

Раздел I. Электроника и нанотехнологии

УДК 621.38-022

DOI 10.23683/2311-3103-2018-7-6-16

**А.Л. Громов, А.С. Коломийцев, А.В. Котосонова,
И.В. Панченко, Н.А. Шандыба**

РАЗРАБОТКА РАСТРОВЫХ ШАБЛОНОВ ДЛЯ БЕЗМАСОЧНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Представлены результаты разработки алгоритма и программного обеспечения, позволяющих создавать растровые шаблоны для безмасочного структурирования поверхности твердых тел и формирования наноразмерных структур методом фокусированных ионных пучков (ФИП). Разработан способ генерации цифровых растровых шаблонов, основанный на формировании файлов формата BMP и ASCII на основании математических выражений, описывающих необходимый рельеф поверхности, либо профилей, заданных графическим файлом. Представлен алгоритм, учитывающий результаты моделирования процессов взаимодействия ионного пучка с подложкой, а также эволюцию профиля поверхности твердого тела при травлении ФИП. Показаны экспериментальные результаты, учитывающие процесс изменения рельефа поверхности в ходе травления под влиянием угловой зависимости коэффициента распыления в каждой точке, эффектов перекрытия областей воздействия ФИП при пошаговом перемещении и пересаживания распыленного материала. Разработанное программное обеспечение позволяет формировать специализированные шаблоны для различного технологического оборудования, реализующего метод ФИП, которые могут быть использованы для создания трехмерных структур с высокой разрешающей способностью и воспроизводимостью параметров, а также автоматизировать процесс проектирования и генерации шаблонов. Ключевой особенностью разработанного программного обеспечения является универсальность и возможность генерировать шаблоны для травления и осаждения методом ФИП на основе математических выражений и профилей, заданных в виде двумерных графиков. Использование математических выражений важно при проектировании шаблонов для изготовления элементов интегральной оптоэлектроники, таких как линзы Френеля и геодезические линзы. Использование двумерных профилей позволяет с высокой эффективностью создавать шаблоны для формирования структур микромеханики и острия зондов для нанодиагностики поверхности твердых тел. Возможность мультиплицирования сгенерированного шаблона является важным шагом к повышению производительности литографических процессов на основе ФИП и возможности автоматизации процесса мелкосерийного производства микро- и наноструктур. Результаты исследований могут быть использованы при разработке перспективных технологических процессов формирования элементной базы нанoeлектроники и наномеханики с использованием локальных лучевых методов наноструктурирования.

Нанотехнология; фокусированный ионный пучок; ионно-лучевое травление; субмикронное профилирование; растровые шаблоны.

A.L. Gromov, A.S. Kolomiytsev, A.V. Kotosonova, N.A. Shandyba, I.V. Panchenko

DEVELOPMENT OF RASTER TEMPLATES FOR AGO STRUCTURING OF SOLID SURFACES USING FOCUSED ION BEAMS

The paper presents the results of the development of the algorithm and software that allows to create raster patterns for maskless structuring of the surface of solids and the formation of nanoscale structures using the method of focused ion beams (FIB). A method for development of

digital raster patterns based on the formation of BMP and ASCII files on the basis of mathematical expressions describing the desired surface relief, or profiles defined by a graphic file, has been developed. An algorithm is presented that considers the results of modeling the interaction of an ion beam with a substrate, as well as the evolution of a solid surface profile during FIB-milling. Experimental results are shown that take into account the process of changing the surface topography during etching under the influence of the angular dependence of the sputtering yield at each point, the effects of overlapping areas of FIB exposure during step-by-step movement and redeposition of the etched material. The developed software allows to create specialized patterns for various technological equipment that implements the FIB method, which can be used to create three-dimensional structures with high resolution and reproducibility of parameters, as well as automate the process of designing and generating patterns. A key feature of the developed software is the versatility and the ability to generate patterns for etching and deposition by the FIB method based on mathematical expressions and profiles specified in the form of two-dimensional graphs. The use of mathematical expressions is important when designing patterns for the manufacture of elements of integrated optoelectronics, such as Fresnel lenses and geodesic lenses. The use of two-dimensional profiles allows with high efficiency to create templates for the formation of structures of micromechanics and the tip of the probes for nanodiagnosics of the surface of solids. The ability to multiply the generated patterns is an important step towards improving the performance of lithographic processes based on FIB and the possibility of automating the process of small-scale production of micro- and nanostructures. The research results can be used in the development of promising technological processes for the formation of the element base of nanoelectronics and nano-mechanics using local nanostructuring methods based on ion and electron beams.

