

УДК 535.3

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

*А.П. Чукланов, Р.Г. Гатиятов, Д.А. Бизяев,  
П.А. Бородин, М.Ф. Галляутдинов, А.А. Бухараев*

### Аннотация

В данной работе выполнены эксперименты по изготовлению микро- и наноструктур на поверхности твердых тел. Для этого использовался метод импульсного лазерного испарения, применяющийся для модификации поверхности имплантированных стекол. Были получены микроперемычки из пленок Ni и Co толщиной 10–20 нм. Ширина перемычек составляла 2–3 мкм. Данный тип структур может послужить основой для создания наноконтактов – магниторезистивных элементов спинтроники. Использование атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволило определить с большой точностью толщину пленок металла и ширину получаемых микроперемычек, а также визуализировать металлические наночастицы, образовавшиеся на подложке под действием лазерного излучения. Для анализа АСМ-изображений наночастиц и получения количественных параметров, таких как распределение частиц по размеру, использовалась компьютерная программа, разработанная авторами.

### Введение

Взаимодействие оптического излучения с поверхностью различных материалов является на сегодняшний день бурно развивающейся отраслью науки и продолжает привлекать внимание исследователей. При этом можно выделить две проблемы, которым уделяется сейчас наибольшее внимание: первая – изучение процессов, лежащих в основе оптической записи и считывания информации; вторая – изучение процессов модификации поверхности лазерным излучением, в частности, формирование на поверхности нано- и субмикронных структур различной природы.

В данной работе были проведены исследования по совершенствованию методов получения микро- и наноструктур на поверхности твердых тел с помощью импульсного лазерного воздействия. Эти исследования основываются, в частности, на изобретении № 1231818 «Способ формирования микрорельефа на поверхности силикатного стекла» [1]. В основе данного изобретения лежит эффект поглощения лазерного излучения тонкими нанометровыми пленками с высоким коэффициентом поглощения, сформированными на оптически прозрачной подложке. При таких условиях энергия поглощенного света практически полностью выделяется в тонком поверхностном слое. Если лазерное излучение имеет высокую плотность энергии, то это приводит к локальному испарению пленки [2].

В данной работе были поставлены две задачи:

- получение микроперемычек из ферромагнитной металлической пленки нанометровой толщины. Данный тип структур может послужить основой для создания наноконтактов – магниторезистивных элементов спинтроники;
- выяснение возможности получения наночастиц импульсным лазерным испарением металлических нанопленок с поверхности.

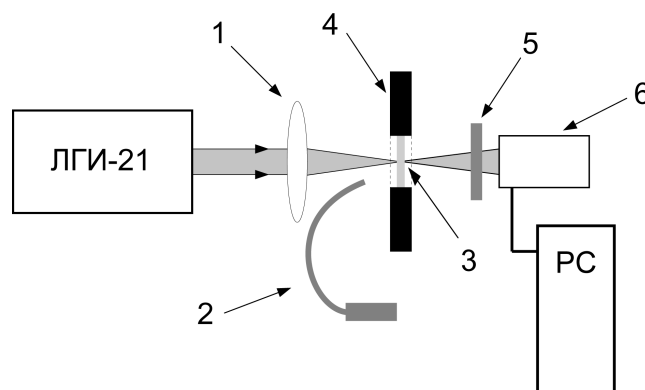


Рис. 1. Схема установки на базе импульсного азотного лазера ЛГИ-21. 1 – короткофокусная линза; 2 – световод с источником света для подсветки образца; 3 – образец; тонкая металлическая пленка на поверхности стекла; 4 – держатель образца с микрометрической подвижкой; 5 – УФ-светофильтр; 6 – длиннофокусный микроскоп с цифровой видеокамерой, подсоединенной к компьютеру

## 1. Описание установок

Для испарения поглощающих свет нанопленок использовались два типа установок. Схема первой приведена на рис. 1. Основным ее элементом является импульсный азотный лазер ЛГИ-21 ( $\lambda = 337$  нм,  $\tau_{\text{имп}} = 10$  нс, частота следования импульсов – 100 Гц, средняя мощность – 4 мВт), используемый для формирования структур заданной конфигурации путем локального испарения полупрозрачной металлической пленки сфокусированным лазерным излучением.

