

Агеев Олег Алексеевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; заведующий кафедрой; д.т.н; профессор.

Смирнов Владимир Александрович

E-mail: sva@fep.tti.sfedu.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; к.т.н.; доцент.

Коломийцев Алексей Сергеевич

E-mail: alexey.kolomiytsev@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Громов Александр Леонидович

E-mail: groall@tti.sfedu.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; магистрант.

Ageev Oleg Alexeevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Head the Department; Dr. of Eng. Sc., Professor.

Smirnov Vladimir Alexandrovich

E-mail: sva@fep.tti.sfedu.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Associate Professor.

Kolomiytsev Alexey Sergeevich

E-mail: alexey.kolomiytsev@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Gromov Alexandr Leonidovich

E-mail: groall@tti.sfedu.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Undergraduate.

УДК 621.382

О.А. Агеев, А.С. Коломийцев, А.Л. Громов, О.И. Ильин

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СУБМИКРОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК КРЕМНИЯ МЕТОДОМ
ФОКУСИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ**

Проведены экспериментальные исследования технологических режимов субмикронного профилирования поверхности кремниевой подложки с нанометровым разрешением методом фокусированных ионных пучков. Установлены зависимости геометрических параметров сформированных наноразмерных структур от ускоряющего напряжения и тока ионного пучка, а также от времени воздействия ионного пучка в точке при различном количестве проходов пучка по шаблону. Исследованы зависимости скоростей травления полупроводниковых материалов от тока ионного пучка. Определены диапазоны технологи-

ских режимов субмикронного профилирования. Сформирован прототип тестового элемента нанофлюидики. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления перспективной элементной базы нанoeлектроники и наносистемной техники.

Нанотехнологии; фокусированные ионные пучки; атомно-силовая микроскопия; нанофлюидика.

O.A. Ageev, A.S. Kolomyitsev, A.L. Gromov, O.I. Ilin

INVESTIGATION OF THE SILICON SUBSTRATE SURFACE PROFILING USING FOCUSED ION BEAMS IN SUBMICRON AREA

In experimental studies of technological modes of submicron surface profiling of a silicon substrate with nanometer resolution using focused ion beams. The dependencies of the geometrical parameters of nanostructures by the accelerating voltage and ion beam current and exposure time of the ion beam at a point with different numbers of passes of the beam pattern. The dependence of the etching velocity of semiconductor materials by ion beam current is defined. The ranges of technological modes of submicron profiling are determined. The prototype of the test element of nanofluidics is formed. The results can be used in the development process of manufacturing a perspective element base of nanoelectronic technology.

Nanotechnology; focused ion beams; atomic forces microscopy; nanofluidics.

Задача формирования перспективной элементной базы радиоэлектронной аппаратуры неразрывно связана с совершенствованием технологических процессов размерной обработки твердотельных структур. В настоящее время уровень интеграции современных СБИС достиг уровня, при котором размеры отдельных элементов ИМС составляют несколько десятков нм [1, 2]. В технологии производства микро- и нанoeлектронной аппаратуры одним из наиболее перспективных методов субмикронного профилирования поверхности твердого тела является метод фокусированных ионных пучков (ФИП) [3].

Метод ФИП обладает рядом достоинств по сравнению с другими методами субмикронного профилирования поверхности структур, таких как: высокая разрешающая способность метода, высокая скорость формирования топологического рисунка без необходимости использования специализированных резистов и масок, возможность обработки широкой номенклатуры материалов и твердотельных структур, которая достигается применением галлиевого ионного пучка средних энергий, локальность и избирательность процесса травления, которые достигаются варьированием технологических параметров в широких пределах [4]. Однако, несмотря на перечисленные достоинства, субмикронное профилирование методом ФИП сопряжено с рядом проблем и сложностей, среди которых особо следует отметить – сложность достижения предельной разрешающей способности при высокой воспроизводимости параметров формируемых структур, а также слабая изученность эффектов, влияющих на точность формирования топологического рисунка [5].

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований технологических режимов субмикронного профилирования поверхности кремниевой подложки с нанометровым разрешением методом фокусированных ионных пучков.

