

Раздел IV. Электроника и нанотехнологии

УДК 621.385.21

**А.М. Светличный, О.Б. Спиридонов, И.Л. Житяев, Е.Ю. Волков,
М.В. Демьяненко**

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НАНОСТРУКТУРАХ С КАТОДОМ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ГРАФЕНА НА SiC

Рассматриваются вопросы разработки автокатодов нанометровых размеров, применение которых предполагает возможность перехода к нанoeлектронике терагерцевого диапазона. Предложена конструкция прямоугольного автоэмиссионного катода. Представлены результаты моделирования распределения электрического поля в межэлектродном промежутке автоэмиссионной ячейки. Моделирование проводилось с использованием программной платформы COMSOL Multiphysics 4.4, в которой решаются системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов, при разности потенциалов между анодом и катодом 4 В. Применялся адаптивный алгоритм построения сетки, позволивший повысить точность математических расчетов за счет увеличения плотности конечных элементов в области сложной геометрии межэлектродного пространства нанометровых размеров. В качестве материала автоэмиссионного катода был выбран карбид кремния с пленкой графена на его поверхности, так как углеродсодержащим материалам свойственны низкие пороговые напряжения начала эмиссии, устойчивость к катодному распылению, высоким температурам и ионизирующему излучению. Исследовано влияние геометрических параметров автоэмиссионной ячейки на эмиссионные характеристики. На основе результатов моделирования и аналитических расчетов получены и проанализированы зависимости величины напряженности электрического поля от межэлектродного расстояния (10–50 нм), толщины (10–200 нм) и высоты катода (50 нм – 2,5 мкм). Напряженность поля ($\sim 10^8$ В/м) увеличивается в 2–4 раза при уменьшении ширины катода и межэлектродного расстояния до 10 нм. Построены графики распределения электрического поля по длине автоэмиссионного катода с прямоугольным сечением, из которых выявлено наличие негативных краевых эффектов в виде увеличения значения напряженности электрического поля в 1,5–2 раза.

Моделирование; автоэмиссионный катод; графен; карбид кремния; напряженность электрического поля.

A.M. Svetlichnyi, O.B. Spiridonov, I.L. Jityaev, E.Yu. Volkov, M.V. Demyanenko

SIMULATION OF THE ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN NANOSTRUCTURES WITH RECTANGULAR CROSS-SECTION FIELD EMISSION CATHODE BASED ON GRAPHENE FILM ON SiC

The article examines the development of the nanosize field emission cathodes, the using of which suggests the possibility of transition to terahertz nanoelectronics. A design of a rectangular field emission cathode was proposed. The simulations results of the electric field distribution in the interelectrode gap of the field emission cell was presented. The simulation was performed, when the potential difference between the anode and the cathode 4 V, by using the software platform COMSOL Multiphysics 4.4, wherein systems of nonlinear differential equations in partial derivatives are solves by finite element method. An adaptive algorithm of the grid constructing is used, he is improved the accuracy of mathematical calculations by increasing the density of the finite element in the complex geometry of the nanosize interelectrode space. Silicon carbide with graphene film on its surface was

chosen as a material of field emission cathode, because carbonaceous materials have low threshold voltage characteristic of the start emission, resistance to cathode sputtering, high temperature and ionizing radiation. The influence of geometrical parameters of the field emission cell on the field emission characteristics was investigated. The dependence of the electric field strength from the interelectrode spacing (10–50 nm), thickness (10–200 nm) and height of the cathode (50 nm – 2.5 μm) was obtained and analyzed based on the simulation results and analytical calculations. The field strength ($\sim 10^8$ V/m) is increased 2–4 times when reducing the width of the cathode and interelectrode distance to 10 nm. Graphs of the electric field distribution along the length of a field emission cathode with a rectangular cross-section was plotted, of which the presence of the negative edge effects in the form of 1,5–2 times increasing the value of the electric field strength.

Simulation; field emission cathode; graphene; silicon carbide; electric field strength.

Введение. В последнее время всё больший интерес проявляется к автоэмиссионным свойствам углеродсодержащих материалов: карбид кремния, графитизированные пленки, алмазоподобные пленки, углеродные нанотрубки, графен и др. [1–6]. С момента первого получения графена в 2004 г. значительно расширилась сфера его применения из-за высокой проводимости, теплопроводности и механической прочности [7–12]. Отличительной особенностью нанокремниевых материалов является низкий порог эмиссии электронов с поверхности катода [13]. При этом наблюдается высокое быстродействие, устойчивость к катодному распылению, СВЧ-излучениям и радиации [14–16]. В работе предлагается использование катодов из карбида кремния с пленками графена на его поверхности. Карбид кремния относится к высокотемпературным материалам, химически устойчив к большинству травителей, возможно получение на всей поверхности пластины пленок графена [17, 18]. Для разработки оптимальной конструкции автоэмиссионной структуры необходимо её теоретическое и практическое исследование. Моделирование эмиссионных процессов позволяет оценить эффективность конструктивных особенностей автоэмиссионной структуры [19, 20]. В настоящее время в большинстве статей при моделировании рассматриваются автоэмиссионные процессы при разности потенциалов порядка 100–1000 В в структурах с катодом в форме острия без учета влияния их геометрических размеров, параметров автоэмиссионной ячейки, площади, с которой происходит эмиссия [21–31]. В статье проводится моделирование при разности потенциалов менее 10 В с целью дальнейшего изготовления элементов наноэлектроники.