Диаметр сфокусированного лазерного пятна на образце составлял 10–25 мкм. Образец крепился на двухкоординатной микроподвижке, перемещающей образец с точностью 2–3 мкм в плоскости, перпендикулярной падающему лучу лазера. Объектив длиннофокусного микроскопа размещен за образцом и отделен от него ультрафиолетовым (УФ) светофильтром, поглощающим излучение лазера. Наличие встроенной в микроскоп цифровой видеокамеры, подключенной к компьютеру, позволяло в реальном времени контролировать процесс испарения металлической пленки при перемещении образца относительно луча лазера.

Вторая установка использовалась для получения микроструктур с помощью интерференционного лазерного испарения полупрозрачных металлических пленок (рис. 2). Основа этой установки – твердотельный лазер на основе стекла с Nd (лазер марки ЛТИП4-1,  $\lambda = 1.06$  мкм,  $\tau_{\text{имп}} = 30$  нс, плотность энергии – до 2 Дж/см<sup>2</sup>). Половина лазерного луча проходит через преломляющую призму, затем оба луча фокусируются на поверхности образца. В месте их падения на образец формируется интерференционная картина с периодом, который определяется выражением  $d = \lambda/2 \sin(\alpha/2)$ , где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения,  $\alpha$  – угол между лучами, падающими на образец. В местах расположения интерференционных максимумов плотность энергии может превышать 1 Дж/см<sup>2</sup>, что достаточно для локального испарения поглощающей свет нанопленки.

## 2. Эксперименты и обсуждение результатов

Исследованные образцы представляли собой металлические пленки Co или Ni, нанесенные термическим напылением в вакуумной установке ВУП-5. В качестве подложки использовалось полированное оптическое кварцевое стекло (SiO<sub>2</sub>) раз-

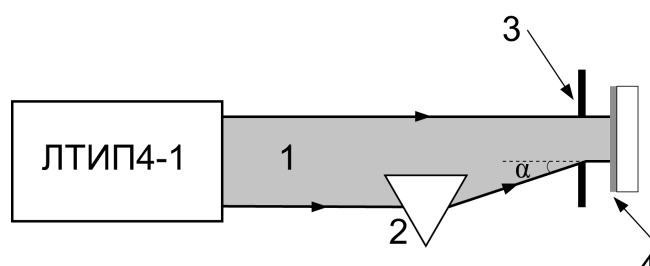


Рис. 2. Схема установки на базе импульсного Nd-лазера ЛТИП4-1: 1 – луч лазера, 2 – призма для разделения луча на две компоненты, 3 – диафрагма, 4 – образец

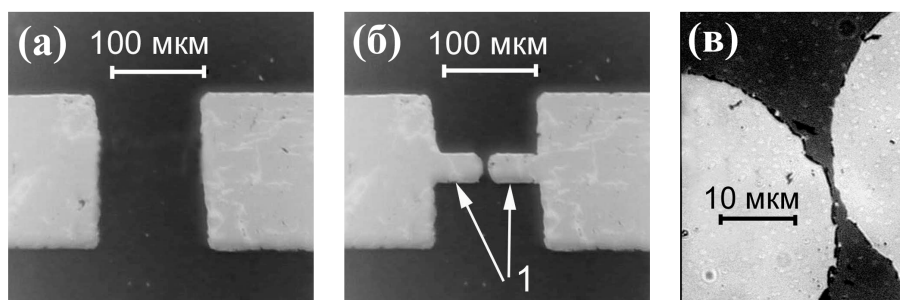


Рис. 3. Формирование микроперемычек сфокусированным лазерным излучением: *а*) исходная структура, полученная напылением Ni на SiO<sub>2</sub> через маску (изображение получено в режиме просвечивания: Ni – темный, подложка – светлая); *б*) получение микроперемычки путем сканирования образца сфокусированным лазерным излучением, 1 – участки, с которых лазерным излучением удален металл; *в*) микроперемычка шириной в 2 мкм, полученная с помощью лазера