Nanotechnology; focused ion beam; ion beam milling; submicron profiling; raster patterns.

1. Введение. Формирование перспективной элементной базы нанoeлектроники и наносистемной техники неразрывно связано с задачей прецизионного формирования структур с нанометровыми геометрическими размерами. В настоящее время для получения заданных размеров и характеристик элементов применяются гибридные технологические процессы, сочетающие в себе операции как традиционной микроэлектроники, так и перспективных локальных методов нанотехнологии [1–4]. Одним из таких методов, позволяющих формировать наноразмерный профиль путем локального ионно-лучевого травления или локального ионно-стимулированного осаждения материалов является метод фокусированных ионных пучков (ФИП) [4–6].

По сравнению с другими методами наноразмерного профилирования поверхности твердых тел метод ФИП обладает рядом достоинств, среди которых: высокая разрешающая способность, высокая скорость формирования топологического рисунка без необходимости использования резистов и масок, возможность обработки широкой номенклатуры материалов и структур, локальность и избирательность процесса травления. Указанные достоинства достигаются возможностью изменения технологических параметров процесса в широких пределах [7]. Несмотря на перечисленные достоинства, наноразмерное профилирование методом ФИП сопряжено с рядом технологических сложностей, основными из которых наиболее значимыми являются низкая производительность метода, сложность достижения предельных значений разрешающей способности, точности, а также сложность применения метода в серийном производстве.

К настоящему времени проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования технологии обработки твердотельных структур фокусированным ионным пучком, процессов, протекающих при ионном распылении твердого тела [8, 9], ведется разработка и оптимизация технологических процессов формирования наноразмерных структур методом ФИП.

В программе управления системой ФИП область, по которой перемещается пучок, задается в виде шаблона. Как правило, применяется три основных способа задания шаблонов: формирование шаблона из набора стандартных фигур, доступ-

ных в используемом программном обеспечении, формирование шаблона в виде растрового графического файла формата *.bmp и формирование шаблона в виде потокового файла [2].

Поставляемые вместе с оборудованием средства создания цифровых растровых шаблонов, не учитывают физические процессы и эффекты возникающие в процессе травления и оказывающие влияние на результирующую геометрию формируемых структур и, как следствие, на будущие рабочие характеристики создаваемых устройств [9]. Учет угловой зависимости коэффициента распыления, эффектов аморфизации подложки и переосаждения распыленного материала на каждом этапе профилирования позволит повысить точность прогнозирования параметров рельефа поверхности и даст возможность создать систему генерации шаблонов для профилирования поверхности с необходимой точностью и воспроизводимостью.

Таким образом, целью данной работы является разработка алгоритма и программного обеспечения, позволяющего формировать цифровые растровые шаблоны для безмасочного структурирования поверхности твердых тел методом ФИП, с учетом основных физических эффектов, возникающих при взаимодействии ионного пучка с твердым телом.

2. Методика исследования. Растровый шаблон является цифровым файлом, содержащим информацию о координатах точек воздействия ФИП на подложку и времени воздействия ФИП в каждой из них. Наиболее распространенным форматом шаблона является растровых изображение типа BMP, в котором информация о времени воздействия пучка в каждой точке закодирована глубиной цвета каждого пикселя. Кроме этого, файл-шаблона может представлять собой потоковый символный файл формата ASCII.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований [10, 11] разработан комплекс программного обеспечения для генерации шаблонов для безмасочного структурирования подложек методом фокусированных ионных пучков, который обеспечивает автоматизацию процесса создания шаблонов и получение высокой повторяемости результатов травления. Интерфейс главного окна программы представлен на рис. 1.

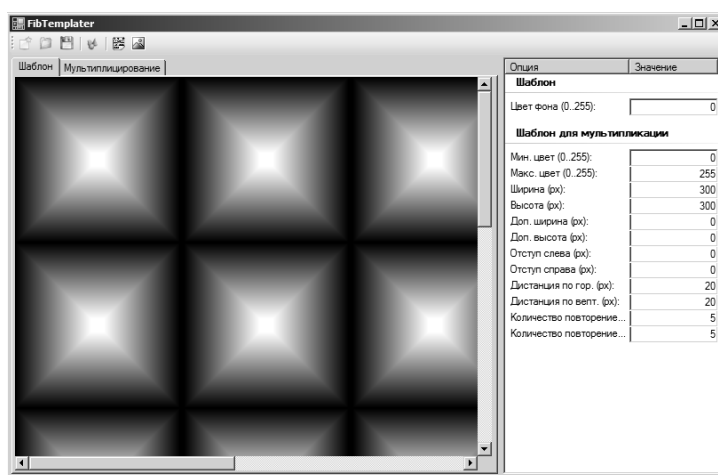


Рис. 1. Интерфейс программы

Для генерации шаблонов разработан алгоритм (рис. 2), учитывающий результаты моделирования рельефа поверхности при травлении ФИП и отклонения размеров структур от заданных.

