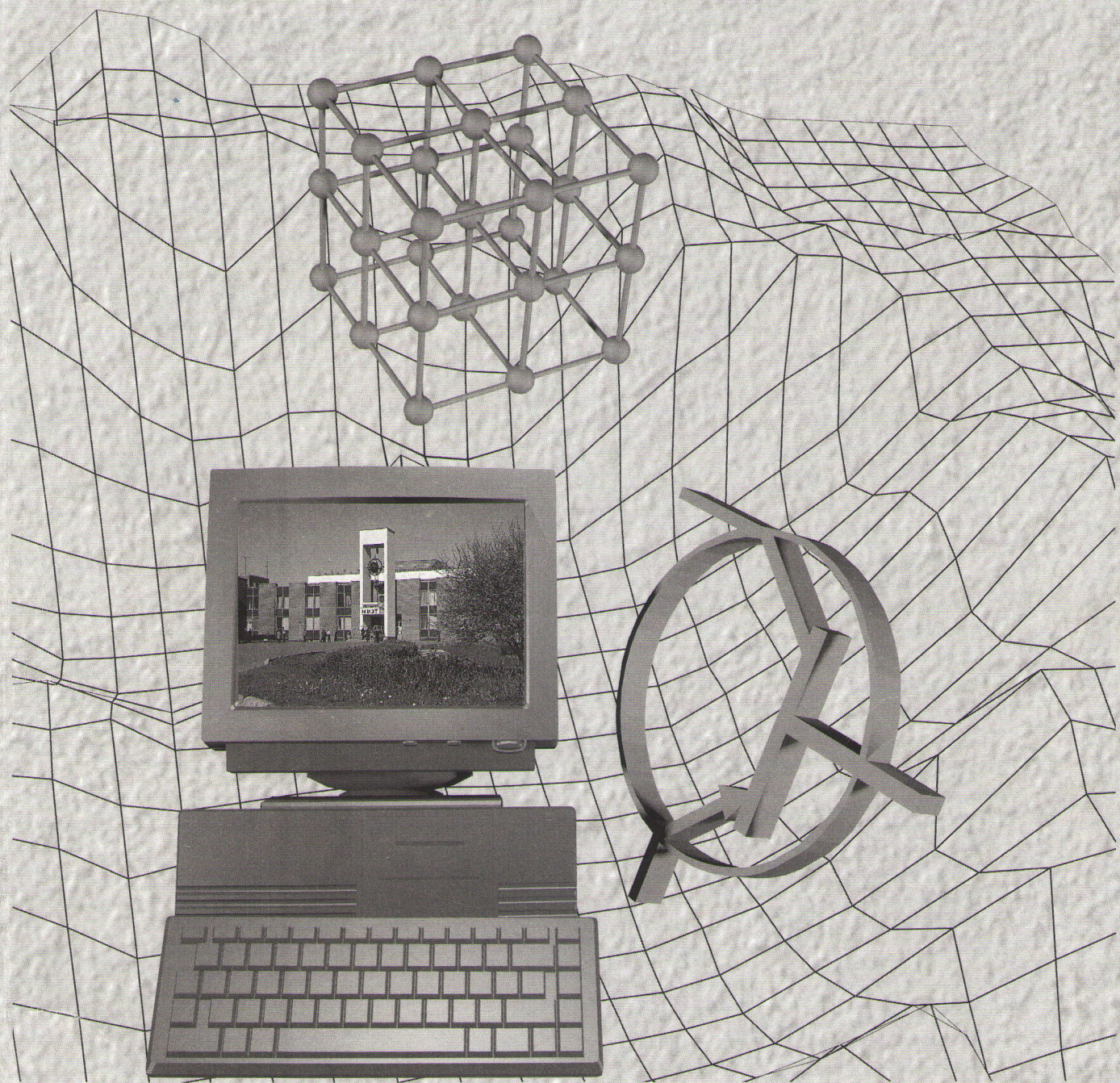


ISSN - 1561-5405

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# Электроника



**2(106)**

**2014**

## Формирование кремниевых наноструктур плазменным травлением через маску, созданную фокусированным пучком ионов Ga<sup>+</sup>