мером  $5 \times 5 \times 2$  мм. Условия напыления подбирались такими, чтобы пленки были полупрозрачными, то есть поглощали от 30 до 70% падающего излучения. Для получения нужной конфигурации пленки поверхность перед напылением защищалась специальной маской. Таким образом были получены образцы с металлическими перемычками шириной от 100 до 200 мкм между макроскопическими участками, которые используются в дальнейшем как контактные площадки.

Всего данным способом было получено более 100 образцов. Использование атомно-силовых микроскопов (АСМ) Solver Bio и Solver P47 (фирмы НТ-МДТ) позволило с высокой точностью контролировать различные параметры нанесенных на подложку металлических пленок, в том числе толщину пленки, которая в зависимости от режима напыления, лежала в интервале от 20 до 100 нм. Пример АСМ-изображения границы пленки приведен на рис. 4.

Результаты проведенных исследований показали, что импульсное лазерное взаимодействие с поглощающими свет нанопленками может быть успешно использовано для формирования на поверхности микро- и наноструктур. Для локального испарения полупрозрачной нанопленки достаточно плотности энергии порядка  $1 \text{ Дж/см}^2$ . Контролируемое с помощью оптического микроскопа и видеокамеры перемещение сфокусированного луча лазера позволило получить микроперемычки в нанопленках Ni и Co шириной в 2 мкм (рис. 3, *б* и *в*). Это означает, что разработанная нами методика не уступает по латеральному разрешению известным методам фотолитографии с использованием фоторезистов. В то же время, наш метод имеет

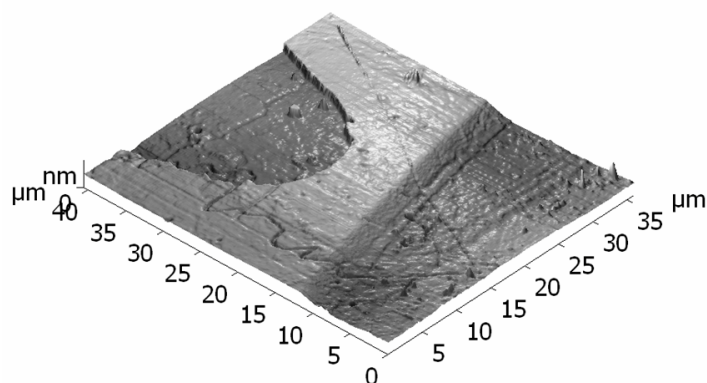


Рис. 4. АСМ-изображение ступеньки – края пленки Ni на подложке из SiO<sub>2</sub>. Толщина пленки 30 нм

существенное преимущество, так как в нем не используются «мокрые» процедуры по химическому травлению засвеченного через фотошаблон фоторезиста и последующей отмывке образцов. Конечно, ширины микроперемычки в 2 мкм еще не достаточно для получения достаточно большого магниторезистивного эффекта. Однако очевидно, что с помощью разработанного нами метода можно получать структуры более сложных конфигураций (например, зигзагообразные и спиралевидные), которые обладают большим магнитосопротивлением [3]. Кроме того, полученные нами структуры можно использовать как исходные для дальнейшего формирования на их основе магниторезистивных наноконтактов с помощью ионного или электрохимического травления [4].

