ДИФРАКЦИЯ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ НАНОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, СФОРМИРО-ВАННОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИМ-ПЛАНТАЦИЕЙ ИОНАМИ СЕРЕБРА

ELECTRON BACKSCATTER DIFFRACTION OF NANOPOROUS SILICON FORMED BY LOW-ENERGY AG-ION IMPLANTATION

В.В. Воробъев^{1,2}, Ю.Н. Осин¹, М.А. Ермаков^{2,3}, В.Ф. Валеев², В.И. Нуждин², А.Л. Степанов^{1,2}

¹ Междисциплинарный центр Аналитическая микроскопия и Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет

² Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук

³ Тихоокенаский государственный университет

V.V. Vorobev^{1,2}, Y.N. Osin¹, M.A. Ermakov^{2,3}, V.F. Valeev², V.I. Nuzhdin², A.L. Stepanov^{1,2}

¹Interdisciplinary Center for Analytical Microscopy, Kazan Federal University, Kazan, Russia ²Kazan Physical-Technical Institute of Kazan Scientific Centr of Russian Academy of Sciencies, Kazan, Russia

³ Pacific National University

e-mail: aanstep@gmail.com и skavik@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты структурного исследования методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ) нанопористого кремния (PSi), сформированного на поверхности монокристаллического (c-Si) и аморфизованного (a-Si) кремния, низкоэнергетической имплантацией ионами серебра. Имплантация проводилась с энергией 30 кэВ при дозе 1.5·10¹⁷ ион/см² и плотности тока в ионном пучке 8 мкА/см² при комнатной температуре облучаемой подложки

Si. Аморфизация c-Si была осуществлена имплантацией ионами He⁺ с энергией 40 кэВ при той же дозе. Показано, что в результате ионной имплантации на c-Si и a-Si формируется тонкий аморфный слой PSi, в структуре которого присутствуют наночастицы серебра. Проведение термического отжига структуры Ag:PSi на c-Si при температуре 600°C в течении 30 минут приводит к частичному восстановлению кристаллической решетки Si и практически полному разрушению металлических наночастиц при существенном понижении концентрации серебра в имплантируемом слое.

Ключевые слова: дифракция обратно рассеянных электронов, пористый кремний, ионная имплантация

Abstract

The results on structural studies backscattered electron diffraction (BSED) of nanoporous silicon (PSi), formed on the surface of the single crystal (p-Si) and amorphized (a-Si) silicon by lowenergy implantation of silver ions, are presented. Implantation was carried out with an energy of 30 keV at a dose of $1.5 \cdot 10^{17}$ ions/cm² and the current density of 8 μ A/cm² at room temperature of the Si substrates. Amorphization a-Si implantation was carried by He⁺ ions with an energy of 40 keV at the same dose. It is shown that as a result of ion implantation of a-Si and a-Si layer a thin amorphous PSi is formed. Also, in this structure the silver nanoparticles are presented. Thermal annealing of Ag:PSi structure on a-Si at 600°C temperature for 30 minutes leds to a partial recrystallization of Si lattice. At the same time almost complete destruction of the metal nanoparticles in a Si substantial is observed with a decrease of the silver concentration in the implantable layer.

Keywords: electron backscatter diffraction porous silicon, ion implantation, metal nanoparticles

Введение

Образования наноразмерных пор, нанопустот и слоев пористого наноматериала в твердых телах в результате высокодозовой имплантации легких ионов инертных газов, исследуется достаточно давно [1] Особенно внимание при этом было уделено металлам, применяемым в качестве материала первой стенки термоядерных реакторов, при решении проблемы надежности покрытий реактора под воздействием интенсивной бомбардировки легкими ионами, приводящей к «вспучиванию» и разрушению поверхностных слоев металла.

К настоящему моменту достаточно хорошо известны способы формирования нанопористого кремния (PSi) при его высокодозовой имплантации ионами инертных газов. Растворимость инертных газов в твердых телах мала, поэтому, начиная с некоторых пороговых доз имплантации, в облученном полупроводнике возможно образование наноразмерных пор вследствие заполнения локального объема материала молекулами или пузырьками из импланти-

руемых ионов (атомов) газа [1]. Образование пор в Si наблюдалось при имплантации ионами водорода [3], гелия [4, 5], неона [6], аргона [7] и криптона [6, 8]. При этом в практике порообразования в Si преследуется одна из двух задач. Во-первых, формирование в объеме c-Si тонкого пористого слоя типа «кремний на изоляторе» для реализации эффекта ионно-индуцированного газового скалывания на заданной глубине облучаемого материала, при изготовлении супертонких нанометровых кристаллических (технология управляемого слоев скола «Smart-Cut») [9]. Во-вторых, это создание в локальных областях кремния геттеров в виде набора пор, которые аккумулируют различные вредные примеси, например, переходных металлов, что улучшает электрофизические параметры кремния [10, 11]. Диффундирующие по кристаллу примеси захватываются на оборванных связях внутренних стенок пор.

