

РАЗРАБОТКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СЕНСОРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР Si/SiO₂/Ni

Канюков Е.Ю., Демьянов С.Е.

НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь

На основе исследования гетероструктур Si/SiO₂/Ni, полученных с использованием метода треков быстрых тяжелых ионов, представлены данные их электрических и магниторезистивных характеристик. Установлено наличие положительного магнитосопротивления, растущего с понижением температуры и достигающего при T~25 К величины 600 %, что позволяет создать высокочувствительные сенсоры магнитного поля для аппаратуры космического применения, функционирующей при жидководородном охлаждении. Определены перспективы создания сенсоров с использованием чередующихся слоев из ферромагнитных и немагнитных металлов в нанопорах и показана возможность применения концепции «Управляемого электронного материала с порами в оксиде кремния».

Введение

Современная наука решает задачи, связанные с изучением взаимосвязи физических свойств материалов (полупроводниковых, диэлектрических, магнитных и др.) с особенностями их кристаллической и дефектной структуры в условиях внешних воздействий (температура, магнитное поле, облучение и др.). Результаты таких исследований являются основой для создания низкоразмерных многокомпонентных гетероструктур, а их изучение во многом связано с пониманием процессов, на границах раздела между слоями различных 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 возможностями создания многослойных структур наноразмерного масштаба на базе традиционной кремниевой технологии, т.е. на основе монокристаллического кремния.

Как показали исследования последнего десятилетия, хорошие перспективы имеет технология создания структур с использованием метода треков быстрых тяжелых ионов, позволяющего формировать узкие протяженные обла-

сти 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 [1–3]. Как показали предыдущие исследования [4], такие нанопоры целесообразно создавать в слое оксида кремния на кремнии. После селективного заполнения различными металлами и/или их композициями они 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 их использования в качестве устройств, детектирующих магнитное поле, проведены исследования их транспортных свойств в магнитных полях различной напряженностью.

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

Получение и исследование морфологии структуры рабочего элемента сенсора

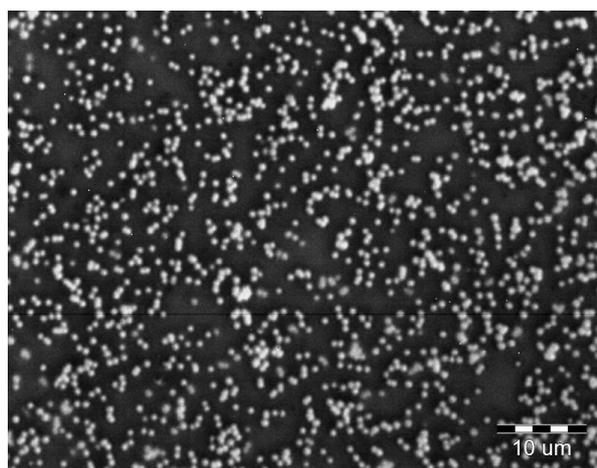
В качестве рабочего элемента сенсора магнитного поля выбраны гетероструктуры n -Si/SiO₂/металл, для создания которых в качестве подложек использовались монокристаллические пластины n -Si ориентации в плоскости (100). Аморфный оксид кремния толщиной 700 нм формировался по методике термического (пирогенного) окисления, после чего латентные треки в слое SiO₂ создавались путем облучения ионами ¹⁹⁷Au²⁶⁺ с энергией 350 МэВ и флюенсом $5 \cdot 10^8$ 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 ¹⁹⁷Au²⁶⁺ в кремниевую подложку не вызывает образование в ней латентных треков вследствие эпитаксиального восстановления поврежденных участков, происходящего за 10^{-8} с после облучения. 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 [5–6]. Далее поры электрохимическим методом заполнялись никелем, причем выбор типа электролита и параметров осаждения определялся целью добиться селективного осаждения металла непосредственно и только в протравленные треки [5].

