

## Формирование наноразмерных структур на кремниевой подложке методом фокусированных ионных пучков

*О.А.Агеев, А.С.Коломийцев, Б.Г.Коноплев*

Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге

Представлены результаты экспериментальных исследований режимов формирования наноразмерных структур на кремниевой подложке методом фокусированных ионных пучков. Получены зависимости диаметра и глубины наноразмерных структур от тока ионного пучка и времени воздействия ионного пучка в точке. Установлено, что основным фактором, определяющим скорость ионно-лучевого травления, является ток ионного пучка. Проведенные исследования могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления элементной базы нанoeлектроники и наносистемной техники.

*Ключевые слова:* фокусированный ионный пучок, ионно-лучевое травление, наноразмерная структура, наносистемная техника, нанолитография.

Задача наноразмерного профилирования полупроводниковых подложек для формирования структур элементной базы нанoeлектроники и наносистемной техники является актуальной и востребованной [1–3]. Данная задача связана с совершенствованием нанолитографических методов и может быть решена различными способами. Наиболее перспективный из них – метод локального травления фокусированным ионным пучком (ФИП) [1–4].

Основные преимущества метода ФИП по сравнению с другими методами нанолитографии: высокая скорость формирования топологического рисунка без использования резистов и масок; возможность обработки широкой номенклатуры материалов; локальность и избирательность процесса травления, которые достигаются варьированием технологических параметров в широких пределах [1, 4]. Однако, несмотря на перечисленные достоинства, формирование наноразмерных структур методом ФИП сопряжено с некоторыми проблемами, а именно сложностью достижения предельной разрешающей способности и высокой воспроизводимости параметров формируемых структур, а также слабой изученностью эффектов, влияющих на точность формирования топологического рисунка [1, 2].

Цель настоящей работы – проведение экспериментальных исследований для выявления закономерностей и технологических режимов наноразмерного профилирования поверхности кремниевой подложки методом фокусированных ионных пучков.

**Методика эксперимента.** Экспериментальные исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа с колонной ФИП Nova NanoLab 600 специальной конфигурации (FEI Company, Нидерланды). Данный прибор позволяет проводить модификацию поверхности твердых тел с высоким пространственным разрешением методом фокусированных ионных пучков. При этом координаты точек воздействия ионного пучка определяются шаблоном, который может формироваться различными способами: с помощью стандартных средств программы управления микроскопом, в виде графических растровых

файлов формата \*.bmp, а также в виде потоковых ASCII-файлов [5].

Экспериментальные исследования проводились по следующей методике: на кремниевой подложке методом ФИП формировался массив из 25 наноразмерных структур в виде углублений при различных параметрах ионно-лучевого воздействия (рис.1). Такие структуры могут иметь широкое практическое применение в микро- и наносистемной технике в качестве масок для проведения различных технологических процессов, мембран в системах на кристалле, а также фотонных кристаллов в интегральной оптике. Шаблон для травления представлял собой потоковый ASCII-файл, содержащий координаты точек травления, время воздействия в каждой точке и число проходов ионного луча по структуре. При этом сканирование ионного пучка по шаблону осуществляется последовательно, от точки к точке, по указанным координатам. Порядок перемещения пучка определялся очередностью расположения координат в потоковом файле. Основными параметрами, влияющими на результат травления, являются ток ионного пучка, ускоряющее напряжение, время воздействия пучка в каждой точке, а также общее количество проходов при травлении.