Помимо формирования и исследования PSi, на практике также ведется активный поиск путей создания различными способа-

ми, правда пока только химическими, композиционных материалов на основе PSi с наночастицами благородных металлов (Ag-PSi, Au-PSi и Pt-PSi) [13-15]. Эта задача находится в рамках нового развивающегося направления в области наноплазмоники и нанофотоники, заключающегося в повышении эффективности проявления оптических свойств PSi за счет присутствия металлических наночастиц. Коллективное возбуждение электронов проводимости в металлических наночастицах под действием электромагнитной волны света вызывает резонансное усиление локального поля (поверхностный плазмонный резонанс), что и ведет к стимулированию оптических и нелинейно-оптических эффектов [16, 17]. Как пример, можно привести результаты работ, в которых наблюдалось гигантское усиление Рамановского рассеяния (surface-enhanced Raman scattering - SERS) адсорбированных органических соединений на структурах Ag-PSi [13], изменение положения максимума фотолюминесценции PSi в Au-PSi [14] и проявление материалом биосенсорных свойств в Pt-PSi [15] за счет возбуждения плазмонного резонанса в металлических наночастицах.

Относительно недавно нами был предложен новый подход к формированию слоев PSi одновременно с синтезом в них наночастиц серебра при использовании низкоэнергетической высокодозовой имплантации ионами Ag⁺ кристаллических слоев с-Si аналогично тому [18-23], как ранее успешно осуществлялся синтез металлических наночастиц в диэлектрических матрицах (неорганическом стекле, сапфире или полимере) при их облучении ионами различных металлов [22]. В настоящей работе приводятся результаты дальнейших исследований порообразования в облучаемом Si с применением методики исследования дифракции отраженных электронов (ДОЭ или EBSD electron backscattered diffraction) [24, 25]. При этом рассматривается вопрос образования пор в аморфном кремнии (a-Si), полученном ионной имплантации с-Si ионами He⁺, а также термический отжиг пористых слоев Aq:PSi. сформированных имплантацией ионами серебра в с-Si.

Методика эксперимента

Для получения структурированного композиционного PSi-материала была использована либо подложка с-Si p – типа проводимости с кристаллографической ориентацией (100), либо аморфные слои a-Si, полученные имплантацией с-Si ионами He⁺ с энергией 40 кэВ при дозе 1.5.10¹⁷ ион/см² и плотности тока в ионном пучке 8 мкА/см² на ионном ускорителе ИЛУ-3. С целью порообразования имплантация слоев с-Si и a-Si проводилась ионами Ад⁺ с энергией 30 кэВ при дозе облучения 1.5 10¹⁷ ион/см² и плотности тока в ионном пучке 8 мкА/см² на том же ускорителе. Термический отжиг имплантированного образца Ag:PSi проводился в вакууме на установке ВУП-5М при температуре 600°С в течение 30 минут.

Наблюдение морфологии пористой поверхности образцов Ag:PSi, энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ и структурные кристаллографические данные, полученные методом ДОЭ, были выполнены на универсальном аналитичевысокоразрешающем сканирующем СКОМ электронном микроскопе (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss) в Междисциплинарном центре «Аналитическая микроскопия» Казанского федерального университета. Для проведения химических элементов был исанализа пользован энергодисперсионный спектрометр AZtec X-Max (Oxford Instruments), а в качестве детектора ДОЭ использовался NordLys HKL (Oxford Instruments).

При проведении измерений ДОЭ были использованы следующие режимы: ускоряющее напряжение пучка зондирующих электронов 20 кэВ, зондовый ток 600 пА, рабочее расстояние между линзой и поверхностью образца 9.6 мм. Для достижения оптимальных условий эксперимента и сбора максимума отраженных электронов на ДОЭдетекторе образец устанавливался под углом 70° относительно нормали падающего потока зондирующих электронов (рис. 1). Анализ ДОЭ-картин проводился с помощью автоматизированного программного комплекса Aztec версии 2.1.

