

УДК 537.622

МАГНИТНЫЕ И РЕЗИСТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ

© 2023 г. В. Е. Сизов^{1, *}, Т. А. Шайхулов²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязинский филиал,
Фрязино, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: sizov@fireras.ru

Поступила в редакцию 12.06.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 28.06.2023 г.

В температурном интервале 50–300 К с помощью магнитотранспортных измерений изучены магнитные и резистивные свойства гетероструктуры антиферромагнетик–ферромагнетик $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. Установлено, что в гетероструктуре слой SrMnO_3 при комнатной температуре находится в антиферромагнитном состоянии, что выше его температуры Нееля для одиночного слоя, а намагниченность гетероструктуры проявляет свойства однонаправленной анизотропии. Данный вывод подтверждается и по спектрам ферромагнитного резонанса.

DOI: 10.31857/S0367676523702630, EDN: PTFSFX

Перовскитные манганиты демонстрируют различные интересные физические явления, в том числе колоссальное магнитосопротивление [1]. Ожидается, что из-за сосуществующих спиновых, зарядовых и орбитальных степеней свободы граничные слои между различными оксидами в гетероструктурах будут демонстрировать гораздо более богатую физику, чем их обычные полупроводниковые аналоги.

Одним из межфазных эффектов является появление дополнительной однонаправленной анизотропии, ее возникновение объясняется обменным взаимодействием между ферромагнитными (ФМ) и антиферромагнитными (АФМ) спинами на границе раздела [2]. Манганиты со структурой перовскита хорошо подходят для изучения интерфейсных эффектов, возникающих в гетероструктурах ферромагнетик/антиферромагнетик, поскольку имеют богатые фазовые диаграммы с несколькими магнитными порядками [3, 4].

Эффект анизотропного магнитосопротивления представляет практический и теоретический интерес. В тонких пленках переходных металлов он используется для изготовления магнитных устройств, например, магнитных считывающих головок и датчиков [5]. Гигантский планарный эффект Холла [6], возникающий из-за эффекта анизотропного магнитосопротивления в манга-

нитах с колоссальным магнитосопротивлением, считается многообещающим для энергонезависимых запоминающих устройств, таких как магнитная память [7]. Кроме того, изучение анизотропного магнитосопротивления проливает свет на его связь с другими фундаментальными свойствами, такими как магнитокристаллическая анизотропия и спин-орбитальная связь в магнитных материалах [8, 9]. Анизотропное магнитосопротивление в ферромагнитных сплавах возникает из-за спин-орбитальной связи, которая дает зависимость скорости рассеяния электронов проводимости s-зоны от угла между направлением их тока и направлением спина локализованных 3d-электронов. Обычно величина анизотропного магнитосопротивления приближается к нулю выше температуры Кюри и увеличивается примерно линейно с понижением температуры ниже температуры Кюри, достигая насыщения при низких температурах. В малых полях анизотропное магнитосопротивление должно демонстрировать монотонное изменение, индуцированное полем, которое выходит на насыщение в больших полях.

С помощью измерений полной кривой магнитосопротивления простых двухслойных АФМ/ФМ гетероструктур определяли анизотропию ферромагнетика (иногда называемую величиной поля обменного подмагничивания), коэрцитивной си-

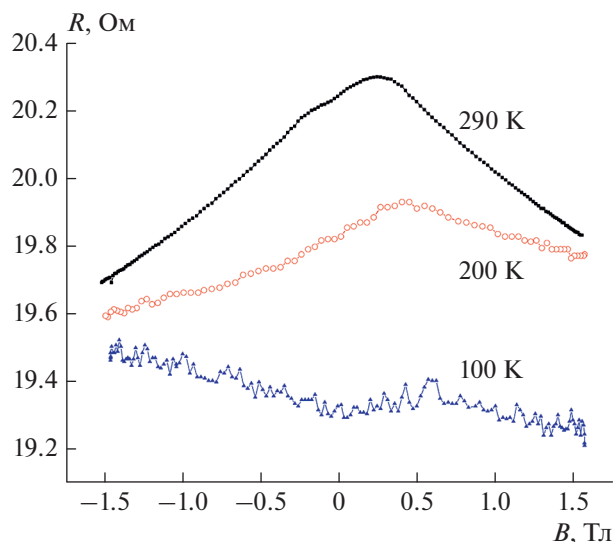


Рис. 1. Эффект Холла для одиночной пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при температурах 290, 200 и 100 К (значения температуры приведены около кривых).

лы или констант анизотропии [10, 11]. Важным результатом некоторых из этих исследований является указание на то, что ФМ-слой, по-видимому, образует переходный слой на границе раздела [12–14].

