

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

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

*ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»,  
г.Минск, Беларусь, petrov@ifftp.bas-net.by*

*<sup>\*</sup>Белорусский государственный университет, г.Минск, Беларусь*

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

В настоящее время проводится интенсивное изучение физических свойств низкоразмерных систем и наноструктурных материалов с целью создания разнообразных нанoeлектронных 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> / p-Si. Слой диоксида кремния был создан термическим окислением Si при температуре 1100 °С в течение 10 часов 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 SiO<sub>2</sub> были сформированы

латентные ионные треки, которые в дальнейшем подвергались селективному травлению в 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.

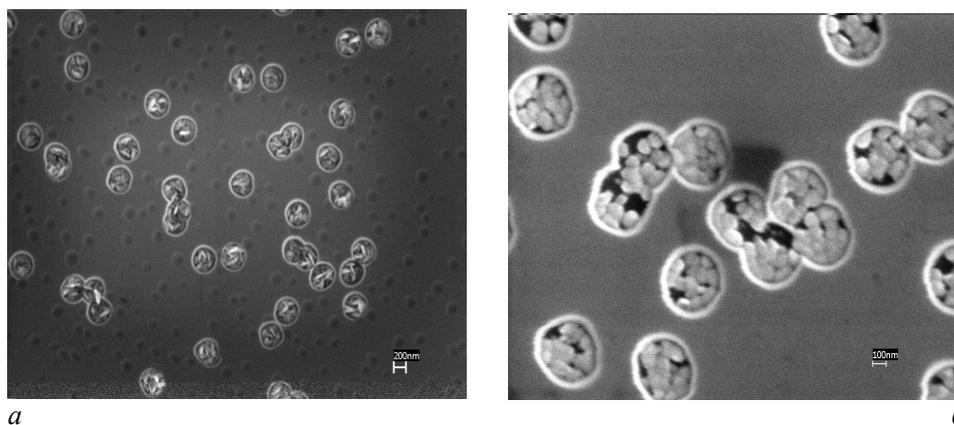
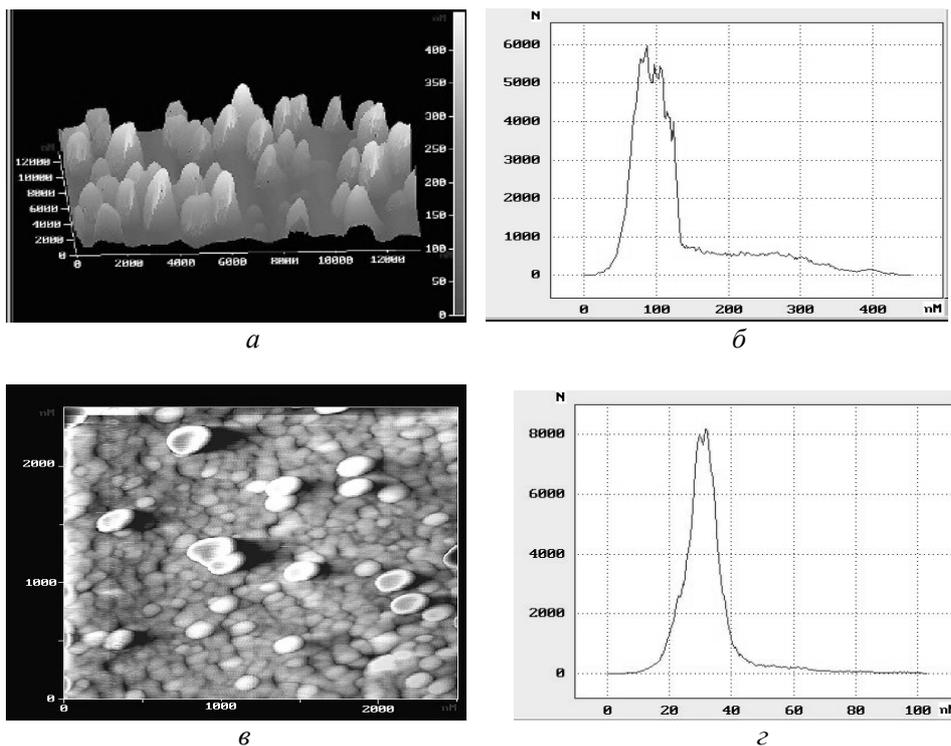


Рис.1. Изображения сканирующей электронной микроскопии нанокластеров Cu (а) и Ni (б), осажденных в нанопоры (ионные треки) системы  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  методом электрохимического подпотенциального осаждения.