Моделирование. В статье методом моделирования проводился анализ влияния геометрических параметров автоэмиссионной ячейки с катодом, имеющим прямоугольное поперечное сечение, на распределение электрического поля в межэлектродном промежутке. Моделирование электростатических полей проводилось в трехмерной декартовой системе координат. Общий вид автоэмиссионного катода с поперечным сечением эмитирующего торца постоянной толщины, т.е. поперечное сечение в виде прямоугольника, приведен на рис. 1.

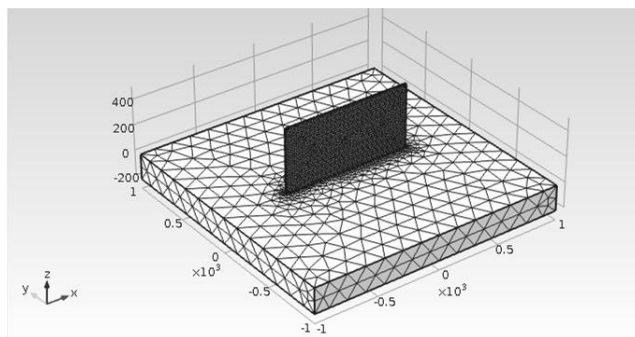


Рис. 1. Автоэмиссионного катода с сечением в виде прямоугольника

В структурах с подобными автоэмиссионными катодами распределение поля описывается уравнением Лапласа для трехмерной декартовой системы координат:

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

Заданы следующие граничные условия первого рода (условия Дирихле): для границ анода – $U_i = \text{const}$; для границ катода – $U_k = \text{const}$; для границ автоэмиссионной ячейки – $U_y = 0$.

Для определения зависимости напряженности электрического поля от толщины поперечного сечения катода было проведено моделирование распределения электростатического поля в межэлектродном зазоре при различных значениях w . Результаты моделирования представлены на рис. 2.

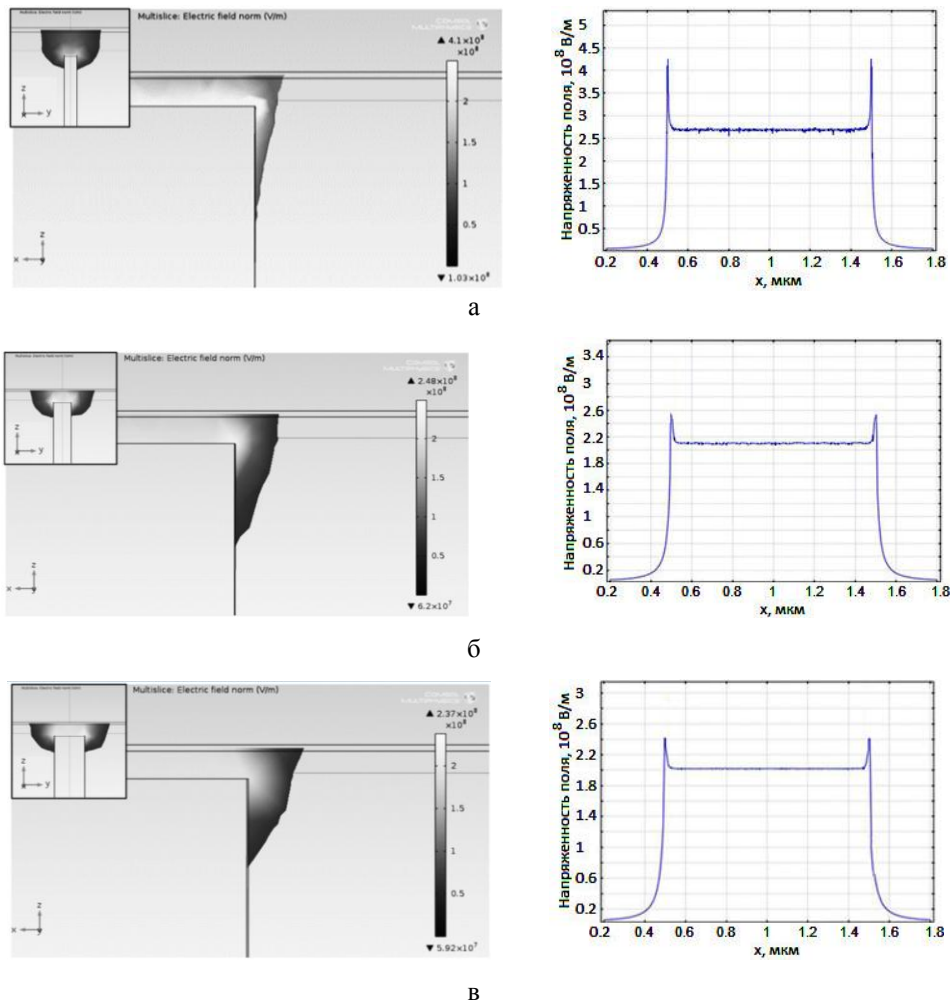
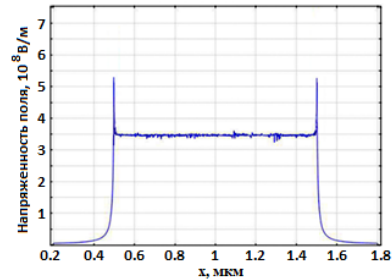
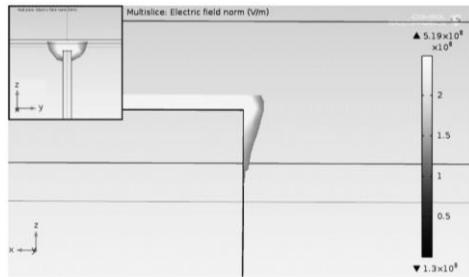


