

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

**ФОРМИРОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ
МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО ИОННО-СТИМУЛИРОВАННОГО
ОСАЖДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ
ПУЧКОМ**

Представлены результаты исследования влияния параметров фокусированного ионного пучка на технологические операции локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения материалов из газовой фазы для формирования элементов вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники. Разработана конструкция вакуумной автоэмиссионной ячейки, состоящая из системы катод-анод, форма которых обеспечивает, с одной стороны, высокую надежность и эффективность работы, а с другой стороны, позволяет применять технологии ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения для формирования герметичных ячеек в едином вакуумном технологическом цикле. Применение элементов вакуумной электроники перспективно с точки зрения достижения высокой радиационной стойкости и высокого быстродействия элементов. Создание наноразмерных структур катода и анода, а также обеспечение сверхмалого межэлектродного расстояния позволяет добиться существенного снижения энергопотребления устройств и повысить плотность компоновки элементов. С использованием методов ионно-стимулированного осаждения углерода и вольфрама и локального травления фокусированным ионным пучком галлия изготовлен макет вакуумной автоэмиссионной ячейки на основе структуры кремний/золото/оксид кремния. Показано, что применение метода ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения фокусированным ионным пучком галлия позволяет формировать элементы вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники с высокой точностью и разрешающей способностью и позволяет избежать недостатков присущих традиционным технологическим процессам микроэлектроники, таких как необходимость применения масок, резистов и жидкостной химии. Полученные результаты позволяют создать основу для разработки радиационно-стойких быстродействующих элементов сверхбольших интегральных схем, обладающих пониженным энергопотреблением и могут быть использованы при разработке перспективных технологических процессов формирования элементной базы наноэлектроники и наномеханики с использованием локальных лучевых методов наноструктурирования.

Нанотехнология; фокусированный ионный пучок; наноэлектроника, автоэлектронная эмиссия; ионно-лучевое травление; субмикронное профилирование; ионно-стимулированное осаждение.

A.S. Kolomiitsev, I.V. Panchenko, N.A. Shandyba, A.V. Kotosonova, I.L. Jityaev

**FORMATION OF VACUUM AUTO EMISSION CATHODES
BY THE METHOD OF LOCAL ION-STIMULATED DEPOSITION
OF MATERIALS BY FOCUSED ION BEAM**

This paper presents the results of a study of the influence of parameters of a focused ion beam on technological modes of local ion beam milling and ion-induced deposition of materials from the gas phase to form elements of a vacuum field-emission nanoelectronics. A design of a field-emission cell was developed, consisting of a cathode-anode system, the shape of which provides, on the one hand, high reliability and efficiency, and on the other hand, it allows the use of ion-beam milling and ion-induced deposition technologies to form sealed cells in a vacuum technological cycle. The use of elements of vacuum electronics is promising from the point of view of achieving high radiation resistance and high operation frequencies. The creation of nanoscale cathode and anode structures, as well as the provision of ultra-short interelectrode distance allows to achieve a significant reduction in the power consumption of devices and to increase the density of the layout of elements. Using the

methods of ion-induced carbon and tungsten deposition and local milling with a focused gallium ion beam, a mock-up vacuum emission cell based on a silicon/gold/silicon oxide structure was made. It is shown that using the method of ion-beam milling and ion-induced deposition of a gallium-focused ion beam makes it possible to form elements of a vacuum field-emission nanoelectronics with high accuracy and resolution and to avoid the drawbacks of traditional microelectronic processes, such as the need for masks, resists and liquid chemistry. The obtained results make it possible to create a basis for the development of radiation-resistant high-speed elements of ultra-large integrated circuits with reduced power consumption and can be used in the development of promising technological processes for the formation of the element base of nanoelectronics and nanomechanics using local beam nanostructuring methods.

Nanotechnology; focused ion beam; nanoelectronics; field emission; ion beam milling; submicron profiling; ion-induced deposition.

