



IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
**ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ПЛАЗМА  
И СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР**

Г. КАЗАНЬ. 6 - 9 ДЕКАБРЯ 2023

**СБОРНИК ТРУДОВ**

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН  
КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А. Н. ТУПОЛЕВА — КАИ  
КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО ФИЗИКЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ  
КАЗАНСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ Е. К. ЗАВОЙСКОГО  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН»  
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

# **IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ПЛАЗМА И СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР»**

*Сборник трудов (г. Казань, 6–9 декабря 2023 г.)*

Казань  
Издательство «Бук»  
2024

УДК 533.9+620.3(063)  
ББК 22.333+22.353.2я431  
Ч52

**Редакционная коллегия:**

Борис Ахунович Тимеркаев, член-корр. Академии наук РТ, профессор,  
доктор физико-математических наук;  
Ильназ Изаилович Файрушин, кандидат технических наук;  
Артем Олегович Софроницкий, кандидат технических наук;  
Алмаз Ильгизович Сайфутдинов, доктор физико-математических наук;

**Ч52 IV Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур»** : сборник трудов (г. Казань, 6–9 декабря 2023 г.) / М-во высшего образования и науки Рос. Федерации, М-во образования и науки Респ. Татарстан, Казанский нац. исследовательский технический ун-т и др. — Казань : Бук, 2024. — 528 с. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-907910-37-9.

Материалы конференции предназначены для специалистов, в области физики газоразрядной плазмы, наноматериалов и нанотехнологий. Могут быть полезны для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 533.9+620.3(063)  
ББК 22.333+22.353.2я431

ISBN 978-5-907910-37-9

## Предисловие

IV Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» прошла с 6 по 9 декабря 2023 года в городе Казань в стенах 8-го здания КНИТУ-КАИ, традиционно в гибридном формате (очно и онлайн). Именно такой формат позволяет принимать активное участие в работе конференции участникам, у которых график работы не позволяет приехать лично. Они могут докладывать свои результаты, задавать вопросы докладчикам, участвовать в прениях независимо от того, где они находятся.

Основными организаторами конференции являются КНИТУ-КАИ, К(П)ФУ и АН РТ. Для проведения конференции оргкомитетом было выбрано самое удачное время года – начало декабря, когда все расчетные работы текущего года уже выполнены, а эксперименты проведены. По результатам работы конференции выпускается данный сборник трудов. Опубликованные материалы дают полное представление о полученных научных результатах участников.

По словам постоянных участников конференции, они ждут конференцию, готовят и представляют доклады от своих научных школ, пользуются возможностью живого общения, конструктивного обсуждения, налаживания контактов с учеными по смежным научным направлениям. Конференция стала заметным событием для сообщества ученых и исследователей, занимающихся физикой газовых разрядов и синтезом наноструктурированных материалов. Для очного участия в работе конференции в Казань приехали ученые с большими делегациями. Были представлены научные учреждения и вузы таких городов как Томск, Новосибирск, Омск, Иваново, Ярославль, Москва, Санкт Петербург. С онлайн докладами выступили в том числе и ученые из Таджикистана, Казахстана. Некоторые материалы были представлены в соавторстве с учеными из Китая. Всего на конференции было представлено более 150 научных докладов.

На конференции были обсуждены фундаментальные, проблемные вопросы теории электрических разрядов в газах, доложены обширные экспериментальные результаты по изучению закономерностей в газовых

разрядах и представлены новые плазменные способы синтеза наноструктур. С приветственным словом и докладом, посвященным задачам и целям конференции выступил председатель оргкомитета конференции заведующий кафедрой общей физики КНИТУ-КАИ, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, профессор, д.ф.-м.н. Борис Ахуневич Тимеркаев. С напутственными словами к участникам конференции выступили также проректор КНИТУ-КАИ по научной и инновационной деятельности Виталий Михайлович Бабушкин и президент КНИТУ-КАИ Юрий Федорович Гортышов. В.М. Бабушкин в своем докладе подчеркнул о вкладе ученых КНИТУ-КАИ в теорию газоразрядной плазмы и созданию технологий по синтезу наноструктур, которые вполне соответствуют вызову времени.

В адрес участников и организаторов конференции поступили несколько поздравлений. Поздравление от А.А. Александрова – президента Ассоциации технических университетов, президента МГТУ им. Баумана лично вручил профессор данного университета Сергей Витальевич Рыжков.

Научную часть конференции открыл председатель оргкомитета конференции Борис Ахуневич Тимеркаев. В своем докладе он подчеркнул занимаемое место и роль данной конференции в деле интеграции науки и координации исследований различных научных школ. Также были отмечены научные достижения ученых, которые соответствуют мировому уровню или превосходят этот уровень. Были перечислены актуальные проблемные вопросы физики газоразрядной плазмы и синтеза наноструктур. Председатель оргкомитета конференции также привел наиболее значимые достижения Казанской школы ученых.

С очень интересным пленарным докладом «Углеродные нанотрубки от синтеза к применениям» выступил профессор Сколковского института науки и технологии Альберт Галийевич Насибулин. Ему удалось довести свои научные достижения до конкретных уникальных приборов и устройств. Также большой интерес вызвал пленарный доклад А. Л. Степанова из Казанского физико-технического института им. Е.К.Завойского ФИЦ КазНЦ РАН «Формирование слоев нанопористого германия имплантацией ионами металлов».

Традиционно одними из первых свои доклады сделали представители Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН, Казанского физико-технического института, ФИЦ КазНЦ РАН, Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана и Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ. С пленарным докладом, посвященным исследованию особенностей кинетики быстрых электронов в плазме коротких тлеющих разрядов и в бестоковой плазме в инертных газах выступил доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики КНИТУ-КАИ Алмаз Ильгизович Сайфутдинов.

Все больший интерес к конференции проявляют частные фирмы, выпускающие продукцию или оборудования для плазменных технологий. Все же основное внимание на конференции было уделено проблемам применения плазмы газовых разрядов для синтеза наноструктур. Отрадно, что в этом направлении имеются результаты, готовые к промышленному применению. На конференции с очным докладом выступил генеральный директор компании «ФЕРРИ БАТТ» Ярослав Олегович Желонкин. Он озвучил острые проблемы и вызовы, которые необходимо решить в ближайшем будущем. Была подчеркнута важность сотрудничества представителей науки и бизнеса. Его долго допытывали вопросами о продукциях фирмы, как и где можно приобрести или заказать оборудование компании «ФЕРРИ БАТТ».

Конференция в 2024 году работала по следующим 12ти секциям:

- 01 — Физика газовых разрядов.
- 02 — Плазменные нанотехнологии и синтез наноструктур.
- 03 — Моделирование процессов в газоразрядной плазме.
- 04 — Моделирование физических свойств наноструктур.
- 05 — Неидеальная и пылевая плазма.
- 06 — Физико-химические процессы в газе, плазме и газовых разрядах.
- 07 — Взаимодействие плазмы с веществом.
- 08 — Лазерные микро и нанотехнологии.
- 09 — Плазмохимия.
- 10 — Плазмодинамика.
- 11 — Высокотемпературные процессы и их инженерные приложения.
- 12 — Применение наноструктур.

По данным тематикам были сделаны множество докладов, которые представили ведущие мировые ученые. Конференция стала площадкой, на которой были представлены совершенно новые фундаментальные результаты, находящиеся на переднем крае науки. Абсолютное большинство представленных работ докладывались впервые.

Тематика устных и стендовых докладов конференции была настолько обширна, что начиналась с космической пылевой плазмы и заканчивалась применениями плазмы импульсных разрядов в медицине. Наряду с известными учеными на конференции принимали участие и молодые ученые и аспиранты, а также магистры. Были рассмотрены практически все виды газовых разрядов, а также широкий спектр их применений: от процессов плазменного травления и синтеза наноструктур до модификации поверхностей медицинских изделий и обработки сельскохозяйственной продукции.

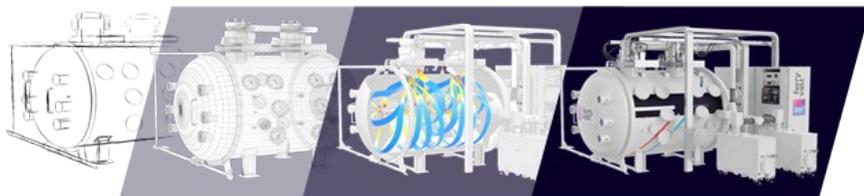
*Председатель оргкомитета конференции Б.А. Тимеркаев*

*Зам. председателя оргкомитета конференции И.И. Файрушин*

*Ученый секретарь оргкомитета конференции А.О. Софроницкий*



ООО "ФЕРРИ ВАТТ" разрабатывает и производит вакуумное технологическое оборудование различного назначения. За **30 лет** компании было изготовлено **более 150 единиц** уникального высокотехнологического оборудования.



Направления деятельности:

- Технологии вакуумного и плазменного **напыления** тонких пленок и покрытий: PVD, CVD, PECVD, ALD и др.;
- Технологии **обработки** различных материалов в ВЧ **плазме** пониженного давления (ССР, ICP);
- Оборудование для **формования композитных материалов и вакуумной пропитки** изделий смолами и лаками;
- Установки климатических **испытаний** в вакууме и имитации космического пространства, испытание электроракетных двигателей;
- Вакуумные **печи** различного назначения;
- **Специальное** промышленное и лабораторное вакуумное и плазменное оборудование (оборудование зонной плавки, в т.ч. монокристаллов, установки вакуумной плавки цветных металлов).



г. Казань, ул. А. Кутуя 159

@ferryvatt

+7 (843) 208-60-20

info@ferryvatt.ru

ferryvatt.ru

## CARBON NANOTUBES: FROM SYNTHESIS TO APPLICATIONS

**Albert G. Nasibulin<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*

The unique properties of single-walled carbon nanotube (SWCNT) films, such as high porosity and specific surface area, low density, high ratio of optical transmittance to sheet resistance, high thermal conductivity and chemical sensitivity, and tunable metallic and semiconducting properties, open up avenues for a wide range of applications.

We review different methods to synthesise the SWCNTs, and demonstrate that the direct integration of the SWCNTs produced by the aerosol CVD methods into different applications. We propose to use machine learning techniques such as artificial neural networks [1] and support vector regression [2] to process the experimental data and to enhance the SWCNT thin-film performance for transparent and conducting applications.

We demonstrate that electrochemical doping of SWCNTs can be successfully applied in transparent electronics. The results allow fine-tuning of the electronic structure of SWCNTs for flexible highly conductive and transparent device applications [3,4].

We report that the electrochemical doping can tailor nonlinear optical absorption and demonstrate its application to control pulsed fiber laser generation [5]. We show that the pulse generation regime can be reversibly switched between femtosecond mode-locking and microsecond Q-switching using different gate voltages.

We develop a novel transparent p-type flexible electrode based on SWCNTs combined with poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS), molybdenum oxide and SWCNT fibers [6]. We achieved a record equivalent sheet resistance of  $17 \Omega/\text{sq}$  with a transmittance of 90% at 550 nm and a high degree of flexibility. We demonstrate that our solar cells based on the proposed electrode and amorphous silicon (a-Si:H) yield an outstanding short-circuit current density of  $J_{sc} = 15.03 \text{ mA}/\text{cm}^2$  and a record power conversion efficiency of  $\text{PCE} = 8.8\%$  for SWCNTs/a-Si:H hybrid solar cells.

We believe that the method of SWCNT synthesis and fabrication of flexible and stretchable transparent films on their basis opens a new avenue for the development of current and future electronics [7].

The author thanks Russian Science Foundation grant No. 22-13-00436.

**References:**

- [1] V. Ya. Iakovlev, D. V. Krasnikov, E. M. Khabushev, J. V. Kolodiaznaia, A. G. Nasibulin, *Carbon* **153**, 100 (2019).
- [2] E. M. Khabushev, D. V. Krasnikov, O. Zarembo, A. P. Tsapenko, A. E. Goldt, A. G. Nasibulin, *J. Phys. Chem. Lett.* **10**, 6962 (2019).
- [3] A. P. Tsapenko, S. Romanov, D. Satco, D. Krasnikov, P. Rajanna, M. Danilson, O. Volobujeva, A. Anisimov, A. Goldt, A. G. Nasibulin, *J. Phys. Chem. Lett.* **10**, 3961 (2019).
- [4] D. S. Kopylova, D. A. Satco, E. M. Khabushev, A. V. Bubis, D. V. Krasnikov, T. Kallio, A. G. Nasibulin (2020). *Carbon* **167**, 244-248.
- [5] Y. Gladush, A. A. Mkrtchyan, D. S. Kopylova, A. Ivanenko, B. Nyushkov, S. Kobtsev, A. Kokhanovskiy, A. Khagai, M. Melkumov, M. Burdanova, M. Staniforth, J. Lloyd-Hughes, A. G. Nasibulin, *Nano Letters* **19**, 5836 (2019).
- [6] P. M. Rajanna, H. Meddeb, O. Sergeev, A. P. Tsapenko, S. Bereznev, M. Vehse, O. Volobujeva, M. Danilson, P. D. Lund, A. G. Nasibulin, *Nano Energy* **67**, 104183 (2020).
- [7] D. A. Ilatovskii, E. P. Gilshtein, O. E. Glukhova, and A. G. Nasibulin (2022) *Advanced Science* 2022, 2201673.

[a.nasibulin@skol.tech](mailto:a.nasibulin@skol.tech)

## ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ НАНОПОРИСТОГО ГЕРМАНИЯ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНАМИ МЕТАЛЛОВ

**А. Л. Степанов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия*

В настоящее время, на практике в качестве перспективных материалов для исследований и широкого класса приложений все чаще рассматривают тонкослойные нанопористые полупроводники, в частности, слои на основе Ge (*PGe*) [1]. Для Ge характерно достаточно высокая подвижность носителей заряда, а поскольку ширина запрещенной зоны Ge вблизи комнатной температуры (300 K) составляет  $\sim 0.67$  эВ, он способен поглощать фотоны с длиной волны до 1800 нм, что востребовано для высокоэффективных солнечных элементов на основе *PGe*, а также в качестве элементов антиотражающих оптических покрытий, используют с целью создания анодов ионно-литиевых аккумуляторных батарей с высокой емкостью, ИК-газовых сенсоров и др. История создания и исследования слоев *PGe* начинается с работы 1971 года [2], в которой были изучены напыленные тонкие пленки Ge с локальными пустотами (порами) в их структуре. Позднее для получения *PGe* использовали различные технологические подходы, такие как, например, электрохимическая обработка монокристаллического *c-Ge* в концентрированных электролитах, плазмо-стимулируемое химическое осаждение из паровой фазы метод искрового разряда и др. Особый интерес, помимо приведенных примеров химических технологий, которые могут приводить к загрязнению формируемых поверхностей наноструктурированных материалов продуктами реакций, представляет эффективная "чистая" методика создания нанослоев *PGe* на поверхности монокристаллической подложки *c-Ge* в результате ее высокодозовой имплантации различными ионами в вакууме. Согласно обзору [1], первой публикацией, посвященной созданию *PGe* методом ионной имплантации, является работа 1977 года [3], в которой при помощи сканирующей электронной микроскопии наблюдали образование кратеров на поверхности *c-Ge*, облученного тяжелыми ионами  $^{128}\text{Te}^+$ . Несколько позднее, в 1982 году, в подробной и самой цитируемой на сегодняшний день публикации по данной тематике [4] была продемонстрирована возможность образования губчатой структуры *PGe* на подложке *c-Ge* после ее имплантации относительно легкими ионами  $^{73}\text{Ge}^+$ . Особенности

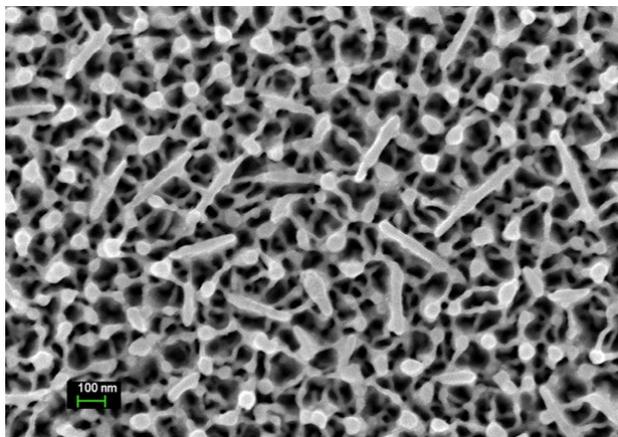
образования слоев *PGe* критически зависят от параметров и условий ионной имплантации, в первую очередь, от энергии  $E$ , дозы  $D$ , плотности тока в ионном пучке  $J$ , температуры облучаемого материала и др [1].

Цель настоящего исследования заключалась в изучении зависимости морфологии поверхностных слоев *PGe*, сформированных при низкоэнергетической имплантации, от массы ионов металлов. Ранее, в работе [5], впервые было показано, что имплантация полированных подложек *c-Ge* ионами  $^{108}\text{Ag}^+$  с  $E = 30$  кэВ при  $D = 1.5 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к образованию губчатых слоев *PGe*, состоящих из нанонитей Ge, покрытых наночастицами Ag. Позднее, при исследовании подложек *c-Ge*, облученных широким рядом относительно легких ионов переходных магнитных металлов  $\text{Cr}^+$ ,  $\text{Mn}^+$ ,  $\text{Fe}^+$ ,  $\text{Co}^+$ ,  $\text{Ni}^+$  было обнаружено формирование слоев *PGe*, отличающихся морфологией имплантированной поверхности от дырочных до мембранных [6]. Предлагаемая работа продолжает исследования и представляет новые результаты по формированию поверхностных слоев *PGe*.

Для получения наноструктурированного слоя *PGe* была использована подложка *c-Ge* толщиной 0.5 мм марки ГДГ-45 с ориентацией (111). Ионное облучение проводилось в вакууме  $10^{-5}$  мм рт. ст. при комнатной температуре облучаемой подложки различными ионами при следующих параметрах облучения:  $E = 40$  кэВ для  $^{63}\text{Cu}^+$  при  $D = 1.0 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> и  $E = 30$  кэВ для  $^{108}\text{Ag}^+$  при  $D = 5.0 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>, а также  $^{209}\text{Bi}^+$  с  $E = 35$  кэВ при  $D = 5.0 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. Плотность тока в ионном пучке  $J$  составляла 5 мкА/см<sup>2</sup>. Морфология сформированных поверхностей наблюдалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Merlin (Carl Zeiss).

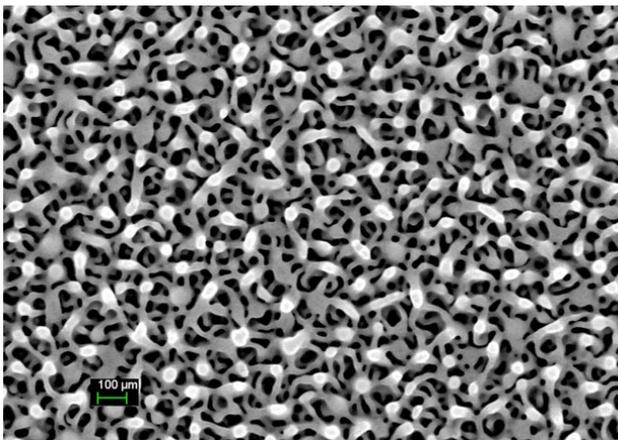
В процессе ионной имплантации распределение внедряемых ионов в обрабатываемом материале неоднородно по глубине образца [1]. Поэтому было проведено моделирование профилей распределения соответствующих имплантированных ионов металлов в Ge при энергии ускорения от 30 до 40 кэВ с помощью алгоритма SRIM-2013. Данная программа позволяет смоделировать статистическое распределение ионов на основе метода Монте-Карло. Установлено, например, что во время имплантации в приповерхностной области Ge происходит накопление атомов Cu с максимумом концентрации по гауссовой кривой на глубинах  $R_p \sim 24.3$  нм, а разброс пробега ионов от  $R_p$  составляет  $\Delta R_p \sim 13.1$  нм. Толщина облученного слоя составляет  $R_p + 2\Delta R_p = 50.5$  нм.

На рисунке 1 показаны СЭМ-изображение поверхности слоя *PGe*, сформированного имплантацией ионами  $^{63}\text{Cu}^+$ .



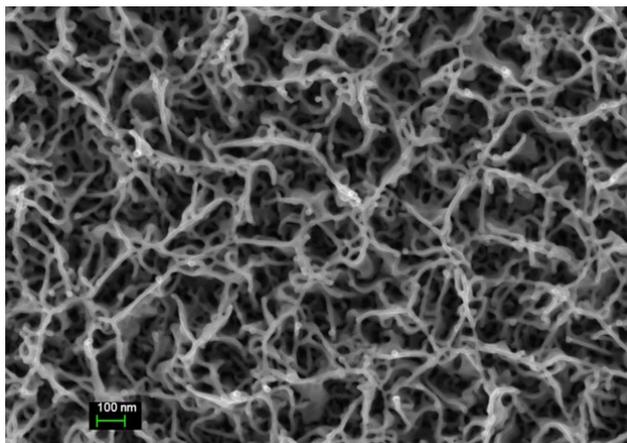
**Рисунок 1.** СЭМ-изображения поверхности *c*-Ge, облученной ионами  $^{63}\text{Cu}^+$

При сравнении с гладкой необлученной подложкой *c*-Ge (СЭМ-изображение, которой приведено в работе [1]), можно заключить об образовании на поверхности *c*-Ge слоев PGe. Структура слоя Cu:PGe представляет из себя трехмерную структуру в виде «нейроноподобной» сетки. При облучении *c*-Ge более тяжелым ионом  $^{108}\text{Ag}^+$  морфология формируемой PGe поверхности несколько изменяется (рисунок 2).



**Рисунок 2.** СЭМ-изображения поверхности *c*-Ge, облученной ионами  $^{108}\text{Ag}^+$

В данном случае Ag:PGe выглядит как губчатая структура, состоящая из переплетающихся нанонитей, как это было заявлено ранее. Заметные изменения в морфологии PGe наблюдается при облучении наиболее тяжелыми ионами  $^{209}\text{Bi}^+$  (рисунок 3). Морфология Bi:PGe также остается губчатой, однако при этом диаметры нанонитей существенно уменьшаются, и они оказываются дистанционно разнесенными достаточно большими пустотами. Согласно данным по дифракции все сформированные имплантированные поверхностные слои PGe являются аморфными  $\alpha$ -Ge.



**Рисунок 3.** СЭМ-изображения поверхности  $c$ -Ge, облученной ионами  $^{209}\text{Bi}^+$

Структурные морфологические изменения поверхности Ge под действием ионного облучения изучались в течение последних пятидесяти лет [1]. Однако, несмотря на широкомасштабные исследования и фундаментальное понимание ряда процессов, сопутствующих явлению наноструктурирования, в целом точные механизмы, ответственные за образование PGe, остаются до сих пор неустановленными.

К настоящему моменту в научной литературе рассматриваются две приоритетные и принципиально различающиеся между собой модели, предлагающие объяснения образования PGe при ионной имплантации  $c$ -Ge. Первый из механизмов условно называется «кластерно-вакансионный», другой, изначально предложенный для случая облучения металлов, объясняется теорией микровзрывов. Модель, основанная на кластеризации радиационно-генерируемых вакансий в облучаемой матрице, основана на предположении о малоэффективной рекомбинации точечных дефектов,

появление которых приводит к пересыщенному количеству вакансий, объединяющихся в макроскопические пустоты (кластеры). По мере увеличения  $D$  облучения, концентрация избыточных вакансий увеличивается до некоторой величины, и они сливаются, образуя макроскопические объемные и поверхностные пустоты. Теория микровзрывов предполагает, что поры (пустоты) в облученном Ge возникают в результате появления деформационных волн (волн давления), вызванных перекрытием ионных каскадов.

Полученные в работе новые результаты демонстрируют образование тонких аморфных слоев PGe различных морфологий при облучении ионами различных металлов  $^{63}\text{Cu}^+$ ,  $^{108}\text{Ag}^+$  и  $^{209}\text{Bi}^+$  монокристаллических подложек  $c$ -Ge. Впервые показано, что при малых  $E$  облучения, в зависимости от массы ионов, на поверхности  $c$ -Ge образуются игольчатые нанообразования ( $^{63}\text{Cu}^+$  и  $^{108}\text{Ag}^+$ ) или слой плотноупакованных нанонитей ( $^{209}\text{Bi}^+$ ). С ростом массы внедряемого иона меняет свою форму последовательно от трехмерной сетчатой ( $^{63}\text{Cu}^+$ ) до губчатой ( $^{108}\text{Ag}^+$  и  $^{209}\text{Bi}^+$ ), образованную отдельными разряженными переплетающимися нанонитями.

Исследование выполнено при поддержке РФФ № 19-79-10216. Автор выражает благодарность В.И. Нуждину, В.Ф. Валееву, А.М. Рогову и Д.А. Коновалову за помощь в экспериментах.

### **Литература:**

- [1] А.Л. Степанов, и др. Формирование слоев пористого кремния и германия с металлическими наночастицами. ФИЦПРЕСС: Казань, 2019. 190 с.
- [2] T.M. Donovan, K. Heinemann, Phe. Rev. Lett. 27 (1971) 1794.
- [3] G. Foti, G. Vitali, J.A. Davies, Rad. Effects 32 (1977) 187.
- [4] I.H. Wilson, J. Appl. Phys. 53 (1982) 1698.
- [5] A.L. Stepanov, V.I. Nuzhdin, V.F. Valeev, et. al, Vacuum 152 (2018) 200
- [6] A.M. Rogov, V.I. Nuzhdin, V.F. Valeev, A.L. Stepanov, Compos. Comm. 19 (2020)

6

aanstep@gmail.com

## КИНЕТИКА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ КОРОТКИХ ТЛЕЮЩИХ РАЗРЯДОВ И РАЗРЯДОВ С МИКРОПОЛЫМ КАТОДОМ

**А. И. Сайфутдинов<sup>1</sup>, С.С. Сысоев<sup>2</sup>, Д.Д.Гущин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

<sup>2</sup>СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты исследований параметров плазмы и кинетики быстрых электронов в области отрицательного свечения (ОС) короткого тлеющего разряда при низких давлениях и разряда с микрополым катодом при высоких давлениях на основе гибридной модели [1,2], включающей кинетическое описание электронов и гидродинамическое описание тяжелой компоненты плазмы. Результаты численных расчетов сопоставлены с результатами зондовых исследований. Показано, что гибридная модель хорошо описывает параметры плазмы в области ОС тлеющего разряда: температуру и концентрацию электронов. Кроме того, гибридная модель позволяет достаточно точно описать формирование пиков на ФРЭЭ от быстрых электронов, рожденных в результате реакций пеннинговской ионизации и ударов второго рода. Показана надежность в определения концентрации возбужденных атомов гелия в плазме отрицательного свечения путем анализа экспериментальной высокоэнергетической части ФРЭЭ, а именно пиков от быстрых электронов, рожденных в реакциях пеннинговской ионизации между двумя метастабильными атомами гелия и пеннинговской ионизации примесных атомов и молекул малой концентрации. Вышеизложенная методика может быть успешно применена для определения абсолютных значений концентрации примесных атомов и молекул путем исключения второй производной ионного тока на зонд и анализе высокоэнергетической части ФРЭЭ. Такая методика может быть востребована как в газоаналитических приложениях, так и в приложениях, связанных с синтезом различных типов наноструктур.

*Работа поддержана фондом Базис, проект № 21-1-3-53-1.*

### **Литература:**

[1] Saifutdinov A.I., Sysoev S.S. // Plasma Physics Reports.– 2023.– 49(6).–P. 772–785

[2] Saifutdinov A.I., Sysoev S.S. // Plasma Sources Science and Technology. – 2023. – Vol. 32. – 114001

as.uav@bk.ru

## ПЛАЗМЕННЫЙ РАЗРЯД В ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ КАК МЕТОД СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Н. А. Булычев<sup>1</sup>, С. А. Колесник<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия*

Работа направлена на исследование плазмохимических процессов, которые определяются сочетанием воздействия на жидкофазные среды термически неравновесной низкотемпературной плазмы и интенсивных ультразвуковых колебаний в режиме развитой кавитации [1]. Разработанный метод реализации плазмохимических превращений представляет значительный интерес и преимущества для создания новых наноразмерных материалов с особыми свойствами, т.к. позволяет направленно варьировать электрофизические и акустические характеристики процесса при осуществлении плазмохимических реакций. Практическим следствием решения данной проблемы является создание метода направленного синтеза значимых веществ. Отличительным признаком и существенным преимуществом данного метода является то, что одновременное воздействие на зону реакции термически неравновесной плазмы и ультразвуковой кавитации приводит к созданию условий, недостижимых в других случаях и обуславливает протекание реакций при высокой локальной концентрации энергии и активных частиц.

Было установлено, что в таком акустоплазменном разряде возможно синтезировать наночастицы металлов и их оксидов различного состава, в том числе наночастицы полиметаллических оксидов. При этом размер первичных наночастиц находился на уровне 2 – 50 нм. в зависимости от материала. При интенсивном воздействии ультразвука удавалось получать узкие размерные фракции наночастиц [1]. В ходе экспериментов была также обнаружена возможность синтезировать наноразмерные материалы типа «ядро-оболочка».

В работах по этому направлению показано, что синтезированные в таких условиях наночастицы различного состава обладают активированной поверхностью с большим количеством нескомпенсированных связей и дефектов в результате действия на них интенсивного ультразвука и тем самым способны к эффективному взаимодействию с органическими и

неорганическими соединениями, матрицами и т.д., что дает возможность создавать на их основе новые гибридные органико-неорганические композиционные материалы [2].

Целью данной работы является разработка подходов к созданию на основе синтезированных дисперсных систем наночастиц оксида олова SnO<sub>2</sub> композиционных материалов с использованием органической полимерной матрицы на основе полиэтилена и винилацетата, пригодных для применения в качестве функциональных и конструкционных материалов, исследование принципов их формирования и свойств, в том числе с использованием ультразвуковой кавитации, а также создание композиционных материалов с заданными характеристиками.

Было установлено, что синтезированные частицы имеют пик распределения в области размеров 50-60 нм, ширина кривой распределения по размерам находится в пределах 30-80 нм. При ультразвуковом воздействии на суспензии наночастиц агрегаты распадаются и пик распределения смещается в область 30-40 нм, при этом ширина кривой распределения по размерам сужается до 25-55 нм. Измеренное значение электрокинетического потенциала поверхности исходных наночастиц в водной дисперсионной среде составляет -28 мВ и увеличивается при действии интенсивного ультразвука до -34 мВ.

В присутствии поливинилового спирта значение потенциала поверхности частиц снижается, т.к. поливиниловый спирт является неионогенным полимером. Для наночастиц без ультразвукового воздействия равновесное значение потенциала поверхности -12 мВ достигается при концентрации полимера 3-4% масс. по отношению к массе частиц, а под действием ультразвука насыщение адсорбционного слоя достигается при 7% масс. полимера и значение потенциала поверхности составляет при этом -16 мВ. Эти данные указывают на то, что под воздействием ультразвука частицы оксида олова приобретают дополнительные активные центры адсорбции, способные к взаимодействию с функциональными группами полимерной матрицы.

Далее методами сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализа были охарактеризованы образцы пленок полимерного композиционного материала на основе наночастиц оксида олова и подтверждено включение наночастиц в полимерную матрицу. СЭМ-изображения полимерных пленок,

полученных на основе наночастиц оксида олова, подвергнутых предварительному ультразвуковому воздействию показывают, что агломераты частиц практически не наблюдаются, размер наночастиц, распределенных в полимерной матрице составляет примерно 30-50 нм.

С использованием данных двух видов наночастиц (до и после ультразвукового воздействия) получены образцы пленок полимерных композиционных материалов. Результаты исследований методом сканирующей электронной микроскопии изломов пленок, полученных при температуре жидкого азота показывают, что структура материала является достаточно целостной, видимые крупные дефекты и полости отсутствуют. Проведены физико-механические испытания пленки из композиционного материала с различным содержанием наночастиц оксида олова: 1 и 3% масс.

Из результатов механических испытаний можно заключить, что ультразвуковое воздействие на наночастицы наполнителя перед их включением в полимерную матрицу влияет на физико-механические свойства пленок из данного композиционного материала: предел прочности повышается на 20-25%, а предельная деформация на 10-15%. Также можно отметить, что повышение концентрации наночастиц наполнителя с 1 до 3% способствует увеличению значений предела прочности и предельной деформации. Из полученных результатов можно сделать вывод, что применение предварительной ультразвуковой обработки наночастиц наполнителя перед их введением в полимерную матрицу повышает гомогенность частиц и обеспечивает их более равномерное распределение в композиционном материале, что положительно сказывается на физико-механических свойствах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 23-19-00540).

#### **Литература:**

- [1] Bulychev N.A., Kazaryan M.A., Gridneva E.S. Plasma discharge with bulk glow in the liquid phase exposed to ultrasound // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2012. Vol. 39. P. 214-220.
- [2] Bulychev N.A., Mikhaylov Yu.G. Synthesis of polymer composite materials based on zinc oxide nanoparticles synthesized in a plasma discharge under the ultrasonic action // RENSIT. 2023. Vol. 15, No. 2. P. 161-168.

nbulychev@mail.ru

## СКВОЗНАЯ МОДЕЛЬ СТРУЙНОГО ВЧИ-РАЗРЯДА Пониженного Давления

**А. Ю. Шемахин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*

Плазма ВЧ-разрядов с продувом газа при давлении  $p = 13.3\text{-}133$  Па применяется для модификации поверхностей различных материалов, таких как сталь, титан, полиэтилен, кожа, мех и др. [1,2]. Плазма, создаваемая данным видом разряда, обладает следующими свойствами: степень ионизации  $10^{-4}\text{-}10^{-5}$ , концентрация электронов  $10^{15}\text{-}10^{19}$  м<sup>-3</sup>, электронная температура 1-4 эВ, температура атомов и ионов в плазменном сгустке 0.2 — 0.3 эВ, в плазменной струе 0.03 — 0.07 эВ. Полученные экспериментальные данные [1] показывают, что исследуемый вид разряда не относится ни к одному из существующих, так как в струе ВЧ-плазмы в вакуумной камере найдена как азимутальные  $H_\phi$ , так и аксиальные компоненты  $E_z$  напряженностей электрического и магнитного полей, что для H-формы разряда является нетипичным. Струя является самостоятельным новым видом разряда. Для описания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления разработана математическая модель, включающая уравнение Больцмана для нейтральной компоненты плазмы, уравнение сохранения энергии для электронной температуры, телеграфные уравнения для ВЧ-поля, уравнения Пуассона для амбиполярной компоненты поля, неразрывности для электронов, ионов и метастабилей. Коэффициенты подвижности и диффузии определяются из функции распределения электронов по энергиям. Построена математическая модель, позволяющая рассчитывать основные характеристики разряда и струи. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-10055).

### **Литература:**

- [1] Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С., Кашапов Н. Ф. Высоочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. Казань: Изд-во Казанского государственного университета, 2000.
- [2] Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С., Сагбиев И. Р. Модификация нанослоев в высокоочастотной плазме пониженного давления. Монография. Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2007

shemakhin@gmail.com

## НАНОМЕТРОВЫЕ И АТОМНЫЕ МАСШТАБЫ ТОЧНОСТИ В ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРОЦЕССАХ ТРАВЛЕНИЯ НАНОСТРУКТУР В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

**А. В. Мяконьких<sup>1</sup>, К. В. Руденко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, Москва, Россия

С уменьшением топологических норм в производстве интегральных схем возрастают требования к процессам травления, становятся актуальными процессы с атомными масштабами точности по вертикали, обладающие высокой селективностью к материалам маски и нижележащих слоев, высокой латеральной однородностью на пластинах большого диаметра. Перспективность идеи атомно-слоевого травления была показана в экспериментах с использованием пучков ускоренных ионов и быстрых нейтральных частиц. Идея процесса атомно-слоевого травления заключается в последовательном проведении насыщающихся реакций на поверхности травящегося функционального слоя. Процесс состоит из двух шагов, разделенных по времени шагами продувки реактора. На первом шаге на поверхности травящегося материала создается модифицированный слой. На втором шаге реакция между модифицированным слоем и функциональным слоем активируется за счёт бомбардировки ускоренными частицами. При этом обязательным условием достижения синергии процесса является отсутствие паразитных реакций с нижележащим слоем на обоих шагах процесса.

Реализация процесса атомно-слоевого травления в установке плазмохимического травления обладает преимуществом возможности масштабирования технологического процесса, в том числе на пластины диаметра 300 мм и выше. Несмотря на то, что для многих материалов такие процессы реализованы, по латеральной однородности они уступают не только процессам атомно-слоевого осаждения, но в ряде случаев и классическим процессам непрерывного травления.

Высокие требования по селективности травления подзатворных диэлектриков по отношению к нижележащему слою и по минимизации количества дефектов, привносимых плазменным травлением в полупроводниковые и диэлектрические слои, делают актуальной задачу

контроля функции распределения ионов по энергиям с точностью до нескольких эВ, в том числе в диапазоне ниже потенциала плазмы. Кроме того, требования по обработке структур low-k диэлектриков ставят задачи использования плазмы с минимальным излучением в ВУФ области.

Перспективные пути решения этих проблем в настоящее время обсуждаются, но могут быть разделены на следующие основные направления: 1) создание реакторов с регулируемым отношением потока радикалов к потоку ионов, 2) создание источников с контролируемой и возможно более узкой функцией распределения ионов по энергиям. В докладе будут рассмотрены различные типы источников плазмы, а также подходы связанные с использованием несинусоидального генератора ВЧ-смещения, позволяющего получать более узкие распределения ионов по энергиям.

Одним из наиболее распространенных способов формирования модифицированного слоя на поверхности является осаждение фторуглеродной пленки из плазмы фторуглеродов (например,  $CF_4$ ) [1]. При этом на поверхности формируют полимерную пленку, в процессе осаждения которой не происходит травления материала. Затем реакция между сформированной пленкой и травящимся материалом активируется ионной бомбардировкой в плазме инертного газа. Таким образом, для достижения насыщения шага формирования модифицированного слоя во фторуглеродной плазме должно происходить осаждение пленки и не должно происходить паразитного травления поверхности материала.

Из литературы известно, что в различных условиях фторуглеродные плазмы могут травить поверхность или формировать пленку на различных материалах [2]. Поэтому исследование взаимодействия фторуглеродной плазмы и поверхности различных материалов важно для выбора оптимальных параметров плазмы при реализации процесса атомно-слоевого травления, особенно, когда целью является достижение селективности.

Процесс атомно-слоевого травления является перспективным для разработки прецизионных технологий формирования структур нанoeлектроники, однако задача его реализации с требуемыми характеристиками в установках плазменного травления остается не в полной степени решенной.

Основным препятствием к достижению желаемых характеристик по видимому является низкое значение синергии процесса, обусловленное паразитными реакциями – либо прямым травлением на шаге модификации поверхности, либо распылением на шаге активации.

Продолжающееся масштабирование КМОП основано на новых структурах и дизайне, а также на разработке новых материалов, что приводит к сложным проблемам интеграции. По всей видимости, дальнейшее масштабирование потребует развития методом селективного атомно-слоевого осаждения. Критериями адекватного процесса выборочного осаждения по площади являются: рост только в определенных областях, высокая производительность, совместимая с промышленными потребностями.

В настоящее время исследуются несколько подходов к разработке процессов ASD, среди которых ASD путем поверхностной дезактивации с использованием самоорганизующихся монослоев (SAM) или блок-сополимеров, температурной обработки, способствующие внутренней селективности, и селективный ALD на основе ABC-циклов, совмещающих. Полученные результаты могут быть применены для создания перспективных структур приборов микро- и нанoeлектроники.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-00771, <https://rscf.ru/project/23-29-00771/>

#### **Литература:**

- [1] V. Kuzmenko, Y. Lebedinskij, A. Miakonkikh, K. Rudenko, Selective atomic layer etching of  $Al_2O_3$ ,  $AlN_x$  and  $HfO_2$  in conventional ICP etching tool, Vacuum 207, 111585 (2023)
- [2] D. C. Marra and E. S. Aydil, Effect of  $H_2$  addition on surface reactions during  $CF_4/H_2$  plasma etching of silicon and silicon dioxide films, Journal of Vacuum Science & Technology A 15, 2508 (1997)

miakonkikh@ftian.ru

## «ПОСЛЕЗАВТРА» ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Я.О. Желонкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ООО "ФЕРРИ ВАТТ", Казань, Россия

### **Введение(... - 1991)**

Вакуумная техника и технологии (ВТТ) являются базовыми, а в некоторых отраслях – единственными, при производстве изделий микроэлектроники, широко используются в машиностроении, автомобилестроении, авиации, энергетике, атомной и космической отраслях.

В 2020 г. исполнилось 100 лет отечественной вакуумной промышленности. Бурное развитие вакуумной техники в СССР в послевоенные годы определялось работами по направлениям атомного проекта, освоения космоса, электроники, электрофизического аппаратостроения [1]. С 1991 года отечественная вакуумная техника была замещена иностранным оборудованием и продукцией, произведенной с применением вакуумных технологий, а именно – процессоры, детали автомобилей с покрытиями (поршневые кольца, вкладыши, детали АКПП), металлорежущий инструмент с покрытиями, авиадвигатели, оптика гражданского назначения, дисплеи, приборы воздействия высокоэнергетическими пучками – медицинские (рентген, МРТ, КТ, онкотерапия), исследовательские, промышленные и др. Импорт вакуумного оборудования в 2021 году составил 33 млрд. рублей, а выпуск отечественного оборудования - 3 млрд. рублей [2].

В текущих внешнеполитических условиях главной стратегической задачей является обеспечение национального технологического суверенитета, в котором ключевую роль занимает вакуумная техника и технологии. Своевременная программа развития отрасли вакуумной техники позволит исключить риск отсутствия ключевого оборудования и технологий, ввоз которых в страну не возможен, а также сформирует фундамент для дальнейшего роста сопутствующей промышленности и экономики в период становления шестого технологического уклада, ведущую роль в котором будут определять био- и нанотехнологии, искусственный интеллект, глобальные информационные системы, новая медицина, другие высокие технологии. Новый импульс получают оборонный комплекс (БПЛА, системы оптического наведения, электроника), металлообработка, ядерные и

космические технологии, гибкие автоматизированные производства, создание конструкционных материалов с заданными свойствами (покрытия, композиты, аддитивные технологии), альтернативные источники энергии.

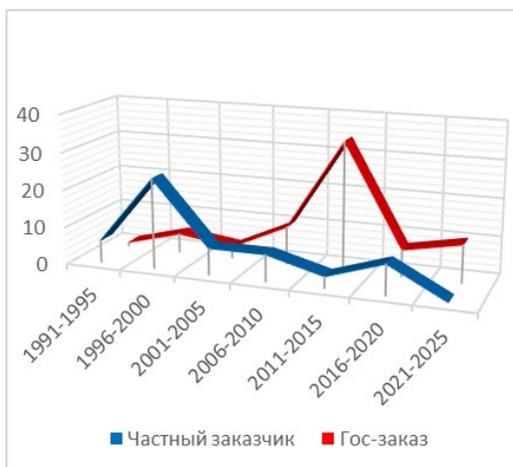
### **Анализ рынка (1991 – 2022)**

Настоящий анализ представляет авторский взгляд на динамику изменения объема рынка и структуры рынка РФ вакуумного технологического оборудования отечественного производства в период с 1991 года до настоящего времени по следующим направлениям:

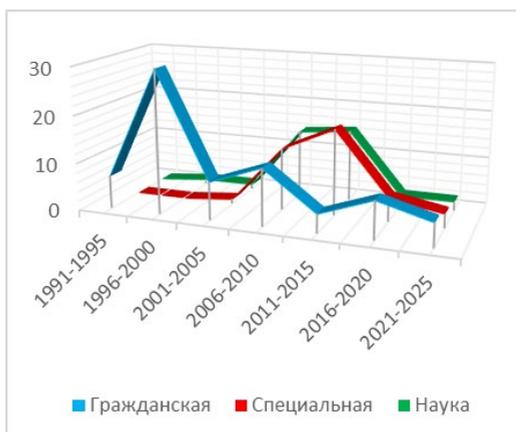
- Технологии вакуумного и плазменного напыления тонких пленок и покрытий (PVD, CVD, PECVD, ALD и др.);
- Технологии обработки различных материалов в высокочастотной (ВЧ) плазме пониженного давления (ССР, ICP);
- Вакуумное оборудование для формования композитных материалов и вакуумной пропитки изделий смолами и лаками;
- Установки испытаний в вакууме, имитации космического пространства, испытания электроракетных двигателей (ЭРД);
- Вакуумные печи различного назначения;
- Специальное промышленное и лабораторное вакуумное и плазменное оборудование (оборудование зонной плавки, в т.ч. монокристаллов, установки вакуумной плавки).

Выбор технологических направлений и период анализа продиктован историей и сферой деятельности компании «ФЕРРИ ВАТТ», которая была основана в 1991 г. [3]. Анализ рынка произведен на основании количественной оценки маркетинговых запросов и исполненных контрактов «ФЕРРИ ВАТТ», с учетом приведения ценовых показателей объемов рынка к безразмерным условным единицам (у.е.), позволяющим качественно сравнить динамику изменения рынка с поправками на изменения валютных и сырьевых курсов. На рисунке 1 представлены графики, отображающие объем и структуру рынка в рассматриваемый период. Структуризация рынка проведена по двум классификациям - с разделением на частного и государственного заказчика (рисунок 1а), с разделением оборудования по назначению на гражданское, специальное и научно-исследовательское (рисунок 1б).

а) структура рынка с разделением на частного и государственного заказчика



б) структура рынка с разделением оборудования по назначению на гражданское, специальное и научно-исследовательское.



**Рисунок 1.** Объем (в у.е.) и структура рынка вакуумного технологического оборудования с 1991 г.

Первое десятилетие (1991 – 2000) выражается в динамичном возникновении малых частных компаний, производящих гражданскую продукцию различного назначения – стекла, зеркала, мебель, сантехника, посуда, детали автомобилей и др. Свободный рынок заполняется дефицитными для Советского периода товарами, при производстве которых находится место и вакуумным технологиям – нанесение защитных покрытий на детали машин,

напыление зеркал, тонируемых и энергосберегающих покрытий на витражные стекла, износостойких покрытий металлорежущего инструмента, пропитка электротехнической продукции. Экономический кризис и дефолт 1998 г. сильно сказывается на себестоимости выпуска конечной продукции в РФ, которая активно начинает замещаться «дешевым» товаром из Китая. 90-е и начало 00-х годов характеризовались для компании большими заказами на серийные установки ВАТТ-1200 и ВАТТ-1600 – было продано более 40 установок в различных исполнениях в РФ и странах СНГ. В дальнейшие годы – частный заказ на вакуумное технологическое оборудование, практически, «сошел на нет», по причине неконкурентности цен на отечественную продукцию с иностранными аналогами.

Государственные предприятия, занимающиеся выпуском высокотехнологичной продукции в Советский период, и активно использовавшие вакуумные технологии, в 90-е, напротив расцвета «частного рынка», переживали период «упадка и приватизации». Указанный период характеризуется очень низкими темпами обновления и наращивания производственных активов и научно-исследовательской базы государственных предприятий. Ситуация начала меняться в лучшую сторону в начале 2000-х за счет государственной поддержки и госзаказа. В 2007 г. создана государственная корпорация «Ростех», объединившая предприятия в различных высокотехнологичных отраслях – авиация, судостроение, электроника, продукция специального назначения. В том же, 2007 г. создана государственная корпорация «Росатом», которая, в отличие от других отраслей, в силу специфики и стратегической государственной важности, смогла наиболее эффективно сохранить кадры и предприятия в период 90-х годов.

Задавшись целью «догнать» западные технологии, период с начала 2000-х годов и до сегодняшнего дня характеризовался спросом государственного заказчика на уникальное, нестандартное, несерийное вакуумное оборудование для совершенно различных задач, что определило ключевую компетенцию компании «ФЕРРПИ ВАТТ» – решать нестандартные задачи в сжатые сроки. Россия смогла успешно пережить Мировой экономический кризис 2008 года по причине низкой интеграции в международную производственную кооперацию и высокой доли в экономике сырьевого экспорта. Период после кризиса – 2008-2014 гг, характеризовался самыми высокими темпами развития рынка ВТТ в РФ. После 2014 г. в динамике рынка наблюдается спад и выход на стагнационный уровень в связи с международными событиями и санкционной политикой наиболее

технологически развитых стран (США, Европа, Япония) в отношении РФ. В период с начала 2000-х и до 2022 г., преобладающая доля, до 90%, объема рынка вакуумного технологического оборудования и комплектующих (средства откачки и измерения вакуума, КИПиА), составляла импорт из указанных стран.

Период 2020-2022 года, в контексте мирового рынка ВТТ, характеризуется спадом, по причине мировой пандемии COVID-19, которая вызвала сокращение объемов производства комплектующих, сбоев международной логистики, а также объемов сбыта оборудования и продукции с применением вакуумных технологий производителям конечной продукции. Особенно чувствительным для других рынков сказался дефицит полупроводниковой продукции (микросхем).

### **ПЕРСПЕКТИВЫ (2022 - ...)**

В начале 2022 года, в связи с объявлением специальной военной операции (СВО), ведущие страны - поставщики вакуумных комплектующих, оборудования и продукции, изготовленной с высокой долей применения вакуумных технологий, объявили санкции, «де-факто» - полное эмбарго, на поставку товаров. Высвобождение рынка предложений и необходимость сохранения уровня социальной жизни и обеспечения граждан высокотехнологичными товарами и услугами, такими как - электроника, авиаперевозки, автомобильная техника и автокомпоненты, электрические машины «большой» энергетики, формируют колоссальный потенциал для роста объемов рынка и уровня технологического развития Российской вакуумной техники. Однако, риском для заполнения существующего спроса Российскими товарами могут выступить продукция азиатских стран, которые применяют активную политику по «замещению» рынков, освободившихся от западных товаров, путем «демпинга» цен, инвестициями в производства на территории РФ. Если продукция специального и стратегического назначения имеет некоторую защиту в лице государства, то отечественная высокотехнологичная продукция массового потребления может развиваться только при условии консолидирования производителей и государственной поддержки.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Вакуумная техника – стратегическая отрасль высоких технологий, при этом малый рынок ВТТ в РФ (десятки млрд. руб.) формирует мега-рынки (триллионы рублей) внутреннего потребления высокотехнологичной продукции, которая в настоящее время не замещена ушедшими западными товарами.

Вакуумная техника, как отрасль, является стратегической для обеспечения национального технологического суверенитета страны в различных направлениях – транспорте, энергетике, оборонной способности, уровне цифрового развития. При этом Вакуумная техника, как отрасль, на сегодняшний день не имеет национальной программы развития.

В заключении, выражаю личное мнение и предложение, что реализовать доступный потенциал рынка можно только консолидировав представителей рынка ВТТ в рабочую межведомственную группу на стыке науки, образования, бизнеса, государственных корпораций, государственных органов с последующей разработкой и исполнением рабочей группой «Дорожной карты» или Федеральной целевой программы по развитию национального проекта в области ВТТ в интересах развития смежных отраслей применения. «ФЕРРИ ВАТТ», имея за плечами более 30-лет опыта разработки и производства вакуумного технологического оборудования в различных направлениях, готов приложить максимальные усилия для реализации вышеуказанных предложений. Только совместными, координированными усилиями мы можем сделать «послезавтра» вакуумных технологий уже сегодня.

#### **Литература:**

1. Нестеров С. Б. Российская вакуумная техника и технология / С. Б. Нестеров // Журнал «ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ» (ISSN: 0869-1738), 2018. – Т. 28, № 1. – С. 4-21. – EDN YYPGOD.
2. Панфилов Ю.В. Стратегические проекты развития МГТУ им. Н. Э. Баумана и импортозамещение вакуумного оборудования / Ю. В. Панфилов, И. А. Родионов, Л. Л. Колесник, А. С. Бабурин // ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА и ТЕХНОЛОГИИ - 2022 : труды 29-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–23 июня 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2022. – С. 68-72. – EDN TYSJMJ.
3. Желонкин Я. О. К тридцатилетнему юбилею компании «ФЕРРИ ВАТТ» / Я. О. Желонкин, А. А. Бикташев, О. В. Желонкин // Вакуумная техника и технология: Десятая Российская студенческая научно-техническая конференция: материалы конференции, Казань, 12–15 апреля 2021 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. – С. 38-43. – EDN SXFBPN.

[zhelonkin.ya@ferryvatt.ru](mailto:zhelonkin.ya@ferryvatt.ru)

## ФОРМИРОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ФАЗОВОГО СОСТАВА ШПИНЕЛИ С СРЕДЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

**В. В. Шеховцов<sup>1</sup>, А. Б. Улмасов<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Томск, Россия*

Огнеупорная промышленность нуждается в качественных огнеупорных материалах, которая играет важную роль для эффективного и безопасного её функционирования. Так как колебания температуры и механические нагрузки, вызывающие напряжение, являются одной из основных причин, ограничивающих эксплуатационные характеристики и долговечность огнеупора. В связи с возросшим спросом на энергосбережение, сокращение выбросов и экономию ресурсов, легкая конструкция рабочей футеровки привлекла большое внимание [1-4].

Одним из перспективных классов огнеупоров является алюмомагнезиальная  $MgAl_2O_4$  шпинель, которая имеет перспективу применения в углеродсодержащих огнеупорах благодаря высокой температуре плавления, прочности и стабильным химическим свойствам [5-7]. С одной стороны, шпинель вводят непосредственно в углеродсодержащие огнеупоры для улучшения их свойств, а с другой, фаза шпинели образуется на месте реакции оксидов алюминия и магния, что приводит к улучшению эксплуатационных свойств готового изделия.

Целью работы является оценить возможность синтеза алюмомагнезиальной шпинели на основе сырьевых материалов природного класса в среде термической плазмы. Методами РФА и СЭМ исследованы фазовые и структурные превращения при синтезе продуктов плавления.

Для получения  $MgAl_2O_4$  использовались сырьевые материалы:  $\gamma-AlO(OH)$  – бёмит (месторождение бокситов) и  $MgCO_3$  – магнезит (Савинское месторождение). Материалы предварительно проходили изотермическую выдержку при температуре 950 °С, в течение трех часов. На основе выбранных материалов приготовлен набор из трех шихт в соотношении  $Al_2O_3/MgO$ : 1,0; 1,5; 2,3. Образцы нумеровались маркером SP, числовое значение соответствует соотношению  $Al_2O_3/MgO$  соответственно. Плазменное плавление подготовленных составов осуществлялось на электроплазменном стенде, подробный процесс и режимы плавления описаны в работах [8-10].

Методом рентгенофазового анализа установлено что в составах присутствует высокое содержание фаз  $MgAl_2O_4$  шпинели, но при этом в образцах SP-1 и SP-1,5 обнаружены вторичные фазы, такие как переклаз ( $MgO$  – при  $2\theta=42,9; 42,9; 52,2^\circ$ ), корунд ( $Al_2O_3$  – при  $2\theta=35,7; 36,5; 55,9; 62,8^\circ$ ), форстерит ( $Mg_2SiO_4$  – при  $2\theta=17,2; 20,9; 22,7^\circ$ ).

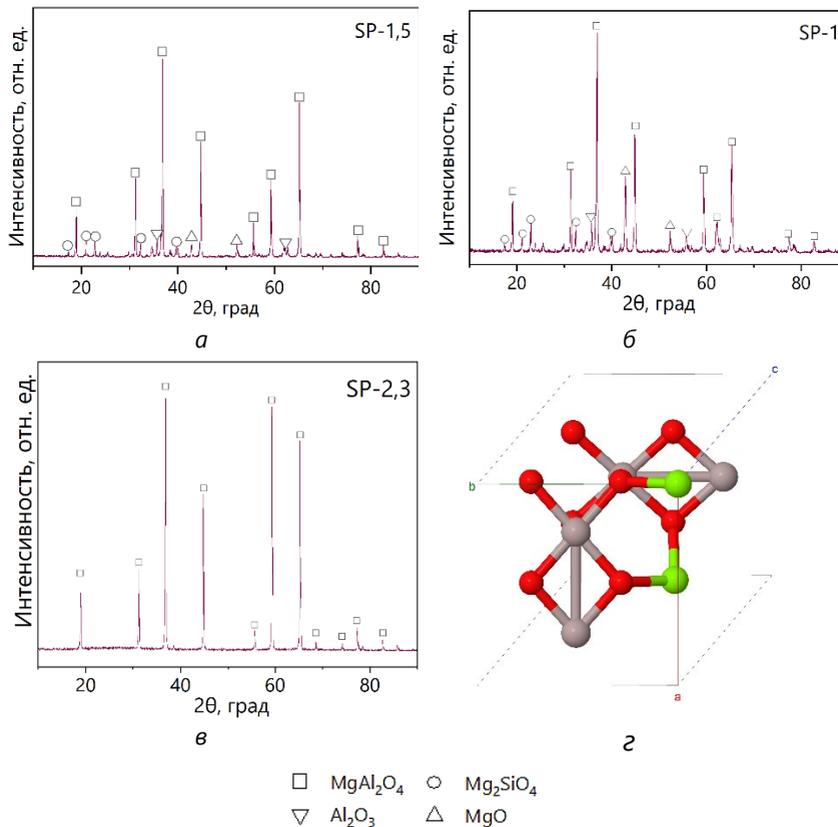
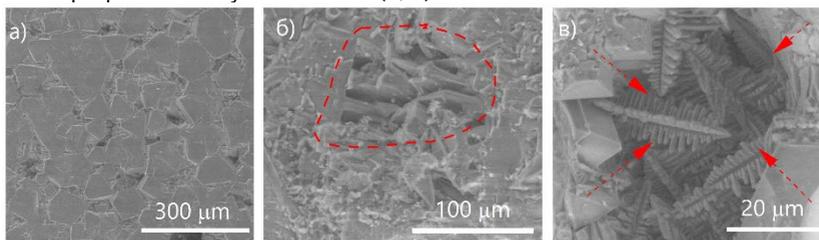


Рисунок 1. Рентгеновский дифрактограммы продуктов плавления и структура  $MgAl_2O_4$  шпинели на плоскости:

а) SP-1, б) SP-1,5, в) SP-2,3, г)

Фазовый состав образца SP-2,3 имеет максимум дифракции кристаллической фазы  $MgAl_2O_4$  ( $2\theta=19; 31,3; 36,7; 44,7; 59,4; 65,4^\circ$ ) при стехиометрическом соотношении 2.3. Таким образом, микроскопические исследования проводились на образце SP-2,3.

На рисунке 2 представлены электронные снимки поверхности образца контактирующей с потоком плазмы (а), а также поверхность поперечного скола при различных увеличениях (б, в).



**Рисунок 2** Электронные снимки а) электронные снимки поверхности образца контактирующей с потоком плазмы  
б, в) поверхность поперечного скола при различных увеличениях.

Объединяющей характерной чертой синтезируемых образцов является образование со сходными текстурно-структурными признаками призматических кристаллов, имеющих четкое очертание граней. Энергодисперсионный анализ показал, что призматические зерна в образце SP-2,3 соответствует элементному составу: O ~ 37.65, Mg ~ 20.08, Al ~ 42.62 мас. %, что в стехиометрическом соотношении составляет  $Al_2O_3/MgO = 2.3$ . Размер зерна варьируется от 150-300 мкм, соединенными кристаллами диаметром 2-4 мкм. Также на поверхности образца со стороны воздействия плазмы обнаружены открытые поры, размер, которые составляет до 45 мкм, насыщенность пор не превышает 2%.

В результате проведенных исследований установлена возможность и определены экспериментальные параметрические характеристики процесса формирования морфологии состава шпинели в среде термической плазмы. Определены влияние компонентного состава на формирование кристаллических фаз при интенсивном процессе плавления и кристаллизации. Исследована морфология керамического образца SP-2,3 с высоким содержанием шпинели. Установлено, что материал состоит из кристаллов размером 2-4 мкм, матрица керамического образца имеет остроугольную форму с размером от 150 до 300 мкм.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001 и гранта Президента РФ МК-66.2022.4.

### Литература:

- [1] Yajie Dai, Wen Yan, Yawei Li, Jianfeng Si, Yibiao Xu, Anzhe Wang, Fracture in lightweight magnesia spinel refractory using heterogeneous simulation approach with a multiscale framework, *Ceramics International*. V. 49. I. 6. 2023. P. 9748-9756.
- [2] Wen Yan, Guiyuan Wu, Sanbao Ma, Stefan Schafföner, Yajie Dai, Zhe Chen, Jiangtao Qi, Nan Li, Energy efficient lightweight periclase-magnesium alumina spinel castables containing porous aggregates for the working lining of steel ladles, *Journal of the European Ceramic Society*. V. 38. I. 12. 2018. P. 4276-4282.
- [3] Taehyung Kim, Donghyun Kim, Shinhoo Kang, Effect of additives on the sintering of  $MgAl_2O_4$ , *Journal of Alloys and Compounds*. V. 587. 2014. P. 594-599.
- [4] Ming Shi, Ying Li, Junjie Shi, Fabrication of periclase and magnesium aluminate spinel refractory from washed residue of secondary aluminum dross, *Ceramics International*. V. 48. I.6. 2022. P. 7668-7676.
- [5] Masoud A.M., Rasoul S.M., Devising a novel method of producing high transparent magnesium aluminate spinel ( $MgAl_2O_4$ ) ceramics body using synthesized LiF nanopowder and spark plasma sintering, *Mater. Chem. Phys.* 2020. V. 250. P. 123035.
- [6] E.Y. Sako, M.A.L. Braulio, E. Zinggrebe, S.R. van der Laan, V.C. Pandolfelli, Fundamentals and applications on in situ spinel formation mechanisms in  $Al_2O_3$ -MgO refractory castables, *Ceramics International*. V. 38. I. 3. 2012. P. 2243-2251.
- [7] Md M. Hasan, Pratik P. Dholabhai, Sanchita Dey, Blas P. Uberuaga, Ricardo H.R. Castro, Reduced grain boundary energies in rare-earth doped  $MgAl_2O_4$  spinel and consequent grain growth inhibition, *Journal of the European Ceramic Society*. V. 37. I. 13. 2017. P. 4043-4050.
- [8] Guoqi Liu, Hongxia Li, Han Zheng, Fan Qian, Weikui Ma, Wengang Yang, Mechanism of in-situ formation of spinel and its effect on the mechanical properties of  $Al_2O_3$ -C refractories, *Ceramics International*. V. 49. I. 6. 2023. P. 9231-9238.
- [9] В. В. Шеховцов, Н. К. Скрипникова, А. Б. Улмасов, Синтез алюмомагнезиальной керамики  $MgAl_2O_3$  в среде термической плазмы, *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24, № 3. С. 138-146.
- [10] В. В. Шеховцов, Н. К. Скрипникова, О. А. Кунц, Плазменная технология синтеза форстеритового материала, *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2023. Т. 25, № 1. С. 166-175.
- [11] В. В. Шеховцов, Н. К. Скрипникова, А. Б. Улмасов, Синтез шпинели  $MgAl_2O_4$  в среде термической плазмы, *Неорганические материалы*. 2023. Т. 59, № 8. С. 1-8.

[akhrorbek001@mail.ru](mailto:akhrorbek001@mail.ru)

## ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СПЕЧЕННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

**И. К. Некрасов<sup>1,2</sup>, И. Ш. Абдуллин<sup>2</sup>, Ф. Р. Сагитова<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>2</sup>ООО "Плазма-ВСТ", Казань, Россия

<sup>3</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет, ,

<sup>4</sup>ООО "ВИЗИОН ТЕХНОЛОДЖИ", Москва, Россия

Уникальная комбинация свойств корундовой керамики расширяет спектр ее применения в различных отраслях промышленности. К основным преимуществам корундовой керамики относят высокую микротвердость и твердость, ударостойкость, жаропрочность [1-2].

Керамические (корундовые) материалы применяются при изготовлении фрез для обработки твердых материалов. Чаще всего используются следующие разновидности керамики:

- оксидно-гибридная: для чистовой, получистовой или прерывистой обработки высокопрочным, обеленных, модифицированных чугунов или сталей, закаленных до 30...60 HRC.
- оксидная (на алюминиево-оксидной основе): для точения не обработанных термически сталей на высоких скоростях. Она способна справиться с материалами твердостью 160-380 НВ (сталь) и 143-289 НВ (чугун).
- кремниевая (в основе - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>): используется для получистовой обработки чугунов и сплавов в основе которых Ni (никель), Co (кобальт), Al (алюминий) с кремнием.
- композит на основе алюминия, укрепленный карбидом кремния: для быстрой обработки сталей и чугунов твердостью свыше 250 НВ.

Основными направлениями модификациями керамических материалов являются увеличение твердости, смачиваемости (для создания КМ), износостойкости и т.п.

Является актуальным улучшение основных характеристик корундовой керамики с целью расширения спектра ее применений и увеличение срока

службы изделий на ее основе. Одним из зарекомендовавших себя методов модификации материалов является метод обработки потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления [3-5].

### ***Методика обработки***

В качестве образцов использовались корундовые керамические шестигранники диаметром 23 мм.

Обработка произведена потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из высокочастотного разряда пониженного давления. Установка состояла из ВЧ генератора, электродов, вакуумной системы, системы подачи газа.

Исследования проведены при следующих выходных параметрах экспериментальной установки: энергия ионов  $E_i$  - от 50 до 100 эВ, плотность тока на поверхность -  $j_i$  от 0.5 до 1,5 А/м<sup>2</sup>, рабочее давление  $P$  до 120 Па, плазмообразующий газ – воздух, аргон, вносимая в разряд мощность - от 1 до 2 кВт, частота генерации ВЧ электромагнитного поля -13,56 МГц.

Микротвердость образцов определялась с помощью микротвердомера ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76.

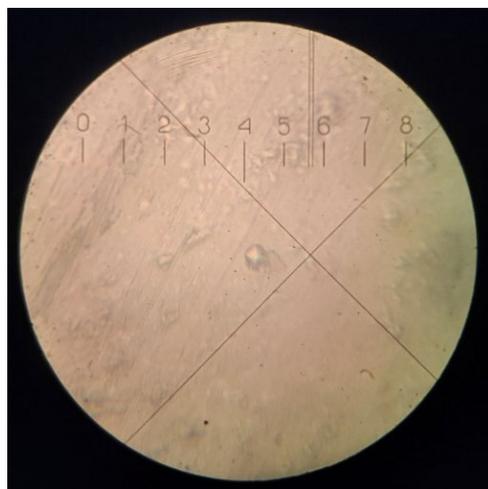
### ***Экспериментальная часть***

Измерения микротвердости продемонстрировали следующее. Обнаружено, что аморфная фаза в спеченном порошке превышает 10%, заявленных производителем. В результате этого при измерении микротвердости пирамидой по методу Виккерса необработанные плазмой образцы растрескивались в области воздействия индентора (см. рис.1). Это говорит о низкой микротвердости материала.

На обработанных плазмой образцах увеличена как микротвердость, так и трещиностойкость. Это видно по наличию отпечатка от пирамиды на поверхности материала (см. рис.2).



**Рисунок 1.** Отпечаток от четырехгранной пирамиды на контрольном образце.



**Рисунок 2.** Отпечаток от четырехгранной пирамиды на обработанном потоком низкоэнергетических ионов образце.

### **Выводы**

Обработка потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы высокочастотного разряда пониженного давления, позволяет улучшить один из важнейших параметров корундовой керамики, как микротвердость.

### **Литература:**

[1] Гаршин А.П., Гропянов В.М. Зайцев Г.П., Семенов С.С. Керамика для машиностроения. – М.: Научтехлитиздат. – 2003, - 380 с.

[2] Гынгазов С. А. и др. Поверхностная модификация корундовой керамики ионным пучком аргона // Перспективные материалы. – 2018. – №. 8. – С. 61-71.

[3] Модификация синтетических волокнистых материалов и изделий неравновесной низкотемпературной плазмой. Часть. 2. Свойства, структура, технологии / Корнеева Н.В. [и др.]. // Казань: Казанский государственный технологический университет (КГТУ), 2011. 256 с.

[4] Абдуллин И.Ш., Некрасов И.К. и др. Влияние низкоэнергетических ионов неравновесной низкотемпературной плазмы на формирование полимерных композитов на основе СВМПЭ-волокнистого материала / Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России: материалы III Международной научно-технической конференции // НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. – М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2022. – с.498-510.

[5] Некрасов И.К., Абдуллин И.Ш., Сагитова Ф.Р. ХАРАКТЕР ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ НА СВОЙСТВА ГЛИНОЗЕМНОЙ КЕРАМИКИ / Высокотемпературные керамические композиционные материалы и защитные покрытия: материалы V Всероссийской научно-технической конференции // НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. – М. : НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2022. – 227 с.

igor05071997@mail.ru

## СРАВНЕНИЕ ТИПОВ РАЗРЯДНИКОВ СВЧ ПЛАЗМОТРОНА НА ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ СПОСОБНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ РАСТВОРА ДОЗИМЕТРА ФРИККЕ

**С. А. Горбатов<sup>1</sup>, Д.В. Басырова<sup>1</sup>, А.В. Тихонов<sup>1</sup>, В.Н. Тихонов<sup>1</sup>, И.А. Иванов<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» — ВНИИРАЭ, Обнинск, Россия

Цель исследования – изучение окислительной способности установки при облучении раствора дозиметра Фрикке нетермальной аргоновой плазмой с различными типами разрядников.

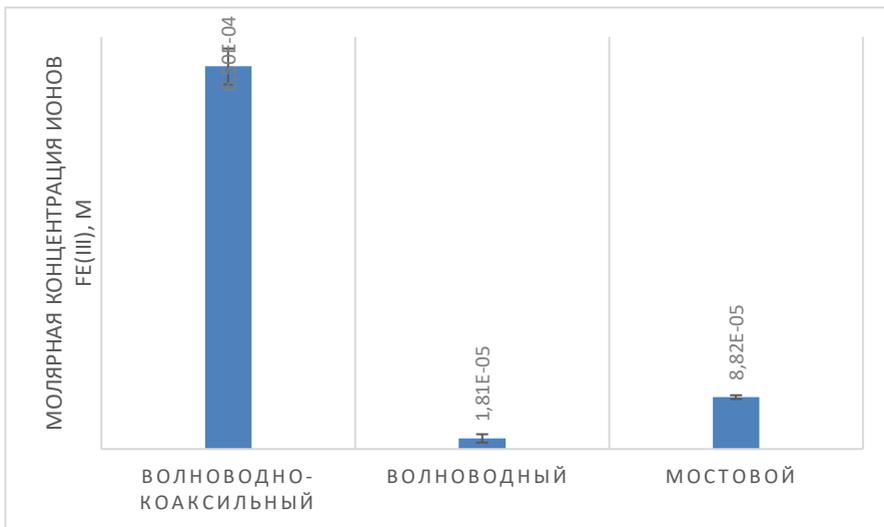
### **Методика эксперимента**

Проведена обработка раствора дозиметра Фрикке с помощью аргоновой плазмы, получаемой на установке СВЧ-генератора, созданного на базе НИЦ «Курчатовский институт» — ВНИИРАЭ, г.Обнинск [1]. В роли дозиметрической системы, являющейся объектом облучения, выступает раствор ферросульфатного дозиметра (дозиметр Фрикке), приготовленного по методике [2]. Мощность установки и скорость потока аргона составили 500 Вт и 5 л/мин соответственно. Пробу объемом 30 мл облучали в течение 5 мин. Расстояние от источника до объекта варьировалось в зависимости от типа используемого источника. После облучения дозиметра Фрикке проведено измерение оптической плотности раствора с помощью спектрофотометра СФ-2000. На основании данных по закону Бугера-Ламберта-Бера рассчитаны значения молярных концентраций ионов трехвалентного железа, которые характеризуют окислительные способности установки при использовании источников разрядов разных типов: волноводно-коаксиальный СВЧ разрядник, СВЧ плазматрон мостового типа и СВЧ плазматрон волноводного типа.

### **Результаты и обсуждение**

На рис.1 представлена концентрационная зависимость ионов трехвалентного железа, полученных в ходе реакции окисления, при обработке нетермальной аргоновой плазмой на установке с различными типами источников. На рисунке 1 наблюдается сильное отличие при

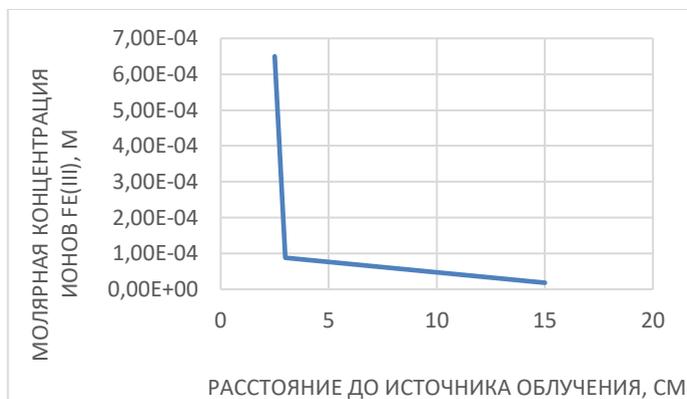
использовании восьмигранного разрядника, концентрация составила  $6,50 \cdot 10^{-4}$  М. При использовании плазмотрона мостового и волноводного типа концентрация ионов трехвалентного железа на порядок ниже.



**Рисунок 1.** Изменение молярной концентрации  $\text{Fe}^{3+}$  при облучении нетермальной плазмой раствора дозиметра Фрикке в зависимости от типа используемого источника

Концентрация ионов трехвалентного железа при использовании мостового типа источника и волноводного типа источника  $8,82 \cdot 10^{-5}$  и  $1,81 \cdot 10^{-5}$  соответственно, разница почти в 5 раз может быть обусловлена отличием в расстоянии до источника облучения. График концентрационной зависимости от расстояния от источника облучения до объекта исследования представлен на рисунке 2.

Расстояние от источника до объекта варьировалось в зависимости от типа используемого разрядника: волноводно-коаксиального – 2,5 см, для мостового – 3,0 см, для волноводного – 15,0 см. Разница в расстоянии между мостовым и волноводным кратна 5, что совпадает с разницей молярных концентраций при использовании этих разрядников. Таким образом, при использовании СВЧ плазмотрона мостового типа и СВЧ плазмотрона волноводного типа наблюдается аналогичный окислительный эффект.



**Рисунок 2.** Изменение молярной концентрации  $Fe^{3+}$  при облучении нетермальной плазмой на установке с использованием различных типов разрядников в зависимости от расстояния до источника облучения

Разница расстояния от источника облучения в 1,2 раза между мостовым и волноводно-коаксиальным показывает явное превосходство разрядника второго типа, который обладает более ярко выраженным окислительным эффектом, разница концентраций – 7,4. Очевидно, что использование волноводно-коаксиального типа разрядника актуально в целях облучения биологических объектов и химических растворов, так как при его использовании достигается минимальное расстояние от источника облучения и максимальный окислительный эффект.

### Литература:

- [1] Тихонов В. Н., Тихонов А. В., Иванов И. А. Микроволновый генератор. Государственный реестр изобретений Российской Федерации, патент РФ № 2 774 922 С1 от 01.11.2021, опублик. 24.06.2022
- [2] Kharlamov V. A., Polyakova I. V., Gorbatov S. A., Medzhidov I. M., Petrukhina D. I., Basyrova D. V., Glushchenko N. V., Ivanov I. A., Tikhonov V. N., Tikhonov A. V. Measurements of the oxidation properties of nonthermal argon microwave plasma using a ferrosulphate dosimeter. *Instruments and Experimental Techniques*. 2022. V. 65, N 6. P. 995–999. DOI: 10.1134/S0020441222060057

gorbatovsa004@gmail.com

## ТЕРМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ТОПЛИВНЫХ ГРАНУЛ ПЛАЗМОЙ ВЧИ РАЗРЯДА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

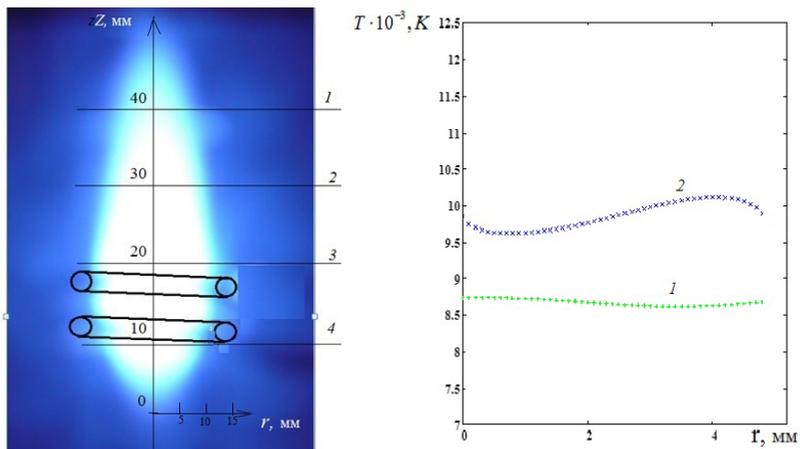
**М. Б. Шавелкина<sup>1</sup>, С. Д. Федорович<sup>2</sup>, Д. И. Кавыршин<sup>1, 2</sup>,  
М. А. Шавелкин<sup>1, 2</sup>**

*<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

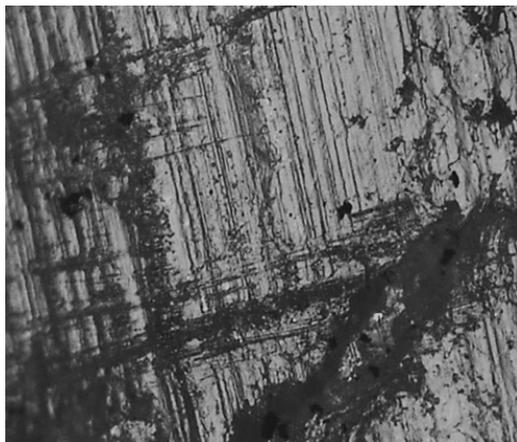
*<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия*

Существуют несколько технологий переработки твердой биомассы с целью получения биоугля — биотоплива, свойства которого, близки к свойствам бурого или каменного угля. Это торрефикация, гидротермальная карбонизация, газификация, медленный пиролиз, быстрый пиролиз и т.д., в основе которых лежат процессы термического удаления наиболее низкокалорийных составляющих с получением максимальной массовой доли углерода. Состав конечного продукта зависит от температурных условий, типа биомассы, способа ведения процесса. Цель данного исследования заключается в повышении эффективности деструкции древесной биомассы применением низкотемпературной плазмы. Плазменные условия создавались высокочастотным индукционным плазмотроном (рабочая частота  $27,12 \pm 0,27$  МГц) при атмосферном давлении. С учетом литературных данных, согласно которым торрефикация топливных гранул в зависимости от вида биомассы проводится в интервале 200-300°C [1], а карбонизация - 500-800°C [2], была проведена оптимизация расположения гранул по отношению к создаваемому факелу. Исследованы спектральные характеристики на различных сечениях индукционной плазмы аргона в интервале 240нм-1мкм (Рисунок 1). При обработке образцов в спектре излучения аргона были зарегистрированы молекулярные полосы летучих компонентов древесины. В результате комбинированное излучение создает особые условия для структурного изменения древесной гранулы, представляющей собой биополимерную композицию, главным образом, из лигнина, гемицеллюлозы и целлюлозы [3]. Вместо вытянутых волокон (рисунок 2) наблюдались слои, типичные для каменного угля (рисунок 3), обычно образующиеся при температурах карбонизации. После плазменной обработки изменился элементный состав гранул и их теплотворная способность. Приведены сравнительные

характеристики исходных и обработанных древесных гранул при температурах в диапазоне 110-220°C.



**Рисунок 1.** Радиальное распределение температуры электронов ВЧИ-плазмы для различных сечений по высоте факела (метод относительных интенсивностей). Высота отсчитывается от нижней точки факела: 1 – 40 мм, 2 – 30 мм.



**Рисунок 2.** Изображение поверхности исходной топливной гранулы.



**Рисунок 3.** Изображение поверхности топливной гранулы после обработки плазмой ВЧИ разряда.

В целом, продемонстрирована эффективность применения оптической спектрометрии для контроля состава плазмы в процессе обработки топливных гранул, что позволяет управлять их потребительскими свойствами.

#### **Литература:**

- [1] Bergman P. C. A., Boersma A. R., Zwart R. W. R., Kiel J. H. A. 2005 Torrefaction for Biomass Co-Firing in Existing Coal-Fired Power Stations Energy Centre of Netherlands, Report No. ECN-C-05-013.
- [2] Lewandowski W., Radziemska E., Ryms M., Ostrowski P. 2011 Modern methods of thermochemical biomass conversion into gas, liquid and solid fuels Ecological Chemistry and Engineering S 18(1) 39-47.
- [3] Acda M.N., Devera E.E. 2014 Physico-chemical properties of wood pellets from forest residues. J Trop Sci 26(4) 589–595

mshavelkina@gmail.com

## ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ЦЕОЛИТОВ С НАНЕСЕННЫМИ НА НИХ НИТРАТАМИ МЕДИ И ЦИНКА

**К. В. Смирнова<sup>1,2</sup>, Ю. А. Лебедев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия*

За последние несколько десятилетий, в условиях продолжающегося роста глобальной индустриализации, развитие и использование устойчивых источников энергии стало одной из самых сложных тем в настоящее время. Благодаря своей возобновляемости, чистоте и доступности солнечная энергия широко рассматривается как многообещающий кандидат для устойчивых технологий [1]. Она используется в ряде постоянно развивающихся технологий, таких как солнечный нагрев воды [2], фотоэлектрическая энергия [3], фотосинтез [4] и фотокатализ [5].

Различные натуральные и синтетические красители используются в текстильной, кожевенной, пластмассовой и пищевой промышленности. Основными стоками промышленных предприятий являются воды, растворенные в красителях. Это приводит к загрязнению воды, которое представляет собой серьезную угрозу для водной жизни и, следовательно, экосистемы. Поэтому очень важно разложить красители до того, как вода с предприятий попадет в реки или океаны. Краситель метиленовый синий (МБ) широко используется в промышленности, а также часто используется в качестве репрезентативного красителя для тестовых моделей. Здесь мы используем иерархическую наноструктуру CuOZnO в качестве очень эффективного фотокатализатора для разложения красителя МБ.

Полупроводники из оксидов металлов, такие как CuO-ZnO, в последнее время привлекли большое внимание исследователей. Наноструктурированные оксиды металлов обладают особыми характеристиками, такими как высокая пористость, высокая адсорбционная способность, дополнительные места для функциональных групп и т. д. Они нашли свое применение в различных промышленных применениях, включая фотокатализ [6-8].

Среди различных материалов носителей цеолиты широко рассматриваются как многообещающие кандидаты для применения в качестве гибридных адсорбентов и фотокатализаторов из-за их уникальных структурных свойств и химического состава, таких как высокая площадь поверхности, высокие адсорбционные и конденсационные свойства, обилие кислотных/основных центров, которые могут снизить рекомбинация электронно-дырочных пар, регулируемые свойства поверхности. Обычный цеолит представляет собой микропористый материал алюмосиликатного типа, построенный из тетраэдрических звеньев  $\text{SiO}_4$  и  $\text{AlO}_4$ . Поскольку цеолит не проявляет фотокаталитических свойств в видимом свете, разработка фотокатализаторов с видимым световым откликом является неизбежной тенденцией в области фотокатализа. Соответственно, легирование металлом/неметаллом или введение других полупроводников с узкой запрещенной зоной в фотокатализаторы на основе цеолита являются эффективными и осуществимыми подходами к созданию фотокатализаторов на основе цеолита, управляемых видимым светом. Кроме того, объединение гетероперехода или Z-схемы с цеолитом для максимального разделения фотогенерированных носителей заряда также является многообещающим методом повышения эффективности фотокатализатора на основе цеолита при очистке окружающей среды

Объединение цеолитов с оксидами должна повысить эффективность и ускорить фоторазложение красителей. Так в статьях описывают полную деградацию красителя за 8 ч [9]. При этом для синтеза используют золь-гель и гидротермальный методы, которые требуют большого количества высокотоксичных компонентов, дорогостоящего оборудования и продолжительного времени синтеза. Мы предлагаем для синтеза оксидов на цеолитах простой и элегантный метод плазменной обработки цеолитов с нанесенными нитратами.

В качестве исходных веществ использовали гексагидрата нитрата меди  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  100%, гексагидрат нитрата цинка  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , а так же их смесь в соотношении 1 к 1 и массой навески (0,5 ммоль/л)  $m(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})=0,147845\text{г}$  и  $m(\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})=0,14868\text{г}$ . Использовали цеолит марки NaX Sorbis Group диаметром 3-5 мм. В растворенные в дистиллированной воде нитраты помещали цеолиты на 2 часа после чего сушили при температуре  $50^\circ\text{C}$  в течении суток. В качестве источника питания использовали Spellman SL1200. На титановый анод подавали напряжение 8 кВ (достаточное для пробоя межэлектродного пространства), в качестве

катода использовали стальную пластину с отверстиями, через которую продували воздух. Ячейка представляла собой цилиндр высотой 5 см с коническим сужением в основании (до 1,2 см). Межэлектродное расстояние составляло 5 мм. Ток разряда 50 мА. Время обработки 10 мин.

Для исследования морфологии и состава поверхности использовали сканирующий электронный микроскоп Tescan VEGA 3 SBH (Чехия) с приставкой для элементного анализа. (элементный анализ получился, изображения необходимо повторить)

Для исследования кинетики изменения оптической плотности использовали спектрофотометр СФ-56 ("ОКБ Спектр", г.С.-Петербург) с длиной оптического пути 10 мм.

Цеолиты с нанесенными нитратами меди и обработанными в тлеющем разряде по структуре поверхности очень схожи с исходными образцами. Основное отличие становится заметно на поверхности цеолитов с нанесенными нитратами цинка после плазменной обработки, поверхность покрыта ворсинками. Образцы цеолитов после смачивания в смеси нитратов цинка и меди после плазменной обработки имеют хорошо развитую поверхность, на которой хорошо заметны нано нити с включениями наношариков.

Вполне ожидаемые и закономерные результаты демонстрируют цеолиты с нанесенными на них нитратами, обработанными в газовом разряде. У образца  $\text{CuO@NAX}$  изменение интенсивности прошедшего света практически такое же, как и у исходного NAX, лучший результат демонстрирует  $\text{ZnO@NAX}$ . Известно, что  $\text{ZnO}$  можно эффективно возбуждать ультрафиолетовым светом. Однако, скорость радиационной рекомбинации высока для фотогенерированных электронов и дырок в чистых  $\text{ZnO}$ , что ограничивает эффективность их эффективность в качестве фотокатализатора. Наилучшую эффективность демонстрирует  $\text{ZnOCuO@NAX}$ .

Данная работа является только первой ступенью исследования фотокаталитической активности оксидов меди, цинка и двойных оксидов меди и цинка для разложения метиленового синего. В дальнейшем планируется более подробное изучение морфологии полученных катализаторов. А также варьирование содержания полученных оксидов на поверхности цеолитов.

Работа выполнена при поддержке Государственным заданием ИНХС РАН.

### **Литература:**

- [1] E. Pulli, E. Rozzi, F. Bella, Transparent photovoltaic technologies: Current trends towards upscaling, *Energy Convers. Manag.* 219 (2020), 112982, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112982>. ...
- [2] V.-D. Dao, N.H. Vu, S. Yun, Recent advances and challenges for solar-driven water evaporation system toward applications, *Nano Energy*. 68 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104324>.
- [3] S. Galliano, F. Bella, M. Bonomo, G. Viscardi, C. Gerbaldi, G. Boschloo, C. Barolo, Hydrogel electrolytes based on xanthan gum: Green route towards stable dye-sensitized solar cells, *Nanomaterials*. 10 (2020) 1–19, <https://doi.org/10.3390/nano10081585>.
- [4] M.E. Aguirre, R. Zhou, A.J. Eugene, M.I. Guzman, M.A. Grela, Cu<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub> heterostructures for CO<sub>2</sub> reduction through a direct Z-scheme: Protecting Cu<sub>2</sub>O from photocorrosion, *Appl. Catal. B Environ.* 217 (2017) 485–493, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.05.058>.
- [5] M. Tahir, S. Tasleem, B. Tahir, Recent development in band engineering of binary semiconductor materials for solar driven photocatalytic hydrogen production, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 15985–16038, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.071>.
- [6] Z. Zang, Efficiency enhancement of ZnO/Cu<sub>2</sub>O solar cells with well oriented and micrometer grain sized Cu<sub>2</sub>O films. *Appl. Phys. Lett.* 112 (2018) 042106-1-042106-5. <https://doi.org/10.1063/1.5017002>.
- [7] S. Joshi, C. B. R. Kumar, L. A. Jones, E. L. H. Mayes, S. J. Ippolito, M. V. Manorama, Modulating interleaved ZnO assembly with CuO nanoleaves for multifunctional performance: perdurable CO<sub>2</sub> gas sensor and visible light catalyst, *Inorg. Chem. Front.*, 4 (2017) 1848-1861. DOI: 10.1039/C7QI00474E.
- [8] F. X. Liang, Y. Gao, C. Xie, X. W. Tong, Z. J. Li, L. B. Luo, Recent advances in the fabrication of graphene–ZnO heterojunctions for optoelectronic device applications, *J. Mater. Chem. C*, 6 (2018) 3815-3833. DOI: 10.1039/C8TC00172C.
- [9] S. Jung, K. Yong, Fabrication of CuO–ZnO nanowires on a stainless steel mesh for highly efficient photocatalytic applications, *Chem. Commun.*, 47 (2011) 2643–2645. DOI: 10.1039/c0cc04985a

[smirnovakv1@gmail.com](mailto:smirnovakv1@gmail.com)

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ВЕЩЕСТВОМ В ЭМИССИОННОМ СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ. НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ ВЛИЯНИЯ ТРЕТЬИХ ЭЛЕМЕНТОВ

**А. Н. Попова<sup>1</sup>, А. С. Мустафаев<sup>1</sup>, В. С. Сухомлинов<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*

*<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Проблемы взаимодействия плазмы с твердой фазой вещества в настоящее время интенсивно исследуются, в том числе, и в связи с их многочисленными применениями. К ним можно отнести получение покрытий с заданными свойствами в процессе плазменного напыления, различные методы исследования свойств поверхностей – определение послыного состава твердой фазы с неоднородным распределением примесей и многие другие.

Одним из таких применений является эмиссионный спектральный анализ (ЭСА), где явление эрозии поверхности твердой фазы при контакте с плазмой используется для определения ее элементного состава [1-3]. Суть метода заключается в том, что атомы, которые в процессе эрозии поверхности попадают в плазму, оптически возбуждаются и по интенсивностям излучения соответствующих спектральных линий можно судить об относительных концентрациях атомов разного сорта в веществе. При этом используются различные типы плазменных разрядов (дуга, искра, тлеющий разряд и т.д.) в атмосфере различных газов - воздуха, инертных газов, азота и пр.

Данный метод является наиболее распространенным при определении состава веществ за счет своей экспрессности (порядка нескольких минут и менее), высокой чувствительности (до  $10^{-7}\%$ ) и относительной простоты его реализации. Вместе с тем, при анализе сложных по составу веществ может возникать, так называемая, проблема влияния третьих элементов (ВТЭ) [4]. Ее суть заключается в том, что интенсивности аналитических линий атомов определяемых элементов начинают зависеть от концентрации в веществе других примесей. Физические причины этого – их влияние на процессы выхода из твердой фазы в плазму атомов определяемого сорта

(коэффициента диффузии в приповерхностных слоях, энергию отрыва атомов от поверхности, температуру поверхности путем влияния на

теплопроводность и пр.), а также на процессы оптического возбуждения в плазме за счет изменения атомного, ионного состава плазмы и, как следствие, средней энергии электронов. Проблема ВТЭ также должна учитываться при построении моделей динамики свойств плазмы при ее контакте с многокомпонентными веществами. Ее решению и посвящена данная работа.

ЭСА определения элементного состава веществ в принципе является методом, предусматривающим использование эталонов – образцов вещества того же типа, что и анализируемое, но с известным элементным составом. Эти эталоны используются для построения, так называемых, градуировочных кривых – зависимостей интенсивностей аналитических элементов от их концентрации в веществе. Данный процесс называется калибровкой.

Как правило, при калибровке спектрометров для анализа веществ с примесными и легирующими элементами, концентрация которых изменяется в больших пределах (2-4 порядка), необходимо варьировать параметры системы возбуждения и атомизации пробы, то есть, разрабатывать отдельные специальные аналитические методики для сравнительно узких групп веществ (например, сталей одной марки). В то же время, при адекватной коррекции влияний третьих элементов в данном случае можно обойтись одной методикой для нескольких различных групп, веществ, что очевидно, экономит временные и материальные ресурсы при производстве спектрометров.

Авторами предлагается общая методика учета влияния третьих элементов из первых принципов, которая применима к любым типам веществ, проверенная на модельной задаче и успешно апробированная на отечественных эмиссионных спектрометрах.

В программах обработки эмиссионных спектрометров функция  $F_i(I_i)$ , как правило, представляется в виде полинома некоторой степени, которая определяется аналитической методикой [5]. Если  $C_i^{(j)}$  - паспортное значение концентрации  $i$  – того элемента в  $j$  - том эталоне, то коэффициенты в полиноме находятся по методу наименьших квадратов (МНК) из минимизации функционала:

$$S_i = \sum_{j=1}^M [C_i^{(j)} - F_i(I_i^{(j)})]^2 \cdot \frac{1}{W_{ij}}; W_{ij} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_i^{(j)}}{I_i^{(j)}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_i^{(j)}}{C_i^{(j)}}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $W_{ij}$  - статистический вес при измерении аналитической линии  $i$  - того элемента по результатам анализа  $j$  - того эталона;  $\Delta I_i^{(j)}, \Delta C_i^{(j)}$  - абсолютные ошибки измерения интенсивности  $I_i^{(j)}$  и паспортного значения концентрации  $C_i^{(j)}$  в эталоне.

После аппроксимации зависимость функции  $\varphi_i$  от интенсивности  $I_{m+s}$  представляют в виде линейной:

$$\phi_i^s(I_{m+s}, I_i) = b_{m+s} I_{m+s} + d_{m+s} I_i I_{m+s}, \quad (2)$$

где первый член учитывает, так называемое, аддитивное влияние, а второй - мультипликативное. При этом будем полагается, что влияния различных элементов складываются аддитивно.

Будем считать, что у нас есть  $M$  эталонов, в каждом из которых известна концентрация  $N$  элементов. Пусть реализуется ситуация, при которой определяемая по аналитической методике концентрация  $i$  - того элемента  $C_i$  зависит не только от интенсивности его аналитической линии  $I_i$ , но и от концентраций (а значит, и от интенсивностей аналитических линий) других элементов. Предположим, что этих элементов  $V < N$  и пронумеруем их от  $m$  до  $m + V - 1$ . При этом очевидно, что:

$$m + s \neq i, \text{ где } s = 0, \dots, V - 1. \quad (3)$$

Предположим также, что зависимость концентрации определяемого  $i$  - того элемента от интенсивностей  $I_i$  аналитической линии определяемого и  $I_m, \dots, I_{m+V-1}$  влияющих элементов имеет вид:

$$C_i = \Phi_i \left( I_i + \sum_{k=m}^{m+V-1} d_{ik} I_k, I_m, \dots, I_{m+V-1} \right). \quad (4)$$

где  $d_{ik}$  - пока неизвестные безразмерные численные коэффициенты, а зависимость функции  $\Phi_i(I_i + \sum_{k=m}^{m+V-1} d_{ik} I_k, I_m, \dots, I_{m+V-1})$  от аргументов  $I_m, \dots, I_{m+V-1}$  пока не определена. Форма первого аргумента функции в правой части соотношения (4)  $I_i + \sum_{k=m}^{m+V-1} d_{ik} I_k$  имеет простой физический смысл. А именно, она учитывает возможные спектральные наложения и зависимость фона в месте расположения аналитической линии определяемого элемента от наличия в плазме влияющих элементов. Для простоты мы взяли эту зависимость линейной по интенсивности влияющих элементов  $I_k$ . В современных эмиссионных спектрометрах при спектральных наложениях линий элементов, влияющих на интенсивность

линии определяемого элемента, реальная зависимость, по-видимому, близка к линейной. Зависимость же интенсивности фона плазмы от интенсивностей линий влияющих элементов (которые определяются их концентрациями) напротив - более сложная. Аналог формулы (2) (линейный

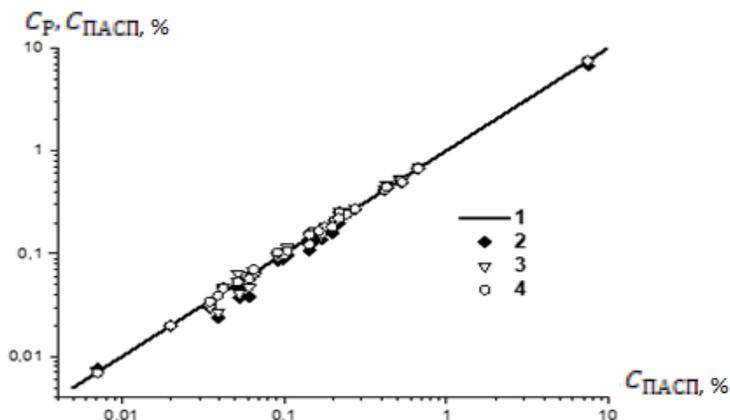
алгоритм учета влияний третьих элементов) для влияющего элемента под номером  $k = m + s$  и определяемого элемента под номером  $i$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \phi_i^2(I_i, I_k) &= \Phi_i(Y_{ik}, I_k) - F_i(I_i) \\ &= \sum_{n=1}^{N_0} d_{ik}^n \left\{ \frac{I_k^n}{n!} \frac{\partial^n F_i(I_i)}{\partial I_i^n} + \sum_{r=n}^{N_0} \sum_{l=1}^{M_0} \frac{A_l^{(ikr)} I_k^{l+n}}{l!} \frac{I_i^{r-n}}{(r-n)!} \right\} \\ &+ \sum_{l=1}^{M_0} \frac{A_l^{(ik0)} I_k^l}{l!}. \end{aligned} \quad (5)$$

Напомним, что индексы  $i, k, j$  относятся к определяемому, влияющему элементам и номеру эталона, соответственно. Определению методом наименьших квадратов подлежат константы  $d_{ik}, A_l^{(ikr)}$ .

Далее мы проверили разработанный алгоритм на реальных аналитических методиках серийно выпускаемых эмиссионных спектрометров. Для примера мы рассмотрели определение содержания Cu и Al в сталях. Использовались эмиссионные спектрометры «СПАС-02», «СПАС-05» и комплекты государственных стандартных образцов (ГСО) сталей: УГ0к-УГ9к (низко и среднелегированные стали); РГ10-РГ18 (быстрорежущие стали); ЛГ57, ЛГ32-ЛГ36, ЛГ60-ЛГ65 (высоколегированные стали). Функция  $F_i(I_i)$  для аналитической линии Cu определялась в виде полинома третьей степени по комплекту ГСО УГ0к-УГ9к.

На Рис. 1 приведена зависимость  $C_p(C_{ПАСП})$ , где  $C_p, C_{ПАСП}$  – расчетная и паспортная концентрации меди в ГСО УГ0к-УГ9к, соответственно. При расчетах с учетом влияний учитывалось влияние на определение Cu следующих элементов: Ni, W, Cr, V, поскольку в быстрорежущих сталях велика концентрация W, V, а в высоколегированных - Ni, Cr. Видно, что применение разработанной теории существенно уменьшает погрешность определения концентрации меди в сталях. Среднее среднеквадратичное отклонение расчетной концентрации от паспортной уменьшается в 2,41 раза – от 14,1 % до величины 5,8 %. При этом среднеквадратичное отклонение для комплекта низко и среднелегированных сталей (где влияния третьих элементов не наблюдается), то есть, при  $C_p(I_i) = F_i(I_i)$ , равно 5,6 %, то есть, они практически равны. Аналогичные результаты получены и для Al.



**Рисунок 1.** Результаты применения разработанной теории для учета влияний третьих элементов (Ni, W, Cr, V,) при определении Cu в сталях.

Таким образом, разработанная теория учета ВТЭ существенно (в разы) уменьшает систематическую ошибку определения состава вещества, взаимодействующего с плазмой методом эмиссионной спектрометрии по сравнению с существующим алгоритмом.

### Литература:

- [1] Vasilyeva I.E., Shabanova E.V. Calibration model of simultaneous multielement atomic emission analysis using analytical line groups of each determined element // Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 1998. V. 361, № 3. P. 280-282.
- [2] Joosten, H.G.; Golloch, A.; Flock, J.; Killewald, S. Atomic Emission Spectrometry. AES—Spark, Arc, Laser Excitation; De Gruyter: New York, NY USA; Berlin, Germany, 2020
- [3] Mermet J.M. Calibration in atomic spectrometry: A tutorial review dealing with quality criteria, weighting procedures and possible curvatures // Spectrochimica Acta (Part B), 2010.V. 65, № 7. P. 509-523.
- [4] Буравлев Ю.М. Атомно-эмиссионная спектрометрия металлов и сплавов, Донецк, ДонНУ. 2000.
- [5] Sukhomlinov V.S. , Mustafaev A.S., Popova A.N., Koubaji H. Accounting for the effects of third elements in the emission spectral analysis and construction of global analytical techniques Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1. 012054. DOI 10.1088/1742-6596/1384/1/012054

## ЭФФЕКТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСТЕНИЯ ЯЧМЕНЯ НЕТЕРМАЛЬНОЙ ПЛАЗМОЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

**С. А. Горбатов<sup>1</sup>, Д.И. Петрухина<sup>1</sup>, В.А. Харламов<sup>1</sup>, М.И. Меджидов<sup>1</sup>,  
В.Н. Тихонов<sup>1</sup>, И.А. Иванов<sup>1</sup>, А.В. Тихонов<sup>1</sup>, Н.В. Глущенко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» - ВНИИРАЭ, Обнинск, Россия

В условиях вегетационного эксперимента изучили последствия однократного воздействия нетермальной СВЧ плазмы на растения ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в различные фазы органогенеза: 3-й лист, кущение и выход в трубку. Длительность воздействия составляла 1, 5, 15 и 30 мин, расход аргона составлял 5 л/мин. Обработку проводили с помощью газового концентратора. Контролем служили необработанные растения. Действие нетермальной плазмы оценивали в конце вегетации по морфофизиологическим показателям и структуре урожая. Растения выращивали до полной спелости. Ранее исследования по изучению эффектов влияния нетермальной аргоновой плазмы атмосферного давления на вегетирующие сельскохозяйственные растения не проводились, что является актуальным. Установлено, что при обработке (1-30 мин) нетермальной плазмой вегетирующих растений ячменя в ранние этапы органогенеза (третий лист и кущение) проявляются как стимулирующие, так и негативные эффекты, в фазу трубкования – эффекты наименее выражены.

Объект исследования — ячмень (*Hordeum vulgare* L.) ярового сорта Владимир. Растения выращивали в условиях вегетационного эксперимента в теплице в сосудах, содержащих 4,5 кг воздушно-сухой дерново-подзолистой почвы. В каждом сосуде выращивалось по 10 растений. Воздействие на растения проводили в различные фазы органогенеза: 3-й лист, кущение и выход в трубку.

В качестве источника нетермальной плазмы использовали описанную ранее установку [1,2]. В установке генерируется микроволновый разряд коаксиальной конфигурации в струе аргона при атмосферном давлении (рис. 1). В накоплении флавоноидов отмечена следующая закономерность: воздействие нетермальной плазмой на растения ячменя в фазу кущения продолжительностью 5 мин обусловило увеличение накопления флавоноидов на  $\approx 33,5$  % по сравнению с контролем. Установлено, что с увеличением продолжительности воздействия плазмы наблюдается дозозависимое повышение уровня флавоноидов. В то же время

воздействие плазмы продолжительностью 5 мин в фазу выхода в трубку способствовало снижению содержания флавоноидов на  $\approx 23,3\%$  по сравнению с контролем. С увеличением продолжительности воздействия плазмы дозозависимое изменения содержания флавоноидов не наблюдалось.



**Рисунок 1.** Общий вид источника нетермальной аргоновой плазмы атмосферного давления

Воздействие нетермальной плазмой на растения ячменя в фазу кущения продолжительностью 1 и 5 мин привело к увеличению показателя  $\Phi_i2$  по сравнению с контролем.  $\Phi_i2$  – это доля световой энергии, захваченная фотосистемой II, которая направляется на фотохимию для производства АТФ и НАДФН и, в конечном итоге, сахара для роста растений.  $\Phi_i2$  в фазу выхода в трубку не отличался от контроля.

Таким образом, однократное воздействие плазмой длительностью 1 и 5 мин в фазу кущения вызывает повышение доли световой энергии, направленной непосредственно на фотосинтез, при этом потери энергии снижаются, что свидетельствует о повышении эффективности фотосинтеза в целом. При воздействии в фазу выхода в трубку отмечается увеличение потерь энергии, т. е. некоторое понижение эффективности фотосинтеза.

Воздействие нетермальной плазмы на растения ячменя в фазу выхода в трубку было менее выражено по сравнению с воздействием на более ранних стадиях развития. Это можно объяснить меньшей чувствительностью данной стадии органогенеза либо значительным увеличением биомассы растений и снижением удельного воздействия плазмы.

По результатам исследования можно сказать, что однократная обработка аргоновой СВЧ плазмой в течение 1 и 5 минут в фазу кущения приводит к повышению эффективности фотосинтеза в целом у растений ячменя. Полученные экспериментальные данные показывают, что при обработке (1-30 мин) нетермальной плазмой вегетирующих растений ячменя в ранние этапы органогенеза (третий лист и кущение) проявляются как стимулирующие, так и негативные эффекты, в фазу трубкования – эффекты наименее выражены.

Поскольку эффекты воздействия низкотемпературной плазмы атмосферного давления на сельскохозяйственные растения недостаточно исследованы, данные результаты по изучению у растений ячменя ответных реакций на действие низкотемпературной плазмы в различные этапы органогенеза представляются интересным для целей повышения урожая и качества продукции в хозяйствах.

#### **Литература:**

[1] Tikhonov V.N., Aleshin S.N., Ivanov I.A., Tikhonov A.V. The low-cost microwave plasma sources for science and industry applications // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2017. Vol. 927(1). P. 012067. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/927/1/012067>

[2] Ivanov I.A., Tikhonov V.N., Tikhonov A.V. Microwave complex for obtaining low-temperature plasma at atmospheric pressure // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2019. Vol. 1393(1). P. 012042. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1393/1/012042>

gorbatovsa004@gmail.com

## ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПЛЕНОК ALN ОТ СООТНОШЕНИЯ АРГОНА И АЗОТА В ПОТОКЕ ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ

**Л. В. Баранова<sup>1,2</sup>, Б. Т. Байсова<sup>1,2</sup>, В. И. Струнин<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО "ОмГУ им Ф.М. Достоевского", Омск, Россия

<sup>2</sup>Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (ИРФЭ ОНЦ СО РАН), Омск, Россия

Тонкие пленки AlN находят широкое применение в микроэлектронике в качестве пьезоэлектрического материала в преобразователях, микросенсорах, фильтрах, резонаторах на объемных и поверхностных акустических волнах [1,2].

Наибольшее распространение среди методов формирования пленок нитрида алюминия получил метод магнетронного распыления, так как он является низкотемпературным и относительно недорогим методом, позволяющим точно оценить характеристики получаемого материала [3,4]. При этом на свойства получаемых пленок AlN оказывают существенное влияние технологические условия их осаждения. Несмотря на многочисленные исследования, взаимосвязь между качеством получаемых пленок и технологическими параметрами их формирования до сих пор не установлена [5-7]. Таким образом, проведение исследований, направленных на определение влияния технологических параметров процесса напыления пленок на их свойства с целью определения оптимальных режимов их формирования является актуальным.

Целью исследования являлось определение влияния соотношения потоков рабочего и реактивного газов на элементный состав и стехиометрию пленок. Определение элементного состава пленок производилось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Формирование тонких пленок производилось с помощью вакуумной установки нанесения многокомпонентных покрытий STEMS116-01 с магнетронной распылительной системой. Исследуемые пленки формировались на кремниевых и ситалловых подложках. В связи с

большими различиями в константах решетки AlN и Si возникают сложности с получением высококачественных пленок [8].

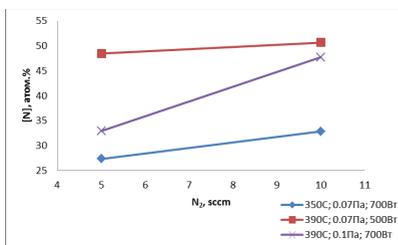
Образцы представляли собой трехслойную конструкцию: ванадий-алюминий-нитрид алюминия. Слой ванадия служил адгезионным слоем, слой алюминия-материалом контактных площадок, создаваемого микроэлектронного устройства, а слой нитрида алюминия-пьезоэлектрическим слоем. Контроль толщины слоев осуществлялся с помощью микровесов, установленных в вакуумной камере [9].

Пленки нитрида алюминия формировались методом реактивного магнетронного распыления алюминиевой мишени в среде рабочих газов аргона и азота. Слои нитрида алюминия формировались при следующих режимах:  $T=350\text{-}390^\circ\text{C}$ ,  $Ar=4$  sccm,  $N_2=5,10$  sccm,  $P=0.07\text{-}0.1$  Па,  $W=400\text{-}900$  Вт.

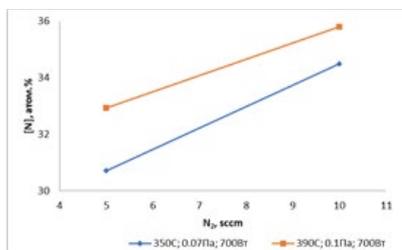
Мишень находится на расстоянии 10-11 см от подложки, что сравнимо с длиной свободного пробега частиц для того, чтобы механизм доставки распыленных атомов алюминия до подложки являлся бесстолкновительным процессом. Толщина слоя алюминия составляла 0.2 мкм.

Определение элементного состава производилось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Измерения проводились на микроскопе Hitachi SU8280.

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости количественного содержания азота в тонких пленках от содержания азота в газовой смеси.



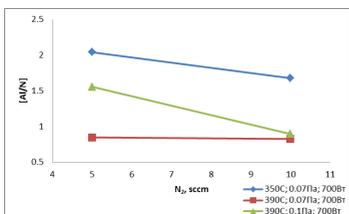
**Рисунок 1.** Зависимость содержания азота в пленках нитрида алюминия на ситалловых подложках от содержания азота в газовой смеси



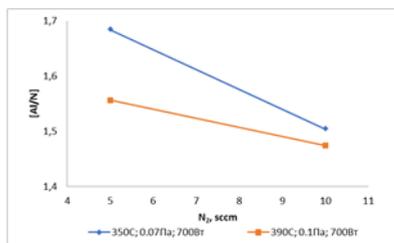
**Рисунок 2.** Зависимость содержания азота в пленках нитрида алюминия на кремниевых подложках от содержания азота в газовой смеси

С повышением содержания азота в составе плазмообразующего газа происходит увеличение содержания азота в тонких пленках, в то время как относительное содержание алюминия к азоту уменьшается.

Аналогичные зависимости для отношения количественного содержания алюминия к количественному содержанию азота в тонких пленках представлены на рисунках 3 и 4.



**Рисунок 3.** Зависимость относительного содержания алюминия к азоту от содержания азота в газовой смеси (ситалловые подложки)



**Рисунок 4.** Зависимость относительного содержания алюминия к азоту от содержания азота в газовой смеси (кремниевые подложки)

### Результаты и выводы

Представлены результаты исследования элементного состава тонких пленок нитрида алюминия (AlN) от соотношения рабочего и реактивного газа.

Одним из основных факторов, влияющих на качество пленок нитрида алюминия, является стехиометрия содержания алюминия и азота в атомарном состоянии непосредственно на поверхности подложки. Поскольку кинетика процессов синтеза нитрида алюминия на поверхности подложки в значительной мере определяется потоками частиц из объема плазмы, то немаловажное значение приобретает информация о концентрации атомарного азота в рабочем объеме. Эффективные плотности потоков алюминия и атомарного азота, необходимые для формирования пленки AlN стехиометрического состава на подложке определяются фактически прореагировавшими атомами алюминия и азота на поверхности подложки.

В случае аргоновой атмосферы в разряде, где единственным ионом является ион аргона, увеличение мощности (силы тока) за счет возрастания плотности потока ионов аргона приводит к увеличению актов рассеяния атомов алюминия и к увеличению плотности потока их на поверхность подложки. В случае использования реактивного рабочего газа Ar:N<sub>2</sub> снижается средняя температура электронов, доля ионизованного аргона и плотность потока ионов аргона, как основной распыляющей частицы, отсюда мы имеем снижение плотности потока атомарного алюминия на подложку. Для неизменности значения установленной мощности (силы тока) в поток положительно заряженных ионов на катод-мишень включаются ионы молекулярного и атомарного азота и ионы алюминия, распылительная способность которых существенно ниже в сравнении с ионами аргона вследствие меньшей массы, наличия у молекулярного азота колебательных степеней свободы, снижающих эффективность передачи энергии атомами алюминия на поверхности.

С увеличением давления степень диссоциации азота уменьшается, что приводит к снижению плотностей потоков на подложку атомарного азота и атомарного азота в возбужденном состоянии как основных частиц для формирования нитрида алюминия на поверхности подложки. Таким образом, происходит отклонение от стехиометрического соотношения плотностей потоков атомов алюминия и атомарного азота в сторону увеличения концентрации алюминия.

### **Заключение**

Были найдены оптимальные режимы получения пленок AlN требуемого стехиометрического состава для использования в устройствах на поверхностных и объемных акустических волнах: давление рабочего газа 0.07 Па, температура подложки 390<sup>0</sup>С, мощность на мишени 700 Вт, поток N<sub>2</sub> 10 sccm.

### **Источник финансирования. Благодарности.**

Работа выполнена в рамках государственного задания Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 121121700062-3).

**Литература:**

- [1] Lange K., Rapp B.E., Rapp M. Surface acoustic wave biosensors: a review / / Anal. Bioanal. Chem. 2008. V. 391 № 5 P. 1509-1519.
- [2] Yantchev V, Katardjiev I. Thin film Lamb wave resonators in frequency control and sensing applications: A review / / J. Micromech. Microengineering. 2013 V. 23. № 4 P. 43-47.
- [3] Moreira M.A., Souza J.F., Diniz J.A. Electrical characterization and morphological properties of AlN films prepared by dc reactive magnetron sputtering Choudhary,. Microelectronic Engineering 88 (5): 802-806 DOI: 10.1016/j.mee.2010.06.045.
- [4] Mishra P., Hubli R.C. Deposition of rock salt AlN coatings by magnetron sputtering / R.K. Choudhary, P. Mishra, R.C. Hubli // Surface Engineering. – 2014. – V. 30 – P. 535-539.
- [5] Shishkin, R.A. The advanced aluminum nitride synthesis methods and its applications: Patent review / Shishkin, R.A., Elagin, A.A., Mayorova, E.S., Beketov, A.R. // Recent Patents on Nanotechnology. – 2016. – Vol. 10. No 2. – P. 146-156.
- [6] Патент CN103771360A, МПК C01B21/072. Способ приготовления AlN / Lin, Z., Rui, L., Chunhua, S., Лунцзян, G.; заявитель ГУЙЧЖОУ WANFANG ALUMINUM SCIENCE AND TECHNOLOGY DEV CO Ltd DD; заявл. 05.07.2014; опубл. 09.16.2015, приоритет 26.02.2014 – 3 с.
- [7] Yuan, Qian, et al. Surface-Nanostructured Al–AlN Composite Thin Films with Excellent Broad-Band Antireflection Properties Fabricated by Limited Reactive Sputtering. *ACS Applied Nano Materials* 1.3 (2018): 1124-1130.
- [8] Kim J. Growth and characterization of high quality AlN using combined structure of low temperature buffer and superlattices for applications in the deep ultraviolet / Kim, J., Pyeon, J., Jeon, M., Nam, O. // Japanese Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 54. No 8. – art. no. 081001/
- [9] Iqbal, Abid, and Faisal Mohd-Yasin. "Reactive sputtering of aluminum nitride (002) thin films for piezoelectric applications: A review." *Sensors* 18.6 (2018): 1797.

baranova@omsu.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ ОБРАБОТКИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ В ВЧЕ РАЗРЯДЕ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

**И. Ш. Абдуллин<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>2</sup>, И. К. Некрасов<sup>1,2</sup>, Ф. Р. Сагитова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ООО Плазма ВСТ, Казань, респ. Татарстан, Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия

<sup>3</sup>ООО "Визион Технолоджи", Москва, Россия

Результаты исследований показывают, что ВЧ плазма пониженного давления позволяет проводить обработку неорганических материалов различной физического природы и структуры: проводящие, полупроводниковые, диэлектрические; металлы и их сплавы; стекла; тонкие пленки, порошковые. С ее помощью можно проводить глубокую очистку и активацию поверхности с удалением дефектных слоев, полировку, упрочнение, наносить и модифицировать тонкопленочные и многослойные покрытия.

Многообразие применений ВЧ плазмы пониженного давления обуславливается некоторыми особенностями, отличающими ее от разрядов, близких по диапазону давлений (тлеющий разряд) или способу ввода энергии (ВЧ индукционный разряд атмосферного давления).

Исследования проводились на ВЧ плазменных установках, состоящих из стандартных блоков и элементов, включающих в себя генератор, ВЧ индуктор и ВЧ электроды, вакуумную систему, систему подачи плазмообразующего газа и диагностической аппаратуры. Изучались свойства разряда в инертных газах (аргон, неон, гелий, криптон) и в смеси аргона с активными газами (кислород, азот, пропан-бутан, углекислый газ, воздух). Исследования проводились в диапазоне расхода плазмообразующего газа от 0 до 0,2 г/с, при изменении давления от 13 до 133 Па. Мощность в разряде варьировалась от 0,5 до 60 кВт, частота генератора изменялась от 1,76 до 30 МГц. В указанных диапазонах реализованы различные виды ВЧ разрядов: индукционные с соленоидальным индуктором, емкостного типа с кольцевыми и плоскими электродами. Свойства плазмы определялись с помощью диагностического комплекса.

В результате комплексных исследований ВЧ разрядов пониженного давления установлено, что в отличие от других видов газовых разрядов, они характеризуются следующим:

1) поток плазмы, вытекающий из разрядной в рабочую камеру, образует плазменную струю длиной до 0,5 м, в которой выделяется до 50% от общей мощности, вкладываемой в разряд. Концентрация электронов в струе на несколько порядков выше, чем она должны быть в распадающейся плазме, и, кроме того, обнаруживается существенное электромагнитное поле;

2) у поверхности тела, помещенного в плазму, образуется слой нескомпенсированного положительного заряда (СПЗ) толщиной, в зависимости от степени термической неравновесности плазмы, от 0,1 до 2 мм. При этом потенциал тела относительно плазмы достигает значений величины 30-100 В;

3) благодаря наличию СПЗ, на поверхность образца поступает слабоинтенсивный ( $0,3 - 25 \text{ А/м}^2$ ) поток низкоэнергетичных (30 – 100 эВ) ионов плазмообразующего газа, который и является основным фактором, воздействующим на свойства поверхностного слоя материала.

При столкновении с поверхностью ионы передают приобретенную кинетическую энергию (30-100 эВ) и энергию рекомбинации атомам кристаллической решетки твердого тела. Это и является основным фактором для реализации процессов глубокой очистки, полировки, повышения усталостной прочности с одновременным наведением остаточных напряжений, создания диффузных и нанодиффузных слоев, нанесение и модификация тонкопленочных покрытий тонкопленочных покрытий.

Для разработки инженерной методики расчета параметров, ответственных за модификацию материалов, разработана математическая модель, описывающая процессы в квазинейтральной плазме, СПЗ и двойном слое. В результате расчетов установлены зависимости основных характеристик плазмы (пространственные распределения электромагнитного поля, концентрации электронов, электронной и газовой температур, энергия ионов и плотность ионного тока на поверхность образца) от параметров установки. Показано, что при энергиях ионов до 100 эВ ионный поток фокусируется на микронеровностях поверхности, следствием чего является избирательный характер плазменной обработки. Обнаруженный эффект является основой реализации перечисленных выше процессов и основным отличием данного вида плазмохимической обработки от других.

Характеристики плазмы ВЧ-разряда в динамическом вакууме отличаются от свойств разряда без продува газа: степень ионизации 10–5–10–4, концентрация электронов  $n_e = 10^{15} - 10^{18}$  1/м<sup>3</sup>, электронная температура  $T_e = 1 - 4$  эВ, температура атомов и ионов 0,03–0,06 эВ. Образец, помещенный в поток плазмы ВЧЕ-разряда в динамическом вакууме, подвергается воздействию потока ионов с энергией 70–100 эВ и плотностью ионного тока 0,1–3 А/м<sup>2</sup> [1].

Модель взаимодействия ионов с полимерным материалом описывается системой уравнений классической молекулярной механики

$$\frac{dv_k}{dt} = \frac{1}{m_k} \sum_{k \neq l} F_{kl}, \quad \frac{dr_k}{dt} = v_k, \quad F_{kl} = -\text{grad } U_{kl}, \quad (1)$$

$$v_k(0) = 0, \quad r_k(0) = r_{k0}, \quad k, l = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Здесь  $v_k$  – вектор скорости  $k$ -ой частицы,  $r_k$  – ее радиус-вектор,  $r_{k0}$  – координаты начального положения частиц,  $F_{kl}$  – сила, действующая на  $k$ -ую частицу со стороны  $l$ -ой частицы,  $m_k$  – масса  $k$ -й частицы,  $t$  – время,  $U_{kl}$  – потенциал взаимодействия частиц с индексами  $k$  и  $l$ ,  $N$  – количество атомов в модели.

Рассматривалась полноатомная модель (*all atom model*) с потенциалом  $U_{k,l}$  Леннард-Джонса (LJ 12-6) с длиннодействующими кулоновскими силами, AIREBO-M [2], ReaxFF [3].

Модель реализована с помощью универсального программного пакета молекулярно-динамического моделирования LAMMPS [4, 5]. Для решения системы уравнений (1)-(2) использован алгоритм Верле. Модель реализована с помощью пакета LAMMPS. Численное интегрирование системы уравнений (1)-(2) проводилось с шагом по времени  $\delta t = 0.1$  фс. Визуализация результатов расчета проводилась в пакете VMD, OVITO [6].

Моделировалась ионная бомбардировка кристаллита СВМПЭ размером  $9 \times 7.6 \times 75$  Å с энергиями ионов 10, 50 и 100 эВ. Наиболее приемлемую картину с точки зрения соответствия существующим представлениям о взаимодействии низкоэнергетичных ионов с материалами даёт потенциал AIREBO-M.

Установлено, что при энергии иона до 10 эВ значительных изменений в структуре полиэтилена не происходит. При энергиях 50 эВ и 100 эВ атомы аргона проникают внутрь материала на глубину 1.8 и 2.8 нм, соответственно. Вдоль траектории движения атома происходит разрыв молекулярных цепочек, вследствие чего образуются короткие алкеновые радикалы. С поверхности полиэтилена эмитируются отдельные атомы углерода и водорода, а также короткие молекулы углеводородов.

Результаты экспериментов показали, что активные алкеновые радикалы реагируют с кислородом воздуха при выносе обработанных образцов из вакуумной камеры после ВЧ-плазменной обработки и на поверхности СВМПЭ волокон возникают функциональные карбонильные группы ( $-C=O$ ), вследствие чего поверхность СВМПЭ приобретает гидрофильные свойства. Разработан процесс объемной обработки пористых материалов (силикагеля различных видов сорбентов), позволяющий существенно улучшить их характеристики за счет увеличения удельной пористости и выравнивания процентного содержания различных пор.

### Литература:

- [1] Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. *Высоочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения.* – Изд-во Казан. ун-та, Казань, 2000.
- [2] O'Connor, T.C. et al. *J. Chem. Phys.* **142** 2 (2015) 24903
- [3] Duin van, A.C.T., et al. *J. Phys. Chem. A* **105** 41 (2001) 9396.
- [4] Plimpton S., *J. Comp. Phys.* **117** (1995) 1
- [5] *LAMMPS: Molecular Dynamics Simulator* <https://www.lammps.org/>
- [6] Kudinov V.V., Krylov I.K., Abdullin I.Sh., Korneeva N.V., Mamonov, Gerov M.V. *Inorganic Materials: Applied Research.* **3** 3 (2012) 257.

igor05071997@mail.ru

## ОСОБЕННОСТИ АЗОТИРОВАНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОТОКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ

**И. Ш. Абдуллин<sup>1</sup>, С. В. Миронов<sup>2</sup>, И. К. Некрасов<sup>1,2</sup>, Ф. А. Гизатуллина<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ООО "Плазма-ВСТ", Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский Федеральный Университет, Казань, Россия

<sup>3</sup>Казанский Национальный Исследовательский Технологический Университет, Казань, Россия

В последнее время с целью повышения износостойкости применяются различные способы нанесения покрытий [1]. Это связано с тем, что стойкость инструмента и оснастки в значительной степени определяется состоянием поверхностных слоев. Тонкое покрытие определяют сопротивлением инструмента контактным воздействиям, в то время как динамическая нагрузка воспринимает основной инструментальный материал. Тонкие износостойкие покрытия наносят в основном газофазным и вакуумным ионо-плазменными методами [2-3].

Процесс нанесения покрытий осуществляется при повышенных температурах (более 400С), что позволяет упрочнить только твердосплавы и быстрорежущие стали. Наличие резкого перехода от покрытия к основе, образующегося при использовании этих методов, также ограничивает сферу их распространения.

Актуальным является разработка методов упрочнения инструмента и оснастки методами химико-термической обработки [4].

При этом перспективным методом повышения стойкости инструмента и оснастки является метод упрочнения в ВЧИ-разряде пониженного давления. Этот метод позволяет в один процесс соединить химико-термическую обработку и нанесение покрытия за достаточно короткий промежуток времени. Процесс получения диффузионных покрытий с помощью струйного ВЧИ разряда пониженного давления реализуется в ВЧИ-плазменной установке, описанной в [5]. Эксперименты проводились при варьировании входных параметров установки в следующих пределах:  $p = 13,3 - 133 \text{ Па}$ ,  $G = 0,04 - 0,12 \text{ г/с}$ ,  $Wp = 0,5 - 3 \text{ кВт}$ , в качестве плазмообразующих газов применялись Ar, пропан-бутан, азот и их смесь в соотношении 70:30%,  $f = 1,76 \text{ мГц}$ , длительность обработки  $t = 1-30$  минут.

Существенным отличием модификации в ВЧИ-разряде пониженного давления с продувом газа является то, что у поверхности тела образуется слой не скомпенсированного положительного заряда (СПЗ). При этом потенциал тела относительно плазмы достигает 70-100В, в результате этого поверхность тела бомбардируется потоком низкоэнергетических ионов с энергией 30-50эВ и плотностью потока 1,5 – 15А/м<sup>2</sup>.

Этот процесс является доминирующим при создании диффузионных покрытий с помощью струйного ВЧИ-разряда пониженного давления. При этом температура разогрева деталей не превышает 350°С, что позволяет упрочнить любые марки стали.

Выбор элементов, способных модифицировать поверхность инструментов, определяется их ролью в процессе износа, которую можно объяснить с позиции теории дислокации. По данным [6] наиболее сильно с дислокациями взаимодействуют атомы углерода и азота, образуя локальные повышенные концентрации (так называемые «облака Коттрелла»). Растворенные в решетке железа по типу внедрения атомы углерода и азота накапливаются у ядра дислокации и могут иметь конфигурацию, присущую карбиду или нитриду. Растворимость нитрида (карбида) может зависеть от типа дислокационных петель. Функционирование модели, описывающей комбинацию «дислокация – нитрид-атом внедрения» можно представить следующим образом:

1. Имплантированные атомы азота способствуют образованию дислокационных петель в решетке железа, а сами концентраторы у ядра дислокации уподобляются нитриду;
2. Образующиеся в процессе износа новые дислокации являются ловушками для внедренных атомов азота, которые мигрируют к ним, образуя «облака Коттрелла», упрочняя тем самым материал.

Результаты исследования воздействия потока низкоэнергетических ионов азота при температуре 350С, при которой диффузионные процессы ничтожно малы, показали, что распространение атомов внедрения вглубь возможно лишь по теории «викерсов».

Для проведения экспериментов использовались образцы инструментальных сталей марок: X12M, P6M5, P7M2Ф6, P2MФ2. Твердость по Роквеллу составляла 60-63ед., которая определялась в соответствии с ГОСТом на ТП-2, а микротвердость на микротвердомере ПМТ-3. Износостойкость образцов исследовалась в условиях абразивного изнашивания на специальном стенде (конструкция СКТБ «Мединструмент»). Стойкость сверл из стали марки P6M5 диаметром 8мм оценивались по

количеству просверленных отверстий. Критерием снятия сверла с испытаний принимали полную потерю сверлом режущих свойств. Наилучшие результаты получены при использовании смеси газов – 70% Ar и 30% N<sub>2</sub>, W<sub>i</sub> = 50эВ, j<sub>i</sub> = 15А/м<sup>2</sup>, t = 30 мин., Gсмеси = 0,1г/с, p = 26,6Па, расстояние от среза плазмотрона до изделия – 60мм. Для стали Х12М при исходной твердости 8000МПа произошло ее увеличение в 2,5 раза, а износостойкости в 3 раза, а для стали Р6М5 стойкость сверл увеличилась в 2,6 раза. При этом глубина модифицированного слоя достигла 150мкм (определено на косых шлифах образцов с помощью микроскопа МИИ-4).

Выводы: таким образом обработка потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазменной струи ВЧИ-разряда пониженного давления, позволяет улучшить физико-механические, технологические и эксплуатационные показатели по сравнению с контрольными, установлены оптимальные режимы плазменной обработки для каждой исследуемой стали.

#### **Литература:**

- 1] Полевит С.Ч., Евдокименко В.О. Упрочнение металлов: справочник. – М. Машиностроение, 1986 – 320с.
- [2] Клименко Г.К., Ляпин А.А. Генераторы плазмы. – М. изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана 2010. – 63с.
- [3] Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М. изд-во Металлургия. 1992. – 432с.
- [4] Е.В. Берман, Н.Н. Коваль, А.А. Сейдман Плазменная химико-термическая обработка стальных деталей М.: Техносфера, 2012 – 464с.
- [5] И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, Н.Ф. Кашапов Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов. Теория практического применения Казань, изд-во Казанского университета – 348с.
- [6] Ионная имплантация. Под. Ред. Дж.К. Хирвонена. – М. Металлургия, 1985 – 693с.

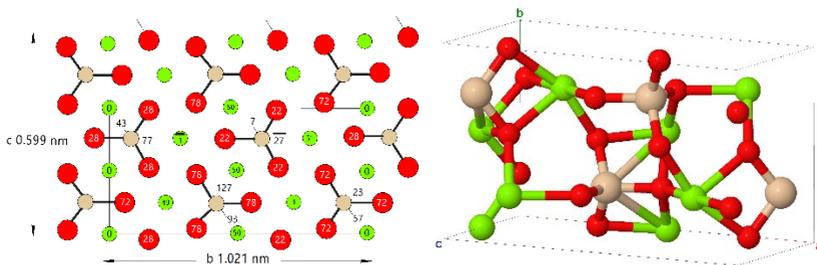
igor05071997@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ $\text{SiO}_2$ НА МОРФОЛОГИЮ ФОРСТЕРИТОВОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО В СРЕДЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

В. В. Шеховцов<sup>1</sup>, А. Б. Улмасов<sup>1</sup>, Н.К. Срипникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Томск, Россия

Быстрое развитие новых технологий требует разработки новых методов синтеза материалов с заданными свойствами. В данной работе упор сделан на синтез форстеритового материала с использованием энергии термической плазмы. Форстерит  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  является востребованным материалом в высокотемпературных отраслях промышленности благодаря своим характеристикам при повышенных температурах. Контролируемая чистота и кристаллические фазы являются ключевыми требованиями для синтеза материалов нового класса, но на сегодняшний день присутствуют ограничения в понимании синтетических методов, которые позволили бы осуществлять контроль на наноуровне [1-3]. Структура  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  состоит в основном из аниона  $\text{SiO}_4^{2-}$  и катиона  $\text{Mg}^{2+}$  [4], как показано на рисунке 1.



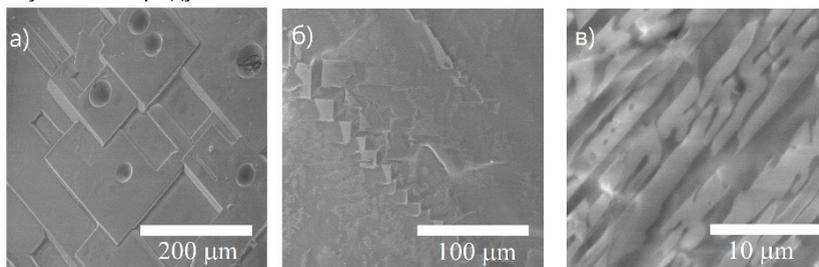
**Рисунок 1.** Структура форстерита  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , проекция на плоскость (100). Цвет: красный — O, зеленый — Mg, бежевый — Si; Связи Si-O выделяют тетраэдры  $\text{SiO}_4$ . Типы положений атомов обозначаются высотами, как показано числами внутри или рядом с кругами.

Кремний является центральным атомом в  $\text{SiO}_4^{2-}$  анион. Каждый атом кислорода связан с кремнием одинарной ковалентной связью. Четыре атома кислорода имеют частичный отрицательный заряд из-за ковалентной связи с кремнием. Следовательно, атомам кислорода необходимо держаться далеко друг от друга, чтобы уменьшить силу отталкивания между

ними. Таким образом, для того чтобы синтезировать настолько сложную структуру необходимо обеспечить высокоэнергетическую среду. Одним из видов генерации высокоэнергетической среды является использование электродуговых плазмотронов, которые позволяют реализовать условия с среднемассовой температурой  $\sim 7000$  К. Данный тип источника апробирован на синтезе муллита  $3\text{Al}_2\text{O}_3$  [5], шпинели  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  [6] и анортита  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$  [7]. Целью данной работы является установить закономерности формирования морфологии продуктов синтеза в зависимости от содержания  $\text{SiO}_2$  в исходном составе шихты.

В качестве исходных материалов для синтеза  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  использовали природные материалы оксид магния (Савинское месторождение) и кварцевый песок (Туганское месторождение). Выбранные материалы предварительно проходили изотермическую выдержку при  $950$  °С. После подготовленные исходные материалы смешивали пропорцией, соответствующей форстериту ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) с повышением  $\text{SiO}_2$  до  $55$  %, гранулировали со связующим  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)$  n, сушили при температуре  $60$ °С. Сырье подвергалось плавлению с использованием энергии термической плазмы в графитовом тигле при режиме: сила тока  $100$  А; напряжение  $120$  В; расход плазмообразующего газа – воздух  $1$  г/с; время плавления  $30$  с.; температура внешней графитовой стенки тигля  $2236$  К.

На рисунке 2 представлены электронные снимки поверхности скола полученных продуктов плавления.



**Рисунок 2.** Морфология поверхности скола полученного продукта плавления  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ : а)  $\text{SiO}_2$  -  $40\%$ ; б)  $\text{SiO}_2$  -  $45\%$ ; в)  $\text{SiO}_2$  -  $55\%$

Структура форстерита (рис. 2, а) представлена плотной упаковкой остроугольных призматических кристаллов, отсутствуют области переходных форм конденсированной фазы. Размер кристаллов варьируется от  $10$  до  $200$  мкм. С увеличением содержания  $\text{SiO}_2$  в составе исходной шихты наблюдается растворение  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , происходит формирование переходных

форм конденсированного материала. При этом стоит отметить, что новообразование фаз формируются на углах кристаллов  $Mg_2SiO_4$  (рис. 2, б) и выстраивают дендритную морфологическую структуру. фазы. При содержании  $SiO_2$  55 масс. % морфология синтезируемого образца представлена вытянутыми кристаллами прямоугольной формы, при этом присутствуют межзерновые границы, отличающиеся по морфологическому признаку.

Таким образом, в данной работе показана возможность синтеза форстеритового материала в среде термической плазмы. Установлено влияние  $SiO_2$  при концентрации от 40-55 масс. %. в составе шихты на морфологию синтезируемых образцов.

*Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001 и гранта Президента РФ МК-66.2022.4.*

#### **Литература:**

- [1] S.M. Mirhadi, A. Forghani, F. Tavangarian, A modified method to synthesize single-phase forsterite nanoparticles at low temperature. *Ceramics International*. V. 42. 2016. P.7974-7979.
- [2] Liugang Chen, Qingfeng Wang, Bart Blanpain, Annelies Malfliet, Muxing Guo. Low temperature synthesis of forsterite from hydromagnesite and fumed silica mixture. *Ceramics International*. V. 41, 2015. P. 2234-2239.
- [3] Ratnawulan R, Fauzi A. Synthesis and Characterization of Forsterite ( $Mg_2SiO_4$ ) Nanomaterials of Dunite from Sumatera. *Recent Advances in Pyrolysis*. IntechOpen. 2020.
- [4] *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Editor-in-Chief Daniel Hillel Columbia University, New York, NY, USA. Academic Press. 2005. ISBN 978-0-12-348530-4.
- [5] Synthesis of Mullite-Containing Ceramics in a Low-Temperature Plasma / V. V. Shekhovtsov, N. K. Skripnikova, O. G. Volokitin, R. E. Gafarov // *Glass Physics and Chemistry*. – 2022. – Vol. 48, No. 5. – P. 440-443.
- [6] В. В. Шеховцов, Н. К. Скрипникова, А. Б. Улмасов. Морфологические особенности керамической матрицы на основе  $MgAl_2O_3$  синтезируемой в среде термической плазмы // *Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России*. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет. 2022. – С. 209-211.
- [7] N. Skripnikova, M. Semenovych, V. Shekhovtsov. Anorthite-based building ceramics // *Magazine of Civil Engineering*. – 2023. – No. 1(117). – P. 11706.

