

20. Nakamura S. High-power GaN p-n junction blue-light-emitting diodes, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 1998, Vol. 28, pp. 125-152.
21. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Mikhaylichenko A.V., Smirnov V.A., Ptashnik V.V., Solodovnik M.S., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Klimin V.S., Il'in O.I., Gromov A.L., Rukomoykin A.V. Poluchenie nanorazmernykh struktur na osnove nanotekhnologicheskogo kompleksa NANOFAB NTK-9 [Nanoscale structures' production based on modular nanotechnology platform NANOFAB] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 109-116.
22. Rukomoykin A.V., Solodovnik M.S. Formirovanie i issledovanie arsenid-gallievyykh nanostruktur na nanotekhnologicheskoy komplekse NANOFAB NTK-9 [Forming and investigation of arsenide gallium nanostructure at nanotechnological system NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 237-238.
23. Available at: <http://www.semiteq.ru>.

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

Климин Виктор Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: kliminvs@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: 88634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Еськов Андрей Владимирович – e-mail: aeskow@gmail.com; НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ; с.н.с.; к.т.н.

Петров Николай Наранович – e-mail: halemgoob@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

Klimin Viktor Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: kliminvs@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371611; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Eskov Andrey Vladimirovich – e-mail: aeskow@gmail.com; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Petrov Nikolay Naranovich – e-mail: halemgoob@gmail.com; the department of nanotechnologies and microsystems; student.

УДК 621.385.21

А.М. Светличный, А.С. Коломийцев, И.Л. Житяев, О.Б. Спиридонов

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОЭМИССИОННОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ГРАФЕНА НА КАРБИДЕ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ*

Рассмотрено изготовление наноразмерных автоэмиссионных структур методом фокусированных ионных пучков (ФИП). Показано, что применение ФИП позволяет формировать структуры автоэмиссионной электроники острийного и планарного типа, а также варьировать геометрические параметры острия в широких пределах. В качестве материалов подложки при формировании автокатодов использованы карбид кремния и плёнки графена на поверхности карбида кремния. Графен получен методом деструкции карбида кремния в вакууме. В статье рассмотрены конструкции автоэмиссионных катодов острийного и планарного типа. Отработаны режимы фор-

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

мирования наноразмерных автоэмиссионных катодов методом локального ионно-лучевого травления ФИП галлия. Разработаны конструкции и изготовлены экспериментальные образцы автоэмиссионных катодов с радиусом закругления острия менее 100 нм. Автоэмиссионные катоды острейного типа изготавливались на подложке карбида кремния с последующим формированием пленок графена на поверхности методом высокотемпературной деструкции. При формировании автоэмиссионных катодов планарного типа с нанометровым межэлектродным расстоянием выявлены технологические ограничения, связанные с соотношением параметров времени травления и тока ионного пучка. Установлено, что для минимизации влияния латерального растравливания топологического рисунка на результат травления, необходимо учитывать форму ионного пучка, описываемую распределением Гаусса, при проектировании и формировании автокатодов. Получены изображения изготовленных автоэмиссионных катодов с помощью растровой электронной (РЭМ) и сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Разработана методика исследования параметров автоэмиссионных катодов на основе использования СЗМ. Определены закономерности влияния режимов травления подложек карбида кремния с графеном методом ФИП на геометрические параметры автоэмиссионных наноструктур.

Автоэлектронная эмиссия; фокусированный ионный пучок; графен; карбид кремния; холодный катод; нанотехнологии.

