

НАЗЕМНІ СИСТЕМИ, ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНІ КОМПЛЕКСИ

УДК 537.311.322: 621.763

Канюков Е.Ю., Демьянов С.Е.

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Беларусь, г. Минск.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СЕНСОРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР N-SI/SIO₂(NI) ДЛЯ АППАРАТУРЫ БОРТОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Посредством ионно-трековой технологии, заключающейся в облучении быстрыми тяжелыми ионами, селективном травлении и электрохимическом осаждении никеля в поры сформированы структуры n-Si/SiO₂(Ni). Впервые установлены механизмы электропереноса в температурных интервалах ~300-200 К, ~200-100 К и ~100-20 К и обнаружена инверсная по знаку зависимость ЭДС Холла от температуры, обусловленная доминированием электронного (~300-100 К) или дырочного типа проводимости (~100-20 К), с отклонением температурной зависимости от экспоненциального закона при температурах ниже 100 К. Обнаружен положительный магнеторезистивный эффект, достигающий 1000 % при температуре порядка 25 К, уменьшающийся с ростом температуры и исчезающий при ~100 К, 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».

Ключевые слова: наноструктуры, ионно-трековая технология, пористые матрицы, металлические наночастицы, вольт-амперные характеристики, электроперенос, магнетосопротивление, эффект Холла

Введение. В последнее время проявляется большой интерес к искусственно создаваемым средам с наноразмерными гетерогенностями. Это обуславливается тем, что в низкоразмерных структурах проявляются новые свойства, не характерные для материалов с мезоскопическими или микроскопическими размерами [1–2]. Для получения структур с низкоразмерными неоднородностями целесообразно применять протравленные треки быстрых тяжелых ионов (поры) в диэлектрической матрице на полупроводнике, как шаблона для заполнения различными металлами, так как создаются естественные условия для реализации таких структур [3]. Дискретность металлической фазы, разделенной диэлектрической прослойкой может привести к появлению новых макроскопических свойств, таких как положительное магнетосопротивление, эффект Холла, на несколько порядков превышающий данный эффект в чистых металлах, и целого ряда других необычных физических характеристик [4–6].

Несмотря на интенсивные исследования систем с наноразмерными металлическими включениями, практически отсутствуют данные о сравнительном и систематическом изучении электрофизических и гальваномагнитных свойств гетероструктур Si/SiO₂/металл, хотя в ряде публикаций сообщается о наблюдении положительного магнетосопротивления в схожих структурах [7]. Объяснения, предлагаемые в этих работах, различны и порой противоречат друг другу, а многие вопросы относительно механизмов электропереноса остаются невыясненными. В данных работах для описания температурной зависимости сопротивления привлекаются

различные механизмы: слабая локализация, кулоновская блокада, прыжковый перенос, неупругое резонансное туннелирование [8–10].

Перспективы практического применения обуславливают необходимость тщательного исследования данных структур для установления условий появления положительного магнетосопротивления и определения критериев его существования. Для этого важным аспектом является глубокое понимание механизмов переноса носителей заряд и вклада вносимого металлическими кластерами в пространственное распределение заряда. По этой причине авторы в данной работе приводят результаты исследования электрофизических и гальваномагнитных свойств гетероструктур на основе протравленных ионных треков в оксидированном кремнии, в которых посредством электрохимического осаждения сформированы однородные композиции металлических наночастиц, а также авторы представляют свое видение механизмов электропереноса, которые реализуются в исследуемой структуре при различных температурах. Понимание механизмов электропереноса, реализуемых в различных температурных областях, а также влияние внешнего магнитного поля на движение носителей заряда определит возможность использования структур Si/SiO₂/Ni в качестве рабочего элемента в сенсорных устройствах, в том числе в аппаратуре бортового применения.

Методика эксперимента. Для приготовления структур n-Si/SiO₂/Ni в качестве основы использовались промышленно выпускаемые монокристаллические пластины кремния КЭФ-4,5 ориентацией (100). Слой оксида кремния, толщиной

700 нм, создавался термическим окислением кремния при температуре 1100 °С в течение 10 часов в атмосфере очищенного кислорода. В исследовательском центре «GSI» (Дармштадт, Германия) образцы n-Si/SiO₂ облучались ионами ¹⁹⁷Au²⁶⁺ с энергией 350 МэВ, в результате чего в слое SiO₂ образовывались стохастически распределенные по поверхности латентные ионные треки со средней плотностью 5×10^8 см⁻², соответствующей дозе облучения. Далее латентные треки, являющиеся по сути областями локальных повреждений с повышенной дефектностью на поверхности SiO₂ протравливались в плавиковой кислоте концентрацией 1,35 % при комнатной температуре. Вследствие различия в скоростях травления облученных и необлученных областей оксида кремния было определено оптимальное время травления (40 мин), необходимое для формирования сквозных (до поверхности Si) пор. По данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), были определены форма и латеральные размеры пор, которые представляют собой усеченные конусы с конусностью ~ 30–35° и диаметрами 200–250 нм на поверхности SiO₂, и 50–100 нм на границе с кремнием. Высота конусов соответствует толщине оксида кремния после травления (~250–300 нм).