[akhrorbek001@mail.ru](mailto:akhrorbek001@mail.ru)

## ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ КАРБИДА ГАФНИЯ В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ

**А. А. Свинухова<sup>1,2</sup>, В. В. Шеховцов<sup>1</sup>**

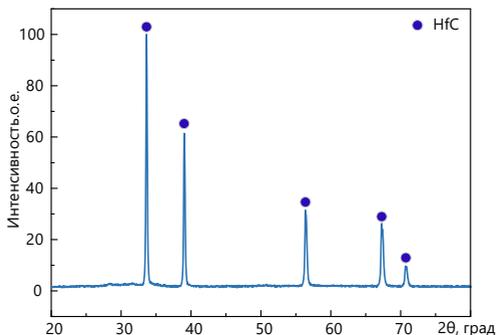
<sup>1</sup>ФГБОУ Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>ФГАУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

С каждым годом рабочие температуры современной промышленности увеличиваются, а вместе с ними растёт спрос на ультратугоплавкие материалы (УНТС). Одним из представителей класса УНТС является карбид гафния HfC который обладает высокой температурой плавления (свыше 3800°C [1]), уникальными механическими и физико-химическими свойствами [2-4] (например: модуль упругости – 350-510 ГПа [5], твердость 26,1 ГПа [6]) Таким образом, спектр применения HfC достаточно широк: производство режущего и бурового инструмента [7], реактивных двигателей [8], излучателей теплового поля [9]. Обычно карбид гафния получают методом искрового плазменного спекания [10], с помощью механосинтеза при последующем отжиге в инертной среде [11]. Перечисленные методы требуют наличия вакуумного оборудования и длительной подготовки к эксперименту, что увеличивает трудоёмкость процесса.

В настоящей работе описывается плазменный синтез карбида гафния в воздушной атмосфере. Для синтеза использовали порошки гафния с размером частиц 10 мкм российского производства компании «Редкий металл» и углерода полученный методом пиролиза из кедровой скорлупы. Смесь исходных порошков с стехиометрическим соотношением Hf/C ~14.8 была подвержена гомогенизации в планетарной мельнице (PM100 Retsch, Германия) в течение 15 минут при частоте 400 об/мин и затем подвержена плазменному воздействию. Экспериментальные исследования по синтезу карбида гафния проводились на электроплазменном стенде, при следующих параметрах: сила тока 40 А, напряжение 100 В, расход плазмообразующего газа - азота 0,5 л/мин, время синтеза 180 с. Продукт плазмохимического синтеза был исследован методами рентгеновской дифрактометрии (Shimadzu XRD 7000s,  $\lambda=1.54060\text{\AA}$ ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (FIB Quanta 200 3D FEI, США).

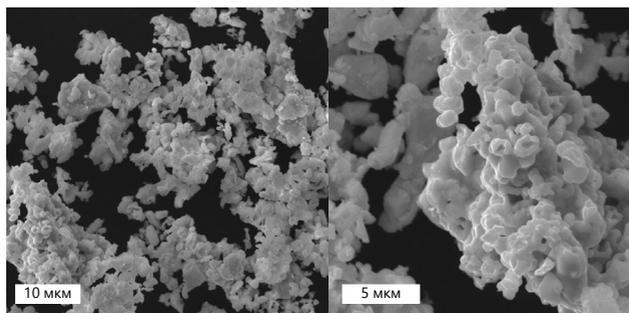
На рисунке 1 представлены результаты рентгеновской дифрактометрии  $20 \leq 2\theta \leq 80$  синтезированного порошка на электроплазменном стенде в воздушной атмосфере.



**Рисунок 1.** Картина рентгеновской дифрактометрии при  $20 \leq 2\theta \leq 80$

По данным рентгеновской дифрактометрии идентифицируется карбид гафния HfC с кубической кристаллической решеткой типа NaCl с параметром решетки  $a=4,61 \pm 0,04$  Å. Присутствие примесей на рентгеновской дифрактограмме не идентифицируется.

На рисунке 2 представлены результаты СЭМ синтезируемого порошка HfC.



**Рисунок 2.** Сканирующая электронная микроскопия продукта синтеза HfC

На микроснимках идентифицируются агломераты частиц размерами от единиц до десятков микрометров. Согласно данным энергодисперсионного анализа в исследуемом порошке содержится углерод в количестве 53,43 ат.%, гафний в количестве 44,08 ат.% и примеси в количестве 2,50 ат.%.

Таким образом, в данной работе был исследован процесс плазменного синтеза HfC в воздушной атмосфере. Были проведены эксперименты, в ходе которых установлено, что синтезируемый порошок характеризуется кубической кристаллической решеткой типа NaCl с параметром решетки  $a=4,61\pm 0,04$  Å, размер частиц находится в пределах от единиц до десятков микрометров. Данные выводы подтверждают успешность исследований по синтезу HfC в воздушной атмосфере с использованием плазменного метода. Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего совершенствования процесса синтеза и применения полученного HfC в различных отраслях промышленности.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001.

#### **Литература:**

- [1] X.-L. Qiu, X.-H. Gao, G. Liu. *Thin Solid Films*. 713, 1-6 (2020). DOI: 10.1016/j.tsf.2020.138349
- [2] Q. Wen, Z. Yu, R. Riedel, E. Ionescu. *J. Eur. Ceram. Soc.* 40, 3499-3508 (2020). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.067
- [3] Y. Fu, Y. Zhang, J. Zhang, G. Chen, T. Li. *Corros. Sci.* 185, 1-10 (2021). DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109443
- [8] N. Ni, W. Hao, T. Liu, L. Zhou, F. Guo, X. Zhao, P. Xiao. *Ceram. Int.* 46, 23840-23853 (2020). DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.06.161
- [4] N. Patran, N. Al Nasiri, D.D. Jayaseelan, W.E. Lee. *Ceram. Int.* 42, 1959-1963 (2016). DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.09.166
- [5] J. Li, Y. Zhang, Y. Fu, T. Fei, Z. Xi. *Ceram. Int.* 44, 13335-13340 (2018). DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.04.165
- [6] Y. Fu, Y. Zhang, J. Zhang, T. Li, G. Chen. *Ceram. Int.* 46, 16142-16150 (2020). DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.03.168
- [7] A.M. Abdelkader, D.J. Fray. *J. Eur. Ceram. Soc.* 32, 4481-4487 (2012). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2012.07.010
- [9] J. Cheng, J. Wang, X. Wang, H. Wang. *Ceram. Int.* 43, 7159-7165 (2017). DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.02.152
- [10] R. He, L. Fang, T. Han, G. Yang, G. Ma, J. Liu, X. Chen, L. Xie, L. Liu, Q. Li, Y. Tang, H. Liang, Y. Zou, F. Peng. *J. Eur. Ceram. Soc.* 42, 5220-5228 (2022). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.06.039
- [11] B.B. Bokhonov, D.V. Dudina. *Ceram. Int.* 43, 14529-14532 (2017). DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.07.164

aag109@tpu.ru

## ВЛИЯНИЕ $\text{SiO}_2$ НА СИНТЕЗ СТЕКЛОКЕРАМИКИ $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ В СРЕДЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

**В. В. Шеховцов<sup>1</sup>**

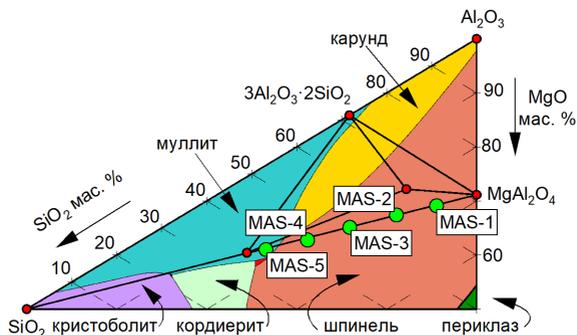
<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

Разработка методов синтеза стеклокерамики на основе алюмомагнетизальной шпинели  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  имеет высокую актуальность в современном мире [1-3]. Стеклокерамика представляет собой материал, обладающий свойствами и характеристиками как стекла, так и керамики. Такой класс керамики обладает высокой прочностью, жаростойкостью, термической и химической стабильностью, а также электроизоляционными свойствами. Одной из областей применения стеклокерамики на основе  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  является электронная промышленность. Благодаря своей высокой термической стабильности и электроизоляционным свойствам, она может использоваться для создания электронных компонентов, таких как подложки для полупроводниковых устройств, интегральные схемы и т.д. Другая область применения – промышленность высоких температур. Стеклокерамика на основе  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  обладает высокой термической стойкостью до 1900 К поэтому использоваться для создания огнеупорных материалов, используемых в металлургической, энергетической и других промышленности, где присутствуют высокие температуры. В данной работе рассмотрено влияние  $\text{SiO}_2$ , как стеклообразующего элемента при синтезе керамической матрицы  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  в среде термической плазмы. В таблице 1 представлен оксидный состав (мас. %) используемых материалов для проведения экспериментальных исследований.

Таблица 1. Оксидный состав материалов

Материалы	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	MnO	$\Delta m_{\text{прк}}$
Магнезит	1,60	0,59	0,80	0,85	48,39	0,05	50,26
Бёмит	0,03	99,0	0,02	–	–	–	0,9
Кварцевый песок	98,15	0,67	0,09	0,07	0,02	–	0,94

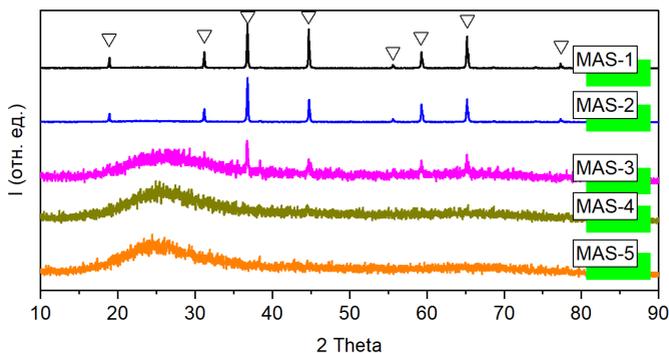
На рисунке 1 представлена часть трехкомпонентной диаграммы состояния  $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ , где отмечены приготовленные составы шихт, которым присвоен шифр (MAS-1, 2, 3 и т.д.). Порядковый номер соответствует количеству вводимого диоксида кремния к стехиометрическому составу шпинели. Например, индекс 1 соответствует 10 мас. % диоксида кремния в шихте.



**Рисунок 1.** Участок диаграммы состояния MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> с указанием экспериментальных составов

Экспериментальные исследования проводились на электроплазменном стенде [3], в основу которого положено использование энергии термической плазмы для плавления твердофазных материалов. Плавление проводилось в графитовом тигле высотой 60 мм и диаметром 25 мм. Масса засыпки составляла 10 г. Синтез образцов проводился при мощности 12 кВт, в течении 90 с.

На рисунке 2 представлены результаты рентгенофазового анализа полученных продуктов плавления из исследуемых составов.

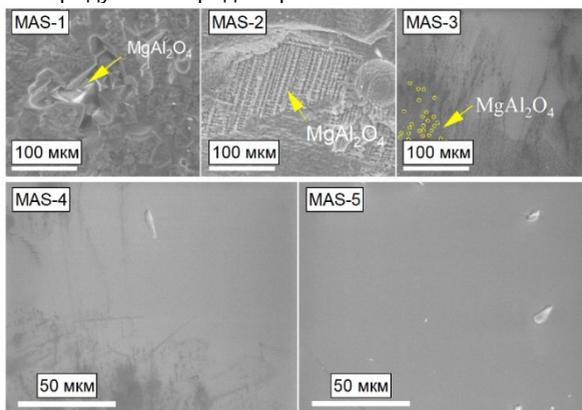


**Рисунок 2.** Экспериментальные дифрактограммы синтезируемых образцов MAS в среде термической плазмы

Установлено, что в образцах MAS-1 и MAS-2, где содержание диоксида кремния SiO<sub>2</sub> не превышает 20 мас. %, фазовых образований не протекает, бинарные соединения типа (2MgO·SiO<sub>2</sub>, MgO·SiO<sub>2</sub>, 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) не

установлены. Это обосновано высокой скоростью кристаллизации шпинели  $MgAl_2O_4$  в системе  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ , введу того, что  $MgAl_2O_4$  имеет наивысшую точку конгруэнтной температуры плавления  $2135\text{ }^\circ\text{C}$ . С увеличением содержанием диоксида кремния от 30 до 50 мас. %, влияние  $SiO_2$  является существенным, формируется квазиаморфная фаза в структурной матрице материала. При этом в образце MAS-3 прослеживаются слабые интенсивности стехиометрической кристаллической фазы  $MgAl_2O_4$  при  $2\theta = 36,6; 44,7; 59,3; 65,4^\circ$ . С увеличением содержанием диоксида кремния от 30 до 50 мас. %, влияние  $SiO_2$  является существенным, формируется квазиаморфная фаза в структурной матрице материала. При этом в образце MAS-3 прослеживаются слабые интенсивности стехиометрической кристаллической фазы  $MgAl_2O_4$  при  $2\theta = 36,6; 44,7; 59,3; 65,4^\circ$ . Образцы MAS-4 и MAS-5 характеризуются, как материал, состоящий из квазиаморфной фазы и методом рентгенофазового анализа, невозможно определить количество растворенной  $MgAl_2O_4$  в составе синтезируемых образцов. Стоит отметить, что с увеличением  $SiO_2$  диффузионное гало стремится к сужению и показывает доминацию атомов  $Si^{4+}$  при формировании решетки.

На рисунке 3 представлены электронные снимки скола поверхности синтезируемых продуктов в среде термической плазмы.



**Рисунок 3.** Электронные снимки поверхности скола синтезируемых образцов MAS с различным содержанием  $MgAl_2O_4/SiO_2$  в среде термической плазмы

С точки зрения формирования морфологических признаков объемной матрицы в образце MAS-1, как и положено формируются октаэдрические кристаллы размером от 10 мкм до 60 мкм [3]. В некоторых областях между

границ разделов кристаллов наблюдается однородная связка (гомогенной по структурном признаку), но данные области отличаются от состава стехиометрической шпинели (присутствуют следы  $\text{SiO}_2$ ). Однако её вклад в формирование всей матрицы материала минимален, в большей степени присутствует плотная упаковка октаэдрических кристаллов  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ .

В образце MAS-2 наблюдается уменьшение размеров октаэдрических кристаллов  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  в плоть до микронных и субмикронных размеров. Это достигается за счет поверхностного диффузионного перемешивания атомов шпинели при контакте с локальными областями жидкой фазы представленной  $\text{SiO}_2$ . Это находит своё подтверждение с постепенным увеличением содержание  $\text{SiO}_2$  в рассматриваемых композициях (MAS-3). Так как в образце MAS-3 просматриваются субмикронные включения кристаллической фазы  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  (отмечены желтыми областями рис. 3), что согласуются и с результатами рентгенофазового анализа (рис. 2).

Также стоит отметить, что при содержании  $\text{SiO}_2$  от 30 до 40 мас. % растворение кристаллической фазы шпинели сопровождается с образованием локальных областей с обогащением Mg и Al, т.е. протекает дифференциация в конденсированной фазе. В образце MAS-5 разделение по структурному фактору в матрице не прослеживается. Это достигается полным растворением кристаллов шпинели, что приведет к образованию единого материала без наглядного присутствия кристаллических фаз, т.е. кристаллы шпинели разрушаются и ионы  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Al}^{3+}$  внедряются в сформированную квазиаморфную матрицу, замещая атомы  $\text{Si}^{4+}$ . Кроме того, атомы кислорода из шпинели также могут переходить в стекло (аморфное состояние, при котором структура материала не имеет дальнего порядка) и образовывать дополнительные связи аморфных силикатов.

### **Литература:**

[1] Dan Han, Jian Zhang, Peng Liu, Gui Li, Liqiong An, Shiwei Wang. Preparation of high-quality transparent Al-rich spinel ceramics by reactive sintering // *Ceram. Int.* 2018. № 44 (3). P. 3189–3194.

[2] Katja Waetzig, Andreas Krell. The effect of composition on the optical properties and hardness of transparent Al-rich  $\text{MgO-nAl}_2\text{O}_3$  spinel ceramics // *J. Am. Ceram. Soc.* 2016. № 99 (3). P. 946–953.

[3] Шеховцов В. В. Стеклокерамика на основе шпинели  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , полученная методом плазменной плавки // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 151-161.

[Shehovcov2010@yandex.ru](mailto:Shehovcov2010@yandex.ru)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

**Д.А. Егошин<sup>1</sup>, Д.О. Новиков<sup>1</sup>, А.В. Павлов<sup>1</sup>, Д.С. Пасынкова<sup>1</sup>, В. Д. Телех<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Полимерные материалы (ПТФЭ, ПОМ, ПММА, ...) являются плазмообразующими материалами в таких устройствах и процессах как генераторы и ускорители плазменных микросгустков, импульсный разряд с аблирующим диэлектриком, лазерная абляция полимеров. В основе работы этих устройств лежит возникновение ускоренного плазменного потока при испарении полимера в условиях экстремального теплового и оптического нагружения. Таким образом, лазерная абляция (в лазерных) и светозероизация (в плазменных установках) являются основным плазмообразующим процессом и определяют массовый расход рабочего вещества [1, 2, 3].

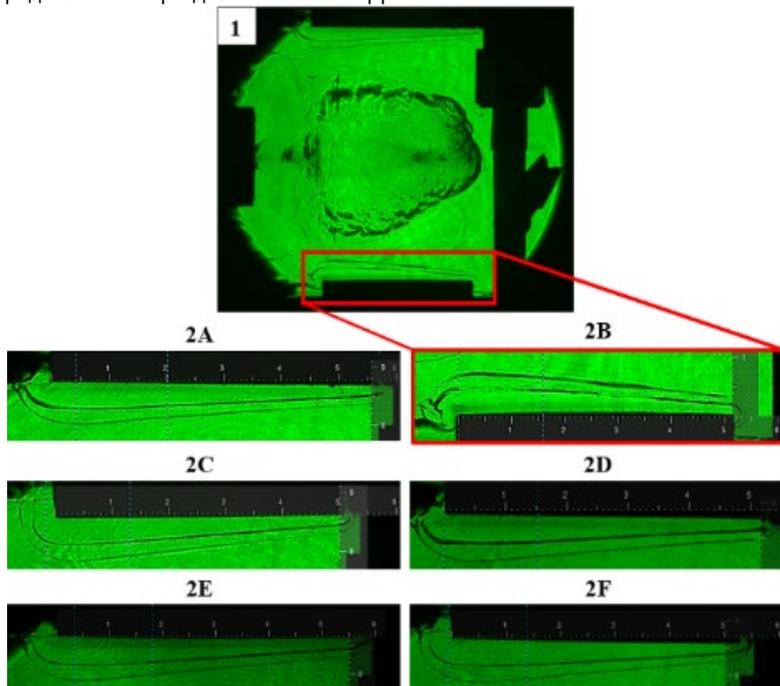
Термин «абляция» означает унос вещества с поверхности твердого тела под действием потока энергии. При этом имеется в виду любой вид энергетического воздействия – высокой температуры, электромагнитного излучения, потоков ускоренных частиц, горячего газа, твердых частиц и т.п.; и унос вещества в любой форме – атомов, молекул пара, атомных кластеров, их смеси. Одним из видов энергетического воздействия является излучение. При этом при лазерном воздействии имеет место лазерная абляция, а импульсных разрядах – абляция (светозероизация) под действием высокояркостного широкополосного излучения УФ-ВУФ области спектра.

Для выяснения особенностей физико-химических процессов при экспозиции высокояркостного ВУФ/УФ излучения на поверхность полимеров и изучения их абляции необходимо применять такие методики, которые позволят установить особенности газодинамического «отклика» от поверхности облучаемой мишени и определить параметры генерируемой плазмы. Целью настоящего исследования было разработать метод количественной оценки реакции облученных полимеров и получить новую информацию об абляции полимеров при воздействии мощного широкополосного VUV-излучения.

Для моделирования испарения полимеров под действием излучения ВУФ диапазона спектра использовалось излучение разряда магнитоплазменного компрессора (МПК) эрозионного типа [4-8]. Спектральным составом излучения разряда можно управлять с помощью фонового газа [9-10], а плотностью мощности излучения на поверхности исследуемого образца – изменением расстояния от разряда до образца. Подробное описание экспериментальной

установки, характеристик разряда МПК, методик оптической диагностики и некоторых особенностей обработки результатов представлено в [6-8].

В ходе эксперимента была получена серия Шлирен-фотографий, на которых наблюдается характерная газодинамическая структура над облучаемой поверхностью [5-8]. На рис. 1 приведены фотографии на задержке 8 мкс от начала разряда в неоне при давлении 100 Торр.



**Рисунок 1.** Шлирен-фотографии разряда (1) и приповерхностных газоплазменных потоков (2А – 2F). Неон, через 8 мкс после начала разряда. (А - капролон, В - политетрафторэтилен, С - полиацеталь-Н, D - полиэтилен, Е - поливинилхлорид, F - полиацеталь-С)

Анализ полученных теневых фотографий (рис. 1) позволяет определить параметры ударной волны, ударно-сжатого газового слоя и плазменного слоя. Плазменный слой образовался из паров материала образца в результате абляции и последующей фотоионизации. Излучение разряда нагревает, испаряет и ионизирует пары образца, что приводит к расширению и сжатию фонового газового слоя над поверхностью образца. Движение контактной границы "плазма-ударно-сжатый газ" происходит со скоростями, сравнимыми с локальной скоростью звука.

Предполагая [6-10], что активное испарение начинается примерно через 3 мкс после иницирования разряда, можно оценить скорость ударной волны. Результаты показывают, что наибольшей интенсивностью испарения обладают поливинилхлорид и полиэтилен.

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана, при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по государственному заданию 0705-2020-0005.

**Литература:**

- [1] Bityurin, N.; Luk'yanchuk, B. S.; Hong, M. H.; Chong, T. C. Models for Laser Ablation of Polymers, *Chem. Rev.*, 2003, 103, 519-552. <https://doi.org/10.1021/cr010426b>.
- [2] Urech, L.; Lippert, T. Photoablation of Polymer Materials. In *Photochemistry and Photophysics of Polymer Materials*, Allen, N.S., Ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, USA, 2010; pp. 541-568. <https://doi.org/10.1002/9780470594179.ch14>.
- [3] Skurat, V. Vacuum ultraviolet photochemistry of polymers. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 2003, 208, 27-34. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)00636-0](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00636-0).
- [4] Pavlov A.V., Protasov Yu. Yu., Telekh V.D., Shchepanyuk T.S. Laser holographic interferometry of short ultraviolet radiation with high power density interaction with condensed matters // *Scientific Visualization*. 2019. 11 (3). P. 111-125. <https://doi.org/10.26583/sv.11.3.10>
- [5] Skriabin A.S., Telekh V.D., Pavlov A.V., Pasyukova D.S. et al. Surface Degradation of Thin-Layer Al/MgF<sub>2</sub> Mirrors under Exposure to Powerful VUV Radiation // *Nanomaterials*. 2023. 13 (21). 2819.
- [6] Pavlov A.V., Shchepanyuk T.S., Skriabin A.S., Telekh V.D. Gas Dynamics Processes above the Polymers Surface under Irradiation with Broadband High-Brightness Radiation in the Vacuum Ultraviolet Spectrum Region // *Polymers*. 2022. V. 14. 3940. <https://doi.org/10.3390/polym14193940>
- [7] Telekh V.D., Pavlov A.V., Kirillov D.V., Vorob'ev E.V. et al. Experimental Study of Irradiation of Thin Oxide and Mo/Si Multilayers by High Brightness Broadband VUV/UV Radiation and Their Degradation // *Coatings*. 2022. 12 (2). 290. <https://doi.org/10.3390/coatings12020290>
- [8] Kozlov N.P., Protasov Yu.S. On the mechanism of a plasma focus formation in an ablation type magnetoplasma compressor // *Phys. Lett. A*. 1978. 67. P. 191-193.
- [9] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. The Qualitative and Quantitative Study of Radiation Sources with a Model Configuration of the Electrode System // *Symmetry*. 2021. V. 13 (6). 927.
- [10] Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Protasov Yu.S., Shashkovskii S.G. Bright thermal VUV sources based on plasmodynamic discharges in gases // *High Temp*. 1989. 27. P. 141-155.

## ПОУРОВНЕВАЯ КИНЕТИКА ВОЗДУХА В ПОСЛЕРАЗРЯДНОЙ ЗОНЕ ОДИНОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

**М. Ю. Мельник<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

За ударными волнами [1, 2], в течениях в соплах [3], в лазерных установках и в низкотемпературной плазме [4, 5] часто частицы находятся в сильнонеравновесных состояниях. Для корректного моделирования подобных течений необходим учёт отклонений от термодинамического равновесия. Для описания подобных течений представляет интерес использование поуровневого приближения [3]. Его ключевой особенностью является рассмотрение электронно-колебательных состояний частиц как отдельных сортов газа. В данной работе с помощью поуровневой кинетики исследуется релаксация неравновесного воздуха в послеразрядной зоне импульсного разряда постоянного тока эксперимента [6]. Особое внимание уделено влиянию моделей химических реакций на поведение основных параметров газа.

Рассмотрена воздушная смесь, состоящая из N<sub>2</sub>, 21% O<sub>2</sub> и 0,8% NO, находящаяся при начальном давлении 1,33 мбар и температуре 300 К. Моделировалась релаксация газа после 5 мс импульсного разряда с силой тока 150 мА. Для описания неравновесной кинетики использовались различные модели описания колебательных энергообменов, диссоциации, рекомбинации и реакций обмена.

Моделирование проведено в нульмерной постановке [7] с использованием упрощённой кинетической схемы. Задача реализована в авторском программном комплексе [8], разработанном для анализа моделей поуровневой кинетики и опубликованном в открытом доступе.

В результате получено хорошее согласие с экспериментальными измерениями послеразрядной зоны. В дополнение к предложенной в [7] кинетической схеме для описания колебательных энергообменов рассмотрена теоретически более обоснованная модель Нагруженного гармонического осциллятора (FHO) [9], а для реакций Зельдовича недавно предложенная коллективом кафедры модель [10]. Оценено влияние выбора

моделей для этих процессов, а также влияние учёта процессов диссоциации при столкновении с тяжёлыми частицами в сравнении с экспериментальными измерениями [6] и теоретическим расчётом [7]. Полученные результаты расширяют инструменты анализа и валидации подходов, а также увеличивает количество доступных коллективу условий для исследований.

### **Литература:**

- [1] Campoli L., et al. *Acta Astronaut.* 175 493–509 (2020)
- [2] Кравченко Д. С., и др. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*, Т. 9 (67). Вып. 3. С. 426–439, (2022)
- [3] Нагнибеда Е. А., Кустова Е. В. Кинетическая теория процессов переноса и релаксации в потоках неравновесных реагирующих газов. — СПб.: Изд-во во С.-Петербургского университета, 2003
- [4] Lepikhin N. D., Popov N. A., Starikovskaia S. M. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 31 084002, (2022)
- [5] Saifutdinov A. I. *Plasma Sources Sci. Technol.* 31 094008, (2022)
- [6] Hubner M., et al. *Meas. Sci. Technol.* 23 115602, (2012)
- [7] Pintassilgo C. D., et al. *Plasma Sources Sci. Technol.* 23 025006, (2014)
- [8] <https://github.com/MaksimMelnik/STS-Simple-Solver/>
- [9] Adamovich I., et al. *J. Thermophys. Heat Transf.*, 12:1 57–65, (1998)
- [10] Kustova E., et al., *AIP Conf. Proc.* 1959 (1) 060010, (2018)

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

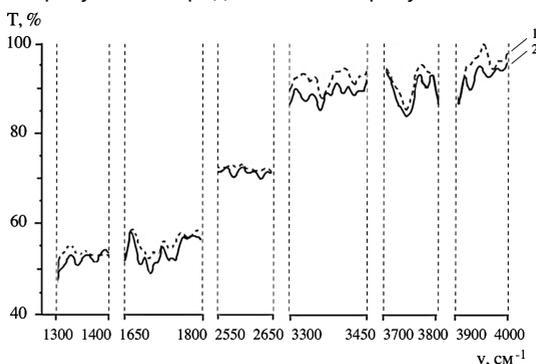
Ю. А. Тимошина<sup>1</sup>, Э. Ф. Вознесенский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технологический университет", Казань, Россия

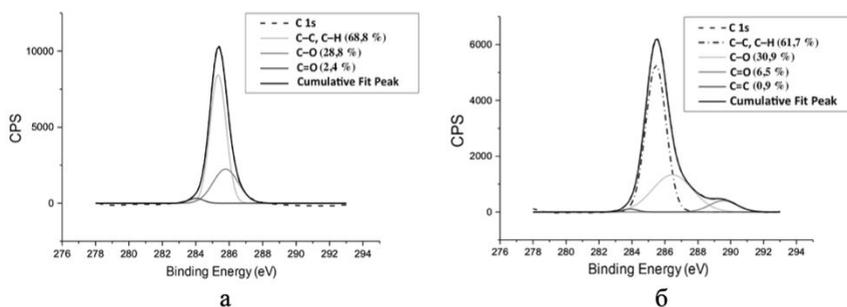
Модификация синтетических волокнистых материалов в плазме высокочастотного разряда пониженного давления позволяет регулировать поверхностные свойства материалов и может быть использована для повышения их адгезионной и сорбционной способности. Модификация в плазме воздуха обеспечивает повышение свободной поверхностной энергии полимерных материалов в результате образования в поверхностном слое полярных функциональных групп [1, 2].

Для уточнения механизмов плазменной модификации исследованы изменения химического состава синтетических материалов методами инфракрасной (ИК) спектроскопии (IRAffinity-1, Shimadzu, Япония) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) (Specs PHOIBOS 150 MCD9, SPECS, Германия). Модификация образцов полиэтиленовых волокон и пленок осуществлялась в экспериментальной высокочастотной емкостной плазменной установке (ФГБОУ ВО «КНИТУ») при мощности разряда 1,8–2,2 кВт, времени обработки 5–10 мин, давлении в рабочей камере 10–30 Па, расходе плазмообразующего газа воздуха 0,95–0,98 н.см<sup>3</sup>/мин.

Полученные результаты представлены на рисунках 1, 2.



**Рисунок 1.** Фрагменты ИК-спектров образцов полиэтиленовых волокон:  
1 – исходного, 2 – модифицированного



**Рисунок 2.** Разложение РФЭС спектра C 1s образцов полиэтиленовых пленок: а – исходного, б – модифицированного

На ИК-спектрах модифицированных образцов наблюдается повышение интенсивности полос поглощения, отвечающих за валентные ( $2650\text{--}2550\text{ см}^{-1}$ ) и деформационные ( $1450\text{--}1300\text{ см}^{-1}$ ) колебания гидроксильной группы, валентные колебания карбонильной ( $1780\text{--}1670\text{ см}^{-1}$ ) и аминогруппы ( $4000\text{--}3300\text{ см}^{-1}$ ). Анализ разложения РФЭС спектров высокого разрешения на индивидуальные компоненты показал, что плазменная модификация приводит к изменению химического состава поверхности образцов. В результате модификации синтетических материалов в плазме воздуха на их поверхности происходит разрыв связей C–C и C–H, с образованием кратных связей C=C, а также полярных функциональных групп, содержащих C–O и C=O связи.

### Литература:

- [1] Гильман, А.Б. Воздействие низкотемпературной плазмы как эффективный метод модификации поверхности полимерных материалов / А.Б. Гильман // Химия высоких энергий. – 2003. – Т. 37, № 1. – С. 20–26.
- [2] Timoshina, Y.A. Plasmachemical modification of polymeric materials / Y.A. Timoshina, E.F. Voznesensky, A.I. Teptina, Y.O. Zhelonkin // High Energy Chemistry. – 2023. – V. 57, S. 1. – P. S256–S259.

ybuki@mail.ru

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРИМЕРОВ В ВОЗДУХЕ ПРИ ДАВЛЕНИИ $\sim 1$ ТОРР

**Н. П. Виноградов<sup>1</sup>, В. Ф. Тарасенко<sup>1</sup>, Е. Х. Бакшт<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИСЭ СО РАН, Томск, Россия

### *Введение*

В настоящее время большое внимание уделяется изучению высотных атмосферных разрядов (красных спрайтов, голубых струй, эльфов и др.), а также их теоретическому и экспериментальному моделированию. Благодаря фотографированию с высоким временным разрешением установлено, что красные спрайты состоят из ветвящихся струй большой протяженности, которые стартуют с высоты - 70—90 км. В большинстве работ предполагается, что спрайты — это стримеры (волны ионизации) больших размеров. Теоретические работы также подтверждают возможность формирования стримеров при низких давлениях воздуха.

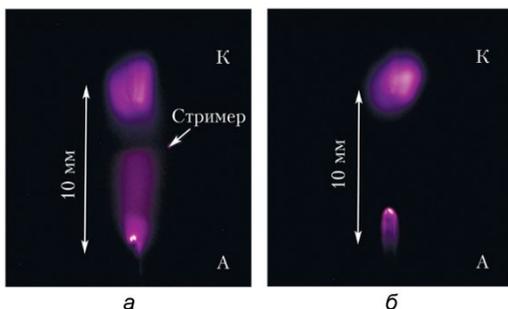
Параллельно с натурными исследованиями проводится экспериментальное моделирование свойств высотных атмосферных разрядов, в частности красных спрайтов. Цель настоящей работы — реализовать в атмосферном воздухе низкого давления режим разряда, при котором формируются стримеры красного цвета.

### *Установка*

Исследование характеристик излучения различных режимов разрядов проводилось на установке, состоящей из кварцевой трубки длиной 120 см с внутренним диаметром 5 см, расположенной параллельно поверхности Земли, источника питания и регистрирующей аппаратуры. Влажность воздуха составляла 23%. Источник питания обеспечивал постоянное напряжение (1—20 кВ) положительной и отрицательной полярности. Electroды были изготовлены из нихромовой проволоки диаметром 1 мм с заостренными концами, имеющими радиус закругления - 200 мкм. Они крепились на фланце из капролона, установленном на левом торце кварцевой трубки. Расстояние между электродами составляло 10 мм. Напряжение на них подавалось по высоковольтному кабелю длиной 3 м через сопротивление 100 МОм.

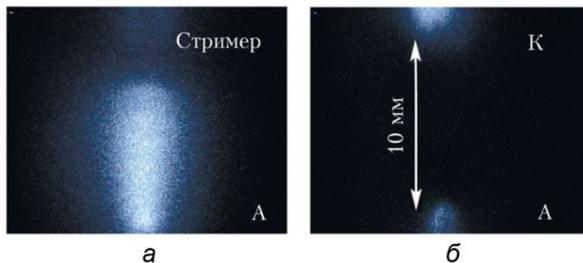
### Результаты

Было установлено, что при повышенном напряжении и давлении ток разряда не меняется и стримеры не формируются. Для реализации стримерного режима разряда необходимо было использовать определенное напряжение и давление. От источника на балластное сопротивление подавалось напряжение  $U_0 = -5$  кВ. Напряжение  $U$  на промежутке возрастало, а затем за счет образования стримеров резко уменьшалось на  $\sim 150$  В. Стримеры цилиндрической формы, как и следовало ожидать, стартовали от электрода положительной полярности. На рис. 1 показаны интегральные фотографии свечения разряда при напряжении источника  $U_0 = -5$  и  $-15$  кВ.



**Рисунок 1.** Фотографии разряда при  $U = -5$  кВ и экспозиции 4 с (а),  $U = -15$  кВ и экспозиции 1 с (б)  $p = 3$  торр

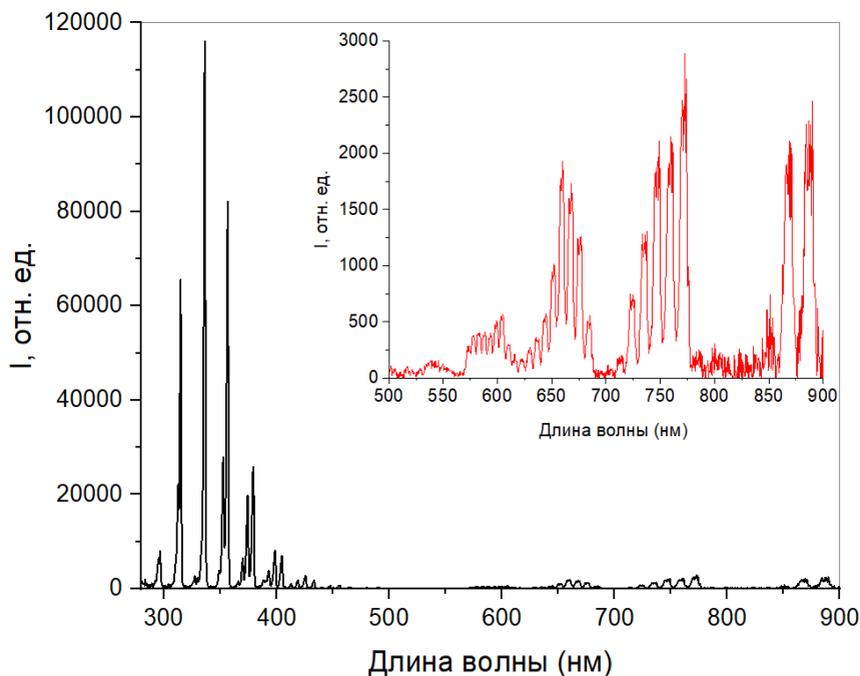
Фотоаппарат фиксировал как излучение стримера, форма которого отдельно показана на рис. 2, а, так и свечение стационарного тлеющего разряда. В таком режиме и стример, и свечение плазмы у обоих электродов были красного цвета, который соответствует излучению спрайтов.



**Рисунок 2.** Изображения, полученные с помощью ICCD-камеры при  $U = -5$  (а) и  $-15$  кВ (б);  $p = 3$  торр; экспозиция — 100 мкс

При давлении 3 торр с увеличением напряжения стримеры не регистрировались (рис. 1, б), а напряжение и ток разряда были постоянные. Изображение стримера, полученное с помощью ICCD-камеры в условиях рис. 1, а, показано на рис. 2, а.

ICCD-камера позволяла разделить вклад различных составляющих в свечение плазмы разряда. При экспозиции 100 мкс видны изображение стримера цилиндрической формы и яркая точка на аноде (рис. 2, а). С ростом напряжения стримеры не формировались (рис. 2, б), но красный цвет разряда при низких давлениях (1 и 3 торр) сохранялся. На рис. 3 приведены спектры излучения плазмы разряда между металлическими электродами при давлении воздуха 1 торр.



**Рисунок 3.** Спектры излучения разряда в области 280—900 (внизу) и в области 500—900 нм при установке светофильтра ЖС-12 (вставка);  $p = 1$  торр.

Измерения подтвердили, что в воздухе при уменьшении давления спектральная плотность энергии излучения полос первой положительной 1+ системы азота увеличивается. Кроме того, в этих условиях было зарегистрировано уменьшение отношения спектральной плотности энергии излучения второй положительной 2+ системы азота относительно 1+. Было установлено, что красный цвет плазмы разряда, который наблюдается визуально и фиксируется в таких экспериментах на фотографиях при уменьшении давления, связан с увеличением абсолютной и относительной интенсивностей 1+ системы азота. Относительная интенсивность 1+ системы азота с уменьшением давления от 30 до 1 торр возросла в шесть раз.

*Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-1026 от 15.11.2021.*

vinikitavin@mail.ru

## МОДИФИКАЦИЯ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ АЛИФАТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ БЕЗЭЛЕКТРОДНОМ РАЗРЯДЕ

**А. А. Лубин<sup>1, 2</sup>, А. В. Чистолитов<sup>1</sup>, Р. В. Якушин<sup>2</sup>, А. В. Перфильева<sup>2</sup>, Ю. А. Беспятых<sup>2, 3</sup>, Я. Д. Шанский<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Российская Федерация*

*<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Российская Федерация*

*<sup>3</sup>«Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины имени академика Ю.М. Лопухина Федерального Медико-биологического Агентства», Москва, Российская Федерация*

Изучение закономерностей плазмохимической функционализации и модификации органических соединений представляет большой интерес как для развития современных методов физико-химического анализа на основе электроразрядной ионизации, так и в целях расширения инструментальных методов органического синтеза [1].

Плазменные технологии используются для создания новых и улучшения существующих методов получения важных для промышленности продуктов, для снижения избыточного введения химических веществ, безреагентности и ресурсосбережения, что отвечает принципам «зелёной химии» [2-4].

В рамках проведенного исследования изучалось влияние высокочастотного (ВЧ) безэлектродного разряда на алифатические спирты различного строения. Ряд рассматриваемых соединений включал первичные, вторичные, третичные ациклические и карбоциклические спирты.

Обрабатываемые модельные системы представляли собой спиртовые растворы с различным значением pH и электропроводности, контролируемые путем введения электролитов – гидроксида натрия (NaOH), азотной кислоты (HNO<sub>3</sub>) и нитрата натрия (NaNO<sub>3</sub>). Оптимизация электро-физических и гидродинамических характеристик лабораторной установки проводилась при обработке модельных растворов фоновых веществ.

Лабораторная установка плазмохимической обработки жидкости включала проточный реакторный блок с системой капилляров, источник высокочастотного электрического поля, перистальтический насос-дозатор, емкость для загрузки обрабатываемого раствора, накопитель.

Для изучения фоновых процессов были приготовлены модельные растворы электролитов – 1,5%-й раствор гидроксида натрия (NaOH), 1,0%-й раствор азотной кислоты (HNO<sub>3</sub>), 4,0%-й раствор нитрата натрия (NaNO<sub>3</sub>). В ходе

модельного эксперимента был определён оптимальный объёмный расход электролита, который составил  $7 \text{ см}^3/\text{мин}$ .

Эксперименты по конверсии кислородосодержащих алифатических соединений проводились при варьируемых условиях, изменялась скорость потока и концентрация спирта в водном растворе. Было проведено два различных типа экспериментов. Эксперимент с ацетоном проводился с добавлением гидроксида натрия с концентрацией  $0,2 \text{ мг/мл}$ , а опыты с алифатическими спиртами проводились без добавления веществ увеличивающих электропроводность.

Анализ продуктов реакций был проведён методом ВЭЖХ МС. Показано, что после плазмохимической обработки ВСЧ разрядом в 30%-го водного раствора пропан-2-ола среди продуктов конверсии наблюдаются спирты – этанол, пропан-1-ол, бутан-1-ол, 2-метилпропан-1-ол, пропанон-2, а также сложный эфир – метилацетат. При обработке 30%-го водного раствора 2-метилпропан-1-ола наблюдается наработка бутан-1-ол, 2-метилпропан-2-ола и этанола. При обработке 30%-го водного раствора 2-метилпропан-2-ола наблюдается наработка пропан-2-ола. Обработка модельного щелочного раствора пропанона-2 приводит к образованию сложного эфира – этилацетата и формальдегида.

Полученный результат позволяет высказать предположение о протекании плазмохимической конверсии спиртов с перегруппировками углеродного скелета, окислительной деструкцией – разрывом связей углерод-углерод, окислении гидроксильных групп, а также о возможном окислении кетонов с участием активных форм кислорода и пероксидов по механизму реакции Байера-Виллигера.

#### **Литература:**

- [1] Masuda S. Destruction of gaseous pollutants and air toxics by surface discharge induced plasma chemical process (SPCP) and pulse corona induced plasma chemical process (PPCP) //Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control: Part B: Electron Beam and Electrical Discharge Processing. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1993. – С. 199-209.
- [2] Уваров В. А., Готулева Ю. В. Плазменная деструкция углеродосодержащих веществ //Энерго-и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика.—Екатеринбург, 2018. – 2018. – С. 1011-1014.
- [3]Chronopoulos C. et al. The Plasma Arc Waste Destruction System—One Year of Maritime Experience //Proceedings of the IT3 2005 conference, Galveston, Texas. – 2005.
- [4] Bonizzoni G., Vassallo E. Plasma physics and technology; industrial applications //Vacuum. – 2002. – Т. 64. – №. 3-4. – С. 327-336.

aalub@bk.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ КОЖИ ИЗ ШКУР МОРСКИХ И РЕЧНЫХ РЫБ.

**Р. Ф. Ахвердиев<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, Г. Р. Рахматуллина<sup>1</sup>, В. П. Тихонова<sup>1</sup>,  
Д. К. Низамова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "КНИТУ", Казань, Россия

В последнее время становятся популярными изделия из рыбьей кожи: обувь, кошельки, сумочки, перчатки и др., что обусловлено своеобразной и уникальной текстурой кожи. Кожа рыб отличается от кожи крупного рогатого скота (КРС), свинной и кожи других млекопитающих уменьшенным содержанием коллагена, что приводит к определенным трудностям при выделке. Улучшение качественных и прочностных характеристик кожи рыб можно добиться обработкой их в плазме высокочастотного емкостного (ВЧЕ)-разряда пониженного давления [1].

Преимуществом ВЧЕ-плазменной обработки является объемная модификация материалов с капиллярно-пористой структурой. В процессе обработки модифицируется поверхность материала и внутренние поверхности пор [2]. Физический механизм модификации капиллярно-пористых материалов с помощью ВЧЕ-плазмы пониженного давления описан в работах [1-3]. ВЧЕ-плазменная обработка позволяет в широком интервале варьировать свойства кожи, в зависимости от режима обработки коже можно придать как гидрофильные, так и гидрофобные свойства.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния ВЧЕ-плазмы на шкуру морских и речных рыб. Для определения воздействия плазмы на кожу рыб необходимо иметь представление о ее структуре.

В отличие от кожи КРС, кожа рыб имеет аркатурную пространственную структуру, в которой продольные и поперечные пучки коллагеновых волокон формируют своего рода дугообразный свод, поддерживаемый колоннами [4]. Шкура рыбы состоит из чешуйчатого слоя, эпидермиса, дермы, подкожно-жировой клетчатки. Особенностью шкур рыб является наличие чешуйчатого слоя, который убирается механически. Эпидермис шкур рыб в процессе консервирования практически полностью утрачивается, остаются лишь небольшие участки неороговевшего эпителия. Это объясняется своеобразной структурой эпидермиса [4].

Дерма рыб образована переплетением волокон соединительнотканых фибриллярных белков двух видов: коллагеновых (преобладающих) и эластиновых. Основу дермы составляют ряды правильно параллельно расположенных тонких извилистых волокон по типу утка, причем параллельно идущие волокна скреплены толстыми, перпендикулярно расположенными волокнами. Эластиновые волокна развиты слабо. Строение дермы шкур лососевых рыб одинаково на всех топографических участках [4].

Ключевым показателем, обуславливающим различие между свойствами кожи рыб, является ее среда обитания: морская или пресноводная. чешуей речные рыбы покрыты почти полностью в отличие от морских.

Для исследования влияния ВЧЕ-разряда пониженного давления на микроструктуру и свойства кожи выбраны шкуры форели (морская рыба) и щуки (пресноводная рыба). Обработка велась в ВЧЕ-разряде при давлении плазмообразующего газа (аргон)  $P=26,6$  Па, расходе газа  $G=0,04$  г/с, времени обработки 3 мин в режимах, представленных в табл. 1.

Таблица 1 - Режимы плазменной обработки ( $I$  – сила тока на аноде генераторной лампы,  $U$  – напряжение на аноде).

Режим	Речные рыбы		Морские рыбы	
	$I$ , А	$U$ , кВ	$I$ , А	$U$ , кВ
1	0,35	2,0	0,5	5,0
2	0,43	3,0	0,7	5,0
3	0,50	3,5	0,6	5,0
4	0,55	4,0	0,7	7,0
5	0,60	4,5	0,7	6,0
6	0,68	5,0	0,7	4,0

Выбор оптимального режима плазменной обработки определяется температурой сваривания сырья после процесса отмоки в сравнении с контрольным образцом, так как она является показателем как разделения структуры волокнисто-пористых материалов, так и структурирования. Результаты измерений на разных этапах выделки представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2 – Температура сваривания дермы щуки

Образец	Температура сваривания образцов при различных режимах плазменной обработки, °С						
	1	2	3	4	5	6	контр
Сырье мокро-соленое	-	-	-	-	-	-	56
Сырье после отмоки	52	52	51,7	52	53	52	54,5
Голье после пикелевания	22,5	22	21,5	25	25,5	23,5	25,7
Полуфабрикат после дубле-ния	82,5	82,5	84,5	82	82,5	81,5	78

Таблица 3 – Температура сваривания дермы форели

Образец	Температура сваривания образцов при различных режимах плазменной обработки, °С						
	1	2	3	4	5	6	контр
Сырье мокро-соленое							39
Сырье после отмоки	42	42	42,5	43	41	41,5	43
Голье после пикелевания	26	26,5	25,5	27	25	26,5	28
Полуфабрикат после дубле-ния	88,5	88,0	88,5	87,5	90	88	86

Анализ результатов табл. 2 и табл. 3 показывает, что наилучшими режимами плазменной обработки для морских рыб является режим №5, а для речных рыб – режим №3. Чем меньше температура сваривания в подготовительных процессах, тем больше происходит разделение волокон, тем выше температура сваривания после дублирования.

Результаты исследований подтверждают также объемный характер плазменной обработки. В ВЧЕ разряде поверхность кожи подвергается воздействию потока ионов с энергией ионов 50–100 эВ. Плотность ионного тока на поверхность составляет 0,3–1,5 А/м<sup>2</sup> в зависимости от режима поддержания разряда [1]. При столкновении с поверхностью кожи

кинетическая энергия иона трансформируется в энергию колебаний атомов поверхности. Обработка внутренних поверхностей кожевенного материала становится возможной вследствие мгновенной разности потенциалов СПЗ с противоположных сторон образца, возникающей при ВЧ-колебаниях электронного газа в плазме и достигающей значений 80–160 В. Толщина рыбьей кожи не превышает 1 мм, поэтому мгновенная напряженность электрического поля в коже составляет до  $(0,8-1,6) \cdot 10^5$  В/м, что достаточно для пробоя пористых промежутков.

Таким образом, ВЧЕ-плазменная обработка кожи морских и речных рыб является перспективным процессом объемной модификации их пористой структуры, в результате которой изменяется температура сваривания этих материалов.

### **Литература:**

[1] Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высоочастотная пла-менно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения — Казань: Изд. Казан. ун-та, -2000. -348 с.

[2] Абдуллин И.Ш., Вознесенский Э.Ф., Желтухин В.С., Красина И.В. Моделирование микроструктуры кожевенного материала на стадиях производства и при ВЧЕ-плазменной обработке. — Казань: Изд-во Казан. нац. исслед. технол. ун-та, 2009. 228 с.

[3] Шестов, А. В. Обработка натуральной кожи специального назначения ВЧ-плазмой пониженного давления: физический механизм модификации / А. В. Шестов // Костюмология. — 2022. — Т. 7. — № 1.

[4] Киладзе А.Б. Товароведная характеристика и оценка показателей качества шкур атлантического лосося как нового вида кожевенного сырья: дисс. канд. техн. наук:05.19.08. –Москва,-2006.- 157 с.

nizamova.darya.93@mail.ru

## МОДИФИКАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ДЕРМЫ ШКУРЫ ЩУКИ НЕРАВНОВЕСНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ

**Р. Ф. Ахвердиев<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, Г. Р. Рахматуллина<sup>1</sup>, В. П. Тихонова<sup>1</sup>,  
Д. К. Низамова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "КНИТУ", Казань, Россия

Шкуры рыб, являются нетрадиционным сырьём кожевенной промышленности, они заготавливаются в небольших количествах и из них выделяют экзотические кожи. Кожа из шкур рыб имеет прекрасные потребительские свойства, не уступающие козам из традиционного вида сырья, по красоте и разнообразию мереи сравнима с кожей рептилий и змей, а по ряду показателей превосходит ее [1].

Рыбьи кожи являются весьма модным и перспективным материалом для использования в эксклюзивных изделиях [2].

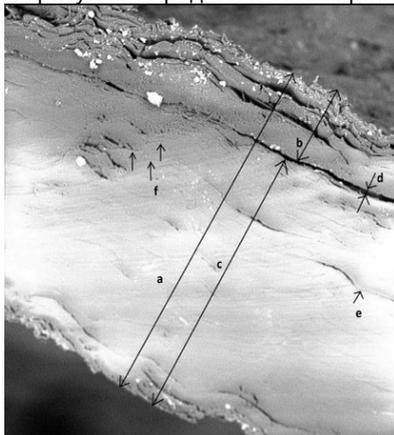
Интерес к производству рыбьих кож обусловлен следующими факторами:

- расширением сырьевой базы кожевенной индустрии;
- расширением объема и ассортимента готовой продукции кожевенной промышленности за счёт экзотических видов рыбьих кож;
- улучшение экологии за счёт использования в качестве сырья отходов рыбного производства.

В данной работе в качестве объекта исследования рассмотрена шкура щуки. Для получения кожи из шкур рыб с повышенными эксплуатационными свойствами исследуемый материал подвергался модификации в потоке неравновесной низкотемпературной плазмы (ННТП), генерируемой высокочастотным емкостным (ВЧЕ) разрядом пониженного давления [3]. ННТП – один из экологически чистых методов обработки волокнисто – пористых природных материалов, позволяющих изменить их структуру и регулировать характеристики физико-механических свойств [3]. Режим плазменной модификации определен на основании ранее проведенных экспериментов: плазмообразующий газ аргон, расход газа 0,04 г/с, давление в разрядной камере 26,6 Па, время обработки 3 мин, сила тока на аноде 0,55А, напряжение на аноде 3,5 кВ.

Микроструктура дермы щуки изучалась методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии на микроскопе LEXT OLS 4100.

В работе [1] установлено такое взаимное расположение пучков коллагеновых волокон у кожи из шкур рыб, которое названо аркатурным типом переплетения, что и создает удивительную прочность рыбьего кожевенного сырья. На рисунке 1 представлена микроструктура шкуры щуки.



**Рисунок 1** – Микроструктура шкуры щуки (a - собственно дерма, b – поверхностный слой дермы, c – глубокий слой дермы, d – корневой участок чешуи, e – горизонтальные пучки коллагеновых волокон, f – поперечный пучки коллагеновых волокон (увеличение в 2000 раз).

Собственно дерма шкуры щуки состоит из глубокого слоя, который занимает почти 70% всей толщины и отвечает за прочностные свойства кожи. Поверхностный лицевой слой дермы шкуры щуки состоит из чешуек, которые располагаются в карманах. После удаления чешуек поверхность приобретает шероховатое ворсистое «лицо», что придает экзотический внешний вид полученной кожи из шкуры щуки.

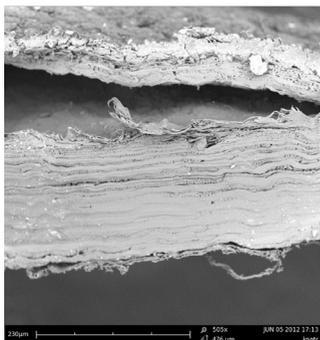
С целью установления влияния плазменного воздействия на изменение микроструктуры дермы хромового полуфабриката из шкуры щуки определялась температура сваривания в сырье, голье и полуфабрикаты после процесса дубления. Температура сваривания – это одна из количественных характеристик устойчивости кожи к теплу и влаге, этот показатель как разделения структуры капиллярно-пористых материалов, так и ее структурирования [4]. Результаты показателей температуры сваривания дермы щуки и прочностных показателей, представлены в таблице 1.

**Таблица 1** – Показатели температуры сваривания и прочности дермы шкуры щуки

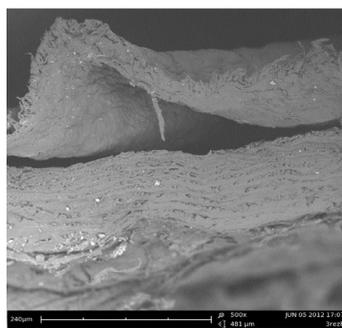
Исследуемый образец	Температура сваривания, °С			Прочностные показатели	
	Сырьё	Голье после процесса пикелевания	Полуфабрикат после хромового дубления	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
Опытный	56,0	21,5	84,5	10,8	46,0
Контрольный		25,7	78,0	5,5	36,8

Из значений, представленных в таблице 1 видно, что плазменная модификация сырья приводит к эффективному разделению структурных элементов дермы в подготовительных процессах, что подтверждается снижением температуры голья после процесса пикелевания относительно контрольного варианта на 16%. Данный эффект способствует лучшей диффузии хромового дубителя в структуру дермы и дополнительному его связыванию с активными центрами белка, в результате чего почти в 2 раза повышается прочность кожи.

На рисунках 2,3, показана микроструктура срезов дермы хромового полуфабриката из шкур щуки без модификации в потоке ННТП и с обработкой ННТП в сырье.



**Рисунок 2** – Микрофотография среза дермы хромового полуфабриката из шкуры щуки после дубления (без плазменной модификации)



**Рисунок 3** - Микрофотография среза дермы хромового полуфабриката из шкуры щуки модифицированной ННТП в сырье после плазменной модификации.

Анализ микрофотографий позволяет заключить, что после плазменной обработки сырья полуфабрикат лучше структурирован при сохранении аркатурного переплетения элементов дермы.

Причиной изменения структуры кожи рыб является объемная обработка, которая характерна ВЧ-плазменной модификации пористых тел [3]. Известно, что при обработке капиллярно-пористых материалов из натуральных ВМС (кожа КРС, свиная) в оптимальных режимах общая пористость увеличивается на 10-20% [3]. Это приводит к расщеплению волокон и их пучков, без образования аркатурных структур, подобных показанной на рис. 3, вследствие иной структуры, представляющей собой пространственную трехмерную структуру из переплетающихся пучков волокон, расположенных в основном в поперечном к поверхности направлении [5]. В отличие от кожи млекопитающих, увеличение пористости кожи рыб в результате плазменной обработки, приводит к расщеплению горизонтальных пучков коллагеновых волокон, а наличие поперечных пучков способствует увеличению аркатурности (рис. 2, 3).

Таким образом, обработка ННТП шкуры щуки перед процессом отмоки приводит к модификации ее микроструктуры. Это способствует увеличению эффективности жидкостных процессов выделки и повышению прочности и долговечности изделий из этого материала.

### **Литература:**

- [1] Низамова Д.К. Разработка технологий выделки кож из шкур лососевых рыб с применением неравновесной низкотемпературной плазмы: Дис. канд. техн. наук. Казан. нац. исслед. технол. университет, – Казань, 2019, – 167 с.
- [2] Киладзе А.Б. Товароведная характеристика и оценка показателей качества шкур атлантического лосося как нового вида кожевенного сырья: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – М., 2006. – 24 с.
- [3] Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменноструйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения — Казань: Изд. Казанск. ун-та, -2000. -348 с.
- [4] Страхов, И.П. Химия и технология кожи и меха: Учебник для вузов/ И.П. Страхов и другие. –М.: Легпромбытиздат, –1985. – 496 с.
- [5] Абдуллин И.Ш. и др. Особенности наноструктуры кожевенного материала, полученного с применением высокочастотной плазменной обработки // Нанотехника. 2008. № 4 (16). С. 75-77.

nizamova.darya.93@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖ- ДЕНИЯ

**Р. Ф. Ахвердиев<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, Г. Р. Рахматуллина<sup>1</sup>, В. П. Тихонова<sup>1</sup>,  
Д. К. Низамова<sup>1</sup>, Л. В. Чапаева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "КНИТУ", Казань, Россия

Шкуры рыб - один из видов нетрадиционного кожевенного сырья. После выделки кожа из шкур рыб по химическому составу и физико-механическим свойствам близка к традиционным кожам. Несомненным преимуществом кожаных изделий из шкур рыб является их водонепроницаемость. Кроме того, такой материал является эксклюзивным, позволяющий оригинальным способом выделиться в среде модельеров, и в среде ценителей экзотики.

Для определения режимов плазменной модификации шкур рыб необходимо знать особенности их структуры и состава, который отличается у разных видов. В работе в качестве исследуемого материала рассматривались шкуры речных и морских рыб. Разберем их более подробно.

Щука. Эпителиальный слой тонкий и слабо связанный с дермой. Дерма сложена из плотно упакованных пучков коллагеновых волокон, четко разграничена на 2 части:- верхняя - состоит из очень плотно уложенных тонких пучков волокон диаметром 1,8–3,6 мкм. Толщина верхней части составляет около 26% толщины дермы;- нижняя - состоит из более толстых пучков волокон диаметром 4,8–5,8 мкм, достаточно плотно упакованных, только в нижней части немного разрыхленных. Толщина нижней части составляет 74% толщины дермы. Хорошо видны вертикальные «тяжи» - толстые пучки коллагеновых волокон диаметром 7,2 мкм, расстояние между ближайшими «тяжами» составляет 72 - 84 мкм.

Строение дермы щуки соответствует модели «матраса». В то же время отмечена рыхлая (слаборазвитая) сеть эластиновых волокон, достаточно равномерно распределенная в толще дермы [1].

Судак. Эпителиальный слой шкуры судака, как и щуки, тонкий и слабо связан с дермой. Дерма сложена из идущих параллельно поверхности лучков коллагеновых волокон, однако, в целом, более рыхло упакованных, чем у щуки. Строение дермы судака также соответствует модели «матраса» [2]

Сом. Для шкуры сома характерно: отсутствие чешуи и чешуйчатых карманов, многослойный, прочно связанный с дермой, эпидермис с большим количеством слизевыделительных клеток. У сома пучки коллагеновых волокон плотно упакованы горизонтальные пласты, прошитые вертикальными толстыми пучками коллагеновых волокон («тяжами») [3].

Сазан. Дерма сазана состоит из очень толстых пучков коллагеновых волокон, идущих параллельно поверхности дермы. В верхней части, составляющей 11% толщины дермы, волокна несколько тоньше (диаметром 4,8-6,0 мкм), и эта часть без резкой границы переходит в нижнюю с очень толстыми пучками волокон диаметром 9,7-19,4 мкм. Строение дермы умеренно рыхлое, причем как в верхней, так и в нижней частях. Вертикально расположенные «тяжи» - очень толстые пучки волокон диаметром 9,7-10,8 мкм. Расстояние между «тяжами» составляет 87-97 мкм. Структура дермы сазана соответствует модели «матраса» [4].

Треска. Эпидермис весьма тонок и содержит очень много слизистых клеток. Подэпидермальный слой несет хроматофоры; последние встречаются и в дерме. Верхний более рыхлый слой дермы образует многочисленные карманчики. Нижняя дерма обычного для рыб строения. Вертикальные пучки коллагеновых волокон многочисленны, но тонки. Жировые отложения в подкожной клетчатке невелики. Эластиновых волокон немного [5].

Семга. Структурообразующим элементом дермы является глубокий слой, занимающий более 70% ее толщины. Именно здесь наблюдается плотный массив соединительнотканых образований, представляющих собой волнообразные пучки коллагеновых волокон, ориентированных в строго горизонтальном направлении, которые периодически прошиваются поперечными пучками коллагеновых волокон [6].

Анализ выше представленных видов дермы рыб позволяет заключить, что не зависимо от среды обитания рыб и отсутствия или наличия чешуи, дерма рыб представляет собой «прошитый матрас», обеспечивающий строгую ориентацию структурных элементов по трем взаимно-перпендикулярным направлениям. Такое специфическое строение дермы обеспечивает высокий уровень износостойкости и прочности рыбьих кож.

В данной работе представило интерес рассмотреть возможность воздействия на строго ориентированные структурные элементы дермы рыб потоком неравновесной низкотемпературной плазмы, т.к. плазменная модификация является эффективным инструментом изменения капиллярно-пористой структуры натуральных материалов [7].

Свойства капиллярно-волоконистых материалов находятся в прямой зависимости от пористости и структуры дермы кожи в целом. В связи с этим, проведен анализ размеров пор полуфабрикатов из шкур речных и морских рыб.

Модификация полуфабриката из шкур рыб осуществлялась в потоке неравновесной низкотемпературной плазмы в следующих режимах [8]: плазмообразующий газ аргон, сила тока на аноде генератора 0,4-0,6 А, напряжение от 0,5-5 кВ, давление в разрядной камере 13,3-26,6Па, расход газа 0,04 г/с, продолжительность обработки 3 мин.

Определение размера пор исследуемых образцов как модифицированных плазмой, так и без обработки плазмой проводилось с помощью газожидкостного порометра POROLUX™100 [9]. Полученные результаты размера пор образцов представлены в табл. 1 (опытные образцы полуфабриката из шкур рыб модифицированные плазмой, контрольные – без обработки)

**Таблица 1** – Размеры пор в полуфабрикате из шкур речных и морских рыб

Вид полуфабриката	Образец	Размер поры, мкм		
		маленькой	средней	большой
Речные рыбы				
Щука	Опытный	0,617	1,243	3,681
	Контрольный	0,502	1,745	3,804
Судак	Опытный	1,400	1,319	2,597
	Контрольный	1,215	2,614	3,786
Сом	Опытный	1,756	2,887	2,812
	Контрольный	1,238	2,961	3,787
Сазан	Опытный	1,393	2,314	2,906
	Контрольный	1,159	2,368	3,794
Морские рыбы				
Треска	Опытный	1,465	2,309	2,997
	Контрольный	1,116	2,512	3,684
Семга	Опытный	1,696	2,087	2,948
	Контрольный	1,208	2,306	3,488

Сравнение размеров пор, представленных в таблице 1, позволяет заключить, что при плазменной модификации полуфабриката из шкур рыб происходит увеличение малых пор до 40% и уменьшение средних и больших - до 50%. Выравнивание размера пор кожи рыб является результатом объемной обработки, которая характерна для высокочастотной плазменной модификации пористых материалов [10]. Физический механизм объемной

обработки заключается в следующем. Известно, что в ВЧЕ-разряде электроны совершают колебания относительно малоподвижных ионов синхронно с ВЧ-полем, что является причиной образования при электродных слоях положительного заряда (СПЗ) [11]. В отличие от тлеющего разряда, наиболее близкого вида разряда по диапазону рабочего давления, модификация в ВЧЕ-разряде пониженного давления проводится при размещении образца не на электроде, а в середине межэлектродного промежутка.

Плоский образец шкуры разделяет область плазмы на 2 части, в каждой из которых электроны совершают колебательное движение. При этом по обе стороны образца возникают СПЗ, аналогично приэлектродным областям. Толщины этих СПЗ динамически изменяются с частотой поля, но в противофазе друг с другом, так как когда электронное облако приближается к одной стороне образца, с другой стороны – удаляется. Соответственно, в противофазе изменяются и потенциалы СПЗ по обе стороны образца.

Разность потенциалов СПЗ означает, что внутри образца возникает электрическое поле, напряженность которого, как показано в работе [12], достаточна для инициирования пробоя пор. Это вызывает модификацию внутренних поверхностей пор, мелкие поры увеличиваются в объеме, а средние и крупные – соответственно уменьшаются, так как наличие вертикальных тяжей препятствует увеличению общего объема шкуры. Изменение размеров пор способствует усреднению пористой структуры дермы и как следствие улучшению показателей прочностных свойств (табл. 2).

**Таблица 2** – Показатели прочности хромового полуфабрикатов из шкур морских и речных рыб

Вид материала	Образец	Предел прочности при разрыве, МПа
Щука	Опытный	10,8
	Контрольный	5,5
Судак	Опытный	7,2
	Контрольный	5,8
Сом	Опытный	18,0
	Контрольный	15,0
Сазан	Опытный	16,8
	Контрольный	15,0
Треска	Опытный	8,9
	Контрольный	6,9
Семга	Опытный	27,0
	Контрольный	24,0

На основании данных, представленных в таблице 2, можно отметить, что модификация полуфабриката из шкур рыб потоком неравновесной низкотемпературной плазмы приводит к повышению показателя предела прочности при растяжении кожи до 96%.

Таким образом установлено, что плазменная обработка дермы рыб способствует усреднению ее капиллярно-пористой структуры без нарушения аркатурности, что приводит к существенному повышению эксплуатационных свойств кожи. Предложен физический механизм ВЧЕ-плазменной модификации шкур рыб при пониженном давлении, объясняющий эффекты объемной обработки и усреднения размеров пор.

### **Литература:**

- [1] Абдуллин И. Ш., Исследование влияния неравновесной низкотемпературной плазмы на структуру шкуры щуки в подготовительных процессах производства кожи/ Абдуллин И. Ш., Ахвердиев Р. Ф., Тихонова В. П., Рахматуллина Г. Р., Фадеев Д. М. // Вестник Казанского технологического университета. -2013. -№23. – С.19-21
- [2] Абдуллин, И.Ш. Исследование влияния неравновесной низкотемпературной плазмы на структуру дермы полуфабриката из шкур речных рыб: сазана и судака / И.Ш. Абдуллин, В.П. Тихонова, Г.Р. Рахматуллина, Р.Ф. Ахвердиев, О.В. Артемьева, Д.К. Низамова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №1. – Т.17. – С. 75-78.
- [3] Журнал «История и культура Приамурья» № 2 (10); Издательство: Краевое государственное бюджетное научное учреждение культуры «Дальневосточная государственная научная библиотека» (Хабаровск) 2011г., Стр.115-118
- [4] Пучков Н.В. Физиология рыб, М., Пищепромиздат, 1954. - 371 с.
- [5] Киладзе, А.Б. Товароведная характеристика и оценка показателей качества шкур атлантического лосося как нового вида кожевенного сырья: Дис. канд. техн. наук. – М., 2006. –142 с.
- [6] Низамова Д.К. Разработка технологий выделки кож из шкур лососевых рыб с применением неравновесной низкотемпературной плазмы: Дис. канд. техн. наук. Казан. нац. исслед. технол. университет, – Казань, 2019, – 167 с.
- [7] Абдуллин И.Ш., Вознесенский Э.Ф., Желтухин В.С., Красина И.В. Моделирование микроструктуры кожевенного материала на стадиях производства и при ВЧЕ-плазменной обработке. — Казань: Изд-во Казан. нац. исслед. технол. ун-та, 2009. 228 с.

- [8] Рахматуллина, Г.Р. Физико-механические свойства натуральной кожи из шкур лососевых рыб с применением неравновесной низкотемпературной плазмы / Г.Р. Рахматуллина, Р.Ф. Ахвердиев, Д.К. Низамова, В.П. Тихонова // Вестник технологического университета, – 2016. – №22. – Т.19. – С.91-92.
- [9] Измерение пористости. Инструменты для измерения пористости, [Электронный ресурс] URL: <https://www.porometer.ru/> (дата обращения: 13.06.2023).
- [10] Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения — Казань: Изд. Казанск. ун-та, -2000. -348 с.
- [11] Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения // М.: Изд-во МФТИ. – 1995.
- [12] Абдуллин И.Ш., Сунгатуллин А.М., Рахматуллина Г.Р., Желтухин В.С. Взаимодействие вч плазмы пониженного давления с капиллярно-пористыми материалами // Кожевенно-обувная промышленность. 2009. № 1. С. 40–42.

nizamova.darya.93@mail.ru

## ТЕРМОХРОМНЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**С. А. Гильфанов<sup>1</sup>, Ю. А. Тимошина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия

Термохромные материалы представляют собой термочувствительные материалы, изменяющие свой цвет при термическом воздействии. Термохромные материалы нашли свое применение для индикации изменения температуры в химических нагревательных устройствах, контейнерах для химических реакций, хранения и транспортировки опасных материалов, в упаковочной продукции для пищевой и медицинской промышленности, лакокрасочных покрытиях, текстильных материалах, автомобильной и авиапромышленности [1].

По обратимости эффекта изменения цвета термохромные материалы подразделяют на необратимые и обратимые (реверсные). Для необратимых термохромных материалов нижней границей диапазона изменения цвета является 50–60 °С, в то время как обратимые термохромные материалы могут изменять свой цвет даже при отрицательных температурах [2].

Для получения термохромных материалов используют лейкокрасители, жидкие кристаллы и пигменты. Неорганические термохромные материалы включают галогениды и соли переходных металлов, а их термохромные температуры обычно превышают 100 °С [3]. Наибольшее распространение получили органические лейкокрасители, состоящие из цветообразователя, проявителя цвета и растворителя. К органическим термохромным материалам относятся природные материалы на основе антоцианов и куркумина, а также синтетические материалы, характеризующиеся наиболее заметным изменением цвета. Цветообразователи в основном включают спиропиримидин, галотан, спиропиридин или фторид. В качестве проявителей цвета используют фенолы и их производные, кислоты Льюиса и другие слабокислотные вещества. Растворитель является средой, связывающей всю систему и определяющей температуру обесцвечивания лейкокрасителя. В качестве растворителей распространение получили длинноцепочечные алкиловые спирты, карбоновые кислоты или сложные эфиры, растворяющие компоненты образователя и проявителя цвета [4].

Одной из перспективных областей является разработка наноструктурированных гибридных органо-неорганических термохромных материалов. Термохромные монодисперсные микрогели с наночастицами оксида ванадия получили практическое применение для производства «умных» окон для повышения энергоэффективности при относительно высоком среднем коэффициенте светопропускания [5]. Применение методов газофазного осаждения позволяет получать термохромные биаксиально-текстурированные тонкие пленки на основе металлорганических соединений с оксидами ванадия [6]. Получаемые тонкопленочные наноструктурированные покрытия представляют особый интерес с точки зрения исследования их термохромных и электрохромных свойств.

### **Литература:**

- [1] Kim, I. J. Investigation of reversible self-thermochromism in microencapsulated fluoran-based materials / I. J. Kim, M. Ramalingam, Y.-A. Son // *Dyes and Pigments*. – 2018. – Vol. 151
- [2] Zhang, Y. Fabrication of visual textile temperature indicators based on reversible thermochromic fibers / Y. Zhang, Z. Hu, H. Xiang, G. Zhai, M. Zhu // *Dyes and Pigments*. – 2019. – Vol. 162
- [3] Pu, Y. Preparation and thermochromic behavior of low-temperature thermochromic microcapsule temperature indicators / Y. Pu, J. Fang // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2022. – Vol. 653
- [4] Sanjabi, S. Preparation of switchable thermo- and photo-responsive polyacrylic nanocapsules containing leuco-dye and spiropyran: Multi-level data encryption and temperature indicator / S. Sanjabi, J. K. Rad, H. Salehi-Mobarakeh, A. R. Mahdavian // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2023. – Vol. 119
- [5] Wang, Y. VO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Poly(N-isopropylacrylamide) Hybrid Nanothermochromic Microgels for Smart Window / Y. Wang, J. Wang, A. R. Khan, Y. Shi, Z. Chen, K. Zhang, L. Li, Y. Gao, X. Guo // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2018. – 57 (38). – P. 12801-12808
- [6] Baigenzhenov, O. Study of magnetron deposition and immersion coating methods obtaining vanadium pentoxide thin films / O. Baigenzhenov, I. Aimbetova, G. Issayev, B. Seitov // *Bulletin of D. Serikbayev EKTU*. – 2022. – № 4. – С. 30–39.

b.wolfa@mail.ru

## БАРЬЕРНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНОКОМПОЗИТНЫМИ СЛОЯМИ

**А. И. Тептина<sup>1</sup>, Ю. А. Тимошина<sup>1</sup>, Э. Ф. Вознесенский<sup>1</sup>**

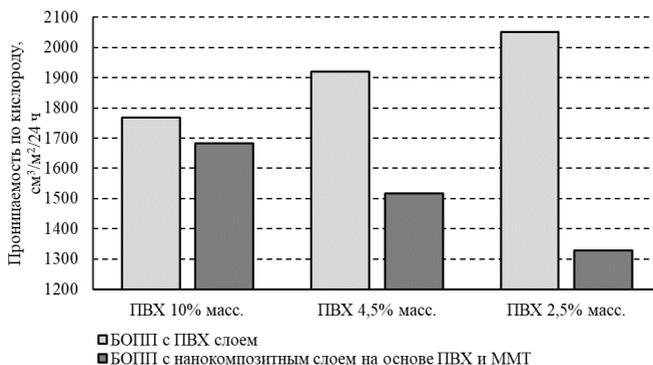
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия

teptinaalyona@gmail.com

Поливинилхлорид (ПВХ) является широко используемым полимером во многих отраслях производства, в том числе в упаковочной промышленности. Композиции на основе ПВХ являются экономически доступными, обеспечивают получение на их основе механически и химически стойких слоев для гибкой упаковки. Модификация ПВХ композиций возможна путем введения функциональных добавок в раствор или расплав полимера. Известно, что введение в ПВХ наполнителей на основе органомодифицированных глин способствует повышению прочностных характеристик материалов и приданию им функциональных свойств [1, 2]. Модификация полимеров наноразмерными наполнителями на основе слоистых алюмосиликатов способствует повышению их барьерных свойств [3, 4]. Механизм снижения проницаемости материалов обусловлен слоистой структурой наполнителя, эксфолиированные чешуйки создают в полимерном материале лабиринтоподобную структуру, которая затрудняет прохождение низкомолекулярных веществ [5].

В работе представлены результаты исследования барьерных свойств пленочных материалов с нанокompозитным слоем. В качестве подложки использована биаксиально ориентированная полипропиленовая (БОПП) пленка толщиной 20 мкм, для получения барьерного слоя использована ПВХ композиция на основе органического полярного растворителя и наноразмерный органомодифицированный монтмориллонит (ММТ). Сухой остаток ПВХ варьировали от 2,5 до 10 масс. %, содержание ММТ в растворителе составляло 10 масс. %. Для диспергирования наполнителя в полимерной композиции использовалась ультразвуковая ванна. Нанесение нанокompозитного слоя на БОПП пленку происходило в лабораторных условиях при помощи проволочного аппликатора с толщиной мокрого слоя 10 мкм. В качестве контрольных образцов использованы образцы БОПП пленки с ПВХ слоем. Полученные образцы исследованы на проницаемость по кислороду согласно стандартной методике ASTM D3985-17.

Результаты исследования барьерных свойств образцов представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Барьерные свойства образцов

Полученные результаты показали, что для образцов с нанокompозитными слоями на основе ПВХ и ММТ характерно снижение проницаемости по кислороду с уменьшением сухого остатка полимера в барьерном слое, тогда как для образцов с ПВХ слоем наблюдается обратная тенденция. Наибольшими барьерными свойствами обладает образец БОПП с нанокompозитным покрытием на основе ММТ и ПВХ с сухим остатком полимера 2,5 % масс.

#### **Литература:**

- [1] Чутаев, Б.Р. Модификация поливинилхлоридных композиций органосиликатами // Б.Р. Чутаев, Р.К. Низамов, Л.А. Абдрахманова. – Известия КазГАСУ. – 2019. – №2 (48). – С. 263.
- [2] Виджиева, А.С. Разработка новых рецептур кабельных пластикатов с повышенными эксплуатационными свойствами / А.С. Виджиева, С.Ю. Хаширова, Х.Х. Сапаев, И.В. Мусов, А.К. Микитаев // Пластические массы. – 2011. – №12. – С. 47–49.
- [3] Ray, S. The Potential Use of Polymer-Clay Nanocomposites in Food Packaging / S. Ray, S.Y. Quek, A. Easteal, X.D. Chen / International Journal of Food Engineering. – 2006. – Vol. 2, Iss. 4. – Article 5. – P. 1–11.
- [4] Ramesh, S. Effect of Clay Modifier on the Structure and Transport Properties in Polyurethane/Clay Nanocomposites as Barrier Materials / S. Ramesh, P. Kamalarajan, K. Punithamoorthy / Iran. J. Chem. Chem. Eng. – 2022. – Vol. 41, №. 11. – P. 3621–3631.
- [5] Тептина, А.И. Упаковочные материалы с барьерными свойствами / А.И. Тептина, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // I Всероссийская конференция с международным участием «Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий»: материалы конференции. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2023. – С. 128–130.

## БОРСОДЕРЖАЩЕЕ ПОКРЫТИЕ, СФОРМИРОВАННОЕ НА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОМ СПЛАВЕ КОМБИНИРОВАННЫМ ИОННО – ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

**И. И. Ажажа<sup>1</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>1</sup>, В. В. Шугуров<sup>1</sup>, Ю. Х. Ахмадеев<sup>1</sup>, Е. А. Петрикова<sup>1</sup>, М. А. Мокеев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИСЭ СО РАН, Томск, Россия

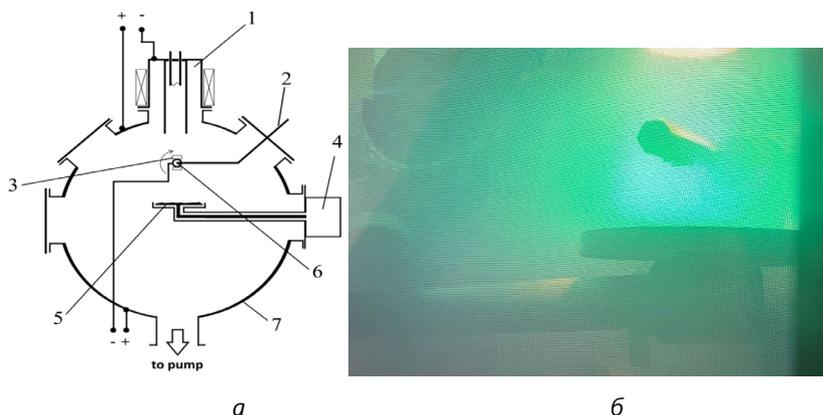
### **1. Введение**

Возможность образования высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) была впервые продемонстрирована в начале XXI века в работах Кантор и др. (2004) и Йех и др. (2004). В настоящее время ВЭС являются одними из наиболее изучаемых материалов. В ближайшем будущем, как отмечается в многочисленных работах (Чудо и Сеньков, 2017; Рогачев, 2020), они могут найти применение практически во всех областях промышленности и медицины. Это связано с уникальным сочетанием механических, трибологических, химических и т.д. характеристик ВЭС. Атомная промышленность является одной из возможных областей применения ВЭС. Бориды и борсодержащие материалы нашли широкое применение в атомной промышленности большинства промышленно развитых стран [1]. Это связано с большим сечением захвата тепловых нейтронов атомами бора (Ворошнин и Ляхович, 1978). Кроме того, поверхности, легированные изотопом  $^{10}\text{B}$ , могут быть использованы для решения задач нейтронной физики, при создании детекторов нейтронов или для биологической защиты (Поло и др., 1999; Иглшам и др., 1994). Существующие методы формирования борсодержащих слоев имеют следующие ограничивающие факторы для широкого применения в промышленности: длительность (несколько десятков часов) и высокая температура (1273-1473 К) процесса, образование крупных включений боридов, снижающих механические свойства материала, низкий уровень экологичности, а в некоторых случаях и взрывоопасность процесса [2].

### **2. Экспериментальная методика**

В качестве материала подложки использовали технически чистый титан ВТ1-0 с предварительно сформированным слоем ВЭС ( $\text{TiAlCuZrNb}$ ) [3] на поверхности. Образцы имели форму пластин размером  $10 \times 10 \times 5$  мм. Перед нанесением покрытия ВЭС поверхность образцов титана подвергалась

механической шлифовке и полировке. После установки в камеру и последующей откачки образцы дополнительно подвергались кратковременной (15 мин) очистке аргоновой плазмой. Процесс осаждения покрытия проводился на установке "КОМПЛЕКС", которая имеет возможность последовательного выполнения этапов ионно-плазменной подготовки поверхности образца и нанесения покрытий (Девятков и др., 2017). Для реализации процесса осаждения борсодержащего покрытия была изготовлена методами порошковой металлургии мишень диаметром 200 мм из порошка  $AlMgB_{14}$  (Никитин и др., 2022).



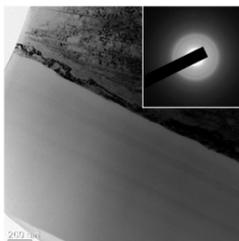
**Рисунок 1.** Схема разрядной системы для ионно – плазменного ВЧ нанесения покрытий: (а) 1 – плазменный генератор; 2 – термопара; 3 – подложка для напыления; 4 – ВЧ-генератор; 5 – мишень; 6 – держатель для подложки; 7 – вакуумная камера, (б) внешний вид свечения плазмы при осаждении плёнки на основе  $AlMgB_{14}$

Исследования элементного и фазового состава состояния дефектной субструктуры системы покрытие/подложка проводились методами сканирующей (прибор SEM 515 Philips) и просвечивающей дифракционной (прибор JEOL JEM-2100F) электронной микроскопии. Твердость материала определяли по методу Виккерса на нанотвердомере DUN-211S (Shimadzu) при нагрузке 30 мН. Исследование трибологических (коэффициент трения и параметр износа) характеристик материала проводилось на трибометре Pin-on-Disc и Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic) при следующих параметрах: шар из стали 100Cr6 диаметром 6 мм, радиус дорожки трения - 2 мм, путь, пройденный телом счетчика, - 100 м, нагрузка на индентор - 1 Н.

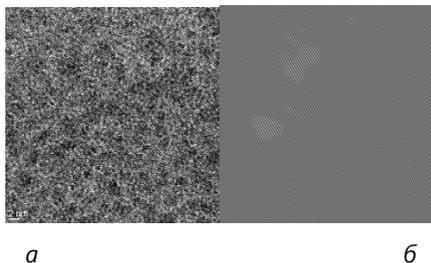
### 3. Результаты исследования

Методами энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа установлено, что сформированные на поверхности образцов ВЭС покрытия имеют следующий химический состав (ат. %):  $94 B - 2,2 Mg - 2,2 Al$  (покрытие получено при распылении мишени состава  $AlMgB_{14}$ ) и  $91,9 B - 3,7 Mg - 0,7 Al - 1,6 Ti$  (покрытие получено при распылении мишени состава  $AlMgB_{14} + TiB_2$ ) [4]. Покрытия, независимо от элементного состава, являются аморфными, о чем свидетельствует микроэлектроннограмма, имеющая два размытых гало (см. рис. 2).

Методами прямого разрешения кристаллической решетки установлено, что покрытия следует относить к аморфно-кристаллическим материалам, т.к. они содержат области размерами 1,5-2,5 нм, в которых выявляются атомные ряды, т.е. области, имеющие кристаллическую структуру (см. рис. 3).



**Рисунок 2.** Электронно-микроскопическое изображение структуры покрытия, сформированного на ВЭС при распылении мишени состава  $AlMgB_{14}$



**Рисунок 3.** Электронно-микроскопическое изображение высокого разрешения (а) участка покрытия, сформированного на ВЭС при распылении мишени состава  $AlMgB_{14} + TiB_2$  и Фурье-преобразование данного снимка (б).

#### 4. Заключение

Борсодержащие покрытия элементного состава  $Al-Mg-B$  и  $Al-Mg-Ti-B$ , сформированные на поверхности высокоэнтропийного сплава  $TiAlCuZrNb$  методом ионно-плазменного высокочастотного напыления (магнетронное ВЧ-осаждение в условиях ионно-плазменного ассистирования при использовании генератора газовой (аргон) плазмы «ПИНК»), являются аморфно-кристаллическими материалами; размеры кристаллической фазы, расположенной в аморфной матрице, изменяются в пределах 1,5-2 нм. Методами микродифракционного анализа в покрытии состава  $AlMgB_{14}$  выявлены рефлексы твердого раствора на основе алюминия и фазы  $B4Mg$ . В покрытии состава  $AlMgB_{14} + TiB_2$  – рефлексы твердого раствора на основе алюминия, борида титана состава  $TiB$  и металида состава  $Ti_2Mg_3Al_{18}$ . Осаждение покрытия сопровождается формированием в поверхностном слое подложки толщиной до 100 нм нанокристаллической 25-40 нм структуры с расположенными на границах наноразмерными 5-8 нм частицами борида железа  $FeB$  и  $Fe_3B$ .

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (грант № 19-19-00183), <https://rscf.ru/project/19-19-00183/>.

#### Литература:

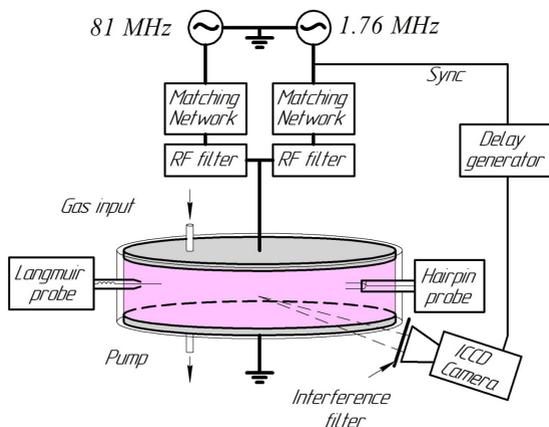
- [1] Gok, M.S. Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures / M.S. Gok, A. Erdogan, M. Oge et al. // Surface Coatings Technology – 2017. – V. 328. – P. 54-62. DOI: [j.surfcoat.2017.08.008](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.08.008).
- [2] Nakajo, H. Boronizing of CoCrFeMnNi high-entropy alloys using spark plasma sintering / H. Nakajo, A. Nishimoto // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2022. – V. 6. – I. 2. – Art. № 29. – 9 p. DOI: [10.3390/jmmp6020029](https://doi.org/10.3390/jmmp6020029).
- [3] Nikitin, P.Yu. Energy-effective AlMgB14 production by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) using the chemical furnace as a source of heat energy / P.Yu. Nikitin, A.E. Matveev, I.A. Zhukov // Ceramics International. – 2021. – V. 47. – I. 15. – P. 21698-21704. DOI: [10.1016/j.ceramint.2021.04.183](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.183).
- [4] Raghavan, V. Al-B-Mg (aluminum-boron-magnesium) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. 2010. □ V. 31. □ I. 3. □ P.272-273. DOI: [10.1007/s11669-010-9675-y](https://doi.org/10.1007/s11669-010-9675-y).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ДВУХЧАСТОТНОЙ ВЧ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ФАЗОВО- РАЗРЕШЁННОЙ ОЭС.

**М. А. Богданова<sup>1</sup>, Д. Р. Шибанов<sup>1</sup>, Д. В. Лопаев<sup>1</sup>, А. В. Глотов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

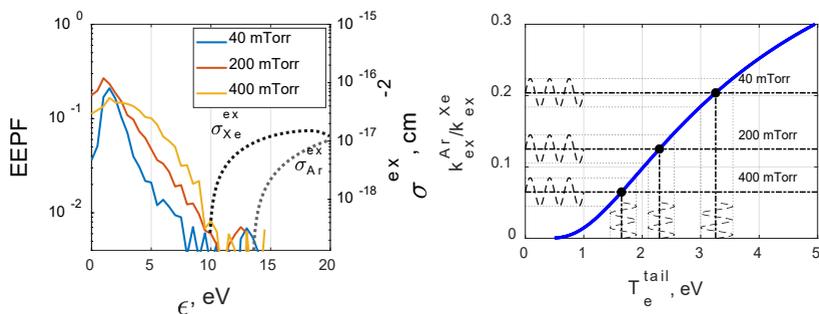
Двухчастотная ВЧ емкостная (ДЧВЧЕ) плазма представляет большой интерес для технологии производства микроструктур. Основное её преимущество – в возможности независимого управления плотностью плазмы и энергией ионов путем варьирования вкладов ВЧ мощности на различных частотах: высокой – десятки МГц, и низкой – единицы МГц. Однако, обеспечение строгого разделения действия частот – задача сложная. Ионы могут откликаться на поле низкой ВЧ частоты, что приводит к изменению кинетики электронов, и, следовательно - к изменению структуры всего разряда. Это так называемые ион-динамические эффекты ДЧВЧЕ плазмы.



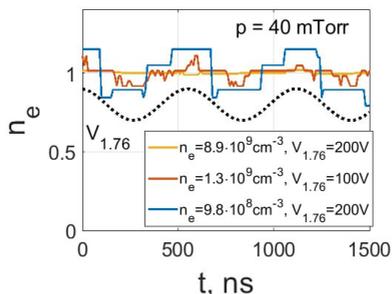
**Рисунок 1.** Экспериментальная установка.

Цель данной работы – пронаблюдать эти эффекты экспериментально через пространственно-временную динамику параметров двухчастотной ВЧ плазмы по периоду низкой частоты – температуры  $T_e$  и концентрации электронов  $n_e$ . Для исследования был выбран метод фазово-разрешённой

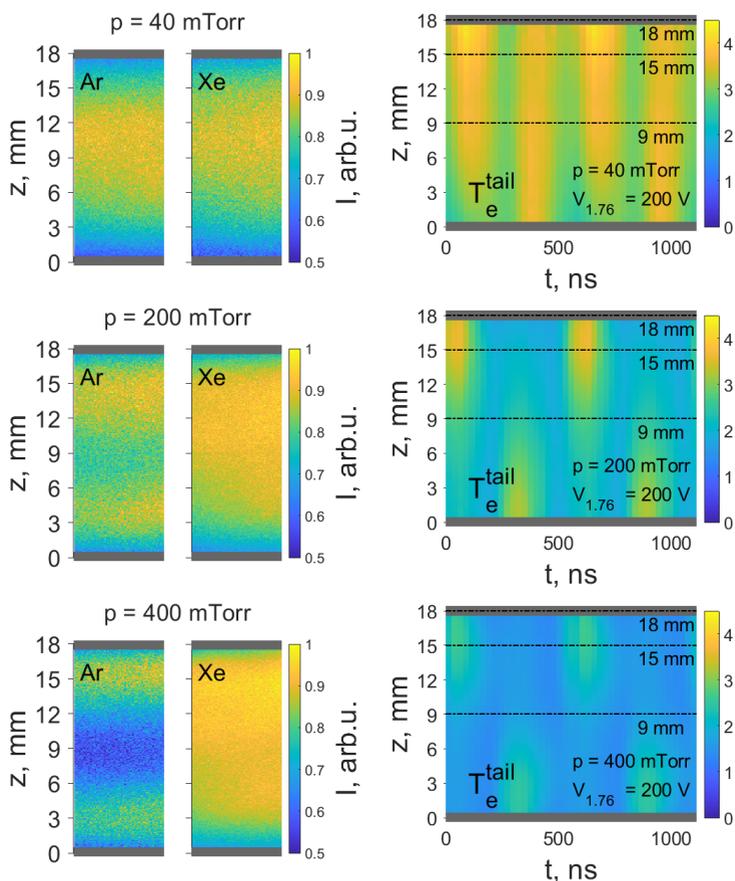
оптической эмиссионной спектроскопии (ФРОЭС) [1], суть которого заключается в использовании для наблюдения таких возбужденных состояний атомов газов смеси, при которых отношение интенсивностей их излучения является почти линейной функцией температуры электронов  $T_e$ . Тогда динамика распределения отношения интенсивностей излучения в межэлектродном промежутке за ВЧ-цикл будет отражать динамику  $T_e(Z, t)$  (если времена жизни излучающих состояний заметно меньше ВЧ-периода). Измерения ФРОЭС были проведены в симметричном двухчастотном (81 & 1.76 МГц) ВЧ емкостном разряде в смеси Ar (95%) и Xe (5%). Схема экспериментальной установки приведена на Рисунке 1.



**Рисунок 2.** Слева: Типичные ФРЭЭ при давлении 40, 200 и 400 мТорр. Также показаны сечения возбуждения прямым электронным ударом Ar и Xe. Справа: зависимость отношения констант скоростей возбуждения атомов Ar и Xe  $k_{ex}^{Ar}/k_{ex}^{Xe}$  от температуры электронов в «хвосте» ФРЭЭ  $T_e^{tail}$ .



**Рисунок 3.** Динамика плотности плазмы  $n_e$  в зависимости от параметров ВЧ частот. Все кривые нормированы на значение  $n_e$  в ОЧ разряде ( $W^{1.76 \text{ MHz}} = 0$ ).



**Рисунок 4.** Слева: распределение интенсивности излучения Ar (слева) и Xe (справа) по межэлектродному промежутку в среднем за период низкой ВЧ частоты для разных давлений – 40, 200 и 400 мТорр. Справа: пространственно-временная динамика температуры электронов в «хвосте» ФРЭЭ  $T_e^{\text{tail}}$  в межэлектродном промежутке в течение двух ВЧ периодов.

Для изучения влияния формы функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ), которая измерялась вч-компенсированным зондом Ленгмюра, измерения были проведены при следующих давлениях газа – 40, 200 и 400 мТорр. Характерные формы ФРЭЭ в этих условиях, приведены на Рисунке 2 (слева). Для исследования поведения температуры «хвоста» ФРЭЭ

были выбраны линии излучения атомов Ar ( $3p^54p \rightarrow 3p^54s$ ) (750.3 нм) и Xe ( $5p^56p \rightarrow 5p^56s$ ) (823.1 нм). Интенсивность излучения атомов Ar и Xe почти полностью определяется возбуждением прямым электронным ударом. Пороговые энергии излучающих уровней Ar и Xe отличаются на величину в несколько электронвольт, то есть порядка температуры «хвоста» ФРЭЭ,  $T_e^{\text{tail}}$  (Рисунок 2, слева), что дает возможность судить о динамике температуры электронов в «хвосте» ФРЭЭ по пространственно-временной динамике отношения  $I_{Ar}/I_{Xe} \sim k_{ex}^{Ar}/k_{ex}^{Xe}$  (Рисунок 2, справа). Динамика плотности плазмы  $n_e$  в центре межэлектродного промежутка была измерена с помощью СВЧ hairpin зонда (Рисунок 3). Как видно, очень небольшая модуляция  $n_e$  возникает в случае низкой плотности плазмы или высокого напряжения низкой ВЧ частоты, когда ВЧ поле заметно проникает в плазму. Если же плотность плазмы не меняется существенным образом по ВЧ-периоду, то «тело» ФРЭЭ (а, значит и температура электронов в этой части ФРЭЭ) очевидно не претерпевает существенных изменений в течение ВЧ-периода низкой частоты, что может быть не так в отношении «хвоста» ФРЭЭ и  $T_e^{\text{tail}}$ . На Рисунке 4 (слева) представлены распределения интенсивности излучения Ar и Xe в межэлектродном промежутке в среднем за ВЧ период в зависимости от давления (сверху вниз – 40, 200, 400 мТорр). На рисунке 4 (справа) представлены картины пространственно-временного распределения температуры электронов в «хвосте» ФРЭЭ,  $T_e^{\text{tail}}$ , по межэлектродному промежутку в течение двух периодов низкой ВЧ частоты, полученные из отношения  $I_{Ar}/I_{Xe}$ . Видно, что при низком давлении нагрев электронов происходит по межэлектродному промежутку, а при повышении давления все больше локализуется в приэлектродной области. Учитывая при этом, что форма «тела» ФРЭЭ почти не изменяется, можно полагать, что изменения ФРЭЭ в течение ВЧ периода низкой частоты происходят преимущественно в «хвосте». Это важный результат, который ранее был получен только из модельных расчётов, а теперь подтверждён экспериментально.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-4610.2022.1.2.

#### Литература:

- [1] Schulze J, Gans T, O'Connell D, Czarnetzki U, Ellingboe A R and Turner M M 2007 *J. Phys. D. Appl. Phys.* **40** 7008–18  
[bogdanova.masha91@gmail.com](mailto:bogdanova.masha91@gmail.com)

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СОХРАНЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОКРАСКИ НА НАТУРАЛЬНЫХ ТКАНЯХ

**А. Р. Гарифуллина<sup>1</sup>, М. В. Антонова<sup>1</sup>, А. А. Хубатхузин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ, Казань, Россия

С появлением широкоформатных принтеров в текстильном производстве резко увеличился ассортимент разнообразных, ярких, красочных принтов. С помощью струйной печати на волокна ткани наносится вододисперсионная текстильная краска; при повышенной концентрации красителя достигается определенная устойчивость чернил к стиркам, трению и к деформациям. Однако, это приводит к большому расходу красителя и к снижению рентабельности производства. С целью снижения расходов на краситель, многие производители обходятся однократным нанесением рисунка, при этом страдает насыщенность цвета и происходит потеря цвета на 20% при первой же стирке.

Для решения указанной проблемы ряд фирм предлагают перед печатанием наносить праймер, который решает проблему насыщенности окраски и четкости в контурах рисунка. Однако, праймер не обеспечивает сохранности цвета при стирке.

Повысить устойчивость вододисперсионного красителя к стиркам при прямой печати можно за счет удаления аппрета (примесей и следов парафина на волокне) при предварительной обработке ткани. Однако, такой способ предусматривает наличие дополнительного оборудования.

Альтернативным способом удаления аппрета, увеличения устойчивости окраски к стиркам и активации волокон ткани перед прямой печатью может служить плазменная модификация [1-4].

Необходимой технологической операцией перед процессом крашения является подготовка текстильного материала, заключающаяся в удалении всех посторонних включений с волокнистых материалов: химически связанных природных окрашивающих веществ (азотистых), пыли, а также веществ, нанесенных в процессе производства: замасливателей, парафина и шлихты, аппретов [5]. Все указанные включения придают тканям водоотталкивающие свойства и мешают краске проникать внутрь волокон.

Поэтому исследование способов предварительной подготовки тканей к прямой печати является актуальным.

Объектами исследования служили текстильные материалы из натуральных искусственных волокон: сатин 40, сатин 60, тенсель, водно-дисперсионный краситель фирмы Dupont.

Контрольные образцы подвергались стирке с целью удаления аппрета. Приготовленные образцы помещались в емкость, заливались раствором ПАВ с концентрацией 5 г/дм<sup>3</sup>, предварительно нагретым до соответствующей температуры. Стирку проводили при температуре 40-60°C в течение 30 минут. По окончании испытания образец сушили.

Опытные образцы стирке не подвергались, однако предварительно прошли плазменную модификацию высокочастотным емкостным разрядом. Режимы обработки представлены в таблице 1. Натуральные ткани обрабатывались в среде воздуха, с целью активации натуральных волокон ткани.

**Таблица 1** - Режимы плазменной модификации

Параметры	Давление P, Па	Расход газа, G, см <sup>3</sup> /мин (при P=10 <sup>5</sup> Па)	Время обработки, мин	Мощность W, Вт
Режим 1	23±2	1500	5	2000
Режим 2	21±2	1500	5	1000

В ходе работы проведены исследования влияния способов запечатывания красителя, методов предварительной обработки натуральных тканей, плазменного воздействия на устойчивость окраски к стиркам.

Исследованы следующие способы предварительной обработки натуральных тканей:

способ А – стирка с применением ПАВ;

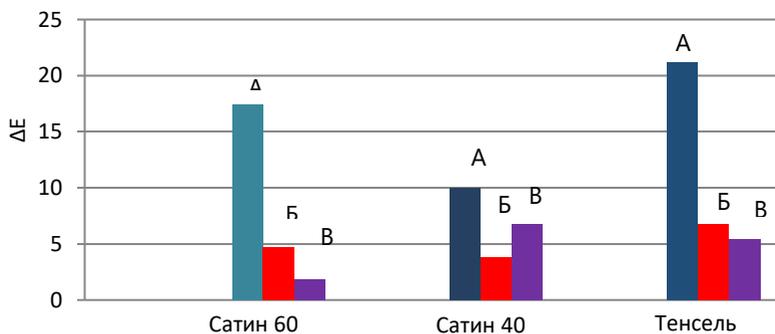
способ Б – плазменный режим 1;

способ В – плазменный режим 2.

После предварительной обработки на ткани методом прямой печати наносился цветной рисунок, который запечатывался в термопрессе. После высушивания, ткани подвергались стирке, для определения сохранности яркости цвета. В качестве эталона использовались окрашенные образцы тканей, не подвергшиеся стиркам и плазменной модификации.

При изучении процесса окрашивания для определения цветопередачи окрашиваемого материала после стирок от эталона использовали многофункциональный спектрофотометр RM200QC. Прибор позволяет определить цветовые различия между исследуемыми образцами и стандартным эталоном; коэффициент непрозрачности; производить оценку оттенков серого. Кроме этого, спектрофотометр RM200QC позволяет производить сравнение внешнего вида измеряемого образца при дневном источнике освещения D65 и источнике A, имитирующем лампу накаливания.

Результаты исследования разницы цветового значения в пространстве Lab ( $\Delta E$ ) опытных образцов от эталонного представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Зависимость устойчивости красителя после стирок от способа удаления аппрета

Результаты, представленные на рисунке 1, устойчивости окраски к многократным стиркам позволил выявить следующие закономерности. На всех видах натуральной ткани плазменная модификация приводит к увеличению фиксации красителя и к его устойчивости к многократным стиркам. Однако плазменная модификация в режиме 2 в газообразующей

среде воздуха приводит к наибольшей устойчивости красителя к многократным стиркам, предположительно за счет окисления аппрета и удаления его с поверхности волокна.

### **Литература:**

- [1] Влияние ВЧ-плазменной обработки при пониженном давлении на проницаемость полиуретанового нанокомпозита / И. Ш. Абдуллин, В. С. Желтухин, И. А. Бородаев [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 2014. – № 2. – С. 83-87.
- [2] Христолюбова, В. И. Применение высокочастотной плазмы пониженного давления для модификации внутренних поверхностей изделий / В. И. Христолюбова, А. А. Хубатхузин, И. Ш. Абдуллин // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 12. – С. 110-113.
- [3] Антонова, М. В. О влиянии газового разряда на свойства джута / М. В. Антонова, А. С. Парсанов // Технологии и качество. – 2021. – № 2(52). – С. 38-42. – DOI 10.34216/2587-6147-2021-2-52-38-42.
- [4] Исследование прочности джутовых волокон, модифицированных в ВЧ-разряде / Р. Р. Шаехметов, Т. О. Графская, М. В. Антонова, И. В. Красина // Новые технологии и материалы легкой промышленности : XVI Всероссийская научно-практическая конференция с элементами научной школы для студентов и молодых ученых. Сборник статей, Казань, 19–23 мая 2020 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2020. – С. 258-260.
- [5] Аппретирование текстильных материалов / А. Р. Антонова, З. Т. Давлетшин, Р. Р. Ямалутдинова, М. В. Антонова // Новые технологии и материалы легкой промышленности : XVII Всероссийская научно-практическая конференция с элементами научной школы для студентов и молодых ученых. Материалы конференции, Казань, 17–21 мая 2021 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. – С. 440-443.

garalf@inbox.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО РЕАКТОРА В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА ГЕРМАНИЕВЫХ И КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР

**А. И. Сайфутдинов, Р. А. Фазулзянов<sup>1</sup>, А. Молостова<sup>1</sup>, Н. П. Германов<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия*

Представленная работа является развитием предыдущих исследований [1,2] и направлена на численный анализ влияния испарения материала на характеристики дугового разряда. В частности, в рамках единой модели [3] проведены численные расчеты по моделированию дуговых разрядов с композитными электродами в среде аргона и гелия. В качестве катода рассматривались тугоплавкие вольфрам и графит, а в качестве анода – кремний или германий в графитовой оправе. В рамках модели помимо учета испарения углеродных атомов и молекул были учтены также процессы испарения атомов кремния и германия, соответственно. Кроме того, для атомов кремния учитывались процессы возбуждения, прямой и ступенчатой ионизации, а для атомов германия – возбуждение и прямая ионизация. Аналогично предыдущим исследованиям [1,2] в работе были продемонстрированы особенности смены плазмообразующего иона, когда доминирующим сортом ионов становился ион кремния или ион германия. В докладе представлены распределения всех основных параметров плазмы и испаренных атомов, их возбужденных состояний и ионов вдоль разрядного промежутка. Полученные распределения позволяют прогнозировать и оптимизировать параметры современных реакторов по синтезу наноструктур.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке по Соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и ВО РФ и КНИТУ-КАИ.*

### **Литература:**

- [1] Saifutdinov A. I. et al. //Plasma Physics Reports. – 2023. – Vol. 49. – no. 10. – P. 1187-1198.
  - [2] Saifutdinov A., Timerkaev B. //Nanomaterials. – 2023. – Vol. 13. – no. 13. – P. 1966.
  - [3] Saifutdinov A. I. //Plasma Sources Science and Technology. – 2022. – Vol. 31. – no. 9. – P. 094008.
- as.uav@bk.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕРСИИ СИЛАНА В СЛАБОТОЧНОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ.

**А. А. Уланова<sup>1</sup>, А. И. Сайфудинов<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия*

Направление, связанное с развитием низкотемпературных методов формирования нанокристаллов элементов IV группы таблицы Менделеева с использованием плазменных технологий, является одним из приоритетных в современной микроэлектронике. Как правило, используется два основных подхода в получении нанокристаллов. Первый основан на использовании реакторов на основе дугового разряда. В этом случае в качестве прекурсоров выступают композитные (с вкраплениями кремния, или германия) электроды [1-3], которые испаряются в процессе горения дуги в разрядный промежуток. Второй, наиболее распространенный, основан на использовании сильнонеравновесной плазмы тлеющих, барьерных и ВЧ-разрядов, когда в качестве прекурсора используются углерод-, кремний- или германий содержащие газы [4-6]. В представленной работе проведен численный анализ продуктов конверсии примесей силана ( $\text{SiH}_4$ ) в аргоне в слаботочном тлеющем разряде при давлениях от 1 до 10 Торр и межэлектродном расстоянии 1 см на основе расширенной гидродинамической модели плазмы. Модель включала в себя уравнения баланса концентраций, заряженных, возбужденных и нейтральных частиц, уравнение баланса плотности энергии электронов, уравнение баланса энергии тяжелой компоненты плазмы и уравнение Пуассона для определения самосогласованного поля. Процессы с участием элементарных процессов в плазме аргона брались из работы [7], а с участием силана из работ [6, 8].

В результате численных расчетов были получены распределения основных параметров плазмы и продуктов конверсии 1% примеси силана. Показано, что при заданных условиях в установившемся режиме плазмообразующим ионом является положительный ион силана. При этом доминирующей отрицательно заряженной частицей в прикатодной области разряда и практически до середины разрядного промежутка является отрицательный ион силана, что связано с высокой скоростью реакции прилипания. С середины разрядного промежутка и до анода доминирующей отрицательной заряженной частицей является электрон. Кроме того, показано формирование достаточно высоких значений концентраций

радикалов SiH, SiH<sub>2</sub>, SiH<sub>3</sub>, а также чистого кремния по всей длине разрядного промежутка.

Таким образом, сформулированная модель и проведенные численные эксперименты, являются удобным инструментом для анализа продуктов конверсии силана в неравновесной газоразрядной плазме и инструментом для прогнозирования синтеза различных типов кремниевых наноструктур.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке по Соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ.*

#### **Литература:**

- [1] Timerkaev B. A. et al. Arc-Assisted Synthesis of Germanium Nanocrystals in Argon //High Energy Chemistry. – 2021. – Т. 55. – С. 402-406.
- [2] Timerkaev B. A. et al. Synthesizing germanium nanotubes in an electric Arc plasma //Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2020. – Т. 94. – С. 613-617.
- [3] Timerkaev B. A. et al. Germanium catalyst for plasma-chemical synthesis of diamonds //High Energy Chemistry. – 2019. – Т. 53. – С. 390-395.
- [4] Kim H. J., Lee H. J. Analysis of intermediate pressure SiH<sub>4</sub>/He capacitively coupled plasma for deposition of an amorphous hydrogenated silicon film in consideration of thermal diffusion effects //Plasma Sources Science and Technology. – 2017. – Т. 26. – №. 8. – С. 085003.
- [5] Joo J. Numerical modeling of SiH<sub>4</sub> discharge for Si thin film deposition for thin film transistor and solar cells //Thin Solid Films. – 2011. – Т. 519. – №. 20. – С. 6892-6895.
- [6] Kushner M. J. A model for the discharge kinetics and plasma chemistry during plasma enhanced chemical vapor deposition of amorphous silicon //Journal of Applied Physics. – 1988. – Т. 63. – №. 8. – С. 2532-2551.
- [7] Saifutdinov A. I. et al. Comparative Analysis of Different Sets of Elementary Processes in Modeling DC Discharge in Argon at Atmospheric Pressure //High Energy Chemistry. – 2023. – Т. 57. – №. Suppl 1. – С. S178-S181.
- [8] Ляхов А. А., Струнин В. И. Численный анализ кинетики химических реакций в аргон-силановой плазме тлеющего разряда //Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – №. 50. – С. 79-89.

as.uav@bk.ru

## МЕХАНИЗМЫ ЗАТУХАНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ СПИНОВЫХ СИГНАЛОВ В РАЗБАВЛЕННЫХ ПАРАМАГНЕТИКАХ

Н. Я. Асадуллина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

Процесс создания, обработки и передачи квантовой информации предполагает возбуждение квантовой системы импульсами резонансного электромагнитного (ЭМ) поля различной длительности и интенсивности. Время жизни сигнала  $T_2$  имеет фундаментальное значение для обработки и хранения информации. Если на спиновый образец, помещенный в постоянное магнитное поле  $\mathbf{B}_0 \parallel \mathbf{z}$ , внезапно воздействовать сильным СВЧ полем  $\mathbf{B}_1(t) = 2B_1 \cos \omega_0 t \parallel \mathbf{x}$  с резонансной частотой  $\omega_0 \approx \omega = g\mu_0 B_0 / \hbar$ , в приемнике возникает сигнал *переходных нутаций* в виде колебаний (осцилляции Раби) с частотой  $\chi = \gamma B_1$ , где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение. Этот сигнал со временем уменьшается со скоростью затухания  $\Gamma(\chi, n_{ac})$ , то есть прямо пропорционально интенсивности СВЧ поля и зависит от концентрации  $n_{ac}$  возбужденных спинов. Эти важные факты не имели теоретического объяснения.

Ниже мы предлагаем новый механизм затухания, обусловленный взаимодействием спин-системы со стенками резонатора, учитывающий неоднородность распределения спинов в образце по резонансным частотам: то есть вместо одной резонансной частоты  $\omega = \omega_0$  имеется некоторое распределение  $f(\Delta)$ ,  $\Delta = \omega - \omega_0$ , спинов по частотам  $\omega$ . Прецессирующие спины наводят неоднородный (по частоте и по фазе) ток на стенках резонатора, который создает *обратное поле* на спинах, тем самым изменяя фазу осциллирующих спинов. Соответственно, фазовая когерентность осцилляций Раби уменьшается, отклик системы спадает. Таким образом, рассмотренный механизм есть механизм *расфазировки*, так как под действием обратного поля происходит хаотичное изменение фазы каждого активного спина. Скорость релаксации  $\Gamma$  прямо пропорциональна интенсивности СВЧ поля, так как концентрация возбужденных («активных») спинов  $n_{ac}(\chi, t) \sim \chi^2$ .

## УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В ЦЕЛЯХ УМЕНЬШЕНИЯ БРЫЗГОВЫХ ДЕФЕКТОВ

**Р. Р. Рахимов<sup>1</sup>, Р. Р. Саубанов<sup>1</sup>, В. А. Песошин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Набережночелнинский институт (филиал) КФУ, Набережные Челны, Россия*

<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия*

Аннотация. Сварочные брызги — часто встречающийся дефект при лазерной сварке, который влияет на качество поверхности сварного шва, может привести к браковке сварного соединения изделий из-за нормативных требований конструкторской документации к чистоте поверхности. В работе рассматривается концепция новой технологий формирования технологических условий для уменьшения интенсивности разбрызгивания при лазерной сварке металлических материалов посредством наложения дополнительного комбинированного воздействия лазерного луча и маломощного индукционного нагревателя на свариваемый материал, а также кинетическая модель, описывающая фазовые превращения в стали при комбинированном воздействии [1-6].

Была реализована программа экспериментальных и численных исследований с целью выявления сварочных характеристик и механизма уменьшения брызг при лазерной сварке наложенным тепловым источником. Результаты экспериментов показали, что выбор дополнительного источника тепла определенной мощности может значительно улучшить качество поверхности сварных соединений.

Также была создана комплексная трехмерная, переходная, мульти физическая модель лазерной сварки для определения изменений в физическом процессе с наложением дополнительного теплового источника.

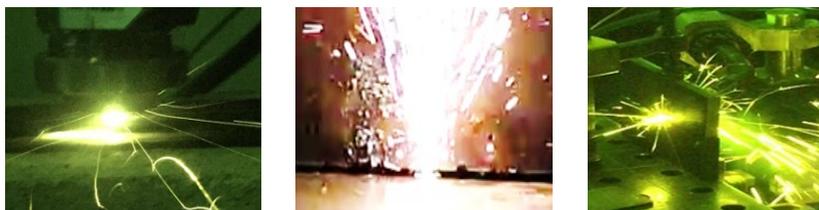
**Введение.** Современным трендом получения неразъёмных соединений является лазерная сварка, широко применяемая в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, благодаря прецизионной точности, высокопроизводительности и возможностью автоматизации. [1-4]. За счет высококонцентрированного источника энергии металл быстро плавится и происходит локальное интенсивное испарение, в зоне жидкого

расплава металла, образуется полость из парожидкостной фракции металла. [4-6]. При этом остается нерешенной проблема достижения необходимого качества поверхности сварного шва, удовлетворяющее нормативным требованиям конструкторской документации.

**Исследовательская часть.** В исследованиях лазерная сварка осуществлялась в режиме глубокого проплавления с узкой зоной термического влияния и малой деформацией.[1,3,4,6].

Технологический процесс сварки подвержена дефектам из-за нестабильности легирующих компонентов в составе жидкого расплава металла. Брызги являются частым дефектом при лазерной сварке в режиме глубокого проплавления, в условиях высокоскоростной сварки на толщинах выше 10 мм лазерами на больших мощностях.

В экспериментах использовали высокоскоростную камеру для записи поведения брызг, изучили траектории брызг из серии изображений при сварке толстостенных материалов, и определен механизм формирования брызг во время лазерной сварки при различных режимах (в режиме полного проплавления). Обнаружено выход струи пара, действующий на расплав и являющийся одним из источников образования брызг (рис.1).



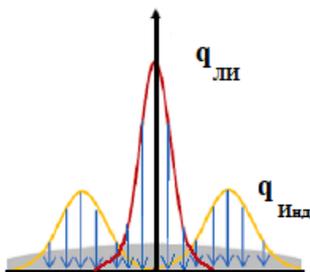
а)

б)

в)

**Рисунок 1.** Фотографии с видеокамеры при сварке металла (мощность лазерного излучения 2 кВт, скорость 20 мм/сек, перемещение луча относительно неподвижного образца, количество снимков в секунду 600)

Модель комбинированной системы теплового поля от нагрева токами высокой частоты и лазерного излучения (ЛИ) состоит из условного центрального сердечника от ЛИ и дополнительной кольцевой формы от индукционного нагревателя (см. рис. 2).



**Рисунок 2.** Мультифизическая модель комбинированной системы (лазерного излучения (ЛИ) и индукционного нагрева (ТВЧ))

Плотность энергии пучка лазерного излучения принимают за Гауссово распределение, которое описывается с помощью уравнения.

$$q_L(x, y, z) = \frac{Q_c}{\pi r_{zc}^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_{zc}^2}\right) \quad (x^2 + y^2 \leq r_{zc}^2) \quad (1)$$

где  $q_L(x, y, z)$  - тепловой поток для координат  $(x, y, z)$ , когда  $x^2 + y^2 \leq r_{zc}^2$ ,  $Q_c$  и  $r_{zc}$  указывают мощность центрального лазерного луча и радиус центрального луча на расстоянии  $z$  до плоскости фокусировки соответственно.  $r_{zc}$  - может быть описан с использованием следующего уравнения:

$$r_{zc} = r_{fc} \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_r} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

где  $r_{fc}$  и  $z_r$  указывают радиус центрального пучка сердечника в фокальной плоскости и длину Рэлея. Уравнение (1) представляет распределение энергии для фокального положения, когда  $z$  равно 0 [5].

Анализ результатов экспериментов показали, что состояние и плотность брызг, в процессе комбинированной лазерной сварки с различной мощностью индукционного нагревателя, значительно влияет на качество поверхности свариваемого изделия.

**Выводы.** В работе была предложена технология комбинированной лазерной сварки с индукционным нагревом (ТВЧ) в режиме глубокого проплавления для механизма смягчения и уменьшения брызг на поверхность свариваемых деталей. Разработана тепловая модель взаимодействия лазерного излучения с дополнительным тепловым

источником на поверхность материала с использованием трехмерной, нестационарной, мультифизической модели, построенной на основе гидрогазодинамики в модуле многофазной модели жидкости (расплава металла), чтобы определить механизм смягчения и снижения количества брызг металла в процессе лазерной сварки. Результаты моделирования показали, что комбинированная технология лазерной сварки может привести к повышению качества и стабилизации сварочных процессов, что является одним из основных факторов, которые связаны с качественной отделкой поверхности сварного шва.

### **Литература:**

- [1] Звездин В. В. Повышение качества сварных соединений узлов и деталей автомобиля при лазерной сварке / В. В. Звездин, В. В. Заморский, В. С. Каримов, И. С. Сабиров // Материалы Ш международной научно-технической конференции «Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств». Ч.1. — Пенза: ПГУАС, 2004.С. 54-58.
- [2] Исследование процесса лазерной сварки разнородных металлов / Звездин В.В., Рахимов Р.Р./ Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2017. № 2 (75). С. 16-23.
- [3] Саубанов Р.Р. Повышение эффективности лазерной сварки / Р.Р. Саубанов, С.С. Сыркин, В.В. Звездин, Р.М. Хисамутдинов, С.М. Портнов // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 3. С. 82-84.
- [4] Звездин В.В. Технологический контроль зоны лазерной сварки средствами технического зрения / В.В. Звездин, Р.Р. Саубанов, Р.Р. Рахимов, Р.М. Хисамутдинов, С.С. Сыркин // Материалы XI Международной научно-технической конференции Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2022 (МНТК "ИМТОМ-2022"). - Казань, 2022. С. 45-49.
- [5] Mitigating spatters in keyhole-mode laser welding by superimposing additional ring-shaped beam / Zhiyuan Wang, Meng Jiang, Xi Chen, Yang Du, Zhenglong Lei, Sicong Zhao, Yanbin Chen // Optics & Laser Technology. Volume 168, January 2024, 109869.
- [6] Рахимов Р.Р. Технологические особенности лазерной сварки металлических изделий / Р.Р. Рахимов, В.В. Звездин В.В. // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2020. № 2 (85). С. 29-36.

rafisih88@mail.ru

## ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВОДЫ НА МОДИФИЦИРОВАННОМ КОБАЛЬТОСОДЕРЖАЩИМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

**П. Я. Эндерс<sup>1, 2, 3</sup>, Е. А. Соловьев<sup>1, 2, 3</sup>, Т. П. Султанов<sup>2, 3</sup>, К. В. Холин<sup>1, 2, 3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, ФИЦ РАН, Казань, Россия*

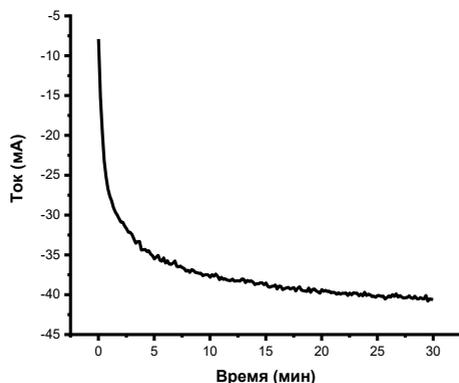
<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*

<sup>3</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия*

Выброс парниковых газов (ПГ) в атмосферу из-за непрерывного сжигания ископаемого топлива представляет серьезную угрозу глобальной окружающей среде и к тому же растущий спрос на энергию привел к росту цен на обычное топливо [1]. Для долгосрочного решения проблемы изменения климата, а также снижения зависимости от нефти, будущие источники энергии должны отвечать требованиям безуглеродности и возобновляемости [2]. Обоим этим критериям отвечает энергетика, основанная на водороде.

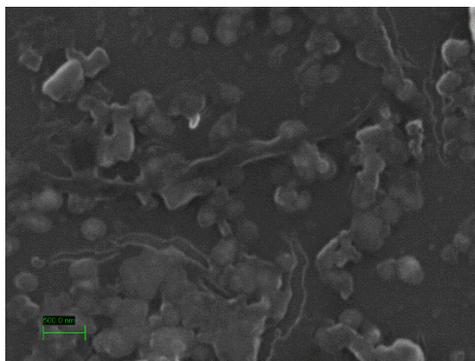
Нами была исследована модифицированная комплексом ПГ-NaCo поверхность стеклоуглеродной пластины и проведена проверка ее каталитической активности в отношении реакции выделения водорода из воды. В качестве метода модификации поверхности электрода использовался метод электрохимического осаждения. Характер поверхности модифицированной пластины после электроосаждения определялся с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

В ходе исследования было проведено электрохимическое осаждение в присутствии кобальтосодержащего комплекса пектата натрия (ПГ-NaCo). Для проведения эксперимента подготовили раствор из деионизованной воды с фоновой солью  $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{NaH}_2\text{PO}_4$  с растворенным в ней кобальтосодержащим комплексом 20%. Далее раствор в ячейке объемом 20 мл барботировали азотом в течение 20 минут. После насыщения системы инертным газом проводили электролиз с контролируемым потенциалом - 1500 мВ в течение 30 минут (рис. 1).

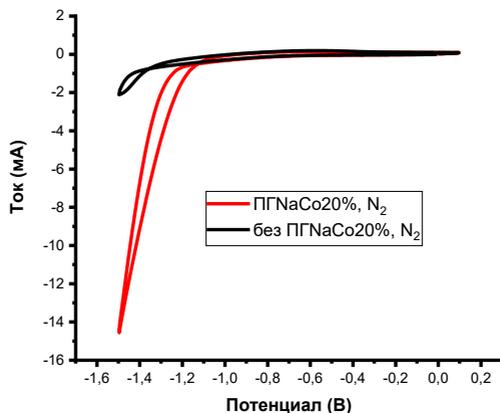


**Рисунок 1.** График зависимости проходящего через электрохимическую ячейку тока от времени при потенциале рабочего электрода -1,5 В отн. Ag/AgCl в течение 30 минут в присутствии комплекса ПГ-NaCo в водном растворе  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 / \text{NaH}_2\text{PO}_4$  (pH 6).

Полученный модифицированный электрод промывали деионизированной водой, чтобы убрать излишки фоновой соли. Далее модифицированная стеклоглеродная пластина была просушена при комнатной температуре. Изображение модифицированной в присутствии комплекса ПГ-NaCo поверхности стеклоглеродного электрода (рис. 2) было получено с помощью сканирующего электронного микроскопа. На снимке видны наноструктуры с размерами от 60 до 350 нм.



**Рисунок 2.** Изображение модифицированной в присутствии комплекса ПГ-NaCo поверхности стеклоглеродного электрода при электролизе в течение 30 минут.



**Рисунок 3.** Циклические вольтамперограммы при насыщении раствора азотом на «чистом» и модифицированном комплексом ПГ-NaCo стеклоглеродных электродах.

Заключительным этапом исследования стала проверка каталитической активности модифицированного Со-содержащими частицами стеклоглеродного электрода в сравнении с чистым немодифицированным электродом.

Данные циклических вольтамперограмм (рис. 3) показали, что модифицированный электрод катализирует реакцию выделения водорода из воды с токами в 6 раз больше, чем на немодифицированном чистом стеклоглеродном электроде при одном и том же потенциале  $E = -1500$  мВ отн. Ag/AgCl.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

#### **Литература:**

- [1] Kim J. W. et al. Thermochemical Cycles for Hydrogen Production from Water //Journal of Energy Engineering. – 2006. – Т. 15. – №. 2. – С. 107-117.
- [2] Turner J. A. Sustainable hydrogen production //Science. – 2004. – Т. 305. – №. 5686. – С. 972-974.

[enderspolina@mail.ru](mailto:enderspolina@mail.ru)

## ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА МОДИФИЦИРОВАННОМ НИКЕЛЕВЫМИ ЧАСТИЦАМИ СТЕКЛОУГЛЕРОДНОМ ЭЛЕКТРОДЕ

**Е. А. Соловьев<sup>1, 2, 3</sup>, П. Я. Эндерс<sup>1, 2</sup>, Т. П. Султанов<sup>1, 2, 3</sup>, К. В. Холин<sup>1, 2, 3</sup>**

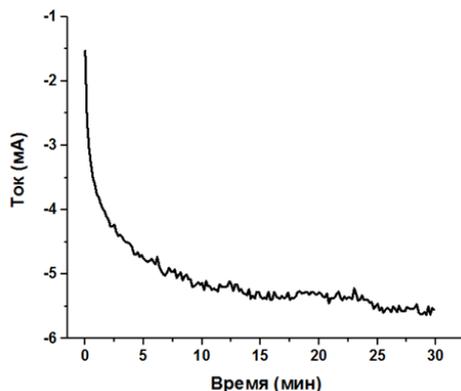
<sup>1</sup>*Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, ФИЦ РАН, Казань, Россия*

<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*

<sup>3</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия*

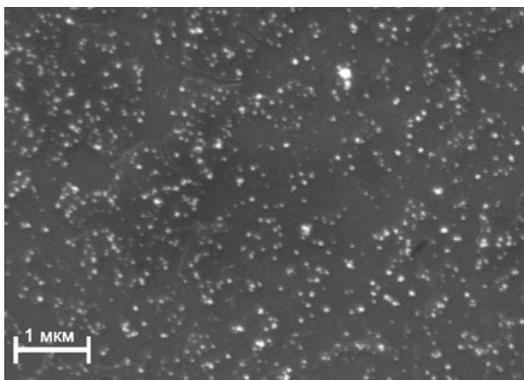
В настоящее время мировая общественность крайне обеспокоена проблемой глобального потепления и энергетического кризиса, так как для получения энергии сжигается сырье, в основном углеродсодержащее и невозобновляемое. Однако существует способ решить две проблемы сразу – это восстановление углекислого газа до необходимого топлива. Для ускорения данной реакции и меньших затрат энергии используют катализаторы, благородные металлы, такие как платина [1], а также некоторые комплексы никеля и кобальта [2], являются одними из самых эффективных, но они очень дорогие, поэтому существует необходимость создания более дешевых катализаторов и разработки метода их нанесения на рабочий электрод, где будет происходить конверсия углекислого газа.

Нами был выбран комплекс пектата натрия с никелем для исследования его каталитических свойств в реакции восстановления углекислого газа. Одной из первых задач в данном исследовании было создать на поверхности рабочего стеклоуглеродного электрода никельсодержащую структуру, для этого комплекс пектата натрия с никелем (20% замещение Na на Ni) растворен в 0,1 М водном растворе  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 / \text{NaH}_2\text{PO}_4$  (pH = 7) и было проведено электроосаждение при потенциале -1,5 В в течение 30 минут (рис.1). По данному графику видно, что модуль тока быстро растет в течении 5 минут, что говорит нам об активном осаждении структур на рабочем электроде, далее ток постепенно выходит на плато.



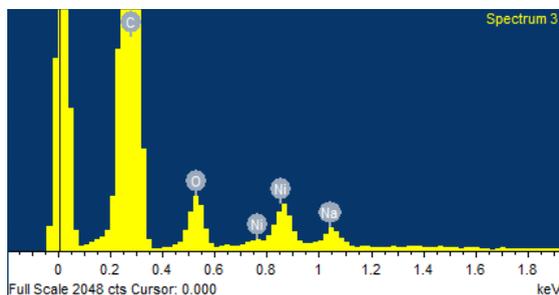
**Рисунок 1.** График зависимости тока от времени в ходе восстановления водного раствора комплекса пектата натрия с никелем в течение 30 минут.

Далее поверхность стеклоглеродного электрода была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Evo и было получено ее изображение (рис.2).



**Рисунок 2.** Изображение поверхности стеклоглерода.

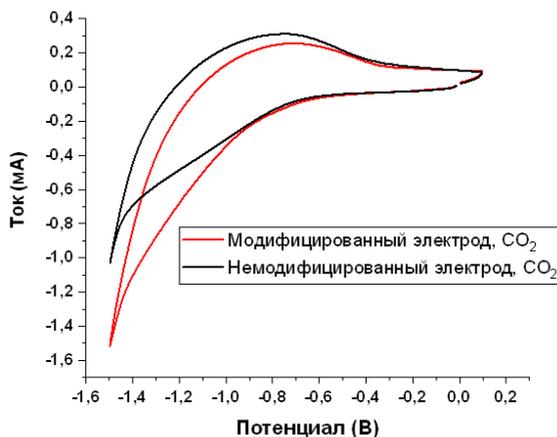
На данном изображении видны никелесодержащие частицы разных размеров, которые варьируются от 20 до 110 нм. Средний размер частиц около 60 нм. Также был проведен элементный состав поверхности с помощью рентгеновской спектроскопии (рис.3).



**Рисунок 3.** Рентгеноструктурный анализ поверхности модифицированного электрода.

Энергодисперсионный рентгеновский анализ, как и ожидалось, показал наличие атомов никеля на поверхности стеклоуглеродного электрода.

Для исследования электрохимической активности электрода использовали метод циклической вольтамперометрии. Вольтамперограммы полученные на немодифицированном и модифицированном никелевыми частицами электродах в растворах, насыщенных углекислым газом, представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4.** График сравнения циклических вольтамперограмм модифицированного и немодифицированного электродов в водном растворе  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 / \text{NaH}_2\text{PO}_4$  при насыщении системы углекислым газом.

По данной циклической вольтамперограмме видно, что перенапряжение реакции снизилось более чем на 300 мВ, модуль тока в присутствии  $\text{CO}_2$  на модифицированном электроде выше в 1,5 раза, чем на немодифицированном при  $E = -1500$  мВ отн. Ag/AgCl. Отсюда вывод, что данная никелесодержащая поверхность на стеклоуглероде активно катализирует реакцию восстановления углекислого газа.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

**Литература:**

- [1] Coutanceau C. et al. Electrocatalytic reduction of dioxygen at platinum particles dispersed in a polyaniline film //Electrochimica Acta. – 2000. – Т. 46. – №. 4. – С. 579-588.
- [2] Fisher B. J., Eisenberg R. Electrocatalytic reduction of carbon dioxide by using macrocycles of nickel and cobalt //Journal of the American Chemical Society. – 1980. – Т. 102. – №. 24. – С. 7361-7363.

evgeniy.solovev.anatolevich@mail.ru

## КИНЕТИКА СВЧ-РАЗРЯДОВ И ЛАЗЕРНО-ИНИЦИИРОВАННЫХ СВЧ-РАЗРЯДОВ В АЗОТЕ

**А. И. Сайфутдинов<sup>1,2</sup>, Е. В. Кустова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе получили развитие сформулированные ранее самосогласованные модели СВЧ-разрядов в молекулярных газах [1-4], в частности в азоте [2,4]. Представлены результаты численных расчетов в широком диапазоне давлений от 20 до 100 Торр. Проанализировано влияние кинетики различных элементарных процессов на динамику перехода из диффузной формы в контрагированную (филаментированную) [4].

Проведены численные расчеты для лазерно-иницированного СВЧ разряда при давлениях от 100 Торр и выше. Показано, что предварительный лазерный пробой позволяет инициировать СВЧ-разряд при высоких давлениях. При этом продемонстрировано, что разряд также проходит все основные стадии развития: вытягивание вдоль электрического поля, формирование диффузной формы и переход в контрагированную (филаментированную форму). Для всех режимов представлены распределения всех основных параметров плазмы лазерно-иницированного СВЧ-разряда, в том числе распределения концентраций различных типов заряженных и возбужденных частиц.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00241, <https://rscf.ru/project/23-19-00241/>.*

### **Литература:**

- [1] Сайфутдинов А. И. и др. //Физика плазмы. – 2019. – Т. 45. – №. 6. – С. 568-576.
- [2] Saifutdinov A.I., Kustova E.V. // Journal of Applied Physics. – 2021. – Vol. 129. – no. 2. – 023301 1-15.
- [3] Напалков О.Г., Кустова Е.В., Сайфутдинов А.И. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Т. 24. № 5. С. 1-17.
- [4] Saifutdinov A., Kustova E. //Plasma Sources Science and Technology. – 2023. – Vol. 32. – no. 12. – P. 125010.

as.uav@bk.ru

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАЗМЕННО-РАСТВОРНОГО СИНТЕЗА ЧАСТИЦ, СОДЕРЖАЩИХ КАТИОНЫ ЖЕЛЕЗА, КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ.

**К. В. Смирнова<sup>1, 2</sup>, П. А. Игнатьева<sup>1</sup>, А. Н. Иванов<sup>1</sup>, Д. А. Шутов<sup>1</sup>, В. В. Рыбкин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия*

*<sup>2</sup>Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия*

Ферриты с структурой типа шпинель привлекают внимание в фундаментальных исследованиях благодаря своим электрическим, магнитным, оптическим и каталитическим свойствам. Следовательно, они находят применение в различных отраслях промышленности [1-3]. Среди ферритов с структурой типа шпинель наиболее широко изученными являются ферриты кобальта и никеля ( $MFe_2O_4$  = Co, Ni). Для них характерна хорошая каталитическая активность, большая химическая стабильность и высокие электромагнитные характеристики. Эти свойства сильно зависят от морфологии, агломерации и размера частиц, которые в свою очередь связаны с выбранным методом получения. Новый метод получения ферритов является синтез в растворах под действием газового разряда. Которые ранее уже зарекомендовали себя для получения оксидов переходных металлов. При этом основная сложность использования плазменно-растворного метода получения ферритов заключается в недостаточности описания физико-химических процессов в растворах, происходящих на границе взаимодействия плазма-раствор. В данной работе мы описали кинетику образования твердой фазы в растворах нитратов железа, кобальта и никеля под воздействием низкотемпературной газоразрядной плазмы.