1. Введение. Развитие и совершенствование элементной базы современной электроники во многом определяется технологическими процессами её формирования, которые в настоящее время обеспечивают создание функциональных электронных компонентов с нанометровыми размерами. Среди наиболее перспективных направлений развития электроники особый интерес представляет вакуумная автоэмиссионная наноэлектроника, которая позволяет создавать наноразмерные приборы, обладающие высоким быстродействием, помехозащищенностью и низким энергопотреблением. Применение традиционных технологических процессов не позволяет добиться высокой точности, воспроизводимости и разрешающей способности при создании элементов вакуумной автоэмиссионной электроники, тогда как применение метода фокусированных ионных пучков (ФИП) дает возможность достичь требуемых размеров структур и использовать преимущества возникающих в низкоразмерных системах физических эффектов [1–3]. Ещё одним существенным недостатком традиционных технологических процессов является необходимость создания и поддержания высокого вакуума в сформированных автоэмиссионных структурах, что позволяет уменьшить рассеяние электронов на молекулах остаточных газов в промежутке катод-анод и увеличить соответственно ток на аноде. Недостатки, присущие традиционным технологическим процессам массового производства электронных компонентов, могут быть минимизированы за счет применения методов локального ионного травления и ионно-стимулированного осаждения материалов фокусированным ионным пучком Ga^+ [4]. Кроме этого, повышение эффективности используемых методов достигается за счет создания особых геометрических форм анода и катода, обеспечивающих полную изоляцию автоэмиссионной ячейки от внешней среды. Ввиду того, что все технологические операции проводятся в едином цикле в вакуумной камере технологической установки, объединяющей как технологическое, так и аналитическое оборудование, в которой постоянно поддерживается достаточно высокий уровень вакуума (порядка 10^{-5} Па), то и система катод-анод сформированных и герметизированных в камере автоэмиссионных структур будет находиться в вакуумной среде после извлечения образцов из технологической камеры [5].

Метод ФИП позволяет в условиях высокого вакуума производить технологические операции локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения материалов из газовой фазы без необходимости применения резистов, масок и химических травителей. При подаче в зону воздействия ФИП химически активных газов, происходит диссоциация их молекул, в результате которой один из компонентов газа осаждается на поверхности, а летучие продукты реакции удаляются вакуумной системой [6–10]. Широкая номенклатура осаждаемых таким методом материалов, позволяет применять ФИП при формировании наноразмерных структур для электроники (квантовых точек, автоэлектронных эмиттеров, точечных контактов) и нанодиагностики (острия зондов, рельефные меры нанометрового диапазона для СЗМ) [11].

К настоящему времени проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования технологии обработки твердотельных структур фокусированным ионным пучком, процессов, протекающих при ионном распылении твердого тела, ведется разработка и оптимизация технологических процессов формирования наноразмерных структур методом ФИП [12–13].

Операции формирования наноразмерных вакуумных автоэмиссионных ячеек осуществляются с использованием встроенных графических шаблонов в программном обеспечении системы ФИП. Контроль параметров формируемых ионно-лучевыми методами структур осуществляется при помощи растрового электронного микроскопа. Таким образом, целью данной работы является разработка технологии формирования вакуумных автоэмиссионных ячеек с использованием метода локального ионно-стимулированного осаждения фокусированным ионным пучком галлия.

2. Методика эксперимента. В работе для проведения экспериментальных исследований использовался двухлучевой электронно-ионный микроскоп Nova NanoLab 600 (FEI Company), оснащенный системой электронно-лучевой литографии.

На начальном этапе были проведены экспериментальные исследования влияния основных технологических параметров фокусированного ионного пучка (ФИП) и закономерностей, влияющих на процесс локального ионно-стимулированного осаждения углерода и вольфрама. Полученные данные дают возможность оценить диапазоны значений основных параметров ФИП, которые необходимо использовать для формирования вакуумных автоэмиссионных ячеек с максимальной точностью и воспроизводимостью параметров.

Для этого была разработана методика, согласно которой в управляющей программе системы ФИП формировался графический шаблон в виде матрицы из 56 структур размерами 2x2 мкм, как показано на рис. 1.