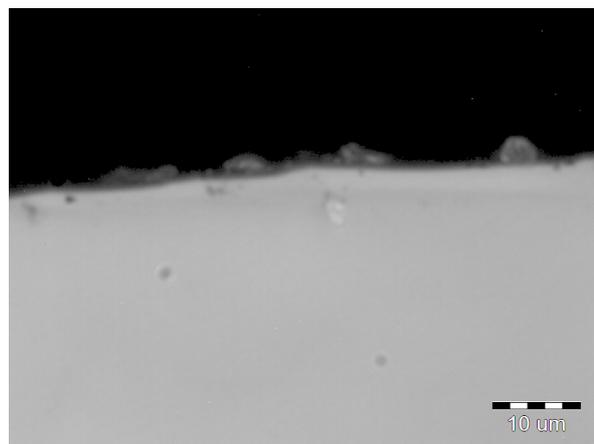
Исследование морфологии структуры рабочего элемента сенсора проводилось на металлографическом оптическом микроскопе «OLYMPUS GX41» (ОМ), сканирующем электронном микроскопе «LEO-1455VP» (СЭМ) и атомно-силовом микроскопе «Solver P47» (АСМ).

Оптическая микроскопия является оптимальным методом для предварительной диагностики структур Si/SiO₂/металл. Типичные изображения, полученные методом ОМ, приведены на рисунке 1. Оценка результатов ОМ свидетельствует о том, что плотность распределения протравленных треков, заполненных металлом, на единицу площади коррелирует по

порядку величины с флюенсом облучения $5 \cdot 10^8$ см⁻², однако имеет меньшие значения $\sim 10^8$ см⁻² со средним расстоянием между порами ~ 700 нм (рисунок 1а). 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 и в некоторых случаях даже образуются небольшие «холмики» над поверхностью оксида кремния (рисунок 1б).



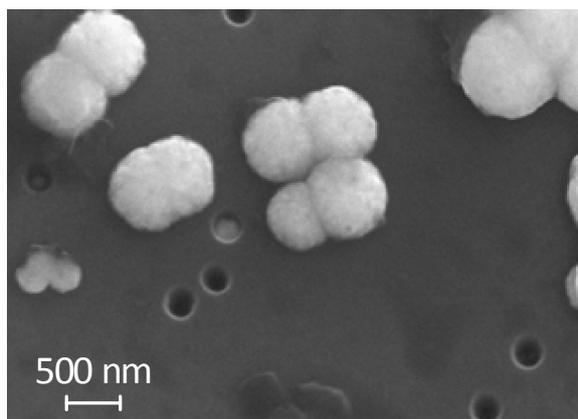
а



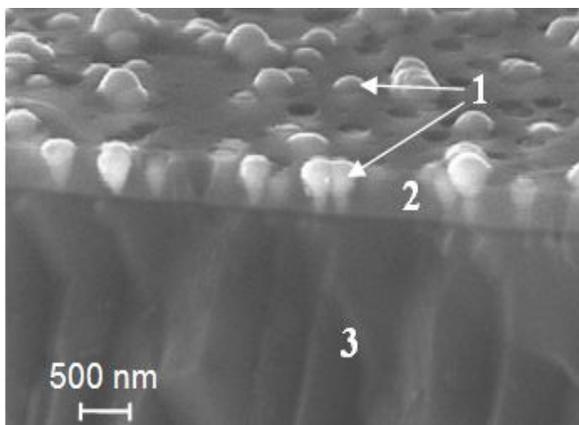
б

Рисунок 1 – Изображения ОМ: а – поверхность образца; б – скол

По данным СЭМ были определены форма и латеральные размеры пор (рисунок 2). Поры представляют собой усеченные конусы с конусностью $\sim 30\text{--}35^\circ$ и диаметрами 200–250 нм на поверхности SiO_2 и 50–100 нм на границе с кремнием, а высота конусов соответствует толщине оксида кремния ($\sim 350\text{--}450$ нм). На границе раздела $n\text{-Si}/\text{SiO}_2$ контакт металла с кремнием составляет несколько десятков нанометров и, как было показано ранее металл осаждается в поры в виде контактирующих между собой кластеров с размерами 30–50 нм [5].