Растворы готовили растворением никеля, кобальта и железа  $Mx+(NO_3)-x$  ( $M = Ni^{2+}; Co^{2+}; Fe^{3+}$ ) в дистиллированной воде. Концентрация рабочего раствора подбиралась эмпирическим путем, таким образом, чтобы конечным продуктом были  $CoFe_2O_4$ ,  $NiFe_2O_4$ . Изображение установки для получения частиц и детальное описание методики получения частиц можно найти в работе [4].

Синтез ферритов проходил в две стадии. Во-первых, плазменно-растворный синтез ультрадисперсных частиц из растворов смеси нитратов под

действием тлеющего разряда постоянного тока. Второй – высокотемпературная обработка полученных гидроксонитратов и гидроксидов. Температуру подбирали на основании данных термогравиметрического анализа, и она составляла 1000 °С.

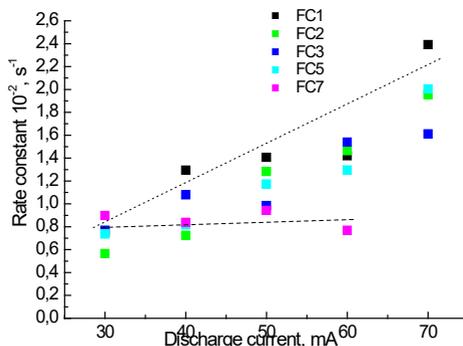
Для изучения кинетики использовали турбидиметрический метод анализа. Интенсивность света, проходящего через слой (1 мм ниже поверхности) раствора, измеряли с помощью спектрометра AvaSpec-2048 FT-2 (Avantes, Нидерланды). Оптическая длина составляла 45 мм. Источником света служил He-Ne лазер ( $\lambda = 632,8$  нм).

pH раствора измеряли до и после обработки раствора с помощью многопараметрического монитора качества воды РНТ-028 (Kelilong, Китай).

Действие разряда на растворы приводит к закислению среды в жидком катоде и защелачиванию среды в жидком аноде. В нашем случае исходные растворы имели кислую среду из-за гидролиза солей. Так если мы возьмем раствор, содержащий только один вид иона металла мы получим равномерное увеличение pH раствора в жидком аноде от времени обработки и уменьшение в жидком катоде. В случае обработки газовым разрядом растворов смесей сильного изменения pH раствора не наблюдается даже после 10 минут обработки.

В результате плазменной обработки в жидком аноде образуются нерастворимые соединения гидроксонитратов металлов. Причем образование носит ступенчатый характер, так сначала образуются нерастворимые соединения катионов металлов с более низким значением pH. Как следствие, начальные концентрации нужно подбирать таким образом, чтобы нитрат, из которого позже происходит образование нерастворимых соединений был в избытке.

Полученные зависимости изменения констант скорости образования твердой фазы от времени представлены на рис. 1. Как видно из графика, скорость образования твердой фазы в растворе под действием разряда увеличивается с увеличением силы тока. Это напрямую связано с накоплением активных частиц в растворе под действием разряда. Скорость образования частиц напрямую зависит от начального pH растворов. Так следует отметить, кинетика образования нерастворимых соединений уменьшается с увеличением стандартного электрохимического потенциала  $Fe \rightarrow Co \rightarrow Ni$ .



**Рисунок 1.** Зависимость эффективной константы скорости для различной начальной концентрации от тока разряда. Точками обозначены граничные условия для концентрации нитрата железа 100%. Штрихами отмечены граничные условия при концентрации нитрата кобальта 100%. [5]

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ (МК-2607.2022.1.2). Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение No. 075-15-2021-671).

### Литература:

- [1] Zhao G, Xu JJ, Chen HY. Fabrication, characterization of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> multilayer film and its application in promoting direct electron transfer of hemoglobin. *Electrochemistry Communications*. 2006;8(1):148-154.
- [2] Zhang T, Tian B, Kong J, Yang P, Liu B. A sensitive mediator-free tyrosinase biosensor based on an inorganic-organic hybrid titania sol-gel matrix. *Analytica Chimica Acta*. 2003;489(2):199-206.
- [3] Chu X, Jiang D, Zheng C. The preparation and gas-sensing properties of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocubes and nanorods. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007;123(2):793-797.
- [4] Shutov, D.A., Ivanov, A.N., Rakovskaya, A.V., Smirnova, K.V., et al. Synthesis of oxygen-containing iron powders and water purification from iron ions by glow discharge of atmospheric pressure in contact with the solution. 53, 445202 (2020). DOI 10.1088/1361-6463/aba4d7
- [5] Smirnova, K.V., Shutov, D.A., Ivanov, A.N. et al. Cobalt Ferrites: Formation From Nitrate Solutions Under the Action of DC Discharge. *Plasma Chem Plasma Process* (2023). <https://doi.org/10.1007/s11090-023-10391-2>  
smirnovakv1@gmail.com

## ФОРМИРОВАНИЕ ПДС ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ ВОЗДУХА В ДЛИННОЙ ТРУБКЕ

**Н. П. Виноградов<sup>1</sup>, В. Ф. Тарасенко<sup>1</sup>, Е. Х. Бакшт<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИСЭ СО РАН, Томск, Россия

В течение последних трех десятилетий активно изучаются атмосферные разряды, инициируемые на высотах от 20 до 100 км над уровнем моря [1]. Они получили название скоротечные оптические явления (СОЯ), при этом красные спрайты [1-2] являются наиболее распространенным их видом. Красные спрайты обычно возникают над мезомасштабными конвективными системами и представляют собой оптические вспышки красного цвета, обусловленные электрическими разрядами в мезосфере над грозовыми облаками [1-2]. Эти спрайты возникают на высоте около 70 км и распространяются как к поверхности Земли (до высоты около 50 км), так и в обратном направлении (до высот около 100 км).

Изучение свойств спрайтов в естественных условиях требует значительных затрат и использования сложного оборудования. Поэтому предпринимаются попытки изучения их аналогов в лабораторных условиях. В нашей лаборатории была создана установка для моделирования красных спрайтов с помощью емкостного разряда, при зажигании которого формировались плазменные диффузные струи (ПДС) длиной до 100 см [4].

Следует также отметить, что с увеличением высоты над уровнем моря снижается не только давление воздуха, но и относительная влажность воздуха, которая на больших высотах относительно невелика [3]. Наши предварительные эксперименты показали, что при одинаковых условиях изменение относительной влажности воздуха влияет на цвет ПДС.

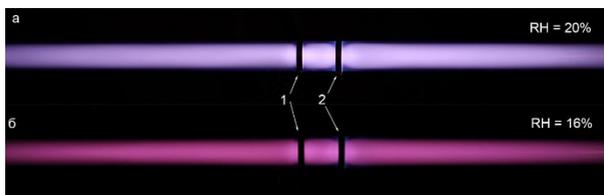
Целью данного исследования является экспериментальное изучение влияния относительной влажности воздуха на свойства ПДС, инициированных емкостным разрядом при давлениях, соответствующих высотам, на которых наблюдаются красные спрайты.

Для проведения исследований использовалась установка, описанная в [4], состоящая из разрядной камеры и высоковольтного генератора. Разрядная камера, в которой возникал емкостной разряд, представляла собой трубку из кварца марки GE 214, пропускающую УФ и видимый свет. Трубка имела длину

120 см и внутренний диаметр 50 мм. В экспериментах использовался комнатный воздух, который подавался в камеру после её предварительной откачки до давления 0.01 Торр. На внешней поверхности трубки располагались два кольцевых электрода из нержавеющей стали шириной 1 см. Расстояние между ними было 6 см. Левый электрод был заземлен, а на правый подавались импульсы напряжения от высоковольтного генератора.

Для проведения экспериментов использовался генератор NPG-15/2000N, работающий в импульсно-периодическом режиме. Генератор формировал на согласованную нагрузку импульсы напряжения амплитудой -9 кВ с частотой следования импульсов 1 кГц, длительностью фронта и импульса напряжения на полувысоте равными, соответственно, 4 нс и 9 нс. Для фотографирования разрядов использовался цифровой фотоаппарат Canon 2000D. Спектры излучения измерялись с помощью спектрометра HR2000+ES (OceanOptics Inc.). Спектральная чувствительность прибора и пропускание световода в диапазоне 200–1100 нм были известны, а разрешение оптической системы составляло не менее 0.9 нм.

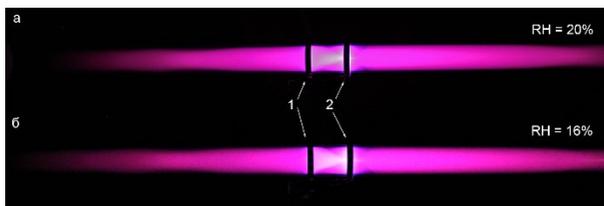
На рисунке 1 представлены фотографии свечения плазмы разряда при различных относительных влажностях воздуха при давлении 0.03 Торр.



**Рисунок 1.** Фотография свечения плазмы ПДС при давлении воздуха 0.03 Торр с разной относительной влажностью воздуха (RH). 1 – заземленный кольцевой электрод, 2 – высоковольтный кольцевой электрод, который имел отрицательную полярность

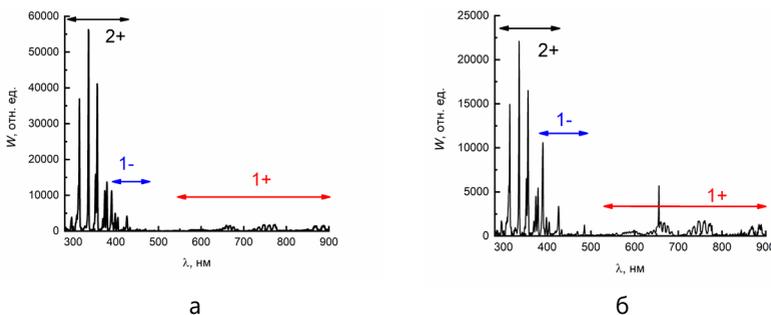
Фотографии на рисунке 1 явно демонстрируют визуальные изменения цвета разрядов при различной относительной влажности воздуха. При относительной влажности воздуха в 20% наблюдается преобладание белого цвета с голубым оттенком, в то время как при относительной влажности воздуха в 16% доминирует красный цвет. Эксперименты с азотом, содержащим низкую концентрацию примесей, подтвердили, что при низкой относительной влажности воздуха преобладает красный цвет.

Влияние относительной влажности воздуха на цвет ПДС проявляется при давлениях менее 0.1 Торр. При давлениях выше 0.1 Торр цвета ПДС при тех же влажностях воздуха оставались схожими, и форма струй практически совпадала, как показано на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Фотография свечения плазмы при давлении воздуха 0.4 Торр с разной относительной влажностью воздуха. 1 – заземленный кольцевой электрод, 2 – высоковольтный кольцевой электрод отрицательной полярности

Сопоставление рисунков 1 и 2 позволяет предположить наличие второго механизма, влияющего на цвет ПДС при изменении относительной влажности воздуха. Для более детального изучения этого механизма были проведены исследования спектров излучения ПДС в различных условиях.



**Рисунок 3.** Спектральное распределение плотности энергии излучения ПДС  $W$  на расстоянии 11 см от правого кольцевого электрода при давлении воздуха с относительной влажностью 20% 0.4 Торр (а) и 0.03 Торр (б).

При относительной влажности воздуха 20% и давлении 0.4 Торр спектры излучения ПДС (рисунок 3, а) показывают преобладание полос второй положительной системы молекулярного азота (2+) в ближней УФ-области спектра. На этой спектрограмме также наблюдаются полосы излучения первой отрицательной системы азота (1-) и широкие полосы первой

положительной системы азота (1+). Важно отметить, что несмотря на большую интенсивность полос 2+ системы азота в УФ-области спектра, видимый и фотографируемый красный цвет разрядов определяется полосами излучения 1+ системы азота.

С уменьшением давления воздуха спектр излучения также изменился (рисунок 3, б). Интенсивность полос 1- системы азота увеличилась, а также появилась интенсивная линия 656.3 нм, принадлежащая атомарному водороду ( $H_{\alpha}$ ). Появление этой линии можно связать с диссоциацией воды за счет увеличения приведенного электрического поля  $E$  при уменьшении давления воздуха.

Относительная влажность воздуха не оказывает влияния на цвет ПДС при давлении 0.4 Торр (рисунок 2) и при более высоких давлениях [4]. Можно предположить, что при уменьшении давления воздуха и низких концентрациях воды красный цвет разряда сохраняется только при ограничении  $E$ . При сохранении пробивного напряжения и увеличении давления  $E$  уменьшается. Таким образом, изменение цвета разряда на рисунке 1, а также спектра на рисунке 3, б может быть объяснено увеличением пробивного напряжения и, следовательно, приведенного электрического поля при увеличении относительной влажности воздуха. Из этих данных можно сделать вывод, что приведенные электрические поля на больших высотах, где также наблюдается излучение красных спрайтов, сравнительно низки, и вклад излучения молекулярного иона азота (1-система) в видимой области спектра невелик, что, соответственно, сохраняет красный цвет разряда.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-1026 от 15.11.2021.

#### **Литература:**

- [1] Sentman D.D. Physics of Plasmas. 1995. V. 2, N 6. P. 2514–2522.
- [2] Rodger C.J. Reviews of Geophysics. 1999. V. 37, N 3. P. 317–336.
- [3] Yue J., Russell III J., Gan Q., et al. Geophysical Research Letters. 2019. V. 46, N 22 P. 13452-13460.
- [4] Tarasenko V., Vinogradov N., Baksht E., Sorokin D. Journal of Atmospheric Science Research. 2022. V. 05, N 04. P. 26–36.

vinikitavin@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ ПЛЕНОК ПОЛИЭТИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В АТМОСФЕРЕ

**М. А. Мокеев<sup>1</sup>, М. С. Воробьев<sup>1</sup>, С. Ю. Дорошкевич<sup>1</sup>, М. С. Торба<sup>1</sup>, Н. Н. Коваль<sup>1</sup>, Р. А. Картавцов<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

**Ключевые слова.** Электронный пучок, источник электронов, плазменный катод, полимерные пленки, адгезия, модификация

### **Введение**

Композиционные материалы на основе полимерных пленок находят всё большее применение в промышленности, в частности, можно отметить необходимость создания липких лент, которые используются для изоляции трубопроводов и строительных конструкций [1,2]. Одной из технических особенностей полимеров является их низкая адгезия, что приводит к необходимости принятия дополнительных мер по ее увеличению с целью улучшения смачиваемости поверхности [3]. Применение новых композиционных материалов в том числе обусловлено разработкой и использованием новых методов и подходов, а в частности, разработкой и созданием нового оборудования для модификации, например, использование низкоэнергетических ускорителей электронов, позволяющих осуществлять генерацию электронных пучков большого сечения с их выводом в атмосферу.

Целью данной работы являлось определение принципиальной возможности модификации адгезионных свойств пленок полиэтилена (далее ПЭ) низкоэнергетическим (до 200 кэВ) субмиллисекундным электронным пучком большого сечения, выведенным в атмосферу. Модификацию проводили на модернизированном импульсном широкоапертурном ускорителе электронов «ДУЭТ» с сеточным плазменным катодом и выводом генерируемого пучка большого сечения (15×75 см<sup>2</sup>) в атмосферу [4]. Принципиальная схема ускорителя приведена на рисунке 1.

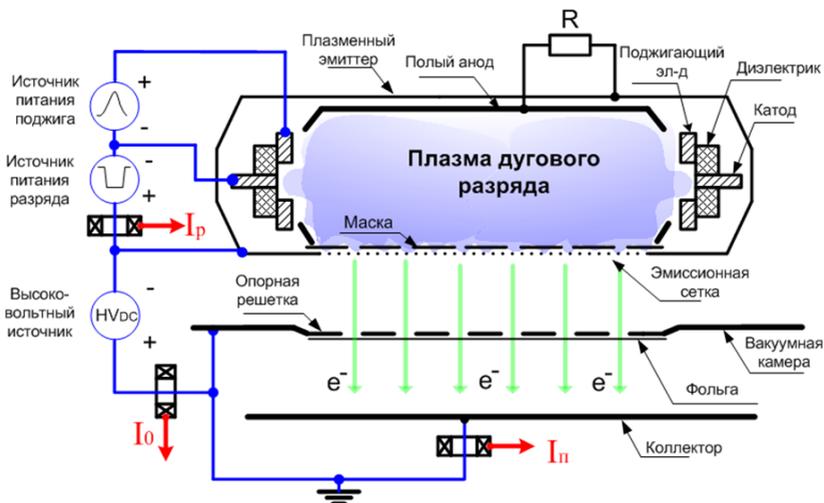
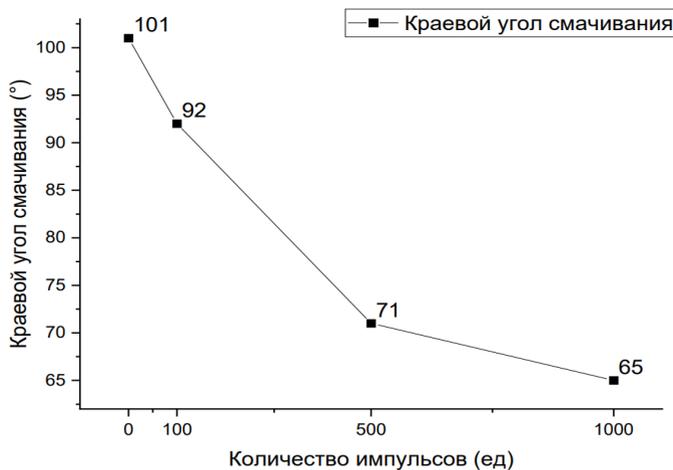


Рисунок 1. Принципиальная схема ускорителя "Дуэт"

### Основная часть

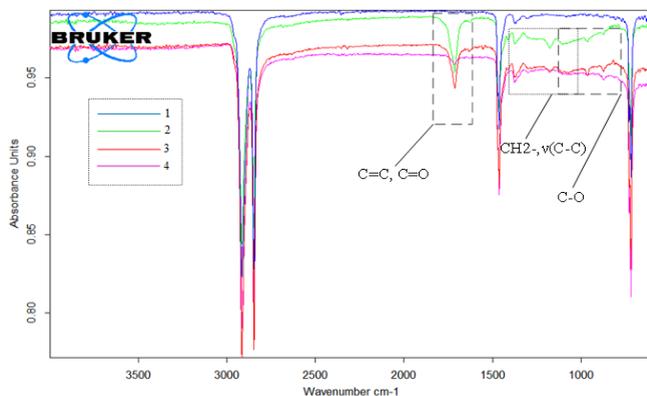
Из литературных данных известно, что модификация пленок полиэтилена в атмосфере приводит к изменению краевого угла смачивания – основного показателя адгезии поверхности. Испытание проводили методом "лежащей капли", при температуре воздуха 25°C и относительной влажности воздуха 30-60%, на лабораторной установке. На закреплённый образец полимерной пленки, расположенный на предметном столе, с помощью лабораторной пипетки переменного объема помещали каплю дистиллированной воды объемом 20 мкл. При помощи цифрового микроскопа, измеряли краевой угол смачивания и с помощью программного обеспечения TopView определяли угол  $\theta$  капли по проекции на экране. Наименьшее значение краевого угла смачивания составляет 65° при 1000 импульсах, при 500 и 100 импульсах значение краевого угла смачивания равно 71° и 92° соответственно по сравнению с 101° исходным. Согласно предположению, изменение краевого угла смачивания и улучшение смачиваемости связано с изменением структурного и химического состава пленок полиэтилена. Результаты исследования представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Зависимость краевого угла смачивания ПЭ от количества импульсов

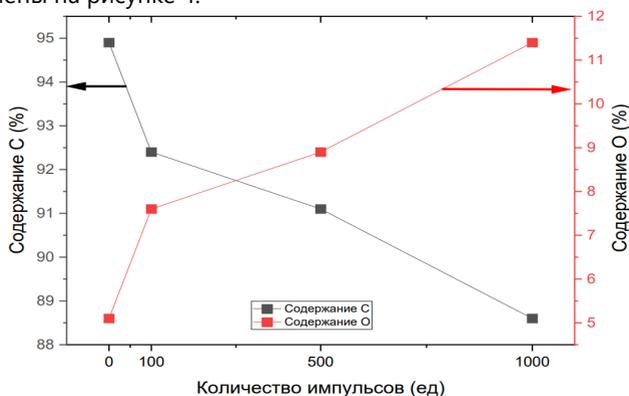
Методом инфракрасной (ИК) спектроскопии было изучено химическое строение поверхности пленок ПЭ, модифицированных электронным пучком в атмосфере. Исследование проведено согласно ГОСТ Р 57941-2017 «Композиты полимерные. Инфракрасная спектроскопия. Качественный анализ» при помощи ИК-спектрометра ALPHA (Bruker, США) с приставкой МНПВО (кристалл ZnSe), на оборудовании лаборатории Химии полимеров БИП СО РАН.

При различных пострадиационных интервалах на поверхности модифицированных пленок ПЭ наблюдается формирование новых функциональных групп: в области  $1700-1650\text{ см}^{-1}$  групп  $\text{C}=\text{C}$  и  $\text{C}=\text{O}$ ; в области  $1300-1100\text{ см}^{-1}$  отмечены колебания, вызванные формированием  $\text{CH}_2$ - и  $\nu(\text{C}-\text{C})$  групп, в области  $1200-1000\text{ см}^{-1}$  – валентные колебания  $\text{C}-\text{O}$ -групп, указывающие на окисление и функционализацию поверхности. При увеличении количества импульсов разряда наблюдается увеличение относительной интенсивности полос поглощения, что может свидетельствовать об увеличении концентрации углерода (С) и кислорода (О) относительно водорода (Н), находящимся в составе исходной пленки ПЭ. Результаты исследования представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Инфракрасные спектры пленок полиэтилена: 1 – исходный, 2 – 100 импульсов, 3 – 500 импульсов, 4 – 1000 импульсов

Образование кислородсодержащих групп на поверхности ПЭ и СтПЭ подтверждается и результатами количественного и качественного анализа методом растровой электронной микроскопии. Результаты исследования представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Зависимость содержания кислорода (O) и углерода (C) от количества импульсов модификации.

Увеличение содержания кислорода (O) до 11,4% с 5,1% и снижение содержания углерода (C) с 94,9% до 88,6% (по масс.) для пленок ПЭ при 1000 импульсах по сравнению с исходными указывает образование гидроксильных OH-групп и кислородсодержащих полярных

функциональных групп на поверхности полимерной пленки, что свидетельствует об улучшении смачиваемости из-за окисления поверхности полимерной пленки и соответственно эксплуатационных свойств.

### **Заключение**

Проведены предварительные эксперименты по модификации пленок полиэтилена электронным пучком большого сечения с выводом в атмосферу, что подтверждает возможность применения установок такого типа для улучшения адгезионных свойств и создания композиционных материалов на их основе. Оптимальным режимом модификации пленок полиэтилена выбран режим с 500 импульсами, при котором краевой угол смачивания составил 71°. Методом ИК-спектроскопии обнаружено формирование кислородосодержащих функциональных групп, подтверждающееся исследованием методом растровой электронной микроскопии, при которой соотношение содержания кислорода к углероду составляет 11,4/88,6%. В дальнейшем требуется проведение исследование прочностных свойств при аналогичных режимах с целью исследования зависимости адгезионных свойств и прочностных.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10015-П).

### **Литература:**

- [1] Власенко Ф. С., Раскутин А. Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях. Труды ВИАМ. № 8. – 2013. – С. 4 – 13.
- [2] Заикин А. Е. Полимерные ленты с клеевым слоем для антикоррозионной изоляции трубопроводов / А. Е. Заикин, С. Ю. Софьина, О. В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 6. – С. 98-112.
- [3] Модификация адгезионных свойств полимерных пленок обработкой коронным разрядом / В. В. Ананьев, Т. Н. Перетокин, Г. Е. Заиков, С. Ю. Софьина // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 5. – С. 116-119.
- [4] An electron source with a multiaperture plasma emitter and beam extraction into the atmosphere. Vorobyov M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A. Instruments and experimental techniques. 2015. т. 58. № 5. с. 687-695.

## ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ АНОРТИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ

Семеновых М.А.<sup>1</sup>, Н. К. Скрипникова<sup>1</sup>, В. В. Шеховцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Томск, Россия

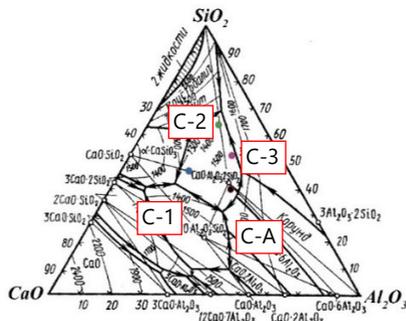
Получение керамических материалов и порошков различного назначения в настоящее время является одним из перспективных направлений современного материаловедения. Одним из таких видов материала является анортит, который обладает высокой термической стойкостью, механической прочностью, химической инертностью, стабильностью при высоких температурах и низкой теплопроводностью [1–3]. Благодаря этим свойствам он может применяться в производстве керамики, теплоизоляционных и абразивных материалов. Процессы синтеза анортита характеризуются высокими энергетическими затратами и длительностью процесса в связи с его температурой плавления 1550 °С. Использование традиционных источников нагрева для его синтеза являются нерациональными. Для решения данной проблемы предлагается использование плазменной установки, которая позволяет производить синтез и плавление тугоплавких материалов широкого класса. Среднемассовая температура, обеспечиваемая плазменной установкой, составляет порядка 6000 °С [4]. Целью данной работы является оценка возможности применения энергии плазмы для синтеза анортита с использованием природного сырья из расплава.

В работе для синтеза анортита использовались природные материалы с преимущественным содержанием одного из оксидов: CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub>. Источником CaO является известняк, источником Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – бёмит, а источником SiO<sub>2</sub> – кварцевый песок. Химический состав сырьевых материалов представлен в табл. 1.

**Таблица 1.** Химический состав сырьевых материалов

Сырье	Содержание оксидов, масс. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	ппп
Кварцевый песок Туганского м-я	98,53	0,52	0,04	0,07	0,02	0,08	0,74
Бёмит Североуральского м-я	5,82	61,33	2,05	24,35	0,30	2,30	3,85
Известняк Сергеевского м-я	3,37	2,03	77,94	1,47	4,87	–	10,32

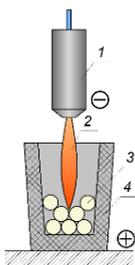
Химические составы, представленные в табл. 1, пересчитывались на трехкомпонентную систему  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , после чего из сырьевых материалов составлялись композиции. Соотношение оксидов  $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$  в композициях и их фигуративное представление на диаграмме состояния системы  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  представлены соответственно на рис. 1. Стоит отметить, что классическое массовое стехиометрическое соотношение оксидов  $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$  в анортите составляет 1:1:2.



**Рисунок 1.** Диаграмма состояния системы  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

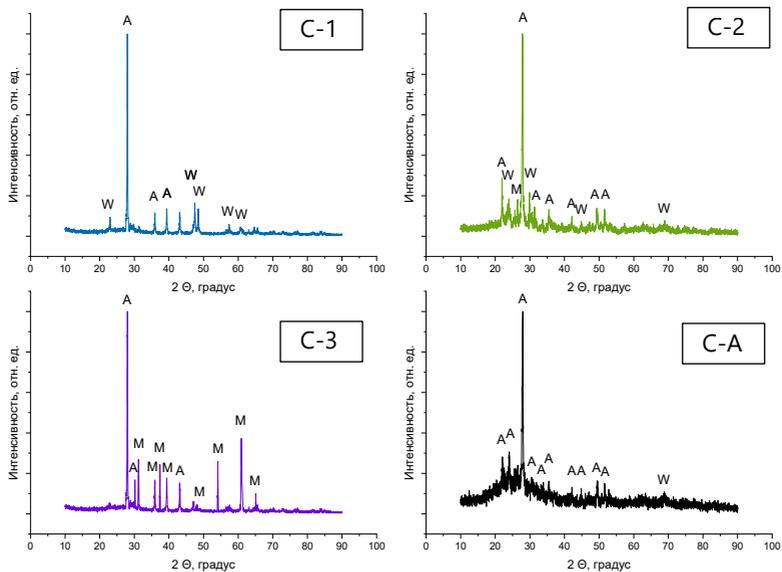
Точки составов лежат в области кристаллизации анортита и подобраны таким образом, чтобы исследовать пограничные области кристаллизации анортита в сравнении с составом соответствующему стехиометрическому анортиту. Состав C-1 является пограничным с волластонитом, C-2 – с тридимитом, а C-3 – с муллитом. Состав C-A подобран таким образом, чтобы соотношение оксидов  $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$  соответствовало стехиометрическому отношению соединения анортита.

Методика подготовки составов включает следующие операции: смешивание материалов в сухом виде, их затворение раствором 5 % поливинилового спирта в количестве 20 мас.% от общей массы сухой шихты, гранулирование до размера частиц  $5 \pm 1,5$  мм и высушивание при нормальных условиях в течение 4 часов. Методика получения продуктов плавления включает: плазменное воздействие на шихту массой  $6 \pm 2$  грамм осуществляется в течение 45 секунд при следующих технологических параметрах – напряжение 97 В; сила тока 100 А, расход плазмообразующего газа 10 л/мин, вид плазмообразующего газа – азот. В процессе воздействия плазменного потока на компонентную шихту происходит ее плавление, после чего при остывании расплава происходит образование стеклокристаллического материала. На рис. 2 представлено схематическое изображение процесса плазменного плавления.



**Рисунок 2.** Схематическое изображение процесса плазменного плавления:  
1 – плазматрон; 2 – плазменная струя; 3 – компонентная шихта;  
4 – графитовый тигель

Полученные в результате плазменного плавления продукты подвергались прокатке в муфельной печи при температуре 850 °С в течение 3 часов. После чего прокатленные продукты плавления подвергались рентгенофазовому исследованию, результаты которого представлены на рис. 3.



**Рисунок 3.** Рентгеновские дифрактограммы продуктов плавления:  
А – анортит  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ; W – волластонит  $\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$ ; M – муллит  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$

Из представленных данных следует, что композиция С-1 представлена фазами анортита ( $d = 0,319; 0,250; 0,229$  нм) и волластонита ( $d = 0,387; 0,192; 0,188; 0,161; 0,153$  нм); фазовый состав композиции С-2 представлен анортитом ( $d = 0,405; 0,319; 0,285; 0,253; 0,214; 0,184; 0,177$  нм) волластонитом ( $d = 0,376; 2,99; 0,202; 0,136$  нм) и муллитом ( $d = 0,337$  нм); у композиции С-3 наблюдаются фазы анортита ( $d = 0,319; 0,296; 0,210$  нм) и муллита ( $d = 0,287; 0,250; 0,240; 0,228; 0,190; 0,169; 0,152; 0,143$  нм); а в композиции С-А установлено преимущественное содержание анортита ( $d = 0,404; 0,371; 0,319; 0,306; 0,280; 0,253; 0,215; 0,202; 0,184; 0,177$  нм) и волластонита ( $d = 0,136$  нм). По результатам качественного фазового анализа можно отметить, что композиция С-А является наиболее чистым анортитом из представленных, в ней обнаружены преимущественно рефлексы анортита. В связи с тем, композиция С-А является наиболее чистым анортитом, процессы ее кристаллизации являются незавершенными, о чем свидетельствует аморфное гало в диапазоне углов дифракции 15-25 градусов.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что природное сырье, смешанное в необходимом соотношении, подверженное плазменному плавлению, позволяет получить силикатный расплав, фазовый состав которого представлен анортитом.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001

#### **Литература:**

- [1] Sokolar R., Nguyen M. Sintering of anorthite ceramic body based on interstratified illite-smectite clay, *Ceramics International*. 2022. Vol. 48 (21). P. 31783-31789.
- [2] Cheng X., Ke S., Wang Q., Wang H., Shui A., Liu P. Fabrication and characterization of anorthite-based ceramic using mineral raw materials *Ceramics International*. 2012. Vol. 38 (4). P. 3227-3235.
- [3] A. Mergen, ve Z. Aslanoğlu Low-temperature fabrication of anorthite ceramics from kaolinite and calcium carbonate with boron oxide addition, *Ceramics International*. 2003. Vol. 29 (6). P. 667-670.
- [4] Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V., Semenovych M.A. Thermal plasma synthesis of anorthite, *Russian Physics Journal*. 2022. T. 65. № 6. С. 1058-1063.

[semenovychmark@gmail.com](mailto:semenovychmark@gmail.com)

## УПРАВЛЯЕМЫЙ СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

**А. В. Зайковский<sup>1</sup>, И. Б. Юдин<sup>1</sup>, М. А. Морозова<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, РФ*

Современные технологии проявляют большой интерес к наноструктурированным материалам в связи с проявлением ими своих уникальных свойств. Углерод является одним из наиболее интересных веществ в этой области из-за обладания большим количеством аллотропных форм. Наиболее известными углеродными нанообъектами являются фуллерены, углеродные нанотрубки и графен. В данной работе будут приведены результаты исследований развития плазмохимического метода синтеза углеродных наноматериалов 0D, 1D и 2D размерностей с использованием плазмы электродугового разряда.

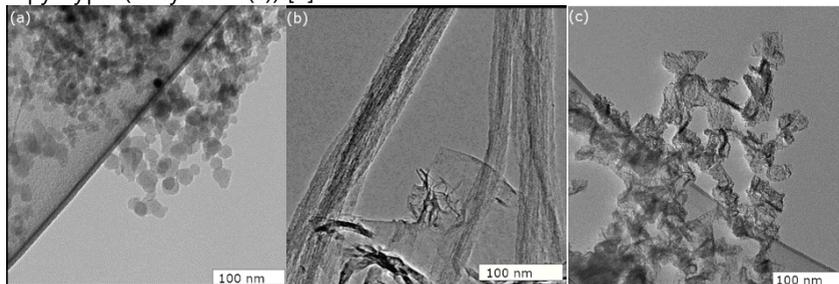
Исследования были проведены с использованием электродугового реактора, который представляет собой герметичную камеру объемом 7 литров, в которой соосно располагаются два электрода. Камера реактора предварительно продувается и заполняется рабочим газом до определенного давления в диапазоне от 3 до 200 Торр. Для получения углеродных глобул и графеновых хлопьев в качестве рабочего газа используется гелий, для получения углеродных нанотрубок – пропан-бутановая смесь. В качестве анода используется цилиндрический стержень диаметром 8 мм и длиной 80 мм. Анод может быть выполнен из сплошного графита, либо в нем может располагаться цилиндрическая полость диаметром 6 мм и глубиной 50 мм, которая плотно забивается смесью порошков графита и катализатора. В данной работе в качестве катализаторов использовались никель - для получения углеродных нанотрубок, и кремний – для получения графеновых хлопьев. Сплошной графитовый анод используется для получения углеродных глобул. Катод представляет собой цельнографитовый цилиндр диаметром 20 мм и длиной 12 мм. Дуговой разряд зажигается между электродами с силой тока 120А и напряжением 23В. По некоторым оценкам, газовая температура в плазме дугового разряда может превышать  $7 \cdot 10^3 \text{K}$  при силе тока 100А [1]. При этом, сами электроды также разогреваются до температур, которые обеспечивают испарение материала, составляющего их. Используя модель испарения Ленгмюра [2], скорость испарения графита в настоящих экспериментах позволила провести

оценку температуры рабочей поверхности анода, которая составляет примерно 3750K. При данных температурах давление насыщенных паров углерода составляет около 12 Торр, что обеспечивает постоянное поступление углеродного пара в горячие области дугового разряда. Кроме того, катализатор (никель, или кремний), входящий в состав распыляемого анода, разлагается и испаряется более интенсивно при данных температурах, поэтому в первые моменты эксперимента материал из полости анода улетает более интенсивно, чем углерод из графитовых стенок, оставляя часть пустой полости. Далее, продукты испарения электрода попадают в горячую область дугового разряда, откуда далее образуют поток в объем камеры реактора. Расширение образуемой струи и смешивание с буферным газом приводит к охлаждению газоплазменной смеси. При этом, при изменении температуры смеси меняется её состав. При понижении температуры начинают происходить процессы образования углеродных кластеров, основными компонентами являются кластеры C<sub>2</sub> и C<sub>3</sub>, которые при взаимодействии между собой и одноатомным углеродом приводят к формированию фуллереновых и графитовых зародышей. Формирование структуры фуллеренов в дуговом разряде преимущественно происходит при специальных условиях в среде гелия [3]. В данных экспериментах состав среды включает как гелий, так и существенное количество паров катализаторов, поэтому процесс конденсации паров углерода идет по сценарию, отличному от сценария формирования фуллереновой структуры. В свою очередь, присутствие катализаторов и давление буферного газа определяют формируемую углеродную структуру.

Распыление чистых графитовых электродов приводит к тому, что структура формируемых графитовых зародышей обрастает углеродом и может трансформироваться в горячих областях камеры реактора. При этом, в камере реактора формируется вихревое течение, возвращающие сформированные углеродные частицы в более горячие области, где на них может осажаться новый углеродный слой, в результате чего может формироваться углеродная наночастица, состоящая из графитизированного ядра, покрытого оболочкой из разупорядоченного углерода (Рисунок 1 (a)) [4]. Данные частицы имеют приближенную форму шара и могут называться глобулами. На структуру формируемых углеродных глобул оказывает большое влияние давление буферного газа. Было установлено, что увеличение давления буферного газа приводит к возрастанию концентрации углеродной компоненты в газовой фазе и более быстрому охлаждению при разлете в камере реактора [5]. Данные факторы приводят к тому, что

увеличение давления газа дает образование углеродных глобул большего размера с более разупорядоченной структурой.

Использование кремния в составе забивки распыляемого анода приводит к появлению паров кремния в образуемой газоплазменной смеси. При этом, кремний может активно взаимодействовать с углеродом в процессе его конденсации и формирования структуры. В процессе конденсации углерод образует графитовые зародыши с большим количеством свободных связей, на которые садятся атомы кремния, тем самым предотвращая замыкание углеродных связей друг на друга и сопутствующие процессы искривления и свертывания формируемой углеродной структуры. Таким образом, пары кремния способствуют формированию плоской графеновой структуры. При этом, при избытке углерода кремний замещается углеродным атомом, а сам образует наночастицу карбида кремния на поверхности графеновой структуры (Рисунок 1 (c)) [6].



**Рисунок 1.** Углеродные глобулы (a), углеродные нанотрубки (b), графеновые глобулы (c).

Использование никеля в составе распыляемого электрода приводит к тому, что при понижении температуры газоплазменной смеси начинают происходить процессы конденсации паров никеля и образования жидких наночастиц никеля. Данные частицы способны взаимодействовать с углеродными структурами и насыщаться углеродом. При условии достаточного источника углерода никелевые наночастицы стимулируют формирование структуры углеродных нанотрубок (УНТ) на своей поверхности. В настоящих экспериментах использовалась пропан-бутановая смесь в качестве рабочего газа, что приводило к разложению молекул углеводорода на поверхности никелевых наночастиц и формированию структуры нанотрубок из высвободившегося углерода. Тем не менее, для обеспечения достаточного количества углерода давление рабочего газа должно превышать определенное значение. В данной работе было

установлено, что давление 60 Торр не приводит к формированию структуры УНТ, в то время как при использовании давления 200 Торр формируемый материал содержит значительное количество УНТ. С другой стороны, при использовании большего значения давления рабочего газа 400 Торр, в полученных продуктах практически не наблюдается присутствие углеродных нанотрубок, что связано с быстрым охлаждением никелевых наночастиц при разлете в камере реактора [7].

Таким образом, с использование электродугового разряда возможно получать углеродные наноструктуры, включая 0D углеродные глобулы, 1D углеродные нанотрубки, 2D графеновые плоскости. Параметрами, управляющими синтезом, являются давление буферного газа и наличие каталитических веществ.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-79-00139  
<https://rscf.ru/project/22-79-00139/>

#### **Литература:**

- [1] Kundrapu M, Keidar M (2012) Numerical simulation of carbon arc discharge for nanoparticle synthesis. *Phys Plasmas* 19(7):073510.
- [2] Langmuir I (1932) Evaporation, condensation and adsorption. *J Am Chem Soc* 54(7):2798–2832.
- [3] Alekseyev NI, Dyuzhev GA (2008) Fullerene formation in an arc discharge. *Carbon* 41(7):1343-1348.
- [4] Zaikovskii AV, Novopashin SA (2017) Electroconductive and magnetic properties of pure carbon soot produced in arc discharge: Regimes of various buffer gas pressure. *Phys Stat Sol A* 214:1700142.
- [5] Zaikovskii A, Yudin I, Kozlachkov D, Nartova A, Fedorovskaya E (2022) Gas pressure control of electric arc synthesis of composite Sn-SnO<sub>2</sub>-C nanomaterials. *Vacuum* 195:110694.
- [6] Zaikovskii AV, Kardash TY, Kolesov BA, Nikolaeva OA (2019) Graphene, SiC and Si Nanostructures Synthesis During Quartz Pyrolysis in Arc-Discharge Plasma. *Phys Stat Sol A* 216:1900079.
- [7] Морозова МА, Ухина АВ, Зайковский АВ (2023) Влияние давления пропан-бутановой смеси а морфологию углеродного наноматериала, формируемого в дуговом разряде. *Теплофизика и аэромеханика* 5:965-973.

[lexeyza@gmail.com](mailto:lexeyza@gmail.com)

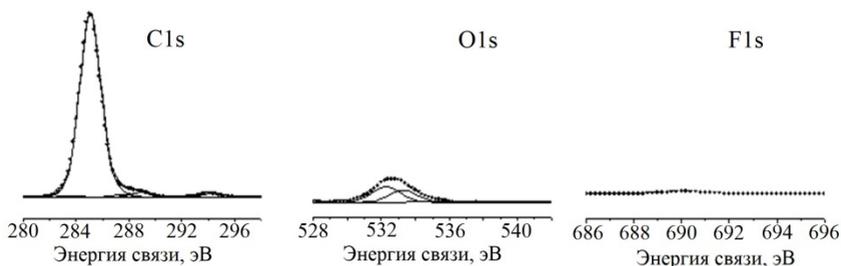
## МОДИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ НТП КОРОННОГО РАЗРЯДА

**Н. В. Шкодич<sup>1</sup>, А. М. Ляхович<sup>1</sup>, И. А. Сотников<sup>1</sup>, Э.М. Галиханов**

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия

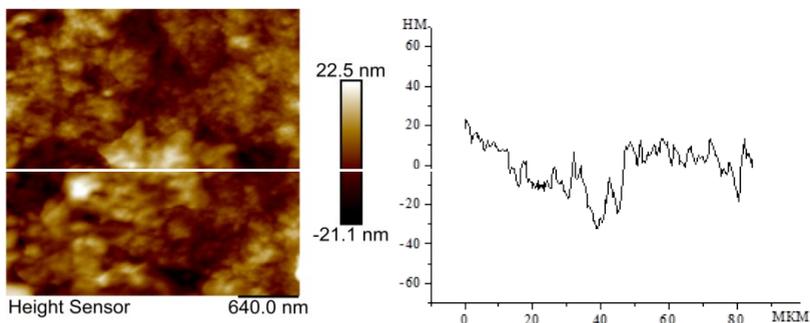
В работе рассмотрена модификация пленок на основе полипропилена, содержащих технологические добавки, при обработке пленок в низкотемпературной плазме коронного разряда. Обычно в состав полимерных пленок входят технологические добавки на основе кремния, фтора и азота, обеспечивающие скольжение и антислипание в рулоне [1]. Объемное содержание модифицирующих добавок не превышает единиц процентов. Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и атомно-силовой микроскопии исследованы химический состав, рельеф, адгезионные и деформационные свойства поверхности пленок до и после модификации в плазме.

Исследование поверхностных слоев исходной пленки методом РФЭС позволило установить, что помимо атомов углерода и кислорода (С – 93 ат.%, О – 7 ат.%) на поверхности в следовых количествах имеются атомы фтора (рисунки 1). Появление кислорода в поверхностных слоях пленки можно объяснить окислительными процессами, протекающими при её экструзии.



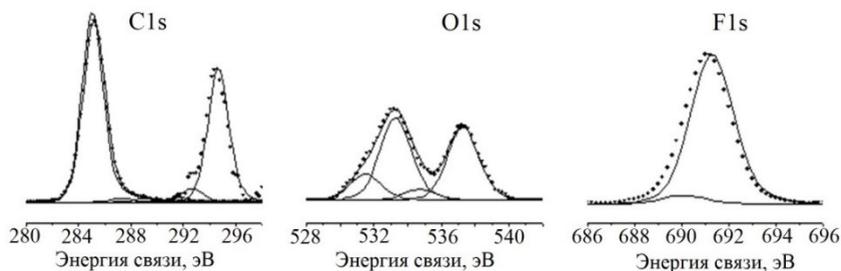
**Рисунок 1.** РФЭС – спектры высокого разрешения элементов С, О, F поверхности исходной пленки.

Исследование рельефа поверхности пленки методом АСМ выявило, что она обладает малой шероховатостью: перепады высот поверхности не превышают 10 нм, а участки с перепадом высот 20 нм (рисунок 2) обусловлены в основном неровностями пластин плоскощелевого экструдера.



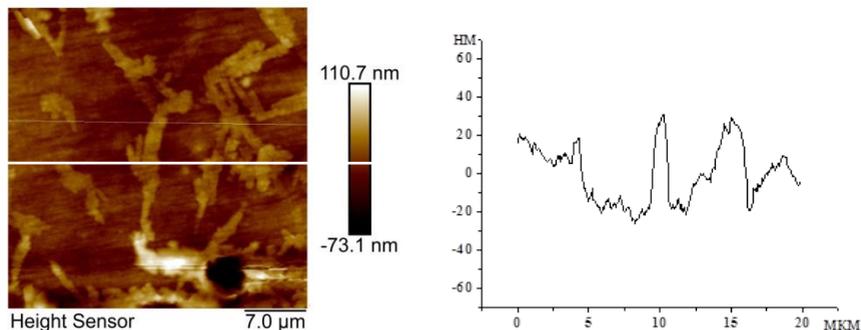
**Рисунок 2.** АСМ изображение поверхности исходной пленки и сечения ее рельефа.

После модификации пленки в коронном разряде в поверхностных слоях появляются в значительном количестве (26 ат.%) атомы фтора, которые можно отнести к технологической добавке с активным веществом – фторполимером. Содержание атомов углерода и кислорода составило 63 ат.% и 11 ат.% соответственно, других элементов на поверхности пленки не обнаружено.



**Рисунок 3.** РФЭС – спектры высокого разрешения поверхности модифицированной коронным разрядом пленки.

Рельеф пленки после модификации отображает появление новых структур на поверхности (рисунок 4), перепад высот которых 180 нм.



**Рисунок 4.** АСМ изображение поверхности модифицированной пленки и профиль ее рельефа

Появление на поверхности пленки атомов фтора можно связать только с миграцией добавки на основе фтора из объема в поверхностные слои. Согласно значениям  $E_{св}$  линий в F1s-спектре [2, 3] установлено, что атомы фтора входят в сложную полимерную структуру, состоящую как из фрагментов  $(-CF_2-CF_2-)_n$  так и из функциональных групп с участием атомов С, F и О.

Анализ результатов исследования показал, что обработка в низкотемпературной плазме коронного разряда пленки на основе полипропилена, содержащий добавку с активным веществом - фторполимером, приводит к миграции технологической добавки на поверхность пленки, изменению химического состава и структуры поверхности пленки, что обусловило возрастание упругих и адгезионных свойств поверхности.

#### **Литература:**

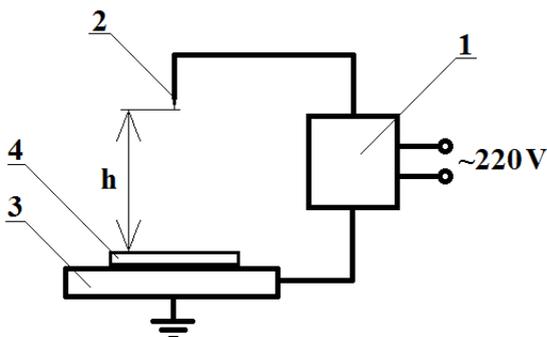
- [1] <https://cromexgroup.ru/продукция/суперконцентраты/добавки>
- [2] NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy database, [<https://srdata.nist.gov/xps/Default.aspx>];
- [3] Beamson, G. High resolution XPS of organic polymers. The scienta ESCA 300 database / G. Beamson, D. Briggs. – Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 1992. – 582 p  
[nvshkodich@gmail.com](mailto:nvshkodich@gmail.com)

## ЗАРЯДОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЁНОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ КОРОНОГО РАЗРЯДА

И. А. Сотников, Н. В. Шкодик, А. М. Ляхович, Э. М. Галиханов

*Казанский федеральный университет, Казань, Россия*

При обработке полимерных плёнок в низкотемпературной плазме коронного разряда возможно получение пьезоэлектриков[1]. В работе рассмотрены пьезоэлектрики на основе полипропилена и полиэтилентерефталата, обработанные на установке коронного разряда (рисунок 1).

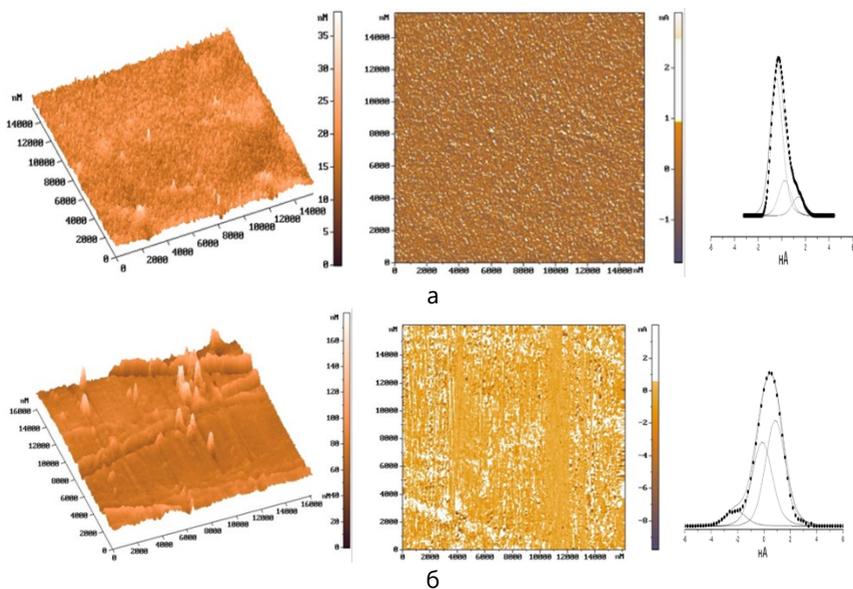


**Рисунок 1.** Принципиальная схема коронатора Start Model-5:

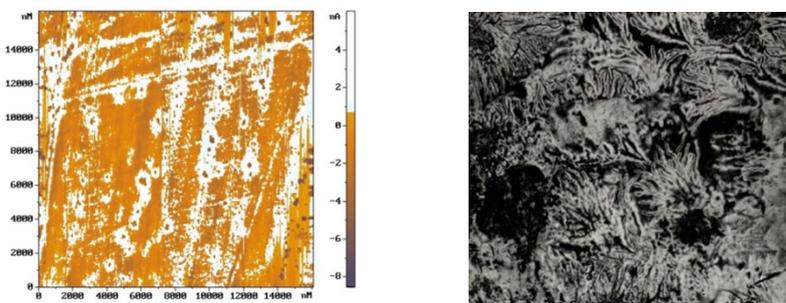
1 – источник питания, 2 – заостренный электрод, 3 – заземленный электрод, 4 – образец.

Режимы плазмообработки:  $U = -9$  кВ, подложка заземлена, время обработки  $t = 1$  мин,  $h$  составляло от 2 см до 30 см, температура и давление комнатные, обработка на воздухе.

Методом АСМ исследованы плёнки до и после обработки в плазме (рисунок 2). Установлено что исходная плёнка имеет фазовую неоднородность, после обработки плёнки коронным разрядом рельеф поверхности стал более выраженным и неоднородность увеличивается. Распределение зарядового состояния поверхности плёнок визуализировалось с помощью ультрадисперсных графитовых порошков и карты фазового контраста поверхности плёнки (рисунок 3).



**Рисунок 2.** АСМ-изображения рельефа, карты фазового контраста и статистики распределения фазового контраста плёнки: а – исходной, б – после обработки в плазме.



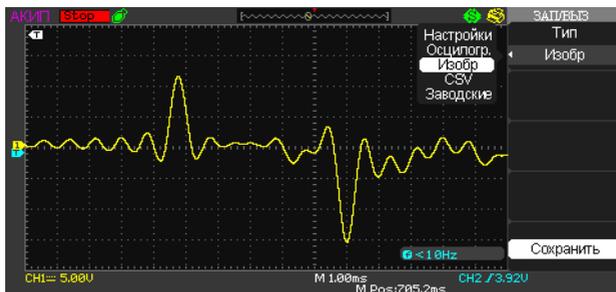
**Рисунок 3.** Фазовый контраст рельефа поверхности и распределение порошка на плёнке.

Из обработанных плёнок были созданы пьезоэлектрические генераторы для маломощных устройств. На рисунке 4 представлен один из генераторов состоящий из двух плёнок, соединённых клеевой прослойкой.



**Рисунок 4.** Генератор с клеевой прослойкой.

Напряжение, вырабатываемое генератором, определяли с помощью осциллографа АКИП-4115/5А (рисунок 5). В зависимости от конструкции генератора амплитуда напряжения изменялась от 20 В до 170 В.



**Рисунок 5.** Амплитуда колебаний напряжения электретного генератора при механическом воздействии.

#### Литература:

[1] Гороховатский, Ю. А. Электретный эффект и его применение / Ю. А. Гороховатский // Соросовский образовательный журнал. – 1997. - №8 – С.92-98.

[iiistyklem@bk.ru](mailto:iiistyklem@bk.ru)

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА В ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ

**Д. В. Терешонок<sup>1</sup>, М. А. Саргсян<sup>1</sup>, М. Х. Гаджиев<sup>1</sup>, А. А. Лубин<sup>1</sup>,  
З. Г. Карчугаева<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Объединённый институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, РФ*

В настоящей работе представлены результаты исследований начальной стадии зажигания дугового разряда в аргоновой среде с расходом на уровне 1.5 г/с при атмосферном давлении в диффузионном режиме при токе 200 А. В качестве катода использовался чистый вольфрам конической формы с углом при вершине 60 градусов. Инициирование дуговой искры происходило посредством подачи высоковольтного напряжения на межэлектродный промежуток. После пробоя напряжение резко падает, и горение электрической дуги продолжается при существенно меньшем напряжении. Анодом служило медное расширяющееся сопло. При этом длина электрической дуги во всех экспериментах не превосходила 1 см, а радиус был на уровне 1 мм. Оптические измерения проводилось через специальное смотровое окно посредством высокоскоростной камеры Phantom Miro M110 с частотой съемки до 100 000 кадров в секунду. В результате было обнаружено, что кончик катода, находящегося в жидком состоянии, вытягивается, образуется перетяжка с последующим взрывом и уносом части материала катода [1]. Такие микровзрывы продолжают до выхода на стационарный режим горения электрической дуги, и их количество может варьироваться от эксперимента к эксперименту, но всегда находится на уровне ~10. Температура электронов полагалась равной температуре тяжелых частиц и определялась метода относительных интенсивностей спектральных линий ионов аргона Ar II and Ar III в диапазоне длин волн 327–370 нм, а концентрация по уширению Штарка на двух длинах волн 363.7 и 329.3 нм [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 22-29-01028).

### **Литература:**

- [1] D. V. Tereshonok et al 2022 EPL 140 34001.
- [2] Konjevic N. et al 2002 J. Phys. Chem. Ref. Data 31(3) 819.

tereshonokd@gmail.com

## КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ ПОРОШКОВ СЛОЖНОГО СОСТАВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ СОЛЕЙ КОБАЛЬТА И МЕДИ

**А. А. Игнатьев<sup>1</sup>, А. Н. Иванов<sup>1</sup>, П. А. Игнатьева<sup>1</sup>, Д. А. Шутов<sup>1</sup>, В. В. Рыбкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИГХТУ, Иваново, Россия

Как показывают многие исследования Cu и Ni — два переходных металла, которые широко используются в качестве различных материалов, в том числе оптоэлектронных [1]. Кроме того, они постоянно используются в качестве катализаторов в реакциях окисления. Исследования показывают, что никель обладает хорошими каталитическими свойствами, к примеру, при очистке воды от соединений фенола. При этом, известны случаи использования в качестве катализаторов многокомпонентных оксидов, которые могут быть получены в результате сочетания частиц одного оксида металла с другим. Согласно авторам трудов [2] ими был синтезирован многокомпонентный оксидный катализатор на основе Cu–Ni, который показал значительно более высокий результат в соответствующих реакциях по сравнению с монометаллическими катализаторами. Исходя из этого, основной целью данного исследования являлось изучение кинетики образования частиц сложного стехиометрического состава в растворе смеси нитратов меди и никеля, под действием тлеющего разряда. Изучение механизмов реакции позволит в дальнейшем получить многокомпонентные оксиды состава NiO/CuO.

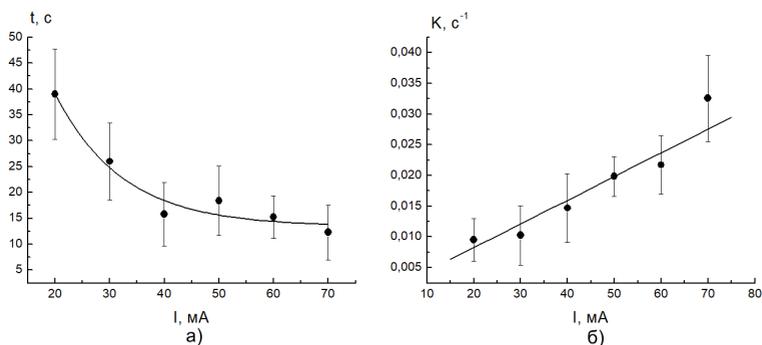
В рамках эксперимента использовался тлеющий разряд постоянного тока, который инициировал низкотемпературную неравновесную плазму атмосферного давления. Реактор представлял собой H-образную стеклянную ячейку, плечи которой разделены целлофановой мембранной так, что раствор в одном из плечей ячейки являлся анодом (ячейка 1), второй – катодом (ячейка 2). Растворы готовились путем смешивания навесок солей Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O и Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O (14,53 г и 12,08 г соответственно на 1 л раствора). Концентрация – 50 ммоль/л (мольное соотношение 1:1). Разряд зажигался между титановыми электродами и поверхностью обрабатываемой жидкости. Расстояние от электрода до, непосредственно, самого раствора составлял 5 мм. Сила тока разряда в

этом эксперименте варьировалась от 20 до 70 мА. Обрабатываемый объем жидкости составлял 100 мл. Полное время обработки фиксировалось на секундомере. Более детальное описание установки и применяемого метода представлено в [3].

При действии разряда наблюдалось образование коллоидных частиц. Взвешенные вещества в начальное время воздействия разряда формировались в верхней части анодной ячейки, в области под разрядом. С течением времени, после воздействия разряда на раствор, частицы оседали на дно ячейки. Осадок и сама водная смесь двух солей имели характерную окраску, которая слабо изменялась со временем, при горении разряда: например, для  $\text{Cu}^{2+}$  – изумрудно-зеленый цвет переходил в бирюзовый.

Кинетику образования частиц проводили турбодиметрическим методом, отслеживая пропускание света в диапазоне длин волн 450-480 нм в приповерхностном слое растворов на глубине 2 мм. Зависимости имели качественно одинаковый экспоненциально падающий вид для различных токов разряда.

Определение кинетики образования коллоидных частиц проводили в независимых экспериментах не менее 5 раз для каждой силы тока разряда. Полученные значения усреднялись, и рассчитывалась случайная погрешность определения константы скорости реакции с доверительной вероятностью 0,95.



**Рисунок 1.** Зависимость времени индукционного периода от силы тока разряда (а) и константы скорости образования частиц в растворе азотнокислых солей Ni и Cu от силы тока разряда (б),  $C = 50$  ммоль/л (соотношение солей 1:1)

На зависимости интенсивности пропускаемого света от времени можно выделить два характерных участка. Первый, достаточно непродолжительный, так называемый индукционный период и участок образования нерастворимых соединений в растворе (см. рис. 1). Время индукционного периода уменьшалось с ростом тока разряда в среднем с 40 до 12 сек, оставаясь практически неизменным при токах разряда более 60 мА (см. рис. 1а). Как видно из рисунка 1б константы скорости линейно возрастают с ростом тока разряда. Предполагаемый стехиометрический состав, получаемых порошков - смесь гидроксидов и гидроксонитратов меди и никеля.

Таким образом, в результате воздействия тлеющего разряда образуются устойчивые нерастворимые соединения. Для получения бинарных оксидов осадок будет собираться, высушиваться в сушильном шкафу и подвергаться термической обработке при  $\sim 1000$  °С.

Следующими этапами исследования являются: проведение анализа размера получаемых частиц методом динамического рассеяния света растворов после обработки плазмой, а также сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, термогравиметрического анализа и сканирующей дифференциальной калориметрии твердофазных продуктов синтеза.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК-2607.2022.1.2).

#### **Литература:**

- [1] Mallik A. et al. Single step synthesis of amine functionalized graphene oxide/Cu-Ni bimetallic nanocomposite and tuning its electrical properties //Materials Science and Engineering: B. – 2023. – Т. 296. – С. 116627.
- [2] Li Z. et al. Preparation and properties of Cu-Ni bimetallic oxide catalyst supported on activated carbon for microwave assisted catalytic wet hydrogen peroxide oxidation for biologically pretreated coal chemical industry wastewater treatment //Chemosphere. – 2019. – Т. 214. – С. 17-24.
- [3] Shutov, D.A., Smirnova, K.V., Gromov, M.V., Rybkin, V.V., Ivanov, A.N. Synthesis of CdO Ultradisperse Powders Using Atmospheric Pressure Glow Discharge in Contact With Solution and the Investigation of Intermediate Products Plasma Chem / D. A. Shutov, K. V. Smirnova, M.V. Gromov, V.V. Rybkin, A. N. Ivanov// Plasma Process. - 2018. - V. 38. - N 1. - P. 107-121.

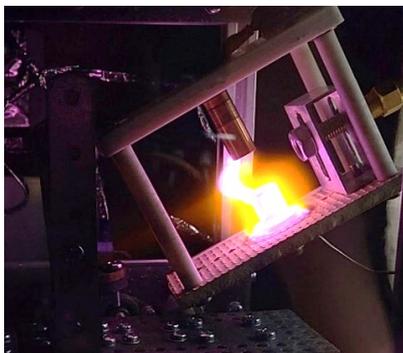
ignadr@yandex.ru

## МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБКЛАДОК КОНДЕНСАТОРА, ПУТЕМ ОСАЖДЕНИЯ НА НИХ НАНОСТРУКТУР МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ В ПОТОКЕ ГАЗА

**Ж. А. Уктамов<sup>1</sup>, А.О. Софроницкий<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

Эта работа является продолжением серии экспериментов посвященных осаждению различных покрытий методом ионного распыления в потоке газа. С помощью метода ионного распыления в потоке газа материал катода выводится за пределы области разряда и осаждается на поверхности подложки (Рисунок 1). Данный метод позволяет наносить равномерное и однородное покрытия из наночастиц. В этот раз была произведена попытка модификация поверхности обкладок конденсатора, путем осаждения на них наноструктур меди. На рисунке 2 представлена фотография подложки с нанесенным покрытием. Покрытие намеренно было нанесено с разной степенью интенсивности, чтобы в зависимости от этого в дальнейшем оценить, как меняется его структура. Справа в нижнем углу область наиболее интенсивного напыления. Покрытие не обладает высокой адгезией и царапается стальной иглой.



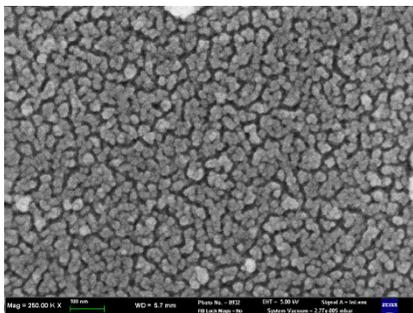
**Рисунок 1.** Процесс нанесения распыляемого материала на подложку.



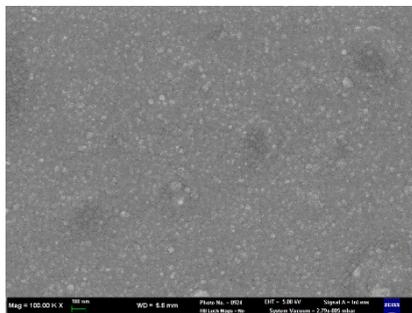
**Рисунок 2.** Подложка с нанесенным на нее покрытием.

На рисунке 3 представлено СЭМ изображение покрытия в области наиболее интенсивного напыления при увеличении в 250 000 раз. Как видно образец имеет достаточно развитую поверхность. Из-за того, что температура частиц, подлетающих к поверхности подложки была близка к температуре плавления, частицы слиплись между собой и образовали весьма развитую поверхность с достаточно большой удельной площадью.

В области менее плотного напыления поверхность имеет вид, представленный на рисунке 4. Как видно на этом изображении поверхность усыпана множеством наночастиц меди, которые не слиплись между собой в отличие от области интенсивного напыления. Как и в первом случае размер долевших частиц составляет приблизительно от 10 до 30нм.



**Рисунок 3.** СЭМ изображение покрытия в области наиболее интенсивного напыления при увеличении в 250 000 раз.



**Рисунок 4.** Изображение СЭМ покрытия в области менее интенсивного напыления при увеличении в 100 000 раз.

Емкость конденсаторов прямо пропорционально зависит от площади обкладок. Очевидно, что в области наиболее интенсивного напыления поверхность является наиболее развитой и обладает большей удельной площадью и такое покрытие может быть нанесено на обкладки конденсаторов с целью увеличения их удельной площади, а следовательно, и емкости конденсатора. Регулируя интенсивность нанесения такого покрытия, можно производить конденсаторы с заданной емкостью, не изменяя при этом макроразмеры конденсатора.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке по Соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ*

## 3D РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ

**А. В. Бернацкий<sup>1</sup>, И. И. Драганов<sup>1,2</sup>, Н. А. Дятко<sup>1,3</sup>, И. В. Кочетов<sup>1,3</sup>, В. Н. Очкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

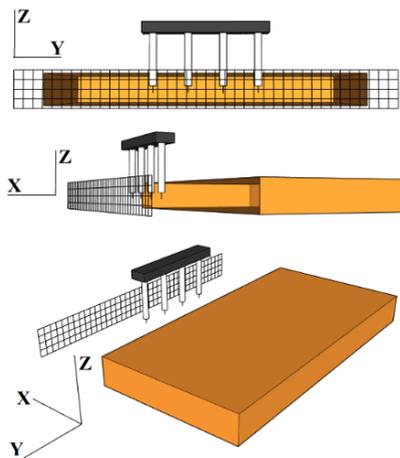
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup>Государственный научный центр РФ "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", Троицк, Россия

Впервые измерено распределение плотности электронов ( $N_e$ ) в области плазмы между срезом ( $100 \times 10$  мм<sup>2</sup>) медного полого катода ( $100 \times 50 \times 10$  мм<sup>3</sup>) и сетчатым стальным анодом ( $100 \times 10$  мм<sup>2</sup>), не ограниченной боковыми стенками. Измерения проводились в разряде в гелии при давлении 1.5 мбар с использованием оригинальной многоканальной зондовой системы [1] и, разработанной в рамках настоящей работы, системы позиционирования зондов Ленгмюра в пространстве. Взаимное расположение разрядных узлов и измерительных зондов продемонстрировано на рисунке 1, подробное описание эксперимента приводится в [2].

Для измерений использовалась сборка из нескольких одиночных зондов Ленгмюра, измерения на которых проводились одновременно. Радиусы зондов  $r=40$  мкм. Выбор радиуса зондов обусловлен результатами, полученными в недавней работе авторов [2]. В работе [2] исследовано влияние радиуса цилиндрического зонда на результаты измерений функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) и связанных с ней плазменных параметров в гелии (давление 1.5 мбар, температура 340 К). Проведен анализ нарастания искажений измеренной ФРЭЭ по мере увеличения радиуса зонда. Впервые предложен метод их учета на основе совместного анализа механизмов стока электронов на зонд [3] и конечности сопротивления плазмы на промежутке зонд-опорный электрод с учетом формирования призондового заряженного слоя [4]. Исследования проведены в диапазоне изменений радиуса зонда 20-200 мкм. Показано, что при использовании зонда радиусом 200 мкм (в экспериментальных условиях длина свободного пробега электронов составляла  $\approx 500$  мкм) измеренная

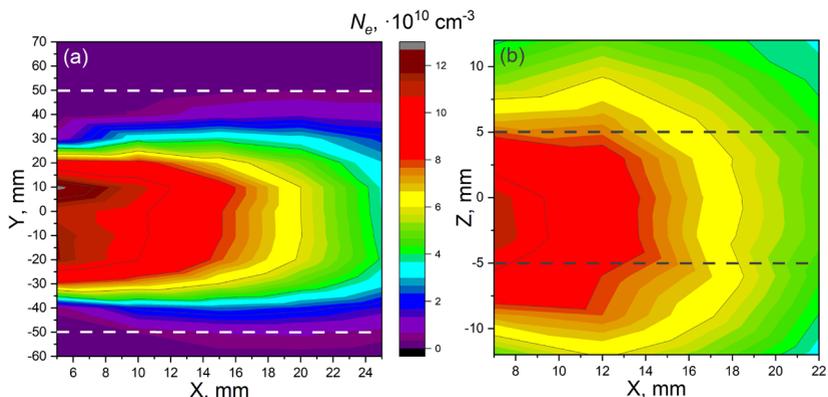
концентрация электронов занижается приблизительно в два раза по сравнению с результатами измерений, полученными с использованием зондов радиусом 20-40 мкм.



**Рисунок 1.** Взаимное расположение разрядного устройства (полый прямоугольный катод, сетчатый анод) и измерительных зондов, представленное в разных проекциях.

В настоящей работе измерения проводились как внутри, так и вне области геометрической апертуры разряда, которая представляет собой прямоугольный параллелепипед, образованный срезом открытого полого катода и анодом ( $X[0:30]$ ,  $Y[-50:50]$ ,  $Z[-5:5]$ , координаты в мм). Результаты измерений представлены на рисунке 2. Как видно из рисунка, распределения  $N_e$  близки к симметричному по отношению к оси X в плоскости XY при  $Z=0$  (рис. 2(a) и плоскости XZ при  $Y=0$  (рис. 2(б)). В центральной области апертуры разряда плотность электронов  $N_e(X)$  убывает в направлении от катода к аноду по закону, близкому к линейному. Последнее связывается с поглощением электронов анодом [5]. Однако на периферии апертуры такая закономерность нарушается. Очевидно, что для анализа свойств свободного разряда, поддерживаемого полым катодом, требуются исследования пространственного распределения эмиссии электронов в плоскости среза катода и электрического поля как внутри катода, так и в промежутке катод-анод.

Авторы приносят благодарность С.Н. Андрееву за помощь в создании системы позиционирования зондов в пространстве.



**Рисунок 2.** Измеренные пространственные распределения концентрации электронов в области между полым катодом и сетчатым анодом: (а) – плоскость XY при Z=0 мм; (б) – плоскость XZ при Y=0 мм. Апертура разряда X[0:30], Y[-50:50], Z[-5:5] указана пунктирными линиями. Ось X направлена от катода к аноду (X=0 мм – катод, X=30 мм – анод); ось Y параллельна открытой длинной стороне катода 100 мм, координаты краёв которой Y=-50 мм, Y=50 мм; ось Z параллельна открытой короткой стороне катода 10 мм, координаты краёв которой Y=-5 мм, Y=5 мм.

### Литература:

- [1] S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin // Vacuum. 2022, V. 206, 111514 (7pp). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111514>
- [2] A.V. Bernatskiy, I.I. Draganov, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin // Plasma Chemistry and Plasma Processing. DOI: 10.1007/s11090-023-10378-z <https://doi.org/10.1007/s11090-023-10378-z>
- [3] S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin // Plasma Sources Science and Technology. 2021, V. 30, No. 9, 095004 (12pp). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac1ee2>
- [4] S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, V.V. Lagunov, V.N. Ochkin // Vacuum. 2023, V. 215, 112372 (7pp). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112372>
- [5] S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, N.A. Dyatko, I.V. Kochetov, V.N. Ochkin // Plasma Physics Reports. 2023, V. 49, No. 8, P. 1031-1037. <https://doi.org/10.1134/S1063780X23600846>

bermen@mail.ru

## ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОЙ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ НА НАНОСТРУКТУРЫ ТИТАНОГАФНИЕВЫХ НИТРИДОВ

**М. М. Гребенщикова<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, М. М. Миронов<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технологический университет", Казань, Россия*

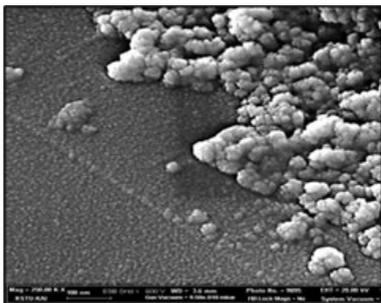
Защитные покрытия для имплантируемых замещающих конструкций травматологии на основе титаногафниевого нитридного конденсата, полученных из плазменной фазы, угнетают рост болезнетворной микрофлоры. Подтверждена активность в отношении штаммов стафилококка, синегнойной и кишечной палочки, клебсиеллы и морганеллы. Токсичность и цитотоксичность покрытия не проявляется в эксперименте на фибробластах человека и других перевиваемых культурах клеток. Индекс роста культур составляет 1,07-2,0. Покрытие устойчиво к средствам стерилизации. Для снижения числа осложнений при установке имплантов в травматологии применяется, в частности, титаногафниевое нитридное покрытие [1]. Актуально с научной точки зрения установление механизма воздействия нитридных титаногафниевых покрытий, конденсированных на имплантаты травматологии, на бактериальную микрофлору.

Проведенные ранее исследования показали малую вероятность ионного механизма угнетения жизнедеятельности бактерий в связи со следовыми концентрациями в области ионов гафния и титана в окружающей покрытие водной среде в живом организме [2]. Механизм воздействия покрытия на бактерии может быть связан с миграцией наночастиц с поверхности покрытия [3].

Процесс нанесения покрытия основан на конденсации соединений из металлической плазмы электродугового разряда в среде реакционного газа. Образование нитридных структур в свете теории слабых взаимодействий и построения кластерных структур несколько усложнен [4]. В плазменных потоках выявлены бинарные и тройные кластеры титана  $Ti_2$  и  $Ti_3$  с энергией диссоциации связей в 1,2 эВ и 2,9 эВ. Рост структур происходит через адсорбцию кластеров на поверхности подложки, миграцию по поверхности в условиях бомбардировки ионами титана с энергией до 3 кэВ и образованием зародышей из нитридов металлов. В конденсированных вакуумно-дуговым методом пленках нитридов присутствуют нанокластеры металла, количество которых возрастает с уменьшением давления азота.

Наличие нанок капельной фазы подтверждает съемка поверхности конденсатов в режиме фиксирования вторичных электронов на сканирующем электронном микроскопе при увеличении  $\sim 10^4$ – $10^5$ , размеры структур оценивали в 10-50 нм в режиме SE (вторичных электронов) и Inlens SE (высокоразрешающий режим вторичных электронов).

Образцы с покрытием обрабатывали в высокочастотном емкостном разряде (ВЧЕ) при давлении 15-30 Па. В ВЧЕ разряде поверхность подвергалась воздействию потока ионов с плотностью ионного тока 0,3-1,5 А/м<sup>2</sup> и энергией ионов 50–100 эВ в диапазоне вкладываемой в разряд мощности 750–2000 Вт [5]. Ионы приобретают такую энергию вследствие возникновения в ВЧЕ-разряде слоя положительного заряда у поверхности образца в результате колебаний электронного газа в плазме ВЧЕ-разряда с амплитудой 1,5–5,0 мм. При столкновении с поверхностью кинетическая энергия иона трансформируется в энергию колебаний атомов поверхности.

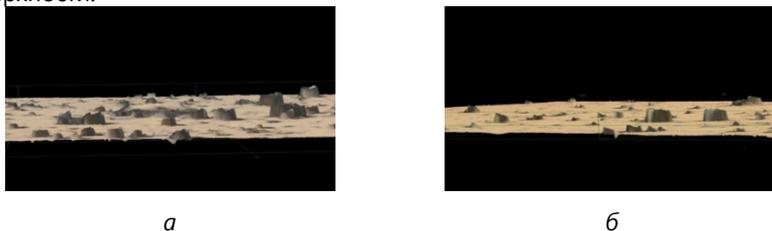


**Рисунок 1** – Визуализация нанофазы при конденсации пароплазменного потока нитрида гафния.

Механизм воздействия ВЧЕ разряда требует разработки математической модели взаимодействия ионного потока с титаногафниевым нитридным покрытием. Модель может быть описана системой уравнений классической молекулярной динамики на основе полноатомной модели (allatommodel) с потенциалом Леннард-Джонса (LJ) для бомбардирующего иона и многочастичного оптимизированного по заряду потенциала (COMB) для системы TiN и HfN. Модель реализуется с помощью универсального программного пакета молекулярно-динамического моделирования LAMMPS.

Первичная оценка воздействия низкоэнергетических ионов на поверхность с микрочастицами может быть, для начала, охарактеризована параметром шероховатости. Измерение проводилось механическим щупом и световым

лучом. Проведено сканирование поверхности покрытия до- и после ВЧ плазменной обработки в лазерной проекции, получены снимки исследуемых образцов в режимах 3D (рисунок 2). Параметр Ra с величины 0,135 мкм уменьшился до 0,06-0,08 мкм, что подтверждает микросъемка поверхности. Аналогичную процедуру со съемкой Inlens SE на нанофазе покрытия зафиксировать не удалось по простой причине – невозможности координатно установить прежнее, до плазменной обработки, место съемки поверхности.



**Рисунок 2** – 3D-изображения поверхности образцов до и после ВЧ-плазменной обработки: а – покрытие TiN+HfN до ВЧ-плазменной обработки; б – покрытие TiN+HfN после ВЧ-плазменной обработки.

Микрокапельная фаза имеет размер от 0,5 до 10,0 мкм и расположена она как непосредственно на поверхности покрытия, так и на некотором углублении в слой нитрида. Она сконденсирована на малых расстояниях от катода-испарителя гафния, а именно 300–320 мм.

Спектральным микроанализом определен состав микрокапельной фазы покрытия на подложке из поликорунда ( $Al_2O_3$ ), так как анализ на металлических подложках искажал результаты исследований из-за «просвечивания» подложки. Исследования проводили на рабочей станции AURIGA CrossBeam (Carl Zeiss), оснащенной спектрометром энергетической дисперсии INCA X-MAX (Oxford Instruments) с разрешением 127 эВ для количественного и качественного элементного анализа.

По энергетическому спектру электронов состав элементов поверхности покрытия в микрообъеме включал наличие углерода 2,5%, азота 10,3%, титана 9,7%, гафния 77,5% по массе. Анализ состава микрокапли на поверхности покрытия примерно соответствовал составу покрытия и включал наличие углерода 3,2%, азота 10,1%, титана 11,2%, гафния 75,5% по массе. Наличие элемента углерода объясняется технологией подготовки пробы с осаждением на поверхность токопроводящей пленки.

Нанокпельная фаза не имеет внедрения в поверхность нитрида. Можно предположить, что нанокпли удерживаются на ней силами межатомного

взаимодействия, которые могут быть ослаблены, воздействием ионов малой энергии, вплоть до отрыва с поверхности.

Движение нанофазы с поверхности титаногафниевого нитридного покрытия оценивали измерением размеров наночастиц после миграции их с покрытия в водную среду при длительном контакте в течение 600-700 часов при температурах близкой к 35 °С. После выдержки образцов в капсуле с изотоническим раствором NaCl, раствор с частицами изучали на анализаторе размера частиц NanoBrook 90Plus ZetaParticleSizeAnalyzer.

В водной вытяжке из образцов с титано-гафниевым нитридным покрытием, обработанным потоками низкоэнергетических ионов из ВЧЕ плазмы, зарегистрированы наночастицы размером 8-10 нм. В вытяжке из образцов до ВЧЕ-плазменной обработки покрытия обнаруживаются частицы размером 200-1500 нм. Эти результаты позволяют выдвинуть гипотезу об определяющей роли воздействия наночастиц титаногафниевого нитридного покрытия-конденсата на контактное угнетение жизнедеятельности болезнетворной микрофлоры.

#### **Литература:**

[1] Абдуллин И.Ш., Миронов М.М., Гарипова Г.И. Бактерицидные и биологически стойкие покрытия для медицинских имплантатов и инструментов // Медицинская техника. №4. 2004. С. 20-22.

[2] Гребенщикова М.М., Миронов М.М., Стародумова Е.В.. Исследование миграции ионов металлов с защитных наноструктурированных покрытий для имплантатов // Вестник технологического университета. 2016. Т.16, № 17. Сс. 49-50.

[3] Мамонова, И. А. Влияние наночастиц переходной группы металлов на антибиотикорезистентные штаммы микроорганизмов : специальность 03.02.03 "Микробиология" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Мамонова Ирина Александровна. – Москва, 2013. – 24 с.

[4] Упрочнение конструкционных материалов наноразмерными многослойными покрытиями / Л. И. Гречихин, С. А. Иващенко, В. М. Голушко, С. Г. Койда // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 9(69). – С. 7-11.

[5] Абдуллин, И. Ш. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения / И. Ш. Абдуллин, В. С. Желтухин, Н. Ф. Кашапов. – Казань : Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2000. – 348 с.

[mironov.medinstrument@yandex.ru](mailto:mironov.medinstrument@yandex.ru)

## КОЛЛЕКТИВНАЯ ДИНАМИКА РАВНОВЕСНОЙ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ. САМОСОГЛАСОВАННАЯ РЕЛАКСАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ

**И. И. Файрушин<sup>1</sup>, А. В. Мокшин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*

В работе представлено развитие самосогласованной релаксационной теории коллективной динамики ионов в сильно неидеальной однокомпонентной плазме. В частности, рассматривается поперечная коллективная динамика частиц жидкости Юкавы при различных параметрах неидеальности и структуры. Проведен расчет спектров временных корреляционных функций поперечного потока и дисперсии поперечных коллективных возбуждений по данным молекулярно-динамического моделирования. Теоретическое описание данных характеристик выполнено с помощью самосогласованной релаксационной теории коллективной динамики многочастичных систем [1-3]. Сравнение теоретических результатов с данными моделирования обнаруживает их согласие.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

### **Литература:**

- [1] А. В. Мокшин, "Самосогласованный подход к описанию релаксационных процессов в классических многочастичных системах", ТМФ, 183 (2015), с. 3.
- [2] A. V. Mokshin, I. I. Fairushin, I. M. Tkachenko, Phys. Rev. E 105, 025204 (2022).
- [3] I. I. Fairushin, A. V. Mokshin, Phys. Rev. E 108, 015206 (2023).

fairushin\_ilnaz@mail.ru

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ В ВВОДНЫХ РАСТВОРАХ НИТРАТОВ ЖЕЛЕЗА И ЦИНКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

**П. А. Игнатьева<sup>1</sup>, А. Н. Иванов<sup>1</sup>, К. В. Смирнова<sup>1</sup>, Д. А. Шутов<sup>1</sup>, А. А. Игнатьев<sup>1</sup>, В. В. Рыбкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИГХТУ, Иваново, Россия

Плазма известна, как «четвертое состояние» вещества и обычно описывается, как совокупность: электронов, ионов, фотонов, нейтральных атомов, радикалов и молекул в различных возбужденных состояниях. Кроме того, общее состояние плазмы, обычно, электрически нейтрально [1]. Поэтому газоразрядная плазма получила широкое распространение в технологиях нанесения и модификации разных покрытий. В последние годы все более привлекательными становятся процессы взаимодействия плазмы с растворами для эффективной очистки воды от органических и неорганических загрязнений. В дополнение к этому, плазменные процессы над растворами и в растворах являются эффективным методом формирования наночастиц, который может заменить традиционные методы их получения. Во время горения тлеющего разряда активные частицы, образующиеся в плазме, приводят к быстрой химической реакции без участия катализаторов. В нанотехнологиях морфологический контроль наноматериалов имеет значение в технологиях его нанесения на различные поверхности. Однако обычно это реализуется с использованием химических добавок. Кроме того, преимуществом плазменно-растворного синтеза является минимизация использования химических добавок [2]. Исходя из этого, основной целью работы является - подбор и установление оптимальных условий реакции формирования ферритов из азотнокислых солей железа и цинка, под действием тлеющего разряда атмосферного давления.

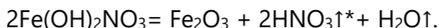
Раствор готовился, путем растворения в воде девятиводного кристаллогидрата нитрата железа ( $C = 4$  ммоль/л) и шестиводного нитрата цинка ( $C = 50$  ммоль/л). Плазменно-растворная система представляла собой H-образную ячейку с двумя вынесенными титановыми электродами ( $d=5$  мм), таким образом, что раствор в одном плече ячейки являлся катодом (жидкий катод) для тлеющего разряда постоянного тока, а в другой – анодом

(жидкий анод). Наиболее точное описание экспериментальной установки приведено в работе [3]. Обрабатываемый объем анодной ячейки 100 мл, ток разряда составлял 50 мА, время обработки - от 20 до 30 минут. После зажигания разряда в анодной части ячейки в течение нескольких минут вблизи контакта плазмы с раствором образовывалась коллоидная взвесь. Для получения феррита цинка осадок от центрифугировался, высушивался в сушильном шкафу при 60 °С и подвергался термической обработке при 900 °С в течение 30 мин.

Элементный анализ показал, что состав после прокаливания соответствует строго составу феррита цинка:  $ZnO \cdot Fe_2O_3$  или  $ZnFe_2O_4$ . Кроме того, вес, высушенного осадка, до высокотемпературной обработки составляет 0,257 г, после - 0,121 г, то есть с продуктами разложения убыль массы равна 0,136 г. Допустим, что исходные составы осадка были представлены гидроксидами металлов, тогда уравнение разложения записывается в виде:

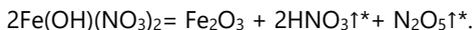


На 1 моль феррита цинка образуется 4 моль воды или на 240,98 г – 72 г. Для массы, образующегося феррита, в нашем опыте (0,121 г), будет соответствовать 0,036 г летучих продуктов, что значительно меньше наблюдаемого результата (0,136 г). Следовательно, продукты, в разлагаемом осадке, должны быть как минимум гидроксонитратами. Исходя из этого, допустим, что исходные осадки были следующего состава:



\* Помечены вещества, как брутто соединения удобны для последующих расчетов, реальные продукты это  $NO_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ .

На 1 моль феррита цинка образуется 3 моль азотной кислоты и 1 моль воды или на 240,98 г – 207 г летучих продуктов. Для нашей массы образующегося феррита (0,121 г) будет соответствовать 0,104 г, что значительно ближе к наблюдаемому результату (0,136 г). Можно говорить, что продукты в разлагаемом осадке должны содержать еще больше нитрат групп. Такими могут быть  $Fe(OH)(NO_3)_2$ , поэтому:



На 1 моль феррита цинка образуется 3 моль азотной кислоты и 1 моль оксида азота V\* или на 240,98 г – 297 г летучих продуктов. Для нашей массы образующегося феррита в 0,121 г будет соответствовать - 0,149 г, что больше наблюдаемого результата (0,136 г) и значит продукты, в разлагаемом осадке, должны содержать чуть меньшее количество нитрат групп. К ним можно отнести смеси  $\text{Fe}(\text{OH})(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{NO}_3$ . Возможные соотношения  $\text{Fe}(\text{OH})(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{NO}_3$  в исходных осадках представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Соотношения  $\text{Fe}(\text{OH})(\text{NO}_3)_2$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{NO}_3$  в исходных осадках

<b>Масса летучих продуктов, г</b>	<b>0.1085</b>	<b>0.1175</b>	<b>0.1265</b>	<b>0.1311</b>	<b>0.1360</b>
Мольные массы по реакции, г/моль	216	234	252	261	270.9
Мольная доля в смеси соединений железа:					
$\text{Fe}(\text{OH})_2\text{NO}_3$ , <b>X</b>	0.9	0.7	0.5	0.4	<b>0.29</b>
$\text{Fe}(\text{OH})(\text{NO}_3)_2$ , <b>1-X</b>	0.1	0.3	0.5	0.6	<b>0.71</b>

Состав осадка может соответствовать следующему содержанию: 1 моль  $\text{Zn}(\text{OH})\text{NO}_3$  и смесь из 0,58 моль  $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{NO}_3$  и 1,42 моль  $\text{Fe}(\text{OH})(\text{NO}_3)_2$ , т. к. именно при таком составе масса летучих продуктов будет соответствовать, измеренной убыли массы, при прокаливании порошка.

Стоит отметить, что это могут быть и нитрат группы в составе нитрата цинка в смеси с гидроксонитратом. Этот вариант возможен в том случае, если учитывать, что нитрат цинка, исходно взятый в большей концентрации, может накапливаться в пористом осадке. В нашем исследовании для приготовления одного литра раствора было взято в значительно избытке нитрата цинка 50 ммоль/л по сравнению с нитратом железа, из-за ранее исследованных проблем с выпадением осадков гидроксонитратов железа при концентрациях более 5 ммоль/л (вследствие низкой pH растворов, менее 2,5).

Таким образом, в случае связывания из раствора всего железа, мы имеем теоретический выход феррита цинка в 2 ммоль или 0,482 г. После прокаливании мы имели фактический выход - 0,121 г или 25 % от теоретического.

Следующими этапами исследования являются: проведение анализа размера получаемых частиц методом динамического рассеяния света растворов после обработки плазмой, а также сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, термогравиметрического анализа и сканирующей дифференциальной калориметрии твердофазных продуктов синтеза.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (МК-2607.2022.1.2).

**Литература:**

- [1] He J. et al. Dielectric barrier discharge plasma for nanomaterials: Fabrication, modification and analytical applications //TrAC Trends in Analytical Chemistry. – 2022. – Т. 156. – С. 116715.
- [2] Kim K. et al. Morphology control of ZnO nanostructures using Zn and W electrodes in solution plasma process //Materials Letters. – 2022. – Т. 309. – С. 131349.
- [3] Shutov, D.A., Smirnova, K.V., Gromov, M.V., Rybkin, V.V., Ivanov, A.N. Synthesis of CdO Ultradisperse Powders Using Atmospheric Pressure Glow Discharge in Contact With Solution and the Investigation of Intermediate Products Plasma Chem / D. A. Shutov, K. V. Smirnova, M.V. Gromov, V.V. Rybkin, A. N. Ivanov// Plasma Process. - 2018. - V. 38. - N 1. - P. 107-121.

Poliv3@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА ГАЗА НА ПАРАМЕТРЫ ТЛЕЮЩЕГО МИКРОРАЗРЯДА В ГЕЛИИ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ.

**Х. С. Нуриддинов<sup>1</sup>, А. И. Сайфутдинов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

В последние десятилетия газовые разряды при атмосферном давлении являются предметами изучения фундаментальных плазменных явлений и возможности их практического применения в плазмохимическом синтезе и наноструктур [1-3]. На сегодняшний день существуют различные типы разрядов, которые являются генераторами неравновесной плазмы при атмосферном давлении. Неисчерпаны возможности и классических двухэлектродных систем - тлеющих микроразрядов [4,5].

Данная работа посвящена роли нагрева газа при моделировании параметров плазмы тлеющего микроразряда. В работе была сформулирована расширенная гидродинамическая модель и проведены численные расчеты в рамках одномерного приближения по учету влияния нагрева газа на характеристики разрядов.

Для определения пространственно-временных характеристик СВЧ-разряда записывалась расширенная гидродинамическая модель. Модель включала  $k$  уравнений химической кинетики для концентраций  $n_k$  всех сортов частиц (нейтральных, возбужденных частиц, электронов и ионов), уравнение для плотности энергии электронов  $n_e$ , уравнение Пуассона для самосогласованного электрического поля  $\mathbf{E}$  в плазме, который, в свою очередь, связан с электрическим потенциалом  $\varphi$ . Кроме того, модель учитывала уравнение баланса энергии для тяжелой компоненты плазмы.

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_k = S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{Q}_e = -e\mathbf{E}_s \cdot \mathbf{\Gamma}_e + Q_{rh} - Q_{el} \quad (2)$$

$$\Delta \varphi = -\frac{q_e}{\epsilon_0} \left( \sum_{k=1}^N z_k n_k - n_e \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{k \neq e} n_k C_{\gamma k} T \right) - \nabla \cdot \left( \sum_{k \neq e} \Lambda_k \nabla T \right) = \sum_{k \neq e} e z_k \Gamma_k \cdot \mathbf{E} + Q_{el}, \quad (4)$$

Величины, входящие в уравнения подробно представлены в работе [4]. Набор элементарных процессов, описывающих плазму гелия представлен в работах [2,6]. Граничные условия для потока электронов, для плотности потока энергии электронов, для ионов, а также возбужденных и нейтральных частиц плазмы на металлических электродах примут, соответственно, следующий вид:

$$\mathbf{n} \cdot \Gamma_e \Big|_{x=0,L} = \frac{1}{4} v_{th}^e n_e - (1 - \alpha) \cdot \sum_k \gamma_k (\Gamma_k \cdot \mathbf{n}), \quad (5)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{Q}_e \Big|_{x=0,L} = \frac{1}{4} v_{th}^e n_e \cdot 2k_B T_e - (1 - \alpha) \cdot \sum_k \gamma_k \bar{\epsilon}_k (\Gamma_k \cdot \mathbf{n}), \quad (6)$$

$$\mathbf{n} \cdot \Gamma_i \Big|_{x=0,L} = \left( \frac{1}{4} v_{th}^i n_e \right) + \alpha \mu_i n_i \mathbf{E} \cdot \mathbf{n}, \quad (7)$$

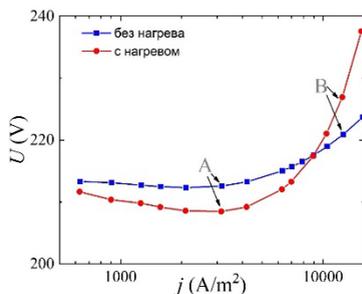
$$\mathbf{n} \cdot \Gamma_n \Big|_{x=0,L} = \left( \frac{1}{4} v_{th}^n n_n \right), \quad (8)$$

где  $\gamma_k$  – коэффициент вторичной электронной эмиссии от  $k$ -ого сорта частиц с поверхности катода,  $\Gamma_k$  – поток  $k$ -ого сорта частиц на электрод,  $v_{th}^e$ ,  $v_{th}^i$ ,  $v_{th}^n$  – средние тепловые скорости электронов, ионов возбужденных и нейтральных частиц плазмы газа, соответственно;  $\alpha = 1$  на аноде и  $\alpha = 0$  на катоде.

Для уравнения Пуассона в качестве граничного условия на катоде предполагалось, что он заземлен, то есть  $\varphi = 0$ , а на аноде  $\varphi = U_0$  определялось из уравнения для электрической цепи. Меняя балластное сопротивление в цепи, можно менять ток в цепи и тем самым варьировать плотность разрядного тока. Граничные условия на температуру тяжелых частиц плазмы на катоде и аноде предполагали, что задана постоянная температура  $T = 300\text{K}$ .

Численные расчеты были проведены для тлеющего микроразряда при атмосферном давлении в гелии. Межэлектродное расстояние предполагалось равным 0.25 мм, что соответствует условиям [7]. В результате численных расчетов были получены зависимости напряжения на разряде от

плотности тока (вольт-амперная характеристика) с учётом нагрева газа и без учёта нагрева газа, представленные на рисунке 1.

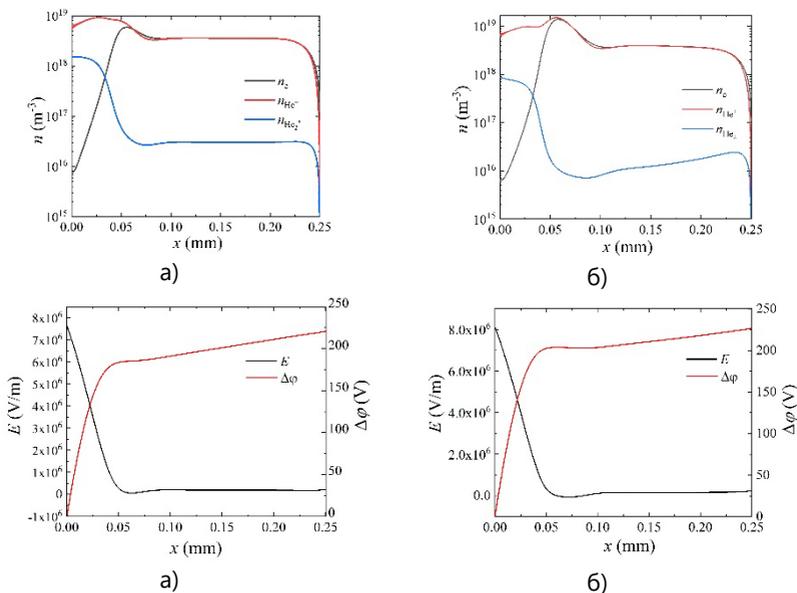


**Рисунок 1.** Вольт-характеристика разряда с учётом нагрева газа и без учёта нагрева газа.

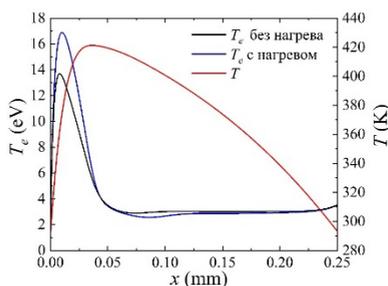
Наблюдается классический вид вольт-амперных характеристик (ВАХ). Видно, что при малых значениях плотности тока (до  $2000 \text{ А/м}^2$ ) зависимость ВАХ слабо убывающая, что соответствует поднормальному разряду. Необходимо отметить, что на эксперименте он не наблюдается. Кроме того, наблюдается точки минимума на обеих ВАХ, при плотности тока  $2000 \text{ А/м}^2$  без учета нагрева газа и при плотности тока  $3000 \text{ А/м}^2$  с учетом нагрева газа. Эти точки соответствуют нормальному тлеющему разряду. Далее наблюдаются растущие участки на ВАХ, характерные для аномального тлеющего разряда. В результате нагрева газа наблюдается снижение минимума на ВАХ, который смещается и составляет  $208.36 \text{ В}$ . Кроме того, аномальный участок ВАХ имеет более выраженный рост по сравнению с ВАХ без нагрева газа. Это можно объяснить тем, что нагрев газа приводит к уменьшению плотности газа в прикатодной области разряда и увеличению катодного падения потенциала.

Для различных точек на ВАХ были получены все основные параметры плазмы. Так, более детально были проанализированы параметры плазмы для нормального и аномального тлеющего режимов – точки А и В, соответственно. Для точки А не наблюдается заметных различий в пространственном распределении основных параметров плазмы без учета и с учетом нагрева газа. Для точки В, соответствующей аномальному режиму распределения параметров плазмы представлены на рисунках 2 и 3. Видно, что нагрев газа приводит к увеличению температуры в прикатодной области разряда, которая достигает  $420 \text{ К}$ . Это значительно влияет на параметры

плазмы. Наблюдается более ярко выраженный максимум концентрации электронов в области отрицательного свечения и минимум в напряженности электрического поля по сравнению с распределениями параметров плазмы, полученными без учета нагрева газа.



**Рисунок 2.** Продольное распределение основных параметров разряда: а) без учета нагрева, б) с учетом нагрева.



**Рисунок 3.** Распределение температуры электронов без учета, с учетом нагрева газа и распределение температуры газа.

Таким образом, в представленной работе проведены численные расчеты по исследованию влияния нагрева газа на тлеющие микроарызряды в гелии при атмосферном давлении. Показано, что учет нагрева газа приводит к снижению минимума на ВАХ, который наблюдался при напряжении 208.36В. При этом аномальный участок на графике ВАХ стал более резким по сравнению с расчетами без учета нагрева газа. Вероятно, это связано со снижением плотности газа в прикатодной области разряда и увеличением катодного падения потенциала. Учет нагрева газа приводит к более выраженному максимуму концентрации электронов в области отрицательного свечения и минимуму в напряженности электрического поля в режиме аномального тлеющего разряда.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке по Соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ.*

#### **Литература:**

- [1] Vekselman V., Raitses Y., Shneider M. N. Growth of nanoparticles in dynamic plasma // Physical Review E. – 2019. – Т. 99. – №. 6. – С. 063205.
- [2] Saifutdinov A. I., Sorokina A. R., Boldysheva V. K., et al. Evaporation of Carbon Atoms and Molecules in Helium by Low-Current Arc Discharge with Graphite Electrodes // High Energy Chemistry. – 2022. – Vol. 56. – №. 6. – С. 477 - 486.
- [3] Kumar A., Lin P. A., Xue A., Hao B., Yap Y. Kh. & Sankaran R. // Nature Communications, 2013, V. 4, № 2618, P.1-8.
- [4] Saifutdinov A.I. Unified simulation of different modes in atmospheric pressure DC discharges in nitrogen // Journal of Applied Physics. – 2021. – Vol. 129. – no. 9. – P 093302 1-21.
- [5] Saifutdinov A. I. Numerical study of various scenarios for the formation of atmospheric pressure DC discharge characteristics in argon: from glow to arc discharge // Plasma Sources Science and Technology. – 2022. – Vol. 31. – no. 9. – P. 094008 1-19.
- [6] Saifutdinov A., Timerkaev B. Modeling and Comparative Analysis of Atmospheric Pressure Anodic Carbon Arc Discharge in Argon and Helium–Producing Carbon Nanostructures // Nanomaterials. – 2023. – Vol. 13. – P. 1966.
- [7] Saifutdinov A.I., Sysoev S.S. Diagnostics and comparative analyzes of plasma parameters in micro hollow cathode discharges with an open and covered external surface of cathode in helium using an additional electrode // Plasma Sources Science and Technology. – 2021. – Vol. 30.– no. 1. – № 017001 1-7.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

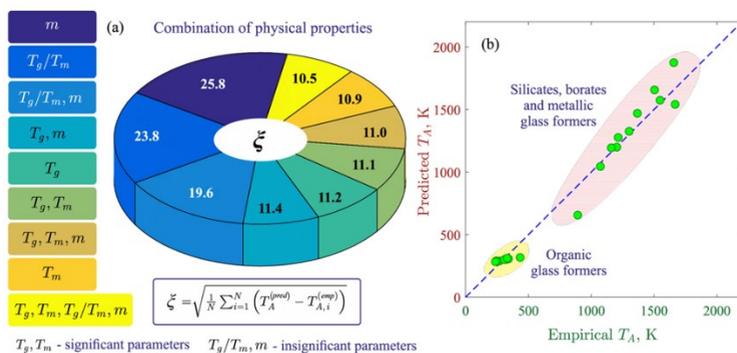
**М. А. Доронина<sup>1</sup>, Б. Н. Галимзянов<sup>1</sup>, А. В. Мокшин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КФУ, Казань, Россия

maria.doronina.0211@gmail.com

В последнее время значительно возрос интерес к изучению структурно-фазовых трансформаций, протекающих в стеклообразующих жидкостях [1]. Появляется все больше свидетельств того, что такие трансформации могут соотноситься со способностью жидкости формировать аморфное состояние [2]. Результаты недавних исследований, в том числе, полученные на основе обработки больших данных по спектроскопии, показывают, что способность жидкости формировать устойчивое аморфное состояние зависит от специфики изменений в её структуре и динамике, происходящих вблизи температуры плавления  $T_m$  [3]. Так, например, начало таких изменений в динамике атомов жидкости соотносится с температурой Аррениусовского перехода  $T_A$ . Существующие эмпирические и теоретические методы оценки температуры  $T_A$  преимущественно основаны на анализе температурной зависимости вязкости жидкости (или времени структурной релаксации) и определении в этой зависимости высокотемпературного линейного режима [4], что представляет собой достаточно трудную задачу для большого класса стеклообразующих систем.

Цель настоящей работы заключается в поиске взаимосвязи температуры Аррениусовского перехода с физическими свойствами жидкостей, непосредственно связанных с их аморфообразующей способностью. С помощью модели машинного обучения выполнен расчёт температуры  $T_A$  для стеклообразующих систем различного состава. Было обнаружено, что для расчёта температуры Аррениуса  $T_A$  достаточно наличие информации о температуре стеклования  $T_g$  и температуре плавления  $T_m$ , в то время как приведенная температура стеклования  $T_g/T_m$  и индекс хрупкости  $m$  не оказывают существенного влияния на получаемое значение температуры Аррениуса (Рисунок. 1).



**Рисунок 1.** Диаграмма среднеквадратичной ошибки  $\xi$  и при оценке температуры Аррениусовского перехода  $T_A$ , рассчитанной для различных комбинаций величин  $T_g$ ,  $T_m$ ,  $T_g/T_m$  и  $m$  на входном слое модели машинного обучения.

Важным результатом работы является уравнение, связывающее величины  $T_g$ ,  $T_m$  и  $T_A$ . Было показано, что это уравнение дает корректные значения  $T_A$  для различных типов жидкостей независимо от их аморфообразующей способности, в том числе, для силикатов и боратов [5]. Таким образом, разработанная модель машинного обучения может быть использована для обработки и интерпретации результатов спектроскопических исследований.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

#### Литература:

- [1] С.А. Angell, М. Hemmati. Glass transitions and critical points in orientationally disordered crystals and structural glassformers: ("strong" liquids are more interesting than we thought), AIP Conf. Proc. 1518, 9-17 (2013).
- [2] Y.S. Elmatad, D. Chandler, and J.P. Garrahan. Corresponding States of Structural Glass Formers, J. Phys. Chem. B 113, 5563 (2009).
- [3] N.A. Mauro, M. Blodgett, M.L. Johnson, A.J. Vogt, K.F. Kelton. A structural signature of liquid fragility, Nat. Commun. 5, 4616 (2014).
- [4] G. Tarjus, D. Kivelson, and P. Viot. The viscous slowing down of supercooled liquids as a temperature- controlled super-Arrhenius activated process: a description in terms of frustration-limited domains, J. Phys.: Condens. Matter 12, 6497 (2000).
- [5] B.N. Galimzyanov, M.A. Doronina, A.V. Mokshin. Arrhenius Crossover Temperature of Glass-Forming Liquids Predicted by an Artificial Neural Network, Materials 16, 1127(2023).

## О ПРОБЛЕМЕ ПОЛУЧЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА У ПЛЕНОК МОЛИБДЕНА

**В.А. Анофриев, А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков**

*ФГБОУ ВО ТвГУ, Тверь, Россия*

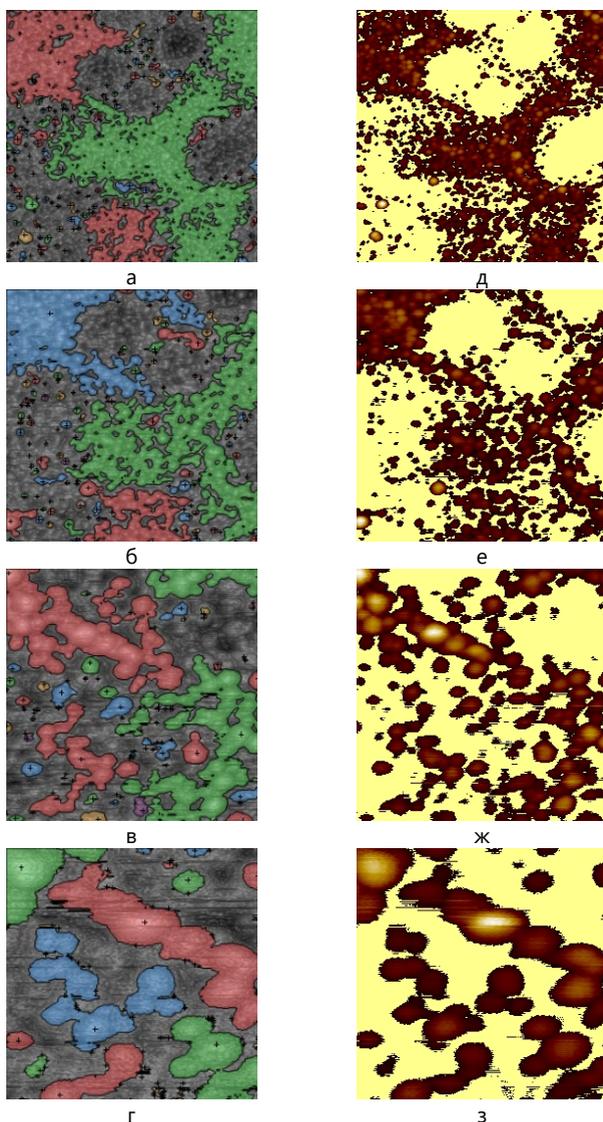
Фрактальные структуры на поверхности тонких пленок вызывают большой интерес среди учёных из-за потенциала использования уникальных свойств таких материалов в различных сферах. Современные методы формирования наноразмерных пленок с определенными физическими характеристиками, такими как оптические или электрические, стимулируют исследователей на поиски общей характеристики поверхности, способной описывать все особенности высотных параметров на заданном масштабе и отражать уровень сложности рельефа. Фрактальная размерность является одним из таких универсальных механизмов описания морфологии поверхности металлических наноразмерных пленок [1-3].

Целью настоящей работы является исследование процесса создания фрактального рельефа пленки молибдена на поверхности слюды. Фрактальный анализ поверхности позволяет с одной стороны установить наличие самоподобных структур, с другой стороны определить изменения физических свойств у участков поверхности образца с фрактальной структурой и без нее.

Проблема определения области исследования агломератов напыляемого вещества является одним из основополагающих аспектов при вычислении фрактальной размерности изображений. Существует четыре самых известных метода выделения частиц: метод пороговой фильтрации (threshold detection), метод водораздела (watershed detection), определение границ (edge detection), поиск кругов (circle detection). В данной работе затронем один из них – метод пороговой фильтрации.

Оценка фрактальной размерности данных изображений (см. рис. 1) осуществлялась с использованием программного обеспечения собственной разработки [4]. Помимо этого, результаты были подтверждены с применением программного продукта Mountains 10 [5]. Важным аспектом исследования являлся также анализ изображений с применением пороговой фильтрации.

Оба способа анализа показали, что фрактальная размерность существенно уменьшается при уменьшении масштаба изображений.



**Рисунок 1.** Изображения пленок молибдена на слюде: а, б, в, г – изначальные изображения с выделенными агломератами с использованием метода пороговой фильтрации, д, е, ж, з – изображения с отфильтрованными по пороговой высоте агломератами.

Подчеркнем, что оба программных продукта продемонстрировали схожие результаты, это свидетельствует о высокой точности разработанного нами программного обеспечения. Полученные данные представлены в Таблице 1 для изображений, обработанных методом пороговой фильтрацией. Анализ морфологии плёнок молибдена выявил, что фрактальная размерность изменяется в диапазоне от 2,19 до 2,45 в зависимости от масштаба изображения.

**Таблица 1.** Расчётные значения фрактальной размерности для изображений с выделенными участками агломератов.

Изображение	Фрактальная размерность изображений в различном используемом программном продукте	
	FractalSurface 2.0	Mountains 10
Рис. 1 д	2,45	2,41
Рис. 1 е	2,39	2,37
Рис. 1 ж	2,29	2,25
Рис. 1 з	2,13	2,13

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006).

### Литература:

- [1] Сдобняков Н.Ю., Антонов А.С., Иванов Д.В. Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: монография. Тверь: ТвГУ, 2019. 168 с.
- [2] Иванов Г.С., Брылкин Ю.В. Фрактальная геометрическая модель микроповерхности // Геометрия и графика. 2016. Т. 4. № 1. С. 4-11.
- [3] Антонов А.С., Сдобняков Н.Ю., Иванов Д.В. и др. Исследование фрактальных свойств наноразмерных пленок золота, серебра и меди: атомно-силовая и туннельная микроскопия // Химическая физика и мезоскопия. 2017. Т. 19. № 3. С. 473-486.
- [4] Свидетельство № 2023614856 Российская Федерация. FractalSurface 2.0: программа для анализа поверхности на наноуровне / Н.Ю. Сдобняков, В.А. Анофриев, А.В. Низенко, А.С. Антонов, Д.В. Иванов, Н.Б. Кузьмин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет». № 2023613525; заявл. 28.02.2023; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06.03.2023. 1 с.
- [5] DigitalSurf. Режим доступа: [www.url: https://www.digitalsurf.com](http://www.url:https://www.digitalsurf.com). 15.08.2023.

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiAlN

**Е.О. Крайнова<sup>1</sup>, А.С. Гренадёрв<sup>1</sup>, В.А. Семёнов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИСЭ СО РАН, Томск, Россия

eok12@tpu.ru

В современной промышленности существует проблема преждевременного износа деталей и инструментов, которую решают путём нанесения защитных покрытий. Широкое применение в качестве таких покрытий нашли нитридные покрытия, увеличивающие срок службы изделий [1]. Нитридные покрытия обладают высокой твёрдостью, стойкостью к износу и коррозии, что важно для режущих инструментов и пар трения [2]. Нанесение таких покрытий позволяет сократить простои на производстве и уменьшить затраты на замену вышедших из строя элементов [3].

Наиболее распространённым защитным покрытием является нитрид титана TiN, но он обладает недостаточной коррозионной стойкостью и малой стабильностью при высоких температурах. Добавление алюминия в эту систему даёт возможность создания пассивирующего слоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на поверхности, препятствующего проникновению кислорода вглубь изделия. В работе [4] показано, что при нанесении покрытия TiAlN на быстрорежущие развёртки их стойкость возрастает более чем в два раза по сравнению с покрытием TiN. В работе [5] показано, что термическая стабильность увеличивается с ростом концентрации алюминия в покрытии TiAlN.

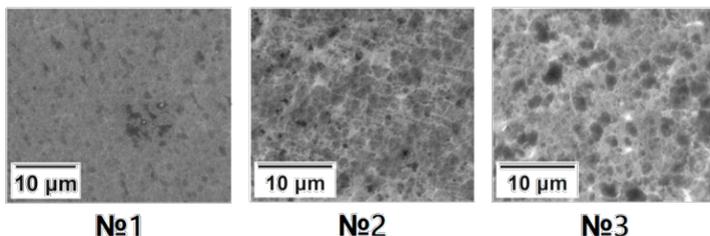
Наиболее распространёнными методами получения покрытий TiAlN являются вакуумно-дуговое испарение и реактивное магнетронное распыление. Вакуумно-дуговое испарение характеризуется высокими скоростями конденсации нитридных плёнок, однако недостатком данного метода является наличие капельной фракции, ухудшающей эксплуатационные свойства изделий. Магнетронные распылительные системы (MPC) позволяют получать покрытия с низкой шероховатостью поверхности и без образования капельной фракции, но в режимах постоянного тока и среднечастотном импульсном существует проблема низкой ионизации распыляемого материала. Сильноточные импульсные MPC (HiPIMS) обеспечивают более высокую ионизацию материала, что позволяет получать покрытия с улучшенными свойствами.

Получение нитридных покрытий, осаждённых методом магнетронного распыления, сопряжено с рядом проблем, потому как реализуется в среде реактивного газа. В таком режиме на поверхности металлической мишени образуется слой диэлектрика, имеющий меньший коэффициент распыления, поэтому скорость распыления снижается. Также диэлектриком покрываются стенки камеры, и если на них приложен положительный потенциал, то возникает проблема «исчезающего» анода. Эти проблемы решаются использованием дуальных MPC, где в одну половину периода первая мишень является катодом, вторая – анодом, затем наоборот. Цель данной работы заключалась в получении нитридных покрытий с использованием сильноточного короткоимпульсного дуального магнетронного распыления.

В данной работе материалом подложек служил твёрдый сплав ВК-8. Перед осаждением покрытий образцы прошли стандартную пробоподготовку для достижения шероховатости поверхности  $Ra < 0,05$  мкм. Нанесение покрытий TiAlN производилось на экспериментальной вакуумной установке, оснащённой дуальной MPC с сильноточным короткоимпульсным электропитанием. Подложки предварительно нагревались ИК-нагревателем до температуры  $400 \pm 30$  °С. Затем производилась очистка поверхности с помощью ионного источника с ускоряющим напряжением 2 кВ в течении 5 минут. Активация поверхности была осуществлена ионами титана в течении 5-10 минут посредством подачи смещения на подложку амплитудой 1 кВ с частотой импульсов 100 кГц и коэффициентом заполнения 60 %. В этом случае параметры MPC с титановой мишенью были следующие: мощность 1 кВт, частота импульсов 1,5 кГц, длительность импульса 20 мкс. Концентрация алюминия в покрытиях регулировалась мощностью MPC с алюминиевым катодом и составляла 50 (образец №1) и 1000 Вт (образцы №2 и №3) при неизменной мощности MPC с титановым катодом, равной 1400 Вт. Для образцов №2 и №3 концентрация алюминия изменяется в зависимости от расположения на подложкодержателе.

Микроструктура поверхности образцов с нитридными покрытиями исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа на установке Quanta 200 3D при ускоряющем напряжении 30 кВ. Элементный состав покрытий был получен на той же установке методом энергодисперсионного анализа. Толщина покрытий определялась по методу Calotest. Твёрдость и модуль упругости были измерены по методу Оливера-Фарра на установке NanoTest 600.

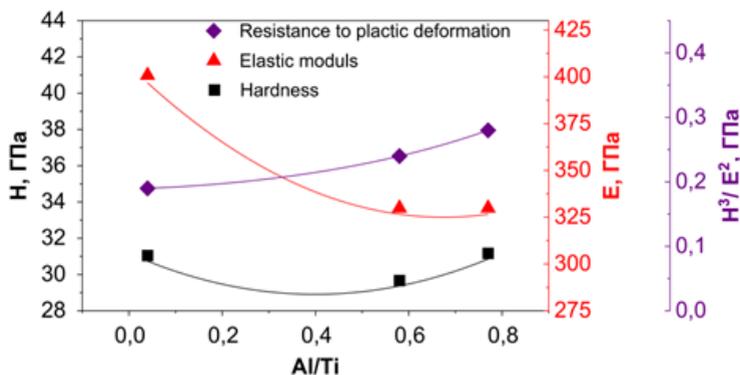
Образец №1 имел наименьшую атомную концентрацию алюминия, соотношение концентраций Al/Ti составляет 0,04; для образца №2 соотношение Al/Ti равно 0,58, а для образца №3 оно достигает 0,77. На рис. 1 показана микроструктура поверхности данных образцов.



**Рисунок 1** – Микроструктура поверхности TiAlN

Морфология поверхности образцов №1, №2 и №3 представляет собой однородную микроструктуру с размерами дефектов порядка 1-2 мкм. Толщина покрытия при этом составляла ~ 3 мкм. Увеличение концентрации алюминия в покрытии TiAlN приводит к образованию новых фаз, влияющих на микроструктуру поверхности.

Изменение твёрдости, модуля упругости и сопротивления пластической деформации  $H^3/E^2$  в зависимости от элементного состава покрытий TiAlN показано на рис. 2. Индекс пластичности H/E при увеличении концентрации Al в покрытии растёт (0,08 для образца №1 и 0,09 для образцов №2 и №3).



**Рисунок 2** – Изменение механических свойств покрытий TiAlN в зависимости от элементного состава

Образец №1 с малой концентрацией алюминия в покрытии обладает наибольшим модулем упругости. Для образца №2 наблюдается наиболее низкие значения твёрдости и модуля упругости. Далее при увеличении соотношения Al/Ti значительно возрастает твёрдость покрытия при относительно низком модуле упругости. Сопротивление пластической деформации  $H^3/E^2$  непрерывно растёт при увеличении соотношения Al/Ti. Таким образом, с помощью дуальной MPC с сильноточным короткоимпульсным источником питания были получены нитридные покрытия с высокими механическими свойствами. Показано, что увеличение концентрации алюминия в покрытии TiAlN приводит к уменьшению его модуля упругости. Как при низком (0,04), так и при высоком (0,77) соотношении Al/Ti наблюдается высокая твёрдость нитридного покрытия (порядка 31 ГПа). Также увеличение концентрации алюминия сопровождается ростом индекса пластичности  $H/E$  и сопротивления пластической деформации  $H^3/E^2$ .

Авторы выражают благодарность Томскому региональному центру коллективного пользования (ТРЦКП) Томского государственного университета за за предоставление оборудования, использованного в данной работе.

#### **Литература:**

- [1] Бердиев А.Г., Федосинко Н.Н. Механические свойства нитридных покрытий [Электронный ресурс]: статья. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 304-308.
- [2] Auezhana A., Tsukasa W. Ryo T, Shinya. Fretting wear and fracture behaviors of Cr-doped and non-doped DLC films deposited on Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alloy by unbalanced magnetron sputtering. Tribology International; 2013, p. 49-57.
- [3] Волков А.Э., Марина А.А. Перспективы применения покрытия на основе нитрида титана для деталей узлов запорной арматуры, работающих в коррозионно-абразивной среде [Электронный ресурс]: статья. – Томск: ТПУ, 2020. – С. 512-513.
- [4] Бритков А.П., Зверинцева Л.В. Выбор износостойких покрытий режущего инструмента [Электронный ресурс]: статья. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, 2022. – С. 5-7.
- [5] Birgit Grossmann, Nina Schalk, Christoph Czettel, Markus Pohler, Christian Mitterer. Phase composition and thermal stability of arc evaporated Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N hard coatings with  $0.4 \leq x \leq 0.67$ . Surface & Coatings Technology; 2017, p. 687-693.

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ: НАКЛОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ

**В. О. Кузьменко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФТИАН им. К. А. Валиева РАН, Москва, Россия

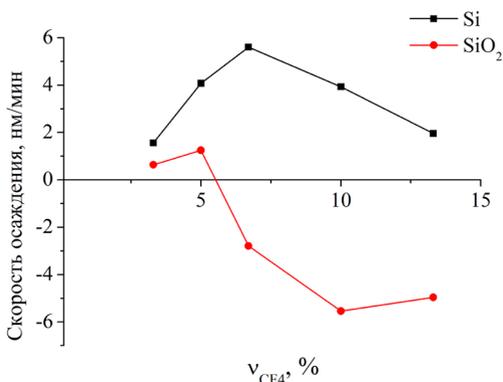
Процесс создания приборного слоя интегральных схем состоит из последовательности технологических этапов, число которых может достигать 300. Существуют три основных разновидности технологических процессов для создания приборной топологии: 1) литография (создание первичного изображения в слое резистивной маски), 2) аддитивные процессы (осаждение или формирование слоев) и 3) субтрактивные процессы (удаление материала нижележащего слоя по рисунку, определяемому топологией маски, которое как правило реализуется при помощи плазменного травления).

Именно плазменные технологии травления позволяют обеспечивать высокие скорости, анизотропию травления и возможность масштабирования процесса на пластины диаметром до 300 мм, и в отдельных случаях выше. Для достижения анизотропии травления поверхность бомбардируют ускоренными ионами из плазмы путём приложения напряжения смещения к пластине. Для достижения высокой скорости и селективности травления применяют химически активные плазмы, в основном, галогенсодержащие. Очень распространены процессы травления с использованием фторсодержащих плазм, однако их применение может сталкиваться с трудностями. Например, при травлении кремния во фторсодержащих плазмах радикалы фтора спонтанно реагируют с поверхностью кремния с образованием летучего фторида кремния  $\text{SiF}_4$ , и из-за изотропного распределения скоростей радикалов травление происходит изотропно [1]. Это приводит к неточности передачи размера в процессе, отклонению профиля травления от вертикального, что часто технологически неприемлемо. Кроме того, для ускорения процесса травления оксида кремния помимо радикалов фтора в плазме должны присутствовать фторуглеродные радикалы. Поэтому в микроэлектронике широко распространены процессы травления в фторуглеродных плазмах.

Механизм травления оксида кремния во фторуглеродных плазмах был исследован ранее [2]. Он заключается в том, что во фторуглеродной плазме на поверхности оксида кремния формируется динамически стационарная фторуглеродная плёнка, в которой с одной стороны фтор взаимодействует с кремнием, а углерод с кислородом с образованием летучих соединений, а с другой стороны из плазмы поступают фторуглеродные радикалы, обеспечивая

поступление новых радикалов к поверхности травления. Возможность управления составом и стационарной толщиной этой полимерной пленки позволяет изменять скорость процесса травления, селективность травления оксида кремния относительно кремния или резистивной маски. Таким образом, исследование осаждение фторуглеродных плёнок из плазмы важно для различных технологических применений.

В работе проведено исследование процессов осаждения плёнок с использованием различных фторуглеродных плазм в установке плазмохимического травления с реактором с индуктивно-связанной плазмой. Толщины плёнок были измерены методом спектральной эллипсометрии, химический состав плёнок был оценен методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. В плазме  $\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{H}_2$  исследована скорость осаждения плёнки на поверхности Si и  $\text{SiO}_2$  (Рис. 1).

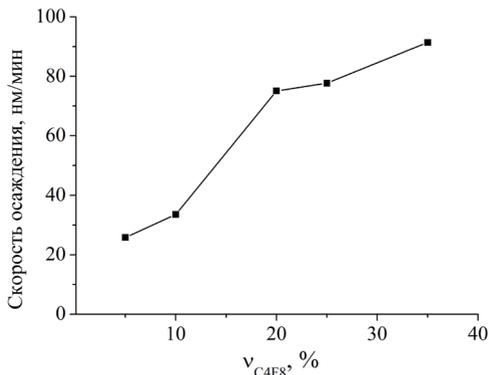


**Рисунок 1.** Скорость осаждения плёнок на поверхности Si и  $\text{SiO}_2$  в плазме  $\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{H}_2$  от доли  $\text{CF}_4$  при фиксированной доле Ar 83 %.

При постоянной доле аргона 83 % при низкой доле  $\text{CF}_4$  на поверхностях происходит осаждения плёнок, а последующее увеличение доли  $\text{CF}_4$  ведёт к уменьшению скорости осаждения и переходу от осаждения к травлению на поверхности  $\text{SiO}_2$ . Исследование состава плазмы показало, что это связано с увеличением соотношения радикалов фтора и фторуглеродных радикалов в плазме. Результаты исследования химического состава осажденных плёнок показывают с увеличением доли  $\text{CF}_4$  в плазме во фторуглеродной плёнке на поверхности увеличивается доля F относительно C. С этим должен быть связан сдвиг равновесия осаждения к процессу травления  $\text{SiO}_2$ .

Другой пример плёнкообразующей плазмы, исследованной в работе,  $\text{C}_4\text{F}_8$ . Исследована зависимость скорости осаждения плёнок на поверхности  $\text{SiO}_2$  в

зависимости от доли  $C_4F_8$  в плазме  $Ar/C_4F_8$ . На рисунке 2 показано, что скорость осаждения плёнки растёт с увеличением доли  $C_4F_8$ . Это связано с увеличением количества фторуглеродных радикалов в плазме.



**Рисунок 2.** Скорость осаждения плёнок на поверхность  $SiO_2$  в плазме  $Ar/C_4F_8$  от доли  $C_4F_8$

Показана возможность применения плазмы  $Ar/C_4F_8$  для реализации анизотропного процесса травления  $SiO_2$  для создания наклонных профилей. Это этого предварительно на поверхности  $SiO_2$  была создана маска из полиметилметакрилата (ПММА) и проведен процесс её наклонного травления в плазме  $O_2/Ar/CF_4$ . После этого в плазме  $Ar(90\%)/C_4F_8(10\%)$  при приложении напряжения смещения 280 В проведён процесс травления  $SiO_2$ , и селективность травления  $SiO_2$  к ПММА составила  $\sim 1:1$ . В результате наклон маски  $\sim 60^\circ$  был перенесен в слой  $SiO_2$ .

Полученные результаты могут быть применены для создания перспективных структур приборов микро- и нанoeлектроники.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00771, <https://rscf.ru/project/23-29-00771/>

#### Литература:

- [1] A. V. Miakonkikh, S.N. Aeverkin, K. V. Rudenko, and V.F. Lukichev, Deep Silicon Plasma Etching: Selection of Processes for Different Applications, Proc. SPIE, 11022, 2019
- [2] Zhang D. and Kushner M. J., Investigations of surface reactions during  $C_2F_6$  plasma etching of  $SiO_2$  with equipment and feature scale models, J. Vac. Sci. Technol. A, 19(2), 2001

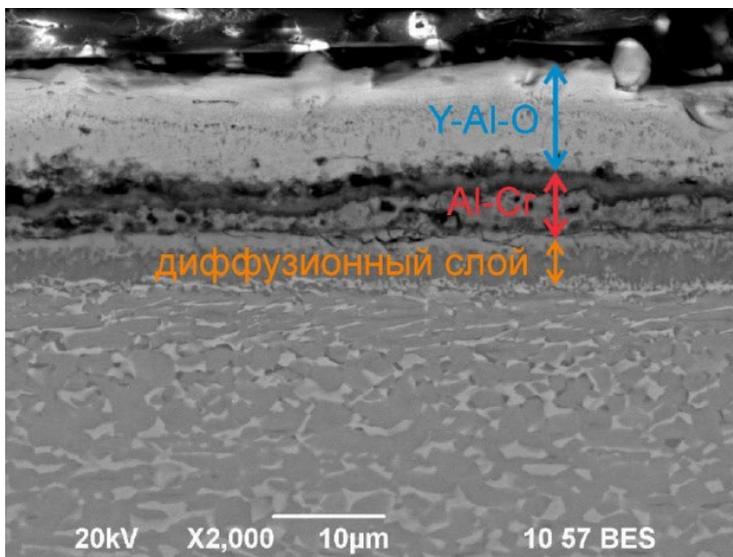
kuzmenko@ftian.ru

## ЗАЩИТА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ Ti-AL СПЛАВОВ ОТ ОКИСЛЕНИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ПОКРЫТИЯ AL-CR + Y-AL-O

**А. А. Маслов<sup>1</sup>, А. Ю. Назаров<sup>1</sup>, А. А. Николаев<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Уфимский университет науки и технологий", Уфа, Россия*

Сплавы на основе интерметаллидов Ti-Al имеют важное значение для исследователей и представителей промышленности благодаря своим жаростойкости, хорошим механическим свойствам при повышенной температуре, а также из-за низкой плотности [1]. Эта группа материалов используется для изготовления лопаток турбин низкого давления реактивных двигателей и роторов турбокомпрессоров двигателей внутреннего сгорания, поскольку такие сплавы способны работать в агрессивных средах, особенно это касается сплавов на основе  $\gamma$ -фазы TiAl [2]. Однако пределы их рабочих температур находятся в диапазоне 750 – 850 °С, выше которой на поверхности сплавов начинает образовываться нестабильная оксидная пленка TiO<sub>2</sub> [3, 4]. Это явление обуславливает необходимость защиты сплавов Ti-Al от окисления при рабочих температурах 900 °С и выше [5, 6], а также необходимость разработки новых сплавов и методов их производства. Сравнительно широкое применение получили ортосплавы на основе фазы Ti<sub>2</sub>AlNb, одним из представителей которых является сплав ВТИ-4. Высокотемпературные характеристики этого сплава позволяют использовать его для изготовления последних ступеней компрессора современных ГТД. Однако сравнительно низкая рабочая температура 650 °С вынуждает вести поиски методов защиты изделий из этого материала от окисления при росте рабочей температуры. На сегодняшний день основными керамическими материалами, защищающими TiAl сплавы, являются оксиды  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>. Однако зачастую их применение сопряжено с недостаточным ресурсом в агрессивных средах, который обусловлен как деградацией структуры, так и изменением фазового состава, приводящему к изменению объема материала. Поэтому для новых керамических покрытий важна фазовая и структурная стабильность в интервале заданных рабочих температур. Перспективной керамической системой сегодня считается система Y-Al-O, а одним из самых перспективных ее представителей является ортоалюминат иттрия YAlO<sub>3</sub>, имеющий орторомбическую структуру перовскита.



**Рисунок 1.** Микроструктура комбинированного покрытия со слоями Al-Cr и Y-Al-O после 100 циклов испытаний

Для осаждения покрытий в вакууме использовалась установка ННВ 6.6-И1., оснащенная двумя дугowymi испарителями (с хромовым/иттриевым и алюминиевым катодами соответственно) и источником газовой плазмы несамостоятельного дугowego разряда с накаливаемым катодом. Для получения оксидного покрытия в камеру подавалась смесь аргона с кислородом. Комбинированное покрытие состояло из 2 слоев, в качестве первого слоя выступало покрытие Al-Cr, в качестве второго – Y-Al-O.

В результате исследований поведения комбинированного покрытия, состоящего из подслоя Al-Cr и внешнего оксидного слоя Y-Al-O, в процессе испытаний на жаростойкость при температуре 750 °C установлено, что в процессе выдержки керамический слой, состоящий преимущественно из оксида  $Y_2O_3$ , практически не изменяется, микроструктура подслоя Al-Cr изменилась, однако это не привело к разрушению покрытия (Рис. 1). Под подслоем Al-Cr в сплаве сформировался диффузионный слой, однако признаков окисления сплава обнаружено не было.

**Литература:**

- [1] Appel F., Paul J. D. H., Oehring M. Gamma titanium aluminide alloys: science and technology. – John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Li Y., Dai J., Song Y. Research progress of first principles studies on oxidation behaviors of Ti-Al alloys and alloying influence //Metals. – 2021. – Т. 11. – №. 6. – С. 985.
- [3] Zhao L. et al. Oxidation behavior of  $\gamma$ -TiAl based alloys at 900 C in air //Materials at High Temperatures. – 2016. – Т. 33. – №. 3. – С. 234-240.
- [4] Swadźba R. et al. Effect of pre-oxidation on cyclic oxidation resistance of  $\gamma$ -TiAl at 900° C //Corrosion Science. – 2020. – Т. 177. – С. 108985.
- [5] Schütze M. The role of surface protection for high-temperature performance of TiAl alloys //Jom. – 2017. – Т. 69. – С. 2602-2609.
- [6] Wang J. et al. A novel TiAl<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating on  $\gamma$ -TiAl alloy and evaluating the oxidation performance //Applied Surface Science. – 2016. – Т. 361. – С. 90-94.

alexey.maslov2011@gmail.com

## СИНТЕЗ SiC В СРЕДЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ

**Р. Д. Герасимов<sup>1, 2</sup>, В. В. Шеховцов<sup>1</sup>**

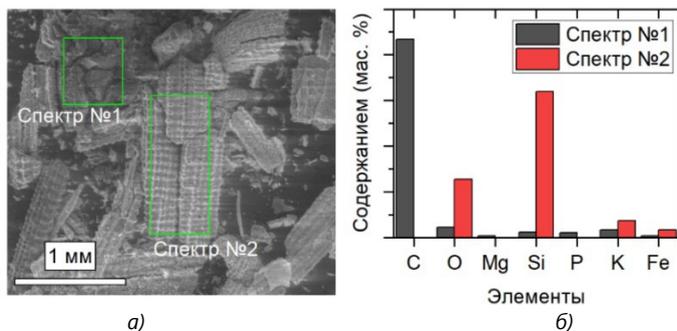
<sup>1</sup>*Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

Карбид кремния (SiC) – прочный и химически стойкий соединительный материал, имеющий имеет широкий спектр применения в различных отраслях промышленности и науке [1]. Включая следующие перспективные области использования: электроника – используется в производстве полупроводниковых устройств, таких как диоды высокой мощности, транзисторы, интегральные схемы и силовые модули; энергетика – используется в солнечных батареях и светодиодах для повышения эффективности преобразования энергии; авиация и автомобильная промышленность – используется для производства высокотемпературных компонентов двигателей и турбин, таких как топливные насосы или сопла, благодаря их способности выдерживать экстремальные условия работы; нанотехнологии – используется в наноструктурах, нанокристаллических пленках и нанорезонаторах для различных приложений, таких как сенсоры, оптические устройства и квантовые точки; металлургия – используется в производстве сплавов с другими материалами для улучшения их механических и термических свойств. Таким образом, широкий спектр областей использования SiC определяет вектор развития технологических основ синтеза и поиск новых источников сырьевых материалов. В работе показана возможность синтеза SiC в среде термической плазмы атмосферного давления из аграрных отходов, представленных пеплом рисовой шелухой.

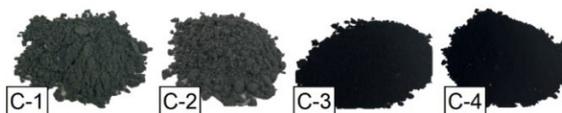
Известно, что содержание оксида кремния в рисовой шелухе может варьировать от 85 до 90% [2], что является перспективным продуктом при синтезе SiC. На рис. 1 представлены электронный снимок (а) пепла рисовой шелухи и результаты энергодисперсионного анализа (б). Установлено, что пепел рисовой шелухи состоит из смеси частиц полидисперсного размера и состава. Можно выделить два морфологических признака частиц: первый – микропористые осколки (визируемая область №1), состав C ~ 86 %; второй

– чешуйчатые объекты (визируемая область №2), состав Si ~ 65 %. Во всех спектрах присутствуют примесные элементы Mg, K, Fe, P массовая доля которых не превышает 7 %.



