

Туннельные магниторезистивные элементы для датчиков магнитного поля

© И.Ю. Пашенькин,¹ М.В. Сапожников,^{1,2} Н.С. Гусев,¹ В.В. Рогов,¹ Д.А. Татарский,^{1,2} А.А. Фраерман¹

¹ Институт физики микроструктур РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: pashenkin@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 28 марта 2019 г.

В окончательной редакции 28 марта 2019 г.

Принято к публикации 15 апреля 2019 г.

Отработана технология изготовления цепочек туннельных магниторезистивных (ТМР) элементов $\text{CoFe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiFe}$ с пиннингом на антиферромагнитном слое IrMn . Исследована зависимость формы кривых магнетосопротивления от геометрических параметров латерально ограниченных ТМР-контактов, а также от взаимной ориентации внешнего магнитного поля и оси однонаправленной анизотропии закрепленного слоя CoFe . Сопротивление цепочек составляло от нескольких десятков $\text{k}\Omega$ до сотен $\text{M}\Omega$ в зависимости от толщины туннельно-прозрачного слоя диэлектрика при величине магниторезистивного эффекта 10–15%. Отработанная технология может быть использована для изготовления туннельных датчиков магнитного поля.

Ключевые слова: туннельные магниторезистивные контакты, однонаправленная анизотропия, магнетронное распыление, оптическая литография, ионное травление.

DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48336.122-19

Интерес к изучению туннельных магниторезистивных (ТМР) структур вызван их востребованностью в ряде приложений, в частности, возможностью изготовления на их основе датчиков магнитного поля [1] и элементов энергонезависимой магниторезистивной памяти с высокой плотностью записи [2]. В связи с этим в настоящее время ведутся активные исследования по подбору материалов и технологических параметров с целью оптимизации характеристик ТМР-элементов, таких как величина магниторезистивного эффекта и форма зависимости их сопротивления от внешнего поля ($R(H)$). На сегодняшний день достигнутые величины ТМР эффекта составляют 40–80% в структурах с аморфным барьером Al_2O_3 [3–5] и 600% — с кристаллическим барьером MgO [6].

ТМР-эффект представляет собой явление изменения сопротивления электрического контакта двух ферромагнитных слоев, разделенных туннельно-прозрачной прослойкой диэлектрика толщиной порядка 1 nm, при приложении магнитного поля. Величина ТМР-эффекта пропорциональна косинусу угла между направлениями намагниченности свободного магнитомягкого и магнитожесткого слоев. В качестве магнитожесткого может быть использован магнитный слой с большой однонаправленной анизотропией, возникающей в результате обменного взаимодействия с антиферромагнетиком (закрепленный слой). В результате отклик ТМР-элемента на внешнее магнитное поле осуществляется за счет перемагничивания свободного ферромагнитного слоя структуры при слабом изменении направления намагниченности закрепленного слоя, от коэрцитивных свойств которого

зависит диапазон магнитных полей, в котором может функционировать прибор. Использование слоев с однонаправленной анизотропией, закрепленных на антиферромагнитном подслое, позволяет заметно увеличить величину поля перемагничивания магнитожесткого слоя. Одной из требуемых характеристик датчиков магнитного поля является линейность зависимости $R(H)$ чувствительных элементов, достигаемая наведением одноосной анизотропии в свободном слое [1]. Среди методов задания анизотропии ферромагнитной пленки можно выделить организацию слабой обменной связи с антиферромагнетиком, напыление во внешнем магнитном поле, а также литографирование областей, обладающих геометрической магнитостатической анизотропией.

Настоящая работа посвящена обработке технологии получения ТМР-элементов на основе многослойных наноструктур $\text{NiFe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CoFe}/\text{IrMn}$, адаптированных для использования в датчиках магнитного поля. Для этого были изготовлены латерально ограниченные ТМР-контакты анизотропной формы размером в несколько μm и исследованы зависимости $R(H)$ при различных взаимных ориентациях внешнего магнитного поля и оси однонаправленной анизотропии для контактных областей с различным аспектным соотношением сторон. Для повышения рабочего напряжения ТМР-элементов единичные контакты были последовательно соединены в цепочки, устойчивые к пробую при напряжениях до 10 V.

