

УДК 004.076.4

*С. А. Костюченко¹, А. И. Дмитриев²*¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова²Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II

Накопление информации с помощью энергонезависимых магниторезистивных запоминающих устройств

Обсуждаются неклассические принципы накопления информации с помощью энергонезависимой оперативной памяти, работающей на магниторезистивном эффекте, способные обеспечить невольтгаические запись и хранение информации в энергетическом пределе, близком к оценкам Ландауэра, где на первый план выходят термодинамические аспекты записи информации.

Ключевые слова: энергонезависимая оперативная память, магниторезистивный эффект, нанопленки и нанопроволоки разбавленных магнитных полупроводников.

*S. A. Kostyuchenko¹, A. I. Dmitriev²*¹Lomonosov Moscow State University²Moscow State University of Railway Engineering

Information storage by nonvolatile magnetoresistive random-access memory

Nonclassical principles of data storage by nonvolatile magnetoresistive random-access memory are discussed. These principles provide the recording and storage of information in the energy limit close to Landauer estimates, where the thermodynamic aspects of information recording dominate.

Key words: nonvolatile random-access memory, magnetoresistive effect, nanofilms and nanowires of diluted magnetic semiconductors.

1. Введение

Современные носители информации, пройдя путь от перфокарт и перфолент до жестких дисков (flash-памяти и blu-ray дисков) с плотностью записи, превышающей 10^{10} бит/см², уже не поражают воображение пользователей. Требования, предъявляемые к размеру, потребляемой энергии, скорости работы устройств хранения информации, стремительно растут. Это ставит задачу поиска и внедрения в технику альтернативных материалов и структур, работающих на неклассических принципах. Несмотря на то, что магнитной памяти уже более ста лет, она по-прежнему обладает рядом преимуществ (надежность записи, низкая стоимость увеличения емкости и т.д.) перед другими более современными видами памяти. При этом естественно, что магнитный способ хранения информации, как и любой другой, обладает своими недостатками. Прежде всего, это ограничение емкости магнитного диска, ограничение на время доступа и точность позиционирования механических систем магнитного диска. Дальнейшее усовершенствование магнитной памяти связано с уменьшением размеров одного бита и устранением механических систем позиционирования. К революционным достижениям в этой области можно отнести создание памяти, работающей на магниторезистивном эффекте (magnetoresistive random-access memory — MRAM) [1]. Магниторезистивный эффект заключается в изменении электрического сопротивления материала в магнитном поле. Этот эффект был обнаружен в 1856 году Уильямом

Томпсоном (лордом Кельвином) в железе. В той или иной мере магнитосопротивлением обладают все материалы, а величина эффекта составляет сотые доли процента. Однако для практического использования изменение сопротивления должно быть «гигантским». За открытие эффекта гигантского магнитосопротивления в мультислойных структурах, используемого в настоящее время в магнитной памяти, в 2007 году П. Грюнбергу (Германия) и А. Ферту (Франция) присуждена Нобелевская премия по физике.

2. Устройство и принципы работы MRAM

В MRAM каждый бит памяти представляет собой мультислойную структуру размером в несколько нанометров, имеющую два ферромагнитных слоя, разделенных тонким слоем диэлектрика (рис. 1). Направление намагниченности одного из слоев всегда остается фиксированным, а направление намагниченности другого слоя изменяется под действием внешнего магнитного поля. Из-за эффекта гигантского магнитосопротивления электрическое сопротивление мультислойной структуры зависит от взаимной ориентации намагниченностей в слоях. Одинаковая ориентация намагниченности в слоях элемента, соответствующая низкому электрическому состоянию, интерпретируется как «0». Разнонаправленная, характеризующаяся высоким электрическим сопротивлением, — как «1».