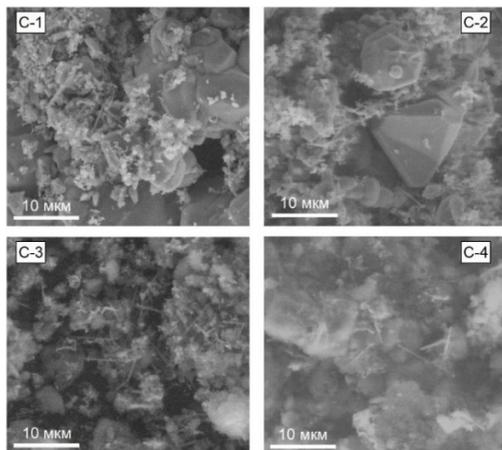
**Рисунок 1.** Электронный снимок (а) пепла рисовой шелухи и результаты энергодисперсионного анализа (б) с различных участков

Методика эксперимента включает: подготовка шихты; синтез порошкового материала; проведение комплекса физико-химических исследований. Подготовка шихты производилась с добавлением мелкодисперсного углерода, полученного путем пиролиза автомобильных покрышек при температуре 600 °С. Концентрация углерода варьировалась от 20 до 80 мас. %. Полученная шихта смешивалась в шаровой мельнице (Retsch MM 500 папо) в течении 25 минут при частоте 25 Гц. Экспериментальные исследования проводились на электроплазменном стенде мощностью 4 кВт [3], в качестве плазмообразующего газа использовался азот. Во всех экспериментах время плазменного воздействия составляло 3 мин. На рис. 2 приставлены фотографии внешнего вида полученных порошковых материалов на основе приготовленных шихт. Маркерами помечено массовое содержание углерода: С-1 – 20%, С-2 – 40%, С-3 – 60%, С-4 – 80%.



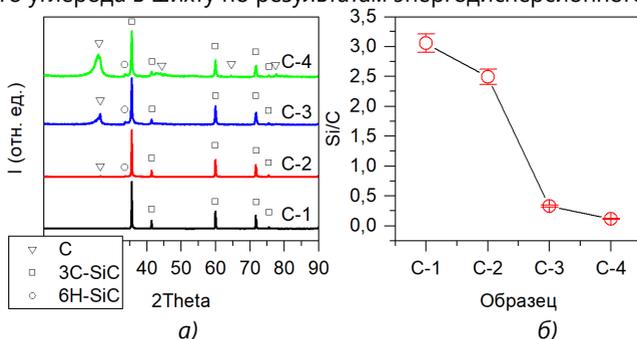
**Рисунок 2.** Фотографии внешнего вида синтезируемых материалов

Стоит отметить, что с увеличением содержания углерода в исходном составе шихты, цвет полученного продукта насыщается черной составляющей. На рис. 3 представлены электронные снимки продуктов синтеза.



**Рисунок 3.** Электронные снимки синтезируемых продуктов в среде термической плазмы атмосферного давления

Образцы C-1 и C-2 характеризуются наличием призматических частиц размером  $10 \pm 3$  мкм. Вокруг призм присутствует мелкодисперсная составляющая, которая коагулируется в агломерированные объекты. В образцах C-3 и C-4 помимо мелкодисперсных частиц кремния наблюдаются нитевидные и хлопьеобразные структуры углерода. На рис. 4, а представлены рентгеновские дифрактограммы синтезируемых образцов. На рис. 4, б представлена зависимость Si/C от концентрации введенного углерода в шихту по результатам энергодисперсионного анализа.



**Рисунок 4.** Рентгеновские дифрактограммы синтезируемых образцов (а) и зависимость содержания Si/C от концентрации введенного углерода (б)

Установлено, что при содержании 20 мас. % углерода в исходном составе шихты происходит синтез 3C-SiC, вторичных фаз методом РФА не обнаружено. При увеличении содержания углерода, наблюдается образование фазы 6H-SiC в районе  $2\theta = 34^\circ$ , а также появляется уширенный дифракционный пик  $2\theta = 28^\circ, 45^\circ, 65^\circ$  соответствующий свободному углероду. В табл. 1 представлено сравнение теоретического состава SiC с составом синтезируемых образцов. Полученные результаты согласуются с результатами энергодисперсионного анализа.

**Таблица 1.** Элементный состав синтезируемых продуктов

Элементы	Теоретический состав	Состав синтезируемых продуктов			
	C-0	C-1	C-2	C-3	C-4
Si	70,05	70,58	68,04	24,74	10,35
C	29,94	29,42	31,96	75,26	89,65

Таким образом, в работе показана возможность использования термической плазмы атмосферного давления при получении карбида кремния из композиционных шихт, состоящих из пепла рисовой шелухи и мелкодисперсного углерода, полученного путем пиролиза автомобильных покрышек. Установлено, что при содержании углерода 20 мас. % синтезируется стабильная известная форма 3C-SiC. В данном исследовании демонстрируется потенциал применения электродуговых плазмотронов при синтезе SiC из вторичных материалов.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001

### **Литература:**

- [1] K. Sun, T. Wang, W. Gong, W. Lu, X. He, E. G. Eddings, M. Fan. Synthesis and potential applications of silicon carbide nanomaterials/nanocomposites // *Ceramics International* Vol. 48, 2022, pp. 32571-32587
- [2] J. Gao, L. Li, J. Liu, F. Liu, Y. Han, X. Zhu, K. Ma. Efficient production of nanoporous silicon carbide from rice husk at relatively low temperature // *Mendeleev Communications*, Vol. 31, 2021, pp. 715-717
- [3] R. D. Gerasimov, V. V. Shekhovtsov, A. Y. Pak. Production Silicon Carbide Based on Micro and Nano-Sized Silicon Dioxide in Conditions of Thermal Plasma Energy // *High Energy Chemistry*, 2023, Vol. 57, pp. S57-S60

rdg2@tpu.ru

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ВОДНОРАСТВОРНЫМ КАТОДОМ В КОМБИНАЦИИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ОКИСЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЯ

**Г. Х. Тазмеев<sup>1</sup>, Р. Н. Тазмеева<sup>1</sup>, Х. К. Тазмеев<sup>1</sup>**

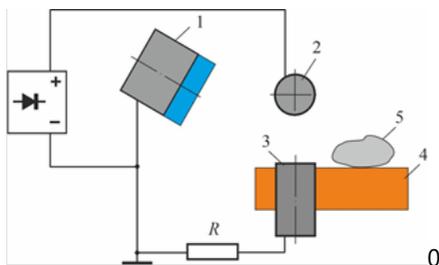
*<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия*

Газовые разряды, создаваемые с использованием жидкости в качестве электродов, являются источниками плазмы с обширными возможностями для практических применений. В настоящее время значительные успехи достигнуты в изучении газовых разрядов с жидкими катодами, которые представляют собой водные растворы различных солей, кислот и щелочей. Большинство исследований проведены при небольших токах (десятки и сотни миллиампер) [1]. Цель данной работы – создание плазменных потоков с использованием сильноточных режимов горения и изыскание возможностей их практического применения.

Во многих случаях требуются плазменные потоки, ориентированные горизонтально или направленные иначе. Оказалось, что такую задачу можно решить с помощью диэлектрической межэлектродной вставки (МЭВ), которая обильно смачивается водным раствором, служащим в качестве катода. МЭВ была смонтирована на выходе из катодного узла. Она была изготовлена из пористого огнеупорного материала. В ней были выполнены отверстия, через которые водный раствор поступал на рабочую поверхность. Подробное описание приведено в [2].

В зависимости от пространственной ориентации электродной пары «катод-анод» были получены плазменные потоки, ориентированные в разных направлениях. Исследования проводились в диапазоне токов 10-20 А. Использовался раствор хлорида натрия в дистиллированной воде с концентрацией по массе  $0.60 \pm 0.02$  г/. Расход водного раствора на образование плазменного потока был в пределах 1.0-2.2 г/с (в зависимости от тока).

Под воздействием потока плазмы дюралевые куски различных форм и размеров быстро расплавились. Однако температура оказалась недостаточной для вскрытия пленки окислов на поверхности жидкого металла. Потребовалось дополнительное воздействие электрической дуги. В упрощенном варианте дуга включалась в электрическую цепь параллельно газовому разряду с использованием балластного резистора (рис. 1).



**Рисунок 1.** Схема совместного использования газового разряда с воднорастворным катодом и электрической дугой. 1 – катодный узел с водным раствором; 2 – анод; 3 – металлический катод; 4 – огнеупорная подставка; 5 – алюминиевое сырье. Анод 2 и металлический катод 3 представляют собой охлаждаемые водой медные стержни с диаметром 25 мм, смонтированные горизонтально и вертикально, соответственно.

Для получения водорода была создана техническая система, позволяющая провести процесс без доступа воздуха. Объем образовавшихся газов измерялся бытовым счетчиком газа СГК G4. Содержание водорода определялось анализатором водорода промышленного типа АВП-01Г. В период интенсивного газообразования содержание водорода было в пределах  $96.0 \pm 4.0$  об.%. Наличие кислорода регистрировалось газоанализатором АВТОТЕСТ-01.03. Объемное содержание кислорода составляло  $0.8 \pm 0.1$  об.%.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - МК-111.2022.1.2.

#### **Литература:**

- [1] Bruggeman P.J. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. V. 25 (5), 053002.
- [2] Тазмеев Г.Х. и др. Патент РФ № 2792276. 2023.

gktazmeev@kpfu.ru

## СИНТЕЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЁНОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И КОНЦЕНТРАЦИЯХ АЗОТА В СВЧ ПЛАЗМЕ

**А. К. Мартьянов<sup>1</sup>, И. А. Тяжелов<sup>1</sup>, С. С. Савин<sup>2</sup>, В. С. Седов<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия*

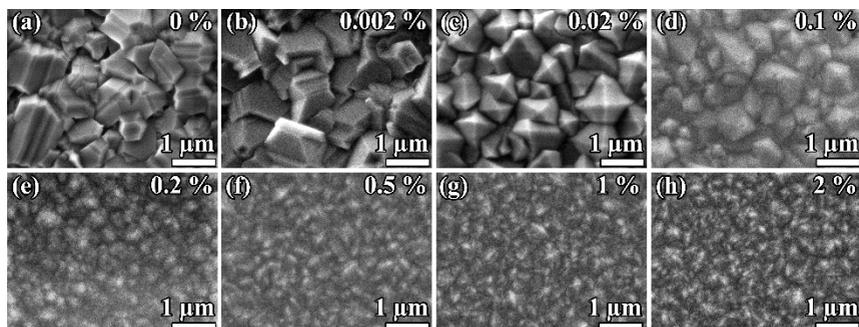
*<sup>2</sup>МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия*

Алмаз обладает высокой твердостью и теплопроводностью, а также химической инертностью, что позволяет использовать его в качестве материала для твердых покрытий режущих инструментов [1] и защитных слоев [2]. Метод химического осаждения алмаза из газовой фазы (CVD) позволяет создавать алмазные покрытия на инструментах сложной формы и объемные теплоотводящие слои для электронных устройств. Одним из процессов, определяющих окончательную структуру пленки, является вторичное зародышеобразование. Это зарождение новых зерен на уже сформированной поверхности пленки. Этот процесс может стимулировать изменение (i) среднего размера зерна, (ii) соотношения фаз  $sp^3$  и  $sp^2$  фаз углерода и (iii) шероховатости синтезированной пленки. Стимулировать вторичную нуклеацию можно двумя способами: (1) повышая концентрацию метана по сравнению со «стандартными» условиями синтеза [3], или (2) добавляя в реакционную газовую смесь небольшую долю азота ( $N_2$ ).

В данной работе исследуется второй фактор: были синтезированы алмазные плёнки на кремниевых подложках при концентрациях азота от 0% до 2% и температурах подложки от 700 до 1050 °С. Полученные образцы были охарактеризованы сканирующей электронной микроскопией (рис.1) рентгеновской дифракцией и рамановской спектроскопией. Определено влияние условий синтеза алмаза на структуру, скорость роста и фазовый состав поликристаллических алмазных пленок.

При концентрациях азота 0.002% и ниже, алмазные кристаллиты ориентированы случайно. При повышении концентрации азота до 0.02 % происходит рост ориентированных в направлении (100) поликристаллических алмазных плёнок. При дальнейшем увеличении концентрации азота до 0.2 % происходит постепенный переход к

нанокристаллической структуре плёнки. Было показано, что рост концентрации азота при постоянной температуре подложки приводит к идентичному механизму перехода от микрокристаллической структуры алмаза к нанокристаллической, как в нашей предыдущей работе [3], где этот процесс запускался без присутствия азота, а только за счёт высокой концентрации метана.



**Рисунок 1.** Изображения СЭМ поликристаллических алмазных плёнок, выращенных при различных концентрациях азота при постоянной температуре подложки 850 °С.

Данная экспериментальная работа является исходными данными для дальнейшего теоретического обоснования и моделирования химических процессов в СВЧ плазме при росте алмаза. Построение такой модели позволит не только лучше понимать физику плазмы, но и точно контролировать характеристики высококачественных CVD алмазных покрытий для различных применений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00082, <https://rscf.ru/project/22-72-00082/>

#### **Литература:**

- [1] E.E. Ashkizazi et al. *Diam. Relat. Mater.* 75 (2017), 169–175.
- [2] S.L. Moore et al. *Scientific Reports.* 8 (2018), 1–8.
- [3] A.K. Martyanov et al. *Coatings.* 13, 4, (2023), 751.  
[art.martyanov@gmail.com](mailto:art.martyanov@gmail.com)

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЙ-КРЕМНИЙ ОБЛУЧЕНИЕМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ АРГОНА ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ИНДУКЦИОННОГО ВЧ РАЗРЯДА

**В. И. Бачурин<sup>1</sup>, И. И. Амиров<sup>1</sup>, К. Н. Лобзов<sup>1,2</sup>, Л. А. Мазалецкий<sup>1,2</sup>, С. Г. Симакин<sup>1</sup>, Смирнова М.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН, Ярославль, РФ

<sup>2</sup>Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, РФ

Ионная бомбардировка твердых тел в последнее время широко используется для полировки поверхностных неоднородностей наноразмерного масштаба. Напротив, еще одним применением данного метода может служить наноструктурирование облучаемой поверхности. То есть формирование квантовых нитей, квантовых точек и др. Размеры и форма топографических структур определяются параметрами облучения (энергия ионов, угол падения, флюенс), которыми легко управлять [1]. В данной работе представлены результаты исследования возможностей формирования рельефа поверхности при распылении двухкомпонентных пленок низкоэнергетичными ионами аргона плазмы индукционного ВЧ разряда.

Тонкие пленки толщиной 100 нм наносились на пластину окисленного монокристаллического кремния методом магнетронного распыления стандартных мишеней АК1, содержащих 1% кремния, на установке SCR 651 "Tetra" (Alcatel).

Распыление пленок проводилось в реакторе ВЧ индукционного разряда RDE 300. В качестве плазмообразующего газа использовался Ar. Остаточное давление в реакторе составляло  $5 \cdot 10^{-4}$  Па. Энергия бомбардирующих ионов определялась мощностью смещения  $W_{см}$ , подаваемой на водоохлаждаемый ВЧ электрод (держатель образца). В зависимости от величины  $W_{см}$  на поверхности устанавливался потенциал самосмещения  $U_{см}$ , который определял среднюю энергию падающих ионов. При увеличении  $W_{см}$  от 50 до 250 Вт средняя энергия ионов изменялась от 40 до 200 эВ. Плотность ионного потока во всех экспериментах имела значение  $\sim 6$   $\text{мА} \cdot \text{см}^{-2}$ .

Скорость распыления образцов ионами  $Ar^+$  измерялась во время распыления in-situ методом лазерной интерферометрии и составляла от 0.2 до 2.5 нм/с. Время распыления изменялось от 2 до 12 мин. Для сравнения результатов проводилось распыление пленок чистого Al и аморфного Si. С помощью программы TRIDYN рассчитана зависимость коэффициентов распыления Al и Si при изменении энергии ионов  $Ar^+$  от 10 до 200 эВ.

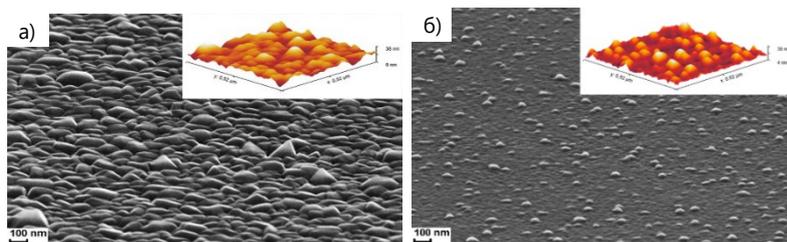
Электронно-микроскопическое изучение морфологии поверхности проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Supra 40. Использовались пучки электронов с энергией 20 кэВ. Угол падения пучка электронов относительно нормали к поверхности составлял 0 и 70°. Кроме того, топография поверхности исследовалась на атомно-силовом микроскопе (АСМ) CMM-2000.

Анализ химического состава поверхности исходных и распыленных пленок проводился на установках растровой электронной оже-спектроскопии (РЭОС) PHI 660 и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) TOF SIMS 5. При анализе поверхности методом РЭОС энергия пучка первичных электронов составляла 10 кэВ. При проведении ВИМС-анализа, в качестве анализирующего, использовался пучок ионов  $Bi^+$  с энергией 25 кэВ. Регистрировались положительные вторичные ионы основных элементов пленки. Регистрация масс-спектров в статическом режиме работы прибора позволила построить ионно-микроскопические изображения поверхности в различных ионах. Послойный анализ образцов проводился с помощью распыляющего пучка ионов  $O_2^+$  с энергией 500 эВ.

Установлено, что скорость распыления Al в два раза превышает скорость распыления Si во всем исследованном диапазоне энергий ионов  $Ar^+$ . Интерполяция зависимостей в область низких энергий позволила определить пороговую энергию распыления. Она составила ~ 30 эВ для Al и ~ 40 эВ для Si. Полученные данные хорошо согласуются с данными моделирования при значении коэффициентов распыления  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  атом/ион.

Изучение топографии методом СЭМ показало, что исходные пленки имеют зернистую структуру с размером зерен порядка 20-100 нм, причем размер зерен для Al пленки, существенно превышает средний размер зерен для пленки AlSi. В случае пленок AlSi на поверхности наблюдаются отдельные участки размером 20 нм, выступающие на поверхности в виде холмов, которые имеют большую яркость. Их можно интерпретировать, как зерна кремния. После ионно-плазменной обработки пленок наблюдается почти

двукратное уменьшение средних размеров зерен. Причем, при распылении пленок AlSi ионами Ar<sup>+</sup> с энергиями менее 100 эВ значительно увеличивается концентрация предполагаемых зерен кремния (рис. 1).

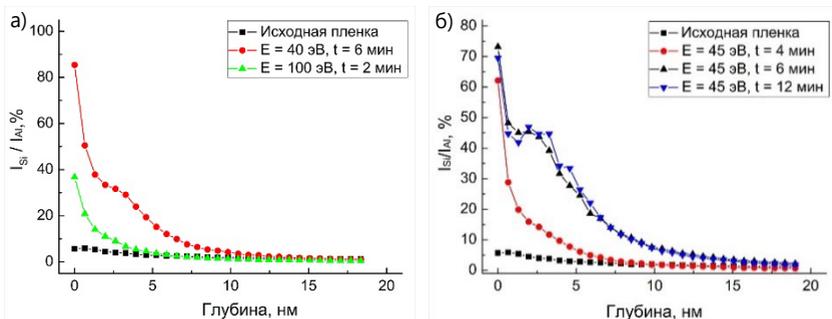


**Рисунок 1.** Электронно-микроскопические изображения исходной пленки (а) и облученной ионами Ar<sup>+</sup> с энергией 60 эВ (б). На вставках представлены соответствующие АСМ-изображения

Анализ химического состава поверхностей пленок (исходной и обработанной в плазме) показывает, что содержание кремния вблизи поверхности возрастает почти на порядок после ионного облучения. Методом РЭОС соотношение концентраций Al и Si определялось по отношению высокоэнергетичных оже-пиков этих элементов с учетом коэффициентов относительной чувствительности. В исходных пленках отношение оже-сигналов  $I_{Al}/I_{Si} \sim 18-19$ , что соответствует концентрации кремния на поверхности менее 4%. После распыления пленок ионами с энергией 60 эВ соотношение  $I_{Al}/I_{Si}$  изменилось до  $\sim 4-5$ , что соответствует увеличению концентрации Si на поверхности до 20-25%.

Эти результаты хорошо согласуются с данными ВИМС анализа. На рис. 2 представлены зависимости послыонного отношения токов вторичных ионов Si<sup>+</sup> к Al<sub>2</sub><sup>+</sup> для различных энергий ионов Ar<sup>+</sup>(а) и времени распыления (флюенса) (б). Видно, что наблюдается тенденция увеличения отношения сигнала  $I_{Si}/I_{Al}$  при уменьшении энергии ионов плазмы. С ростом времени распыления пленок в плазме ионами одной энергии наблюдается незначительный рост пика вторичных ионов Si<sup>+</sup> на поверхности и увеличение толщины приповерхностного слоя с повышенным содержанием кремния в пленке.

Таким образом можно предположить, что облучение пленок AlSi, низкоэнергетичными ионами Ar<sup>+</sup> приводит к формированию на поверхности кластеров Si нанометрового размера.



**Рисунок 2.** Распределение Si в приповерхностном слое: а) исходной пленки и после распыления ионами  $Ar^+$  с энергией  $E=40$  эВ,  $t=6$  мин.;  $E=100$  эВ,  $t=2$  мин.; б) исходной пленки и после распыления ионами  $Ar^+$  с энергией  $E=45$  эВ в течение  $t=4$  мин.,  $t=6$  мин.,  $t=12$  мин.

Увеличение концентрации кремния на поверхности образцов при ионной бомбардировке можно объяснить следующим образом. Измерение скорости распыления и моделирование с помощью программы TRIDYN позволяют утверждать, что парциальный коэффициент распыления Al почти в два раза больше, чем Si. Пороговая энергия распыления кремния почти в 1.5 раза больше, чем для алюминия. С учетом этих факторов и, принимая во внимание, что при бомбардировке пленок ионами, среднее значение энергии которых близко к пороговой энергии, наблюдается заметное увеличение концентрации кремния на поверхности пленки. Известно, что сплав AlSi представляет собой в основном твердый раствор при концентрации кремния менее 7%, а при 12% и выше он является смесью твердого раствора и включений Si [2]. Поэтому возрастание концентрации Si выше критической на поверхности пленки должно приводить к формированию кластеров кремния, которые как показано в работе имеют размеры порядка 10 нм.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Ярославского филиала Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме № FFNN-2022-0018.

#### Литература:

- [1] R. Cuerno, J.-S. Kim // J. Appl. Phys. 2020. V. 128. P. 180902.
  - [2] L. Murray, A.J. McAlister, *Bullet. of Alloy Phase Diagrams* 5 (1984)
- [vibachurin@mail.ru](mailto:vibachurin@mail.ru)

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПОЛУЧЕНИЮ CORE-SHELL ПОРОШКОВ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ

**К. Н. Каримов<sup>1</sup>, Э. Ф. Вознесенский<sup>1</sup>, Я. О. Желонкин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия

<sup>2</sup>ООО "ФЕРРИ ВАТТ", Казань, Россия

### **Аннотация:**

Исследована методика получения core-shell порошков методом вакуумной осаждения покрытий. В качестве основы core-shell порошков выбраны круглые гранулы оксида алюминия двух дисперсных фракций – 50 мкм и 10 мм. Для нанесения покрытий на гранулированные материалы разработано механическое перемешивающее устройство. Показано, что при использовании разработанного перемешивающего устройства методом дугового испарения с предварительной ионной бомбардировкой поверхности в течение 7 мин на гранулах формируется титановое покрытие толщиной 0,3 мкм. Проведены исследования полученного покрытия.

### **Ключевые слова:**

Core-shell порошки, PVD, титановое покрытие, дуговое испарение, оксид алюминия, аддитивные технологии, вакуум, механическое перемешивание.

### **Реферат:**

В работе исследовали процесс получения core-shell (ядро-оболочка) порошков, полученных с использованием PVD (physical vapor deposition) метода нанесения покрытий. Исследованы режимы очистки поверхности порошков от загрязнений при дегазации и обработке в тлеющем разряде. Исследованы процессы конденсации Ti в среде плазмообразующего аргона методом КИБ (конденсация с ионной бомбардировкой). Эксперименты проводили на экспериментальной установке ВАТТ-450-2Д ресурсного центра ООО «ФЕРРИ ВАТТ», г. Казань. Образцы сферических гранул из альфа-оксида алюминия диаметром 50 мкм и 10 мм обрабатывали с применением перемешивающего устройства барабанного типа. В целях дальнейшего

усовершенствования технологии и оборудования полученные core-shell порошки подвергали исследованиям и испытаниям.

### **Введение:**

Машиностроительная отрасль постоянно развивается, совершенствуя технологии. Использование традиционных методов обработки металла, таких как литье, сварка, механическая и электрохимическая обработка, предполагает достаточные трудоемкие процессы изготовления изделий, особенно имеющих сложную геометрию поверхности. Перспективным направлением изготовления подобных сложнопрофильных изделий являются аддитивные технологии.

Основными направлениями аддитивного изготовления металлических изделий со сложной пространственной формой являются методы сплавления с использованием лазерного излучения [1] или спекания в условиях вакуума [2].

Материалом, применяемым в данных методах, выступает металлический порошок, который под действием термического воздействия лазера сплавляется или спекается. В настоящее время существуют технологии получения core-shell порошков [1] (от англ. core – ядро, shell – оболочка). Такие порошки представляют собой композитный материал, состоящий из ядра, например из керамики (оксид алюминия, карбид бора, оксид кремния и т.д.) в металлической оболочке (титан, железо, хром, никель, цинк, медь и т.д.) или из металла в металлической оболочке (титан, железо, хром, никель, цинк, медь, алюминий, многие другие металлы). Core-shell структура порошка позволяет снизить металлоемкость, плотность изделия или получить гибридную металл-керамическую структуру.

Основной сложностью при производстве металл-керамических core-shell порошков является равномерное нанесение металлического покрытия на дисперсную керамическую основу. Гальванические методы, методы расплава и аэрозоля имеют важный недостаток – в процессе получения core-shell порошков происходит окисление в контакте с жидкостью или в воздушной среде. Применение PVD метода [3] исключает окисление получаемого core-shell порошка, поскольку процесс проводится в безвоздушной среде.

В настоящее время существует несколько методов получения core-shell порошков с применением PVD-технологий. Известны процессы пересыпания из бункера в бункер с одновременным нанесением покрытия, нанесение покрытия на порошки, находящиеся на виброплите, нанесение покрытия с использованием различных устройств для перемешивания внутри вакуумной камеры.

Перспективной схемой получения core-shell порошков PVD-методом является нанесение покрытий в условиях вакуума с применением перемешивающего устройства барабанного типа.

### **Оборудование и материалы:**

Компания ООО «ФЕРРИ БАТТ» разработала экспериментальную установку получения core-shell порошков с механизмом перемешивания порошков путем вращения барабана – БАТТ-450-2Д (рис. 1) [4, 5]. Внутреннее перемешивающее устройство представляет собой цилиндрический полый барабан с ребрами для перемещения порошка.



**Рисунок 1.** Внешний вид вакуумной установки БАТТ-450-2Д

Установка БАТТ-450-2Д имеет в своем составе следующие блоки:

- барабан с приводом вращения, для равномерного перемешивания сыпучего материала;
- термоэлектрические нагреватели, расположенные снаружи от барабана, обеспечивающие равномерный нагрев и дегазацию порошка;
- источник электропитания смещения для генерации тлеющего разряда для процессов ионной очистки;

– электродуговые планарно-протяженные испарители в качестве источника металлической плазмы для нанесения покрытий. Также возможна конфигурация с применением метода магнетронного распыления. Применение различных источников металлической плазмы позволяет регулировать скорость нанесения покрытий.

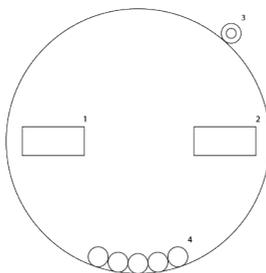
Модульная конструкция внутренней оснастки установки BATT-450-2Д, обеспечивает вариативность при разработке методик получения core-shell порошков.

Для нанесения металлических покрытий использовали гранулы оксида алюминия диаметром 50 мкм и 10 мм. Для исследования структуры core-shell порошков использовали конфокальный лазерный сканирующий микроскоп Olympus LEXT OLS-4000 (Япония) [6].

Адгезию покрытия к грануле оценивали методом параллельных насечек по ГОСТ 31149-2015 (ISO 2409:2013) [7].

#### **Экспериментальная часть:**

Для отработки технологии очистки поверхности и нанесения покрытия использовали гранулы сферической формы из альфа-оксида алюминия диаметром 10 мм. Большой размер гранул позволят определить адгезию и толщину полученного покрытия к подложке. Гранулы оксида алюминия помещали в перемешивающий барабан вакуумной установки BATT-450-2Д (рис. 2).



**Рисунок 2.** Схема расположения гранул внутри перемешивающего барабана: 1, 2 – электродуговые испарители, 2 – контакт подачи потенциала для тлеющего разряда и тока смещения, 4 – гранулированный оксид алюминия

С помощью диффузионного и форвакуумного насосов рабочая камера установки вакуумировалась до остаточного давления  $P = 0,0133$  Па, с целью удаления воздуха и легколетучих веществ. Для проведения процесса очистки поверхности гранул в тлеющем разряде в камеру подавали плазмообразующий инертный газ – Ar до давления 0,15 Па с расходом газа 0,44 н. см<sup>3</sup>/мин. На панели приборов включали привод вращения барабана с частотой 10 оборотов в мин.

На основе ранее проведенных исследований, устанавливали рабочие значения параметров на источнике электропитания смещения подложки:

- режим работы – импульсный;
- значение выходного напряжения – 350 В;
- частота повторения импульсов – 40 кГц;
- значение силы тока – 0,98 А.

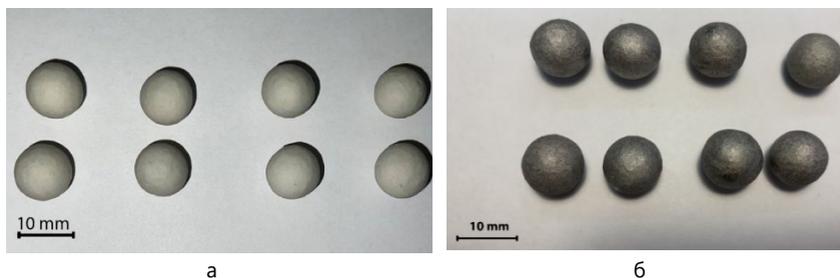
Дегазацию и очистку поверхности проводили в течении 10 мин, при постоянном вращении привода барабана.

После проведения очистки поверхности гранул проводили откачку газа диффузионным насосом из вакуумной камеры до значения давления 0,0133 Па. Затем подавали в камеру плазмообразующий газ Ar до значения давления 0,5 Па, с расходом газа 0,70 н. см<sup>3</sup>/мин при котором инициируется стабильное перемещение катодного пятна на катод электродугового испарителя. Материал катода электродугового испарителя – Ti марки BT1-0.

Установили значение тока, подаваемого на катод – 120 А. Процесс испарения проводили в течении 5 мин с постоянным вращением барабана. После проведения процесса нанесения покрытия на гранулы оксида алюминия, проводилась пассивация в среде Ar, в течении 15 мин. Внешний вид образцов гранул представлен на рис. 3.

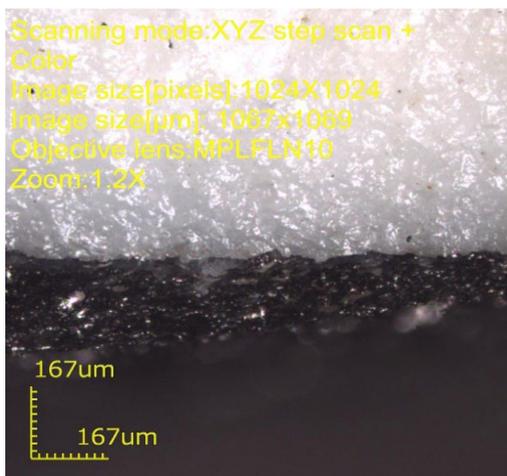
Покрытие имеет равномерный серый оттенок на всей поверхности образцов, что соответствует цвету титана. Исследовали адгезию оболочки к ядру.

При нанесении на покрытие параллельных надрезов и дальнейшей визуальной оценке состояние покрытия по четырехбалльной системе оценивалось на 4 балла.



**Рисунок 3.** Внешний вид образцов гранул  $Al_2O_3$ : а – до нанесения покрытия, б – с покрытием

Изучение толщины полученного покрытия проводили по поперечному сколу гранул с использованием конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS-4000 (рис. 4).



**Рисунок 4** – Изображение скола гранулы

Из проведенных измерений толщины полученного покрытия можно сделать заключение о том, что среднее значение толщины покрытия составляет 0,35 мкм, при варьировании толщины в пределах 0,28–0,44 мкм. Расчетная средняя скорость нанесения титанового покрытия на гранулированный оксид алюминия составляет около 0,62 мкм/мин.

Режимы обработки, использованные для гранул диаметром 10 мм использовали для проведения эксперимента с порошками диаметром 50 мкм.

Навеску порошка массой 10 г помещали в перемешивающий барабан установки. Проводили откачку вакуумной камеры до давления 0,00133 Па. В вакуумную камеру подавали плазмообразующий Ar с расходом газа 0,45 н. см<sup>3</sup>/мин до давления 15 Па для очистки порошков в тлеющем разряде. Процесс проводился с вращением барабана с частотой 20 оборотов в мин.

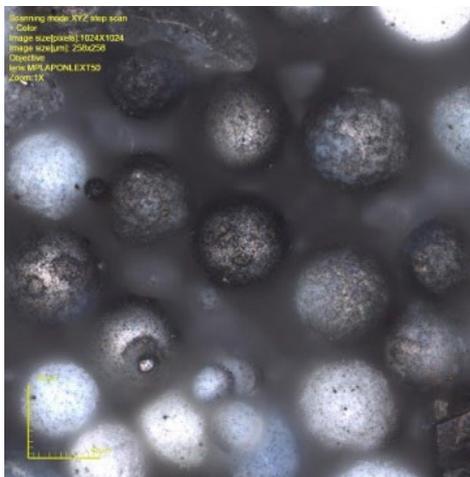
Очистку поверхности порошка от органических и неорганических загрязнений проводили в тлеющем разряде в импульсном режиме обработки, значении выходного напряжения – 350 В, частота повторения импульсов – 40 кГц, сила тока – 0,98 А. Процесс проводили при постоянном перемешивании порошка в течении 5 мин.

После очистки поверхности порошка провели пассивацию покрытия. Для этого провели откачку газа из вакуумной камеры до величины давления 0,00133 Па, подали в камеру газ Ar до значения давления 4,9 Па, с расходом газа 0,70 н. см<sup>3</sup>/мин. Процесс проводился при постоянном перемешивании в течение 10 мин. Фото порошка до и после нанесения покрытия представлены на рис. 5а и 5б, соответственно.



**Рисунок 5.** Внешний вид порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> дисперсностью 50 мкм: а – исходный, б – с титановым PVD-покрытием

Титановая пленка осела на порошок, но недостаточно равномерно, часть гранул в силу неравномерности перемешивания осталась без покрытия. Это наглядно на изображении, полученном с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа (рис. 6.).



**Рисунок 6** – КЛСМ-изображение порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с покрытием из Ti

Отметим, что эксперимент проводился исходя из данных, полученных в ходе эксперимента с гранулами большего размера. Однако большая часть порошка имеет металлическое покрытие, что свидетельствует о установленной положительной тенденции. Необходимо провести дальнейшие исследования с подбором технологических параметров для получения более качественного и равномерного покрытия и, в конечном итоге, получить плакированный порошок в полном объеме.

На сегодняшний день аддитивный метод спекания порошков реализуется в установках различных производителей, в том числе и ООО «ФЕРРИ ВАТТ» в установке проекта «Спекание».

#### **Выводы:**

1. PVD-метод нанесения покрытия в вакуумной установке с барабанным механизмом перемешивания, может составить конкуренцию для методов нанесения покрытий на малоразмерные изделия, гранулированные и дисперсные материалы.
2. Конденсация титанового покрытия на поверхности гранул диаметром 10 мм происходит при следующих режимах катодно-дугового испарения: сила тока, подаваемого на дуговой испаритель – 130 А; продолжительность

обработки – 7–15 мин; давление в камере 0,2–0,3 Па, расход плазмообразующего газа аргона 0,35–0,45 н. см<sup>3</sup>/мин. При этом получаемое титановое покрытие имеет толщину в интервале 0,439–0,279 мкм при удовлетворительной адгезии. Данный режим так же позволяет нанести покрытие на гранулы диаметром 50 мкм, при этом во всем объеме порошка присутствуют гранулы без покрытия.

3. Требуется более тщательное исследование структуры и состава покрытия и ее состава, а также доработка режима нанесения покрытия на порошки малой дисперсности.

### **Литература:**

[1] Евсеев, А.В. Лазерные технологии быстрого прототипирования и прямой фабрикации трехмерных объектов / С.В. Камаев, Е.В. Коцюба, М.А. Марков, А.Н. Никитин, М.М. Новиков, В.Я. Панченко // Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных и прикладных разработок. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – С.333–397.

[2] Либенсон, Г.А. Процессы порошковой металлургии: учеб. пособие в 2-х т. Т.2. / Г.А. Либенсон, В.Ю. Лопатин, Г.В. Комарницкий.– М.; «МИСИС», 2002. – 320 с.

[3] Xie, Z.H. Microstructural response of TiN monolithic and multilayer coatings during microscratch testing / Z.H. Xie, M. Hoffman, P. Munroe, R. Singh, A. Bendavid, P.J. Martin. //Journal of Materials Research. – 2007. – V. 22. – N 8. – P. 2312–2318.

[4] ООО «ФЕРРИ ВАТТ» [Электронный ресурс]. - <http://ferryvatt.ru>

[5] Установка для нанесения покрытий ВАТТ-450-2Д ресурсного центра ООО «ФЕРРИ ВАТТ» [Электронный ресурс] <https://ferryvatt.ru/products/nanesenie-pokrytiy/>

[6] The Olympus OLS 4000 LEXT is a laser confocal microscope [Электронный ресурс] [https://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Olympus\\_OLS\\_4000\\_LEXT](https://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Olympus_OLS_4000_LEXT)

[7] ГОСТ Р 31149-2014. Определение адгезии методом решетчатого надреза. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2015. – 16 с.

krutotushenka@gmail.com

## ТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ В ПОТОКЕ ГАЗА.

**А. О. Софроницкий<sup>1</sup>, А. А. Масянов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

С помощью метода ионного распыления в потоке газа можно синтезировать различные металлические и металл-оксидные частицы, размеры которых можно контролировать при изменении давления внутри вакуумной камеры, силы тока разряда, потока газа, межэлектродного расстояния и т.д. Подробнее про сам метод можно почитать в работах [1,2], а про небольшой обзор сфер применения металлических и металл-оксидных наночастиц, синтезированных при ионном распылении в потоке газа в работе [3].

Наночастицы ZnO можно синтезировать различными методами. Так, например, авторы в работе [4] показали, что синтезированные химическим методом наночастицы ZnO можно использовать как полупроводниковый канал для полевых транзисторов. Средний размер частица составлял около 70 нм. Методом ионного распыления в потоке газа можно синтезировать наночастицы ZnO различных размеров и более химически чистые, которые не требуют дополнительной очистки по сравнению с синтезированными химическими методами.

Материалы на основе оксида цинка показали хорошие химические, сенсорные и электрические характеристики и свойства [5]. Также ZnO является прозрачным для спектра видимого света из-за своей ширины запрещённой зоны, которая равна 3.36 эВ. При взаимодействии кислорода и ZnO, молекулы кислорода захватывают свободные электроны с поверхности наночастиц оксида цинка, при этом уменьшается концентрация свободных носителей заряда и истощается поверхность, на которую были нанесены эти наночастицы [4]. Однако после ультрафиолетового облучения можно стабилизировать наночастицы оксида цинка и увеличить электрические свойства тонкоплёночного транзистора.

Использование наночастиц оксида цинка, синтезированных методом ионного распыления в потоке газа, может сделать производство транзисторов более технологичным. Это связано с уменьшением количества этапов, необходимых для создания транзисторов по сравнению с химическими методами синтеза аналогичных частиц, использованными в работе [4].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке по Соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ.*

#### **Литература:**

- [1] Fairushin, I. I., Saifutdinov, A. I., & Sofronitskiy, A. O. (2020). Numerical and Experimental Studies of the Synthesis of Copper Nanoparticles in a High-Pressure Discharge. High Energy Chemistry, 54(2), 150-153. DOI: 10.1134/S0018143920020071
- [2] Fairushin, I. I., Saifutdinov, A. I., Sofronitskiy, A. O., Timerkaev, B. A., & Dautov, G. Y. (2019, October). Development of plasma reactor design for synthesis of copper nanoparticles using multi-scale simulation. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1328, No. 1, p. 012088). IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/1328/1/012088
- [3] A. O. Sofronitskiy, A. A. Masyanov Promising Applications of Metal and Metal-Oxide Nanoparticles Synthesized by Ion Sputtering in a Gas Flow. doi: 10.1134/S0018143923070457
- [4] Fabio F. Vidor, Thorsten Meyers and Ulrich Hilleringmann // Nanomaterials. 2016. V.6. No 9. P. 154.
- [5] Jagadish, C.; Pearton, S.J. Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures. Processing, Properties and Applications; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2006

artempic8@mail.ru

## НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ УПРОЧНЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ВЫБРОПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

**С. Н. Шарифуллин<sup>1</sup>, А.Т.Байниязова<sup>2</sup>, М.М.Абжаев<sup>2</sup>, Р.Р. Гилязетдинов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>2</sup>Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан

<sup>3</sup>Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

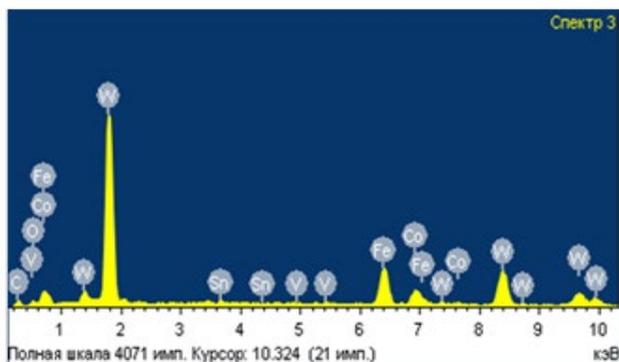
Задача повышения ресурса работы различных машин и оборудования путем упрочнения поверхностей ее рабочих элементов всегда была актуальной. На сегодня наиболее успешно эту задачу решают с применением плазменных технологий [1-4]. В данной работе приводим результаты некоторых исследований по обработке поверхностного слоя образцов из стали 65Г. Эта сталь является основным материалом таких рабочих органов почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин, как лемех плуга, диск сошника и стрелчатые лапы культиватора. В качестве воздействия на поверхность образцов были выбраны вибрационная электрическая искра и вибрационный дуговой разряд. Эти разряды кратко назовем виброплазменными. Такая технология позволит внедрение в структуру поверхностного слоя изделия целый перечень легирующих элементов твердосплавных материалов, науглероживание этого слоя и создание упрочненного слоя, состоящего из оксидов, карбидов, боридов и нитридов. Поэтому исследование технологического процесса упрочнения изделий с применением виброплазменного метода является насущной необходимостью.

Для обработки поверхностей образцов изделий использованы устройства для электроискрового легирования металлов по патенту РФ на изобретение № 2655420 и установка вибродугового упрочнения ВДГУ-2. В качестве стержней электродов выбраны омедненный графитовый пруток диаметром 8 мм, вольфрамово-кобальтовый пруток ВК6 диаметром 4 мм и электроды для сварки ОЗН-6 или ВСН-6.

Исследование спектральных характеристик рентгеновского излучения поверхностного слоя исходного образца показали, что в элементный состав материала входят всего 4 элемента: углерод, кремний, марганец и его основа – железо. По весовому соотношению элементов железу приходится 93,32 %, углероду – 5,60 %. Упрочняющих составляющих

исходный образец практически не имеет. Твердость поверхности по Бринеллю 260 МПа.

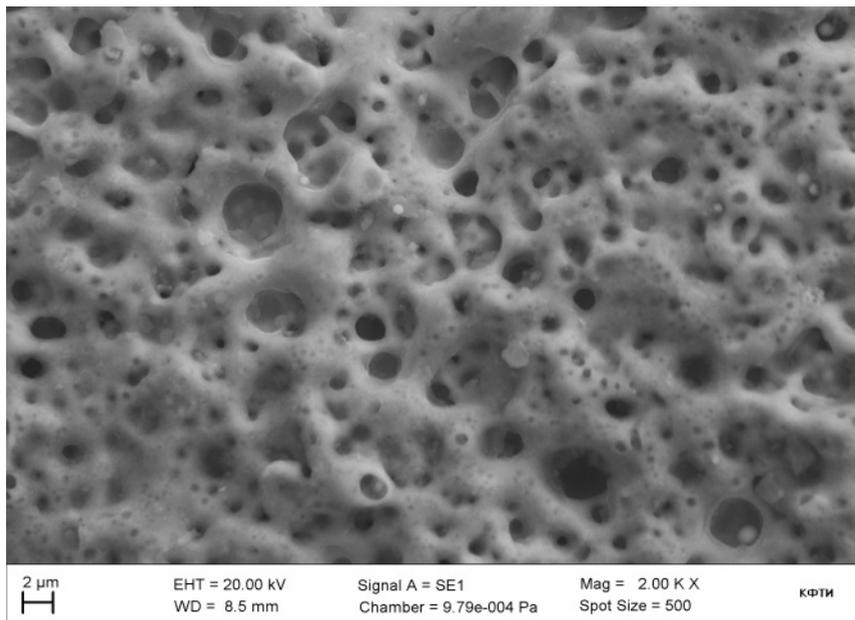
Электроискровая обработка при некоторых режимах позволяет повысить твердость поверхности материала более чем в 4,0 раза. Это означает, что электроискровая обработка повышает ресурс работы рабочих органов сельскохозяйственных машин также в 3,0 – 4,0 раза. Исходя из элементного состава, можно предположить, что это могут быть соединения (оксиды, карбиды) и сплавы железа, вольфрама и кобальта. Если обратить внимание на спектральную характеристику материала (Рисунок 1), то видно, что легируемые элементы проявляются при различных воздействиях энергии на поверхность. Это означает, что в упрочненном слое имеются не только элементы тугоплавких материалов, а он состоит еще из оксидов, карбидов, боридов и нитридов.



**Рисунок 1.** Спектр характеристического рентгеновского излучения поверхностного слоя характерной площади образца, упрочненного электроискровой обработкой вольфрамокобальтовым электродом

По принципу воздействия вибродуговая обработка похожа на электроискровую. Однако есть существенное различие. Во-первых, электрическая искра по времени воздействия составляет всего порядка нескольких десятков микросекунд, а вибродуга в 4,0 – 5,0 раз дольше. Во-вторых, вся энергия электрической искры выбрасывается сразу, а энергия вибродуги расходуется равномерно. Вследствие этого при электроискре в основном упрочняется более тонкий слой материала, нежели при вибродуге. Поэтому, эти методы отличаются и по эффективности. На рисунке 2 представлена фотография поверхности образца из диска сошника

с вибродуговой обработкой меднографитовым электродом. За счет такой обработки произошло науглероживание поверхностного слоя материала.



**Рисунок 2.** Фотография поверхности образца из диска сошника с вибродуговой обработкой. Твердость поверхности по Бринелю 950 МПа

Видно также, что в поверхностном слое подложки присутствуют частицы графита не участвующие в плазмохимическом процессе. Упрочненный слой имеет твердость в 3,0 раза больше твердости основы.

Были проведены эксперименты по упрочнению поверхностей легированием в поверхностный слой материала одновременно нескольких элементов. Электрод составлен из графитового стержня, вольфрамокобальтового и сварочного. Из элементного состава поверхностного слоя и спектральной характеристики было видно, что при такой обработке твердость поверхности изделия можно повысить более чем в 5,0 раз по сравнению с твердостью исходного материала.

Совместно со специалистами Наносцентра ФНАЦ ВИМ были изучены поперечные шлифы образца из стали 65Г с электроискровой и

вибродуговой обработкой. Полученные результаты в принципе согласуются с результатами исследований других авторов по электроискровому и вибродуговому разрядам. Поверхностный слой, сформированный при обработке детали виброплазмой, представляет собой новую композиционную структуру. Верхний тонкий слой состоит из материала анода, модифицированного элементами материала катода и межэлектродной среды. Под верхним слоем располагается модифицированный упрочненный слой, состоящий из смеси материалов анода и катода. Под ним располагается зона термического влияния, образованная в результате теплового воздействия. Ее структура отличается от структуры материала обрабатываемой детали строением и зернистостью.

Технология с применением виброплазменных разрядов позволяет производить комплексную обработку поверхности с внедрением в структуру поверхностного слоя изделия целый перечень легирующих элементов твердосплавных материалов, науглероживание этого слоя и создание упрочненного слоя, состоящего из оксидов, карбидов, боридов и нитридов. Появляется наноструктурированный упрочненный слой с оплавленной основой, перемешанным материалом электродов и продуктами твердосплавных соединений.

### **Литература:**

- [1] Черноиванов В.И. Организация и технология восстановления деталей машин / В.И. Черноиванов, В.П. Лялякин.– Москва: ФНАЦ ВИМ, 2022. – 284 с.
- [2] Соловьев С.А. Износостойкие композиционные покрытия для рабочих органов сельхозмашин / С.А. Соловьев, В.В. Иванайский, А.В. Ишков и др. – Москва: РАН, 2019. – 187 с.
- [3] Sharifullin S.N. Simulation of the Process of Electric Spark Hardening of the Surfaces of Machine Parts and Mechanisms /S.N. Sharifullin, M.M. Abzhaev , A.T. Bainiyazova //High Energy Chemistry. – 2023. – Vol. 57. – Suppl. 1. – Pp. 193 – 199.
- [4] Sharifullin S.N. Nanostructuring of the surface layer of the working bodies of agricultural machines with alloyed elements by the method of vibroplasma treatment /S.N. Sharifullin, V.A. Denisov, R.N. Zadorozhny, V.A. Zuevskiy, M.M. Abzhaev, A.T. Bainiyazova //International Journal of Nanotechnology.- 2021. – Vol. 18.- No. 9/10. -Pp. 903-914.

Saidchist@mail.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ТОНКОЙ НАСТРОЙКИ СИНТЕЗА ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МЕТОДОМ АЭРОЗОЛЬНОГО CVD

**Э. М. Хабушев<sup>1</sup>, Д. В. Красников<sup>1</sup>, Е. Е. Агафонова<sup>1</sup>, В. А. Кондрашов<sup>1</sup>, В. Я. Яковлев<sup>1</sup>, А. Г. Насибулин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Сколковский Институт науки и технологий, Москва, Россия*

Данная работа посвящена стратегии оптимального развития многопараметрического процесса синтеза однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ). Помимо общей обоснованности методов машинного обучения и достижимости ускоренной оптимизации процесса для заданных приложений, в работе обсуждаются внедрение технологий машинного обучения, особенности оптимального размера набора данных их условной плотности для метода химического осаждения из газовой фазы на поверхности аэрозольного катализатора [10.1016/j.carbon.2022.10.044]. Мы используем набор данных из 369 точек, включающий как входные параметры синтеза (количество катализатора, температура, скорость подачи источника углерода), так и соответствующие характеристики углеродных нанотрубок (выход, качество, структура, оптоэлектронные характеристики). В работе сравнивается эффективность использования шести методов машинного обучения. Показано, что искусственная нейронная сеть является наиболее подходящим подходом для прогнозирования результатов синтеза. Мы показываем, что даже набора данных из 250 точек с неоднородным распределением входных параметров достаточно для достижения приемлемой производительности искусственной нейронной сети, где ошибка, скорее всего, возникает из-за экспериментальной неточности и скрытых неконтролируемых переменных. Также в работе обсуждается возможность разработки автономной системы синтеза однослойных углеродных нанотрубок для произвольных задач (SMART реактор).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-73-10256.

d.krasnikov@skol.tech

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИОН-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ В ТЛЕЮЩИХ РАЗРЯДАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**С. И. Елисеев<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*ООО "Лаборатория им. В. А. Бурцева", Санкт-Петербург, Россия*

Эмиссия электронов поверхностями, контактирующими с плазмой, влияет на ее свойства множеством способов. Изучение механизмов эмиссии — тема исследований, охватывающая различные типы газовых разрядов и источников низкотемпературной плазмы [1]. Большие трудности в исследованиях этих процессов в условиях газовых разрядов объясняют постоянное внимание исследователей к новым экспериментальным и теоретическим методам их описания [2]. Отсутствие таких данных традиционно является узким местом численных моделей газовых разрядов, используемых как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях [3]. В работе сформулирована методика оценки эффективного значения коэффициента вторичной эмиссии на основе анализа вольт-амперных характеристик тлеющих разрядов постоянного тока с использованием теоретического моделирования. Представлен анализ потенциальных источников неопределенностей, возникающих из-за ошибок в экспериментальных данных, а также из модельных допущений и аппроксимаций. Методика продемонстрирована на примере имеющихся в литературе вольт-амперных характеристик тлеющих разрядов постоянного тока в аргоне с медными электродами. Значения, полученные для рассматриваемых данных, делятся на две четко различимые группы, близко соответствующие значениям для чистых и грязных поверхностей медных катодов.

### **Литература:**

- [1] Lafleur, T., Schulze, J., & Donkó, Z. (2019). Plasma Sources Science and Technology, 28(4), 040201.
- [2] Baragiola, R. A., & Riccardi, P. (2008) Reactive Sputter Deposition, 43-60.
- [3] Phelps, A. V. (2001). Plasma Sources Science and Technology, 10(2), 329.  
step.eliseev@yandex.ru

## О ТОЧНОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ПУАССОНА-БОЛЬЦМАНА И ПУАССОНА-ФЕРМИ-ДИРАКА

**И. И. Файрушин<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Пылевая плазма с сильно асимметричным межкомпонентным распределением зарядов и как следствие нелинейным экранированием электрических полей является предметом многих исследований [1-3]. Здесь следует отметить работы И. Л. Иосилевского и И. А. Мартыновой [1-2], в которых развито теоретическое описание особенностей термодинамики фазовых переходов в такой плазме. В настоящей работе предлагается метод локальной линеаризации для приближенного аналитического решения нелинейного уравнения Пуассона-Больцмана (УПБ) в сферически симметричной постановке применительно к термоэмиссионной пылевой плазме. Выявлено, что данный метод позволяет с помощью простых аналитических соотношений описывать распределение потенциала электрического поля вокруг пылевой частицы (макроиона) в режиме нелинейного экранирования. Установлены значения входных параметров для данного подхода, которые обеспечивают наилучшее согласие с результатами численного решения нелинейного УПБ. Показано, что разработанный метод применим также и к решению нелинейного уравнения Пуассона-Ферми-Дирака.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

### **Литература:**

[1] Martynova I.A., Iosilevskiy I.L. Non-linear Screening and Phase States of a Complex Plasma // Contrib. Plasma Phys. 2018. V. 58. № 2–3. P. 203.

[2] Мартынова И.А., Иосилевский И.Л. О сдвиге границ термодинамической неустойчивости асимметричной комплексной плазмы с учетом эффекта нелинейного экранирования // ТВТ. 2021. Т. 59. № 6. С. 817.

[3] Bystrenko O., Zagorodny A. Critical Effects in Screening of High-Z Impurities in Plasmas // Phys. Lett. A. 1999. V. 255. P. 325.  
fairushin\_ilnaz@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГАЗОВ НА ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА В МИКРОВОЛНОВОМ РАЗРЯДЕ В ЖИДКОМ УГЛЕВОДОРОДЕ

**Т. С. Батукаев<sup>1</sup>, И. В. Билера<sup>1</sup>, Г. В. Крашевская<sup>1, 2</sup>, Ю. А. Лебедев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

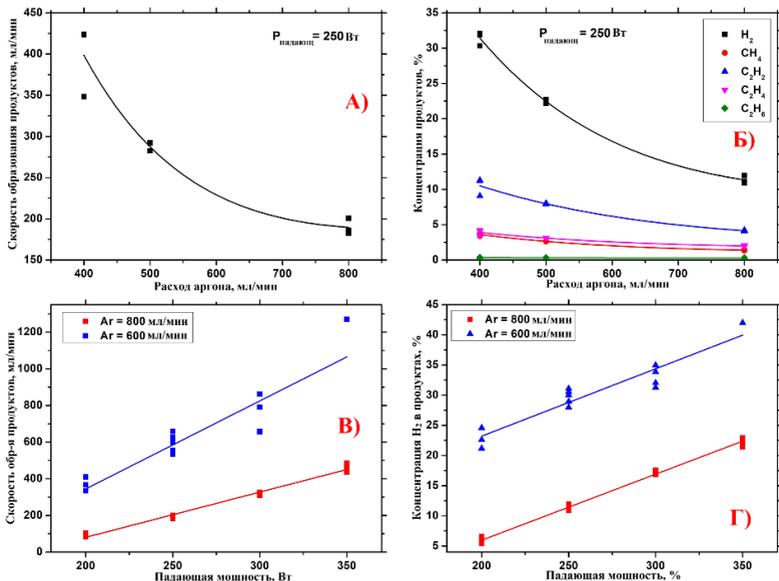
В последнее время растет интерес к производству водорода и водородосодержащих газов. Ожидается, что водород станет безопасным и доступным источником энергии для устойчивого развития с точки зрения загрязнения воздуха, энергетической безопасности и изменения климата. Ответ на вопрос, сможет ли водород удовлетворить мировые потребности в качестве энергоносителя, не столь очевиден. Подробно эта проблема рассмотрена в [1] и обоснован вывод о том, что на начальном этапе развития водородной энергетики наиболее реальным способом решения сложных проблем транспортировки и хранения водорода является его рассредоточенное малотоннажное производство непосредственно на предприятиях места потребления.

Большое внимание уделяется проблеме получения водорода с использованием низкотемпературной плазмы в газовых средах, содержащих углеводороды или пары спирта, особое место среди плазменных методов занимает СВЧ-разряд в жидких углеводородах и спиртовых растворах. Разряд нестационарен и плазмохимические процессы происходят в газовом пузыре, расположенном внутри жидкости на конце СВЧ-антенны.

Основной целью работы было определение возможностей управления химической активностью получения водорода в микроволновом разряде в жидких углеводородах с использованием различных барботирующих газов (Ar, He, CO<sub>2</sub>). Критерием изменения химической активности являлось изменение выхода различных компонентов газовой смеси на выходе из реактора. Использование газовых добавок даст дополнительную информацию и позволит лучше понять физику процессов в СВЧ разряде в

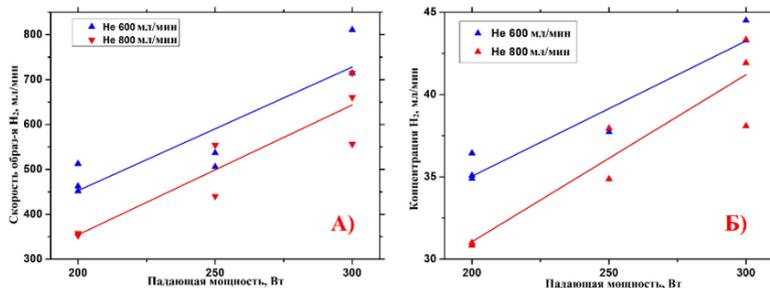
жидкости. Экспериментальная установка, используемая для генерации и исследования СВЧ-разряда в жидких углеводородах, подробно описана в [1, 2].

Были получены зависимости скоростей образования продуктов и концентрации продуктов от расхода аргона, на рис. 1 а, б показано изменение общего расхода газа и концентрации продукта на выходе из реактора при изменении скорости подачи аргона. Из полученных экспериментальных результатов следует вывод о том, что при добавлении аргона определяющим фактором, влияющим на выход продукта, является разбавление паров углеводородов аргоном, и увеличение частоты появления пузырьков газа не может компенсировать этот эффект. Увеличение падающей мощности приводит к увеличению выхода продукта (рис. 1 в, г).



**Рисунок 1.** А) Общий расход газа на выходе из реактора и Б) концентрации продуктов в зависимости от расхода аргона, В) скорость образования всех газовых продуктов и Г) концентрация водорода в продуктах от падающей мощности при барботировании аргона.

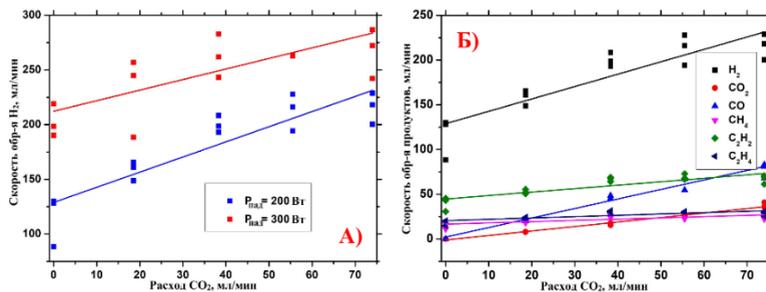
Для определения роли столкновений молекул углеводородов с атомами благородных газов в метастабильных состояниях в процессах в СВЧ-разряде в «Нефрасе» были проведены эксперименты с барботажем гелия через зону разряда и проведено сравнение результатов с представленными для барботажа аргоном.



**Рисунок 2.** А) Зависимость выхода водорода от падающей мощности при барботировании гелием. Б) Зависимость концентрации водорода в продуктах от падающей мощности при барботировании гелием.

Сравнение результатов, представленных на рис. 2 с полученными при аргоновом барботаже показывает, что при аргоновом и гелиевом барботаже состав основных продуктов одинаков; однако при барботаже гелием концентрация и выход водорода выше, чем при барботаже аргоном. Полученный результат указывает на роль столкновений молекул углеводородов с метастабильными атомами благородных газов, потенциал возбуждения атомов гелия выше, чем у атомов аргона.

Добавление  $CO_2$  в СВЧ-разряд в жидком Нефрасе исследовалось ранее в связи с поиском путей решения экологической проблемы разложения углекислого газа [3]. Было показано, что этот способ может быть полезен, поскольку, помимо разложения углекислого газа, он позволяет получать синтез-газ, необходимый в различных химических синтезах. В работе было исследовано влияние добавки углекислого газа на процесс образования водорода в микроволновом разряде в жидких углеводородах и причины этого влияния. Разряд загорелся в нефрасе с барботажем смеси газов – аргона (600 мл/мин) и  $CO_2$ . Результаты хроматографического анализа продуктов представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3.** А) Зависимость скорости образования водорода от расхода CO<sub>2</sub> при двух значениях падающей мощности и Б) скорости образования продуктов газовой фазы в зависимости от расхода CO<sub>2</sub> при падающей мощности 200 Вт.

Видно, что добавление CO<sub>2</sub> увеличивает выходы всех газовых продуктов разряда. Причины такого влияния неочевидны и могут быть обусловлены раздельным и совместным влиянием нескольких факторов. Одна из причин может быть связана с изменением кинетики плазменных процессов при добавлении CO<sub>2</sub>. Другой причиной может быть влияние добавки CO<sub>2</sub> на параметры и структуру разряда.

Представленные результаты по физическим и химическим свойствам СВЧ-разряда в жидких углеводородах могут быть полезны при определении перспектив использования этого типа разряда в различных прикладных задачах.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИНХС РАН.

### Литература:

- [1] Lebedev Yu. A. et al. Light emission from microwave discharges in liquid hydrocarbons at the initial stages of their development //Plasma Processes and Polymers. - 2021. – Т. 18. - № 10. – С. 2100051.
- [2] Lebedev Yu. A. et al. Time resolved study of ignition of microwave discharge in liquid hydrocarbons //Plasma Processes and Polymers. -2022. – Т. 19. - № 5. – С. e2100215.
- [3] Batukaev T.S. et al. CO<sub>2</sub> Decomposition in Microwave Discharge Created in Liquid Hydrocarbon //Plasma. – 2023. – Т. 6. С. 115–126.  
batukaevtimur95@gmail.com

## О СТРУКТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МОНО- И БИНАРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОКЛЕТОК

**Д.Н. Соколов<sup>1</sup>, Н.Ю. Сдобняков<sup>1</sup>, О.В. Полев<sup>1</sup>, В.С. Мясниченко<sup>1</sup>, К.Г. Савина<sup>1</sup>**

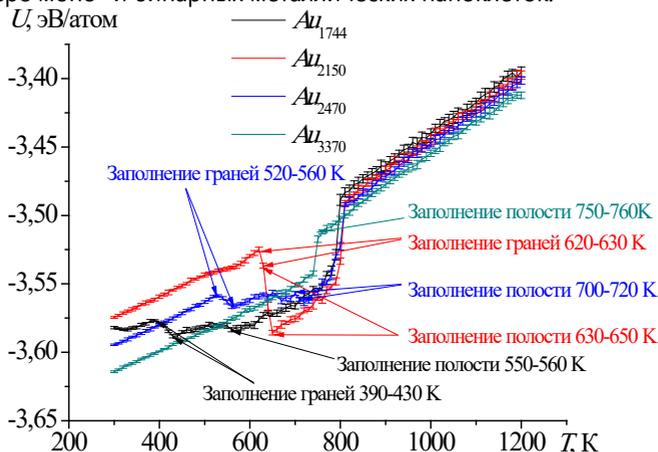
*<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» 170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35*

Многообразие свойств моно- и бинарных структур заставляет исследователей исследовать новые объекты. В последнее время большой интерес проявляется к наночастицам, однако остаётся проблема стабильности формы и структуры. Компьютерное моделирование позволяет оценить стабильность формы и структуры, тем самым решая данную проблему. Известно, что среди наноструктур наибольший интерес представляют те, что состоят из благородных металлов. В первую очередь из-за их уникальных свойств и различных возможностей применения. Подбирая состав, размер, форму, наличие искусственных дефектов, в том числе пористость структуры можно менять некоторые свойства подобных наноструктурированных материалов из благородных металлов, тем самым значительно улучшая их эксплуатационные характеристики.

Целью данной работы является исследование изменения в структуре и оценка ее стабильности моно- и бинарных наноклеток, состоящих из атомов золота и серебра, при термическом воздействии. Объектами исследования были выбраны наноклетки, состоящие из атомов Au и Ag различных размеров и составов, которые представляют собой полые (пористые) наночастицы, с отверстиями на гранях. Для проведения компьютерного моделирования нами была использована ПО Metropolis [1], в которой реализован атомистический метод Монте-Карло – алгоритм Метрополиса [2]. Взаимодействие между атомами описывалось потенциалом сильной связи [3]. Перед запуском серий компьютерных экспериментов начальные конфигурации наноклеток подвергались процедуре минимизации энергии методом Монте-Карло. Причём для случая смешанного состава, минимизация также проводилась с помощью обмена атомов различных сортов. Для получения калорических зависимостей удельной потенциальной части внутренней энергии, производился нагрев наноклеток от температуры 300 К до 1200 К с шагом 10 К. В каждой пробной серии расчётов количество шагов МК увеличивалось в 10 раз. После проведения серийных расчётов были

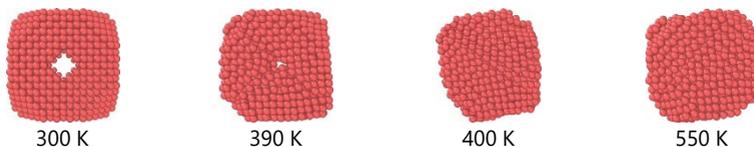
подобраны следующие параметры:  $10^8$  – общее количество шагов,  $9 \cdot 10^7$  – количество шагов для релаксации системы, оставшиеся  $10^7$  – количество шагов, на которых происходило усреднение параметров системы.

В работе были получены зависимости потенциальной части внутренней энергии моно- и бинарных наноклеток (см. рис. 1). Различные участки этих кривых были сопоставлены с процессами, происходящими в исследуемых конфигурациях. Например, процесс заполнения («залечивания») атомами отверстий граней сопровождался понижением удельной потенциальной энергии. Для некоторых наноклеток это понижение происходило скачком, а для других этот процесс происходил в более широком температурном диапазоне. По всей видимости, увеличение ширины температурной области связано с большим количеством отверстий, при этом их заполнение происходило не одновременно, а постепенно. Представленные на рис. 1 подписи позволяют отследить температурные области, в которые происходит разрушение полостей (пор). Процесс заполнения для граней, как правило, происходит в более широком температурном интервале. Это может быть связано с меньшей скоростью перемешивания атомов в процессе сегрегации и диффузии, в то время как для заполнения (коллапса) как правило хватает температурного интервала в 10 К. Далее на рис. 2-4 показаны примеры эволюция атомной структуры на примере моно- и бинарных металлических наноклеток.

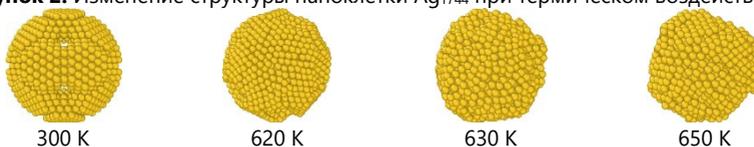


**Рисунок 1.** Калорические зависимости удельной потенциальной части внутренней энергии наноклеток Au. Здесь и далее указана погрешность оценки энергии.

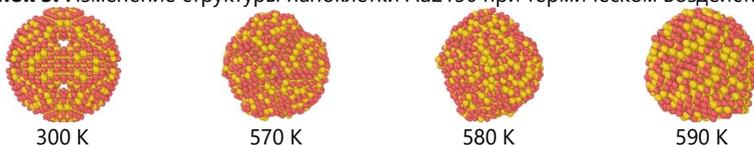
Очевидно, что при комнатной температуре, а также в диапазоне температур соответствующему, например биологическим объектам, структура металлических наноклеток не должна существенным образом изменяться, т.е. моно- и бинарные металлические наноклетки могут быть стабильными и использоваться в качестве рабочих элементов в соответствующих направлениях нанотехнологий.



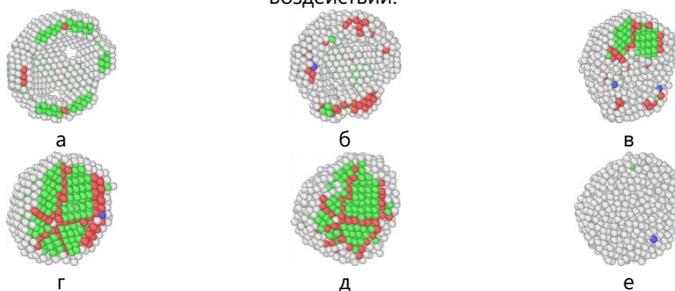
**Рисунок 2.** Изменение структуры наноклетки  $\text{Ag}_{1744}$  при термическом воздействии.



**Рисунок 3.** Изменение структуры наноклетки  $\text{Au}_{2150}$  при термическом воздействии.



**Рисунок 4.** Изменение структуры наноклетки  $\text{Au}_{1075}@\text{Ag}_{1075}$  при термическом воздействии.



**Рисунок 5.** Пример коллапса формы наноклетки и структурных превращений в системе  $\text{Au}_{1685}\text{-Ag}_{1685}$ : а – начальная конфигурация при  $T=300$  К, б – «залечивание» периферийных стенок при  $T=570$  К, в – «залечивание» внутренней полости наноклетки при  $T=580$  К, г – завершение процесса формирования внутренней структуры наночастицы при  $T=590$  К, д – начало плавления квазикристаллической структуры при  $T=840$  К, е – жидкая структура наночастицы при  $T=850$  К.

Отметим также, что интерес представляет изменение структуры наноклетки в процессе термического воздействия, а также изменение структуры наночастицы после коллапса наноклетки еще до температуры плавления. Как проиллюстрировано на рис. 5, в процессе коллапса в наночастице восстанавливаются внутренние связи и до температуры плавления кристаллические локальные фазы могут быть идентифицированы. Для определения фаз использовалось ПО Ovito [4]. При этом наблюдается структурная сегрегация, которая была нами предсказана еще для монометаллических наночастиц [5] и экспериментально наблюдалась в работе [6].

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006).

#### **Литература:**

- [1] Свидетельство № 2019661915 Российская Федерация. Metropolis / Д.Н. Соколов, Н.Ю. Сдобняков, А.Ю. Колосов, П.М. Ершов, С.С. Богданов; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет». – № 2019660847; заявл. 30.08.2019; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11.09.2019. – 1 с.
- [2] Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo method // Journal of the American Statistical Association. 1949. V. 44. I. 247. P. 335-341.
- [3] Cleri F., Rosato V. Tight binding potentials for transition metals and alloys // Physical Review B. 1993. V. 48. I. 1. P. 22-33.
- [4] Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO – the open visualization tool // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2010. V. 18. I. 1. P. 015012-1-015012-7.
- [5] Сдобняков Н.Ю., Соколов Д.Н. Изучение термодинамических и структурных характеристик наночастиц металлов в процессах плавления и кристаллизации: теория и компьютерное моделирование: монография. Тверь: Тверской государственный университет, 2018. 176 с.
- [6] Perevezentsev V.N. The theory of evolution of the microstructure of superplastic alloys and ceramics // In: Superplasticity. 60 years after Pearson: proceedings of the conference organized on behalf of the Superplastic Forming Committee of the Manufacturing Division of the Institute of Materials and Held at the University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), 7-8 December 1994; ed. by N. Ridley. London: CRC Press, 1995. P. 51-59.  
olvalpolev@gmail.com

## НАНОМАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПЛАЗМОЙ В ЖИДКОСТИ: ПРИМЕНЕНИЕ В ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКАХ ТОКА

**Е. В. Белецкий<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Сегодня литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) стали ключевым средством для удовлетворения растущего спроса на энергию, в связи с чем активно разрабатываются современные устройства хранения энергии [1]. ЛИА выделяются среди других благодаря использованию электродных материалов с повышенной обратимой емкостью, обеспечивающих низкий саморазряд, высокое рабочее напряжение, отличную плотность энергии и длительный срок службы [2]. С увеличением требований к устройствам хранения энергии становится ясной необходимость в более энергоемких электродных материалах для достижения высокой плотности энергии.

Достижение необходимых энергетических характеристик новых электродных материалов часто требует сложных синтетических подходов и использование дорогостоящих реагентов. Это может включать переход от одностадийного к многостадийному процессу, усложнение процедур очистки, низкие выходы продукта и необходимость контроля множества влияющих параметров. Хотя эти методы могут обеспечить высокие энергетические характеристики материалов в лабораторных условиях, их применение в крупномасштабном производстве усложняется из-за потребности в крупных реакторах, что приводит к увеличению стоимости продуктов.

Уникальные свойства плазмы в контакте с жидкостями привлекают исследователей в сфере синтеза наноматериалов. Нетепловая плазма обладает преимуществами при создании и модификации электродных материалов, так как она обеспечивает высокую химическую реакционную способность частиц при комнатной температуре и минимальное тепловое воздействие, сохраняя структуру синтезируемого материала [3].

Синтез на границе плазмы и жидкости обеспечивает отсутствие необходимости в сложных химических реагентах, экологически чистые отходы, простоту экспериментов и получение продуктов с уникальными

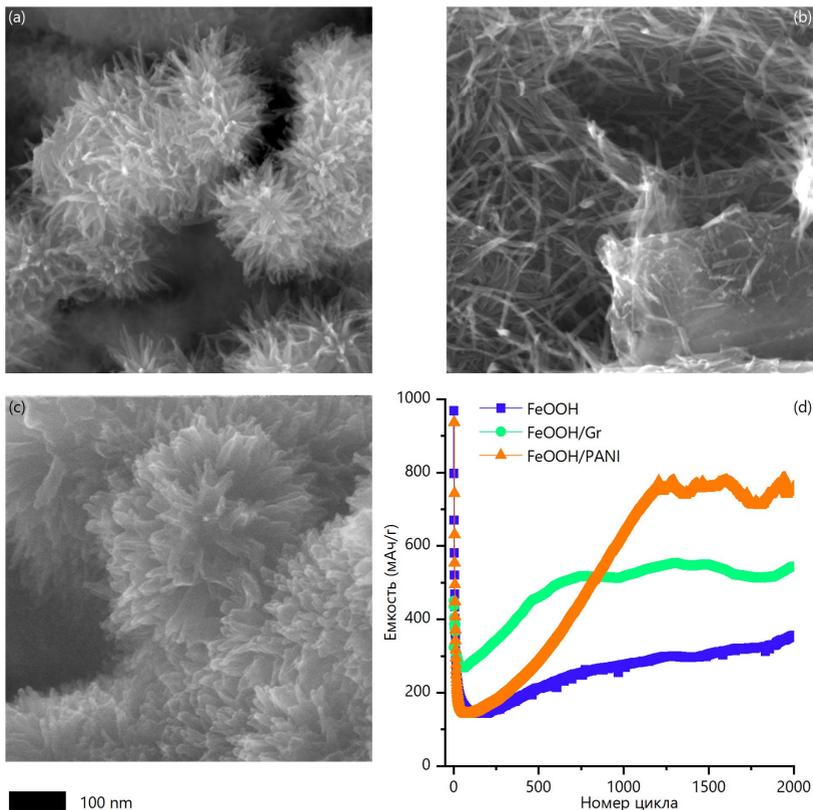
свойствами [4]. В сравнении с традиционными методами синтеза, плазмозлектрохимический синтез позволяет получить готовую дисперсию целевого продукта, избегая этапа удаления, измельчения и очистки. Кроме того, он открывает возможность для проведения электрохимических и химических реакций, недоступных при использовании традиционных методов синтеза [5].

На кафедре электрохимии СПбГУ с использованием плазмы в жидкости были синтезированы и протестированы наноматериалы для химических источников тока. В рамках исследования [6] были получены метагидроксид железа ( $\text{FeOOH}$ ) и его композиты с графитом ( $\text{FeOOH/Gr}$ ) и полианилином ( $\text{FeOOH/PANI}$ ). На микрофотографии  $\text{FeOOH}$  (Рисунок 1 (а)) видна ежеподобная форма частиц с размерами 100-300 нм и их агломератами до 1300 нм. В композите  $\text{FeOOH/Gr}$  (Рисунок 1 (b)) частицы  $\text{FeOOH}$  образуют сетку на поверхности графита, В композите  $\text{FeOOH/PANI}$  сохраняется ежеподобная форма частиц, однако на поверхности находится полианалин (Рисунок 1 (c)). Частицы в 500-600 нм собраны в агломераты до 1300 нм.

Электрохимические характеристики  $\text{FeOOH}$ ,  $\text{FeOOH/Gr}$  и  $\text{FeOOH/PANI}$  представлены на Рисунке 1 (d). Происходит прорабатывание материала в течение первых 500 циклов, что увеличивает разрядную емкость из-за электрохимического перемалывания частиц  $\text{FeOOH}$  [6]. Затем разрядная емкость стабилизируется на максимальном значении для каждого материала, увеличиваясь в порядке:  $\text{FeOOH}$  –  $\text{FeOOH/Gr}$  –  $\text{FeOOH/PANI}$ . Это связано с увеличением электрической проводимости материала, составляющей около  $10^{-10}$  См/см для  $\text{FeOOH}$ ,  $10^{-9}$  См/см для  $\text{FeOOH/Gr}$  и  $10^{-5}$  См/см для  $\text{FeOOH/PANI}$ .

Нами в работе [7] исследовано применение электрических разрядов в воде для очистки отработанных графитовых анодов литий-ионных аккумуляторов. Эффективность обработки водной дисперсии графита анодной плазмой оценивалась в зависимости от времени. Микрофотографии показали полное удаление продуктов загрязнения графита после 30 минут обработки. Электрохимические тесты материалов с разной продолжительностью обработки показали, что увеличение времени до 15 минут приводит к повышению стабильности и емкости, а дополнительные 15 минут обработки еще более улучшают результаты. Однако, увеличение времени до 60 минут не приводит к дополнительному росту характеристик. Исследование подтверждает, что электрические разряды в плазме эффективно применимы

для переработки отработанных литий-ионных аккумуляторов, и оптимальное время обработки составляет 30 минут.



**Рисунок 1.** Микрофотографии FeOOH (a), FeOOH/Gr (b), FeOOH/PANI (c) и их электрохимические характеристики на протяжении 2000 циклов заряда-разряда током 1,2 А/г (с)

Таким образом, плазма в контакте с жидкостью представляет уникальные возможности по синтезу новых материалов, которые могут быть эффективно использованы в химических источниках тока. Поэтому следует расширять сферу применения плазмы в контакте с жидкостью к тем материалам химических источников тока, которые на сегодняшний день получают химически или электрохимически.

### Литература:

- [1] Li G, Li Y, Chen J, Zhao P, Li D, Dong Y, et al. Synthesis and Research of Egg shell-yolk NiO/C porous composites as Lithium-ion Battery Anode Material. *Electrochim Acta* 2017;245:941–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.06.039>.
- [2] Wu F, Maier J, Yu Y. Guidelines and trends for next-generation rechargeable lithium and lithium-ion batteries. *Chem Soc Rev* 2020;49:1569–614. <https://doi.org/10.1039/C7CS00863E>.
- [3] Ouyang B, Zhang Y, Xia X, Rawat RS, Fan HJ. A brief review on plasma for synthesis and processing of electrode materials. *Mater Today Nano* 2018;3:28–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2018.11.002>.
- [4] Koo IG, Lee MS, Shim JH, Ahn JH, Lee WM. Platinum nanoparticles prepared by a plasma-chemical reduction method. *J Mater Chem* 2005;15:4125–8. <https://doi.org/10.1039/B508420B>.
- [5] Jang HJ, Jung EY, Parsons T, Tae H-S, Park C-S. A Review of Plasma Synthesis Methods for Polymer Films and Nanoparticles under Atmospheric Pressure Conditions. *Polymers (Basel)* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/polym13142267>.
- [6] Beletskii E V, Kamenskii MA, Alekseeva E V, Volkov AI, Lukyanov DA, Anishchenko D V, et al. One-step atmospheric plasma-assisted synthesis of FeOOH and FeOOH/graphite high performance anode materials for lithium-ion batteries. *Appl Surf Sci* 2022;597:153698. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153698>.
- [7] Beletskii E V, Pakalnis V V, Lukyanov DA, Anishchenko D V, Volkov AI, Levin O V. Recycling spent graphite anodes into a graphite/graphene oxide composite via plasma solution treatment for reuse in lithium-ion batteries. *J Environ Chem Eng* 2023;11:109234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109234>.

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского Государственного Университета (проект 101746882, Практико-ориентированный подход к созданию аккумуляторов на основе органических материалов).

st803431@spbu.ru

## ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ КАК МЕТОД СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С ОКСИДОМ ГРАФЕНА

**Ю. В. Иони<sup>1, 2</sup>, И. Е. Рассказов<sup>1, 3</sup>, Е. И. Ефремова<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>ИОНХ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>РТУ МИРЭА, Москва, Россия

<sup>3</sup>НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Газотермическое напыление – это широко используемая в промышленности технология модификации поверхности, которая работает с разнообразным спектром твердых материалов различной природы [1]. Основной областью применения является создание функциональных покрытий различного типа (антикоррозионных, тепло- и износостойких, электропроводящих, и др.). Газопламенное напыление является одним из наиболее распространенных видов газотермического нанесения покрытий. Оно представляет собой процесс высокотемпературного нагрева используемого материала в пламени системы кислород-горючий газ до состояния расплава с дальнейшим перенесением на подложку под действием сжатого воздуха для создания функционального покрытия.

Современные технологии позволяют использовать нанокремниевые структуры, такие как графен, нанотрубки и др. для получения функциональных материалов с заданными свойствами [2]. Например, графен, как вещество с аномально высокой прочностью и теплопроводностью вводят в различных количествах при создании суперсплавов с целью улучшения механических характеристик. Также к наиболее часто используемым производным графена относится оксид графена (ОГ), который ранее рассматривали только как основной источник для синтеза графена химическим или термическим восстановлением. Оксид графена представляет собой графеновый монослой, поверхность которого покрыта большим количеством кислородсодержащих функциональных групп (карбоксильных, карбонильных, гидроксильных и эпоксидных) и адсорбированными молекулами воды. В водной дисперсии оксид графена существует практически только в форме монослоев, но после высушивания до состояния порошка и пленки является уже многослойной структурой, которая имеет терминологическое название оксид графита [3]. Оксид графита состоит из большого числа листов оксида графена, которые под действием УЗ и/или дисперсной среды вновь легко расслаиваются до монослойного состояния.

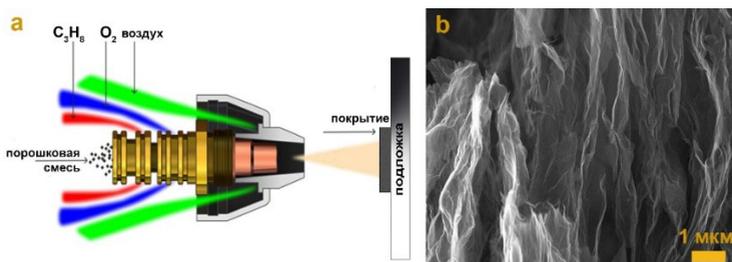
Метод газопламенного напыления предполагает высокотемпературное распыление металлсодержащих порошков на поверхность подложки. В данной

работе для создания наноструктурированных покрытий использовали смесь оксида графита и металлических порошков различного состава. Формирование покрытий осуществляли при использовании установки газопламенного напыления МРК 10 (Россия), работающей на смеси пропан/кислород – воздух при следующих параметрах: давление воздуха 1,8 атм., давление пропана (входящее) – 2 атм., давление кислорода (входящее) – 3,5 атм.; дистанцию напыления варьировали от 160 до 180 мм. Температуру подложки контролировали при помощи пирометра для предотвращения перегрева. В ходе напыления смесь ОГ с металлосодержащими порошками с высокой скоростью проходила через пламя газовой горелки и нагревалась до температуры пластичного состояния металлов (Рис. 1). При этом ранее было уже показано, что при использовании монокомпонентного порошка ОГ с фракцией 150-200 мкм в качестве исходного материала не происходит ни существенного изменения структуры ОГ, ни выгорания [4]. Сверхбыстрая обработка оксида графита в газовом пламене приводит к удалению адсорбированных и внутрикластерных молекул воды с образованием наноразмерных пор (3.5-6.0 нм). Таким образом площадь поверхности ОГ сильно увеличивается: вплоть до 27 раз.

ОГ смешивали с металлосодержащими порошками таким образом, чтобы его количество составляло 12,5-33,3% об. В качестве основы использовали порошки на основе никеля NiAlMo (фракция 45-125 мкм) и керамические микросферы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20-80 мкм). Механическую смесь порошков напыляли струей газового пламени на поверхность металлических пластин из стали Ст3. Полученные образцы представляли собой серые матовые покрытия с черными включениями ОГ, толщина покрытия составляла 200-300 мкм.

Наличие ОГ в образцах подтверждали при помощи метода Раман-спектроскопии. Это широко используемый метод для оценки морфологии, состава или электронной структуры графеновых материалов. Измерения осуществляли на портативном Раман-спектрометре “Инспектр” R532 (Россия), встроенном в микроскоп Olympus CX-41 (Япония) без разрушения образца покрытия. ОГ характеризуется наличием сильно уширенных D- (~1355 см<sup>-1</sup>) и G- (~1605 см<sup>-1</sup>) мод, которые присутствуют и совпадают во всех образцах полученных покрытий. D-полоса отображает степень разупорядоченности кристаллической структуры и деформации графеновой решетки. G-полоса характерна для спектров всех углеродных структур, содержащих sp<sup>2</sup>-связи и обусловлена колебаниями атомов углерода в плоскости графеновой решетки. Раман-спектры ОГ в составе полученных методом газопламенного напыления покрытий полностью идентичны спектрам исходного порошка. При этом стоит отметить их меньшую интенсивностью, что, вероятно, связано с частичным выгоранием ОГ в процессе прохождения газового пламени.

Структуру полученных покрытий также исследовали при использовании сканирующей электронной микроскопии. ОГ при прохождении газового пламени, не смотря на разницу в плотности, за счет слоистой структуры смешивается с расплавленными металлическими частицами и одновременно с ними оседает на поверхность подложки. При этом не происходит разрушения кристаллической структуры ОГ или образования фазы карбида металла. Частицы ОГ при напылении формируются на всей площади образцы покрытия с высокой степенью дисперсности без образования агрегатов.



**Рисунок 1.** Схема процесса газопламенного напыления покрытий (слева); структура ОГ, прошедшего сквозь газовое пламя (справа)

Таким образом, показано, что метод газопламенного напыления может использоваться для создания функциональных покрытий на основе металлсодержащих порошков и оксида графена. Свойства получаемых покрытий находятся в зависимости от типа металлсодержащих порошков, вводимых в смесь.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 22-19-00110).

#### **Литература:**

- [1] D. Tejero-Martin, M. Rezvani Rad, A. McDonald, et al. Beyond Traditional Coatings: A Review on Thermal-Sprayed Functional and Smart Coatings. *J Therm Spray Tech.* 28, 598–644 (2019).
- [2] Z. Chen, P. Wei, S. Zhang, et. al. Graphene reinforced nickel-based superalloy composites fabricated by additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A.* 769, 138484 (2020).
- [3] ISO/TS80004-13:2017 Nanotechnologies—Vocabulary—Part 13: Graphene and related two-dimensional (2D) materials.
- [4] Ioni Y., Popova A., Maksimov S., Kozerozhets I. Ni Nanoparticles on the Reduced Graphene Oxide Surface Synthesized in Supercritical Isopropanol. *Nanomaterials.* 13, 2923 (2023).

[Acidladji@mail.ru](mailto:Acidladji@mail.ru)

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОКИСЛЕНИЕ БЕНЗОЛА И ТОЛУОЛА В ПЛАЗМЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

**А. В. Лещик<sup>1</sup>, А. Н. Очерedyкo<sup>1</sup>, А. Ю. Рябов<sup>1</sup>, Т. В. Петренко<sup>1</sup>, С. В. Кудряшов<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Институт Химии Нефти СО РАН, Томск, Россия*

На сегодняшний день существует большая потребность в разработке эффективных и экологически безопасных методов нефтехимического производства, удовлетворяющих принципам рационального природопользования и «зелёной» химии. Среди альтернативных методов синтеза фенолов можно отметить прямое окисление бензола и толуола каталитическими методами, плазмохимическими методами в присутствии катализаторов, а также плазмохимическими методами в плазме барьерного разряда (БР). Плазмохимическое окисление ароматических углеводородов [1] имеет ряд преимуществ, и является перспективным направлением синтеза органических веществ, поверхностно-активных веществ, и полимеров.

В работе приведен сравнительный анализ результатов по влиянию температуры стенок реактора на одностадийную окислительную конверсию бензола и толуола в БР.

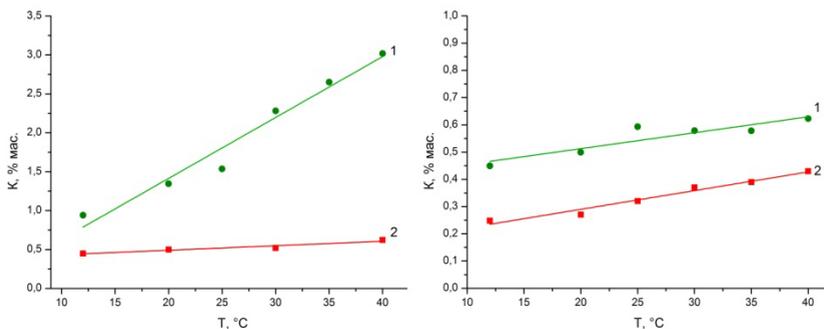
Толуол окисляли кислородом и воздухом в плазмохимическом реакторе с БР. Подробная схема установки представлена в работе [2]. Температуру стенок плазмохимического реактора контролировали термостатом и варьировали от 12 до 40 °С. Объемные скорости потока составили 60 мл/мин для окислительного газа и 0,3 мл/мин для толуола. Время пребывания исходной парогазовой смеси в реакторе 10,5 с. Конверсия толуола приведена за один проход парогазовой смеси через разрядную зону реактора.

Разряд зажигался высоковольтными импульсами напряжения амплитудой не выше 10 кВ, частота повторения импульсов равнялась 400 Гц. Активная мощность разряда рассчитывалась по методике, приведённой в [3], и равнялась 1,8 Вт.

Состав продуктов окисления толуола в барьерном разряде исследовали методом газовой хроматографии (хроматограф Agilent HP 6890 с пламенно-ионизационным детектором). Конверсию исходного углеводорода, селективность образования продуктов окисления в

послереакционной смеси (долю продукта в смеси), оценивали на основе массы идентифицированных продуктов окисления.

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости, иллюстрирующие влияние температуры стенок реактора на процесс окисления толуола (кривая 1) кислородом (рис. 1. а) и воздухом (рис. 1 б) в реакторе с барьерным разрядом. Рисунки для наглядности дополнены соответствующими данными по окислению бензола (кривая 2) в БР в идентичных условиях [2].

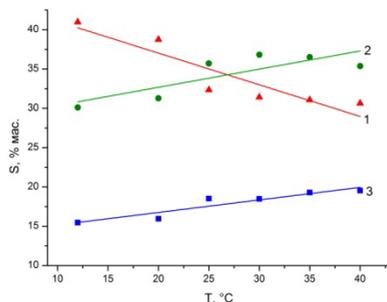


**Рисунок 1.** Конверсия толуола (1) и бензола (2) при различной температуре стенок реактора. а) окисление кислородом, б) окисление воздухом

В исследованном температурном диапазоне конверсия толуола при окислении кислородом увеличивается с 1 до 3% мас. (рис. 1), что сопровождается снижением энергозатрат на его превращение с 14 до 6 кВт·ч/кг. При окислении воздухом конверсия толуола ниже, чем в случае кислорода, а ее увеличение с ростом температуры стенок реактора выражено менее заметно (с 0,4 до 0,6% мас.), энергозатраты при этом снижаются с 17 до 9,5 кВт·ч/кг.

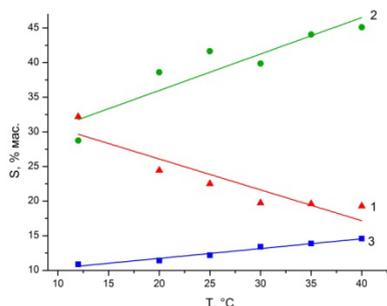
Конверсия бензола при окислении кислородом тоже увеличивается с 0,2 до 0,4% мас. (рис. 1), что соответствует энергозатратам 45 и 27 кВт·ч/кг. В случае воздуха в указанном интервале температур конверсия бензола возрастает с 0,4 до 0,5% мас. (рис. 1), что соответствует энергозатратам 28 и 23 кВт·ч/кг.

Среди продуктов окисления толуола идентифицированы в основном бензойный альдегид, бензиловый спирт, и различные крезолы. Зависимость селективности их образования от температуры стенок реактора приведена на рис. 2, 3.



**Рисунок 2.** Селективность образования продуктов окисления толуола воздухом в БР при различной температуре стенок реактора: бензойный альдегид (1), различные крезолы (2), бензиловый спирт (3)

При увеличении температуры стенок реактора в экспериментах по окислению толуола воздухом увеличивается содержание бензилового спирта (с 15,9 до 19,5% мас.), и крезолов (с 30 до 37% мас.), при этом снижается содержание бензойного альдегида с 41 до 30,6% мас.



**Рисунок 3.** Селективность образования продуктов окисления толуола кислородом в БР при различной температуре стенок реактора: бензойный альдегид (1), различные крезолы (2), бензиловый спирт (3)

При окислении толуола в среде кислорода при увеличении температуры стенок реактора тенденции по увеличению содержания бензилового спирта (с 10,9 до 15% мас.), крезолов (с 28 до 44% мас.), и уменьшению содержания бензилового альдегида (с 24,5 до 19% мас.) сохраняются.

При окислении бензола как кислородом, так и воздухом в БР основным продуктом окисления является фенол. Селективность его образования достигает 72,8 и 77,3% мас. в случае кислорода и воздуха, соответственно. Также обнаружены двухатомные фенолы, в основном – гидрохинон, селективность его образования составляет 3,3 и 2,5% мас. для экспериментов по окислению бензола кислородом и воздухом, соответственно. При этом температурный эффект практически слабо выражен [16] (на примере окисления бензола воздухом): селективность образования фенола с ростом температуры падает незначительно (с ~80 до ~75% мас.), конверсия слабо растет с 0,4 до 0,5% мас.

Проведены исследования по влиянию температуры стенок реактора на процесс окисления толуола кислородом и воздухом в барьерном разряде. Основными продуктами окисления толуола являются бензиловый спирт, бензальдегид и крезолы. Показано, что конверсия толуола при окислении кислородом с ростом температуры стенок реактора увеличивается с 1 до 3% мас., при окислении воздухом – с 0,4 до 0,6% мас. В случае как кислорода, так и воздуха рост температуры стенок реактора сопровождается повышением селективности образования бензинового спирта и крезолов и снижением селективности образования бензальдегида.

Продемонстрирована целесообразность контроля температуры для управления процессом одностадийного окисления ароматических углеводов в плазме.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования РФ, проект FWRN-2021-0003).

### **Литература:**

- [1] Ogata A., Shintani N., Yamanouchi K., Mizuno K., Kushiya S., Yamamoto T. Effect of water vapor on benzene decomposition using a nonthermal-discharge plasma reactor. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2000. V. 20. N 4. P. 453–467. DOI: 10.1023/A:1007075721610.
- [2] Очеретько А.Н., Кудряшов С.В., Рябов А.Ю., Лещик А.В. Прямое окисление бензола в фенол в реакторе с барьерным разрядом. *Химия высоких энергий.* Т. 56. №. 4. С. 300-304. DOI: 10.31857/S002311932204012X.
- [3] Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: МГУ. 1989. 174 с.

ms.leshzhich7@gmail.com

## СИНТЕЗ И КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОСЕНСОРНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА МЕДИ И SP1- УГЛЕРОДА

**А. В. Смирнов<sup>1, 2</sup>, В. С. Абуков<sup>1</sup>, П. С. Платонов<sup>1, 2</sup>, Д. В. Петров<sup>1, 2</sup>, Е. С. Тюнтеров<sup>1, 2</sup>, Г. М. Сорокин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

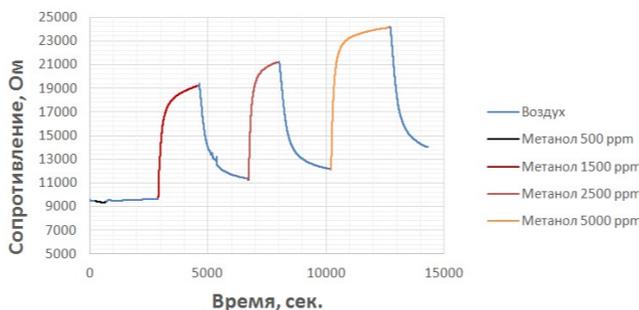
<sup>2</sup>Ассоциация молодых физиков Чувашии, Чебоксары, Россия

В настоящее время широко исследуются наноструктурированные оксиды полупроводниковых металлов р-типа в качестве чувствительных элементов (пленок) датчиков определения наличия или концентрации восстановительных, окисляющих, опасных, легковоспламеняющихся и ядовитых газов и паров. Для получения датчиков с хорошими газочувствительными свойствами применяют металлооксидные наноматериалы (пленки) с высоким отношением площади поверхности к объему, что способствует процессам адсорбции/десорбции анализируемого газа или пара [1]. Важным технологическим этапом получения пленок с хорошей газочувствительностью является этап термообработки (отжига).

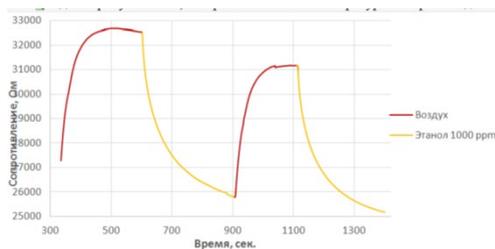
В настоящей работе проведено исследование режимов термического окисления пленок Cu (для получения оксидов меди) и систем оксиды меди/линейно-цепочечный углерод (на 99% состоящий из атомов углерода в состоянии sp<sup>1</sup>) на кварцевых подложках.

Проведены исследования газочувствительности полученных пленок при комнатных температурах и при нагреве подложке до небольших температур (~150°C). Получены образцы с различным сопротивлением от десятков кОм до десятков МоМ. Рентгеновский фотоэлектронный анализ (РФЭС) показал, что валентность меди в оксиде зависит от параметров синтеза. Были проведены измерения электрофизических и оптических свойств. Для одновалентных пленок оксида меди Cu<sub>2</sub>O и Cu<sub>2</sub>O/ЛЦУ оптическая ширина запрещенной зоны в диапазоне 2,2-2,8 эВ, для двухвалентных пленок оксида меди CuO и CuO/ЛЦУ равна 1,6-2,1 эВ. Степень р-легированности (отношение 2E<sub>a</sub>/E<sub>g</sub>) находится в диапазоне 0,197-0,646. Полученные пленки разной толщины, времени и температуры отжига имеют разные электрические сопротивления. Получены пленки с временем отклика/восстановления от 20

секунд до нескольких минут, с чувствительностью от 2 до 245 % на пары этанола / метанола (к примеру, рис. 1 и 2). Результаты всех экспериментов обобщены в виде многофакторных вычислительных моделей, созданных с помощью нейронных сетей. Модели позволяют решать как прямые, так и обратные задачи эксперимента.



**Рисунок 1.** Газочувствительные свойства  $\text{CuO}+\text{ЛЦУ-400}^{\circ}\text{C}$  - 60мин.(медная гранула 4 на 4) в парах метанола различной концентрации с температурой нагрева подложки  $150^{\circ}\text{C}$ .



**Рисунок 2.** Изменение сопротивления образца  $\text{CuO-250}^{\circ}\text{C}$  - 60мин.(медная гранула 4 на 1) в парах этанола с температурой нагрева подложки  $200^{\circ}\text{C}$  при концентрации паров этанола 1000 ppm.

### Литература:

[1] 1. Ahn M.-W., Park K.-S., Heo J.-H., Park J.-G., Kim D.-W., Choi K. J., Lee J.-H., Hong S. H. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 263103.

## РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ПОРИСТОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА

**Г. А. Никифоров<sup>1</sup>, Б. Н. Галимзянов<sup>1</sup>, А. В. Мокшин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

\*nikiforov121998@mail.ru

На сегодняшний день пористые материалы активно используются в широком спектре отраслей промышленности и медицины [1]. При этом свойства пористых материалов зависят не только от материала твердой матрицы, но во многом определяются морфологией пористой системы. Сама морфология пористой структуры может быть описана с помощью следующих параметров: пористость, средний линейный размер пор и средний линейный размер перемычек. Морфология пористых материалов определяет как механические свойства материала (предел прочности, модуль упругости и др.), так и функциональные (демпферные, капиллярные, термо- и шумоизоляционные свойства и др.).

В настоящей работе изучается влияние морфологии пор на механические свойства пористого бинарного сплава Ni<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub>. Поскольку на данный момент зависимость механических свойств от пористости хорошо изучена [2], в работе был сделан акцент на изучение механических свойств пористого материала от среднего линейного размера пор. Было предложено универсальное уравнение, определяющее значения таких механических характеристик, как предел прочности, предел текучести и модуль Юнга как функции среднего линейного размера пор и пористости. Выражение было получено на основе данных молекулярно-динамических расчетов для наномасштаба и на основе экспериментальных данных для микромасштаба. Особенностью полученного выражения является учет взаимного влияния параметров пористой структуры на механические свойства пористого материала.

Работа выполнена в рамках программы «Приоритет-2030».

### **Литература:**

[1] Liu P.S., Chen G.F. Porous Materials. Processing and Applications. – Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2014. – 560 pp.

[2] Ji S., Gu Q., Xia B. // J. Mater. Sci. – 2006. – V. 41 (6). – P. 1757-1768.

## ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ В АКУСТИЧЕСКОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЯХ

**Д. А. Тукмаков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИММ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, РФ

Частным случаем неоднородных сред являются газозвеси – взвешенные в газа твердые частицы или жидкие капли [1-6]. В данной работе рассматривается динамика несжимаемой частицы в акустическом поле [7,8]. Представлена математическая модель колебаний частицы в акустическом поле с учетом воздействия силы Кулона [5]. Получено аналитическое решение совокупности уравнений, описывающих динамику одиночной электрически заряженной частицы, математическая модель реализована в виде компьютерной программы. Акустическое поле описывается волновым уравнением (1) [7]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (1)$$

Здесь  $\varphi$  – потенциал акустического поля,  $c$  – скорость звука,  $x, t$  – пространственная и временная переменная. Скорость движения газа  $-u$  является производной по пространству от потенциала акустического поля (2):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = u \quad (2)$$

Изменение давления газа  $-p$  ( $p_0$  – равновесное давление,  $\rho$  – плотность газа) описывается уравнением (3):

$$p = p_0 + p' = p_0 - \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (3)$$

Скорость дисперсной части описывается дифференциальным уравнением (4):

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = \frac{a}{m}(u - u_1) - \frac{q_0}{m} \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (4)$$

$q_0$ –удельный заряд частицы,  $m$ –масса частицы,  $u_1$ –скорость частицы,  $\psi(x,t)$  потенциал электрического поля, задаваемый уравнением,  $a$ –коэффициент сопротивления,  $\mu$ –вязкость газа:

$$a = 6\pi d\mu \quad (4^*)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0 \quad (5)$$

Одномерное уравнение Лапласа (5) может иметь стационарное решение (6) или нестационарное решение (6\*)

$$\psi(x) = \psi_1 + x \frac{\psi_2 - \psi_1}{L} \quad (6)$$

$$\psi(x, t) = \cos(\alpha + \omega t) \psi_1 + x \cos(\alpha + \omega t) \frac{\psi_2 - \psi_1}{L} \quad (6^*)$$

Здесь  $\omega$ – циклическая частота колебаний,  $\alpha$ – начальная фаза волны. Рассмотрим алгоритм метода разделения переменных [9] применительно к уравнению (1), представим функцию потенциала акустического поля  $\varphi(x,t)$  в виде произведения функций зависящих только от пространственной переменной  $x$  – $X(x)$  и  $T(t)$  соответственно:

$$\varphi(x, t) = T(t) X(x) \quad (7)$$

При подстановке уравнения (7) в уравнение (1) получаем уравнение

$$XT'' = c^2 X'' T \quad (1^*)$$

Из уравнения (1\*) разделенного на  $X(x)T(t)$  следует уравнение (1\*\*):

$$\frac{T''}{T} = c^2 \frac{X''}{X} = -\lambda^2 \quad (1^{**})$$

Для функции, зависящей от времени –  $T(t)$  записывается уравнение (8):

$$T'' = -\lambda^2 T \quad (8)$$

Для функции, зависящей от пространственной переменной –  $X(x)$  записывается уравнение (9):

$$X'' = -\frac{\lambda^2}{c^2} X \quad (9)$$

Уравнение (8) имеет решение (8\*):

$$T(t) = A_k \cos \lambda_k t + B_k \sin \lambda_k t \quad (8^*)$$

Уравнение (9) имеет решение (9\*) [10]:

$$X(x) = C_k \cos \lambda_k x + D_k \sin \lambda_k x \quad (9^*)$$

Из уравнений (8\*) и (9\*) следует выражение для потенциала акустического поля:

$$\begin{aligned} \varphi(x, t) = & A_k C_k \sin \frac{\lambda_k x}{c} \sin \lambda_k t + A_k D_k \sin \lambda_k t \cos \frac{\lambda_k x}{c} + \\ & + B_k C_k \sin \frac{\lambda_k x}{c} \cos \lambda_k t + B_k D_k \cos \frac{\lambda_k x}{c} \lambda \cos_k t \quad (10) \end{aligned}$$

Работа выполнялась в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра Казанского научного центра Российской академии наук.

### Литература:

- [1] Тукмаков А.Л. Распределение твердых частиц в акустическом поле резонансной трубы при различных режимах возбуждения колебаний//Теплофизика и аэромеханика. 2005. № 2. С. 219-227.
- [2] Тукмаков Д. А., Ахунов А. А. Численное исследование влияния электрического заряда дисперсной фазы на распространение ударной волны из чистого газа в запылённую среду// Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика, 2020, Т. 20, № 3, с. 183–192.
- [3] Тукмаков Д.А., Ахунов А.А. Численное исследование распространения ударной волны малой интенсивности из чистого газа в электрически заряженную запылённую среду//Чебышевский сборник, 2020, Т. 21, №4, с. 360–372.
- [4] Тукмаков Д.А. Численное исследование влияния параметров дисперсной фазы на генерацию течения газа, формирующегося при гравитационном осаждении аэрозоля// Вычислительная механика сплошных сред, 2020, Т. 13, № 3, с. 279-287.
- [5] Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А. Генерация акустического возмущения движущейся заряженной газозвезью// Инженерно-физический журнал, 2018, №5, с.1207-1213.
- [6] Тукмаков Д.А. Численное исследование влияния плотности материала дисперсной компоненты на интенсивность генерации акустического импульса в электрически заряженной газозвези// Математические заметки СВФУ, 2020, № 4, С. 99-109.
- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.В. Теоретическая физика. Гидродинамика. Москва: Наука, 1986, 736 с.
- [8] Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 1: Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. —504 с.
- [9] Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Москва: Наука, 1977. 736 с.
- [10] Имас О.Н, Пахомова Е.Г., Рожкова С.В., Устинова И.Г. Лекции по дифференциальным уравнениям. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 193 с.

tukmakovda@imm.knc.ru

## РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА В ТРУБЕ С ОБЪЕМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОТЫ

**С. А. Фадеев<sup>1</sup>, Л. Р. Шайдуллин<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия*

<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия*

Колебания газа в трубе с объемным источником теплоты являются важным процессом в работе некоторых технических устройств. Особый интерес с практической точки зрения вызывают резонансные колебания газа.

В энергетических установках может реализовываться пульсационный режим горения, сопровождающийся возбуждением колебаний газа в камере сгорания [1, 2]. Часто, реализация пульсационного режима горения может быть нежелательным явлением. С другой стороны, колебания газового потока ускоряют теплоотдачу к стенкам камеры сгорания и повышают полноту сгорания топлива по сравнению с равномерным режимом горения [1-3].

Термоакустические устройства, где совершаются колебания температурно-неоднородного газа в замкнутых объемах, являются перспективными тепловыми двигателями и холодильниками [4].

Газовый объем, заключенный в акустический резонатор, при выведении из теплового равновесия источником тепла, может самопроизвольно усиливать свои резонансные моды до высоких амплитуд. Так, метод усиления звука и автоколебаний в частично ионизированном газе высокого давления представлен в работе [5]. В [6] обнаружено, что звуковые волны, могут удерживать частично ионизованный газ. Экспериментальное исследование влияния акустических колебаний на структуру и электрические параметры коронного разряда в воздухе представлено в [7].

Таким образом, в некоторых резонаторах существуют градиенты температуры, возникающие вследствие термоакустического эффекта, горения или джоулева нагрева. Рассмотрение резонансных колебаний газа в трубе, в данных условиях, является актуальной задачей.

Рассмотрим резонансные колебания газа в трубе закрытой с одного конца, на другом конце по гармоническому закону колеблется поршень, геометрические размеры трубы приведены в [8]. Амплитуда смещения поршня  $l_0 = 0.01$  мм. Колебания газа в такой системе описывались линеаризованной системой уравнений Навье–Стокса, включающей уравнения сохранения импульса, массы, энергии и уравнение состояния. Система уравнений решается методом возмущений [3]. Уравнение энергии нулевого порядка с объемной плотностью теплового потока  $Q$  описывает распределение фоновой температуры. Подробное изложение модели и граничных условий представлено в [8].

С повышением температуры наблюдается сдвиг резонансной частоты в сторону увеличения в сравнении с резонансной частотой, полученной из расчета в отсутствии источника тепла, так как резонансная частота пропорциональна скорости звука  $\omega \sim c_0$  и, как следствие, корню средней температуры в трубе. При наличии объемной плотности теплового потока  $Q$  в ядре потока профиль амплитуды осевой компоненты скорости принимает близкий к параболическому вид. Поскольку при возбуждении колебаний газа в трубе с неоднородным распределением температуры по радиусу профиль стоячей волны зависит от профиля температуры [9]. С увеличением  $Q$  возрастает амплитуда колебаний давления газа, что связано с уменьшением потерь обусловленных вязкостью [8, 10].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01169, <https://rscf.ru/project/23-79-01169/>.

### Литература:

- [1] Раушенбах Б.В. // Вибрационное горение. 1961. 250 с.
- [2] Натанзон М.С. // Неустойчивость горения. 1986. 248 с.
- [3] Галиуллин Р.Г., Ткаченко Л.А. // Нелинейные колебания газа в трубах. 2007. 116 с.
- [4] Swift G.W. // Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators. 2017. 326 p.
- [5] Pree S., Putterman S., Koulakis J.P., Phys. Rev. E. 105. 033204 (2019).
- [6] Koulakis J.P. et al., Phys. Rev. E. 98. 043103 (2018).
- [7] Balek R. et al., Plasma Sources Sci. Technol. 23:3. 035005 (2014).
- [8] Gubaidullin D.A., Tkachenko L.A., Fadeev S.A., Shaidullin L.R., Lobachevskii J. Math. 43. 1110–1115 (2022).
- [9] Завершинский И.П., Коган Е.Я., Физика плазмы. 22:3. 281–288 (1996).
- [10] Gubaidullin D.A., Fadeev S.A., Shaidullin L.R., Lobachevskii J. Math. 44. 1629–1633 (2023). [fadeev.sergei@mail.ru](mailto:fadeev.sergei@mail.ru)

## ЧАСТИЦЫ С РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ, ИМЕЮЩИХ МАЛЫЙ РАДИУС КРИВИЗНЫ, ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ

**В. Ф. Тарасенко<sup>1</sup>, Д. В. Белоплов<sup>1</sup>, М. И. Ломаев<sup>1</sup>, А. Н. Панченко<sup>1</sup>, Д. А. Сорокин<sup>1</sup>**

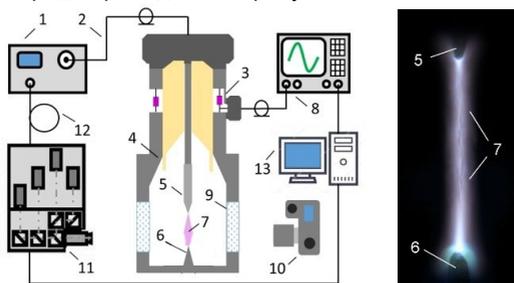
*<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

Известно, что при пробое вакуумных промежутков на катоде образуются яркие пятна и из них разлетаются частицы металла [1]. Разлёт частиц материала электродов также наблюдается при импульсных разрядах в воздухе и других газах, см., например, [2]. Исследования первичного пробоя вакуумных промежутков между полированными электродами при однородном электрическом поле, результаты которых были проанализированы в работе [3], показали, что уменьшение пробивного напряжения нельзя связывать только с взрывной электронной эмиссией [4]. Для понимания причин, ограничивающих электрическую прочность вакуумной изоляции, надо также учитывать влияние сильного электрического поля на механические свойства поверхности электродов. Расчеты, проведённые в работе [3] показали, что в непрогретой области, размер которой значительно превышает размер центра взрывной эмиссии электронов, материал катода также подвергается воздействию разрушающих механических напряжений. При подаче на разрядный промежуток, заполненный газами, импульсов напряжения с крутым фронтом порог взрывной электронной эмиссии в неоднородном электрическом поле достигается за короткое время [4]. В результате значительного увеличения электрического поля за счёт использования электродов, имеющих малый радиус кривизны, это может происходить за время менее 1 наносекунды. В работах [5,6] было установлено, что при наносекундном разряде с использованием электродов, изготовленных из иголок, в воздухе и аргоне из области ярких пятен на электродах прорастают тонкие светящиеся треки (ТСТ), которые связаны с разлётом частиц. ТСТ были зарегистрированы в диффузных и искровых разрядах с помощью фотоаппарата, а также ICCD камеры. Треки частиц имели различную форму от прямых линий до извилистых, а направление их

движения в ряде случаев изменялось на противоположное. Некоторые из ТСТ начинались на краях ярких пятен на электродах. Однако данные, полученные в работах [5,6], являются предварительными и требуются продолжения исследований условий появления частиц при диффузных и искровых разрядах в неоднородном электрическом поле, а также изучения закономерностей их разлёта.

В настоящей работе продолжены исследования разлёта частиц в условиях искрового разряда между двумя острями. При атмосферном давлении воздуха были получены дополнительные данные о разлёте частиц при импульсах напряжения положительной полярности с длительностью на полувысоте  $\approx 10$  нс и фронтом  $\approx 3$  нс.

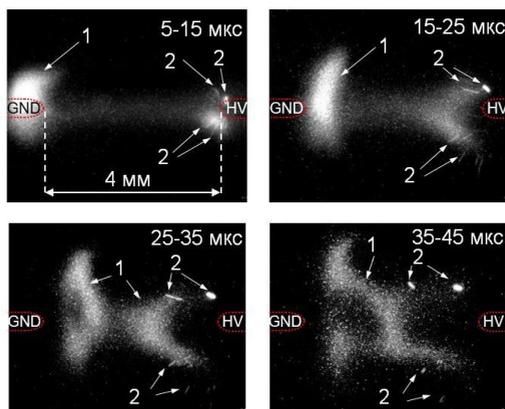
Схема установки экспериментальной установки и фотография интегрального свечения разряда приведены на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Схема экспериментальной установки и фотография (справа) интегрального свечения разряда за один импульс. 1 – высоковольтный генератор, 2 – высоковольтный кабель, 3 – шунт, 4 – разрядная камера, 5 и 6 – электроды с малым радиусом кривизны, 7 – плазма разряда, 8 – осциллограф, 9 – окно из кварца, 10 – фотоаппарат, 11 – ICCD камера, 12 – линия задержки, 13 – компьютер.

Импульсы напряжения положительной полярности с амплитудой в падающей волне 15 кВ от генератора ГИН-55-01 по коаксиальному кабелю подавались на вход передающей линии разрядной камеры. Излучательные характеристики наносекундного разряда регистрировались между двумя электродами, которые изготавливались из отрезков швейных игл с диаметром у основания 0.75 мм. Их длина после длительной тренировки равнялась  $\approx 5.5$  мм, а радиусы закругления были  $\approx 100$  мкм у высоковольтной иглы, на которую подавались импульсы напряжения, и  $\approx 300$  мкм у заземлённой иглы. Заземлённая игла при предварительной

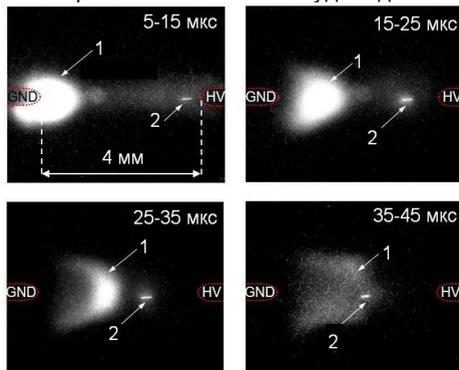
тренировке электродов изменила форму и стала притупленной. Для съёмки свечения плазмы разряда использовался зеркальный фотоаппарат Canon EOS 2000D и четырёх кадровая ICCD камера HSFC PRO. Газоразрядная камера откачивалась форвакуумным насосом и заполнялась атмосферным воздухом атмосферного давления с относительной влажностью 23%. На рисунке 2 показаны изображения свечения разряда и треков частиц при горизонтальном расположении оси разрядного промежутка.



**Рисунок 2.** Изображения свечения плазмы в промежутке, полученные с помощью ICCD камеры при атмосферном давлении воздуха в различные временные интервалы (5-15, 15-25, 25-35 и 35-45 мкс) после подачи импульса напряжения на промежуток. GND – заземлённый электрод, HV – высоковольтный электрод, 1 – области диффузного свечения, 2 – треки частиц. Опыт 1.

Частицы на расстояниях от электродов, достаточных для их регистрации, появлялись за единицы микросекунд. Скорость частиц меньшего поперечного размера, что следует из толщины их треков, была больше ( $\approx 50$  мм/мс), чем у частиц с большим поперечным сечением. Из рисунка 2 видно, что скорость частиц уменьшалась при удалении от электрода. Светящиеся диффузные области у электродов за десятки микросекунд вытеснялись к центру промежутка. Было установлено, что форма свечения плазмы в промежутке изменяется от импульса к импульсу. Анализ формы свечения разряда, фиксируемой ICCD камерой, показал, что ТСТ инициировались как с высоковольтного, так и заземлённого электродов. На

рисунке 3 показаны фотографии диффузного свечения разряда и треков частиц после их появления в различные моменты времени для второго импульса напряжения при той же его амплитуде и длительности.



**Рисунок 3.** Изображения свечения плазмы в промежутке, полученные с помощью ICCD камеры в различные временные интервалы (5-15, 15-25, 25-35 и 35-45 мкс) после подачи импульса напряжения на промежуток. GND – заземлённый электрод, HV – высоковольтный электрод, 1 – области диффузного свечения, 2 – треки частиц. Опыт 2.

Можно предположить, что образование ТСТ связано, в том числе, с вылетом частиц металла из поверхности электродов в том числе под воздействием высокого электрического поля из-за механических явлений при образовании первичной плазмы в результате теплового взрыва.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

#### **Литература:**

- [1] Beilis I. // *Plasma and Spot Phenomena in Electrical Arcs* (Springer Nature, Switzerland, 2020).
- [2] Tarasenko V., Vinogradov N., Beloplotov D., et al. // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. P. 652.
- [3] Нефедцев Е., Онищенко С. // *Письма в ЖТФ*. 2022. Т. 48. Вып. 2. С. 33.
- [4] Королев Ю. Д., Месяц Г. А. // *Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде*. (Наука. Сиб. отд-ние, 1982).
- [5] Tarasenko V.F., Beloplotov D.V., Panchenko A.N., Sorokin D.A. // *Surfaces*. 2023. V. 6. Iss. 2. P. 214.
- [6] Tarasenko V.F., Beloplotov D.V., Lomaev M.I., et al. // *Uspekhi Prikladnoi Fiziki (Advances in Applied Physics)*. 2023. V. 11. № 4. P. 312.

[VFT@loi.hcei.tsc.ru](mailto:VFT@loi.hcei.tsc.ru)

## РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОГО ФОТОННОГО ОТЖИГА ITO ПОКРЫТИЙ

**В. Д. Городинов<sup>1</sup>, Л. Ю. Володин<sup>1</sup>, М. А. Мелкомуков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

На сегодняшний день в области электроники появилось новое перспективное направление – производство гибкой электроники. Гибкая электроника — это технология, базирующаяся на тонкопленочных проводящих материалах, нанесенных на гибкую подложку. Как правило материалы это наночастицы или полупроводниковые структуры, которые требуют дополнительную постобработку в виде отжига или спекания. Проводящие компоненты, как правило это паста из наночастиц металлов или графена, которая требует спекания для достижения приемлемой проводимости [1]. Полупроводниковые структуры – это чаще всего тонкие пленки, которые тоже требуют термообработки (ITO, FTO), но на гибких подложках это затруднено, так как в большинстве случаев используются нетермостойкие пластики (например, ПЭТ). Поэтому традиционные методы термической постобработки в этой области мало применимы.

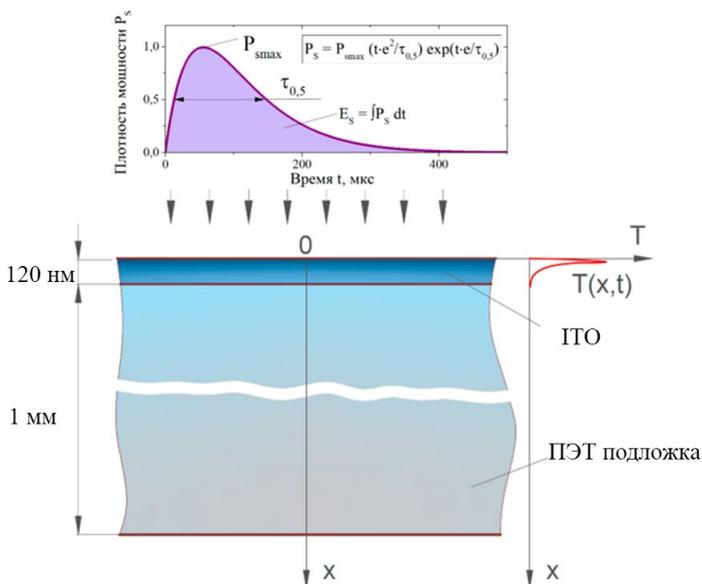
Наиболее распространенным процессом осаждения тонкопленочных ITO покрытий является магнетронное распыление. Этот метод является наиболее используемым в массовом производстве. В процессе напыления осуществляется дополнительный нагрев до температур выше температуры кристаллизации, которая составляет от 150°C до 180°C [2], или производят дополнительный отжиг после нанесения покрытия с длительностью более часа. Согласно исследованиям [3] проведение высокотемпературного отжига пленок ITO после напыления способствует увеличению подвижности носителей заряда за счет увеличения кристаллов пленки и концентрации носителей за счет активации примеси олова.

Альтернативным методом постобработки ITO пленок на стеклянных и гибких подложках является метод отжига импульсными ксеноновыми лампами [4,5]. Импульсный характер излучения позволяет нагревать поверхность пленки до температур достаточных для рекристаллизации пленки и до окисления примеси олова за несколько миллисекунд.

Большинство исследований по отжигу тонких пленок импульсными ксеноновыми лампами проводятся на установках с плотностями энергии до  $100 \text{ Дж/см}^2$  и в этих статьях практически не уделено внимание другим характеристикам излучения. Однако из анализа уравнения теплопроводности возникает предположение, что в формировании пиковой температуры поверхности большее значение имеет резкий начальный фронт мощности излучения и значение пиковой мощности излучения импульсной ксеноновой лампы.

В данной работе проводится сравнительный расчетно-теоретический анализ влияния энерго-мощностных параметров излучения на характеристики нагрева ИТО покрытий, нанесенных на ПЭТ подложку.

Создана расчетная теоретическая модель нагрева ИТО покрытия на гибкой пластиковой ПЭТ подложке при различных режимах излучения. Излучение задается как функция плотности мощности, а нагрев задается функцией внутренних источников. Схема модели представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Расчетная схема теоретической модели нагрева ИТО покрытия.

Для сравнения характеристик нагрева использовались режимы, реализуемые на разработанных лабораторных прототипах установок фотонной модификации.

Первая установка в качестве источника излучения использовала импульсную ксеноновую лампу ИФП-800 (размеры тела свечения  $\varnothing 7 \times 80$  мм), установленную в отражателе с габаритами выходного сечения  $40 \times 90$  мм. Питание лампы осуществляется от конденсаторной батареи с емкостью  $C = 200$  мкФ с величиной зарядного напряжения  $U$  до 1,8 кВ. Данная установка позволяет проводить облучение материалов с плотностью энергии до  $3,4$  Дж/см<sup>2</sup> и плотностью мощности до  $330$  МВт/м<sup>2</sup> (режим 1).

Во второй экспериментальной установке в качестве источника излучения используется лампа ИФК-2000 У-образной формы с габаритными размерами светящейся части лампы  $30 \times 80$  мм. Габариты выходного сечения отражателя -  $70 \times 90$  мм. Питание лампы осуществляется от конденсаторной батареи с емкостью  $C = 5412$  мкФ с величиной зарядного напряжения  $U$  до 850 В. Плотность энергии на выходе из оптической системы составляет  $3,4$  Дж/см<sup>2</sup> при зарядном напряжении 500 В, пиковая плотность мощности излучения -  $17$  МВт/м<sup>2</sup> (режим 2). Характерные длительности импульсов излучения составляют 0,15 мс и 1,9 мс соответственно.

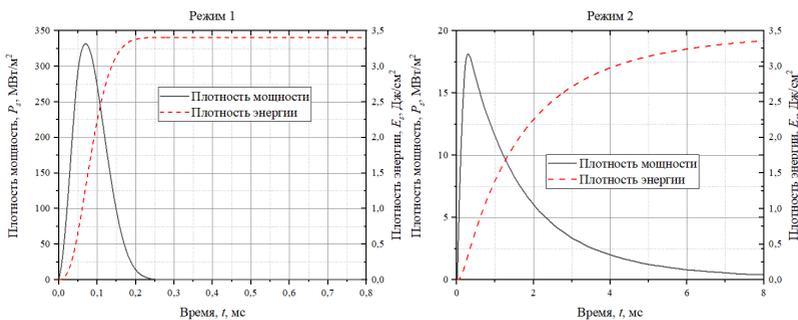


Рисунок 2 – Режимы работы установок

Для расчета заданы материалы и их физические характеристики, такие как: термическая проводимость, плотность, теплоемкость, коэффициент поглощения. В качестве материала подложки использован ПЭТ пластик. Материалом пленки является индий, легированный оловом. В качестве граничных условий были следующие: начальная температура всех объектов 297.15 К; нижняя граница подложки теплоизолирована; на верхней границе

происходит конвективный теплообмен с окружающей средой ( $\alpha=10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)). Экспериментальные выражения для поверхностной мощности излучения (рисунок 1) аппроксимировались математической зависимостью с учетом плотности поверхностной энергии. Расчет проводился методом конечных элементов в программной среде Matlab.

В результате численного моделирования получена зависимость температуры поверхности ИТО пленки от времени. Анализ результатов показал, что при одинаковой поверхностной плотности мощности излучения, в режиме 1 с мощностью 330 МВт/м<sup>2</sup> происходит нагрев поверхности до большей температуры чем в режиме 2 (17 МВт/м<sup>2</sup>). Анализ температурного поля показал, что глубина прогрева в режиме 1 составляет на порядок меньше, чем в режиме 2. Большая глубина проникновения тепла пагубна влияет на нетермостойкие подложки. Таким образом облучение образцов с режимами высокой пиковой мощности позволяет меньше повреждать нетермостойкий материал подложки.

Представлена расчетная теоретическая модель нагрева ИТО покрытия на гибкой пластиковой ПЭТ, проведено сравнение двух режимов обработки с одинаковой плотностью энергии, но с существенно различной плотностью мощности излучения. Установлено, что пиковое значение мощности играет существенную роль в процессе нагрева тонких пленок. В режим с высокой пиковой мощностью прогрев образца происходит на существенно меньшую глубину, за счет чего меньше повреждается нетермостойкий материал подложки.

### **Литература:**

- [1] Wiklund, J.; Karakoç, A.; Palko, T.; Yiğitler, H.; Ruttik, K.; Jäntti, R.; Paltakari, J. A Review on Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021, 5, 89
- [2] Lee J. H. Effects of substrate temperature on electrical and optical properties ITO films deposited by rf magnetron sputtering // *Journal of electroceramics.* – 2009. – Т. 23. – С. 554-558.
- [3] Сахаров Ю. В., Ефимович Т. П., Жидик Ю. С. Исследование механизмов электропроводности пленок оксида индия, легированного оловом // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.* – 2015. – № 3 (37). – С. 85-88.
- [4] Kim Y. et al. Flash lamp annealing of indium tin oxide thin-films deposited on polyimide backplanes // *Thin Solid Films.* – 2017. – Т. 628. – С. 88-95.
- [5] Kim Y. et al. Xe-arc flash annealing of indium tin oxide thin-films prepared on glass backplanes // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2015. – Т. 91. – С. 543-551. [gorodinovvd@student.bmstu.ru](mailto:gorodinovvd@student.bmstu.ru)

## СИНТЕЗ БИНАРНЫХ НАНОСЛАВОВ: ПРОБЛЕМА ПОЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ

**К. Г. Савина, Д.Р. Зорин, С.С. Богданов, Н.Ю. Сдобняков, П.М. Ершов**

*ФГБОУ ВО ТвГУ, Тверь, Россия*

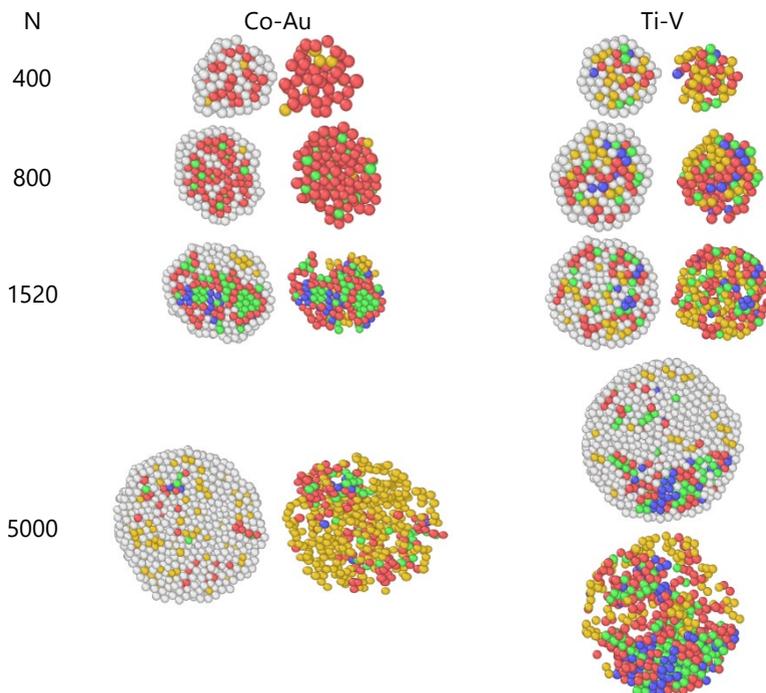
Металлические наночастицы, состоящие из двух или более металлов, обладают уникальными оптическими, электрическими и каталитическими свойствами. Хорошим примером может служить сплав магнитных металлов, таких как Со, с немагнитными материалами, которые приносят каталитические или оптические эффекты в конечный продукт. Сплавы Ti-V в свою очередь представляют практический интерес для изготовления высокотемпературных конструкционных деталей для аэрокосмической и автомобильной промышленности, а также для разработки ядерных реакторов. Ранее процессы структурообразования исследовались в [1].

В данной работе предпринята попытка установить, описать и сравнить специфические закономерности структурообразования в вышеперечисленных бинарных наночастицах, определить основные факторы, влияющие на процесс кристаллизации.

В качестве объектов исследования выступали бинарные наночастицы Co-Au и Ti-V, содержащие  $N = 400, 800, 1520$  и  $5000$  атомов. Для исследования использовались бинарные наночастицы эквимолярного состава. Компьютерный эксперимент проводился методом молекулярной динамики (МД), с использованием авторского программного обеспечения ClusterEvolution [2].

Исследуемые бинарные наночастицы нагревались до температуры, на  $50$  К выше температуры плавления более тугоплавкого металла в системе, а затем охлаждались до  $0,1$  К. Шаг по времени в МД эксперименте составлял  $1$  фс. Для моделирования межатомного взаимодействия использовался многочастичный потенциал сильной связи [3].

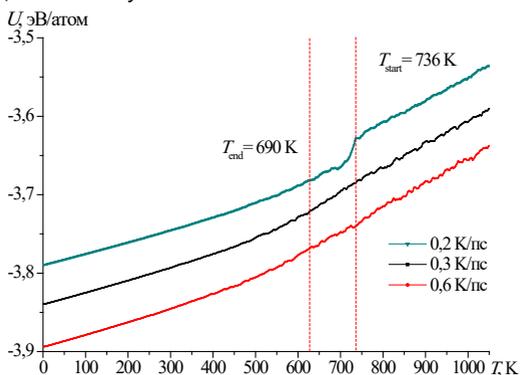
С целью более детального рассмотрения процессов кристаллизации наночастицы исследовались на наличие кристаллических фаз с использованием метода сопоставления полиэдрических шаблонов [4]. Было установлено (см. рис. 1), что в бинарных наночастицах эквимолярного состава образуются множественные малые ядра икосаэдрической симметрии, а также цепочки из них.



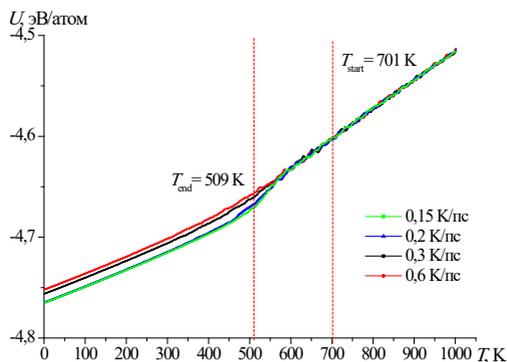
**Рисунок 1.** Конечные конфигурации бинарных наночастиц эквипотенциального состава Co-Au и Ti-V, содержащие  $N = 400, 800, 1520$  и  $5000$  атомов в сечении плоскостью. Цветовое обозначение атомов соответствует соотнесённым им упорядоченным фазам: зеленые – ГЦК, красные – ГПУ, синие – ОЦК, желтые – ИК ядра, белые – нераспознанные (справа – конфигурации только с распознанными атомами).