Рис. 2. Распределение электрического поля в эмиссионной структуре при различных значениях толщины катода: а – 10 нм; б – 30 нм; в – 50 нм

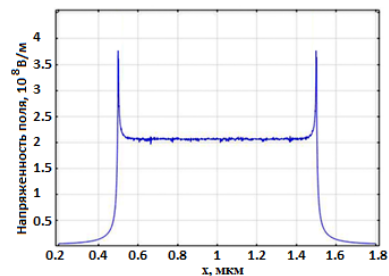
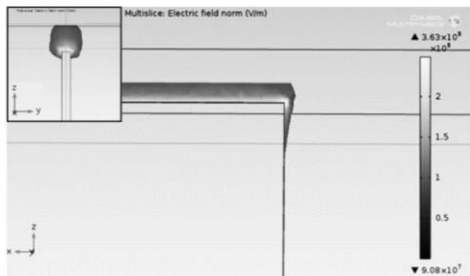
Значения, используемые при моделировании электрического поля в межэлектродном зазоре: толщина автоэмиссионного катода $w = 10\text{--}200$ нм, разность потенциалов $U = 4$ В, межэлектродное расстояние $R = 20$ нм, высота автоэмиссионного катода $h = 3$ мкм, материал катода – карбид кремния с пленкой графена. Сле-

ва на рис. 2 показано распределение электрического поля по двум взаимно перпендикулярным плоскостям XZ и YZ. Справа на рис. 2 показаны графики распределения величины напряженности электрического поля по координате X (вдоль автоэмиссионного катода), из которых видно, что происходит усиление электрического поля на краях автоэмиссионного катода. Снижение толщины автоэмиссионного катода приводит к росту величины усиления электрического поля.

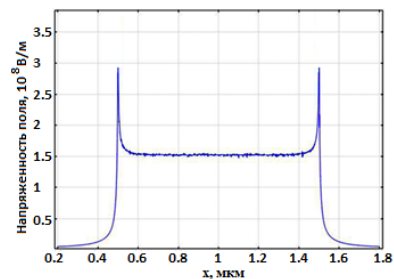
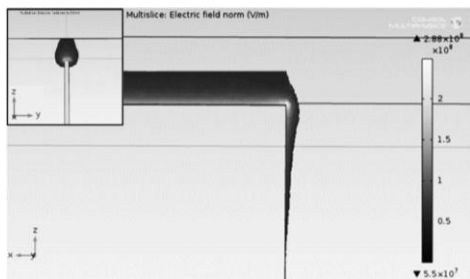
Было проведено моделирование распределения электростатического поля в межэлектродном зазоре при различных значениях R . Значения, используемые при моделировании электрического поля в межэлектродном зазоре: толщина автоэмиссионного катода $w = 10$ нм, разность потенциалов $U = 4$ В, межэлектродное расстояние $R = 10\text{--}50$ нм, высота автоэмиссионного катода $h = 3$ мкм, материал катода – карбид кремния с пленкой графена. Слева на рис. 3 показано распределение электрического поля по двум взаимно перпендикулярным плоскостям XZ и YZ, справа – графики распределения величины напряженности электрического поля вдоль автоэмиссионного катода. Результаты моделирования распределения напряженности электрического поля по длине автоэмиссионного катода при различных значениях межэлектродного расстояния также показали наличие усиления электрического поля на краях автоэмиссионного катода.



а



б



в

Рис. 3. Распределение электрического поля в эмиссионных структурах при различных значениях межэлектродного расстояния: а – 10 нм; б – 30 нм; в – 50 нм

Еще одним важным конструкционным параметром автоэмиссионного катода является его высота h . Для определения влияния высоты автоэмиссионного катода на напряженность электрического поля было проведено моделирование. Значения, используемые при моделировании электрического поля в межэлектродном зазоре: толщина автоэмиссионного катода $w = 10$ нм, разность потенциалов $U = 4$ В, межэлектродное расстояние $R = 20$ нм, высота автоэмиссионного катода $h = 50$ нм – 3 мкм, материал катода – карбид кремния с пленкой графена. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