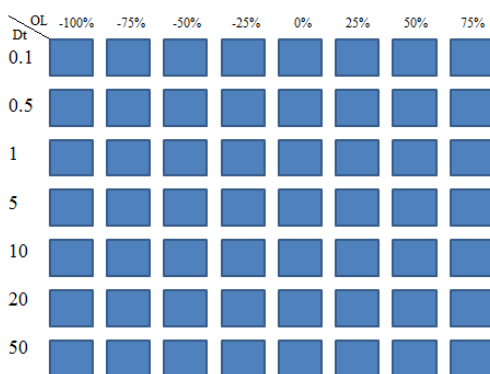


Рис. 1. Схема структуры шаблона для исследования технологических параметров и режимов ионно-стимулированного осаждения углерода и вольфрама

Для структур, в строках матрицы изменялась область перекрытия ФИП между двумя последующими (от -100 до 75%). Для структур в столбцах изменялось время воздействия ФИП (от 0.1 до 50 мкс), как показано на рис. 1. Диапазон значений токов ФИП изменялся от 1 до 500 пА. Количество проходов ФИП изменялось (от 6 до 115 шт) в зависимости от тока ФИП для поддержания общего времени локального ионно-стимулированного осаждения структур равного 5 минутам.

После проведения обработки и анализа экспериментальных данных установлено, что локальное ионно-стимулированное осаждение углерода и вольфрама происходило не на всех структурах. При определенных сочетаниях технологических параметров, в частности, при больших значениях тока, величины перекрытия и времени воздействия вместо локального ионно-стимулированного осаждения, наблюдалось ионно-лучевое травление подложки Si, как показано на рис. 2.

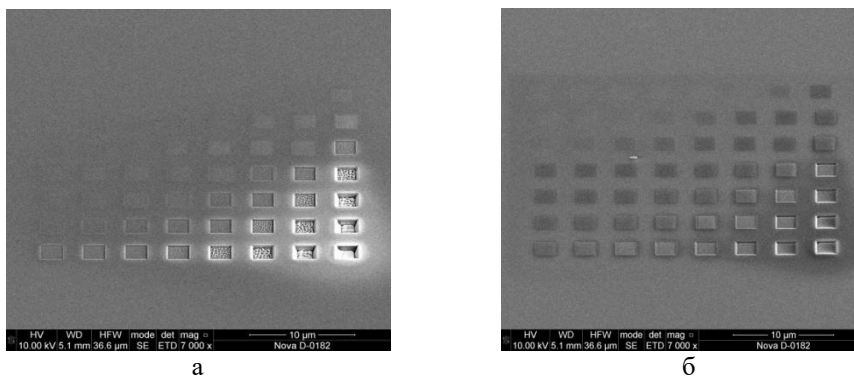


Рис. 2. РЭМ-изображение сформированных структур вольфрама (а) и углерода (б) при токе ФИП 300 нА

Возможным объяснением данного эффекта является удаление адсорбированного на поверхности подложки Si газа-прекурсора вместе с приповерхностными атомами подложки пучком ионов Ga⁺ высокой плотности, при определенных сочетаниях технологических параметров ФИП. При этом наблюдается ионно-лучевое травление поверхности подложки [14].

Отмечено, что локальное ионно-стимулированное осаждение углерода происходит эффективнее, чем вольфрама, что связано с физико-химическими свойствами используемых газов-носителей осаждаемого материала [15].

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что с уменьшением тока ФИП, эффективность локального ионно-стимулированного осаждения углерода и вольфрама смещается в сторону меньших значений области перекрытия и времени воздействия ФИП, что подтверждает предварительный вывод о том, что ключевым параметром локального ионно-стимулированного осаждения является плотность тока ФИП.

Таким образом, экспериментально определены режимы локального ионно-стимулированного осаждения углерода и вольфрама, при которых процессы ионно-стимулированного осаждения преобладают над процессами ионно-лучевого травления и протекают наиболее эффективно. Установлено, что ключевым фактором локального ионно-стимулированного осаждения является плотность тока ФИП [16].

3. Результаты и обсуждение. В работе формирование вакуумных автоэмиссионных ячеек проводилось на подложке, представляющей собой структуру кремний/золото/оксид кремния. При этом толщина пленки золота составила 100 нм, а толщина оксида кремния – 850 нм. На первом этапе работы производилось нанесение маркерных знаков на подложку (рис. 3) для совмещения с технологическими процессами традиционной микроэлектроники и для обеспечения возможности последующего исследования структуры на атомно-силовом микроскопе Ntegra Vita в полуконтактном режиме АСМ [15].

