

НАНОСТРУКТУРЫ СИСТЕМ Si/SiO₂/МЕТАЛЛ С ТРЕКАМИ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Е.Ю. Канюков

Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск

В последнее время проводится интенсивное изучение физических свойств низкоразмерных систем и наноструктурных материалов, с целью создания разнообразных наноэлектронных устройств. В связи с этим представляет интерес технология треков быстрых тяжелых ионов, связанная с формированием узких и протяженных областей радиационного повреждения (латентных ионных треков), в результате воздействия на вещество высокоэнергетических ионов. Последующее травление латентных треков позволяет сформировать микро- и нанопоры, которые могут иметь цилиндрическую или коническую форму и размеры от 10 нм, в зависимости от параметров облучения, условий травления, а также типа подложки [1].

С научной и практической точки зрения, перспективно создание структур на подложке кремния с его оксидом, содержащим ионные треки, внутри которых посредством метода подпотенциального электрохимического осаждения формируются однородные нанокпозиции или многослойные наноструктуры с чередующимися слоями, состоящими из ферромагнитных и немагнитных металлов. При создании указанных систем целесообразно использовать разработанную ранее технологию TEMPOS («Tunable Electronic Material in Pores in Oxide on Semiconductors» – «Управляемый электронный материал с порами в оксиде на полупроводнике») [2-3].

Результаты исследования таких структур могут стать основой для моделирования электронных устройств обладающих нелинейными вольт-амперными характеристиками, в том числе отрицательным дифференциальным сопротивлением и барьером Шоттки. Помимо этого, реализация сформулированной выше идеи позволит создавать высокочувствительные сенсоры магнитного поля и использовать систему Si/SiO₂/металл для формирования массива электронных эмиттеров.

Для создания структуры использовались подложки в виде монокристаллических пластин n-Si. Оксид кремния на них формировался путем термического окисления. Латентные ионные треки в слое SiO₂ создавались путем их облучения ионами ¹⁹⁷Au²⁶⁺ с энергией 350 МэВ и флюенсом $5 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ на циклотроне с использованием камеры облучения «BIBER» (Центр технологий ионных пучков Хан-Майтнер-Института, г.Берлин, Германия). Травление латентных треков в плавиковой кислоте приводило к образованию стохастически распределенных пор в виде усеченных конусов с диаметрами оснований 150-250 нм на поверхности SiO₂ и 100-200 нм на границе с Si. Их высота соответствовала толщине слоя SiO₂, которая после травления составляла порядка 200 нм.

Заполнение нанопор металлами (медью и никелем), проводилось методом подпотенциального электрохимического осаждения из растворов 0,5 моль/л H₃BO₃ + 0,005 моль/л CuSO₄ – для меди и 0,5 моль/л H₃BO₃ + 0,5 моль/л NiSO₄ – для никеля. Данный метод характеризуется высоким уровнем контроля процесса, включая варьирование структурных параметров, таких как размеры кластера, толщина слоя, последовательность слоев и морфология осаждаемого материала и позволяет

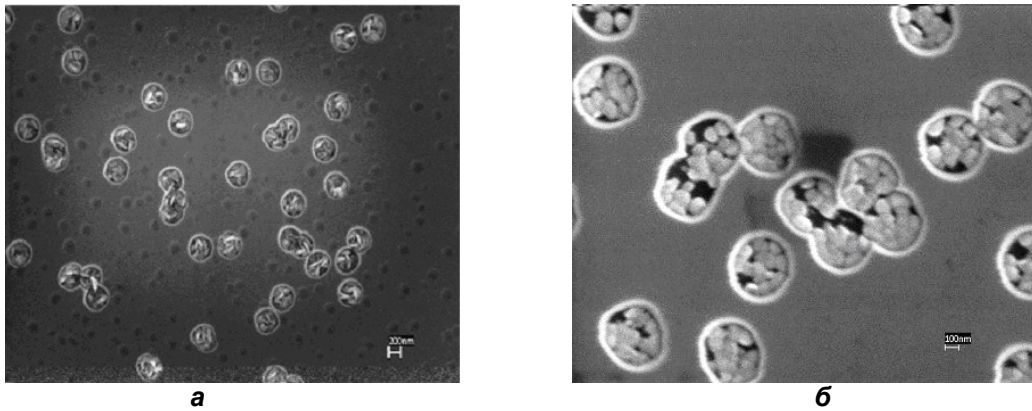


Рис. 1. Изображения сканирующей электронной микроскопии нанокластеров Cu (а) и Ni (б), осажденных в ионные треки (нанопоры) слоя SiO₂.