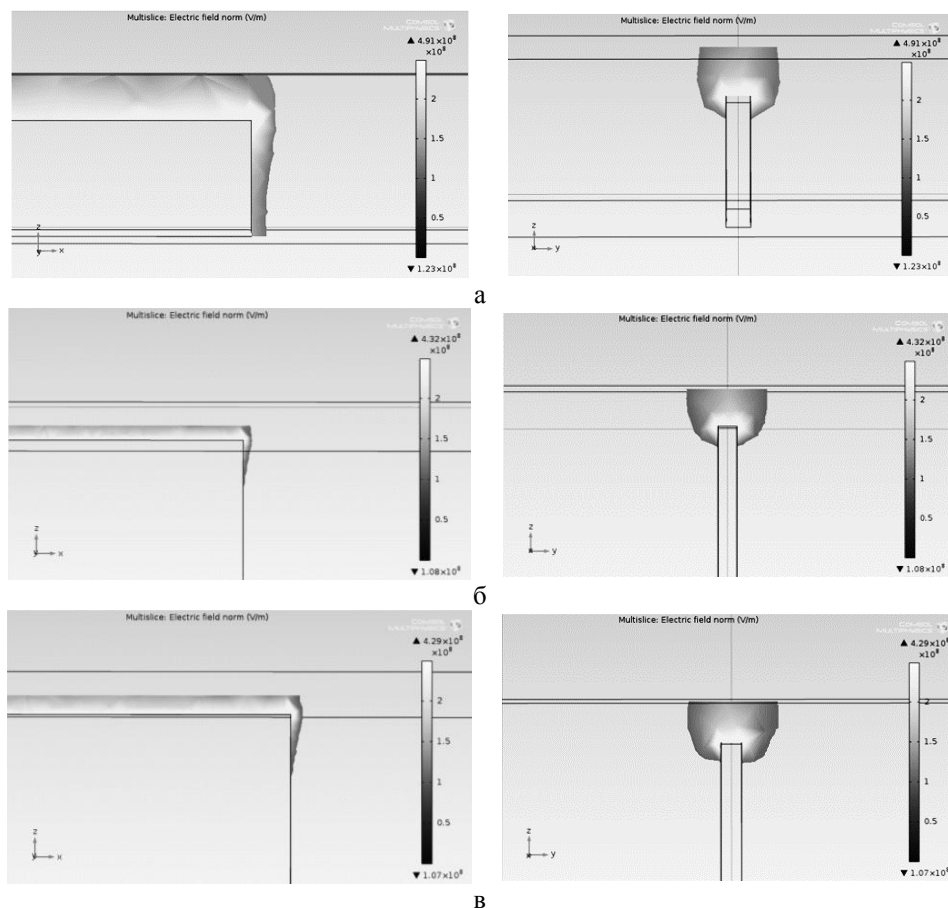


Рис. 4. Распределение электрического поля в эмиссионных структурах при различных значениях высоты автоэмиссионного катода:
 а – 50 нм; б – 1 мкм; в – 2,5 мкм

Результаты и обсуждение. По результатам моделирования были построены зависимости напряженности электрического поля от геометрических параметров автоэмиссионной ячейки. Также был выполнен аналитический расчет напряженности электрического поля по выражению:

$$E = \frac{2 \cdot U}{\sqrt{\pi \cdot R \cdot w}} \quad (2)$$

Результаты моделирования и аналитических расчетов представлены графиком зависимости напряженности электрического поля от толщины автоэмиссионного катода и межэлектродного расстояния (рис 5, 6). Из графиков видно, что зависимости,

полученные в результате расчета и моделирования, имеют схожий характер: увеличение геометрических размеров автоэмиссионной структуры способствует снижению величины напряженности электрического поля. Различия значений напряженности электрического поля объясняется тем, что аналитическое выражение не учитывает локального усиления поля в углах катода, а кривые 1 на рис. 5, 6 построены с учетом максимальных значений напряженности электрического поля, полученных из результатов моделирования.

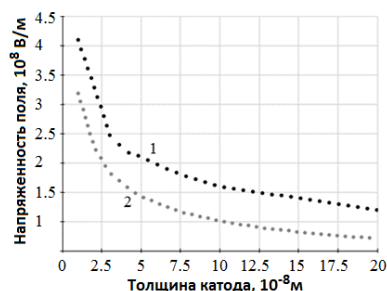


Рис. 5. Зависимости напряженности электрического поля от толщины автоэмиссионного катода: 1 – численный метод; 2 – аналитический метод

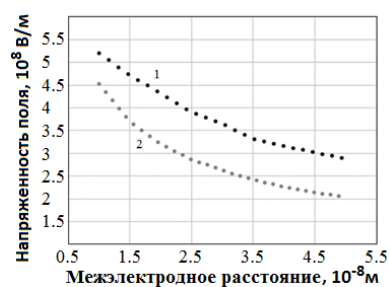


Рис. 6. Зависимости напряженности электрического поля от межэлектродного расстояния: 1 – численный метод; 2 – аналитический метод

Зависимость напряженности электрического поля от высоты автоэмиссионного катода приведена на рис. 7. График построен с учетом максимальных значений напряженности электрического поля, полученных из результатов моделирования. Анализ полученных данных показал увеличение напряженности поля с уменьшением высоты автокатада. При высоте катода менее 1 мкм происходит незначительное увеличение напряженности электрического поля, а при высоте катода менее 100 нм наблюдается эмиссия с подложки.

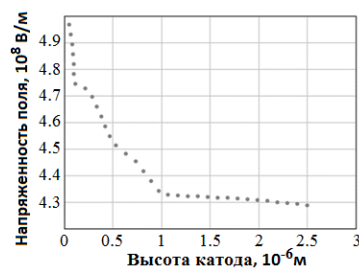


Рис. 7. Зависимости напряженности электрического поля от высоты автоэмиссионного катода

