

магнетитового ряда. Степень нестехиометрии слабо-магнитной составляющей компоненты определить не представляется возможным. Можно только говорить о суперпарамагнетизме данной фазы обусловленной размером наночастиц магнетита.

В спектрах при 90 К изомерный сдвиг некоторых секстетов и дублетов имеет промежуточные значения между Fe^{3+} и Fe^{2+} , что можно интерпретировать как сохранение электронного обмена в некоторых частицах.

Сложная форма спектров полученных образцов связана как с суперпарамагнетизмом фаз, так и с комбинацией стехиометрической и нестехиометрической составляющих фазы.

Библиографический список

1. **Yu-Ving Mai.** Polimernye nanokompozity / Yu-Ving Mai, Zhong-Zhen Yu. – М.: Tehnosfera, 2011. – 688 с.
2. **Kayal, S.** Doxorubicin loaded PVA coated iron oxide nanoparticles for targeted drug delivery / S. Kayal, R. V. Ramanujan // Mater. Sci. and Eng.: C. – 2010. – V. 30, Iss. 3. – P. 484–490.
3. **Kozhitov, L. V.** The effective method based on IR annealing for manufacturing novel carbon nanocrystalline material and multifunctional metal-polymer nanocomposites / L. V. Kozhitov, V. V. Kozlov, V. G. Kostishyn, A. T. Morchenko, D. G. Muratov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. and Eng. – 2009. – N 5. – P. 012021.
4. **Rubinstein, M.** Investigation of the insulating phase of magnetite by NMR and Mossbauer effect / M. Rubinstein, D. W. Forester // Solid State Commun. – 1971. – V. 9. – P. 1675–1679.
5. **Hargrove, R. S.** Mossbauer measurements of magnetite below the Verwey transition / R. S. Hargrove, W. Kundig // Ibid. – 1970. – V. 8. – P. 303–308.
6. **Kyundig, V.** Issledovanie nekotorykh svoystv melkikh chastic $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ s pomosh'yu effekta Mossbauera / V. Kyundig, G. Bemmell, D. Konstabaris, R. H. Dinndkvist – М.: Atomizdat, 1969. – S. 222–238.
7. **Krupyanskii, Yu. F.** Razmernye efekty v mal'kh chasticah Fe_3O_4 / Yu. F. Krupyanskii, I. P. Suzdalev // ZhETF. – 1974. – T. 67, vyp. 2(8). – S. 736–743.
8. **Roggwiller, P.** Mössbauer spectra of superparamagnetic Fe_3O_4 / P. Roggwiller, W. Kundig // Solid State Communication. – 1973. – V. 12. – P. 901–903.
9. **Menil, F.** Systematic trends of ^{57}Fe Mössbauer isomer shifts in (FeO_n) and (FeF_n) polyhedra. Evidence of a new correlation between the isomer shift and the inductive effect of the competing bond $T\text{--}X(\text{--O})$ (where X is O or F and T element with a formal positive charge) / Menil F. // J. Phys. and Chem. of Solids. – 1985. – V. 46. – P. 763–789.
10. **Huang, H.** Mössbauer spectroscopy of protein-passivated iron oxide nanoparticles / H. Huang, R. Christmann, R. Ulber, V. Schunemann // Hyperfine Interactions. – 2012. – V. 205, Iss. 1–3. – P. 121–124.
11. **Oshtrakh, M. I.** Magnetite nanoparticles as-prepared and dispersed in Copaiba oil: study using magnetic measurements and Mössbauer spectroscopy / M. I. Oshtrakh, M. V. Ushakov, A. S. Semenova, D. G. Kellerman, V. Sepelak, A. F. R. Rodriguez, V. A. Semionkin, P. C. Morais // Hyperfine Interactions. – 2013. – V. 219, Iss. 1–3. – P. 19–24.
12. **Sawatzky, G. A.** Recoilless-Fraction ratios for Fe^{57} in octahedral and tetrahedral sites of a spinel and a garnet / G. A. Sawatzky, F. Van der Woude, A. H. Morrish // Phys. Rev. – 1969. – V. 183. – P. 383–386.
13. **Volenic, K.** A Mössbauer and X-ray diffraction study of nonstoichiometry in magnetite / K. Volenic, M. Seberini, J. Neid // Czechoslovak J. Phys. – 1975. – V. 25. – P. 1063–1071.