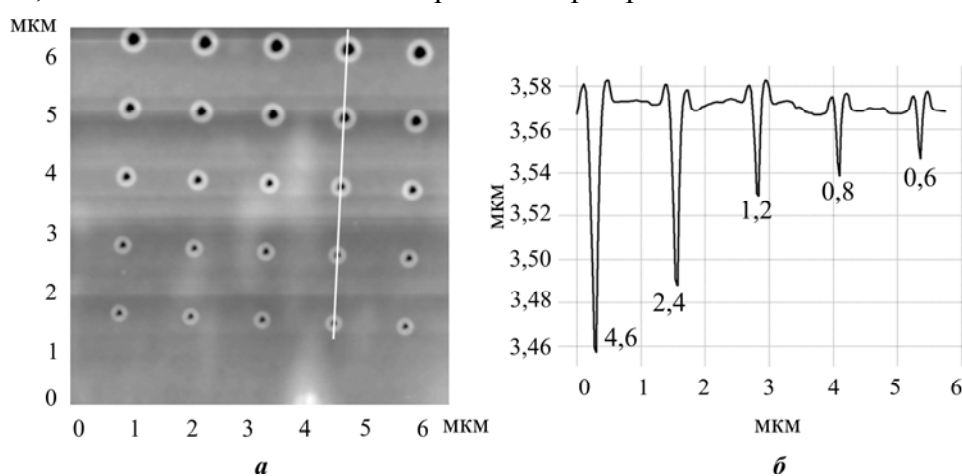


Рис.1. АСМ-изображение (а) и профилограмма вдоль линии (б) массива 25 наноразмерных структур, сформированных локальным травлением ФИП при различных значениях времени воздействия ионного пучка в точке (мс)

В ходе экспериментальных исследований для выявления влияния технологических режимов травления ФИП на характеристики наноразмерных объектов и кинетику ионно-лучевого травления формировались 3 ряда тестовых структур. В первом ряду при фиксированных значениях времени воздействия в точке (9,6 мс), ускоряющего напряжения (30 кэВ) и двух значениях числа проходов (10 и 100) варьировался ток ионного пучка в диапазоне от 1 пА до 7 нА. Во втором ряду массив формировался при сходных параметрах и диапазоне токов от 30 пА до 1 нА, при этом шаблон формировался стандартными средствами программы управления микроскопом FEI xTUI 3.6.1 за счет задания фиксированного расстояния между точками воздействия пучка, равного 500 нм. В третьем ряду изменялось время воздействия ионного пучка в каждой точке от 600 мкс до 9,6 мс при 50 проходах ионного пучка (см. рис.1).

Контроль процесса ионно-лучевого травления осуществлялся методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для анализа морфологии и геометрических характеристик структур проводились исследования на сканирующей зондовой нанолaborатории Ntegra Vita (ЗАО «Нанотехнология МДТ», Россия) в режиме полуконтактной атомно-силовой микроскопии (АСМ). Статистическая обработка полученных АСМ-изображений проводилась с использованием программного пакета Image Analysis 2.0 (ЗАО «Нанотехнология МДТ», Россия).

**Результаты и их обсуждение.** На основании полученных статистических данных построены зависимости (рис.2, 3) средних значений диаметра и глубины наноразмерных струк-

тур (с учетом эффекта переосаждения) от тока ионного пучка при различных значениях числа проходов пучка по шаблону и различных типах шаблонов.

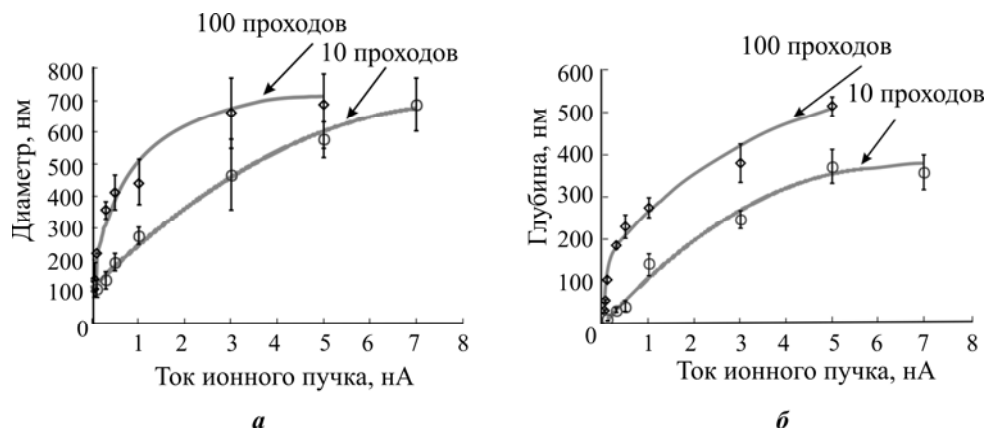


Рис.2. Зависимости диаметра (а) и глубины (б) наноразмерных структур от тока ионного пучка при 10 и 100 проходах ионного пучка по шаблону, заданному в виде потокового файла

