

Bykov Alexander Victorovich – NT-MDT Co (Molecular Devices and Tools for NanoTechnology); e-mail: bykov@ntmdt.ru; Building 100, Zelenograd, Moscow, 124482, Russia; phone: +74997357777; chief researcher.

УДК 621.382

А.С. Коломийцев

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СУБМИКРОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПОДЛОЖЕК ФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ ГАЛЛИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР*

Представлены результаты экспериментальных исследований режимов субмикронного профилирования поверхности подложек фокусированным ионным пучком галлия. Для подложек кремния и арсенида галлия получены зависимости глубины травления от тока ионного пучка, от общего времени воздействия; угла наклона грани от тока ионного пучка, от значения параметра overlap, от общего времени воздействия; среднеарифметической шероховатости от тока ионного пучка, от значения параметра overlap, от времени воздействия ионного пучка в точке и от общего времени воздействия. Установлено, что минимальное значение среднеарифметической шероховатости для Si и GaAs достигается при значениях overlap 50 и 25 % соответственно. Показано, что угол наклона грани для структур на Si и GaAs возрастает в диапазоне значений тока 1 нА – 3 нА. Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования структур и элементов микро- и нанoeлектроники, интегральной оптоэлектроники с применением метода фокусированных ионных пучков.

Нанотехнология, нанодиагностика; фокусированные ионные пучки; наноразмерное профилирование; наносистемная техника.

A.S. Kolomiitsev

THE RESEARCH OF THE SUBSTRATES SUBMICRON PROFILING USING FOCUSED GALLIUM ION BEAM FOR PRODUCTION OF THE NANOSCALE STRUCTURES

The results of experimental studies of the modes of submicron profiling of a substrates surface are presented by the focused ionic beam of gallium. The dependences of the etching depth and ion beam current, the total exposure time; the angle of the face inclination of the ion beam current, the value overlap parameter, the total exposure time; arithmetic average roughness of the ion beam current, the value overlap parameter, the time of the ion beam in situ exposure and the total exposure time for silicon and gallium arsenide substrates are obtained. It has been established that the minimum value of an average arithmetic roughness for Si and GaAs is reached at overlap values of 50% and 25 % respectively. It is shown that the slope faces to structures on Si and GaAs increases in the range of current of 1 pA – 3 nA. The results of experimental studies can be used in the development process of the structures formation and elements of micro- and nanoelectronics, integrated optoelectronics with application the method of focused ion beams.

Nanotechnology; nanodiagnostics; focused ion beams; nanoscale profiling; nanosystems technology.

Введение. В настоящее время локальное ионно-лучевое травление фокусированным ионным пучком (ФИП) является одним из наиболее перспективных методов субмикронного профилирования поверхности твердых тел [1]. Применение технологии

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-31162 мол_а, а также Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 16.1154.2014/К).

ФИП позволяет достичь высокой селективности, точности, воспроизводимости параметров микро- и наноструктур. Использование ФИП дает возможность использовать проводящие, полупроводниковые и диэлектрические подложки и формировать на них сложные трехмерные структуры без использования резистов и масок [2, 3].

Метод ФИП успешно применяется для морфолого-геометрического и структурно-фазового анализа поверхностей, является актуальным при анализе дефектов и границ раздела композитных наноматериалов, препарирования микро- и наноразмерных объектов [2]. Использование технологии ФИП предоставляет широкие возможности по созданию элементов микросистемной техники, формированию элементов микрооптики (таких как оптические дифракционные решетки, линзы Френеля). Применение ионного пучка является эффективным при прецизионном избирательном ремонте и регулировке изделий МЭМС, изготовлении микро- и нанoeлектронных сенсоров [4], изготовлении и модификации зондовых датчиков для атомно-силовой микроскопии [5, 6], а также создании центров кристаллизации для управляемого роста углеродных нанотрубок и формирования квантовых точек [7].

Травление с использованием технологии ФИП представляет собой локальное распыление материала подложки под воздействием фокусированного ионного пучка, который пошагово перемещается по поверхности. Для субмикронного профилирования поверхности твердых тел используются ионы галлия с энергией 2–30 кэВ [8]. Перемещение пучка задается с помощью растрового графического шаблона, который можно формировать из набора стандартных фигур, доступных в программном обеспечении управления системой ФИП, также есть возможность формировать шаблон в виде растрового графического файла формата *.bmp или в виде потокового файла.