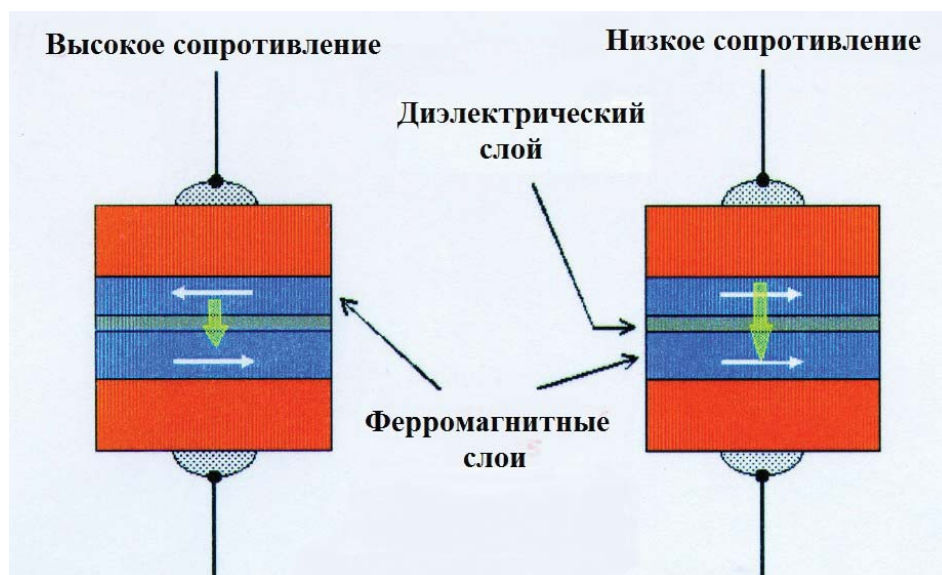


Рис. 1. Схема мультислойного элемента MRAM

Элементы MRAM расположены в виде квадратной сетки (рис. 2). Данные записываются путем пропускания тока через проводящие линии, расположенные выше и ниже этих элементов (рис. 3). Эти линии называют соответственно разрядными и числовыми шинами. Ток, протекающий по плоскому проводнику, создает магнитное поле, направленное в плоскости проводника перпендикулярно направлению тока. Чтобы перемагнитить ферромагнитный слой мультислойного элемента, отвечающего одному биту, недостаточно величины электрического тока в одной из управляющих шин. Лишь одновременное воздействие магнитного поля от обеих шин приводит к перемагничиванию. Таким образом, одновременное использование двух управляющих шин позволяет направлять запись информации в определенную область, обходясь без механически движущихся частей и устройств позиционирования. Считывание информации в MRAM основано на эффекте гигантского магнитосопротивления. К считывающим шинам прикладывается разность потенциалов. Если направление намагниченности управляемого ферромагнитного слоя совпадает с направлением намагниченности фиксированного ферромагнитного слоя, то электрический ток течет. Если направление намагниченности управляемого слоя противоположно намагниченности фиксированного слоя ферромагнетика, то ток отсутствует. Таким образом, реги-

стрируя электрический ток, можно считывать биты информации. MRAM является энерго-независимой памятью (записанная информация не стирается при снятии электропитания) с высокой скоростью записи/считывания. Определенные требования предъявляются к записывающей среде, которая в лучшем варианте должна представлять собой независимые, геометрически разделенные биты памяти.