Многослойные наноструктуры $\text{Ta}(20)/\text{Pt}(20)/\text{Ta}(20)/\text{Pt}(5)/\text{Ta}(5)/\text{NiFe}(7)/\text{Al}_2\text{O}_3(d)/\text{CoFe}(7)/\text{IrMn}(15)/\text{Ta}(5)/\text{Pt}(5)$ (толщины указаны в нанометрах) формировались методом высоковакуумного магнетронного распыления.

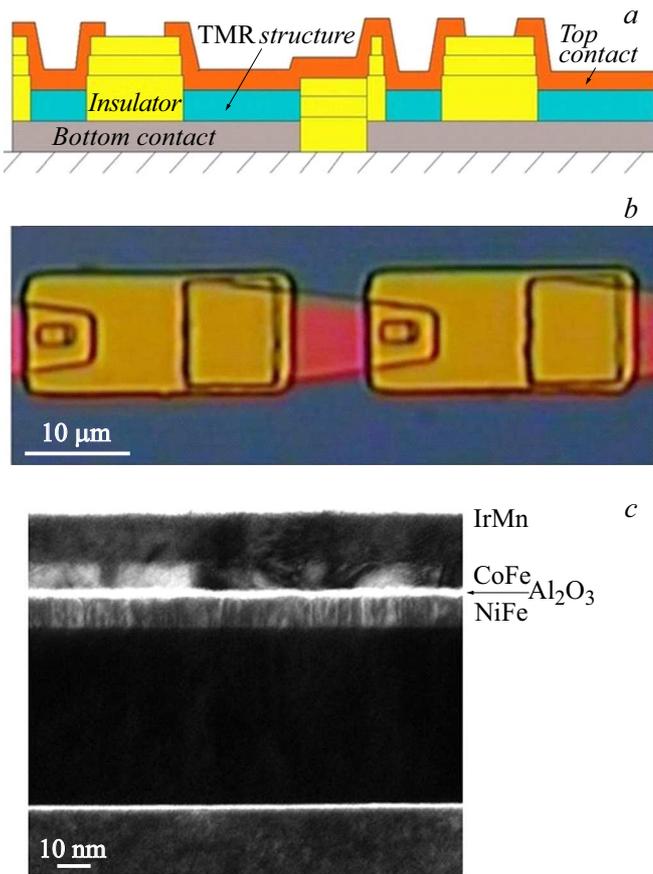


Рис. 1. *a* — схематическое изображение поперечного сечения двух соседних элементов в цепочке; *b* — фотография двух элементов цепочки. Изолятор — окись тантала, верхний контакт — золото; *c* — светлопольное изображение поперечного сечения TMR-структуры, полученное в просвечивающем электронном микроскопе.

Остаточное давление в напылительной камере не превышало 5×10^{-7} Торр, рабочее давление аргона в процессе напыления составляло 2×10^{-3} Торр. Диэлектрические слои Al_2O_3 получались методом реактивного высокочастотного магнетронного распыления металлической мишени Al в атмосфере смеси газов Ar и O_2 . Толщина диэлектрика d для разных образцов варьировала от 0.9 до 1.5 nm. Формирование всех слоев структуры производилось в одном технологическом процессе без нарушения вакуума. На рис. 1, с приведено изображение поперечного среза TMR-структуры, полученное на просвечивающем электронном микроскопе.

Контроль магнитных свойств полученных пленок осуществлялся методами оптической керровской магнетометрии в меридиональной конфигурации на длине волны 632 nm. На рис. 2 приведена кривая намагничивания одной из полученных структур. Формирование однонаправленной анизотропии ферромагнитного слоя CoFe осуществлялось без процедуры отжига. Для этого напыление антиферромагнитного слоя IrMn производилось в магнитном поле напряженностью 150 Oe. При этом слой

CoFe находился в магнитном состоянии однородного насыщения и диктовал направление намагниченности приграничных слоев антиферромагнетика за счет обменного взаимодействия. Направление подмагничивающего поля совпадало с направлением цепочек в TMR-контактов. Соответственно после отключения поля слой CoFe оказывается запиннигованным на подслое IrMn. Ось легкого намагничивания слоя NiFe также определяется направлением магнитного поля в процессе напыления.

