

УДК 621.382

СУБМИКРОННОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

¹Коломийцев А.С., ¹Громов А.Л., ¹Ильин О.И., ¹Лисицын С.А., ²Катханов Б.С.

¹ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону,
e-mail: alexey.kolomiitsev@gmail.com;

²ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова», Нальчик, e-mail: kathanov@rambler.ru

В работе проведены экспериментальные исследования технологических режимов субмикронного структурирования поверхности кремниевой подложки методом фокусированных ионных пучков с использованием растровых графических шаблонов. Рассмотрены основные способы формирования растровых шаблонов в методе фокусированных ионных пучков. Установлены закономерности влияния параметров шаблона, сформированного при помощи специализированного программного продукта Unigen, и режимов травления на точность воспроизведения смоделированного профиля на подложку. Сформированы и исследованы методом атомно-силовой микроскопии экспериментальные образцы наноразмерных структур. На основании полученных результатов произведена корректировка моделей и алгоритмов, используемых для генерации шаблонов в программе Unigen. Полученные результаты могут быть использованы при формировании наноразмерных структур и разработке технологических процессов изготовления перспективной элементной базы нанoeлектроники и наносистемной техники.

Ключевые слова: нанотехнологии, фокусированные ионные пучки, атомно-силовая микроскопия, растровые шаблоны, субмикронное структурирование

SUBMICRON STRUCTURING OF SILICON SUBSTRATE USING FOCUSED ION BEAMS

¹Kolomiitsev A.S., ¹Gromov A.L., ¹Ilin O.I., ¹Lisitsyn S.A., ²Kathanov B.S.

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Southern Federal University», Rostov-on-Don, e-mail: alexey.kolomiitsev@gmail.com;

²Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, e-mail: kathanov@rambler.ru

In experimental studies of technological modes of silicon substrate surface submicron structuring by focused ion beams using a raster pattern. The key methods for forming raster pattern in the method of focused ion beams. The regularities of the influence of template parameters, formed by specialized software Unigen, and modes of milling accuracy simulated profile on the substrate. Formed and analyzed by atomic force microscopy experimental models of nanoscale structures. Based on these results readjusted models and algorithms used to generate patterns in the program Unigen. The results can be used in the formation of nanoscale structures and the development of manufacturing processes perspective element base nanoelectronics and nanosystem technology.

Keywords: nanotechnology, focused ion beams, atomic force microscopy, raster patterns, submicron structuring

Технология формирования устройств нанoeлектроники и наносистемной техники неразрывно связана с формированием на поверхности твердого тела субмикронного профиля различной конфигурации. Конструкции перспективных приборов зачастую предусматривают создание сложных наноразмерных 3D-структур и их прецизионную локализацию на подложке. Применение традиционных методов оптической литографии ограничено дифракционным пределом разрешения и необходимостью использования операций жидкостного или плазменного травления, что сужает возможности технологии и не всегда позволяет решать задачи создания современных устройств с нанометровыми размерами [5].

В настоящее время одним из наиболее перспективных и динамично развивающихся методов субмикронного структурирования поверхности твердого тела является метод фокусированных ионных пучков (ФИП) [6–8].

Несмотря на многочисленные достоинства метода ФИП [8], ионно-лучевое субмикронное профилирование сопряжено с трудностями, связанными с отсутствием средств эффективной генерации растровых графических файлов, используемых в качестве шаблонов, которые определяют размеры, форму и расположение формируемых на подложке структур, а также сложностью выбора режимов воздействия, обеспечивающих наибольшую точность формирования профиля [9].

Целью данной работы является исследование процессов безмасочного субмикронного структурирования поверхности подложки кремния методом фокусированных ионных пучков с использованием растровых графических шаблонов.

В НОЦ «Нанотехнологии» Южного федерального университета для эффективного формирования структур методом ФИП был разработан пакет прикладных программ Unigen, позволяющий генерировать растро-

вые графические шаблоны в форматах *.bmp и ASCII для безмасочного структурирования подложки фокусированным ионным пучком с учетом особенностей взаимодействия ионов с поверхностью твердого тела, размерных эффектов, закономерностей переосаждения распыленного материала, и дающий возможность мультиплицирования рисунка по заданной области подложки.

Экспериментальные исследования в данной работе производились с использованием растрового электронного микроскопа с колонной ФИП Nova NanoLab 600, сконфигурированного для решения

технологических задач (FEI Company, Нидерланды), а также модуля ФИП многофункционального сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (ЗАО «Нанотехнология-МДТ», Россия) [1–4].

В ходе экспериментальных исследований процессов безмасочного структурирования поверхности подложки генерировался набор растровых шаблонов с различными параметрами, представляющих собой массив из 9 структур пирамидальной формы с разрешением от 512×512 до 1024×1024 точек (рис. 1).