Заполнение конусных нанопор никелем проводилось электрохимическим методом. Электрохимические эксперименты выполнялись в стандартной трехэлектродной стеклянной ячейке с разделенными электродными пространствами. Осаждение никеля в темплату n-Si/SiO₂ с протравленными ионными треками проводилось в потенциостатическом режиме из водного электролита, содержащего 0,5 моль/л NiSO₄ и 0,5 моль/л H₃BO₃. Для равномерного распределения потенциала по поверхности, на неокисленную сторону кремния наносился In-Ga эвтектический сплав, к которому подводился электрический контакт. В качестве вспомогательного электрода использовалась платиновая проволока, а в качестве сравнительного – хлорсеребряный насыщенный раствор [11].

Результаты и обсуждения. Как следует из СЭМ

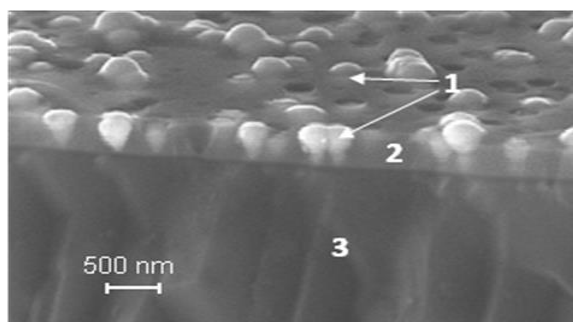


Рис. 1. СЭМ-изображение структуры n-Si/SiO₂/Ni: 1 – никель, осажденный в поры оксида кремния, 2 – слой оксида кремния, 3 – подложка кремния.

- изображения (рис.1.) и ранее опубликованных нами результатов [11–12] металл осаждается в поры в виде нанокластеров размером 30–50 нм, контактирующих с поверхностью кремния.

Исследование электрофизических свойств гетероструктур проводилось на образцах в форме прямоугольного параллелепипеда длиной 10 мм и шириной 3 мм и толщиной, соответствующей толщине кремниевой подложки. Для получения омичных и механически надёжных контактов на поверхность образцов со стороны SiO₂/Ni методом ультразвуковой пайки наносились индиевые электроды площадью ~ 1 мм² по схеме, представленной на рисунке 2.

Электрофизические и гальваномагнитные измерения проводились на универсальной измерительной системе фирмы „Cryogenic Limited“ в режиме заданного тока от стабилизированного источника питания. Измерения электросопротивления R и магнитосопротивления (MR) проводилось четырех-зондовым методом, а принцип измерений (рис.2) обеспечивал протекание тока по схеме металл-полупроводник-металл. Для исключения влияния асимметричности барьерного сопротивления все измерения выполнялись с коммутацией тока I , значения которого для исключения возможности сварки металлических кластеров в порах не превышали 100 нА. Температурные зависимости электросопротивления измерялись в режиме непрерывного охлаждения со скоростью 1 К/мин с точностью определения температуры 0,001 К.

Исследования MR и ЭДС Холла U_x проводились в постоянном магнитном поле величиной до 12Тл и направленном перпендикулярно плоскости гетероструктуры. Для исключения возникновения температурных градиентов в структурах, образцы термостатировались при каждой температуре измерения в течение получаса; отклонение температуры от задаваемой при проведении измерений не превышало 0,1 К. Во избежание проявления фотопроводимости и фото-ЭДС измерения проводились в закрытой измерительной

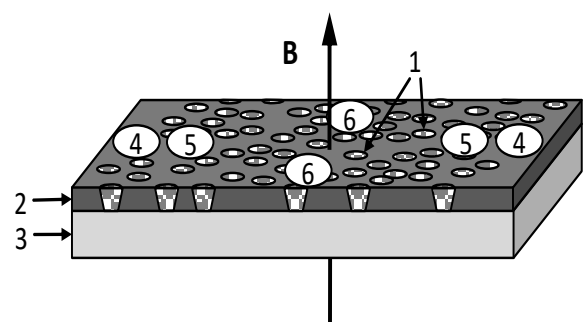


Рис. 2. Схема структуры n-Si/SiO₂/Ni и расположения контактов для измерения электрофизических и гальваномагнитных свойств: 1 – металл в порах, 2 – слой оксида кремния, 3 – кремний, 4 – токовые контакты, 5 – потенциальные контакты, 6 – холловские контакты.

ячейке. Для исключения вкладов паразитной термо-ЭДС и геометрических ошибок из-за неточного расположения холловских контактов на одной эквипотенциалии образца измерения в каждой точке выполнялись с коммутацией направлений тока и поля.

Исследование электрофизических свойств гетероструктур n-Si/SiO₂/Ni логично было начать с изучения вольт-амперные характеристики (ВАХ), поскольку согласно методике измерения токоперенос, осуществляемый по схеме металл-полупроводник-металл (см. рис.2), предполагает нелинейность зависимостей $I(U)$. Это подтверждают данные, приведенные рисунке 3, из которых следует, что нелинейность симметрична для обоих направлений приложенного напряжения и свидетельствует о наличии барьера Шоттки при переходе носителей заряда из металлических кластеров Ni в кремний.