A.M. Svetlichnyi, A.S. Kolomiytsev, I.L. Jityaev, O.B. Spiridonov

FABRICATION FIELD EMISSION NANO-ELECTRONICS DEVICES BASED ON GRAPHENE FILMS ON SILICON CARBIDE USING FOCUSED ION BEAM

The work is dedicated to the making of nanosized field emission structures by focused ion beam (FIB). It is shown that the FIB method provides the formation of the planar and tip probes with the different kinds of shapes and sizes. Silicon carbide and graphene on silicon carbide used as materials of field emission cathodes. Graphene is fabricated by decomposition of silicon carbide in vacuum. The spike form and planar type of field emission cathodes are considered in the article. Modes of formation of nanoscale field-emission cathodes by FIB are investigated. Designs of cathodes were developed and field-emission cathodes with a radius of rounding of the top less than 100 nm are made. Spike type of field emission cathodes was made of silicon carbide, followed by the formation of graphene films on the surface. Etching of field emission cathodes in the form of of a spike was made in a two-stage operation. In the first stage etching was performed at an ion beam current – 3 nA. In the second stage finishing of a spike was made by precision ion etching with a minimum value of the current of the ion beam, which allowed us to obtain a spike structure with a radius of rounding ~ 25-30 nm. Planar type of field emission cathodes was formed from the films of graphene on silicon carbide. It was established that in order to minimize the influence of the lateral etching topological pattern on the result of the etching, it is necessary to take into account the shape of the ion beam, described by a Gaussian distribution. The images of the field emission cathodes was obtained using scanning electron (SEM) and scanning probe microscopy (SPM). The technique of the field emission cathodes parameters research based on the use of SPM was developed. The regularities of the influence of etching conditions on the geometric parameters of field emission nanostructures were determined.

Field emission; focused ion beam; graphene; silicon carbide; cold cathode; nanotechnology.

Введение. Наноразмерные автоэмиссионные структуры являются перспективными источниками свободных электронов, которые имеют перспективы широкого практического применения при построении функциональных электронных компонентов [1–4]. Перспективными с точки зрения стабильности, стойкости и долговечности являются автоэмиссионные нанокатоды на основе пленок графена

на карбиде кремния [3, 4]. Исследования таких автоэмиссионных катодов показали, что пороговые напряжения, необходимые для начала эмиссии электронов, существенно ниже значений характерных для большинства современных автоэмиссионных катодов [5, 6]. Метод получения графена путем термической деструкции карбида кремния в вакууме обладает высокой технологичностью и позволяет достичь высоких значений однородности параметров графеновых пленок [7, 8]. В настоящее время технология получения и автоэмиссионные свойства наноразмерных автокатодов на основе пленок углеродных наноматериалов недостаточно изучены, что требует проведения теоретических и экспериментальных исследований.

В работе для формирования наноразмерных автоэмиссионных катодов на карбиде кремния использовался метод локального ионно-лучевого травления фокусированным ионным пучком (ФИП) галлия [9, 10]. Разрешающая способность ионно-лучевого травления методом ФИП определяется, главным образом, диаметром ионного пучка, который при оптимальном значении ускоряющего напряжения (30 кэВ) и минимальном токе (1 пА) составляет около 7 нм. В отличие от традиционных методов субмикронной литографии метод ФИП позволяет формировать автоэмиссионные структуры с межэлектродным расстоянием ~15–30 нм [11–13]. Применение ФИП для формирования структур на поверхности карбида кремния позволяет избежать недостатков традиционных процессов литографии, связанных с необходимостью применения резистов, масок и жидкостных травителей [14].

Целью данной работы является исследование режимов формирования наноразмерных элементов автоэмиссионной электроники на основе карбида кремния с пленками графена методом фокусированных ионных пучков, а также разработка методики исследования их параметров на основе использования сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ).

Методика исследования. Выбор конструкции и геометрических размеров автоэмиссионных катодов в форме острия был основан на результатах ранее проведенного моделирования, в котором учитывались оптимизированные значения межэлектродного расстояния, радиуса закругления вершины катода, высоты и полуугла раствора конуса, образующего катод [15].

Реализация технологических операций наноразмерного профилирования карбида кремния и исследование характеристик эмиттеров производились с использованием сверхвысоковакуумного модуля фокусированных ионных пучков (СВВ ФИП) многофункционального нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (производитель – ЗАО «Нанотехнология-МДТ», г. Зеленоград) и растрового электронно-ионного микроскопа Nova NanoLab 600 (FEI Company, Нидерланды).

Экспериментальные образцы помещались в вакуумную камеру модуля ФИП и ориентировались таким образом, чтобы поток ускоренных ионов попадал на подложку в направлении нормали. Рабочий вакуум при проведении ионно-лучевого травления поддерживался на уровне $1 \div 2 \times 10^{-4}$ Па.

Ионно-лучевое формирование автоэлектронных эмиттеров острейного типа производилось в два этапа: грубого травления, при котором формировались форма и высота структуры, и прецизионного травления, при котором формировались требуемые значения радиуса закругления острия, аспектного соотношения и угла конусности автокатаода (рис. 1).