Экспериментальные исследования в данной работе производились с использованием растрового электронного микроскопа с колонной ФИП Nova NanoLab 600 в специальной конфигурации (FEI Company, Нидерланды), а также модуля ФИП многофункционального сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (ЗАО «Нанотехнология-МДТ», Россия) (рис. 1) [6].

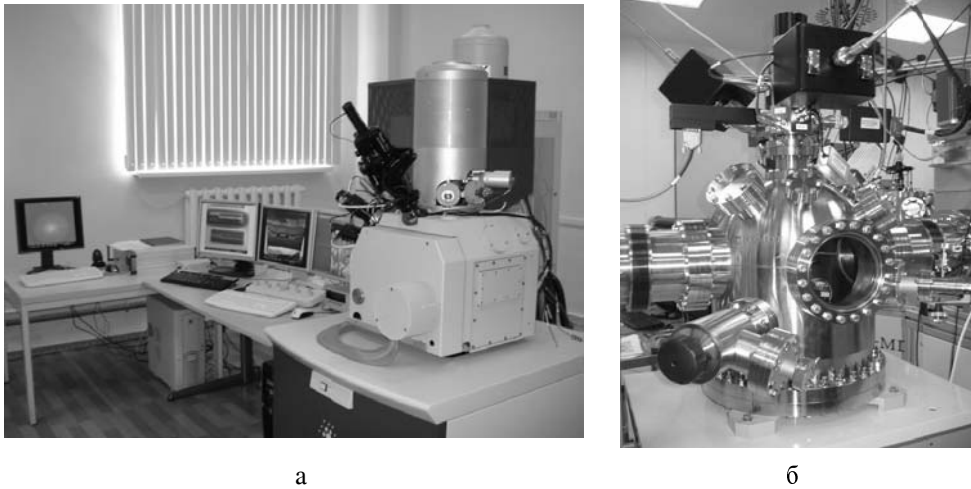


Рис. 1. РЭМ Nova NanoLab 600 (а) и модуль ФИП нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (б)

В данных приборах координаты точек воздействия ФИП на обрабатываемую структуру определяются шаблоном, который задается при помощи управляющей ЭВМ. Шаблоны травления могут формироваться различными способами: с помощью стандартных средств программы управления системой ФИП, в виде графических растровых файлов формата *.bmp, а также в виде потоковых ASCII-файлов [5].

Методика проведения экспериментальных исследований заключалась в следующем: на кремниевой подложке формировался массив 25 наноразмерных структур в виде углублений при различных значениях параметров ионно-лучевого воздействия (рис. 2,а). 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.

В работе в ходе экспериментальных исследований для выявления влияния технологических режимов травления ФИП на характеристики формируемых наноразмерных объектов и кинетику ионно-лучевого травления, по шаблону формировались 3 ряда тестовых структур.

В первом ряду варьировалось время воздействия ионного пучка в каждой точке в диапазоне от 600 мкс до 9,6 мс при 50 проходах ионного пучка (рис. 2,б). Во втором ряду при фиксированных значениях времени воздействия в точке, равном 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. В третьем ряду массив формировался при сходных параметрах и диапазоне токов от 30 пА до 1 нА, при этом шаблон формировался стандартными средствами программы управления РЭМ Nova NanoLab 600 FEI xTUI 3.6.1 за счет задания фиксированного расстояния между точками воздействия пучка, равного 500 нм.

По аналогичной методике производились экспериментальные исследования влияния ускоряющего напряжения на параметры формируемых наноструктур. Ускоряющее напряжение ФИП варьировалось в диапазоне 5–30 кэВ при фиксированном токе ионного пучка – 0,1 нА и времени воздействия пучка в точке – 1 мс.

