

ОСОБЕННОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА В НАНОСТРУКТУРАХ Si/SiO₂/МЕТАЛЛ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Канюков Е.Ю., Демьянов С.Е.

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», ул.П.Бровки, 19, 220072 г.Минск, Беларусь, e-mail: kaniukov@physics.by

В последнее время ведется поиск технологий, которые позволят уменьшить размеры электронных приборов, в связи с чем интенсивно развиваются такие технологии, как молекулярно-лучевая эпитаксия, различные виды литографии, позволяющие получать различные наноструктуры. Среди этих технологий менее известна и сравнительно недавно развивается метод быстрых тяжелых ионов, который связан с облучением различных материалов высокоэнергетическими ионами [1-2]. Данное воздействие приводит к формированию в веществе узких протяженных областей радиационного повреждения, которые получили название «ионные (латентные) треки». 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 [3].

В связи с широким использованием кремниевой технологии перспективно создание структур на подложке кремния с его оксидом, содержащим ионные треки, внутри которых посредством метода электрохимического осаждения формируются однородные наноконпозиции или многослойные наноструктуры с чередующимися слоями, состоящими из ферромагнитных и немагнитных металлов [4]. Результаты исследования таких структур могут стать основой для моделирования различных электронных устройств обладающих нелинейными вольтамперными характеристиками [3-4], а также сенсоров магнитного поля. Для оценки возможности создания таких структур необходимо рассмотреть механизмы электропереноса в системах Si/SiO₂/металл, а также поведение данных структур в присутствии магнитного поля в широком интервале температур.

Для создания структуры Si/SiO₂/металл в качестве подложек использовались монокристаллические пластины n-Si. Оксид кремния на них формировался путем термического окисления, после чего латентные ионные треки в слое SiO₂ создавались путем облучения ионами ¹⁹⁷Au²⁶⁺ с энергией 350 МэВ и флюенсом $5 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$. 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.

В данном исследовании изучались структуры с никелем, являющимся модельным ферромагнитным металлом с высокой степенью спиновой поляризации электронов проводимости. Процесс создания и исследования структуры поверхности таких систем подробно рассмотрен в работах [4-8].

Для проведения измерений вольтамперных 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. Измерения ВАХ проводились в режиме постоянного напряжения в интервале от -7 до 7 В с шагом 0,5 В с последующей регистрацией тока, протекающего через заполненные металлом треки и контактирующего с ними кремния. Кроме этого, измерения ВАХ в широком

интервале температур 4-300 К и в поперечных магнитных полях до 12 Тл проводились в режиме заданного тока на измерительной системе, содержащей рефрижератор замкнутого цикла фирмы „Cryogenic Limited“.

На рисунке 1 представлены ВАХ структуры, измеренные в режиме заданного напряжения при комнатной и азотной температуре. Очевидно, что характеристики симметричны при обоих направлениях приложенного напряжения и проявляют особенности, характерные для двухбарьерных структур, что позволяет сделать вывод о появлении барьеров Шоттки при протекании тока из полупроводника в металл.