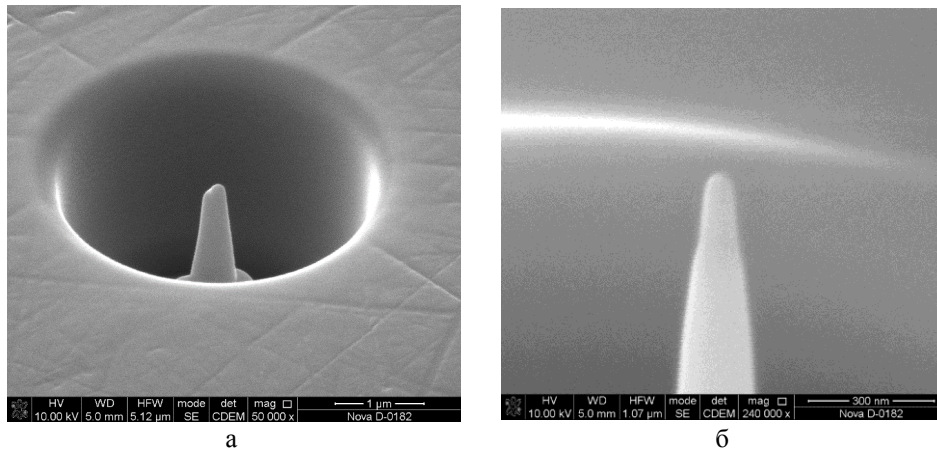


Рис. 1. РЭМ-изображение автокатода в форме острья на двух этапах изготовления: а – этап грубого травления; б – этап прецизионного травления

При травлении на каждом этапе применялись различные значения параметров ионного пучка. Это обусловлено тем, что на первом этапе травления необходимо удаление большого объема материала, а на втором – прецизионное травление с целью достижения требуемых нанометровых значений радиуса закругления. При травлении были использованы следующие параметры ионного пучка: ток ионного пучка на первом этапе – 3 нА; время травления эмиссионной структуры – 32 мин; ток ионного пучка на втором этапе – 30 пА; время травления эмиссионной структуры – 3,5 мин. Остальные параметры ФИП оставались постоянными как на первом, так и на втором этапе травления. Так ускоряющее напряжение пучка составляло 30 кэВ, время воздействия пучка в каждой точке – 1 мкс, перекрытие пучка при пошаговом перемещении – 50 % от диаметра пучка. При указанных параметрах ионно-лучевого воздействия была изготовлена серия элементов автоэмиссионной наноэлектроники острийного типа с радиусами закругления острья 30–60 нм (рис. 2).

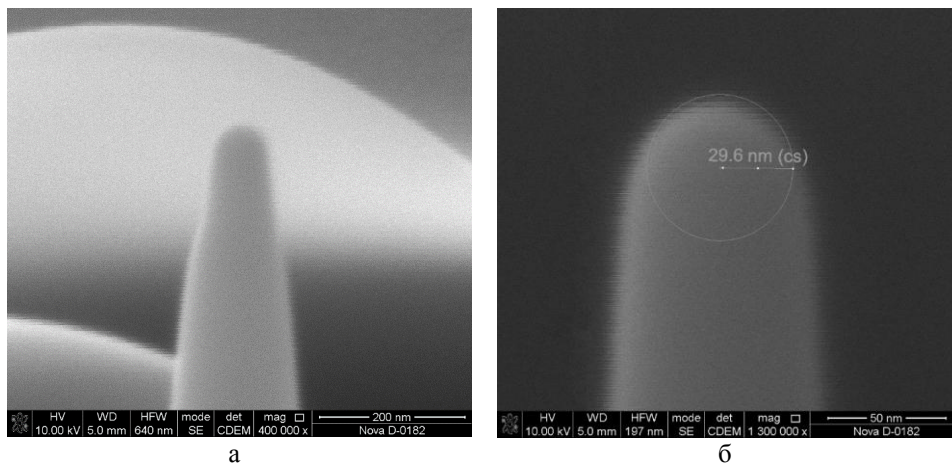


Рис. 2. РЭМ-изображение автоэмиссионного катода в форме острья с радиусом закругления вершины ~30 нм: а – увеличение 400 000x; б – увеличение 1 300 000x

На следующем этапе проведения экспериментальных исследований методом ФИП формировались автоэмиссионные катоды планарного типа. Изготовление планарных автоэмиссионных структур на основе пленок графена на карбиде кремния методом ФИП более технологично, так как позволяет формировать катод и анод в едином цикле травления, а также регулировать параметры межэлектродного расстояния в широких пределах. Величина межэлектродного расстояния определяется значением диаметра ионного пучка (~15–30 нм), топологическим рисунком растрового графического шаблона, а также временем воздействия пучка в точке и количеством проходов пучка при травлении.