*И.И. Бобринецкий, А.В. Волкова, А.А. Зайцев,  
В.К. Неволин, К.А. Царик, А.А. Чудинов*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

Представлен метод формирования трехмерных кремниевых наноструктур с помощью создания маски фокусированным ионным пучком для последующего плазменного травления. Плазменным травлением легированной области сформирован рельеф поверхности с глубиной до 80 нм, зависящей от дозы внедренных ионов. Определен диапазон значений дозы пучка ионов Ga<sup>+</sup> для легирования кремния. Получены трехмерные кремниевые структуры с линейными размерами порядка 100 нм.

*Ключевые слова:* фокусированный ионный пучок, локальное ионное легирование, наноразмерные полупроводниковые структуры, плазменное травление, нанолитография.

На сегодняшний день плазменное травление (ПТ) – один из основных методов формирования наноразмерных элементов с линейными размерами менее 100 нм при изготовлении интегральных схем, различных микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС). ПТ по сравнению с жидкостным травлением характеризуется высокой разрешающей способностью, селективностью и анизотропией травления, а также высоким уровнем контролируемости процесса [1].

Поверхность кремния, легированная ионами галлия, является маской для плазменного травления [2] (рис.1). Применение данного эффекта описано в работах [3, 4], где показана возможность создания кремниевых наноразмерных структур.

Метод фокусированного ионного пучка (ФИП) для создания маски – относительно новый и перспективный инструмент нанотехнологии, который применяется для получения поперечного сечения микросхемы, создания 1D-, 2D- и 3D-структур, а также различных МЭМС и НЭМС. Однако при обработке областей 100×100 мкм и более процесс формирования маски с помощью ФИП с максимальным разрешением порядка 10 нм длительный и затратный. Поэтому применение этого метода актуально для штучных изделий, таких как шаблоны наноимпринт-литографии, НЭМС и т.п. Совмещение технологий ПТ и маскирования легированием ФИП позволяет резко сократить время создания наноразмерных элементов с высокой степенью интеграции.

В настоящей работе проводится исследование эффекта маскирования поверхности кремния легированными ионами Ga<sup>+</sup> для процесса плазменного травления. Исследуется

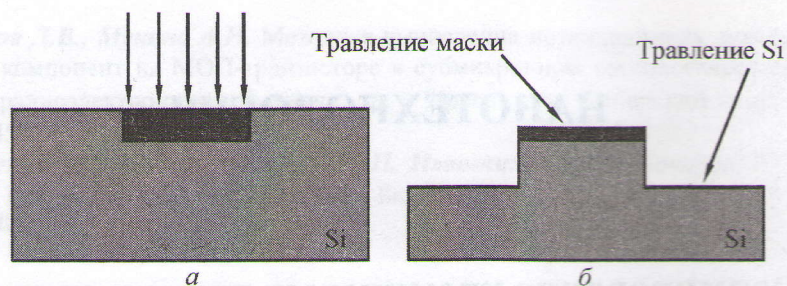


Рис. 1. Схема формирования наноразмерных кремниевых структур с помощью ПТ кремниевой подложки с маскированной областью: а – легирование ионами Ga<sup>+</sup>, б – после ПТ

влияние операционных характеристик процессов ФИП и ПТ на геометрические размеры полученных кремниевых структур. Анализируются параметры полученных наноразмерных структур в зависимости от технологических параметров процессов.

**Эксперимент. Маскирование с помощью ФИП.** Локальное легирование областей кремния марки КЭФ-4,5 ионами Ga<sup>+</sup> проводится в нанотехнологическом комплексе «Нанофаб», имеющем в своем составе установку ФИП, а также высоковакуумный сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ), на котором проводится сканирование образца.

