

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР Si / SiO<sub>2</sub> / МЕТАЛЛ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

А. В. Петров<sup>1</sup>, Е. Ю. Канюков<sup>1</sup>, С. Е. Демьянов<sup>1</sup>,  
А. К. Федотов<sup>2</sup>, И. А. Свито<sup>2</sup>, D. Fink<sup>3</sup>

*ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», petrov@ifstp.bas-net.by*

*<sup>2</sup>Белорусский государственный университет*

*<sup>3</sup>Хан-Майтнер-Институт, г.Берлин, Германия*

В настоящее время проводится интенсивное изучение физических свойств низкоразмерных систем и наноструктурных материалов с целью создания разнообразных наноэлектронных устройств. В связи с этим развиваются различные технологии, позволяющие получать наноразмерные кластеры различных материалов, полупроводниковые нанотрубки и другие наносистемы. В то же время устойчивый рост затрат на производство электронных приборов стимулирует поиск новых технологий, позволяющих уменьшать размеры приборов до нанометрового диапазона. В частности, в последние годы возрастает интерес к технологии треков быстрых тяжелых ионов (БТИ) [1, 2], связанной с формированием узких и протяженных областей радиационного повреждения («латентных ионных треков»), в результате воздействия на вещество энергетичных ионов. В последнем случае протравленные треки БТИ (или поры) формируются в различных подложках за счет химического воздействия специальных травителей, удаляющих области треков с модифицированными свойствами. Для создания различных электронных устройств с использованием треков БТИ (ионных треков), например разного рода сенсоров, можно использовать введение различных материалов в такие поры [1, 3].

Многообещающим методом формирования наноструктур внутри пор, образованных травлением ионных треков в оксидированном кремнии, является их электрохимическое заполнение разными материалами. Такой способ делает возможным формировать в порах системы Si/SiO<sub>2</sub> однородных или многослойных наноструктур (наностержней) на основе металлических и (или) полупроводниковых наночастиц. В противоположность другим методам электрохимическое заполнение пор обладает высокой селективностью, приводя к заполнению лишь области поры в оксиде кремния, которая находится в электрическом контакте с проводящей подложкой (кремний) и исключает осаждение на слой оксида кремния. Перспективность использования заполненных треков в оксидированном кремнии определяется возможностью создания на их основе электронных устройств типа «TEMPOS» – структур («Tunable Electronic Material in Pores in Oxide on Semiconductors» – «Управляемый электронный материал с порами в оксиде кремния»), которые могут обладать нелинейными вольт-амперными характеристиками, в том числе с отрицательным дифференциальным сопротивлением [3, 4].

В процессе выполнения данного исследования использовались образцы SiO<sub>2</sub> / *n*-Si. Слой диоксида кремния был создан термическим окислением Si при температуре 1100 °C в течение 10 ч в атмосфере очищенного кислорода. Толщина оксидного слоя составила 0,7 ± 0,1 мкм. После облучения ионами <sup>197</sup>Au<sup>26+</sup> с энергией 350 МэВ и дозой 5·10<sup>8</sup> см<sup>-2</sup> в Центре технологий ионных пучков («ISL») Хан-Майтнер-Института в

г. Берлин (Германия), в слое  $\text{SiO}_2$  были сформированы латентные ионные треки, которые в дальнейшем подвергались селективному травлению в  $\text{HF}$  с концентрациями 1.35 % и 2.7 % при  $20 \pm 1$  °C. В результате в слое диоксида кремния образовались стохастически размещенные поры в виде усеченных конусов с диаметрами оснований 200 нм (на границе с Si) и 250 нм и высотой 200 нм. Травление треков осуществлялось на всю глубину слоя  $\text{SiO}_2$ , до кремниевой подложки [5].

Далее было проведено наполнение протравленных ионных треков нанокластерами меди и никеля посредством подпотенциального электрохимического осаждения. Для осаждения металлов использовалась трехэлектродная двухкамерная электрохимическая ячейка. Электролитами служили растворы 0.5 моль/л  $\text{H}_3\text{BO}_3$  + 0.005 моль/л  $\text{CuSO}_4$  (для осаждения меди) и 0.5 моль/л  $\text{H}_3\text{BO}_3$  + 0.5 моль/л  $\text{NiSO}_4$  (для осаждения никеля). Осаждение металлов проводилось при потенциале электрода минус 0.5 В в течение 120 с (для осаждения меди) и 60 с (для осаждения никеля) [5].