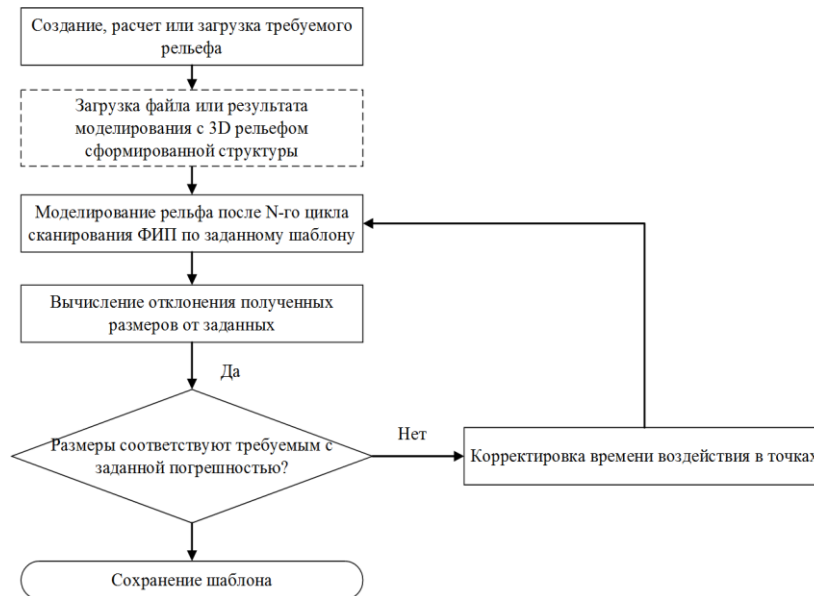


Рис. 2. Схема алгоритма, реализованного в программном обеспечении, для генерации растровых шаблонов для безмасочного структурирования поверхности подложек методом фокусированных ионных пучков

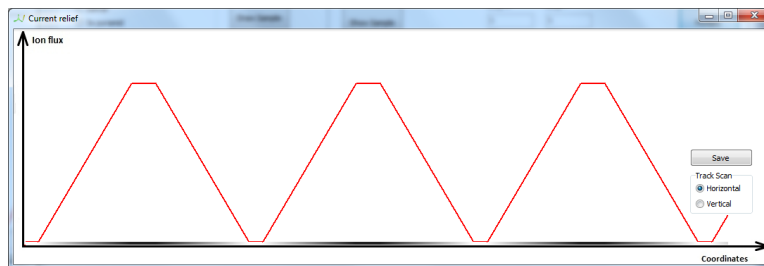
На начальном этапе процедуры выполняется моделирование рельефа поверхности при травлении ФИП по заданному шаблону. Каждый сгенерированный шаблон применяется при моделировании структуры, которая будет сформирована с его помощью. Полученные данные сравниваются с заданными геометрическими параметрами формируемой структуры. Если полученный в результате моделирования рельеф имеет отличия, то исходный шаблон корректируется таким образом, чтобы нивелировать их. Количество итераций, которые проходит алгоритм зависит от точности, заданной до начала вычислений. Данный подход позволяет минимизировать количество установочных экспериментов и практически исключить брак.

Программа имеет несколько режимов генерации и мультипликации растровых графических шаблонов по шаблону с большим разрешением: генерация стандартных фигур; мультиплицирование шаблонов, загружаемых из файла; генерация шаблонов по заранее заданному математическому выражению; генерация шаблонов по контуру, заданному графическим файлом.

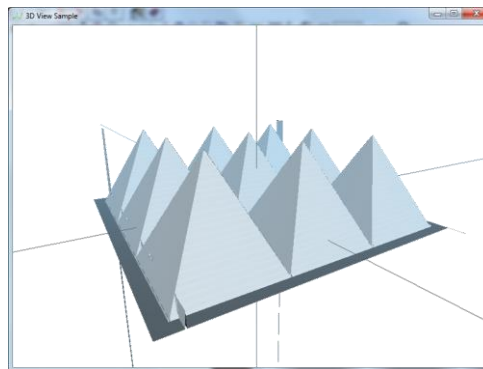
Управление режимом сканирования ФИП по точкам шаблона позволяет минимизировать отрицательные эффекты переосаждения, возникающие в процессе распыления подложки. Особенно сильно данные эффекты проявляются при количестве проходов ФИП менее 10. Например, при формировании структуры, форма которой радиально симметрична, возможно снизить искажение рельефа формируемой структуры, если пучок ионов будет иметь круговое направление движения. Возможность выбора следующей случайной точки воздействия ФИП позволяет значительно уменьшить количество переосажденного материала в какой-то одной области формируемой структуры, которая неминуемо возникает при движении ФИП в процессе травления из одной области структуры в другую последовательно.