Следует отметить, что данная методика ДОЭ имеет свою историю, начинающуюся с пионерских работ Сейси Кикучи в 1928 г. [24, 25]. В процессе зондирования поверхности образца электронным лучом, электроны проникают на определенную глубину, с которой происходит их отражение, что определяет конечную толщину поверхностного слоя исследуемого материала, участвующего в образовании дифракционной картины. Проведенное моделирование профиля распределения интенсивности отраженных электронов в Si при параметрах ускоряющего напряжения и угле наклона образца, соответствующих эксперименту, показали, что зондируемая толщина образца составляет около 300 нм (рис.2).



Рис. 1. Схема стандартной геометрии метода ДОЭ. Показаны: полюсной наконечник; направление электронного пучка; расположение образца и флюоресцирующего экрана детектора [24, 25].





Экспериментальные результаты и их обсуждение

Ионная имплантация обеспечивает проникновение ионов серебра в объем облучаемого Si. В работах [18-23] при использовании компьютерного алгоритма SRIM-2013 было оценено, что в начальный период облучения с-Si происходит накопление атомов серебра в его объеме с максимумом статистического распределения концентрации по гауссовой кривой на глубине $R_{\rm p} \sim 26.3$ нм при разбросе пробега ионов от величины $R_{\rm p}$, на $\Delta R_{\rm p} \sim 8$ нм. При этом толщина имплантированного слоя ($R_{\rm p} + 2\Delta R_{\rm p}$) составляет примерно 42.3 нм, т.е. при низкоэнергетической имплантации оказывается достаточно тонкой.

На рис. За приведено СЭМ - изображение поверхности подложки исходного полированного с-Si до проведения импланта-

ции ионами He⁺ и Ag⁺. Как видно из данного рисунка, поверхность кремниевого образца гладкая и однородная. В центре СЭМ – изображения поверхности (рис. 3а) указана меткой локальная область, на которой проводились структурные измерения ДОЭ. На рис. Зб показана экспериментально – наблюдаемая картина дифракции Кикучи в отраженных электронах. На рис. 3 в приведены результаты, соответствующие компьютерному моделированию регистрируемой ДОЭ-картины (рис. 3 б), из которых следует, что используемая для ионной имплантация подложка с-Si имеет кристаллографическую ориентацию (100) и характеризуется монокристаллической структурой кубической сингонии с элементарной ячейкой с параметрами a = b = c = 5.43 Å и $\alpha = \beta = \gamma = 90^{\circ}$.





Рис. 3. (а) СЭМ-изображение неимплантированной поверхности с-Si с указанием точки анализа кристаллографической структуры; (б) ДОЭ-картина Кикучи от с-Si; (в) компьютерное моделирование экспериментальной ДОЭ-картины, приведенной на (б).



Рис. 4. Спектр энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа неимплантированной поверхности с-Si.

На рис. 4 представлен спектр энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа, измеренный на том же локальном участке, на котором проводился структурный ДОЭ-анализ. Полученный спектр свидетельствует об отсутствии каких-либо примесных химических элементов в исходной матрице с-Si, используемой в настоящем эксперименте для ее имплантации ионами He⁺ и Ag⁺. Полученные данные для подложки с-Si далее будут использованы для сравнительных анализов со структурой PSi.

Рассмотрим результаты наблюдений и анализа образца Ag:PSi, сформированного имплантацией с-Si ионами серебра. В отличие от исходной полированной необлученной подложки (рис. 3а), морфология поверхности Ag:PSi характеризуется ярко - выраженной пористой структурой (рис. 5а). Средний размер отверстий пор в образце Ag:PSi составляет примерно 150-180 нм при толщине стенок 30-60 нм, а их глубина, как было показано ранее измерениями на атомносиловом микроскопе [20], оказывается порядка 100 нм. В работах [18-23] было показано, что яркие светлые пятна, наблюдаемые на сером фоне стенок матрицы PSi со средним размером ~ 5-15 нм, являются ионносинтезированными наночастицами серебра. Механизм образования наночастиц серебра в Si при ионной имплантации такой же, как и в случае зарождения металлических наночастиц при облучении ионами металла различных диэлектриков и оксидных полупроводников – стекол, полимеров, ZnO, TiO₂ и т. д. [22].