Методом интерференционного лазерного испарения были получены периодические структуры, представляющие собой Ni полоски шириной в 2 мкм (рис. 5, а), находящиеся друг от друга на расстоянии также около 2 мкм. Полученные структуры имеют две особенности: у них достаточно неровные края и на поверхности присутствуют наночастицы. Многочисленные эксперименты по лазерному интерференционному испарению показали, что в результате данного процесса на поверхности образуется большое число частиц. Причем количество частиц на единицу площади сильно зависит от их размера. Горизонтальные размеры наночастиц лежат в интервале от 200 до 600 нм, высота достигает 350 нм (рис. 6). Механизм их формирования еще не совсем ясен. Вероятнее всего, испаренный с поверхности металл осаждается на поверхности уже в виде наночастиц.

Для количественного анализа наночастиц была применена программа, разработанная на основе предложенного ранее алгоритма [5]. Этот алгоритм специально адаптирован для анализа данных АСМ, он позволяет более корректно, по сравнению с существующими алгоритмами обработки изображений, применяющимися, в частности, в электронной микроскопии [6], строить гистограммы распределений частиц по размерам по размерам в случаях сильно неровных поверхностей и наличия большого количества слипшихся частиц. На рис. 5, б и в приведен пример использования программы для обработки экспериментальных данных. В данном случае анализировался эффективный диаметр  $d_{\text{eff}} = (4S/\pi)^{1/2}$  наночастиц, которые были получены при интерференционном испарении Ni нано пленки. Из приведенной на рис. 5, в гистограммы следует, что размеры наночастиц лежат преимущественно в интервале от 100 до 250 нм, наибольшее число наночастиц имеет размер около 180 нм.

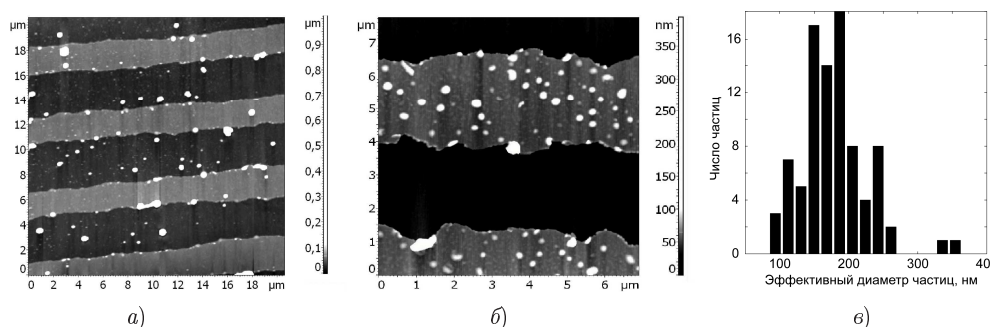


Рис. 5. *a)* АСМ-изображение Ni микрополосок с наночастицами, полученных с помощью интерференционного лазерного испарения нанопленки; *б)* АСМ-изображение тех же полосок при большем увеличении, белые оконтуренные объекты это наночастицы; *в)* гистограмма распределения частиц по размерам полученная при анализе рисунка (*б)*)

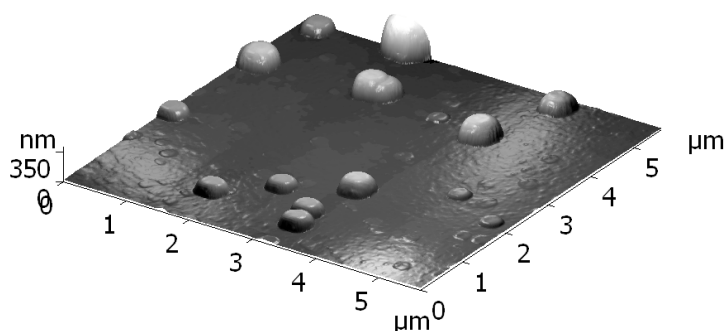


Рис. 6. АСМ-изображения наночастиц, полученных с помощью импульсного интерференционного лазерного испарения металлической нанопленки