Как видно, зависимости при различных температурах качественно подобны друг другу, но при понижении T нелинейность ВАХ проявляется при более высоких напряжениях и имеет более резкий характер, что связано с повышением сопротивления на барьере [3]. Тем самым уменьшается вероятность его прохождения за счет туннельной эмиссии зарядов.

Температурные зависимости сопротивления Si/SiO₂/Ni в нулевом магнитном поле и поле 12Тл представлены на рисунке 4. Во всем исследованном интервале T имеет место увеличение сопротивления структуры, что в целом характерно для полупроводников. Однако, вид зависимостей значительно более сложный и имеет особенности, которые позволяют четко выделить 3 температурных интервала: I – соответствует области температур 300 – 180 К, II – 180 – 30 К, III – 30 – 18 К. Ниже температуры 18 К результаты отсутствуют, так как сопротивление

структуры достигает значений, превышающих предел измерения установки в режиме заданного тока.

В первом температурном интервале имеет место быстрое, практически линейное увеличение сопротивления более чем на два порядка, вплоть до температуры 180 К. При последующем охлаждении гетероструктуры на зависимости $R(T)$ наблюдается параболический перегиб и слабый рост сопротивления вплоть до 30К с тенденцией к насыщению (область II). Третий, низкотемпературный интервал характеризуется резким экспоненциальным возрастанием R и структура Si/SiO₂/Ni в целом становится диэлектриком при T ниже 18К.

При анализе такой нетривиальной температурной зависимости сопротивления необходимо учитывать сложность исследуемой структуры, сочетающей в себе металлические наноразмерные кластеры Ni в диэлектрической матрице на подложке кремния п-типа.

Следует отметить, что при электропереносе в приграничном слое кремния, в контакте с ним находятся заполненные металлом поры, плотность которых составляет 10^8 см⁻², а среднее расстояние между ними ~ 500 нм. Учитывая, что средний размер контакта никеля с кремнием для единичной поры равен 100 нм, это составляет около 20% пути носителей заряда при токопереносе (см. рис. 1). Данные особенности определяют механизмы проводимости, доминирующие в каждом температурном интервале.

В первом, «высокотемпературном» диапазоне, система n-Si/SiO₂/Ni характеризуется собственной электропроводностью кремния, а температурная зависимость определяется изменением концентрации и подвижности носителей заряда. С понижением температуры концентрация электронов, переходящих через запрещенную зону

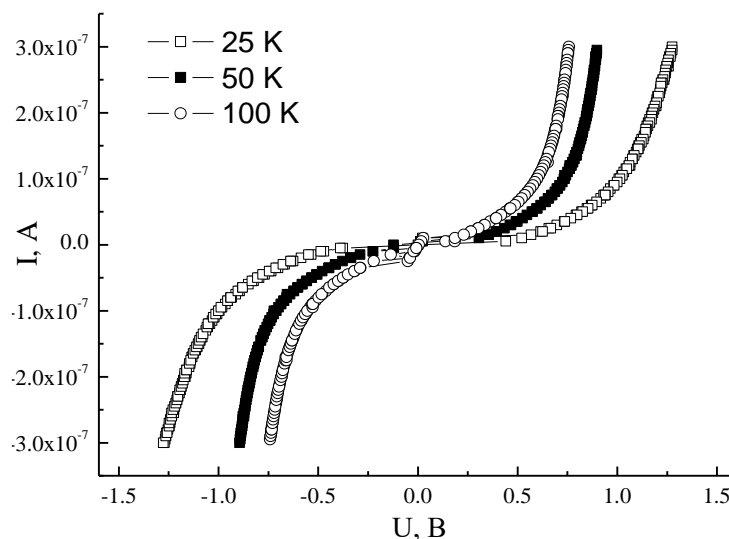


Рис.3. Вольт-амперные характеристики образцов с никелем в порах при температурах 25, 50 и 100 К

в зону проводимости, экспоненциально уменьшается, что должно приводить к соответствующему увеличению сопротивления. В целом такая тенденция наблюдается до $T \sim 180$ К, однако рост $R(T)$ происходит по линейному закону. Такой характер зависимости связан с наличием в гетероструктуре кластеров никеля со значительно меньшим удельным сопротивлением по сравнению с кремнием. Несмотря на то, что в рассматриваемом температурном интервале движение заряда происходит по всему объему полупроводника, а токоперенос в приповерхностных областях будет осуществляться по кластерам Ni, длина свободного пробега электронов в которых соизмерима с их размерами.

При температурах ниже 180 К прекращается термоактивируемый переход носителей через запрещенную зону. Участок кривой в интервале 180–30К (область II на рис. 4), где имеет место слаборастущая зависимость $R(T)$, является областью с постоянной концентрацией носителей заряда. Электронные ресурсы примесных атомов, максимальные при низких температурах, истощены, а их подвижность при понижении температуры падает. Это приводит к увеличению высоты барьера и сопротивление на контактах полупроводник - металл становится больше чем у кремния, вследствие чего электроны кластеров Ni не принимают участие в электропереносе.