Полученные многослойные наноструктуры использовались для изготовления TMR-элементов, в которых слой NiFe(7)/ $\text{Al}_2\text{O}_3(d)$ /CoFe(7)/IrMn(15) является магниточувствительным, а структура Ta(20)/Pt(20)/Ta(20)/Pt(5)/Ta(5) выполняет функцию контактного слоя. Формирование TMR-элементов производилось с применением последовательных операций оптической литографии и ионного травления в атмосфере аргона. Латеральная геометрия TMR контактов представляет собой прямоугольные области размерами 2×3 и $1.5 \times 4 \mu\text{m}$ для разных образцов. Прямоугольники имеют закругленные углы с радиусом закругления $\sim 0.25 \mu\text{m}$, что обусловлено разрешением литографической установки. Готовый TMR-элемент получается последовательным соединением в цепочку 50 единичных TMR-контактов мостиками из золота (рис. 1, *a, b*) и формированием контактных площадок для включения в измерительную схему. В зависимости от толщины барьерного слоя структур сопротивление цепочек варьировало от нескольких десятков kΩ до сотен MΩ, что позволяло проводить электрические измерения при достаточно больших напряжениях.

Результаты измерения зависимости сопротивления цепочек TMR-элементов от внешнего магнитного поля $R(H)$ показали наличие TMR-эффекта величиной 10–15% при комнатной температуре. При этом форма кривой $R(H)$ завит от взаимных ориентаций оси

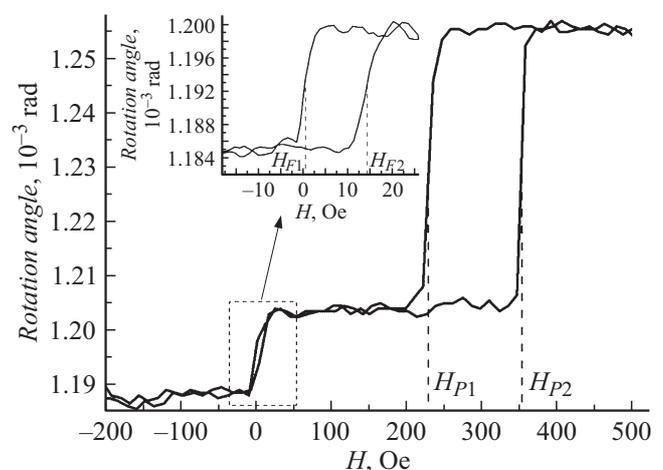


Рис. 2. Характерная кривая намагничивания TMR-структур. Характерные поля перемагничивания свободного (F) и закрепленного (P) слоя, обозначенные на рисунке как H_{F1} , H_{F2} , H_{P1} и H_{P2} , соответствуют полям на рис. 4.

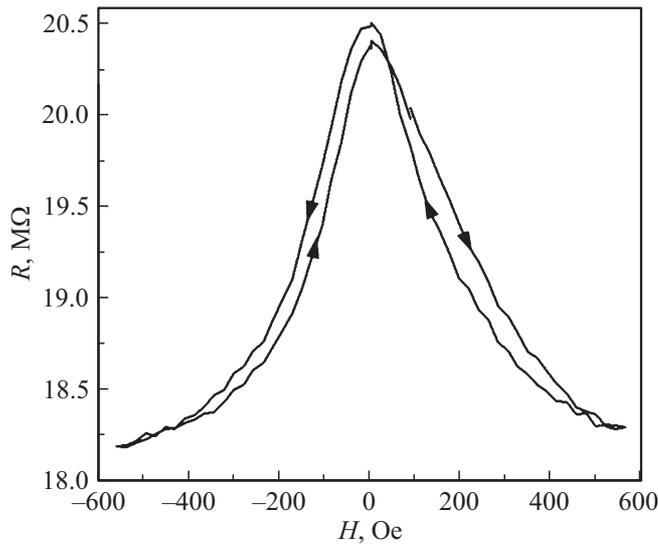


Рис. 3. Характерный вид $R(H)$ цепочек ТМР-контактов во внешнем поле, направленном перпендикулярно оси однонаправленной анизотропии.