Была изготовлена серия планарных элементов автоэмиссионной наноэлектроники с высотой острия – 1 мкм, углом раствора острия – 30° , радиусом закругления острия – от 28,7 нм и межэлектродным расстоянием – 30 нм. РЭМ-изображения сформированных структур представлены на рис. 3.

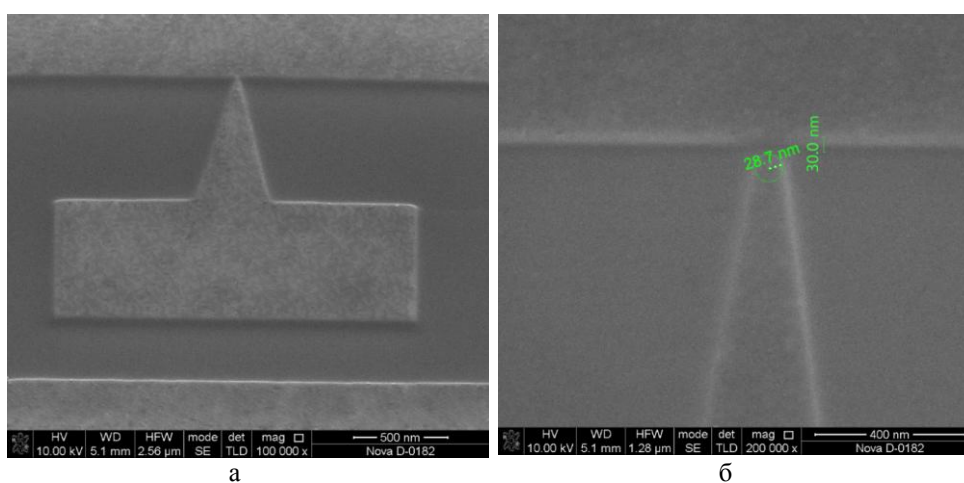


Рис. 3. РЭМ-изображение автоэмиссионного катода планарного типа с радиусом закругления вершины ~30 нм: а – увеличение 100 000х; б – увеличение 200 000х

Результаты и обсуждение. Для анализа параметров сформированных элементов автоэмиссионной наноэлектроники как острой, так и планарной типов применялись методы растровой электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии в полуконтактном режиме сканирования. На рис. 4 представлены АСМ-профили элементов наноэлектроники острой формы. Показано, что радиус закругления острия эмиттера составляет около 30 нм, что соответствует расчетным значениям. Благодаря уникальным возможностям сканирующей зондовой микроскопии, в едином цикле измерений могут быть получены сведения о параметрах рельефа структуры, локальных электрических, магнитных и механических свойствах. На основе использования АСМ была разработана универсальная методика исследования параметров острой и планарных автоэмиссионных катодов. Суть методики заключается следующем: на начальном этапе методом динамической АСМ исследуется рельеф поверхности автоэмиссионных наноструктур, затем в контактно-режиме производятся исследования методом отображения сопротивления растекания, что позволяет выявить локальную проводимость структуры. Измерения ВАХ автоэмиссионных структур производятся методом АСМ-спектроскопии. В случае острой структуры зонд АСМ подводится к острию эмиттера на расстоянии от 1 до 50 нм, при этом прикладывается напряжение в диапазоне от -10 до +10 В. В случае планарных структур острие зонда приводится в контакт с эмиттером, а прижимной контакт размещается на поверхности анода.