С ростом размера нанокластера (уже при  $N = 400$ ) идентифицируется структура из пересекающихся плоскостей атомов ГПУ фазы. Атомы титана формируют некристаллические фазы, включая ИК, в то время как атомы ванадия в основном формируют ГПУ структуру. Причем ванадий с точки зрения кристаллизации проявляет себя хуже в сплавах с титаном, чем, например, алюминий [1]. Однако с увеличением размера наночастиц до  $N = 5000$  доля атомов, образующих кристаллические фазы, заметно уменьшается (рис. 1).

Скорость охлаждения – это параметр, изменение которого позволяет управлять конечной структурой охлажденных многокомпонентных наночастиц. На рис. 2 представлены температурные зависимости потенциальной части удельной внутренней энергии бинарных систем Co-Au и Ti-V ( $N=1520$  атомов). Для системы Co-Au кристаллические фазы идентифицированы при скорости охлаждения  $0,2$  К/пс, а для Ti-V –  $0,15$  К/пс. Таким образом, определение оптимальной скорости охлаждения для определенного состава и размера бинарных наночастиц является задачей, требующей отдельного изучения.



а



б

**Рисунок 2.** Температурная зависимость потенциальной части удельной внутренней энергии наночастиц Co-Au (а) и Ti-V (б) эквипроцентного состава ( $N=1520$ ) при различных скоростях охлаждения.

По результатам серий компьютерных экспериментов было установлено, что основными факторами, влияющими на возможность получения кристаллических фаз, являются: скорость охлаждения бинарных наночастиц, их размер и размерное несоответствие атомов, входящих в состав. В частности, влиянию скорости охлаждения на процессы кристаллизации были посвящены работы [5, 6]. На процесс кристаллизации влияет процентное соотношение компонентов в бинарной наночастице, сложнее всего получить кристаллические фазы в системах эквиатомного состава, тогда как для монометаллических наночастиц и зеркальных составов (25-75% и 75-25%) проще подобрать оптимальные условия эксперимента. Таким образом, варьируя размер и состав, возможно влиять на процесс структурообразования при кристаллизации и последующем охлаждении в исследуемых бинарных наночастицах.

#### **Литература:**

- [1] Мясниченко В.С., Ершов П.М., Савина К.Г., Веселов А.Д., Богданов С.С., Сдобняков Н.Ю. Закономерности структурообразования в биметаллических наночастицах с разной температурой кристаллизации // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. — 2021. — Вып. 13. — С. 568-579.
- [2] Свидетельство № № 2011615692 Российская Федерация. Молекулярнодинамическое моделирование и биоинспирированная оптимизация бинарных и тройных металлических наноструктур (КластерЭволюшн) / В.С. Мясниченко; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2011613732; заявл. 23.05.2011; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 20.06.2011. – 1 с.
- [3] Cleri F., Rosato V. Tight binding potentials for transition metals and alloys // Physical Review B. 1993. V. 48. I. 1. P. 22-33.
- [4] Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO – the open visualization tool // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2010. V. 18. I. 1. P. 015012-1-015012-7.
- [5] Самсонов В.М, Талызин И.В., Самсонов М.В. О влиянии скоростей нагрева и охлаждения на плавление и кристаллизацию металлических нанокластеров // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – Вып.6. С. 149-152.
- [6] Sdobnyakov N.Yu., Myasnichenko V. S., San C.-H. et al. Simulation of phase transformations in titanium nanoalloy at different cooling rates // Materials Chemistry and Physics. – 2019. – V. 238. – Art. № 121895. – 9 p.

kseniya.savina.g@yandex.ru

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ХИТОЗАНА ДЛЯ АГРОНОМИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

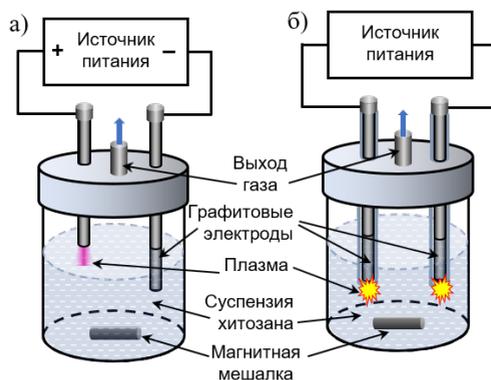
**В. А. Титов<sup>1</sup>, И. К. Наумова<sup>2</sup>, А. В. Хлюстова<sup>1</sup>, Д. С. Ульянова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

<sup>2</sup>Ивановский государственный университет, Иваново, Россия

В докладе описана обработка водных суспензий хитозана газоразрядной плазмой, контактирующей с жидкой фазой, и представлены результаты испытаний фитостимулирующей активности модифицированной суспензии. Работа продолжает исследования приложений газоразрядной обработки воды и хитозана для решения агротехнических задач [1-4]. Ранее в качестве стимуляторов всхожести и роста растений были испытаны водорастворимые фракции хитозана, выделенные из его растворов в разбавленной уксусной кислоте после плазменного воздействия. Обработка водной суспензии ведет к сокращению числа стадий процесса и к экономии реактивов.

В экспериментах использовали разряд постоянного тока в воздухе, катодом которого служила суспензия хитозана, а также разряд в парогазовых пузырьках у поверхности графитового электрода, погруженного в суспензию (так называемый «подводный разряд» (рис. 1).



**Рисунок 1.** Схемы установок: а) – разряд постоянного тока с жидким катодом (обрабатываемой суспензией); б) – «подводный» разряд.

Разряд постоянного тока (рис. 1а) горел при межэлектродном зазоре 4 мм, напряжении 1080 В и токе 50 мА. Подводный разряд возбуждали при подаче переменного напряжения с частотой 50 Гц на графитовые электроды, помещенные в стеклянные трубки и погруженные в суспензию (рис. 1б). С использованием цифрового осциллографа регистрировали осциллограммы тока и напряжения на электродах. При напряжении горения разряда  $300 \pm 40$  В значения тока составляли  $90 \pm 20$  мА, частота импульсов разряда  $\sim 10$  с<sup>-1</sup>.

Суспензии готовили путем диспергирования  $m_0 = 4 - 10$  г хитозана в 400 мл дистиллированной воды в ультразвуковой ванне «Stegler 3DT». Использовали хитозан с молекулярной массой 195 кДа и степенью дезацетилирования 0,82 (ЗАО «Биопрогресс», Россия). Суспензии обрабатывали в течение 4 – 20 минут при перемешивании магнитной мешалкой. Нерастворимый хитозан после обработки отделяли фильтрованием и высушивали при температуре 40°C до постоянной массы. По разнице масс исходной навески и высушенного нерастворимого хитозана оценивали суммарную массу всех полученных водорастворимых продуктов ( $m_{ws}$ ) и находили их выход:  $Y_{ws} = (m_{ws}/m_0) \times 100$  (%).

В результате обработки уменьшалась средняя молекулярная масса хитозана, что проявлялось в изменении вязкости его растворов. Скорости накопления продуктов составили  $8,43 \pm 0,76$  мг/мин для разряда в воздухе и  $6,50 \pm 0,87$  мг/мин для подводного разряда, а выходы за 20 мин обработки  $Y_{ws} = 4,2$  и  $3,3$  мас.% соответственно. Это ниже, чем значения выходов, полученных при обработке растворов хитозана в разбавленной уксусной кислоте: 24,4% для разряда постоянного тока в воздухе и 12,8% для подводного разряда [3]. Известно, что высокие выходы низкомолекулярных продуктов ( $Y_{ws} \geq 80\%$ ) достигаются при длительной обработке (120 – 300 мин) растворов хитозана плазмой.

Выход водорастворимых продуктов в расчете на единицу вложенной энергии при обработке суспензий оценили по отношению скорости их накопления к мощности, рассеиваемой в разряде. Так, в случае разряда постоянного тока в воздухе энергетический выход составил  $\sim 2,8$  мг/кДж. Сравнение с представленными в работе [5] данными по затратам энергии на получение низкомолекулярных фракций хитозана путем гидролиза, фотодеструкции в присутствии катализатора (TiO<sub>2</sub>), окислительной деструкции с использованием реактива Фентона, а также при обработке раствора плазмой барьерного разряда показывает, что предлагаемый нами

процесс по энергозатратам уступает только процессам с использованием барьерного разряда и деструкции с применением реактива Фентона.

В электронных спектрах поглощения растворов после отделения нерастворимого хитозана присутствуют широкие неразрешенные полосы в УФ-области, связанные с наличием окисленных водорастворимых продуктов. Действие плазмы на водные суспензии сопровождалось также накоплением в жидкой фазе пероксида водорода (до 0,85 ммоль/л при 20 мин обработки), а при разряде в воздухе – ионов  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$ . При действии подводного разряда нитрат- и нитрит-ионы обнаружены не были.

На рис. 2 показаны фотографии семян гороха, которые проращивали с использованием модифицированной суспензии хитозана в сравнении с контрольной партией семян. Применение модифицированной суспензии дало увеличение степени набухания семян при замачивании с 230 до 258 % и их всхожести до 89% при 84%-ной всхожести в контрольной партии (с использованием обычной воды).

Применение для полива модифицированной суспензии с водорастворимыми фракциями хитозана заметно ускоряло рост растений при посадке в грунт (рис. 3). В работе [6] показано, что основной эффект наблюдается в первые 5-6 суток выращивания. Суспензия хитозана способствовала и развитию листовой системы: после 18 дней выращивания в грунте при поливе модифицированной суспензией сухая масса 10 ростков составила 1,34 г, а в контрольной партии при поливе водой – 0,97 г.



**Рисунок 2.** Семена гороха на пятый день проращивания с использованием модифицированной суспензии хитозана (а), и воды без обработки (контроль) (б).



**Рисунок 3.** Фотографии ростков гороха на восемнадцатый день выращивания в грунте с использованием модифицированной суспензии хитозана (справа), и воды без обработки (слева).

Таким образом, газоразрядная обработка водных суспензий хитозана является достаточно простым и ресурсосберегающим способом получения стимулятора всхожести семян и раннего развития растений гороха.

#### **Литература:**

- [1] Наумова И. К., Титов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А., Прикладная физика. 2020. № 6. С. 34.
- [2] Наумова И. К., Субботкина И. Н., Титов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А., Прикладная физика. 2021. № 4. С. 40.
- [3] Khlyustova A., Sirotkin N., Naumova I., Tarasov A., Titov V., Plasma Chem. Plasma Process. 2022. V. 42. P. 587–603.
- [4] Titov V. A., Naumova I. K., Khlyustova A. V., Sirotkin N. A., High Energy Chemistry, 2023, 57, P. S238–S242
- [5] Wang D., Song R., Liu Y., Ren J., Zhang Y., Wang T., Qu G., J. Clean. Prod. 2021. V. 316. P. 128295.
- [6] Наумова И. К., Титов В. А., Хлюстова А. В., Агафонов А. В., Прикладная физика. 2023. № 5. С. 84-90.

tva@isc-ras.ru

## О МНОГООБРАЗИИ СЦЕНАРИЕВ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В БИНАРНЫХ НАНОЧАСТИЦАХ Co-Au

**С.С. Богданов, К.Г. Савина, В.С. Мясниченко, Н.Ю. Сдобняков**

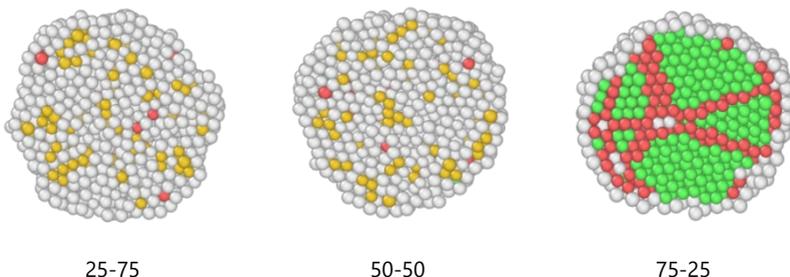
*ФГБОУ ВО ТвГУ, Тверь, Россия*

Актуальность исследований биметаллических наночастиц Co-Au была в достаточной мере описана нами в работах [1-3], в частности, при исследовании закономерностей структурообразования для системы ядро-оболочка. В данной работе мы планируем провести более подробное исследование процесса структурообразования в биметаллических наночастицах Co-Au.

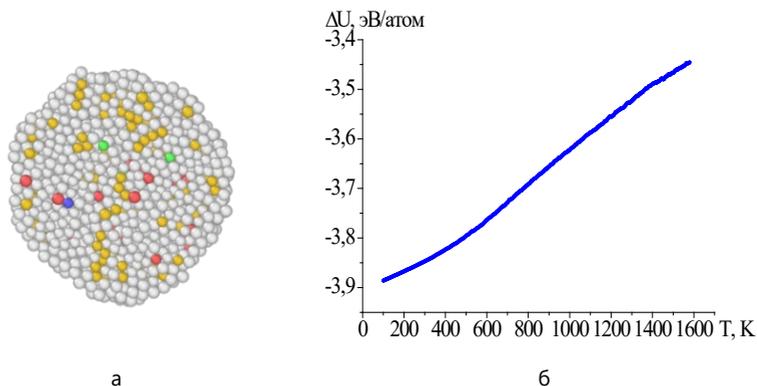
Методом молекулярной динамики с использованием потенциала сильной связи [4] исследуются бинарные наночастицы Co-Au трёх стехиометрических составов, размер наночастицы составляет 3000 атомов. Компьютерный эксперимент проводился методом молекулярной динамики, с использованием авторского программного обеспечения ClusterEvolution [5]. Исследуемые бинарные наночастицы нагревались до температуры плавления Co как более тугоплавкого металла, а затем охлаждались до 0,1 K со скоростью 0,3 K/пс. Шаг по времени в молекулярно-динамическом эксперименте составлял 1 фс. Далее структура полученных наночастиц исследовалась с использованием программного комплекса Ovito [6].

Анализируя полученные данные можно сделать вывод, что в составе с 25 ат.% Au преобладают кристаллические фазы, причем предпочтительными являются ГЦК и ГПУ фазы, а в составах с 50 ат.% и 75 ат.% содержанием Au образуются множественные малые ядра локальной икосаэдрической симметрии (см. рис. 1). Полученные данные хорошо согласуются с теоретическими и экспериментальными данными [7], которые предсказывают для данного диапазона (25-75%) процентного содержания кобальта в наночастице образование аморфной структуры. При увеличении размера бинарных наночастиц Co-Au до 5000 атомов мы сталкиваемся как с проблемой поиска скорости охлаждения, при которой наблюдается кристаллизация, так и возможностью обнаружения отдельных сценариев, в которых кристаллизация всё-таки происходит. На рис. 2 представлены результаты охлаждения эквиатомного состава, для которого не обнаруживалось образование кристаллических фаз (доля их составляет менее 5% см. рис. 2 а) при скорости охлаждения равной 0,3 K/пс. Данный

факт подтверждается как анализом структуры полученной наночастицы, так и видом калорической кривой потенциальной части внутренней энергии (см. рис. 2 б).



**Рисунок 1.** Бинарные наночастицы Co-Au различного состава в сечении плоскостью при температуре 0,1 К. Цветовое обозначение атомов соответствует соотнесённым им упорядоченным фазам: зеленые – ГЦК, красные – ГПУ, синие – ОЦК, желтые – ИК ядра, белые – нераспознанные.



**Рисунок 2.** Бинарная наночастица Co-Au эквиатомного состава, состоящая из 5000 атомов при температуре 0,1 К (а) и калорическая кривая, соответствующая процессу охлаждения (б). Цветовое обозначение атомов соответствует рис. 1.

На основе серии молекулярно-динамических экспериментов нами были изучены процессы структурообразования в биметаллических наночастицах Au-Co различного размера и состава. Было установлено, что выбранная биметаллическая система демонстрирует большое разнообразие конечных конфигураций наночастиц, полученных при

кристаллизации, а значит можно ожидать и различных физических характеристик, проявляющихся при сочетании определенного размера и состава биметаллической наночастицы.

**Литература:**

[1] Сдобняков Н.Ю., Колосов А.Ю., Богданов С.С. Моделирование процессов коалесценции и спекания в моно- и биметаллических наносистемах. Монография. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. 168 с.

[2] Сдобняков Н.Ю., Самсонов В.М., Колосов А.Ю., Васильев С.А., Мясниченко В.С., Соколов Д.Н., Савина К.Г., Веселов А.Д. К проблеме стабильности/нестабильности биметаллических структур Co (ядро)/ Au (оболочка) и Au (ядро)/ Co (оболочка): атомистическое моделирование // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, 2019. Вып. 11. С. 520-534.

[3] Sokolov D.N., Myasnichenko V.S., Bogdanov S.S., Savina K.G., Kolosov A.Yu., Ershov P.M., Veselov A.D., Sdobnyakov N.Yu. Monte Carlo simulation of structural phase transformations of Co-Au nanoclusters during crystallization // Book of Abstracts of the International Conference MELTS, September 12-18, 2021, Ekaterinburg, Russia. – Ekaterinburg: Ural State Pedagogical University, 2021. p. 79.

[4] Cleri F., Rosato V. Tight binding potentials for transition metals and alloys // Physical Review B. 1993. V. 48. I. 1. P. 22-33.

[5] Свидетельство № № 2011615692 Российская Федерация. Молекулярнодинамическое моделирование и биоинспирированная оптимизация бинарных и тройных металлических наноструктур (КластерЭволюшн) / В.С. Мясниченко; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2011613732; заявл. 23.05.2011; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 20.06.2011. – 1 с.

[6] Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO – the open visualization tool // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2010. V. 18. I. 1. P. 015012-1-015012-7.

[7] Yan, H.F., Guo, H.B., Shen, Y.X., Li, J.H., Liu, B.X. Nonequilibrium solid phases studied by thermodynamic calculation, molecular dynamics simulation, ab initio calculation and ion-beam manipulation in an immiscible Au–Co system at equilibrium // Acta Materialia. 2006. V. 54. P. 5293–5304.

borman\_9@mail.ru

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПЛЕНОК ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА

**Т. Г. Шикова<sup>1</sup>, С. А. Смирнов<sup>1</sup>, А. С. Поспелов<sup>1</sup>, И. И. Сажин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФБГОУВО "ИГХТУ", Иваново, Россия

Поливинилиденфторид (PVDF, ПВДФ) — полимер, который сегодня становится все популярнее благодаря высокой механической прочности, хорошей химической стойкости, пьезоэлектрическим и пирозэлектрическим свойствам. По популярности использования среди фторполимеров он уступает лишь тефлону. По своему строению ПВДФ представляет собой углеродные цепи, к каждому атому которых попеременно присоединены по два атома фтора и водорода. Имеется три основных типа конформации цепей:  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  [1]. В ходе промышленного производства не удается получить ПВДФ с одним типом цепей. В зависимости от преобладающего конформационного типа полимерный материал может обладать различными свойствами. Например, при доминировании цепей  $\beta$ -типа (плоский зигзаг) полимер обладает пьезоэлектрическими свойствами. В ПВДФ, как правило, сосуществуют кристаллические и аморфные области. Целью настоящей работы было исследование результатов воздействия плазмы пониженного давления, которая широко используется для модифицирования полимерных материалов, на пленки ПВДФ различных производителей.

В качестве объектов исследования использовали пленки ПВДФ производства Solvay, Шанхай, Китай (пленка №1), Shandong Huaxia, Китай (пленка №2), NEVAFLON, производства АО «Российский Научный Центр «Прикладная химия (ГИПХ)» толщиной 50 мкм (пленка №3).

Обработку образцов проводили в тлеющем разряде постоянного тока в аргоне и кислороде [2]. Пленки полимеров размером 1,5×9,4 см размещали в виде кольца по образующей на внутренней поверхности стеклянного реактора диаметром 3 см в зоне положительного столба разряда. Давление газа составляло 100 Па, линейная скорость потока газа – 30 см/с, ток разряда – 50, 80, 110 мА, время обработки – 5 - 10 мин.

Поверхность полимера исследовали методом Фурье–ИК-спектроскопии НПВО на спектрофотометре фирмы "Nicolet" типа "Avatar-360". Топологию

поверхности исследовали методом атомно-силовой микроскопии на приборе SOLVER P47-PRO в полуконтактном режиме. Краевые углы смачивания поверхности образцов дистиллированной водой определяли по фотографиям капель. Исследование пленок методом фазового анализа было проведено с использованием дифрактометра ДРОН ЗМ. Измерения массы образца проводили на аналитических весах CAUW 120D (CAS, Южная Корея). Анализ исходных образцов показал, что ИК спектры НПВО пленок №1 и №2 качественно и количественно близки между собой и отличаются от пленки №3. В ИК спектрах всех образцов наблюдаются полосы поглощения, которые могут быть отнесены к колебаниям в кристаллической фазе различных модификаций ( $\alpha$ - и  $\beta$ - формы). Результаты оценки доли пьезоактивной  $\beta$ -модификации по данным инфракрасной спектроскопии, выполненные по методике, приведенной в работе [1], представлены в таблице 1. Приведенные данные показывают, что у пленки марки Nevaflon содержание  $\beta$ -фазы, значительно выше, чем у образца №3.

**Таблица 1.** Доля  $\beta$ -фазы в различных пленках ПВДФ

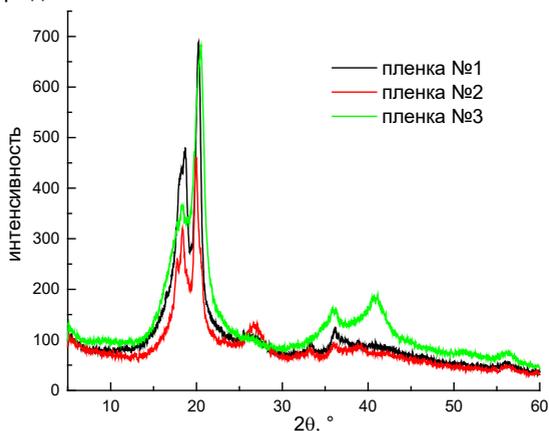
Вид пленки	$A_{\alpha}$ (766 $\text{см}^{-1}$ )	$A_{\beta}$ (840 $\text{см}^{-1}$ )	$F_{\beta} = A_{\beta} / (1.26 A_{\alpha} + A_{\beta})$
Пленка №1	0,384	0,241	0,33
Пленка №3	0,046	0,339	0,85

Примечание:  $A_{\alpha}$ ,  $A_{\beta}$  – оптическая плотность, измеренная в максимумах полос поглощения на волновых числах 766  $\text{см}^{-1}$  и 840  $\text{см}^{-1}$ .

Рентгенофазовый анализ пленок подтверждает результаты ИК спектроскопии: во всех исходных образцах полимеров присутствует кристаллическая фаза (рис.1). Рентгенограммы образцов №1 и №2 близки между собой. У образца №3 наблюдается сдвиг максимумов рефлексов по углам и появление новых рефлексов. Это говорит о том, что в последнем случае соотношение различных кристаллических фаз ( $\alpha$  и  $\beta$ ) иное, чем в образцах №1 и №2.

Плазмохимическая обработка приводит к изменению состава и структуры поверхностного слоя. Анализ образцов методом ИК спектроскопии НПВО показал, что наиболее значительные изменения в спектрах наблюдаются в области 1780 – 1550  $\text{см}^{-1}$  (рис. 4). Рост поглощения в этой области спектра может быть связан с образованием связей С=О в различном окружении, двойных связей С=C.

Обработка образцов в плазме аргона приводит к более значительному росту поглощения в выделенном участке спектра, чем при воздействии на полимер плазмы кислорода.

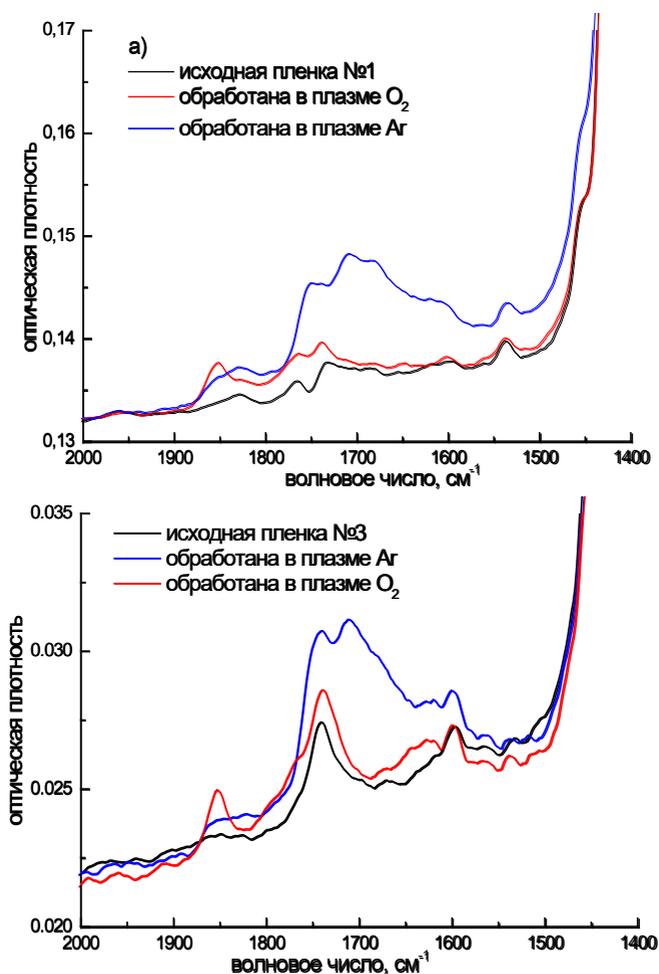


**Рисунок 1.** Рентгенограммы исходных пленок ПВДФ

В таблице 2 приведены результаты измерения поглощения на волновых числах 1734 и 1709  $\text{см}^{-1}$ , отнесенные к величине поглощения на  $1400 \text{ см}^{-1}$ , связанному с деформационными колебаниями связи С-Н в  $\text{CH}_2$  и выбранному в качестве опорной полосы. Так как у рассматриваемых образцов пленок ПВДФ до обработки в плазме поглощение в рассматриваемой области спектра различно, для сравнения результатов модифицирования этих пленок между собой полученные значения относительных оптических плотностей приведены к исходному образцу, для которого  $A_{1734, 1709}/A_{1400}$  составляет 1.

Можно отметить, что несмотря на более «жесткие» условия обработки (более высокий ток разряда и большее время модифицирования) изменения в ИК спектрах пленок №1 и 2 происходят в меньшей степени, чем для пленки №3.

Воздействие плазмы приводит не только к изменению состава поверхностного слоя, но и к деструкции полимеров. В таблице 3 приведены результаты гравиметрических измерений для пленок ПВДФ, из которых следует, что скорость убыли массы у пленок №1 и №2 меньше, чем у пленки 3, и для всех образцов скорость травления при обработке в плазме кислорода значительно выше, чем в плазме аргона.



**Рисунок 2.** ИК НРВО спектры пленок ПВДФ

Исследование поверхности пленок методом атомно-силовой микроскопии показало, что обработка в плазме приводит к изменению структуры поверхностного слоя и росту шероховатости. Изменение химического состава и топологии поверхности образцов, наблюдаемые после обработки пленок в плазме, приводит к улучшению смачиваемости полимеров (табл. 4).

**Таблица 2.** Данные ИК спектроскопии модифицированных пленок

Пленка	Условия обработки	A <sub>1734</sub> /A <sub>1400</sub>	A <sub>1709</sub> /A <sub>1400</sub>
№1	плазма O <sub>2</sub> , p=100 Па, I=110 мА, t <sub>обр</sub> = 10 мин	1,27	1,00
	плазма Ar, p=100 Па, I=110 мА, t <sub>обр</sub> = 10 мин	3,30	4,56
№2	плазма O <sub>2</sub> , p=100 Па, I=110 мА, t <sub>обр</sub> = 10 мин	1,05	1,50
	плазма Ar, p=100 Па, I=110 мА, t <sub>обр</sub> = 10 мин	1,27	4,50
№3	плазма O <sub>2</sub> , p=100 Па, I=80 мА, t <sub>обр</sub> = 5 мин	1,24	1,80
	плазма Ar, p=100 Па, I=80 мА, t <sub>обр</sub> = 5 мин	1,88	5,60

**Таблица 3.** Скорости убыли массы (г·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) пленок ПВДФ

Условия обработки	Пленка №1	Пленка №3
Плазма O <sub>2</sub> , 100 Па, 50 мА, 310К	1,37·10 <sup>-7</sup>	2,56·10 <sup>-7</sup>
Плазма Ar, 100 Па, 50 мА, 306К	2,44·10 <sup>-8</sup>	4,02·10 <sup>-8</sup>
Плазма O <sub>2</sub> , 100 Па, 80 мА, 315К	3,73·10 <sup>-7</sup>	5,80·10 <sup>-7</sup>
Плазма Ar, 100 Па, 80 мА, 309К	2,05·10 <sup>-7</sup>	2,95·10 <sup>-7</sup>

**Таблица 4.** Краевые углы смачивания пленок ПВДФ

Условия обработки образца	Пленка №1	Пленка №2	Пленка №3
исходный	88±1	84±2	88±1
плазма O <sub>2</sub> , p=100 Па, I=80 мА, время обработки 5 мин	44±2	55±3	51±1
плазма Ar, p=100 Па, I=80 мА, время обработки 5 мин	58±1	60±2	58±1

Таким образом, плазмохимическая обработка приводит к изменению состава и структуры поверхностного слоя всех исследованных ПВДФ пленок, которые могут быть использованы в электронике, биомедицине химических и ядерных производствах.

*Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671). Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (шифр научной темы FSFN-2022-0007).*

#### **Литература:**

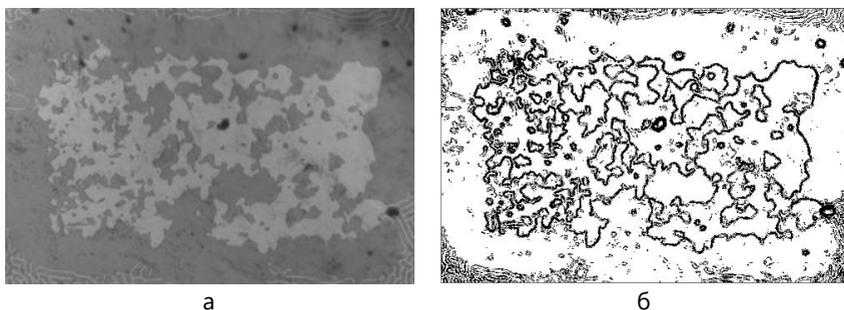
- [1] Sencadas, V.  $\alpha$  - to -  $\beta$  Transformation on PVDF Films Obtained by Uniaxial Stretch / V. Sencadas, V. M. Moreira, S. Lanceros-Mendez, A. S. Pouzada, R. Gregorio Jr. // Materials Science Forum. – 2006. – V. 514/516. – P. 872–876.
- [2] Kadnikov D.V., Ovtsyn A.A., Shibaev S.A., Smirnov S.A. Feedback in Non-equilibrium Oxidative Plasma Reacting with the Polyethylene// Plasma Physics and Technology. - 2017. V. 4, N 1. P. 104 – 107. DOI: 10.14311/ppt.2017.1.104  
[shikova@isuct.ru](mailto:shikova@isuct.ru)

## О ПРОБЛЕМЕ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НАНОПОКРЫТИЙ

**А.В. Низенко, В.А. Анофриев, Н.Ю. Сдобняков**

*ФГБОУ ВО ТвГУ, Тверь, Россия*

Определение фрактальной структуры на изображениях поверхности образцов зачастую сопряжено с трудностями, возникающими при цифровой обработке исследуемых изображений. Существующие программные продукты имеют ряд пользовательских ограничений, которые вынуждают исследователей разрабатывать и апробировать собственные программные продукты [1, 2]. Дефекты, проявляющиеся в ходе обработки изображений, можно разделить на два вида: изначальные и приобретённые. Изначальные дефекты изображения возникают из-за ошибок при получении самих изображений, например, с помощью сканирующей туннельной или атомно-силовой микроскопии. Сами изображения могут содержать шумы, иметь сдвиговые дефекты, иметь слишком высокую контрастность или высокую размытость. Для частичного устранения этих дефектов и получения подготовленных к фрактальному анализу изображений принято использовать матричные конволюционные фильтры с различными ядрами свёртки, некоторые фильтры и данные полученные в ходе расчётов с их использованием представлены в работах [3, 4]. Эти фильтры позволяют добиться наилучшего качества изображений, и как следствие избежать ошибок при определении фрактальной размерности исследуемых изображений. Однако полностью устранить изначальные дефекты не всегда представляется возможным, некоторые дефекты могут быть приняты за исходные данные самих изображений, из-за неустранимости этих дефектов и из-за излишней обработки могут возникать приобретённые дефекты, поскольку некоторые из матричных фильтров могут усилить проявление дефектов на итоговых изображениях. Пример обработки представлен на рис. 1 для изображения полей рассеяния базисной плоскости магнита КС-37, полученные средствами магнитооптики на поверхности индикаторной Vi:ФГ пленки после воздействия импульсным полем. Значение фрактальной размерности, отвечающей исходному изображению, составляет 1,76, после обработки – 1,68.



**Рисунок 1.** Пример работы фильтра: а – исходное изображение, б – изображение после обработки.

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006).

#### **Литература:**

- [1] Свидетельство № 2021618928 Российская Федерация. FractalSurface: программа для анализа поверхности на наноуровне / Н.Ю. Сдобняков, В.А. Анофриев, В.А. Кошелев, А.С. Антонов, Д.В. Иванов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет». № 20216180353; заявл. 27.05.2021; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 02.06.2021. 1 с.
- [2] Свидетельство № 2023614856 Российская Федерация. FractalSurface 2.0: программа для анализа поверхности на наноуровне / Н.Ю. Сдобняков, В.А. Анофриев, А.В. Низенко, А.С. Антонов, Д.В. Иванов, Н.Б. Кузьмин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет». № 2023613525; заявл. 28.02.2023; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06.03.2023. 1 с.
- [3] Анофриев В.А., Низенко А.В., Иванов Д.В., Антонов А.С., Сдобняков Н.Ю. К проблеме автоматизации процесса определения фрактальной размерности // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. Вып. 14. С. 264-276.
- [4] Иванов Д.В., Васильев С.А., Сдобняков Н.Ю., Романовская Е.В., Анофриев В.А., Кошелев В.А., Антонов А.С. Моделирование процесса формирования фрактальных металлических пленок // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2020. Вып. 12. С. 424-437.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И УСЛОВИЙ В НАПЫЛИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ НА ЛАЗЕРНУЮ АБЛЯЦИЮ YBCO КЕРАМИКИ

**И. С. Позыгун<sup>1</sup>, Г. М. Серопян<sup>1</sup>, С. А. Сычев<sup>1</sup>**

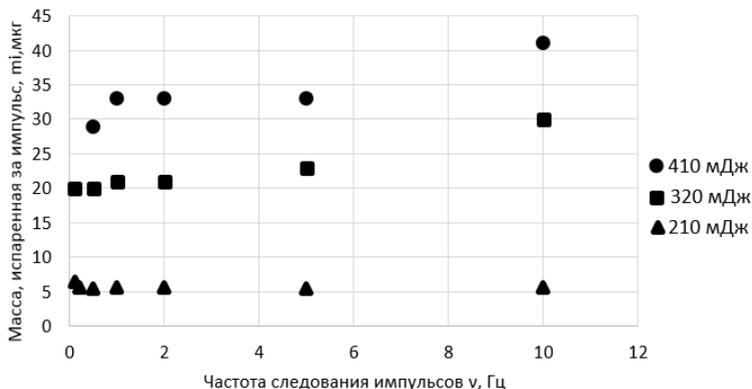
<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «ОмГУ им. Ф.М. Достоевского», Омск, Россия

Метод лазерной абляции является наиболее эффективным для выращивания тонких YBCO пленок, на основе которых изготавливаются пленочные элементы сверхпроводниковой микроэлектроники. Механизмы отрыва частиц от мишени, переноса частиц на подложку в лазерной плазме, формирования и роста пленок определяют качество получаемых пленок и структур на их основе [1]. Воздействие лазерного импульса на мишень зависит от свойств материала мишени и параметров лазерного излучения [2, 3]. На сегодняшний день остается нерешенной проблема наличия на поверхности пленок капель расплавленного материала мишени, что повышает брак при изготовлении сверхпроводящих пленочных датчиков. Оптимизация параметров лазерного излучения и условий в напылительной камере могут способствовать уменьшению размеров и количества капель.

Целью работы является исследование влияния параметров лазерных импульсов и температуры в напылительной камере на лазерную абляцию YBCO керамики, а также расчет пороговой интенсивности импульсного лазерного излучения, при котором начинает плавиться YBCO керамика. В работе применялся твердотельный наносекундный лазер с Nd:YAG стержнем. Длина волны излучения составляла 1064 нм, длительность импульса 16 нс.

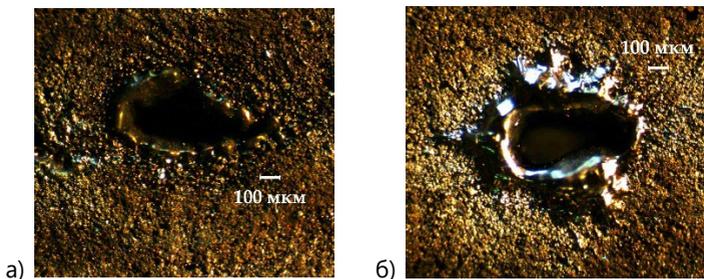
Влияние частоты следования импульсов на эффективность лазерной абляции отслеживалось по массе, испаренной за один импульс. На рис. 1 показана зависимость испаренной за импульс массы  $m_i$  от частоты следования импульсов  $\nu$  для значений энергии импульса 210, 320 и 410 мДж. Из графиков видно, что при увеличении частоты следования импульсов эффективность лазерной абляции YBCO керамики растет для импульсных энергий 410 и 320 мДж, а для импульсной энергии 210 мДж практически не меняется. Полученные зависимости можно объяснить тем, что при больших импульсных энергиях и больших частотах в материале керамики в зоне

облучения накапливается тепловая энергия, приводящая к появлению расплава в кратере YBCO материала. А при низких частотах скважность лазерных импульсов достаточная для отвода значительной части тепловой энергии из области облучения, что снижет возможность образования жидкой фазы материала.



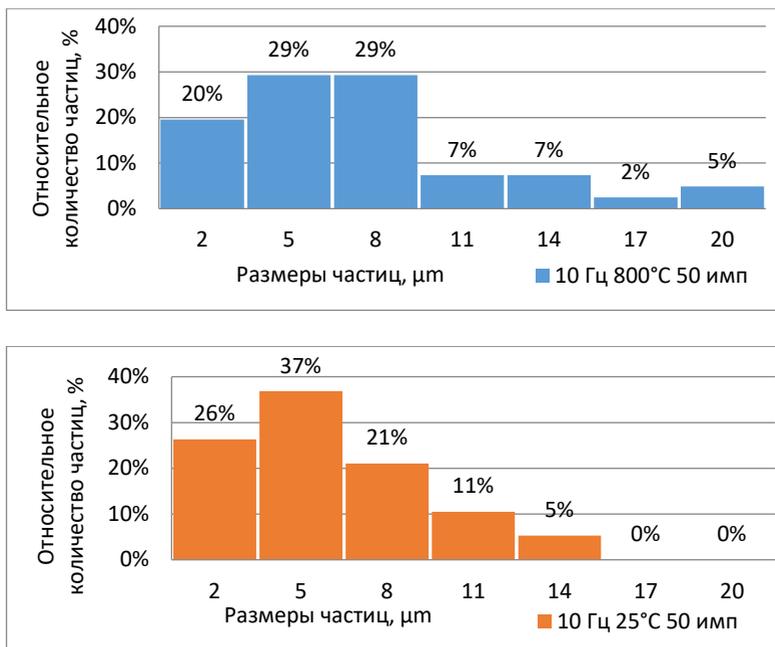
**Рисунок 1.** Графики зависимости испаренной за импульс массы  $m_i$  от частоты следования лазерных импульсов  $\nu$ .

На рис. 2 показаны микрофотографии кратеров, полученных при импульсной энергии 320 мДж и частоты следования импульсов 0,1 Гц (а) и 10 Гц (б). Наблюдается уменьшение количества выброшенного расплава материала вокруг кратера с увеличением скважности импульсов.



**Рисунок 2.** Изображение кратеров для частоты следования импульсов 0,1 Гц (а) и 10 Гц (б).

Для построения гистограмм распределения капель были проведены эксперименты по распылению мишени на монокристаллические подложки SrTiO<sub>3</sub> при частоте следования импульсов 10 Гц, количестве импульсов N = 50 для двух температур напыления 800 и 25 °С. Импульсная энергия и плотность мощности составляли 210 мДж и 6,7·10<sup>11</sup> Вт/см<sup>2</sup> соответственно. Гистограммы распределения капель по размерам представлены на рис. 3. Рост температуры мишени способствует образованию расплава в кратере, что приводит к росту доли крупных капель.



**Рисунок 3.** Гистограммы распределения капель по размерам.

Согласно работе [4] кластерный механизм отрыва начинает преобладать над капельным при плотности мощности от 2,5·10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup> и выше. Используя теорию из работы [5], рассчитаем нижний порог плотности мощности, при котором появляется жидкая фаза в кратере мишени:

$$I_{\text{имп}}^{\text{пор}} = \frac{(T - T_H)k\sqrt{\pi}}{2(1 - R)\sqrt{\alpha\tau}}$$

где  $\tau$  – длительность импульса,  $R$  – коэффициент отражения YBCO керамики,  $\alpha$  и  $k$  – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности керамики,  $T$  – температура плавления керамики,  $T_n$  – начальная температура. Теплопроводность керамики YBCO в интервале температур от 25 до 350 °C практически неизменна и находится в интервале 0,8-1,2 Вт/(м·К), а температуропроводность при комнатной температуре составляет  $0,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с [6]. Тогда рассчитанная пороговая плотность мощности  $I_{\text{имп}}^{\text{nop}} = 8,8 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Следовательно, в интервале плотности мощности  $10^6$ - $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> преобладает капельный механизм отрыва частиц от мишени, а при увеличении плотности мощности выше  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup> начинает доминировать кластерный механизм отрыва частиц. Однако при  $I \approx 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> капли появляются снова, что указывает о расходе энергии излучения не только на плазму и сопровождающим ее излучением, но и на накопление тепловой энергии в материале.

По результатам работы можно сделать следующие выводы: эффективность лазерной абляции YBCO керамики растет с повышением импульсной энергии, а частота следования импульсов начинает влиять на эффективность лазерной абляции при импульсных энергиях выше 300 мДж. Понижение температуры мишени и частоты следования импульсов способствуют понижению количества и размеров капель на пленке. Напыление сверхпроводящих YBCO пленок рекомендуется проводить при плотности мощности  $10^8$ - $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>.

### Литература:

- [1] В.С. Воробьев. Плазма, возникающая при взаимодействии лазерного излучения с твердыми мишенями. УФН. 1993. Том 163. №12. С. 51-83.
- [2] Парфенов В.А. Лазерная микрообработка материалов. СПб.: Из-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
- [3] В.П. Бессмельцев, Е.Д. Булушев. Оптимизация режимов лазерной микрообработки (обзор). Автометрия. 2014. Т. 50, № 6. С. 3-21.
- [4] К.Н. Югай, Г.М. Серопян, А.Б. Муравьев и др. Макроструктура ВТСП YBCO пленок, выращенных методом лазерной абляции. ЖТФ. 1998. Т. 98. № 2. С. 48-51.
- [5] В.П. Вейко. Технологические лазеры и лазерное излучение. ИТМО Санкт-Петербург. 2007. С. 6-7.
- [6] Ю.А. Кириченко, К.В. Русанова, Е.Г. Тюрина. Теплопроводность высокотемпературных сверхпроводящих материалов. Харьков. 1989. С. 33.

ser\_gm@mail.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕВРАЗИЙСКОЙ ПАТЕНТНО-ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ (ЕАПАТИС) ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**С. В. Лапушкин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Евразийское патентное ведомство, Москва, Россия*

Значение анализа патентной информации при формировании технической политики в процессе создания конкурентоспособных технологий и образцов новой техники трудно переоценить. Патент является носителем достаточно емкой информации. Информация, содержащаяся в патентных документах, является уникальной: из 100% сведений, содержащихся в ней, лишь только 15-20% можно найти в других источниках информации. По своей оперативности она превосходит другие источники информации. По сведениям о правовом статусе изобретения можно судить о возможности его использования третьими лицами. Выдача патентного документа сопровождается публикацией полного описания изобретения. Достоверность информации об изобретении подтверждается выводами экспертизы.

Как правило, текущая патентная информация отличается гарантированной новизной. Для патентной документации характерна унифицированность, т.е. приблизительно одинаковая форма изложения всех документов, подготавливаемых в соответствии со стандартами Всемирной организации интеллектуальной собственности (ВОИС), что делает их удобными для изучения. В ней приводится множество библиографических данных, которые можно систематизировать и использовать для анализа. Следовательно, патентный документ содержит не только информацию о новизне, о том, что известно (предшествующий уровень техники), но в ряде случаев дает подробную информацию о состоянии технического развития в соответствующей области.

Изучение актуальной патентной информации позволяет экономить значительные средства на проведение научно-исследовательских работ. Кроме того, патентная документация может дать новый импульс для проведения дальнейших исследований. На основе анализа патентной документации делается вывод о целесообразности проведения разработок

по тем или иным направлениям. Динамика патентования по определенной тематике дает возможность оценить, является ли данная область стабильной или же она изменяется.

Для поиска патентной информации могут использоваться платные и бесплатные специализированные патентные базы данных, а также патентные базы данных свободного доступа в Интернет.

В Евразийском патентном ведомстве разработана и используется Евразийская патентно-информационная система (ЕАПАТИС) в которой содержится около 90 млн. патентных документов мирового патентного фонда. Уникальной особенностью системы является наличие наиболее полного в мире массива русскоязычных документов, включая документацию Евразийского патентного ведомства (ЕАПВ), России и СССР (с 1924г), стран-участниц Евразийской патентной конвенции, а также Грузии, Молдовы, Узбекистана, Украины. Англоязычный фонд включает патентные документы ВОИС, Европейского патентного ведомства (ЕПВ), а также документы наиболее развитых стран мира – США, Японии, Германии, Франции, Китая, Кореи и других.

ЕАПАТИС позволяет проводить различные виды поиска: нумерационный, тематический (по индексам МПК), по ключевым словам и фразам в полных описаниях патентов с учётом контекстного расстояния, по именам авторов, заявителей и патентообладателей.

В настоящее время в России действует государственный стандарт на проведение патентных исследований. Патентно-информационные исследования должны осуществляться при проведении любых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в рамках государственных заказов и государственных контрактов.

Результаты исследований должны заканчиваться оформлением отчета согласно ГОСТ Р15.011-2022 [1].

ЕАПАТИС позволяет автоматически формировать данные для отчёта о патентных исследованиях по ГОСТ Р15.011-2022 в виде таблицы «В 6.1. – Патентная документация».

Таким образом, использование ЕАПАТИС позволяет проводить полноценные патентные исследования в одной системе с автоматическим формированием отчётных материалов по ГОСТ Р15.011-2022.

[slapushkin@eapo.org](mailto:slapushkin@eapo.org)

## СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ 80-180 Å ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ПО ПОВЕРХНОСТИ ФЕРРИТА

**С. М. Климович<sup>1,2</sup>, А. В. Бернацкий<sup>1</sup>, С. Н. Андреев<sup>1</sup>, А. П. Шевелько<sup>1</sup>, С. Н. Цхай<sup>1</sup>, С. Ю. Савинов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

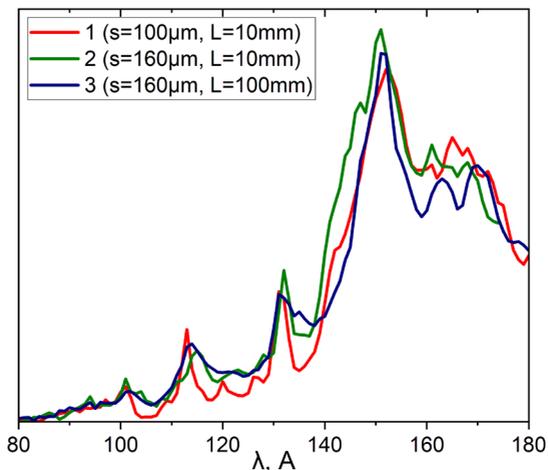
Одним из источников УФ-излучения, находящего своё применение в различных областях человеческой деятельности [1], является разряд по поверхности феррита, предложенный в качестве альтернативы газовым разрядам и взрывающимся проволочкам. Изучались механизмы генерации излучения [2, 3], а также его пространственные характеристики [4, 5]. Наряду с этим исследовался спектр в области среднего УФ-излучения [6, 7], однако область экстремального УФ-излучения изучена слабо. В рамках данной работы исследовался спектр излучения разряда по поверхности феррита в диапазоне 80-180 Å.

Эксперимент проводился на установке БАЦ [4, 5], включающей в себя генератор импульсов с амплитудой до 300 кВ, током разряда до 1 кА, фронтом нарастания на уровне ~1 нс и длительностью ~20 нс. Количество импульсов в ходе эксперимента менялось от 30 до 60. Образец из феррита (Ni-Zn)Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> марки M1000НН с предварительно прожжённым каналом размещался в высоковакуумной камере при давлении 10<sup>-5</sup>-10<sup>-4</sup> мбар. Габариты феррита составляли 50×20×4 мм<sup>3</sup>.

Для отображения спектра применялся оптический спектрометр GIS-1 [8] со сферической дифракционной решёткой с 600 штр./мм. Спектр регистрировался на фотоплёнку УФ-4, которая обрабатывалась в проявителе D19 в течение 2-3 минут [9].

Спектры, полученные при разных расстояниях L от феррита до входной щели спектрометра, а также при разных ширинах s входной щели, хорошо согласуются друг с другом (см. рис. 1). Это позволяет, руководствуясь

атласом [10], выделить в них линии электронных переходов в ионах кислорода (см. табл. 1). Такая интерпретация результатов может иметь место, поскольку кислород входит в состав феррита, а также способен адсорбироваться на его поверхности.



**Рисунок 1.** Измеренные спектры разряда, нормированные на единичную площадь. Получены в следующих вариациях  $s$  и  $L$ : 1 –  $s=100$  мкм,  $L=10$  мм; 2 –  $s=160$  мкм,  $L=10$  мм; 3 –  $s=160$  мкм,  $L=100$  мм

$\lambda$ , Å	Излучающий элемент	Излучающий переход
110	O VI	$1s^2 2p \rightarrow 1s^2 6d$
116	O VI	$1s^2 2s \rightarrow 1s^2 4p$ ; $1s^2 2p \rightarrow 1s^2 5d$
129.8	O VI	$1s^2 2p \rightarrow 2s^2 4d$
150	O VI	$1s^2 2s \rightarrow 1s^2 3p$
151.5	O V	$2s 2p \rightarrow 2s 4d$
163	O V	$2p^2 \rightarrow 2p 4d$ ; $2p^2 \rightarrow 2p 4s$
171	O V	$2s 2p \rightarrow 2s 4d$ ; $2s^2 \rightarrow 2s 3p$

**Таблица 1.** Обнаруженные электронные переходы

Работа выполнена за счёт средств гранта Российского научного фонда (проект №19-79-30086).

### Литература:

- [1] D. Attwood. Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications // Cambridge University Press. 1999. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139164429>
- [2] A.A. Petrov, S.M. Klimovich, N.V. Pestovskii, I.N. Tilikin, S.Yu. Savinov A.A. Formation of the Magnetization Wave in the Prebreakdown Discharge Stage over the Ferrite Surface // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2023, V.50, No.11, P.504-510. <https://doi.org/10.3103/S106833562311009X>
- [3] I.N. Tilikin, S.Yu. Savinov, N.V. Pestovskii, et al. Coherent x-ray radiation induced by high-current breakdown on a ferrite surface // Journal of Physics D: Applied Physics. 2022, V.55, No.40, P.405006. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac83cf>
- [4] S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, G.A. Dushkin, et al. Spatial distributions of x-ray radiation during ferrite surface breakdown // Journal of Physics: Conference Series. 2022, V.2270, 012039 (5pp). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2270/1/012039>
- [5] S.N. Andreev, A.V. Bernatskiy, G.A. Dushkin, et al. Spatial Characteristics of Radiation Initiated by a Discharge over the Ferrite Surface // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2021, V.48, P.321-326. <https://doi.org/10.3103/S1068335621100031>
- [6] S. Kashiwabara, K. Watanabe, R. Fujimoto. Ultraviolet emission spectra from formed-ferrite plasma sources // Journal of Applied Physics. 1988, V.63, No.8, P.2514-2516. <https://doi.org/10.1063/1.341031>
- [7] S. Kashiwabara, K. Watanabe, R. Fujimoto. Highly conductive amorphous-ferrite formed by excimer laser material processing // SPIE. 1991, V.1397, P.803-806. <https://doi.org/10.1117/12.25927>
- [8] A.P. Shevelko. Spectral instruments for x-ray and VUV plasma diagnostics // Journal of Physics: Conference Series. 2018, V.1115, P.022042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/2/022042>
- [9] E.D. Kazakov, A.P. Shevelko, O.F. Yakushev. Sensitometric Characteristics of the UF-4 Photographic Film for its Usage in High Temperature Plasma EUV-Spectroscopy // Problems of Atomic Science and Technology. 2017, V.40, No.3, P.63-67. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2017-40-3-63-67>
- [10] R.L. Kelly. Atomic and Ionic Spectrum Lines below 2000 Angstroms: Hydrogen through Krypton. Part I (H-Cr) // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 1987, V.16.

s.klimovich@lebedev.ru

## ОСОБЕННОСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК РbTe ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТАКТА С ПОДЛОЖКОДЕРЖАТЕЛЕМ

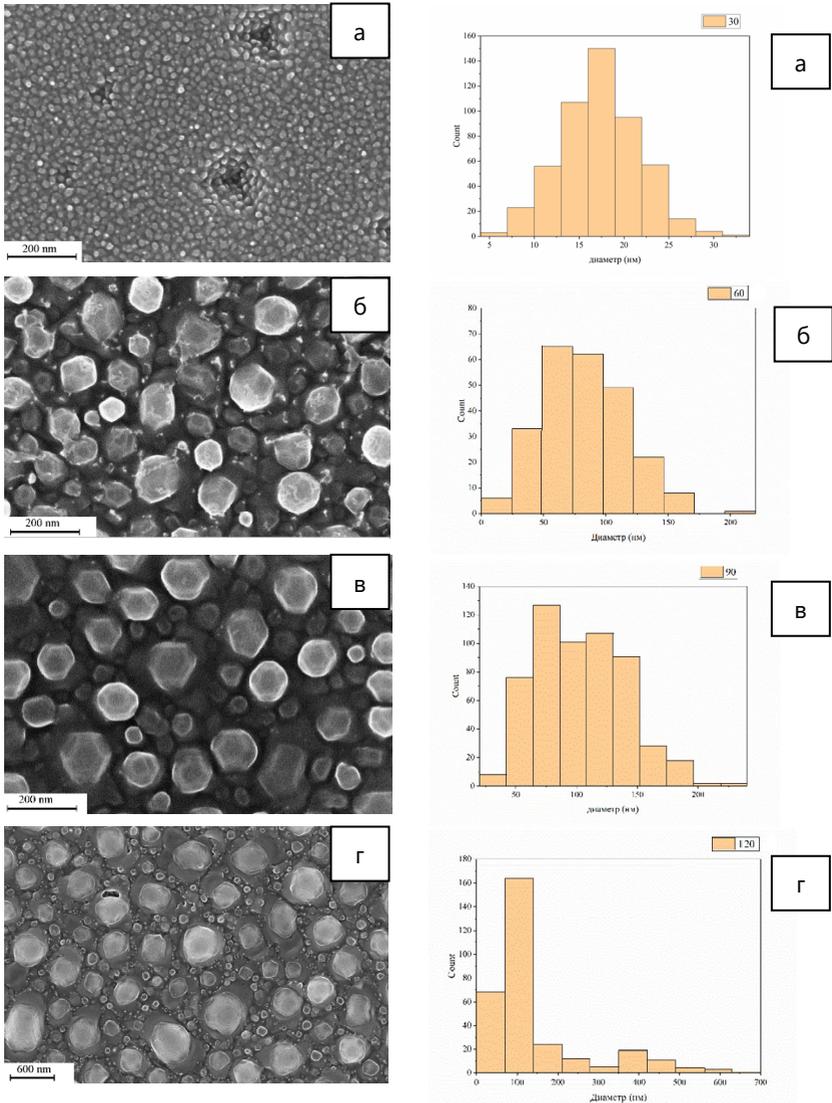
**Я. Д. Белов<sup>1</sup>, С. П. Зимин<sup>1, 2</sup>, И. И. Амиров<sup>1</sup>, Л. А. Мазалецкий<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, Ярославль, Россия

<sup>2</sup>ЯрГУ им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия

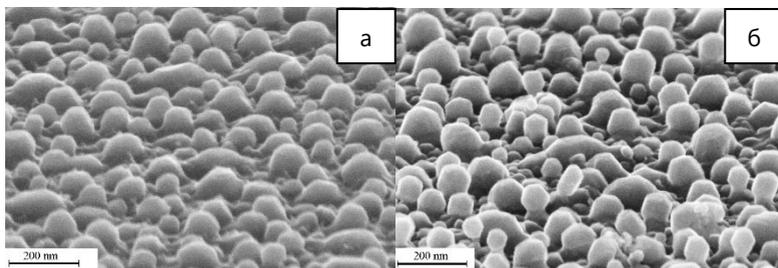
Ионно-плазменная обработка поверхности является эффективным способом модификации поверхности пленок халькогенидных материалов с целью придания им необходимых оптических свойств. Ранее нами было показано, что в зависимости от времени обработки при низкой энергии ионов (25 эВ) на поверхности пленки RbTe образовывались наноструктуры различной формы [1]. Формирование таких структур могло быть обусловлено нагревом пленок, лежащих на держателе, температура которых не контролировалась. В данной работе образцы были установлены на кремниевой пластине на вакуумной смазке, которая обеспечивала тепловой контакт с пластиной Si. В этом случае температура образца соответствовала температуре кремниевой пластины, которая может быть измерена лазерно-интерферометрическим способом [2]. Целью работы являлось исследование наноструктурирования поверхности RbTe при ионно-плазменной обработке в условиях различного теплового контакта образца с подложкодержателем.

Пленки теллурида свинца толщиной 1-2 мкм были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках (111) BaF<sub>2</sub> авторами [3]. Ионно-плазменная обработка проводилась в реакторе плотной аргоновой плазмы ВЧ индукционного разряда (13,56 МГц, 800 Вт). Обработка осуществлялась при энергии ионов 25эВ, продолжительность обработки варьировалась от 60 до 180 с. Исследования морфологии поверхности проводились с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Zeiss Supra-40.

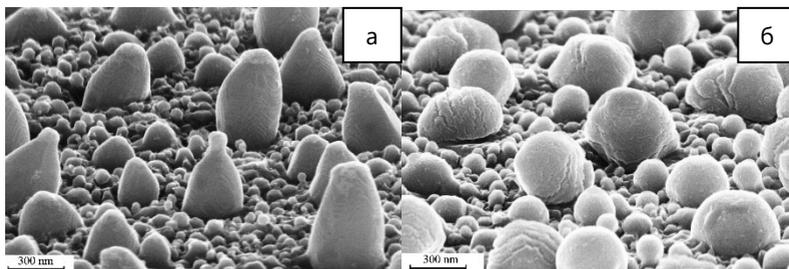


**Рисунок 1.** Поверхность пленок PbTe после обработки в плазме аргона в течение 30 (а), 60 (б), 90 (в), 120 (г) сек и гистограммы распределения латеральных размеров образований.

После обработки поверхности в течение 30 с на исходной гладкой поверхности возникали однородные каплеобразные структуры размером меньше 20 нм с поверхностью плотностью  $\sim 10^{11}$  см<sup>-2</sup> (рис. 1а). Дальнейшая обработка поверхности приводила к резкому увеличению квазисферических образований с частичной огранкой (рис. 1б, в), средние размеры которых после 60 и 90 секундной обработки, согласно приведенным гистограммам, достигали 100-200 нм. Близкие по размерам и форме нано – и субмикронные структуры наблюдались нами ранее в случае, когда образцы устанавливались на держателе без теплового контакта [1]. Результаты сравнения показаны на рис. 2 и рис. 3. Важно отметить, что длительности обработки в сравниваемых режимах были различными.

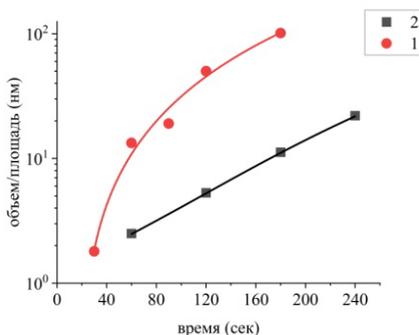


**Рисунок 2.** РЭМ снимки поверхности пленки PbTe после обработки в плазме Ar на пластине Si с тепловым контактом (а) и без теплового контакта на Al держателе (б)[1]. Время обработки: 60 с (а), 180 с (б).



**Рисунок 3.** РЭМ снимки поверхности пленки PbTe после обработки в плазме Ar на пластине Si с тепловым контактом (а) и без теплового контакта на алюминиевом держателе (б) [1]. Время обработки: 180 с (а), 600с (б).

Как показал анализ состава образующихся на поверхности квазисферических структур, они состоят в основном из свинца [1]. На основе полученных гистрограмм латеральных размеров с учетом их высоты можно определить объем металла. Частное от деления объема наноструктур на площадь анализируемой поверхности соответствует толщине пленки металла при равномерном его распределении на поверхности. В случае, когда образец обрабатывался на пластине Si толщина приведенного слоя металла намного больше (рис. 4).



**Рисунок 4.** Толщина приведенного слоя металла на поверхности PbTe при обработке с разным тепловым контактом. 1- образец на кремниевой пластине с тепловым контактом, 2 – образец на Al держателе без теплового контакта.

Работа выполнена в рамках государственного задания ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, тема № FFNN-2022-0017, РЭМ-исследования проведены в ЦКП «Диагностика микро- и наноструктур при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### Литература:

- [1] Зимин С.П., Амиров И.И., Наумов В.В., Белов Я.Д., Abramof E., Rappl P.H.O., Поверхность, 2022,10, 66–74.
- [2] Магунов А.Н. Теплообмен неравновесной плазмы с поверхностью. – М: Физматлит, 2005. – 312 с.
- [3] Rappl P.H.O., Closs H., Ferreira S.O., Abramof E., Boschetti C., Motisuke P., Ueta A.Y. and Bandeira I.N., J. Cryst. Growth, 1998, 191, 466–471.

yadblov@gmail.com

## АНОМАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ЖИДКОЙ СУРЬМЫ: AB-INITIO АНАЛИЗ

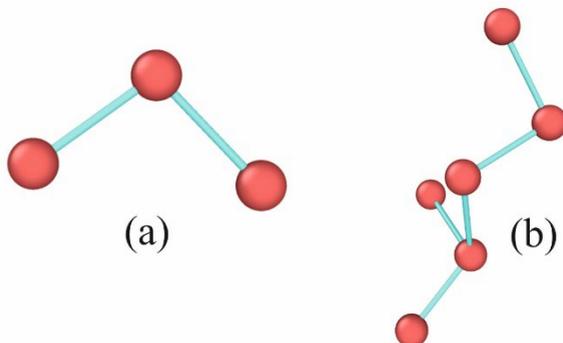
**А. А. Цыганков<sup>1</sup>, Б. Н. Галимзянов<sup>1</sup>, А. В. Мокшин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия*

Равновесный расплав сурьмы вблизи плавления характеризуется особенностями в структуре, которые отсутствуют в равновесных однокомпонентных простых жидкостях. Эти особенности выражаются на эксперименте в виде плеча в радиальной функции распределения  $g(r)$  и статическом структурном факторе  $S(k)$  [1]. Причины этих особенностей до сих пор мало изучены и не имеют единой точки зрения на этот вопрос, которые, в основном, сводились либо к следствию необычных особенностей межатомного взаимодействия, либо наличием кластеров и димеров [2, 3]. Цель данной работы – интерпретация структуры жидкой сурьмы, используя методы первопринципного (ab-initio) моделирования и доступные экспериментальные данные.

Для проверки воспроизводимости структуры расплава сурьмы было проведено ab-initio моделирование молекулярной динамики состояния, соответствующему температуре  $T = 923$  К и давлению  $P = 1$  атм в пакете VASP [4]. Расчет радиальной функции распределения  $g(r)$  и статического структурного фактора  $S(k)$  из полученных данных показал, что структура рассматриваемой системы воспроизводится методами первопринципных расчетов.

Поскольку структурные особенности жидкой сурьмы воспроизводимы методами моделирования, то следует проверить наличие кристаллоподобных образований в жидкой сурьме. Для этого были проведены расчеты распределений локального ориентационного порядка  $q_4$  и  $q_6$  [5]. Распределения показали отсутствие каких-либо кристаллоподобных структур. Чтобы проверить принципиальное наличие упорядоченных образований в расплаве, рассчитывались распределения пар атомов по временам соседства [6]. Полученные результаты указывают на то, что в сурьме вблизи плавления реализуются, по крайней мере, пары связанных атомов.



**Рисунок 1.** (а) Элементарная единица цепочки – триплет. (б) Пример цепочки, составленной из триплетов.

Для характеристики структур, реализующихся в расплаве, был произведен расчет распределений по углам и длинам связей. Обнаружено, что структурные образования представляют собой триплеты с длинами связи 3.07 Å и 4.7 Å, и углами 45° и 90°, пример которых показан на Рис. 1.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет-2030».

#### **Литература:**

- [1] Y. Waseda, K. Suzuki, Phys. Stat. Sol. (b). 47, 581 (1971).
- [2] R. O. Jones et al., J. Chem Phys. 146, 194502 (2017).
- [3] J. Hafner, W. Jank, Phys. Rev. B. 45, 2739 (1992).
- [4] G. Kresse, J. Hafner, Phys. Rev. B. 47, 558 (1993).
- [5] P. Steinhardt et al., Phys. Rev. B. 28, 784 (1983).
- [6] A. V. Mokshin et al., Phys. Chem. Chem. Phys. 22, 4122 (2020).

tsigankov.artiom@yandex.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ С ПРОДУВОМ ГАЗА В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОСТАНОВКЕ Е. С. Самсонова<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1, 2</sup>, А. Ю. Шемахин<sup>1</sup>, Т. Н. Терентьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>К(П)ФУ, Казань, Россия

<sup>2</sup>КНИТУ, Казань, Россия

Представлена двумерная осесимметричная модель плазмы высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда пониженного давления. Модель была реализована на платформе COMSOL Multiphysics 6.0. Распределение характеристик разряда в потоке частично ионизированного аргона рассчитываются в самосогласованной постановке, устанавливается взаимосвязь внутренних параметров разряда с внешними управляющими параметрами режима. Модель включает в себя уравнение Навье-Стокса, уравнения для плотности ионов и плотности электронов, уравнение плотности энергии электронов, уравнение теплопереноса, уравнения Максвелла и соответствующие граничные условия на границах разряда. В качестве начального приближения двумерной задачи используется решение, полученное для упрощенной модели в одномерном случае. Одномерная модель рассматривается как нелинейная спектральная задача с параметром для системы, включающей уравнения Максвелла и уравнения непрерывности электронов. В работе приводятся результаты численных экспериментов по расчету характеристик ВЧИ разряда (1.76 МГц) пониженного давления (13 - 130 Па), разработаны рекомендации по управлению режимов поддержания разряда, рабочим газом в котором является аргон. Результаты моделирования верифицируются по экспериментальным данным.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-71-10055).

ek.s.pavlova@gmail.com

## ИЗОТЕРМЫ АДСОРБЦИИ ГАЗОВ В НАНОПОРИСТЫХ LOW-K ДИЭЛЕКТРИКАХ В УСЛОВИЯХ КРИОГЕННОГО ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ

**Р.А. Гайдукасов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, Москва, Россия

По мере уменьшения топологических размеров интегральных схем в системе металлизации сверхбольших интегральных схем (СБИС) для снижения динамического энергопотребления, улучшения частотных характеристик и уменьшения перекрестных помех используются пористые диэлектрики с ультранизкой диэлектрической проницаемостью, за которыми закрепился термин low-k [1]. Хотя проблемы интеграции пористых диэлектриков были успешно решены, начиная с топологического размера 45 нм, новые топологические размеры, вплоть до 7 нм, требуют решения новых задач, таких как создание новых перспективных методов травления с требуемыми точностными характеристиками, новых металлов в качестве проводников и исследование барьерных слоев для подавления диффузии в процессе работы СБИС [2]. Особенно активно развивается направление создания новых диэлектрических материалов [3] с альтернативной химической природой, что в перспективе потребует разработки и исследования специальных методов травления.

Плазмохимическое травление является важнейшим и критическим этапом их обработки. Пористые материалы деградируют из-за проникающих в них радикалов [4], ВУФ фотонов, энергичных ионов и электронов [5]. В результате "плазменного повреждения" изменяется химический состав low-k диэлектриков – гидрофобные связи заменяются гидрофильными. Также могут наблюдаться и другие негативные эффекты, такие как уплотнение, накопление захваченных зарядов и т.д. В результате наблюдается повышение диэлектрической проницаемости, и снижение частотных характеристик. Одним из способов снижения деградации является метод криогенного плазменного травления. При низкой температуре и определенном давлении в порах происходит конденсация плазмообразующих газов и побочных продуктов, что препятствует проникновению активных радикалов в поры и уменьшает повреждение low-k диэлектриков. Этот подход известен для различных плазмообразующих газов с высокой молекулярной массой,

склонных к конденсации в порах при низких температурах, таких как  $\text{CF}_3\text{Br}$  [6] и  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$  [7].

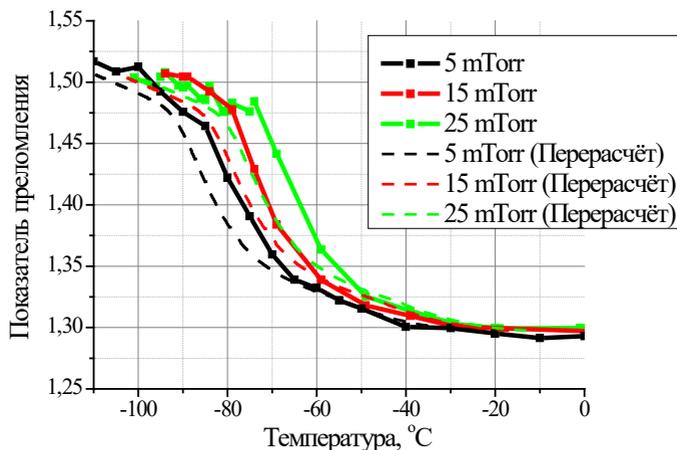
С другой стороны, изменение оптических характеристик пленки при конденсации паров в порах было положено в основу широко применяемого диагностического метода адсорбционной порометрии [8], который позволяет определять степень пористости, распределение пор по размерам и другие характеристики пористых пленок. Этот метод реализован для разных разновидностей адсорбатов в широком диапазоне температур и давлений. Как правило, в эксперименте изменяют парциальное давление адсорбата в газовой фазе над образцом при фиксированной температуре, наблюдая при этом изотермы адсорбции и десорбции. Такие подходы могут быть реализованы как в атмосферном варианте, так и *in situ*, непосредственно в плазменном реакторе.

Наиболее простым в реализации и подходящим для применения *in situ* является метод лазерной интерферометрии [9]. Метод основан на измерении коэффициента отражения от образца, покрытого исследуемой пленкой. При толщинах пленок порядка длины волны существует зависимость коэффициента отражения пленки от ее толщины. Для таких экспериментов не нужно наличие специальных портов на стенках реактора и её можно использовать для *in situ* контроля тонких пленок. Недостатком метода является неоднозначный характер зависимости коэффициента от толщины, который требует знания начальной толщины пленки.

В данной работе был разработан метод для измерения *in situ* параметров адсорбции плазмообразующего газа в порах нанопористого диэлектрика в условиях установки криогенного плазменного травления. Метод схож с методом лазерной интерферометрии, но коэффициент отражения измеряется не для одной длины волны, а в большом спектральном диапазоне, что позволяет получать необходимые данные об образце, для успешного вычисления степени заполнения пор. Метод был применён для получения изобар адсорбции газа  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$  в пористом диэлектрике с ультранизкой диэлектрической проницаемостью при пониженных температурах и давлениях характерных для плазменного криогенного травления (Рис. 1). Исследован интервал температур от  $0^\circ\text{C}$  до  $-120^\circ\text{C}$ , представляющий интерес в рабочем диапазоне давлений, характерных для технологической ICP плазмы (5-25 мТорр). Все процессы проводились в установке плазмохимического травления Plasmalab Dual System 100

производства Oxford Instruments, UK. Использовался спектрометр Ocean Optics HR-4000, измерения проводились в спектральном диапазоне 200-900 нм. Обработка данных проводилась в реальном времени с применением методов численной оптимизации. В качестве образца использовали OSG-пленки (30% открытой пористости и  $k=2,3$ ) толщиной 200 мкм на кремниевой подложке. По данным спектральной эллипсометрии изначальный показатель преломления составил 1,29.

Для калибровки метода было решено провести атмосферные эллипсометрические измерения на парах изопропанола. Полученные изотермы были пересчитаны в изобары (Рис. 1) [10]. Из графика видно, что заполнение пор происходит в зависимости от давления в диапазоне  $-60 - -80^{\circ}\text{C}$ , причем с повышением давления  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$  температура начала конденсации в порах растёт. Таким образом, использование этого газа, в отличие от применяемых в других работах  $\text{CF}_4$ ,  $\text{C}_4\text{F}_8$ ,  $\text{SF}_6$  позволяет выполнять травление с защитой пористой структуры материала при умеренно пониженных температурах, которые в промышленных установках могут быть получены с использованием жидкостных chillеров (без применения жидкого азота).



**Рисунок 1.** Изобара адсорбции газа  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$  в порах исследуемого диэлектрика при давлениях 5, 15 и 25 мТорр с перестройкой изотермы адсорбции изопропанола [10] в изобару газа  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$  при пониженных температурах.

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее выполненными исследованиями процесса криогенного травления пористых диэлектриков в плазме  $C_2F_4Br_2$  [7]. Предложенный метод, реализованный в промышленного типа установке с возможностью обработки пластин диаметром до 200 мм, может быть использован для разработки и исследования новых технологических процессов низковольтного травления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00771, <https://rscf.ru/project/23-29-00771/>

### **Литература:**

1. Volksen, W., Miller, R.D. and Dubois G. Low dielectric constant materials // Chem. Rev. 2010. V.110. P. 56-110.
2. Orlov A.A. et al. Dielectric Barrier in the Subtractive Process of Formation of a Copper Metallization System // Russian Microelectronics. Pleiades Publishing Ltd. 2022. V. 51(6). P. 470–479.
3. Rezvanov A.A. et al. Benzene bridged hybrid organosilicate films with improved stiffness and small pore size // Materials Chemistry and Physics. Elsevier BV. 2022. V. 290. P. 126571.
4. David J. Michalak, James M. et al. Porosity scaling strategies for low-k films // J. Mater. Res. № 30, 2015.
5. Baklanov M.R. et al. Plasma processing of low-k dielectrics // Journal of Applied Physics. AIP Publishing, 2013. Vol. 113, № 4.
6. Rezvanov A. et al. Journal of Vacuum Science and Technology B: Nanotechnology and Microelectronics, 2017, v. 35(2), p. 021204.
7. Orlov A.A., Rezvanov A.A. and Miakonkikh A.V. "Research on the process of lines formation in metallization system for technology nodes 28 nm and below" Nanoindustry, S96-2, pp. 684-687, 2020.
8. Гайдукасов Р.А., Мяконьких А.В., Руденко К.В., Применение метода регуляризации Тихонова в задачах эллипсометрической порометрии low-k диэлектриков, Микроэлектроника. 2022. Т. 51. № 4. С. 243-254.
9. Александров Д.В. Разработка методов исследования наноматериалов с использованием лазерных интерферометров и компьютерной обработки // Нелинейный мир. – 2011. – т. 9. – № 1. – С. 11-12.
10. Rezvanov A.A., Gornev E.S., et. al. Adsorption isobars of fluorocarbon compounds selected for cryogenic plasma etching of low-k dielectrics // ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. СЕРИЯ 3: МИКРОЭЛЕКТРОНИКА. V(1). 2015.

gaydukasov.r@gmail.com

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКА ВИХРЕВОЙ ВТОРОГО РОДА С РЕШЕТКИ РОДА С НЕРЕГУЛЯРНОСТЬЮ И ВАКАНСИЯМИ

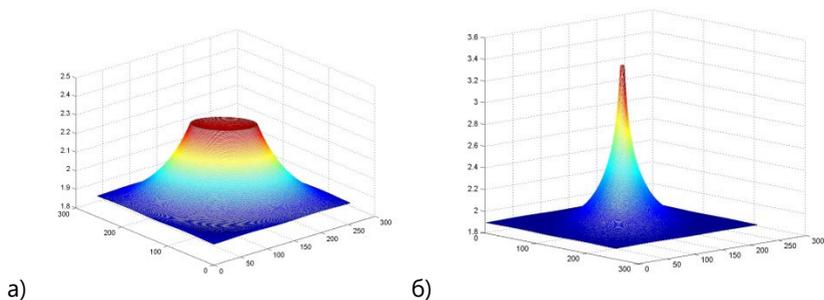
**А. В. Минкин<sup>1</sup>, С. А. Демин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ЕИ КФУ, Елабуга, Россия

<sup>2</sup>КФУ, Казань, Россия

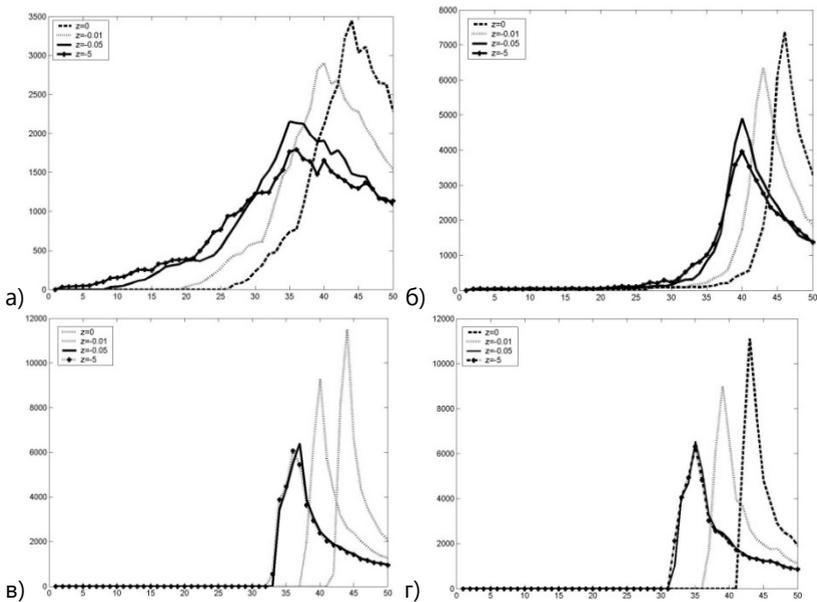
В последние годы сверхпроводники применяют для создания сильных магнитов, детекторов электромагнитных полей и создания электрических кабелей. Более того, они используются как детекторы фотонов, а в будущем их будут использовать для детектирования энергии молекул. Особую значимость приобретают высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), это связано, прежде всего, с возможностью их использования при температуре жидкого азота в широком диапазоне больших магнитных полей в качестве магнитов с захваченным магнитным потоком [1, 2]. Для этого на практике могут использоваться объемные ВТСП и наноструктурированные микротрубки [3]. Для исследования структуры и поведения наноструктурированных ВТСП активно привлекаются методы математического моделирования [4–6].

В настоящей работе проведен расчет функции распределения магнитного поля для нерегулярной решетки вихрей ВТСП, а также решетки с вакансиями, с учетом поверхностных эффектов. Для этого используется модель вихря с нормальной сердцевинкой конечного радиуса (Рис. 1).



**Рисунок 1.** Модель вихря с нормальной сердцевинкой с радиусом сердцевинки  $\zeta$  равной: а)  $0.1\lambda$ , б)  $0.01\lambda$ .

Функция распределения вычислена для высокотемпературного сверхпроводника YBaCuO с  $T_c = 90$  K с параметром анизотропии  $\Gamma = 25$  ( $\Gamma = m_3/m_1$ ,  $m_1 = m_2$ ,  $m_3$  – главные значения «тензора масс», вводимого для описания плотности кинетической энергии сверхпроводящих электронов). Рассмотренный массивный образец помещен во внешнее магнитное поле  $\mathbf{H}$  ( $H_{c1} < H < H_{c2}$ ), направленное вдоль оси анизотропии  $\mathbf{c}$  сверхпроводника. На основе модифицированного уравнения Лондонов, так же, как и в работе [7] получено локальное магнитное поле  $h(\mathbf{G}, z)$  по обратным векторам решетки  $\mathbf{G}$ . Построена расширенная вихревая решетка из 64 вихрей. Для восстановления картины распределения магнитного поля такой решетки использовано быстрое преобразование Фурье, расширенная ячейка составила  $256 \times 256$  точек. Отметим, что в экспериментах над сверхпроводниками (например, см. работу [8]) методом декорирования были получены разные картины распределения вихрей в сверхпроводнике. Далее на основе Фурье-анализа картин декорирования по периоду межвихревого расстояния была проведена оценка индукции спонтанного магнитного потока.



**Рисунок 2.** Функция распределения локального магнитного поля  $f(h, z)$ : а) нерегулярная решетка, б) решетка с вакансией, в) регулярная решетка с  $\zeta=0.01\lambda$ , г) регулярная решетка с  $\zeta=0.001\lambda$ .

На Рис. 2 представлена функция распределения  $f(h, z)$  локального магнитного поля на разных глубинах  $z$ . Показано, что форма линии существенно меняется в зависимости от глубины, нерегулярности и наличия вакансии в вихревой решетке. Учет данного обстоятельства будет способствовать проведению экспериментов с выбором типа вихревой решетки и параметров сверхпроводника.

**Литература:**

- [1] Z. Huang, H.S. Ruiz, T.A. Coombs, Pulsed field magnetization strategies and the field poles composition in a bulk-type superconducting motor, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2017, v. 534, p. 73-84.
- [2] J. Arnaud, J.F.P. Fernandes, P.J.C. Branco, Modifying the pulsed-field-magnetization technique for HTS bulks in electrical machines without magnetic field sensors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, v. 28, № 4, p. 1–4.
- [3] R. Rezaev, E. Posenitskiy, E. Smirnova, E. Levchenko, O. G. Schmidt, V. M. Fomin, Voltage induced by superconducting vortices in open nanostructured microtubes, *Physica Status Solidi – Rapid Research Letters*, 2019, v. 13, № 1, p. 1970010.
- [4] И.А. Ушаков, Е.А. Левченко, Моделирование вихрей Абрикосова в трехмерных наноструктурах, *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2020, т. 63, № 3, с. 131–136.
- [5] А.Н. Мороз, А.Н. Максимова, В.А. Кашурников, И.А. Руднев, Динамические вихревые состояния в высокотемпературных сверхпроводниках при импульсном намагничивании, *Физика твердого тела*, 2020, т. 62, № 5, с. 661–668.
- [6] A.V. Minkin, S.A. Demin, The Simulation of a Vortex Lattice in a Nanofilm of a Type-II Superconductor, *High Energy Chemistry*, 2023, v. 57, Suppl. 1, p. S24–S27.
- [7] А.В. Минкин, С.Л. Царевский, Форма линии магнитного резонанса в анизотропных сверхпроводниках с нерегулярной вихревой решеткой, *Физика металлов и металловедение*, 2005, т. 101, № 1, с. 5–10.
- [8] Л.Я. Винников, И.С. Вещунов, М.С. Сидельников, В.С. Столяров, С.В. Егоров, О.В. Скрябина, В. Джао, Г. Цао, Т. Тамегай, Прямое наблюдение вихревых и мейснеровских доменов в монокристалле ферромагнитного сверхпроводника  $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.79}\text{P}_{0.21})_2$ , *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 2019, т. 109, Вып. 8, с. 530–534.

avminkin@yandex.ru

## МОДЕЛЬ ТОМСОНА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

**Р. Н. Гайнуллин<sup>1</sup>, А. В. Герасимов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*

В работе рассмотрены основные этапы построения двумерной модели постоянной проводимости ВЧ-индукционного разряда конечной длины.

Система уравнений, описывающая квазистационарное электромагнитное поле ВЧИ-разряда атмосферного давления, представленная в работе [1], позволяет проводить только численный анализ его структуры. Для исследования структуры разряда в приосевой области требуется аналитическая модель. Для ее построения необходимо перейти к комплексной форме уравнений Максвелла. Такой подход для описания одномерного ВЧИ-разряда впервые использовал Дж. Томсон [2]. В этом случае нелинейные в физических переменных дифференциальные уравнения электромагнитного поля переходят в линейные дифференциальные уравнения для комплексных величин, которые допускают точные решения при помощи специальных функций Бесселя и Кельвина.

При этом комплексные уравнения квазистационарного электромагнитного поля [3]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_{\varphi}) &= -\frac{i\omega}{c} H_z; & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_r) + \frac{\partial H_z}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial H_z}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial z} &= -\frac{4\pi\sigma}{c} E_{\varphi}; & \frac{\partial E_{\varphi}}{\partial z} &= \frac{i\omega}{c} H_r; \end{aligned}$$

переходят в линейные дифференциальные уравнения для комплексных величин

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} - i a H_z = 0;$$

$$\frac{\partial^2 H_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 H_r}{\partial z^2} - \left(ia + \frac{1}{r^2}\right) H_r = 0;$$

$$\frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial z^2} - \left(ia + \frac{1}{r^2}\right) E_\varphi = 0$$

допускающие точные решения, которые можно записать при помощи специальных функций Бесселя комплексного аргумента как

$$H_r(r, z) = -i \frac{b H_z^a(0,0)}{\sqrt{b^2 + ia}} J_1\left(i\sqrt{b^2 + ia} r\right) \sin(bz);$$

$$H_z(r, z) = i H_z^a(0,0) J_0\left(i\sqrt{b^2 + ia} r\right) \cos(bz);$$

$$E_\varphi(r, z) = \frac{\omega}{c} \frac{H_z^a(0,0)}{\sqrt{b^2 + ia}} J_1\left(i\sqrt{b^2 + ia} r\right) \cos(bz).$$

Здесь  $H_z$ ,  $H_r$  и  $E_\varphi$  – соответственно продольная магнитная, радиальная магнитная и азимутальная электрическая комплексные компоненты электромагнитного поля;  $\omega$  – частота колебаний ВЧ поля;  $\sigma$  – проводимость в разряде;  $c$  – скорость света в пустоте; параметр  $a = 4\pi\omega\sigma/c^2$ .

В этих соотношениях константа расщепления  $b = \frac{1}{L} \arccos \frac{H_z^a(0,L)}{H_z^a(0,0)}$  –

действительное число, равное нулю в классической одномерной модели Томсона;  $J_{0,1}$  – функции Бесселя соответственно нулевого и первого порядков. При устремлении в полученных формулах константы расщепления к нулю, они переходят в классическое решение Томсона одномерной модели.

Полученные соотношения позволяют сформулировать несколько выводов, которые касаются структуры квазистационарного электромагнитного поля ВЧИ разряда конечной длины [4]:

1) фазовые углы  $\varphi_{H_z}$ ,  $\varphi_{H_r}$  и  $\varphi_{E_\varphi}$  всех трёх компонент электромагнитного поля в разряде не зависят от продольной координаты  $z$ ;

2) разность фаз между фазой радиальной составляющей магнитного поля  $\varphi_{H_r}$  и фазой азимутального электрического поля  $\varphi_{E_\varphi}$  есть величина постоянная и равная  $\frac{\pi}{2}$ :

$$\Delta\varphi = \varphi_{H_r}(r) - \varphi_{E_\varphi}(r) = \frac{\pi}{2};$$

3) амплитуды радиального магнитного  $H_r^a$  и азимутального  $E_\varphi^a$  полей в разряде, связаны соотношениями

$$\frac{\partial H_r^a}{\partial z} = \frac{b^2 c}{\omega} E_\varphi^a; \quad \frac{\partial E_\varphi^a}{\partial z} = -\frac{\omega}{c} H_r^a.$$

Результаты, полученные в данной работе, могут быть полезны специалистам в области физики и техники ВЧ индукционного разряда.

### Литература:

- [1] Р.Н. Гайнуллин, А.П. Кирпичников. *Прикладная физика*. **5** (2008) 44.
- [2] J.J. Tomson. *J.Philos. Mag.* **2**, **9** (1926) 674.
- [3] Р.Н. Гайнуллин. *Контактная диагностика струйного высокочастотного индукционного разряда атмосферного давления*. Изд-во КГТУ, Казань, 2009.
- [4] Р.Н. Гайнуллин, А.П. Кирпичников. *Прикладная физика*. **3** (2007) 54.

[aleks\\_gerasimov@mail.ru](mailto:aleks_gerasimov@mail.ru)

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ВЧ-МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В АРГОНЕ

**А. Ю. Савин<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, А. Г. Лучкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия

### **Актуальность**

Одной из задач современного материаловедения является создание новых материалов с многофункциональными покрытиями. Метод магнетронного распыления широко применяется для нанесения как декоративных, износостойких или защитных покрытий, так и для получения сложных, многослойных оптических конструкций или электропроводящих покрытий, свойства и структуры которых магнетронные системы распыления позволяют задавать и варьировать в требуемых диапазонах [1]. Высокочастотное магнетронное распыление имеет несколько преимуществ, таких как высокая эффективность, отличный контроль над однородностью и толщиной пленки, хорошая адгезия пленки к подложке и другие [2].

Предварительные расчеты для разряда постоянного тока в пересекающихся полях, проведенные в пакете «COMSOL Multiphysics», показали, что сходимость расчета с магнитным полем существенно ухудшается по сравнению с разрядом без магнитного поля. Поэтому для отработки алгоритма расчета таких разрядов разработана программа на языке программирования Python.

Целью настоящей работы является постановка задачи моделирования ВЧ-магнетронного разряда в аргоне и обсуждение некоторых особенностей численной реализации.

### **Постановка задачи**

Рассматривается модель разряда в осесимметричном приближении между двумя круглыми плоскими электродами, расположенными на расстоянии  $b$  друг от друга. Один электрод заземлен, на второй подается напряжение. Под одним из электродов находятся постоянные магниты.

Процессы, происходящие в ВЧ-магнетронном разряде, описываются с помощью следующих краевых задач.

1. Уравнение конвекции–диффузии для электронного газа

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\Gamma}_e = \nu_i n_e, \quad 0 < r < R, \quad 0 < z < b \quad t > 0, \quad (1)$$

где  $z = b$  – нагруженный электрод,  $z = 0$  – заземленный электрод,  $R$  – радиус электрода,  $\vec{\Gamma}_e = -\mathbf{D}_e \vec{\nabla} n_e - \boldsymbol{\mu}_e n_e \vec{E}$  – плотность потока электронов,  $\mathbf{D}_e = \mathbf{D}_e^{\parallel} \cos(\alpha) + \mathbf{D}_e^{\perp} \sin(\alpha)$  – коэффициент диффузии (тензор),  $\mathbf{D}_e^{\parallel}$  и  $\mathbf{D}_e^{\perp}$  – продольная и поперечная магнитному полю составляющие коэффициента диффузии соответственно (тоже тензоры),  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ ,  $\vec{B}$  – магнитная индукция,  $n_e$  и  $n_+$  – концентрации электронов и атомарных положительных ионов соответственно,  $\boldsymbol{\mu}_e$  и  $\boldsymbol{\mu}_+$  – тензоры подвижности электронов и атомарных положительно заряженных ионов соответственно,  $\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$  – напряженность электрического поля,  $\varphi$  – потенциал электрического поля,  $\nu_i$  – частота ионизации.

Уравнение (1) дополняется граничными условиями, учитывающими процесс вторичной ионно-электронной эмиссии на электродах и «мягкими» граничными условиями на диэлектрических стенках. В качестве начальных условий задается равномерное распределение  $n_e$  по разрядам объема.

2. Уравнение конвекции–диффузии для атомарных ионов

$$\frac{\partial n_+}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\Gamma}_+ = \nu_i n_e, \quad 0 < r < R, \quad 0 < z < b \quad t > 0, \quad (2)$$

где  $\vec{\Gamma}_+ = -\mathbf{D}_+ \vec{\nabla} n_+ + \boldsymbol{\mu}_+ n_+ \vec{E}$  – плотность потока атомарных положительно заряженных ионов,  $\mathbf{D}_+ = \mathbf{D}_+^{\parallel} \cos(\alpha) + \mathbf{D}_+^{\perp} \sin(\alpha)$  – коэффициент диффузии атомарных положительно заряженных ионов (тензор),  $\mathbf{D}_+^{\parallel}$  и  $\mathbf{D}_+^{\perp}$  – продольная и поперечная магнитному полю составляющие коэффициента диффузии соответственно (тоже тензоры).

Уравнение (2) дополняется граничными условиями равенства диффузионного и дрейфового потоков на электроды и «мягкими» граничными условиями на диэлектрических стенках. В качестве начальных условий задается равномерное распределение  $n_+$  по разрядам объема.

3. Нестационарное уравнение теплопроводности для электронной температуры

$$\frac{3}{2} k \frac{\partial (n_e T_e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{5}{2} k T_e \vec{\Gamma}_e - \boldsymbol{\lambda}_e \vec{\nabla} T_e \right) = n_e q_e \langle \boldsymbol{\mu}_e \vec{E}^2 \rangle - Q_{yn} N n_e - I \nu_i n_e, \quad 0 < r < R, \quad 0 < z < b \quad t > 0. \quad (3)$$

Здесь  $q_e$  – заряд электрона,  $\boldsymbol{\lambda}_e = 5 n_e k \mathbf{D}_e / 2$  – коэффициент электронной теплопроводности (тензор),  $I = 15,76$  эВ – потенциал ионизации,  $Q_{yn}$  –

энергия, получаемая тяжелыми частицами при упругих столкновениях с электронами,  $N$  – концентрация нейтральных атомов, через  $\langle \rangle$  обозначено усреднение по периоду колебания электрического поля.

Граничные условия для данного уравнения ставятся в следующем виде: на электродах создается значение температуры, на боковой стенке условие равенства тепловых потоков за счет теплопроводности и конвекции. Начальные условия задаются постоянной температурой, равной температуре окружающей среды.

4. Уравнение теплопроводности для атомарно ионного газа

$$\vec{\nabla} \cdot (-\lambda_a \vec{\nabla} T_a) = \vec{j}_+ \vec{E} + Q_{yn} N_e, \quad (4)$$

где  $\vec{j}_+ = e \mu_+ n_+ \vec{E}$  – дрейфовый ионный ток,  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности атомно-ионного газа.

В качестве краевых и начального условий для уравнения (4) задается постоянная температура на стенках и внутри объема.

Исходя из принципа суперпозиции, электромагнитное поле в разряде представим в виде суммы вихревого ВЧ-электромагнитного поля  $(\vec{E}_c, \vec{H}_c)$ , потенциального электрического поля  $\vec{E}_p$  и постоянного магнитного поля  $\vec{B}_s$ .

5. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}_c = \sigma \vec{E}_c + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{E}_c}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}_c = 0, \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}_c = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}_c}{\partial t}. \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}_c = 0. \quad (8)$$

6. Закон Гаусса для потенциальной составляющей ВЧ-электромагнитного поля

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}_p = \frac{q_e}{\varepsilon_0} (n_+ - n_e), \quad (9)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная вакуума.

7. Уравнения Максвелла для постоянного магнитного поля

$$\vec{\nabla} \times \vec{B}_s = \vec{j}_s, \quad (10)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}_s = 0. \quad (11)$$

Здесь  $\sigma$  – удельная проводимость среды,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\vec{j}_s$  – статическая часть плотности тока.

Данные для аппроксимации коэффициента диффузии  $D_e$ , подвижности электронов  $\mu_e$ , вклада, вносимого упругими соударениями в нагрев газа  $Q_{уп}$ , могут быть определены с помощью пакета BOLSIG+ [3] с учетом зависимости от электронной температуры и наличия электрон-электронных соударений на основе базы данных.

### Решение

Задача решается методом конечных разностей. Спецификой задачи является значительное влияние дрейфового слагаемого в уравнениях (1) – (2). Разностные схемы для них строятся интегро-интерполяционным методом [4] с аппроксимацией потоковых членов по схеме Шарфеттера-Гуммеля [5, 6]. При решении параболических уравнений применяется итерационная схема Писмена-Рэкфорда в комбинации с нелинейным вариантом метода Шарфеттера-Гуммеля. Для решения стационарных уравнений используется метод релаксации. Результаты работы будут представлены в последующих трудах.

### Заключение

Сформулирована полная постановка задачи для ВЧ-магнетронного разряда и разработан численный метод.

### Литература

- [1] Каштанов, П. В., Смирнов, Б. М., & Хипплер, Р. (2007). // *Успехи физических наук*, 177(5), 473-510.
- [2] Safavi, M. S., Surmeneva, M. A., Surmenev, R. A., & Khalil-Allafi, J. (2021). // *Ceramics International*, 47(3), 3031-3053.
- [3] BOLSIG+, Version: 12/2019. [BOLSIG+ | Electron Boltzmann equation solver \(univ-tlse.fr\)](#)
- [4] Вабищевич, П. Н. (2010). // *М.: Книжный дом «Либроком»*.
- [5] Kulikovskiy, A. A. (1995). // *Journal of computational physics*, 119(1), 149-155.
- [6] Желтухин, В. С., Фадеева, М. С., & Чебакова, В. Ю. (2017). // *Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки*, 159(4), 444-457.

[aysavin01@gmail.com](mailto:aysavin01@gmail.com)

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДИЦИНСКИХ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**А. С. Парсанов<sup>1</sup>, И. В. Красина<sup>1</sup>, М. В. Антонова<sup>1</sup>, А. Р. Ибатуллина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия

### **Введение**

Нетканый материал известен с давних времен и представляет собой полотно, изготовленное из нитей или волокон без применения ткацких технологий. Данный материал используется во многих отраслях промышленности, таких как производство мебели, строительство, текстильная индустрия, сельское хозяйство и медицина.

Нетканые материалы нашли свое применение в медицине благодаря своим уникальным свойствам: высокая прочность, эластичность, воздухопроницаемость и способность задерживать жидкости. Однако, используемые в медицинских целях материалы должны соответствовать определенным стандартам. При прохождении лабораторного контроля качества часть поступающего сырья не соответствует предъявляемым требованиям, причем расхождение с нормативными требованиями составляет 0,5-5%, что, связано с условиями транспортировки (время, условия, человеческий фактор). Образцы, не прошедшие входной контроль качества, подлежат утилизации, так как доработка экономически не целесообразна. Поэтому, поиск инструментов, точно изменяющих свойства готовых текстильных материалов, актуален и востребован.

Одним из таких инструментов является обработка текстильных материалов низкотемпературной плазмой пониженного давления. При воздействии плазмы на материал его поверхность подвергается бомбардировке различными частицами плазмы, включая электроны, ионы, радикалы и нейтралы, а также фотоны ультрафиолетового излучения. Эти активные частицы обладают достаточной энергией, чтобы разрушить химические связи и вызвать реакции на поверхности материала [1].

Очистка поверхности плазменными методами включает удаление всех примесей и загрязнений, с поверхности подложки. Для очистки поверхностей текстильных материалов используют, инертные газы, азотную или кислородную плазму. При обработке плазмой с окисгенированным гелием достигается более высокая скорость травления ПЭТ-пленки по

сравнению с травлением в плазме, содержащей только гелий. Этот результат объясняется химической реакцией атомарного кислорода с поверхностью полимерной пленки. Кислородная плазма приводит к прививке полярных и гидрофильных функций, что увеличивает поверхностную энергию материала. Поэтому, с целью изменения физико-механических свойств нетканых материалов предложен метод низкотемпературной плазменной модификации. Обработка плазмой является экономически эффективным методом, кроме того, это гарантирует сохранение материала, не прошедшего первоначальный контроль качества [2-4].

### **Материалы и методы**

В работе исследованы материалы отечественного производства, применяемые для изготовления медицинской одежды:

- однослойный нетканый материал, на основе полипропиленовых волокон;
- двухслойный нетканый материал, состоящий из верхнего впитывающего по всей поверхности изделия слоя, состоящего из вискозы и нижнего влагонепроницаемого слоя;
- трехслойный нетканый материал, состоящий из верхнего впитывающего по всей поверхности изделия слоя, состоящий из вискозы, среднего влагонепроницаемого слоя и нижнего слоя из волокон полипропилена.

Плазменная обработка проводилась на экспериментальной плазменной установке пониженного давления (емкостного разряда), в среде воздуха. Обработку вели в течение 10 мин при подаваемой мощности 1,25 кВт, значения рабочего давления – 21–28 Па. Выбор газа обусловлен возможностью придания гидрофильного эффекта поверхностям обрабатываемых материалов.

Исследование на впитываемость проводилось в соответствии с ГОСТ Р 54872-2011.

### **Результаты и обсуждение**

Первым этапом работы являлось исследование на соответствие представленных образцов заявленным требованиям ГОСТ Р 58551-2019.

Для исследования использовались образцы из сорока рулонов каждого вида (типа). Исследовано отличие фактической поверхностной плотности материалов от паспортных значений производителя. Согласно полученным данным, представленные виды материалов соответствуют заявленным показателям.

Вторым этапом исследованы прочностные характеристики материалов на разрыв в сухом состоянии в продольном и поперечном направлениях, а также проведены испытания нетканых материалов на впитываемость. В ходе эксперимента, установлено, что 1–3% исследованных рулонов материалов не соответствуют требованиям производителя по показателю впитываемости. Для решения данной проблемы был предложен метод плазменной модификации.

Образцы нетканых материалов с пониженными значениями показателей впитываемости подвергались плазменной обработке в экспериментальной ВЧЕ-плазменной установке КНИТУ. Режимы обработки выбраны на основе исследований других авторов в области ВЧЕ-плазменной модификации нетканых полотен [5].

Для улучшения гидрофильности нетканых материалов из полипропилена (PP) применяют физическую модификацию направленную на изменение структуры молекул высокого порядка с целью улучшения гидрофильности. При обработке нетканых материалов в среде воздуха имеют место оба этих процесса.

Исследовано влияние плазменной обработки на значения впитываемости нетканых полотен. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1. Изменение показателя впитываемости нетканых материалов, под действием плазмы пониженного давления

Нетканый материал	Впитываемость, %	
	До плазменной модификации	После плазменной модификации
Однослойный	100	190
Двухслойный	290	370
Трехслойный	680	770

Экспериментально показано, что плазмохимическое окисление нетканых материалов, под действием воздуха, позволяет повысить значение впитываемости воды на 20,1–106,9%.

## Выводы

Исучено влияние плазменной модификации на механические свойства нетканых материалов медицинского назначения, установлено, что плазменная обработка в воздушной среде, способствует сохранению

физико-механических свойств и увеличивает показатель впитываемости влаги.

Таким образом, основываясь на результатах исследования, можно сделать вывод, что модификация в условиях низкотемпературной плазмы является перспективным методом повышения требуемых свойств нетканых материалов, используемых в медицинских целях.

### **Литература:**

- [1] Гайнутдинов Р.Ф., Гайсин Аз. Ф. К вопросу применения низкотемпературной плазмы для обработки текстильных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2017. — с. 72-73.
- [2] Хакимуллин Ю. Н., Вольфсон С. И., Галимзянова Р. Ю., Кузнецова И. В., Ручкин А. В., Абдуллин И. Ш. Нетканые материалы на основе полимеров, используемые для производства медицинской одежды и белья, стерилизуемой радиационным излучением: виды материалов, технологии производства // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №23. — с. 97-103.
- [3] Азанова А.А., Галимзянова Р.Ю., Абуталипова Л.Н., Хисамиева Л.Г. Плазменная модификация физико-механических свойств нетканых материалов медицинской маски / Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. XIII Международная научно-техническая конференция— Казань: Издательство Казанского университета, 2021. — с. 8-11.
- [4] Равилова А.Ф., Антонова М.В., Красина И.В., Антонова Е.В., Электрофизическая модификация синтетических нитей / Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2019, в.3, с.78-81.
- [5] Валиева А.А., Яковлева А.А., Фадеева О.С., Антонова М.В., Красина И.В. Исследование влияния низкотемпературной плазмы на физико-механические свойства ткани специального назначения / Вестник технологического университета. 2015, т.18, в.2, с.279-280.

[parsanov1982@yandex.ru](mailto:parsanov1982@yandex.ru)

## ПЛАЗМЕННАЯ ОЧИСТКА КАК ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП МОДИФИКАЦИИ УГЛЕВОЛОКНА

А. Р. Ибатуллина<sup>1</sup>, М. В. Антонова<sup>1</sup>, И. В. Красина<sup>1</sup>, А. С. Парсанов<sup>1</sup>

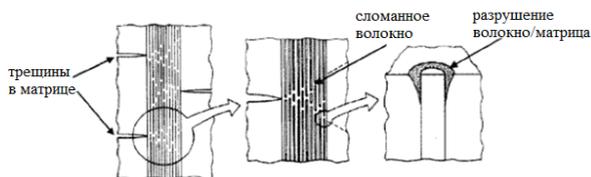
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технологический университет", Казань, Россия

### Введение

Композиционные материалы (КМ) на основе углеродного волокна (УВ) характеризуются высокой прочностью, высоким модулем, малым весом, отличной усталостной прочностью и низкой плотностью. Углеродные волокна обладают высоким модулем (900 ГПа), теплопроводностью (1000 Вт/мК) и электропроводностью (106 См/м). Эти волокна стали основным материалом во многих отраслях промышленности. Композит, армированный углеродным волокном, состоит из матрицы, волокна и межфазной области. Матрица может наделять композит ключевыми свойствами. Коэффициент теплового расширения углеродных волокон обычно намного ниже, чем у большинства матриц, поэтому углеродные волокна значительно повышают устойчивость композита [1-2].

На сегодняшний день острой проблемой КМ является расслоение (межслоевой сдвиг), которое происходит в материале во время усталостных нагрузок. Разрушение начинается, как правило, из-за усталости и накопления повреждений, таких как: расслоение, нарушение целостности матрицы, вырыв волокна или его перелом. Трещины в матрице являются одним из наиболее распространенных видов повреждений слоистых материалов [3-4].

Повреждение начинается в слоях, перпендикулярных направлению нагрузки. Трещины растут и распространяются поперек направления нагрузки по толщине слоя, из-за этих трещин отдельные волокна начинают разрушаться и отделяться от матрицы вблизи концов сломанных волокон (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Разрушения компонентов композита и волокнисто-матричные отслоения

Поэтому актуальной задачей при создании углеродных композитов все еще является модификация волокнистого армирующего наполнителя.

Взаимодействие различного рода модификаторов с поверхностными слоями монофиламентов углеродного волокна будет значительно затруднено, если на поверхности волокна будет присутствовать дополнительная фаза.

В случае УВ дополнительной фазой являются вещества, входящие в состав аппрета. Аппрет – замасливатель, способный накапливаться в дефектных структурах и микротрещинах волокна. Для модификации необходимо избавиться от аппрета и обеспечить «посадочную площадку» для новых структур. Поэтому, исходя из вышесказанного, встает вопрос об удалении аппрета с поверхности углеродного волокна.

**Объекты исследования:** многофиламентное непрерывное углеродное волокно.

### **Методы исследования**

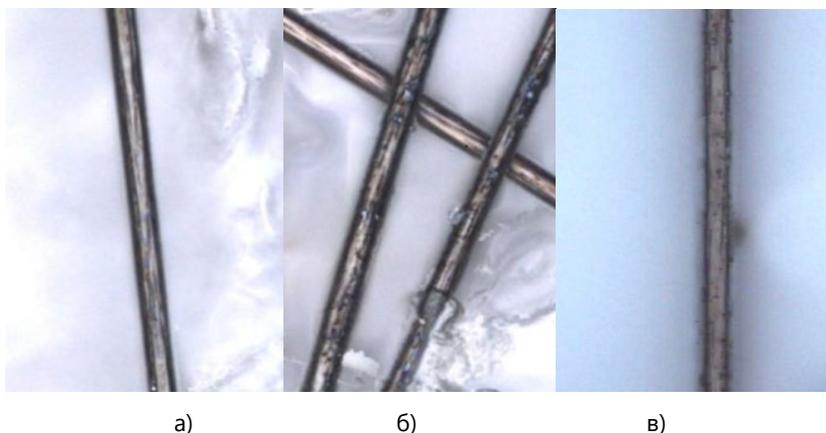
В данной работе удаление аппрета для увеличения поверхностной активности было проведено двумя способами. Выявлена наиболее подходящая и менее «травматичная» процедура.

Методы удаления аппрета с поверхности УВ:

1. аппрет удаляли с поверхности УВ смесью ацетона и этанола в объемном соотношении 1:1 на протяжении 10 минут для волокон и 15 минут для ткани, соответственно. Затем, оправляли в печь на 10 минут при температуре 90°C, с последующей очисткой в дистиллированной воде;
2. удаление аппрета проводилось в опытно-промышленной плазменной установке высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда. Исходные образцы помещали в плазменную установку для обработки в режиме:  $U = 5$  кВ,  $P = 50$  Па,  $G = 0,04$  г/с, продолжительность обработки:  $\tau = 7,5$  мин. Плазмообразующий газ – воздух.

### **Результаты и обсуждение**

Визуальную оценку качества снятия аппрета проводили методом конфокальной лазерной микроскопии. Все образцы до и после снятия аппрета с поверхности углеродного волокна разными способами были исследованы с помощью конфокального сканирующего микроскопа Olympus. На рисунке 2 приведены полученные микрофотографии.



**Рисунок 2.** Микроскопия углеродных волокон до и после снятия аппрета (увеличение 100 крат): а) контрольный образец, б) образец после снятия аппрета в смеси ацетона и этанола, в) образец после снятия аппрета с помощью воздействия плазмы

На микрофотографиях (рис.2) видно, что после воздействия ацетона на поверхности волокна заметны разводы маслянистого типа, которые можно идентифицировать как остатки замасливающих веществ, аппрет снят не полностью. Микрофотография углеволокна после воздействия на образец воздушной плазмы демонстрирует хорошую очистку поверхности, аппрет удален, наблюдаются естественные дефекты и травматичность УВ.

## Выводы

Плазменная модификация активно исследуется как инструмент регулирования свойств широкого ассортимента волокнистых материалов различной природы [5-6]. Из полученных результатов можно отметить, что наиболее оптимальным методом удаления аппрета с поверхности УВ является обработка образцов в воздушной плазме ВЧЕ разряда. Образцы полностью очистились от замасливателя. Очистка поверхности углеродного волокна для его последующей модификации будет производиться с помощью плазменной обработки.

**Литература:**

- [1] Соколова, В. В. Преимущества карбона и способы его применения / В. В. Соколова, А. А. Юдин, Д. Р. Исламгалиева [и др.] // Вестник Евразийской науки. — 2022. — Т 14. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/46SAVN322.pdf> (дата обращения: 17.10.2023).
- [2] Татрокова П.В., Ибатуллина А.Р., Способы получения и производство углеродного волокна / Сборник научных трудов международной научной конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора Н.А. Васильева. 2021, т.2, с.114-118
- [3] Татрокова П.Х., Ибатуллина А.Р., Исаева Э.Б. Перспективы и особенности применения полимерных матричных композиций в космической отрасли / В сборнике: Новые технологии и материалы легкой промышленности. Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции с элементами научной школы для студентов и молодых ученых. Казань, 2022. С. 14-17.
- [4] Татрокова П.Х., Ибатуллина А.Р., Исаева Э.Б. Экранирующие металлизированные ткани для защиты от электромагнитных излучений / В сборнике: Технический текстиль - основа научно-технического развития России. Сборник научных трудов Всероссийского круглого стола с международным участием. Москва, 2023. С. 185-189.
- [5] Ибатуллина А.Р., Файзуллина А.Р. Исследование влияния плазменной модификации на свойства конопляных волокон / Вестник технологического университета. 2016, т.19, в.16, с.43-45
- [6] Ибатуллина А.Р., Сравнение спектров арамидных волокон до и после модификации их в плазме ВЧЕ-разряда пониженного давления / Вестник технологического университета. 2014, т.17, в.13, с.128-131

gaynutdinovaa@bk.ru

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДИФфуЗИИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АМИНОСМОЛ ПОТОКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ ПРИ НАПОЛНЕНИИ КОЖИ

**И. И. Латфуллин<sup>1</sup>, А. В. Островская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия

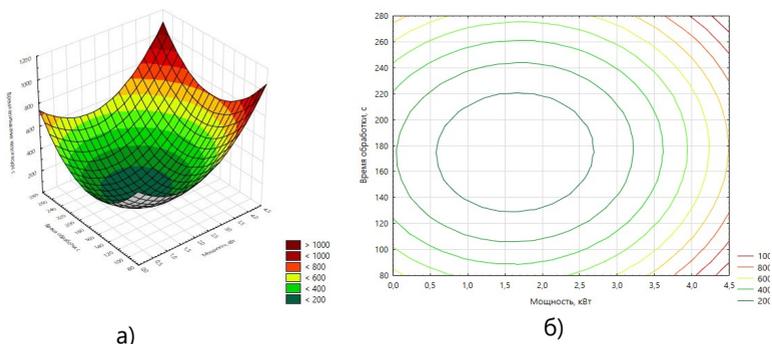
В условиях тенденций развития науки актуальной задачей является внедрение в производство современных решений, позволяющих повышать качество производимых материалов. Одной из отраслей производства, где необходимо решать комплекс производственных технологических задач является легкая промышленность, в частности кожевенно-меховое производство. В кожевенной промышленности находят применение аминоксодержащие синтетические смолы, основную долю которых составляет зарубежная продукция. Отечественными аналогами таких реагентов являются продукты конденсации карбамида, дициандиамида, меламин с формальдегидом, называемые аминформальдегидными смолами.

В работе синтезированы карбаминоформальдегидные смолы, модифицированные алифатическими спиртами: изопропиловым спиртом (КФС-ИПС) и 1,1,3-тригидротетрафторпропанолом (КФС-ФП). Объектом исследования являлась кожа хромового дубления из овчины. Наполнение синтезированными карбаминоформальдегидными смолами проводили после плазменной обработки кожи при температуре 38-40°C в течение 180 минут в смеси растворителей вода:диметилсульфоксид в соотношении 70:30. В ходе исследования установлено, что при наполнении кожи модифицированными аминоксмолами диффузия их преимущественно протекает с бахтармянной стороны. Лицевой слой кожи является естественным барьером для проникновения реагентов внутрь дермы капиллярно-пористого материала.

Одним из основных факторов воздействия потока низкоэнергетических ионов, генерируемых из высокочастотного емкостного разряда в условиях динамического вакуума, является ионная бомбардировка, в результате которой выделяется дополнительная энергия ионизации, достаточная для разрыва водородных связей. В результате изменяется надмолекулярная структура обрабатываемого материала [1, 2]. Также авторами работы [3] показано, что воздействие плазмы ВЧЕ-разряда приводит к интенсификации жидкостных процессов. Таким образом, можно ожидать интенсификацию

диффузии модифицированных аминокормальдегидных смол путем обработки кожи хромового дубления из овчины.

Для поиска оптимальных параметров ВЧЕ-плазменной обработки кожи хромового дубления из шкур овчины применялся метод математического планирования эксперимента. В качестве факторов исследования выбраны мощность разряда, значения которого варьировали в пределах 0,4-4,1 Вт, и продолжительность обработки: 90-270 с. Расход плазмообразующего газа – аргона 0,04 г/с, давление в разрядной камере 26,6 Па. Функцией отклика является время впитывания капли воды. На рисунке 1 представлены поверхность отклика и контуры поверхности отклика на плоскости кожи, обработанной плазмой ВЧЕ-разряда.

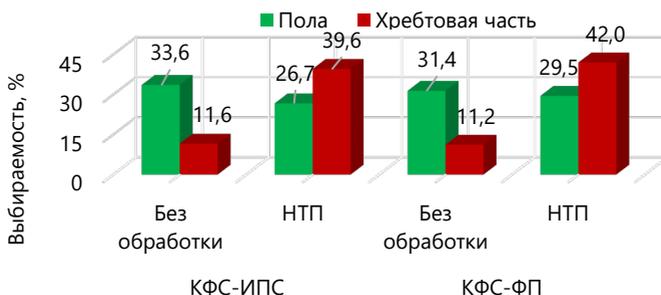


**Рисунок 1.** Поверхность отклика (а) и контуры поверхности отклика на плоскости (б) кожи, обработанной плазмой ВЧЕ-разряда

Наименьшее значение времени впитывания капли воды достигается при мощности разряда 1,3-1,5 кВт и продолжительности модификации 180 с. При использовании в качестве плазмообразующего газа смеси аргон:воздух в соотношении 70:30 позволило сократить время впитывания капли воды в 1,5 раза – до 64 секунд. Подтверждением, что найденный режим плазменной обработки является оптимальным и приводит к разделению структуры дермы является снижение термостойкости, обработанных плазмой образцов на 3°С по сравнению с контрольными: 106°С против 109°С контрольного образца. На рисунке 2 представлена выбираемость растворов карбамидоформальдегидных смол из рабочего раствора при наполнении кожи хромового дубления из овчины.

Как видно по представленным данным, предварительная плазменная модификация кожи позволяет интенсифицировать процесс наполнения.

Хребтовая часть после плазменной модификации после плазменной модификации становится более проницаемой.



**Рисунок 2.** Выбираемость карбамидоформальдегидных смол из рабочего раствора

Так, при наполнении смолой КФС-ИПС выбираемость хребтовой части увеличивается в 3,4 раза, при наполнении смолой КФС-ФП увеличивается в 3,7 раза. Таким образом, плазменная модификация за счет рекомбинации ионов, приводящей к конформационным изменениям полипептидных цепей коллагена приводит к разделению структуры дермы и интенсификации диффузии карбамидоформальдегидных смол при наполнении кожи.

### Литература:

- [1] Абдуллин, И. Ш. Взаимодействие ВЧ плазмы пониженного давления с капиллярно-пористыми материалами / И. Ш. Абдуллин, А. М. Сунгатуллин, Г. Р. Фахрутдинова, В. С. Желтухин // Кожевенно-обувная промышленность. – 2009. – №1. – С.40-42.
- [2] Кулевцов Г. Н. Повышение эффективности использования сырья, полуфабриката, отходов и вспомогательных материалов кожевенного производства с применением низкотемпературной плазмы: монография [Текст] / Г. Н. Кулевцов, Л. Р. Джанбекова, И. Ш. Абдуллин, В. С. Желтухин, И. В. Красина, Э. Ф. Вознесенский. – Казань: Изд-во КГТУ, 2008. – 260 с.
- [3] Абдуллин, И. Ш. Модификация структуры кожевенного материала в потоке высокочастотной плазмы пониженного давления / И. Ш. Абдуллин, Э. Ф. Вознесенский, И. В. Красина, Т. Р. Хасанова // V Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии: сборник трудов, Т.2. – Иваново: Ивановский гос.хим.-технол.ун-т, 2008. – С. 406-409.

lilatfullin@gmail.com

## ВЛИЯНИЕ ПОТОКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ АМИНОСМОЛ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОЖИ

**И. И. Латфуллин<sup>1</sup>, А. В. Островская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия

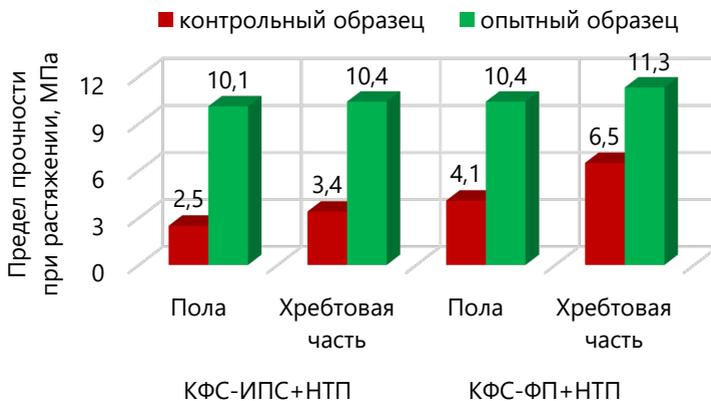
Продукция кожевенной и меховой промышленности пользуется стабильным спросом в России. Одними из факторов, влияющих на производство высококачественных изделий являются использование современных технологий обработки сырья и полуфабриката, а также применение химических реагентов, обеспечивающих комплекс эксплуатационных и эстетических свойств готового изделия. Производители химических реагентов для кожевенно-меховой отрасли расширяют ассортимент продукции, в котором особое место занимают полимерные соединения. Их применение позволяет повысить физико-механические показатели кожи и кожевой ткани меха, наполненность, а также эстетические свойства изделий. К перспективным методам модификации свойств материалов относится обработка потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из высокочастотного емкостного разряда в условиях динамического вакуума [1].

В работе приведены результаты комбинированной обработки модифицированными аминосолами и ВЧ-плазменной обработки кожи хромового дубления из овчины. Так, синтезированы карбамидоформальдегидные смолы, модифицированные алифатическими спиртами: изопропиловым спиртом (КФС-ИПС) и 1,1,3-тригидротетрафторпропанолом (КФС-ФП).

Объектом исследования являлась кожа хромового дубления из овчины. Наполнение синтезированными карбамидоформальдегидными смолами проводили после плазменной обработки кожи при температуре 38–40°C в течение 180 минут в смеси растворителей вода:диметилсульфоксид в соотношении 70:30.

ВЧЕ-плазменная обработка кожи проводилась в ранее установленных оптимальных параметрах: давление в разрядной камере 26,6 Па, мощность разряда 1,3–1,5 кВт, продолжительность обработки 180 с, плазмообразующий газ – аргон:воздух в соотношении 70:30.

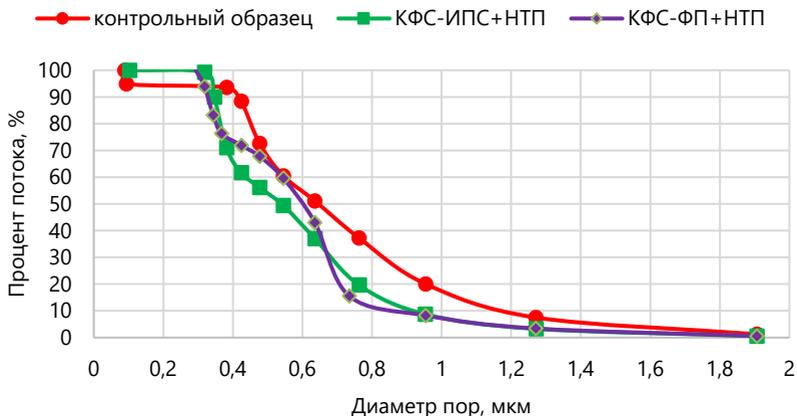
Одними из основных эксплуатационных показателей кожи являются физико-механические характеристики. На рисунке 1 представлены данные по изменению предела прочности при растяжении контрольных и опытных образцов, прошедших комбинированную обработку в плазме ВЧЕ-разряда и модифицированными аminosмолами.



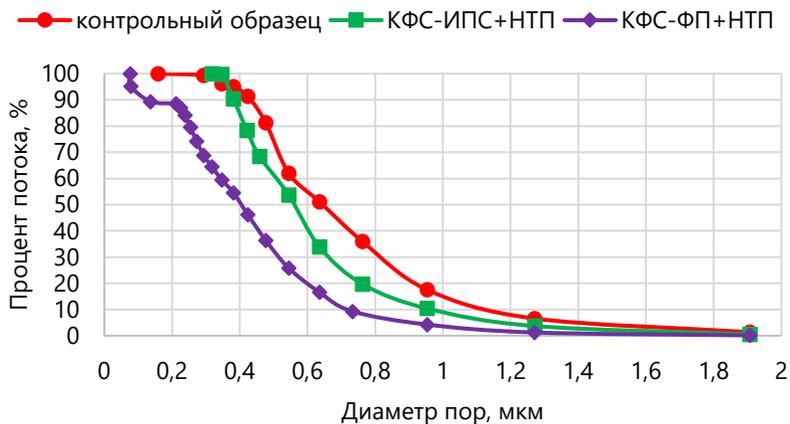
**Рисунок 1.** Предел прочности при растяжении кожи хромового дубления из овчины

Как видно по представленным данным, предел прочности при растяжении опытных образцов после комбинированной обработки в плазме ВЧЕ-разряда и модифицированными аminosмолами повышается во всех случаях. Так, при использовании для наполнения смолы КФС-ИПС предел прочности при растяжении увеличивается в 3-4 раза для хребтовой части и участка полы соответственно. В меньшей степени увеличение предела прочности при растяжении наблюдается в случае наполнения кожи смолой КФС-ФП: в 1,8-2,5 раза для хребтовой части и полы соответственно.

Наполнение капиллярно-пористых материалов приводит к снижению гигиенических показателей. В данной работе исследование распределения пор по размерам проводили методом газо-жидкостной порометрии. На рисунках 2, 3 представлены корректирующие интегральные кривые распределения пор по размерам участков кожи хромового дубления из овчины.



**Рисунок 2.** Корректирующие интегральные кривые распределения пор по размерам хребтовой части кожи хромового дубления из овчины



**Рисунок 3.** Корректирующие интегральные кривые распределения пор по размерам участка полы кожи хромового дубления из овчины

Как видно по представленным данным, перераспределение пор по размерам наблюдается во всех случаях опытных образцов по сравнению с контрольными. Однако, наиболее заметное влияние комбинированной обработки плазмой ВЧЕ-разряда и модифицированными аminosмолами проявляется при исследовании участка поры. Так, пористость опытного образца в среднем снижается на 10,7-27,8 % в случае наполнения КФС-ИПС и КФС-ФП соответственно. Пористость хребтовой части в среднем снижается на 14,0 % при наполнении кожи смолой КФС-ФП, и на 17,2 % при наполнении кожи смолой КФС-ИПС.

Паропроницаемость опытных образцов составляет 2,2-2,4 мг/см<sup>2</sup>·ч. Значение паропроницаемости контрольных образцов составляет 2,0-2,1 мг/см<sup>2</sup>·ч.

Таким образом, комбинированная обработка плазмой ВЧЕ-разряда и модифицированными аminosмолами позволяет повысить предел прочности при растяжении кожи хромового дубления из овчины, существенно не изменив при этом ее пористости.

#### **Литература:**

[1] Абдуллин, И. Ш. Модификация структуры кожевенного материала в потоке высокочастотной плазмы пониженного давления / И. Ш. Абдуллин, Э. Ф. Вознесенский, И. В. Красина, Т. Р. Хасанова // V Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии: сборник трудов, Т.2. – Иваново: Ивановский гос.хим.-технол.ун-т, 2008. – С. 406-409.

lilatfullin@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СТРУИ ЭЛЕКТРОЛИТА С ТОКОМ

**К. А. Гашигуллин<sup>1</sup>, К. Ш. Мاستюков<sup>1</sup>, М. Е. Сухих<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, Р. Р. Каюмов<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева, Казань, Россия*

В плазменно-жидкостных системах сложным образом переплетаются такие науки как физика плазмы, гидрогазодинамика, плазмохимия, тепломассообмен и фотолиз [1]. Наряду с этим данные системы находят широкое применение в различных отраслях промышленного производства [2-4]. Существуют различные виды и конфигурации плазменно-жидкостных систем. Одним из интересных разновидностей является высокочастотный (ВЧ) разряд со струйными электролитными электродами [5-6]. Данный тип разряда характеризуется возникновением кольцевых или полукольцевых плазменных структур вокруг струи электролита. Механизм их возникновения до конца не ясен, так как в жидкости носителями тока выступают ионы, свободные электроны отсутствуют.

Целью настоящей работы является расчет напряженности электрического поля около струи электролита с током и выяснение механизма появления свободных электронов.

Известно, что в ВЧ емкостном разряде вектор электромагнитного поля имеет две составляющие: потенциальную  $E$  и вихревую ( $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ ) [3]. В конструкции плазмотрона с двумя и более жидкими электродами один из них является неподвижным – электролит в ванне, остальные – струйными. Сечение струи при этом на порядок и больше меньше площади электролита в ванне, поэтому все составляющие вектора электромагнитного поля имеют  $r$ - и  $z$ -компоненты. Форму свободно-истекающей струи в зоне распада можно аппроксимировать в первом приближении волнообразной фигурой с синусоидальным профилем переменной амплитуды (рис.1), который может быть описан уравнением

$$r_c(z) = 0,001 \cos(4\pi z * 10^2) - 0,005z + 0,0015, \text{ [мм]}$$

Здесь  $z$  [мм] – расстояние от начала струи. Согласно экспериментальным данным [4], радиус струи в её основании 2.5 мм, максимальный радиус синусоидального профиля в конце рассматриваемого участка 2 мм, длина периода синусоидального профиля 5 мм, амплитуда 1 мм.

В цилиндрической системе координат высокочастотный ток плотностью  $\vec{j} = (0, 0, j_z)$  индуцирует магнитное поле  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} = (0, \mu_0 H_\varphi, 0)$ , и электрическое поле  $\vec{E} = (E_r, E_\varphi, E_z)$ , где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Применим метод комплексных амплитуд для расчета высокочастотного поля:

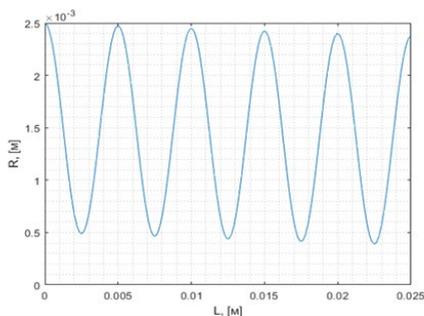
$$\vec{j} = j_A \exp(i\omega t), \quad \vec{H} = H_A \exp(i\omega t), \quad \vec{E} = E_A \exp(i\omega t), \quad (1)$$

где  $j_A, H_A, E_A$  – вектор-амплитуды,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,  $f$  – частота тока,  $i$  – мнимая единица.

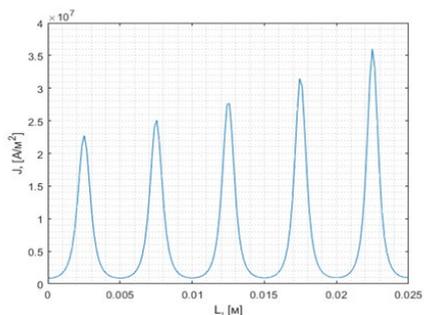
Пусть  $r_c = r_c(z)$  – текущий радиус струи. Тогда плотность тока запишется следующим уравнением (рис. 16):

$$j_z(z) = I_A / \pi r_c^2(z) \quad (2)$$

где  $I_A$  – амплитуда тока.



**Рисунок 1.** Схема профиля струи электролита

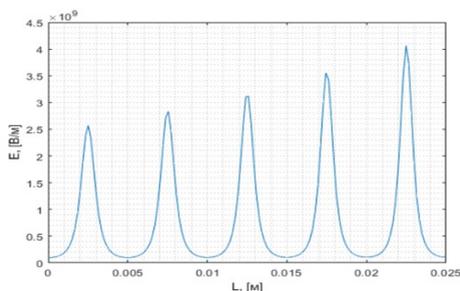


**Рисунок 2.** Плотность тока в струе

Вводя комплексные амплитуды, можно получить значения вещественных компонент комплексной электрической напряженности на границе струи в виде (рис.3):

$$\operatorname{Re} E_r(z) = \frac{I_a}{2\pi\varepsilon_0\omega r_c^2(z)} \cdot \frac{\partial r_c}{\partial z}, \quad \operatorname{Re} E_z(z) = -\frac{I_a}{\pi\varepsilon_0\omega r_c^2(z)}. \quad (3)$$

Таким образом, напряженность электрического поля достигает значений более  $2 \cdot 10^9$  В/м. При такой напряженности электрического поля возможна автоэлектронная эмиссия электронов из струи электролита. Эти электроны могут быть первичными для возникновения кольцевого или полукольцевого разряда в области сужения струи.



**Рисунок 3.** Напряженность электрического поля струи

### Литература:

- [1] P.J. Bruggeman, A. Bogaerts, J.M. Pouvesle, E. Robert, E.J. Szili, Journal of Applied Physics, 130 (20), 200401 (2021).
- [2] A.F. Gaysin, A.K. Gilmutdinov, Inorganic Materials: Applied Research, **12** (3), 633 (2021). DOI: 10.1134/S2075113321030102
- [3] A.F. Gaysin, Inorganic Materials: Applied Research, **8** (3), 392 (2017)
- [4] A.F. Gaysin, A.K. Gilmutdinov, D.N. Mirkhanov, Metal Science and Heat Treatment, 60 (1-2), 128 (2018).
- [5] Ал.Ф. Гайсин, Ф.М. Гайсин, В.С. Желтухин, Э.Е. Сон, Физика плазмы, **48** (1), 71 (2022).
- [6] А.Ф. Гайсин, Э.Е. Сон, С.Ю. Петряков, Физика плазмы, **43** (7), 625 (2017).

kamil.gashigullin@yandex.ru

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ПОТОКЕ ГЕЛИЯ

**Б. А. Тимеркаев<sup>1</sup>, О. А. Петрова<sup>1</sup>, А. И. Сайфутдинов<sup>1</sup>, Д. И. Исрафилов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

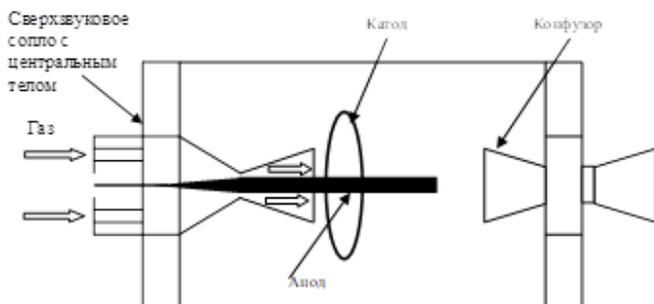
<sup>2</sup>КФУ, Казань, Россия

Электрические разряды в сверхзвуковом потоке газа находят применение в самых разнообразных областях. В работе [1] в качестве возможных применений плазменных технологий в авиации выделяют управление аэродинамическими характеристиками летательных аппаратов и плазменно-стимулированное горение пропан-воздушных смесей при сверхзвуковых скоростях потока. В то же время тлеющий разряд в сверхзвуковом потоке газа может найти широкое применение во многих других областях. Например, в газовых лазерах в качестве активной среды, плазменном нанесении защитных, функциональных, антикоррозионных покрытий. Для газовых лазеров использование сверхзвуковых потоков привлекательно с точки зрения быстрой смены рабочего газа с сохранением высокой степени инверсности заселенности лазерных уровней и для исключения ионизационно-перегревных неустойчивостей [2-3]. В случае плазменного нанесения покрытий разряд в сверхзвуковом потоке может служить альтернативой магнетронному разряду [4]. В последнем случае используется возможность создания с помощью сверхзвукового потока газа неравномерность распределения частиц газа в пространстве.

Одним из необходимых условий для обеспечения качественного покрытия является сильное разрежение рабочего газа, при котором выбитый из катода атом может долететь до подложки, не испытав ни одного столкновения. При реальных размерах вакуумной установки это возможно лишь при давлениях порядка  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  Торр. С другой стороны, для выполнения условия самоподдержания разряда необходимо наличие хотя бы 5-10 ионизирующих столкновений электронов в прикатодной области. В работе [4] представлена теория тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке азота, организованном вблизи центрального тела осесимметричного сверхзвукового сопла с центральным телом. Как показали теоретические расчеты, сверхзвуковой поток газа может обеспечить неравномерное распределение частиц газа в межэлектродном пространстве. Т.е., анод может находиться в области

повышенного давления газа, а катод в области пониженного давления. В данной работе представлены результаты теоретических расчетов распределения в разрядной области основных характеристик тлеющего разряда в гелии. Главной особенностью этих расчетов являются неоднородность распределения концентрации частиц газа в межэлектродном пространстве. Численные расчеты распределения концентрации частиц газа в межэлектродном пространстве были выполнены в работах [4], которые показали, что вблизи центрального тела осесимметричного сопла Лавалья образуется плотное кольцо нейтральных частиц газа. За пределами этого кольца плотность частиц газа определяется характеристиками вакуумных насосов.

Схема установки показан на рис.1. Геометрические размеры сопла Лавалья, представленные на рис.1, рассчитаны исходя из требуемых расходов газа и чисел Маха.



**Рисунок 1.** Эскиз разрядного устройства со сверхзвуковым потоком газа.

Геометрические размеры сопла Лавалья с центральным телом имели следующие параметры: диаметр входного сечения  $d_1 = 6$  мм, диаметр критического сечения  $d_2 = 3,5$  мм, диаметр выходного сечения  $d_3 = 8$  мм, длина до критического сечения и за критической части сопла соответственно равны 5 мм и 12 мм. Диаметр цилиндрическое центральное тело равен 3 мм.