а

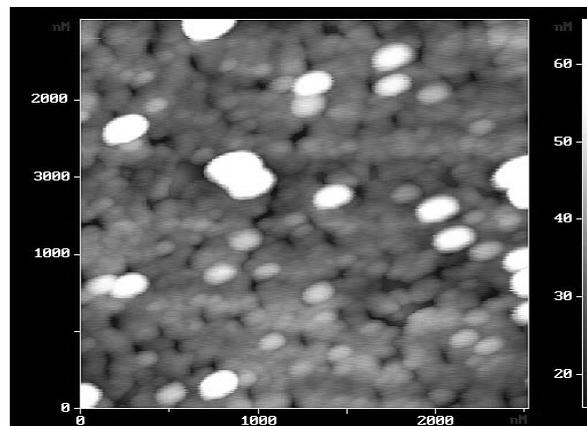


б

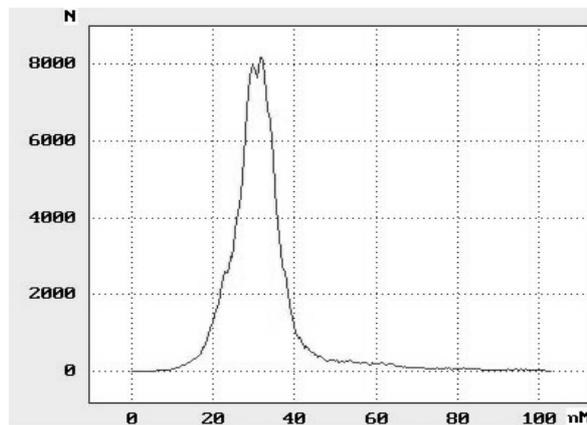
Рисунок 2 – Изображения СЭМ: а – поверхность образца; б – скол; 1 – никель, осажденный в поры оксида кремния; 2 – слой оксида кремния; 3 – подложка кремния

Градиентное изображение поверхности SiO_2 с порами заполненными металлом, полученное методом АСМ (рисунок 3а) отражает изменение ее рельефа и свидетельствует о формировании выростов металла над слоем SiO_2 . Гистограмма распределения высот в пределах

сканируемого участка (рисунок 3б) указывает на то, что выросты осажденного металла находятся в диапазоне от 10 до 60 нм при наиболее вероятном значении (90%) 20–40 нм.



а



б

Рисунок 3 – Изображения АСМ: а – изометрическое изображение поверхности образца; б – гистограмма распределения высот над поверхностью SiO_2 в пределах сканируемого участка

Исследование электрофизических характеристик рабочего элемента сенсора

Для определения перспективности использования гетероструктур $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{металл}$ 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–полупро-

водник–металл. Данный метод нанесения электродов обеспечил омичность контакта, его механическую прочность и, соответственно, воспроизводимость результатов.

Схематическое изображение гетероструктуры с нанесенными контактами представлено на рисунке 4.

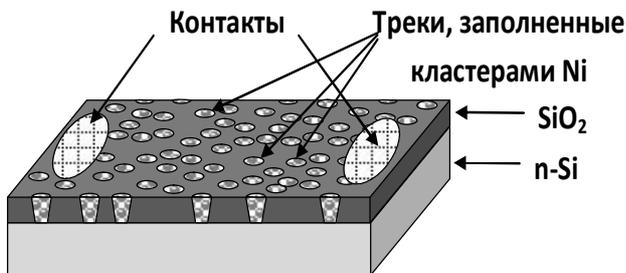


Рисунок 4 – Общий вид гетероструктуры и схема расположения контактов

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 (рисунок 5).