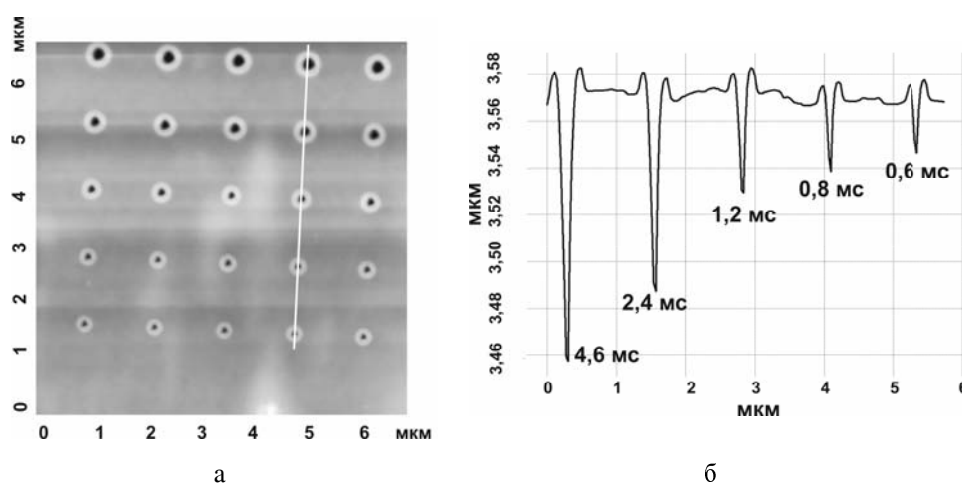


Рис. 2. АСМ-изображение (а) и профилограмма вдоль линии (б) массива 25 наноразмерных структур, сформированных локальным травлением ФИП при различных значениях времени воздействия ионного пучка в точке

Контроль проведения технологического процесса осуществлялся *in situ* методом РЭМ на Nova NanoLab 600. После формирования структур при различных технологических параметрах проводились исследования подложки в модуле сверхвысоковакуумной сканирующей зондовой микроскопии нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 в режиме полуконтактной атомно-силовой микроскопии (АСМ).

На втором этапе работы производились экспериментальные исследования скорости травления полупроводниковых материалов методом ФИП. В качестве подложек для проведения исследований были использованы образцы кремния, карбида кремния и арсенида галлия размером 10x10 мм. С помощью графического редактора был сформирован растровый шаблон формата *.bmp, который представлял собой массив из 9 прямоугольных элементов размером 2x2 мкм². Шаблон загружался программой управления микроскопа и использовался для формирования тестовых элементов при исследовании ионно-лучевого травления. Травление каждого элемента производилось при ускоряющем напряжении ионного пучка 30 кэВ, времени воздействия ионного пучка в каждой точке шаблона 1 мкс, время травления каждого элемента – 60 с, ток ионного зонда варьировался от 10 пА до 1 нА. Контроль геометрических параметров формируемых структур осуществлялся методом РЭМ при помощи встроенных программных средств обработки изображений, а также методом полуконтактной атомно-силовой микроскопии на зондовой нанолaborатории Ntegra Vita (ЗАО «Нанотехнология-МДТ», Россия). На рис. 3 представлено РЭМ-изображение тестовой топологии, сформированной на подложке карбида кремния.

Скорость травления материалов определялась по количеству распыленного материала в единицу времени для каждого значения тока ионного пучка.

После формирования структур и их исследования методом АСМ проводилась статистическая обработка массива полученных экспериментальных результатов. Статистическая обработка АСМ-изображений производилась с использованием программного пакета Image Analysis 2.0, который поставляется ЗАО «Нанотехнология-МДТ» в комплекте с аналитическим оборудованием.

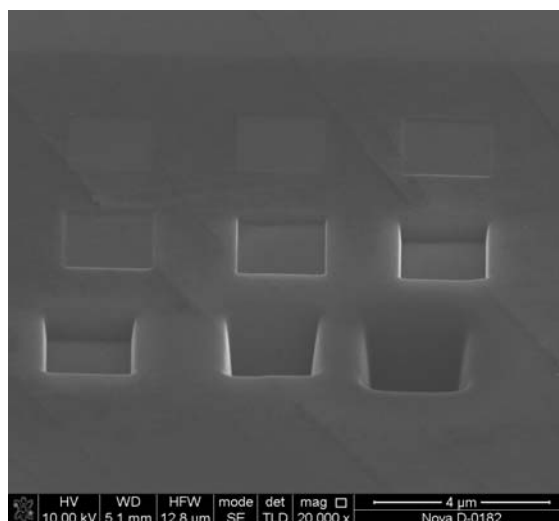


Рис. 3. РЭМ-изображение тестовой топологии, сформированной на подложке карбида кремния

На основании полученных статистических данных были построены зависимости (рис. 4–7) средних значений диаметра и глубины наноразмерных структур, сформированных ионно-лучевым травлением, от тока ионного пучка при различных значениях числа проходов пучка по шаблону и различных типах шаблонов, а также от времени воздействия ионного пучка в точке и ускоряющего напряжения.