Самосогласованная модель тлеющего разряда включала  $k$  уравнений баланса для плотностей всех рассматриваемых типов частиц (нейтральных частиц, возбужденных частиц, электронов и ионов), одно уравнение баланса для плотности энергии электронов и уравнение Пуассона для электрического потенциала  $\phi$ . [30-33]. Вектор напряженности электрического поля

определяется из уравнения Пуассона. Потоки плотности заряженных, возбужденных и нейтральных частиц, а также поток плотности энергии электронов записываются в диффузионно - дрейфовом приближении. В уравнении для энергии учитываются нагрев электронов в электрическом поле, обмен энергией при упругих столкновениях электронов с нейтральными частицами газа, изменение энергии вследствие неупругих столкновений электронов и тяжелых частиц плазмы как доля потерянной (или полученной) энергии на один электрон в данной реакции. Исползованная система уравнений приведена в [4].

Для гелия существуют различные наборы элементарных процессов. Мы использовали плазмохимические реакции из [5].

Константы с участием электронов - упругих и неупругих процессов, а также транспортные характеристики электронов определялись путем свертки сечения с функцией распределения электронов, полученной путем решения локального кинетического уравнения Больцмана. Для металлических электродов граничные условия для потока электронов, для плотности потока энергии электронов, для ионов, а также возбужденных и нейтральных частиц плазмы имеют вид:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_e \Big|_{x=0, L_g} = \frac{1}{4} v_{th,e} n_e - (1 - \alpha) \sum_i \gamma_i (\mathbf{\Gamma}_i \cdot \mathbf{n}), \quad (1)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{Q}_e \Big|_{x=0, L_g} = \frac{1}{4} v_{th,e} n_e \times 2k_B T_e - (1 - \alpha) \sum_i \gamma_i \bar{\mathcal{E}}_i (\mathbf{\Gamma}_i \cdot \mathbf{n}), \quad (2)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_i \Big|_{x=0, L_g} = \left( \frac{1}{4} v_{th,i} n_e \right) + \alpha \mu_i n_i \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} \quad (3)$$

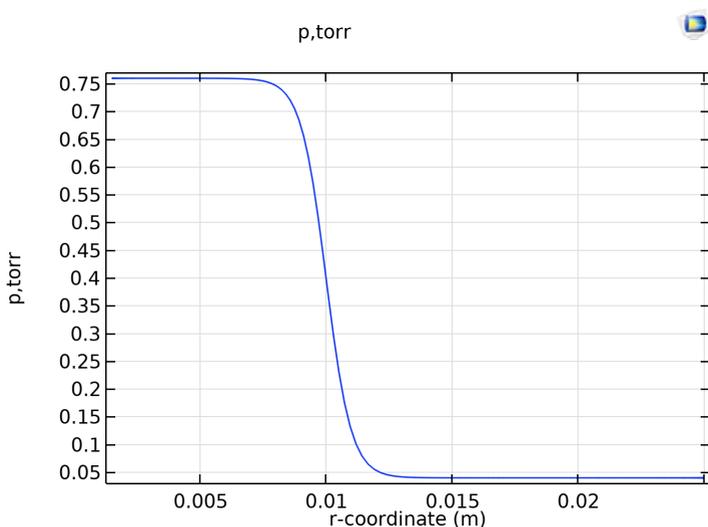
$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_n \Big|_{x=0, L_g} = \left( \frac{1}{4} v_{th,n} n_n \right) \quad (4)$$

Здесь  $\mathbf{n}$  — вектор нормали, направленный к стенке,  $\gamma_i$  — коэффициент вторичной эмиссии с поверхности катода для частиц типа  $i$ ;  $\mathbf{\Gamma}_i$  обозначает поток частиц данного типа на электрод;  $\bar{\mathcal{E}}_i = (\mathcal{E}_{ion,i} - 2W)_i$ ;  $\mathcal{E}_{ion,i}$  — средняя

энергия, приходящаяся на излучаемый электрон в результате столкновений с частицами типа  $i$ ;  $\bar{\epsilon}_{th} = 2k_B T_c$  – энергия ионизации частиц газа для иона  $i$ -го типа;  $\bar{\epsilon}$  – средняя энергия, приходящаяся на испускаемый электрон при термоэлектронной эмиссии;  $v_{th,e}$ ,  $v_{th,i}$ ,  $v_{th,n}$  и – средние тепловые скорости электронов, ионов, возбужденных и нейтральных частиц соответственно;  $\alpha = 1$  на аноде и  $\alpha = 0$  на катоде  $W$  – выходная мощность срабатывания,  $L_g$  – координата анода.

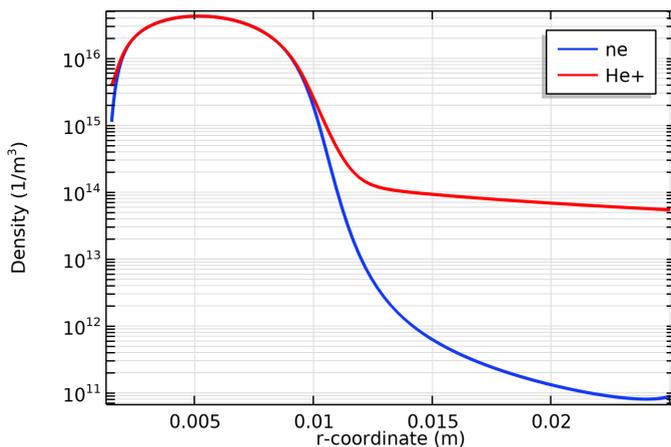
В качестве граничного условия для уравнения Пуассона предполагалось, что катод заземлен, а на аноде потенциал определяется из уравнения электрической цепи по закону Кирхгофа.

Ниже представлены результаты расчетов для случая, когда вблизи анода создается повышенная концентрация частиц гелия, определяемая распределением давления на рисунке 2а. Давление газа вблизи катода  $p_0 = 0.04$  Тор, давление газа вблизи анода  $p = 0.076$  Тор. На рисунках 2 а,2б, 2в приведены распределения давления, концентрации ионов гелия и электрона, потенциала электрического поля в межэлектродном пространстве.

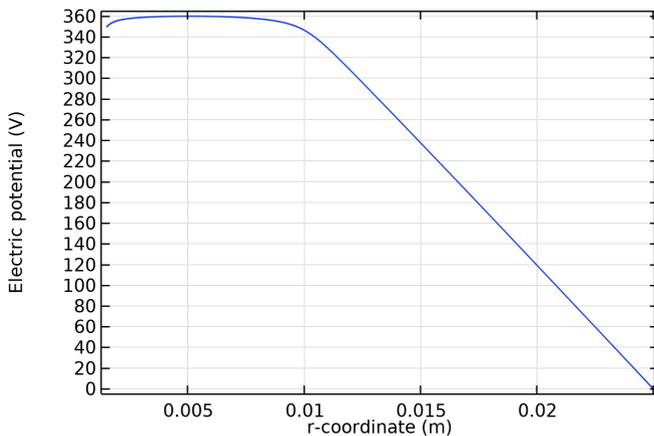


**Рисунок 2а.** Распределение давления в межэлектродном пространстве.  $p_0 = 0.04$  Тор,  $p = 0.076$  Тор. Межэлектродное расстояние 2,5 см.

He,  $p_0(0.04\text{torr}) \cdot r_{\text{am}} V_0 = +1000\text{V}$ ,  $b=10$  анод в центре

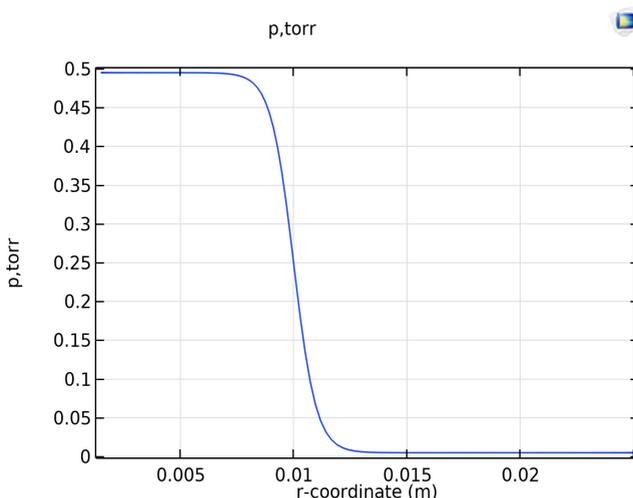


**Рисунок 26** Распределение концентраций электронов и ионов He в межэлектродном пространстве.  $b=10$   $p_0=0.04$  Тор,  $p=0.76$  Тор. Межэлектродное расстояние 2,5 см



**Рисунок 2в.** Распределение потенциала в межэлектродном пространстве.  $b=10$   $p_0=0.04$  Тор,  $p=0.76$  Тор. Межэлектродное расстояние 2,5 см

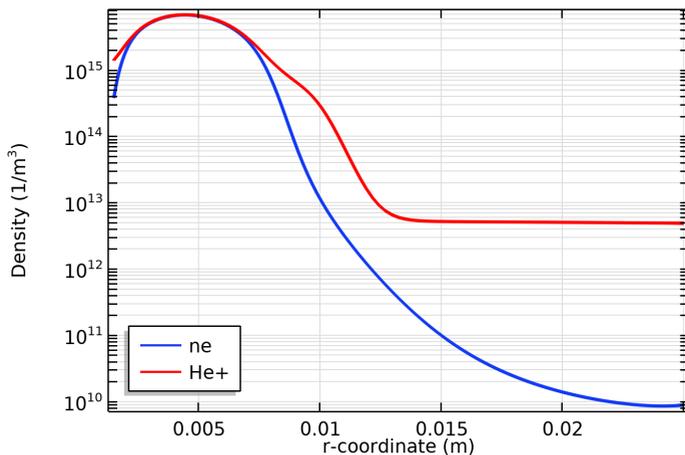
Как видно из рисунков, при данном распределении давления все прикатодные зоны перемещаются в область повышенных концентраций газа. В области низкой плотности частиц газа потенциал поля практически линейно возрастает до максимального значения. Это распределение говорит о том, что в этой области нет объемных зарядов, напряженность поля имеет постоянную величину и намного больше, чем во всех остальных областях межэлектродного пространства. Вид распределения потенциала в области повышенной концентрации частиц газа напоминает фарадеево темное пространство: концентрации заряженных частиц на расстоянии 5 мм от поверхности анода достигает максимума. В этой области напряженность поля должна обратиться в нуль. Из 1000 В приложенного напряжения ориентировочно 350 В падает на разрядный промежуток, а остальные 650 В падает на балластнике.



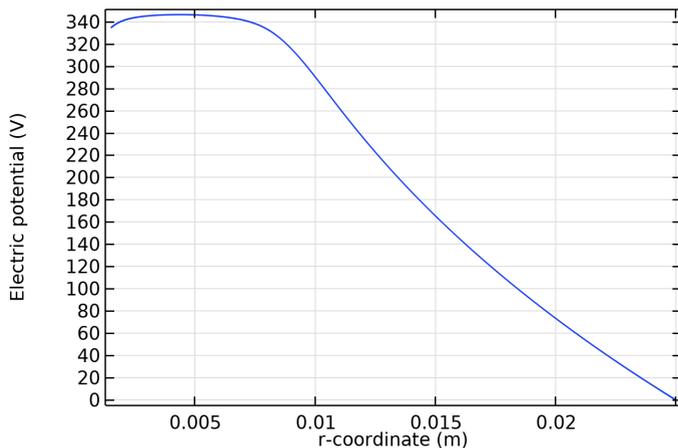
**Рисунок 3а.**  $p_0=0,005$  Тор,  $p=0,5$  Тор  $I=0,066$ А катод справа  $V=0$ , анод слева  $V_0=+1000$ В. Межэлектродное расстояние 2,5 см

На рисунках 3а, 3б, 3в представлены аналогичные распределения параметров тлеющего разряда для случая, когда давление газа вблизи анода 0,5 Тор, а вблизи катода 0,005 Тор. При этом в камере устанавливается напряжение 330 В и ток 66 мА. На балластнике падает 670 В. Как видно из рисунка 3в на распределение потенциала оказывает влияние объемный заряд и это распределение не является прямой линией.

He,  $p=0.005\text{torr}$  \*ram,  $L_k=25\text{mm}$ ,  $V_0=+1000\text{V}$ , анод слева



**Рисунок 36.**  $p_0=0.005$  Тор,  $p=0.5$  Тор  $I=0.066\text{A}$  катод справа  $V=0$ , анод слева  $V_0=+1000\text{В}$ . Межэлектродное расстояние 2,5 см



**Рисунок 3в.**  $p_0=0.005$  Тор,  $p=0.5$  Тор  $I=0.066\text{A}$  катод справа  $V=0$ , анод слева  $V_0=+1000\text{В}$ . Межэлектродное расстояние 2,5 см

Следовательно, напряженность электрического поля будет линейной функцией от радиуса. В области границы сверхзвукового потока наблюдается существенный отрыв концентрации положительных ионов от концентрации электронов, который достигает полтора порядка на границе сверхзвуковой струи. Этот отрыв вблизи катода становится порядка 250 раз. Следует обратить внимание на то, что на расстоянии 5 мм от катода концентрация электронов начинает расти в направлении к аноду. В то же время величина концентрации в этой области и до катода остается неизменной. Видимо, небольшой рост концентрации ионов компенсируется ускорением ионов в направлении к катоду.

**Заключение.** Таким образом, в работе показано, что сверхзвуковой поток, организованный вблизи анода тлеющего разряда, позволяет управлять внутренней структурой тлеющего разряда.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке по Соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ*

#### **Литература:**

- [1] М. Шибков, К. Н. Корнев, А. А. Логунов, Ю. К. Нестеренко. Нагрев газа в условиях пульсирующего поперечно-продольного разряда в дозвуковых и сверхзвуковых воздушных потоках. Физика плазмы, 2022, Т. 48, № 7, стр. 648-656. DOI: 10.31857/S0367292122100183
- [2] Тимеркаев Б.А., Галеев И.Г., Гончаров В.Е., Торопов В.Г., Фасхутдинов А.Х. Особенности тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке газа. Теплофизика высоких температур, т.28, № 5, с.843-846 1990
- [3] Тимеркаев Б.А., Галеев И.Г., Гончаров В.Е., Торопов В.Г., Фасхутдинов А.Х. Характеристики газового разряда в микросоплах. Журнал Теплофизика высоких температур, 1992, т.30, № 4, с. 439-444.
- [4] Shamsutdinov, R.S., Timerkaev, B.A., Petrova, O.A., Saifutdinov, A.I. Controlling the structure of a glow discharge by supersonic gas flow. Physics of Plasmas, 2022, 29(12), 120702. Web of Science Core Collection.
- [5] Kinga Kutasi, Peter Hartmann, Zoltan Donko. Self-consistent modeling of helium discharges: investigation of the role of He+2 ions. J.Phys.D: Appl.Phys. 34(2001), 3368-3377.

btimerkaev@gmail.com

## СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ ПЛАЗМЫ С ДРЕВЕСИНОЙ

**В.А. Черемных<sup>1</sup>, Д.В. Корженко<sup>2</sup>, А.А. Клопотов<sup>1</sup>, Г.Г. Волокитин<sup>1</sup>, М.С. Сыртанов<sup>2</sup>, В.В. Шеховцов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, Томск, Россия

В настоящее время в мире производятся десятки миллионов тонн технического углерода в год. Для производства технического углерода применяют природные и промышленные газы, нефтяные остатки и каменноугольные масла. Сажа относится к материалам широко используемым в шинной промышленности, при производстве типографских красок и углеграфитовых материалов.

Известно много способов получения технического углерода. Отметим основные:

- канальные сажи, получаемые сжиганием газа или его смесей с маслом при 1500–1700°C в камерах с щелевыми горелками;
- печные или пламенные сажи получают при сжигании газа или его смесей с маслом сырья в турбулентном потоке;
- термические сажи, получаемые разложением газа при 1100–1500°C в генераторах без доступа воздуха;
- ацетиленовая сажа, которую готовят сжиганием ацетилена при 2800–3200°C;
- ламповые или масляные сажи, получаемые при сжигании масел или нефтяных остатков в специализированных лампах [1].
- сажи, полученные методом конверсии метана в плазме СВЧ-разряда [2,3].

Особенности структурного строения технического углерода определяют качество конечного продукта. Кроме того, в углеродном материале возможно получение углеродных нанотрубок путем конверсии природного газа [4]. Поэтому структурные исследования, посвященные исследованию технического углерода, полученного разными методами, являются актуальными.

Целью настоящей работы являются структурные исследования сажи, полученной в результате взаимодействия высокоэнтальпийного плазменного потока с поверхностью древесины.

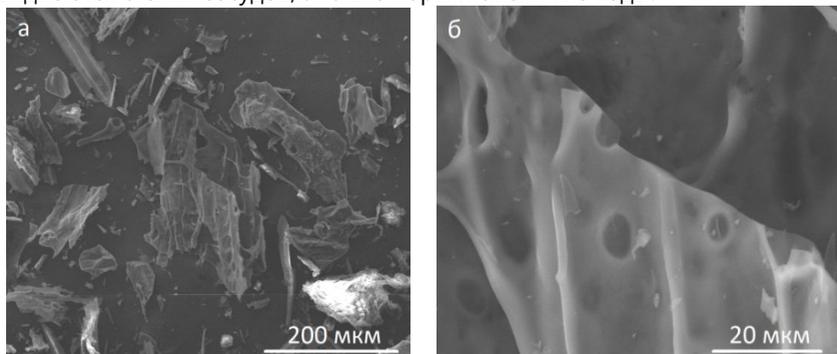
Тонкий слой сажи получали в результате взаимодействия высокоэнтальпийного плазменного потока с поверхностью древесины. Плазменный поток получали помощью оригинального стенда, созданного в Томском государственном архитектурно-строительном университете [5]. На этом стенде при помощи электродугового плазматрона прямого действия можно получать удельные тепловые потоки  $1,0 - 3,0 \text{ Вт/м}^2$  [6].

При взаимодействии высокоэнтальпийных плазменных потоков с древесиной получен порошок сажи.

В результате конверсии метана в плазме СВЧ-разряда в плазмохимическом реакторе получен углеродный материал [4].

Структурные исследования сажи проводили на сканирующем электронном микроскопе QUANTA 200 3D. Для рентгенофазового анализ использовали дифрактометр Shimadzu XRD 7000S с  $\text{CuK}\alpha$ -излучением. Анализ фазового состава проведен с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

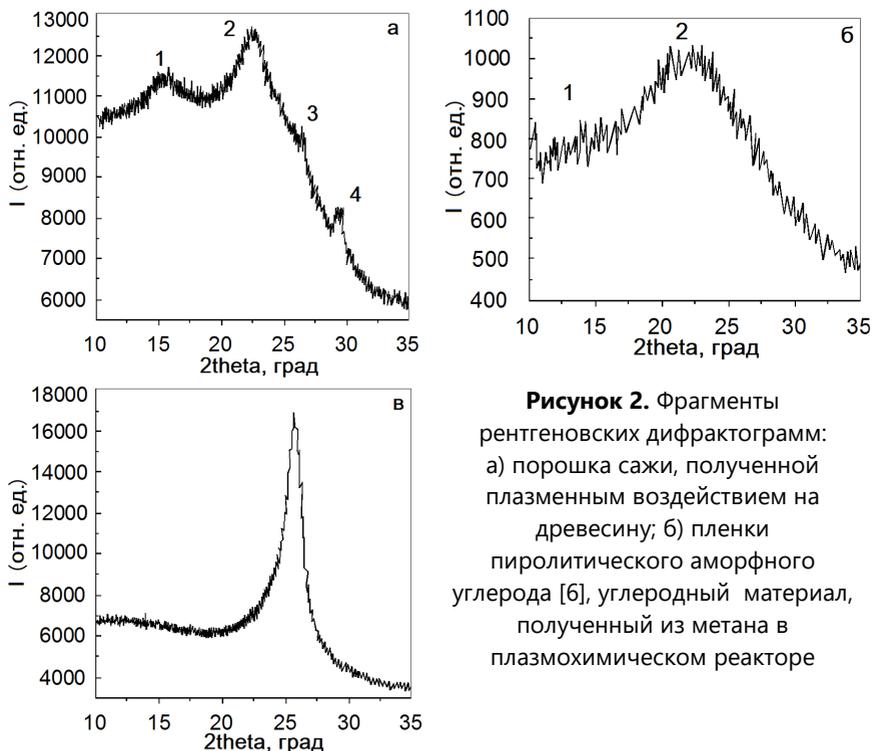
На рисунке 1 представлены микрофотографии порошка сажи, полученного при взаимодействии высокоэнтальпийного плазменного потока. Размер частиц порошка сажи изменяется в широких пределах от 1 до 120 мкм. Частицы порошка сажи хорошо повторяют морфологию древесины: виднеются стенки сосудов, а также поры и смоляные ходы.



**Рисунок 1.** Электронные снимки порошка сажи с поверхности древесины:  
а) увеличение  $\times 500$ , б) увеличение  $\times 4000$

На рисунке 2а приведен фрагмент дифрактограммы порошка сажи, полученной в результате взаимодействия плазмы с древесиной.

На дифрактограмме наблюдается размытый широкий пик с максимумом  $2\theta=22,4^\circ$ . Широкий размытый пик на дифрактограмме в области малых углов  $2\theta$  свидетельствует о наличии рентгеноаморфной углеродной фазы [7].



**Рисунок 2.** Фрагменты рентгеновских дифрактограмм: а) порошка сажи, полученной плазменным воздействием на древесину; б) пленки пиролитического аморфного углерода [6], углеродный материал, полученный из метана в плазмохимическом реакторе

На рисунке 2б приведена рентгеновская дифрактограмма пленки пиролитического аморфного углерода [8]. На дифрактограмме наблюдается размытый широкий пик с максимумом  $2\theta=22,4^\circ$ .

На рис. 2в представлена картина рентгеновской дифракции углеродного материала, полученного из метана в плазмохимическом реакторе. Согласно данным, приведенным в работе [4], в этом углеродном материале по составу выделяют целый спектр фаз на основе углерода: углеродные нановолокна, углеродные нанотрубки (однослойные, многослойные, луковичные), аморфный углерод, графит. На рис. 2а видно присутствие острого пика на дифрактограмме порошка сажи, полученного плазменным

воздействием на древесину (пик 3). Угловое положение этого пика хорошо совпадает с пиком на дифрактограмме от углеродного материала, полученного из метана в плазмохимическом реакторе.

На основе анализа широких дифракционных пиков на дифрактограммах были рассчитаны межплоскостные расстояния  $d$  и радиусы областей упорядочения  $R$  порошка сажи пиролитического аморфного углерода. Расчет межплоскостного расстояния проводился по формуле Вульфа-Брегга [9]. Радиус области упорядочения находился из уравнения Вайнштейна [10]:

$$R = \frac{1.58 \cdot 2\pi \cdot n^2}{B_{1/2}} \quad (2)$$

где  $B_{1/2}$  – полуширина пика.

Таблица 1. Структурные данные рентгеноаморфной углеродной фазы, определенные с широкого пика в области углов  $2\Theta$  от 20 до 32° углеродного материала

Образец	Номер пика	$2\Theta$	$R, \pm 0.01$ нм	Литература
Сажа, полученная при плазменном взаимодействии с древесиной	1	15.28	18.05	
	2	22.40	7.35	
	3	26.32	68.94	
	4	29.31	36.77	
Углеродный материал, полученный из метана в плазмохимическом реакторе		25.68	35.20	
Пиролитический углерод	1	14.2	12.94	[6]
	2	22.40	6.41	

Таким образом, установлено, что при синтезе углеродного материала, образующегося в результате высокоэнергетического воздействия на древесину, возможно образование углеродных наночастиц.

### Литература

1. Углеродные материалы и их физико-химические свойства / А.В. Романенко, П.А. Симонов / под общ. ред. д.т.н., проф. А.С. Носкова. - М : Калвис, 2007. - 109.
2. Ларионов К. Б. Исследование физико-химических характеристик углеродного материала, полученного методом конверсии метана в плазме

СВЧ-разряда/ К. Б. Ларионов, С. А. Янковский, А. Я. Пак [и др.] / Кокс и химия. 2022. №3. С.32-38.

3. Газохимия Инпромстрой [Электронный ресурс]. URL: <http://GAZONIMIYA.RU.html>

4. Жерлицын А.Г. Получение углеродных нанотрубок из природного газа / А.Г. Жерлицын, В.С. Косицын, А.С. Кобец, [и др.]/ Вестник науки Сибири. 2012. № 3 (4) С.30-37.

5. Патент на полезную модель № 212821 U1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Устройство для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы : № 2021139632 : заявл. 29.12.2021 : опубл. 10.08.2022 / Г. Г. Волокитин, В. В. Шеховцов, К. А. Безухов, В. А. Черемных; заявитель ФГБОУ ВО "Томский государственный архитектурно-строительный университет".

6. Волокитин Г. Г. Создание защитного - декоративного покрытия на поверхности древесины с помощью энергии низкотемпературной плазмы / Г. Г. Волокитин, Н. К. Скрипникова, О. Г. Волокитин, В. В. Шеховцов // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. – 2014. – Т. 1, № 5. – С. 185-189.

7. Рентгенография и электронная микроскопия материалов: Учеб. пособие / В.Д. Андреева, Е.В. Новиков, И.К. Боричева, А.Б. Спешилова. — СПб.: Политехнический ун-т, 2008. – 180 с.

8. Богданов С.П. Рентгеноструктурный анализ углеродистых материалов: методические указания. / С.П. Богданов - СПб.: СПбГИ.- 2013. - 26 с.

9. Брэгг У.Г., Брэгг У.Л. Кристаллическое состояние. М.: Главная редакция технико-теоретической литературы. 1938. 336 с.

10. Вайнштейн Б.К. Дифракция рентгеновских лучей на цепных молекулах. М.: АН СССР. 1963. 372 с.

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

**Р. Ш. Нагимов<sup>1</sup>, А. А. Николаев<sup>1</sup>, А. Ю. Назаров<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

Рассматриваются вопросы влияния режимов плазменного источника с накальным катодом при ионном азотировании в дуговом разряде низкого давления на физико-механические характеристики поверхности быстрорежущей стали Р6М5 при комплексной ионно-плазменной обработке. В работе описано влияние режимов азотирования, таких как отрицательное смещение на подложке, ток разряда плазменного источника с накальным катодом и состав газовой смеси Ar/N<sub>2</sub>.

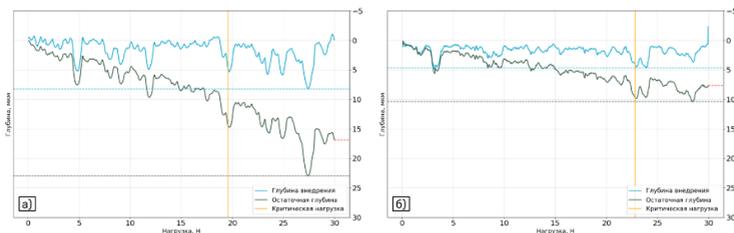
Для увеличения ресурса работы металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали используются различные методы упрочнения поверхности [1]. Один из наиболее перспективных - комплексная ионно-плазменная обработка, включающая ионное азотирование в дуговом разряде и нанесение функционального покрытия в едином вакуумном цикле. Выбор режимов позволит спрогнозировать температуру детали и глубину диффузионного слоя, что в свою очередь повлияет на адгезионные и трибологические характеристики покрытия.

Разработана математическая модель прогнозирования температуры детали при ионном азотировании, принимающая на вышеуказанные технологические режимы. Полученная модель имеет линейный вид и описывается как:

$$T = 1.06U + 0.83I + 17.14k - k(0.94U - 12.19I) - 206.92$$

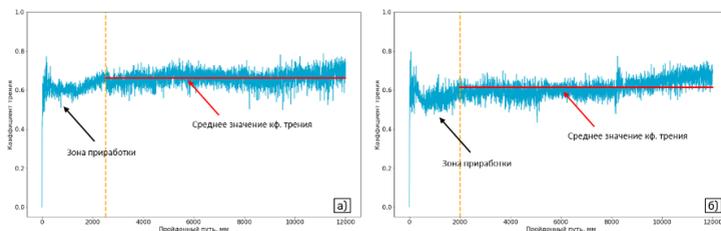
Расчет температуры и экспериментальные исследования глубины диффузионного слоя позволили определить, что зависимость глубины от времени имеет логарифмический вид, где с увеличением продолжительности процесса возрастает толщина слоя. По результатам литературного анализа определено, что оптимальной является толщина слоя в 40 мкм [3]. Зная температуру и необходимую глубину, были рассчитаны продолжительности такой обработки. По результатам склерометрических исследований было определено, что образец, обработанный технологией при T = 475°C, t = 35 мин, показал наилучшие результаты по критической нагрузке L<sub>c</sub>, а также по

максимальной глубине проникновения индентора и по глубине проникновения индентора при 30 Н. Однако коэффициент упругого восстановления незначительно выше у технологии  $T = 400^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 47$  мин (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Склерометрические испытания для образцов: а)  $T = 400^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 47$  мин, б)  $T = 475^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 35$  мин.

Результаты трибологических испытаний (рисунок 2) показали, что обработка образца при температуре  $400^{\circ}\text{C}$  и времени 47 минут привела к среднему коэффициенту трения 0.66, в то время как обработка при температуре  $475^{\circ}\text{C}$  и времени 35 минут дала коэффициент трения 0.6. Интенсивность изнашивания для обоих образцов была незначительно различной и составила порядка  $2.5\text{e-}5$ .



**Рисунок 2.** Склерометрические испытания для образцов: а)  $T = 400^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 47$  мин, б)  $T = 475^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 35$  мин.

Результаты показали, что используя следующие режимы ионного азотирования в плазменном источнике с накалимым катодом: отрицательное смещение потенциала 550 В, ток дуги плазменного источника 50 А, состав газа 50%Ar/50%N<sub>2</sub> температура детали составляет  $475^{\circ}\text{C}$  и при обработке с глубиной в 40 мкм со времени в 35 минут позволяет существенно увеличить адгезионные и трибологические характеристики защитного покрытия.

### Литература:

- [1] Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента.
- [2] Андреев А. А., Саблев Л. П., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые покрытия. – 2010.

[r.sh.nagimov@gmail.com](mailto:r.sh.nagimov@gmail.com)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОАКСИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ПОТОКА ИОНОВ В СИСТЕМЕ РЕАКТИВНОГО ИИНО - ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ

**А. В. Абрамов<sup>1, 2</sup>, Е. А. Панкратова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж,

<sup>2</sup>Воронеж,

<sup>3</sup>2Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина.,  
Воронеж

В [1] было показано, что в разрядной камере (РК) диодного типа при движении частиц в режиме близком к свободно молекулярному, потоки незаряженных химически активных частиц (ХАЧ) и положительных ионов формируются различным путем. Незаряженные ХАЧ попадают на электрод с пластиной главным образом после диффузного отражения от других поверхностей РК, что приводит к минимуму плотности их потока в центре электрода. Напротив, ионы не отражаются от поверхностей РК и попадают на электрод из места их генерации в объеме плазмы, что приводит к максимуму плотности их потока в центре электрода.

В данном докладе показано, что для выравнивания потока ионов по поверхности электрода можно использовать постоянное коаксиальное магнитное поле. В этом случае благодаря замагничиванию электронов диэлектрические стенки РК заряжаются положительным зарядом и большая часть ионов будет зеркально отражаться от них (рис.1а). Таким образом, поток идущих на поверхность электрода ионов будет складываться из потока поступающего непосредственно из объема плазмы ( $j_{in}$ ) и отраженного от стенок РК ( $j_{ст}$ ). В расчетах полагалось, что:

- скорость генерации ионов ( $G_i$ ) равномерна по объему плазмы;
- после генерации ионы двигаются изотропно и без столкновений.

С учетом этих положений, запишем выражение для плотности потока ионов, идущих из элемента объема плазмы  $\Delta V$  в точку на поверхности электрода, удаленную от него на расстояние  $\rho$  в виде

$$\Delta j_{in} = \frac{G_i}{4\pi} \frac{\Delta V \cos \alpha}{\rho^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол падения ионов на границу ионного слоя. Переходя от (1) к тройному интегралу в цилиндрических координатах получаем

$$j_m = \frac{G_i}{4\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} dj \int_0^{\sqrt{R^2 - y_0^2 \cos^2 j}} r dr \int_0^L \frac{z dz}{(r^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (2)$$

Здесь L и R соответственно высота и радиус РК,  $y_0$  – расстояние от центра электрода. Выполнив интегрирование в (2) по  $z$  и  $r$  имеем

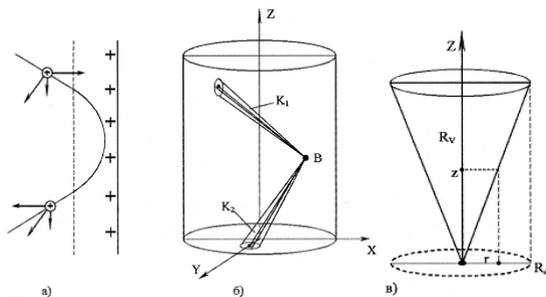
$$j_m = \frac{G_i}{2} \left[ L - \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left( \sqrt{y_0^2 \sin^2 \varphi + 2y_0 \sin \varphi \sqrt{R^2 - y_0^2 \cos^2 \varphi} + R^2 - y_0^2 \cos^2 \varphi} + L^2 + \sqrt{R^2 - y_0^2 \cos^2 \varphi} \right) d\varphi \right] \quad (3)$$

На рис. 2 кривая 1 иллюстрирует зависимость  $j_{\text{ип}}$  от  $y_0$ , которая имеет максимум в центре РК.

Процесс вычисления  $j_{\text{иТ}}$  иллюстрирует рис. 1б. С учётом зеркального отражения ионов, можно принять, что ионы образующиеся в объёме ограниченном конусом  $K_1$  попадают в точку В стенки РК и отражаются в пределах объёма, ограниченного конусом  $K_2$ . Конус  $K_2$  охватывает тот же телесный угол, что и  $K_1$ . Плотность потока ионов, поступающих в точку В из объёма конуса  $K_1$  ( $j_T$ ), будет проводить по объёму конуса, из которого поступают ионы (рис.1в):

$$j_T = \frac{G_i}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^{R_\Delta} r dr \int_{\frac{R_V}{R_\Delta}}^{R_V} \frac{z dz}{r(r^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

где  $R_V$  – длина оси конуса,  $R_\Delta$  – радиус основания конуса.



**Рисунок 1.** Иллюстрация к расчёту плотности потока ионов отраженного от стенки РК на обрабатываемую поверхность.

Здесь учтено, что линейные размеры основания конуса много меньше, чем длина его оси. В этом случае ось конуса будет совпадать с его высотой. Вычисление интеграла (4) даёт выражение:

$$j_T = \frac{G_i}{2} \left( R_V - \frac{R_V^2}{\sqrt{R_\Delta^2 + R_V^2}} \right). \quad (5)$$

Если сделать в выражении (5) замену  $R_{\Lambda}^2 = k^2 Rv^2$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности, то оно преобразуется к виду:

$$j_{\tau} = \frac{G_i R v}{2} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{k^2 + 1}} \right).$$

При  $k^2 \ll 1$ , т.е. когда высота конуса много больше радиуса основания, выражение для плотности потока ионов, поступающих на боковую поверхность РК, принимает вид:

$$j_{\tau} = \frac{G_i k^2}{4} R v.$$

В этом случае плотность потока ионов, поступающих в произвольную точку поверхности электрода с элемента  $\Delta S$  поверхности РК, с учетом возможности их отражения в пределах телесного угла  $\pi k^2$  будет

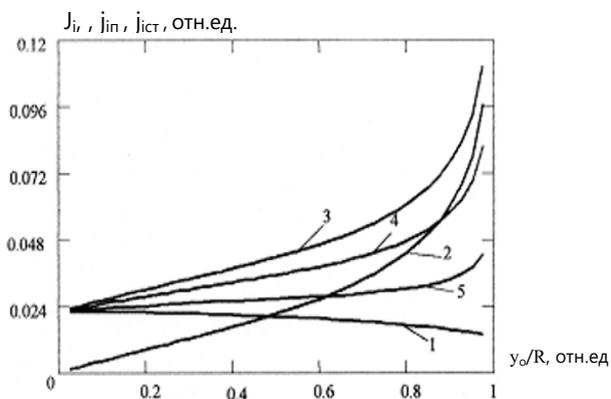
$$\Delta j_{i \text{ ст.}} = \frac{j_{\tau}}{\pi k^2} \cdot \frac{\Delta S \cos \alpha}{\rho^2}, \quad (6)$$

где  $\rho$  – расстояние от точки на электроде до элемента  $\Delta S$ , а  $\alpha$  – угол между нормалью к поверхности в этой точке ( $n_{\perp}$ ) и направлением  $\rho$ . Эта формула справедлива при условии, что линейные размеры элемента  $\Delta S$  много меньше  $\rho$ .

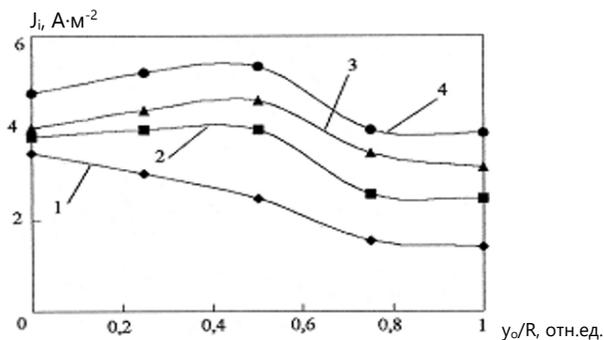
Ось конуса  $K_1$  может пересекать две поверхности: боковой стенки РК и верхнего электрода. Обозначим их соответственно  $Rv_{\text{ст}}$  и  $Rv_{\text{эл}}$ . Этим случаям соответствуют плотности потоков ионов  $j1_i$  и  $j2_i$ , а суммарная плотность потока  $j_{i \text{ ст.}}$ :  $j_{i \text{ ст.}} = j1_i + j2_i$ . Плотности потоков  $j1_i$  и  $j2_i$ :

$$j1_i = \frac{G_i R}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^{\tau_{\text{max}}} \frac{Rv_{\text{ст.}} \cos \alpha}{\rho^2} dz', \quad j2_i = \frac{G_i R}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_0^l \frac{Rv_{\text{эл.}} \cos \alpha}{\rho^2} dz'. \quad (7)$$

Интегралы (7) аналитически по переменной  $\varphi$  не вычисляются, поэтому зависимости  $j1_i$  и  $j2_i$  получены с помощью ЭВМ. Кривая 2 на рис. 2 показывает ход зависимости плотности отражённого потока ионов от стенки РК, а кривая 3 – суммарной плотности потока ионов по радиусу электрода для  $k_{\text{от}} = 1$ . Кривые 4 и 5 рассчитаны для коэффициентов отражения ( $k_{\text{от}}$ ) равных, соответственно 0,7 и 0,3. Анализ показывает, что изменяя  $k_{\text{от}}$ , т.е. меняя величину магнитного поля, можно управлять равномерностью распределения плотности потока ионов. Экспериментальные зависимости  $j_{i \text{ ст.}}$ , полученные при различных значениях идущего через соленоид тока, представлены на рис. 3. Наблюдающееся различие экспериментальных и теоретических зависимостей на периферии электрода вероятно связано с неравномерностью магнитного поля вдоль стенок РК. Ближе к верхнему и нижнему электродам камеры стенки РК заряжаются, вероятно, отрицательно, т.к. электроны попадают на них вдоль силовых линий магнитного поля.



**Рисунок 2.** Распределение плотности потока ионов вдоль радиуса электрода.  
 $J_{in}(1)$ ,  $J_{icr}(2)$ ,  $J_i(3,4,5)$ :  $k_{от} = 1(3)$ ,  $k_{пт} = 0.7(4)$ ,  $k_{от} = 0.3(5)$



**Рисунок 3.** Распределение плотности потока ионов вдоль радиуса электрода.  
Газ –  $SF_6$ ,  $P = 6,65 \cdot 10^{-2}$  Па,  $\Gamma = 2 \cdot 10^{-3}$   $m^3 \cdot Pa \cdot s^{-1}$ ,  $U_{вч} = 1,5$  кВ,  $i_i = 0(1)$ ; 1(2); 2(3); 3 (4).

### Литература:

[1] Abramov A. V., Pankratova E. A. Mathematical modeling of particle flux formation processes in reactive ion-plasma etching system at low pressures. X International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology» Contributed papers., Minsk, Belarus September 12-16, 2022. P.267-270.

abramovgasu@yandex.ru

## СТАБИЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА КОНДУКТОМЕТРИ- ЧЕСКОГО СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОН ОКСИДА НИКЕЛЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

**В. В. Кузнецова<sup>1, 2</sup>, Г. Р. Низамеева<sup>1, 3</sup>, Э. М. Лебедева<sup>1</sup>, Р. Р. Гайнуллин<sup>1</sup>,  
Н. А. Кузина<sup>3</sup>, И. Р. Низамеев<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, ФИЦ РАН, Казань, Россия*

<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ, Казань, Россия*

<sup>3</sup>*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*

Загрязнение воздуха продолжает оставаться одной из главных экологических проблем современного мира. Одним из наиболее опасных загрязняющих газов является диоксид азота (NO<sub>2</sub>) [1-3]. Для обнаружения этого высокотоксичного газа применяются сенсоры контроля газовой среды. Как известно, основным элементом любого сенсора является активный элемент. Важной характеристикой газочувствительного активного элемента, необходимой для проведения долгосрочного сбора данных о состоянии воздуха, мониторинга окружающей среды и обнаружения парниковых газов, является его долговременная стабильность. Поэтому исследование его стабильности является очень актуальной задачей.

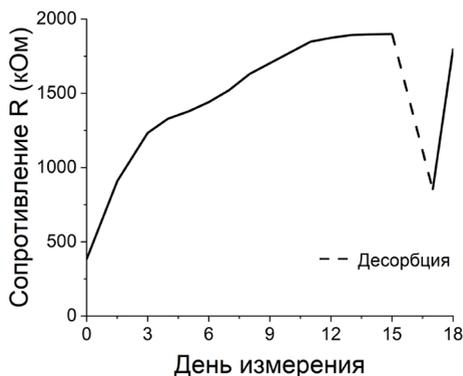
В рамках данной работы изучается стабильность газочувствительного элемента кондуктометрического сенсора диоксида азота, а также адсорбционно-десорбционные процессы, протекающие на его поверхности. В качестве газочувствительного элемента выступают волокна оксида никеля (NiO), нанесенные на поверхность стеклянной подложки с токопроводящими электродами.

Как известно, стабильность активного элемента кондуктометрического сенсора определяется его способностью поддерживать сигнал в течение длительного периода времени [4]. Сигналом в данном случае служит значение электрическое сопротивление.

Результаты исследований стабильности электрического сопротивления волокон оксида никеля в воздушной среде показали, что его значение до определенного момента времени растет и затем, стабилизируется.

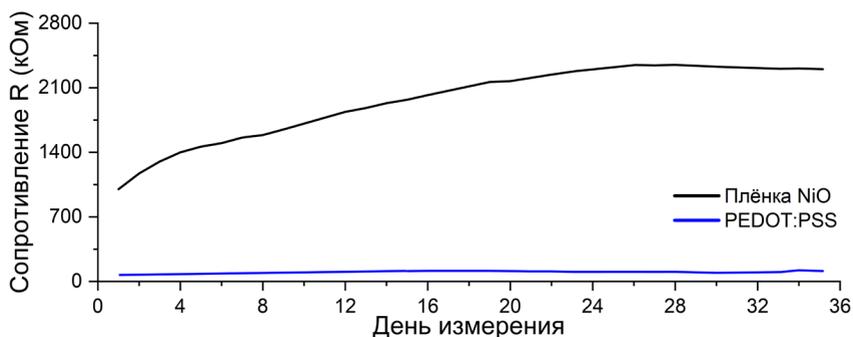
Такой характер изменения сопротивления, предположительно, связан с адсорбцией на поверхности волокон оксида никеля водяного пара или других молекул, которые содержатся в воздухе. По мере насыщения поверхностных слоев волокон оксида никеля и достижения порога насыщения скорость адсорбции уменьшается, что приводит к стабилизации сопротивления. Однако стоит отметить, что в зависимости от условий окружающей среды, сопротивление газочувствительного элемента, после стабилизации, может скачкообразно изменяться от измерения к измерению.

Также изучен процесс десорбции адсорбированных молекул с поверхности газочувствительного элемента на основе волокон оксида никеля, в ходе которого установлено, что десорбция начинается при  $t > 60^\circ\text{C}$ . В данной работе десорбция проводилась при  $t = 150^\circ\text{C}$ , результаты которой показаны на рисунке 1. В процессе десорбции наблюдается резкое падение сопротивления газочувствительного элемента, что свидетельствует об активном влиянии адсорбированных молекул на процессы переноса заряда в волокнах оксида никеля.



**Рисунок 1.** Десорбция чувствительного элемента на основе волокон оксида никеля

Далее, с целью улучшения адгезии волокон оксида никеля к поверхности стеклянной подложки и механических свойств волокон, они были модифицированы двумя способами: путем нанесения на поверхность волокон тонкой пленки оксида никеля и пленки PEDOT:PSS. Для модифицированных газочувствительных элементов также проведены исследования стабильности электрического сопротивления в воздушной среде. Результаты представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Изменение сопротивления модифицированных тонкой плёнкой NiO и плёнкой PEDOT:PSS чувствительных элементов с течением времени

Результаты оценки стабильности для газочувствительных элементов, модифицированных тонкой плёнкой оксида никеля, показали, что их характер стабилизации сопротивления аналогичен чистым волокнам оксида никеля. Однако, в отличие от чистых волокон оксида никеля, для модифицированных плёнкой оксида никеля газочувствительных элементов скачкообразных изменений сопротивления от внешних условий не наблюдается. Это говорит о том, что, кроме улучшения адгезии и механических свойств, покрытие в виде пленки NiO повышает стабильность электрического сопротивления и в последующем способность кондуктометрического сенсора поддерживать сенсорный отклик в течение длительного периода времени.

Стабилизация сопротивления газочувствительных элементов, модифицированных плёнкой PEDOT:PSS, происходит с течением определенного времени. Однако, как и в случае чистых волокон оксида никеля, даже после стабилизации, для них наблюдается скачкообразное изменение сопротивления в зависимости от условий окружающей среды.

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что стабильность сопротивления газочувствительного элемента на основе волокон оксида никеля зависит от условий окружающей среды, а именно, от адсорбционно-десорбционных процессов, протекающих на его поверхности в воздушной среде. Для поддержания стабильного сопротивления и поддержания электрического сигнала в течение длительного периода времени, целесообразным является модификация чистых волокон оксида никеля, путем нанесения тонкой пленки оксида никеля.

### **Литература:**

- [1] Garshick E. Effects of short-and long-term exposures to ambient air pollution on COPD // *European Respiratory Journal*. – 2014. – V. 44. – №. 3. – P. 558-561.
- [2] Chen T. M., Kuschner W. G., Gokhale J., Shofer S. Outdoor air pollution: nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide health effects // *The American journal of the medical sciences*. – 2007. – V. 333. – №. 4. – P. 249-256.
- [3] Bălă G. P., Râjnoveanu R. M., Tudorache E., Motișan R., Oancea C. Air pollution exposure—the (in) visible risk factor for respiratory diseases // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – V. 28. – P. 19615-19628.
- [4] Chai H., Zheng Z., Liu K., Xu J., Wu K., Luo Y., Zhang C. Stability of metal oxide semiconductor gas sensors: A review // *IEEE Sensors Journal*. – 2022. – V. 22. – №. 6. – P. 5470-5481.

guliya.riv@gmail.com

## ФФП-ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ЭФФЕКТОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ В ДИНАМИКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

**С. А. Демин<sup>1</sup>, В. А. Юнусов<sup>1</sup>, А. В. Минкин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия*

В последнее время все большую актуальность приобретают так называемые «науки о сложности», самыми ранними из которых являются теория динамических систем, кибернетика, общая теория систем, а позднее теория сложных систем и искусственный интеллект. Эти быстро эволюционирующие направления привлекают результаты друг друга для исследования природы и свойств сложных систем [1].

Физика сложных систем – научное направление, в котором сложные системы рассматриваются как объекты, имеющие значительное (порой бесконечное) число компонентов, взаимодействующих между собой. Взаимодействие между частями целого приводит к появлению уникальных свойств сложной системы. Задачи указанного направления состоят в поиске физических закономерностей при описании поведения и свойств сложных систем, а также в применении физических методов, например статистической физики, для изучения эволюции сложных систем. К сложным систем можно отнести головной мозг и другие органы человека, системы его жизнедеятельности, астрофизические объекты, такие как Солнце и двойные рентгеновские звезды (микрокварзы) и многое другое. Временные сигналы и пространственные карты, генерируемые сложными физическими, живыми и астрономическими системами, содержат большой объем скрытой информации. Методы статистического анализа позволяют провести их параметризацию и установить информационную значимость нерегулярностей экспериментально фиксируемых параметров [2, 3].

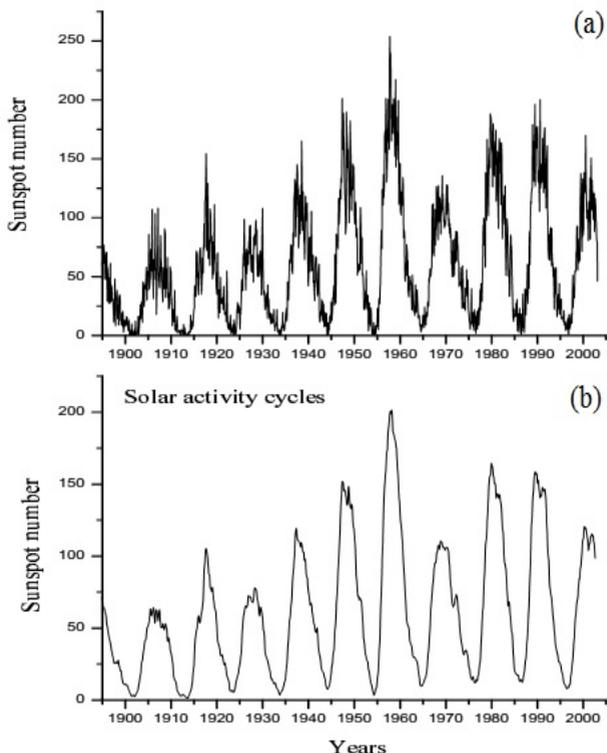
Солнце, как и другие астрофизические объекты, относятся к открытым нестационарным системам, динамика которых характеризуется квазипериодическими процессами с эффектами нелинейности и нерегулярности, динамической перемежаемости. В такой динамике проявляются компоненты в разных диапазонах частот, как чисто специфические – резонансные составляющие с широким набором частот, так и неспецифические – хаотические составляющие. Поэтому задача извлечения астрометрической информации при анализе сложной

динамики звезд и звездных систем должна включать выявление первичных данных, которые могли бы быть использованы для последующего физического осмысления и моделирования исследуемых систем.

Солнечная активность – удивительное астрономическое явление, оказывающее существенное влияние на эволюцию систем живой и неживой природы. Интенсивное исследование процессов на Солнце осуществляют астрономы, геофизики, метеорологи, врачи, связисты. Например, в рамках теоретической физики рассматриваются магнитогидродинамические процессы, колебательные и волновые движения в плазме, процессы взаимодействия заряженных частиц с электромагнитными полями. Солнечно-земные связи позволяют объяснять разнообразие явления, происходящие на Земле и описывать эволюцию астрофизических систем, подобных солнечной атмосфере. Солнечные пятна являются индикаторами магнитной активности Солнца, которая охватывает всю атмосферу и проявляется в виде темных волокон и протуберанцев, вспышек в хромосфере, а также корональных дыр, через которые выбрасываются потоки высокоскоростных заряженных частиц. Большие пятна и группы пятен становятся центрами активных областей, в которых происходят динамичные процессы, сопровождающиеся движением газа и изменением формы и размеров пятен со значительным выделением энергии.

Исследование статистических закономерностей процессов, реализуемых в солнечной атмосфере, позволяет получить информацию об активности Солнца в отдельные периоды и осуществить прогноз ее поведения (Рис. 1). Для выявления долговременных циклических закономерностей в достаточной степени подходят методы, основанные на авто-, кросс-корреляционном анализе, Фурье- и вейвлет-преобразованиях. В то же время использование указанных методов к небольшим выборкам указывает на их ограниченность.

В настоящей работе для понимания физико-химических процессов, реализуемых в конвективной зоне и внешних слоях атмосферы Солнца, в рамках формализма функций памяти (ФФП) мы проводим параметризацию (количественное и качественное описание эволюции системы на основе извлечения информации с помощью некоторого количества параметров) динамических и спектральных характеристик, а также эффектов статистической памяти [4, 5], выявляемых в ключевом показателе солнечной магнитной активности – динамике чисел Вольфа [6].



**Рисунок 1.** (а) – изменение ежедневных чисел Вольфа, (б) – сглаженная кривая, демонстрирующая циклические особенности.

Построение фазовых портретов, спектров мощности функций и мер памяти, кинетических и релаксационных параметров выполняется как для всей последовательности чисел Вольфа, охватывающих несколько десятилетий, так и отдельных солнечных циклов. Как итог на основе ФП в распределении чисел Вольфа установлены периодические закономерности, основанные на циклическом образовании солнечных пятен в результате нестабильности магнитного давления. Закономерности, связанные с циклическостью солнечной активности, отражаются в фазовых портретах динамических ортогональных переменных, а также спектрах мощности функций статистической памяти. Кроме того, продемонстрированы

пространственно-временные структуры фазовых портретов, обнаруженные для максимумов и минимумов, а также предикторы, состоящие в изменении уровня эффектов статистической памяти в периоды, предшествующие экстремумам солнечной активности.

В завершение отметим, что изучение механизмов самоорганизации намагниченной плазмы в атмосфере Солнца и формирования устойчивых магнитных солнечных структур является актуальной задачей современной астрофизики [7, 8], термоядерного синтеза и физики плазмы, а также всех естественных наук, изучающих влияние активных процессов на поверхности Солнца как на живую, так и на неживую природу Земли.

### **Литература:**

- [1] Kwapień, J. Physical approach to complex systems / J. Kwapień, S. Drożdż // *Physics Reports*. – 2021. – V. 515. – P. 115.
- [2] Timashev, S.F. Review of flicker noise spectroscopy in electrochemistry / S.F. Timashev, Y.S. Polyakov // *Fluctuation and Noise Letters*. – 2007. – V. 7. – P. R15.
- [3] Panishev, O.Y. Cross-correlation markers in stochastic dynamics of complex systems / O.Y. Panishev, S.A. Demin, J. Bhattacharya // *Physica A*. – 2010. – V. 389. – P. 4958.
- [4] Demin, S.A. Auto- and cross-correlation analysis of the QSOs radio wave intensity / S.A. Demin, O.Y. Panishev, Y.A. Nefedyev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – V. 661. – Art. no. 012003.
- [5] Demin, S.A. Dynamic and spectral X-ray features of the microquasar XTE J1550-564 / S.A. Demin, O.Y. Panishev, Y.A. Nefedyev // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. – 2014. – V. 30, No. 2. – P. 63.
- [6] SILSO – The World Data Center for the production, preservation, and dissemination of the international sunspot number [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sidc.be/silso/home>.
- [7] Demin, S.A. Non-stationarity and cross-correlation effects in the MHD solar activity / S.A. Demin, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev, N.Y. Demina, S.F. Timashev, // *Advances in Space Research*. – 2018. – V. 61, No. 2. – P. 639.
- [8] Demin, S.A. FNS-Parameterization of Irregularities of Solar Activity Dynamic Variables / S.A. Demin, V.A. Yunusov, S.F. Timashev, A.V. Minkin // *High Energy Chemistry*. – 2023. – V. 57, Suppl. 1. – P. S19.

serge\_demin@mail.ru

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАЮЩЕГО МОДУЛЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ФОТОННОЙ МОДИФИКАЦИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ **М. А. Мелкомуков<sup>1</sup>, В. Д. Городинов<sup>1</sup>, Л. Ю. Володин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

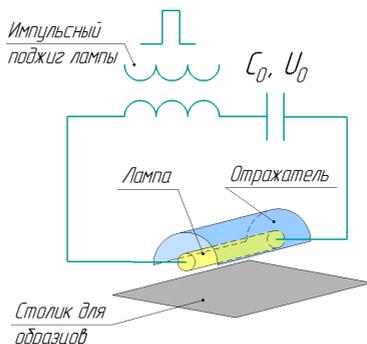
На сегодняшний день технология производства гибкой электроники представляют значительный научно-технический интерес. Для ее производства используются тонкопленочные материалы, такие как, например, ИТО, FTO, выступающие в качестве оптически прозрачных проводящих слоев (фотовольтаика, носимая электроника) [1]. Другим немаловажным компонентом гибкоэлектронных устройств являются тонкопленочные транзисторы (TFT – thin film transistor), в качестве активных слоев которых часто используют слои металл оксидного материала оксида индия-галлия-цинка (IGZO). Другое подразделение гибкой электроники - аддитивная – позволяет методами струйной, аэрозольной или трафаретной печати получать проводящие слои из наночастиц металлов или графена, обеспечивающие электрический контакт на плате [2]. Все указанные тонкопленочные материалы после нанесения в большинстве случаев требует дополнительной термической обработки (до 300-600°), которая в зависимости от материала и решаемой технологической задачи, позволяет удалить лишнее связующие (буферную среду в случае проводящих наночернила или отжиг прекурсора для перовскитных панелей), повысить подвижность носителей заряда, улучшить проводимости материала. Поскольку в качестве гибкой подложки в большинстве случаев используются пластики (например, ПЭТ), то оказывается невозможным реализовать «традиционный» отжиг без термического повреждения подложки.

Относительно новым подходом для модификации (отжига, спекания) тонкопленочных материалов является использование импульсного излучения, позволяющего селективно нагревать их без существенного изменения температуры прозрачной пластиковой подложки. В качестве источников излучения используются установки на базе импульсных лазеров (чаще всего эксимерных или YAG) и ксеноновые лампы [3].

Лазерные источники позволяют добиваться быстрого нагрева за счет высокой пиковой мощности излучения. Однако они имеют ряд недостатков, к которым относятся монохроматичность (влияет на эффективность нагрева материалов разного рода), малая площадь обработки за счет фокусировки излучения, сложность масштабирования. Установки на базе импульсных ксеноновых ламп обладают широким спектром излучения (200-1100 нм), могут быть масштабированы для конвейерного производства и обеспечивают возможность облучать материалы с длительностями более 10 мкс с энергиями до десятков кДж.

В данной работе представлены результаты разработки и исследования компактного излучающего модуля, выполненного на базе импульсной ксеноновой лампы, для различных исследовательских и технологических применений.

Установка фотонного отжига функционально состоит из облучателя и источника питания. Облучатель представляет собой импульсную трубчатую ксеноновую лампу, установленную в отражатель. Разряд в лампе осуществляется за счет импульса с высоким напряжением и малой силой тока через трансформаторную обмотку.

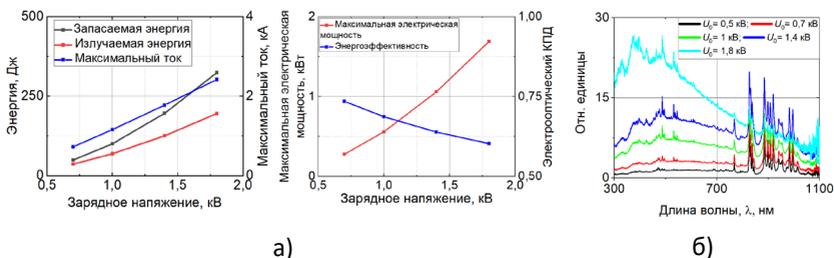


**Рисунок 1.** Принципиальная схема установки

По мере увеличения длины лампы, возрастает и максимальный уровень запасаемой энергии, однако вынужденно возрастает и общая площадь излучения. Таким образом, важно подобрать габаритные параметры лампы таким образом, чтобы обеспечить большую энергию излучения, при меньшем значении излучающей площади. Предварительный выбор типа лампы проводился с использованием

расчетной методики из работы [4]. По результатам серии расчетов установлено, что для достижения оптимальных плотностей энергии может быть использована лампа ИФП-800 с межэлектродным расстоянием 80 мм и максимальной запасаемой энергией 800 Дж.

Экспериментальное исследование электротехнических характеристик лампы (рисунок 2) при зарядных напряжениях конденсаторной батареи до 1,8 кВ проводилось с использованием токового датчика *Pearson 4418*, высоковольтного делителя напряжения *Pintek HVP-39PRO* и осциллограф *Tektronix TDS1002B*. В качестве накопителя энергии использовалась конденсаторная батарея  $C=200$  мкФ с величиной зарядного напряжения  $U$  до 1.8 кВ (запасаемая энергия до  $W_0 = 900$  Дж). За счет изменения напряжения на батарее возможно регулировать энергию излучения, а как следствие и плотность энергии на облучаемой поверхности. Для исследования спектральных характеристик излучения лампы в диапазоне 300-1100 нм использовался спектрометр *Solar S100*. Полученные зависимости представлены на рисунке 2.



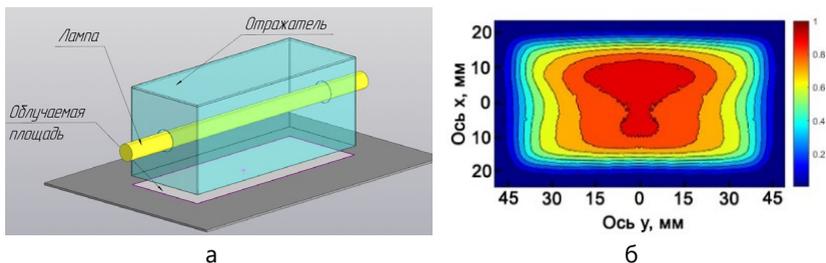
**Рисунок 2.** Результаты измерений характеристик лампы: (а) электротехнических; (б) спектральных

Максимальный тока в лампе возрастает линейно с ростом зарядного напряжения. При максимальном значении зарядного напряжении (1,8 кВ) пиковый ток достигает 2,4 кА, максимальная излучаемая энергия 195 Дж. Увеличение зарядного напряжения приводит к практически квадратичному росту излучаемой энергии, однако происходит снижение электрооптического КПД. Длительность импульса для различных режимов составляла порядка 150 мкс и практически не зависит от зарядного напряжения.

Спектр представляет из себя сплошное излучения с длинами волн от 300 до 1100 нм с наложением на него линий. При низких напряжениях

линейчатое излучение вносит существенный вклад в ближнюю ИК область (850-1050 нм). С ростом зарядного напряжения повышается доля УФ компоненты в общем спектре и снижается вклад линейчатого излучения в ближней ИК области.

Ключевым узлом облучающего модуля является отражатель, определяющими характеристиками которого являются габариты облучаемой за один импульс области и равномерность поля облучения. Предварительный расчет с использованием CAD систем, позволяющих проводить трассировку лучей, показал, что приемлемыми характеристиками обладает отражатель прямоугольного сечения. Отражатель для установки выполнен в виде параллелепипеда размером 4x10 см в основании, с отверстием по центру на торцевой стороне для расположения лампы. Он выполнен из алюминия марки Miro-2. Для определения равномерности поля облучения использовался метод флуоресцентного анализа. Он заключается в фиксации излучения люминесцентной пластинки, после облучения УФ излучением, и последующей обработки специальным скриптом в программе *Matlab*. Измерения проводились с помощью фотокамеры, прямоугольной пластины фотолюминофора, светового фильтра УФЦ-2 (рисунок 3).

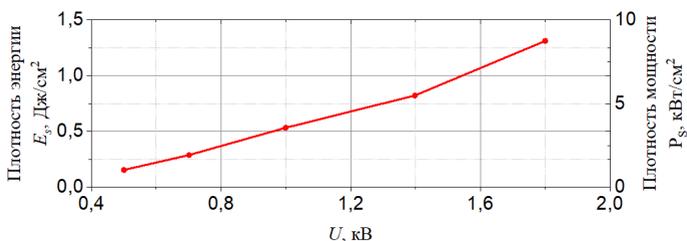


**Рисунок 3.**

- а) Схематичное изображение конструкции отражателя с лампой;
- б) Измеренная равномерность поля излучения

Выявлено что на площади 35x65 мм<sup>2</sup> достигается равномерность поля облучения порядка 70%.

Для разработанного облучателя определены поверхностные энергия и мощность излучения, для этого использовался фотоприемник пироэлектрической лазерной головки *Ophir-3A-SH*. Результаты измерений представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Плотность энергии и мощности излучения

По представленным данным видно, что зависимость энергии и мощности на поверхности от зарядного напряжения является линейной на участке от 500 до 1800 В и достигает 1,3 Дж/см<sup>2</sup> и 8,7 кВт/см<sup>2</sup> соответственно.

Таким образом, в ходе работы спроектирован облучающий модуль для фотонной модификации тонкопленочных материалов, определены его энергетические характеристики. Спектр излучения для данного модуля является сплошным, основная его часть находится в диапазоне от 300 до 1100 нм. Плотность энергии и мощности облучения линейно зависят от зарядного напряжения и достигают 1,3 Дж/см<sup>2</sup> и 8,7 кВт/см<sup>2</sup> соответственно. Равномерность поля облучения составляет порядка 70% на площади 35х65 мм<sup>2</sup>.

#### **Литература:**

- [1] Chandan Dawo, Harsh Chaturvedi Recent advances in the development of flexible dye-sensitized solar cells: fabrication, challenges and applications-a review / Chandan Dawo, Harsh Chaturvedi // KFPE Korea Flexible & Printed Eletronics Society. — 2023. — № 244.
- [2] Wiklund, J.; Karakoç, A.; Palko, T.; Yi ğitler, H.; Ruttik, K.; Jäntti, R.; Paltakari, J. A Review on Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts. J. Manuf. Mater. Process. 2021, 5, 89
- [3] Bian, J., Zhou, L., Wan, X., Zhu, C., Yang, B., & Huang, Y. (2019). Laser Transfer, Printing, and Assembly Techniques for Flexible Electronics. Advanced Electronic Materials / Adv. Electron.Mater / Vol. 5.
- [4] 1. Камруков А.С., Кулебякина А.И. Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп: Учеб. пособие / Под. Ред. Н.П. Козлова; кафедра «Плазменные энергетические установки (Э-8). – М.: ООО НИЦ «Инженер», 2010. – 222с.

mma18ea273@student.bmstu.ru

## СИНТЕЗ НАНОАЛМАЗОВ В АРГОНОВОЙ ДУГЕ ИЗ ПАРОВ УГЛЕРОДА

**Б. А. Тимеркаев<sup>1</sup>, Н. Г. Андреева<sup>1</sup>, Б. Р. Шакиров<sup>1</sup>, Р. Шайхаттаров<sup>1</sup>, Р. Курбангалеев<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева (КНИТУ-КАИ), Казань, Россия*

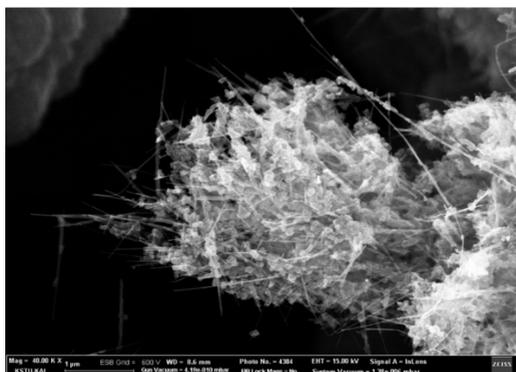
btimerkaev@gmail.com

Проблемам синтеза углеродных наноматериалов, таких как нанотрубки, фуллерены, графены, посвящено большое количество работ. Их обычно относят новому классу углеродных материалов, или углеродных каркасных структур, свойства которых значительно отличаются от других форм углерода, таких как графит и алмаз. Несмотря на существование множества способов по синтезу углеродных наноструктур, все они, по существу, сводятся к созданию пара атомарного углерода и организации их осаждения на какой-либо поверхности. Фуллерены и графен могут собираться из газовой фазы в свободном пространстве инертного газа.

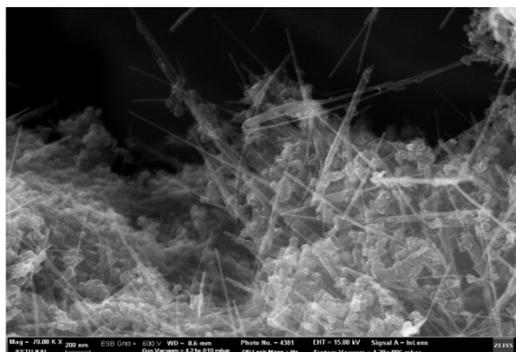
Углерод может испаряться из графита при его нагревании (электрической дугой, лазерным лучом, индукционным током), при бомбардировке ионами (в магнетронном разряде), либо может быть извлечен из углеводородов в электрическом разряде (из метана, пропана, паров жидких углеводородов). При наличии пара атомарного углерода возможно также образование наноалмазов и микроалмазов, однако для этого должны быть высокоэнергичные потоки либо атомов, либо ионов углерода [1-3]. При газохимическом методе синтеза углеродных наноматериалов углеводородный газ осаждается на поверхности металлического катализатора, нагретого до высокой температуры. Здесь происходит химическая реакция атомов газа с атомами металла, и на поверхности катализатора образуются фуллерены и нанотрубки.

В данной работе распыление графитового электрода и дальнейшее сопровождение ионов углерода осуществляется в аргоновой дуге. Синтез углеродных наноструктур производится в вакуумной камере, заполненной аргоном при давлении около 500 Торр. В качестве электродов служили графитовые стержни. Расстояние между электродами поддерживали в пределах от 1 до 3 мм. В ходе эксперимента происходило испарение атомов графита с поверхности анода. Эти атомы в дуговой плазме частично ионизовывались и становились переносчиками тока. Так как атом углерода в разряде может

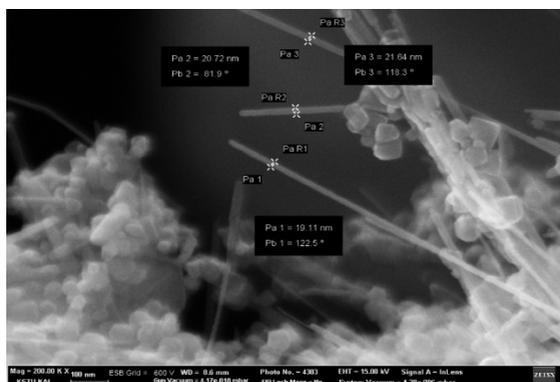
ионизоваться как положительно, так и отрицательно, то в последствии положительные ионы могли попасть на катод, а отрицательные ионы - на анод. Последние с перегретого анода снова возвращаются в плазму. Те ионы, которые имели положительный заряд, а также нейтральные атомы углерода попадали на катод и там осаждались, создавая самые разные углеродные наноструктуры. Во время эксперимента, который продолжался около 5 минут на катоде образовался нарост и высотой, и диаметром около 5 мм. Для обеспечения постоянных условий эксперимента в ходе эксперимента приходилось постоянно поддерживать оптимальное расстояние между электродами. Наноструктуры образовались и на аноде за пределами анодного пятна. Примерно около 80% массы анода осаждался на катоде, около 10 % на аноде. Электронно-микроскопические снимки нанообразований на катоде представлены на рисунках 1-3.



**Рисунок 1.** Нанообразования, отложенные на катоде. Увеличение 40000 раз.



**Рисунок 2.** Нанообразования, отложенные на катоде. Увеличение 70000 раз.



**Рисунок 3.** Нанообразования, отложенные на катоде. Увеличение 200000 раз.

На этих рисунках мы видим два вида наноструктур: углеродные нанотрубки и наноалмазы. Углеродные нанотрубки открытого типа, многослойные, диаметром порядка 18 – 22 нм. По толщине очень хорошо калиброванные. У некоторых нанотрубок вырос второй слой, химический не связанный с первым слоем в виде трубка в трубке. Обе видимые нанотрубки имеют цилиндрическую форму. Внутри нижней нанотрубки могут содержаться еще несколько нанотрубок, также не связанных друг с другом химическими связями. Углеродные нанотрубки могут достигать по длине порядка 40 мкм. Они нарастают на катоде и собираются в цилиндрические пучки диаметром около 50 мкм. Пространство между пучками нанотрубок заполнено наноалмазами и одиночными нанотрубками. Содержание нанотрубок в углеродном осадке в некоторых участках может приближаться к 50%, а остальные наноструктуры – это наноалмазы. Кроме того, в продуктах термического распыления содержится небольшое количество фуллеренов, осаждающихся, в основном, на стенках камеры, а также на боковой поверхности катода.

Интересно, что на рост наноалмазов в данной конкретной ситуации способствует поверхность нанотрубок. Гексагональная структура графена на поверхности нанотрубки может служить катализатором роста зародыша алмазоподобных структур. Размеры наноалмазов порядка 60 – 80 нм.

Таким образом, в аргоновой дуге был осуществлен синтез многослойных калиброванных углеродных нанотрубок и калиброванных наноалмазов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке по Соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ.*

**Литература:**

- [1] 1. B. A. Timerkaev, R. K. Gevorgyan, A. A. Zalyalieva, and D. B. Timerkaeva. Plasma-chemical synthesis of nanodiamonds on the surface of a microarc discharge cathode. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 95, No. 5, 1201 – 1206. September, 2022. DOI 10.1007/s10891-022-02586-9 (Тимеркаев Б. А., Геворгян Р. К., Залялиева А. А., Тимеркаева Д. Б. Плазмохимический синтез наноалмазов на поверхности катода микродугового разряда. ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2022. ТОМ 95, № 5. С. 1219-1224.)
- [2]. B A Timerkaev, A A Abdullin, R M Suleimanov, R R Shaikhattarov, R K Gevorgyan. Synthesis of microdiamonds and germanium nanotubes in the argon-germanium arc. *Journal of Physics: Conference Series* 2270 (2022) 012030. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/2270/1/012030
- [3]. B A Timerkaev, R B Shakirov, A A Zalyalieva, R K Gevorgyan, R R, Shaikhattarov. NANODIAMONDS FROM FUEL. *Journal of Physics: Conference Series* 2270 (2022) 012008. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/2270/1/012008

## ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ДЕФЕКТНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В УТОПЛЕННОМ В МАЗУТ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ МИКРОРАЗРЯДЕ.

**Б. А. Тимеркаев<sup>1</sup>, И. Г. Галеев<sup>1</sup>, Г. Р. Фархутдинова<sup>1</sup>, Н. Г. Андреева<sup>1</sup>, А. Н. Галиев<sup>1</sup>, Б. Р. Шакиров<sup>1</sup>, Т. Я. Асадуллин<sup>1</sup>**

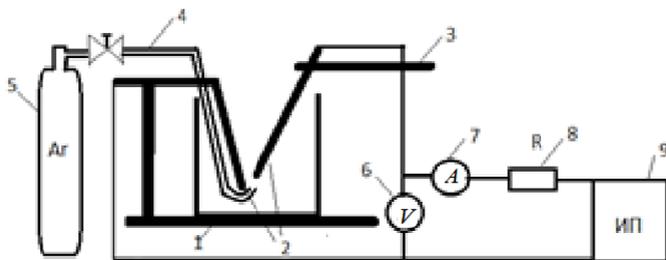
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

btimerkaev@gmail.com

Проблема углубления переработки углеводородного сырья даже сегодня является актуальной задачей в плане создания безотходных и ресурсосберегающих технологических процессов, обеспечивающих полное использование сырья с получением в итоге зеленого водорода и твердых остатков в виде углеродных наноматериалов. В данной работе рассматривается получение многослойных углеродных нанотрубок в утопленном в мазут микродуговом разряде.

Использование электрических микроразрядов для разложения тяжелых углеводородов привлекательно из-за уникальности возможностей по избирательности процессов и простоте реализации технологического процесса. Здесь мы под микроразрядами подразумеваем электрические разряды, образующиеся при разрыве контакта между электродами, погруженными в жидкую среду. Часто эти разряды не постоянны. Их поджигают либо путем соприкосновения электродов и с последующим разрывом контакта, либо путем подачи высокого напряжения. Они отличаются достаточно большой интенсивностью, особенно в средах с большой вязкостью, когда в образовавшийся из-за разряда газовый пузырь не так быстро затекает новая порция жидкости, в результате чего разряд легко может быть прерван. В жидких углеводородах микроразряды вызывают крекинг с образованием газа и атомарного углерода. В работе [1] разложение тяжелых углеводородов в тлеющем и микродуговом разряде в мазуте исследован теоретически. Крекинг углеводородов в микроразрядах нельзя считать чисто термическим, но он не является и чисто дуговым. Крекинг скорее всего является комбинированным. В газообразных фракциях крекинга основными продуктами являются ацетилен, этилен, водород и метан [2,3].

В данной работе микродуговой разряд в мазуте изучен с акцентом на получение углеродных наноструктур. Для исследования микродугового разряда в толще тяжелого углеводородного сырья использован плазмохимический реактор, схема которого представлен на рис.1.



**Рисунок 1.** Схема экспериментальной установки для разложения тяжелого углеводородного сырья дугowym разрядом с утопленными электродами: 1 — реакционная камера; 2 — электроды; 3 — держатель; 4 - трубка продувки буферным газом; 5 — баллон с газом; 6 – вольтметр; 7– амперметр; 8 — блок балластных сопротивлений; 9 — источник питания.

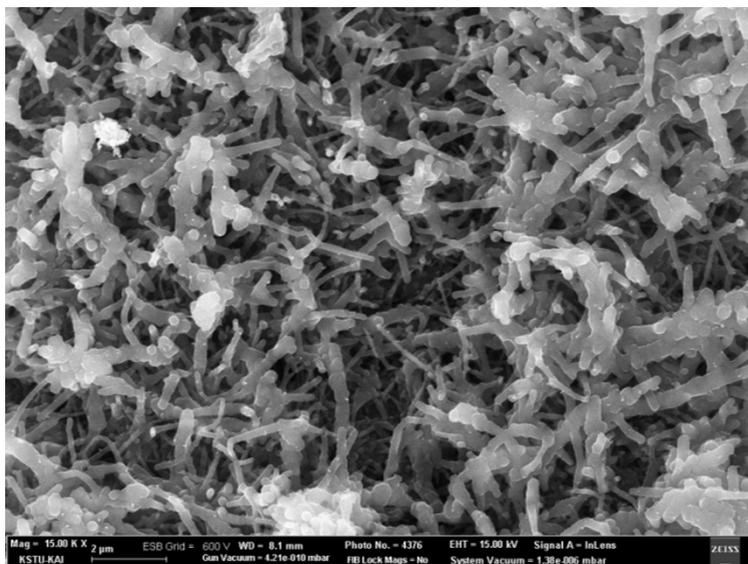
Реакционная камера представляет собой керамическую емкость, в которую вмонтированы медные стержневые электроды и устройство для подачи аргона. Катод закреплен в керамическую емкость неподвижно. Во время эксперимента анод вручную подводится к катоду и отводится от него на небольшое расстояние порядка 1 - 2 мм. В область разряда для подачи буферного газа (аргона) проведена трубка. Мазут заливается в емкость до тех пор, пока межэлектродная область не окажется на глубине около 2 см. Затем в межэлектродное пространство подаётся аргон. Расход аргона настолько мал, что о нем можно узнать лишь по выходящим пузырькам, которые отрываются от трубки продувки только после достижения Архимедовой силы определенной величины, достаточной для самостоятельного всплытия пузырька в мазуте. После этого к электродам подводится высокое напряжение.

Инициирование разряда осуществляется точно так же, как в случае зажигания дуги, т.е., сначала электроды приводим в контакт и затем отводим на некоторое расстояние. Напряжения и токи разряда, реализованные на экспериментах, представлены в таблице 1.

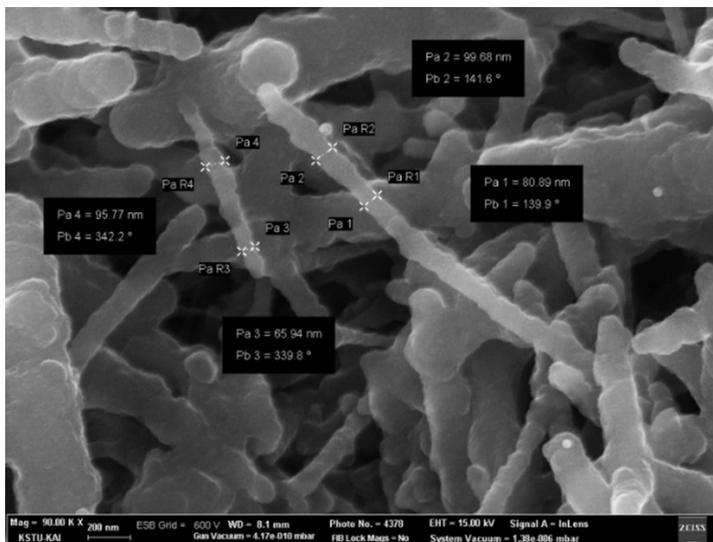
**Таблица 1.** Напряжения и токи разряда.

Сила тока, mA	Напряжение на электродах во время разряда, В	Напряжение на электродах в отсутствие разряда, кВ
60	450	2,5
78	300	3
94	200	3,5
110	150	4

Во время эксперимента область мазута, которая напрямую контактирует с микродугой, будет кипеть, поставляя в разрядную область многообразные нефтяные фракции и продукты их крекинга. Попадая в область разряда, они будут атакованы электронами с высокой энергией. В результате разрыва связей в углеводородных цепочках появятся летучие фракции углеводородов, водород, а также атомарный углерод и ионы углерода. Из-за Архимедовой силы пары углеводородов вместе с аргонном покидают область разряда, уступая место новым углеводородам, а углерод, в основном, откладывается на катоде. Эти отложения были проанализированы на электронно-сканирующем микроскопе. Электронно-микроскопические снимки приведены на рисунках 2,3.



**Рисунок 2.** Многослойные дефектные нанотрубки. Увеличение 15000раз.



**Рисунок 3.** Многослойные дефектные нанотрубки. Увеличение 90000раз.

Как видно из рисунков 2,3, нанотрубки имеют периодические утолщения, их диаметры колеблются от 50 до 100 нм. Дефектность нанотрубок объясняется, скорее всего, разрушением ячейки гексагона на поверхности графена во время синтеза с заменой на пентагон, как в случае образования фуллерена, или септагон. Дефект в виде пентагона должен привести к появлению утолщения регулярной трубки, так как примыкающие к нему гексагоны только за счет искривления поверхности могут обеспечить непрерывность структуры. Обратный поворот обеспечивается за счет встраивания септагона в структуру нанотрубок. Такие дефекты непременно уменьшают прочность данных видов нанотрубок. В то же время, изгиб в одном направлении должен быть предвестником обратного изгиба. Другими словами, в нанотрубке эти изгибы должны быть периодическими, что мы и наблюдаем на рисунке 3. Образование этих выпуклостей и впадин на поверхности нанотрубок может быть вызвано особенностями микроразрядов. А именно, термоэлектронная эмиссия не в состоянии поддержать дуговой ток устойчивого разряда при атмосферном давлении в стесненных условиях внутри жидкости, так как полный ток ограничен балластным сопротивлением. Поэтому после пробоя промежутка между электродами микроразряд, возникший на следе пробоя, прерывается,

Напряжение на электродах снова возрастает, осуществляется пробой и процесс повторяется.

Таким образом, в электродуговых микроразрядах в мазуте на медном катоде синтезируются нанотрубки с регулярными дефектами.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке по Соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ.*

### **Литература:**

[1] Saifutdinov, A.I., Timerkaev, B.A., Saifutdinov, A.A. Features of Transient Processes in DC Microdischarges in Molecular Gases: From a Glow Discharge to an Arc Discharge with a Unfree or Free Cathode Regime(Article). JETP Letters Volume 112, Issue 7, October 2020, Pages 405-412.

[2] AA Saifutdinova, AO Sofronitskiy, BA Timerkaev, AI Saifutdinov. Plasma-Chemical Decomposition of Hydrocarbons on the Basis of the Micro-Arc Discharge with Disc Electrodes Rotating in the Bulk of Raw Materials. - Russian Physics Journal, 2020/3/13. Russian Physics Journal. Springer US. 1-5.

[3] B. A. Timerkaev, GR Ganieva, AA Kaleeva, ZK Israfilov, AO Sofronitskii. Growing of Carbon Nanotubes from Hydrocarbons in an Arc Plasma Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 92(5), 1248-1252, 2019. DOI 0.1007/s10891-019-02040-3

# ИЗУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ МЕТАНА ПОСРЕДСТВОМ ОПТИКО-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

**А. Р. Гарифуллин<sup>1</sup>, М. Ф. Шаехов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Российская Федерация

gar-azat@mail.ru

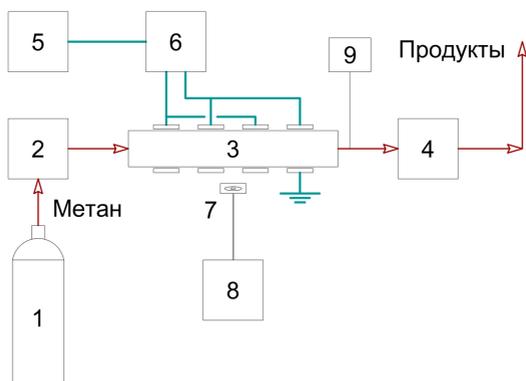
## **Введение**

Процессы получения водорода путем конверсии углеводородов весьма распространены. Но данные процессы термokatалитические и являются довольно энергоемкими. Для конверсии углеводородов можно использовать плазму источником которой являются различные виды электрических разрядов. При такого рода процессах в рабочем объеме образуются свободные электроны, радикалы, возбужденные молекулы, которые способны, подобно катализаторам, инициализировать реакционно-цепной механизм конверсии углеводородов.

Для изучения механизмов плазмохимических реакций, происходящих в системе, важно знать из каких компонентов состоит плазма. Оптико-эмиссионный спектральный анализ хорошо применим для измерения интенсивности света, излученного плазмой, с целью определения компонентов плазмы [1]. В ходе данной работы были получены и проанализированы оптико-эмиссионные спектры плазмы в потоке метана при различных значениях расхода газа, давления в реакторе и мощности разряда.

## **Экспериментальная установка и методика эксперимента**

Работы проводились в вакуумной установке, схема которой представлена на рисунке 1. Установка состоит из ВЧЕ-реактора, ВЧ-генератора Cesar 1310 13,56 МГц, 1000 Вт, двух вакуумных насосов типа НВД и АВЗ, расходомера и баллона с метаном. Реактор представляет собой кварцевую трубку с внутренним диаметром 30 мм и длиной 1 м. Снаружи по длине трубки установлены 21 кольцевые электроды – попеременно катоды и аноды. На выходе трубки установлен тройник к которому подключен датчик давления. Спектр плазмы снимался при помощи малогабаритного оптоволоконного спектрометра USB4000 с линейным ПЗС детектором Toshiba TCD1304AP.



**Рисунок 1.** Схема ВЧЕ установки конверсии метана: 1 – баллон с метаном; 2 – расходомер; 3 – ВЧЕ-реактор; 4 – вакуумные насосы; 5 – ВЧ-генератор; 6 – согласующее устройство; 7 – оптический кабель; 8 – оптико-эмиссионный спектрометр; 9 – датчик давления

Были проведены 3 эксперимента при различных условиях:

- 1) мощность разряда 200 Вт, расход метана 30,8 л/мин, давление в реакторе 55 Па;
- 2) мощность разряда 400 Вт, расход метана 30,8 л/мин, давление в реакторе 55 Па;
- 3) мощность разряда 400 Вт, расход метана 61,6 л/мин, давление в реакторе 82 Па.

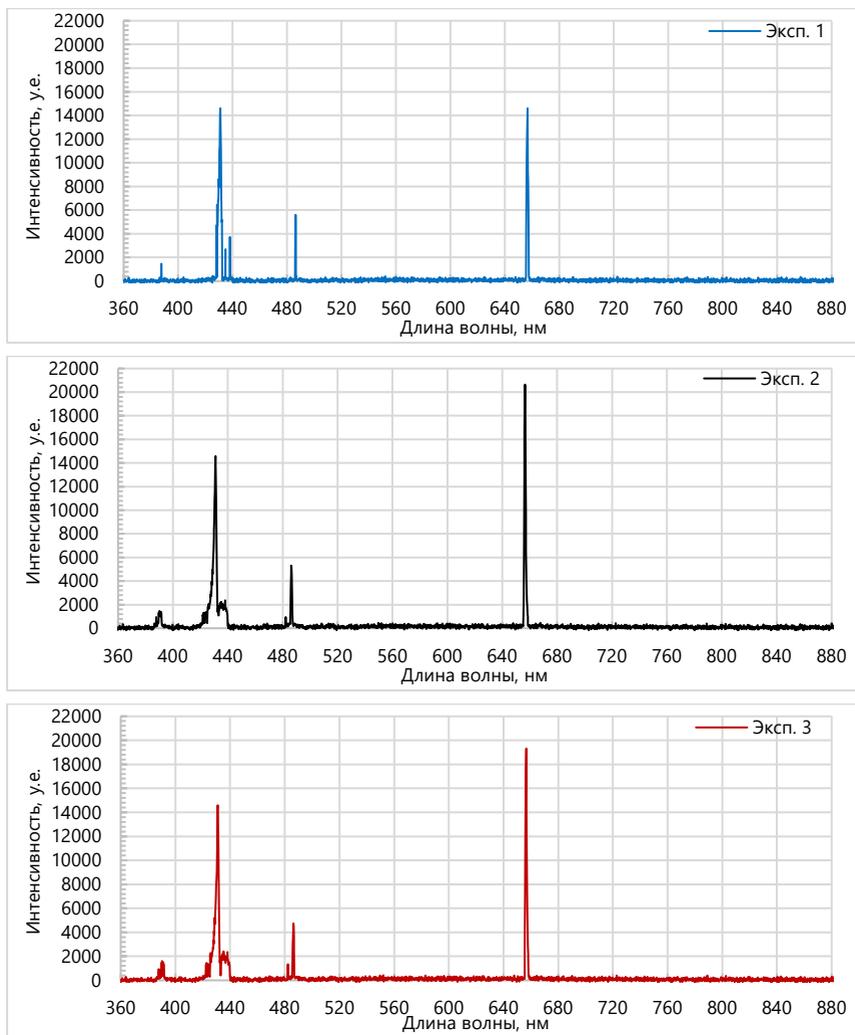
### Результаты

Компоненты, которые были определены в исследуемых спектрах, и длины волн их излучения приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Компоненты плазмы

№	Компонент	Длина волны, нм
1	CH ( $B^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$ )	387,8
2	CH ( $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$ )	431,0
3	H $\gamma$	434,7
4	H $\beta$	486,2
5	H $\alpha$	656,6

Сами спектры приведены на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Эмиссионные спектры плазмы

В результате обработки спектров были получены отношения интенсивностей излучения компонентов для сравнения различных режимов плазмы. Значения относительных интенсивностей приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Относительные интенсивности излучения

Параметр	Эксп. 1	Эксп. 2	Эксп. 3
$\text{CH} (B^2\Sigma^- \rightarrow X^2\Pi) / \text{CH} (A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi)$	0,101	0,065	0,065
$\text{H}\gamma / \text{CH} (A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi)$	0,185	0,152	0,155
$\text{H}\beta / \text{CH} (A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi)$	0,383	0,365	0,325
$\text{H}\alpha / \text{CH} (A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi)$	1,001	1,415	1,324
$\text{H}\alpha / \text{H}\beta$	2,611	3,879	4,080

Видно, что при большей мощности (эксп. 2 и 3) интенсивность излучения атомарного водорода  $\text{H}\alpha$  значительно увеличивается по отношению к интенсивности излучения частицы  $\text{CH}$  (переход  $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$ ), что согласуется с большим выходом водорода при больших мощностях плазмы [2]. А отношение интенсивности излучения  $\text{H}\beta$  и  $\text{H}\gamma$  к  $\text{CH} (A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi)$  при этом напротив уменьшается.

Отношение излучения  $\text{H}\alpha$  к  $\text{H}\beta$  при больших мощностях также увеличивается, что свидетельствует об увеличении электронной температуры плазмы [3].

Также следует отметить, что в исследуемых спектрах отсутствуют излучения компонентов  $\text{C}_2$  - полосы Свана, следствием чего должно быть отсутствие в продуктах ненасыщенных углеводородов.

### **Заключение**

Были исследованы спектры плазмы, полученной высокочастотным емкостным разрядом, при различных значениях мощности разряда, расхода газа и давления в реакторе. Определены компоненты плазмы, установлены относительные интенсивности их излучения при различных режимах.

### **Литература:**

- [1] Bai, Han; Huang, Bangdou; Liu, Yadi; Zhang, Cheng; Shao, Tao. Reaction mechanism in non-thermal plasma enabled methane conversion: correlation between optical emission spectroscopy and gaseous products.// *Journal of Physics D Applied Physics*, Volume 54 (42): 17 – Oct 21, 2021.
- [2] Mohammad Salehi, Parnia Bastani, Loghman Jamilpanah, Abbas Madani, Seyed Majid Mohseni. Low defect and high electrical conductivity of graphene through plasma graphene healing treatment monitored with in situ optical emission spectroscopy.// *Sci Rep* **11**, 20334 (2021).
- [3] C. Gomez-Aleixandre, O. Sanchez, A. Castro, and J. M. Albella. Optical emission characterization of  $\text{CH}_4 + \text{H}_2$  discharges for diamond deposition. *J. Appl. Phys.* 74, 3752 (1993).

## PLASMA-TREATED CARBON NANOTUBES FOR FAST INFRARED BOLOMETERS

**Т. Н. Куртукова<sup>1</sup>, Д. С. Копылова<sup>1</sup>, Н. И. Рагинов<sup>1</sup>, И. М. Хабушев<sup>1</sup>, И. В. Новиков<sup>1</sup>, С. И. Серебrenникова<sup>1</sup>, Д. В. Красников<sup>1</sup>, А. Г. Насибулин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Мы докладываем об исследовании применения плазмы с целью улучшения свойств пленок углеродных нанотрубок для болометрических фотодетекторов [1]. Пленки углеродных нанотрубок являются перспективным классом материалов для болометрических фотодетекторов благодаря уникальному сочетанию чрезвычайно тонкого (нм) свободного форм-фактора с малой теплоемкостью и интригующими электронными и оптическими свойствами, что обеспечивает высокую чувствительность и высокую скорость срабатывания. Тем не менее, ключевой параметр материала болометрического сенсора — температурный коэффициент сопротивления (ТКС) — неприемлемо низок, что ограничивает применение пленок углеродных нанотрубок. Здесь мы рассматриваем плазменную обработку пленок одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) как эффективный метод повышения ТКС. Изучено влияние различных плазменных газов (кислорода, азота и водорода) на проводимость обработанных пленок. Кроме того, мы исследуем влияние дефектности, длины и степени агломерации ОУНТ на ТКС. Оптимизированная методика позволяет увеличить ТКС до 1,7% K<sup>-1</sup> по модулю при 100 К и до 0,8% K<sup>-1</sup> при 300 К. Прототипы болометров на основе обработанных плазмой пленок ОУНТ демонстрируют высокую чувствительность в широком ИК-диапазоне. (~21 В/Вт), малое время отклика (~1 мс) и малошумящая эквивалентная мощность (~8 × 10<sup>-9</sup> Вт Гц<sup>-1/2</sup>) при температуре 100 К.

### **Литература:**

[1] Kurtukova et al. *Appl. Phys. Lett.* 122, 093501 (2023).

Nikita.Raginov@skoltech.ru

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ БАКТЕРИЦИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ДВУХРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

**М. М. Гребенщикова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "КНИТУ", Казань, Россия

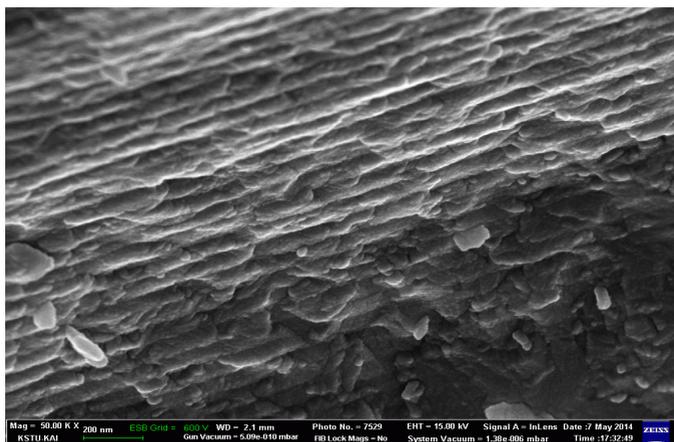
Титаногафниевые нитридные конденсаты в виде покрытий характеризуются биоинертными и бактерицидными свойствами [1]. Проявление этих свойств связано со сложной наноструктурой покрытия и свойствами гафния. Покрытия наносят двухразрядной плазменной технологией КИБ (PVD) в среде азота при давлении 0,1- 0,2 Па. Плавное регулирование кинетической энергии конденсирующихся частиц металла (гафния) является положительным отличием двухразрядной технологии от других технологий нанесения покрытий, обеспечивая тем самым все основные ее преимущества. Максимальные защитные свойства у покрытия проявляются при многослойной структуре, причем толщина слоев в структуре покрытия должна находиться в области нанодиапазона (в соответствии с ГОСТ/ISO 80004-4-2016), когда размерный фактор структуры материала переходит в качественный фактор. Происходит повышение значения механических характеристик композиционного материала при размерах структурных элементов в диапазоне 6-20 нм, что определено зависимостью Холла-Петча. В качестве материала одного или двух катодов дугового испарителя, продуцирующего ионную, паровую и капельную составляющую используется металлический гафний. Гафний благодаря исключительно высокой температуре кипения (испарения) - около 5500 К - способствует ускоренной конденсации паров металла в вакууме в нанокapли на дистанциях равных расстоянию от катода до покрываемого изделия. При этих расстояниях микрокапельная фаза от гафниевого катода успевает осесть на стенки испарителя. Ионная, паровая и нанокapельная фазы достигают поверхности изделия и образуют нанослой нитрида гафния толщиной 6-20 нм в общей структуре покрытия. В качестве материала другого катода дугового испарителя, используют металлический титан. Титан по сравнению с гафнием имеет температуру испарения в 3500 К и конденсации паров в нанокapли не происходит. Ионная, паровая фазы образуют нанослой нитрида титана толщиной 6-20 нм в общей структуре покрытия. Между слоями происходит синтез фазы замещения TiHfN<sub>2</sub>. Она является

скрепляющей между нанослоями, что способствует повышению твердости и стойкости всего многослойного наноструктурированного покрытия. Содержание химических элементов в покрытии по массе определяется: титана 10-12%, гафния 80-81%, азота 7-10% [2]. Свойства покрытия приведены в таблице 1.

**Таблица 1** - Характеристики многослойных титаногафниевых покрытий

	Толщина слоя, нм		Твердость, ГПа	Параметр шероховатости, Ra, мкм	Фазы	Пористость, %
	Всех	Одного				
TiN	2400	6-12	32- 35	0,06-0,08	TiN <sub>2</sub> , TiN	2-3
HfN	2000	4-8	32-37	0,15-0,2	HfN <sub>2</sub> , HfN	3-5
(Ti+Hf)N <sub>2</sub>	4400	10-20	42-48	0,1 - 0,15	HfTiN, HfTiN <sub>2</sub>	3-4

Расчетная и экспериментально определенная толщина нанослоев нитридов составила от 4 до 20 нм с измеренным составом методом ОЖ-спектрометрии, структура определялась методом дифрактометрии [3]. На рисунке 1 представлены нанослои покрытия.



**Рисунок 1.** Нанослои покрытия

Наиболее значимым свойством разработанного покрытия и технологии формирования является способность покрытия в контакте угнетать

жизнедеятельность болезнетворной микрофлоры грамположительных и грамотрицательных бактерий и микозной флоры [1]. Обобщенные результаты исследования изменения колониеобразующих единиц болезнетворных микроорганизмов с течением времени в присутствии титаногафниевого нитридного конденсата свидетельствуют о наличии антимикробного эффекта в отношении *St/aureus*, *P.aeruginosa*, *E. coli*.

Механизм воздействия конденсата гафния связан с наличием на покрытии наночастиц [4]. Поиск наночастиц на поверхности титаногафниевого плазменного конденсата через миграцию этих частиц в раствор хлористого натрия на анализаторе NanoBrook 90 Plus Zeta Particle Size Analyzer (Brookhaven), позволил оценить их размеры. Размеры находятся в нанодиапазоне. Микроспектроскопия подтвердила состав частиц – это титаногафниево-нитриды. Активировать выход наночастиц с поверхности покрытия помогла обработка поверхности потоком низкоэнергетических ионов азота и аргона. Они ослабили связь наночастиц с поверхностью за счет тепловых, электростатических и ионных воздействий на поверхность. Модель процесса ионной обработки разрабатывается.

#### **Литература:**

[1] I I Shamsutdinov, L T Bayazitova, M M Grebenshchikova , M M Mironov, Antimicrobial properties of nanostructured plasma condensates from medical implants / Journal of Physics: Conference Series. 2017, в.927

[2] Патент № 2801170 С1 Российская Федерация, МПК С23С 14/14, С23С 14/24, А61L 27/28. Бактерицидное покрытие : № 2023110144 : заявл. 20.04.2023 : опубл. 02.08.2023 / М. М. Гребенщикова, М. М. Миронов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет"

[3] Рентгендифракционный анализ покрытий совместной конденсации нитридов титана и гафния из плазменной фазы / М. М. Миронов, Е. В. Стародумова, М. М. Гребенщикова [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 12. – С. 58-60.

[4] Мамонова, И. А. Влияние наночастиц переходной группы металлов на антибиотикорезистентные штаммы микроорганизмов : специальность 03.02.03 "Микробиология" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Мамонова Ирина Александровна. – Москва, 2013. – 24 с.

grebenshchikova.marina@yandex.ru

## ПЛАЗМЕННО-ЖИДКОСТНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИЕ

**Р. Р. Каюмов<sup>1</sup>, Р. Р. Марданов<sup>1</sup>, М. Ф. Ахатов<sup>1</sup>, А. А. Султанов<sup>1</sup>**

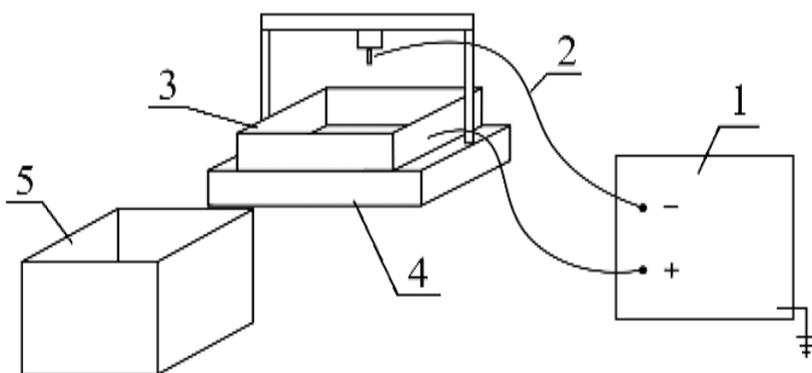
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

Создание и производство машин нового поколения, особенно таких сложных в техническом отношении объектов, как авиационные реактивные двигатели, газо- и паротурбинные энергетические установки невозможно без создания принципиально новых материалов и технологий. В настоящее время в промышленно развитых странах все большее внимание уделяется плазменным технологиям. Обусловлено это тем, что с помощью плазменных технологий возможно локальное воздействие (определенной зоны или всей поверхности детали) вместо обработки всей массы детали, что экономически нецелесообразно. При этом у деталей формируются уникальные по химическому, структурно-фазовому составу и свойствам композиции материалов, которые традиционной металлургией по термодинамическим ограничениям получить невозможно. Интерес к таким технологиям обусловлен также тем, что их применение в промышленности вместо традиционных методов обработки материалов и деталей предполагает существенную экономию финансовых вложений и энергозатрат, повышение эффективности и устранение экологически вредных последствий производства и, что не менее важно, кардинальное повышение эксплуатационных свойств изделий – надежности и долговечности. Анализ теоретико-экспериментальных исследований показал, что такие технологии могут быть созданы на основе плазменных технологий на основе достижений в области физики межатомного взаимодействия, интеграции фундаментальных знаний в областях физического материаловедения, химического синтеза и высокотехнологичных способов получения (модифицирования) материалов.

К таким способам можно отнести плазменно-жидкостную обработку металлической поверхности. Особый интерес представляет исследование воздействия низкотемпературной плазмы с жидкими электродами. Результатом взаимодействия с поверхностью является осажденная пленка

из части удаленного вещества или преобразованная поверхность. Это дает возможность применять процессы плазменной обработки для нанесения пленок разнообразных материалов, очистки, полировки поверхности[1,2].

Функциональная схема экспериментальной установки плазменно-жидкостной обработки металлической поверхности при атмосферном давлении представлена на рис.1 состоит из системы электрического питания; электролитической ванны; аппаратуры контроля и управления работой установки и измерения характеристик электрического разряда.



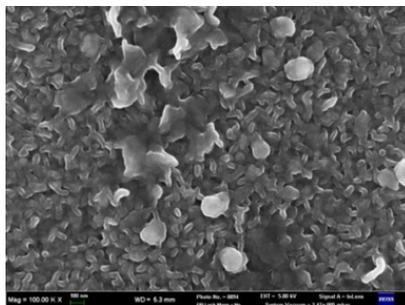
**Рисунок 1.** - Функциональная схема установки. 1 — блок питания; 2 — силовые кабели; 3 — разрядная камера; 4 — координатное устройство со встроенным соплом для подачи электролита; 5 — ёмкость с помпой для круговорота электролита

Экспериментальные исследования плазменно-жидкостной обработки проводились в диапазоне напряжения  $U=0,2 \div 1,5$  кВ,  $I=0,01 \div 2$  А, длины струи  $l_c=1 \div 90$  мм, расхода электролита  $G=0,5 \div 8$  г/с, скорости струи  $v=0,18 \div 0,95$  м/с и диаметра струи  $d_c=1,5 \div 3$  мм. В качестве струйного электролита использовался раствор  $\text{NaCl}$  в технической воде.

На фотографии 2 показаны образцы детали меди марки М1 до обработки с различным увеличением а,б. Результаты экспериментального исследования воздействия плазменно-жидкостного метода на металлическую поверхность методом электронной микроскопии представлены на рис. 3 с различным увеличением а,б. Установлено, что при плазменно-жидкостной обработке происходит очистка и полировка изделий.

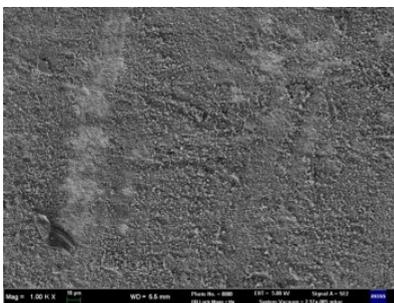


а

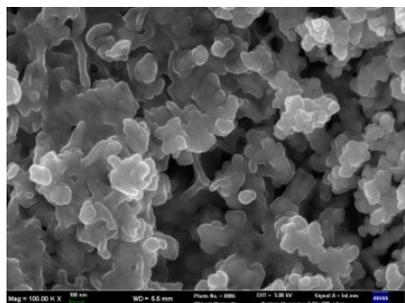


б

**Рисунок 2.** Образец детали меди марки М1 до обработки



а



б

**Рисунок 3.** Образец детали меди марки М1 после обработки  
плазменно-жидкостным методом при атмосферном давлении

### Литература:

- [1] Плазменно-жидкостной рециклинг металлического порошка для 3d печати Гайсин А.Ф., Каюмов Р.Р., Купутдинова А.И., Марданов Р.Р. Физика и химия обработки материалов. 2023. № 1. С. 37-44.
- [2] Высоочастотный разряд между металлическим и жидким (неметаллическим) электродами Мирханов Д.Н., Гайсин Ал.Ф., Басыров Р.Ш., Петряков С.Ю. Журнал технической физики. 2023. Т. 93. № 3. С. 356-364.

rushan\_250189033@mail.ru

## МНОГОКАНЛЬНЫЙ РАЗРЯД ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗАГРЯЗНЕННОЙ ВОДЫ

**М. Ф. Ахатов<sup>1</sup>, Р. Р. Каюмов<sup>1</sup>, И. И. Гайсин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия

С быстрым развитием современного общества постоянно возрастают потребности в воде во всех секторах хозяйствования. Среди известных методов обеззараживания воды наибольшее распространение, несоизмеримое по масштабам с другими методами, получило хлорирование с использованием в основном жидкого хлора, а также хлорной извести и гипохлорита кальция. Однако хлорирование не обеспечивает дезинфекцию воды от спорообразующих организмов и большинства вирусов. Кроме того, давно установлено, что хлорирование воды приводит к образованию в ней многих побочных хлорсодержащих веществ, обладающих высокой токсичностью мутагенностью и канцерогенностью [1].

Альтернативой хлорированию в настоящее время выступают методы УФ облучения и озонирования, которые также имеют ряд недостатков. В виду сложности технологии и больших затрат электроэнергии озонирование применяется в основном на небольших объемах воды. Чувствительность УФ излучения к мутности обеззараживаемой воды и отсутствие эффекта последействия не позволяет использовать данную технологию как самостоятельную [2].

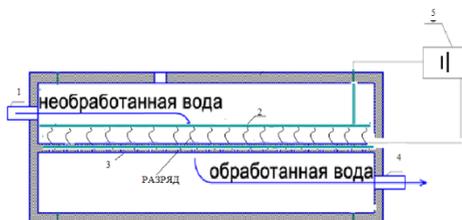
На протяжении последних 40 лет в России и за рубежом ведутся разработки электроимпульсных методов обеззараживания жидкостей основанных на осуществлении высоковольтных разрядов в жидкости как наиболее перспективных с точки зрения непосредственного введения в обрабатываемую воду окислительных реагентов. Разновидностью импульсного разряда в жидкости является диафрагменный электрический разряд (ДЭР), в канале которого возникают эффекты кавитации, образуются активные радикалы, перекись водорода, озон, УФ излучение, а так же происходит диффузия ионов металла с поверхности электродов [3].

Выбор метода очистки воды обусловлен ее составом, требованиями к качеству очищенной воды и областью ее применения. Задача получения воды для технических нужд может сводиться к простому обезжириванию,

то есть к удалению железа и иногда марганца. Если не удалить из воды ионы этих металлов достаточно глубоко, она становится непригодной даже для технических нужд, так как желтеет на воздухе или при нагреве и кипячении. Это происходит потому, что при окислении растворимое двухвалентное железо переходит в форму нерастворимого оксида трехвалентного железа. Данный оксид отлично знаком всем - это обычная ржавчина. Задача обезжелезивания при очистке воды может быть решена многими способами, которые сводятся к его окислению с последующей фильтрацией [4].

Решаемая техническая задача в работе это использование многоканального разряда с использованием жидких электродов которые создают мощные УФ излучение, ударные волны и активные радикалы (ОН, атомарный кислород, пероксид водорода и т.д.) каждый из них является эффективным средством против биологических и химических загрязнений [5].

Исследования заключается в установлении оптимальных режимов работы реакторов с использованием многоканального разряда.



**Рисунок 1.** Схема экспериментальной разрядной камеры.

Разрядная камера использовалась для исследований свойств очищенной воды, электрическим разрядом в лабораторных условиях. Воздействие МР (многоканальным разрядом) на воду осуществлялось в камере, выполненном из винипласта емкостью 1000 мл. Длина 200 мм, ширина 100 мм (рис.1).

Исходная вода подавалась на разрядную камеру через патрубок для подачи воды 1. На верхний 2 и нижний 3 пластины служащие электродами, из электротехнической меди.. Разряд формировался в промежутке между пластинами 2 и 3.

Для проведения исследований было выбрано несколько типов пластин медь, алюминий, сталь, и т.д.

На созданной экспериментальной установке были произведены экспериментальные исследования разряда в различных режимах, были получены спектральные характеристики. На основе анализа существующих и полученных в работе экспериментальных данных и созданной экспериментальной установки была разработана методика очистки воды при помощи многоканального разряда. Исходя из выше сказанного можно сделать вывод: очистка электрическими разрядами (многоканальным разрядом) – это безвредная и безопасная очистка воды по сравнению с хлорированием и другими методами так, как очистка происходит без добавления каких-либо кислот или микроорганизмов.

### **Литература:**

- [1] Kayumov R.R. Experimental study of the effect of electric discharge on carbon fiber/Zakirov Zh.U., Kayumov R.R., Khazeev K.I.// Journal of Physics: Conference Series This link is disabled, 2021, 1870(1), 012007
- [2] Akhatov M.F. Glycerin as an electrolytic electrode / Sh. Akhatov, G., Kayumov R.R., Valeeva R.R., Akhatov M.F.// Physical journal: conf. Series. 2019.V. 1328 Is.1,01200410
- [3] Bagautdinova L.N. Low-power electric discharges with metal, dielectric and electrolytic electrodes at low frequencies and atmospheric pressure / Gaisin A.F., Sadriev R.S., Bagautdinova L.N., Nasibullin R.T., Gaisin F.M., Mastuykov S.S. // High temperature, 2020, 58(6), pp. 777-780
- [4] Galimova R.K. Calculation of portable properties of some real gas mixtures at high temperatures / Taxeitov R.R., Galimova R.K., Yakupov Z.Ya. // Physical Journal: Conference Series, 2020, 1588(1), 012065
- [5] Fakhrutdinova, I.T. Features of the development of an electric discharge between a jet anode and a liquid cathode / Galimzyanov I.I., Gaisin A.F., Fakhrutdinova I.T., Shakirova E.F., Akhatov M.F., Kayumov R.R. // High temperature, 2018, 56(2), pp. 296-298
- [6] Tsareva, A.M. Determination of natural frequencies and vibration modes of a disk of constant thickness with a central mount / Makaeva, R.Kh., Tsareva A.M., Karimov, A.Kh. // Russian Aeronautics, 2008, 51(1), pp. 53-59
- [7] Gaisin A.F. Special features of a multichannel discharge in a porous solid cathode/Loginov N.A, Son E.E., Gaisin A.F., Gaisin F.M. //High Temperature. 2009. T. 47. № 4. С. 603-605.

[ahatov.81@yandex.ru](mailto:ahatov.81@yandex.ru)

## ПРИМЕР КОМПЛЕКСНОГО РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОЙ РАДИАЦИОННО-МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Е. А. Воронина<sup>1</sup>, В. К. Минеев<sup>1</sup>, А. Г. Полянский<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приведен пример построения адаптивных сеток при расчете комплексных импульсных радиационно-магнитогазодинамических (РМГД) моделей [1-10] в обобщенной системе координат. Проведена валидация и верификация многомерных комплексных импульсных радиационно-магнитогазодинамических моделей и численных методов для получения характеристик импульсных радиационно-магнитогазодинамических систем на примере расчета газодинамических параметров струи, выходящей со среза сопла в спутный поток газа.

Для математического описания процессов воздействия мощного, например, лазерного на вещество разработан простой и эффективный способ дискретизации расчетной области, позволяющий построить квазиортогональные структурированные сетки в областях сложной формы. В разработанной модели плазмодинамические процессы, которые имеют место, как в низко, так и высокотемпературной плазме [11-20], определяются интенсивностью, длительностью и диапазоном спектра мощного излучения, материалом исследуемого образца, термодинамическими параметрами окружающей среды. Численная реализация плазмодинамической модели основана на многоблочной многосеточной технологии расчетов на неортогональных структурированных сетках с использованием схем расщепления по физическим процессам и направлениям.

Сформулирована численная методика построения регулярных криволинейных адаптивных сеток в произвольных областях. Данная методика позволяет построить адаптивную (к границам расчетной зоны и особенностям решения задач математической физики) расчетную сетку путем решения эллиптических уравнений в частных производных и с помощью специальных алгоритмов адаптации. Проведены тестовые

(модельные) расчеты с помощью предложенной численной методики, которая применима для широкого круга задач.

Полученные в результате исследования параметры и характеристики устройств могут быть использованы для прогнозирования при проектировании и создании новых перспективных установок и современных технологий, а также для различных приложений [21-30].

Результаты теоретического исследования получены в рамках выполнения программы “Приоритет-2030” и федерального проекта Минобрнауки России “Передовые инженерные школы” (ПИШ).

### **Литература:**

- [1] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Simulation of parameters of plasma dynamics of a magnetoplasma compressor // Applied Sciences. 2023. V. 13 (9). P. 5538.
- [2] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Numerical modeling of individual plasma dynamic characteristics of a light-erosion MPC discharge in gases // Applied Sciences. 2022. V. 12. P. 3610.
- [3] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. Numerical simulation **of the** coaxial magneto-plasma accelerator and non-axisymmetric radio **frequency** discharge // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 830. P. 012049.
- [4] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Thermophysical Parameter Estimation of a Neutron Source Based on the Action of Broadband Radiation on a Cylindrical Target // Fusion Science and Technology. 2023. V. 79. P. 399-406.
- [5] Кузенов В.В., Рыжков С.В., Фролко П.А., Шумаев В.В. Математическая модель импульсного плазменного двигателя с предиионизацией геликоновым разрядом // Труды МАИ. 2015. № 82.
- [6] Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Mathematical Modeling of Structure and Dynamics of Concentrated Tornado-Like Vortices: A Review // Mathematics. 2023. V. 11. P. 3293.
- [7] Клименко Г.К., Кузенов В.В., Ляпин А.А., Рыжков С.В. Учебник: Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 264 с.
- [8] Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V. New realization method for calculating convective heat transfer near the hypersonic aircraft surface // ZAMP. 2019. V. 70. P. 46.

- [9] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Calculation of heat transfer and drag coefficients for aircraft geometric models // Applied Sciences. 2022. V. 12 (21). P. 11011.
- [10] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Numerical modeling of individual plasma dynamic characteristics of a light-erosion MPC discharge in gases // Applied Sciences. 2022. V. 12. P. 3610.
- [11] Кузенов В.В., Рыжков С.В. Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами // ТБТ. 2021. Т. 59, № 4. С. 492–501.
- [12] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. The Qualitative and Quantitative Study of Radiation Sources with a Model Configuration of the Electrode System // Symmetry. 2021. V. 13 (6). P. 927.
- [13] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Approximate calculation of convective heat transfer near hypersonic aircraft surface // Journal of Enhanced Heat Transfer. 2018. V. 25 (2). P. 181-193.
- [14] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical Simulation of Pulsed Jets of a High-Current Pulsed Surface Discharge // Computational Thermal Sciences. 2021. V. 13. P. 45-56.
- [15] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. The Adaptive Composite Block-Structured Grid Calculation of the Gas-Dynamic Characteristics of an Aircraft Moving in a Gas Environment // Mathematics. 2022. V. 10. P. 2130.
- [16] Shumeiko A.I., Telekh V.D., Ryzhkov S.V. Probe Diagnostics and Optical Emission Spectroscopy of Wave Plasma Source Exhaust // Symmetry. 2022. V. 14 (10). P. 1983.
- [17] Четверушкин Б.Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. М.: Наука, 1985. 303 с.
- [18] Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Particle-Laden and Droplet-Laden Two-Phase Flows Past Bodies (A Review) // Symmetry. 2023. V. 15. P. 388.
- [19] Кузенов В.В., Рыжков С.В., Фролко П.А., Шумаев В.В. Математическая модель импульсного плазменного двигателя с преионизацией геликоновым разрядом // Труды МАИ. 2015. № 82.
- [20] Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2017. 200 с.
- [21] Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency // Physics of Plasmas. 2014. V. 21. 022501.
- [22] Ryzhkov S.V. Comparison of a deuterium - helium-3 FRC and mirror trap for plasma confinement // Fusion Science and Technology. 2007. V. 51. № 2Т. P. 190–192.

- [23] Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Vortex Flows with Particles and Droplets (A Review) // *Symmetry*. 2022. V. 14 (10). P. 2016.
- [24] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme // *Physica Scripta*. 2021. V. 96. P. 125613.
- [25] Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Turbulence in Two-Phase Flows with Macro-, Micro- and Nanoparticles (A Review) // *Symmetry*. 2022. V. 14 (11). P. 2433.
- [26] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure // *Physics of Plasmas*. 2019. V. 26. P. 092704.
- [27] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Starostin A.V. Development of a Mathematical Model and the Numerical Solution Method in a Combined Impact Scheme for MIF Target // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. 2020. V. 16. No. 2. P. 325-341.
- [28] Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Mathematical Modeling of Gas-Solid Two-Phase Flows: Problems, Achievements and Perspectives (A Review) // *Mathematics*. 2023. V. 11. P. 3290.
- [29] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Computational and experimental modeling in magnetoplasma aerodynamics and high-speed gas and plasma flows (A Review) // *Aerospace*. 2023. V. 10. P. 662.
- [30] Ryzhkov S.V. Magneto-Inertial Fusion and Powerful Plasma Installations (A Review) // *Applied Sciences*. 2023. V. 13 (21). P. 6658.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОСЕКУНДНЫХ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ОПТИМИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**С. И. Елисеев<sup>1, 2</sup>, А. А. Самохвалов<sup>1</sup>, А. А. Смирнов<sup>1</sup>, К. А. Сергушичев<sup>1</sup>, А. В. Бурцев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ООО "Лаборатория им. В. А. Бурцева", Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рентгеновская микроскопия биологических объектов основана на использовании рентгеновского излучения в «водяном окне» – диапазоне длин волн от 2,3 до 4,4 нм. В этом диапазоне вода прозрачна для рентгеновских лучей, а углерод (и органические соединения) поглощают ее, что позволяет визуализировать внутреннюю структуру клеток *in vivo* [1]. Современный уровень развития методов рентгеновской микроскопии и нанотомографии в основном достигнут при использовании чрезвычайно дорогих и громоздких источников синхротронного излучения. Одним из основных векторов развития данной области является разработка доступных, но в то же время эффективных источников излучения требуемого спектрального диапазона [2]. Одной из рассматриваемых альтернатив на сегодняшний день являются источники на основе наносекундных импульсных газовых разрядов. Первые полученные с их помощью увеличенные изображения живых культур продемонстрировали перспективность источников рентгеновского излучения на их основе [3], однако достижение уровня качества и детализации изображений, сопоставимого с получаемыми с помощью синхротронов, потребует существенной оптимизации газоразрядной технологии. Численное моделирование является ценным инструментом при проектировании и оптимизации таких источников на основе газовых разрядов различных типов.

В докладе представлены результаты численного исследования различных факторов, оказывающих существенное влияния на свойства и динамику плазмы наносекундных капиллярных разрядов, среди которых – длительность и амплитуда импульсов тока, распределение параметров на стадии преионизации, давление и тип газа, состав газовой смеси.

Параметрический анализ проводился с использованием одножидкостной двухтемпературной МГД модели, результаты соотносились с результатами экспериментов на компактном источнике мягкого рентгеновского излучения, созданного в лаборатории им В. А. Бурцева.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-72-00039).

**Литература:**

- [1] Kördel, Mikael, et al. "Laboratory water-window x-ray microscopy." *Optica* 7.6 (2020): 658-674.
- [2] Adam, J. F., Moy, J. P., & Susini, J., "Table-top water window transmission x-ray microscopy: Review of the key issues, and conceptual design of an instrument for biology," *RSI*, 76(9), 091301, 2005.
- [3] Parkman, Tomáš, et al. "Table-Top Water-Window Microscope Using a Capillary Discharge Plasma Source with Spatial Resolution 75 nm." *Applied Sciences* 10.18 (2020): 6373.

step.eliseev@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИОНИЗАЦИИ ГАЛОГЕНЗАМЕЩЕННЫХ АРОМАТИЧЕСКИХ АМИНОВ

Е. С. Осина<sup>1</sup>, Л. А. Лузенина<sup>1</sup>, Е. П. Баберкина<sup>1</sup>, В. В. Беляков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Метод спектрометрии ионной подвижности (СИП) основан на ионизации молекул исследуемого вещества коронным разрядом при атмосферном давлении. Ионизированные молекулы различных веществ имеют разную скорость движения в дрейфовой камере в зависимости от их заряда, массы и эффективного сечения образовавшегося иона. Молекулярные ионы разных соединений отличаются временем прибытия к коллектору, что позволяет определить их природу.

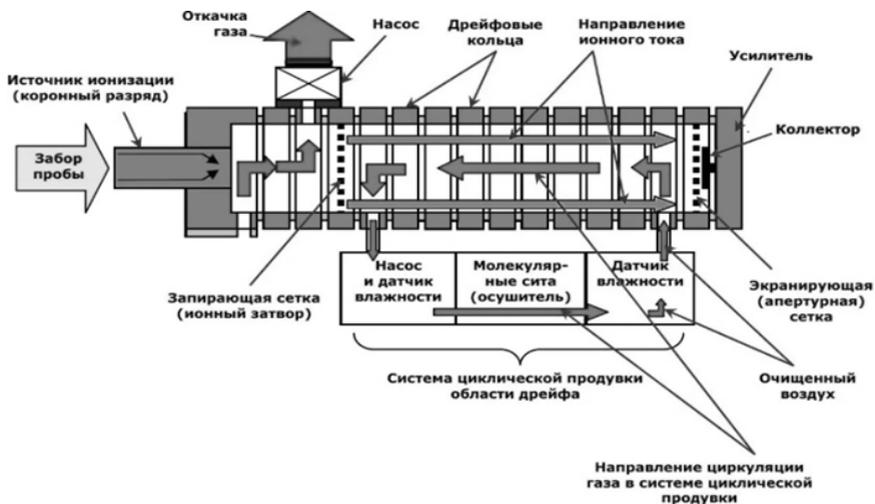
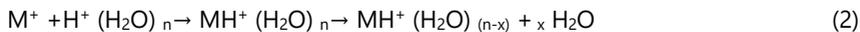


Рисунок 1. Схема ИДД «Кербер»

Механизм образования реактант-иона в отрицательной (1) и положительной (2) ионизации:



Где M - образец,  $O_2^-(H_2O)_n$  - реактант-ион,  $MO_2^-(H_2O)_{n-x}$  - продукт-ион, x  $H_2O$  - вода.



Где M - образец,  $H^+(H_2O)_n$  - реактант-ион,  $MH^+(H_2O)_n$  - кластерный ион,  $MH^+(H_2O)_{(n-x)}$  -ион исследуемого соединения, x  $H_2O$  - вода [1].

При изучении процессов ионизации методом спектрометрии ионной подвижности (СИП) на ионно-дрейфовом спектрометре «Кербер-Т» были получены и проанализированы спектры ионной подвижности галогензамещенных ароматических аминов: 2-хлоранилин и 4-хлоранилин, 2,6-дихлоранилин, 3,4-дихлоранилин, 3,5-дихлоранилин. Для математической обработки данных разработана программа на языке программирования Python версии 3.3., позволяющая исследовать и анализировать большое количество спектров ИП.

В ходе исследования было обнаружено, что выбранные галогензамещенные ароматические амины детектируются только в положительной ионизации.

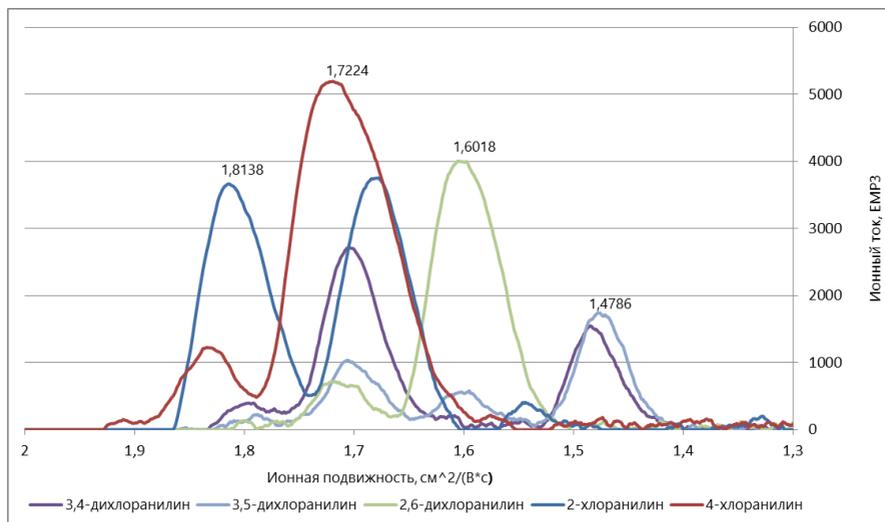


Рисунок 1. Общая ионограмма объектов исследования

Ранее было обнаружено, что наличие в структуре атома галогена влияет на значение ИП в области отрицательной ионизации [2]. При анализе галогензамещенных ароматических аминов методом спектрометрии ионной подвижности сигналы в отрицательной ионизации отсутствовали. Предположительно, это обусловлено особенностью строения молекул галогензамещенных ароматических аминов.

### **Литература:**

- [1] Мобильные технические средства выявления и идентификации взрывчатых веществ, опасных химических и биологических агентов // Инженерный журнал: журнал. — 2019. — № 1 (12)
- [2] Каплин А.А.. Спектрометрия ионной подвижности ацетофенона и его галогенпроизводных//Химия и технология биологически активных веществ для медицины и фармации//тезисы докладов. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2023. С. 108.

osinovka5@gmail.com

## КОНСТРУКЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРЕТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МАЛОМОЩНЫХ УСТРОЙСТВ

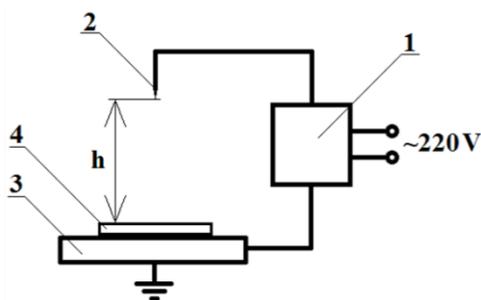
**А.С. Большакова<sup>1</sup>, А. М. Ляхович<sup>1</sup>, И. А. Сотников<sup>1</sup>, Э.М. Галиханов**

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия

Самым популярным аккумулятором для питания современных устройств и бытовой техники являются литий-ионные батареи. Их преимущество заключается в низком саморазряде, высокой токоотдаче и отсутствии постоянного обслуживания. Однако, при перезаряде, несоблюдении инструкций по правильной эксплуатации или механических повреждениях они взрывоопасны, а также[] при перезаряде теряют работоспособность и являются токсичным отходом.

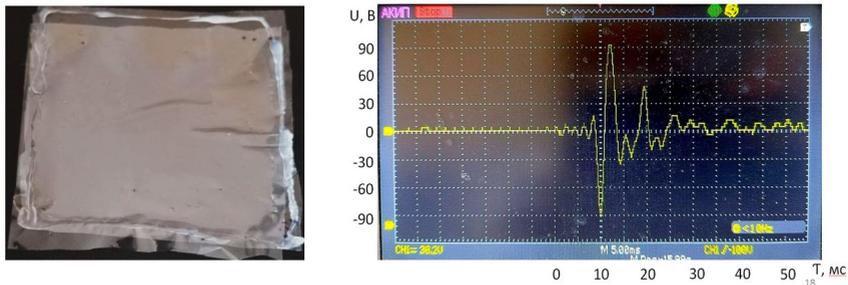
Решением данного вопроса является создание пьезоэлектрического генератора[1-4], который работает на принципе пьезоэлектрического эффекта, то есть, при механической деформации электрета возникает на поверхности электрический заряд. В зависимости от типа технологий получают разные типы электретов: термоэлектретов, триоэлектретов, радиационные электретов, короноэлектретов, электроэлектретов, хемоэлектретов, механоэлектретов, магнетоэлектретов.

В работе рассмотрены генераторы, изготовленные на основе полипропиленовых электретов, получаемых под действием низкотемпературной плазмы коронного разряда (рисунок 1).



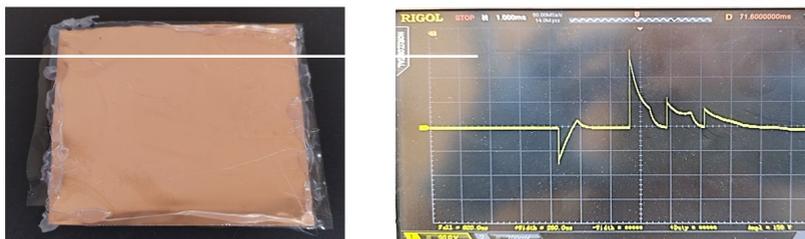
**Рисунок 1.** Принципиальная схема и фото установки: 1 – источник питания, 2 – заостренный электрод, 3 – заземленный электрод, 4 – образец.

Генератор с клеевой прослойкой (рисунок 2).  $U_{max} = 186$  В.



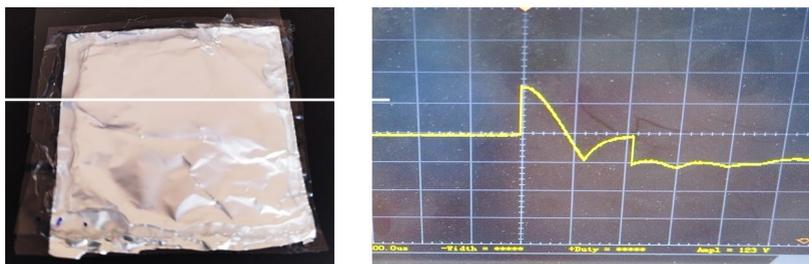
**Рисунок 2.** Пьезогенератор и график зависимости  $U(T)$ .

Генератор с медной прослойкой (рисунок 3).  $U_{max} = 150$  В.



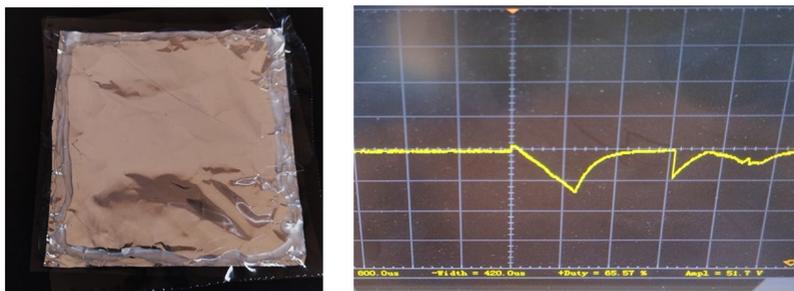
**Рисунок 3.** Пьезогенератор с медной прослойкой и график  $U(T)$ .

Генератор с алюминиевой прослойкой (рисунок 4).  $U_{max} = 123$  В



**Рисунок 4.** Пьезогенератор с алюминиевой прослойкой блестящей стороной вверх и график  $U(T)$ .

Генератор с алюминиевой прослойкой (рисунок 5).  $U_{\max} = 51,7 \text{ В}$



**Рисунок 5.** Пьезогенератор с алюминиевой прослойкой блестящей стороной вниз и график  $U(T)$ .

#### **Литература:**

- [1] Гороховатский, Ю. А. Электретный эффект и его применение / Ю. А. Гороховатский // Соросовский образовательный журнал. – 1997. - №8 – С.92-98.
- [2] Nakano, T. Plasma polymer coating for suppression of charge injection into polyethylene / T. Nakano, T. Kihira, Y. Ohki // Materials Science. – 1987. – P. 245-250.
- [3] Аббакумов К.Е. Пьезоэлектрический генератор / К.Е. Аббакумов, В.М. Цаплев, Н.В. Степаненко, А.И. Ахметшина, А.О. Белякина, Р.С. Коновалов // RU136937U1.
- [4] Шахин И. А. Пьезоэлектрический генератор, способ его изготовления и мобильное устройство, содержащее его/ И.А. Шахин, О.А. Романов, В. Я. Сушков// RU2570819C1.

[abolsakova907@gmail.com](mailto:abolsakova907@gmail.com)

## МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

**А. А. Калеева<sup>1</sup>, И. Г. Даутов<sup>1</sup>, А. А. Шарипова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

Использование плазменно-дугового напыления покрытий обычно необходимы для повышения износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости и поддержания общих поверхностных и механических свойств изделий, эксплуатируемых в каких-либо экстремальных – суровых условиях.

Среди известных газотермических методов, представленных в таблице 1, плазменное напыление имеет ряд преимуществ, при реализации задачи получения покрытия с заданными функциональными свойствами.

**Таблица 1** Газотермические методы напыления покрытий

№	Методы	Покрyтия	Скорость движения частиц порошка
1	Электродуговая металлизация	Металлы и их оксиды	90 м/с
2	Плазменное напыление	Металлы, тугоплавкие оксиды, карбиды	120 м/с
3	Сверхзвуковое газопламенное напыление	Металлы, тугоплавкие оксиды, карбиды	550 м/с
4	Сверхзвуковое плазменно-струйное напыление	Металлы, тугоплавкие оксиды, карбиды	600 м/с
5	Детонационное напыление	Металлы	650 м/с

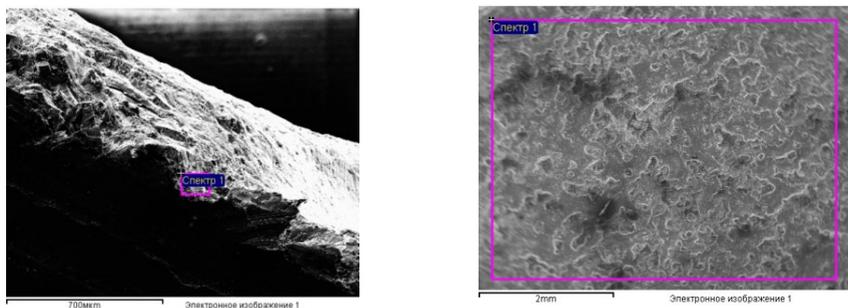
Выделен параметр скорость частицы порошка, так как он является одним из определяющих прочность и пористость при формировании покрытия. Плазменная струя может достигать температур значительно выше 7000°С, что позволяет плавить и наносить покрытия практически из любого материала [1]. Принцип плазменного напыления основан на использовании

тепловой и кинетической энергии плазменной струи ( $T=5000\div 20000$  К;  $V=200\div 2400$  м/с), генерируемой плазмотроном.