Разработанное программное обеспечение позволяет рассчитывать и моделировать профили структур, которые будут изготовлены по сгенерированным шаблонам. Существует два режима моделирования рельефа поверхности структур. Двумерный реализует отображение сечения структуры, а трехмерный режим отображает объемный рельеф структуры, выравненной по шаблону (рис. 3).

Таким образом, разработанная программа позволяет создавать специализированные шаблоны для любого оборудования, реализующего метод ФИП, по которым возможно производить травление трехмерных структур с высокой точностью параметров и воспроизводимостью результата, а также автоматизировать процесс проектирования и генерации необходимых шаблонов.



а



б

Рис. 3. Отображение двумерного (а) и трехмерного (б) рельефов смоделированной структуры

Также в разработанном ПО реализована функция оценки шероховатости рельефа поверхности модельной структуры на основании выражения [10]:

$$L_a = \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \left| S_{ij} - \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} S_{ij} \right|, \quad (1)$$

где L_a – средняя арифметическая шероховатость (согласно ISO 4287/1), S_{ij} – функция, определяющая рельеф поверхности в выбранной области (X , Y), N_x , N_y – число точек по осям X , Y соответственно.

Для исследования разработанного комплекса программного обеспечения для генерации растровых шаблонов для безмасочного структурирования поверхности подложек методом фокусированных ионных пучков и методики повышения точности переноса топологического рисунка на подложку, были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых на подложке монокристаллического

кремния КЭФ-4,5 (100) методом ФИП формировались структуры размером 3×3 мкм и глубиной 4.5 мкм. Формирование производилось по стандартному шаблону, созданному в ПО, поставляемому вместе с РЭМ Nova NanoLab 600 и по комплекту шаблонов, сгенерированному в разработанном ПО. Травление по стандартному шаблону производилось при степени перекрытия соседних областей воздействия 50%, рекомендованной ПО, поставляемым с прибором. Травление по шаблонам, созданным разработанным программным обеспечением, производилось при степени перекрытия соседних областей воздействия 35%, которое является оптимальным согласно исследованиями, результаты которых представлены в [12]. При этом разрешение растровых шаблонов было подобрано разработанным ПО автоматически исходя из заданных параметров ФИП. Параметры травления ФИП по стандартному шаблону составили: время воздействия в точке 500 мкс, ток пучка 0,5 нА, количество проходов 1230. Использование меньшего тока не позволяет получать требуемую глубину в приемлемые сроки выполнения эксперимента.

2. Результаты и обсуждение. Полученные структуры исследовались методами РЭМ и АСМ. Для исследования методом РЭМ производилось травление кросс-секций (рис. 4). С помощью пакета программ Image Analysis 2.0 проводилась обработка АСМ-изображений полученных структур, строились профилограммы (рис. 5, 6), по профилограммам измерялись углы отклонения стенок от вертикали и отклонение полученного профиля от заданного [12–14].

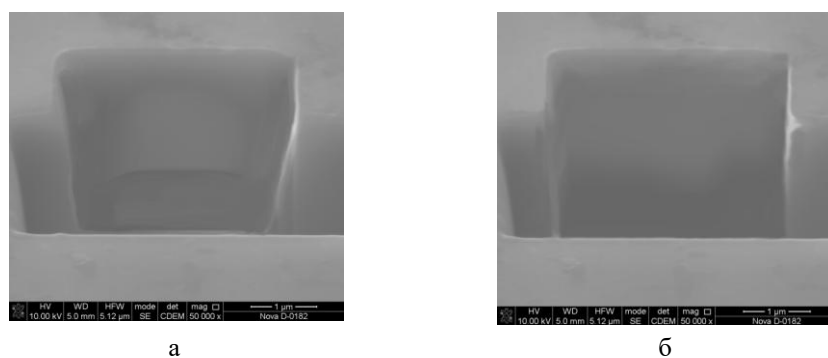


Рис. 4. РЭМ-изображение кросс-секций структур сформированных: а – по стандартному шаблону; б – по комплекту шаблонов, сгенерированных в разработанном ПО