Рис. 5. (а) СЭМ-изображение поверхности Ag:PSi, полученного имплантацией ионов Ag⁺ в с-Si, с указанием точки анализа кристаллографической структуры; (б) ДОЭ-картина для Ag:PSi.

Так же как и в предыдущем случае (рис. 3), был проведен анализ локальной области поверхности образца Ag:PSi методом ДОЭ в области метки, т.е. области, показанной на СЭМ-изображении (Рис. 5а). Экспериментально наблюдаемая дифракционная картина приведена на рис. 5б. В отличие от дифракции Кикучи в виде параллельных плоскостям кристаллической решетки полос, соответствующей неимплантированному с-Si (рис. 3б), в случае Ag:PSi ДОЭ-картина представляется в виде суперпозиции слабых линий Кикучи (просматривающихся в нижней части изображения), перекрываемых широкими диффузными кольцами (наблюдаемые справа и слева), отражающими формирование аморфного слоя PSi. Наночастицы серебра, присутствующие в образ-

це Ag:PSi, достаточно малы, поэтому собственная дифракционная картина от таких объектов малоразличима на ДОЭ - изображение для образца Ag:PSi (рис. 5б). Отметим, что глубина проникновения зондирующего пучка электронов в анализируемый образец при ДОЭ-измерениях составляет порядка 300 нм и полностью перекрывает имплантированный слой, что подтверждает возникновение ДОЭ-картины в виде суперпозиции вкладов от с-Si подложки и облученного аморфного слоя Ag:PSi.

Энергодисперсионный спектр образца Ag:PSi (рис. 6) демонстрирует ожидаемое накопление серебра в облучаемой приповерхностной области образца с-Si, ведущее к формированию наночастиц серебра в имплантируемом слое PSi.



Рис. 6. Спектр энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа поверхности Ag:PSi, сформированной имплантацией ионами серебра.

С целью восстановления кристаллической структуры облученного с-Si из PSi проводился термический отжиг образца Ag:PSi в вакууме. Как видно на СЭМ-изображении (рис. 7), в результате постимплантационного отжига наблюдается модифицирование структуры поверхности Ag:PSi (рис. 7а,б), сохраняющей неоднородную морфологию PSi (рис. 5а). На ДОЭ-изображении (рис. 7в) наблюдается восстановление ряда линий Кикучи, указывающих на частичную кристаллизацию структуры PSi, схожую с кубической. Однако, компьютерная идентификация линий Кикучи отожженного образца Ag:PSi свидетельствует об образовании слоя с кристаллографической ориентацией, отличающейся от ориен-

тации (100) исходного с-Si. Иными словами, эпитаксиальной рекристаллизации имплантированного аморфного слоя по направлению ориентации точно, совпадающим с подложкой с-Si (100), не происходит, как это предсказывается для процесса термического отжига [26]. При этом в энергодисперсионном спектре отожженного образца Ag:PSi (рис. 8) наблюдается только пик кремния, что свидетельствует о резком понижении концентрации серебра на анализируемом участке. Подобное явление наблюдалось ранее для силикатных стекол с имплантированными наночастицами серебра, подвергнутых термическому отжигу при сравнимых температурах [22].



Рис. 7. (а, б) СЭМ-изображения в различных масштабах поверхности Ag:PSi, полученного имплантацией ионов серебра в с-Si и последующего термического отжига с указанием точки анализа кристаллографической структуры; (в) экспериментальная ДОЭ -картина и ее компьютерное моделирование (г).



Рис. 8. Спектр энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа поверхности Ag:PSi, сформированной имплантацией ионами серебра с-Si и последующего термического отжига.

Рассмотрим образование слоя Ag:PSi на аморфизированном слое a-Si, сформированном предварительной низкоэнергетической высокодозовой имплантацией с-Si ионами Не⁺. Методика амортизации Si облучением ионами газов хорошо известна и применяется на практике достаточно давно [24]. На рис. 9а, в ее левой части СЭМ-изображения можно наблюдать поверхность Si, имплантированную ионами He⁺. Как видно из рисунка, такое облучение не создает на поверхности морфологических неоднородностей и она выглядит схожей с гладкой поверхностью необлученного с-Si (рис. 3а). ДОЭ-изображение поверхностного слоя, соответствующего имплантации с-Si ионами He⁺, приведено на рис. 9б. Данная ДОЭ-картина состоит из суперпозиции линий Кикучи от кристаллической структуры с-Si (100) и диффузных колец, доказывающих образование аморфного слоя а-Si. Глубина пробега ионов He⁺ в Si, оцениваемая по программе SRIM-2013, составляет порядка 450 нм, что превышает глубину проникновения зондирующих электронов при ДОЭ. Однако, аморфизированный слой a-Si может оказываться при этом заметно тоньше предсказываемой глубины пробега легких ионов Не⁺ [24].