Температуры ниже 30 К (область III) малы для образования достаточной концентрации носителей

заряда за счёт перехода электронов с примесных уровней в зону проводимости, и кремний фактически становится диэлектриком.

В этих условиях электроперенос в основном осуществляется по локализованным состояниям в приповерхностных слоях Si, а в областях контакта с порами по металлическим кластерам. При этом величина сопротивления и характер температурной зависимости определяется доминирующим высокоомным состоянием полупроводниковой составляющей гетероструктуры.

Подтверждением роли металлических кластеров в механизме проводимости при низких температурах является зависимость $R(T)$ в магнитном поле. Поведение кривых на рисунке 4 свидетельствуют, что магнитное поле не влияет на электропроводность гетероструктуры в высокотемпературном диапазоне, по крайней мере до $T \sim 100$ К. При понижении температуры электросопротивление в поле увеличивается относительно значений R в его отсутствии (вставка на рис. 4), т.е. имеет место положительный магниторезистивный эффект.

Из температурной зависимости относительного магнитосопротивления $MR = \frac{R_B - R_0}{R_0}$ (R_B и R_0 - сопротивление в магнитном поле и в его отсутствии, соответственно) видно, что при экспоненциальном росте MR достигает значений $\sim 1000\%$ (рис. 5).

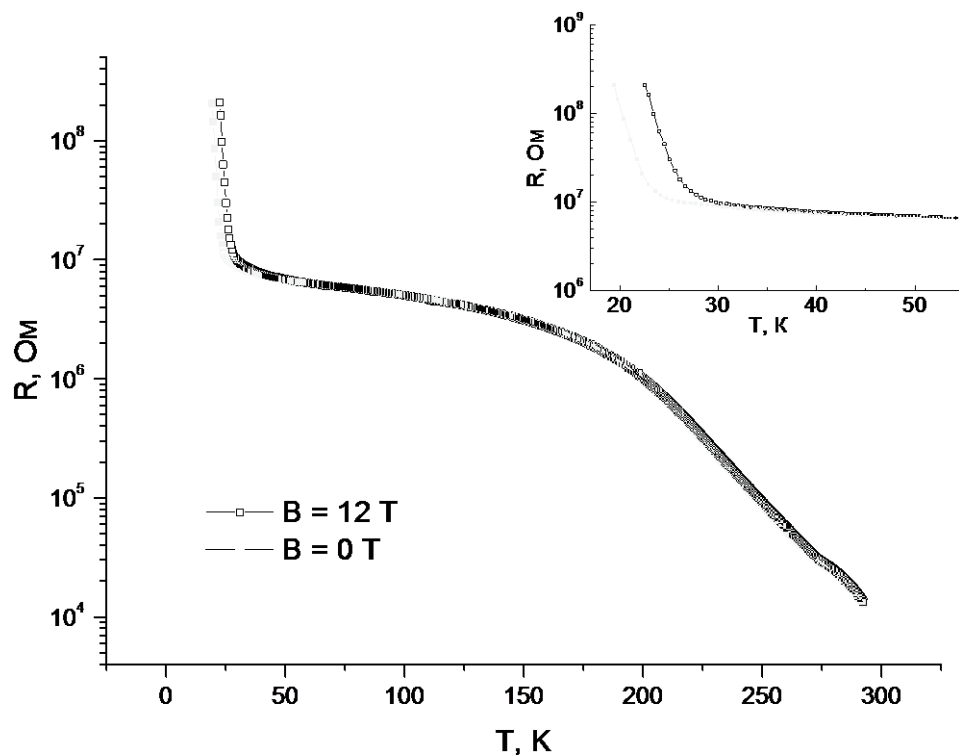


Рис. 4. Температурные зависимости сопротивления гетероструктуры Si/SiO₂/Ni в отсутствие магнитного поля и в поле 12 Тл

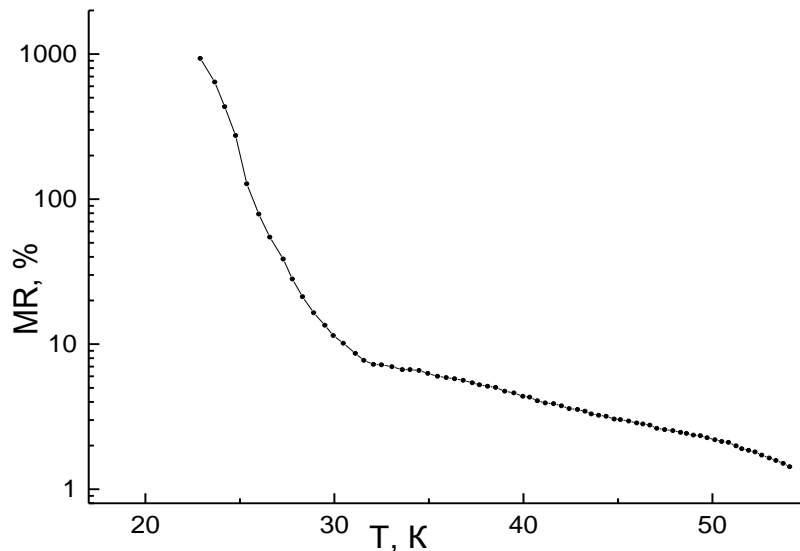


Рис. 5. Температурная зависимость относительного магнитосопротивления структуры Si/SiO₂/Ni в поле 12 Тл