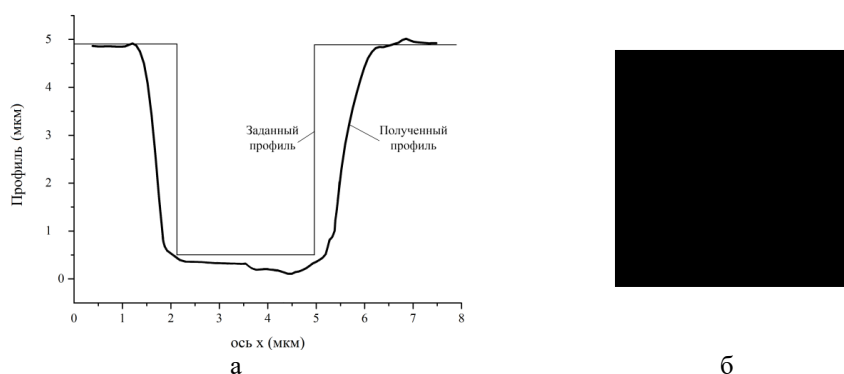


Рис. 5. АСМ-профилограмма (а) структуры, полученной травлением по стандартному шаблону (б)

Сформированная по стандартному шаблону структура (рис. 5) имеет следующие геометрические характеристики: отклонение стенок от вертикали до 15° , отклонение полученного профиля от заданного 28 %, отклонение латеральных размеров 1 мкм.

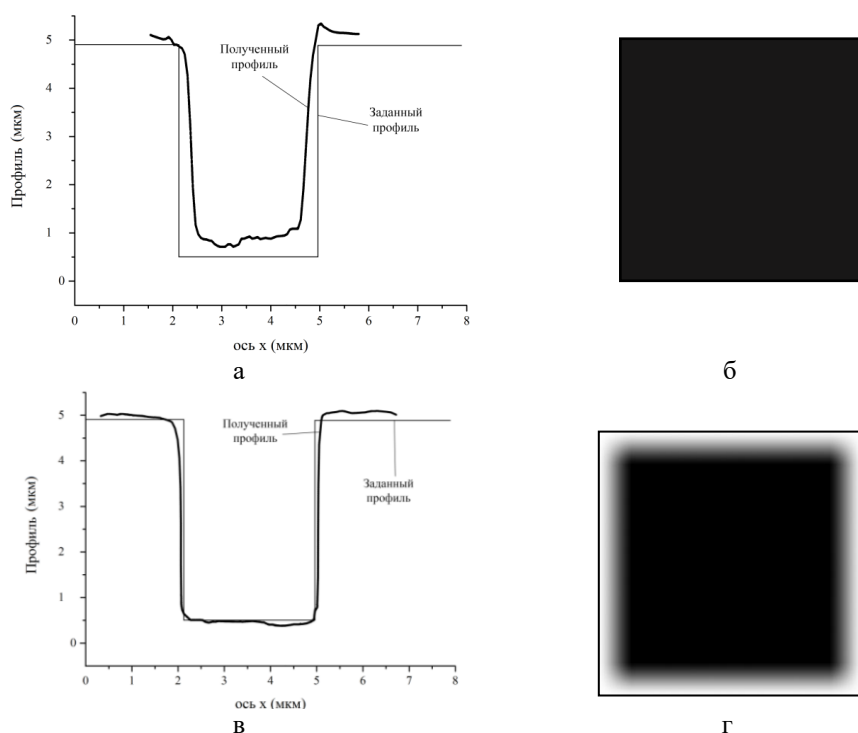


Рис. 6. АСМ-профилограммы (а, в) структур, полученных травлением по шаблону (б, г), созданным разработанным ПО: а, б – I этап; в, г – II этап

Формирование структуры по комплекту растровых шаблонов, созданному с использованием разработанного ПО, выполнялось в два этапа. На первом этапе созданный разработанным ПО равномерно окрашенный шаблон (рис. 6,б) имеет разрешение, подобранное с учетом результатов теоретических и экспериментальных исследований, представленных в главах 2, 3 таким образом, чтобы периферийные области пучка не оказывали влияния на вертикальность стенок структуры. Травление проводилось при токе 1 нА. При этом, сформированная на первом этапе структура имела размеры меньше требуемых (рис. 6,а).

На втором этапе полученная профилограмма загружалась в разработанное ПО и производился анализ отклонения полученного профиля от заданного. На основе результатов проведенного анализа генерировался второй растровый шаблон (рис. 6,г), учитывающий профиль полученной структуры и задающий технологические параметры фокусированного ионного пучка, которые позволяют сформировать структуру с минимальными отклонениями размеров от заданных.