формировать нанокластеры металлов, диэлектриков и полупроводников, а также их чередующиеся слои [4-5].

Результаты осаждения меди в нанопоры оксида кремния по данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рис.1, показали, что метод подпотенциального электрохимического осаждения обеспечивает селективное заполнение металлами областей ионных треков.

Эти результаты были подтверждены исследованиями поверхности полученных структур методом сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), рис.2. Видно, что при выбранном режиме осаждения (потенциал электрода минус 0,5 В, время – 120 сек.) происходит не только заполнение каналов ионных треков, но формирование выростов над ними на поверхности SiO₂.

Для проведения измерений вольт-амперных характеристик исследуемых структур на поверхность образца методом ультразвуковой пайки наносились индиевые электроды (см. вставку на рис.3). Данный метод нанесения электродов обеспечил омичность контакта, его механическую прочность и повторяемость результатов. Результаты измерений структуры n-Si/SiO₂/Cu, представленные на рисунке 3, свидетельствуют о наличии в системе металл-диэлектрик-полупроводник барьеров Шоттки.

Кроме возможности использования данных структур в сенсорной технике [6] перспективно применение системы n-Si/SiO₂/Ni для формирования массива электронных эмиттеров на базе углеродных нанотрубок (УНТ). Выбор никеля обусловлен тем, что он используется в качестве катализатора при последующем синтезе УНТ методом термического разложения химических соединений. Предыдущие исследования,

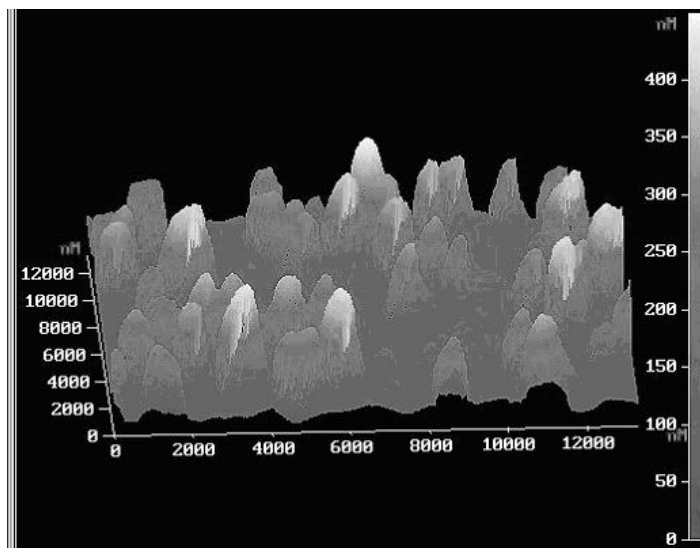


Рис. 2. Изометрическое изображение поверхности SiO₂ с ионными треками, заполненными Cu (метод СЗМ).

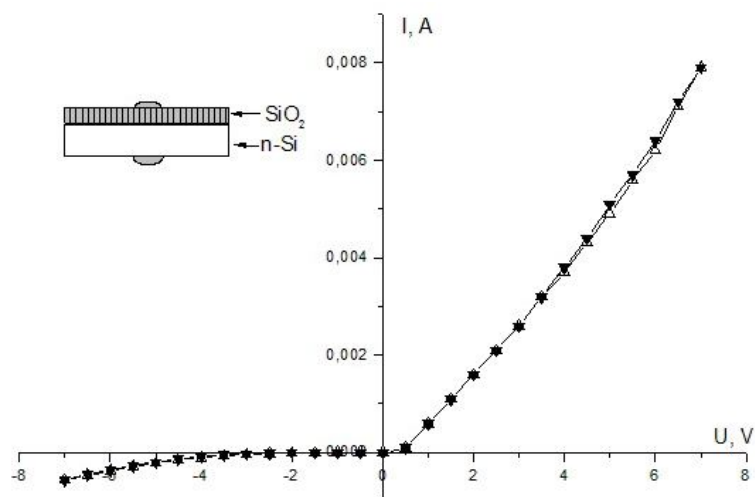


Рис. 3. ВАХ структуры n-Si/SiO₂/Cu.