*Рис.2.* Изображения атомно-силовой микроскопии морфологии поверхности  $\text{SiO}_2$  с ионными треками, заполненными нанокластерами металлов: (а, в) изометрические изображения поверхности  $\text{SiO}_2$  с ионными треками, заполненными Cu и Ni, соответственно; (б, г) гистограммы распределения высот выростов Cu и Ni, соответственно, в пределах сканируемого участка.

На рис. 2 б представлена гистограмма распределения высот в пределах сканируемого участка, приведенного на рис.2 а, из которой следует, что наиболее 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 Ц300. Измерения проводились в режиме постоянного напряжения в интервале от -10 до 10 В, с шагом 0,5 В, с последующей регистрацией тока, протекающего 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

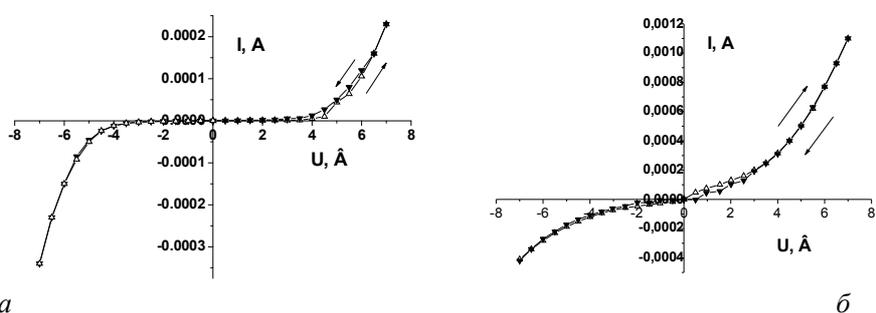


Рис.3. Вольт - амперные характеристики структур Cu/SiO<sub>2</sub>/Si при температурах 77 К (а) и 293 К (б).

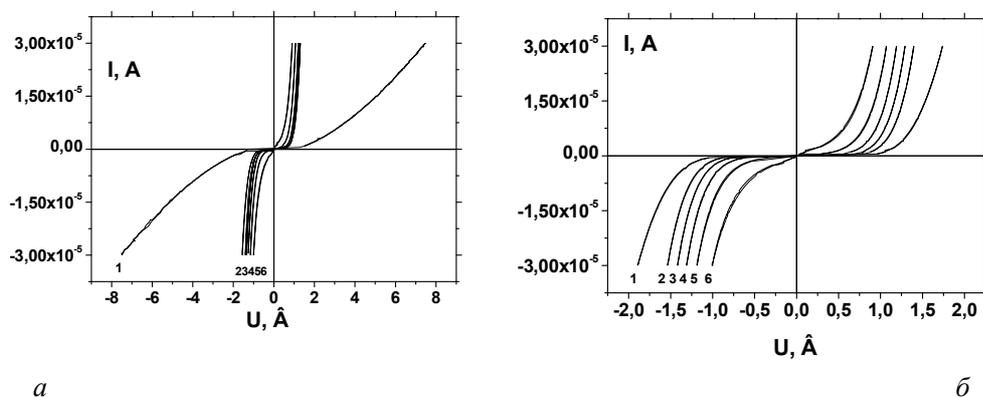


Рис.4. Вольт - амперные характеристики структур Ni/SiO<sub>2</sub>/Si без магнитного поля (а) и в магнитном поле 8 Тл (б) при температурах 25К (1), 50К (2), 100К (3), 150К (4), 200К (5), 250К (6), 310К (7).

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.

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 «Наноматериалы и нанотехнологии».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers. Ed. by Fink D., Springer. 2004. 63
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. V.B218. P.355 - 361
4. Fink D., Petrov A.V., Fahrner W.R., et al. // Intern. Journ. of Nanoscience. 2005. V.4. P.965 – 973
5. Ivanova Yu.A., Ivanou D.K., Fedotov A.K., et al. // Journ. Mater. Sci. 2007. V.42. P.9163 – 9169