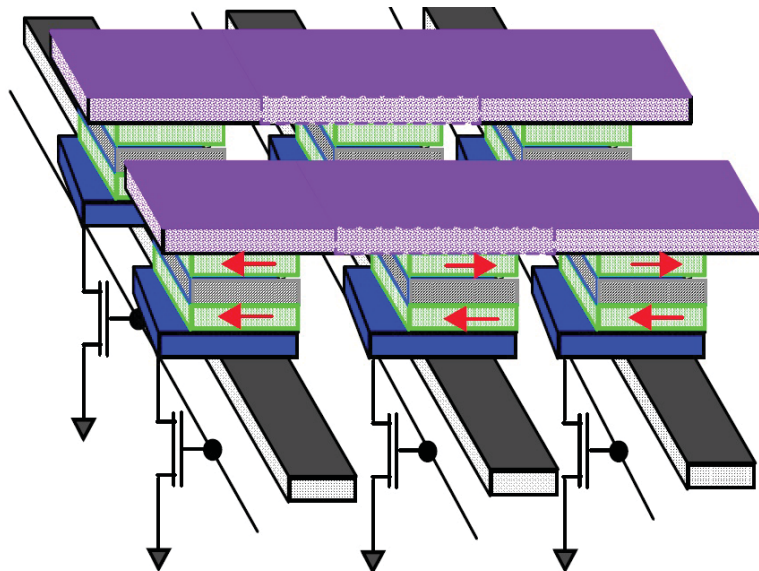


Рис. 2. Схема модуля MRAM

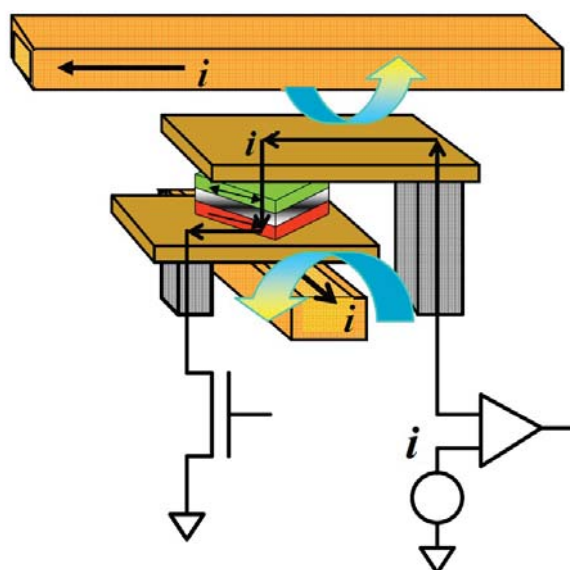


Рис. 3. Схема отдельной запоминающей ячейки MRAM

3. Массивы упорядоченных магниторезистивных нанопроволок как основа MRAM нового поколения

В качестве отдельных битов в MRAM в перспективе можно использовать массивы упорядоченных наноструктур разбавленных магнитных полупроводников Ge:Mn, Ge:Co и др. [1–4]. Анизотропия формы нанопроволок (большое значение отношения длины к диаметру) снимает проблему перехода в суперпарамагнитное состояние, приводящее к потере намагниченности, т.е. записанной информации. (При уменьшении размеров частиц энергия

магнитной анизотропии, стремящейся выстроить вектор намагниченности вдоль оси легко-го намагничивания, становится меньше энергии термических флуктуаций, отклоняющих вектор намагниченности от направления вдоль легкой оси.)

В настоящее время в качестве подложки для приготовления нанопроволок предложены: пленки анодированного оксида алюминия (рис. 4), поликарбонатные мембраны, нанопористые стекла и др. [5]. Мезопористые материалы должны иметь упорядоченные нанопоры с легко регулируемой и надежно воспроизводимой геометрией.



Рис. 4. Изображение мембраны анодированного оксида алюминия с порами диаметром 200 нм, полученное на просвечивающем электронном микроскопе

Однако достичь этого удастся далеко не всегда. Потенциальные проблемы, с которыми сталкиваются при приготовлении массивов упорядоченных нанопроволок элементарных полупроводников, отражены на рис. 5 [5]. Для приготовления нанопроволок подходят исключительно монокристаллические подложки без трещин и сколов. В противном случае на межзеренных границах поликристаллической подложки происходит нарушение периодичности нанопор. С этой же проблемой сталкиваются при использовании недостаточно чистых подложек. Большое внимание следует уделять состоянию поверхности. Шероховатости могут провоцировать рост нанопор в продольном направлении подложки. Разнородные поверхности подложки с нанопорами и нанопроволок должны иметь высокую адгезию, позволяющую фиксировать нанопроволоки внутри нанопор силами поверхностного сцепления. Адгезия представляет собой крайне сложное явление, поэтому подбор подложек с высокой адгезией к поверхности элементарных полупроводников происходит методом «проб и ошибок».

