

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СЕНСОРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР Si/SiO₂/Ni ДЛЯ АППАРАТУРЫ БОРТОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ

¹С.Е. Демьянов, ¹Е.Ю. Канюков, ¹А.В. Петров, ²Е.К. Белоногов
¹НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск;
²Воронежский государственный технический университет, Россия

Методами оптической микроскопии проведены исследования гетероструктур Si/SiO₂/Ni, полученных с использованием метода треков быстрых тяжелых ионов. На основании результатов исследования электрических и магниторезистивных характеристик установлено наличие положительного магнитосопротивления, растущего с понижением температуры и достигающего при T ~25 К величины 600 %, что перспективно для создания высокочувствительных сенсоров магнитного поля для аппаратуры бортового применения, функционирующей при жидководородном охлаждении.

Введение

В настоящее время решаются задачи, связанные с изучением взаимосвязи физических свойств материалов с особенностями их кристаллической и дефектной структур в условиях таких внешних воздействий, как температура, магнитное поле, облучение и др. Результаты таких исследований являются основой для создания многокомпонентных гетероструктур, а их изучение во многом связано с пониманием процессов, протекающих на границах раздела между слоями материалов с различной степенью и типом проводимости. Рост затрат на производство современных электронных приборов приводит к необходимости поиска новых альтернативных технологий, позволяющих существенно уменьшить размеры и повысить чувствительность функциональных устройств. Актуальность такого направления определяется возможностью создания структур наноразмерного масштаба на базе традиционной кремниевой технологии.

Как показали исследования последнего десятилетия, хорошие перспективы имеет технология создания структур с использованием метода треков быстрых тяжелых ионов (БТИ), позволяющего формировать узкие протяженные области радиационного повреждения (латентные ионные треки) при воздействии на вещество ионов с высокой энергией. Последующее травление латентных треков приводит к образованию в поверхностном слое структуры стохастически распределенных нанопор, форма и размеры которых задается выбором параметров облучения и травления [1]. Как показали предыдущие исследования [2], такие нанопоры целесообразно создавать в слое оксида кремния на подложке кремния. Они после селективного заполнения различными металлами и/или их композициями позволяют сформировать гетероструктуры с различными электропроводящими характеристиками, весьма чувствительными к температуре и магнитному полю. Интерес к такого рода системам определяется возможностью их использования в качестве рабочего элемента в сенсорных устройствах, в связи с чем исследования, проведенные в данной работе по изучению электрофизических свойств структур Si/SiO₂/Ni, представляются актуальными. Для определения возможности и использования в качестве устройств, детектирующих магнитное поле, проведены исследования их транспортных свойств в магнитных полях различной напряженности. Полученные ре-

зультаты позволят разработать технологические и конструктивные аспекты создания рабочего элемента сенсора магнитного поля.

1. Методика получения структур Si/SiO₂/Ni

В качестве рабочего элемента сенсора магнитного поля выбраны гетероструктуры n-Si/SiO₂/металл, для создания которых в качестве подложек использовались монокристаллические пластины n-Si ориентации в плоскости (100). Аморфный оксид кремния толщиной 700 нм формировался по методике термического (пирогенного) окисления, после чего латентные треки в слое SiO₂ создавались путем облучения ионами ¹⁹⁷Au²⁶⁺ с энергией 350 МэВ и флюенсом $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, проведенного в исследовательском центре GSI (Дармштадт, Германия). Такой энергии ионов золота достаточно для прохождения слоя SiO₂ с созданием в нем высокодефектных областей. Проникновение ионов золота в кремниевую подложку не вызывает образования в ней латентных треков, вследствие эпитаксиального восстановления поврежденных участков. Введенное количество примеси золота на много порядков меньше, чем концентрация фосфора в n-Si марки КЭФ 4,5, и поэтому не может внести заметный вклад в процесс электропереноса.

Последующая обработка структур в плавиковой кислоте приводила к формированию стохастически распределенных, протравленных вплоть до кремниевой подложки треков (пор) в оксиде кремния, при общем уменьшении толщины SiO₂ [3, 4]. Далее поры электрохимическим методом заполнялись никелем, причем выбор типа электролита и параметров осаждения определялся с целью добиться селективного осаждения металла непосредственно и только в протравленные треки [3].

2. Исследование морфологии структуры рабочего элемента сенсора

Исследование морфологии структуры рабочего элемента сенсора проводилось на металлографическом оптическом микроскопе OLYMPUS GX41 (ОМ), сканирующем электронном микроскопе LEO-1455VP (СЭМ) и атомно-силовом микроскопе Solver P47 (АСМ).