СЭМ-изображения в различных масштабах поверхности образца Ag:PSi, сформированного имплантацией a-Si ионами Ag⁺ приведены на рис. 9а (правая часть) и ее увеличенная часть на рис. 9в. Сравнение результатов проведенных экспериментов показывает, что облучение a-Si низкоэнергетическими ионами Ag⁺, как и в случае с-Si (рис. 5а),ведет к порообразованию и синтезу наночастиц серебра (белые пятна на рис. 9в) в структуре PSi. Соответствующее образцу Ag:PSi (рис. 9в) ДОЭизображение показывает появление диффузных колец, доказывающих дополнительную аморфизацию Si (рис. 9г). По отсутствию линий Кикучи на приведенном ДОЭ - изображении можно заключить, что либо степень аморфизации в данном образце Ag:PSi выше, по сравнению с a-Si, полученном облучением ионами He⁺, либо толщина аморфного слоя в Ag:PSi больше чем a-Si.



Рис. 9. (а) СЭМ-изображение поверхности Si, полученного имплантацией ионов He⁺ (левая часть) и последовательно ионами He⁺ и Ag⁺ (правая часть); (б) ДОЭ-картина, соответствующая поверхности a-Si, показанной на левой части рис. 9а; (в) СЭМ-изображение поверхности Ag:PSi в увеличенном масштабе правой части рис. 9а; (г) ДОЭ-картина, соответствующая поверхности Ag:PSi, показанной на правой части рис. 9а.

Заключение

Таким образом, в данной работе продемонстрированы экспериментальные результаты, показывающие возможность формирования слоев Ag:PSi на поверхности как монокристаллического с-Si, так и аморфизированного a-Si при низкоэнергетической высокодозовой имплантации ионами Ag⁺. Впервые осуществлен кристаллографический анализ слоев Ag:PSi методом ДОЭ. Установлено, что во время низкоэнергетической имплантации с-Si ионами Ag⁺ на поверхности образуется аморфный PSi-слой, а в процессе термического отжига наблюдается его частичная рекристаллизация при сохранении морфологических неоднородностей на поверхности Si, изначально являющихся PSi структурой. При этом имеет место потеря серебра из образца вследствие испарения.

Очевидно, что последующие шаги по совершенствованию таких типов композиционных материалов должны заключаться в оптимизации процессов их изготовления и, в частности, в поиске корреляции между структурными параметрами и оптическими, плазмонными, фотолюминесцентными и сенсорными характеристиками новых пористых структур.

Полученные результаты были частично опубликованы в работе [27].

Результаты данных исследований были представлены и обсуждены на IV Международной конференции «Наноструктурные материалы» (НАНО-2014) в Минске (Беларусь), V Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» в Суздале и на X Всероссийской конференции и IX Школе молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики и материаловедения «Кремний-2014» в Иркутске. Авторы выражают благодарность Файзрахманову И.А. за обсуждение результатов. Работа выполнена при финансировании РФФИ проектами (№ 13-02-12012_офи и № 14-32-50301_мол_нр).

Список литературы:

1. Козловский В.В., Козлов В.А., Ломасов В.Н. Модифицирование полупроводников пучками протонов. Обзор. // ФТП. 2000. Т.34. С. 129-147.

2. Ищенко А.А., Фетисов Г.В., Асланов Л.А. Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля. «Физматлит».М.: 2011. 495 с.

3. Cerofolini G.F., Evans J.H., De Jong P.C., van Veen A. Helium desorption/permeation from bubbles in silicon: a novel methof of void production // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1987. Vol. 27. P.417-420.

4. Stein H.J., Myers S.M., Follstaedt D.M. Infrared spectroscopy of chemically bonded hydrogen at voids and defecs in silicon // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 73. P.2755-2764.

5. Реутов В.Ф., Сохацкий А.С. Упорядоченные гелиевые поры в аморфном кремнии, индуцированном облучением низкоэнергетическими ионами гелия // ЖТФ. 2003. Т. 73. С.73-78.