проведенные в Институте неорганической химии им. А.В.Николаева СО РАН (Новосибирск) показали, что для эффективного синтеза УНТ необходимо заполнение конических ионных треков никелем не на всю их глубину. При полном заполнении треков нанокластерами никеля УНТ растут вдоль поверхности диэлектрического слоя (рис. 4). Для формирования же массива электронных эмиттеров на основе исследуемых структур необходимо, чтобы УНТ были ориентированы перпендикулярно поверхности образца, что может быть достигнуто лишь в том случае, когда направление роста задается узким каналом незаполненной никелем части трека. Таким образом, задача заключалась в заполнении ионных треков нанокластерами Ni примерно на 1/3 и 1/2 их глубины.

Несмотря на то, что технология электрохимического осаждения металлов хорошо отработана, эксперименты по осаждению никеля в ионные треки на 1/3 и 1/2 глубины ионного трека (т.е. примерно на 70 нм и 100 нм, соответственно) до настоящего времени не проводились. После проведения серии экспериментов по осаждению никеля в разных режимах были подобраны следующие параметры: для осаждения нанокластеров никеля на 1/3 глубины ионного трека – 30 сек. и 60 сек. для заполнения на 1/2 глубины соответственно при потенциале электрода минус 1.2 В.

На рис. 5 приведены изображения поверхностной структуры образцов с нанокластерами никеля в ионных треках, полученные на сканирующем электронном микроскопе. Сравнение данных изображений подтверждает не полное заполнение ионных треков примерно на 1/3 (рис. 5 а) и 1/2 их глубины (рис. 5 б).

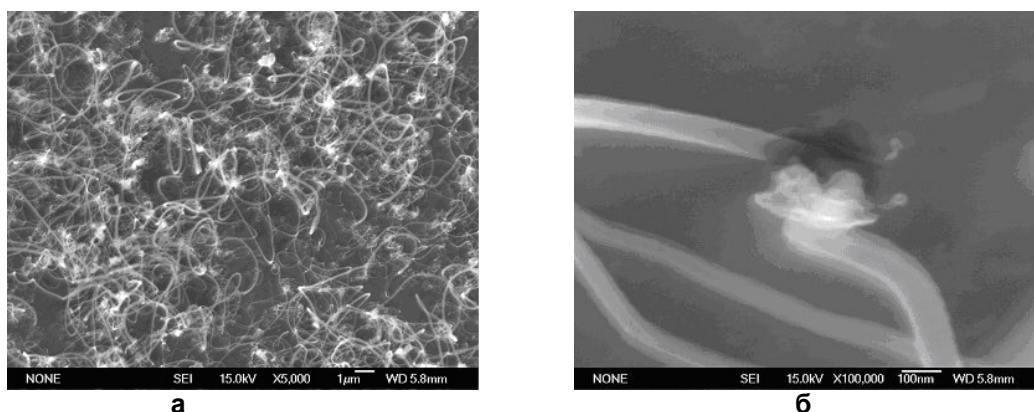


Рис. 4. Изображения сканирующей электронной микроскопии поверхности образца n-Si/SiO₂ с углеродными нанотрубками, выращенными в ионных треках, полностью заполненных никелем: а – общий вид; б – фрагмент структуры [7].