УДК 621.318.1:621.315.592

УСИЛЕННЫЙ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭФФЕКТ В МАССИВАХ НАНОСТОЛБИКОВ НИКЕЛЯ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

© 2013 г. Ю. А. Федотова¹, Д. К. Иванов², Ю. А. Иванова², А. Саад³, А. В. Мазаник², И. А. Свито², Е. А. Стрельцов², А. К. Федотов², С. И. Тютюнников⁴, П. Ю. Апель⁴

¹ Национальный центр физики частиц и высоких энергий БГУ, Республика Беларусь,

² Белорусский государственный университет, Республика Беларусь,

³ Al-Balqa Applied University, Jordan,

⁴ Объединенный институт ядерных исследований

Показано, что магниторезистивные свойства наноструктур $n\text{-Si/SiO}_2/\text{Ni}$, содержащих наногранулированные никелевые стержни в вертикальных порах в слое SiO_2 , существенно отличаются от аналогичных свойств в ранее исследованных наногранулированных пленках Ni, электроосажденных на пластины $n\text{-Si}$. С точки зрения электрофизических свойств изученные наноструктуры аналогичны системе двух диодов Шотки Si/Ni, включенных навстречу друг другу. В интервале температур 2–300 К и магнитных полей до 8 Тл исследовано магнитосопротивление таких струк-

тур. Установлено, что при температурах 17–27 К структуры обладают положительным магниторезистивным эффектом, величина которого зависит от приложенного к структуре поперечного напряжения и возрастает по мере уменьшения силы продольного (вдоль столбиков) тока. При токе 100 нА относительное магнитосопротивление в поле 8 Тл возрастает от 500 до 35000 % при изменении поперечного напряжения от 0 до –2 В. Наблюдаемый магниторезистивный эффект, по-видимому, связан с влиянием магнитного поля на процессы ударной ионизации приме-

сей, приводящие к лавинному пробою барьера Шотки Ni/Si. Доказана возможность управления магниторезистивным эффектом в темплатных структурах $n\text{-Si/SiO}_2/\text{Ni}$, прикладывая к наноструктуре дополнительное (поперечное) электрическое поле между кремниевой подложкой (как третьим электродом) и никелевыми столбиками.

Ключевые слова: барьеры Шотки, кремний, магнитосопротивление, магниторезистивный эффект, наноструктуры, никель.

Введение

Существующие в настоящее время магнитные наносенсоры и ячейки памяти имеют ряд недостатков, связанных с сильной чувствительностью к температуре, высокой стоимостью, ухудшением характеристик на высоких частотах. В связи с этим вызывает интерес разработка методов синтеза наноструктур и их массивов, использующих эффекты гигантского или туннельного магнитосопротивления [1]. Указанные эффекты реализуются в слоистых системах, содержащих большое количество формирующих сверхрешетки магнитных и немагнитных слоев [2], в мультислойных структурах в конфигурации спиновых вентилей [3], в контактах между двумя ферромагнитными материалами [4, 5] и т. д.

Другой подход к созданию массивов магнитных сенсоров основан на использовании пористых матриц-темплатов (SiO_2 , Al_2O_3 , полимеры и т. д.), в которых упорядоченные или случайно распределенные меза- или нанопоры могут быть заполнены различными материалами [6]. В настоящее время темплатный синтез стал доступной и надежной методикой для создания массивов наночастиц различных металлических и полупроводниковых материалов (см., например, работы [1, 7, 8]). Один из методов темплатного синтеза основан на использовании ионных треков. Известно, что облучение тяжелыми высокоэнергетическими ионами может существенно изменять свойства материала в цилиндрической области диаметром до 10 нм. Селективное травление этих латентных ионных треков, приводящее к созданию каналов (пор) с большим аспектным отношением длина/диаметр, позволяет формировать пористые темплаты для последующего синтеза массива наноструктур.