Заключение. Проведено моделирование распределения электрического поля в межэлектродном зазоре автоэмиссионной ячейки нанометровых размеров с катодом, имеющим прямоугольное поперечное сечение. По результатам моделирования и аналитического расчета были определены зависимости напряженности электрического поля от межэлектродного расстояния, высоты и толщины автоэмиссионного катода. Кривые на графиках показали схожий характер и значения напряженности электрического поля порядка 10^8 В/м, что не противоречит большинству результатов исследований автоэмиссионных структур [32–36]. Уменьшение геометрических размеров автоэмиссионной ячейки до нанометровых размеров позволило снизить рабочие напряжения на 2–3 порядка по сравнению с современными характеристиками автоэмиссионных приборов [37–40]. Уменьшение поперечного сечения катода и межэлектродного расстояния приводит к увеличению напряженности электрического поля в несколько раз, а при высоте катода менее 1 мкм проявляется эффект влияния подложки. Результаты моделирования выявили повышенные значения напряженности электрического поля на краях автоэмиссионного катода прямоугольного сечения. Данный эффект присутствует как в продольном, так и в поперечном направлениях. Это локальное усиление поля может быть одной из причин нестабильности автоэмиссионных катодов в сильных электрических полях [41, 42]. С целью снижения усиления электрического поля на краях автоэмиссионного катода необходимо проводить оптимизацию его конструкции. Результаты, полученные в работе, необходимо учитывать 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. Исследование выполнено в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (Задание №16.1154.2014/К).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Образцов А.Н., Павловский И.Ю., Волков А.П.* Автоэлектронная эмиссия в графитоподобных пленках // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71. – Вып. 11. – С. 89-95.
2. *Лупехин С.М., Ибрагимов А.А.* Полевая электронная эмиссия катодов из углеродных нитей с наноструктурной эмиссионной поверхностью // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81. – Вып. 6. – С. 109-112.
3. *Шешин Е.П.* Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. – М.: Изд-во МФТИ, 2001. – 288 с.
4. *Gao J.H., Zhang L., Zhang B.L. et al.* Fabrication of globe-like diamond microcrystalline aggregate films and investigation of their field emission properties // Thin Solid Films. – 2008. – Vol. 516. – P. 7807-7811.
5. *Конакова Р.В., Охрименко О.Б., Светличный А.М. и др.* Оценка возможности изготовления автоэмиссионных наноструктур на основе графена // Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь – Россия – Украина (НАНО-2010): материалы II Международной научной конференции (Киев, 19-22 октября, 2010). – Киев: Изд-во. Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова, 2010. – С. 249.
6. *Охрименко О.Б., Конакова Р.В., Светличный А.М. и др.* Оценка автоэмиссионных свойств наноструктур на основе карбида кремния и графена // Наносистемы. – 2012. – Т. 10, № 2. – С. 335-342.
7. *Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. et al.* Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene // Nature. – 2005. – Vol. 438. – P. 197-200.
8. *Chen Zh., Lin Yu-M., Rooks M.J. et al.* Graphene Nano-Ribbon Electronics // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2007. – Vol. 40, № 2. – P. 228-232.
9. *Lee C., Wei X., Kysar J.W. et al.* Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene // Science. – 2008. – Vol. 321, № 5887. – P. 385-388.

10. *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.
11. *Сорокин П.Б., Чернозатонский Л.А.* Полупроводниковые наноструктуры на основе графена // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183, №2. – С. 113-132.
12. *Kaushik V., Shukla A.K., Vankar V.D.* Improved electron field emission from metal grafted graphene composites // Carbon. – 2013. – Vol. 62. – P. 337-345.
13. *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, № 7. – P. 1048-1051.
14. *Вартапетов С. Ильичев Э., Набиев Р. и др.* Эмиссионная электроника на основе нано-(микро-) структурированных углеродных материалов // Наноиндустрия. – 2009. – № 4. – С. 12-18.
15. *Дюжев Н.А. Козлов А.И., Махов В.И. и др.* Быстродействие микроэлектронных структур с автоэлектронными катодами // Микроэлектроника. – 1990. – Т. 19. – Вып. 5. – С. 478-485.
16. *Елецкий А.В.* Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 3. – С. 233-274.
17. *Карачинов В.А., Торицин С.Б., Карачинов Д.В.* Эффект самосограженной перфорации аморфных слоев карбида кремния // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74. – Вып. 12. – С. 96-97.
18. *Лебедев А.А. Козловский В.В., Строкан Н.Б. и др.* Радиационная стойкость широкозонных полупроводников (на примере карбида кремния) // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36. – Вып. 11. – С. 1354-1359.
19. *Житяев И.Л.* Влияние конструкции острых наноразмерных автокатодов на основе пленок графена на карбиде кремния на эмиссионные характеристики // X Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН: тезисы докладов (г. Ростов-на-Дону, 14–29 апреля 2014 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. – С. 138-139.
20. *Житяев И.Л., Светличный А.М., Демьяненко М.В.* Особенности моделирования автоэмиссионных катодов в форме острия на основе пленок мультиграфена на карбиде кремния // Нанотехнологии в электронике и МЭМС: труды Международной научно-технической конференции и молодежной школы-семинара (г. Таганрог, 20–25 октября 2014 г.). – Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2014. – С. 49-50.
21. *Mayer A., Lambin Ph.* Quantum-mechanical simulations of field emission from carbon nanotubes // Carbon. – 2002. – Vol. 40. – P. 429-436.
22. *Wang X.Q., Wang M., Li Z.H. et al.* Modeling and calculation of field emission enhancement factor for carbon nanotubes array // Ultramicroscopy. – 2005. – Vol. 102, № 3. – P. 181-187.
23. *Wang X.Q., Wang M., Ge H.L. et al.* Modeling and simulation for the field emission of carbon nanotubes array // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2005. – Vol. 30, № 1-2. – P. 101-106.
24. *Watcharotone S., Ruoff R.S., Read F.H.* Possibilities for graphene for field emission: modeling studies using the BEM // Physics procedia. – 2008. – Vol. 1. – P. 71-75.
25. *Tong J., Li L., Chu N.J. et al.* Optimization for field emission from carbon nanotubes array by Fowler–Nordheim equation // Physica E. – 2008. – Vol. 40. – P. 3166-3169.
26. *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.
27. *Rezeq M.* Finite element simulation and analytical analysis for nano field emission sources that terminate with a single atom: A new perspective on nanotips // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 258. – P. 1750-1755.
28. *Mamta Khanejaab, Swati Singhb, Santanu Ghosh et al.* Modeling Field Emission from Single-Tip Carbon Nanotube in Triode Configuration // International Journal of Green Nanotechnology. – 2013. – Vol. 4. – № 4. – P. 547-552.
29. *Навроцкий И.А., Бурцев А.А.* Особенности моделирования многоостриных катодов с переменной периодической структурой // Антенны. – 2013. – № 7. – С. 63-65.
30. *Лыткин Л.К., Филатов Г.А., Цепилов Г.В.* Расчет автоэмиссионных структур с помощью ELCUT // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. URL: www.science-education.ru/119-15041 (дата обращения: 26.12.2014).