Отдельные частицы напыляемого материала, в виде порошка, вводятся в плазменную струю, после расплавления движутся к подложке с высокой скоростью, ударяются и растекаются по поверхности и затвердевают, образуя брызги.

При выборе режимов напыления необходимо учитывать, что чем крупнее фракция напыляемого порошка и меньше его теплопроводность, чем выше его температура плавления, тем больше требуемая тепловая мощность плазменной струи, а её необходимая скорость — меньше [2]. Соответственно при напылении легкоплавких порошков, материалов с высокой теплопроводностью, металлических порошков мелкой фракции ( $\leq 40$  мкм.) необходимо уменьшать мощность плазменной струи и увеличивать её скорость. Уменьшить мощность плазменной струи можно уменьшением силы тока дугового разряда плазмотрона. Увеличить или уменьшить скорость истечения струи плазмы можно, соответственно, увеличением или уменьшением расходов плазмообразующего, защитного, транспортирующего и фокусирующего газов. Так же изменять скорость струи можно за счёт диаметров анода и сопла плазмотрона (чем больше диаметр анода и сопла, тем меньше, при прочих равных условиях, скорость плазменной струи).

В работе проведен ряд экспериментов плазменно-дугового нанесения покрытий, в частности проведены эксперименты с напылением порошка  $Al_2O_3$ , рисунок 1.



**Рисунок 1.** Исследование образцов титанового сплава до напыления (слева), после нанесения плазменного напыления (справа)

Полученные данные на электронном микроскопе показывают, что снизилось содержание кислорода и активных металлов, увеличилось содержание алюминия в поверхностном слое в таблице 1-2. Плазменное покрытие блокирует проникновение активных металлов вглубь формы. Исследования проведенные по поперечному срезу показали уменьшение альфированного слоя (в 3-4 раза).

**Таблица 2** Результаты до напыления

Элемент	Весовой %	Атомный%
O K	22.79	46.30
Al K	1.40	1.68
Si K	1.17	1.36
Ti K	74.64	50.66
Итоги	100.00	

**Таблица 3** Результаты после напыления

Элемент	Весовой %	Атомный%
C K	10.94	21.21
O K	31.69	46.12
Na K	0.73	0.74
Mg K	5.15	4.93
Al K	1.08	0.93
Si K	4.29	3.56
Cl K	0.28	0.18
Ca K	0.49	0.28
Ti K	45.35	22.04
Итоги	100.00	

Одним из недостатков плазменного напыления является высокая температура напыления покрытий, поскольку оно может разлагать и изменять исходные кристаллические структуры вещества [3]. Кроме того, возникают расслаивание покрытий, вызванное высвобождением частиц из подложки. Частично это связано с тем фактом, что для полного покрытия поверхности плазменным напылением минимальная толщина покрытия составляет около 50 мкм, что предполагает потенциальное плохое сцепление и в конечном итоге плохие адгезионные свойства.

### **Литература:**

- [1] Continuous fiber reinforced ceramic matrix composites/ R. Devasia, A. Painuly, D. Devapal, K.J. Sreejith // Fiber Reinforced Composites Constituents, Compatibility, Perspectives, and Applications Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering 2021, Pages 669-751
- [2] Surface modification of medical devices at nanoscale—recent development and translational perspectives/ K.E. Fox, N.L. Tran, T.A. Nguyen, T.T. Nguyen, P.A. Tran // Biomaterials in Translational Medicine A Biomaterials Approach Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 2019, Pages 163-189
- [3] Thermal barrier coatings manufactured by suspension and solution precursor plasma spray—State of the art and recent progress/ D. Zhou, R. Vassen // Thermal Barrier Coatings (Second Edition) Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering 2023, Pages 199-228

andreeva.anzhelika.a@yandex.ru

## ВЛИЯНИЕ ФИНИШНОЙ ПОЛИРОВКИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПОКРЫТИЯ

**Р. Ш. Нагимов<sup>1</sup>, А. А. Николаев<sup>1</sup>, А. Ю. Назаров<sup>1</sup>**

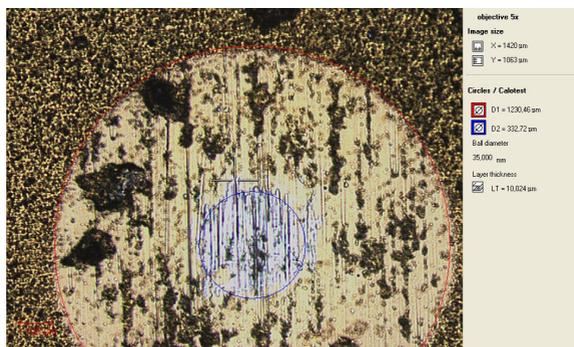
*<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

Исследовалось влияние электролитно-плазменного полирования однослойного покрытия TiN, нанесенного методом вакуумно-дугового осаждения на шероховатость полученной поверхности. Из экспериментальных данных следует, что при ЭПП, длительность которого превышает 1 минуту, происходит полное удаление покрытия. Следовательно, для такого покрытия необходимо ограничить время обработки до 1 минуты, чтобы избежать разрушения покрытия.

Электролитно-плазменная обработка лишена недостатков, присущих традиционным механическим и электрохимическим способам обработки, и дополнительно позволяет экономить материальные ресурсы. Его преимуществами являются высокая производительность и эффективность, соблюдение экологической чистоты окружающей среды, высокое качество и скорость выполняемых операций. Однако для того, чтобы в полной мере реализовать все преимущества необходимо провести исследования режимов электролитно-плазменного полирования [1, 2].

В качестве исследуемого покрытия применялся нитрид титана (TiN). Применение многослойного покрытия структуры TiN-Ti с толщиной титановых промежуточных слоёв в 2-3 раза меньше нитридных позволяет снизить величину остаточных напряжений практически в два раза.

Перед нанесением покрытия образцы из быстрорежущей стали были обработаны электролитно-плазменной обработкой до шероховатости Ra 0.25. Затем на образцы нанесли вакуумное покрытие TiN толщиной 10 мкм. Результаты измерения толщины покрытия при помощи сферических микрошлифов, подготовленных с использованием CSM Calotest представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Толщина покрытия TiN.

Установлено, что при времени обработки равном 2 минуты на образце начинает местами удаляться покрытие и создается неоднородность обработки разных материалов подложки и покрытия, что повышает значение шероховатости при замере. На основе представленных данных сделан вывод, что оптимальное время обработки составляет 1 минуту.

В результате подбора коэффициентов А и С в формуле установлено, что зависимость шероховатости Ra от времени обработки t определяется уравнением вида:

$$Ra = 0,85 \cdot \exp\left(-\frac{t}{60}\right) + 0,03$$

#### **Литература:**

- [1] Мукаева В. Р. Управление технологическим процессом электролитноплазменного полирования на основе контроля шероховатости поверхности по импедансным спектрам // Уфимский государственный авиационный технический университет. – 2014.
- [2] Б. Р. Лазаренко, В. Н. Дураджи, И. В. Брянцев, О структуре и сопротивлении приэлектродной зоны при нагреве металлов в электролитной плазме // Электронная обработка материалов. 1980. №2. С. 50-55.

r.sh.nagimov@gmail.com

## КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ NiO-PEDOT:PSS В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО СЕНСОРА НА ДИОКСИД АЗОТА

**Э. М. Лебедева<sup>1</sup>, Г. Р. Низамеева<sup>1,2</sup>, Р. Р. Гайнуллин<sup>1</sup>, В. В. Кузнецова<sup>1</sup>, И. Р. Низамеев<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова-ФИЦ РАН, Казань, Россия*

<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*

<sup>3</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева, Казань, Россия*

Постоянный контроль воздуха на содержание вредных концентраций оксидов азота, в частности, диоксида азота NO<sub>2</sub>, является очень актуальной задачей, поскольку это высокотоксичное соединение, которое оказывает неблагоприятное воздействие не только на организм человека, но и на окружающую среду [1]. В связи с этим, на сегодняшний день существует высокая потребность в создании газочувствительных элементов датчиков, способных реагировать на малое содержание диоксида азота в атмосфере. В рамках данной работы в качестве такого активного элемента кондуктометрического сенсора диоксида азота исследуется композитный материал на основе ориентированных волокон оксида никеля и поли (3,4-этилендиокситиофен) полистиролсульфоната (PEDOT:PSS) [2,3].

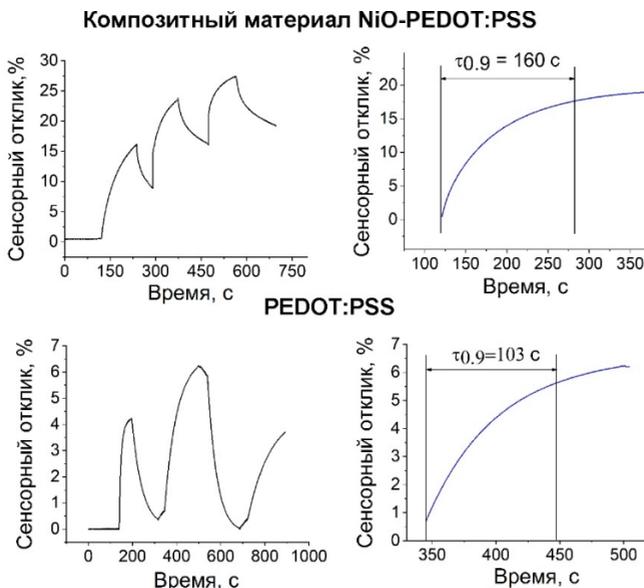
Для получения активного элемента сенсора диоксида азота методом химического осаждения металла из жидкой фазы нами был синтезирован материал в виде субмикронных волокон никеля. Далее синтезированные волокна в виде ориентированной сетки были нанесены на поверхность стеклянной подложки с золотыми электродами и окислены. Для создания композитного материала, а также улучшения адгезии и механической прочности, ориентированная сеть из волокон оксида никеля была покрыта тонким слоем PEDOT:PSS.

Сенсорные свойства разработанного газочувствительного элемента были исследованы в специально сконструированном статическом газоанализаторе с компьютерным управлением, состоящим из герметичной

капсулы, детектора с внедренным газочувствительным элементом, баллона с целевым газом, редукционного клапана давления, персонального компьютера, потенциостата для контроля заданного напряжения и измерения тока. Испытания проводились при комнатной температуре и относительной влажности воздуха 45%. В качестве целевого газа использовали диоксид азота.

Отклик сенсора, который выражается в относительных единицах, рассчитывался по формуле:  $R_r = (R_{gas} - R_0) / R_0$ , где  $R_{gas}$  – сопротивление газочувствительного элемента в присутствии исследуемого газа,  $R_0$  – сопротивление газочувствительного элемента до воздействия исследуемого газа. Время отклика газочувствительного элемента  $\tau_{0,9}$  рассчитывалось как интервал времени, составляющий 90% от времени, требуемого для достижения газочувствительным элементом стационарного отклика после подачи на сенсор диоксида азота.

Результаты сенсорных исследований разработанного газочувствительного элемента на основе ориентированных волокон оксида никеля в полимерной матрице PEDOT:PSS в сравнении с чистыми пленками PEDOT:PSS показаны на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Результаты сенсорных испытаний

Согласно этим данным, сенсорный отклик композитного материала на диоксид азота в 4 раза больше по сравнению с чистой пленкой PEDOT:PSS. Время отклика композитного материала составляет 160 секунд, а PEDOT:PSS 103 секунды.

Таким образом получен композитный материал на основе волокон оксида никеля и полимера PEDOT:PSS. Исследованы сенсорные свойства полученного материала в среде целевого газа. Показана возможность использования композитного материала в качестве активного элемента сенсора диоксида азота.

### **Литература:**

- [1] Brender J. D. Human health effects of exposure to nitrate, nitrite, and nitrogen dioxide // *Just enough nitrogen: Perspectives on how to get there for regions with too much and too little nitrogen.* – 2020. – P. 283-294.
- [2] Sadek A. Z., Wlodarski W., Shin K., Kaner R. B., Kalantar-zadeh K. A layered surface acoustic wave gas sensor based on a polyaniline/ $\text{In}_2\text{O}_3$  nanofibre composite // *Nanotechnology.* – 2006. – V. 17. – № 17. – P. 4488.
- [3] Zampetti E., Pantalei S., Muzyczuk A., Bearzotti A., De Cesare F., Spinella C., Macagnano A. A high sensitive  $\text{NO}_2$  gas sensor based on PEDOT–PSS/ $\text{TiO}_2$  nanofibres // *Sensors and Actuators B: Chemical.* – 2013. – V. 176. – P. 390-398.

guliya.riv@gmail.com

## ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ НИОБИЕМ

Д. А. Шпанов<sup>1</sup>, М.С. Воробьев<sup>1</sup>, П.В. Москвин<sup>1</sup>, Е. А. Петрикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИСЭ СО РАН, Томск, Россия

das138@tpu.ru

Термическая стабильность до 1150°C, хорошая технологичность и свариваемость стали с повышенным содержанием ниобия объясняется измельчением первичной структуры наплавленного шва вследствие образования феррита и заполнением междендритных промежутков эвтектической жидкостью [1]. Детали с подобной постобработкой позволяют снизить вес машин и конструкций и повысить их надежность и ресурс.

Электронно-пучковое легирование лидирует над другими способами ввода энергии в поверхность образца по КПД до 90%, по малому отражению электронов, по контролю и однородности теплового потока [2].

Цель работы – выявить оптимальные режимы облучения поверхности системы «ниобий (плёнка) / сталь 40Х (подложка)» электронным пучком с помощью Comsol Multiphysics.

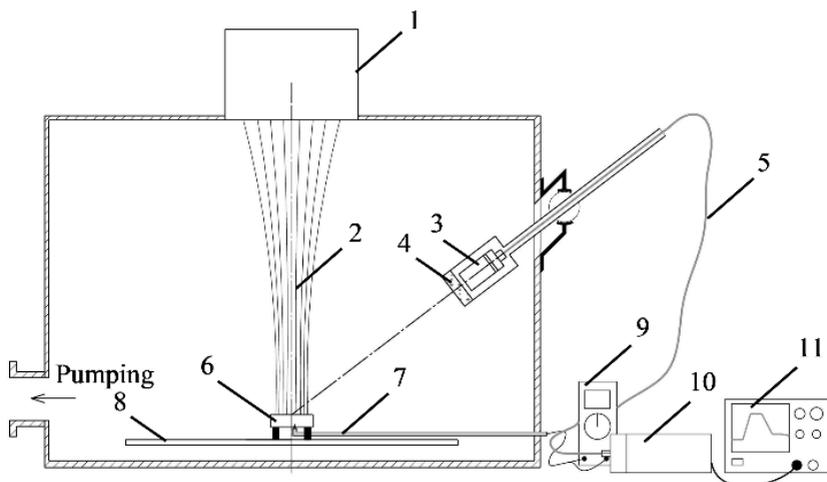
**Модель.** Для модели тонкой плёнки с поверхностным источником тепла уравнение теплопроводности Фурье без конвекции и теплоотдачи с граничными и начальными условиями может быть представлена в виде:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad -\lambda \frac{\partial T(t,0)}{\partial x} = q(t), \quad \frac{\partial T(t,L)}{\partial x} = 0; \quad T(t = 0, x) = T_0$$

где  $c, \rho, \lambda$  – суперпозиции теплоёмкости, плотности и коэффициента теплопроводности твёрдых и жидких фаз с учётом массовых долей;  $q(t)$  – плотность сообщаемой электронным пучком мощности, вычисляется из осциллограмм токов и напряжений в ускоряющем промежутке источника электронов и данных калориметрии с поверхности образца. Скрытая теплота плавления  $L$  вводится в качестве дополнительного члена в теплоемкость при фазовом переходе:  $c = c_s + L/\Delta T$ , где  $\Delta T$  – величина интервала при фазовом переходе - устраняет скачкообразное измерение свойств. Изменение радиуса пучка в течение импульса учитывается аппроксимацией эмпирических данных.

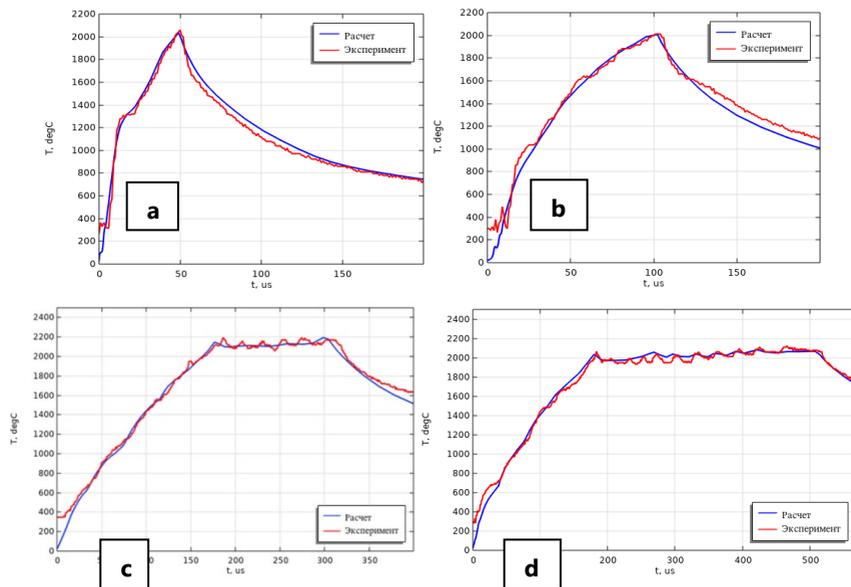
**Методика эксперимента.** На поверхность образцов стали 40Х наносили электродуговым плазменно-ассистированным способом [3] пленку Nb толщиной 3 мкм. После вакуумного остывания облучали систему «пленка (Nb) / (сталь 40Х) подложка» на установке «СОЛО» (Рис. 1), генерирующей пучок электронов диаметром до 5 см с энергией электронов до 25 кэВ, длительностью импульсов (20-1000) мкс и плотностью энергии до 100 Дж/см<sup>2</sup>, позволяющей контролируемо изменять данные параметры независимо друг от друга [2]. Таким образом, на границе раздела фаз стальной-ниобий формируется заданное температурное поле и фазовый состав.

Режимы облучения (Рис.2) выбраны так, чтобы поверхностный слой образцов был прогрет выше температуры плавления стали 40Х (1450-1550 °С), но не достигал температуры плавления ниобия (2500°С). Для импульсного измерения температуры поверхности облучаемого образца использовали высокоскоростной инфракрасный пирометр.

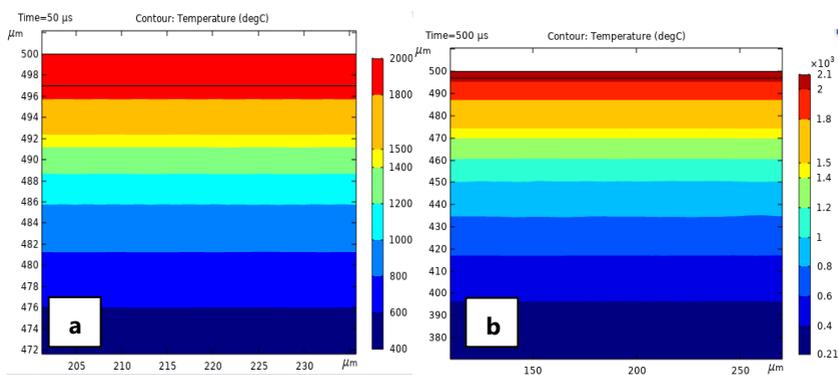


**Рисунок 1.** Схема эксперимента 1 – источник электронов; 2 – импульсный электронный пучок; 3 – линза; 4 – кварцевое стекло; 5 – оптический волновод; 6 – облучаемая мишень; 7 – термопара хромель – алюмель; 8 – двухкоординатный стол манипулятор; 9 – мультиметр; 10 – высокоскоростной инфракрасный пирометр; 11 – осциллограф.

**Результаты эксперимента:** Модулируемый электронный пучок за доли мс плавит поверхностные слои стальной детали с растворением покрытия ниобия с последующей кристаллизацией расплава со скоростью до  $10^9 \frac{K}{C}$



**Рисунок 2.** Температура поверхности для длительностей импульсов тока 50 (a), 100 (b), 300 (c) и 500 мкс (d) – расчет и эксперимент.



**Рисунок 3.** Распределение температуры вглубь образца при длительности облучения для 50 мкс (a) и 500 мкс (b).

С увеличением длительности импульса пучка глубина расплавленного слоя образца увеличивается с 8 до 30 мкм (Рис. 3). При этом скорость роста толщины расплава зависит от длительности импульса и от плотности мощности воздействия. Охлаждение образца по окончании импульса происходит в основном за счет теплопроводности, формируется столбчатая структура высокоскоростной кристаллизации ячеистого типа. [4]

Выполнен анализ прочностных (микротвердость) и трибологических (износостойкость, коэффициент трения) свойств поверхностного слоя облученных образцов. После облучения в каждом из режимов значение микротвердости превышает исходное значение в 1.6 – 1.8 раз. После облучения снижается скорость износа – в режимах облучения с длительностью 50 мкс и 100 мкс в 30-35 раз, при удержании температуры около 2000 °С в 45-60 раз. С увеличением времени удержания температуры растёт вклад энергии в поверхностный слой образца, что также может приводить к росту микротвердости и износостойкости облученных образцов.

**Заключение:** Распространённая конструкционная сталь 40X, легированная Nb, может быть использована для изготовления инструментов для эффективной экструзии легких металлов (например, алюминия) и горячей обработки подшипников как альтернатива дорогим, механически труднообрабатываемым жаропрочным сталям, легированным в своей массе Mo, W, Ti и V. Предлагаемый метод отличается более низкими затратами материалов и электроэнергии, а также стоимостью, ведь легирование можно использовать как постобработку готовых изделий.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 20-79-10015-П).*

#### **Литература:**

- [1] Ф.Ф. Химушин. Нержавеющие стали. 2-е изд.– М. Металлургия.1967. 797 с
- [2] М.С. Воробьёв, П.В. Москвин, В.И. Шин, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашурова, С.Ю. Дорошкевич, В.Н. Девятков, М.С. Торба, В.А. Леванисов. Динамическое управление мощностью мегаваттного электронного пучка субмиллисекундной длительности в источнике с плазменным катодом. Письма в ЖТФ, 2021, том 47, вып. 10, с. 38-42
- [3] Shugurov, V.V.; Koval, N.N.; Krysina, O.V.; Prokopenko, N.A. QUINTA equipment for ion-plasma modification of materials and products surface and vacuum arc plasma-assisted deposition of coatings. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1393, 012131–012141.
- [4] Vorobyov, M.S.; Petrikova, E.A.; Shin, V.I.; Moskvin, P.V.; Ivanov, Y.F.; Koval, N.N.; Koval, T.V.; Prokopenko, N.A.; Kartavtsov, R.A.; Shpanov, D.A. Steel Surface Doped with Nb via Modulated Electron-Beam Irradiation: Structure and Properties. *Coatings* 2023, 13, 1131.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА, ПРИМЕНЯЕМОГО В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССАХ

**Р. В. Рудаков<sup>1</sup>, М. В. Сержантова<sup>1</sup>, В. И. Бойков<sup>1</sup>, О. С. Нуйя<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>СПб ГУАП, Санкт-Петербург, Россия

Проблема идентификации, представленная в названии доклада продиктована необходимостью повышения адаптивности управления манипуляторами при исследованиях, связанных с высокотемпературными процессами. Анализ существующих методов идентификации [1-6] выявил, что они не являются адаптивными. В этой связи авторы разработали на основе уравнения Лагранжа адаптивный метод идентификации.

**Идентификация однозвенного манипулятора на основе уравнения Лагранжа.** Для вывода уравнений движений робота в обобщенных координатах используем уравнение Лагранжа второго рода [3]:

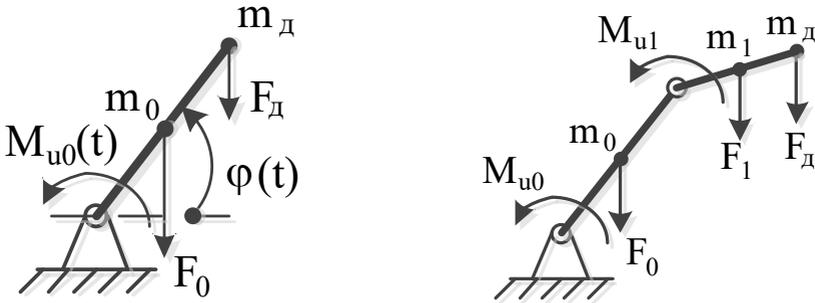
$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1),$$

где  $T(q_i, \dot{q}_i, t)$  – кинетическая энергия системы;  $q_i$  – обобщенные координаты;  $Q_i$  – обобщенная сила. Отметим, что уравнение (1) описывает движение механической системы, подчиненной идеальным связям. Рассмотрим исследуемые объекты. Первый объект, представленный на рисунке 1 – однозвенный манипуляционный робот, состоящий из звена длиной  $L_0$  и массой  $m_0$ . Под действием внешнего управляющего момента  $M_{u0}(t)$  звено поворачивается на угол  $\varphi(t)$ , который выберем в качестве обобщенной координаты. Предположим, что робот переносит деталь массой  $m_d$ , величину которой будем считать неизвестной, но постоянной. При изменении угла поворота меняются силы веса  $F_0$  и  $F_d$ , которые отнесем к внешним возмущениям. При составлении уравнения модели однозвенного манипулятора звено робота будем считать тонким и абсолютно жестким стержнем, масса которого сосредоточена в его центре (центр масс). Момент инерции такого звена относительно шарнира составит

$J_0 = m_0 L_0^2 / 4$ . Наличие переносимой детали увеличит момент инерции на величину  $J_d = m_d L_0^2$ .

После преобразований уравнение (1) принимает вид

$$(J_0 + J_d)\ddot{\varphi}(t) + K_0\dot{\varphi}(t) + \left(\frac{m_0}{2} + m_d\right)gL_0 \cos \varphi(t) = M_{u0}(t) . \quad (2)$$



**Рисунок 1.** Однозвенный (слева) и двухзвенный (справа) робот-манипулятор.

Полученное нелинейное уравнение второго порядка движения однозвенного манипуляционного робота, параметры которого зависят от массы  $m_d$  переносимой детали и поэтому априорно неизвестны линейризуем в положении  $\varphi_0$ . Тогда при малых отклонениях угла от этого положения получаем выражение

$$\varphi(t) = \varphi_p + \Delta\varphi(t), \quad (J_0 + J_d)\Delta\ddot{\varphi}(t) + K_0\Delta\dot{\varphi}(t) + \left(\frac{m_0}{2} + m_d\right)(gL_0 \cos \varphi_p)\Delta\varphi(t) = M_{u0}(t) - \left(\frac{m_0}{2} + m_d\right)gL_0 \sin \varphi_p \quad (3)$$

Ранг матрицы идентифицируемости зависит от значений измеряемых компонент вектора состояния и в случае, когда начальное значение компоненты  $x_2 \neq 0$   $rank R_I = rank [X \ AX] = 2$ , т.е. система идентифицируемая.

**Идентификация двухзвенного манипулятора на основе уравнения Лагранжа.** Рассмотрим второй объект, представленный на рисунке 1(справа) – двухзвенный манипуляционный робот, состоящий из первого звена длиной  $L_0$  и массой  $m_0$  и второго звена длиной  $L_1$  и массой  $m_1$ . Под действием внешнего управляющего момента  $M_{u0}(t)$  первое звено

поворачивается на угол  $\varphi_0(t)$ ; и благодаря действию управляющего момента  $M_{u1}(t)$  второго звена поворачивается на угол  $\varphi_1(t)$ . Предположим, что робот переносит деталь массой  $m_d$ , величину которой будем считать неизвестной, но постоянной. При изменении угла поворота меняются силы веса  $F_0, F_1$  и  $F_d$ , которые отнесем к внешним возмущениям.

Формируя модель двухзвенного манипулятора, будем считать звенья робота тонкими и абсолютно жесткими стержнями, масса которых сосредоточена в центре масс каждого. Момент инерции первого звена относительно шарнира составит  $J_0 = m_0 L_0^2 / 4$ . Наличие переносимой детали и второго звена увеличит момент инерции на величину момента инерции второго звена, которое будет определяться по сумме момента инерции детали и второго звена соответственно  $J_d = m_d L_0^2$  и  $J_1 = m_1 L_1^2 / 4$ .

На первое звено действует вращающий момент  $M_{u0}(t)$  и на второе звено  $M_{u1}(t)$  – входное управляющее воздействие, а также моменты, вызванные действием сил тяжести. После преобразований уравнение (1) принимает вид

$$\begin{aligned} & \frac{J_0 \ddot{\varphi}(t)}{2} + \frac{m_0}{2} g L_0 \cos \varphi_0(t) + \left( \frac{m_1}{2} + m_d \right) g L_1 \cos \varphi_1(t) \\ & - K_0 \dot{\varphi}(t) + \frac{(J_1 + J_d + \frac{m_1}{2} + m_d) \varphi_1^2}{4} + \left( \frac{m_1}{2} + m_d \right) g L_1 \cos \varphi(t) - K_1 \dot{\varphi}_1(t) = \\ & M_{u0}(t) + M_{u1}(t) \end{aligned} \quad (4).$$

В результате получили нелинейное уравнение второго порядка движения двухзвенного манипуляционного робота, параметры которого зависят от массы  $m_d$  переносимой детали и поэтому априорно неизвестны.

Уравнение (4) можно линеаризовать. Так, если звено робота находится в положении  $\varphi_0$ , то при малых отклонениях угла от этого положения получаем

$$\varphi(t) = \varphi_p + \Delta\varphi(t),$$

$$\begin{aligned} & J_0 \Delta \ddot{\varphi}(t) + \frac{m_0}{2} g L_0 \cos \Delta\varphi_0(t) + \left( \frac{m_1}{2} + m_d \right) g L_1 \cos \Delta\varphi_1(t) - K_0 \dot{\varphi}(t) + \\ & \frac{(J_1 + J_d + \frac{m_1}{2} + m_d) \Delta\varphi_1^2}{4} + \left( \frac{m_1}{2} + m_d \right) g L_1 \cos \Delta\varphi(t) - K_1 \dot{\varphi}_1(t) = \\ & = M_{u0}(t) - \frac{m_0}{2} g L_0 \cos \varphi_0(t) + \left( \frac{m_1}{2} + m_d \right) g L_1 \cos \varphi_1(t) + M_{u1}(t) - \left( \frac{m_1}{2} + \right. \\ & \left. m_d \right) g L_1 \cos \varphi(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Ранг матрицы идентифицируемости зависит от значений измеряемых компонент вектора-состояния и в случае, когда начальное значение компоненты  $x_2 \neq 0$ .  $\text{rank } R_I = \text{rank } [X \quad AX] = 2$ , следовательно, система идентифицируема. Очевидно, что в случае неподвижности звена, когда внешний управляющий момент  $M_u(t)$  уравнивает действие сил тяжести, система неидентифицируема. Решена задача идентификации манипуляционного робота на основе теоремы идентифицируемости для класса линейных непрерывных стационарных динамических систем на примере двухзвенного манипулятора с подвешенным грузом в условиях неопределенности параметров системы. Установлено, что объекты являются идентифицируемыми. Сформирован алгоритм идентификации в условиях неопределенности.

### **Литература:**

- [1] Формирование уравнений динамики роботов-манипуляторов / И. Р. Белоусов. - Москва: Ин-т прикладной математики им. Москва В. Келдыша РАН, 2002. - 31 с.: ил.; 21 см. - (Препринт / Рос. акад. наук. Ин-т прикладной математики им. М.В. Келдыша; № 45 за 2002 г.).
- [2] С.Л. Крутиков. Базовые инерционные параметры манипуляционных роботов // Вестник МГТУ. Серия «Приборостроение». 2011. Т.1. С.28-45
- [3] Г. И. Вольфсон. Локальная параметрическая идентифицируемость систем в случае конечномерных семейств параметров. Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2011.-№1.- С. 8-13.
- [4] Структурная идентификация систем: анализ информационных структур / Н. Н. Карабутов. - Москва: URSS, 2009. - 173 с.
- [5] И. И. С. Можаровский. К проблеме идентифицируемости моделей нелинейных объектов управления// Надежность и качество сложных систем. – 2013. - №2.- С.44-50.
- [6] С. В. Стафеев Н.Н. Об условиях глобальной идентифицируемости для моделей факторного анализа / Труды Карельского научного центра РАН.- 2011. - № 5. - С. 111–114.

12noch@mail.ru

## СИНТЕЗ НАНОАЛМАЗОВ И АЛМАЗОПОДОБНЫХ НАНОПЛЕНОК В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ

**А. Н. Галиев<sup>1</sup>, И. З. Нуруллин<sup>1</sup>, Б. А. Тимеркаев<sup>2</sup>, З. Х. Исрафилов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (АО «НПО ГИПО»), Казань, Россия

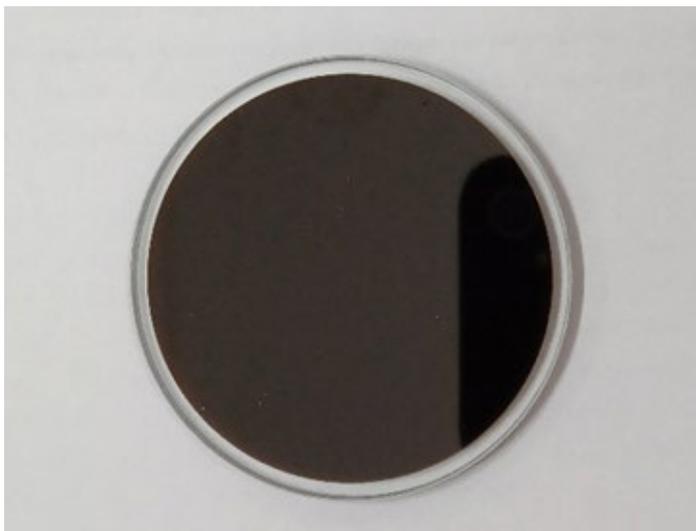
<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева (КНИТУ-КАИ), Казань Россия

К настоящему времени про алмазы и наноалмазы известно практически всё: их структура, способы добычи, способы синтеза, все расширяющиеся области применения. Уникальное сочетание высокой твердости с высокой поверхностной активностью и структурообразующими качествами пророчит наноалмазам широкое применение в качестве структурообразующего элемента композиционных материалов, абразивных материалов для обработки сверхтвердых материалов и др. Однако возможности применения наноалмазов гораздо шире. Можно упомянуть хотя бы окраску алмазов путем имплантации ионов полупроводниковых элементов. В этом случае примеси могут оказаться элементом оптической памяти.

В последнее время производство наноалмазов, в основном, осуществляется детонационным способом. При достижении температур 2000 - 3500К и давлений 10 - 30 ГПа графит превращается в алмаз. Предполагалось, что увеличение температуры ослабляет связи между атомами кристаллического графита, а всестороннее сжатие сближает атомы углерода до межатомных расстояний в алмазе. Однако изучение кинетики формирования наноалмазов показало, что высокая температура и высокое давление создают лишь реакционную плазму, из которой впоследствии в результате химических реакций синтезируются наноалмазы. Т.е., детонационная волна лишь создает среду и условия для образования алмазов и наноалмазов. Поэтому этот способ синтеза наноалмазов можно отнести к CVD технологиям. Среду и условия образования наноалмазов и алмазоподобных покрытий также можно реализовать в аргоновой дуге с графитовыми электродами [1], электрической дуге, погруженной в мазут [2], в высоковольтном разряде из пропана [3], в магнетронном разряде [4]. Теоретический анализ синтеза наноалмазов в дуговом разряде в мазуте

проанализирован в [5]. К CVD технологиям также относится нанесение алмазных и алмазоподобных покрытий и пленок магнетронным способом. Ко второй группе относятся методы химического получения алмазных пленок. Здесь уже температуры близки к комнатной, а давления или ниже, или существенно ниже атмосферного.

В данной работе для нанесения алмазоподобной пленки был использован метод магнетронного разряда в пропане [4]. Перед экспериментом осуществляется очистка катода из нержавеющей стали и запускается разряд. В разряде ускоренные электрическим полем электроны разбивают молекулы пропана, в результате которого освобождаются атомарные углероды. Попадая на стеклянную подложку, они образуют алмазоподобную пленку. На рисунке 1 представлен стеклянный диск с алмазоподобной пленкой.



**Рисунок 1.** Алмазоподобная пленка на поверхности стекла

Данная пленка была исследована на электронном микроскопе. Как и ожидалось, в составе пленки элементы материала катода отсутствуют. Это связано с тем, что в составе газа присутствуют лишь легкие элементы, такие как водород, углерод. Их масса и кинетическая энергия не в состоянии выбить материал катода.<sup>1</sup>

*Исследование выполнено при финансовой поддержке по Соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ.*

**Литература:**

1. B.A.Timerkaev, A.A.Abdullin, R.M.Suleimanov, R.R.Shaikhattarov, R.K.Gevorgyan. SYNTHESIS OF MICRODIAMONDS AND GERMANIUM NANOTUBES IN THE ARGON-GERMANIUM ARC. Journal of Physics: Conference Series 2270 (2022) 012030. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/2270/1/012030
2. B A Timerkaev, R B Shakirov, A A Zalyalieva, R K Gevorgyan, R R.,Shaikhattarov. NANODIAMONDS FROM FUEL. Journal of Physics: Conference Series 2270 (2022) 012008. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/2270/1/012008.
3. Timerkaev, B.A., Shakirov, B.R., Andreeva, N.G., ...Galeev, I.G., Saifutdinov, A.I. Synthesis of Nanodiamonds from Gasoline Fractions of Hydrocarbons in a High-Voltage Nonequilibrium Electric Discharge. High Energy Chemistry, 2023, 57, S50–S52.
4. Гайнутдинов И. С., Азаматов М. Х., Михайлов А. В., Галиев А. Н., Нуруллин И.З., Шушарин С. Н. Гибридное просветляющее покрытие с алмазоподобным слоем // Оптический журнал, СПб., 2015, т.82, №1. с.70-73
5. Saifutdinova A.A., B.A.Timerkaev, A.I.Saifutdinov Synthesis of Nanodiamonds from Fuel Oil Processing Products Using an Arc Discharge.- 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). IEEE. 2020. 867-869.

btimerkaev@gmail.com

## СИНТЕЗ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕР-ПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЮЩЕГОСЯ В ПОТОКЕ ГАЗА

**Д. А. Зуза<sup>1</sup>, В. О. Нехорошев<sup>1</sup>, А. В. Батраков<sup>1</sup>, И. А. Курзина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

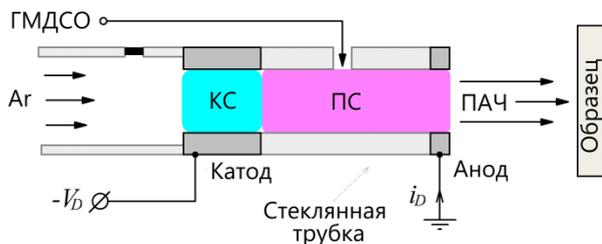
<sup>2</sup>*Томский государственный университет, Томск, Россия*

Осаждение органических и элементоорганических покрытий из газовой фазы с использованием низкотемпературной плазмы газовых разрядов является многообещающим методом современных плазменных технологий [1]. Однако метод нетривиален, и его сложность обусловлена разнообразием путей плазмохимических реакций, а также физико-химическими процессами в газе и на границах раздела фаз [1, 2]. Несмотря на это, сегодня метод активно развивается, так как позволяет получать диэлектрические защитные покрытия толщиной от десятков нанометров до десятков микрон на подложках различной природы (диэлектрики, проводники) в одну стадию и без использования растворителей на [3].

В настоящем докладе представлены и обсуждаются результаты по исследованию дистанционного осаждения полимер-подобных кремнийорганических покрытий плазмохимическим методом. Особенностью метода, применяемого в данной работе, является то, что процессы активации исходного вещества – гексаметилдисилоксана (ГМДСО), протекают в тлеющем разряде постоянного тока, поддерживаемом в потоке плазмообразующего газа – аргона. Под процессами активации исходного вещества понимаются элементарные акты взаимодействия высокоэнергетических частиц в плазме с молекулами вещества, что приводит к образованию молекулярных ионов и свободных радикалов.

Рассмотрены два различных подхода к плазмохимической активации ГМДСО. Подходы отличаются друг от друга местом инъекции паров ГМДСО в плазмохимический реактор, который представляет собой газоразрядную систему из двух полых электродов.

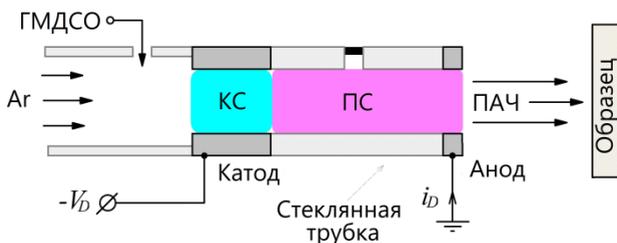
В первом случае пары инжектировались в плазмохимический реактор через боковой ввод (Рисунок 1).



**Рисунок 1.** Активация ГМДСО в плазме положительного столба тлеющего разряда

Так как поток аргона препятствовал диффузии молекул ГМДСО в сторону прикатодных слоев разряда (КС), в этом случае процессы активации протекали только в плазме положительного столба (ПС) разряда. Поток газа способствовал выносу активированных частиц из сопла (анода) плазмохимического реактора в вакуумную камеру. Таким образом, формировался поток активированных частиц (ПАЧ), который направлялся на поверхность покрываемого образца. В результате реакций активированных частиц друг с другом – процессов рекомбинации, на поверхности формировался слой высокомолекулярного вещества.

Во втором случае пары ГМДСО предварительно смешивались с аргоном и инжектировались в реактор через полый катод (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Активация ГМДСО в прикатодных слоях и в плазме положительного столба тлеющего разряда

Здесь молекулы ГМДСО активировались в прикатодных слоях разряда (КС) и в положительном столбе (ПС) разряда.

Путем варьирования среднего тока разряда в диапазоне 5-60 мА и массового расхода ГМДСО в диапазоне 1-10 мг/мин был проведен ряд

экспериментов по плазмохимическому осаждению при различных подходах к активации ГМДСО. Для каждого режима оценивался массовый выход продукта и анализировалось его химическое строение. Химическое строение образцов анализировалось с использованием рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и инфракрасной спектроскопии.

Так как массовый выход продукта и его химическое строение зависят как от тока разряда, так и от скорости потока исходного вещества, для характеризации режимов работы системы был предложен метод оценки удельной энергии – средней энергии, рассеивающейся на активацию одной молекулы мономера. Показано, что удельная энергия может рассматриваться как количественная мера процессов активации.

В случае активации ГМДСО в плазме положительного столба была установлена прямая взаимосвязь между удельной энергией и массовым выходом продукта, а также удельной энергией и химическим строением.

В случае активации ГМДСО в прикатодных слоях разряда и в плазме положительного столба разряда, существенная часть продукта осаждается на катод, что ограничивает выход продукта, а процессы распыления осажденной диэлектрической пленки с катода приводят к обогащению удаленно осажденного покрытия углеродом.

#### **Благодарность:**

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWRM-2021-0007).

#### **Литература:**

- [1] Ch. Ma, A. Nikiforov, D. Hegemann, N. De Geyter, R. Morent, K. Ostrikov Plasma-controlled surface wettability: recent advances and future applications, *International Materials Reviews*. 68 (1) (2023) 82-119. <https://doi.org/10.1080/09506608.2022.2047420>
- [2] D. Hegemann, Plasma activation mechanisms governed by specific energy input: Potential and perspectives. *Plasma Processes Polym.* 20 (2023) e2300010. <https://doi.org/10.1002/ppap.202300010>
- [3] A.S.M. de Freitas, C.C. Maciel, J.S. Rodrigues, R.P. Ribeiro, A.O. Delgado-Silva, E.C. Rangel, Organosilicon films deposited in low-pressure plasma from hexamethyldisiloxane — A review. *Vacuum*. 194 (2021) 110556. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110556>

zzdnl@yandex.ru

## МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОАТОМНЫХ МОЛЕКУЛ С СОДЕРЖАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ H, C, N, O, S.

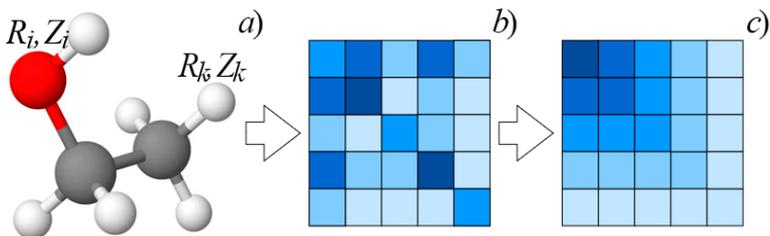
**М. Б. Юнусов<sup>1</sup>, Р. М. Хуснутдинов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>2</sup>Удмуртский федеральный научный центр УрО РАН, Ижевск, Россия

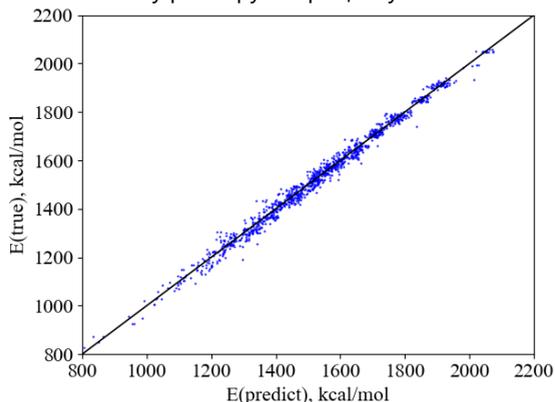
Методы квантово-механического компьютерного моделирования широко используются для поиска новых материалов и исследования свойств уже известных материалов. Однако, существенным недостатком таких методов является времязатратность расчетов и высокая требовательность к вычислительным ресурсам. Комбинирование квантовомеханического подхода и методов машинного обучения может стать ключом к быстрым и точным предсказаниям различных характеристик многоатомных систем. В представленной работе развивается метод, основанный на использовании матриц Кулона [1, 2] и позволяющий прогнозировать энергетические параметры молекул с помощью полносвязной нейронной сети. В качестве параметра для обучения и тестирования модели нейронной сети выбрана энергия атомизации  $E_{at}$  - энергия, которую необходимо затратить для расщепления молекулы на отдельные атомы. В качестве данных по конфигурациям и энергетическим характеристикам молекул, применяемых для обучения и тестирования модели, использован набор данных QM7 [1]. Набор содержит данные только о молекулах, состоящих из элементов H, C, N, O, S и включающих не более 23 атомов, величина набора составляет 7165 молекул. В качестве входных данных нейронной сети используются координаты  $R_i$  и  $Z_i$  заряды атомов, представленные в виде матрицы Кулона (рис. 1а). Элементы матрицы Кулона вычисляются, согласно выражениям:  $C_{ii}=Z_i^2/2$ ,  $C_{ik}=Z_i Z_k / |R_i - R_k|$ . Матрица Кулона является инвариантной относительно перемещений и вращений молекулы в пространстве, однако не существует универсального правила индексации атомов для ее заполнения (рис. 1б). Одним из способов стандартизации матриц Кулона является сортировка столбцов и строк в порядке убывания нормы (рис. 1с). Используемая в данной работе модель нейронной сети представляет собой полносвязный перцептрон. Методом перебора были

определены наиболее эффективные для данной задачи функции активации и функции ошибки.



**Рисунок 1.** Представление данных о конфигурации молекулы в виде сортированной матрицы Кулона.

Активация каждого последующего слоя определяется функцией ReLu, для минимизации ошибки используется метод градиентного спуска по алгоритму Adam [3] и комбинация среднеквадратичной и средней абсолютной ошибок. Кроме того, были сравнены модели с различным количеством слоев и количеством нейронов в скрытых слоях. Количество скрытых слоев варьировалось от 1 до 5, количество же нейронов в слоях варьировалось от 23 до 529. Здесь начальное значение нейронов соответствует максимальному количеству атомов в молекулах из обучающего набора, а конечное – максимальному размеру матрицы Кулона.



**Рисунок 2.** Сопоставление спрогнозированных энергий атомизации и эталонных значений энергий атомизации для 7165 молекул.

Наибольшую точность при предсказании энергии атомизации  $E_{at}$  продемонстрировали модели с конфигурациями  $4 \times 276$  нейронов и  $5 \times 529$  нейронов, показав среднюю абсолютную ошибку в  $\approx 8.1$  ккал/моль, что соответствует  $0.5\%$  от средней энергии атомизации молекул в представленном наборе QM7. При этом обучение модели с конфигураций  $4 \times 276$  занимает вдвое меньше времени по сравнению с моделью  $5 \times 529$ . На рисунке 2 представлено сравнение эталонных значений энергий атомизации  $E_{at}$  и значений, предсказанных моделью. Таким образом, методы машинного обучения способны выявлять закономерности между параметрами молекулярных систем и могут быть использованы в задачах, где требуется мгновенное прогнозирование с заданной точностью значений недостающих параметров на основе известных данных, например, координат  $R_i$  и зарядов  $Z_i$  атомов. Методы машинного обучения обладают большим потенциалом прогнозирования в областях материаловедения, дизайна новых соединений и хемоинформатики – точность моделей может быть повышена за счет более совершенных алгоритмов минимизации ошибки и нахождения оптимальных форм представления данных для обучения, то есть молекулярных дескрипторов.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 22-22-00508).

#### **Литература:**

- [1] M. Rupp et al., Physical review letters **108**, 5 (2012).
- [2] G. Montavon et al., Advances in neural information processing systems **25** (2012).
- [3] Z. Zhang., 26th international symposium on quality of service (IWQoS) (2018).

mukhammadbek@mail.ru

## ПЛАЗМЕННЫЙ РЕАКТОР ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЛАЗМА-СТИМУЛИРОВАННЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Н. А. Ашурбеков<sup>1</sup>, М. З. Закарьяева<sup>1,2</sup>, К. О. Иминов<sup>1</sup>, К. М. Рабаданов<sup>1,3</sup>,  
Г. Ш. Шахинов<sup>1</sup>, А. А. Муртазаева<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Дагестанский Государственный Университет, Махачкала, Россия

<sup>2</sup> Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия

<sup>3</sup> Харбинский Политехнический Университет, Харбин, Китай

Процессы управляемого плазменного осаждения сверхтонких покрытий и плазменного травления поверхности материалов микро- и нанoeлектроники занимают ключевое место в современной электронной промышленности при синтезе наноразмерных пленок и 3D полупроводниковых структур. Для этих целей применяют плазма-стимулированные технологии атомно-слоевого осаждения (Atomic layer deposition, ALD) и атомно-слоевого травления (Atomic layer etching, ALE), которые позволяют модифицировать поверхность материала с контролем процессов роста и травления на уровне отдельных атомарных или молекулярных слоев [1-4]. Эти технологии основаны на использовании продуктов реакций, образующихся в результате деградации молекул и атомов рабочего газа под действием ионизации. Продукты деградации газа либо реагируют друг с другом, осаждаясь на поверхности подложки в виде нового соединения, либо реагируют с материалом подложки, образуя летучие соединения. Поэтому необходимо подобрать источники плазмы для генерации энергетически и химически активных частиц, отвечающих определенным требованиям. Прежде всего, следует попытаться обеспечить, чтобы образующиеся частицы имели определенные энергии и равномерно распределялись по определенным областям, используя источники плазмы с достаточной мощностью.

При создании 3D наноразмерных структур плазменное травление атомарного слоя позволяет не только удалить один монослой материала, но и оставить неповрежденными соседние слои. Такая прецизионность технологии достигается созданием ионных потоков с точным контролем величины потока частиц при крайне низкой энергии ионов. Исследования последних лет показали, что для этих целей хорошо подходит плазма, генерируемая электронным пучком, поскольку она обычно характеризуется высокой плотностью заряженных частиц ( $10^{10}$ - $10^{12}$ см<sup>-3</sup>) и низкими

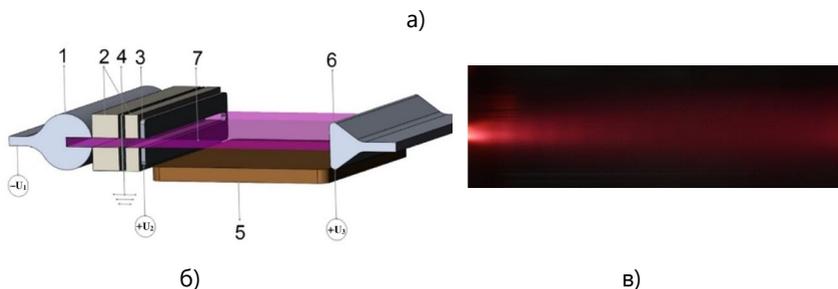
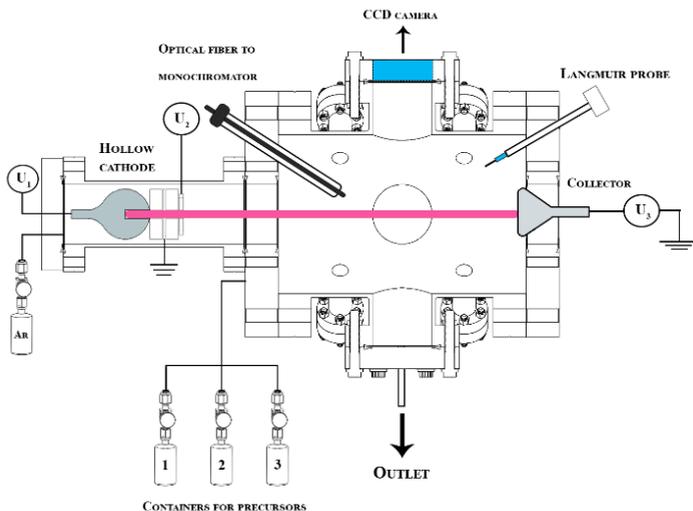
электронными температурами для вторичных плазменных электронов (<1,0 эВ).

В этой работе мы обсуждаем возможность создания плазменного реактора с возможностью формирования у поверхности материала широкоапертурные низкоэнергетичные потоки ионов с использованием импульсно-периодического наносекундного разряда с протяженным полым катодом в спектрально чистом неоне и аргоне [5].

Общий вид плазменного реактора и блок-схема широкоапертурного плазменного источника потоков низкоэнергетичных ионов представлены на рис.1. Для получения пучковой плазмы нами разработан газоразрядный источник ленточных электронных пучков на основе высоковольтного импульсно-периодического разряда наносекундной длительности с протяженным щелевым катодом [6]. Катод представляет собой цилиндрический стержень из алюминия длиной 5 см и диаметром 1.2 см, вдоль которой прорезана прямоугольная полость (щель) шириной 0.2 см, глубиной 0.6 см (рис.16). Анод удален от катода на расстояние 0.6 см и представляет собой плоскую пластину из алюминия с эмиссионным окном прямоугольного поперечного сечения 0.4×5 см, перекрытым мелкой вольфрамовой сеткой. Размер элементарной ячейки сетки составляет величину 0.5 × 0.5 мм, геометрическая прозрачность - 70%. Формируемый плазменным источником ленточный электронный пучок вытягивается ускоряющим напряжением на электроде, расположенном на расстоянии 0.5 см от сетки. Далее электронный пучок транспортируется на расстояние до 4 см в сторону коллектора, в результате чего формируется ионизованная область в виде «плазменного листа» площадью 5×4 см, выступающий в роли широкоапертурного эмиттера потоков низкоэнергетичных ионов на поверхность подложки. Такой плазменный источник ионных потоков подсоединялся к плазменному реактору, изготовленному из нержавеющей стали, через стандартный вакуумный фланец CF2,75.

В данной работе мы уделяем особое внимание оптимизации условий формирования ленточного электронного пучка с управляемыми характеристиками плотности и энергии электронов для получения широкоапертурного источника низкоэнергетичных ионных потоков. С этой целью в источнике электронных пучков налажена диагностика плотности электронов и возбужденных атомов плазмы, энергии и плотности ленточного пучка электронов, пространственной структуры разряда в источнике электронного пучка и в области формирования ионных потоков. Все измерения проводились в спектрально чистых неоне и аргоне. Массовый

состав остаточных газов в плазменном реакторе контролировался масс-спектрографом модели Extorr RGA-300M.



**Рисунок 1.** Общий вид плазменного реактора в разрезе (а), блок-схема широкоапертурного плазменного источника потоков низкоэнергетичных ионов (б) и характерный вид поперечного сечения оптического излучения из «плазменного листа» в неоне при давлении газа 0.8 Тор. (1 - протяженный щелевой катод, 2 - изоляторы, 3 - ускоряющий электрод, 4 - анод с эмиссионным окном, 5 - подложка, 6 - коллектор, 7 – «плазменный лист»).

Показано, что при исследованных условиях для неона и аргона доля пучковой составляющей электронной компоненты может составить до 10 процентов от общей плотности электронов плазмы. При этом, энергия

электронов в ленточном электронном пучке может регулироваться в диапазоне от 0.7 до 1.5 кэВ. Площадь относительно однородной поверхности эмиттера ионных потоков («плазменного листа») может составить до 15 см<sup>2</sup>. Энергия ионов пучка может регулироваться в области величин 1 эВ. С использованием результатов экспериментальных исследований разработана и исследована самосогласованная численная модель для данного плазменного источника ленточных электронных пучков [7-9].

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта Госзадания FZNZ-2020-0002.*

### **Литература:**

- [1] I. Adamovich, S. Agarwal, E. Ahedo, L. L. Alves, S. Baalrud, et al.. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55 (37), pp.373001.
- [2] Tahsin Faraz, Karsten Arts, Saurabh Karwa, Harm C M Knoops, Wilhelmus M M Kessels. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2019. 28 024002
- [3] S.G. Walton, D. R. Boris, S. G. Rosenberg, H. Miyazoe, E. A. Joseph, S. U. Engelmann. *Journal of Vacuum Science & Technology.* 2021. A 39, 033002
- [4] Chen Li, Valery Godyak, Thorsten Hofmann, Klaus Edinger, and Gottlieb S. Oehrlein *J. Vac. Sci. Technol.* 2020. A 38, 033001.
- [5] N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov Generation of high-energy electrons in the nanosecond gas discharges with a hollow cathode. *Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases vol 1*, ed V F Tarasenko. - New York: Nova Publishers, 2016. – P. 421.
- [6] Н.А.Ашурбеков, К.О.Иминов, М.З.Закарьяева, А.А.Муртазаева, Г.Ш.Шахсинов. Патент RU № 2722690 С1. Заявка 2019139000 от 29.11.2019. Оpubл. 03.06.2020, Бюл. №16.
- [7] N.A. Ashurbekov, K.O. Iminov, K. M. Rabadanov, G.S. Shakhshinov, M.Z. Zakaryayeva, and M.B. Kurbangadzhieva, *Plasma Science and Technology.* 2023, vol. 25, no. 3, p. 035405.
- [8] N.A. Ashurbekov, M.Z. Zakaryayeva, K.M. Rabadanov, K.O. Iminov, M.B. Kurbangadzhieva, and A.A. Kudryavtsev. *Phys. Plasmas.* 2022. 29, 123905.
- [9] N.A.Ashurbekov, M.Z.Zakaryayeva, K.O.Iminov, K.M.Rabadanov, and G. Sh. Shakhshinov. *High Temperature.* 2022, Vol. 60, No. 5, pp. 745–751.

nashurb@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ СЛОЕВ ГИБКИХ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСОВ

**К. С. Куликов<sup>1</sup>, Ю. А. Кенжебаева<sup>1</sup>, Миличко В.А.<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

*kirill.kuliko@gmail.com*

В последние несколько лет металл-органические каркасы (МОК), кристаллические пористые полимеры, состоящие из металлических ионов и органических лигандов, стали одной из быстроразвивающихся областей фотоники [1]. Гибкость структуры и способность обратимо и быстро изменять свои оптические свойства под воздействием внешних факторов (давление, температура, лазерное излучение) позволяют применять данные материалы в коммерческих устройствах обработки и хранения информации [2].

Однако использование МОК в качестве активного материала в современных устройствах ограничивается медленной скоростью структурных трансформаций и низкой структурной стабильностью. Тем не менее, данные проблемы могут быть преодолены с помощью оптимально подобранного гибкого МОК, который сможет обеспечить высокоэффективную и энергоэффективную работу устройства памяти. Кроме того, для потенциального применения МОК в качестве активного элемента в устройствах записи и обработки информации необходима оптимизация получаемых МОК до единичных тонких слоев для последующей миниатюризации устройств.

В данной работе сообщается о получении тонких слоев металл-органического каркаса методом механического расслаивания и в процессе разморозки-заморозки. Было установлено, что метод разморозки-заморозки оказался более перспективным для создания тонких слоев МОК. Особое внимание уделялось выбору оптимальных растворителей для процесса расслаивания, что повышает качество получения тонких слоев МОК. Характеризация полученных слоев была проведена с помощью атомно-силового микроскопа Aist SmartSPM: Были получены слои высотой меньше 100 нм и длиной порядка 10-50 мкм.

Результаты работы демонстрируют перспективный характер единичных слоев МОК с динамической структурой для использования в устройствах записи и обработки информации.

### **Литература:**

[1] Furukawa H. et al., *Angew. chem. int. ed.*, Т. 54, №11, (2015)

[2] Knebel A. et al., *Science*, Т. 358, №6361, (2017)

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ СИЛ МЕЖЧАСТИЧНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЮКАВА СИСТЕМЫ ПРИ ПОМОЩИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Р. А. Хабибуллин<sup>1</sup>, А. В. Мокшин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия*

Несмотря на то, что методы атомистического/молекулярного моделирования были предложены более полувека назад и с тех пор активно используются для решения самых разных задач в физике, химии, материаловедении, биологии и медицине, до сих пор существует ряд проблем, значительно ограничивающих применимость этих методов. И одна из таких проблем — существенный разрыв в пространственных и временных масштабах между моделированием и экспериментом для ряда наблюдаемых процессов и явлений в конденсированных неупорядоченных системах. Так, например, типичная величина шага интегрирования уравнений движения в методе молекулярной динамики составляет несколько фемтосекунд, в то время как для исследования процессов кристаллизации и переохлаждения может потребоваться выполнить моделирование на интервалах времени порядка нескольких микро или миллисекунд, что в общем случае являются недоступным для молекулярно-динамического моделирования.

К настоящему времени для решения этой проблемы было предложено множество методов моделирования «с улучшенной выборкой» (enhanced-sampling molecular dynamics), большинство из которых можно разделить на две группы. Ключевая идея методов первой группы (метадинамика [1], variationally enhanced sampling [2]) состоит в использовании так называемых коллективных переменных (collective variables, CVs) — функций координат частиц, описывающих коллективное поведение атомов или молекул в системе и медленно изменяющихся с течением времени. Сложность использования этих методов заключается в необходимости корректного определения коллективных переменных. Отличительной особенностью методов второй группы (REMD [3], ITS [4]), напротив, является отсутствие зависимости от коллективных переменных. Например, в методе REMD (Replica-exchange molecular dynamics) предполагается одновременное моделирование нескольких «реplik» системы с разными температурами.

Далее, в определенные моменты времени реплики могут обмениваться координатами и импульсами частиц, что обеспечивает более эффективную выборку конформаций и термодинамических состояний в системе.

Достичь больших временных или пространственных масштабов в молекулярно-динамическом моделировании можно также путем оптимизации наиболее вычислительно затратной процедуры — расчета сил взаимодействия частиц. Такие известные алгоритмы, как список Верле, список ячеек, суммирование по Эвальду для случая электростатического взаимодействия, позволяют уменьшить количество пар частиц, для которых необходимо вычислять силы взаимодействия, и тем самым снижают вычислительную сложность МД моделирования. В данной работе предлагается оригинальный метод ускорения расчета сил межчастичного взаимодействия в молекулярной динамике. Основная идея метода состоит в том, чтобы рассчитывать на основе потенциала взаимодействия лишь небольшую часть от общего числа взаимодействий в системе. Окончательные значения сил межчастичного взаимодействия восстанавливаются при помощи процедур машинного обучения. Такой подход позволяет увеличить производительность моделирования в несколько раз без существенной потери в точности. Применимость метода исследуется на примере многочастичной конденсированной системы, в которой межчастичное взаимодействие задается потенциалом Юкавы.

*Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет-2030». Крупномасштабные молекулярно-динамические расчеты выполнены на вычислительном кластере Казанского федерального университета.*

#### **Литература:**

- [1] Laio A., Parrinello M. Escaping free-energy minima // Proceedings of the national academy of sciences. – 2002. – Т. 99. – №. 20. – С. 12562-12566.
- [2] Valsson O., Parrinello M. Variational approach to enhanced sampling and free energy calculations // Physical review letters. – 2014. – Т. 113. – №. 9. – С. 090601.
- [3] Sugita Y., Okamoto Y. Replica-exchange molecular dynamics method for protein folding // Chemical physics letters. – 1999. – Т. 314. – №. 1-2. – С. 141-151.
- [4] Gao Y. Q. An integrate-over-temperature approach for enhanced sampling // The Journal of chemical physics. – 2008. – Т. 128. – №. 6.

roman.khabibullin@outlook.com

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ТОКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ С ВОДНОРАСТВОРНЫМИ КАТОДАМИ

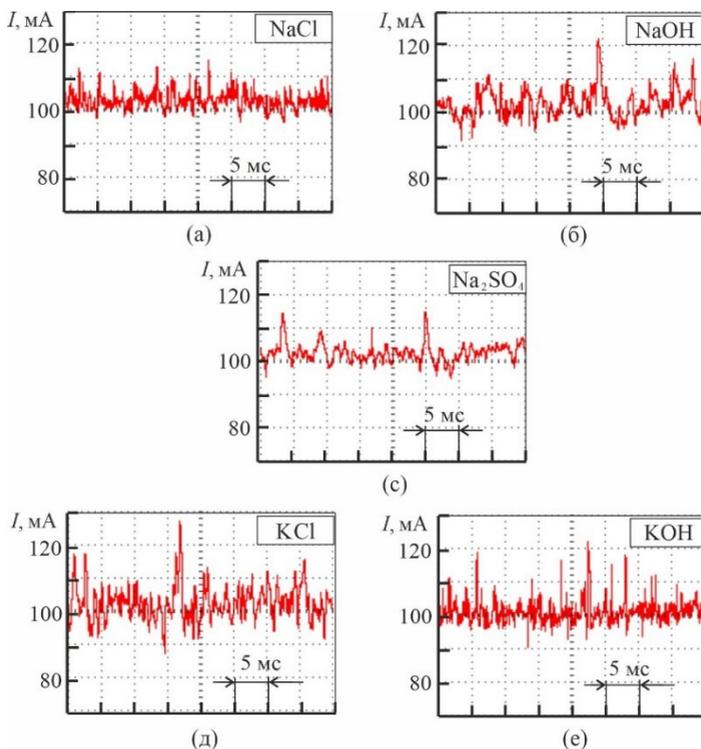
**Х. К. Тазмеев<sup>1</sup>, А. Х. Тазмеев<sup>1</sup>, Г. Х. Тазмеев<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Набережные Челны, Россия*

В последние годы исследование электрических разрядов, происходящих в контакте с жидкостями, стало значимым направлением в физике газоразрядной плазмы. Существенные успехи достигнуты в изучении электрических разрядов, которые зажигаются между жидкостным катодом и металлическим анодом. В частности, накоплено значительное количество экспериментальных данных о том, что оптические и электрические свойства плазмы во многом определяются химическим составом и концентрацией водных растворов, используемых в качестве катодов. Тем самым экспериментально подтвержден перенос компонентов растворенного вещества из жидкостного катода в плазму. Однако нет полной ясности в механизме такого массопереноса. Одним из вариантов рассматривается капельный перенос, т.е. перенос вещества из жидкой фазы в газовую в виде мелких капелек. Реализация капельного переноса подтверждается в опытах. Авторами работы [1] осуществлена визуализация капелек при использовании водного раствора хлорида натрия в качестве катода. Целью данной работы явилось изучение влияния капельного переноса на образование мелкомасштабных пульсаций тока.

Исследования были проведены в диапазоне токов 50-100 мА. Анод был выполнен из вольфрамового стержня с диаметром 3 мм. Межэлектродное расстояние менялось в пределах 1-12 мм. Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель. Пульсации выходного напряжения сглаживались П-образным индукционно-емкостным фильтром. Номинальное значение тока измерялось стрелочным прибором типа М 2015 класса точности 0,2. Осциллограммы тока регистрировались цифровым осциллографом АК ИП-15/1 (полоса пропускания 25 МГц) при помощи шунта 10 Ом. В качестве жидкого электролитного катода были использованы водные растворы NaCl, KCl, NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CuSO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub> и HCl с концентрациями 0.10-0.5, моль/л. Подробное описание экспериментальной установки приведено в работе [2].

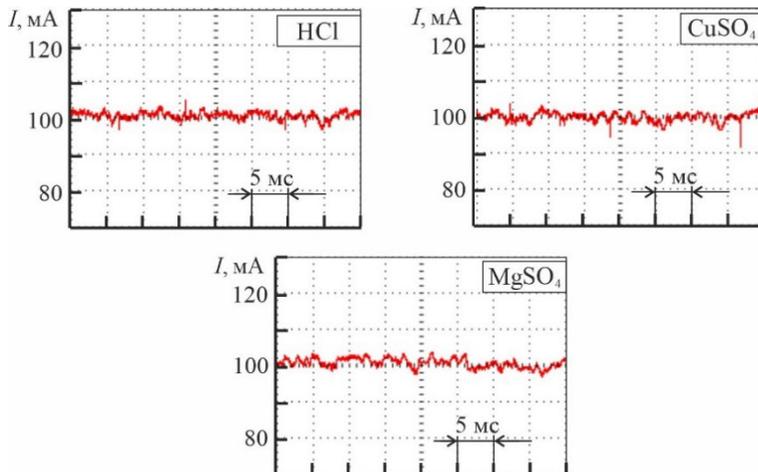
На рис. 1 и 2 представлены осциллограммы тока, полученные при использовании различных водных растворов в качестве катода. Все осциллограммы зарегистрированы при одном и том же номинальном значении тока (100 мА) и при одинаковых межэлектродных расстояниях (5 мм). Молярные концентрации водных растворов также одинаковые (0.2 моль/л).



**Рисунок 1.** Пульсации тока. Катоды – водные растворы химических соединений щелочных металлов: натрия (а, б, с) и калия (д, е).

Пульсации возникали в тех случаях, когда использовались водные растворы щелочей и солей щелочных металлов. Они были достаточно интенсивные. Максимальные отклонения тока составляли 20 % и более от номинального значения (рис.1 б, д, е). Образование пульсаций тока свидетельствует о быстротечном изменении количества заряженных частиц в разрядной области. Туда поступают электронейтральные капельки водного раствора.

Они подвергаются тепловому воздействию и разрушаются. При этом высвобождаются катионы и анионы, содержащиеся в составе капелек. Их участие в создании электрического тока приводит к образованию пульсаций.



**Рисунок 2.** Осциллограммы тока. Катоды – водные растворы, в составе которых отсутствуют ионы щелочных металлов.

В тех случаях, когда в качестве катода использовались водные растворы, не содержащие ионы щелочных металлов, пульсации тока были незначительные (рис. 2). Из анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что щелочные металлы, содержащиеся в составе растворенного вещества, играют важную роль в распылении воднорастворимого катода в виде мелких капелек.

При повышении тока, а также при увеличении концентрации водного раствора регистрировались более сглаженные осциллограммы тока. Такая картина объясняется тем, что частота пульсаций увеличивается и одиночные пульсации накладываются друг на друга. Ещё одна закономерность была обнаружена при изменении межэлектродного расстояния. В диапазоне 1-3 мм пульсации были незначительными.

### Литература:

- [1] Shirai N. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. P. 025007
- [2] Тазмеев Г.Х. и др. // Прикладная физика. 2023. № 3. С. 33-38.

tazmeevh@mail.ru

## САМООРГАНИЗАЦИЯ ЧАСТИЦ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА В ЭТАНОЛЕ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ОСАЖДЕНИИ.

**И. В. Моряков<sup>1</sup>, З. А. Заклецкий<sup>1</sup>, Д. В. Малахов<sup>1</sup>, А. М. Анпилов<sup>1</sup>, А. С. Конькова<sup>1</sup>, С. В. Кузнецов<sup>1</sup>, Н. Г. Борисенко<sup>2</sup>, Н. Г. Гусейн-заде<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, г Москва, Россия*

*igor\_miw@mail.ru*

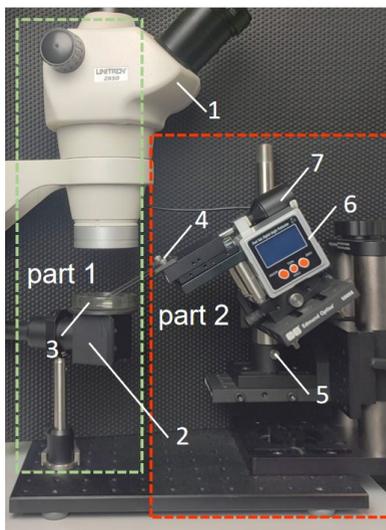
В последнее десятилетие было проведено множество работ, в которых исследовался процесс самоорганизации физических, химических и биологических систем [1] с целью дальнейшего практического применения полученных результатов. В частности, развитие такой междисциплинарной области как нанотехнологии привело к необходимости комплексно использовать подходы физики, химии и прикладного материаловедения при исследовании механизмов самоорганизации открытых диссипативных систем. Самоорганизация – сложнейший многостадийный процесс, в который вовлечены гидрофобные и гидрофильные взаимодействия, кулоновские и Ван-дер-Ваальсовы силы и пр. Получение наноструктур путем самоорганизации, индуцированной испарением – одно из важнейших направлений при испарении многокомпонентных коллоидных растворов [2-5].

Примером самоорганизации является представленный в данной работе процесс диффузного испарение коллоидного раствора нанокремнекислота в этаноле на поверхности предметного стекла. Испаряющийся на поверхности стекла коллоидный раствор нанокремнекислота в этаноле является системой, в которой происходит обмен энергией и веществом с окружающей средой. При этом при некоторых критических значениях параметров системы происходит ее спонтанный переход из неупорядоченного состояния (коллоидный раствор) в упорядоченное (наноструктурированная пленка на поверхности стекла).

Коллоидный раствор был получен при помощи высоковольтного кольцевого импульсного многоискрового разряда в этаноле с инъекцией

газа в межэлектродное пространство. Подробно описание разрядной камеры, методики получения коллоидного раствора, а также его параметры приведены в работах [6-8].

Результаты исследований по самоорганизации частиц коллоидного раствора особенно востребованы при получении алмазоподобных углеродных (diamond like carbon, DLC) покрытий и пленок. Данные покрытия ранее применялись для решения широкого спектра прикладных задач: при создании антибактериальных покрытий [6], в СВЧ-технике для снижения вторичной электронной эмиссии [7, 8] и при получении алмазных покрытий плазмохимическим способом [9]. Одна из проблем, возникающих при получении DLC покрытий, состоит в том, чтобы добиться высокой степени их однородности и адгезии, особенно при толщинах  $\sim 1$  мкм.



**Рисунок 1.** Экспериментальный стенд для вытягивания под углом плёнок из коллоидного раствора

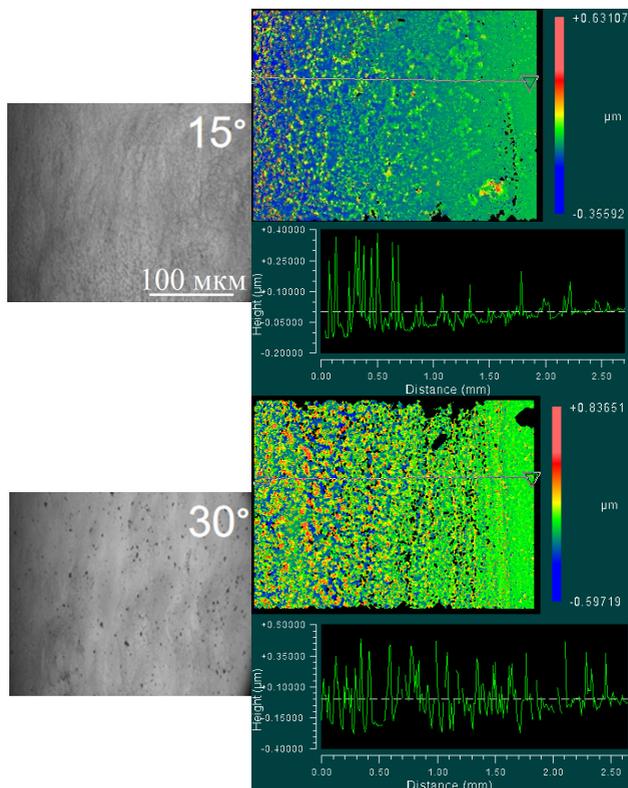
- 1 - оптический микроскоп, 2 - предметный столик,
- 3 - объем коллоидного раствора,
- 4 - держатель для подложки,
- 5 - оптомеханическая подставка,
- 6 - измеритель углов, 7 - шаговый двигатель

Для ускорения процесса самоорганизации плёнки был использован метод механического вытягивания: подложка с определённой скоростью вертикально поднималась из коллоидного раствора.

На рисунке 1 представлен собранный экспериментальный стенд для осаждения коллоидных частиц. Стенд можно разделить на два характерных блока: первый отвечает за систему визуализации осаждения, второй блок обеспечивает вытягивание подложки из жидкости под требуемыми углом и скоростью.

Блок 1 состоял из системы визуализации на основе оптического микроскопа с большим полем зрения. Объем ёмкости с коллоидным раствором составлял 20 мл. Второй блок состоял из оптомеханических компонентов, объединенных в общую

конструкцию, позволяющую поднимать держатель для подложек на различную высоту и угол от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . В экспериментах по вытягиванию предметных стёкол угол варьировался от  $15^\circ$  до  $60^\circ$  и скорость от 2 мкм/с до 20 мкм/с.



**Рисунок 2.** Типичные изображения наноструктурированной пленки на поверхности предметного стекла, полученной при разных углах (слева), с профилометра и профиль поверхности (справа).

Изображения микроструктурированной тонкой плёнки на поверхности стекла, полученные при скорости вытягивания 2 мкм/с, представлены на рис. 2.. Профиль поверхности измерялся при помощи профилометра ZYGO new view 6000. Было установлено, что на качество покрытия существенное влияние оказывает как угол вытягивания, так и скорость. Было показано, что при углах  $15^\circ$  и меньше образуется неоднородная по толщине микронная

пленка, состоящая из наноразмерных слоев углеродных частиц. При увеличении угла до  $30^\circ$  пленка становится неоднородной, поверхность состоит из островковых слоев наночастиц и крупных агломератов. При дальнейшем увеличении угла, вместо однородной плёнки возникает квазипериодическая структура из полос микрослоев наночастиц, при этом не происходит образование агломератов частиц.

При увеличении скорости вытягивания в 10 раз картина распределения частиц на поверхности подложки кардинально изменяется. Для угла  $15^\circ$  на предметном стекле образуется микроструктурированная нанослойная плёнка с участками агломератов наночастиц, которые, так же как и для случая с меньшей скоростью и углом  $30^\circ$ , распределены по поверхности случайно. При этом для угла  $30^\circ$  при увеличенной скорости образование агломератов уже не наблюдается, вместо этого на поверхности можно обнаружить квазипериодические слои наночастиц, близкие по структуре к случаю  $45^\circ$  и скорости 1 мкс/см. При углах  $45^\circ$  и более и скорости 20 мкс/см или при углах  $60^\circ$  и более и скорости 2 мкс/см в оптическом микроскопе не обнаружена какая-либо плёнка.

Было обнаружено, что одним из ключевых факторов для роста однородной бездефектной плёнки является форма мениска, которая наибольшим образом зависит от угла наклона подложки и скорости вытягивания.

Для коллоидного раствора углерода в этаноле определена зависимость морфологии наноструктурированной плёнки от угла наклона и скорости вытягивания, тем самым в дальнейших экспериментах может быть получено контролируемое покрытие методом вертикального осаждения с необходимым углом и скоростью осаждения, но уже для подложек большей площади.

#### **Литература:**

- [1] Лебедев-Степанов П.В и др. Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. № 3-4. С. 5-23.
- [2] Lu Y. et all. Nature, 398 (1999), pp. 223-226.
- [3] C.J. Brinker et all. Adv. Mater., 11 (1999), pp. 579-585
- [4] Kim H. et all. Phys. Rev. Lett., 116 (2016), p. 124501
- [5] Parsa M. et all. Nanopart. Res., 19 (2017), p. 268
- [6] Barkhudarov, E.M. et all Nanomaterials. 2020. Vol. 10. № 2130. P. 1-12.
- [7] Anpilov, A.M. et all. Applied Physics. 2014. № 4. P. 11-15.
- [8] Anpilov, A.M. et all. Journal of Physics: Conf. Series. 2019. № 1328. 012052.
- [9] Anpilov A.M. et al// 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1094 012030.

## МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИПРОПИЛЕНА СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДУГОЙ

С.Д. Дондуков<sup>1</sup>, К.А. Демин<sup>2</sup>, С.С. Агнаев<sup>1</sup>, А.Л. Петров<sup>1</sup>, А.Н. Хаглеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Российская Федерация

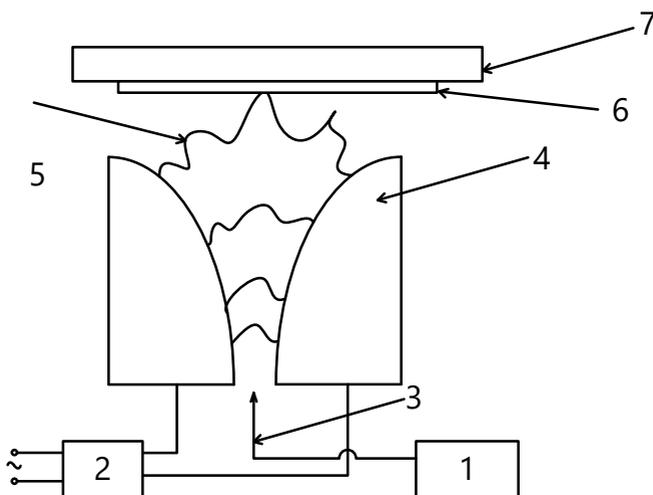
**Аннотация.** В работе приведены данные о применении плазмы скользящей дуги для улучшения адгезионных свойств поверхности полипропилена, как следствие – возможность более эффективно наносить различные покрытия расширяющие его применение. После модификации поверхности полипропилена были получены данные, свидетельствующие об увеличении адгезионных свойств, подобран оптимальный режим работы.

**Введение.** Полипропилен (ПП) благодаря своим свойствам получил широкий спектр применения в различных отраслях приборостроения, авиастроения и автомобилестроения, строительстве и медицине. Для расширения возможности использования ПП применяют модифицирование его поверхности с целью увеличения адгезионных свойств. Известно [1-2], что низкотемпературная плазма является одним из способов увеличения поверхностной энергии полимеров и уменьшения краевого угла смачивания ( $\theta$ ), улучшения гидрофильности и адгезии, при этом не влияя на структуру ПП, что позволяет сочетать прочность с высокой адгезией. В отличие от химической модификации [3] данный способ является более экологичным и экономичным. Так как при химической модификации требуется утилизировать отработанные реагенты и применять дополнительные меры безопасности.

**Объекты и методы исследования.** В качестве объекта исследования был выбран ПП ГОСТ 26996-86 толщиной – 20 мкм. Для оценки угла  $\theta$  был выбран метод лежащей капли, заключающийся в измерении угла между плоскостью поверхности и жидкости. Исследование краевого угла ПП было осуществлено с помощью цифрового микроскопа DM и программного обеспечения Tour View. Оценку адгезионной способности поверхности ПП, исходного и модифицированного скользящего дугой, проводили путём

расчёта работы адгезии на основе полученных значений краевого угла смачивания по уравнению Дюпре-Юнга, описанной в работе [4].

Модификация ПП осуществлялась на разработанной плазменной установке (ПУ) [5]. Для создания разряда скользящей дуги в корпус ПУ из компрессора, направляется поток воздуха, обтекающий электроды и создающий плазменный поток, продвигаемый в направлении модифицируемой поверхности ПП. Образцы ПП закреплялись на стеклянной подложке, модификацию проводили непосредственно в плазме скользящей дуги, под углом  $90^\circ$  относительно электродов на расстоянии 15 мм (рисунок 1.)



**Рисунок 1.** Принципиальная схема плазменной установки: 1 – воздушный компрессор; 2 – импульсный высокочастотный генератор; 3 – поток воздуха; 4 – алюминиевые электроды; 5 – скользящая дуга; 6 – образец полипропилена; 7 – стеклянная подложка.

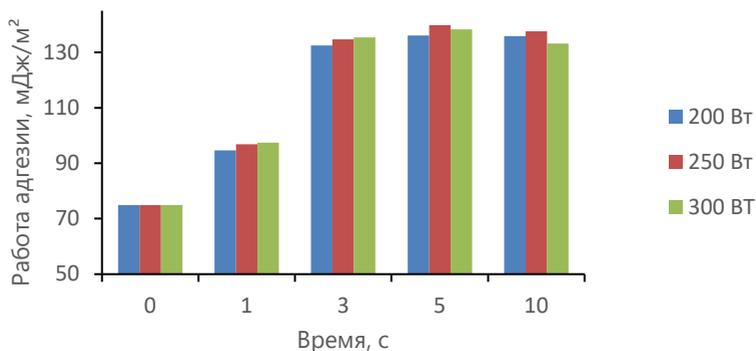
**Результаты и их обсуждение.** По результатам проведенного исследования получены данные, представленные в таблице 1, из которых видно, что при увеличении времени модификации и мощности потребляемой ПУ, снижаются значения краевых углов смачивания. Такой эффект достигается благодаря образованию на поверхности ПП различных функциональных групп и активных центров, позволяющих улучшить адгезионные свойства поверхности.

Время, с	Краевой угол смачивания по воде, $\theta^\circ$		
	200 Вт	250 Вт	300 Вт
Исходный	91-93		
1	72-74	70-72	70-72
3	33-35	30-32	30-32
5	28-30	22-24	23-25
10	29-31	27-29	31-33

**Таблица 1.** Влияние времени модификации на значения краевого угла полипропилена

Следует отметить, что при модификации менее 3 с не замечено существенного снижения краевого угла смачивания, при увеличении времени модификации до 10 с наблюдается снижение эффективности модификации, а значения краевого угла смачивания достигают минимума. Максимальный эффект модификации был достигнут при потребляемой мощности ПУ 250 Вт и времени обработки 5 с.

Анализ полученных данных, из графиков на рисунке 2, показал, что процесс уменьшения краевого угла смачивания и увеличения работы адгезии протекало экспоненциально. При модификации в течение 1 с, значительного прироста работы адгезии не происходит, при дальнейшем увеличении времени модификации наблюдается рост значений работы адгезии, но при достижении 10 с происходит уменьшение значения работы адгезии. Такое падение связано с увеличением влияния термического воздействия скользящей дуги.



**Рисунок 2.** Влияние времени модификации и мощности на работу адгезии

Также данные рисунка 2 свидетельствуют факту, что при увеличении мощности ПУ увеличивается работа адгезии. Однако при достижении потребляемой мощности ПУ 300 Вт наблюдается признаки термической деформации. Исходя из вышеперечисленных фактов оптимальным режимом модификации является потребление ПУ 250 Вт и временем модификации 5 с. При данных параметрах значения работы адгезии достигают максимума, а тепловое воздействие плазмы недостаточно, чтобы проявились признаки термической деформации.

### **Литература:**

- [1] Рыбкин, В. В. Низкотемпературная плазма как инструмент модификации поверхности полимерных материалов / В. В. Рыбкин // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6, № 3. – С. 58-63. – EDN QBSWZH.
- [2] Смирнов Б. М. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2017); <https://old.bigenc.ru/physics/text/2267532> Дата обращения: 26.11.2023
- [3] Способ химической модификации полипропилена / Н. А. Рахимова, Ю. А. Зимица, В. С. Авилова, Д. К. Еренков // Инновационная наука. – 2016. – № 12-4. – С. 64-65. – EDN XETVDJ.
- [4] Модификация адгезионных свойств полимерных пленок обработкой коронным разрядом / В. В. Ананьев, Т. Н. Перетокин, Г. Е. Заиков, С. Ю. Софьина // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 5. – С. 116-119. – EDN RZAZWF.
- [5] Патент № 2781708 С1 Российская Федерация, МПК В29С 71/00, Н01J 37/00. Установка для модификации поверхности полимерных пленок в низкотемпературной плазме скользящего разряда атмосферного давления : № 2022107494 : заявл. 22.03.2022 : опубл. 17.10.2022 / А. Н. Хаглеев, К. А. Демин, М. А. Мокеев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления". – EDN DVYCAS.

dondukov.s@yandex.ru

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНТРАКЦИИ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА В ГЕЛИИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

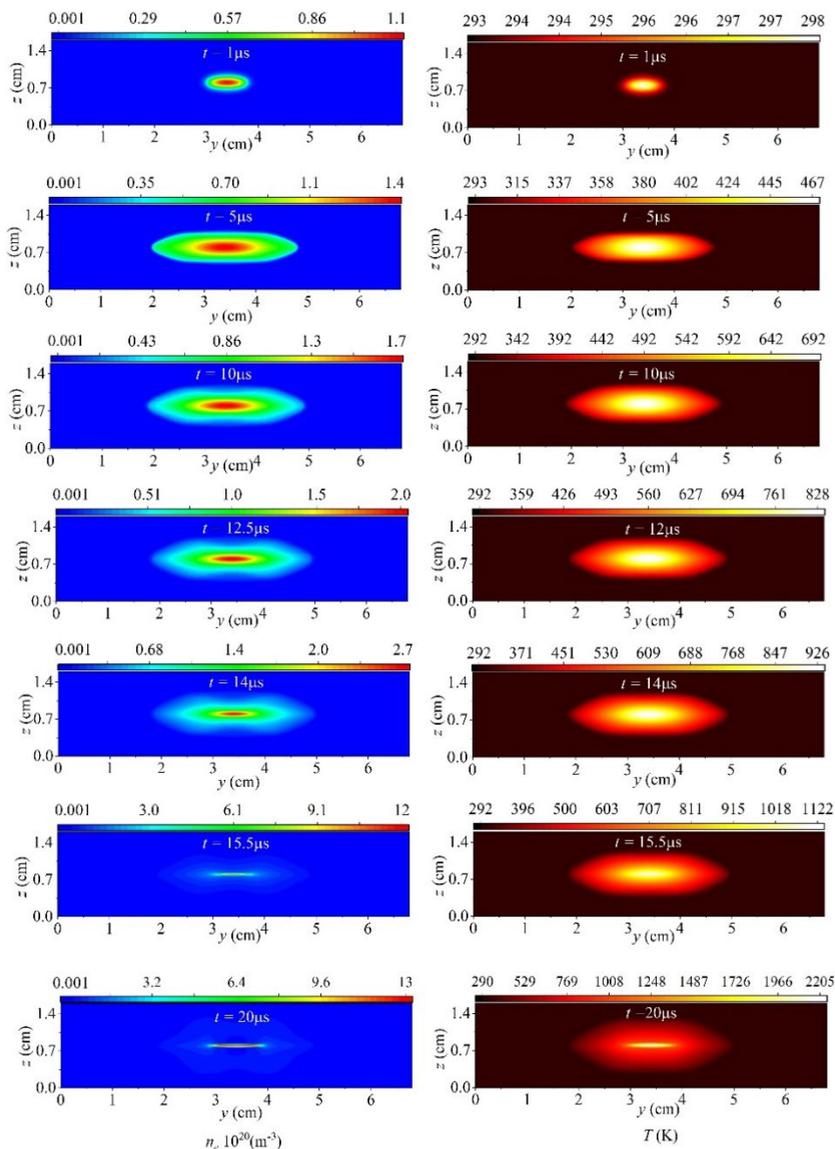
**А.А Сайфутдинова<sup>1</sup>, А.Р. Мардеев<sup>1</sup>, А.А. Галиев<sup>1</sup>, А.И. Сайфутдинов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

Несмотря на постоянный интерес исследователей и значительный прогресс в исследовании микроволновых разрядов остается много открытых проблем. Экспериментальные исследования показали, что микроволновые разряды в свободном пространстве могут быть реализованы в двух основных формах: диффузной форме при низком давлении и форме стримера при высоком давлении и сравнительно высокой вкладываемой мощности в разряд [24-29, 30, 31]. Физические механизмы, ответственные за создание разряда в этих формах, принципиально различны, и их особенности также различны. Поскольку частота передачи импульса в столкновениях между электроном и нейтральной частицей пропорциональна давлению и при низких значениях последней мала, то диффузный разряд практически не поглощает микроволновую энергию. Стримерный же разряд характеризуется высокоэнергетическим взаимодействием с падающей СВЧ электромагнитной волной [31].

В представленной работе сформулирована самосогласованная физико-математическая модель СВЧ-разряда в гелии. Модель основана на расширенном гидродинамическом описании плазмы и включает в себя уравнение Гельмгольца для описания внешней СВЧ электромагнитной волны, балансовые уравнения для концентраций заряженных и возбужденных частиц, уравнение баланса для плотности энергии электронов, уравнение Пуассона для описания самосогласованного электрического поля в плазме. Кроме того, система уравнений дополнена уравнением баланса энергии для тяжелой компоненты плазмы и уравнениями Навье-Стокса. Численные расчеты были проведены для разряда при высоких давлениях от 100 до 760 Торр для СВЧ электромагнитной волны частотой 7.5 ГГц.

Для разряда при атмосферном давлении было показано формирование трех основных стадий в динамике разряда: СВЧ пробой, вытягивание СВЧ плазмоида, при котором на начальных временах наблюдается диффузная форма, а на конечных временах второй стадии наблюдается промежуточная форма диффузная форма с контрагированной центральной областью.



**Рисунок 1.** Распределения концентрации электронов и температуры газа в различные моменты времени

На третьей стадии наблюдается контрагированный (или филаментированный) режим. Представлены пространственные распределения концентраций заряженных и возбужденных частиц, а также температуры электронов и температуры газа в различные моменты времени. Показано, что значительный нагрев в области разряда наблюдается в контрагированном режиме.

Дополнительно был проведен анализ на выполнение законов подобия при давлениях 300 Торр и 100 Торр. Было показано, что не все соотношения подобия выполняются. Так, если соотношение  $pL = \text{const}$  показало достаточно хорошее совпадение, то такой параметр как  $n/t$  показал значительные отклонения от соблюдения законов подобия. В частности, при уменьшении давления в 2.5 раза, длина плазмоида увеличивается практически в 2.5 раза. При этом время вытягивания плазмоида увеличивается в 10 раз, а время, при котором разряд переходит из диффузной формы в контрагированную ~6.7 раз. Связано это в первую очередь с различным нагревом газа при различных давлениях, а также с недопустимостью возможности масштабирования таких элементарных процессов, как ступенчатая ионизация, Пеннинговская ионизация, излучение, конверсия в эксимеры и ионная конверсия реакции рекомбинации. Поэтому при исследовании СВЧ-разрядов при высоких давлениях, когда необходимо учитывать различный спектр элементарных процессов необходимо с особой аккуратностью подходить к использованию законов подобия и для каждого конкретного случая необходимо проводить численный расчет.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00276 <https://rscf.ru/project/23-21-00276/>.*

#### **Литература:**

- [1] Сайфутдинов А. И. и др. Динамика сфокусированного импульсного микроволнового разряда в воздухе // Физика плазмы. – 2019. – Т. 45. – №. 6. – С. 568-576.
- [2] Saifutdinov A.I., Kustova E.V. Dynamics of plasma formation and gas heating in a focused-microwave discharge in nitrogen // Journal of Applied Physics. – 2021. – Vol. 129. – no. 2. – 023301 1-15.

aliya\_2007@list.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРОСТОЙКОСТИ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ TiAl ПОКРЫТИЙ НА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОМ СПЛАВЕ ВТИ4

**К. Н. Рамазанов<sup>1</sup>, А. Ю. Назаров<sup>1</sup>, А. А. Николаев<sup>1</sup>, А. А. Маслов<sup>1</sup>,  
А. Р. Хаиткулов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>УУНиТ, Уфа, Россия

Интерметаллические сплавы на основе орто фазы  $Ti_2AlNb$  сочетают низкую плотность с высоким удельным пределом текучести и хорошими свойствами ползучести вплоть до высоких температур [1]. Данные сплавы приобретают все большее техническое значение для лопаток реактивных двигателей в качестве потенциальной замены тяжелых суперсплавов на основе никеля [2]. Рабочая температура данных сплавов составляет 600–650 °С (кратковременно 700 °С), что обусловлено образованием оксидов титана при дальнейшем нагреве, которые нарушают сплошность пленки из оксида  $Al_2O_3$ , что приводит к стремительному окислению [3].

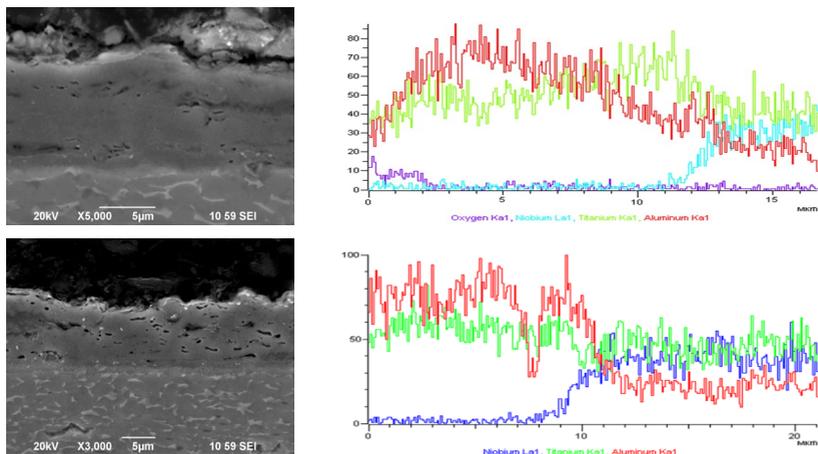
Нанесение жаростойких покрытий на основе интерметаллических соединений является одним из перспективных методов защиты от окисления при повышенных температур [4]. Среди интерметаллических соединений системы Ti-Al наибольшей жаростойкостью обладает фаза  $TiAl_3$ . Однако его применение ограничено ввиду практически нулевой пластичности при комнатной температуре. Данную проблему можно решить путем подбора архитектуры покрытия, при которой не будет происходить его разрушение.

В настоящей работе исследовали влияние архитектуры интерметаллидного покрытия системы Ti-Al на жаростойкость орто сплава ВТИ4.

Осаждение покрытий Ti-Al проводилось с двух электродуговых испарителей (катодов из титана и алюминия соответственно) на установке ННВ-6,1-И1 при давлении в камере  $4 \cdot 10^{-3}$  мбар, постоянном потенциале смещения на подложке 180 В и при различных токах на дуговых испарителях для титана и алюминия соответственно. Осаждение покрытий проводилось при ассистировании процессу плазмогенератором "ПИНК" с подачей аргона. Покрытие наносилось по трем технологиям, включающим в себя напыление покрытия с содержанием Ti:Al 1:1 (условное обозначение  $TiAl1$ ), покрытие с

содержанием Ti:Al 1:2 (TiAl<sub>2</sub>) и градиентное покрытие с плавным наращиванием содержания алюминия (TiAl<sub>3</sub>).

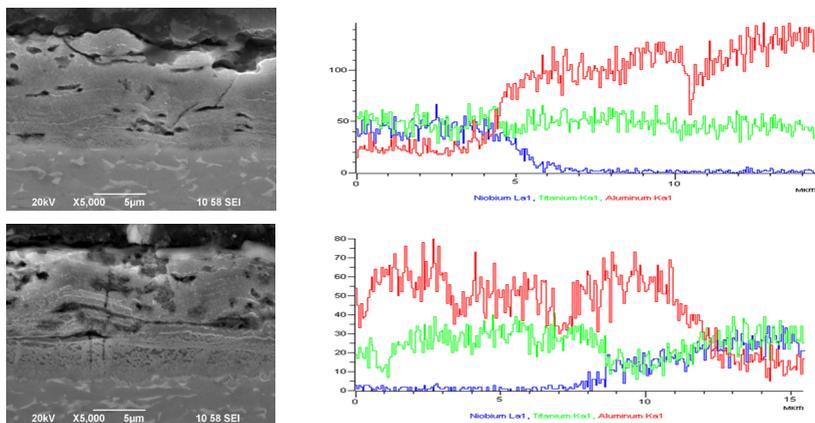
Анализ изображений после отжига в атмосфере (рисунок 1) показал, что слоистая структура в покрытии исчезает, что обусловлено диффузией слоев алюминия и титана. После 200 часов отжига (рисунок 1 а,б) в покрытии не наблюдаются слои оксидов, которые на РЭМ изображениях характеризуются повышенной яркостью ввиду накопления заряда. Элементный анализ по сечению покрытия показывает, что на поверхности пониженное содержание алюминия, что вероятно связано с образованием оксида алюминия и его возможного скалывания при подготовке шлифов. После 500 часов отжига произошло уменьшение толщины покрытия, что связано со скалыванием окисленных слоев, на что указывает волнистый рельеф поверхности и распределение элементов по сечению покрытия. Исходная структура сплава сохраняется при этом увеличение диффузионной зоны не наблюдается.



**Рисунок 1.** СЭМ изображения покрытия TiAl<sub>1</sub> после отжига при температуре 700 °С в течении: а,б – 200 ч, в,г – 500 ч; а,в –РЭМ снимки, б,г – распределение элементов в данном покрытии.

Характер окисления покрытия с повышенным содержанием алюминия схож с покрытием с эквипотным содержанием титана и алюминия. Однако отличительной особенностью является то, что после 500 часов испытаний толщина покрытия сохранилась. Такое поведение по всей видимости обусловлено отличием в элементном и как следствие фазовом составе. Большое количество алюминия в покрытии обеспечивает формирование

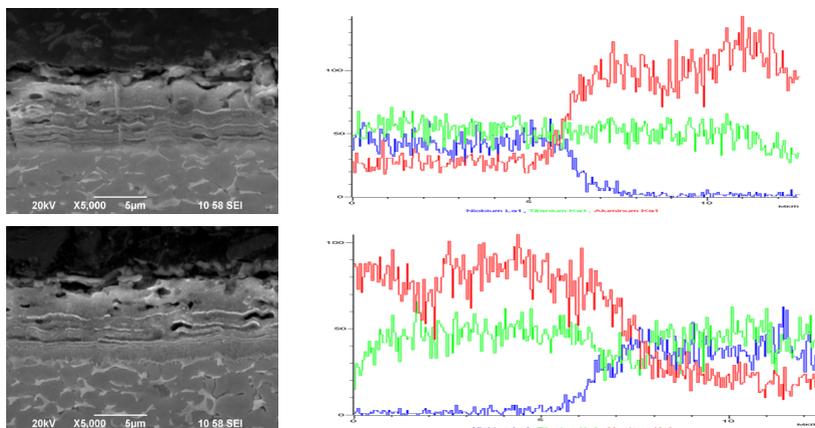
двух жаростойких фаз интерметаллида  $TiAl_3$  и при окислении его сплошной пленки  $Al_2O_3$ . Однако, при этом покрытие становится более хрупким ввиду низкой пластичности фазы  $TiAl_3$  на что указывает образование трещин и участков отслоения.



**Рисунок 2.** РЭМ изображения покрытия  $TiAl_2$  после отжига при температуре  $700\text{ }^\circ\text{C}$  в течении: а,б – 200 ч, в,г – 500 ч; а,в – РЭМ снимки, б,г – распределение элементов в данном покрытии.

Для сохранения пластичности без снижения жаростойкости можно использовать градиентные покрытия. Создав градиент алюминия от поверхности вглубь покрытия, можно сформировать верхние жаростойкие слои с внутренними пластичными. Испытания таких градиентных покрытий (рисунок 2) показало, что после отжига при  $700^\circ\text{C}$  происходит гомогенизация элементного состава, а характер его распределения схож с покрытием  $TiAl_2$ . При этом в покрытии не наблюдаются трещины и сколы что обусловлено его исходным градиентным строением.

В данной работе покрытие системы Ti-Al было получено по трем различным технологиям, которые отличались распределением титана и алюминия по сечению покрытия. Толщина покрытий составляла порядка 8 мкм. Результаты испытаний на жаростойкость при  $700\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 500 часов показали, что наилучшей жаростойкостью обладает покрытие с градиентным распределением алюминия от поверхности к основе.



**Рисунок 3.** РЭМ изображения покрытия TiAl<sub>3</sub> после отжига при температуре 700 °С в течении: а,б – 200 ч, в,г –500 ч; а,в – РЭМ снимки, б,г – распределение элементов в данном покрытии.

#### **Благодарности:**

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 22-29-01463.

#### **Литература:**

- [1] Development of Ti<sub>2</sub>AlNb Alloys: Opportunities and Challenges // Advanced Materials and Processes. 2014. P. 23–27.
- [2] Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 186–194.
- [3] Шубин И.Ю., Никитин Я.Ю., Пучков Ю.А., Алексеев Е.Б., Давыдова Е.А. ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ И СОЛЕВОЙ КОРРОЗИИ ЖАРОПРОЧНОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТИ-4 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2020. №6 (135).
- [4] 8. Huang J. et al. Long-term oxidation behavior of silicon-aluminizing coating with an in-situ formed Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> diffusion barrier on γ-TiAl alloy //Applied Surface Science. – 2022. – Т. 582. – С. 152444.

alanfrutis4@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЬЕЗОМОДУЛЯ (D33) ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ МАГНЕТРОННОГО ФОРМИРОВАНИЯ

**А. Ю. Куклев<sup>1, 2</sup>, В. И. Струнин<sup>1, 3</sup>, А. Г. Козлов<sup>1, 4</sup>, Л. В. Баранова<sup>1, 3</sup>, Н. А. Давлеткильдеев<sup>3, 5</sup>, Н. А. Чириков<sup>1, 2</sup>, А. Н. Байдаков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИРФЭ ОНЦ СО РАН, Омск, РФ

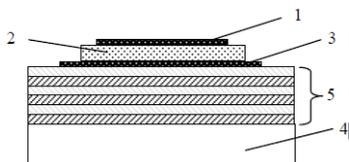
<sup>2</sup>АО "ОНИИП", Омск, РФ

<sup>3</sup>ОмГУ им. Ф. М. Достоевского, Омск, РФ

<sup>4</sup>ОмГТУ, Омск, РФ

<sup>5</sup>ОНЦ СО РАН, Омск, РФ

В настоящее время актуальной задачей является создание тонкопленочного резонатора на объемных акустических волнах с Брэгговским отражателем [1]. Слои отражателя должны обладать разными показателями акустического импеданса и близкими значениями скорости распространения продольной акустической волны. Конструкция данного устройства состоит из ситалловой подложки (СТ-50), на которую формируется многослойная структура Брэгговского отражателя, обеспечивающая акустическую изоляцию электроакустического преобразователя с нижним и верхним электродом от подложки. В качестве пьезоэлектрика предлагается использовать пленки нитрида алюминия, сформированные методом реактивного вакуумного магнетронного распыления алюминиевой мишени, в плазме постоянного газового разряда в среде аргона и азота.

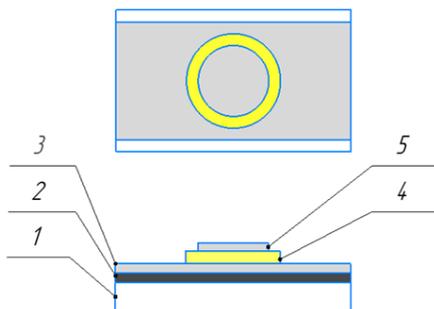


**Рисунок 1.** Конструкция резонатора с акустическим Брэгговским отражателем [1]: 1 – верхний электрод; 2 – пьезоэлектрическая пленка; 3 – нижний электрод; 4 – подложка; 5 – слои Брэгговского отражателя.

В данной работе слои Брэгговского отражателя выполняются из пар слоёв алюминия (Al) и молибдена (Mo). Данные материалы обладают различным значением акустического импеданса и просты в получении методом магнетронного формирования [3]. Поэтому основной интерес обусловлен характеристиками пленок AlN сформированных на слоях Al и Mo.

Целью данной работы является исследование зависимости продольного пьезомодуля  $d_{33}$  от технологических режимов формирования и материала зародышевого слоя.

В качестве экспериментальных образцов исследуются слои AlN сформированные на слоях Al и Mo, на ситалловых подложках. В качестве адгезионного слоя на подложку напылялся тонкий (20 нм) слой ванадия. Топология структур представлена на рис. 1.



**Рисунок 2.** Топология образцов:

- 1 – ситалл; 2 – ванадий; 3 – алюминий (молибден); 4 – нитрид алюминия;  
5 – алюминий (молибден).

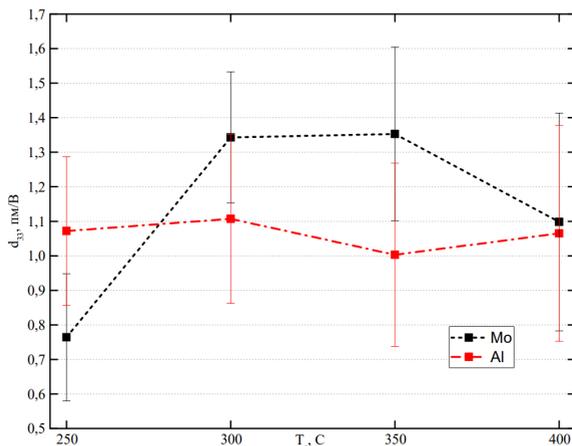
В качестве способа контроля получаемых пленок использовался метод сканирующей силовой микроскопии пьезоотклика (ССМП). Данный метод основывается на явлении обратного пьезоэффекта. В данном случае электрод микроскопа контактирует с металлическим слоем пленочной структуры, а кантилевер с поверхностью пленки AlN. При подаче переменного электрического поля на пленку AlN, происходит пьезоэлектрическая деформация образца, что в свою очередь, получается зафиксировать как изменение амплитудного контраста поверхностного слоя исследуемого образца. В нескольких точках определяются значения амплитуды и добротности пьезоотклика, что позволяет определить значение пьезомодуля в выбранной точке.

Исследования проводились в двух режимах измерения сигнала пьезоотклика: одночастотный и режим Dual AC Resonance Tracking (DART) [4]. Результаты измерений сведены в таблицу 1.

**Таблица 1.** Зависимость пьезомодуля от температуры подложки

Образец	Подслой	Температура подложки, °C	Толщина, мкм	$\langle d_{33} \rangle$ , пм/В	$\Delta d_{33}$ , пм/В
№ 208	V-Mo	250	0,64	0,764	0,184
	V-Al			1,072	0,215
№ 209	V-Mo	300	0,62	1,343	0,190
	V-Al			1,107	0,245
№ 211	V-Mo	350	0,60	1,353	0,251
	V-Al			1,003	0,266
№ 212	V-Mo	400	0,54	1,098	0,315
	V-Al			1,065	0,312

Исходя из данных представленных в таблице можно определить оптимальную температуру подложки для формирования слоя нитрида алюминия – 300–350 °C. Зависимость пьезомодуля от температуры подложки представлена на рис. 3.



**Рисунок 3.** Зависимости  $d_{33}$  от температуры подложки и материала зародышевого слоя

На графике зависимости можно наблюдать, что пленки, сформированные на подслое Mo обладают большими значениями пьезомодуля чем пленки сформированные на подслое Al. Это вероятно связано с малым коэффициентом несовпадения решеток AlN и Mo, а также схожими коэффициентами линейного температурного расширения [5].

Таким образом, можно прийти к выводу о том, что слои Mo наиболее приемлемы в качестве электродов электроакустического преобразователя на основе пьезоэлектрических пленок AlN.

Полученные результаты имеют практическую значимость при изготовлении тонкопленочных микроэлектронных резонаторов.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-12-20010)».*

### **Литература:**

- [1] Струнин В. И., Чириков Н. А. Механические напряжения в пленках нитрида алюминия, сформированных методом магнетронного распыления. IV International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update" 17-19 March 2020. Omsk, Russia
- [2] Давлеткильдеев Н. А., Мосур Е. Ю., Никифорова А. О. Изучение пьезоэлектрических свойств ниобата лития методом сканирующей силовой микроскопии пьезоотклика // Техника радиосвязи. 2022. Выпуск 4 (55). С. 83–90.
- [3] Танская Т. Н., Зима В. Н., Козлов А. Г. Сравнительный анализ технологии изготовления и характеристик тонкопленочных СВЧ резонаторов на OAB // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы VI Общерос. науч.-техн. конф. / ОмГТУ. Омск, 2016. С. 355–367.
- [4] Proksch R. In-situ piezoresponse force microscopy cantilever mode shape profiling // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 118. P. 072011.
- [5] Lee, J.-B., Jung, J.-P., Lee, M.-H., & Park, J.-S. (2004). Effects of bottom electrodes on the orientation of AlN films and the frequency responses of resonators in AlN-based FBARs. Thin Solid Films, 447-448, 610–614. DOI: 10.1016/j.tsf.2003.07.023

alexanderkuklev@mail.ru

## ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 35ХГСЛ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОДОМ ИЗ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ ERCUSN-C

**Н. А. Панькин<sup>1</sup>, В. А. Никишин<sup>1</sup>, С. В. Ильин<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева", Саранск, Россия*

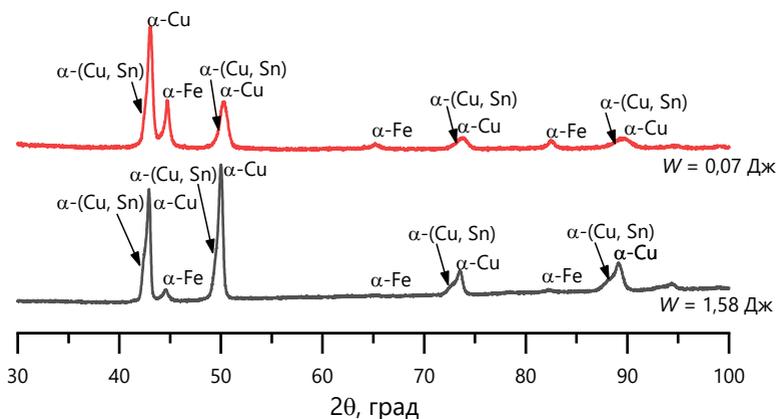
Метод электроискровой обработки/легирования (ЭИО) широко применяется при модификации поверхности проводящих материалов и восстановлении эксплуатационных характеристик после различного рода износа [1]. При его реализации происходит униполярный перенос вещества между электродами (преимущественно с анода на катод) при электроискровом импульсном разряде. При этом в качестве катода, чаще всего, служит обрабатываемая деталь, а анодом – электрод из расходоуемого материала. Состав, структура и свойства будущего слоя определяются параметрами работы установки и состоянием электродов.

Целью настоящей работы являлось исследование фазового состава поверхностного слоя стали 35ХГСЛ после электроискровой обработки электродом из оловянной бронзы ERCuSn-C.

В качестве катода взяты плоские образцы изготовленные из стали 35ХГСЛ. В качестве анода использовали проволоку из оловянной бронзы ERCuSn-C по стандарту AWS A5.7-84. Электроискровая обработка проводилась в ручном режиме на установке Alier-31 при энергиях  $W$  одиночного импульса 0,07 Дж и 1,58 Дж. Частота вибрации электрода-анода составляла 100 Гц при коэффициенте амплитуды равном 1,0.

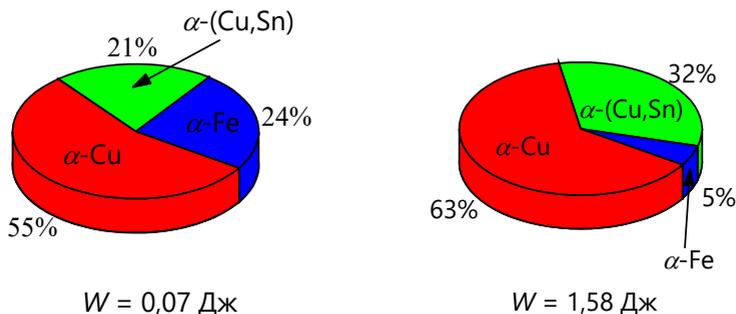
Исследования фазового состава поверхностного слоя проводили на рентгеновском дифрактометре «Empyrean PANalytical» в медном фильтрованном излучении.

Участки рентгенограмм от стали 35ХГСЛ после ЭИО бронзовым электродом представлены на рисунке 1. Их анализ указывает на наличие кристаллографических фаз  $\alpha$ -Fe, меди и  $\alpha$ -(Cu; Sn) - твердого раствора олова в меди. Линии от  $\alpha$ -(Cu; Sn) расположены (по брегговскому углу) близко к рефлексам от меди и сдвинуты в область малых углов. Данный факт связан, прежде всего, с внедрением атомов олова в октаэдрические и тетраэдрические пустоты кристаллической решетки меди с увеличением её постоянных.



**Рисунок 1.** Участки рентгеновской дифракционной картины поверхностного слоя стали 35ХГСЛ после ЭИО электродом из бронзы ERСuSn-С.

На рисунке 2 показаны доли вышеуказанных фаз в поверхностном слое стали 35ХГСЛ после электроискровой обработки электродом-анодом из оловянной бронзы ERСuSn-С. Можно отметить, что повышение энергии одиночного импульса  $W$  при электроискровой обработке приводит к существенному снижению доли фазы  $\alpha$ -Fe в поверхностном слое. Данный факт связан с формированием на поверхности стали покрытия из оловянной бронзы. Его толщина увеличивается с ростом значений  $W$ . Соотношение между долями фаз  $\alpha$ -Cu и  $\alpha$ -(Cu, Sn) остается примерно одинаковым (отличаются приблизительно в 2 раза).



**Рисунок 2.** Доли фаз в поверхностном слое стали 35ХГСЛ после электроискровой обработки электродом из оловянной бронзы

Результаты эмиссионного спектрального анализа указывают на достаточно высокие температуры в межэлектродной области исследования при использовании электрода из оловянной бронзы – порядка 11000 К [2, 3]. Вследствие этого, возможно испарение олова и меди. На это указывают их температуры кипения - 2620 °С и 2570 °С, соответственно для Cu и Sn. Они значительно меньше соответствующих значений температур в межэлектродном промежутке.

Отмечается более сильное разделение (по брегговскому углу) линий кристаллографических фаз меди и  $\alpha$  - (Cu; Sn) по мере повышения энергии электроискровой обработки. Данные различия, скорее всего, обусловлены изменением напряженного состояния в зернах соответствующих фаз. Детальный его анализ затруднен из-за сильного перекрытия линий соответствующих фаз. Кроме того, вышеуказанный факт возможно связан с интенсификацией внедрения в кристаллическую решетку элементов атмосферы (прежде всего азота и кислорода) - обработка проводилась в воздушной среде. В рамках рентгенографических исследований дифракционные линии оксидов металлов не выявлены. Анализ соотношения интенсивностей для каждой из выявленных фаз указывает на отсутствие преимущественной ориентации роста соответствующих кристаллитов в ходе электроискровой обработки.

### **Литература:**

- [1] Верхотуров А.Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования. Владивосток: Дальнаука, 1992, 180 с.
- [2] Панькин Н.А., Ильин С.В. Оптическая спектроскопия межэлектродного промежутка электроискровой обработке стали вольфрамом и оловянной бронзой // Прикладная физика. 2023. №4. С. 100-106.
- [3] Бураков В.С., Невар Е.А., Неделько М.И., Савостенко Н.А., Тарасенко Н.В. Спектроскопическая диагностика плазмы электрического разряда в жидкости // Журнал прикладной спектроскопии. 2009. Т. 76. № 6. С. 907-914.

panjkinna@yandex.ru

## ДИНАМИКА ПРОТЯЖЕННЫХ РАЗРЯДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОДОМ И ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРОВОДЯЩЕГО РАСТВОРА

**N. Chen<sup>1</sup>, L. Miao<sup>1</sup>, A. M. Астафьев<sup>2</sup>, А. А. Кудрявцев<sup>1</sup>, А. С. Чирцов<sup>2</sup>,  
С. Yuan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Harbin Institute of technology, Harbin, China*

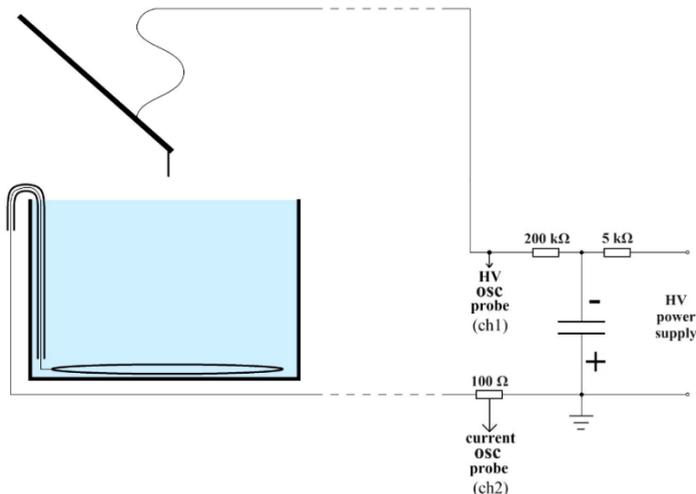
<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*

В последние десятилетия активно исследуются различные типы разрядов, когда один или оба электрода являются проводящей жидкостью. Такое повышенное внимание к изучению разрядов с жидкими электродами обусловлено большими перспективами их использования в актуальных в настоящее время различных приложениях. Например, эти разряды могут быть использованы при очистке сточных вод, а также для дезинфекции жидкостей или влажных поверхностей [1, 2]. Помимо практического применения, такие разряды представляют самостоятельный интерес для исследований. Описанный более двадцати лет назад импульсный симметричный разряд [3], при котором возникают долгоживущие светящиеся образования до настоящего времени широко исследуется различными научными группами по всему миру [4, 5].

В настоящее время описаны и изучены различные типы разрядов с жидкостями. Однако помимо стационарных разрядов, также актуально исследование возникающих неустойчивостей в разрядах с жидкими электродами. В данной работе исследуются неустойчивости протяженных разрядов постоянного тока между тонким проводом и поверхностью жидкости. Для зажигания разряда была собрана система, которая показана на рисунке 1. В качестве одного из электродов разрядной системы использовался акриловый сосуд диаметром 300 мм и высотой 300 мм, который был заполнен дистиллированной водой или насыщенным раствором пищевой соды с высокой электропроводностью. Другой электрод представлял собой медную проволоку диаметром 1,5 мм, которая была закреплена на длинном диэлектрическом стержне. Разряд зажигался путем поднесения медного электрода к поверхности жидкости, при этом ток

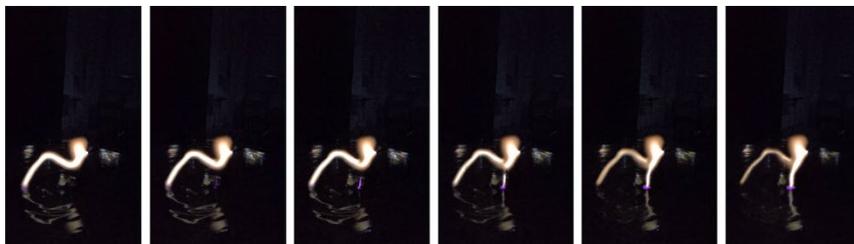
разряда не превышал 100 мА. Достаточно большое значение напряжения питания (до 15 кВ) позволяло растянуть канал разряда примерно до 15 см.

Для изучения режимов разряда с жидким анодом и жидким катодом можно было переключать полярность жидкого и металлического электродов. Видеосъемка разряда производилась камерой Sony FDR-AX700 с разной скоростью съемки.



**Рисунок 1.** Схема экспериментальной установки

При достаточно длинном разрядном канале разряд начинал перемещаться по поверхности жидкого электрода, при этом характер движения сильно зависел от полярности. Было обнаружено, что в случае, когда проводящий раствор являлся анодом, анодное пятно начинало быстро удаляться от своего первоначального положения по поверхности раствора по мере увеличения разрядного промежутка. При сильном удалении анодного пятна от своего исходного положения и, соответственно, значительном увеличении канала разряда появлялись катодонаправленные вторичные пробои (рисунок 2). Особенностью этих пробоев состояла в том, что для их возникновения требовалось примерно в 10 раз меньшая напряженность поля, чем для первоначального пробоя. Время формирования вторичных пробоев составляло несколько миллисекунд. Такие вторичные пробои возникали не только с поверхности проводящего раствора, но также и между отдельными частями искривленного канала разряда, которые также являлись катодонаправленными (рисунок 3).

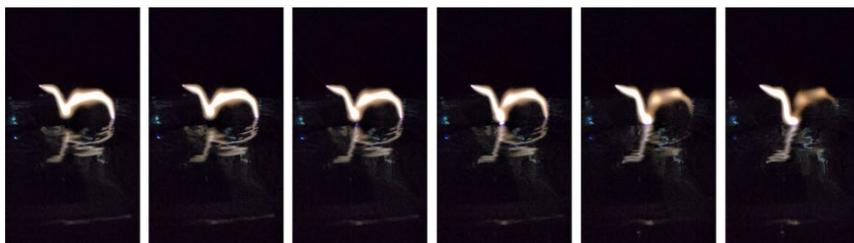


**Рисунок 2.** Неустойчивость разряда с жидким анодом (интервал между изображениями 1 мс)



**Рисунок 3.** Пробои между отдельными частями изогнутого канала разряда с жидким анодом (интервал между изображениями 1 мс)

При противоположной полярности, когда поверхность проводящего раствора являлась катодом, таких вторичных пробоев между медным электродом и поверхностью воды не возникало. В этом случае по мере увеличения разрядного промежутка плазменный канал притягивался к поверхности проводящего раствора с последующим образованием нового плазменного канала (рисунок 4).



**Рисунок 4.** Неустойчивость разряда с жидким катодом (интервал между изображениями 1 мс)

Такое отличие динамики канала разряда с жидким анодом и жидким катодом, по-видимому, связано с наличием нескомпенсированного положительного заряда в канале разряда. Это обстоятельство может быть существенным, например, при изучении вихревых процессов, возникающих при формировании долгоживущих образований импульсного симметричного разряда [6, 7].

### **Литература:**

- [1] X. Wang, Z. Li, J. Zeng, X. Zhang, L. Lei, "Improvement of Atmospheric Water Surface Discharge with Water Resistive Barrier," *Plasma Chem Plasma Process*, vol. 33, p. 691-705, 2013, <https://doi.org/10.1007/s11090-013-9453-9>.
- [2] J. Foster, B. S. Sommers, S. N. Gucker, I. M. Blankson and G. Adamovsky, "Perspectives on the Interaction of Plasmas With Liquid Water for Water Purification," in *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 40, no. 5, pp. 1311-1323, May 2012, doi: 10.1109/TPS.2011.2180028.
- [3] G. D. Shabanov, "The optical properties of long-lived luminous formations," *Tech. Phys. Lett.*, vol. 28, no. 2, pp. 164–166, Feb. 2002, doi: 10.1134/1.1458524.
- [4] V. Stelmashuk and P. Hoffer, "Experimental Study of a Long-Living Plasmoid Using High-Speed Filming," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 12, pp. 3160–3165, Dec. 2017, doi: 10.1109/TPS.2017.2770224.
- [5] R. Friedl, U. Fantz, I. Pilottek, D. Schmid, and S. Steibel, "Spatio-temporal structure and emission of a large plasmoid in atmosphere," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 54, no. 9, p. 095205, Mar. 2021, doi: 10.1088/1361-6463/abc918.
- [6] V. L. Bychkov, S. V. Anpilov, and N. P. Savenkova, "Gas dynamics modeling of a plasmoid created by the Gatchina discharge," *Russ. J. Phys. Chem. B*, vol. 8, no. 1, pp. 50–55, Jan. 2014, doi: 10.1134/S1990793114010102.
- [7] V. L. Bychkov, S. V. Anpilov, N. P. Savenkova, V. Stelmashuk, and P. Hoffer, "On modeling of 'plasmoid' created by electric discharge," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 996, p. 012012, Mar. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/996/1/012012.

astafev-aleksandr@yandex.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ СВАРКИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

**Э. Б. Мирзаянова<sup>1</sup>, Д. Р. Акулова<sup>1</sup>, И. Т. Фахрутдинова<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия*

Исследования электрических разрядов с использованием жидких и твердых электродов представляют собой одно из наиболее быстроразвивающихся направлений науки [1]. Данный тип разряда возникает при подаче постоянного или переменного тока между электродами, где один или оба из которых могут быть проточной или не проточной жидкостью. В качестве жидкого электрода, обычно, используется раствор солей различной концентрации в технической, дистиллированной или водопроводной воде. В данной работе была рассмотрена возможность сварки двух предварительно обработанных образцов из меди. По результатам эксперимента получены данные, которые доказывают большой потенциал практического применения электрических разрядов.

Источник питания для предварительной обработки и сварки двух изделий – это устройство, способное обеспечить необходимую мощность для возможности производства сварочных работ. Для контроля процесса сварки необходимо использовать амперметр и вольтметр. Амперметр позволяет измерять силу тока, что является важным параметром для обеспечения правильной предварительной обработки и сварочной работы. Вольтметр позволяет измерять напряжение, которое создается при сварочном процессе, что также имеет большое значение для правильной и точной практики сварки. Данный источник питания для обработки и сварки двух изделий обладает достаточной мощностью и соответствует требованиям безопасности и производительности [2].

Сварка изделий происходит при помощи двух электродов: один жидкий - электролит, который имеет положительный потенциал, а второй – обрабатываемая поверхность, к которой подключен отрицательный потенциал.

Показания напряжения в процессе сварки не изменялись, тогда как сила тока колебалась в диапазоне от 50 до 100 А. Также нужно отметить то, что при предварительной обработке изделий, сварка может успешно проходить при показаниях силы тока и напряжение меньшими, чем при сварке двух необработанных изделий.

Полученный сварной шов крепче, чем при сварке неочищенных образцов. Так как предварительно произошла закалка деталей. Если в процессе сварки произошла закалка, то шов становится еще более твердым и прочным. В результате, такой сварной шов обладает высокой устойчивостью к механическим нагрузкам и сохраняет свою прочность на протяжении долгого времени. Таким образом, сварной шов с закалкой является надежным соединительным элементом в различных областях, где требуется высокая прочность и долговечность соединения.

Преимущества данного сварного шва заключаются в том, что при создании такого сварного шва происходит закалка металла, что обеспечивает создание твердого и прочного шва. Такой шов имеет более высокую стойкость к механическим и термическим воздействиям, чем при сварке необработанных образцов. Более того, сварка электрическими разрядами может быть выполнена на разных типах металлов и имеет возможность прочно соединить элементы различных толщин и размеров.

Полученные данные эксперимента и проверки сварного шва позволяют сказать, что одним из главных преимуществ сварки очищенных деталей из меди является получение твердого сварного шва. Это обусловлено тем, что при очистке деталей от оксидов, жира и других загрязнителей удаляются все примеси, которые могут негативно сказаться на качестве сварного шва. Кроме того, после сварки очищенных деталей из меди, шов проходит закалку, что существенно увеличивает его прочность и устойчивость к механическим воздействиям. В результате сварка очищенных деталей из меди обеспечивает более качественный и долговечный результат, чем сварка неочищенных деталей.

Применение электрических разрядов в сварочном процессе медных образцов позволяет получать качественное сварное соединение с высокой прочностью и надежностью, что является важным для промышленности.

### **Литература:**

- [1] Фахрутдинова И.Т. Некоторые особенности развития электрического разряда между струйным анодом и жидким катодом // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 2. С. 306-309.
- [2] Фахрутдинова И.Т. Об особенностях электрического разряда между струйным анодом и металлическим катодом // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 6. С. 775-777.

tagiirina@mail.ru

## СРАВНЕНИЕ 1D И 2D МОДЕЛЕЙ ПЛАЗМЫ МИКРОРАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ГЕЛИИ

**Ch. Chen<sup>1</sup>, Zh. Chen<sup>1</sup>, К. М. Рабаданов<sup>1,2</sup>, А. А. Кудрявцев<sup>1</sup>, Ch. Yuan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Харбинский Политехнический Университет, Харбин, Китай*

<sup>2</sup>*Дагестанский Государственный Университет, Махачкала, Россия*

Научный и практический интерес к микроразрядам при атмосферном давлении во многом определяется тем обстоятельством, что для их реализации не требуется дорогостоящего оборудования и они просты в конструкции. Среди множества видов микроразрядов при атмосферном давлении особое место занимают разряды в чистом гелии или в смесях в гелием, поскольку такие разряды наиболее стабильны. И к настоящему времени разработаны и используются на практике множество различных численных моделей микроразрядов в гелии при высоком давлении [1-7]. В основном это различные модификации флюид модели, как одномерные [3, 4, 6, 7] так и двумерные [1, 8]. В модификациях флюид модели транспортные и кинетические коэффициенты электронов вычисляются как функции от электронной температуры  $T_e$ , а не как зависимости от локального значения электрического поля. При этом  $T_e$  рассчитывается из уравнения баланса энергии электронов. В работе [9] обосновали правомерность использования наиболее распространенных модификаций флюид модели тлеющих разрядов.

В данный момент также продолжают попытки усовершенствовать флюид модели. Одной из таких работ является [7], где рассматривается одномерная модель тлеющего разряда постоянного тока при атмосферном давлении в гелии. В данной работе в флюид модели был учтен нагрев газа и проанализировано влияние нагрева газа на характеристики разряда. Было показано, что эффект нагрева газа становится более заметным с увеличением токов разряда. Отметим, что во всех описанных выше работах рассматриваются одномерные модели, и что одномерные модели не учитывают дополнительный гибель частиц на стенках. В данной ситуации возникает необходимость рассмотреть двумерную модель и сопоставить результаты 2D модели с результатами 1D модели.

Таким образом, целью данной работы является 2D моделирование микроразрядной камеры в гелии с учетом всех доступных в настоящее время

плазмохимических реакций при атмосферном давлении для гелия. Сравнение полученных результатов с результатами моделирования одномерной модели.

При моделировании в данной работе использовалась модифицированная флюид модель, которая использовалась в работах [6, 7]. Подробное описание данной модели можно найти в работах [7, 10, 11], здесь лишь отметим, что в данной модели чтобы учесть нелокальные эффекты транспортные и кинетические коэффициенты электронов вычисляются на основе решения кинетического уравнения Больцмана не в зависимости от локального значения электрического поля, а как функции от электронной температуры  $T_e$ .

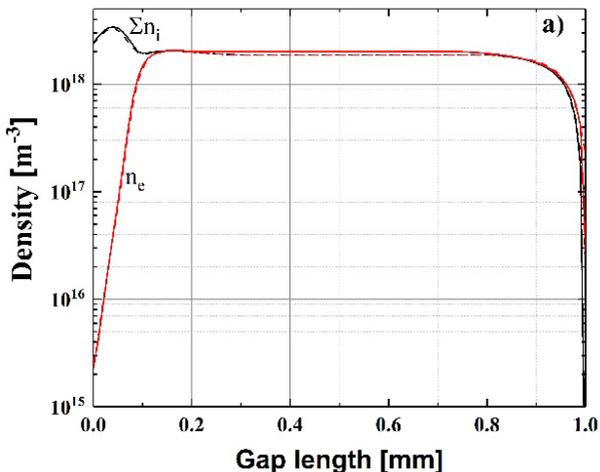
Расчеты в данной работе были проведены по следующей последовательности: 1) Сначала для верификации данной модели были проведены расчеты в одномерной конфигурации с учетом плазмохимических реакций из работ [6, 7] и сравнение полученных результатов с результатами из работы [7]; 2) Далее проведены расчеты в двумерной конфигурации с учетом тех же плазмохимических реакций из работ [6, 7] и сравнение результатов с результатами из 1D расчета.

В качестве основы для нашей модели мы выбрали простую конструкцию с типичными размерами разрядной камеры [4, 6, 7], где расстояние между электродами устанавливался равным 1.0мм [7]. В случае двумерного моделирования длина электродов составляла 1.0мм а толщина – 0.63мм . Площадь поперечного сечения электродов составляла 0,006 см<sup>2</sup> и плотность тока  $j = 0.318\text{A}/\text{cm}^2$  как в работе [7]. Набор реакций для данного этапа моделирования выбирался точно такой же как в работах [6, 7]. Здесь отметим, что в работе [7] в реакции 40 допущена опечатка.

Для одномерного случая были проведены расчеты для выбранной конструкции разрядной камеры. Ниже на рисунке 1 приведено сравнение результатов полученных в данной работе с результатами из работы [7]. Так на рисунке 1а приведена плотность электронов и ионов. Из рисунков данного сравнения видно, что результаты из данной работы очень хорошо согласуются с результатами из работы [7], что дает нам основание утверждать, что данная модель дает правильные результаты и его можно использовать для проведения дальнейших расчетов.