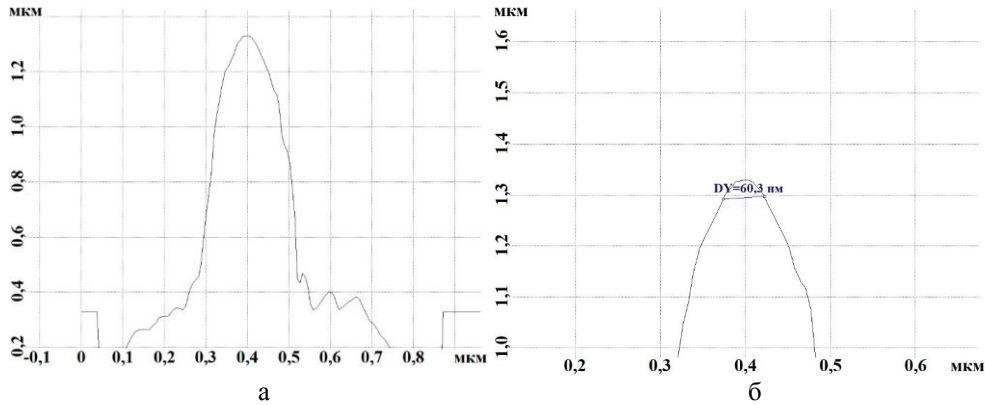


Рис. 4. Профили сечения автоэмиссионного катода в форме острия с радиусом закругления ~ 30 нм: а – профиль эмиттера; б – профиль острия

На рис. 5 представлены АСМ-изображения планарного автоэлектронного эмиттера, сформированного методом ФИП. Основным недостатком использования АСМ является сильное влияние формы зонда на качество получения экспериментальных результатов. Так применение стандартных АСМ-зондов с радиусом закругления около 10 нм и углом конусности 15° при исследовании планарных эмиттеров с межэлектродным расстоянием 30 нм не позволяет качественно отобразить область катода и анода из-за возникающих артефактов (рис. 5,б). Во избежание подобных артефактов необходимо применять монокристаллические висеренные зонды или зонды с высоким аспектным соотношением, сформированные методом ФИП [17–20].

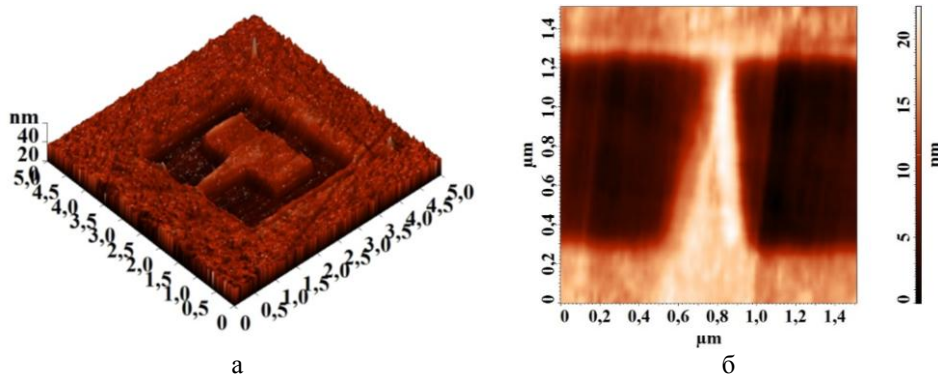


Рис. 5. АСМ-изображение автоэмиссионного катода планарного типа с радиусом закругления острия ~ 30 нм: а – общий вид; б – острие катода

Заключение. В работе приведены результаты экспериментальных исследований по формированию наноразмерных элементов автоэмиссионной нанoeлектроники методом ФИП. Определены закономерности влияния режимов ионно-лучевого травления эмиссионных структур острийного и планарного типов методом ФИП. Разработана методика исследования параметров автоэмиссионных катодов на основе использования сканирующей зондовой микроскопии. Исследованы параметры сформированных структур автоэмиссионной нанoeлектроники методами растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии. Установ-

лено, что применение метода ФИП позволяет формировать эмиссионные структуры со значениями радиуса закругления острия и межэлектродного расстояния менее 30 нм. В работе предложен оригинальный метод формирования планарной эмиссионной структуры с нанометровым межэлектродным расстоянием, при котором как катод, так и анод изготавливаются из пленки графена на карбиде кремния [16]. Изменяя основные параметры ионно-лучевого травления – ток пучка, время воздействия в точке, количество проходов луча, и используя растровые графические шаблоны для травления, можно изменять параметры эмиссионных структур в широких пределах. Экспериментальные результаты, полученные в работе, могут быть использованы при проектировании и изготовлении элементов вакуумной автоэмиссионной микро- и нанoeлектроники.