Координаты точек воздействия ионного пучка задаются в виде потокового ASCII-файла (файл-шаблона), содержащего координаты точек воздействия, время воздействия в каждой точке и число проходов ионного луча по структуре. Файл-шаблон для выполнения легирования содержит параметры воздействия ФИП в 20 квадратных областях 3 × 3 мкм и области в виде сетки из пересекающихся линий (20 вертикальных и 20 горизонтальных) с различной дозой легирования. Шаг сетки 1,5 мкм. Воздействие ионного пучка для каждого элемента осуществляется последовательно от точки к точке по указанным координатам. Порядок перемещения пучка определяется очередностью расположения координат в файл-шаблоне.

Время воздействия пучка в точке для различных квадратов и линий варьируется от 100 до 2000 мкс. Данный файл-шаблон выполняется при апертурах с током пучка 1, 10, 30 пА с диаметром пучка 7, 12, 16 нм соответственно и энергией пучка ионов 30 кэВ при отсутствии наложений пучка ионов в соседних точках воздействия.

**ПТ маскированного кремния.** Для создания наноразмерных кремниевых структур процесс плазменного травления должен быть селективным к маске. Образцы подвергались ПТ в высокочастотной индуктивно-связанной плазме на установке «Согил 200II».

В качестве рабочей смеси используется газ CHF<sub>3</sub> с добавлением O<sub>2</sub>. Операционные параметры ПТ кремния подобраны таким образом, чтобы химический механизм травления преобладал над физическим распылением. С соблюдением условия селективности получены объемные наноразмерные структуры. Преобладание процесса химического травления кремния происходит за счет того, что фторсодержащая среда не образует с галлием летучих соединений. Скорость травления галлия в таком случае определяется малым физическим распылением поверхности, которое, в свою очередь, определяется напряжением смещения в процессе ПТ.

Время травления и мощность, подаваемая на индукционную пару, выбраны исходя из структурной целостности получаемых элементов. В результате заложенные фигуры в потоковом файле должны проявиться на подложке без искажения латеральных размеров и поверхность с одинаковой дозой внедрения в каждой соседней точке должна иметь один уровень по высоте.

Заданы следующие параметры ПТ: ВЧ-мощность, подаваемая на индуктор источника, 800 Вт; мощность емкостной пары, подаваемая на подложку, 50 Вт; давление в камере 1,33 Па; напряжение смещения  $-40$  В. Для получения глубины травления кремния 100 нм при данных параметрах время травления равно 60 с. Напряжение смещения необходимо для ускорения процесса травления, но оно выбиралось таким образом, чтобы скорость травления кремния была значительно больше скорости травления маски галлия.

**Результаты и их обсуждение. Связь параметров маскирования с размерами структур.** После легирования кремниевой подложки ФИП ионов  $\text{Ga}^+$  при апертуре с током пучка 30 пА проводится сканирование образца в атомно-силовом микроскопе (АСМ) (рис.2). АСМ-изображения получены в полуконтактном режиме измерения.

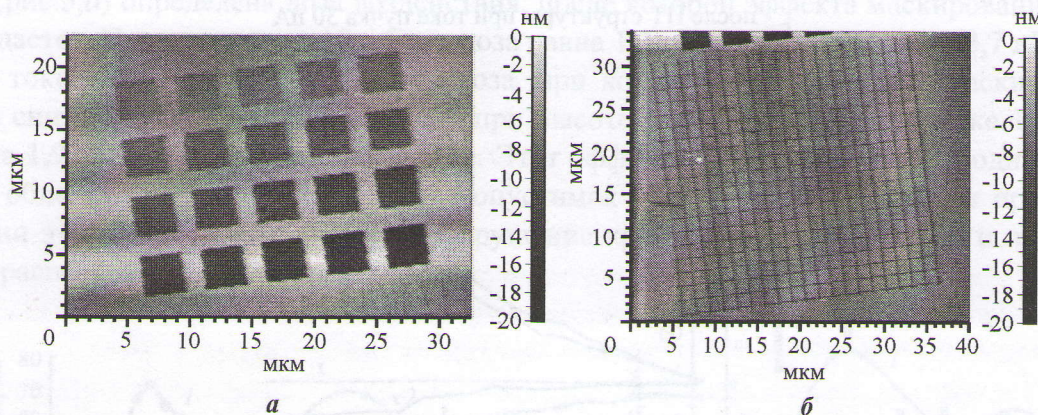


Рис.2. АСМ-изображение квадратов (а) и полос (б), полученное после воздействия ФИП