Изучение морфологии поверхности образцов  $\text{Cu/SiO}_2/\text{Si}$  и  $\text{Ni/SiO}_2/\text{Si}$  с помощью сканирующей электронной микроскопии (рис.1) подтвердило селективный характер заполнения ионных треков нанокластерами меди и никеля. Более подробные данные о характере и степени заполнения ионных треков металлами в диэлектрическом слое были получены с помощью исследований структуры образцов на атомном силовом микроскопе в различных режимах. Так, на рис. 2 приведены изометрические изображения поверхности образцов, которые показывают, что при выбранном режиме подпотенциального электрохимического осаждения меди (рис. 2, а, б) происходит не только заполнение каналов ионных треков, но формирование выростов над ними на поверхности  $\text{SiO}_2$ . Изображение позволяет рассчитать плотность распределения этих выростов на поверхности, их латеральные размеры и характер купола каждого из них. Из приведенной диаграммы высот видно, что глубина впадин не превышает 50 нм (при толщине оксидного слоя 700 нм), а максимальная высота «столбиков» металла над поверхностью диэлектрика не превышает 350–400 нм.

На рисунке 2, б представлена гистограмма распределения высот в пределах сканируемого участка, приведенного на рис. 2, а, из которой следует, что наиболее

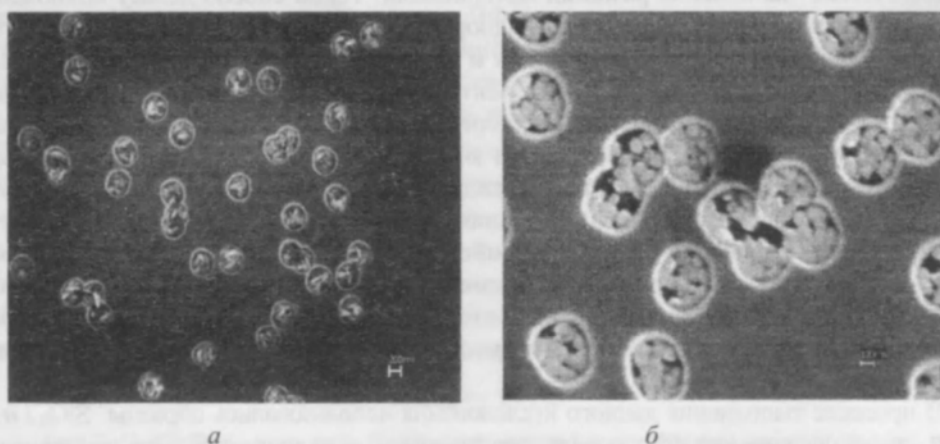


Рис. 1. Изображения сканирующей электронной микроскопии нанокластеров Cu (а) и Ni (б), осажденных в нанопоры (ионные треки) системы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  методом электрохимического подпотенциального осаждения