Наиболее важными технологическими параметрами ионного пучка являются: время воздействия ионного пучка в точке, ток ионного пучка, общее время воздействия и перекрытие (overlap), которое определяется диаметром пучка и шагом между точками воздействия, как показано на рис. 1, при этом схема формирования рельефа на поверхности подложки методом ФИП будет иметь вид, как показано на рис. 2.

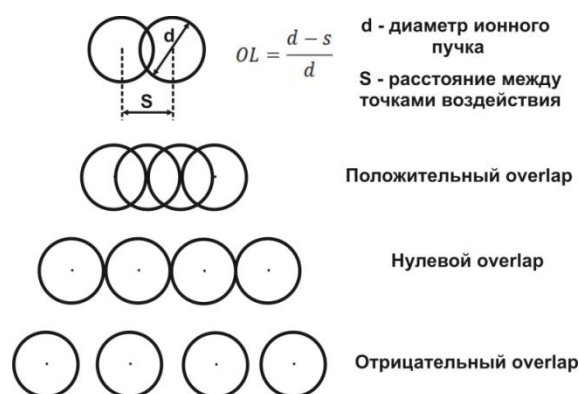


Рис. 1. Определение параметра overlap

Существенным ограничением использования метода ФИП для микро- и наноразмерного локального профилирования поверхностей твердых тел является сложность выбора режимов ионно-лучевого травления, которая определяется большим количеством технологических параметров, влияющих на формирование профиля при травлении [2, 3].

Целью данной работы является исследование режимов наноразмерного профилирования подложек методом ФИП для формирования микро- и наноструктур с наименьшими отклонениями значений геометрических параметров от заданных.

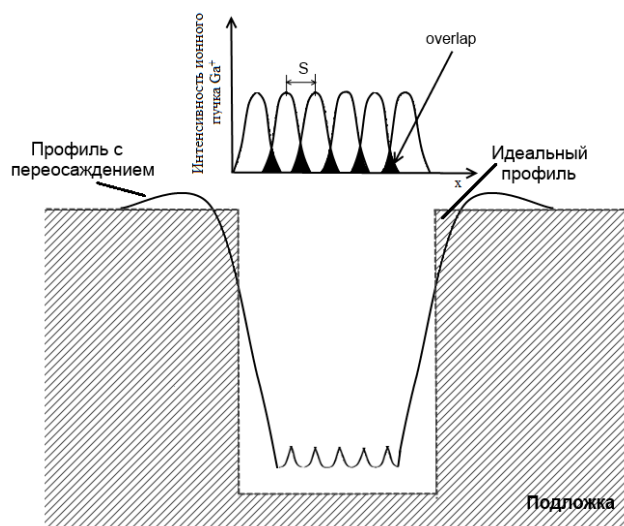


Рис. 2. Схема процесса формирования рельефа при травлении ФИП

Методика исследования. Экспериментальные исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа с системой ФИП Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды) и сканирующего зондового микроскопа Solver P47H-PRO (ЗАО «НТ-МДТ», Россия). В качестве образцов для экспериментальных исследований использовались подложки Si (КДБ-10 (100)) и GaAs. Данный выбор материалов обусловлен их технологичностью, широким использованием и перспективностью для применения в технологии нанoeлектроники, МЭМС и НЭМС.

Для определения влияния параметров ФИП на геометрические характеристики формируемых структур была разработана методика, согласно которой по специально разработанному шаблону формировались микро- и наноразмерные структуры. Шаблон для травления ФИП представлял собой массив прямоугольников размерами $5 \times 5 \text{ мкм}^2$, сформированный с использованием стандартных средств проектирования программы управления системой ФИП. Варьировались значения тока ионного пучка, значения параметра overlap, время воздействия ионного пучка в точке и общее время воздействия.