Манганиты-перовскиты привлекают внимание не только из-за большого количества интересных физических свойств, включая колоссальное магнитосопротивление, высокую температуру Кюри, фазовое разделение и взаимодействие между электронами [15–17], но и из-за их потенциальных применений [18, 19]. Одним из наиболее перспективных материалов в семействе манганитов является $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ из-за его свойств полуметалла, колоссального магнитосопротивления и высокой температуры Кюри [17, 20]. $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ обладает высококоррелированной электронной системой со сложными взаимодействиями между спином, зарядом и орбитальной степенью свободы [21], чувствительными к внутренним или внешним возмущениям, таким как деформация решетки, стехиометрия кислорода и другим [22–24].

Манганит на основе стронция SrMnO_3 принадлежит к семейству манганитов на основе лантана стронция $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. Обычно он имеет три различные полиморфные фазы, а именно, кубическую, 4Н- и 6Н-гексагональную фазы, стабилизированные при разных температурах роста [25]. Все фазы обладают свойствами АФМ изолятора G-типа при температурах ниже температуры Нееля, которая варьируется для него от 260 до 278 К [25, 26]. АФМ обмен в объемном SrMnO_3 определяется сверхобменным взаимодействием между ионами Mn^{4+} , что сохраняет вырожденность Mn^{4+} орбита-

лей. С другой стороны, в тонких пленках SrMnO_3 проявляется большое разнообразие механизмов магнитного упорядочения. Например, при разных эпитаксиальных рассогласованиях между подложкой и пленкой антиферромагнитное упорядочение в этих пленках может быть перестроено с G-типа на C/A-тип [27].

Цель данной работы состоит в изучении влияния тонкого слоя антиферромагнетика SrMnO_3 на магнитные и резистивные характеристики пленки ферромагнетика $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ в широком температурном диапазоне.

Гетероструктуры были изготовлены методом магнетронного высокочастотного напыления на плоскость (110) подложки из монокристаллического галлата неодима NdGaO_3 при температуре $T = 800^\circ\text{C}$ и давлении кислорода 0.5 мбар для слоев $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ [28] и SrMnO_3 [29]. Толщина пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ в исследуемой гетероструктуре составляла 44 нм, а толщина пленки SrMnO_3 — 2 нм.

Магнитотранспортные измерения проводили по типовой схеме в конфигурации Ван-дер-Пау на образцах квадратной формы со стороной около 5 мм. Величина тока, постоянная по величине в ходе измерения, находилась в пределах от 1 до 100 мкА. Магнитное поле перпендикулярное к плоскости образца менялось в пределах от 0 до 1.5 Тл. Исследования выполнены в широком интервале температур от комнатной до 50 К. Такой выбор был определен желанием провести измерения выше и ниже температуры Нееля для изолированного антиферромагнетика, а также выделить различные эффекты влияния магнитного поля на кинетические свойства носителей заряда в структурах.

Результаты измерений эффекта Холла для одиночной пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при температурах 290, 200 и 100 К представлены на рис. 1. Для наглядности при совмещении на одном рисунке трех кривых величина сигнала для кривой 200 К увеличена в пять раз, а для кривой 100 К — в двадцать раз, и положение кривых по вертикали произвольно. В поведении кривых проявляются разные эффекты, например, обычный эффект Холла и магнитосопротивление. Также видно, что максимальная величина сигнала сдвинута относительно нулевого поля, что может объясняться наличием устойчивой намагниченностью, при этом с понижением температуры положение максимума смещается в сторону еще больших полей. В целом с понижением температуры влияние магнитного поля ослабевает и при этом еще уменьшается относительный вклад от магнитосопротивления. При температуре 50 К общий вид кривой (не представлено здесь) ведет себя почти монотонно, как в обычном эффекте Холла. Отметим еще, что в малых полях (до 0.25 Тл)

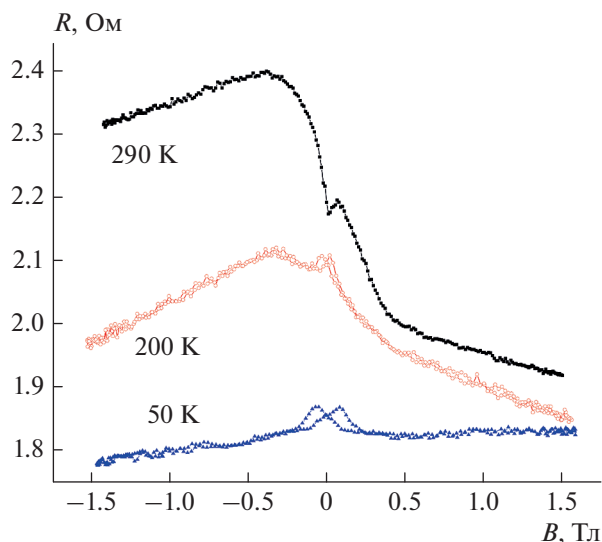


Рис. 2. Эффект Холла для гетероструктуры $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ при температурах 290, 200 и 50 К (значения температуры приведены около кривых).