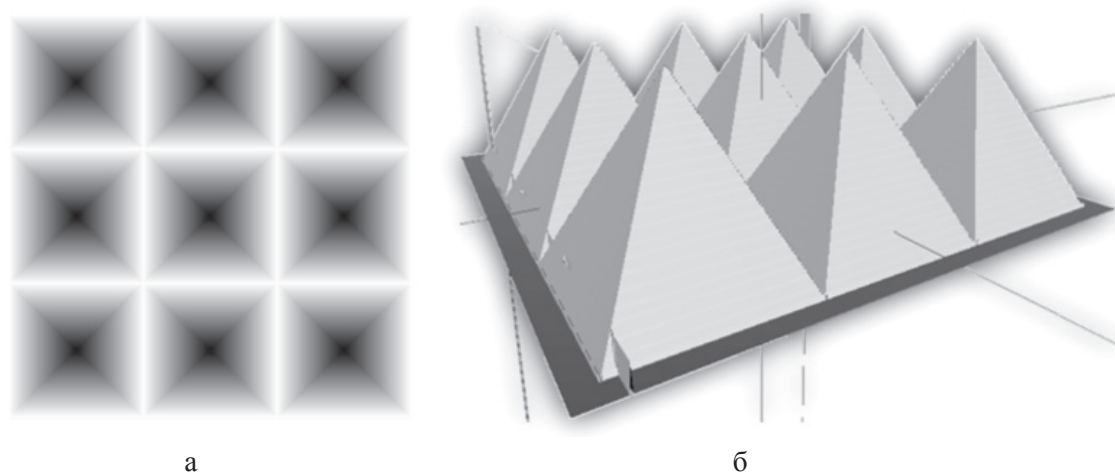


Рис. 1. Растровый графический шаблон для ионно-лучевого травления ФИП (а) – 2D, (б) – 3D

Для исследования влияния соотношения параметров ФИП и характеристик шаблона на точность воспроизведения топологии при травлении варьировались разрешение шаблона, количество проходов пучка по шаблону, размер шаблона, шаг перемещения пучка, время воздействия ионного пучка в точке

и ток ионного пучка. Травление кремниевой подложки КДБ-10 с использованием сгенерированных шаблонов производилось на модуле ФИП комплекса НАНОФАБ НТК-9.

Параметры ионно-лучевого травления для каждого из выбранных режимов приведены в таблице.

Параметры ионно-лучевого травления структур сложного профиля

Режим	Разрешение шаблона	Кол-во проходов	Время травления, с	Размер фигуры, мкм	Шаг, нм	Время воздействия в точке, мкс	Ток ионного пучка, пА	Макс. разность между профилями, нм
1	512×512	100	1001	10×10	20	10	5	22
2	512×512	100	561	5×5	10	30	5	5
3	512×512	200	1123	5×5	5	20	10	7
4	512×512	100	561	5×5	4	30	5	18
5	1024×1024	500	1554	2×2	30	1	30	40
6	512×512	200	561	2×2	10	20	10	9,5

После ионно-лучевого травления образец по сверхвысоковакуумной магистрали передавался в модуль сканирующей зондовой микроскопии, где производились исследования сформированных структур методом полуконтактной атомно-сило-

вой микроскопии (АСМ) (рис. 2). После этого профилограммы сформированных структур, полученные на основе АСМ-изображений, сравнивались с профилями модельной структуры, полученными в ПО для генерации шаблонов для безмасочного

структурирования поверхности подложек методом ФИП. Основным критерием, по которому производилось сравнение и выбор режимов, было выбрано максимальное значение разности между профилями

экспериментальной и модельной структур, которая измерялась в каждой точке профиля с шагом 10 нм. Значения наилучшей максимальной разности внесены в таблицу.

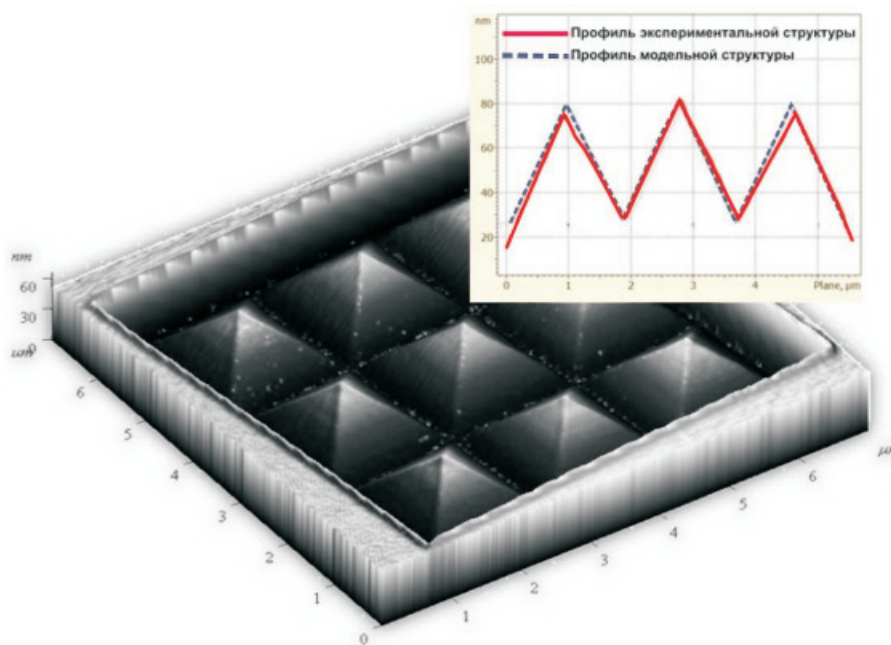


Рис. 2. АСМ-изображение топологии сформированной ионно-лучевым травлением ФИП по растровому шаблону и профилограмма экспериментальной структуры в сравнении с модельным профилем