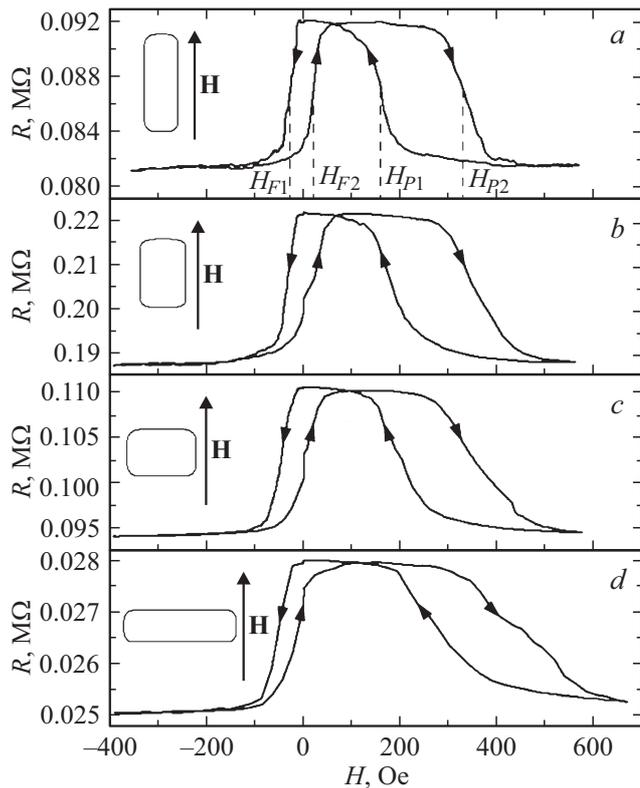


Рис. 4. Зависимости $R(H)$ цепочек с различной геометрией ТМР-контактов. Латеральные размеры областей: $a, b - 1.5 \times 4$; $c, d - 2 \times 4 \mu\text{m}$. Характерные поля перемагничивания свободного (F) и закрепленного слоя (P), обозначенные на рисунке как H_{F1}, H_{F2}, H_{P1} и H_{P2} , соответствуют полям на рис. 2.

однаправленной анизотропии CoFe (и совпадающей с ней осью легкого намагничивания слоя NiFe), длин-

ной стороны области ТМР-контакта и приложенного магнитного поля. Характерная форма кривых $R(H)$ цепочек ТМР-контактов при намагничивании поперек (перпендикулярная геометрия) и вдоль оси (продольная геометрия) однонаправленной анизотропии приведена на рис. 3, 4 соответственно.

Форма кривой $R(H)$ при перпендикулярном намагничивании свидетельствует о том, что ось легкого намагничивания слоя NiFe совпадает с осью однонаправленной анизотропии закрепленного слоя. При этом следует отметить, что форма ТМР-контактов не оказывает заметного влияния на кривую в этой геометрии.

Смена направления внешнего магнитного поля с перпендикулярного на продольное качественно изменяет форму зависимости $R(H)$. На рис. 4 приведены соответствующие кривые $R(H)$ цепочек ТМР-контактов различной геометрии. Цепочки отличались различным аспектным соотношением сторон прямоугольных областей ТМР-контактов, а также направлением длинной стороны относительно оси пиннинга. В этом случае зависимости $R(H)$ имеют форму, близкую к прямоугольной (рис. 4), что соответствует перемагничиванию ферромагнитных слоев вдоль их легких осей. Влияние формы областей ТМР-контактов и их ориентации относительно внешнего поля проявляется в изменение наклона петли, соответствующей перемагничиванию слоя CoFe, тогда как на петле NiFe форма ТМР-контактов практически не сказывается. По-видимому, это связано с тем, что одноосная анизотропия слоя NiFe, возникающая в результате напыления структуры во внешнем магнитном поле, превалирует над эффектами формы.