Данные приведенные выше свидетельствуют о существовании двух механизмов электропереноса работающих в различных температурных областях: высокотемпературной и низкотемпературной. Однако неясно, при какой температуре происходит переключение с одного механизма на другой, так как зависимость $R(T)$ дает температуру 35 К, $R(B)$ ~50 К, а из ВАХ следует что при температуре ~100 К. Для определения точной температуры смены механизмов переноса были проведены исследования гальваномагнитных свойств гетероструктуры n-Si/SiO₂/Ni.

На рисунках 6 и 7 представлены температурные и полевые зависимости ЭДС Холла, наиболее достоверные и типичные для разных температурных интервалов (4–300 К с шагом 25К) и магнитных полей (0–12 Тл с шагом 1–0,25 Тл).

Во всем интервале магнитных полей

температурные зависимости холловского напряжения качественно идентичны, на рисунок 6. В области высоких температур ЭДС Холла экспоненциально возрастает и имеет положительный знак (что характерно для n-Si) до температур 110–20 К. В области $T \sim 100$ К знак резко изменяется на отрицательный и достигает минимума при температуре около 75 К. При T ниже 75 К ЭДС Холла выходит на насыщение, с тенденцией к медленному понижению U_x по абсолютному значению.

Для полевых зависимостей очевидно, что при температурах выше 100 К ЭДС Холла является растущей функцией поля, рисунок 7. При $T = 100$ К полевая зависимость становится аномально падающей, то есть с ростом поля ЭДС Холла уменьшается. Ниже 100 К, в области отрицательных значений ЭДС является растущей по абсолютному значению функцией поля.

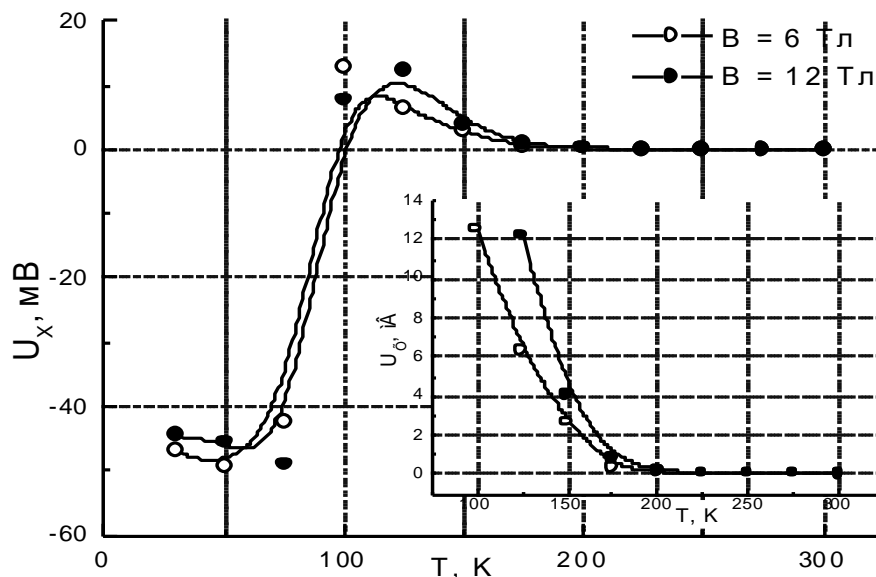


Рис. 6. Зависимость холловского напряжения от температуры структуры n-Si/SiO₂/Ni в полях 6 и 12 Тл