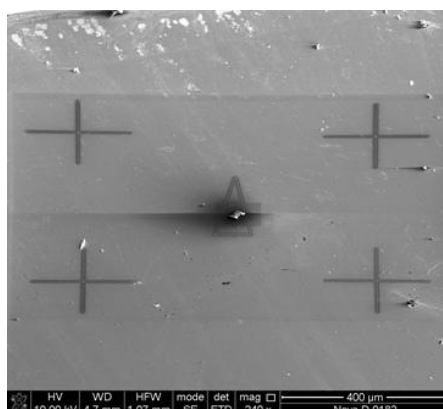


Рис. 3. Маркерные знаки совмещения

На рис. 4 представлена схема разработанной конструкции вакуумной автоэмиссионной ячейки, в которой катод сформирован методом локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама на золоте и помещен в углублении, сформированном в диэлектрике. Верхний электрод представляет собой «крышку» в виде полого конуса, который с одной стороны герметизирует ячейку, а с другой стороны выполняет функции анода при работе устройства. Данная компоновка электродов и геометрическая форма ячейки позволяют сохранять в промежутке катод-анод значения вакуума, соответствующие значениям вакуума в камере Nova NanoLab 600 (10^{-4} – 10^{-5} Па).

Для реализации разработанной конструкции был разработан технологический маршрут, в основе которого лежат операции обработки подложки фокусированным ионным пучком галлия. Тонкая пленка золота на поверхности кремниевой подложки формируется методом магнетронного распыления, после этого на пленку наносится слой оксида кремния толщиной около 850 нм методом плазмохимического осаждения. Структуры анода и катода формируются методом ионно-стимулированного осаждения углерода или вольфрама.

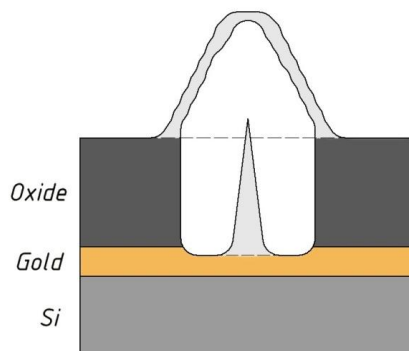


Рис. 4. Макет вакуумной автоэмиссионной ячейки

В ходе практической реализации разработанной конструкции методом ионно-лучевого травления было сформировано углубление цилиндрической формы радиусом 300 нм и глубиной около 900 нм, таким образом, чтобы на дне углубления находилась только пленка золота, а боковые стенки состояли из оксида кремния (рис. 5).

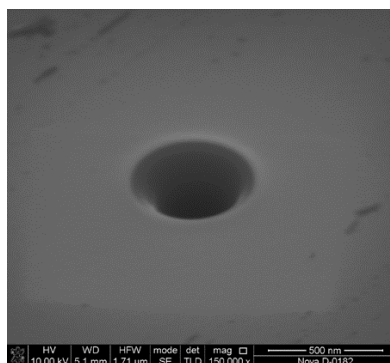
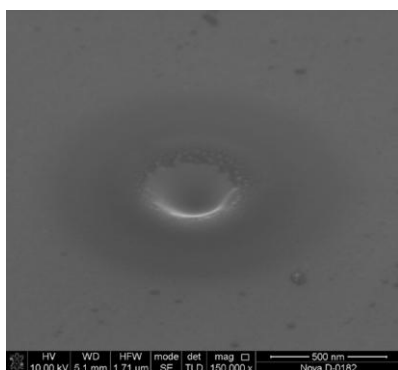
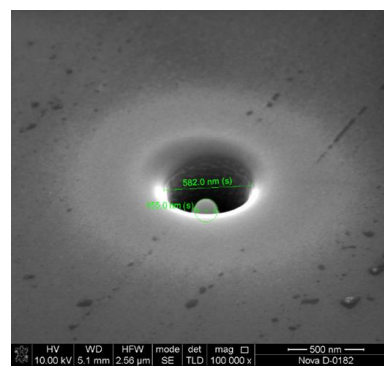


Рис. 5. Углубление в структуре Si/Au/SiO₂ сформированное ионно-лучевым травлением

На следующем этапе работы, методом локального ионно-стимулированного осаждения сформированное отверстие было заполнено вольфрамом (рис. 6,а). После этого методом ионно-лучевого травления, используя растровый графический шаблон в форме кольца с внешним радиусом 500 нм и внутренним 200 нм было сформировано вольфрамовое острие, находящееся внутри отверстия со стенками из оксида кремния (рис. 6,б). В результате радиус закругления острия катода составил около 75 нм. Таким образом, был сформирован проводящий катод, изолированный от боковых стенок и имеющий электрический контакт с пленкой золота, находящейся под ним [17, 18].