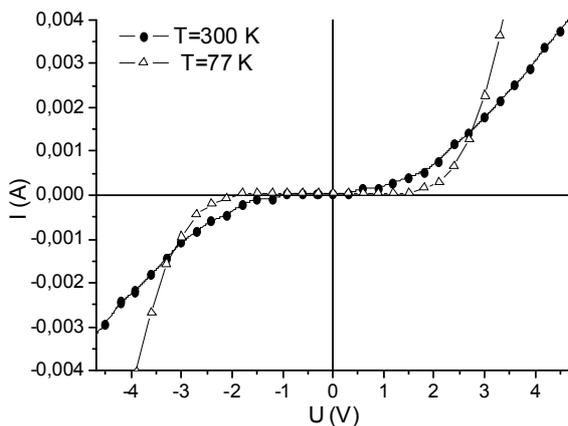


Рисунок 5 – ВАХ исследуемого образца при комнатной температуре и температуре жидкого азота

Видно, что 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. Это объясняется тем, что электроны в полупроводниковом слое вблизи барьера Шоттки опускаются на более низкие энергетические уровни и, соответственно, вероятность туннельного прохождения барьера уменьшается.

Измерения электро- и магнетосопротивления в режиме заданного тока 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 (рисунок 6).

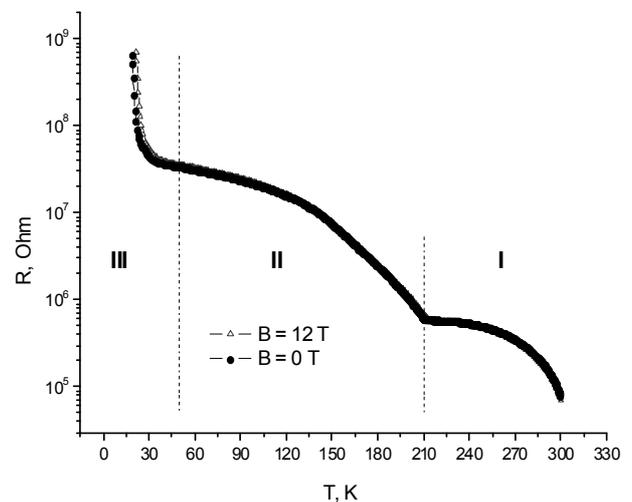


Рисунок 6 – Температурные зависимости сопротивления в нулевом магнитном поле и в поле 12 Тл

При понижении температуры во всем исследованном интервале наблюдается уменьшение проводимости структуры Si/SiO₂/Ni, что характерно для полупроводников. Однако, вид зависимостей $R(T)$ в целом значительно более сложный и условно может быть разделен на 3 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 и переходом

кремния в диэлектрическое состояние при температурах ниже 20 К.

Наибольший интерес с точки зрения сенсорных возможностей гетероструктуры представляет третий температурный интервал, т.к. при температурах ниже 50 К начинает проявляться магнеторезистивный эффект (рисунок 7).

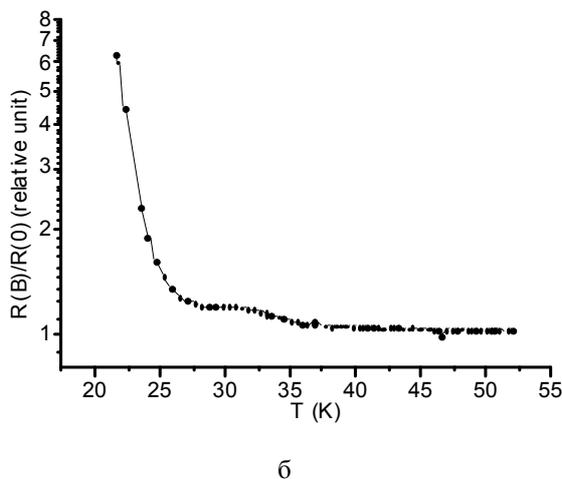
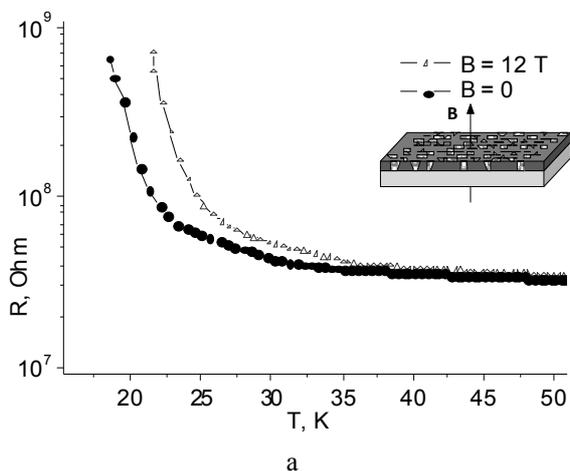