Особый интерес представляет использование метода темплатного синтеза для создания устройств микро- и нанoeлектроники в сочетании с электрохимическим осаждением, позволяющим контролировать процессы роста на атомарном уровне. Преимуществами электрохимического осаждения являются эффективный контроль толщины, состава и размера зерен осадков. Изменение параметров синтеза (потенциала осаждения, состава электролита, температуры, времени) позволяет создавать как однородные материалы, так и гетерогенные структуры [9].

Рассмотренный метод синтеза на кремниевых подложках массивов наночастиц, проявляющих магниторезистивные свойства, является перспективным для создания магниточувствительных электронных устройств, совместимых с планарной кремниевой технологией. Кроме того, при создании массивов наночастиц на полупроводниковой подложке последняя может быть использована как дополнительный электрод. В результате появляется возможность управлять параметрами полученных

структур, изменяя приложенное электрическое напряжение [10, 11].

Цель работы — изучение магниторезистивных свойств наноструктур $n\text{-Si/SiO}_2/\text{Ni}$, в которых никель электрохимически осажден в нанопоры, созданные посредством селективного травления треков тяжелых ионов в слое SiO_2 , термически выращенном на кремниевой подложке.

Образцы и методы исследования

Слой SiO_2 толщиной 700 нм был получен посредством термического окисления (1100°C , 10 ч, чистый кислород) пластин кремния марки КЭФ 4,5 (ориентация поверхности (100)). Далее пластины облучали ионами $^{197}\text{Au}^{26+}$ с энергией 350 МэВ и флюенсом $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Поры были получены посредством селективного химического травления латентных ионных треков в слабом растворе плавиковой кислоты. Травление приводило к формированию системы случайно расположенных сквозных нанопор по всей толщине оксида кремния. Поры имели форму усеченного конуса с нижним и верхним диаметрами порядка 100 и 250 нм соответственно. Заполнение нанопор никелем проводили путем электрохимического осаждения в подпотенциальном режиме. Режимы осаждения и электрохимические свойства полученных наноструктур описаны в работе [12].

Полученные наноструктуры $n\text{-Si/SiO}_2/\text{Ni}$ исследовали методами сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Согласно работе [12], электроосажденный никель имеет гранцентрированную кубическую решетку ($a \approx 0,352 \text{ нм}$) и гранулярную структуру с размером гранул порядка 30–70 нм.

Измерения электрофизических свойств выполняли в интервале температур от 2 до 310 К в магнитных полях до 8 Тл с использованием системы CFM (Cryogenic Ltd., Великобритания) на основе рефрижератора замкнутого цикла. Использованный температурный контроллер (Lakeshore, model 331) позволял осуществлять непрерывную развертку температуры со скоростью 0,1–1 К/мин либо стабилизировать температуру с точностью 0,005 К в процессе развертки магнитного поля или измерения вольт-амперных характеристик [12].

Вольт-амперные характеристики исследованных наноструктур $n\text{-Si/SiO}_2/\text{Ni}$ (рис. 1, а) измеряли с использованием трех контактов (рис. 1, б). Контакты 1 и 2 формировали на лицевой поверхности образца ультразвуковой пайкой индия. Тыльный контакт 3 формировали на обратной стороне кремниевой подложки с помощью индий-галлиевой эвтектики. Наличие тыльного контакта позволяло прикладывать к структуре поперечное напряжение V_{tr} (между парой контактов 1 и 3 или 2 и 3).

