

УДК 537.311.322: 621.763

Канюков Е.Ю., Павленко А.А.

Руководитель Демьянов С.Е., доктор физ.-мат. наук

**Низкотемпературные сенсоры магнитного поля на
основе гетероструктур Si/SiO₂/Ni**

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Предложены принципы работы низкотемпературных сенсоров магнитного поля на основе гетероструктур Si/SiO₂/Ni, полученных с использованием метода треков быстрых тяжелых ионов, и представлены данные их электрических характеристик. Описаны перспективы создания сенсоров с использованием структур с чередующимися слоями из ферромагнитных и немагнитных металлов в нанопорах и концепции «TEMPOS».

Важной составной частью многих электронных устройств, определяющей их надежность и точность, являются датчики физических характеристик, многие из которых определяются при детектировании магнитных полей. В связи с широким использованием кремниевой технологии актуально создание сенсоров магнитного поля на подложке кремния. Одним из перспективных направлений формирования таких сенсоров является технология ионных треков, использующаяся для создания нанопор в оксидированном кремнии [1].

Формы и размеры пор задаются параметрами ионного облучения (энергия, флюенс, тип иона) и условиями травления. В порах посредством метода электрохимического осаждения формируются однородные композиции или многослойные структуры с чередующимися слоями из ферромагнитных и немагнитных металлов.

В настоящей работе для создания гетероструктуры Si/SiO₂/металл в качестве подложек использовались монокристаллические пластины n-Si ориентации в плоскости (100). Оксид кремния толщиной 700 нм формировался путем

термического окисления, после чего латентные ионные треки в слое SiO_2 создавались путем облучения ионами $^{197}\text{Au}^{26+}$ с энергией 350 МэВ и флюенсом $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Последующее травление образцов в плавиковой кислоте приводило к образованию стохастически распределенных пор при одновременном уменьшении толщины оксида кремния [2–3]. Они посредством электрохимического осаждения заполнялись никелем, причем выбор типа электролита и метода осаждения определялся необходимостью селективного осаждения металла в поры [2].

Структура полученных образцов изучалась на сканирующем электронном микроскопе «LEO-1455VP» (СЭМ) и атомном силовом микроскопе «Solver P47» (АСМ). Изучение поверхности образцов n-Si/SiO₂/Ni при помощи СЭМ показало, что никель не образует сплошной пленки на поверхности SiO₂, а селективно осаждается в поры, образуя выступы над поверхностью оксида кремния (рис. 1а).

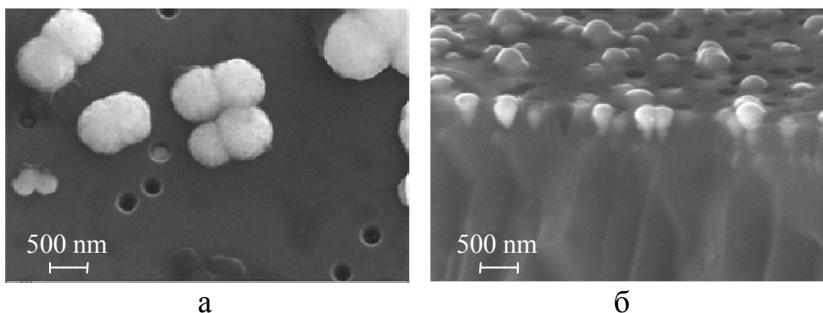


Рисунок 1 — Изображения СЭМ: а) поверхность образца, б) скол.

Анализ результатов СЭМ позволяет оценить: латеральные размеры пор, которые лежат в интервале 150–250 нм; плотность их распределения ($\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$); определить среднее расстояние между порами ($\sim 500 \text{ нм}$). На рисунке 1б представлен скол перпендикулярно поверхности образца, который позволяет определить: толщину оксида кремния ($\sim 350\text{--}450 \text{ нм}$); что поры имеют форму конуса с конусностью $\sim 30\text{--}35^\circ$; на границе

раздела n-Si/SiO₂ контакт металла с кремнием составляет всего несколько нм; поры, которые не достигают поверхности кремния, не заполнены металлом.

Изображение, представленное на рисунке 2, получено при сканировании поверхности исследуемой структуры методом АСМ. Видно, что выросты никеля над поверхностью SiO₂ достигают 300 нм.