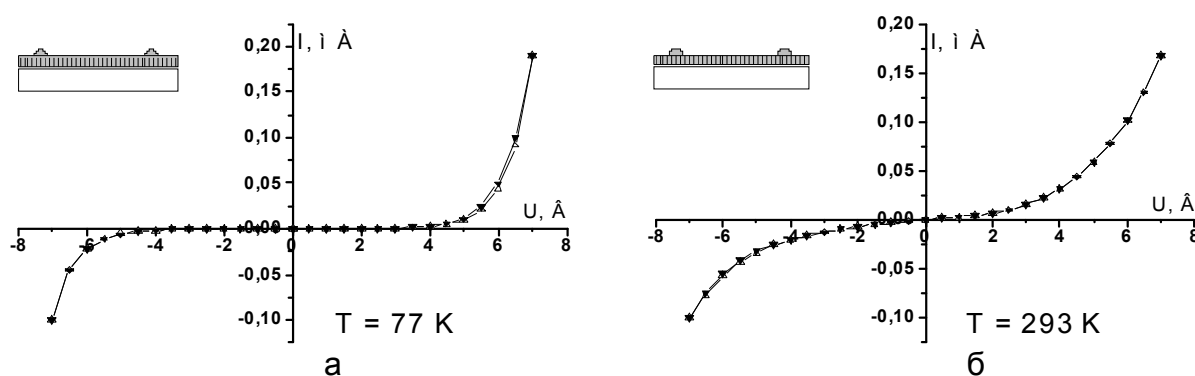


Рис.1. Вольтамперные характеристики образцов с нанокластерами никеля в ионных треках при температуре жидкого азота (а) и комнатной температуре (б). На вставках приведены схемы расположения контактов.

Как видно из сравнения рисунков 1а и 1б, зависимости качественно подобны друг другу, но при азотных температурах нелинейность ВАХ проявляется при более высоких напряжениях и имеет более резкий характер. Можно предположить, что при низких температурах имеет место более высокое барьерное сопротивление (при напряжениях до 5 В), после чего начинается лавинный пробой. При повышении температуры сопротивление на барьере уменьшается и переход к лавинному пробое становится более плавным. 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 (рис.2).

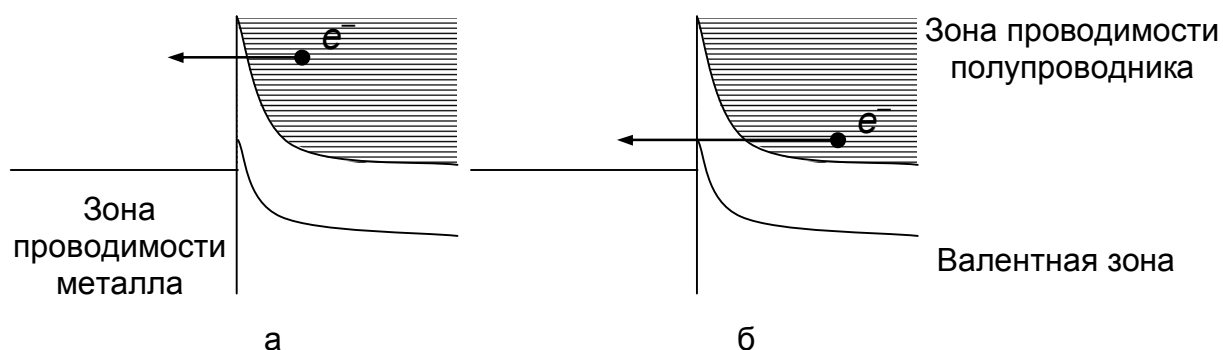


Рис.2. Преодоление электронами Барьера Шоттки в системе полупроводник n-типа – металл; а – при высоких температурах, б – при низких температурах.

Измерение температурных зависимостей сопротивления при постоянном токе $I = 10$ нА показало, что кривые имеют схожий вид как в нулевом магнитном поле, так и в поле 12 Тл (рис.3). Видно, что при понижении температуры во всем интервале наблюдается

уменьшении проводимости структуры Si/SiO₂/Ni, что, в принципе, характерно для полупроводников. Однако, вид зависимостей R(T) в целом значительно более сложный и условно может быть разделен на 3 температурных интервала. В области T = 300–210 К имеет место параболическое увеличение электросопротивления, которое выходит на насыщение при температуре ниже 240 К. При T = 210 наступает резкий перегиб, после которого R начинает снова возрастать по параболе с насыщением в области T ~ 35 К. В третьем температурном интервале 35 – 18 К наблюдается экспоненциальный рост сопротивления, свойственный для чистых полупроводников, которые в области гелиевых температурах становятся диэлектриками.