были заметны особенно при высокой температуре гистерезисные эффекты.

На рис. 2 представлены аналогичные результаты измерений для гетероструктуры $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$. Здесь все кривые приведены в одном масштабе, но разнесены по вертикали. Яркое отличие от однослойного образца состоит в наличии характерной гистерезисной ступеньки, которая постепенно исчезает с понижением температуры. И при низкой температуре наиболее ярко на графиках при малом поле проявляется особенность в виде гистерезисного пика. Такое поведение может говорить о том, что в гетероструктуре между слоями имеет место эффект обменного подмагничивания, т.е. слой SrMnO_3 находится в состоянии антиферромагнетика [2]. И это наблюдается при температуре 290 К, что выше температуры Нееля для этого материала невстроенного в гетероструктуру. Таким образом, в гетероструктуре намагниченность проявляет свойства однонаправленной анизотропии. Данный вывод подтверждается и по спектрам ферромагнитного резонанса. На рис. 3 представлены угловые зависимости резонансного поля для одиночной пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ толщиной 40 нм (квадраты) и для гетероструктуры $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (круги) при $T = 300$ К. В отсутствие какого-либо внешнего воздействия вектор намагниченности в ферромагнетике направлен вдоль резонансного поля для спектров ферромагнитного резонанса одиночной пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ и для гетероструктуры. Все спектры сняты на образцах размером $5 \times 5 \text{ мм}^2$ при условии, что внешнее постоянное магнитное поле лежит в плоскости образца (парал-

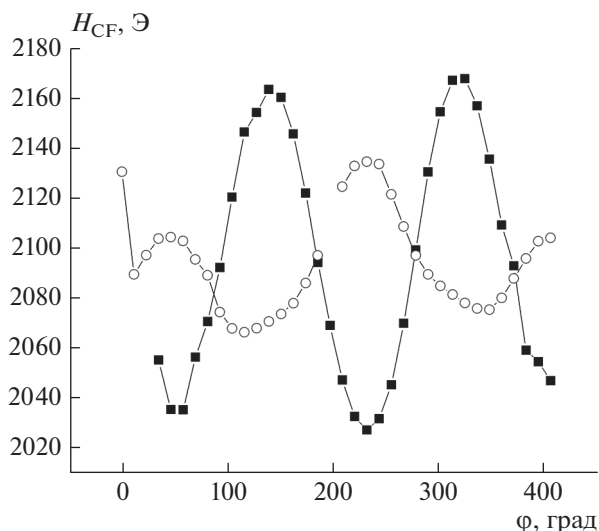


Рис. 3. Угловая зависимость резонансного поля для одиночной пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ толщиной 40 нм (квадраты) и для гетероструктуры $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (кружочки) при $T = 300$ К.

лельная ориентация), а магнитная составляющая сверхвысокочастотного (СВЧ) поля направлена по нормали к пленке. Измерения проводили на стандартном спектрометре Bruker ER 200 на частоте 9.6 ГГц и при комнатной температуре. Угол измеряли от одной из граней подложки.

Рисунок 3 иллюстрирует переход пленки SrMnO_3 из парамагнитного в АФМ состояние. В гетероструктуре АФМ/ФМ вместо одноосной анизотропии (две эквивалентные легкие конфигурации в противоположных направлениях) намагниченность в системах АФМ/ФМ имеет только одно легкое направление, часто называемое однонаправленной анизотропией, появление антисимметричных пиков в угловой зависимости верхней части гетероструктуры (часть пленки $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, граничащей с пленкой антиферромагнетика) свидетельствует о появлении однонаправленной анизотропии в верхней части гетероструктуры, что объясняется возникновением обменного взаимодействия на границе АФМ/ФМ [30]. Из сравнения двух образцов (один — чистый манганит (ферромагнетик), а другой — гетероструктура ферромагнетик—антиферромагнетик) видно, что наличие подслоя антиферромагнетика толщиной 2 нм приводило к образованию гистерезисной ступеньки и ярко выраженного гистерезисного пика при низких температурах. Чистый магнетик имеет сдвинутый по полю максимум на графиках, сдвиг которого при понижении температуры возрастал. Мы также делаем вывод, что слой антиферромагнетика в составе гетероструктуры находится в антиферромагнитном состоянии при комнатной температуре, то есть выше тем-

пературы Нееля в случае изолированного слоя. Также обнаружено, что в гетероструктуре намагниченность проявляет свойства однонаправленной анизотропии. Данный вывод подтверждается по спектрам ферромагнитного резонанса. Можно предположить, что полученные результаты будут полезны при разработке сверхбыстродействующих устройств на основе антиферромагнетиков.