Результаты работы были получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Le Febvre A.J., Abelman L., Lodder J.C.* Field emission at nanometer distances for high-resolution positioning // *Journal of Vacuum Science & Technology*. – 2008. – Vol. 26. – P. 724-729.
2. *Fursey G.N., Petrick V.I., Novikov D.V.* Low-threshold field electron emission from carbon nanoclusters formed upon cold destruction of graphite // *Technical Physics*. – 2009. – Vol. 54, No. 7. – P. 1048-1051.
3. *Вартанетов С. Ильичев Э., Набиев Р. и др.* Эмиссионная электроника на основе нано-(микро-) структурированных углеродных материалов // *Наноиндустрия*. – 2009. – № 4. – С. 12-18.
4. *Kaushik V., Shukla A.K., Vankar V.D.* Improved electron field emission from metal grafted graphene composites // *Carbon*. – 2013. – Vol. 62. – P. 337-345.
5. *Konakova R.V., Okhrimenko O.B., Svetlichnyi A.M. et al.* Characterization of the field-emission cathodes based on the graphene films on SiC // *Semiconductors*. – 2015. – Vol. 49. – Issue 9. – P. 1242-1245.
6. *Охрименко О.Б. Конакова Р.В. Светличный А.М. и др.* Оценка автоэмиссионных свойств наноструктур на основе карбида кремния и графена // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. – 2012. – Т. 10, № 2. – С. 335-342.
7. *Hibino H., Kageshima H. and Nagase M.* Graphene Growth on Silicon Carbide // *NTT Technical Review*. – 2010. – Vol. 8, No. 8. – P. 1-6.
8. *Конакова Р.В., Светличный А.М., Волков Е.Ю. и др.* Сравнительные характеристики спектров комбинационного рассеяния света пленок графена на проводящих и полупроводящих подложках 6H-SiC // *Физика и техника полупроводников*. – 2013. – Т. 47. – Вып. 6. – С. 802-804.
9. *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, Issue 13. – P. 1709-1712.
10. *Ageev O.A., Vnukova A.V., Gromov A.L., et al.* Analysis of modes of nanoscale profiling during ion-stimulated deposition of W and Pt using the method of focused ion beams // *Nanotechnologies in Russia*. – 2014. – Vol. 9, No. 3-4. – P. 145-150.
11. *Агеев О.А., Алексеев А.М., Внукова А.В. и др.* Исследование разрешающей способности наноразмерного профилирования методом фокусированных ионных пучков // *Российские нанотехнологии*. – 2014. – Т. 9, № 1-2. – С. 40-43.
12. *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.
13. *Алексеев А.Н., Соколов И.А., Агеев О.А. и др.* Комплексный подход к технологическому оснащению центра прикладных разработок. Опыт реализации в НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 4 (117). – С. 207-210.