Постепенно затемняющиеся квадраты (рис.2,а) или линии (рис.2,б) свидетельствуют об увеличивающейся глубине легированных областей кремния. Градиент глубины структуры от 0 до 20 нм, отображающийся как градиент яркости серии квадратов и линий, соответствует градиенту времени воздействия ФИП от 100 до 2000 мкс с шагом 100 мкс. При легировании ФИП для получения требуемой дозы легирования, определяемой временем воздействия ФИП в точке, происходит распыление поверхности кремния в области воздействия пучка. Следует отметить, что латеральное отклонение внедряемых ионов  $\text{Ga}^+$  при энергии пучка ионов 30 кэВ составляет около 7 нм. Это необходимо учитывать при создании элементов с сопоставимыми линейными размерами, например полос шириной менее 50 нм.

После сканирования в АСМ и замера геометрических параметров проводится ПТ образца с созданной легированием маской. Пройдя этап плазменного травления, образец повторно сканируется в АСМ. Высота полученных элементов (рис.3) увеличивается от 2 до 70 нм с увеличением времени воздействия ФИП в точке от 100 до 2000 мкс. Причем, чем больше время воздействия в точке, а следовательно, и доза внедрения, тем больше высота полученных после плазменного травления элементов.

Селективность ПТ нелегированного кремния по отношению к кремнию, легированному ионами  $\text{Ga}^+$ , объясняется тем, что соединения галлия не образуют химических продуктов реакции с фторуглеродами [5].

На основе результатов, показанных на рис.2 и 3, построены зависимости для углублений и высот элементов от времени воздействия апертур при токе пучка 1, 10, 30 пА до и после ПТ (рис.4).

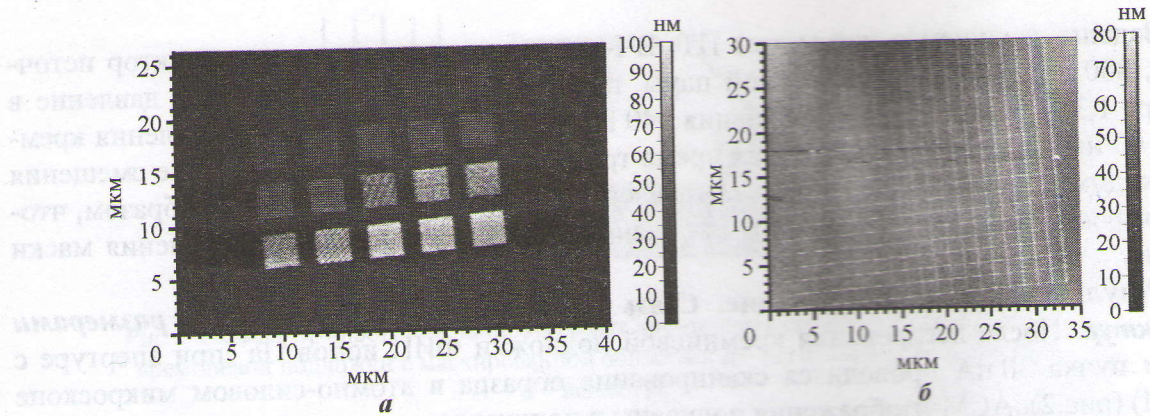


Рис.3. АСМ-изображение элементов (квадратов) (а) и полос (б) после ПТ структуры при токе пучка 30 пА