Травление по шаблону (рис. 6,г) выполнялось при следующих режимах ФИП: ток пучка 1 пА, время стояния в точке 500 мкс, количество проходов 29123. На рис. 6,в показана профилограмма структуры после второго этапа травления.

Параметры структуры, полученной после второго этапа травления по разработанному комплексу шаблонов и их сравнение с характеристиками структуры, полученной травлением по стандартному шаблону представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры полученных структур

Параметр	Стандартный шаблон	Комплект разработанных шаблонов
Отклонение стенок от вертикали	~15 °	< 1,5°
Отклонение полученного профиля от заданного	~28 %	< 3 %

Таким образом, разработанный алгоритм и комплекс ПО позволяют повысить точность формирования структур травлением методом ФИП и сократить время их разработки и создания. Дополнительным достоинством предложенного алгоритма и комплекта ПО является возможность корректировки уже сформированных структур на основе учета их АСМ-профилограмм с целью устранения недостатков предыдущих технологических операций.

Заключение. В результате выполнения работы создан комплекс программного обеспечения, позволяющего генерировать цифровые растровые шаблоны, позволяющие формировать наноразмерный рельеф поверхности твердых тел с высокой точностью и разрешающей способностью. Разработанный алгоритм и использованная математическая модель расчета рельефа поверхности подложки при травлении фокусированным ионным пучком позволяют прогнозировать параметры рельефа поверхности твердых тел при травлении методом ФИП и производить его учет при подготовке цифрового растрового шаблона. Адекватность разработанной модели подтверждается хорошей корреляцией результатов моделирования профиля структуры с экспериментальными данными в широком диапазоне значений параметров системы. Так использование специально разработанных шаблонов позволило уменьшить угол наклона вертикальных стенок структур с 15 ° до 1,5 °, а величину общей погрешности (отклонения полученного профиля от заданного) с 28 % до 3 %.

Для повышения адекватности разработанного алгоритма и точности получаемых структур необходимо повысить количество итераций при расчете количества переосажденного материала, произвести учет эффекта аморфизации приповерхностного слоя подложки на каждом проходе ионного пучка по шаблону.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке перспективных технологических процессов формирования элементной базы нанoeлектроники и наномеханики с использованием локальных лучевых методов наноструктурирования. [13–16].

Важным направлением применения результатов работы является создание наноразмерных структур сложной формы, таких как, например, острия зондов для специализированных задач зондовой нанодиагностики. В работах [17–20] описаны варианты применения локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения для производства зондовых датчиков-кантилеверов.