а



б

Рис. 6. Углубление в подложке, заполненное вольфрамом (а) и сформированный вольфрамовый катод (б)

На следующем этапе производилось формирование анода в виде полого конуса методом локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама из газовой фазы. Для этих целей был разработан растровый графический шаблон в виде набора концентрических окружностей с уменьшающимся диаметром (рис. 7) [19]. Ионно-стимулированное осаждение вольфрама по разработанным шаблонам производилось при ускоряющем напряжении ФИП 30 кэВ, токе ионного пучка – 0,1 нА и времени воздействия пучка в точке – 1 мкс.

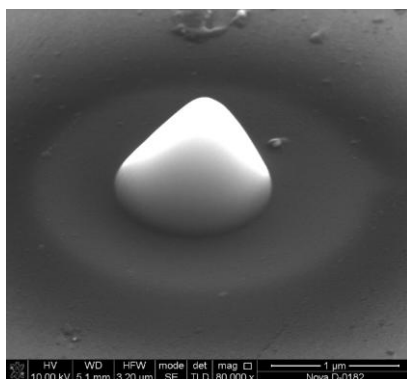


Рис. 7. Вольфрамовый анод, сформированный методом ионно-стимулированного осаждения

На заключительном этапе работы производилось исследование вольтамперных характеристик на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Ntegra Vita. Для этого на области 2x2 мм вблизи края подложки был удален оксид кремния для формирования контакта к пленке золота.

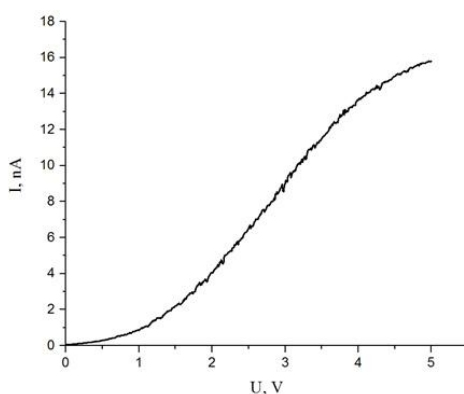


Рис. 8. Вольтамперная характеристика вакуумной автоэмиссионной ячейки

В ходе проведения измерений проводящее острие зонда АСМ располагалось на аноде, а прижимной контакт через вскрытое окно в диэлектрике на пленке золота. Измеренная ВАХ полученной структуры представлена на рис. 8.

Таким образом, сформированная структура демонстрирует нелинейную зависимость тока от напряжения, ток эмиссии возникает при значениях менее 0,5 В, при этом при напряжении 2 В ток составляет около 4 нА. Низкие пороговые напряжения эмиссии позволяют использовать подобные структуры для создания функциональных электронных компонентов с уменьшенным энергопотреблением. Кроме того, предложенная технология позволяет обеспечить вакуумную среду в автоэмиссионной ячейке без необходимости проведения дополнительных технологических операций [20]. Показано, что применение метода ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждение фокусированным ионным пучком галлия позволяет формировать элементы вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники с высокой точностью и разрешающей способностью. Полученные результаты позволяют создать основу для разработки быстродействующих элементов сверхбольших интегральных схем, обладающих пониженным энергопотреблением.