Предварительная диагностика структур Si/SiO₂/Ni проводилась методом оптической микроскопии. Оценка результатов ОМ свидетельствует о том, что плотность распределения протравленных треков, заполненных никелем, на единицу площади коррелирует по порядку величины с флюенсом облучения $5 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$, однако имеет меньшие значения $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$ со средним расстоянием между порами $\sim 700 \text{ нм}$. Такое несоответствие с флюенсом облучения вероятно связано с тем, что оксид кремния, как и все аморфные вещества, обладает неоднородной плотностью, в связи с чем не все латентные треки в результате травления преобразуются в поры на всю толщину SiO₂. Хотя возможности оптической микроскопии не позволяют определить размеры и геометрию пор, тем не менее, она подтверждает селективность заполнения и показывает степень заполнения поры. Анализ изображений боковых сколов образцов показывает, что высота заполнения пор металлом соответствует толщине слоя SiO₂, а в некоторых случаях даже образуются небольшие «холмики» над поверхностью оксида кремния.

По данным СЭМ были определены форма и латеральные размеры пор (рис. 1). Поры представляют собой усеченные конусы с конусностью $\sim 30\text{--}35^\circ$ и диаметрами 200–250 нм на поверхности SiO₂ и 50–100 нм на границе с кремнием, а высота конусов соответствует толщине оксида кремния ($\sim 350\text{--}450 \text{ нм}$). На границе раздела n-Si/SiO₂ контакт металла с кремнием составляет несколько десятков нанометров и, как было показано ранее, никель осаждается в поры в виде контактирующих между собой кластеров с размерами 30–50 нм [3].

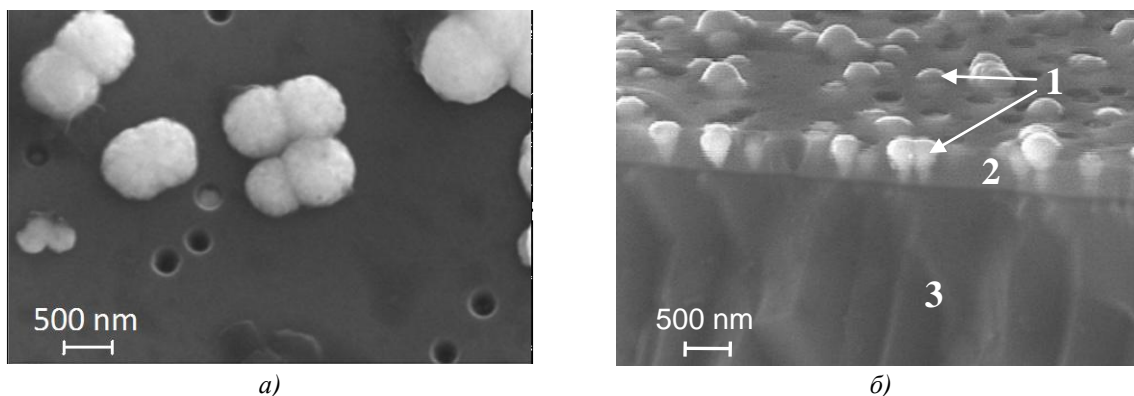


Рис. 1. Изображения СЭМ: *а)* поверхность образца; *б)* скол (1 – никель, осажденный в поры оксида кремния, 2 – слой оксида кремния, 3 –подложка кремния)

Градиентное изображение поверхности SiO_2 с заполненными металлом порами, полученное методом АСМ (рис. 2, *а)*, отражает изменение ее рельефа и свидетельствует о формировании выростов Ni над слоем SiO_2 . Гистограмма распределения высот в пределах сканируемого участка (рис. 2, *б)* указывает на то, что выросты осажденного металла находятся в диапазоне от 10 до 60 нм, а при наиболее вероятном значении (90 %) – от 20 до 40 нм.