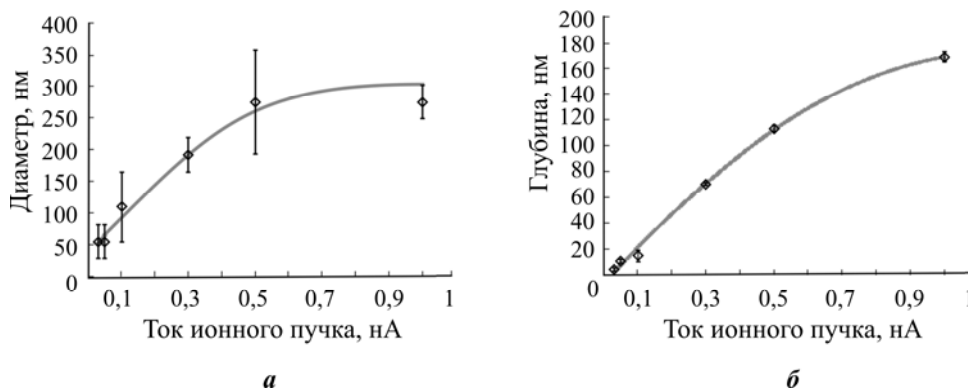


Рис.3. Зависимости диаметра (а) и глубины (б) наноразмерных структур от тока ионного пучка при 4 проходах ионного пучка по шаблону, заданному стандартными средствами программы управления микроскопом

Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении значения тока ионного пучка увеличиваются геометрические размеры наноразмерных структур. Данный эффект может быть объяснен возрастанием плотности потока энергии ионного пучка и увеличением размеров ионного зонда. Установлено, что увеличение числа проходов пучка по шаблону в 10 раз приводит к увеличению глубины и латеральных размеров наноструктур примерно в 1,5 – 2 раза. Выявлено, что для 100 проходов при токе ионного пучка свыше 5 нА сформированные структуры начинают перекрываться, что делает невозможным дальнейшее измерение их геометрических характеристик. Кроме этого, при токе ионного пучка от 1 пА до 1 нА наблюдается максимальная скорость увеличения латеральных размеров наноструктур, тогда как в диапазоне токов свыше 1 нА эта скорость уменьшается и происходит насыщение. При этом в том же диапазоне токов глубина структур монотонно возрастает.

При формировании массива наноструктур по шаблону, заданному стандартными средствами программы управления микроскопом FEI xTUI 3.6.1, диапазон исследуемых токов был ограничен 1нА из-за большого количества точек при аналогичных параметрах эксперимента. Анализ зависимости, полученной для данного шаблона, показал, что при токе выше 0,5 нА значения диаметра наноструктур превышают 250 нм и начинается их взаимное перекрытие, однако при этом глубина травления продолжает возрастать монотонно. Кроме этого, необхо-

димо отметить, что при увеличении тока ионного пучка в 10 раз (с 0,1 до 1 нА) средний диаметр наноструктур возрастает примерно в 2,5 раза, тогда как средняя глубина – примерно в 8 раз.