На первом этапе экспериментальных исследований значение тока изменялось пошагово от 1 пА до 3 нА, при значении: overlap 50 % и времени воздействия в точке 1 мкс. На втором этапе изменялось значение параметра overlap от 0 до 80 %, с шагом 10 %, при значениях тока ионного пучка 50 пА и времени воздействия в точке 1 мкс. В ходе проведения третьего этапа экспериментальных исследований параметры фокусированного ионного пучка имели следующие значения: overlap 50 %, ток ионного пучка 50 пА, а значения времени воздействия ионного пучка в точке изменялись в диапазоне 200 нс – 500 мкс.

Четвертый этап экспериментальных исследований заключался в формировании массива структур при различном значении общего времени воздействия ФИП: от 10 с до 300 с, при времени воздействия в точке 1 мкс, значении параметра overlap 50 % и значении тока ионного пучка 50 пА.

После проведения операций ионно-лучевого травления, поверхность подложек исследовалась методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Результаты исследований представлены на рис. 3,а-г.

При исследовании сформированных массивов структур методами АСМ определялись такие геометрические параметры, как глубина травления, угол наклона боковой грани и среднеарифметическая шероховатость дна, которые измерялись по профилограммам, полученным на основе АСМ-изображений при помощи программного пакета обработки АСМ-изображений Image Analisys 3.0 (ЗАО «НТ-МДТ», Россия).

На основании анализа данных экспериментальных исследований получены зависимости геометрических параметров формируемых структур от тока ионного пучка, значения параметра overlap, времени воздействия в точке и общего времени наноразмерного профилирования.

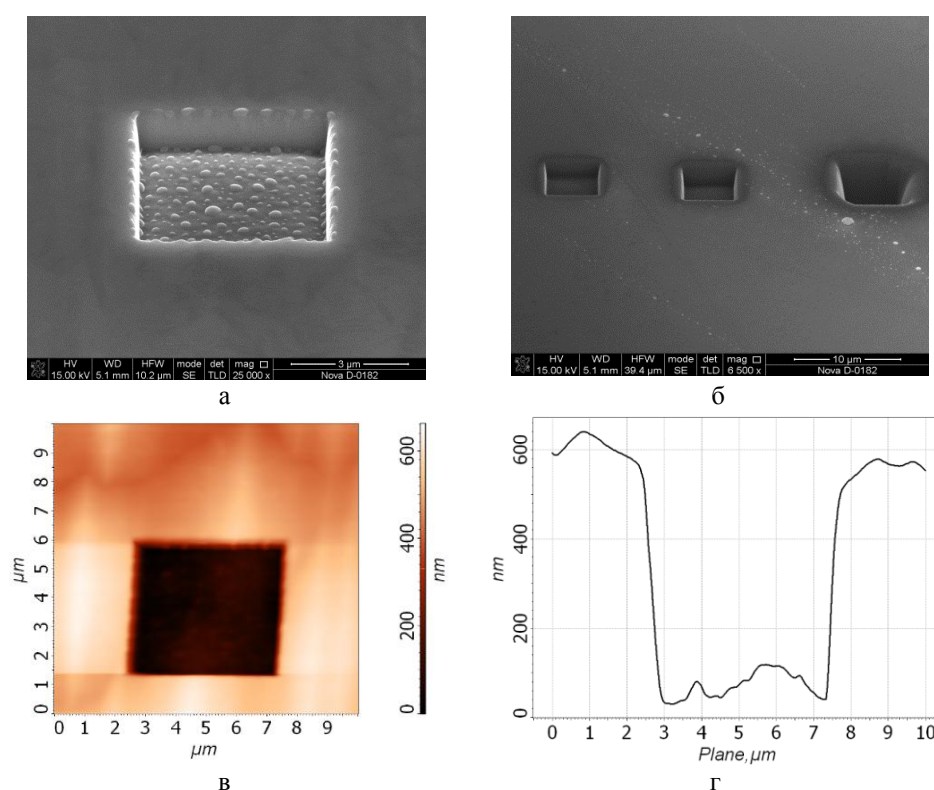


Рис. 3. РЭМ-изображение фрагмента тестовой структуры на подложке арсенида галлия (а), РЭМ-изображение тестовых структур, полученных на подложке кремния (б), АСМ-изображение фрагмента тестовой структуры на подложке арсенида галлия (в), профилограмма фрагмента тестовой структуры (г)

Результаты и обсуждение. На рис. 4 показана зависимость угла наклона грани от значения тока ионного пучка для Si и GaAs, также получены зависимости глубины травления и среднеарифметической шероховатости от тока ФИП.