14. Pearton S.J., Chen J.J., Lim W.T. et al. Wet Chemical Etching of Wide Band gap Semiconductors-GaN, ZnO and SiC // ECS Transactions. – 2007. – Vol. 6, Issue 2. – P. 501-512.
15. Svetlichnyi A.M., Ageev O.A., Volkov E.Yu. et al. Modelling of the influence of a pointed field emission cathode design from the silicon carbide with graphene film on the electric field strength // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 752-753. – P. 163-167.
16. Lee S.W. Lee S.S. Yang E.-H. A Study on Field Emission Characteristics of Planar Graphene Layers Obtained from a Highly Oriented Pyrolyzed Graphite Block // Nanoscale Res Lett. – 2009. – Vol. 4 (10). – P. 1218-1221.
17. Коноплев Б.Г., Ageev O.A., 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., Kolomiytsev A.S., Bykov A.V., Smirnov V.A., I.N. Kots Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam // Microelectronics Reliability. – 2015. – No. 55. – P. 2131-2134.
19. Ageev O.A., 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. Le Febvre A.J., Abelman L., Lodder J.C. Field emission at nanometer distances for high-resolution positioning, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2008, Vol. 26, pp. 724-729.
2. Fursey G.N., Petrick V.I., Novikov D.V. Low-threshold field electron emission from carbon nanoclusters formed upon cold destruction of graphite, *Technical Physics*, 2009, Vol. 54, No. 7, pp. 1048-1051.
3. Vartapetov S. Il'ichev E., Nabiev R. i dr. Emissionnaya elektronika na osnove nano- (mikro-) strukturirovannykh uglerodnykh materialov [Emission electronics based on nano- (micro-) structured carbon materials], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2009, No. 4, pp. 12-18.
4. Kaushik V., Shukla A.K., Vankar V.D. Improved electron field emission from metal grafted graphene composites, *Carbon*, 2013, Vol. 62, pp. 337-345.
5. Konakova R.V., Okhrimenko O.B., Svetlichnyi A.M. et al. Characterization of the field-emission cathodes based on the graphene films on SiC, *Semiconductors*, 2015, Vol. 49, Issue 9, pp. 1242-1245.
6. Okhrimenko O.B. Konakova R.V. Svetlichnyy A.M. i dr. Otsenka avtoemissionnykh svoystv nanostruktur na osnove karbida kremniya i grafena [Evaluation of field emission properties of nanostructures based on silicon carbide and graphene], *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotekhnologii* [Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotekhnologii], 2012, Vol. 10, No. 2, pp. 335-342.
7. Hibino H., Kageshima H. and Nagase M. Graphene Growth on Silicon Carbide, *NTT Technical Review*, 2010, Vol. 8, No. 8, pp. 1-6.
8. Konakova R.V., Svetlichnyy A.M., Volkov E.Yu. i dr. Sravnitel'nye kharakteristiki spektrov kombinatsionnogo rasseyaniya sveta plenok grafena na provodyashchikh i poluizoliruyushchikh podlozhkakh 6H-SiC [Comparative characteristics of the spectra of Raman scattering of graphene films on conductive and polilogy substrates 6H-SiC], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov], 2013, Vol. 47, Issue 6, pp. 802-804.
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, Issue 13, pp. 1709-1712.
10. Ageev O.A., Vnukova A.V., Gromov A.L., et al. Analysis of modes of nanoscale profiling during ion-stimulated deposition of W and Pt using the method of focused ion beams, *Nanotechnologies in Russia*, 2014, Vol. 9, No. 3-4, pp. 145-150.
11. Ageev O.A., Alekseev A.M., Vnukova A.V. i dr. Issledovanie razreshayushchey sposobnosti nanorazmernogo profilirovaniya metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Study resolution of nanosized profiling using focused ion beams], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Nanotechnologies in Russia], 2014, Vol. 9, No. 1-2, pp. 40-43.

12. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Gromov A.L., Il'in O.I. Issledovanie rezhimov submikronnogo profilirovaniya poverkhnosti podlozhek kremniya metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Investigation of the silicon substrate surface profiling using focused ion beams in submicron area], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 171-180.
13. Alekseev A.N., Sokolov I.A., Ageev O.A. i dr. Kompleksnyy podkhod k tekhnologicheskomu osnashcheniyu tsentra prikladnykh razrabotok. Opyt realizatsii v NOTs «Nanotekhnologii» YuFU [Comprehensive approach to technological equipping for R&D CENTER. The experience in implementing of SEC «NANOTECHNOLOGY» SFedU], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 207-210.
14. Pearton S.J., Chen J.J., Lim W.T. et al. Wet Chemical Etching of Wide Band gap Semiconductors-GaN, ZnO and SiC, *ECS Transactions*, 2007, Vol. 6, Issue 2, pp. 501-512.
15. Svetlichnyi A.M., Ageev O.A., Volkov E.Yv. et al. Modelling of the influence of a pointed field emission cathode design from the silicon carbide with graphene film on the electric field strength, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 752-753, pp. 163-167.
16. Lee S.W. Lee S.S. Yang E.-H. A Study on Field Emission Characteristics of Planar Graphene Layers Obtained from a Highly Oriented Pyrolyzed Graphite Block, *Nanoscale Res Lett.*, 2009, Vol. 4 (10), pp. 1218-1221.
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 using focused ion beams], *Mikroelektronika* [Russian Microelectronics], 2012, Vol. 41, No. 1, pp. 47-56.
18. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Bykov A.V., Smirnov V.A., I.N. Kots Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam, *Microelectronics Reliability*, 2015, No. 55, pp. 2131-2134.
19. 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 the probe-cantilever for atomic force microscopy using focused ion beams], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2011, No. 4, pp. 4-8.
20. Bykov A.V., Kolomiytsev A.S., Polyakova V.V., Smirnov V.A. Profilirovanie zondov dlya skaniruyushchey zondovoy nanodiagnostiki metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Profiling of the tips for scanning probe nanodiagnosics using focused ion beams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 133-140.