Заключение. В данной работе были проведены исследования режимов локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама и углерода. Было определены оптимальные параметры осаждения для создания элементов вакуумной автоэмиссионной наноэлектроники. Разработан и исследован экспериментальный образец вакуумного автоэмиссионного диода. Анализ ВАХ изготовленной структуры показал, что эмиссия наблюдается при значениях тока эмиссии менее 0.5 В, что позволяет существенно снизить энергопотребление устройств, построенных на такой элементной базе. Благодаря тому, что все операции ионно-лучевого травления и локального ионно-стимулированного осаждения проходят в условиях высокого вакуума, то отсутствует необходимость дополнительного вакуумирования пространства катод-анод. Обеспечение низкого давления в ячейке позволяет продлить срок службы таких автоэмиссионных структур, уменьшить их загрязнение и увеличить ток анода. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и реализации технологических процессов изготовления элементной базы наноэлектроники, микро- и наносистемной техники.

Благодарности. Результаты были получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного Федерального Университета. Работа выполнена в рамках Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (Проект № МК-1811.2019.8).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Serbu N.I., Smirnov V.A. Probe modification for scanning probe microscopy by the focused ion beam method // *Russian Microelectronics*. – 2012. – Vol. 41, No. 1. – P. 41-50.
2. Лучинин В.В. Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы. – М.: Физматлит, 2006. – 522 с.
3. 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.
4. Ageev O.A., 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.
5. Ageev O.A., 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Ageev O.A., 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. – № 84 (117). – С. 171-180.
10. Panchenko I.V., Kolomiitsev A.S., Shandyba N.A., Lisitsyn S.A. Fabrication of probes for scanning near-field optical microscopy using focused ion beam // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 443. – P. 012-015.

11. 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.
12. Ageev O.A., Ильин О.И., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г., Смирнов В.А. Модификация зондовых датчиков-кантиллеров для атомно-силовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков // *Нано- и микросистемная техника*. – 2011. – № 4. – С. 4-8.
13. Громов А.Л., Коломийцев А.С., Котосорова А.В., Панченко И.В., Шандыба Н.А. Разработка растровых шаблонов для безмасочного структурирования поверхности твердых тел методом фокусированных ионных пучков // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2018. – № 7 (201). – С. 6-16.
14. Panchenko I.V., Shandyba N.A., Kolomiitsev A.S., Gromov A.L., Ageev O.A. Study the influence of focused ion-beam milling parameters on the surface roughness // *VI International Scientific Conference STRANN*. – P. 133-135.
15. Shandyba N., Panchenko I. The formation of probes for specialized modes of scanning probe microscopy by the method of focused ion beams // *Saint Petersburg OPEN 2018*. – P. 606-607.
16. Ivan Panchenko, Nikita Shandyba, Alexey Kolomiitsev, Alexandr Gromov, and Oleg Ageev. Investigation of The Local Profiling of The Solid Surfaces Using Focused Ion Beam // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2064. – P. 030011
17. Панченко И.В., Шандыба Н.А. Исследование процессов формирования элементов автоэмиссионной наноэлектроники методом фокусированных ионных пучков // *Моделирование. Фундаментальные исследования, теория, методы и средства*. – 2018. – С. 31-33.
18. Шандыба Н.А., Панченко И.В. Исследование структуры интегральных микросхем методом растровой электронной микроскопии // *Моделирование. Фундаментальные исследования, теория, методы и средства*. – 2018. – С. 274-277.
19. Panchenko I.V., Shandyba N.A., Kolomiitsev A.S. Fabrication of nanosized vacuum field emission cells using focused ion beam // *Saint Petersburg OPEN 2019*. – P. 571-572.
20. Shandyba N.A., Panchenko I.V., Kolomiitsev A.S. Formation of Elements of Field-emission Nanoelectronics by the Method of Focused Ion Beams // *Physics and mechanics of new materials and their applications (PHENMA)*. – 2018. – P. 313-314.

REFERENCES

1. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Serbu N.I., Smirnov V.A. Probe modification for scanning probe microscopy by the focused ion beam method, *Russian Microelectronics*, 2012, Vol. 41, No. 1, pp. 41-50.
2. Luchinin V.V. *Nanotekhnologii: fizika, protsessy, diagnostika, pribory* [Nanotechnology: physics, processes, diagnostics, devices]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 522 p.
3. 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. 1709-1712.
4. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G. Issledovanie parametrov vzaimodeystviya fokusirovannykh ionnykh puchkov s podlozhkoy [Investigation of parameters of interaction of focused ion beams with a substrate], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2011, No. 3 (89), pp. 20-25.
5. Ageev O.A., Alekseev A.M., Vnukova A.V., Kolomiitsev 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 substrate surface relief in nanoscale profiling by focused ion beams], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2014, No. 1-2 (January-February), Vol. 9, pp. 44-49.
6. 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.
7. 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.
8. 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, pp. 8-15.