Рисунок 7 – а – температурные зависимости сопротивления в нулевом магнитном поле и в поле 12 Тл; б – относительное магнетосопротивление

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 [7].

Температурная зависимость относительного магнетосопротивления свидетельствует,

что $R(B)/R(0)$ имеет положительное значение, растущее с понижением температуры и достигающее при $T < 25$ К значения 600 % (рисунок 7б). Такая величина магнетосопротивления свидетельствует о перспективе использования данных структур в приборах и аппаратах космического применения, функционирующих при температуре переохлажденного водорода (20–25 К).

Перспективы использования гетероструктур Si/SiO₂/металл

Развитие дальнейшей работы с гетероструктурами Si/SiO₂/металл с целью расширения температурного интервала существования магнеторезистивного эффекта перспективно в двух направлениях. Первое связано с созданием многослойных структур с чередующимися слоями из ферромагнитных и немагнитных металлов в порах [8–10]. Второе предусматривает применение технологии TEMPOS («Tunable Electronic Material in Pores in Oxide on Semiconductors» – «Управляемый электронный материал с порами в оксиде кремния») [11]. Применительно к таким гетероструктурам схема TEMPOS представлена на рисунке 8.

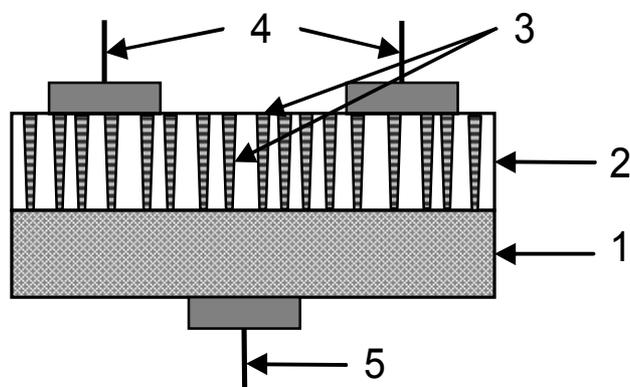


Рисунок 8 – Принципиальная схема TEMPOS-структуры: 1 – подложка Si; 2 – слой SiO₂; 3 – каналы ионных треков заполненные металлом (-ами); 4 – электрические контакты на SiO₂; 5 – управляющий контакт на Si

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 пара-

метры, 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 электронных схем. Уменьшение числа периферийных элементов приводит к выигрышу в скорости функционирования и к большей надежности, в первую очередь к радиационной стойкости, так как добавка небольшого числа каналов передачи заряда при облучении к $\sim 10^8$ уже существующим (т.е. ионным трекам) не окажет существенного влияния на характеристики.

Заключение

Принцип работы применяемых в настоящее время сенсоров магнитного поля основан на четырехконтактном методе измерения эффекта Холла (датчики Холла изготавливаются на основе полупроводниковых материалов, например, InSb и GaAs, обладающих высокой подвижностью носителей заряда и соответственно большими значениями ЭДС Холла). Более простыми в использовании являются сенсоры, в основу которых положена зависимость электросопротивления от магнитного поля, что позволяет исключить два контакта из схемы измерения. К сожалению, небольшая величина магнетосопротивления, достигающая лишь 10 % (например, в пермаллоиде) не позволяет использовать их в качестве высокочувствительных сенсоров.