Сопротивление между контактами 1 и 2 определяли как отношение напряжения между этими

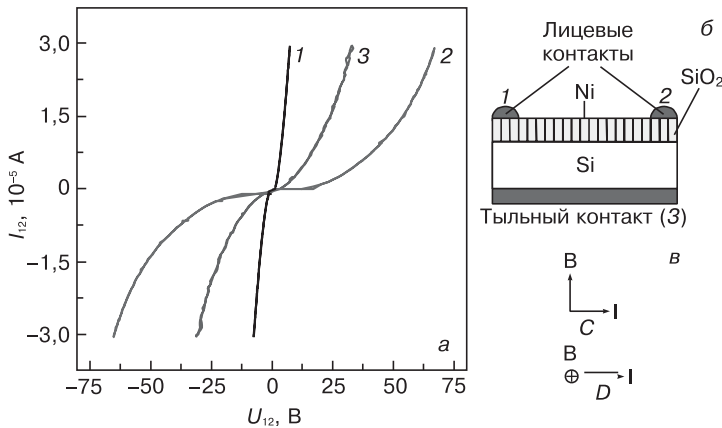


Рис. 1. Вольт–амперные характеристики наноструктур $n\text{-Si/SiO}_2/\text{Ni}$ при $V_{tr} = 0$ и $T = 25$ К (а), расположение контактов (б) и относительные направления магнитного поля и тока для конфигураций С и D (в): а: 1 — $B = 0$; 2 — $B = 8$ Тл, конфигурация С; 3 — $B = 8$ Тл, конфигурация D

контактами V_{12} к току I_{12} . При измерении температурной зависимости R_{12} температуру уменьшали от комнатной до 2 К со скоростью 0,5 К/мин, а ток I_{12} поддерживали постоянным. Как видно из рис. 1, б, при такой схеме измерений ток I_{12} всегда проходил через связки никелевых столбиков под контактами 1 и 2 и затем протекал по подложке параллельно поверхности образца.

Относительное магнитосопротивление определяли из соотношения

$$MR_{12}(B) = \frac{R_{12}(B) - R_{12}(0)}{R_{12}(0)} = \frac{V_{12}(B) - V_{12}(0)}{V_{12}(0)}, \quad (1)$$

где $R_{12}(B)$, $R_{12}(0)$ — сопротивления наноструктуры в магнитном поле B и в его отсутствии соответственно. Величину MR_{12} рассчитывали вычитанием друг из друга температурных зависимостей $R_{12}(T)$, измеренных при $B = 0$ и $B = 8$ Тл.

Магнитосопротивление измеряли при двух различных взаимных ориентациях магнитного поля и тока I_{12} через образец (конфигурации С и D, рис. 1, в. Как видно из рис. 1, в, в конфигурации С вектор $\mathbf{B}$ направлен вдоль оси никелевых наностолбиков, а в конфигурации D перпендикулярен как направлению наностолбиков, так и направлению тока.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлен пример вольт–амперных характеристик исследованных наноструктур, измеренных при 25 К в отсутствие поперечного напряжения смещения. Симметрия ветвей ВАХ, соответствующих разным полярностям продольного напряжения V_{12} , указывает на то, что связки никелевых наностержней, расположенных под контактами 1 и 2 (см. рис. 1, вставка (и)), формируют две системы последовательно соединенных через подложку и включенных навстречу друг другу диодов Шотки Si/Ni. Как видно из рис. 1, включение магнитного поля приводит

к уменьшению тока, причем величина эффекта зависит от ориентации вектора $\mathbf{B}$ относительно плоскости подложки и никелевых наностержней. Это находится в согласии с предыдущей работой [12], где впервые было обнаружено наличие существенного положительного магниторезистивного эффекта в области температур 17–27 К в наноструктурах $n\text{-Si/SiO}_2/\text{Ni}$.

Представленные на рис. 2 результаты (полученные при $V_{tr} = 0$ и $B = 8$ Тл) показывают, что магнитосопротивление MR_{12} исследованных наноструктур зависит не только от температуры, но и от величины измерительного тока. В частности, можно видеть, что при температурах ниже 35 К величина MR_{12} существенно увеличивается с уменьшением измерительного тока (см. кривые 1 и 2 на рис. 2, б). Кроме того, в отсутствие поперечного напряжения наблюдается существенный магниторезистивный эффект, достигающий 198–548 % при токах $10 < I_{12} < 1000$ нА. При этом температура, соответствующая максимальному значению MR_{12} , уменьшается от 25,8 до 21,1 К при уменьшении тока I_{12} (см. вставку на рис. 3, а).