Наблюдаемая величина ТМР-эффекта высокорезистивных цепочек демонстрирует зависимость от вели-

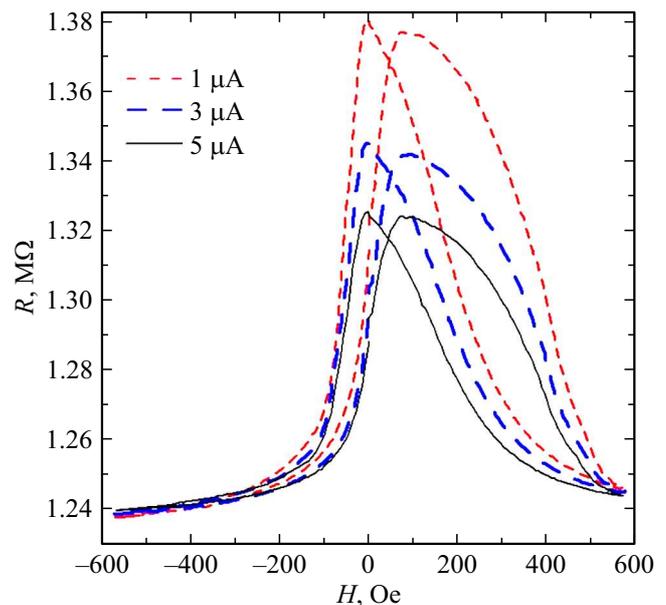


Рис. 5. Зависимость $R(H)$ цепочки ТМР-контактов при разных величинах протекающего тока. Намагничивание осуществляется вдоль легкой оси ТМР-элемента.

чины протекающего тока (рис. 5), тогда как в образцах с небольшим сопротивлением данный эффект при тех же величинах тока отсутствует. Это позволяет предположить, что изменение величины магнетосопротивления связано с изменением формы туннельного барьера в электрических полях порядка 1 MV/cm [7,8], что соответствует напряжению около 10 V , приложенному к цепочке ТМР-элементов.

Таким образом, нами отработана технология изготовления и исследованы магниторезистивные свойства цепочек ТМР-контактов в зависимости от их геометрии и ориентации осей анизотропии относительно внешнего магнитного поля. Объединение отдельных ТМР-контактов в цепочку позволяет избежать статического пробоя ТМР-элементов и повысить их рабочее напряжение до 10 V . Полученные результаты могут быть использованы для изготовления туннельных датчиков магнитного поля.

Финансирование работы

Отработка технологии изготовления туннельных магниторезистивных структур и исследование их магнитных свойств было выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-02-00247), исследование транспортных и магнитоэлектрических свойств цепочек туннельных контактов выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 16-12-10340).

Благодарности

При выполнении работы использовалось оборудование ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“ ИФМ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Freitas P.P., Ferreira R., Cardoso S. // *Proceed. IEEE*. 2016. Vol. 104. N 10. P. 1894–1918. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2578303
- [2] Yuasa S., Djayaprawira D.D. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. N 40. P. 337–354. DOI:10.1088/0022-3727/40/21/R01
- [3] Wie H.X., Qin Q.H., Ma M., Sharif R., Han X.F. // *J. Appl. Phys.* 2007. Vol. 101. P. 09B501. DOI: 10.1063/1.2696590
- [4] Wang D.X., Nordman C., Daughton J.M., Qian Z.H., Fink J. // *IEEE Trans. Magn.* 2004. Vol. 40. N 4. P. 2269–2271.
- [5] Gao L., Jiang X., Yang S.-H., Rice P.M., Topuria T., P.Parkin S.S. // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102. P. 247205. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.247205
- [6] Ikeda S., Hayakawa J., Ashizawa Y., Lee Y.M., Miura K., Hasegawa H., Tsunoda M., Matsukura F., Ohno H. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 93. P. 082508. DOI: 10.1063/1.297643

[7] Cruz de Gracia E.S., Dorneles L.S., Schelp L.F., Teixeira S.R., Baibich M.N. // *Phys. Rev. B*. 2007. Vol. 76. P. 214426.

[8] Li F., Li Z., Xiao M., Du J., Xu W., Hu A. // *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 69. P. 054410.