31. Гусинский Г.М., Баранова Л.А., Найденов В.О. Субмикронный источник свободных электронов // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – Вып. 3. – С. 129-132.
32. Гуляев Ю.В. Углеродные нанотрубные структуры – новый материал для эмиссионной электроники // Вестник Российской академии наук. – 2003. – Т. 73, № 5. – С. 389-391.
33. Дмитриев А.Н., Музыков П.Г., Тангали С. и др. Исследование процесса автоэмиссии графитизированных слоев на поверхности карбида кремния // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 109-118.
34. Зайцев Н., Горнев Е., Орлов С. и др. Наноалмазографитовые автоэммиттеры для интегральных автоэмиссионных элементов // Наноиндустрия. – 2011. – № 5. – С. 36-39.
35. Liu J., Zeng B., Wang X. et al. Ultra low field electron emission of graphene exfoliated from carbon cloth // Applied Physics Letters. – 2012. – № 101. – P. 153104.
36. Белянин А.Ф., Борисов В.В., Тимофеев М.А. и др. Ненакаливаемые катоды на основе углеродных наноструктурированных слоистых структур // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013. – № 4. – С. 31-36.
37. Лейченко А.С., Негров Д.В., Рауфов А.С. и др. Применение автоэмиссионного катода из терморасширенного графита для формирования элемента дисплейной матрицы // ТРУДЫ МФТИ. – 2010. – Т. 2, № 1 (5). – С. 33-36.
38. Nguyen D.D., Lai Yi-T., Tai N.-H. Enhanced field emission properties of a reduced graphene oxide/carbon nanotube hybrid film // Diamond and Related Materials. – 2014. – Vol. 47. – P. 1-6.
39. Chen L., He H., Ya H. et al. Electron field emission characteristics of graphene/carbon nanotubes hybrid field emitter // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 610. – P. 659-664.
40. Deng J.-H., Wang F.-J., Cheng L. et al. Improved field emission of few-layer graphene-carbon nanotube composites by high-temperature processing // Materials Letters. – 2014. – Vol. 124. – P. 15-17.
41. Fursey G.N., Ptitsyn V.E., Krotevich D.N. Spontaneous migration of the surface atoms at maximum current densities of the field-electron emission initiating vacuum breakdown // Proc. 11th ISDETV. – 1984. – Vol. 1. – P. 69-71.
42. Кротевиц Д.Н., Птицын В.Е., Фурсей Г.Н. Самопроизвольная перестройка автоэмиссионного катода при предельных плотностях тока // Журнал технической физики. – 1985. – Т. 55, № 3. – С. 625-627.

REFERENCES

1. Obraztsov A.N., Pavlovskiy I.Yu., Volkov A.P. Avtoelektronnaya emissiya v grafitopodobnykh plenkakh [Field emission in graphite-like films], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2001, Vol. 71, Issue 11, pp. 89-95.
2. Lupekhin S.M., Ibragimov A.A. Polevaya elektronnaya emissiya katodov iz uglerodnykh nitey s nanostrukturnoy emissionnoy poverkhnost'yu [Field electron emission cathodes made of carbon fibres with nanostructured emission surface], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2011, Vol. 81, Issue 6, pp. 109-112.
3. Sheshin E.P. Struktura poverkhnosti i avtoemissionnye svoystva uglerodnykh materialov [The surface structure and field emission properties of carbon materials]. Moscow: Izd-vo MFTI, 2001, 288 p.
4. Gao J.H., Zhang L., Zhang B.L. et al. Fabrication of globe-like diamond microcrystalline aggregate films and investigation of their field emission properties, *Thin Solid Films*, 2008, Vol. 516, pp. 7807-7811.
5. Konakova R.V., Okhrimenko O.B., Svetlichnyy A.M. i dr. Otsenka vozmozhnosti izgotovleniya avtoemissionnykh nanostruktur na osnove grafena [To assess the possibility of manufacturing a field emission nanostructures based on grapheme] Nanostrukturnye materialy – 2010: Belarus' – Rossiya – Ukraina (NANO-2010): *materialy II Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Kiev, 19-22 oktyabrya, 2010)* [Nanostructured materials – 2010: Belarus – Russia – Ukraine (NANO-2010): proceedings of the II International scientific conference (Kyiv, October 19-22, 2010)]. Kiev: Izd-vo. Institut metallofiziki im. G.V. Kurdyumova, 2010, pp. 249.
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 grapheme], *Nanosistemy* [Nanosystems], 2012, Vol 10, No. 2, pp. 335-342.
7. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in grapheme, *Nature*, 2005, Vol. 438, pp. 197-200.