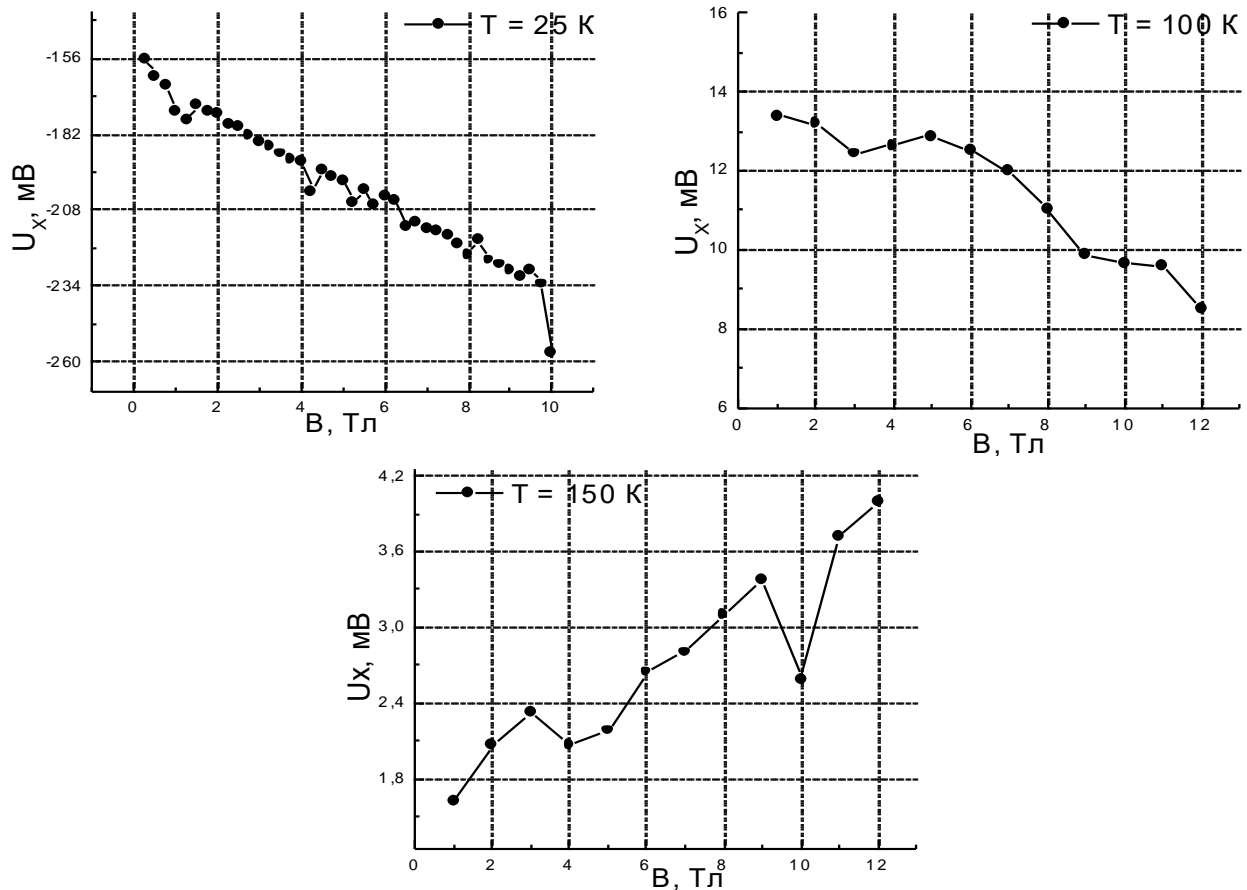


Рис. 7. Зависимость холловского напряжения от магнитного поля при температурах $T = 25, 100, 150$ K структуры n-Si/SiO₂/Ni

Как было указано выше, в высокотемпературной области электроперенос осуществляется по схеме металл-полупроводник-металл, не задействуя поры, заполненные металлом, которые находятся между контактами. В данной области температур очевидно, что величина ЭДС Холла определяется кремнием, то есть с понижением температуры подвижность носителей заряда в кремнии экспоненциально падает, что вызывает экспоненциальный рост холловского напряжения (вставка к рисунку 6). При дальнейшем понижении температуры происходит резкий скачок ЭДС Холла со сменой знака (отрицательный коэффициент Холла характерен для никеля) с сохранением тенденции к экспоненциальному увеличению абсолютного значения U_x . Это свидетельствует о том что при $T \sim 100$ K происходит изменение доминирующего механизма электропереноса. Как уже говорилось выше, при $T > 100$ K перенос заряда осуществляется по схеме «металл в порах под контактом – полупроводник – металл в порах под контактом», не задействуя поры, находящиеся между контактами. При дальнейшем понижении температуры происходит включение в электроперенос никелевых кластеров, находящихся в контакте с кремниевой пластиной. При $T \sim 100$ K, когда U_x становится равным нулю, токоперенос происходит как по кремнию, так и по

никелевым кластерам в равной степени. В связи с тем, что в абсолютной величине холловского напряжения, а соответственно в подвижности носителей заряда не происходит изменений, на зависимости $R(T)$ на рисунке 4 не наблюдается перегибов.

Интересное явление наблюдается при $T = 100$ K, когда полевая зависимость становится аномально падающей. Такое поведение $U_x(B)$ связано опять же с конкуренцией двух различных механизмов при данной температуре. В малых полях U_x имеет большие значения, то есть работает кремний, а при увеличении поля «включается» никель. Увеличение абсолютного значения U_x происходит до температуры 75 K, после чего вступает в действие «низкотемпературный механизм переноса заряда», который описан выше. При температурах менее 75 K электроперенос осуществляется по металлическим кластерам и локализованным состояниям на границе раздела Si/SiO₂. Кроме того, при температурах менее 75 K следует учитывать еще не решенную теоретиками проблему скачка холловской разности потенциалов на границе сред с существенно различающимися удельными электросопротивлениями.

Развитие дальнейшей работы с гетероструктурами Si/SiO₂/металл с целью

расширения температурного интервала существования магниторезистивного эффекта перспективно в двух направлениях. Первое связано с созданием многослойных структур с чередующимися слоями из ферромагнитных и немагнитных металлов в порах [13–14]. Второе предусматривает применение технологии TEMPOS («Tunable Electronic Material in Pores in Oxide on Semiconductors» – «Управляемый Электронный Материал с Порами в Оксиде Кремния») [15]. Применительно к таким гетероструктурам схема TEMPOS представлена на рисунке 8.