Для объяснения такого нетривиального вида температурных зависимостей необходимо учитывать, прежде всего, сложность исследуемой структуры, сочетающей в себе металлические наноразмерные кластеры Ni в порах SiO₂ и контактирующие с кремниевой подложкой. Тип структуры и метод измерения электрофизических характеристик сразу позволяют определить, что движение носителей заряда происходит по схеме: кластеры Ni в треках – слой Si вблизи границы с SiO₂ – кластеры Ni в треках. При этом следует учитывать, что при электропереносе в приграничном слое кремния в контакте с ним находятся заполненные никелем поры, плотность которых в SiO₂ составляет 10⁵ мм⁻², а среднее расстояние между треками ~ 1 мкм [6]. В соответствии с этим и следует рассматривать механизмы проводимости, доминирующие в каждом температурном интервале.

На рисунке 4 представлено схематическое изображение процессов переноса носителей заряда в структуре n-Si/SiO₂/Ni для различных температурных интервалов.

При температурах 300 – 210 К электроперенос происходит по схеме представленной на рисунке 4а. В этой области при переходе носителей заряда из полупроводника в металл основной вклад в проводимость вносят электроны, находящиеся на верхних энергетических уровнях зоны проводимости Si (рис.2а). При этом, судя по характеру зависимости R(T) при температурах 300 – 260 К, имеет место и надбарьерная эмиссия электронов в металл.

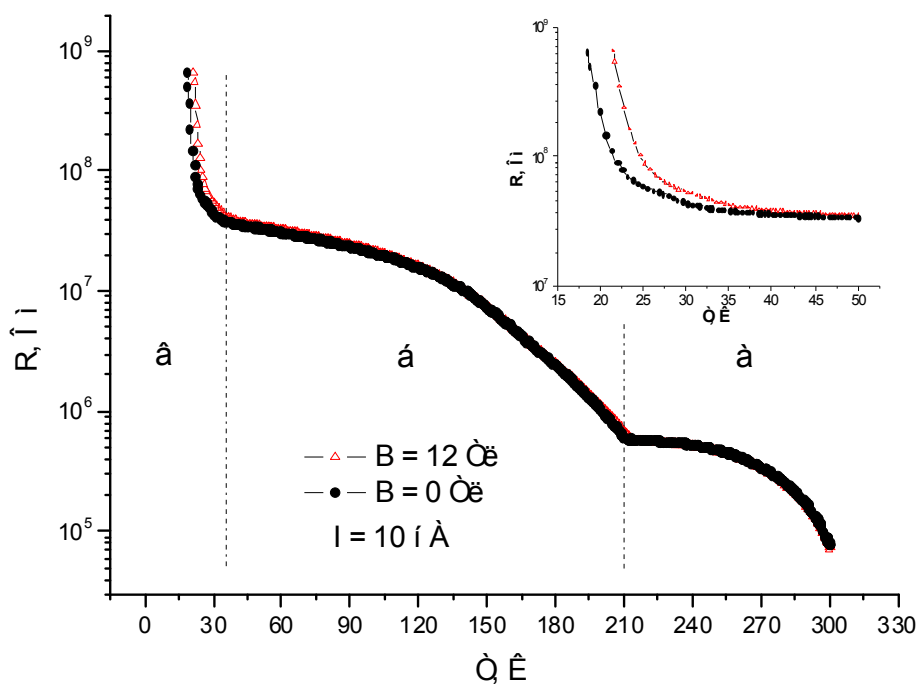


Рис.3. Температурные зависимости сопротивления в нулевом магнитном поле и в поле 12 Тл.