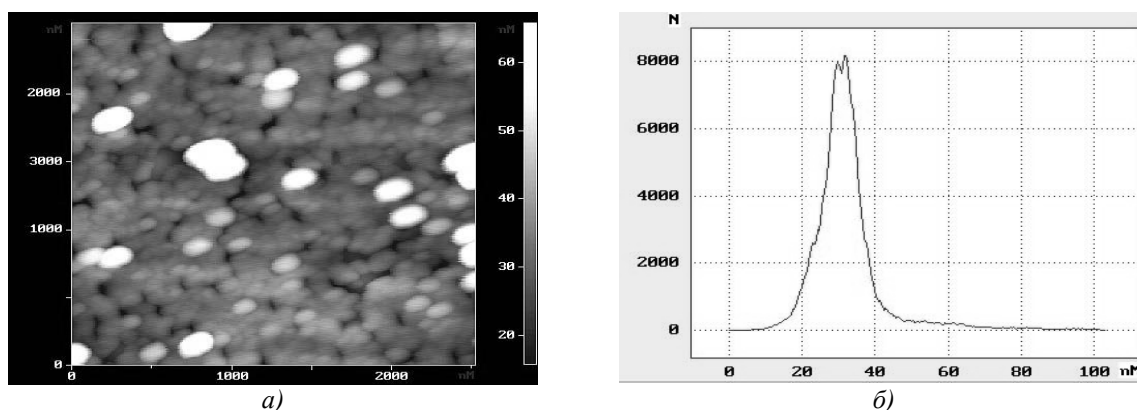


Рис. 2. Изображения АСМ: *а)* изометрическое изображение поверхности образца; *б)* гистограмма распределения высот над поверхностью SiO_2 в пределах сканируемого участка

3. Исследование электрофизических характеристик рабочего элемента сенсора

Для определения перспективности использования гетероструктур Si/SiO₂/металл в качестве рабочего элемента сенсора магнитного поля необходимо было провести комплексные исследования электрофизических характеристик в широком интервале температур (4–300 К) и в магнитных полях до 12 Тл. Для проведения таких исследований на поверхность образцов, содержащих заполненные металлом поры, методом ультразвуковой пайки наносились индиевые электроды для обеспечения протекания тока по схеме металл-полупроводник-металл. Данный метод нанесения электродов обеспечил омичность контакта, его механическую прочность и, соответственно, повторяемость результатов. Схематическое изображение гетероструктуры с нанесенными контактами представлено на рис. 3.

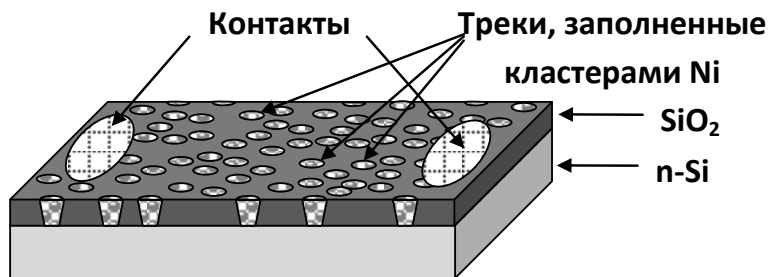


Рис. 3. Общий вид гетероструктуры и схема расположения контактов

Измерения вольт-амперных характеристик (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. Полученные ВАХ проявляют зависимости, типичные для структур с барьером Шоттки в области контакта металлических кластеров с кремниевой подложкой, а их симметрия при обоих направлениях тока свидетельствует о наличии двойного барьера при протекании тока по схеме никель-кремний-никель [5]. Зависимости при различных температурах качественно подобны друг другу, однако при азотных температурах нелинейность ВАХ проявляется при больших напряжениях и имеет более резкий характер, что связано с повышением сопротивления на барьере при понижении температуры.

Измерения электро- и магнитосопротивления в режиме заданного тока были проведены на универсальной измерительной системе фирмы Cryogenic Limited в интервале температур $4-300$ К в поперечных магнитных полях до 12 Тл с погрешностью измерений, не превышающей 5% . Исследования показали, что зависимости сопротивления от температуры имеют схожий вид как в нулевом магнитном поле, так и в поле 12 Тл, (рис. 4). При понижении температуры во всем исследованном интервале наблюдается уменьшение проводимости структуры $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Ni}$, что характерно для полупроводников. Однако вид зависимостей $R(T)$ в целом значительно более сложный и условно может быть разделен на три температурных интервала: I – $300-210$ К, II – $210-50$ К, III – $50-18$ К. В первом температурном интервале имеет место параболическое увеличение электросопротивления, которое выходит на насыщение при температуре порядка 240 К. При $T = 210$ К наступает резкий перегиб, после которого сопротивление начинает снова возрастать по параболе с тенденцией к насыщению, начиная с температур ~ 60 К. В третьем температурном интервале наблюдается экспоненциальный рост сопротивления с переходом кремния в диэлектрическое состояние при температурах ниже 20 К.

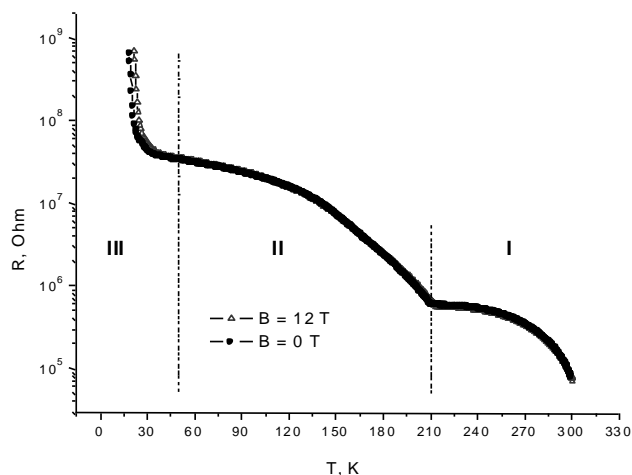


Рис. 4. Температурные зависимости сопротивления в нулевом магнитном поле и в поле 12 Тл