Зависимости среднего диаметра и глубины наноразмерных структур от времени воздействия ионного пучка в каждой точке шаблона представлены на рис.4. Из полученных зависимостей следует, что увеличение времени воздействия в точке приводит к увеличению геометрических параметров наноразмерных структур. При этом необходимо отметить, что при увеличении времени воздействия ионного пучка в точке скорость травления по глубине возрастает в несколько раз быстрее, чем скорость латерального травления. Это объясняется тем, что при постоянном значении тока и ускоряющего напряжения ионного пучка геометрические размеры и энергетические характеристики пучка остаются неизменными. Незначительное, по сравнению с ростом глубины, увеличение диаметра наноразмерных структур обусловлено распределением интенсивности ионного пучка по радиусу в соответствии с законом Гаусса и неидеальностью фокусировки. Подобные эффекты также описаны в работе [6]. Глубина травления возрастает за счет увеличения физического времени воздействия ионного пучка на обрабатываемую структуру в данной точке.

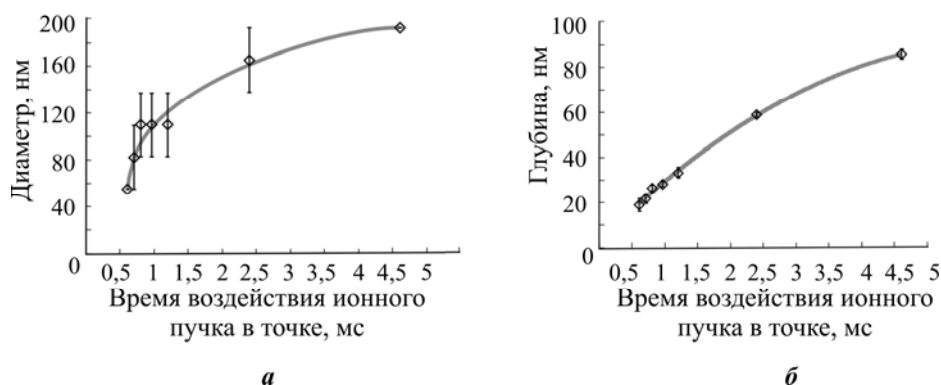


Рис.4. Зависимости диаметра (а) и глубины (б) наноразмерных структур от времени воздействия ионного пучка в точке при 100 проходах ионного пучка по шаблону, заданному в виде потокового файла

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно сделать вывод о том, что для получения структур размером сотни нанометров целесообразно применять большие токи ионного пучка (свыше 0,5 нА) и большие времена воздействия пучка в точке (1–5 мс) при малом числе проходов ионного пучка по шаблону (<100). Если необходимо формировать структуры с пространственным разрешением на уровне десятков нанометров, то следует применять токи ионного пучка менее 0,1 нА, а эффективно управлять глубиной травления целесообразно путем увеличения времени воздействия ионного пучка в точке в пределах 0,5 – 4,5 мс.

Зависимости диаметра и глубины наноструктур от тока ионного пучка и времени могут характеризовать изменение скорости травления материала в продольном и поперечном направлениях относительно ионного луча. Для кремния скорость травления вдоль направления ионного пучка изменяется в пределах от 92 до 42 нм/мс, при этом скорость латерального травления изменяется от 32 до 19 нм/мс на всем исследуемом диапазоне.

На основании результатов проведенных экспериментальных исследований и рекомендаций по выбору диапазонов технологических режимов на кремниевой подложке методом ФИП сформирован тестовый элемент наносистемной техники (рис.5), который представляет собой 2 параллельные мембраны, сформированные локальным ионно-лучевым травлением. Толщина каждой мембраны составляет около 100 нм. Массивы наноразмерных отверстий диаметром около 250 нм сформированы в первой мембране и около 100 нм – во второй. От-

клонение диаметров от заданного значения составляет не более 15 нм, что подтверждает высокую воспроизводимость результатов травления ФИП.