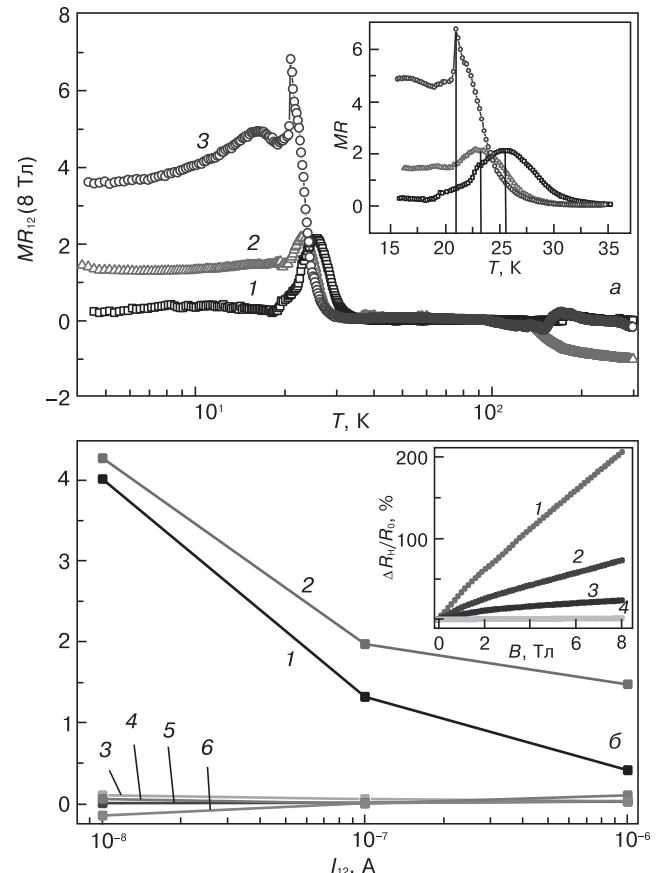


Рис. 2. Зависимости магнитосопротивления MR_{12} для геометрии измерения С от температуры T (а) и силы тока I_{12} (б) при $V_{tr} = 0$ и $B = 8$ Тл: а: 1–3 — для тока I_{12} 1000, 100 и 10 нА соответственно; б: 1–6 — при температуре 10, 23, 50, 100, 160, 300 К. Вставка на рис. 2, а — смещение максимума магнитосопротивления с уменьшением тока I_{12} ; вставка на рис. 2, б — магнитопольевые зависимости $MR_{12}(B)$, измеренные при $I_{12} = 100$ нА в конфигурации С при $T = 23$ (1), 25 (2), 30 (3) и 50 (4) К

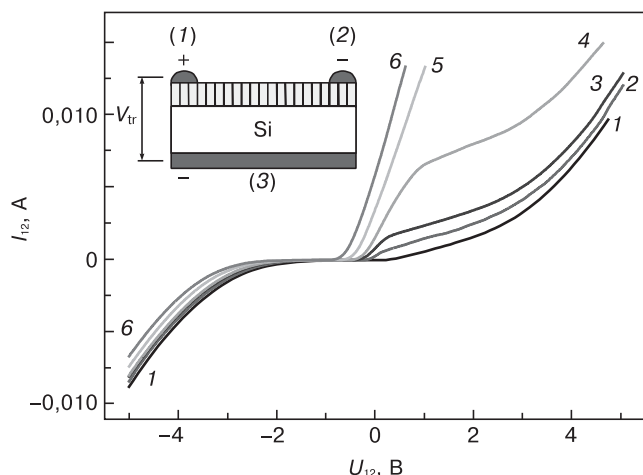


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики ($B = 0$, $T = 300$ К) при различных напряжениях V_{tr} , В: 1 — 0; 2 — 0,5; 3 — 0,8; 4 — 1; 5 — 1,5; 6 — 2

