

КРИТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ГИСТЕРЕЗИСНОМ ПОВЕДЕНИИ МУЛЬТИСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

*Д. А. Льготина**, *П. В. Прудников*

*Центр новых химических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г. К. Борескова
Сибирского отделения Российской академии наук» (Омский филиал),
644040, Омск, Россия*

Поступила в редакцию 5 декабря 2024 г.,
после переработки 25 декабря 2024 г.
Принята к публикации 27 декабря 2024 г.

Проведено численное исследование магнитных свойств мультислойных магнитных гетероструктур. Исследуется влияние размерного перехода при изменении толщины ферромагнитных пленок на температуру фазового перехода и гистерезисные эффекты. Полученные результаты показывают, что увеличение толщины ферромагнитных слоев ведет к повышению критической температуры всей структуры. В мультислойной гетероструктуре наблюдается наличие ступеней в петлях гистерезиса, возникающих в результате переворота намагниченности в атомарных слоях, что обусловлено обменным взаимодействием между ферромагнитными пленками.

DOI: 10.31857/S0044451025040108

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования магнитных материалов продолжают открывать новые горизонты для разработок в области создания приборов и устройств на основе эффекта гигантского магнитосопротивления (GMR) [1]. Одним из перспективных направлений являются гетероструктуры [2], обладающие уникальными магнитными свойствами, которые отличаются от свойств объемных магнитных материалов. Эти структуры находят широкое применение в качестве носителей информации с высокой плотностью записи, таких как магниторезистивная оперативная память (MRAM) [3], термомагнитная запись (HAMR) [4].

Несмотря на обширный накопленный материал, изучение магнитных свойств тонкопленочных магнитных структур, таких как Co/Pt [5], Fe/Pd и Fe/Ge [6], (Fe, Co)/(Si, Ge) [7], продолжает вызывать значительный научный и практический интерес.

Ключевым аспектом работы мультислойных гетероструктур является гистерезис [8, 9], который значительно влияет на их эксплуатационные характеристики. Гистерезис характеризует задержку

реакции магнитной намагниченности материала на изменение внешнего магнитного поля, что имеет критическое значение для приложений, таких как датчики магнитного поля различного назначения [10–12].

Критические эффекты, наблюдаемые вблизи фазовых переходов, оказывают значительное влияние на магнитные свойства мультислойных гетероструктур. Эти эффекты вызывают изменения в коэрцитивной силе, магнитной восприимчивости и других характеристиках, что, в свою очередь, влияет на стабильность работы и производительность магнитных устройств.

В данной статье сосредоточено внимание на анализе критических эффектов в гистерезисном поведении мультислойных гетероструктур. В многослойных пленках наличие осцилляции косвенной обменной связи между ферромагнитными слоями приводит к значительным изменениям величин коэрцитивной силы [13]. Коэрцитивность мультислойных магнитных структур Co/Cu/Co зависит от таких факторов, как толщина магнитных слоев, межслоевая обменная связь [14], дефекты структуры [15], магнитная анизотропия [16], температура [17]. В ранее проведенных исследованиях влияние толщины ферромагнитных пленок на магнитополевое поведение трехслойных систем не изучалось.

* E-mail: lgotinada@ihcp.ru

2. МОДЕЛЬ И МЕТОД

Проведено исследование магнитных свойств модели мультислойной магнитной гетероструктуры (рис. 1), состоящей из двух гейзенберговских ферромагнитных пленок, разделенных пленкой немагнитного металла.

Теоретическое описание магнитных взаимодействий в мультислойной структуре задано в виде обобщенной модели Гейзенберга с гамильтонианом

$$H = -J_1 \sum_{i,j \in N_1, N_2}^{N_S} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j - J_2 \sum_{\alpha \in N_1, \beta \in N_2}^{N_S} \mathbf{S}_\alpha \cdot \mathbf{S}_\beta - A \sum_{i \in N_1, N_2}^{N_S} (S_i^z)^2 - h \sum_{i \in N_1, N_2}^{N_S} S_i^z, \quad (1)$$

где

$$N_S = L^2 \sum_{i=1,2} N_i$$

— полное число спинов. Первый член гамильтониана (1) описывает обменное взаимодействие между спинами внутри ферромагнитных пленок, суммирование ведется по всем парам ближайших соседей. Второй отвечает за межслоевое антиферромагнитное взаимодействие с учетом спинов из каждой ферромагнитной пленки. Третий описывает влияние одноионной магнитной анизотропии типа легкая плоскость [20]. Четвертый описывает влияние внешнего магнитного поля $h = g\mu_0\mu_B H$ на систему.