В настоящее время наиболее подходящим материалом для подложки является анодированный оксид высокочистого алюминия с гексагональным расположением нанопор на поверхности. Контроль условий анодирования (электролит, время, напряжение и ток анодирования) позволяет в широких пределах варьировать диаметр пор, расстояние между порами и толщину пленки. Число пор можно доводить до 10^{14} штук/см². Уникальная структура пор с узким распределением по размерам, высокая устойчивость к внешним воздействиям делает мембраны анодированного оксида алюминия привлекательным материалом для выращивания массивов упорядоченных нанопроволок. Кроме того, анодированный оксид алюминия имеет высокую диэлектрическую проницаемость, что открывает новые возможности подавления так называемых короткоканальных эффектов (туннелирование электронов и электрический пробой). Мембраны анодированного оксида алюминия с порами, заполненными магниторезистивным материалом, есть прообраз устройства магни-

торезистивной памяти нового поколения, соответственно, с легко регулируемой и надежно воспроизводимой архитектурой битов.

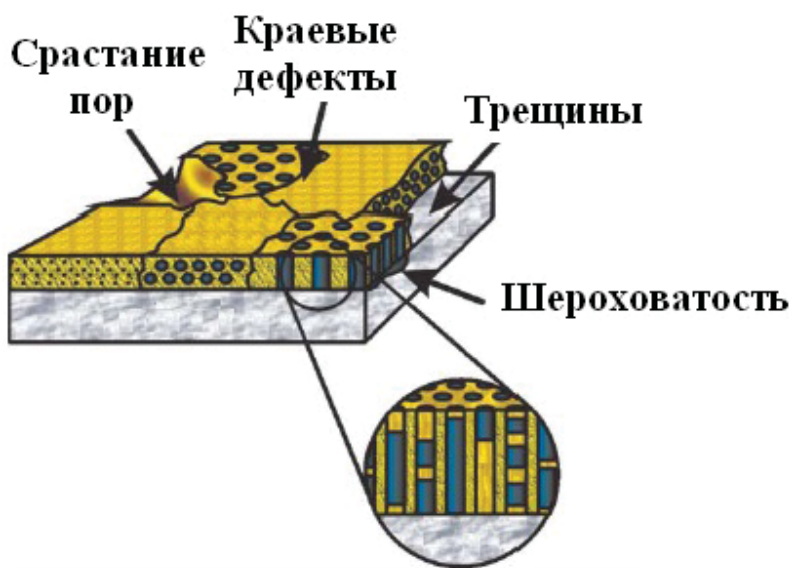


Рис. 5. Схема мезопористой тонкой пленки анодированного оксида алюминия. Стрелками обозначены дефекты структуры пленки [6]

В порах анодированного оксида алюминия методом сверхкритической жидкости синтезированы упорядоченные массивы нанопроволок германия, легированного переходными металлами Ge:Mn, Ge:Co и др. [1, 3–5, 7] (рис. 6).