8. Chen Zh., Lin Yu-M., Rooks M.J. et al. Graphene Nano-Ribbon Electronics, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2007, Vol. 40, No. 2, pp. 228-232.
9. Lee C. Wei X., Kysar J.W. et al. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene, *Science*, 2008, Vol. 321, No. 5887, pp. 385-388.
10. Konakova R.V., Svetlichnyy A.M., Volkov E.Yu. i dr. Sravnitel'nye kharakteristiki spektrov kombinatsionnogo rasseyaniya sveta plenok grafena na provodyashchikh i poluiliziruyushchikh podlozhkakh 6H-SiC [Comparative characteristics of the spectra of Raman scattering of graphene films on conductive and polycrystalline substrate 6H-SiC], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 2013, Vol. 47, Issue 6, pp. 802-804.
11. Sorokin P.B., Chernozatonskiy L.A. Poluprovodnikovye nanostrukturny na osnove grafena [Semiconductor nanostructures based on graphene], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi], 2013, Vol. 183, No. 2, pp. 113-132.
12. Kaushik V., Shukla A.K., Vankar V.D. Improved electron field emission from metal grafted graphene composites, *Carbon*, 2013, Vol. 62, pp. 337-345.
13. 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.
14. Vartapetov S. Il'ichev E., Nabiev R. i dr. Emissionnaya elektronika na osnove nano- (mikro-) strukturirovannykh uglerodnykh materialov [Emission electronics-based nano- (micro-) structured carbon materials], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2009, No. 4, pp. 12-18.
15. Dyuzhev N.A. Kozlov A.I., Makhov V.I. i dr. Bystrodeystvie mikroelektronnykh struktur s avtoelektronnymi katodami [The performance of the microelectronic structures with field cathodes], *Mikroelektronika* [Russian Microelectronics], 1990, Vol. 19, Issue 5, pp. 478-485.
16. Eletskiy A.V. Mekhanicheskie svoystva uglerodnykh nanostruktur i materialov na ikh osnove [Mechanical properties of carbon nanostructures and materials on their basis], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi], 2007, Vol. 177, No. 3, pp. 233-274.
17. Karachinov V.A., Toritsin S.B., Karachinov D.V. Effekt samosopryazhennoy perforatsii amorfnykh sloev karbida kremniya [The effect of self-adjoint perforation of amorphous layers of silicon carbide], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2004, Vol. 74, Issue 12, pp. 96-97.
18. Lebedev A.A. Kozlovskiy V.V., Strokan N.B. i dr. Radiatsionnaya stoykost' shirokozonnnykh poluprovodnikov (na primere karbida kremniya) [Radiation resistance wide-band gap semiconductor (for example silicon carbide)], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 2002, Vol. 36, Issue 11, pp. 1354-1359.
19. Zhityaev I.L. Vliyanie konstruksii ostriynykh nanorazmernnykh avtokatodov na osnove plenok grafena na karbide kremniya na emissionnye kharakteristiki [The effect of eld emission structures of nanoscale autocatalog based on graphene films on silicon carbide on the emission characteristics of], *X Ezhegodnaya nauchnaya konferentsiya studentov i aspirantov bazovykh kafedr Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN: tezisy dokladov (g. Rostov-na-Donu, 14–29 aprelya 2014 g.)* [X Annual scientific conference of students and postgraduates of basic departments of the southern scientific center of Russian Academy of Sciences: abstracts (Rostov-on-don, 14-29 April 2014)]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2014, pp. 138-139.
20. Zhityaev I.L., Svetlichnyy A.M., Dem'yanenko M.V. Osobennosti modelirovaniya avto-emissionnykh katodov v forme ostriya na osnove plenok mul'tigrafena na karbide kremniya [Features simulation of field emission cathodes in the form of a spike-based films multigravida on silicon carbide]. *Nanotekhnologii v elektronike i MEMS: trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii i molodezhnoy shkoly-seminara (g. Taganrog, 20–25 oktyabrya 2014 g.)* [Nanotechnologies in electronics and MEMS: proceedings of International scientific-technical conference and youth conference (Taganrog, 20-25 October 2014)]. Taganrog: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2014, pp. 49-50.
21. Mayer A., Lambin Ph. Quantum-mechanical simulations of field emission from carbon nanotubes, *Carbon*, 2002, Vol. 40, pp. 429-436.
22. Wang X.Q., Wang M., Li Z.H. et al. Modeling and calculation of field emission enhancement factor for carbon nanotubes array, *Ultramicroscopy*, 2005, Vol. 102, No. 3, pp. 181-187.
23. Wang X.Q., Wang M., Ge H.L. et al. Modeling and simulation for the field emission of carbon nanotubes array, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2005, Vol. 30, No. 1-2, pp. 101-106.
24. Watcharotone S., Ruoff R.S., Read F.H. Possibilities for graphene for field emission: modeling studies using the BEM, *Physics procedia*, 2008, Vol. 1, pp. 71-75.