Благодарности

Результаты были получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного использования «Нанотехнология» Южного Федерального Университета. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-79-00175).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы / под ред. В.В. Лучинина, Ю.М. Таирова. – М.: Физматлит, 2006. – 552 с.
2. The Focused Ion Beam Instrument // Instrumentation, Theory, Techniques and Practice. – Springer US, 2005. – P. 1-12.
3. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2016. – 480 с.
4. *Reyntjens S.* A review of focused ion beam applications in microsystem technology // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2001. – Vol. 11, No. 4.
5. *Yao N., Wang Z.* Handbook of microscopy for nanotechnology. – Kluwer academic publishers, 2005. – 743 p.
6. Handbook of charged particle optics (2nd ed.) / ed. by J. Orloff. – CRC Press, 2009. – 688 p.
7. *Коломийцев А.С., Ильин О.И., Громов А.Л., Лисицын С.А., Катханов Б.С.* Субмикронное структурирование поверхности подложек кремния методом фокусированных ионных пучков // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11-3. – С. 615-618.
8. *Гурович Б.А., Приходько К.Е., Талденков А.Н. и др.* Разработка ионно-пучкового метода изготовления кремниевых нанопроводов // Российские нанотехнологии. – 2012. – Т. 7, № 1-2. – С. 93-97.
9. *Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G.* Formation of nanosize structures on a silicon substrate by method of focused ion beams // Semiconductors. – 2011. – Vol. 45, No. 13. – P. 1709-1712.
10. *Агеев О.А., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г.* Исследование параметров взаимодействия фокусированных ионных пучков с подложкой // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2011. – № 3 (89). – С. 20-25.
11. *Prikhodko K. E., Gurovich B. A., Komarov D.A. et al.* Microstructure evolution during silicon oxidation at room temperature under composite ion beam irradiation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2014. – Vol. 326. – P. 273-277.
12. *Агеев О.А., Алексеев А.М., Внукова А.В., Коломийцев А.С., Громов А.Л., Коноплев Б.Г., Лисицын С.А.* Моделирование рельефа поверхности подложки при наноразмерном профилировании методом фокусированных ионных пучков // Российские нанотехнологии. – 2014. – № 1-2 (январь-февраль). Т. 9. – С. 44-49.
13. *Sabouri A., Anthony C.J., Bowen J., Vishnyakov V., Prewett P.D.* The effects of dwell time on focused ion beam machining of silicon // Microelectronic Engineering. – 2014. – Vol. 121. – P. 24-26.
14. *Roediger P., Wanzenboeck H., Waid S., Hochleitner G., Bertagnolli E.* Focused-ion-beam-inflicted surface amorphization and gallium implantation–new insights and removal by focused-electron-beam-induced etching // Nanotechnology. – 2011. – Vol. 22. – P. 235302.
15. *De Felicis D., Mughal M., Bemporad E.* A method to improve the quality of 2.5 dimensional micro- and nanostructures produced by focused ion beam machining // Micron. – 2017. – Vol. 101. – P. 8-15.
16. *Агеев О.А., Коломийцев А.С., Громов А.Л., Ильин О.И.* Исследование режимов субмикронного профилирования поверхности подложек кремния методом фокусированных ионных пучков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 171-180.
17. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Смирнов В.А., Коломийцев А.С., Сербу Н.И.* Модификация зондов для сканирующей зондовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков // Микроэлектроника. – 2012. – Т. 41, № 1. – С. 47-56.
18. *Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Bykov A.V., Smirnov V.A., Kots I.N.* Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam // Microelectronics Reliability. – 2015. – Vol. 55. – P. 2131-2134.
19. *Агеев О.А., Ильин О.И., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г., Смирнов В.А.* Модификация зондовых датчиков-кантилеверов для атомно-силовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 4. – С. 4-8.
20. *Быков А.В., Коломийцев А.С., Полякова В.В., Смирнов В.А.* Профилирование зондов для сканирующей зондовой нанодиагностики методом фокусированных ионных пучков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 9 (158). – С. 133-140.

REFERENCES

1. Nanotekhnologii: fizika, protsessy, diagnostika, pribory [Nanotechnology: physics, processes, diagnostics, devices], ed. by V.V. Luchinina, Yu.M. Tairova. Moscow: Fizmatlit, 2006, 552 p.
2. The Focused Ion Beam Instrument, *Instrumentation, Theory, Techniques and Practice*. Springer US, 2005, pp. 1-12.
3. Nanotekhnologii v elektronike [Nanotechnology in electronics], ed. by Yu.A. Chaplygina. Moscow: Tekhnosfera, 2016, 480 p.
4. Reyntjens S. A review of focused ion beam applications in microsystem technology, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2001, Vol. 11, No. 4.
5. Yao N., Wang Z. Handbook of microscopy for nanotechnology. Kluwer academic publishers, 2005, 743 p.
6. Handbook of charged particle optics (2nd ed.), ed. by J. Orloff. CRC Press, 2009, 688 p.
7. Kolomiytsev A.S., Il'in O.I., Gromov A.L., Lisitsyn S.A., Katkhanov B.S. Submikronnoe strukturirovanie poverkhnosti podlozhek kremniya metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Submicron structuring of silicon substrate surface by the method of focused ion beams], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2012, No. 11-3, pp. 615-618.
8. Gurovich B.A., Prihod'ko K.E., Taldenkov A.N. i dr. Razrabotka ionno-puchkovogo metoda izgotovleniya kremnievykh nanoprovodov [Development of ion-beam method of silicon nanowires manufacturing], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnologies], 2012, Vol. 7, No. 1-2, pp. 93-97.
9. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Konoplev B.G. Formation of nanosize structures on a silicon substrate by method of focused ion beams, *Semiconductors*, 2011, Vol. 45, No. 13, pp. 1709-1712.
10. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Konoplev B.G. Issledovanie parametrov vzaimodeystviya fokusirovannykh ionnykh puchkov s podlozhkoy [Study of the interaction parameters of focused ion beams with the substrate], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2011, No. 3 (89), pp. 20-25.
11. Prihodko K. E., Gurovich B. A., Komarov D.A. et al. Microstructure evolution during silicon oxidation at room temperature under composite ion beam irradiation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2014, Vol. 326, pp. 273-277.
12. Ageev O.A., Alekseev A.M., Vnukova A.V., Kolomiytsev A.S., Gromov A.L., Konoplev B.G., Lisitsyn S.A. Modelirovanie rel'efa poverkhnosti podlozhki pri nanorazmernom profilirovanii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modeling of the substrate surface relief under nanoscale profiling by the method of focused ion beams], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2014, No. 1-2 (yanvar'-fevral'), Vol. 9, pp. 44-49.
13. Sabouri A., Anthony C.J., Bowen J., Vishnyakov V., Prewett P.D. The effects of dwell time on focused ion beam machining of silicon, *Microelectronic Engineering*, 2014, Vol. 121, pp. 24-26.
14. Roediger P., Wanzenboeck H., Waid S., Hochleitner G., Bertagnolli E. Focused-ion-beam-inflicted surface amorphization and gallium implantation—new insights and removal by focused-electron-beam-induced etching, *Nanotechnology*, 2011, Vol. 22, pp. 235302.
15. De Felicitis D., Mughal M., Bemporad E. A method to improve the quality of 2.5 dimensional micro-and nanostructures produced by focused ion beam machining, *Micron*, 2017, Vol. 101, pp. 8-15.
16. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Gromov A.L., Il'in O.I. Issledovanie rezhimov submikronnogo profilirovaniya poverkhnosti podlozhek kremniya metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [A study of the submicron surface profiling of silicon wafers using focused ion beams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 171-180.
17. Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A., Kolomiytsev A.S., Serbu N.I. Modifikatsiya zondov dlya skaniruyushchey zondovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modification of probes for scanning probe microscopy by focused ion beams], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2012, Vol. 41, No. 1, pp. 47-56.
18. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Bykov A.V., Smirnov V.A., Kots I.N. Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam, *Microelectronics Reliability*, 2015, Vol. 55, pp. 2131-2134.