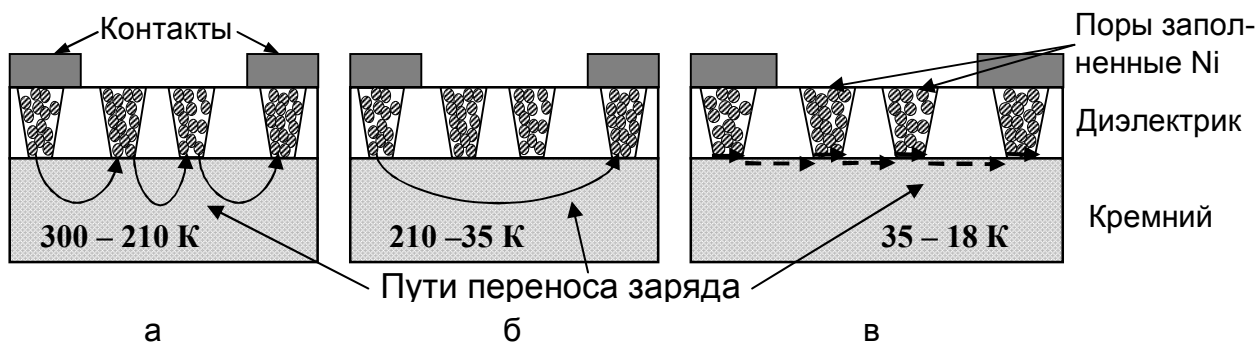


Рис.4. Схематическое изображение процессов переноса носителей заряда в структуре n-Si/SiO₂/Ni для различных температурных интервалов в соответствии с рис.3.

Дальнейшее понижение температуры приводит к вымораживанию состояний на верхних уровнях зоны проводимости, вследствие чего наблюдается насыщение R в интервале температур 260 – 210 К (рис.3) и при T = 210 К происходит полное прекращение надбарьерного прохождения электронов, что выражается в виде точки перегиба.

В интервале температур 210 – 35 К сопротивление, также как и при более высоких температурах, монотонно возрастает по причине заселения носителями более низких энергетических уровней, что приводит к увеличению барьера (рис.2б). В связи с этим в механизме проводимости, в данной области температур, не принимают участие металлические кластеры в треках, находящиеся между контактами, вследствие того, что сопротивление барьеров на контактах полупроводник/металл становится больше чем у кремния и электроперенос происходит по схеме, представленной на рисунке 4б.

При температурах ниже 35 К (рис.4в), когда кремний фактически становится диэлектриком, электроперенос частично осуществляется через металлические кластеры в порах (~ 20 – 25 % пути между электродами), а между порами – в приповерхностных слоях кремния, которые, очевидно, содержат локализованные состояния.

Вольт-амперные характеристики структур в магнитном поле B = 12 Тл и без поля, для различных температур представлены на рисунке 5. Полученные данные свидетельствуют о существенном увеличении напряжения при низких температурах при приложении магнитного поля, уменьшающееся с повышением температуры и практически исчезающее при T ~ 100 К. На вставке рисунка 3 видно, что в температурном интервале 18-35 К величина сопротивления в отсутствие магнитного поля намного меньше чем в поле, т.е. при данных температурах имеет место положительное магнетосопротивление, величина которого достигает 10 (1000 %). Данные результаты хорошо согласуются с изложенной выше моделью электропереноса. Магнитное поле оказывает существенное влияние только при низких температурах, когда носители заряда проходят часть пути по никелевым кластерам (рис.4в).

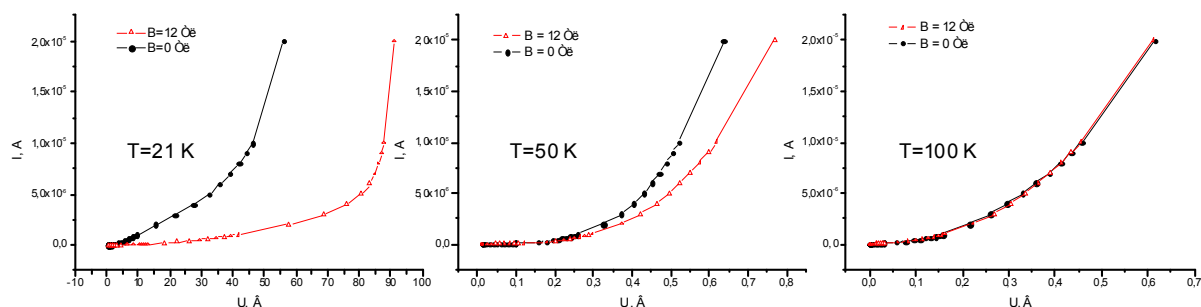


Рис.5. ВАХ при различных температурах в нулевом магнитном поле и в поле 12 Тл.