В работе показано, что технология треков быстрых тяжелых ионов дает возможность создавать поры в слое оксида кремния, впоследствии заполняемые металлом (Ni), на монокристаллическом кремнии, что органично адаптирует такую гетероструктуру к стандартной кремниевой технологии. Она может служить рабочим элементом низкотемпературного сенсора магнитного поля, что подтверждено серией экспериментов по исследованию электрофизических характеристик в широком интервале температур и магнитных полей.

Установлено наличие положительного магниторезистивного эффекта, растущего с понижением температуры и достигающего при $T \sim 25$ К величины 600 %, что позволяет создать высокочувствительные сенсоры для ап-

паратуры космического применения, функционирующей при жидководородном охлаждении ($T = 20-25$ К).

Показаны перспективы дальнейшей работы с гетероструктурами типа Si/SiO₂/металл с целью расширения температурного интервала существования магниторезистивного эффекта, связанные с формированием в порах чередующихся слоев ферромагнитных и немагнитных металлов и с применением технологии TEMPOS.

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 атомно-силовой микроскопии.

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 использованных источников

1. *Fink, D.* Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers / ed. D. Fink // Springer Series in Materials Science, Heidelberg – 2004. – Vol. 63. – P. 391.
2. *Zollondz, J.-H.* Towards new applications of ion tracks / J.-H.Zollondz, A.Weidinger // Nuclear Instruments and Methods. – 2004. – В. 225. – P. 178–183
3. *Fink, D.* Ion track-based electronic elements / D. Fink [et al.] // Nuclear Instruments and Methods. – 2004. – В.218. – P. 355–361.
4. *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.
5. *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.] // Journal of Materials Science. – 2007. – Vol. 42, №. 22. – P. 9163 – 9169.
6. *Демьянов, С.Е.* Наноструктуры систем Si/SiO₂/металл с треками быстрых тяжелых ионов / С.Е. Демьянов [и др.] // Журнал «Известия РАН. Серия Физическая». – 2008. Т. 72, № 9. – С. 1262–1264.
7. *Канюков, Е.Ю.* Особенности электропереноса в наноструктурах Si/SiO₂/Ni в сильных магнитных полях / Е.Ю. Канюков, С.Е. Демьянов // Журнал «Материаловедение». – 2010. – № 6. – С. 53 – 58.

8. *Baibich, M.N.* Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices / M.N. Baibich [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – Vol. 61, № 21. – P. 2472–2475.
9. *Ведяев, А.В.* Гигантское магнитосопротивление / А.В. Ведяев, А.Б. Грановский // *Природа.* – 1995. – № 8– С. 2–79.
10. *Berkowitz, A.E.* Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co and Ag-Co alloy films / A.E. Berkowitz [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 1993. – Vol. 73, № 10. – P. 5320–5325.
11. *Petrov, A.V.* Novel Electronic Devices For Nanotechnology Based on Materials with Ion Tracks / A.V. Petrov [et al.] // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures : Materials of the «Nanomeeting – 2005», Minsk, Belarus, 24 – 27 May 2005.* – P. 544–547.

Kaniukov E. Yu., Demyanov S. E.

Engineering of low-temperature magnetic field sensors based on heterostructures Si/SiO₂/Ni

Results of investigations of electrical and magnetoresistive characteristics of Si/SiO₂/Ni heterostructures obtained using the swift heavy ion track technology are presented. The presence of a positive magnetoresistance growing up with decreasing temperature and reaching 600 % at T ~ 25 K is determined. This result makes it possible to create highly-sensitive magnetic field sensor devices for space applications, which operates at a liquid hydrogen cooling. The prospects of the creation of magnetic-field sensors using alternating layers of ferromagnetic and nonmagnetic metals in the nanopores are determined. The possibility of application of the «Tunable Electronic Material in Pores in Oxide on Semiconductors» concept on this concern is demonstrated.

Поступила в редакцию 18.01.2011.