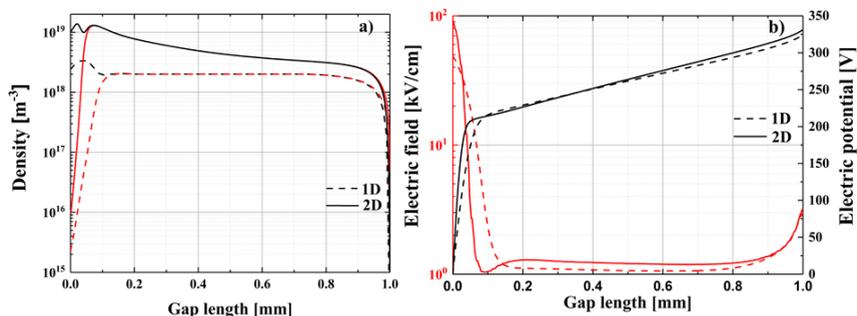
После верификации данной модели мы приступили к построению двумерной модели с той же плазмохимией, которая использовалась в 1D

моделировании. Для двумерной модели расстояние между электродами составлял 1мм как и в случае одномерной модели, длина электродов составлял 1мм, а толщину - 0,63мм. Плотность тока в данном случае также была равна  $j = 0.318\text{A} / \text{cm}^2$ .



**Рисунок 1.** Сравнение результатов моделирования из данной работы (сплошные) с результатами из работы [7] (пунктирные)

На рисунке 2 приведено сравнение результатов одномерного и двумерного моделирования с одинаковой плазмохимией и одинаковыми параметрами разрядной камеры. Так на рисунке 2а приведена плотность электронов и ионов, на рисунке 2б – электрическое поле и потенциал. Из рисунка 1а видно, что 2D моделирование дает большую электронную и ионную плотность, особенно в катодной области результаты 2D моделирования отличаются на порядок. Как видно, из рисунка 2б причиной такого отличия является то, что электрическое поле при 2D моделировании в катодной области получается в два раза больше чем при 1D моделировании. Также из рисунка 2б видно, что при 2D моделировании в катодной области наблюдаются две точки обращения поля в отличие от случая 1D моделирования.



**Рисунок 2.** Сравнение результатов 1D (пунктирные) и 2D (сплошные) моделирования.

### Литература:

- [1] G. J. M. Hagelaar, G. M. W. Kroesen, U. van Slooten, H. Schreuders, *J. Appl. Phys.* 2000, 88 (5), 2252–2262.
- [2] P. Hartmann, K. Kutasi and Z. Donko, XXVIIth ICPIG, Eindhoven, the Netherlands, 18–22 July, 2005.
- [3] Y. B. Golubovskii, V. Maiorov, J. Behnke, and J. Behnke, *J. Phys. D*, 36, 39 (2002).
- [4] Q. Wang, D. J. Economou, and V. M. Donnelly, *J. Appl. Phys.* 100, 023301 (2006).
- [5] T. Martens, A. Bogaerts, W. J. M. Brok and J. J. A. M. van der Mullen, *J. Anal. At. Spectrom.*, 2007, 22, 1033–1042.
- [6] E. Bogdanov, K. Kapustin, A. Kudryavtsev, and A. Chirtsov, *Tech. Phys.* 55, 1430–1442, (2010).
- [7] Rafatov Ismail, Gubad Islamov, Ender Eylenceoglu, Cihan Yesil, and Eugeny Bogdanov, *Phys. Plasmas* 30, 093504, 2023.
- [8] P. S. Kothnur and L. L. Raja, *J. Appl. Phys.* 97, 043305, 2005.
- [9] Hagelaar J.M., Pitchford L.C. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005. Vol. 14. P. 722–733.
- [10] Boeuf J.P., Pitchford L.C. // *Phys. Rev. E.* 1995. Vol. 51. P. 1376–13790.
- [11] Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A., Arslanbekov R.R. // *Contrib. Plasma Phys.* 2006. Vol. 46. N 10. P. 807–816.

kurbanbagama91@mail.ru

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ВЧИ И СВЧ-РАЗРЯДОВ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ С ПРИМЕСЯМИ В МИНИАТЮРНЫХ ТРУБКАХ

**А.А. Сайфутдинова<sup>1</sup>, А.Р. Мардеев<sup>1</sup>, Т.Х. Байханов<sup>1</sup>, А.И. Сайфутдинов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

В работе на основе расширенного гидродинамического описания плазмы были сформулированы самосогласованные модели высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда и сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда [1,2]. Модели были основаны на уравнениях Максвелла, которые для ВЧИ-разряда записывались в калибровке Лоренца, а для СВЧ-разряда были сведены к уравнению Гельмгольца. Кроме того, модели включали уравнения неразрывности для заряженных и возбужденных частиц, уравнение Пуассона для описания самосогласованного поля в плазме, систему уравнений Навье-Стокса, а также уравнения баланса плотности энергии для электронов и для тяжелой компоненты плазмы [1,2]. Численные расчеты были проведены для разрядов в цилиндрической трубке в чистом аргоне и аргоне с примесями этанола при сравнительно низких давлениях в диапазоне от 1 до 20 Торр. Был проведен параметрический анализ пространственно-временных характеристик плазмы, генерируемой двумя типами разрядов в зависимости от вкладываемой мощности и давления газа. Анализ на выполнение законов подобия показал их отклонения из-за влияния нагрева газа на характеристики разряда. Кроме того, было показано, что такие процессы, как ступенчатая ионизация, Пеннинговская ионизация и излучение приводят к отклонению от законов подобия. Были проведены исследования по конверсии этанола и было показано формирование радикалов  $\text{CH}$ ,  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$ , максимальные концентрации которых наблюдались в пристеночных областях трубки.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00276 <https://rscf.ru/project/23-21-00276/>.*

### **Литература:**

[1] Сайфутдинов А. И. и др. //Физика плазмы. – 2019. – Т. 45. – №. 6. – С. 568-576.

[2] Saifutdinov A.I., Kustova E.V. // Journal of Applied Physics. – 2021. – Vol. 129. – no. 2. – 023301 1-15.

aliya\_2007@list.ru

## STUDY OF INTERMETALLIDES FORMATION IN BILAYERED TIN-IRON SYSTEM

**A. K. Zhubaev<sup>1</sup>, A. A. Kenzhebayeva<sup>1</sup>, R. B. Baigereyeva<sup>1</sup>**

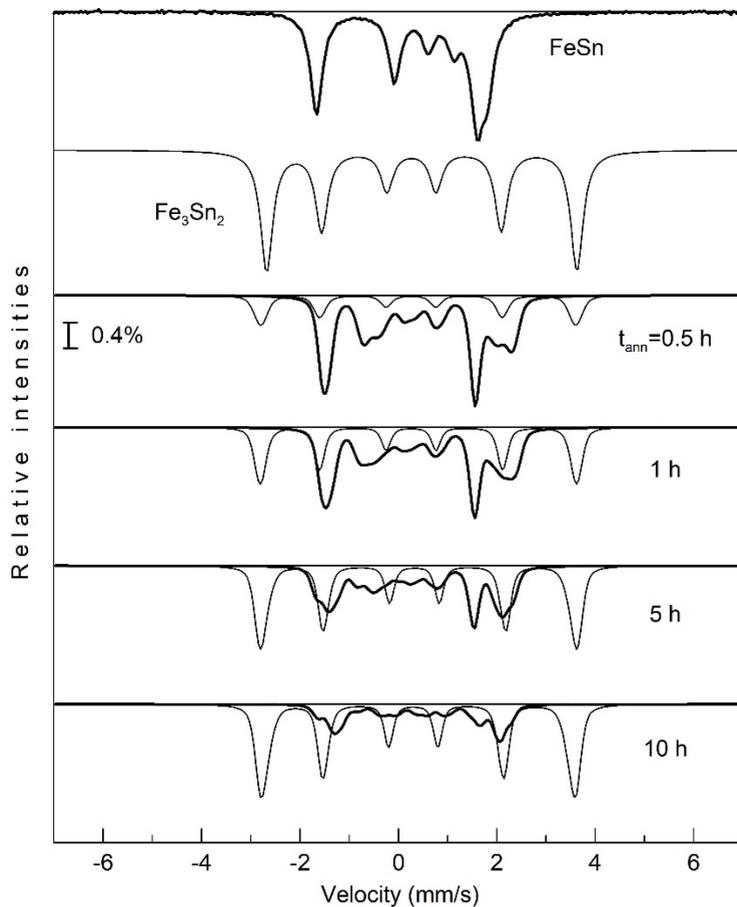
*<sup>1</sup>Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan*

In the present work the investigations of thermally induced processes of phase formation in two-layered systems Sn(4  $\mu\text{m}$ ) – Fe(10  $\mu\text{m}$ ), obtained by ion-plasma sputtering; have been carried out by methods of Mössbauer spectroscopy at <sup>57</sup>Fe nuclei.

The application of a Tin coating 4  $\mu\text{m}$  thick onto a substrate of  $\alpha$ -Fe was performed on an Argamak setup (Institute of Nuclear Physics, Republic of Kazakhstan) employing the method of ion-plasma sputtering [1]. The substrates were prepared from a bar of armco iron (99.8% Fe) by rolling to a thickness of  $\sim 10$   $\mu\text{m}$  using special rollers, with subsequent homogenizing annealing at a temperature 850°C for 3 h. Sequential isothermal annealings at 650°C with a duration of up to 20 h were carried out in a vacuum furnace with a residual pressure of  $6 \times 10^{-6}$  mm Hg. Mössbauer spectroscopy was employed as the investigation method. The Mössbauer measurements were conducted on an MS1104ME spectrometer in the absorption geometry at room temperature. <sup>57</sup>Co(Rh) with an activity of  $\sim 30$  mCi served as a source of  $\gamma$ -quanta. The spectrometer was calibrated against the standard sample of  $\alpha$ -Fe. The experimental spectra were processed using the techniques of restoration of distribution functions of hyperfine parameters of partial spectra and a model identification method [2].

The Mössbauer spectrum of the layered Sn-Fe system in the initial state is a Zeeman's sextet. Thermal annealing at 650°C temperature leads to the appearance of additional lines of the magnetically ordered phase with substantially smaller fields. Processing the spectra using the method of recovering the distribution functions of the magnetic field (fig.1) showed the appearance of an intermetallic phase with parameters characteristic of the intermetallic compound FeSn at first, and then, with an increase in the duration of annealing, the phase Fe<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>. The dependence of the relative intensities of the partial spectra for the forming phases on the annealing duration was obtained.

The Mossbauer spectra of intermetallic phases of the Fe-Sn binary system were modeled. Their comparison with experimental spectra confirms the correctness of phase identification.



**Figure 1.** Simulated Mossbauer spectra and partial Mossbauer spectra at <sup>57</sup>Fe nuclei of intermetallic compounds

**References:**

- [1] K.K. Kadyrzhanov, Physical fundamentals of ionic technologies, Alma-Ata, 1992. (in Russian).
- [2] V.S. Rusakov, Mossbauer spectroscopy of locally heterogeneous systems. Almaty: INP NNC RK, 2000. (in Russian)

mosslab.kz@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РЕАКЦИОННЫХ ГАЗОВ АЗОТА И АЦЕТИЛЕНА ПРИ ОСАЖДЕНИИ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ti-AL-C-N НА СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

**К. Н. Рамазанов<sup>1,2</sup>, А. Ю. Назаров<sup>2</sup>, В. Р. Мухамадеев<sup>2\*</sup>, И. Р. Мухамадеев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Академия наук Республики Башкортостан, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

\* [vener\\_muhamadeev@mail.ru](mailto:vener_muhamadeev@mail.ru)

Приведены результаты исследования компонентного состава смеси реакционных газов при синтезе карбонитридных покрытий системы Ti-Al-C-N, оказывающих влияние на износостойкость режущего инструмента.

Механообработка новых перспективных конструкционных материалов затруднена из-за высоких значений физико-механических свойств обрабатываемых материалов. В связи с этим потребность разработки новых материалов и покрытий для металлорежущего инструмента остается крайне актуальной задачей [1-5].

Покрытие наносили на модернизированной установке ННВ-6.6-И1 распылением из двух однокомпонентных катодов при ассистировании процесса плазменным источником с полым катодом (ПИПК). Во время нанесения покрытия в камеру подавали смесь из реакционных газов азота N<sub>2</sub> и ацетилена C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> в соотношении 1:4, 2:3, 3:2, 4:1 через плазмогенератор ПИПК, который подает в камеру ионизированный газ.

Покрытие наносили при следующих режимах: ток титанового дугового испарителя I<sub>Ti</sub>=120 А, ток алюминиевого испарителя I<sub>Al</sub>=100 А, напряжение смещения U=280 В, давление в вакуумной камере (3...4) · 10<sup>-3</sup> Па, время осаждения – 1 час.

Для проведения сравнительных испытаний на твердосплавные пластины из сплава ВК8 были нанесены однослойные покрытия TiAlN и TiAlCN.

Микротвердость определяли по методу Виккерса по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере EMCO-TestDuraScan 50 при нагрузке 0,05 кг, на каждом образце микротвердость была измерена в 5 точках.

Толщина покрытия определялась с помощью прибора CSM Calotest по результатам измерения параметров 3 лунок.

Для экспериментальных исследований при точении использовались заготовки из одной партии материалов одинаковых марок диаметром 70–100 мм и длиной 500 мм, предварительно обточенные и зацентрованные с обеих сторон. Заготовки зажимали в самоцентрирующемся трехулачковом патроне и поджимали вращающимся центром, установленным в пиноли задней бабки станка. Исследования проводились при глубине резания  $t=0,5$  мм и подаче  $S=0,11$  мм/об при частоте вращения 1000 об/мин.

В качестве исследуемого параметра износа инструмента использовалась средняя ширина фаски износа задней поверхности (без учета выемок). Ширину  $h_3$  фаски износа инструмента по задней поверхности измеряли с помощью отсчетного микроскопа МИР-2П с насадкой МОВ-15 с точностью отсчета до 0,002 мм. Критерий затупления режущих инструментов принимали равным  $h_3=0,3$  мм. Для обеспечения достоверности результатов эксперимента согласно рекомендациям исследования повторялись 4–5 раз при отклонениях не более 8 %.

Повышение твердости покрытия с увеличением содержания углерода обусловлено следующими факторами: уменьшение размера зерна приводит к эффекту Холла – Петча, который способствует повышению твердости пленки; атомы С частично замещают атомы N с образованием твердого раствора. Это приводит к искажению решетки, что блокирует движение дислокаций, а также увеличивает твердость покрытия.

Максимальное значение твердости покрытия достигает 4870 HV<sub>0,05</sub>, дальнейшее увеличение содержания углерода приводит к постепенному снижению твердости до 2983 HV<sub>0,05</sub>. Существенное снижение твердости после достижения максимального значения при увеличении содержания углерода можно объяснить увеличением содержания аморфного углерода.

Согласно графику зависимости пути резания от состава реакционного газа (рис. 4) оптимальным составом для достижения максимальной износостойкости является соотношение азота к ацетилену 4:1.

Таким образом, детальный анализ поверхности резцов из твердого сплава с разными упрочняющими покрытиями показал, что изменение содержания составляющих в смеси реакционных газов влияет не только на физико-механические, но и на эксплуатационные свойства. Изменение содержания состава реакционного газа приводит к изменению как износостойкости, так и механизма износа. Полученные результаты необходимо более детально исследовать с применением рентгеноструктурного анализа и

просвечивающей электронной микроскопией, но уже на данном этапе они могут быть рекомендованы к применению по отношению к различным металлорежущим инструментам.

Увеличение концентрации ацетилена приводит к увеличению содержания углерода в составе синтезируемого покрытия. Изменение соотношения концентрации азота к углероду до 2:3 (60 % углерода) позволяет увеличить микротвердость покрытия до 4870 HV. Однако дальнейшее увеличение содержания ацетилена приводит к резкому снижению микротвердости до 2983 HV.

Вывод: исследование на износостойкость инструмента показали, что инструмент с покрытием, полученным при соотношении концентрации азота к ацетилену 4:1, до критерия затупления проходит путь резания 3113 метров, что в 10 раз больше, чем для резцов без покрытия, и в 3,5 раза лучше, чем для резцов со стандартным покрытием Ti–Al–N. Анализ результатов измерения микротвердости и натуральных испытаний инструментов с покрытием показал, что результаты лабораторных исследований не совпадают с производственными испытаниями, так как все процессы, происходящие во время работы режущего инструмента, невозможно повторить в лабораторных условиях.

#### **Литература:**

- [1] Rashidi M., Tamizifar M., Ali Boutorabi S.M. Characteristics of TiAlCN ceramic coatings prepared via pulsed-DC PACVD, part I: influence of precursors' ratio // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. № 2. P. 1269–1280.
- [2] Liu K., Ma F., Lou M., Dong M., Zhu Y., Wang Y., Wu X., Liu X., Li J. Structure and tribocorrosion behavior of TiAlCN coatings with different Al contents in artificial seawater by multi-arc ion plating // *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2021. Vol. 9. № 4. Article number 045004.
- [3] Tillmann W., Grisales D., Marin Tovar C., Contreras E., Apel D., Nienhaus A., Stangier D., Lopes Dias N.F. Tribological behaviour of low carbon-containing TiAlCN coatings deposited by hybrid (DCMS/HiPIMS) technique // *Tribology International*. 2020. Vol. 151. Article number 106528.
- [4] Chen S.N., Zhao Y.M., Zhang Y.F., Chen L., Liao B., Zhang X., Ouyang X.P. Influence of carbon content on the structure and tribocorrosion properties of TiAlCN/TiAlN/TiAl multilayer composite coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 411. Article number 126886.
- [5] Zeng Y., Qiu Y., Mao X., Tan S., Tan Z., Zhang X., Chen J., Jiang J. Superhard TiAlCN coatings prepared by radio frequency magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 2015. Vol. 584. P. 283–288.

## ОБРАБОТКА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ КОМПЛЕКСОНОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ МНОГОИСКРОВЫМ ИСТОЧНИКОМ С ИНЖЕКЦИЕЙ АРГОНА В МЕЖЭЛЕКТРОДНЫЕ ПРОМЕЖУТКИ

**В. В. Гудкова<sup>1, 2\*</sup>, В. Д. Борзосеков<sup>1, 2</sup>, И. В. Моряков<sup>1</sup>, К. В. Артемьев<sup>1</sup>,  
А. М. Давыдов<sup>1</sup>, Н. К. Бережецкая<sup>1</sup>, Е. М. Кончечков<sup>1</sup>, Н. Г. Гусейн-заде<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия

\* [gudkova-vi@fpl.gpi.ru](mailto:gudkova-vi@fpl.gpi.ru)

Применение растворов этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) и ее динатриевой соли Трилон Б (комплексон II и III) особенно интересно своей биологической активностью, которая вызвана хорошей проникающей способностью хелатных соединений в биологические объекты. В сельском хозяйстве существует отдельное направление применения подобных удобрений благодаря высокой степени усвоения растениями полезных элементов в хелатной форме. С другой стороны, активно развивается отрасль исследований синтеза наночастиц в ходе газоразрядной обработки [1-3], которые также могут быть полезны в сельском хозяйстве. Показано положительное влияние оксида железа на прорастание семян пшеницы [4] и арахиса [5], был получен результат по положительному влиянию наночастиц железа в малых концентрациях на всхожесть семян, ускорению роста побегов и усилению роста проростков [6]. В совокупности с известными фактами генерации активных форм кислорода и азота в ходе плазмохимических реакций, полученный продукт, дополненный наночастицами материала электрода и хелатными соединениями, может быть весьма востребован в сельскохозяйственной промышленности. Все вышеуказанные положительные факторы воздействия на растения в одном растворе можно получить в ходе одностадийного процесса газоразрядной обработки водных растворов комплексонов.

В работе рассматривалось воздействие на водные растворы ЭДТА и Трилон Б высоковольтным импульсно-периодическим многоискровым разрядом с инжекцией газа в межэлектродные промежутки [7,8]. При газоразрядной

обработке наблюдалась эрозия электродов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В качестве рабочего газа использовался аргон (расход газа 5 литров в минуту). Время воздействия = 10 минут, объем жидкости = 120 мл. Исследовалось воздействие на растворы ЭДТА (с концентрациями 300 мкМ и 3 мМ); ЭДТА-Na<sub>2</sub> (Трилон Б, с концентрациями 300 мкМ, 3 мМ и 30 мМ). Проводилось сравнение с воздействием на деионизированную воду.

Разряд (Рисунок 1а) осуществлялся между четырьмя парами электродов, погруженными в жидкость, в протоке аргона. Межэлектродное расстояние было 2 мм. Амплитуда напряжения, подаваемого на электроды, составляла  $U = 20$  кВ, а частота следования высоковольтных импульсов –  $f = 50$  Гц, длительность импульса – 2 мкс. Энергия, вложенная в разряд за один импульс, составляла ~ 1 Дж. Концентрация плазмы была определена в [8] по уширению линии  $H_{\alpha}$ , вызванному эффектом Штарка, как  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Газовая температура  $T = 4000-5000$  К по континууму излучения.

Концентрация пероксида водорода измерялась с помощью реактива FOX по спектру поглощения на длине волны 560 нм [9], концентрация ионов  $Fe^{3+}$  с помощью реактива ХО по спектру поглощения на длине волны 560 нм [10]. Гидродинамический диаметр частиц определялся через динамическое рассеяние света (DLS). Проводился анализ с помощью просвечивающей (ПЭМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (Рисунок 1б-1г) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, снимались электронограммы.

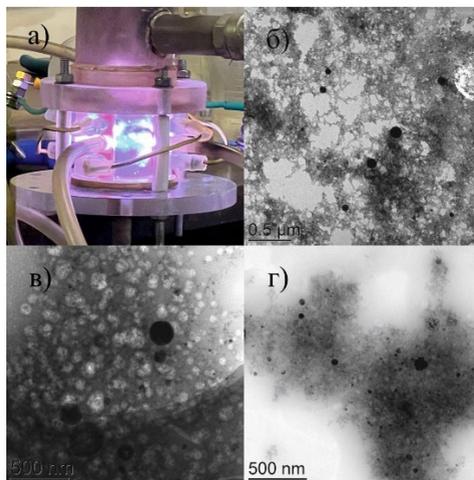
Образец	Концентрация $H_2O_2$ , мкМ	Концентрация $Fe^{3+}$ , мкМ
Деионизированная вода	$604 \pm 32$	$131 \pm 1$
ЭДТА, 300 мкМ	$11 \pm 1$	$115 \pm 4$
ЭДТА, 3 мМ	$18 \pm 1$	$148 \pm 1$
Трилон Б, 300 мкМ	$10 \pm 1$	$138 \pm 3$
Трилон Б, 3 мМ	$135 \pm 10$	$45 \pm 5$
Трилон Б, 30 мМ	$503 \pm 10$	$38 \pm 3$

**Таблица 1.** Концентрации  $H_2O_2$  и  $Fe^{3+}$  после 10 минут воздействия многоискровым разрядом с инъекцией аргона.

После воздействия разряда на деионизированную воду с начальной проводимостью 0.1 мкСм/см концентрация ионов  $\text{Fe}^{3+}$  составляла 131 мкМ (Таблица 1), что приблизительно совпадает с концентрациями ионов  $\text{Fe}^{3+}$  при воздействии на образцы с малыми концентрациями ЭДТА 300 мкМ и Трилон Б 300 мкМ. Высушенный осадок фиксировался в виде неполного гидроксида  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в альфа-фазе, который обладает слабыми магнитными свойствами при комнатной температуре. Также присутствовала малая фракция, вероятнее всего, смешанного оксида  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (магнетит), который проявляет сильные магнитные свойства. Электронограммы показали, что при обработке ЭДТА 300 мкМ в осадке наблюдались оба оксида железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Обработанный раствор Трилон Б 300 мкМ содержал в основном оксид железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , причем в большем количестве, чем при воздействии на воду, что может быть связано с адсорбционными свойствами хелата.

При обработке ЭДТА 3 мМ образуются крупные агломераты частиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  с ярко выраженными магнитными свойствами, а также микро- и наночастицы железа Fe. Концентрация  $\text{Fe}^{3+}$  была выше, чем при воздействии на воду, и достигала значения  $148 \pm 1$  мкМ. При повышении концентрации Трилон Б происходило снижение концентрации ионов  $\text{Fe}^{3+}$ , что, возможно, связано с образованием комплекса железо-ЭДТА. Хелатное соединение на основе железа стабильно и не дает определить ионы со степенью окисления +3 с помощью ХО. В обоих растворах (концентрации 3 мМ, 30 мМ) образовывались агломераты частиц магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , большая часть которых (98%) имела гидродинамический диаметр <150 нм. Также это подтверждается значениями окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и водородного показателя среды (рН) по диаграмме Пурбе для железа. Значений ОВП и рН раствора 300 мкМ Трилон Б недостаточно для полного перехода от  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  к  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Также по элементному анализу и СЭМ осадка было зафиксировано наличие в образцах хрома и никеля.

Хелатные соединения и наночастицы используются во многих задачах современной промышленности, сельского хозяйства и биомедицины. Показано, что с помощью газоразрядной обработки водных растворов комплексонов возможно получать растворы, содержащие одновременно и хелатные соединения, и наночастицы, и пероксид водорода. При этом, варьируя тип растворенного вещества и его концентрации в исходном растворе, можно управлять образованием водорастворимых соединений и частиц, возникающих в следствие распыления электродов.



**Рисунок 1.** а) Разрядная камера, б) ПЭМ образца Трилон Б 300 мкм, в) ПЭМ образца ЭДТА, 3 мм, г) ПЭМ образца Трилон Б 30 мм.

#### **Литература:**

- [1] Smirnova, K.V. et al. Plasma Chem Plasma Process (2023). DOI: 10.1007/s11090-023-10391-2
- [2] Saifutdinov, A.; Timerkaev, B. Nanomaterials 2023, 13, 1966. DOI: 10.3390/nano13131966
- [3] Sirotkin, N.A. et al. Plasma Chem Plasma Process 42, 191–209 (2022). DOI: 10.1007/s11090-021-10213-3
- [4] Ali A. et al. Nanotechnology, Science and Applications. – 2016. – Vol.9. – P. 49-67. DOI: 10.2147/nsa.s99986
- [5] Iqbal T. An International Journal of Plant Research. – 2017. – Vol. 30. – P. 93-100. DOI: 10.5958/2229-4473.2017.00042.8
- [6] Amin H. et al. Role of Metal-Based Nanomaterials in Plant Growth. – 2021.
- [7] Anpilov A.M. et al. Plasma Phys. Rep., 45 (3), 246 (2019). DOI: 10.1134/S1063780X19020016
- [8] Anpilov A.M. et al. Tech. Phys., 66 (5), 675 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221050029
- [9] S.P. Wolff, Methods in Enzymology, 233, 182 (1994). DOI: 10.1016/S0076-6879(94)33021-2
- [10] M. Otomo, BCSJ, 36 (7), 809 (1963). DOI: 10.1246/bcsj.36.809

## ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ НАРАБОТКИ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ В ГЕЛИИ

**К. М. Рабаданов<sup>1,2</sup>, Н. А. Ашурбеков<sup>2</sup>, К. О. Иминов<sup>2</sup>, Г. Ш. Шахсинов<sup>2</sup>, М. З. Закарьяева<sup>2</sup>, А. А. Муртазаева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Харбинский Политехнический Университет, Харбин, Китай*

<sup>2</sup>*Дагестанский Государственный Университет, Махачкала, Россия*

Исследование посвящено изучению влиянию поперечного магнитного поля на наработку метастабильных атомов и возбужденных молекул гелия в высоковольтном импульсном разряде в гелии при средних давлениях газа. Представлена двумерная флюид модель для описания высоковольтного импульсного разряда в гелии в поперечном слабом магнитном поле. Исследована динамика развития разряда при высоковольтном импульсном разряде в гелии при давлении 30 Торр в присутствии магнитного поля. Изучено влияние приложенного магнитного поля на поведение плотности заряженных частиц, метастабильных атомов и возбужденных молекул гелия в высоковольтном импульсном разряде гелия. Показано, что в разрядной области плотность метастабильных атомов при прикладывании поперечного магнитного поля уменьшается, которое является следствием увеличения частоты ступенчатой ионизации.

Основное воздействие магнитного поля на тлеющий разряд заключается в том, что электроны и ионы движутся не по прямым линиям, а по орбитам вокруг линий магнитного поля по спиральным орбитам [1] радиусом  $r_L$ , называемым ларморовским:

$$r_L = m v / e B \quad (1)$$

где  $v$  - скорость электрона,  $B$  – вектор магнитной индукции, а  $e$  и  $m$  - заряд и масса электронов.

Исследование поведения газовых разрядов в магнитных полях в настоящее время все еще активно проводятся [2-4]. При исследовании газоразрядной плазмы и при учете влияния магнитного поля на газоразрядную плазму особое значение имеет изучение процессов наработки метастабильных атомов и возбужденных молекул и учет этих частиц при моделировании [5-6]. Метастабильные атомы и молекулы играют важную роль в газовых

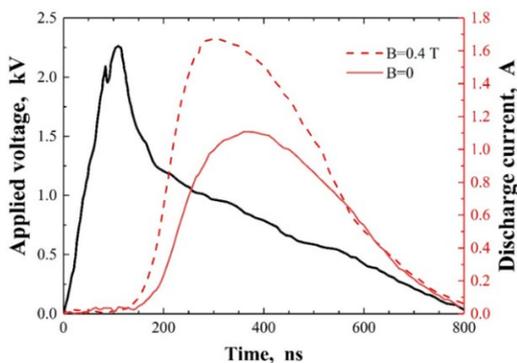
разрядах, например, в генерации ионов посредством процессов ионизации Пеннинга. Также метастабильные атомы играют значительную роль во многих технологических областях где используется плазма, например, в качестве катализаторов [7], и для ионизации целевых аналитов [8]. Так в работе [5] было исследовано влияние метастабильных атомов в радиочастотном разряде в аргоне и показано, что при давлении 1 Торр ступенчатая ионизация с участием метастабилей составляет значительный процент от общей скорости ионизации, сильно влияя на нагрев электронов и потенциал разряда. Поэтому изучение поведения метастабильных частиц в разрядах играют важную роль, особенно при накладывании магнитного поля на газоразрядный промежуток.

Объектом исследования в данной работе является высоковольтный импульсный разряд в гелии при средних давлениях газа. Для иллюстрации возможностей численной модели расчеты выполнены для давления газа 30 Торр. Для анализа влияния поперечного магнитного поля на характеристики газового разряда использовалась двумерная гидродинамическая модель. Численная модель газоразрядной камеры соответствовала как по размерам, так и по конструкции реальной геометрии. Разрядная камера состоит из двух цилиндрических электродов закругленных на конце с радиусом закругления 4 мм, которые располагаются внутри кварцевой трубки. Электроды диаметром 0.8 см, имеющие полусферическую форму, расположены на расстоянии 0.4 см друг от друга. Постоянные магниты расположенные поверх трубки создавали в зазоре постоянное магнитное поле  $B=0,4T$ .

Для описания плазмы и протекающих процессов в разрядной камере используется уравнение непрерывности для частиц с дрейфово-диффузионным приближением, дрейфово-диффузионное уравнение для средней энергии электронов и уравнение Пуассона для анализа распределения электрического поля в разрядном промежутке[9].

В рассматриваемом нами случае разряда в гелии в уравнениях электрическое поле  $E$  можно заменить на эффективное электрическое поле  $E_{ef} = E / \sqrt{1 + \omega^2 / \nu_{ca}^2}$ , поскольку в слабо ионизированной плазмы в слабом магнитном поле, если частота упругих столкновений не зависит от энергии электронов при фиксированном давлении газа, то частота ионизации в магнитном поле будет зависеть только от эффективного электрического поля.

На рисунке 1 показаны приложенное напряжение и ток разряда в результате моделирования в случае наличия магнитного поля  $B=0,4\text{T}$  и отсутствие внешнего приложенного магнитного поля  $B=0$ .

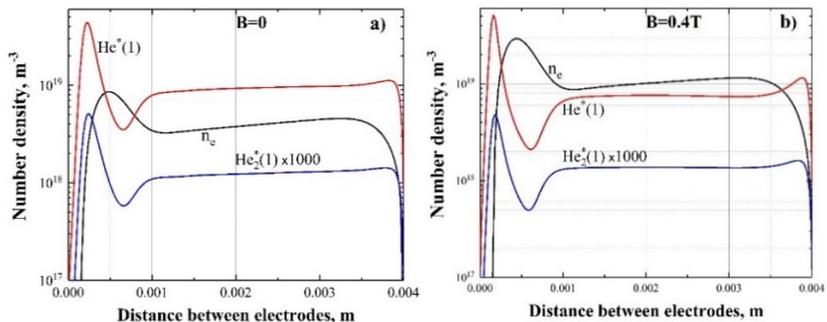


**Рисунок 1.** Импульс приложенного к электродам напряжения и разрядных токов высоковольтного импульсного разряда в гелии из моделирования при давлении газа 30 Торр.

Из рисунка 1 видно, что при наличии магнитного поля время формирования пробоя немного сокращается. В работе [10] было показано, что магнитное поле сильно влияет на характеристики левой части кривой пробоя Пашена. В режиме низкого давления напряжение пробоя уменьшается за счет увеличения плотности магнитного потока, а положение минимума пробоя смещается за счет магнитного поля.

На рисунке 2 показано распределение плотности электронов, метастабильных атомов и метастабильных молекул гелия вдоль оси симметрии между электродами при давлении 30 Торр для рассматриваемых случаев  $B=0$  и  $B=0,4\text{T}$  в момент времени 800 нс. Из этого рисунка видно, что плотность электронов и метастабильных атомов к концу приложенного импульса напряжения все еще остается довольно большой в обоих рассматриваемых случаях. Прикладывание магнитного поля приводит к увеличению плотности электронов во всей области разрядной камеры. Это связано с тем, что магнитное поле приводит к усилению удержания электронов и ионов, поскольку они уже двигаются не по прямым линиям, а по спиральным орбитам вокруг линий магнитного поля. Также видно из рисунка в обоих случаях, что плотность молекулярных метастабилей  $He_2^*(1)\left(^3\Sigma_u^+\right)$  более чем на 3 порядка меньше плотности метастабильных

атомов  $He^*(1)(2^3S)$ . Плотность метастабилей в разрядной области в случае присутствия магнитного поля становится меньше плотности электронов за исключением приэлектродных областей.



**Рисунок 2.** Распределение плотности электронов, метастабильного атома  $He^*(1)(2^3S)$  и метастабильной молекулы  $He_2^*(1)(\sum_u^+)$  гелия вдоль оси симметрии между электродами в момент 800 нс.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания FZNZ-2020-0002.*

### Литература:

- [1] J. Alami et al., Plasma Sources Sci. Technol. 14, 525 (2005).
- [2] Chen-Yon Tobias Tschang et al, J. Phys. D: Appl. Phys., 53, 215202 (2020).
- [3] Jean-Pierre Boeuf, Andrei Smolyakov, Phys. Plasmas, 30 (5): 050901 (2023).
- [4] Bocong Zheng et al, J. Phys. D: Appl. Phys. 53, 435201 (2020).
- [5] Lauro-Taroni, M. M. Turner, and N. S. Braithwaite, Journal of Physics D: Applied Physics, 37, 2216 (2004).
- [6] C Yuan et al, Plasma Sources Sci. Technol. 28, 035017 (2019).
- [7] Sanito, R.C., You, S.J., Chang, G.M., Wang, Y.F., J. Hazard. Mater. 394, 122558 (2020).
- [8] Moore S, Vromet L, Rondeau B. Chemosphere, 54, 453–9 (2003).
- [9] G.J.M. Hagelaar and L.C. Pitchford, Plasma Sources Science and Technology, 14, 722–733 (2005).
- [10] S. Z. Li and H. S. Uhm, Phys. Plasmas 11, 3443 (2004).

kurbanbagama91@mail.ru

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЕРОВОДОРОДА С ПОЛУЧЕНИЕМ ВОДОРОДА

**Ю. С. Денисов<sup>1, 2</sup>, Д. И. Субботин<sup>1, 2</sup>, В. Е. Попов<sup>1</sup>, С. Д. Попов<sup>1</sup>, М. В. Обрывалин<sup>1, 2</sup>, К. И. Бабич<sup>2</sup>**

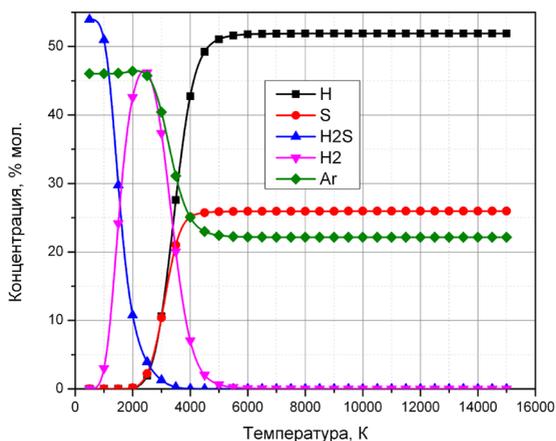
<sup>1</sup>*Институт Электрофизики и Электроэнергетики РАН, СПб, РФ*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт (Технический Университет), СПб, РФ*

Сероводород – крупнотоннажный побочный продукт нефтепереработки. В основном он получается в результате гидроочистки нефти от серы. Стандартным способом его утилизации является процесс Клауса. Однако он имеет существенный недостаток – сероводород окисляется до воды и элементарной серы. Экономически привлекательным выглядел бы метод утилизации сероводорода с сохранением  $H_2$  для дальнейшего использования в цикле. Альтернативой процессу Клауса является термическое разложение сероводорода. С 1980-х годов велась дискуссия об использовании плазмы для разложения сероводорода. Во времена активного обсуждения данной темы, технические характеристики плазмотронов не позволяли использовать их в непрерывных процессах. Сегодня пройден рубеж в тысячу часов работы плазмотронов до замены электродов. Особых успехов в разработке высоковольтных плазмотронов и плазмохимических установок на их основе добился Институт Электрофизики и Электроэнергетики РАН [1].

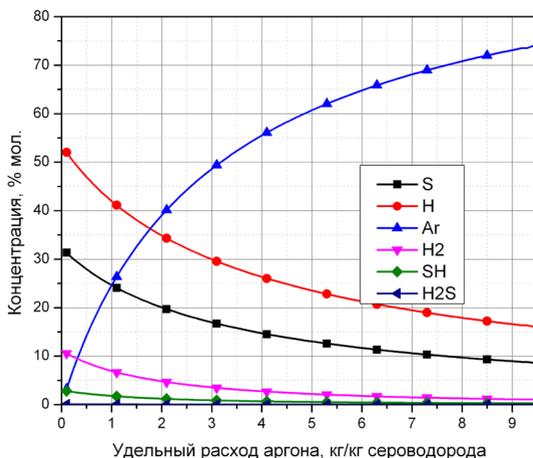
Был запланирован эксперимент по плазменному пиролизу сероводорода. Стоит отметить, что подавать чистый сероводород напрямую в плазмотрон недопустимо. Образование серы в приэлектродном пространстве приведет к нестабильной работе плазмотрона вследствие изменения параметров электрической дуги. Соответственно, следует применять газ-инерт. Наиболее доступными для промышленного использования газами с малой реакционной способностью являются азот и аргон. Цена азота ниже, однако если планируется применять циклический процесс гидроочистки, то данное

преимущество не является решающим. Недостатком азота является то, что в электрической дуге он реагирует с кислородом воздуха, попадающим через неплотности аппаратуры, с образованием кислотных оксидов, которые крайне разрушительны как для корпуса плазмохимического реактора, так и для его арматуры. Исходя из озвученных соображений, решение о применении того или иного инерта нельзя принимать в отрыве от конкретной технологической схемы и номенклатуры оборудования. Для создания нового высоковольтного плазмотрона и опытной установки выполнены термодинамические расчеты. Они выполнялись в программном пакете Chemical-Workbench. Расчет равновесного состава велся исходя из поиска максимума энтропии. Проведен анализ зависимости состава продуктов пиролиза смеси  $H_2S$ -Ar (массовое соотношение 1/1) от температуры. На рисунке 1 представлена зависимость состава продуктов от температуры.



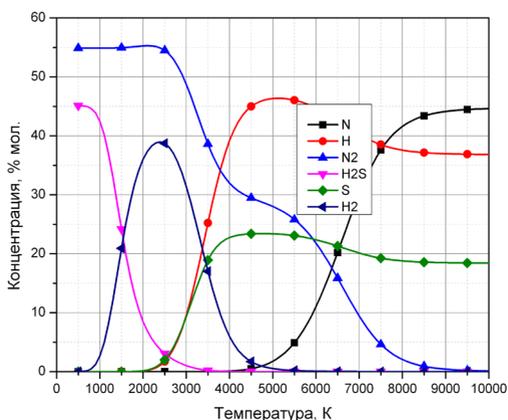
**Рисунок 1.** Зависимость состава продуктов пиролиза смеси сероводорода и аргона от температуры.

Из рисунка видно, что уже при 4000K содержание сероводорода стремится к нулю. Данная температура достаточно легко достигается в плазмохимических реакторах с высоковольтными электродуговыми плазмотронами. Аналогично была рассчитана зависимость состава продуктов пиролиза от удельного расхода аргона (кг/кг сероводорода), температура - 4000K (2 рисунок).



**Рисунок 2.** Зависимость состава продуктов пиролиза смеси сероводорода и аргона от удельного расхода аргона.

Из рисунка видно, что расход аргона не влияет на состав продуктов реакции. Соответственно, расход аргона можно варьировать исходя из конструкционных возможностей плазмотрона и соображений эффективности. Для массового соотношения  $H_2S/Ar=1$  при температуре 4000К были рассчитаны следующие энергетические параметры процесса: удельные энергозатраты на 1 кг плазмообразующей смеси (энтальпия плазмы) — 12,9 МДж/кг ; удельные энергозатраты на 1 кг сероводорода — 25,8 МДж/кг ; удельные энергозатраты на 1 кг произведенного водорода - 439 МДж/кг. Еще один расчет был выполнен для азота, который также может применяться в качестве защитного газа. На рисунке 3 можно видеть зависимость состава продуктов пиролиза от температуры, при массовом соотношении  $H_2S/N_2=1$ . Также как и в случае смеси с аргоном, концентрация сероводорода при повышении температуры резко снижается. При 3500К сероводород содержится в продуктах реакции в следовых количествах. Зависимость состава продуктов от удельного расхода азота аналогична зависимости для аргона.



**Рисунок 3.** Зависимость состава продуктов пиролиза смеси сероводорода и азота от температуры

Был разработан план экспериментального подтверждения расчётов. Предполагается получать сероводород в процессе эксперимента гидролизом сульфида алюминия.

#### **Литература:**

[1] Surov, A.V. Multi-gas AC plasma torches for gasification of organic substances / A.V. Surov, S.D. Popov, V.E. Popov, D.I. Subbotin, E.O. Serba, V.A. Spodobin, Gh.V. Nakonechny, A.V. Pavlov // Fuel. - 2017. – V. 203. – P. 1007-1014

ura-denisov2001@yandex.ru

## СО<sub>2</sub> ПЛАЗМЕННЫЙ РИФОРМИНГ МЕТАНА

**М. В. Обрывалин<sup>1, 2</sup>, Д. И. Субботин<sup>1, 2</sup>, В. Е. Попов<sup>1</sup>, С. Д. Попов<sup>1</sup>, К. И. Бабич<sup>2</sup>, Ю. С. Денисов<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>Институт Электрофизики и Электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт (Технический Университет), Санкт-Петербург, Россия

Водород является важнейшим и незаменимым сырьем в химической промышленности. Он применяется в производстве аммиака, в синтезе спиртов и простых эфиров, в процессах гидрирования и в качестве источника энергии.

В 2022 году глобальное потребление водорода составило 95 Мт, что на 3% больше чем в 2021, поддерживая стабильный ежегодный рост [1]. Основным методом его производства остается паровой риформинг природного газа, который сразу приводит к получению смеси водорода и угарного газа в разных соотношениях, называемой синтез газом. Риформинг метана обладает большим рядом положительных особенностей: на выходе получается сингаз высокой чистоты, имеется огромный опыт использования этого метода, он хорошо изучен, в силу чего его эффективность уже достаточно высока. Однако, минусами такого метода является высокая температура входного водяного газа и строгий температурный режим, приводящий к термическому влиянию на катализатор и его отравлению, вторым минусом является большое количество СО<sub>2</sub> в виде побочного продукта, который является парниковым газом и оказывает негативное влияние на общую экологию.

Одним из альтернатив паровому риформингу можно предложить углекислотный риформинг, где СО<sub>2</sub> уже используется в качестве сырья, суммарная реакция такого процесса может быть представлена в виде:



Эта реакция, однако, является эндотермической, с сильно положительным значением изменения энтальпии реакции: 260.8кДж/моль или около

16.3 МДж/кг  $\text{CH}_4$ , так что проведение такой реакции требует подвода значительного количества энергии – проблема, которую можно решить плазмохимическим путем.

В литературе уже описано использование различных видов плазмотронов и начальных условий для выполнения этой реакции [2, 3]. Однако, в них не упоминается влияние количества водорода в дуге на электрические свойства дуги. Поэтому было решено проверить эти зависимости экспериментальным путем. Для этого был поставлен эксперимент, используя плазмотрон переменного тока с хорошо известными и описанными электрическими параметрами. Сам метод исследования заключался в разделении потока углекислого газа на две зоны: приэлектродную и непосредственно зону электрической дуги. Удельный расход метана сохранялся постоянным: 1 г/с в приэлектродную зону и 1.4 г/с в зону дуги. Суммарный удельный расход углекислого газа составлял 6.9 г/с и было выполнено 5 опытов, где удельный расход  $\text{CO}_2$  в зоне дуги составлял 3.7; 3.6; 3.4; 3.3; 3.2 г/с соответственно.

Пересчет экспериментальных значений мощности на тепловую мощность (т.е. с учетом КПД плазмотрона) позволил сделать выводы о связи равновесного состава (включая количество водорода), тепловой мощности и электропроводности дуги. Обработанные экспериментальные данные представлены в таблице 1.

**Таблица 1** – Отношение равновесных составов  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}_2$ , средней температуры и электропроводности дуги

№	Равновесный состав, % об.		Тепловая мощность, кВт	Средняя температура, К	Электропроводность дуги, См
	$\text{H}_2$	$\text{CO}$			
1	48.46	50.47	117.2	3201	0.0364
2	48.47	50.47	114.6	3171	0.0365
3	48.47	50.47	113.6	3159	0.0375
4	48.48	50.47	112.7	3147	0.0377
5	48.48	50.48	110.3	3116	0.0383

В ходе эксперимента было замечено, что повышение количество углекислого газа в дуге приводило к повышению средней температуры в реакторе, а

также к повышению электропроводности дуги. Дальнейший анализ равновесного состава продуктов реакции показал, что происходит увеличение количества водорода с увеличением количества  $\text{CO}_2$  в дуге, а это приводит к уменьшению электропроводности дуги. Доля  $\text{CO}_2$  в дуге влияет на ее параметры слабо, в то время как, средняя температура и тепловая мощность напрямую зависят друг от друга и от количества водорода. Таким образом параметр, доступный для экспрессного измерения, строго показывающий количество образовавшегося водорода – это электропроводимость плазменной дуги, что делает ее предпочтительной для оценки количества водорода.

**Литература:**

[1] IEA (2023), Global Hydrogen Review 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>, License: CC BY 4.0

[2] Se M.Ch., Yong Ch.H., Dae H.Ch. // Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. 2017. V. 19. P. 221—229.

[3] Ming-wei Li, Gen-hui Xu, Yi-ling Tian et al. // J. Phys. Chem. A. 2004. V. 108(10). P. 1687—1693.

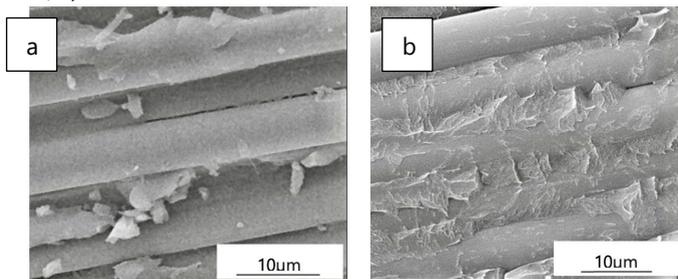
maxim.obryvalin2@gmail.com

## ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПРИ СОЗДАНИИ УГЛЕКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА

**П. В. Космачев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

Из полимерных композиционных материалов, в том числе на основе полифениленсульфида (ПФС), широко распространенными и востребованными являются слоистые (ламинаты). Это обусловлено их высокими упругими и прочностными характеристиками в плоскости армирования. Однако они обладают минимальным сопротивлением нагружению в условиях поперечного разрыва и межслоевого сдвига, что может приводить к трещинообразованию и постепенному расслоению композита вплоть до полного его разрушения. Устранение данной проблемы требует повышение прочности связи между слоями материала, что, преимущественно, достигнуто путем повышения межслоевой адгезии [1,2]. В работе исследованы слоистые ПФС-углеволоконные (УВ) композиты, изготовленные методом термопрессования, в которых межслоевую адгезию повышали предварительной DRE-плазменной обработкой с различным временем воздействия на ленты углеродных волокон [3]. Исследования структуры получаемых образцов показало, что в композите, изготовленном с применением необработанных УВ, на межслоевых границах наблюдались несмоченные полимером поверхности волокон, разрушение происходило строго по межфазным границам волокно/полимер (Рисунок 1, а).



**Рисунок 1.** РЭМ-фотографии структуры композитов ПФС/УВ без обработки (а) и с DRE-плазменной обработкой УВ в течение 15 мин (б)

В то же время, в структуре композитов, с предварительно модифицированными DRE-плазменным воздействием слоями углеткани (Рисунок 1, б), отчетливо наблюдаются хорошо смоченные полимером волокна. Закрепившиеся фрагменты разрушенного полимерного связующего присутствуют на поверхности всех наблюдаемых волокон, разрушение происходило по когезионному механизму.

**Литература:**

- [1] Dong, Y.; Yu, T.; Wang, X.; Zhang, G.; Lu, J.; Zhang, M.; Long, S.; Yang, J. Improved Interfacial Shear Strength in Polyphenylene Sulfide/Carbon Fiber Composites via the Carboxylic Polyphenylene Sulfide Sizing Agent. *Compos. Sci. Tech.* 2020, 190, 108056.
- [2] Xu, D.; Liu, B.; Zhang, G.; Long, S.; Wang, X.; Yang, J. Effect of Air Plasma Treatment on Interfacial Shear Strength of Carbon Fiber–Reinforced Polyphenylene Sulfide. *High Performance Polymers* 2015, 28, 411–424.
- [3] Kosmachev, P.V.; Panin, S.V.; Panov, I.L.; Bochkareva, S.A. Surface Modification of Carbon Fibers by Low-Temperature Plasma with Runaway Electrons for Manufacturing PEEK-Based Laminates. *Materials* 2022, 15, 7625.

kosmachev@ispms.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В ДВУХСЛОЙНОЙ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЕ

**А. К. Жубаев<sup>1</sup>, А. О. Сагынова<sup>1</sup>, Г. А. Рахметолла<sup>1</sup>**

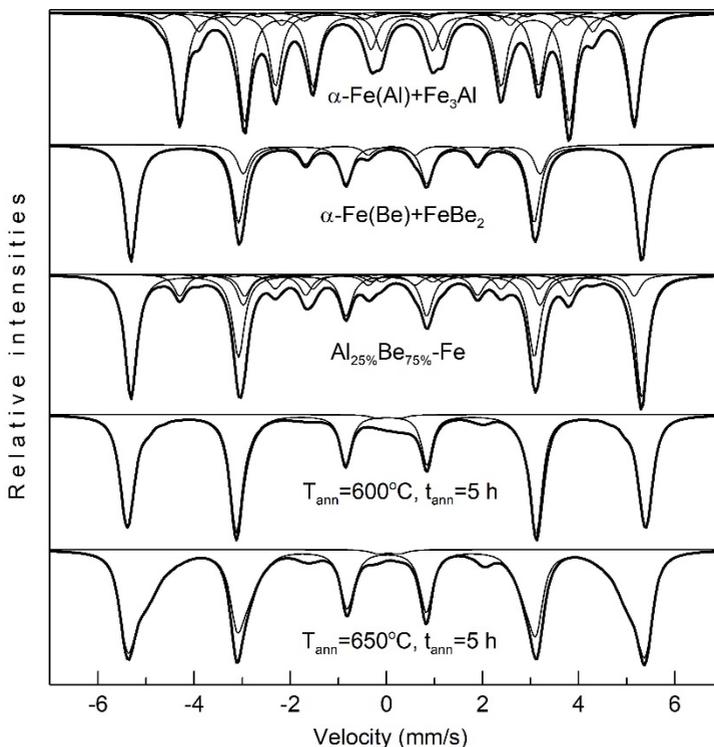
*<sup>1</sup>Актюбинский региональный университет им.К.Жубанова, Актюбе, Казахстан*

В данной работе спектры бинарных систем FeBe и Fe-Al [1] были смоделированы с помощью метода модельной расшифровки мессбауэровских спектров [2].

Были исследованы тонкие фольги армко-железа с алюминиево-бериллиевым покрытием (75 ат.% Be+25 ат.% Al) после 5-часового изохронного термического отжига в диапазоне температур 300-900°C [3].

Для тонких образцов железа (толщина  $\approx 10$  мкм) с покрытием  $Al_{25\%}Be_{75\%}$  толщиной  $\approx 2$  мкм были рассчитаны значения средней концентрации атомов Al и Be по всему объему образца, которые достигаются при полном растворении атомов примеси в матрице  $\alpha$ -Fe:  $3,4 \pm 0,3\%$  для Al и  $17,9 \pm 1,5\%$  для Be, соответственно. Используя фазовую диаграмму бинарной системы FeBe и "правило рычага", были рассчитаны относительные вклады интерметаллического соединения  $FeBe_2$  и твердого раствора  $\alpha$ -Fe(Be) атомов бериллия. Аналогичным образом, для бинарной системы Fe-Al были определены вклады интерметаллида  $Fe_3Al$  и твердого раствора  $\alpha$ -Fe(Al) атомов алюминия.

Были смоделированы мессбауэровские спектры двухфазных систем интерметаллид-твердый раствор. С учетом соотношения компонентов нанесенного покрытия были получены спектры многофазных систем  $FeBe_2$ - $\alpha$ -Fe(Be)+ $Fe_3Al$ - $\alpha$ -Fe(Al). На рисунке 1 показаны смоделированные спектры для потенциально образующихся фаз при 600°C. Для сравнения, ниже представлены экспериментальные спектры слоистой системы  $Al_{25\%}Be_{75\%}$  (2 мкм)-Fe(10 мкм) после термического отжига при 600°C и 650°C в течение 5 часов. На основе сравнительного анализа модельных и экспериментальных спектров можно говорить об интенсивном образовании бериллийсодержащих фаз (твердого раствора атомов бериллия  $\alpha$ -Fe(Be) и бериллида железа) в слоистой системе  $Al_{25\%}Be_{75\%}$ -Fe, полученной методом ионно-плазменного распыления.



**Рисунок 1.** Смоделированные и экспериментальные мессбауэровские спектры на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  слоистой системы  $\text{Al}_{25\%}\text{Be}_{75\%}$  (2 мкм)-Fe (10 мкм)

#### Литература:

- [1] Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: в 3 т, Т. 2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.
- [2] Русаков В.С. Мёссбауэровская спектроскопия локально неоднородных систем. – Алматы, 2000. – 431 с.
- [3] Сулов Е.Е., Плаксин Д.А., Жубаев А.К., Русаков В.С., Туркебаев Т.Э., Кадыржанов К.К. Термически индуцированные фазовые превращения в слоистой системе Fe-Al-Be. – Известия НАН РК. Серия физико-математическая, 2005, т.2, с.128-136.

mosslab.kz@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕСТРУКЦИИ КРАСИТЕЛЯ РОДАМИНА Б В ПЛАЗМЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

**Г. И. Гусев<sup>1</sup>, А. А. Гуцин<sup>1</sup>, Г. А. Гридин<sup>1</sup>, Д. А. Стулов<sup>1</sup>, А. В. Скалова<sup>1</sup>,  
Е. В. Кипина<sup>1</sup>, И. В. Заварихин<sup>1</sup>**

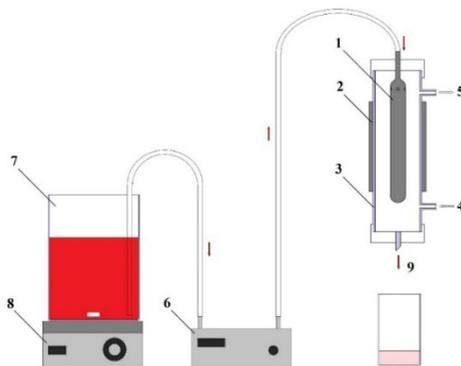
*<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "ИГХТУ", Иваново, Россия*

Одним из перспективных методов интенсификации процессов очистки сточных вод от органических поллютантов является диэлектрический барьерный разряд (ДБР), уже нашедший широкое применение в системах охраны окружающей среды [1-3]. Его преимуществом являются высокие скорости разложения загрязняющих веществ на менее токсичные продукты [1-3]. Среди различных красителей, используемых в различных сферах хозяйственной деятельности человека, родамин Б нашел широкое применение в текстильной и пищевой промышленности [4], Родамин Б – токсичное соединение, оказывающее раздражающее действие на слизистые оболочки и кожу. Этот краситель обладает канцерогенными свойствами, проявляет нейротоксическое действие и оказывает хроническое токсическое действие на водные организмы и человека [5].

Цель настоящего исследования – изучение эффективности деструкции красителя родамина Б в реакторе ДБР. В качестве модельного загрязняющего вещества использовался водный растворы содержащий краситель Родамин Б RhB, ( $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ ,  $M = 479,02$  г/моль).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, основным элементом которой являлся реактор диэлектрического барьерного разряда Среднеквадратичное значение напряжения в экспериментах составляло 16,5 кВ. При этом ток разряда составлял 13,08 мА. Частота напряжения, приложенного к электродам, составляла 800 Гц. Более подробное описание установки приведено в [3]. В качестве плазмообразующего газа во всех экспериментах использовался технический кислород, расход которого во всех опытах составлял 500 мл/мин (8,33 мл/с). Контроль значений первичного напряжения осуществлялся вольтметром марки Д 5015. Типичные формы импульсов тока и напряжения разряда приведены на рис. 7. Оба сигнала были записаны цифровым двухканальным осциллографом GW

Instek GDS-2072 (Instek, Тайвань). Входную мощность определяли путем интегрирования произведения обеих форм сигнала за период. Время контакта с разрядной зоной реактора  $\tau$  изменялось в диапазоне приблизительно 0,39 – 5,91 секунд и рассчитывалось в соответствии с [3].



**Рисунок 1.** Схема экспериментальной установки.

1 – внутренний электрод; 2 – внешний электрод; 3 – стеклянная трубка;  
4 – вход газа (кислород); 5 – выход газа; 6 – насос; 7 – раствор красителя;  
8 – мешалка магнитная; 9 – обработанный раствор.

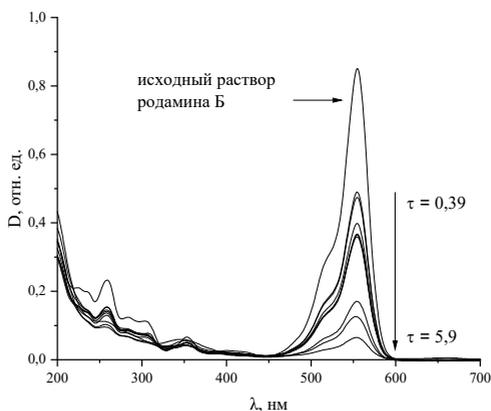
Исследование разложения родамина от его начальной концентрации в растворе показало, что при увеличении концентрации от 5 до 40 мг/л эффективность снижается практически в 2 раза. С целью оптимизации параметров обработки, была выбрана максимальная концентрация в данном диапазоне и все дальнейшие исследования проводились с ней.

Оптимальные параметры, используемые в дальнейшем в работе, представлены в табл. 1. На рис. 2 показано изменение UV-Vis спектров поглощения родамина-Б, который, как хромофор, характеризуется тремя основными полосами поглощения в водном растворе - при 554, 340 и 259 нм [6]; уменьшение последней указывает на деградацию ароматической части красителя до более простых соединений, например карбоновых кислот.

Наиболее важное наблюдение при сравнении спектров - появление в спектре с увеличением времени обработки интенсивных полос вблизи 250 нм. Эффективность деструкции родамина Б от времени контакта с зоной горения плазмы представлена в табл. 2 и показывает, что деструкция протекает с высокой эффективностью (80-85 %) при времени контакта от 2,9 с до 5,91 с.

**Таблица 1.** Параметры эксперимента

Параметр	Значение	Единица измерения
Концентрация красителя (родамин Б)	40	мг/л
Частота	800	Гц
Мощность, вкладываемая в разряд	8,6	Вт/см <sup>3</sup>
Сила тока	13	мА
Напряжение	16,5	кВ
Расход плазмообразующего газа (O <sub>2</sub> )	0,5	л/мин
Время контакта	0,39-5,9	с



**Рисунок 5.** Изменение UV-Vis спектров в процессе обработки растворов, содержащих родамин-Б, от времени контакта с зоной разряда.

**Таблица 2.** Влияние на процесс деструкции времени контакта с зоной горения плазмы

Расход, мл/с	$\tau$ , с	C, ммоль/л	Эффективность, %
0,66	0,39	48,12	43,75
0,58	0,6	46,69	44
0,5	0,81	46,48	53,1
0,4	1,2	33,20	63,5
0,25	2,05	30,29	66,5
0,1	2,9	23,136	79,4
0,017	5,9	17,08	85

Таким образом, можно сделать вывод, что в ДБР процессы деструкции родамина Б протекают с высокой эффективностью, а основным параметром, влияющим на процесс деструкции является время контакта с зоной горения плазмы.

*Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР (Тема №FZZW-2020-0010) с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671). Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-3784.2022.1.3).*

### **Литература:**

- [1] Shen, Y. Synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CuO/ZnO/RGO and its catalytic degradation of dye wastewater using dielectric barrier discharge plasma / Y. Shen, Y. Wang, Y. Chen, J. K. Park, S. Fang, K. Feng // Arabian Journal of Chemistry. – 2023. – V. 16. – №. 4. – P. 104571.
- [2] Kim, S. Construction of an underwater plasma and Fenton hybrid system for the rapid oxidation of organic dyes and antibiotics. / S. H. Kim, J. Seo, Y. Hong, Y. Shin, H. J. Chung, H. R. An, H. U. Lee // Journal of Water Process Engineering. – 2023. – V. 52. – P. 103519.
- [3] Butman M. F., Gushchin A. A., Ovchinnikov N. L., Gusev G. I., Zinenko N. V., Karamysheva S. P., Krämer K. W. Synergistic Effect of Dielectric Barrier Discharge Plasma and TiO<sub>2</sub>-Pillared Montmorillonite on the Degradation of Rhodamine B in an Aqueous Solution // Catalysts. – 2020. – V. 10, № 4. – P. 359.
- [4] Mandlimath T. R., Moliya A., Sathiyarayanan K. I. Synthesis of Bi<sub>2</sub>Mo<sub>3</sub>O<sub>12</sub> and Bi<sub>2</sub>- xRExMo<sub>3</sub>O<sub>12</sub> nanorods (RE= Eu<sup>3+</sup> and Pr<sup>3+</sup> and x= 0.07–0.3): improved photocatalytic activity towards the degradation of rhodamine B dye under visible light // Applied Catalysis A: General. – 2016. – T. 519. – C. 34-47.
- [5] Dire D. J., Wilkinson J. A. Acute exposure to rhodamine B // Journal of Toxicology: Clinical Toxicology. – 1987. – T. 25, № 7. – C. 603-607.
- [6] Cuiping B., Xianfeng X., Wenqi G., Dexin F., Mo X., Zhongxue G., Nian X. Removal of rhodamine B by ozone-based advanced oxidation process // Desalination. – 2011. – T. 278, № 1-3. – C. 84-90.

grisha.gusev.05@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ГАЗОВУЮ ФАЗУ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗРЯДА С ЖИДКИМ КАТОДОМ

**А. В. Чистолинов<sup>1</sup>, Р. В. Якушин<sup>2</sup>, А. А. Лубин<sup>1, 2</sup>, А. В. Перфильева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

В последние два десятилетия наблюдается значительный рост интереса к исследованиям взаимодействия плазмы с поверхностью жидкости [1, 2]. Такое внимание, прежде всего, связано с перспективами практического использования разрядов, контактирующих с жидкостями.

Если плазменно-растворная система организована так, что жидкость является катодом в газовом разряде, то радиационные эффекты в жидкости оказываются наиболее сильными [3]. Это объясняется тем, что в случае разряда с жидким катодом происходит бомбардировка поверхности жидкости положительными ионами, разогнанными в катодном слое. Разряды с жидким катодом являются эффективными источниками активных частиц в жидкости. Поэтому они находят применение в новых методах очистки воды, модифицирования высокомолекулярных соединений, синтезе наноматериалов и многих других.

Задачей настоящей работы являлось исследование переноса органических соединений из водного раствора в газовую фазу под действием разряда постоянного тока, в котором водный раствор, содержащий органические соединения, играет роль катода. Это исследование представляет большой интерес потому, что водный раствор, содержащий, в том числе и органические вещества, может быть поставщиком исходных материалов для плазмохимического процесса в газовой фазе.

В разрядах постоянного тока с жидким катодом имеет место неравновесный перенос молекул растворителя и растворённых веществ в газовую фазу под действием ионной бомбардировки жидкого катода, аналогичный процессу катодного распыления в классическом тлеющем разряде [3, 4]. В случае органических соединений, процесс переноса молекул в газовую фазу сопровождается также частичной деструкцией последних под действием активных частиц, как в растворе, так и в плазме разряда.

Для характеристики переноса вещества из раствора в газовую фазу под действием разряда постоянного тока с жидким катодом вводится коэффициент переноса - величина, равная числу частиц данного вещества, перенесённых в неизменном виде из раствора в газовую фазу в расчете на один бомбардирующий поверхность жидкости ион.

В ходе выполнения работы впервые было проведено систематическое исследование переноса органических соединений в газовую фазу под действием разряда постоянного тока с жидким катодом и были определены коэффициенты переноса для типичных представителей класса спиртов в разряде с жидким катодом.

В ходе выполнения работы использовалась экспериментальная установка, в которой разряд постоянного тока создавался между стержневым металлическим электродом и поверхностью раствора внутри стеклянной разрядной камеры в проточной разрядной ячейке. Компоненты раствора, переходящие в газовую фазу в результате взаимодействия с плазмой разряда, перемещались через разрядную камеру и далее по стеклянной трубке к стеклянному теплообменнику, в котором и происходила их конденсация. Конденсат собирался в специальном пробоприёмнике и в последующем анализировался.

Эксперимент проводился в двух вариантах: без продувки и с продувкой разрядной камеры атмосферным воздухом. Во втором случае продувка атмосферного воздуха через разрядную камеру, осуществлялась со скоростью 280 мл/мин.

В первом случае в качестве органических веществ исследовались 4 вида спиртов: этанол, пропанол-1, бутанол-1 и изопропанол. Во втором случае для приготовления растворов использовалось 3 вида спиртов: изопропанол, бутанол-1 и бензиловый спирт (фенилкарбинол). Для сравнения также использовался раствор без органических примесей. Для приготовления растворов использовалась деионизированная вода, в которую добавлялся гидроксид натрия с концентрацией  $3 \cdot 10^{-3}$  моль/л (120 мг/л), что обеспечивало начальную удельную проводимость растворов 660 мкСм/см.

В экспериментах без продувки исследовалась зависимость коэффициентов переноса спиртов от таких параметров как ток разряда, разрядный промежуток, концентрация спирта в растворе.

Эксперименты с продувкой проводились при концентрации спиртов в растворе 1% объёмный, разрядном токе 80 мА и расстоянии между электродом и поверхностью раствора 6 мм при различном диаметре

разрядных камер и разных режимах перемешивания раствора вблизи поверхности.

В первой серии экспериментов с продувкой была исследована зависимость коэффициентов переноса воды и изопропанола от диаметра разрядной камеры. Было установлено, что коэффициент переноса воды при переходе от разрядной камеры диаметром 8 мм к разрядной камере диаметром 15 мм (рост площади свободной поверхности жидкости в 3,5 раза) падает, а при переходе от разрядной камеры диаметром 15 мм к разрядной камере диаметром 22 мм (рост площади свободной поверхности жидкости в 2,15 раза) не меняется. То есть, было установлено, что с ростом свободной поверхности жидкости коэффициент переноса воды не растёт. Это указывает на то, что перенос компонентов раствора в газовую фазу происходит в основном в самой зоне разряда, а не со свободной поверхности жидкости под действием потоков горячего воздуха. Более высокий коэффициент переноса воды в разрядной камере диаметром 8 мм можно объяснить значительным разогревом стенок камеры из-за малого её диаметра и как следствие закипание жидкости, контактирующей со стенкой. Чтобы избежать этого эффекта все остальные эксперименты проводились с в разрядных камерах диаметром 15 или 22 мм.

Для разрядной камеры диаметром 15 мм было исследовано два режима. В режиме «с перемешиванием раствора» разрядная камера лишь касалась поверхности раствора, и температура вблизи поверхности была, как и в остальной части разрядной ячейки, на уровне 20-30 °С. В режиме «без перемешивания раствора» высота части разрядной камеры, заполненной раствором составляла 5 мм. Этот пятимиллиметровый слой жидкости сильно прогревался и конвективно не перемешивался с остальным раствором из-за более высокой температуры и более низкой плотности.

Было установлено, что в режиме без перемешивания коэффициенты переноса воды и органических соединений существенно выше, чем в режиме с перемешиванием. Так для воды без органических соединений коэффициент переноса воды в режиме без перемешивания в 7,3 раза больше, чем с перемешиванием. Для 1% раствора изопропанола коэффициент переноса воды в режиме без перемешивания в 14 раз больше, чем с перемешиванием, а коэффициент переноса изопропанола в 17,6 раза больше. Для 1% раствора бензилового спирта коэффициент переноса воды в режиме без перемешивания в 8,8 раз больше, чем с перемешиванием, а коэффициент переноса бензилового спирта в 11 раз больше.

Таким образом, установлено, что коэффициенты переноса воды и органических соединений из водных растворов в разряде с жидким катодом существенно зависят от режима перемешивания и температуры поверхности раствора.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).*

**Литература:**

- [1] Vanraes P., Bogaerts A. Plasma physics of liquids - A focused review // Applied Physics Reviews. 2018. Vol. 5. P. 031103.
- [2] Bruggeman P. et al. Plasma-driven solution electrolysis // J. Appl. Phys. 2021. Vol. 129. P. 200902.
- [3] Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. – М.: Наука, 2004. – 497 с.
- [4] Chistolinov A.V., Yakushin R.V., Sargsyan M.A., Khromov M.A., Perfilieva A.V. Study of the discharge with a liquid cathode with organic impurities // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1556. P. 012090.

a-chi@yandex.ru

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ

**С. Ю. Жачкин<sup>1</sup>, Г. И. Трифонов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия

На сегодняшний день в рамках программы импортозамещения все большую популярность на производственных площадях России набирают методы газотермического нанесения покрытий, в частности технология плазменного напыления. Данная технология относится интенсивно развивающемуся научно-технологическому направлению инженерия поверхности [1] и, согласно данным [2], уже нашла применение на ремонтно-восстановительных предприятиях поскольку является эффективным методом по повышению физико-механических и эксплуатационных характеристик деталей машин и механизмов путем напыления функциональных покрытий с заданными свойствами. При этом темпы по требованиям к качеству наносимых покрытий, выдвигаемые современными авиастроительными производствами, постоянно растут. Следовательно, необходимо проводить научно-исследовательские изыскания по привлечению новых подходов, совершенствованию существующих и разработки новых методов и технологий по напылению покрытий.

Известно [3], что рациональное назначение технологических процессов с их возможной оптимизацией в зависимости от поставленных задач тесно связано с проведением теоретических и экспериментальных исследований, протекающих при напылении физических и химических процессов.

Опубликована серия работ, посвященных теоретическим исследованиям и построению математических моделей на основе распространения нестационарных волн в многокомпонентных средах в процессе плазменного напыления [4-7]. На текущем этапе исследований возникает интерес по обобщению полученных результатов с целью получения комплексной математической модели процесса плазменного напыления.

Такая модель, с соответствующим набором входных и выходных параметров будет полезна для анализа закономерностей формирования функциональных покрытий.

Обобщение полученных результатов по исследованию нестационарных волн в процессе плазменного напыления, а также рассмотрению особенностей математического моделирования его отдельных этапов и составляет цель данной работы.

Для исследования распространения нестационарных волн при плазменном напылении при проводимых исследованиях были введено допущения, что габаритные размеры пор среды весьма малы в сравнении с расстоянием, на котором значительному изменению претерпевают физико-механические показатели движения частиц материала напыления.

Также необходимо отметить, что разрабатываемые математические модели распространения упругих волн в пористой среде можно представить, как совокупность уравнений [4, 5]: 1) деформации упруго-вязкопластической фазы представлены в виде суммы упругих и пластических; 2) тензор упругих деформаций связан с тензором напряжений обобщенным законом Гука; 3) тензор скорости пластической деформации связан с тензором напряжений локальным условием пластичности и соотношениями ассоциированного закона течения.

Скорость распространения продольной волны находится

$$G_l^2 = \frac{1}{2(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)} \left( \left( \rho_{11}A_2 - 2\rho_{12}A_1 + \rho_{22} \frac{E(1-\nu_1)}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)} \right) \pm \sqrt{D} \right), \quad (1)$$

$$A_1 = (1-m)R_0, \quad A_2 = mR_0. \quad (2)$$

где  $\rho_{11}$  и  $\rho_{22}$  – эффективные массы фаз;  $\rho_{12}$  – коэффициент динамической связи упруго-вязкопластической фазы и газа;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu_1$  – коэффициент Пуассона;  $m$  – пористость;  $R_0$  – модуль сжимаемости газа.

Скорость распространения поперечной волны находится

$$G_t = \sqrt{\frac{E\rho_{22}}{2(1+\nu_1)(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)}}. \quad (3)$$

По итогам исследования [5] был сделан вывод о том, что составление математической модели на основе распространения упругих волн в двухкомпонентной среде даст основу для детального исследования влияния скоростей продольных и поперечных волн на такие физико-механические и

теплофизические параметры, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициенты сжимаемости и плотности наносимого покрытия.

Представлены основные результаты работ, посвященных распространению нестационарных волн в процессе плазменного напыления и формирования наносимого при этом покрытия.

Перспективным направлением по дальнейшему развитию рассматриваемой темы может являться математическое моделирование распространения поперечных волн в трехкомпонентной среде. В частности, при формировании композитного покрытия на обрабатываемой поверхности детали.

### **Литература:**

- [1] Jorn Larsen-Basse. Surface engineering and the new millennium // Surface Engineering. – 1998. – Vol. 14, No. 2. – P. 81–83.
- [2] Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. – Минск: Беларус. Навука. 2011. – 357 с.
- [3] Харламов М.Ю. Комплексное математическое моделирование процессов плазменно-дугового проволочного напыления покрытий / М.Ю. Харламов, И.В. Кривцун, В.Н. Коржик, А.И. Демьянов // Вестник ЮГУ. 2015. №2 (37). С. 33–41.
- [4] Трифонов Г.И. Математическое моделирование процессов плазменного напыления покрытий трехкомпонентных сред / Г.И. Трифонов, В.С. Поленов, С.Ю. Жачкин // Современные наукоемкие технологии. №10. 2018. С. 131–136.
- [5] Жачкин С.Ю. К вопросу о математическом моделировании процесса плазменного напыления при восстановлении деталей АПК / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, Н.А. Пеньков, А.В. Бирюков // Упрочняющие технологии и покрытия. №4 (196). 2021. С.162–165.
- [6] Трифонов Г.И. Распространение волн ускорения в композитных материалах / Г.И. Трифонов, Кукарских Л.А. // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей / под ред. В.А. Лебедева; Донской государственный технический университет. Ростов-на-Дону: ДГТУ. 2021. С. 167–172.
- [7] Sharifullin S.N. Modeling of the influence of non-stationary waves in three-component medium in the formation of a plasma jet / S.N. Sharifullin, G.I. Trifonov, S.Yu. Zhachkin // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Т. 1328. (012098). DOI: 10.1088/1742-6596/1328/1/012098.

grishakip@yandex.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С АТОМАМИ ИНЕРТНОГО ГАЗА В ЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОМ РАЗРЯДЕ

**Р. Ф. Юнусов<sup>1</sup>, А.И. Миндарова<sup>1</sup>, Э. Р. Юнусова<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия*

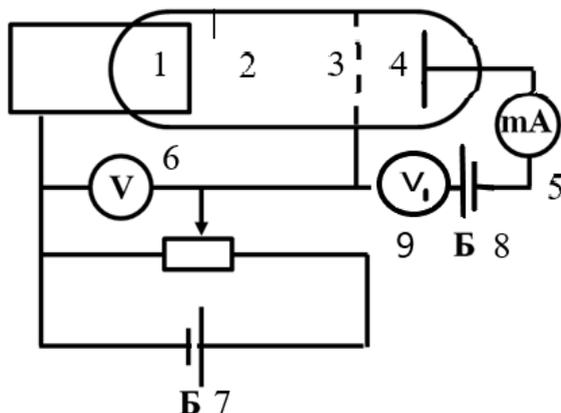
*<sup>2</sup>ГАУЗ ГKB № 7, Казань, Россия*

### **Введение**

Деление газовых разрядов на самостоятельные и несамостоятельные несколько условно. Несамостоятельный разряд, который не может существовать без внешнего источника ионизации, можно также считать начальной фазой самостоятельного разряда. Область применения указанных видов разряда простирается от классических радиоэлектронных приборов (индикаторные и рекламные лампы, тиратроны), озонирования в медицине, газовых лазеров до технологий получения новых материалов (плазмохимия, наноматериалы, нанесение тонких пленок методом катодного распыления вещества) [1,2]. Поэтому дальнейшее исследование особенностей несамостоятельной формы разряда является актуальной задачей и поможет осознанно подойти к решению практических задач. Методика измерения ВАХ разряда, температуры нейтральных частиц газовой среды, газодинамических параметров, осциллограмм описана в работах [3-10]. В работах [11,12] отмечается, что кинетические модели газоразрядной плазмы инертных газов не в состоянии дать надежные абсолютные сечения неупругих переходов, а существующие базы данных постоянно обновляются. Экспериментальные данные в свою очередь носят отрывочный характер и тоже нуждаются в дополнительной проверке. Только объединенные усилия в развитии теоретических и экспериментальных методик позволят получить надежные данные по сечения неупругих соударений электронов с атомами инертных газов.

### **Метод исследования**

Эксперимент осуществлялся на установке, показанной на рисунке 1.

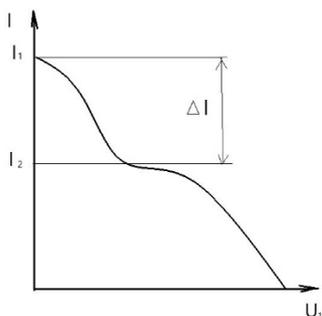


**Рисунок 1.** Схема экспериментальной установки: 1 -накаливаемый катод, 2 – вакуумная лампа с аргоном, 3 – сеточный электрод, 4 – анод, 5 – микроамперметр, 6 – вольтметр для измерения ускоряющего напряжения, 7 – регулируемый источник питания для напряжения на участке катод - сетка, 8 – регулируемый источник запирающего напряжения на участке сетка - анод, 9 – вольтметр для измерения запирающего напряжения.

Основой установки является наполненная аргоном вакуумная трехэлектродная лампа 2. Накаливаемый катод 1 обеспечивает термическую эмиссию электронов внутрь лампы. Ускоряющее напряжение  $U$  между катодом и сеткой 3 регулируется потенциометром в пределах от 0 до 100 В и измеряется вольтметром 6. Запирающее напряжение  $U_1$  между сеткой 3 и анодом 4 регулируется также регулируется потенциометром и измеряется вольтметром 9. Анодный ток регистрируется амперметром 5. Также вольтамперные характеристики были сняты осциллографическим методом, который является возможно менее точным, но более наглядным. В работе использовался осциллограф ОСУ-10В с генератором. Оба метода дают согласованные результаты с погрешностью 10%. В работе [11] отмечается, что до сих пор не существует хорошей теоретической модели разряда в аргоне, позволяющей рассчитать, например, его вольтамперную характеристику. Вольтамперная характеристика задержки позволяет оценить эффективное сечение неупругого столкновения электронов  $\sigma$  с атомами по известной формуле

$$\sigma = \frac{\Delta I k T}{I a p} \quad (1)$$

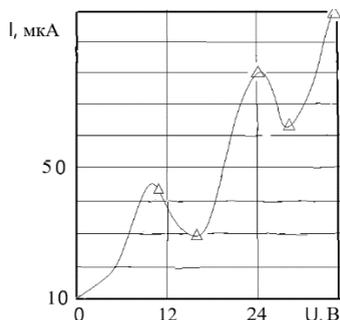
$\sigma$  – эффективное сечение возбуждения атомов аргона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T, p$  – температура и давление газа;  $a$  – расстояние между катодом и сеткой в лампе. Величину разности анодных токов  $\Delta I = I_1 - I_2$ , которая пропорциональна концентрации электронов, которые совершили неупругие столкновения с атомами, как раз можно найти из вольтамперной характеристики задержки как показано на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Зависимость силы тока разряда  $I$  от напряжения задержки  $U_1$ . Здесь ускоряющее напряжение  $U$  задано и остается постоянным  $U > U_B$ .

### Экспериментальные результаты

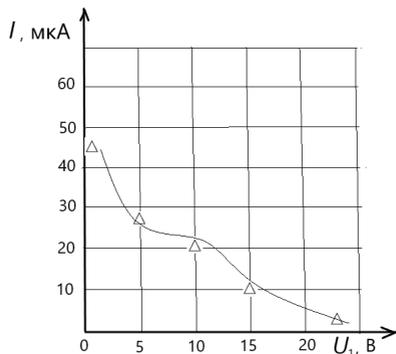
На рисунке 3. приведена вольтамперная характеристика характеристики несамостоятельном разряде с аргоном.



**Рисунок 3.** ВАХ электрического несамостоятельного разряда в аргоне: расстояние катод – сетка  $a = 0,003$  м,  $P = 5$  мм рт. ст.

Вначале с увеличения напряжения  $U$  сила тока разряда  $I$  возрастает. Большинство электронов в этом случае сталкиваются с атомом аргона упруго, без потерь энергии. Но при определенном напряжении сила тока начинает уменьшаться. Это обусловлено тем, что при определенном напряжении упругие столкновения электронов с атомами аргона сменяются неупругими, электроны при этом теряют энергию и не могут преодолеть тормозное электрическое поле на пути от сетки 3 к аноду 4.

На рисунке 4. показана вольтамперная характеристика задержки



**Рисунок 4.** ВАХ задержки несамостоятельного разряда в аргоне:  $P = 5 \text{ мм рт. ст.}$ ,  $T=600\text{К}$ ,  $U = 16 \text{ В}$

По данным этого графика и расчетной формуле эффективное сечение неупругого столкновения электрона с атомом аргона составило  $\sigma = 2 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2$ . Этот результат согласуется с погрешностью 20% с данными работы [12, 13].

### Заключение

В данной работе экспериментально получены вольтамперная характеристика несамостоятельного разряда в аргоне, а также вольтамперная характеристика задержки. Выявлены характерные провалы силы тока разряда, что согласуется с известными данными. По максимумам или минимумам силы тока разряда определен первый потенциал возбуждения атома аргона с точностью 10%. По данным вольтамперной характеристики задержки рассчитано эффективное сечение неупругих столкновений электронов с атомом с точностью 20%.

**Литература:**

1. Raizer Yu.P. Gas Discharge Physics/Raizer Yu.P.-Springer, Berlin, 2011.
2. Yunusov R.F. Heat transfer in a longitudinal glow discharge// Journal of Physics: Conf. Series 789 (2017) 012069.
3. Yunusov R.F., Garipov M.M. Experimental study of heat transfer in a longitudinal glow discharge// Journal of Physics: Conf. Series 927 (2017) 012076.
4. Yunusov R.F., Garipov M.M. Experimental study of voltage fluctuations in a longitudinal glow discharge// Journal of Physics: Conf. Series 927 (2017) 012077.
5. Yunusov R.F., Garipov M.M., Yunusova E.R. Heat Balance in the Positive Column of a Glow Discharge//Journal of Physics: Conf. Series 1058 (2018) 012051.
6. Yunusov R.F., Garipov M.M., Yunusova E.R. Transients in the longitudinal glow discharge//Journal of Physics: Conf. Series 1058 (2018) 012050.
7. Kiselev A.S., Kostrin D.K., Lisenkov A.A. and Smirnov E.A. Determination of the plasma parameters of a glow discharge in long tubes// //Journal of Physics: Conf. Series 789 (2017) 012027.
8. Timerkaev B.A. et al. Longitudinal distribution of electrical parameters in normal glow discharge// Journal of Physics: Conf. Series 567 (2014) 012036.
9. Tazmeev K.K., Tazmeev A.K. and Dautov I.G. Effect of gas injection on energy characteristics of high-current gas discharge with liquid electrolyte cathode// Journal of Physics: Conf. Series 1588 (2020) 012051.
10. Tazmeev K.K. et al. Low-current arc in plasma flow from discharge with liquid electrolyte cathode// Journal of Physics: Conf. Series 2270 (2022) 012028.
11. Д.С. Вершинин, А.В. Козырев, А.Г. Ситников. Константа ионизации электронным ударом в скрещенных  $E \times H$  -полях в слабоионизованной аргоновой плазме//Известия высших учебных заведений. Физика. 2008., №8, С. 3-7.
12. В.П. Афанасьев, Б.М. Смирнов, Д.А. Жияев. Неупругие процессы в газоразрядной плазме инертных газов// ТВТ, 2018, том 56, № 5, с. 645-655.
13. Р.И. Голятина, С.А. Майоров. Сечения столкновения электронов с атомами инертных газов// Прикладная физика, 2021, № 3, С. 11-16.

optanir@mail.ru

## Содержание

Стр.	Название труда
8	<b>CARBON NANOTUBES: FROM SYNTHESIS TO APPLICATIONS</b> <u>A. Nasibulin</u> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <i>Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia</i>
10	<b>ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ НАНОПОРИСТОГО ГЕРМАНИЯ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНАМИ МЕТАЛЛОВ</b> <u>А. Л. Степанов</u> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <i>Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия</i>
15	<b>КИНЕТИКА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ КОРОТКИХ ТЛЕЮЩИХ РАЗРЯДОВ И РАЗРЯДОВ С МИКРОПОЛЫМ КАТОДОМ</b> <u>А. И. Сайфутдинов</u> <sup>1</sup> , С.С. Сысоев <sup>2</sup> , Д.Д. Гушин <sup>1</sup> <sup>1</sup> <i>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия</i> <sup>2</sup> <i>СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия</i>
16	<b>ПЛАЗМЕННЫЙ РАЗРЯД В ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ КАК МЕТОД СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> <u>Н. А. Булычев</u> <sup>1</sup> , С. А. Колесник <sup>1</sup> <sup>1</sup> <i>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия</i>
19	<b>СКВОЗНАЯ МОДЕЛЬ СТРУЙНОГО ВЧИ-РАЗРЯДА Пониженного Давления</b> <u>А. Ю. Шемахин</u> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <i>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия</i>
20	<b>НАНОМЕТРОВЫЕ И АТОМНЫЕ МАСШТАБЫ ТОЧНОСТИ В ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРОЦЕССАХ ТРАВЛЕНИЯ НАНОСТРУКТУР В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ</b> <u>А. В. Мяконьких</u> <sup>1</sup> , К. В. Руденко <sup>1</sup> <sup>1</sup> <i>ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, Москва, Россия</i>
23	<b>«ПОСЛЕЗАВТРА» ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b> <u>Я.О. Желонкин</u> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <i>ООО "ФЕРРИ БАТТ", Казань, Россия</i>
29	<b>ФОРМИРОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ФАЗОВОГО СОСТАВА ШПИНЕЛИ С СРЕДЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ</b> <u>В. В. Шеховцов</u> <sup>1</sup> , <u>А. Б. Улмасов</u> <sup>1</sup> <sup>1</sup> <i>Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Томск, Россия</i>

- 33 **ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СПЕЧЕННОГО ОКСИДА АЛЛЮМИНИЯ**  
И. К. Некрасов<sup>1,2</sup>, И. Ш. Абдуллин<sup>2</sup>, Ф. Р. Сагитова<sup>3,4</sup>  
<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия  
<sup>2</sup>ООО "Плазма-ВСТ", Казань, Россия  
<sup>3</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия  
<sup>4</sup>ООО "ВИЗИОН ТЕХНОЛОДЖИ", Москва, Россия
- 37 **СРАВНЕНИЕ ТИПОВ РАЗРЯДНИКОВ СВЧ ПЛАЗМОТРОНА НА ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ СПОСОБНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ РАСТВОРА ДОЗИМЕТРА ФРИККЕ**  
С. А. Горбатов<sup>1</sup>, Д.В. Басырова<sup>1</sup>, А.В. Тихонов<sup>1</sup>, В.Н. Тихонов<sup>1</sup>, И.А. Иванов<sup>1</sup>.  
<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» — ВНИИРАЭ, Обнинск, Россия
- 40 **ТЕРМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ТОПЛИВНЫХ ГРАНУЛ ПЛАЗМОЙ В ЧИ РАЗРЯДА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ**  
М. Б. Шавелкина<sup>1</sup>, С. Д. Федорович<sup>2</sup>, Д. И. Кавыркин<sup>1,2</sup>, М. А. Шавелкин<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия
- 43 **ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ЦЕОЛИТОВ С НАНЕСЕННЫМИ НА НИХ НИТРАТАМИ МЕДИ И ЦИНКА**  
К. В. Смирнова<sup>1,2</sup>, Ю. А. Лебедев<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия  
<sup>2</sup>Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия
- 47 **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ВЕЩЕСТВОМ В ЭМИССИОННОМ СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ. НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ ВЛИЯНИЯ ТРЕТЬИХ ЭЛЕМЕНТОВ**  
А. Н. Попова<sup>1</sup>, А. С. Мустафаев<sup>1</sup>, В. С. Сухомлинов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
- 52 **ЭФФЕКТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСТЕНИЯ ЯЧМЕНЯ НЕТЕРМАЛЬНОЙ ПЛАЗМОЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**  
С. А. Горбатов<sup>1</sup>, Д.И. Петрухина, В.А. Харламов, М.И. Меджидов, В.Н. Тихонов, И.А. Иванов, А.В. Тихонов, Н.В. Глущенко  
<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» - ВНИИРАЭ, Обнинск, Россия
- 55 **ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПЛЕНОК ALN ОТ СООТНОШЕНИЯ АРГОНА И АЗОТА В ПОТОКЕ ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ**  
Л. В. Баранова<sup>1,2</sup>, Б. Т. Байсова<sup>1,2</sup>, В. И. Струнин<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>ФГАОУ ВО "ОмГУ им Ф.М. Достоевского", Омск, Россия  
<sup>2</sup>Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН (ИРФЭ ОНЦ СО РАН), Омск, Россия

- 60 **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ ОБРАБОТКИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ В ВЧЕ РАЗРЯДЕ Пониженного Давления**  
И. Ш. Абдуллин<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>2</sup>, И. К. Некрасов<sup>1,2</sup>, Ф. Р. Сагитова<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>ООО "Плазма-ВСТ", Казань, респ. Татарстан, Россия  
<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия  
<sup>3</sup>ООО "Визион Технолоджи", Москва, Россия
- 64 **ОСОБЕННОСТИ АЗОТИРОВАНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОТОКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ**  
И. Ш. Абдуллин<sup>1</sup>, С. В. Миронов<sup>2</sup>, И. К. Некрасов<sup>1,2</sup>, Ф. А. Гизатуллина<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>ООО "Плазма-ВСТ", Казань, Россия  
<sup>2</sup>Казанский Федеральный университет, Казань, Россия  
<sup>3</sup>Казанский Национальный Исследовательский Технологический Университет, Казань, Россия
- 67 **ВЛИЯНИЕ SiO<sub>2</sub> НА МОРФОЛОГИЮ ФОРСТЕРИТОВОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО В СРЕДЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ**  
В. В. Шеховцов<sup>1</sup>, Н. К. Скрипникова<sup>1</sup>, А. Б. Улмасов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Томск, Россия
- 70 **ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ КАРБИДА ГАФНИЯ В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ**  
А. А. Свинухова<sup>1,2</sup>, В. В. Шеховцов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Томск, Россия  
<sup>2</sup>ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
- 73 **ВЛИЯНИЕ SiO<sub>2</sub> НА СИНТЕЗ СТЕКЛОКЕРАМИКИ MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> В СРЕДЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ**  
В. В. Шеховцов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия
- 77 **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**  
Д. А. Егошин<sup>1</sup>, Д. О. Новиков<sup>1</sup>, А. В. Павлов<sup>1</sup>, Д. С. Пасынкова<sup>1</sup>, В. Д. Телех<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
- 80 **ПОУРОВНЕВАЯ КИНЕТИКА ВОЗДУХА В ПОСЛЕРАЗРЯДНОЙ ЗОНЕ ОДИНОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА**  
М. Ю. Мельник<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
- 82 **ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
Ю. А. Тимошина<sup>1</sup>, Э. Ф. Вознесенский<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технологический университет", Казань, Россия

- 84 **Формирование стримеров в воздухе при давлении ~ 1 Торр**  
Н. П. Виноградов<sup>1</sup>, В. Ф. Тарасенко<sup>1</sup>, Е. Х. Бакшт<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИСЭ СО РАН, Томск, Россия
- 88 **МОДИФИКАЦИЯ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ АЛИФАТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ БЕЗЭЛЕКТРОДНОМ РАЗРЯДЕ**  
А. А. Лубин<sup>1,2</sup>, А. В. Чистолитов<sup>1</sup>, Р. В. Якушин<sup>2</sup>, А. В. Перфильева<sup>2</sup>, Ю. А. Беспятых<sup>2,3</sup>, Я. Д. Шанский<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Российская Федерация  
<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Российская Федерация  
<sup>3</sup>«Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины имени академика Ю.М. Лопухина Федерального Медико-биологического Агентства», Москва, Россия
- 90 **ПРИМЕНЕНИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ КОЖИ ИЗ ШКУР МОРСКИХ И РЕЧНЫХ РЫБ.**  
Р. Ф. Ахвердиев<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, Г. Р. Рахматуллина<sup>1</sup>, В. П. Тихонова<sup>1</sup>, Д. К. Низамова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "КНИТУ", Казань, Россия
- 94 **МОДИФИКАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ДЕРМЫ ШКУРЫ ЩУКИ НЕРАВНОВЕСНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ**  
Р. Ф. Ахвердиев<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, Г. Р. Рахматуллина<sup>1</sup>, В. П. Тихонова<sup>1</sup>, Д. К. Низамова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "КНИТУ", Казань, Россия
- 98 **ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**  
Р. Ф. Ахвердиев<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, Г. Р. Рахматуллина<sup>1</sup>, В. П. Тихонова<sup>1</sup>, Д. К. Низамова<sup>1</sup>, Л. В. Чапаева<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "КНИТУ", Казань, Россия
- 104 **ТЕРМОХРОМНЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**  
С. А. Гильфанов<sup>1</sup>, Ю. А. Тимошина<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия
- 106 **БАРЬЕРНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНОКОМПОЗИТНЫМИ СЛОЯМИ**  
А. И. Тептина<sup>1</sup>, Ю. А. Тимошина<sup>1</sup>, Э. Ф. Вознесенский<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия
- 108 **БОРСОДЕРЖАЩЕЕ ПОКРЫТИЕ, СФОРМИРОВАННОЕ НА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОМ СПЛАВЕ КОМБИНИРОВАННЫМ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ**  
И. И. Ажажа<sup>1</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>1</sup>, В. В. Шугуров<sup>1</sup>, Ю. Х. Ахмадеев<sup>1</sup>, Е. А. Петрикова, М. А. Мокеев  
<sup>1</sup>ИСЭ СО РАН, Томск, Россия

- 112 **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ДВУХЧАСТОТНОЙ ВЧ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ФАЗОВО-РАЗРЕШЁННОЙ ОЭС.**  
М. А. Богданова<sup>1</sup>, Д. Р. Шибанов<sup>1</sup>, Д. В. Лопаев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
- 116 **АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СОХРАНЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОКРАСКИ НА НАТУРАЛЬНЫХ ТКАНЯХ**  
А. Р. Гарифуллина<sup>1</sup>, М. В. Антонова<sup>1</sup>, А. А. Хубатхузин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*КНИТУ, Казань, Россия*
- 120 **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО РЕАКТОРА В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА ГЕРМАНИЕВЫХ И КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР**  
А. . Сайфутдинов, Р. . Фазулзянов<sup>1</sup>, А. . Молостова<sup>1</sup>, Н. . Германов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия*
- 121 **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕРСИИ СИЛАНА В СЛАБОТОЧНОМ ТЛЕЮЩЕМ МИКРОРАЗРЯДЕ.**  
А. . Уланова<sup>1</sup>, А. . Сайфутдинов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия*
- 123 **Механизмы затухания микроволновых спиновых сигналов в разбавленных парамагнетиках**  
Н.Я. Асадуллина<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия*
- 124 **УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В ЦЕЛЯХ УМЕНЬШЕНИЯ БРЫЗГОВЫХ ДЕФЕКТОВ**  
Р. Р. Рахимов<sup>1</sup>, Р. Р. Саубанов<sup>1</sup>, В. А. Песошин<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*Набережночелнинский институт (филиал) КФУ, Набережные Челны, Россия*  
<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия*
- 128 **ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВОДЫ НА МОДИФИЦИРОВАННОМ КОБАЛЬТОСОДЕРЖАЩИМИ НАНОСТРУКТУРАМИ**  
П. Я. Эндерс<sup>1,2,3</sup>, Е. А. Соловьев<sup>1,2,3</sup>, Т. П. Султанов<sup>1,2,3</sup>, К. В. Холин<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>*Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, ФИЦ РАН, Казань, Россия*  
<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*  
<sup>3</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия*
- 131 **ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА МОДИФИЦИРОВАННОМ НИКЕЛЕВЫМИ ЧАСТИЦАМИ СТЕКЛОУГЛЕРОДНОМ ЭЛЕКТРОДЕ**  
Е. А. Соловьев<sup>1,2,3</sup>, П. Я. Эндерс<sup>1,2</sup>, Т. П. Султанов<sup>1,2,3</sup>, К. В. Холин<sup>1,2,3</sup>  
<sup>1</sup>*Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, ФИЦ РАН, Казань, Россия*  
<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*  
<sup>3</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия*

- 135 **КИНЕТИКА СВЧ-РАЗРЯДОВ И ЛАЗЕРНО-ИНИЦИИРОВАННЫХ СВЧ-РАЗРЯДОВ В АЗОТЕ**  
А. И. Сайфутдинов<sup>1,2</sup>, Е. В. Кустова<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербурге, Россия
- 136 **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЛАЗМЕННО-РАСТВОРНОГО СИНТЕЗА ЧАСТИЦ СОДЕРЖАЩИХ КАТИОНЫ ЖЕЛЕЗА, КОБАЛЬТА И НИКЕЛЯ.**  
К. В. Смирнова<sup>1,2</sup>, П. А. Игнатъева<sup>1</sup>, А. Н. Иванов<sup>1</sup>, Д. А. Шутов<sup>1</sup>, В. В. Рыбкин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия  
<sup>2</sup>Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Толчичева РАН, Москва, Россия
- 139 **ФОРМИРОВАНИЕ ПДС ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ ВОЗДУХА В ДЛИННОЙ ТРУБКЕ**  
Н. П. Виноградов<sup>1</sup>, В. Ф. Тарасенко<sup>1</sup>, Е. Х. Бакшт<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИСЭ СО РАН, Томск, Россия
- 143 **ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ ПЛЕНОК ПОЛИЭТИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В АТМОСФЕРЕ**  
М. А. Мокеев<sup>1</sup>, М. С. Воробьев<sup>1</sup>, С. Ю. Дорошкевич<sup>1</sup>, М. С. Торба<sup>1</sup>, Н. Н. Коваль<sup>1</sup>, Р. А. Картавцов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия
- 148 **ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ АНОРТИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ**  
М. А. Семеновых<sup>1</sup>, Н. К. Скрипникова<sup>1</sup>, В. В. Шеховцов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия
- 152 **УПРАВЛЯЕМЫЙ СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОДУГОВОМ РАЗРЯДЕ**  
А. В. Зайковский<sup>1</sup>, И. Б. Юдин<sup>1</sup>, М. А. Морозова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, РФ
- 156 **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ НА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИХ В НТП КОРОННОГО РАЗРЯДА.**  
Н. В. Шкодич<sup>1</sup>, А. М. Ляхович<sup>1</sup>, И. А. Сотников<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия
- 159 **ЗАРЯДОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЁНОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ КОРОННОГО РАЗРЯДА**  
И. А. Сотников<sup>1</sup>, Н. В. Шкодич<sup>1</sup>, А. М. Ляхович<sup>1</sup>, Э. М. Галиханов<sup>1</sup>, И. А. Сотников<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия
- 162 **НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА В ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ**  
Д. В. Терешонок<sup>1</sup>, М. А. Саргсян<sup>1</sup>, М. Х. Гаджиев<sup>1</sup>, А. А. Лубин<sup>1</sup>, З. Г. Карчугаева<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Объединённый институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, РФ

- 163 **КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ ПОРОШКОВ СЛОЖНОГО СОСТАВА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ СОЛЕЙ КОБАЛЬТА И МЕДИ**  
А. А. Игнатъев<sup>1</sup>, А. Н. Иванов<sup>1</sup>, П. А. Игнатъева<sup>1</sup>, Д. А. Шутов<sup>1</sup>, В. В. Рыбкин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИГХТУ, Иваново, Россия
- 166 **Модификация поверхности обкладок конденсатора, путем осаждения на них наноструктур меди, полученных методом ионного распыления в потоке газа**  
А.О. Софроницкий<sup>1</sup>, Ж. А. Уктамов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
- 168 **3D РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ**  
А. В. Бернацкий<sup>1</sup>, И. И. Драганов<sup>1,2</sup>, Н. А. Дятко<sup>1,3</sup>, И. В. Кочетов<sup>1,3</sup>, В. Н. Очкин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия  
<sup>3</sup>Государственный научный центр РФ "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", Троицк, Россия
- 171 **ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОЙ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ НА НАНОСТРУКТУРЫ ТИТАНОГАФИНИЕВЫХ НИТРИДОВ**  
М. М. Гребенщикова<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, М. М. Миронов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия
- 175 **КОЛЛЕКТИВНАЯ ДИНАМИКА РАВНОВЕСНОЙ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ. САМОСОГЛАСОВАННАЯ РЕЛАКСАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ**  
И. И. Файрушин<sup>1</sup>, А. В. Мокшин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
- 176 **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ В ВВОДНЫХ РАСТВОРАХ НИТРАТОВ ЖЕЛЕЗА И ЦИНКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА**  
П. А. Игнатъева<sup>1</sup>, А. Н. Иванов<sup>1</sup>, К. В. Смирнова<sup>1</sup>, Д. А. Шутов<sup>1</sup>, А. А. Игнатъев<sup>1</sup>, В. В. Рыбкин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИГХТУ, Иваново, Россия
- 180 **ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА ГАЗА НА ПАРАМЕТРЫ ТЛЕЮЩЕГО МИКРОРАЗРЯДА В ГЕЛИИ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ**  
А. И. Сайфутдинов<sup>1</sup>, Х. С. Нуриддиов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
- 185 **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**  
М. А. Доронина<sup>1</sup>, Б. Н. Галимзянов<sup>1</sup>, А. В. Мокшин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КФУ, Казань, Россия

- 187 **О ПРОБЛЕМЕ ПОЛУЧЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА У ПЛЕНОК МОЛИБДЕНА**  
В. А. Анофриев<sup>1</sup>, А. С. Антонов<sup>1</sup>, Н. Ю. Сдобняков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО ТвГУ, Тверь, Россия
- 190 **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiAlN**  
Е. О. Крайнова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИСЭ СО РАН, Томск, Россия
- 194 **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ: НАКЛОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ**  
В. О. Кузьменко<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФТИАН им. К. А. Валиева РАН, Москва, Россия
- 197 **ЗАЩИТА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ Ti-AL СПЛАВОВ ОТ ОКИСЛЕНИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ПОКРЫТИЯ AL-CR+Y-AL-O**  
А. А. Маслов<sup>1</sup>, А. Ю. Назаров<sup>1</sup>, А. А. Николаев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Уфимский университет науки и технологий", Уфа, Россия
- 200 **СИНТЕЗ SiC В СРЕДЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ**  
Р. Д. Герасимов<sup>1,2</sup>, В. В. Шеховцов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Томск, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
- 204 **О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ВОДНОРАСТВОРНЫМ КАТОДОМ В КОМБИНАЦИИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ОКИСЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЯ**  
Г. Х. Тазмеев<sup>1</sup>, Р. Н. Тазмеева<sup>1</sup>, Х. К. Тазмеев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Россия
- 206 **СИНТЕЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЁНОК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И КОНЦЕНТРАЦИЯХ АЗОТА В СВЧ ПЛАЗМЕ**  
А. К. Мартянов<sup>1</sup>, И. А. Тяжелов<sup>1</sup>, С. С. Савин<sup>2</sup>, В. С. Седов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия  
<sup>2</sup>МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия
- 208 **ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЙ-КРЕМНИЙ ОБЛУЧЕНИЕМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ АРГОН ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ИНДУКЦИОННОГО ВЧ РАЗРЯДА**  
В. И. Бачурин<sup>1</sup>, И. И. Амиров<sup>1</sup>, К. Н. Лобзов<sup>1,2</sup>, Л. А. Мазалецкий<sup>1,2</sup>, С. Г. Симакин<sup>1</sup>, М. А. Смирнова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН, Ярославль, РФ  
<sup>2</sup>Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, РФ

- 212 **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПОЛУЧЕНИЮ CORE-SHELL ПОРОШКОВ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ**  
К. Н. Каримов<sup>1</sup>, Э. Ф. Вознесенский<sup>1</sup>, Я. О. Желонкин<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия  
<sup>2</sup>ООО "ФЕРРИ ВАТТ", Казань, Россия
- 221 **Транзисторы на основе наночастиц ZnO нанесенных методом ионного распыления в потоке газа.**  
А. О. Софроницкий<sup>1</sup>, А. А. Масынов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
- 223 **НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ УПРОЧНЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ВИБРОПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ**  
С. Н. Шарифуллин<sup>1</sup>, А. Т. Байниязова<sup>2</sup>, М. М. Абжаев<sup>2</sup>, Р. Р. Гилязетдинов<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия  
<sup>2</sup>Кызылординский государственный университет им. Коркыт ата, Кызылорда, Казахстан  
<sup>3</sup>Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия
- 227 **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ТОНКОЙ НАСТРОЙКИ СИНТЕЗА ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МЕТОДОМ АЭРОЗОЛЬНОГО CVD**  
Э. М. Хабушев<sup>1</sup>, Д. В. Красников<sup>1</sup>, Е. Е. Агафонова<sup>1</sup>, В. А. Кондрашов<sup>1</sup>, В. Я. Яковлев<sup>1</sup>, А. Г. Насибулин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Сколковский Институт науки и технологий, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия
- 228 **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИОН-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ В ТЛЕЮЩИХ РАЗРЯДАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА**  
С. И. Елисеев<sup>1, 2</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>2</sup>ООО "Лаборатория им. В. А. Бурцева", Санкт-Петербург, Россия
- 229 **О ТОЧНОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ПУАССОНА-БОЛЬЦМАНА И ПУАССОНА-ФЕРМИ-ДИРАКА**  
И. И. Файрушин<sup>1, 2</sup>  
<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия  
<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия
- 230 **ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГАЗОВ НА ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА В МИКРОВОЛНОВОМ РАЗРЯДЕ В ЖИДКОМ УГЛЕВОДОРОДЕ**  
Т. С. Батукаев<sup>1</sup>, И. В. Билера<sup>1</sup>, Г. В. Крашевская<sup>1, 2</sup>, Ю. А. Лебедев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Толчьева Российской академии наук, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

- 234 **О СТРУКТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МОНО- И БИНАРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОКПЕТОК**  
Д. Н. Соколов<sup>1</sup>, Н. Ю. Сдобняков<sup>1</sup>, О. В. Полев<sup>1</sup>, В. С. Мясниченко<sup>1</sup>, К. Г. Савина<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», Тверь, Россия
- 238 **НАНОМАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПЛАЗМОЙ В ЖИДКОСТИ: ПРИМЕНЕНИЕ В ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКАХ ТОКА**  
Е. В. Белецкий<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
- 242 **ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ КАК МЕТОД СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С ОКСИДОМ ГРАФЕНА**  
Ю. В. Иони<sup>1,2</sup>, И. Е. Рассказов<sup>1,3</sup>, Е. И. Ефремова<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>ИОНХ РАН, Москва, Россия  
<sup>2</sup>РТУ МИРЭА, Москва, Россия  
<sup>3</sup>НИТУ МИСИС, Москва, Россия
- 245 **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОКИСЛЕНИЕ БЕНЗОЛА И ТОЛУОЛА В ПЛАЗМЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА**  
А. В. Лещик<sup>1</sup>, А. Н. Очерedyко<sup>1</sup>, А. Ю. Рябов<sup>1</sup>, Т. В. Петренко<sup>1</sup>, С. В. Кудряшов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт Химии Нефти СО РАН, Томск, Россия
- 249 **СИНТЕЗ И КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОСЕНСОРНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА МЕДИ И SP1-УГЛЕРОДА**  
А. В. Смирнов<sup>1,2</sup>, В. С. Аbrukов<sup>1</sup>, П. С. Платонов<sup>1,2</sup>, Д. В. Петров<sup>1,2</sup>, Е. С. Тютнеров<sup>1,2</sup>, Г. М. Сорокин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия  
<sup>2</sup>Ассоциация молодых физиков Чувашии, Чебоксары, Россия
- 251 **РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ПОРИСТОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА**  
Г. А. Никифоров<sup>1</sup>, Б. Н. Галимзянов<sup>1</sup>, А. В. Мокшин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
- 252 **ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ В АКУСТИЧЕСКОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЯХ**  
Д. А. Тукмаков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИММ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, РФ
- 256 **РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗА В ТРУБЕ С ОБЪЕМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОТЫ**  
С. А. Фадеев<sup>1</sup>, Л. Р. Шайдуллин<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия  
<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, Казань, Россия

- 258 **ЧАСТИЦЫ С РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ, ИМЕЮЩИХ МАЛЫЙ РАДИУС КРИВИЗНЫ, ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ**  
В. Ф. Тарасенко<sup>1</sup>, Д. В. Белоплотов<sup>1</sup>, М. И. Ломаев<sup>1</sup>, А. Н. Панченко<sup>1</sup>, Д. А. Сорокин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБУН Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия
- 262 **РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИМПУЛЬСНОГО ФОТОННОГО ОТЖИГА ИТО ПОКРЫТИЙ**  
В. Д. Городинов<sup>1</sup>, Л. Ю. Володин<sup>1</sup>, М. А. Мелкомуков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
- 266 **СИНТЕЗ БИНАРНЫХ НАНОСЛАВОВ: ПРОБЛЕМА ПОЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ**  
К. Г. Савина<sup>1</sup>, Д. Р. Зорин<sup>1</sup>, С. С. Богданов<sup>1</sup>, Н. Ю. Сдобняков<sup>1</sup>, П. М. Ершов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тверской Государственный Университет», Тверь, Россия
- 270 **ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ХИТОЗАНА ДЛЯ АГРОНОМИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ**  
В. А. Титов<sup>1</sup>, И. К. Наумова<sup>2</sup>, А. В. Хлюстова<sup>1</sup>, Д. С. Ульянова<sup>2</sup>, В. А. Титов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия  
<sup>2</sup>Ивановский государственный университет, Иваново, Россия
- 274 **О МНОГООБРАЗИИ СЦЕНАРИЕВ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В БИНАРНЫХ НАНОЧАСТИЦАХ СО-AU**  
С. С. Богданов<sup>1</sup>, К. Г. Савина<sup>1</sup>, В. С. Мясниченко<sup>1</sup>, Н. Ю. Сдобняков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тверской Государственный университет», Тверь, Россия
- 277 **ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПЛЕНОК ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА**  
Т. Г. Шикова<sup>1</sup>, С. А. Смирнов<sup>1</sup>, А. С. Поспелов<sup>1</sup>, И. И. Сажин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФБГОУВО «ИГХТУ», Иваново, Россия
- 282 **О ПРОБЛЕМЕ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НАНОПОКРЫТИЙ**  
А. В. Низенко<sup>1</sup>, В. А. Анофриев<sup>1</sup>, Н. Ю. Сдобняков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО ТвГУ, Тверь, Россия
- 284 **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И УСЛОВИЙ В НАПЫЛИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ НА ЛАЗЕРНУЮ АБЛЯЦИЮ УВСО КЕРАМИКИ**  
И. С. Позыгун<sup>1</sup>, Г. М. Серопян<sup>1</sup>, С. А. Сычев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия
- 288 **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕВРАЗИЙСКОЙ ПАТЕНТНО-ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ (ЕАПАТИС) ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**  
С. В. Лапушкин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Евразийское патентное ведомство, Москва, Россия

- 290 **СПЕКТРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ 80-180 А ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ПО ПОВЕРХНОСТИ ФЕРРИТА**  
С. М. Климович<sup>1,2</sup>, А. В. Бернацкий<sup>1</sup>, С. Н. Андреев<sup>1</sup>, А. П. Шевелько<sup>1</sup>, С. Н. Цхай<sup>1</sup>, С. Ю. Савинов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
- 293 **ОСОБЕННОСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК РВТЕ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТАКТА С ПОДЛОЖКОДЕРЖАТЕЛЕМ**  
Я. Д. Белов<sup>1</sup>, С. П. Зимин<sup>1,2</sup>, И. И. Амиров<sup>1</sup>, Л. А. Мазалецкий<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, Ярославль, Россия  
<sup>2</sup>ЯрГУ им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия
- 297 **АНОМАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ЖИДКОЙ СУРЬМЫ: АВ-INITIO АНАЛИЗ**  
А. А. Цыганков<sup>1</sup>, Б. Н. Галимзянов<sup>1</sup>, А. В. Мокшин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия
- 299 **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНОГО СТРУЙНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА Пониженного Давления**  
Е. С. Самсонова<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1,2</sup>, А. Ю. Шемахин<sup>1</sup>, Т. Н. Терентьев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>К(П)ФУ, Казань, Россия  
<sup>2</sup>КНИТУ, Казань, Россия
- 300 **ИЗОТЕРМЫ АДсорбции ГАЗОВ В НАНОПорИСТЫХ LOW-K ДиЭЛЕКТРИКАХ В УСЛОВИЯХ КРИОГЕННОГО ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ.**  
Р. А. Гайдукасов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, Москва, Россия, Москва, Россия
- 304 **МОДЕЛИРОВАНИЕ Вихревой РЕШЕТКИ СВЕРХПРОВОДНИКА ВТОРОГО РОДА С НЕРЕГУЛЯРНОСТЬЮ И ВАКАНСИЯМИ**  
А. В. Минкин<sup>1</sup>, С. А. Демин<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ЕИ КФУ, Елабуга, Россия  
<sup>2</sup>КФУ, Казань, Россия
- 307 **МОДЕЛЬ ТОМСОНА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ**  
Р. Н. Гайнуллин<sup>1</sup>, А. В. Герасимов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия
- 310 **ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ВЧ-МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В АРГОНЕ**  
А. Ю. Савин<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, А. Г. Лучкин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия

- 314 **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДИЦИНСКИХ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
А. С. Парсанов<sup>1</sup>, И. В. Красина<sup>1</sup>, М. В. Антонова<sup>1</sup>, А. Р. Ибатуллина<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия
- 318 **ПЛАЗМЕННАЯ ОЧИСТКА КАК ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП МОДИФИКАЦИИ УГЛЕВОЛОКНА**  
А. Р. Ибатуллина<sup>1</sup>, М. В. Антонова<sup>1</sup>, И. В. Красина<sup>1</sup>, А. С. Парсанов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технологический университет", Казань, Россия
- 322 **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДИФфуЗИИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АМИНОСМОЛ ПОТОКОМ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ ПРИ НАПОЛНЕНИИ КОЖИ**  
И. И. Латфуллин<sup>1</sup>, А. В. Островская<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия
- 325 **ВЛИЯНИЕ ПОТОКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ АМИНОСМОЛ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОЖИ**  
И. И. Латфуллин<sup>1</sup>, А. В. Островская<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, Россия
- 329 **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СТРУИ ЭЛЕКТРОЛИТА С ТОКОМ**  
К. А. Гашигуллин<sup>1</sup>, К. Ш. Мастюков<sup>1</sup>, М. Е. Сухих<sup>1</sup>, В. С. Желтухин<sup>1</sup>, Р. Р. Каюмов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, Казань, Россия
- 332 **РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ПОТОКЕ ГЕЛИЯ**  
Б. А. Тимеркаев<sup>1</sup>, О. А. Петрова<sup>1</sup>, А. И. Сайфутдинов<sup>1</sup>, Д. И. Исрафилов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия  
<sup>2</sup>КФУ, Казань, Россия
- 340 **СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ ПЛАЗМЫ С ДРЕВЕСИНОЙ**  
В. А. Черемных<sup>1</sup>, Д. В. Корженко<sup>2</sup>, А. А. Клопотов<sup>1</sup>, Г. Г. Волокитин<sup>1</sup>, М. С. Сыртанов<sup>2</sup>, В. В. Шеховцов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия  
<sup>2</sup>Томский политехнический университет, Томск, Россия
- 345 **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ**  
Р. Ш. Нагимов<sup>1</sup>, А. А. Николаев<sup>1</sup>, А. Ю. Назаров<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

- 347 **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
КОАКСИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАВНОМЕРНОСТЬ  
ПОТОКА ИОНОВ В СИСТЕМЕ РЕАКТИВНОГО ИННО -  
ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ**  
А. В. Абрамов<sup>1</sup>, Е. А. Панкратова<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия  
<sup>2</sup>Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина.,  
Воронеж, Россия
- 351 **СТАБИЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА  
КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОН  
ОКСИДА НИКЕЛЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ**  
В. В. Кузнецова<sup>1,2</sup>, Г. Р. Низамеева<sup>1,3</sup>, Э. М. Лебедева<sup>1</sup>, Р. Р. Гайнуллин<sup>1</sup>, Н. А.  
Кузина<sup>3</sup>, И. Р. Низамеев<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, ФИЦ РАН, Казань, Россия  
<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.  
Туполева-КАИ, Казань, Россия  
<sup>3</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань,  
Россия
- 355 **ФФП-ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ЭФФЕКТОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ  
ПАМЯТИ В ДИНАМИКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ МАГНИТНОЙ  
АКТИВНОСТИ**  
С. А. Демин<sup>1</sup>, В. А. Юнусов<sup>1</sup>, А. В. Минкин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия
- 359 **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАЮЩЕГО МОДУЛЯ ДЛЯ  
ИМПУЛЬСНОЙ ФОТОННОЙ МОДИФИКАЦИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**  
М. А. Мелкомуков<sup>1</sup>, В. Д. Городинов<sup>1</sup>, Л. Ю. Володин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
- 364 **СИНТЕЗ НАНОАЛМАЗОВ В АРГОНОВОЙ ДУГЕ ИЗ ПАРОВ  
УГЛЕРОДА**  
Б. А. Тимеркаев<sup>1</sup>, Н. Г. Андреева<sup>1</sup>, Б. Р. Шакиров<sup>1</sup>, Р. . Шайхаттаров<sup>1</sup>, Р. .  
Курбангалеев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
- 368 **ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ДЕФЕКТНЫХ УГЛЕРОДНЫХ  
НАНОТРУБОК В УТОПЛЕННОМ В МАЗУТ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ  
МИКРОРАЗРЯДЕ.**  
Б. А. Тимеркаев<sup>1</sup>, И. Г. Галеев<sup>1</sup>, Г. Р. Фархутдинова<sup>1</sup>, Н. Г. Андреева<sup>1</sup>, А. Н.  
Галиев<sup>1</sup>, Б. Р. Шакиров<sup>1</sup>, Т. Я. Т.Я.Асадуллин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
- 373 **ИЗУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО  
РАЗРЯДА В ПОТОКЕ МЕТАНА ПОСРЕДСТВОМ ОПТИКО-  
ЭМИССИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА**  
А. Р. Гарифуллин<sup>1</sup>, М. Ф. Шаехов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «КНИТУ», Казань, Российская Федерация

- 377 **PLASMA-TREATED CARBON NANOTUBES FOR FAST INFRARED BOLOMETERS**  
Т. Н. Куртукова<sup>1</sup>, Д. С. Копылова<sup>1</sup>, Н. И. Рагинов<sup>1</sup>, И. М. Хабушев<sup>1</sup>, И. В. Новиков<sup>1</sup>, С. И. Серебrenникова<sup>1</sup>, Д. В. Красников<sup>1</sup>, А. Г. Насибулин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия
- 378 **ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ БАКТЕРИЦИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ДВУХРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ**  
М. М. Гребенщикова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "КНИТУ", Казань, Россия
- 381 **ПЛАЗМЕННО-ЖИДКОСТНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИЕ**  
Р. Р. Каюмов<sup>1</sup>, Р. Р. Марданов<sup>1</sup>, М. Ф. Ахатов<sup>1</sup>, А. А. Султанов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
- 384 **МНОГОКАНЛЬНЫЙ РАЗРЯД ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗАГРЯЗНЕННОЙ ВОДЫ**  
М. Ф. Ахатов<sup>1</sup>, Р. Р. Каюмов<sup>1</sup>, И. И. Гайсин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ, Казань, Россия
- 387 **ПРИМЕР КОМПЛЕКСНОГО РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОЙ РАДИАЦИОННО-МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**  
Е. А. Воронина<sup>1</sup>, А. Г. Полянский<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
- 391 **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОСЕКУНДНЫХ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ОПТИМИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**  
С. И. Елисеев<sup>1,2</sup>, А. А. Самохвалов<sup>1</sup>, А. А. Смирнов<sup>1</sup>, А. К. Сергушечев<sup>1</sup>, А. В. Бурцев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ООО "Лаборатория им. В. А. Бурцева", Санкт-Петербург, Россия  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
- 393 **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИОНИЗАЦИИ ГАЛОГЕНЗАМЕЩЕННЫХ АРОМАТИЧЕСКИХ АМИНОВ**  
Е. С. Осинава<sup>1</sup>, Л. А. Лузенина<sup>1</sup>, Е. П. Баберкина<sup>1</sup>, В. В. Беляков<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия  
<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия
- 396 **КОНСТРУКЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРЕТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МАЛОМОЩНЫХ УСТРОЙСТВ**  
А.С. Большакова<sup>1</sup>, А. М. Ляхович<sup>1</sup>, И. А. Сотников<sup>1</sup>, Э.М. Галиханов  
<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия
- 399 **МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**  
А. А. Калеева<sup>1</sup>, И. Г. Даутов<sup>1</sup>, А. А. Шарипова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

- 403 **ВЛИЯНИЕ ФИНИШНОЙ ПОЛИРОВКИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПОКРЫТИЯ**  
Р. Ш. Нагимов<sup>1</sup>, А. Ю. Назаров<sup>1</sup>, А. А. Николаев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Уфимский университет науки и технологий, Уфа*
- 405 **КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ NiO-PEDOT:PSS В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОГО СЕНСОРА НА ДИОКСИД АЗОТА**  
Э. М. Лебедева<sup>1</sup>, Г. Р. Низамеева<sup>1,2</sup>, Р. Р. Гайнуллин<sup>1</sup>, В. В. Кузнецова<sup>1</sup>, И. Р. Низамеев<sup>1,3</sup>  
<sup>1</sup>*Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова-ФИЦ РАН, Казань, Россия*  
<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия*  
<sup>3</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева, Казань, Россия*
- 408 **ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ НИОБИЕМ**  
Д. А. Шпанов<sup>1</sup>, М. С. Воробьев<sup>1</sup>, П. В. Москвин<sup>1</sup>, Е. А. Петрикова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*ИСЭ СО РАН, Томск, Россия*
- 412 **ИССЛЕДОВАНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА, ПРИМЕНЯЕМОГО В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССАХ**  
Р. В. Рудаков<sup>1</sup>, М. С. Сержантова<sup>1</sup>, В. И. Бойков, О. С. Нуйа  
<sup>1</sup>*СПБ ГУАП, Санкт-Петербург, Россия*
- 416 **СИНТЕЗ НАНОАЛМАЗОВ И АЛМАЗОПОДОБНЫХ НАНОПЛЕНОК В МАГНЕТРОННОМ РАЗРЯДЕ**  
А. Н. Галиев<sup>1</sup>, И. З. Нуруллин<sup>1,2</sup>, Б. А. Тимеркаев<sup>2</sup>, З. Х. Исрафилов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (АО «НПО ГИПО»), Казань, Россия*  
<sup>2</sup>*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева (КНИТУ-КАИ), Казань, Россия*
- 419 **СИНТЕЗ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕР-ПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЮЩЕГОСЯ В ПОТОКЕ ГАЗА**  
Д. А. Зуза<sup>1</sup>, В. О. Нехорошев<sup>1</sup>, А. В. Батраков<sup>1</sup>, И. А. Курзина<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*  
<sup>2</sup>*Томский государственный университет, Томск, Россия*
- 422 **МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОАТОМНЫХ МОЛЕКУЛ С СОДЕРЖАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ Н, С, N, O, S.**  
М. Б. Юнусов<sup>1</sup>, Р. М. Хуснутдинов<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*  
<sup>2</sup>*Удмуртский федеральный научный центр УрО РАН, Ижевск, Россия*

- 425 **ПЛАЗМЕННЫЙ РЕАКТОР ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЛАЗМА-СТИМУЛИРОВАННЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
Н. А. Ашурбеков<sup>1</sup>, М. З. Закарьяева<sup>1,2</sup>, К. О. Иминов<sup>1</sup>, К. М. Рабаданов<sup>1,3</sup>, Г. Ш. Шахинов<sup>1</sup>, А. А. Муртазаева<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Дагестанский Государственный Университет, Махачкала, Россия  
<sup>2</sup>Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Россия  
<sup>3</sup>Харбинский Политехнический Университет, Харбин, Китай
- 429 **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ СЛОЕВ ГИБКИХ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСОВ**  
К. С. Куликов<sup>1</sup>, Ю. А. Кенжебаева, В. А. Миличко<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербурге, Россия
- 430 **ВОССТАНОВЛЕНИЕ СИЛ МЕЖЧАСТИЧНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЮКАВА СИСТЕМЫ ПРИ ПОМОЩИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**  
Р. А. Хабибуллин<sup>1</sup>, А. В. Мокшин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия
- 432 **ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ТОКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ С ВОДНОРАСТВОРНЫМИ КАТОДАМИ**  
Х. К. Тазмеев<sup>1</sup>, А. Х. Тазмеев<sup>1</sup>, Г. Х. Тазмеев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт, Россия
- 435 **САМООРГАНИЗАЦИЯ ЧАСТИЦ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО УГЛЕРОДА В ЭТАНОЛЕ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ОСАЖДЕНИИ.**  
И. В. Моряков<sup>1</sup>, З. А. Заклецкий<sup>1</sup>, Д. В. Малахов<sup>1</sup>, А. М. Анпилов<sup>1</sup>, А. С. Конькова<sup>1</sup>, С. В. Кузнецов<sup>1</sup>, Н. Г. Борисенко<sup>2</sup>, Н. Г. Гусейн-заде<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г Москва, Россия  
<sup>2</sup>Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, г Москва, Россия
- 439 **МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИПРОПИЛЕНА СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДУГОЙ**  
С. Д. Дондуков<sup>1</sup>, К. А. Демин<sup>2</sup>, С. С. Агнаев<sup>1</sup>, А. Л. Петров<sup>1</sup>, А. Н. Хаглеев<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Российская Федерация  
<sup>2</sup>Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Российская Федерация
- 443 **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНТРАКЦИИ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА В ГЕЛИИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ**  
А. А. Сайфутдинова<sup>1</sup>, А. Р. Мардеев<sup>1</sup>, А. А. Галиев<sup>1</sup>, А. И. Сайфутдинов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия
- 446 **ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРОСТОЙКОСТИ ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ТИТАЛ ПОКРЫТИЙ НА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОМ СПЛАВЕ ВТИ4**  
К. Н. Рамазанов<sup>1</sup>, А. Ю. Назаров<sup>1</sup>, А. А. Николаев<sup>1</sup>, А. А. Маслов<sup>1</sup>, А. Р. Хаиткулов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>УУНИТ, Уфа, Россия

- 450 **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЬЕЗОМОДУЛЯ (D33) ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ МАГНЕТРОННОГО ФОРМИРОВАНИЯ**  
А. Ю. Куклев<sup>1,2</sup>, В. И. Струнин<sup>1,3</sup>, А. Г. Козлов<sup>1,4</sup>, Л. В. Баранова<sup>1,3</sup>, Н. А. Давлеткильдеев<sup>3,5</sup>, Н. А. Чириков<sup>1,2</sup>, А. Н. Байдаков<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИРФЭ ОНЦ СО РАН, Омск, РФ  
<sup>2</sup>АО "ОНИИП", Омск, РФ  
<sup>3</sup>ОМГУ им. Ф. М. Достоевского, Омск, РФ  
<sup>4</sup>ОМГТУ, Омск, РФ  
<sup>5</sup>ОНЦ СО РАН, Омск, РФ
- 454 **ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 35ХГСЛ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОДОМ ИЗ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ ERcUSn-C**  
С. В. Ильин<sup>1</sup>, В. А. Никишин<sup>1</sup>, Н. А. Панькин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева", Саранск, Россия
- 457 **ДИНАМИКА ПРОТЯЖЕННЫХ РАЗРЯДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОДОМ И ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРОВОДЯЩЕГО РАСТВОРА**  
N. Chen<sup>1</sup>, L. Miao<sup>1</sup>, А. М. Астафьев<sup>2</sup>, А. А. Кудрявцев<sup>1</sup>, А. С. Чирцов<sup>2</sup>, С. Yuan<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Harbin Institute of technology, Harbin, China  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия
- 461 **ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ СВАРКИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**  
Э. Б. Мирзаянова<sup>1</sup>, Д. Р. Ақулова<sup>1</sup>, И. Т. Фахрутдинова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия
- 463 **СРАВНЕНИЕ 1D И 2D МОДЕЛЕЙ ПЛАЗМЫ МИКРОРАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ГЕЛИИ**  
С. Chen<sup>1</sup>, Z. Chen<sup>1</sup>, К. М. Рабаданов<sup>1,2</sup>, А. А. Кудрявцев<sup>1</sup>, С. Yuan<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Харбинский Политехнический Университет, Харбин, Китай  
<sup>2</sup>Дагестанский Государственный Университет, Махачкала, Россия
- 467 **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ВЧИ И СВЧ-РАЗРЯДОВ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ С ПРИМЕСЯМИ В МИНИАТЮРНЫХ ТРУБКАХ**  
А. А. Сайфутдинова<sup>1</sup>, А. Р. Мардеев<sup>1</sup>, Т. Х. Байханов<sup>1</sup>, А. И. Сайфутдинов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия
- 468 **STUDY OF INTERMETALLIDES FORMATION IN BILAYERED TIN-IRON SYSTEM**  
А. К. Zhubaev<sup>1</sup>, А. А. Kenzhebayaeva<sup>1</sup>, R. B. Baigereyeva<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan

- 470 **ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РЕАКЦИОННЫХ ГАЗОВ АЗОТА И АЦЕТИЛЕНА ПРИ ОСАЖДЕНИИ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ti-AL-C-N НА СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**  
К. Н. Рамазанов<sup>1,2</sup>, А. Ю. Назаров<sup>2</sup>, В. Р. Мухаммадеев<sup>2</sup>, И. Р. Мухаммадеев<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Академия наук Республики Башкортостан, Уфа, Россия  
<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
- 473 **ОБРАБОТКА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ КОМПЛЕКСОНОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ МНОГОИСКРОВОМ ИСТОЧНИКОМ С ИНЪЕКЦИЕЙ АРГОНА В МЕЖЭЛЕКТРОДНЫЕ ПРОМЕЖУТКИ**  
В. В. Гудкова<sup>1,2</sup>, В. Д. Борзосеков<sup>1,2</sup>, И. В. Моряков<sup>1</sup>, К. В. Артемьев<sup>1</sup>, А. М. Давыдов<sup>1</sup>, Н. К. Бережецкая<sup>1</sup>, Е. М. Кончечков<sup>1</sup>, Н. Г. Гусейн-заде<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия
- 477 **ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ НАРАБОТКИ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ В ГЕЛИИ**  
К. М. Рабаданов<sup>1,2</sup>, Н. А. Ашурбеков<sup>2</sup>, К. О. Иминов<sup>2</sup>, Г. Ш. Шахсинов<sup>2</sup>, М. З. Закарьяева<sup>2</sup>, А. А. Муртазаева<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Харбинский Политехнический Университет, Харбин, Китай  
<sup>2</sup>Дагестанский Государственный Университет, Махачкала, Россия
- 481 **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЕРОВОДОРОДА С ПОЛУЧЕНИЕМ ВОДОРОДА**  
Ю. С. Денисов<sup>1,2</sup>, Д. И. Субботин<sup>1,2</sup>, В. Е. Попов<sup>1</sup>, С. Д. Попов<sup>1</sup>, М. В. Обрывалин<sup>1,2</sup>, К. И. Бабич<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Институт Электрофизики и Электроэнергетики РАН, СПб, РФ  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт (Технический Университет), СПб, РФ
- 485 **СО2 ПЛАЗМЕННЫЙ РИФОРМИНГ МЕТАНА**  
М. В. Обрывалин<sup>1,2</sup>, Д. И. Субботин<sup>1,2</sup>, В. Е. Попов<sup>1</sup>, С. Д. Попов<sup>1</sup>, К. И. Бабич<sup>2</sup>, Ю. С. Денисов<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>Институт Электрофизики и Электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт (Технический Университет), Санкт-Петербург, Россия
- 488 **ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПРИ СОЗДАНИИ УГЛЕКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА**  
П. В. Космачев<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
- 490 **ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В ДВУХСЛОЙНОЙ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЕ**  
А. К. Жубаев<sup>1</sup>, А. О. Сагынова<sup>1</sup>, Г. А. Рахметолла<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Актюбинский региональный университет им.К.Жубанова, Актобе, Казахстан

- 492 **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕСТРУКЦИИ КРАСИТЕЛЯ РОДАМИНА Б В ПЛАЗМЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА**  
Г. И. Гусев<sup>1</sup>, А. А. Гуцин<sup>1</sup>, Г. А. Гридин<sup>1</sup>, Д. А. Стулов<sup>1</sup>, А. В. Скалова<sup>1</sup>, Е. В. Кипина<sup>1</sup>, И. В. Заварихин<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "ИГХТУ", Иваново, Россия
- 496 **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ГАЗОВУЮ ФАЗУ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗРЯДА С ЖИДКИМ КАТОДОМ**  
А. В. Чистолинов<sup>1</sup>, Р. В. Якушин<sup>2</sup>, А. А. Лубин<sup>1,2</sup>, А. В. Перфильева<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ОИВТ РАН, Москва, Россия  
<sup>2</sup>РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия
- 500 **Теоретические исследования особенностей технологии плазменного напыления в многокомпонентных средах**  
С. Ю. Жачкин<sup>1</sup>, Г. И. Трифионов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, Воронеж, Россия  
<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия
- 503 **Экспериментальное исследование взаимодействия электронов с атомами инертного газа в несамостоятельном разряде**  
Р. Ф. Юнусов<sup>1</sup>, А. И. Шатунова<sup>1</sup>, Э. Р. Юнусова<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия  
<sup>2</sup>ГАУЗ ГKB № 7, Казань, Россия

*Научное издание*

**IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ПЛАЗМА И СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР»**

Выпускающий редактор Г. А. Письменная

*Отпечатано с готового оригинал-макета*

Подписано в печать 08.10.2024. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 30,69.  
Тираж 100 экз. Заказ 2064.

Издательство «Бук». 420029, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25.  
Отпечатано в типографии «Т8 Издательские Технологии»,  
г. Москва, Волгоградский пр-т, д. 42, корп. 5



**БУК**  
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
www.bukbook.ru

ISBN 978-5-907910-37-9



9 785907 910379



[GQP-NANO.COM](http://GQP-NANO.COM)

**ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:**



**Kazan Federal  
UNIVERSITY**



*Российская Академия Наук*  
Научный совет РАН по физике низкотемпературной плазмы