### 3. Выводы

Таким образом, в данной работе развиты методы формирования микро- и наноструктур путем локального испарения сфокусированным лазерным излучением полупрозрачных металлических нанопленок, осажденных на кварцевое стекло. Использование АСМ позволило с высокой точностью контролировать толщину и структуру получаемых нанопленок. Минимальные латеральные размеры микроперемычек из нанопленок, полученных лазерным испарением, составили 2 мкм, что сравнимо с разрешающей способностью традиционной фоторезистивной литографии. Продемонстрировано, что с помощью импульсного лазерного испарения металлических нанопленок можно получать наночастицы с размерами от 100 до 250 нм.

Дальнейшее изучение локального импульсного лазерного воздействия на нанопленки в сочетании с АСМ должно привести к более глубокому пониманию фундаментальных процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, будет способствовать созданию новых нанотехнологий и, в перспективе, может быть использовано для разработки новых наноразмерных устройств.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта НШ 10200.2006.2.

### Summary

*A.P. Chuklanov, R.G. Gatiyatov, D.A. Bizyayev, P.A. Borodin, M.F. Galyautdinov, A.A. Bukharaev.* Forming micro and nanostructures using impulse laser influence.

In this work the experiments for forming micro and nanostructures on solid surfaces using impulse laser evaporation are performed. This method was designed for modification of the ion implanted glasses. Ni and Co films with a thickness of 20–30 nm were grown on quartz glass and then micro-junction was made under impulse laser evaporation. These structures are suitable for nano-contact formation which is the main magneto-resistant unit of spintronics. The film thickness and the micro-junction width were measured with high precision using atomic-force microscopes (AFM). Also nanoparticles formed on a substrate under impulse laser evaporation were visualized with AFM. To estimate particle size distribution the special computer algorithm was applied.

### Литература

1. *Бухараев А.А., Казаков А.В., Манапов Р.А., Хайбуллин И.Б., Яфаев Н.Р.* Официальный Бюллетень Государственного Комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР «Открытия, Изобретения». – 1995. – № 18. – С. 256.
2. *Bukharaev A.A., Janduganov V.M., Samarsky E.A., Berdunov N.V.* Atomic force microscopy of laser induced sub-micrometer periodic structures on implanted fused silica and silicon // *Appl. Surf. Sci.* – 1996. – V. 103, No 1. – P. 49–54.
3. *Taniyama T., Nakatani I., Namikawa T., Yamazaki Y.* Resistivity due to domain walls in Co zigzag wires // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – V. 82, No 13. – P. 2780–2783.
4. *Гатиятов Р.Г., Борозин П.А., Бухараев А.А., Визяев Д.А.* Прецизионные измерения магнитострикции в никелевых структурах, используемых для получения магниторезистивных наноконтактов // *Письма в ЖТФ.* – 2006. – Т. 32, № 19. – С. 72–78.
5. *Chuklanov A.P., Bukharaev A.A., Ziganshina S.A.* Computer program for the grain analysis of AFM images of nanoparticles placed on a rough surface // *Surf. Interface Anal.* – 2006. – V. 38, No 4. – P. 679–681.
6. *Kittler J., Illingworth J., Foglein J.* Threshold selection based on a simple image statistic // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing.* – 1985. – V. 30, No 2. – P. 125–147.

Поступила в редакцию  
22.01.07

**Чукланов Антон Петрович** – аспирант лаборатории физики и химии поверхности Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: *achuklanov@kfti.knc.ru*

**Гатиятов Руслан Гумарович** – студент Казанского государственного университета, инженер Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

**Визяев Дмитрий Анатольевич** – младший научный сотрудник лаборатории физики и химии поверхности Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

**Борозин Павел Александрович** – младший научный сотрудник Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

**Галаяутдинов Мансур Фаляхутдинович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной фотохимии Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

**Бухараев Анастас Ахметович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики и химии поверхности Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.