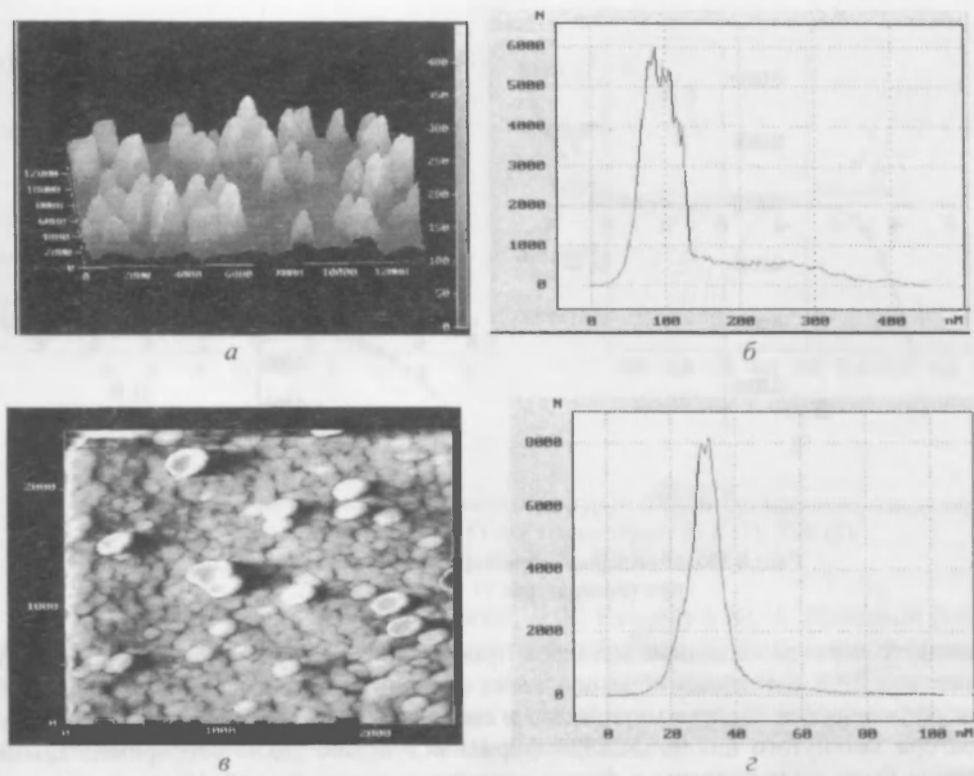


Рис. 2. Изображения атомно-силовой микроскопии морфологии поверхности SiO<sub>2</sub> с ионными треками, заполненными нанокластерами металлов: (а, б) и изометрические изображения поверхности SiO<sub>2</sub> с ионными треками, заполненными Cu и Ni, соответственно; (д, е) гистограммы распределения высот выростов Cu и Ni, соответственно, в пределах сканируемого участка

вероятное значение высот рельефа составляет 80–100 нм, а выросты высот от 150 до 400 нм занимают площадь на порядок меньшую. Этот график имеет смысл плотности вероятности обнаружить ту или иную высоту в пределах данного участка (шкала N).

Результаты заполнения нанопор никелем представлены на рис. 2, в. Данное изображение получено на атомном силовом микроскопе при помощи сканирования поверхности образца магниточувствительным зондом. Благодаря использованию данного метода исследования получено фазово-контрастное изображение, на котором светлые области на фоне рельефа отвечают за намагниченные участки – никелевые кластеры в порах оксида кремния. Для большей наглядности построена гистограмма распределения высот выростов Ni (рис. 2, г) в пределах сканируемого участка, которая указывает на то, что при данном режиме осаждения кластеры никеля образуют выросты над поверхностью образца, высоты которых лежат в пределах от 10 до 60 нм.

Экспериментальная установка для проведения исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) состоит из специально изготовленной ячейки, дающей возможность проводить измерения с помощью прижимных электродов, в том числе в поле постоянных магнитов, стабилизатора напряжения постоянного тока П4105, цифрового вольтметра Щ300. Измерения проводились в режиме постоянного напряжения в интервале от –10 до 10 В, с шагом 0.5 В, с последующей регистрацией тока, про-

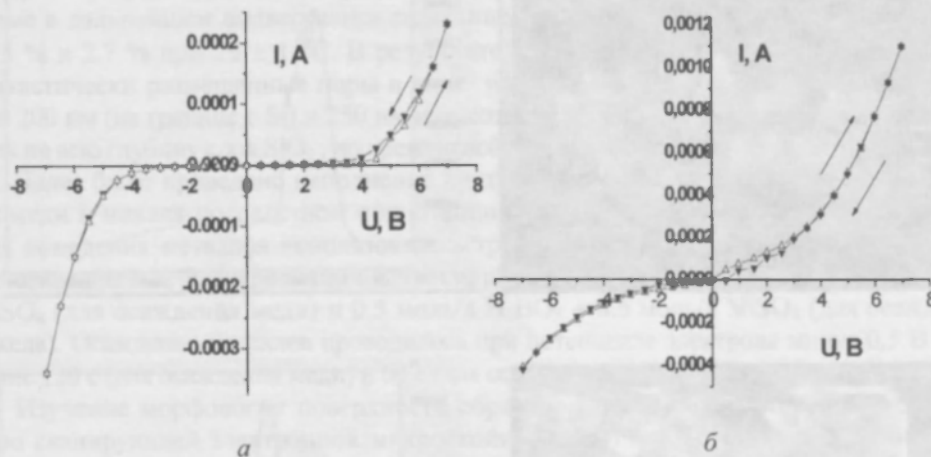


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структур Cu/SiO<sub>2</sub>/Si при температурах 77 К (а) и 293 К (б)

текающего через заполненные металлом треки и контактирующего с ними кремния. Измерения ВАХ изучаемых образцов также проводились на установке исследований электрофизических свойств материалов в сильных магнитных полях на базе рефрижератора замкнутого цикла «J-2532» фирмы «Cryogenic Ltd.». Экспериментальные образцы были подготовлены в форме прямоугольников длиной 10 мм и шириной 5 мм. Для измерений ВАХ со стороны слоя SiO<sub>2</sub> на образцы были нанесены индиевые контакты при помощи ультразвуковой пайки, после чего они помещались в измерительную ячейку. Монтаж образцов производился с учетом технологии «TEMPOS» [3].