Глубина формируемых структур прямо пропорциональна значению тока ионного пучка, что связано с увеличением количества распыленного вещества, происходящим вследствие возрастания диаметра пучка при увеличении ионного тока. При идентичных значениях тока ионного пучка структуры на подложке GaAs имеют большую

глубину, чем на подложке Si. Данный эффект связан с различием коэффициентов распыления GaAs и Si, соответственно коэффициент распыления GaAs при 30 кэВ составляет 8, 17, а Si – 1,06 [6]. Зависимость среднеарифметической шероховатости для структур на Si подложке возрастает с увеличением значений тока, что объясняется усилением влияния эффекта переосаждения распыленного материала. Иной характер аналогичной зависимости для структур на подложке GaAs может быть связан с формированием капель жидкого Ga на поверхности при обработке ФИП.

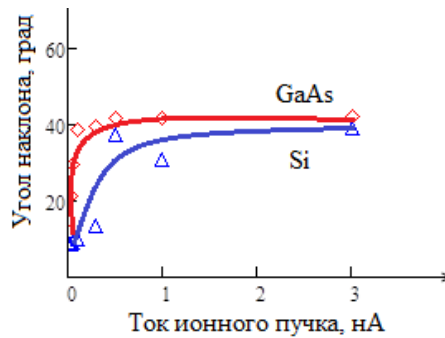


Рис. 4. Экспериментальная зависимость угла наклона грани от значения тока ионного пучка для Si и GaAs

С ростом значений тока ионного пучка происходит увеличения угла наклона грани (см. рис. 4), что объясняется увеличением диаметра ионного пучка, уширением его периферийных областей [6] и, как следствие этого, повышением интенсивности подтравливания стенок, а также увеличением количества материала, переосаждающегося на поверхность боковых граней.

На рис. 5 показаны зависимости среднеарифметической шероховатости и угла наклона грани структур от значения параметра overlap. Значения среднеарифметической шероховатости структур полученных методом травления ФИП на подложке Si, лежат в диапазоне 2,5–3,5 нм, и минимальное значение достигается при значении параметра overlap 50 % (рис. 5,а). Интервал значений среднеарифметической шероховатости структур на GaAs подложке составляет 7–20 нм, а минимальное ее значение наблюдается при значении overlap 25 %.

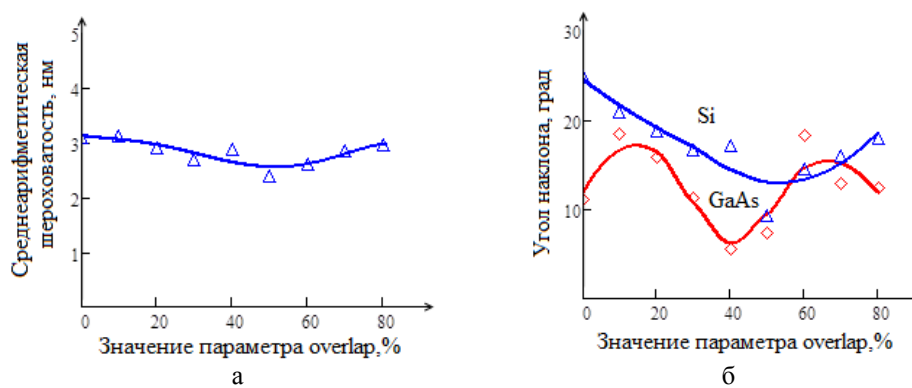


Рис. 5. Зависимость среднеарифметической шероховатости дна структур на подложке Si от значения параметра overlap (а), зависимость угла наклона грани структур от значения параметра overlap для Si и GaAs (б)

Минимальные значения угла наклона грани для структур на подложках GaAs и Si достигаются при значениях параметра overlap 40 и 50 % соответственно. Различия значений среднеарифметической шероховатости для GaAs и Si, а также различие значений overlap, при которых наблюдаются минимумы зависимостей, связаны с формированием капель жидкого Ga на поверхности подложки GaAs, при ее травлении ионами Ga^+ , и отсутствием подобных эффектов на подложке Si.