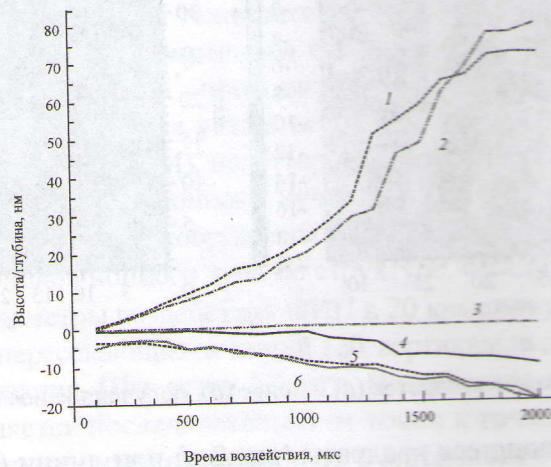


Рис.4. Зависимость высоты/глубины элементов от времени воздействия при легировании методом ФИП при токе пучка 30, 10, 1 пА соответственно: 1, 2, 3 – высота после ПТ; 6, 5, 4 – глубина легирования до ПТ

Как видно из рис.4, во время легирования с помощью ФИП одновременно с плавным увеличением дозы внедрения происходит плавное увеличение глубины легированных областей из-за распыления поверхности. Скорость распыления небольшая: при 1 мс глубина распыления достигает 10 нм, при 2 мс – 20 нм. Большое значение имеет тот факт, что при данном времени воздействия создается маскирующий слой внедренных атомов галлия, препятствующий травлению кремния в плазме. Ограничение по времени воздействия ФИП на поверхность кремния выбрано таким образом, чтобы обеспечить отсутствие эффекта нелинейности скорости распыления кремния при легировании методом ФИП. Распыление поверхности образца при легировании ФИП ионов  $Ga^+$  элементов 30 пА в один проход на глубину 20 нм и более из-за термических эффектов происходит неравномерно и дно квадратных областей становится шероховатым и неравномерным. Это связано с эффектами расплавления, разбрызгивания и переосаждения материала [6], поэтому для увеличения суммарной дозы внедрения ионов  $Ga^+$  следует повышать количество проходов воздействия.

**Критическая доза внедрения при маскировании.** Используя многопроходную методику при внедрении ионов, исследованы самые малые апертуры с током пучка 1 и 10 пА при энергии ионов 30 кэВ. При такой энергии глубина проникновения ионов  $Ga^+$

в кремний достигает 60–70 нм. Данные по глубине проникновения получены с использованием программного пакета расчетов SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter).

При помощи ФИП определена доза легирования, при которой эффект распыления поверхности кремния начинает преобладать над эффектом легирования приповерхностной области. Для определения критической дозы воздействия используется тот же файл-шаблон из квадратов и пересекающихся линий. Доза легирования изменяется от 0,5 до 5 нКл/мкм<sup>2</sup>. Для достижения таких доз при апертурах с током пучка 1 и 10 пА легирование осуществляется в 20 проходов.

Для плазменного травления используются рассмотренные параметры. На рис.5 представлены графики зависимости высоты элементов и полос, полученных после плазменного травления, от дозы легирования. Из полученной зависимости для квадратов (рис.5,а) определена доза воздействия, после которой эффекта маскирования не наблюдается. При токе пучка 10 пА эта доза равна 1,3 нКл/мкм<sup>2</sup>, при 1 пА – 2,7 нКл/мкм<sup>2</sup>. При токе пучка 10 пА критическая доза, при которой эффективность маскирующего слоя снижается, равна 0,65 нКл/мкм<sup>2</sup> при высоте элемента 70 нм, при токе 1 пА доза равна 1,9 нКл/мкм<sup>2</sup> при той же высоте. Этот эффект связан с тем, что в модифицируемой области достигается предельно допустимая концентрация примеси и при превышении этого значения происходит разрушение кристаллической решетки и последующее распыление материала.