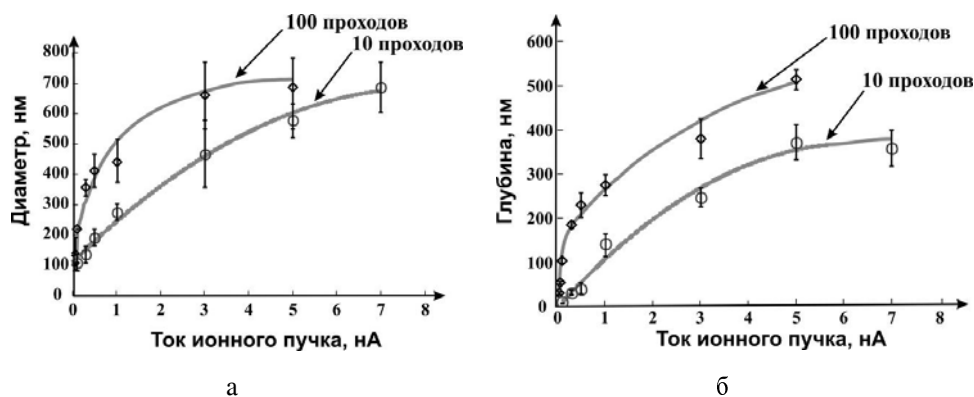


Рис. 4. Зависимости диаметра (а) и глубины (б) наноразмерных структур от тока ионного пучка при 10 и 100 проходах ионного пучка по шаблону, заданному в виде потокового файла

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. Анализ зависимости на рис. 5 показал, что при таком способе формирования шаблонов травления при токе выше 0,5 нА значения диаметра наноструктур превышают 250 нм и начинается их взаим-

ное перекрытие, однако при этом глубина травления продолжает возрастать монотонно. Кроме этого, необходимо 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, когда как средняя глубина – примерно в 8 раз.

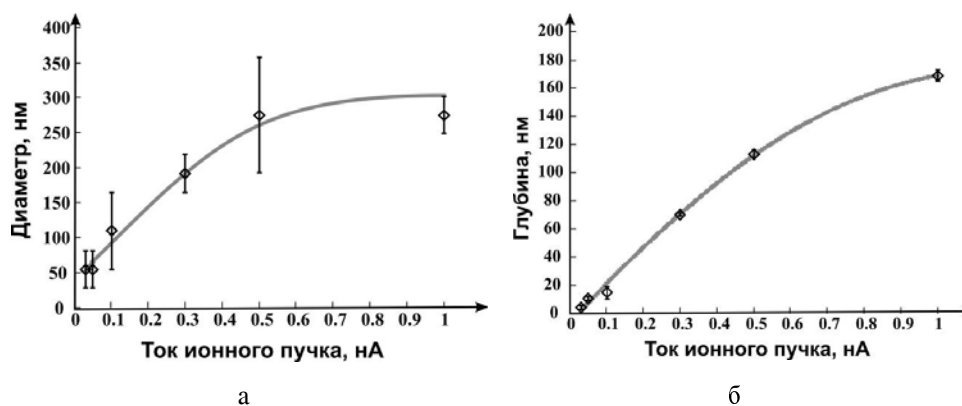


Рис. 5. Зависимости диаметра (а) и глубины (б) наноразмерных структур от тока ионного пучка при 4 проходах ионного пучка по шаблону, заданному стандартными средствами программы управления системой

Из зависимостей, представленных на рис. 6, 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 ФИП остаются неизменными.