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

Светличный Александр Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: amsvetlich@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Коломийцев Алексей Сергеевич – e-mail: askolomiytsev@sfedu.ru; тел.: 88634371767; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Житяев Игорь Леонидович – e-mail: jityaev.igor@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Спиридонов Олег Борисович – Южный Лазерный Инновационно-Технологический Центр; e-mail: o.spiridonov@slitc.ru; 347923, г. Таганрог, пл. Авиаторов, 1; тел.: +78634340855; к.т.н.; генеральный директор.

Svetlichnyi Alexander Mikhailovich – Southern Federal University; e-mail: amsvetlich@gmail.com; 2, Shevchenko street, corps. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371611; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kolomiytsev Alexey Sergeevich – e-mail: askolomiytsev@sfedu.ru; phone: +78634371767; the department of nanotechnologies and microsystems technology; cand. of eng. sc.; associate professor.

Jityaev Igor Leonidovich – e-mail: jityaev.igor@gmail.com; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

Spiridonov Oleg Borisovich – Southern Laser Innovation Technological Center; e-mail: o.spiridonov@slitc.ru; 1, Aviatorov square, Taganrog, 347923, Russia; phone: +78634340855; cand. of eng. sc.; CEO.

УДК 621.373.826

Е.А. Рынди́н, М.А. Денисенко, А.С. Исаева

**ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНАЛЬНО ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ
ЛАЗЕРОВ-МОДУЛЯТОРОВ**

Рассмотрен метод построения функционально интегрированных инжекционных лазеров-модуляторов, объединяющих в единой наногетероструктуре инжекционный лазер и быстродействующий модулятор оптического излучения, что позволяет, с одной стороны, расширить диапазон частот модуляции до единиц терагерц, а с другой, – обеспечить высокую технологичность и возможность реализации лазеров и модуляторов на кристалле интегральной схемы в едином технологическом цикле. В цепи питания лазера-модулятора задается ток накачки, обеспечивающий инверсную заселенность при неизменном во времени суммарном числе носителей заряда в квантовых ямах гетероструктуры активной области. Амплитудная модуляция лазерного излучения осуществляется посредством изменения управляющего поля, поперечного к направлению плотности тока накачки. Изменение направления поперечного управляющего поля при неизменном токе накачки приводит к передислокации носителей заряда в пространственно смещенных квантовых областях, результатом которой является пространственное совмещение или разделение максимумов плотности электронов и дырок в квантовых ямах зоны проводимости и валентной зоны, приводящее к увеличению или уменьшению интенсивности лазерного излучения. Проведен сравнительный анализ ограничений, свойственных современным моделям инжекционных лазеров, основанным на уравнениях кинетики и уравнениях фундаментальной системы. На основе анализа фундаментальной системы уравнений полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении и уравнений кинетики лазеров разработаны физико-топологическая и схемотехническая модели, позволяющие с различной степенью детализации проводить численный анализ динамики процессов в инжекционных лазерах-модуляторах с учетом их принципов функционирования, режимов работы, структурно-топологических особенностей, профиля легирования, неравномерности пространственных распределений концентраций электронов, дырок и фотонов в активной области лазера, особенностей пространственного распределения плотности тока, влияния периферийных областей лазера-модулятора на его характеристики.

Инжекционный лазер; модулятор оптического излучения; модель.

E.A. Ryndin, M.A. Denisenko, A.S. Isaeva

**PHYSICAL-TOPOLOGICAL AND CIRCUIT MODELS OF FUNCTIONALLY
INTEGRATED INJECTION LASERS-MODULATORS**

The method of constructing of functionally integrated injection laser-modulator that combines in a single nanoheterostructure injection laser and a fast modulator of optical radiation, which allows, on the one hand, to extend the range of modulation frequencies up to one terahertz, and the other, to guarantee high productivity and possibility of realization of lasers and modulators on a chip of integrated circuit in a single technological cycle. The power circuit of the laser-modulator sets the constant pump current, which provides the fixed in time total number of charge carriers in quantum wells of heterostructure active region. Amplitude modulation of laser radi-