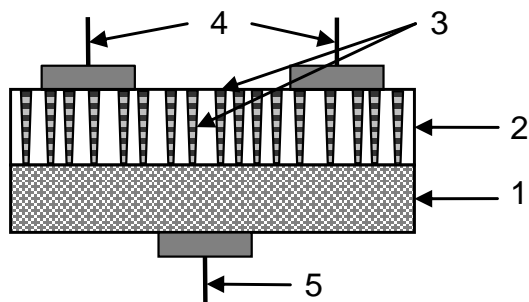


Рис. 8. Принципиальная схема TEMPOS-структуры: 1) подложка Si, 2) слой SiO₂, 3) каналы ионных треків заполненные металлом (-ами), 4) электрические контакты на SiO₂, 5) управляющий контакт на Si

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 треків, 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) и изготавливаются 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 заложена зависимость электросопротивления от магнитного поля, что позволяет исключить два контакта из схемы измерения. К сожалению, небольшая величина магнетосопротивления, достигающая лишь 10 % (например, в пермаллоэ) не позволяет использовать их в качестве высокочувствительных сенсоров.

В работе показано, что технология треків 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.

Определены механизмы электропереноса реализуемые в различных температурных интервалах, а также установлено наличие положительного магниторезистивного эффекта, растущего с понижением температуры и достигающего при $T \sim 25$ K величины 1000 %, что позволяет создать высокочувствительные сенсоры для аппаратуры космического применения, функционирующей при жидководородном охлаждении ($T = 20-25$ K). 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.

Список літератури:

1. Davies J.H. *The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction* / J.H., Davies // Cambridge University Press, Cambridge. 1998. – P. 120-135.
2. Harrison P. *Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics*. John Wiley & Sons, Chichester. 2000. – 370 p.
3. 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.
4. Sankar S. Spin-dependent transport of Co-SiO₂ granular films approaching percolation / S. Sankar, A.E. Berkowitz, D.J. Smith // *Phys.Rev.B* 2000. В. 62. – P. 14273.
5. Стогней О.В. Изотропное положительное магнетосопротивление наногранулированных композиционных материалов Co-Al₂O₃ / О.В. Стогней, А.В. Ситников, Ю.Е. Калинин, С.Ф. Авдеев // *ФТТ*. 2007. 49. – С. 158.
6. Беркутов И.Б. Положительное квазиклассическое магнетосопротивление и квантовые эффекты в германиевом

- квантовом каналі / И.Б. Беркутов, В.В. Андриевский, Ю.Ф. Комник, О.А. Миронов // ФНТ. 2010. 36. – С. 1335.
7. Zhao B. Giant Hall effect in granular Fe-SiO₂ film / B., Zhao, X., Yan // J., Appl. Phys. 1997. 81. – P. 5527.
 8. Lin C.-H. Hopping conduction in granular metals / C.-H., Lin, G.Y., Wu // Physica B: Condensed Matter, 2000. B 279. – P. 341.
 9. Мотт Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н.Мотт, Э. Дэвис. – М.: Мир, 1982. – 658 с.
 10. Луцев Л.В. Электронный транспорт в гранулированных пленках аморфного углерода с наночастицами кобальта / Л.В. Луцев, Т.К. Звонарева, В.М. Лебедев // Письма в ЖТФ. 2001. 27. – С. 84.
 11. 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, D.K., Ivanou, A.K., Fedotov, E.A., Streltsov, S.E., Demyanov, A.V., Petrov, E.Yu., Kaniukov, D., Fink // J. Mat. Sci. 2007. – №42. – P. 9163.
 12. Demyanov, S.E. On the morphology of Si/SiO₂/Ni nanostructures with swift heavy ion tracks in silicon oxide / S.E., Demyanov, E.Y., Kaniukov, A.V., Petrov, E.K., Belonogov, E.A., Streltsov, D.K., Ivanov, Y.A., Ivanova, C., Trautmann, H., Terryn, M., Petrova, J., Ustarroz, V., Sivakov // J. Surf. Investig. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2014. № 8. – P. 805–813.
 13. 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.
 14. Berkowitz, A.E. Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co and Ag-Co alloy films / A.E. Berkowitz [et al.] // J. Appl. Phys. 1993. V.73, – № 10, – P.5320–5325.
 15. 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.

References:

1. Davies, J.H. The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction / J.H., Davies // Cambridge University Press, Cambridge. 1998. – P. 120-135.
2. Harrison, P. Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics. John Wiley & Sons, Chichester. 2000. – 370 p.
3. Kaniukov, E.Yu. Peculiarities of electric conductivity in Si/SiO₂/Ni nanostructures in strong magnetic fields / E.Yu., Kaniukov, S.E., Demyanov // Materialovedeniye. 2010. № 6. – P. 53 [in Russian].
4. Sankar, S. Spin-dependent transport of Co-SiO₂ granular films approaching percolation / S., Sankar, A.E., Berkowitz, D.J., Smith // Phys.Rev.B 2000. B. 62. – P. 14273.
5. Stogney, O.V. Isotropic positive magnetoresistance of nanogranular composite materials Co-Al₂O₃ / O.V., Stogney, A.V., Sitnikov, Yu.E., Kalinin, S.F., Avdeev // Solid State Physics. 2007. 49. – P. 158 [in Russian].
6. Berkutov, I.B. Positive quasiclassical magnetoresistance and quantum effects in a germanium quantum channel / I.B., Berkutov, V.V., Andrievsky, Yu.F., Comnik, O.A., Mironov // Low Temperature Physics. 2010. 36. – P. 1335 [in Russian].
7. Zhao, B. Giant Hall effect in granular Fe-SiO₂ film / B., Zhao, X., Yan // J., Appl. Phys. 1997. 81. – P. 5527.
8. Lin C.-H. Hopping conduction in granular metals / C.-H., Lin, G.Y., Wu // Physica B: Condensed Matter, 2000. B 279. – P. 341.
9. Mott N., Electronic processes in a non-crystal. Substances / N. Mott, E. Davis. – М.: Mir, 1982. – 658 p. [in Russian].
10. Lutsev, L.V. Electronic transport in granular films of amorphous carbon with cobalt nanoparticles / L.V., Lutsev, T.K., Zvonaieva, V.M., Lebedev // Letters in Journal of Technical Physics. 2001. 27. – P.84 [in Russian].
11. 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, D.K., Ivanou, A.K., Fedotov, E.A., Streltsov, S.E., Demyanov, A.V., Petrov, E.Yu., Kaniukov, D., Fink // J. Mat. Sci. 2007. 42. – P. 9163.
12. Demyanov, S.E. On the morphology of Si/SiO₂/Ni nanostructures with swift heavy ion tracks in silicon oxide / S.E., Demyanov, E.Y., Kaniukov, A.V., Petrov, E.K., Belonogov, E.A., Streltsov, D.K., Ivanov, Y.A., Ivanova, C., Trautmann, H., Terryn, M., Petrova, J., Ustarroz, V., Sivakov // J. Surf. Investig. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2014. № 8. – P. 805–813.
13. 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.
14. Berkowitz, A.E. Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co and Ag-Co alloy films / A.E. Berkowitz [et al.] // J. Appl. Phys. 1993. V.73, – № 10, – P.5320–5325.
15. 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.

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ СТРУКТУР N-SI/SIO₂(NI) ДЛЯ АПАРАТУРИ БОРТОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Канюков Є.Ю., Дем'янов С.Є.

За допомогою іонно-трекової технології, що полягає в опроміненні швидкими важкими іонами, селективному травленні і електрохімічному осадженні нікелю в пори сформовані структури n-Si / SiO₂ (Ni). Вперше встановлені механізми електропереносу в температурних інтервалах ~ 300-200 К, ~ 200-100 К і ~ 100-20 К і виявлена інверсна за знаком залежність ЕРС Холла від температури, обумовлена домінуванням електронного (~ 300-100 К) або діркового типу провідності (~ 100-20 К), з відхиленням температурної залежності від експоненціального закону при температурах нижче 100 К. Виявлено позитивний магніторезистивний ефект, що сягає 1000% при температурі близько 25 К, який зменшується з ростом температури і зникає при ~ 100 К, що дозволяє створити високочутливі сенсори магнітного поля для апаратури космічного застосування, функціонує при рідинноводневому охолодженні. Визначено перспективи створення сенсорів з використанням шарів, що чергуються з феромагнітних і немагнітних металів в нанопори і показана

можливість застосування концепції «Керованого електронного матеріалу з порами в оксиді кремнію».

Ключові слова: наноструктури, іонно-трекова технологія, пористі матриці, металеві наночастинки, вольт-амперні характеристики, електроперенос, магнітоопір, ефект Холла.

LOW-TEMPERATURE MAGNETIC FIELD SENSORS BASED ON n-Si/SiO₂(Ni) STRUCTURES FOR ON-BOARD EQUIPMENT

E.Yu. Kaniukov, S.E. Demyanov

Using the ion-track technology, consisting of irradiation with swift heavy ions, selective chemical etching and electrochemical deposition of nickel in the pores, n-Si/SiO₂(Ni) structures have been formed. The mechanisms of electrotransport in the temperature ranges ~ 300-200 K, ~ 200-100 K, and ~ 100-20 K were established and an inverse temperature dependence of the Hall voltage was observed due to the dominance of the electron (~ 300-100 K) or hole conductivity type (~ 100-20 K), with a deviation of the temperature dependence of the exponential law at temperatures below 100 K. A positive magnetoresistive effect reaching 1000% at 25 K, which decreasing with increasing temperature and vanishing at ~ 100 K has been detected. It allowed creating highly sensitive magnetic field sensors for space application equipment functioning with liquid hydrogen cooling. Prospects for creating sensors using alternating layers of ferromagnetic and nonmagnetic metals in nanopores have been determined and the possibility of using the concept of a "Tunable electronic material with pores in silicon oxide" has been demonstrated.

Keywords: nanostructures, ion-track technology, porous templates, metallic nanoparticles, current-voltage characteristics, electron transport, magnetoresistance, Hall effect.