При температуре более 35 К магнитосопротивление MR_{12} уменьшается с ростом температуры; при этом на зависимостях $MR_{12}(T)$ наблюдается локальный максимум, который уменьшается по величине, смещаясь в область более высоких температур с увеличением тока I_{12} . Кроме того, для обеих использованных ориентаций векторов $\mathbf{B}$ и $\mathbf{I}$ при токах $I_{12} = 10\div 100$ нА знак MR_{12} сменяется с положительного

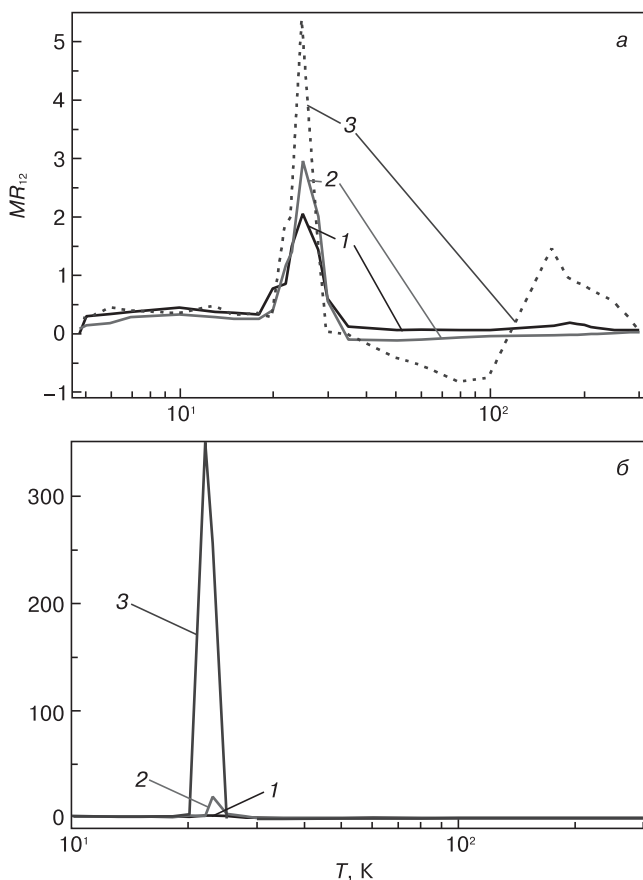


Рис. 4. Температурные зависимости магнитосопротивления MR_{12} ($B = 8$ Тл), полученные при измерительных токах $I_{12} = 1000$ (а) и 100 (б) нА при различных значениях поперечного напряжения V_{tr} , В: 1 — 0; 2 — +2; 3 — -2

на отрицательный при $T > 180$ К (рис. 2, б). Это может быть связано с анизотропным магнитосопротивлением в никелевых наностержнях (их вклад в общее сопротивление структуры n -Si/SiO₂/Ni повышается с ростом температуры вследствие быстрого уменьшения сопротивления кремниевой подложки), как наблюдалось в специально проведенных экспериментах с использованием гранулярных пленок никеля, осажденных на подложки n -Si при тех же режимах [12, 13].

Сопротивление структуры при пропускании тока через контакты 1—2 определяется в первую очередь обратносмещенным барьером Шотки. Поэтому, вероятнее всего, влияние магнитного поля на величину R_{12} связано главным образом с процессами, происходящими в обедненной области этого барьера. С учетом формы вольт-амперной характеристики на рис. 1 можно предположить, что в отсутствие магнитного поля в обедненной области происходят процессы ударной ионизации, в результате чего высота барьера уменьшается вследствие захвата неосновных носителей заряда. Это находится в согласии с отсутствием эффекта положительного магнитосопротивления при высоких температурах, когда подвижность носителей заряда мала. В соответствии с работами [14—17], магнитное поле препятствует ударной ионизации, что и приводит к увеличению сопротивления наноструктуры n -Si/SiO₂/Ni.