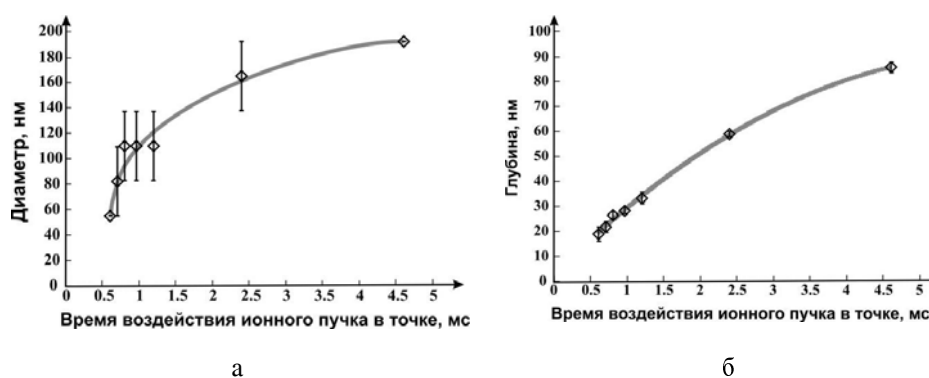


Рис. 6. Зависимости диаметра (а) и глубины (б) наноразмерных структур от времени воздействия ионного пучка в точке при 100 проходах ионного пучка по шаблону, заданному в виде потокового файла

Из анализа зависимостей диаметра и глубины наноразмерных структур от ускоряющего напряжения (рис. 7) следует, что с увеличением ускоряющего напряжения интенсивность травления падает, а разрешающая способность увеличивается-

ся. Таким образом, наилучших характеристик фокусировки ионного пучка удается достичь при максимальных значениях ускоряющего напряжения пучка. Для формирования структур диаметром $\sim (10\text{--}20)$ нм целесообразно применять малые значения тока фокусированного ионного пучка (1–50 пА) при максимальном значении ускоряющего напряжения (30 кэВ). Эффективно управлять глубиной травления можно, изменяя время воздействия ионного пучка в точке в широких пределах (600 мкс – 5 мс).

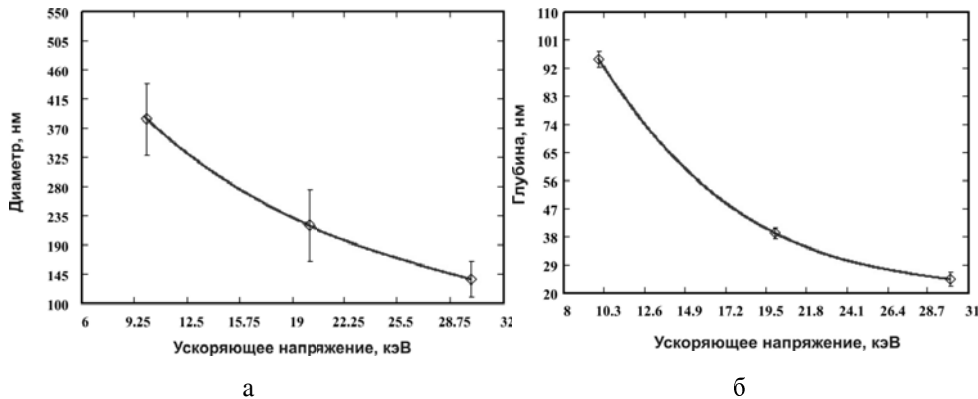


Рис. 7. Зависимости диаметра (а) и глубины (б) наноразмерных структур от ускоряющего напряжения ионного пучка

Зависимость скорости ионно-лучевого травления от тока ионного пучка (рис. 8) позволяет оценить интенсивность удаления материала при определенных параметрах ионно-лучевого воздействия. С увеличением тока ионного пучка возрастает скорость травления полупроводниковых материалов. Это объясняется тем, что при увеличении тока возрастает диаметр ионного луча и увеличивается плотность потока энергии в пучке. Соответственно за аналогичный промежуток времени (равный времени воздействия пучка в точке) большее количество ионов попадает на поверхность подложки, а значит, большее количество атомов поверхности выбивается при ионной бомбардировке, что приводит к ускорению процесса травления [4].

Анализ скоростей травления различных полупроводниковых материалов показал, что наименьшая скорость травления наблюдается у карбида кремния, а наибольшая – у арсенида галлия. При травлении арсенида галлия фокусированным ионным пучком был обнаружен эффект появления наноразмерных капель на поверхности полупроводника после ионной обработки. На кремнии и карбиде кремния подобных эффектов не наблюдалось. Это может быть объяснено тем, что при воздействии ионов галлия на GaAs в полупроводнике происходит разрушение связей Ga и As. Разрушение связей, а также накопление в структуре имплантированного галлия приводит к образованию его избыточной концентрации и возникновению капель на поверхности подложки.