6. Wittmer M., Roth J., Revesz P., Mayer J.M. Epitaxial regrowth pf Ne- and Kr-implanted amorphous silicon // J. Appl. Phys. 1978. V.49. P.5207-2512.

7. Revesz P., Wittmer M., Roth J., Mayer J.M. Epitaxial regrowth of Ar-implanted amorphous silicon // J. Appl. Phys. 1978. V.49. P.5199-5206.

8. Галяутдинов М.Ф., Курбатова Н.В., Буйнова Э.Ю., Штырков Е.И., Бухараев А.А. Исследование пористого кремния, полученного имплантацией ионов криптона и лазерным отжигом // ФТП. 1997. Т. 31. С. 1130-1134.

9. Реутов В.Ф., Дракин К.А., Дмитриев С.Н., Бутовская М.В., ЕГорнев.С. Способ радиационно-индуцированного газового скалывания хрупких кристаллических материалов. Патент РФ 2297691. 2005.

10. Wong-Leung J., Ascheron C.H., Petravic M., Elliman R.G., Williams J.S. Gettering of copper to hydrogen-induced cavities in silicon // Appl. Phys. Lett. 1995. V.66. P.1231-1233.

11. Myers S.M., Petesen G.A., Seager C.H. Binding of cobalt and iron to cavities in silicon // J. Appl. Phys. 1996. V.80. P.3717-3726.

12. S. Chan, S. Kwon, T.-W. Koo, L.P. Lee, A.A. Berlin Surface-enhanced Raman scattering of small molecules from silver-coated silicon nanopores // Adv. Mat. 2003. V.15. P.1595-1598.

13. Amran T.S., Hashim M.R., Al-Obaidi N.K., Yazid H., Adnan R. Optical absorption and photoluminescence studies of gold nanoparticles deposited on porous silicon // Nanoscale Res. Lett. 2013. V.8. P.35-41.

14. Wang M., Wang X., Ghoshal S. Deposition of platinum nanoparticles on p-type macroporous silicon wall // Micro & Nano Lett. 2013. V.8. P.465-469.

15. Wang Y., Liu Y.P., Liang H.L., Mei Z.X., Du X.L. Broadband antireflection on the silicon surface realized by Ag nanoparticle-patterned black silicon // Phys. Chem. Chem. Phys. 2013. Vol. 12. P. 2345-2350.

16. Kreibig U., Vollmer M. Optical properties of metal clusters. "Springer". Berlin: 1995. 468 p.

17. Stepanov A.L. Ion-synthesis of metal nanoparticles and their optical properties. "Nova Sci. Publ.". New York: 2011. 91 c.

18. Stepanov A.L., Trifonov A.A., Osin Y.N., Valeev V.F., Nuzhdin V.I. New way for synthesis of porous silicon using ion implantation // Optoelectronics and Adv. Mater. - Rapid Comm. 2013. V.7. P.692-696.

19. Stepanov A.L., Trifonov A.A., Osin Y.N., Valeev V.F., Nuzhdin V.I. Fabrication of nanoporous silicon by Ag⁺-ion implantation // Nanoscience and Nanoenginering. 2013. V.1. P.134-138.

20. Тригонов А.Л., Осин Ю.Н., Валеев В.Ф., Нуждин В.И., Каветцкий Т.С., Степанов А.Л. Нетрадиционный способ получения нанопористого кремния при помощи имплантации ионами металла // Нанотехнологии: наука и производство. 2013. Т.4. С.46-52.

21. Степанов А.Л., Осин Ю.Н., Трифонов А.А., Валеев В.Ф., Нуждин В.И. Новый подходк синтезу пористого кремния с наночастицами серебра методом ионной имплантации // Российские нанотехнологии 2014. Т.9 С.53-56.

22. Степанов А.Л., Фотонные среды с наночастицами, синтезированными ионной имплантацией, «Lambert Acad. Publ.". Саарблюккен: 2014. 353 с.

23. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Осин Ю.Н. Способ изготовления пористого кремния. Положительное решение на изобретение, заяка га Патента РФ № 20141114101, приоритет от 9.04.2014.

24. Метод дифракции отраженных электронов в материаловедении, ред. Шварц А., Кумар М., Адамс Б. «Техносфера». М.: 2014. 560 с.

25. Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение. Ред. Жу У., Уанга Ж.Л. «Бином». М.: 2006. С.66-106.

26. Мейер Д., Эриксон Л., Девис Д. Ионное легирование полупроводников. «Мир». М.: 1973. 296 с.