В рамках подхода, предложенного в работах [10, 11], можно управлять электрофизическими свойствами темплатных структур, используя кремниевую подложку как третий электрод и прикладывая к наноструктуре дополнительное (поперечное) электрическое поле. С этой целью была проведена серия экспериментов, в которых дополнительно подавали некоторое напряжение V_{tr} (от -2 до +2 В) между тыльным и одним из лицевых электродов (см. вставку на рис. 3). Такое напряжение будет приводить к перераспределению электрического потенциала в наноструктуре n -Si/SiO₂/Ni и, в частности, влиять на электрофизические свойства внутренних границ раздела n -Si/SiO₂ и n -Si/Ni (изменяя ширину областей объемного заряда и напряженность электрического поля в них). Результаты этих экспериментов представлены на рис. 3 и 4.

Как видно из рис. 3, зависимость тока I_{12} от напряжения V_{12} существенно изменяется при подаче к структуре поперечного напряжения V_{tr} . Очевидно, что изменение напряжения V_{tr} позволяет уменьшить напряжение V_{12} , соответствующее заданному измерительному току I_{12} . В этом случае даже незначительное увеличение сопротивления под действием магнитного поля в соответствии с соотношением (1) будет приводить к существенному росту значения относительного магнитосопротивления MR_{12} даже при незначительном изменении абсолютной величины изменения электросопротивления в магнитном поле.

Как показали эксперименты, приложение поперечного напряжения V_{tr} существенно изменяет ход температурной зависимости относительного магнитосопротивления MR_{12} . Как видно из рис. 4, при подаче напряжения V_{tr} существенно растет значение MR_{12} в области температур 20—30 К, максимум на зависимости $MR_{12}(T)$ увеличивается и становится более выраженным, причем эффект усиливается по мере снижения силы тока I_{12} и увеличения V_{tr} . Наибольший рост MR_{12} , достигавший 34000 % в магнитном поле 8 Тл, наблюдали при $V_{tr} = -2$ В и $I_{12} = 100$ нА (рис. 4, б). При температурах $T > 35$ К значение MR_{12} также зависит от значения и знака напряжения смещения V_{tr} , хотя и в меньшей степени. В частности, при $V_{tr} = +2$ В (см. рис. 4, а, кривая 2) магнитосопротивление становится отрицательным во всей области температур выше 35 К. В то же время при $V_{tr} = -2$ В (см. рис. 4, а, кривая 3), величина MR_{12} при увеличении температуры дважды меняет знак: при $T \sim 35$ К — с положительного на отрицательный и при ~ 120 К — наоборот, с отрицательного на положительный. Минимальное значение MR_{12} (обусловленное, вероятно, анизотропным магнитосопротивлением никеля [18]) достигает $-86,3$ % при 80 К, в то время как максимальное «высокотемпературное» положительное магнитосопротивление достигает 143,6 % при 161,4 К.

Заключение

Показано, что магниторезистивные свойства наноструктур n -Si/SiO₂/Ni, содержащих наногранулированные никелевые стержни в порах в слое SiO₂, существенно отличаются от аналогичных свойств в ранее исследованных наногранулированных пленках Ni, электроосажденных на пластины n -Si. С точки зрения электрофизических свойств изученные наноструктуры n -Si/SiO₂/Ni аналогичны системе двух диодов Шотки Si/Ni, включенных навстречу друг другу.

Установлено, что наноструктуры n -Si/SiO₂/Ni обладают значительным положительным относительным магнитосопротивлением в области температур 17—27 К, которое зависит от силы тока через образец и может эффективно управляться поперечным электрическим напряжением смещения, достигая 34000 % в магнитном поле 8 Тл. Наблюдаемый магниторезистивный эффект связан с влиянием магнитного поля на процессы ударной ионизации, приводящие к лавинному пробое барьера Шотки.

Библиографический список

1. Imry, Y. Nanostructures and mesoscopic systems / Y. Imry. — New York Academic : 1992. — P. 11.

2. Baibich, M. N. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices / M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas // Phys. Rev. Lett. — 1988. — V. 61. — P. 2472—2475.

3. Garcia, N. Magnetoresistance in excess of 200% in ballistic Ni nanocontacts at room temperature and 100 Oe / N. Garcia, M. Munoz, Y.-W. Zhao // Ibid. — 1999. — V. 82. — P. 2923—2926.