Результаты измерений ВАХ образцов системы Cu/SiO<sub>2</sub>/Si при различных температурах представлены на рис. 3, а результаты измерений ВАХ образцов системы Ni/SiO<sub>2</sub>/Si при различных температурах и в магнитном поле 8 Тл представлены на рис. 4.

Результаты измерений ВАХ показали, что используемый метод нанесения электродов на образцы обеспечивает омичность контактов, их механическую прочность и повторяемость результатов измерений. Анализ экспериментальных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что они характерны для систем металл-диэлектрик-полупроводник с барьером Шоттки. Прослеживается четкая зависимость формы ВАХ изучаемых образцов от воздействия температуры и магнитного поля. Форма и характер поведения наблюдавшихся электрофизических свойств исследуемых образцов позволяют предположить, что среди механизмов проводимости в изучаемых наносистемах имеют место эмиссия Пула – Френкеля, связанная с облегченным электрическим полем термическим возбуждением захваченных ловушками электронов в зону проводимости оксида кремния, эмиссия Шоттки, связанная с термоэлектронной эмиссией носителей заряда через энергетический барьер, прыжковая и омическая проводимость. Изменение формы ВАХ под влиянием сильного магнитного поля в системе Ni/SiO<sub>2</sub>/Si подтверждает возможность использования данной структуры для создания сенсора магнитного поля.

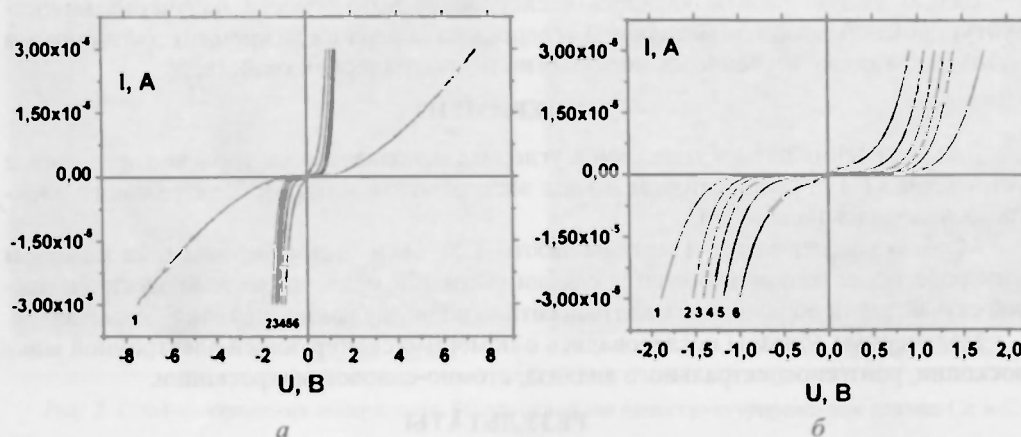


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики структур Ni/SiO<sub>2</sub>/Si без магнитного поля (а) и в магнитном поле 8 Тл (б) при температурах 25 К (1), 50 К (2), 100 К (3), 150 К (4), 200 К (5), 250 К (6), 310 К (7)

Авторы признательны Е. А. Стрельцову, Д. К. Иванову и Ю. А. Ивановой (химический факультет БГУ) за помощь в подготовке образцов, С. В. Гусаковой (физический факультет БГУ) за проведение сканирующей электронной микроскопии и Е. К. Белоногову (Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия) за проведение атомной силовой микроскопии.

Работа выполнялась в рамках ГКПНИ «Нanomатериалы и нанотехнологии».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers. Ed. by Fink D., Springer. 2004. 63 p.
2. Реутов В. Н., Дмитриев С. Н. // Рос. хим. журнал. 2002. Т. XLVI. С. 74–80.
3. Fink D., Petrov A. V., Hoppe K., Fahrner W. R. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2004. Vol. B218. P. 355–361.
4. Fink D., Petrov A. V., Fahrner W. R. et al. // Intern. Journ. of Nanoscience. 2005. Vol. 4. P. 965–973.
5. Ivanova Yu. A., Ivanou D.K., Fedotov A.K. et al. // Journ. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. P. 9163–9169.

### НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ МЕТАЛЛ-УГЛЕРОД НА КРЕМНИИ, СФОРМИРОВАННЫЕ ТОРЦЕВЫМ ЭРОЗИОННЫМ УСТРОЙСТВОМ

А. В. Пунько<sup>1</sup>, В. В. Углов<sup>2</sup>, Н. Т. Квасов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

#### ВВЕДЕНИЕ

Уединенные проводящие образования на непроводящей поверхности представляют собой планарную матрицу емкостей, которая, в свою очередь, может использоваться в качестве детектора излучения определенных длин волн или элемента памяти [1].