С увеличением значения времени воздействия ионного пучка в точке происходит возрастание значений среднеарифметической шероховатости структур на подложках Si и GaAs (рис. 6), что объясняется увеличением роли периферийных областей ионного пучка в формировании рельефа вследствие увеличения глубины диничого воздействия.

На рис. 6,б представлена зависимость, согласно которой с увеличением общего времени воздействия ионного пучка происходит возрастание глубины формируемых структур, что объясняется ростом количества распыленного материала подложки с увеличением общего времени травления.

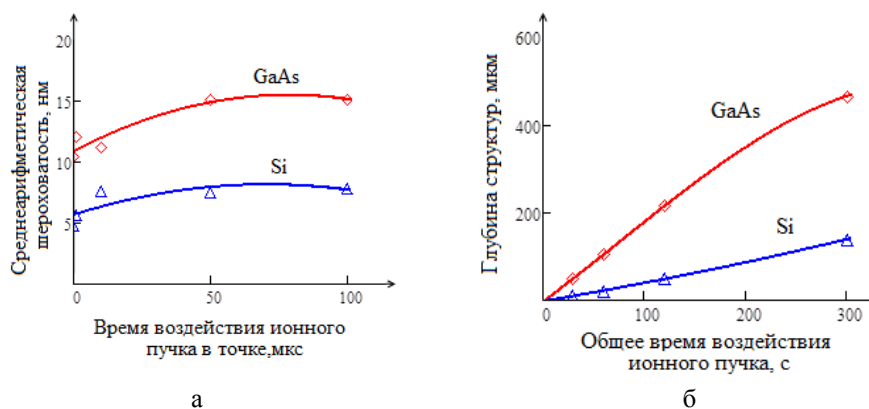


Рис. 6. Зависимость среднеарифметической шероховатости дна от значения времени воздействия в точке (а), зависимость глубины структуры от значения общего времени воздействия ионного пучка (б)

Увеличение времени травления приводит к росту значения среднеарифметической шероховатости дна структур на GaAs и практически не влияет на среднеарифметическую шероховатость дна структур на Si (рис. 7), что также объясняется формированием и ростом капель жидкометаллического галлия на поверхности GaAs при травлении ФИП.

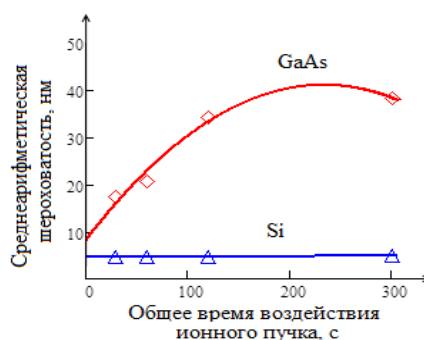


Рис. 7. Зависимость среднеарифметической шероховатости дна области травления от общего времени воздействия ионного пучка

Угол наклона грани прямо пропорционален общему времени воздействия ионного пучка, что приводит к усилению роли эффекта переосаждения распыленного материала при формировании рельефа поверхности. Глубина структур возрастает при увеличении значения тока ионного пучка и общего времени воздействия, что объясняется увеличением количества распыляемых атомов подложки.

Заключение. Таким образом, в работе разработана и исследована методика определения влияния режимов ионно-лучевого травления ФИП на геометрические параметры формируемых наноразмерных структур.

Установлено, что минимальное значение шероховатости дна области травления для Si и GaAs достигается при значениях параметра overlap 50 и 25 % соответственно. Значение среднеарифметической шероховатости дна области травления для Si составляет 2,9 нм, для GaAs – 6,5 нм. Минимальные значения угла наклона грани достигаются при значениях параметра overlap 40 % – для Si и 50 % – для GaAs.

Отмечено, что наиболее сильное влияние на глубину формируемых микро- и наноразмерных структур оказывают такие параметры ФИП, как значение тока ионного пучка и общее время воздействия на подложку, тогда как время воздействия в точке и overlap в значительной степени определяют интенсивность латерального растравливания.

Установлено, что увеличение времени воздействия ионного пучка в точке приводит к росту значений среднеарифметической шероховатости структур на подложках Si и GaAs, тогда как увеличение общего времени травления приводит к росту значения среднеарифметической шероховатости только на GaAs и практически не влияет на среднеарифметическую шероховатость структур на Si.