19. Ageev O.A., Il'in O.I., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Smirnov V.A. Modifikatsiya zondovykh datchikov-kantileverov dlya atomno-silovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modification of probe sensors-cantilevers for atomic force microscopy by focused ion beams], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem technique], 2011, No. 4, pp. 4-8.
20. Bykov A.V., Kolomiitsev A.S., Polyakova V.V., Smirnov V.A. Profilirovanie zondov dlya skaniruyushchey zondovoy nanodiagnostiki metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Profiling of probes for scanning probe nanodiagnostics by the method of focused ion beams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 133-140.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.А. Рындин.

Громов Александр Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: adn13@gmail.com; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +78634371611; НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ; к.т.н.; н.с.

Коломийцев Алексей Сергеевич – e-mail: askolomiitsev@sfedu.ru; тел.: 88634680890 (доб. 30105); кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой.

Котосонова Алена Витальевна – e-mail: alena.kotosonova@gmail.com; тел.: 88634371940; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

Панченко Иван Викторович – e-mail: iv-pan4encko2014@yandex.ru; кафедра радиотехнической электроники; студент.

Шандыба Никита Андреевич – e-mail: vip.shandyba@mail.ru; кафедра радиотехнической электроники; студент.

Gromov Alexandr Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: adn13@gmail.com; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371611; REC «Nanotechnologies» SFedU; cand. of eng. sc.; researcher.

Kolomiitsev Alexey Sergeevich – e-mail: askolomiitsev@sfedu.ru; phone: +78634680890 (add 30105); the department of nanotechnologies and microsystems technology; cand. of eng. sc.; associate professor; head of department.

Kotosonova Alena Vitalievna – e-mail: alena.kotosonova@gmail.com; phone: +78634371940; the department of nanotechnologies and microsystems technology; student.

Panchenko Ivan Viktorovich – e-mail: iv-pan4encko2014@yandex.ru; the department of electronics in radioengineering; student.

Shandyba Nikita Andreevich – e-mail: vip.shandyba@mail.ru; the department of electronics in radioengineering; student.

УДК 621.369.9

DOI 10.23683/2311-3103-2018-7-16-24

Н.Н. Горбатенко, Д.В. Семенихина

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЯНИЯ ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕГО ЦИЛИНДРА С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ ПОКРЫТОГО СЛОЕМ МЕТАМАТЕРИАЛА

На данный момент актуальной задачей исследования является изучение нелинейных эффектов при облучении монохроматической волной искусственных объектов. В литературе данный эффект получил название эффекта нелинейного рассеяния (ЭНР). Практическое применение ЭНР охватывает все более обширную область радиотехники. ЭНР широко используют для создания сенсоров, поиска насекомых, для поиска людей, попавших в природные катастрофы. Одним из главных направлений практического применения ЭНР также является расширение