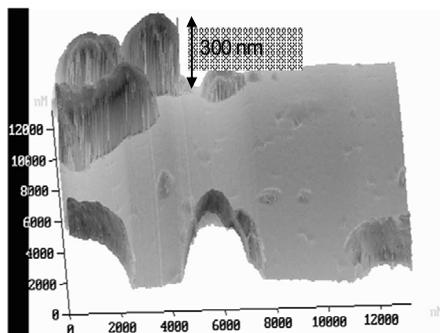


Рисунок 2 – Скан поверхности структуры Si/SiO₂/Ni методом атомной силовой микроскопии

Для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) на поверхность образцов, содержащих заполненные металлом поры, методом ультразвуковой пайки наносились индиевые электроды. Данный метод нанесения электродов обеспечил омичность контакта, его механическую прочность и, соответственно, повторяемость результатов. Схематическое изображение гетероструктуры с нанесенными контактами представлено на рисунке 3.

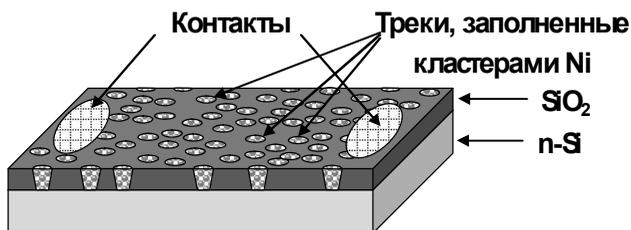


Рисунок 3 – Общий вид гетероструктуры и схема расположения контактов.

Измерения ВАХ проводились в режиме постоянного напряжения в интервале от -5 до 5 В с шагом 0,25 В на установке ИППП-1 при $T=300$ К и $T=77$ К. На рисунке 4 представлены результаты измерения ВАХ при протекании тока по схеме металл-полупроводник-металл.

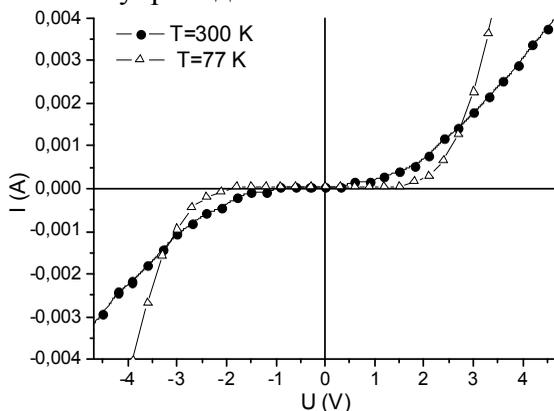


Рисунок 4 – ВАХ исследуемого образца при комнатной температуре и при температуре жидкого азота

Характеристики симметричны при обоих направлениях тока, и ВАХ проявляют зависимости, типичные для двухбарьерных структур, свидетельствуя о наличии барьеров Шоттки в области контакта металлических кластеров с кремниевой подложкой. Как видно из данного рисунка, зависимости качественно подобны друг другу, но при азотных температурах нелинейность ВАХ проявляется при более высоких напряжениях и имеет более резкий характер, что связано с более высоким сопротивлением на барьере. Это объясняется тем, что с ростом температуры электроны в полупроводниковом слое вблизи барьера Шоттки возбуждаются на более высокие энергетические уровни и, соответственно, вероятность туннельного прохождения барьера возрастает.

В интервале температур 4-50 К и в поперечных магнитных полях проводились измерения электро- и магнетосопротивления в режиме заданного тока на универсальной измерительной

системе фирмы „Cryogenic Limited“. Погрешность измерений во всем интервале температур не превышала 5 %.

Температурные зависимости электросопротивления имеют схожий вид как в нулевом магнитном поле, так и в поле 12 Тл (рис.5а). Видно, что при понижении температуры во всем исследованном интервале наблюдается экспоненциальное возрастание электросопротивления гетероструктуры Si/SiO₂/Ni.

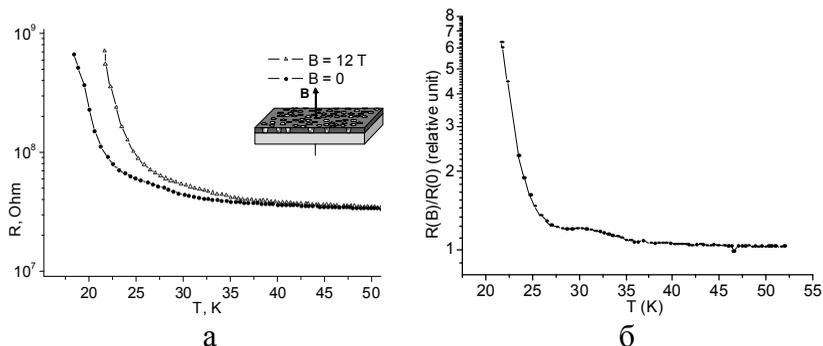


Рисунок 5 – а) температурные зависимости сопротивления в нулевом магнитном поле и в поле 12 Тл, б) относительное магнетосопротивление.