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке методик наноразмерного профилирования поверхности подложек для наноэлектроники, МЭМС и НЭМС, а также при формировании перспективных структур зондовой нанодиагностики.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра "Нанотехнологии" Южного федерального университета".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев О.А., Алексеев А.М., Внукова А.В., Громов А.Л., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г. Моделирование рельефа поверхности подложки при наноразмерном профилировании методом фокусированных ионных пучков // Российские нанотехнологии. – 2014. – Т. 9, № 1-2. – С. 44-48.
2. Лучинин В.В. Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы. – М.: Физматлит, 2006. – 552 с.
3. Коноплев Б.Г., Агеев О.А. Элионные и зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 165-175.
4. Агеев О.А., Алексеев А.М., Внукова А.В., Громов А.Л., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г. Исследование разрешающей способности наноразмерного профилирования методом фокусированных ионных пучков // Российские нанотехнологии. – 2014. – Т. 9, № 1-2. – С. 40-43.
5. 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.
6. 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.
7. Ageev O.A., Kolomyitsev A.S., Konoplev B.G. Formation of nanosize structures on a silicon substrate by method of focused ion beams // Semiconductors. – 2011. – Vol. 45, № 13. – С. 89-92.
8. 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.

REFERENCES

1. Ageev O.A., Alekseev A.M., Vnukova A.V., Gromov A.L., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G. Modelirovanie rel'efa poverkhnosti podlozhki pri nanorazmernom profilirovanii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modeling of the surface topography of the substrate with nanoscale profiling method focused ion beams], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian Nanotechnology], 2014, Vol. 9, No. 1-2, pp. 44-48.
2. Luchinin V.V. Nanotekhnologii: fizika, protsessy, diagnostika, pribory [Nanotechnology: physics, processes, diagnostics, devices]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 552 p.
3. Konoplev B.G., Ageev O.A. Elionnye i zondovye nanotekhnologii dlya mikro- i nanosistemnoy tekhniki [Leonne and probe nanotechnology for micro- and nanosystems technology], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 12 (89), pp. 165-175.
4. Ageev O.A., Alekseev A.M., Vnukova A.V., Gromov A.L., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G. Issledovanie razreshayushchey sposobnosti nanorazmernogo profilirovaniya metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [The study nanoscale resolution profiling method focused ion beams], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian Nanotechnology], 2014, Vol. 9, № 1-2, pp. 40-43.
5. Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A., Kolomiitsev A.S., Serbu N.I. Modifikatsiya zondov dlya skaniruyushchey zondovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modification of probes for scanning probe microscopy focused ion beams], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2012, Vol. 41, No. 1, pp. 47-56.
6. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G. Issledovanie parametrov vzaimodeystviya fokusirovannykh ionnykh puchkov s podlozhkoy [The study of the interaction parameters of the focused ion beam to the substrate], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics], 2011, No. 3 (89), pp. 20-25.
7. 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, pp. 89-92.
8. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Gromov A.L., Il'in O.I. Issledovanie rezhimov submik-ronnogo profilirovaniya poverkhnosti podlozhek kremniya metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [The study of modes of submicron profiling the surface of the silicon substrates by the method of focused ion beams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 171-180.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Коломиицев Алексей Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: askolomiitsev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е, каб. Е-312; тел.: 88634371767; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники к.т.н.; доцент.

Kolomiitsev Alexey Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: askolomiitsev@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, build. E, room E-312, Taganrog, 347928; phone: +78634371767; the department of nanotechnologies and microsystems technology; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 629.052.7

Е.Ю. Гусев, В.А. Гамалеев, А.С. Михно, А.В. Быков, Ю.Ю. Житяева

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ
КОНТАКТНО-МЕТАЛЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ПЬЕЗОКАНТИЛЕВЕРА ДЛЯ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ***

Работа относится к области разработки кантилеверов с интегрированной системой регистрации отклонений консоли, на основе пьезоэлектрического эффекта. Ограничение применимости традиционных кантилеверов обусловлено потребностью во внешних аппаратных средствах – технически сложных системах оптической регистрации откло-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 14.575.21.0045).