4. Schmidt, G. Spintronics in semiconductor nanostructures / G. Schmidt, C. Gould, L. W. Molenkamp // Physica E. — 2004. — V. 25. — P. 150—159.

5. Template-based synthesis of nanorod or nanowire arrays // Springer Handbook of nanotechnology / Ed. by Bharat Brushan — Heidelberg; Dordrecht; London; New York : Springer, 2007. — P. 161—178.

6. Nanofunctional materials, nanostructures and novel devices for biological and chemical detection / Ed. by C. Li, A. Zribi, L. Nagahara, M. Willander. — Warrendale (PA), 2007.

7. Magnetic ultrathin films: multilayers and surfaces/interfaces and characterization / Ed. by B. T. Jonker et al. — Warrendale (PA), 1990.

8. Fink, D. Etched ion tracks in silicon oxide and silicon oxynitride as charge injection or extraction channels for novel electronic structures / 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 Instrum. and Meth. in Phys. Res. B. — 2004. — V. 218. — P. 355—361.

9. Streltsov, E. A. Effect of Cd(II) on electrodeposition of textured PbSe / E. A. Streltsov, N. P. Osipovich, L. S. Ivashkevich, A. S. Lyakhov // Electrochim. Acta. — 1999. — V. 44. — P. 2645—2652.

10. Fink, D. Nanotechnology with ion track — tailored media / D. Fink, D. Sinha, J. Opitz-Coutureau, A. V. Petrov, S. E. Demyanov, W. R. Fahrner, K. Hoppe, A. K. Fedotov, L. T. Chadderton, A. S. Berdinsky // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. Mater. of the «Nanomeeting-2005». — Minsk (Belarus), 2005. — P. 474.

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. Mater. Sci. — 2007. — V. 42. — P. 9163—9165.

12. Fedotova, J. Magnetoresistance in n -Si/SiO₂/Ni nanostructures manufactured by swift heavy ion-induced modification technology / J. Fedotova, D. Ivanou, Yu. Ivanova, A. Fedotov, A. Mazanik, I. Svito, E. Streltsov, A. Saad, S. Tyutyunnikov, T. N. Koltunowicz, S. Demyanov, V. Fedotova // Acta Physica Polonica A. — 2011. — V. 120. — P. 133—135.

13. Fedotova, J. Gigantic magnetoresistive effect in n -Si/SiO₂/Ni nanostructures fabricated by the template-assisted electrochemical deposition / J. Fedotova, A. Saad, D. Ivanou, Yu. Ivanova, A. Fedotov, A. Mazanik, I. Svito, E. Streltsov, S. Tyutyunnikov, T. N. Koltunowicz // Electrical Rev. — 2012. — V. 88. — P. 305—308.

14. Delmo, M. P. Large positive magnetoresistive effect in silicon induced by the space-charge effect / M. P. Delmo, Sh. Yamamoto, Sh. Kasai, T. Ono, K. Kobayashi // Nature. — 2009. — V. 457. — P. 1112—1115.

15. Lanyon, H. P. D. Magnetoresistance of silicon diodes reverse biased into breakdown / H. P. D. Lanyon, W. S. Neal // Phys. status solidi (a). — 1974. — V. 21. — P. 605—616.

16. Lanyon, H. P. D. Magnetoresistance of avalanche semiconductor diodes / H. P. D. Lanyon // Ibid. — 1974. — V. 21. — P. 197—207.

17. Lutsev, L. V. Giant magnetoresistance in semiconductor / granular film heterostructures with cobalt nanoparticles / L. V. Lutsev, A. I. Stognij, N. N. Novitskii // Phys. Rev. B. — 2009. — V. 80. — P. 184423.

18. Fedotova, J. Magnetotransport in nanostructured Ni films electrodeposited on Si substrate / J. Fedotova, A. Saad, D. Ivanou, Yu. Ivanova, A. Fedotov, A. Mazanik, I. Svito, E. Streltsov, S. Tyutyunnikov, T. N. Koltunowicz // Electrical Rev. — 2012. — V. 88. — P. 90—92.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы» Республики Беларусь (задание 2.4.08).