При температурах ниже 50 К электроперенос частично осуществляется через металлические кластеры в порах (~ 20 – 25 % пути между электродами), а между порами – в приповерхностных слоях кремния, которые содержат локализованные состояния. Подробно механизмы проводимости в таких гетероструктурах рассмотрены в работе [4].

Температурная зависимость относительного магнетосопротивления свидетельствует, что $R(B)/R(0)$ имеет положительное значение, растущее с понижением температуры и достигающие при $T < 25$ К значения 600 % (рис.5б) Такая величина магнетосопротивления свидетельствует о перспективе использования данных структур в приборах и аппаратах космического применения с жидководородным охлаждением.

Дальнейшая перспектива работы с гетероструктурами Si/SiO₂/металл с целью расширения температурного интервала существования магниторезистивного эффекта может быть реализована двумя способами. Первый из них связан с созданием многослойных структур с чередующимися слоями из ферромагнитных и немагнитных металлов в порах [5]. Второй предусматривает применение технологии TEMPOS («Tunable Electronic Material in Pores in Oxide on Semiconductors» – «Управляемый Электронный Материал с Порами в Оксиде Кремния») [6]. Применительно к нашему случаю схема TEMPOS-структуры представлена на рисунке 5.

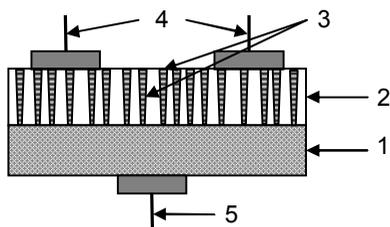


Рисунок 5 – Принципиальная схема TEMPOS-структуры.

(1) подложка Si, (2) слой SiO₂, (3) каналы ионных треков заполненные металлом (-ами), (4) электрические контакты на SiO₂, (5) управляющий контакт на Si.

TEMPOS-структуры проявляют свойства схожие со свойствами электронных устройств типа МОП-структур, обладающих нелинейными вольт-амперными характеристиками, в том числе отрицательным дифференциальным сопротивлением. В тоже время TEMPOS - структуры имеют дополнительные свободные параметры, такие как форма и плотность протравленных треков, положение, высота, диаметр, и тип материала, внедренного в треки. Это дает более широкие возможности для создания микро- и нанoeлектронных устройств. Например, более сложная внутренняя структура TEMPOS по сравнению с традиционными электронными элементами, упрощает проектирование TEMPOS-содержащих схем. Уменьшение числа периферийных элементов приводит к

выигрышу в скорости функционирования и к большей надежности, в первую очередь, к радиационной стойкости. Добавка небольшого числа каналов передачи заряда при облучении к $\sim 10^8$ уже существующим (т.е. ионным трекам) не окажет существенного влияния на характеристики.

Авторы признательны Е.А. Стрельцову и Д.К. Иванову (БГУ) за проведение электрохимического осаждения никеля в ионные треки и Е.К. Белоногову (ВГТУ) за проведение АСМ.

Данное исследование выполнено при поддержке НТП Союзного государства «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» («Нанотехнология-СГ», договор № 4.2.1).

Список литературы

- 1) D. Fink, et al. // Nucl. Instr. Meth., B218 (2004) 355
- 2) Ivanova Yu.A., et al. // Journal of Materials Science, 2007, V.42, No.22, p.9163–9169.
- 3) Демьянов С.Е., и др. // Известия РАН. Серия Физическая, 2008, том 72, №9, с.1262-1264.
- 4) Канюков Е.Ю., Демьянов С.Е. // «Материаловедение» №6, с.53-58.
- 5) Ведяев А.В., Грановский А.Б. // Природа. 1995. № 8. с. 72–79
- 6) A.V. Petrov, et al. // “Physics, Chemistry and Application of Nanostructures” (Materials of the “Nanomeeting – 2005”), 544 (2005)