Приложение магнитного поля приводит к поляризации спинов в кластерах, исключая их из процесса электропереноса, в результате чего сопротивление структуры существенно возрастает. При повышении температуры движение электронов осуществляется только в приповерхностном слое кремния (рис.4б), в результате чего влияние магнитного поля резко ослабевает.

На основании проведенных экспериментов и анализа результатов можно сделать вывод, что в системе Si/SiO₂/Ni в различных температурных интервалах доминируют несколько механизмов электропереноса. В области T = 300 – 210 К основной вклад в проводимость вносят электроны, находящиеся на верхних энергетических уровнях зоны проводимости Si и имеет место их надбарьерная эмиссия в металл. При понижении температуры (T = 210 – 35 К), вследствие вымораживания электронных состояний на верхних уровнях, из процесса электропереноса исключаются кластеры никеля в порах из-за увеличения барьера на границе полупроводник-металл. При температурах ниже 35 К, когда фактически становится диэлектриком, электроперенос частично осуществляется через металлические кластеры в порах, а между порами – в приповерхностных слоях кремния. Этим механизмом также обосновывается обнаруженное при низких температурах положительное магнетосопротивление, появляющееся вследствие поляризации спинов в кластерах Ni с исключением их из процесса проводимости.

Авторы признательны Е.А. Стрельцову и Д.К. Иванову (БГУ) за проведение электрохимического осаждения никеля в ионные треки, а А.К. Федотову за обсуждение полученных результатов.

Данное исследование выполнено при поддержке ГКПНИ "Наноматериалы и нанотехнологии" (задание № 6.06) и Президиума НАН Беларуси (молодежный грант Е.Ю. Канюкова).

ЛИТЕРАТУРА

1. R.L.Fleischer, P.B.Price, R.M.Walker, Nuclear Tracks in Solids. Principles and Applications. Univ. California Press. Berkeley. CA. 1975
2. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers. Ed. by D.Fink. Heidelberg. Springer Series in Materials Science. V.63. 2004
3. D.Fink, A.V.Petrov, K. Hoppe, W.R. Fahrner, R. M. Papaleo, A.S. Berdinsky, A. Chandra, A.Chemseddine, A. Zrineh, A. Biswas, F. Faupel, L.T. Chadderton // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2004. V. B 218. P. 355
4. D.Fink, A.V.Petrov, W.R.Fahrner, K.Hoppe, R.M.Papaleo, A.S.Berdinsky, A.Chandra, A.Zrineh, L.T.Chadderton // International Journal of Nanoscience. 2005.V.4. Nos. 5-6. P. 965
5. D.Ivanou, E.A.Streltsov, A.K.Fedotov, A.V.Mazanik, D.Fink, A.V.Petrov, // Thin Solid Films. 2005. V.490. P.154
6. Ivanova Yu.A., Ivanou D.K., Fedotov A.K., Streltsov E.A., Demyanov S.E., Petrov A.V., Kaniukov E.Yu., Fink D. // Journal of Materials Science, 2007, V.42, No.22, p.9163–9169.
7. Демьянов С.Е., Канюков Е.Ю., Петров А.В., Белоногов Е.К. // Известия РАН. Серия Физическая, 2008, том 72, №9, с.1262-1264.
8. Канюков Е.Ю., Демьянов С.Е., Петров А.В., Окопуб А.В. // Сборник докладов XIII Ежегодного Симпозиума "Нанофизика и наноэлектроника", 16-20 марта 2009 г., Н.Новгород, Россия, с. 268-269