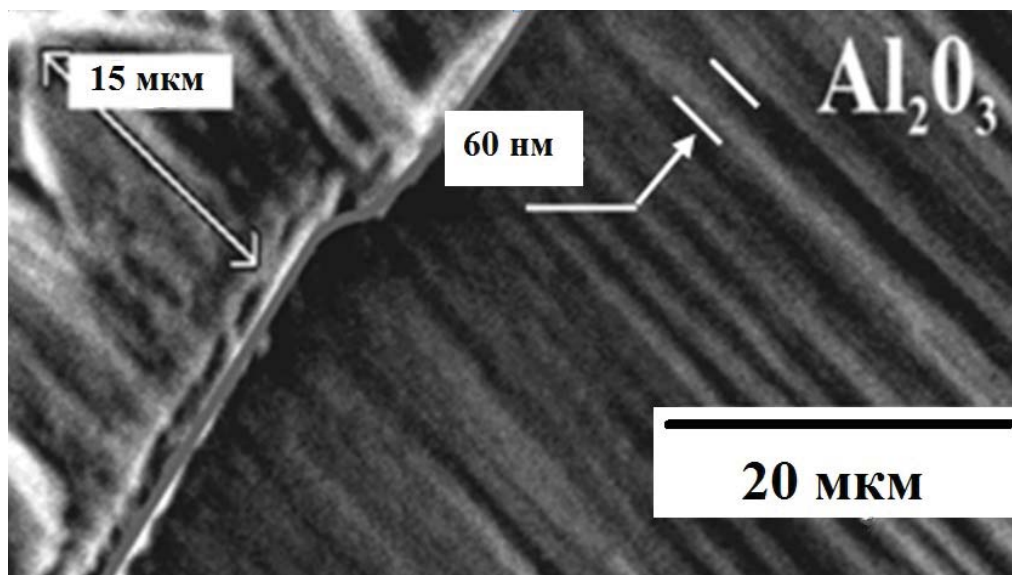


Рис. 6. Изображение мембраны анодированного оксида алюминия с нанопроволоками Ge:Cr: справа — упорядоченный массив нанопроволок в порах мембраны, слева — нанопроволоки, выступающие из поверхности частично растворенной мембраны [5, 7]

Этот метод приготовления нанопроволок имеет несколько преимуществ перед другими методами. Во-первых, процесс выращивания нанопроволок протекает всего 15–30 мин, в то время как синтез другими методами может протекать несколько дней. Во-вторых, среда, находящаяся в сверхкритическом состоянии, имеет низкую вязкость, что обеспечивает высокий коэффициент диффузии молекул реагентов, и, как следствие, их легкое проникновение в нанопоры среды для выращивания нанопроволок. В качестве сверхкритической

жидкости был выбран углекислый газ, так как он не токсичен и не горюч, в отличие от большинства органических растворителей.

Удалось измерить значение удельного электрического сопротивления нанопроволок на постоянном токе [8]. Эксперименты были осуществлены в двух вариантах. В первом варианте были проведены макроконтатные измерения для больших групп нанопроволок. Для создания омических контактов пластинки, содержащие вертикально выстроенные нанопроволоки, полировали алмазной пастой до тех пор, пока выступающие нанопроволоки не удалось наблюдать с помощью атомного силового микроскопа. Затем с торцов нанопроволок бомбардировкой ионами аргона снимали окисленный слой. После этого методом химического осаждения на обе поверхности пластинки наносили золотые контакты. Во втором варианте удалось подключить контакт к отдельным нанопроволокам и исследовать их электрическую проводимость. Это оказалось возможным с помощью атомного силового микроскопа, снабженного приставкой для измерения электрической проводимости (рис. 7).