На основании результатов проведенных исследований и оптимизации диапазонов технологических режимов на кремниевой подложке методом ФИП сформирован тестовый элемент нанофлюидики (рис. 9), который представляет собой систему каналов и резервуаров для экспресс-диагностики микроколичеств жидкости, содержащую мембрану с наноразмерными отверстиями для фильтрации наноразмерных частиц. Диаметр отверстий в мембране составляет ~ 100 нм.

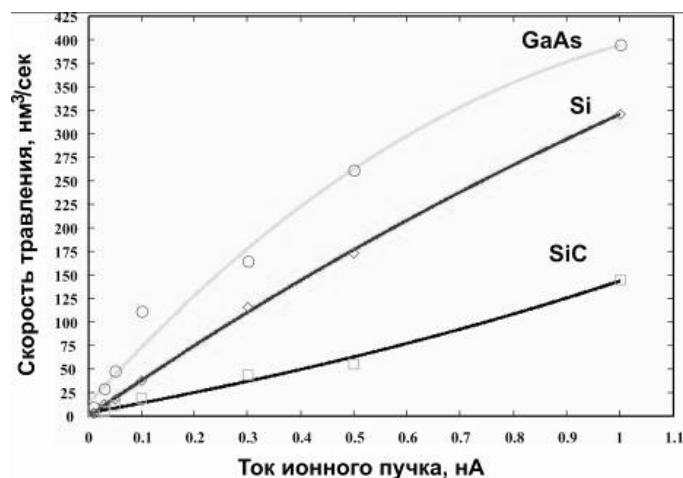
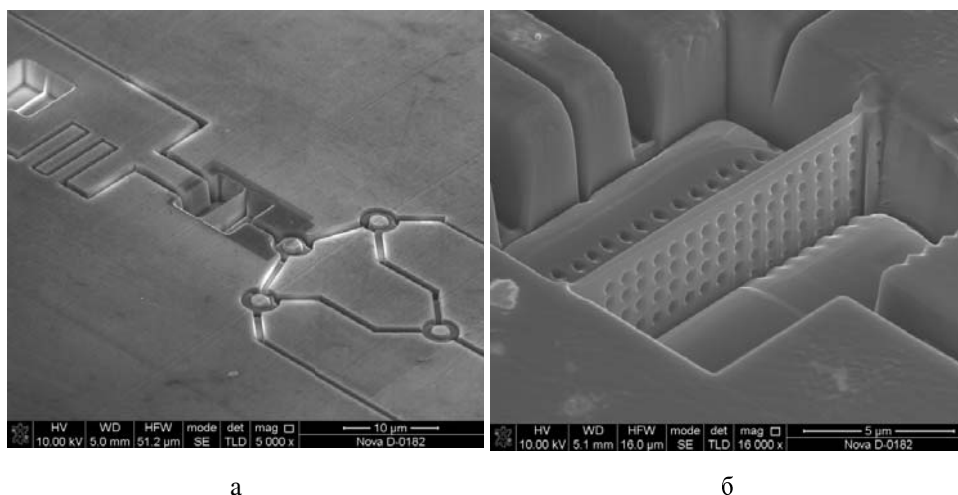


Рис. 8. Зависимости скорости травления полупроводниковых материалов от тока фокусированного ионного пучка



а

б

Рис. 9. РЭМ-изображения тестового элемента наноплюидики сформированного методом ФИП

Сформированная тестовая структура может использоваться в качестве мембранного фильтра в лабораториях на кристалле, а так же как элемент микрожидкостных ячеек в наноплюидике.