В результате проведенной работы исследованы режимы субмикронного структурирования кремниевой подложки методом фокусированных ионных пучков с использованием растровых графических шаблонов, сгенерированных при помощи пакета прикладных программ Unigen. Выявлены режимы, обеспечивающие наилучшее соответствие между профилями модельной и экспериментальной структур. Полученные результаты будут использованы при корректировке моделей и алгоритмов, применяемых для генерации шаблонов, что позволит повысить точность воспроизведения смоделированного профиля на подложке. Результаты, полученные в настоящей работе, также могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования перспективной элементной базы наноэлектроники и наносистемной техники.

Работа выполнена при поддержке государственных соглашений № 12-08-90045/12, № 14.A18.21.0126, № 14.A18.21.0923, № 14.

A18.21.0933, № 14.A18.21.0900, № 14.A18.21.0887, № 14.A18.21.1206 в рамках проектов РФФИ и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Исследование режимов субмикронного профилирования поверхности подложек кремния методом фокусированных ионных пучков / О.А. Агеев, А.С. Коломийцев, А.Л. Громов и др. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – Т. 117. – № 4. – С. 171–180.
2. Агеев О.А., Коломийцев А.С. Исследование параметров взаимодействия фокусированных ионных пучков с подложкой // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2011. – № 89. – С. 20–25.
3. Агеев О.А., Коломийцев А.С., Михайличенко А.В. и др. Получение наноразмерных структур на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – Т. 114. – № 1. – С. 109–116.
4. Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Коломийцев А.С. Формирование наноразмерных структур на кремниевой подложке методом фокусированных ионных пучков // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2011. – № 87. – С. 29–34.

5. Коноплев Б.Г., Ageev O.A. Эллионные и зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – Т.89. – № 12. – С. 165–175.

6. Лучинин В.В. Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы – М: Физматлит, 2006. – 552 с.

7. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.

8. Giannuzzi L.A., Stevie F.A. Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice. – New York: Springer, 2004 – 357 p.

9. Wilhelmi O. Nanofabrication and rapid prototyping with Dual Beam instruments // FEI Company application note. – 2007. – URL: <http://www.fei.com> (дата обращения: 26.08.2012).

References

1. Ageev O.A., Kolomijcev A.S., Gromov A.L. i dr. Issledovanie rezhimov submikronnogo profilirovaniya poverhnosti podlozhek kremnija metodom fokusirovannyh ionnyh puchkov // Izvestija Juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2011. T. 117. no. 4. pp. 171–180.

2. Ageev O.A., Kolomijcev A.S. Issledovanie parametrov vzaimodejstviya fokusirovannyh ionnyh puchkov s podlozhkoj // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektronika. 2011. no. 89. pp. 20–25.

3. Ageev O.A., Kolomijcev A.S., Mihajlichenko A.V. i dr. Poluchenie nanorazmnyh struktur na osnove nanotehnologich-

eskogo kompleksa NANOFAB NTK-9 // Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2011. T. 114. no. 1. pp. 109–116.

4. Konoplev B.G., Ageev O.A., Kolomijcev A.S. Formirovanie nanorazmnyh struktur na kremnevoj podlozhke metodom fokusirovannyh ionnyh puchkov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektronika. 2011. no. 87. pp. 29–34.

5. Konoplev B.G., Ageev O.A. Jellionnye i zondovye nanotehnologii dlja mikro- i nanosistemnoj tehniki // Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2008. T.89. no. 12. pp. 165–175.

6. Luchinin V.V. Nanotehnologii: fizika, processy, diagnostika, pribory M: Fizmatlit, 2006. 552 p.

7. Chaplygin Ju.A. Nanotehnologii v jelektronike M.: Tehnosfera, 2005. 448 p.

8. Giannuzzi L.A., Stevie F.A. Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice. New York: Springer, 2004 357 p.

9. Wilhelmi O. Nanofabrication and rapid prototyping with Dual Beam instruments // FEI Company application note. 2007. URL: <http://www.fei.com> (data obravnenija: 26.08.2012).

Рецензенты:

Рындин Е.А., д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник ЮНЦ РАН;

Жорник А.И. д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической, общей физики и технологии ФГБОУ ВПО ТГПИ.

Работа поступила в редакцию 26.10.2012.