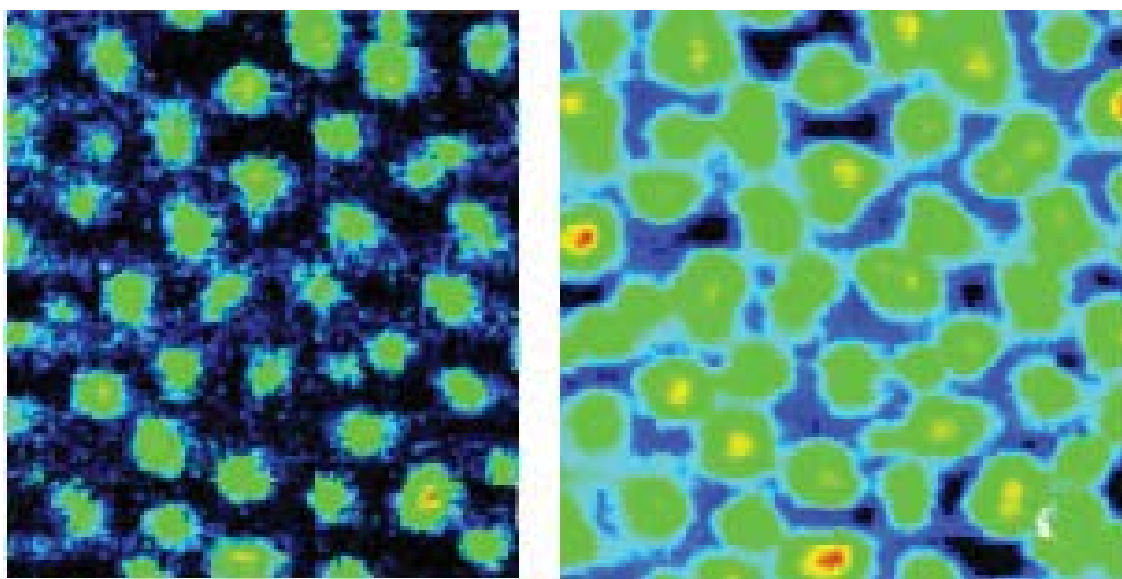


Рис. 7. Токовая карта поверхности мембраны анодированного оксида алюминия с ансамблем упорядоченных нанопроволок, полученная на атомно-силовом микроскопе при напряжениях 20 В (слева) и 40 В (справа). Светлые области соответствуют проводящим нанопроволокам. Темные – диэлектрической мембране [8]

Оба метода (макроконтатное подсоединение и измерение проводимости отдельных нанопроволок) дали близкие величины проводимости и вольтамперные характеристики, указывающие на наличие омических контактов. Измерение полевых зависимостей магнитного момента нанопроволок обнаруживает гистерезис при комнатной температуре, что указывает на ферромагнитное упорядочение в них [9]. Исследование высокочастотных магнитных и электрических свойств разбавленного магнитного полупроводника Ge:Mn обнаруживает зависимость электрической проводимости от намагниченности, что может быть использовано в MRAM [5, 7, 10].

4. Выводы

Для создания энергонезависимых магниторезистивных запоминающих устройств предложены альтернативные материалы и структуры, работающие на неклассических принципах. Обсуждаемые в статье принципы способны обеспечить невольтайческие запись и хранение информации в энергетическом пределе, близком к оценкам Ландауэра, где на первый план выходят термодинамические аспекты записи информации. Синергизм магнетизма и электронно-транспортных свойств, выражающийся в виде микроволнового магнитосопротивления в нанопленках и нанопроволках разбавленных магнитных полупроводников на

основе германия, легированного переходными металлами, является фундаментальной основой для использования этих материалов в вычислительной технике. Разработаны простые и не требующие больших затрат методы приготовления массивов магниторезистивных нанопроволок в мембранах анодированного оксида алюминия, являющихся прототипом энергонезависимой магниторезистивной оперативной памяти со сверхвысокой плотностью хранения информации (1 бит на одну нанопроволоку).

Авторы признательны В.П. Соловьеву за полезные обсуждения. Работа частично поддержана грантом РФФИ № 16-07-00863а и грантом Президента РФ МК-5754.2016.3