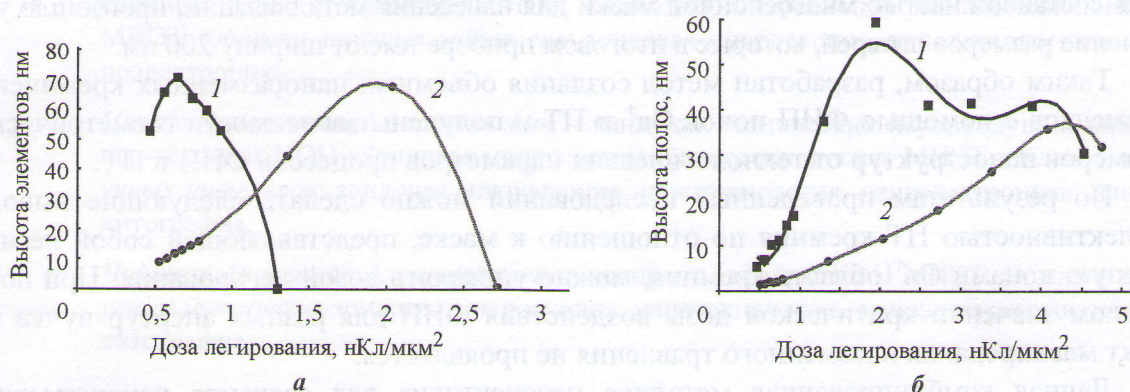


Рис.5. Зависимость высоты элементов (а) и полос (б) от дозы легирования после ПТ: при токе пучка 10 пА (кривая 1) и 1 пА (кривая 2)

Как видно из рис.5, при использовании апертуры с меньшим током пучка для получения структуры определенной высоты требуется большая доза легирования, соответствующая большему времени воздействия. Данная зависимость объясняется тем, что при токе пучка 10 пА плотность пучка ионов галлия больше (0,088 пА/нм<sup>2</sup>), чем 1 пА (0,026 пА/нм<sup>2</sup>).

Максимальные значения высоты полос при токе пучка 10 и 1 пА соответственно достигаются для доз внедрения 1,8 и 4,2 нКл/мкм<sup>2</sup>, значения высоты для этих апертур равны 60 и 36 нм соответственно. Ширина полос существенно отличается от диаметра пучка: 150 и 80 нм при диаметре 12 и 7 нм соответственно. Разброс в ширине полос незначительный, не более 10 нм.

**Испытание разработанной методики.** На основе разработанной комбинированной методики изготовлен штамп для наноимпринт-литографии (рис.6,а). Штамп представляет собой кремниевую встречно-штырьевую структуру с протяженными наноразмерными элементами шириной 100 нм, высотой 100 нм и длиной 60 мкм,

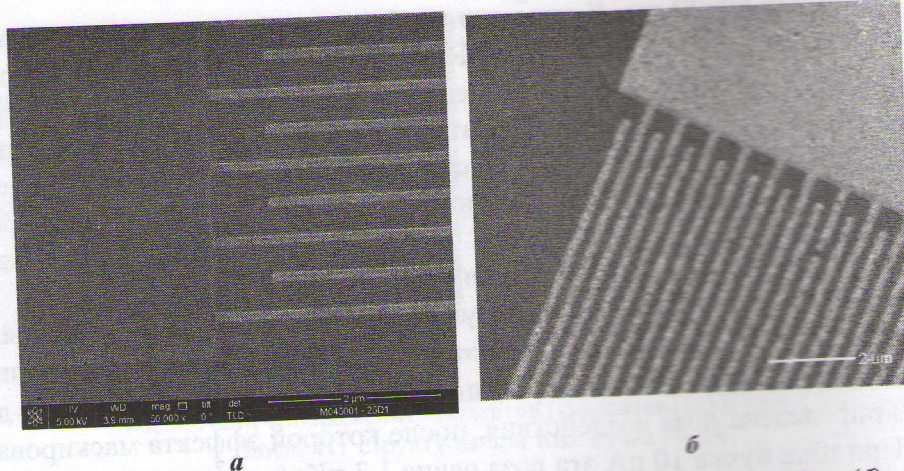


Рис. 6. Штамп для наноимпринт-литографии (а) и топология прибора (б)

расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга с периодом решетки 800 нм. В процессе наноимпринт-литографии с помощью данного штампа получена топология периодической структуры акустоэлектрического преобразователя, работающего на длине поверхностной акустической волны 800 нм (рис.6,б). Из рисунка видно, что после проведения наноимпринт-литографии и контролируемого травления слоя SiO<sub>2</sub>, являющегося составной частью многослойной маски для нанесения металлизации, произошло увеличение размеров штырей, которые в итоговом приборе имеют ширину 200 нм.