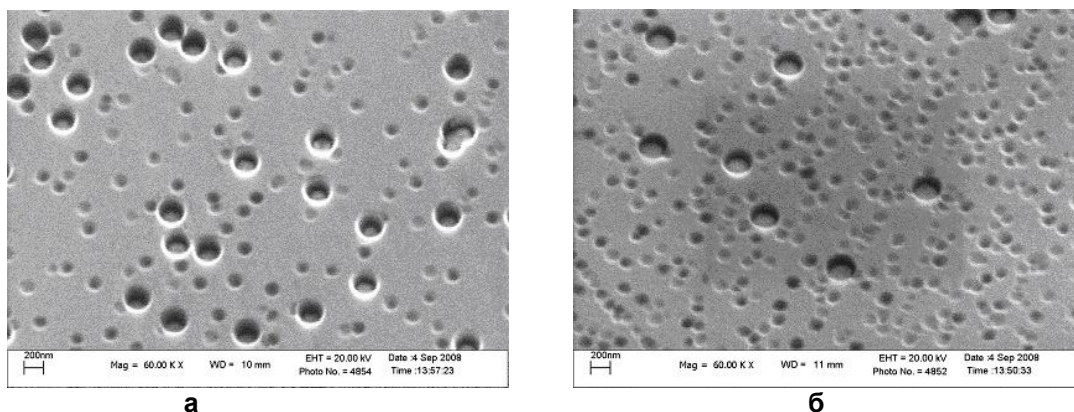


Рис. 5. Изображения СЭМ нанокластеров Ni в треках слоя SiO₂ при сканировании под углом 30° к поверхности образца: а – время осаждения 30 сек.; б – 60 сек.

ВЫВОДЫ

1. Используя ионно-трековую технологию, созданы структуры n-Si/SiO₂ с нанопорами в слое оксида кремния, заполненными частицами Cu и Ni.
2. Методами СЭМ и СЗМ показано, что электрохимическое подпотенциальное осаждение обеспечивает селективность заполнения нанопор металлами и возможность контроля степени заполнения пор путем варьирования параметров осаждения.
3. Результаты измерения электрофизических характеристик свидетельствуют о нелинейности ВАХ и существовании барьеров Шоттки, типичных для систем металл-диэлектрик-полупроводник.
4. Определены параметры контролируемого неполного заполнения пор никелем, что позволяет синтезировать ориентированные перпендикулярно слоя SiO₂ углеродные нанотрубки.

Автор признателен Д.К. Иванову (БГУ г.Минск) за помощь в проведении подпотенциального электрохимического осаждения металлов в ионные треки.

Данное исследование выполнено при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф08Р-077) и Президиума НАН Беларуси (молодежный грант автора).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers. Ed. by Fink D. // Heidelberg. Springer Series in Materials Science. V.63. 2004
2. Fink D., Petrov A.V., Hoppe K., Fahrner W.R., Papaleo R. M., Berdinsky A.S., Chandra A., Chemseddine A., Zrineh A., Biswas A., Faupel F., Chadderton L.T. Etched Ion Tracks in Silicon Oxide and Silicon Oxynitride as Charge Injection or Extraction Channels for Novel Electronic Structures // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2004, V.B 218, p. 355-361.
3. Fink D., Petrov A.V., Fahrner W.R., Hoppe K., Papaleo R.M., Berdinsky A.S., Chandra A., Zrineh A., Chadderton L.T. Ion Track-Based Nanoelectronics // International Journal of Nanoscience, 2005, V.4, Nos. 5-6, p.965 – 973.
4. Ivanou D., Streltsov E.A., Fedotov A.K., Mazanik A.V., Fink D., Petrov A.V. Electrochemical Deposition of PbSe and CdTe Nanoparticles onto p-Si (100) Wafers and into Nanopores in SiO₂/Si (100) Structure // Thin Solid Films, 2005, V.490, p.154 – 160.
5. Ivanova Yu.A., Ivanou D.K., Fedotov A.K., Streltsov E.A., Demyanov S.E., Petrov A.V., Kaniukov E.Yu., Fink D., Electrochemical Deposition of Ni and Cu onto Monocrystalline n-Si(100) Wafers and into Nanopores in Si/SiO₂ Template // Journal of Materials Science, 2007, V.42, No.22, p.9163–9169.
6. Канюков Е.Ю., Петров А.В., Демьянов С.Е., Иванова Ю.А., Иванов Д.К., Стрельцов Е.А., Федотов А.К., Fink D., Fahrner W.R., Физические принципы создания наносенсоров на основе систем Si/SiO₂/металл с треками быстрых тяжелых ионов // Сборник докладов международной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела», 23-26 октября 2007 г., Минск, Беларусь, том 2, с.384-388.
7. Окотруб А.В. Частное сообщение.