25. Tong J., Li L., Chu N.J. et al. Optimization for field emission from carbon nanotubes array by Fowler–Nordheim equation, *Physica E*, 2008, Vol. 40, pp. 3166-3169.
26. Le Febvre A.J., Abelmann L., Lodder J.C. Field emission at nanometer distances for high-resolution positioning, *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2008, Vol. 26, pp. 724-729.
27. Rezeq M. Finite element simulation and analytical analysis for nano field emission sources that terminate with a single atom: A new perspective on nanotips, *Applied Surface Science*, 2011, Vol. 258, pp. 1750-1755.
28. Mamta Khanejaab, Swati Singhb, Santanu Ghosh et al. Modeling Field Emission from Single-Tip Carbon Nanotube in Triode Configuration, *International Journal of Green Nanotechnology*, 2013, Vol. 4, No. 4, pp. 547-552.
29. Navrotskiy I.A., Burtsev A.A. Osobennosti modelirovaniya mnogoostriynykh katodov s peremennoy periodicheskoy strukturoy [Simulation features mnogoseriynykh cathodes with variable periodic structure], *Antenny* [Antennas], 2013, No. 7, pp. 63-65.
30. Lytkin L.K., Filatov G.A., Tsepilov G.V. Raschet avtoemissionnykh struktur s pomoshch'yu ELCUT [Calculation of field emission structures using ELCUT], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2014, No. 5. Available at: <http://www.science-education.ru/119-15041> (Accessed 26 December 2014).
31. Gusinskiy G.M., Baranova L.A., Naydenov V.O. Submikronnyy istochnik svobodnykh elektronov [Submicron source of free electrons *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2015, Vol. 85, Issue 3, pp. 129-132.
32. Gulyaev Yu.V. Uglerodnye nanotrubnye struktury – novyy material dlya emissionnoy elektroniki [Carbon nanotube patterns – a new material for emission electronics], *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2003, Vol. 73, No. 5, pp. 389-391.
33. Dmitriev A.N., Muzykov P.G., Tangali S. i dr. Issledovanie protsessa avtoemissii grafitizirovannykh sloev na poverkhnosti karbida kremniya [Field emission from the graphitized surface of silicon carbide], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 109-118.
34. Zaytsev N., Gornev E., Orlov S. i dr. Nanoalmazografityvye avtoemittery dlya integral'nykh avtoemissionnykh elementov [Nanoulaturtue automater for integral field emission elements], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2011, No. 5, pp. 36-39.
35. Liu J., Zeng B., Wang X. et al. Ultra low field electron emission of graphene exfoliated from carbon cloth, *Applied Physics Letters*, 2012, No. 101, pp. 153104.
36. Belyanin A.F., Borisov V.V., Timofeev M.A. i dr. Nenakalivaemye katody na osnove uglerodnykh nanostrukturirovannykh sloistykh struktur [Nakalivaniya cathodes based on carbon nanostructured layered structures], *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and Designing in Electronic Equipment], 2013, No. 4, pp. 31-36.
37. Leychenko A.S., Negrov D.V., Raufov A.S. i dr. Primeneniye avtoemissionnogo katoda iz termorasshirennogo grafita dlya formirovaniya elementa displeynoy matritsy [The use of a field emission cathode of expanded graphite for forming a display element matrix], *Trudy MFTI* [Proceedings of MIPT], 2010, Vol. 2, No. 1 (5), pp. 33-36.
38. Nguyen D.D., Lai Yi-T., Tai N.-H. Enhanced field emission properties of a reduced graphene oxide/carbon nanotube hybrid film, *Diamond and Related Materials*, 2014, Vol. 47, pp. 1-6.
39. Chen L., He H., Ya H. et al. Electron field emission characteristics of graphene/carbon nanotubes hybrid field emitter, *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, Vol. 610, pp. 659-664.
40. Deng J.-H., Wang F.-J., Cheng L. et al. Improved field emission of few-layer graphene–carbon nanotube composites by high-temperature processing, *Materials Letters*, 2014, Vol. 124, pp. 15-17.
41. Fursey G.N. Ptitsyn V.E., Krotevich D.N. Spontaneous migration of the surface atoms at maximum current densities of the field-electron emission initiating vacuum breakdown, *Proc. 11th ISDETV*, 1984, Vol. 1, pp. 69-71.
42. Krotevich D.N., Ptitsyn V.E., Fursey G.N. Samoproizvol'naya perestroyka avtoemissionnogo katoda pri predel'nykh plotnostyakh toka [Spontaneous restructuring of the field emission cathode at the limiting current densities], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 1985, Vol. 55, No. 3, pp. 625-627.

Статью рекомендовал к опубликованию к.х.н., доцент Д.С. Гаев.

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.

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

Демьяненко Максим Валерьевич – e-mail: maks_vd@mail.ru; 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.

Волков Евгений Юрьевич – e-mail: eyvolkov@gmail.com; к.т.н.; инженер.

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

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

Demyanenko Maxim Valeryevich – e-mail: maks_vd@mail.ru; 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.

Volkov Evgeny Yurievich – e-mail: eyvolkov@gmail.com; cand. of eng. sc.; engineer.

УДК 621.38.049.77

**Е.Ю. Гусев, Ю.Ю. Житяева, А.С. Коломийцев, В.А. Гамалеев, И.Н. Коц,
А.В. Быков**

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЖИДКОСТНОГО ТРАВЛЕНИЯ ЖЕРТВЕННОГО СЛОЯ SiO₂ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ Si*/SiO₂/Si

Представлены результаты экспериментальных исследований удаления жертвенного слоя диоксида кремния в буферном растворе плавиковой кислоты и фторида аммония (HF: NH₄F = 1:4) в зависимости от времени травления (от 10 до 60 с) и первоначальной конфигурации структуры. Разработана и изготовлена серия элементов балочного типа, на основе одной из базовых структур технологии поверхностной микрообработки – поликристаллический кремний/оксид кремния/подложка кремния – Si/SiO₂/Si. Топологический рисунок элементов формировали литографией фокусированными ионными пучками. Исследования полученных элементов, в том числе измерение параметров профиля SiO₂ проводили методами растровой электронной микроскопии и фокусированных ионных пучков. Предложены два способа вскрытия окон под жидкостное травление, приводящие к различному профилю фронта травления – классическому и нетипичному для жидкостного травления отвесному. Показано, что процесс жидкостного травления жертвенного слоя практически не зависит от ширины элементов топологического рисунка структурного слоя. Представлена временная зависимость глубины травления в горизонтальном направлении. Значение скорости травления оксида составило около 20 нм/с, а минимальное время необходимое для удаления оксида кремния под балками шириной 0,5–2,5 мкм (с шагом 0,5 мкм) – в диапазоне от 11 с до 62,5 с. Установлено, что наличие окон перфорации в структурном слое значительно уменьшает время необходимое для удаления жертвенного слоя. Выявлено*