Наибольший интерес с точки зрения сенсорных возможностей гетероструктуры представляет третий температурный интервал, так как при температурах ниже 50 К начинает проявляться магниторезистивный эффект (рис. 5). По всей видимости, это обусловлено тем, что электроперенос частично осуществляется через металлические кластеры в порах (а это ~ 20 % токового пути), а между порами – в приповерхностных слоях кремния, которые содержат локализованные состояния. Подробно механизмы проводимости в таких гетероструктурах рассмотрены в работе [5].

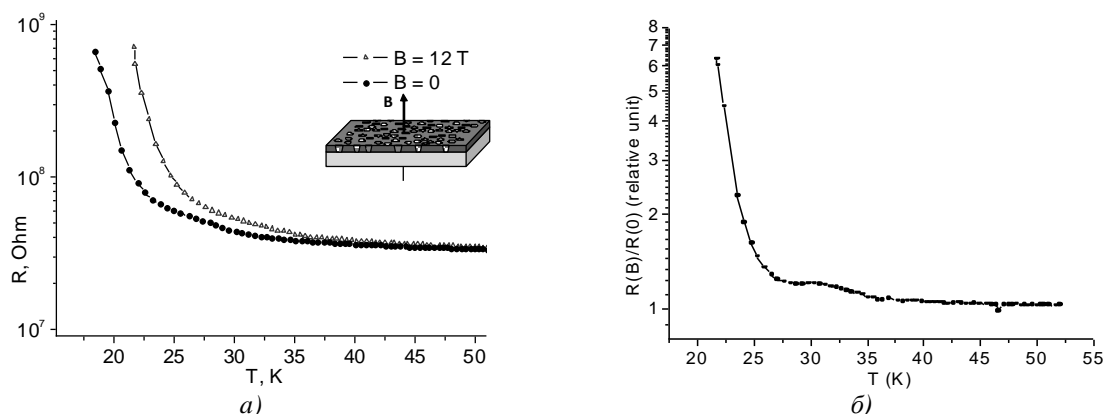


Рис. 5. Температурные зависимости сопротивления в нулевом магнитном поле и в поле 12 Тл (а); относительное магнитосопротивление (б)

Температурная зависимость относительного магнитосопротивления свидетельствует, что $R(B)/R(0)$ имеет положительное значение, растущее с понижением температуры и достигающие при $T < 25$ К значения 600 %. Такая величина магнитосопротивления свидетельствует о перспективе использования данных структур в приборах и аппаратах космического применения, функционирующих при температуре переохлажденного водорода (20–25 К). Кроме того, от устройств, созданных с применением технологии треков БТИ, следует ожидать высокой радиационной стойкости, так как добавка небольшого числа каналов передачи заряда при облучении к $\sim 10^8$ уже существующим (т. е. ионным трекам) не должна оказывать существенного влияния на выходные характеристики.

Работа выполнена в рамках проекта 4.2.1 программы «Нанотехнология – СГ». Авторы признательны С. Trautmann (центр GSI, Дармштадт, Германия), Е.А. Стрельцову, Д.К. Иванову, Ю.А. Ивановой (БГУ, Минск) за подготовку образцов.

Список литературы

1. Fink, D. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers // Springer Series in Materials Science, Heidelberg, 2004. – Vol. 63. – P. 391.
2. Sinha, D. Tempos Structures with Gold Nanoclusters / D. Sinha [et al.] // Radiation Effects and Defects in Solids. – 2004. – Vol. 159, № 8-9. – P. 517–533.
3. Ivanova, Yu.A. Electrochemical Deposition of Ni and Cu onto Monocrystalline n-Si(100) Wafers and into Nanopores in Si/SiO₂ Template / Yu.A. Ivanova [et al.] // J. of Materials Science. – 2007. – Vol. 42, № 22. – P. 9163–9169.
4. Демьянов, С.Е. Наноструктуры систем Si/SiO₂/металл с треками быстрых тяжелых ионов / С.Е. Демьянов [и др.] // Известия РАН. Сер. «Физическая». – 2008. – Т. 72, № 9. – С. 1262–1264.
5. Канюков, Е.Ю. Особенности электропереноса в наноструктурах Si/SiO₂/Ni в сильных магнитных полях / Е.Ю. Канюков, С.Е. Демьянов // Материаловедение. – 2010. – № 6. – С. 53–58.