9. 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. 84 (117), pp. 171-180.
10. Panchenko I.V., Kolomiytsev A.S., Shandyba N.A., Lisitsyn S.A. Fabrication of probes for scanning near-field optical microscopy using focused ion beam, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 443, pp. 012-015.
11. 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.
12. Ageev O.A., Il'in O.I., Kolomiytsev 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.
13. Gromov A.L., Kolomiytsev A.S., Kotosonova A.V., Panchenko I.V., SHandyba N.A. Razrabotka rastrovyykh shablonov dlya bezmasochnogo strukturirovaniya poverkhnosti tverdykh tel metodom fokusirovannykh ionnykh puchko [Development of raster templates for maskless structuring of the surface of solids by the method of focused ion beams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 7 (201), pp. 6-16.
14. Panchenko I.V., Shandyba N.A., Kolomiytsev A.S., Gromov A.L., Ageev O.A. Study the influence of focused ion-beam milling parameters on the surface roughness, *VI International Scientific Conference STRANN*, pp. 133-135.
15. Shandyba N., Panchenko I. The formation of probes for specialized modes of scanning probe microscopy by the method of focused ion beams, *Saint Petersburg OPEN 2018*, pp. 606-607.
16. Ivan Panchenko, Nikita Shandyba, Alexey Kolomiytsev, Alexandr Gromov, and Oleg Ageev. Investigation of The Local Profiling of The Solid Surfaces Using Focused Ion Beam, *AIP Conference Proceedings*, 2019, Vol. 2064, pp. 030011.
17. Panchenko I.V., Shandyba N.A. Issledovanie protsessov formirovaniya elementov avtoemissionnoy nanoelektroniki metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Study of processes of formation of elements of auto-emission nanoelectronics by the method of focused ion beams], *Modelirovanie. Fundamental'nye issledovaniya, teoriya, metody i sredstva* [Modeling. Fundamental research, theory, methods and means], 2018, pp. 31-33.
18. Shandyba N.A., Panchenko I.V. Issledovanie struktury integral'nykh mikroskhem metodom rastrovoy elektronnoy mikroskopii [Investigation of the structure of integrated circuits by scanning electron microscopy], *Modelirovanie. Fundamental'nye issledovaniya, teoriya, metody i sredstva* [Modeling. Fundamental research, theory, methods and means], 2018, pp. 274-277.
19. Panchenko I.V., Shandyba N.A., Kolomiytsev A.S. Fabrication of nanosized vacuum field emission cells using focused ion beam, *Saint Petersburg OPEN 2019*, pp. 571-572.
20. Shandyba N.A., Panchenko I.V., Kolomiytsev A.S. Formation of Elements of Field-emission Nanoelectronics by the Method of Focused Ion Beams, *Physics and mechanics of new materials and their applications (PHENMA)*, 2018, pp. 313-314.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Е. Лысенко.

Коломийцев Алексей Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: askolomiytsev@sfnu.ru, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: 88634680890 (доб 30105); кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой.

Панченко Иван Викторович – e-mail: iv-pan4encko2014@yandex.ru, тел.: 88634371940; кафедра радиотехнической электроники; студент.

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

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

Житяев Игорь Леонидович – e-mail: jityaevigor@gmail.com; кафедра радиотехнической электроники; ассистент.

Kolomiytsev Alexey Sergeevich – Southern federal university; e-mail: askolomiytsev@sfedu.ru; 347922, Taganrog, Shevchenko street, 2, build. E; phone: +78634680890 (add 30105); the department of nanotechnologies and microsystems technology; cand. of eng. sc.; associate professor; head of department.

Panchenko Ivan Viktorovich – e-mail: iv-pan4encko2014@yandex.ru; phone: +78634371940; the department of electronics in radioengineering; student.

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

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

Jityaev Igor Leonidovich – e-mail: jityaevigor@gmail.com; the department of electronics in radioengineering; assistant professor.