В результате проведенных исследований определены режимы субмикронного профилирования полупроводниковых структур методом фокусированных ионных пучков, получены зависимости геометрических характеристик наноразмерных структур, сформированных на кремниевой подложке от тока ионного пучка, ускоряющего напряжения и времени воздействия в точке. Установлено, что для формирования структур с размерами порядка десятков нанометров целесообразно применять значения тока ионного пучка в диапазоне 1–50 нА, ускоряющего напряжения 30 кэВ при значениях времени воздействия пучка в точке менее 1 мс. Определены зависимости скоростей травления полупроводниковых материалов от тока ионного пучка. Полученные результаты показывают, что определяющим фак-

тором, влияющим на скорость травления при постоянном ускоряющем напряжении, является ток ионного пучка. Сформирована структура тестового элемента нанофлюидики на основе системы микроканалов и мембран с нанометровыми отверстиями на кремниевой подложке. Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования перспективной элементной базы наносистемной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мальцев П.П.* Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам // Сборник статей. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. *Чаплыгин Ю.А.* Нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.
3. *Лучинин В.В.* Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы. – М: Физматлит, 2006. – 552 с.
4. *Giannuzzi L.A., Stevie F.A.* Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice. New York: Springer, 2004. – 357 p.
5. *Wilhelmi O.* Nanofabrication and rapid prototyping with Dual Beam instruments // FEI Company application note. – 2007. - <http://www.fei.com>.
6. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А.* Элионные и зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 165-175.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.С. Кужаров.

Агеев Олег Алексеевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634371611.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; заведующий кафедрой; д.т.н; профессор.

Коломийцев Алексей Сергеевич

E-mail: alexey.kolomiytsev@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; аспирант.

Громов Александр Леонидович

E-mail: groall@tti.sfedu.ru.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; магистрант.

Ильин Олег Игоревич

E-mail: ru.saint@gmail.com.

Кафедра технологии микро- и нанoeлектронной аппаратуры; студент.

Ageev Oleg Alexeevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ageev@fep.tti.sfedu.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371611.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Head the Department; Dr. of Eng. Sc., Professor.

Kolomiytsev Alexey Sergeevich

E-mail: alexey.kolomiytsev@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Postgraduate Student.

Gromov Alexandr Leonidovich

E-mail: groall@tti.sfedu.ru.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Undergraduate.

Ilin Oleg Igorevich

E-mail: ru.saint@gmail.com.

The Department of Micro- and Nanoelectronics; Student.

УДК 534.21:536.21

Е.А. Рындин, Б.Г. Коноплев, В.В. Винарьева

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ
ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА***

Разработана модель наноразмерных термоакустических излучателей на основе нестационарного уравнения теплопроводности и программные средства численного моделирования. Исследована динамика изменения температуры в термоакустическом излучателе и в окружающей воздушной среде. Получены зависимости амплитуды изменения температуры стержней термоакустического излучателя от частоты входного сигнала, от расстояния между излучателем и теплоотводом (подложкой), от площади поперечного сечения стержней излучателя. Выполнена оценка мощности, отводимой от прибора посредством излучения. Проведен анализ результатов численного моделирования наноразмерных термоакустических излучателей.

Термоакустика; акустический излучатель; модель; программа моделирования.

E.A. Ryndin, B.G. Konoplev, V.V. Vinaryeva

**MODELING OF NANODIMENSIONAL ACOUSTIC SPEAKERS
ON THE BASIS OF THERMOACOUSTIC EFFECT**

The model of nanodimensional thermoacoustic radiators on the basis of the non-stationary equation of heat conductivity and software of numerical modeling is developed. Dynamics of temperature in a thermoacoustic radiator and in the surrounding air environment is investigated. Dependences of amplitude of temperature of cores of a thermoacoustic radiator on frequency of an input signal, on distance between a radiator and a heat-conducting path (substrate), from the area of cross-section section of cores of a radiator are received. The estimation of the power which is taken away from the device by means of radiation is executed. The analysis of results of numerical modeling is carried out.

Thermoacoustics; an acoustic speaker; model; the modeling program.

В настоящее время исследования по термоакустике, изучающей взаимные преобразования тепловых и звуковых потоков, фактически объединены в специальный раздел акустики. Описанию способов возбуждения звука с помощью тепла посвящена работа Рэлея [1], первое издание которой вышло в 1877 г. Сам Рэлей ссылается на работы Фарадея, Зеебека, Тиндаля, выполненные в первой половине XIX века, когда данные эффекты представляли чисто научный интерес и были лишь изящными, достаточно сложными примерами неустойчивости [2].

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (госконтракты № П1224 от 27.08.2009 г. и № 16.740.11.0425 от 03.12.2010, проект 2.1.2/10229).