Таким образом, разработан метод создания объемных наноразмерных кремниевых элементов с помощью ФИП ионов Ga<sup>+</sup> и ПТ и получены зависимости геометрических размеров наноструктур от технологических параметров процессов ФИП и ПТ.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Селективностью ПТ кремния по отношению к маске, представляющей собой легированную ионами Ga<sup>+</sup> область кремния, можно управлять дозой легирования. При определенном значении критической дозы воздействия ФИП для разных апертур пучка эффект маскирования плазменного травления не проявляется.

Данная комбинированная методика перспективна для создания наноразмерных элементов. На основе разработанного метода изготовлен штамп для наноимпринт-литографии с протяженными кремниевыми полосами шириной порядка 100 нм и длиной 60 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение № 14.В37.21.1092) и Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 13-07-12405).

### Литература

1. **Yongqi Fu, Lumin Wang.** Focused ion beam machining and deposition // Ion Beams in Nanoscience and Technology. – 2010. – P 265–290.
2. **Schmidt B., Oswald S., Bischoff L.** Etch rate retardation of Ga<sup>+</sup>-ion beam-irradiated silicon // J. Electrochem. Soc. – 2005. – Vol. 152. – Is. 11. – P. G875–G879.
3. Fabrication of Si microstructures using focused ion beam implantation and reactive ion etching / **H.X. Qian, Wei Zhou, Jianmin Miao et al.** // J. of Micromechanics Microengineering. – 2008. – Vol. 18. – N.3 – P. 035003-1–035003-5.

4. The fabrication of silicon nanostructures by local gallium implantation and cryogenic deep reactive ion etching / *N. Chekurov, K. Grigoros, A. Peltonen et al.* // Nanotechnology. – 2009. – Vol. 20. – N 6. – P. 065307-1 – 065307-5.

5. *Henry M.D., Shearn M.J., Chhim B., Scherer A.* Ga<sup>+</sup> beam lithography for nanoscale silicon reactive ion etching // Nanotechnology. – 2010. – Vol. 21 – N 24. – P.245303-1 – 245303-8.

6. *Bessonova A.V., Nevolin V.K., Romashkin A.V., Tsarik K.A.* Systematic features of the formation of semiconductor nanostructures using a focused ion beam // Semiconductors. – 2012. – Vol. 46. – N 13. – P. 1604–1607.

Статья поступила  
после доработки 10 октября 2013 г.

**Бобринецкий Иван Иванович** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник НОЦ «Зондовая микроскопия и нанотехнология» МИЭТ. *Область научных интересов:* молекулярная электроника, нанобиоэлектроника, нанотехнология и наноэлектроника. **E-mail:** [vkkn@miee.ru](mailto:vkkn@miee.ru)

**Волкова Анна Владимировна** – соискатель кафедры квантовой физики и наноэлектроники (КФН) МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, нанотехнология и наноэлектроника.

**Зайцев Алексей Александрович** – аспирант кафедры КФН МИЭТ. *Область научных интересов:* наноимпринт-литография, нанотехнология и наноэлектроника.

**Неволин Владимир Кириллович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры КФН, руководитель НОЦ «Зондовая микроскопия и нанотехнология» МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, нанотехнология и наноэлектроника.

**Царик Константин Анатольевич** – кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог НОЦ «Зондовая микроскопия и нанотехнология» МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, нанотехнология, наноэлектроника, нанолитография.

**Чудинов Александр Александрович** – аспирант кафедры КФН МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, нанотехнология, наноэлектроника, нанолитография.

### Вниманию читателей журнала

#### «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Оформить годовую подписку на электронную  
копию журнала можно на сайтах

- Научной Электронной Библиотеки: [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)
- Национального цифрового ресурса «Руконт»: [www.rucont.ru](http://www.rucont.ru)