Авторы выражают благодарность В.В. Демидову за представление данных по ферромагнитному резонансу. Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках темы государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cheng Zhang, Shuaishuai Ding, Kaiming Qiao et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2021. V. 13. P. 28442.
2. Nogues J., Schuller K.I. // J. Magn. Magn. Mater. 1999. V. 192. P. 203.
3. Ramirez A.P. // J. Phys. Cond. Matter. 1997. V. 9. No. 39. P. 8171.
4. Coey J.M.D., Viret M., von Molnar S. // Adv. Phys. 1999. V. 48. P. 167.
5. du Trémolet de Lacheisserie É., Gignoux D., Schlenker M. Magnetism II – materials and applications. Norwell: Kluwer, 2002. 552 p.
6. Bason Y., Klein L., Yau J.-B. et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. No. 14. P. 2593.
7. Bason Y., Klein L., Yau J.-B., X. Hong et al. // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. No. 8. Art. No. 08R701.
8. Dahlberg E.D., Riggs K., Printz G.A. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. No. 8. P. 4270.
9. Rijks Th.G.S.M., Coehoorn R., de Jong M.J.M. // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. P. 283.
10. Kuhlow B., Lambeck M., Schroeder-Furst H. et al. // Z. Angew. Phys. 1971. V. 32. P. 54.
11. Miller B.H., Dahlberg E.D. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 3932.
12. Chen Y., Lottis D.K., Dahlberg E.D. // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. No. 10. P. 5822.
13. Chen Y., Lottis D.K., Dahlberg E.D. // Mod. Phys. Lett. 1991. V. 5. P. 1781.
14. Roux-Buisson H., Bruyere J.C. // Czech J. Phys. B. 1971. V. 21. P. 516.
15. Jin S., Tiefel T.H., McCormack M. et al. Thousandfold change in resistivity in magnetoresistive La–Ca–Mn–O films // Science. 1994. V. 264. P. 413.
16. Hwang H.Y., Cheong S.-W., Ong N.P., Batlogg B. Spin-polarized intergrain tunneling in $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. P. 2041.
17. Ziese M. Extrinsic magnetotransport phenomena in ferromagnetic oxides // Rep. Prog. Phys. 2002. V. 65. P. 143.
18. Coey J.M.D., Viret M., von Molnar S. // Adv. Phys. 1999. V. 48. P. 167.
19. Никитов С.А., Сафин А.Р., Калябин Д.В. и др. // УФН. 2020. Т. 190. № 10. С. 1009; Nikitov S.A., Sa-fin A.R., Kalyabin D.V. et al. // Phys. Usp. 2020. V. 63. No. 10. P. 945.
20. Park J.-H., Vescovo E., Kim H.-J. et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. No. 9. P. 1953.
21. Изюмов Ю.А., Скрыбин Ю.Н. // УФН. 2001. Т. 171. № 2. С. 121.
22. Yan Wu, Suzukia Y., Ruˆdiger U. et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. № 15. P. 2295.
23. Chaluvadi S.K., Ajejas F., Orgiani P. et al. // J. Physics D. 2020. V. 53. P. 375005.
24. Dho J., Hur N.H., Kim I.S., Park Y.K. // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. No. 12. P. 7670.
25. Søndergaard R., Ravindran P., Stølen S. et al. // Phys. Rev. B. 2006. V. 74. No. 5. Art. No. 144102.
26. Nalecz D.M., Bujakiewicz-Koronska R., Radwanski R.J. // Ferroelectrics. 2015. V. 483. P. 86.
27. Maurel L., Marcano N., Prokscha T. et al. // Phys. Rev. B. 2015. V. 92. No. 2. Art. No. 024419.
28. Шайхулов Т.А., Овсянников Г.А., Демидов В.В., Андреев Н.В. // ЖЭТФ. 2019. Т. 156. № 1. С. 135.
29. Шайхулов Т.А., Сафин А.Р., Станкевич К.Л. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 117. № 8. С. 620.
30. Li F., Song C., Wang Y.Y. et al. // Sci. Reports. 2015. V. 5. P. 16187.

Magnetic and resistive characteristics of the $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ heterostructure in a wide temperature range

V. E. Sizov^{a, *}, T. A. Shaikhulov^b

^a Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch, Fryazino, 141190 Russia

^b Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125000 Russia
*e-mail: sizov@fireras.su

Magnetic and resistive properties of the antiferromagnet–ferromagnet $\text{SrMnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ heterostructure were studied in the temperature range of 50–300 K using magnetotransport measurements. It is established that in the heterostructure, the SrMnO_3 layer is in an antiferromagnetic state at room temperature, which is higher than its temperature for a single layer, and the magnetization of the heterostructure exhibits the properties of unidirectional anisotropy. This conclusion is also confirmed by the ferromagnetic resonance spectra