Литература

1. *Моргунов Р.Б., Дмитриев А.И.* Наноструктуры ферромагнитных полупроводников – будущее спинтроники // Российский химический журнал. 2009. Т. LIII, № 2. С. 36–46.
2. *Дмитриев А.И., Моргунов Р.Б., Казакова О.Л., Танимото Й.* Спин-волновой резонанс в пленках $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$, обладающих перколяционным ферромагнетизмом // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2009. Т. 135, вып. 6. С. 1134–1141.
3. *Моргунов Р.Б., Дмитриев А.И., Tanimoto Y., Кленина И.Б., Kazakova O.L., Kulkarni J.S., Holmes J.D.* Магнитный резонанс в нанопроволоках $\text{Ge}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}$ // Физика твердого тела. 2007. Т. 49, вып. 2. С. 285–290.
4. *Моргунов Р.Б., Дмитриев А.И., Tanimoto Y., Kazakova O.L., Kulkarni J.S., Holmes J.D.* Спиновая динамика в ориентированных ферромагнитных нанопроволоках $\text{Ge}_{0.99}\text{Co}_{0.01}$ // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, вып. 6. С. 657–663.
5. *Моргунов Р.Б., Дмитриев А.И.* Спиновая динамика в наноструктурах магнитных полупроводников (обзор) // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, вып. 10. С. 1873–1889.
6. *Ziegler K.J., Polyakov B., Kulkarni J.S., Crowley T.A., Ryan K.M., Morris M.A., Erts D., Holmes J.D.* Conductive films of ordered nanowire arrays // Journal of Materials Chemistry. 2004. V. 14. P. 585–589.
7. *Дмитриев А.И., Таланцев А.Д., Зайцев С.В., Коплак О.В., Моргунов Р.Б.* Нано- и гетероструктуры магнитных полупроводников для спинтроники // Известия академии наук. Серия химическая. 2011. Вып. 6. С. 1027–1033.
8. *Erts D., Polyakov B., Daly B., Morris M.A., Ellingboe S., Boland J., Holmes J.D.* High Density Germanium Nanowire Assemblies: Contact Challenges and Electrical Characterization // Journal of Physical Chemistry B. 2006. V. 110. P. 820–826.
9. *Kazakova O., Kulkarni J.S., Holmes J.D., Demokritov S.O.* Room-temperature ferromagnetism in $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ nanowires // Physical Review B. 2005. V. 72. P. 094415–1–6.
10. *Дмитриев А.И., Моргунов Р.Б., Казакова О.Л.* Влияние отжига на микроволновое магнетосопротивление в тонких пленках $\text{Ge}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}$ // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44, вып. 3. С. 320–325.

References

1. *Morgunov R.B., Dmitriev A.I.* Ferromagnetic semiconductor nanostructures — future spintronics. Russ. J. Gen. Chem. 2010. V. 80. P. 591–603.
2. *Dmitriev A.I., Morgunov R.B., Kazakova O.L., Tanimoto Y.* Spin-wave resonance in $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ films exhibiting percolation ferromagnetism. J. Exp. Theor. Phys. 2009. V. 108. P. 985–991.

3. *Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Tanimoto Y., Klenina I.B., Kazakova O.L., Kulkarni J.S., Holmes J.D.* Magnetic resonance in $\text{Ge}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}$ nanowires. *Phys. Solid State*. 2007. V. 49. P. 296–301.
4. *Morgunov R.B., Dmitriev A.I., Tanimoto Y., Kulkarni J.S., Holmes J.D., Kazakova O.L.* Spin dynamics in oriented ferromagnetic nanowires $\text{Ge}_{0.99}\text{Co}_{0.01}$. *Phys. Solid State*. 2008. V. 50. P. 1103–1109.
5. *Morgunov R.B., Dmitriev A.I.* Spin dynamics in magnetic semiconductor nanostructures. *Phys. Solid State*. 2009. V. 51. P. 1985–2002.
6. *Ziegler K.J., Polyakov B., Kulkarni J.S., Crowley T.A., Ryan K.M., Morris M.A., Erts D., Holmes J.D.* Conductive films of ordered nanowire arrays. *Journal of Materials Chemistry*. 2004. V. 14. P. 585–589.
7. *Dmitriev A.I., Talantsev A.D., Zaitsev S.V., Koplak O.V., Morgunov R.B.* Nano- and heterostructures of magnetic semiconductors for spintronics. *Russ. Chem. Bull.* 2011. V. 60. P. 1051–1057.
8. *Erts D., Polyakov B., Daly B., Morris M.A., Ellingboe S., Boland J., Holmes J.D.* High Density Germanium Nanowire Assemblies: Contact Challenges and Electrical Characterization. *Journal of Physical Chemistry B*. 2006. V. 110. P. 820–826.
9. *Kazakova O., Kulkarni J.S., Holmes J.D., Demokritov S.O.* Room-temperature ferromagnetism in $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ nanowires. *Physical Review B*. 2005. V. 72. P. 094415–1–6.
10. *Dmitriev A.I., Morgunov R.B., Kazakova O.L.* Effect of annealing on the microwave magnetoresistance of thin $\text{Ge}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}$ films. *Semiconductors*. 2010. V. 44. P. 303–308.

Поступила в редакцию 06.02.2017