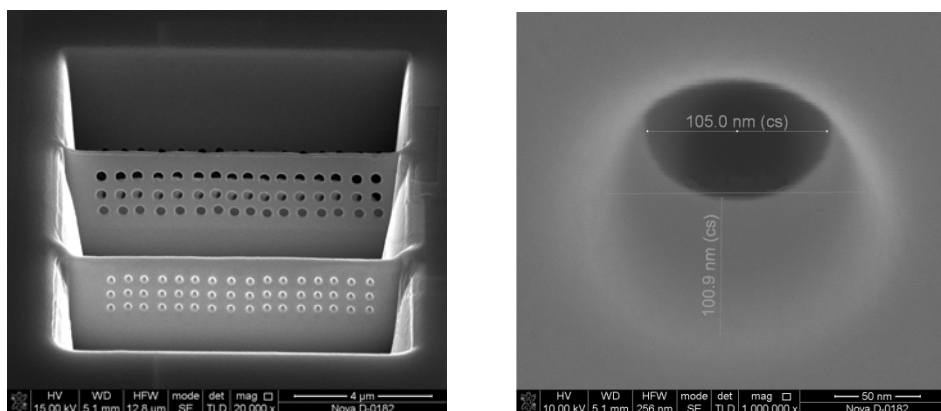


Рис.5. РЭМ-изображение тестового элемента наносистемной техники

Полученный элемент может применяться как мембранный фильтр наноразмерных частиц в системах микро- и нанофлюидики, в структурах интегральной оптики. Если мембрану отделить от образца, она может использоваться в качестве маски при проведении различных технологических процессов.

В результате проведенной работы исследованы режимы формирования наноразмерных структур методом фокусированных ионных пучков и получены зависимости геометрических размеров наноразмерных углублений в кремнии от тока ионного пучка и времени воздействия в точке.

Установлено, что для формирования углублений с размерами порядка десятков нанометров целесообразно применять значения тока ионного пучка в диапазоне 1 пА – 0,1 нА при значениях времени воздействия пучка в точке менее 1 мс и при количестве проходов ионного пучка по шаблону 100 и более. Показано, что фактором, влияющим на скорость травления при постоянном ускоряющем напряжении, является ток ионного пучка.

Сформирована тестовая структура элемента наносистемной техники на основе кремниевых мембран с нанометровыми отверстиями.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования элементной базы нанoeлектроники и наносистемной техники.

### Литература

1. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика / Под ред. В.В.Луцинина, Ю.М.Таурова. – М.: Физматлит, 2006. – 552 с.
2. Луцинин В.В., Савенко А.Ю. Фокусированный ионный пучок как технология локального прецизионного травления // Вакуумная техника и технология. – 2008. – Т. 18. – № 3. – С. 191–195.
3. Бараин С.В., Лосев В.В., Царик К.А. Формирование нанометровых слоев фокусированным ионным пучком // Изв. вузов. Электроника. – 2008. – № 3. – С. 63–67.
4. Giannuzzi L.A., Stevie F.A. Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice. – N.Y.: Springer, 2004. – 357 p.
5. Wilhelmi O. Nanofabrication and rapid prototyping with Dual Beam instruments // FEI Company application note. – 2007. – URL: <http://www.fei.com>
6. Yongqi Fu, Ngoi Kok. Investigation of aspect ratio of hole drilling from micro to nanoscale via focused ion beam fine milling // Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST). – 2005. – 01. – P. 1–5.

Статья поступила  
1 июля 2010 г.

**Коноплев Борис Георгиевич** – доктор технических наук, профессор, декан факультета электроники и приборостроения ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* микроэлектроника и методы автоматизированного проектирования. **E-mail: kbg@tsure.ru**

**Агеев Олег Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* стимулированные фотонным, ионно- и электронно-лучевым воздействием физико-химические процессы технологии микро- и нанoeлектроники; разработка и исследование технологических процессов изготовления элементной базы приборов нанoeлектроники; разработка и исследование технологических процессов формирования контактов к активным элементам приборов экстремальной электроники.

**Коломийцев Алексей Сергеевич** – аспирант кафедры технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры ТТИ ЮФУ. *Область научных интересов:* разработка и исследование технологических процессов микро- и нанoeлектроники на основе использования фокусированных ионных пучков, аналитическая растровая электронная микроскопия наноразмерных структур.