Внутрислойное обменное взаимодействие носит ферромагнитный характер с $J_1 > 0$. Межслоевое косвенное РККИ-взаимодействие имеет осциллирующий характер [21]. Толщина немагнитной прослойки меди в мультислойной структуре подбирается таким образом, чтобы эффективное межслоевое взаимодействие было антиферромагнитным ($J_2 < 0$). Рассматриваемая структура моделирует искусственно создаваемые мультислойные системы, которые характеризуются проявлением эффекта GMR.

Моделирование динамики спинов проводилось методом Монте-Карло с применением алгоритма односпиновых переворотов — алгоритма Метрополиса [22], основанного на поиске нового состояния для отдельно взятого спина, что позволяет изучать метастабильные и переходные состояния системы. Кластерные алгоритмы Вольфа и Свендсена–Вана [23–25] являются основными для моделирования

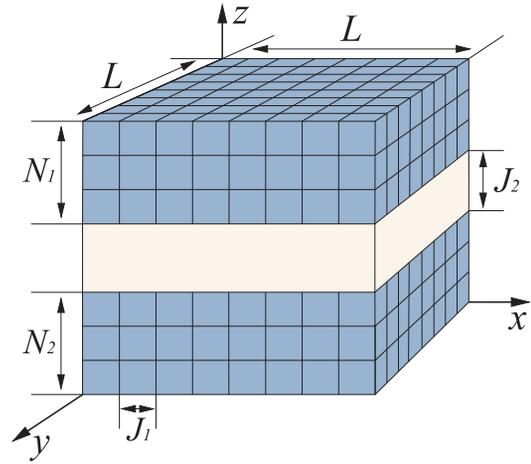


Рис. 1. Схема мультислойной гетероструктуры Co/Cu/Co [18,19]. Размеры ферромагнитных пленок: N_i — толщины, L — линейный размер; толщина и линейный размер пленок задаются в единицах моноатомных слоев (ML). Обменные интегралы J_1 и J_2 определяют взаимодействия спинов внутри пленки и между пленками соответственно

спиновых систем, но не подходят для данного исследования, так как при вычислении нового состояния системы полностью теряется информация о предыдущем состоянии. Моделирование проводится с периодическими граничными условиями в плоскости пленок. Для определения температуры фазового перехода использовался метод кумулянтов Биндера четвертого порядка [26]. Намагниченность как параметр порядка ферромагнитной пленки задавалась, как среднее значение по всем спинам в системе:

$$m = \frac{1}{N_S} \left\langle \sum_{i \in N_1, N_2}^{N_S} S_i^z \right\rangle. \quad (2)$$

3. ТЕМПЕРАТУРА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Ферромагнитные пленки обладают свойствами, чувствительными к изменению размерности системы и отличными от свойств объемных материалов. Объемный материал кобальта характеризуется температурой Кюри перехода из парамагнитного в ферромагнитное состояние $T_C = 1388$ К [27]. Тонкие ферромагнитные пленки кобальта имеют значительно более низкие температуры Кюри [28]. Эти различия в температуре фазового перехода объясняются уменьшением толщины пленки. Вблизи T_C критические флуктуации влияют на намагниченность, магнитную восприимчивость и коэрцитивную силу гетероструктуры.

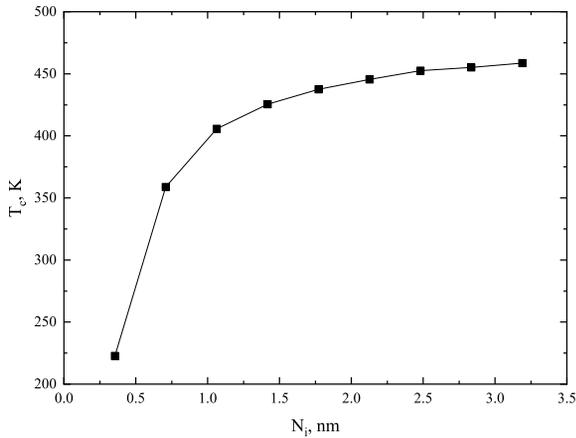


Рис. 2. Зависимость критической температуры от толщины ферромагнитной пленки

Рассчитывалась критическая температура мультислойной структуры при $J_2 = -0.3J_1$, $A = 0.1J_1$ для разных толщин ферромагнитных пленок с линейными размерами $L = 32, 48, 64$ ML в температурном интервале $T = (0.1-2.1)J_1/k_B$ с шагом $\Delta T = 0.1$. Дальнейшие уточнения температурного диапазона для каждой из рассмотренных толщин пленок проводились в области наблюдения спада намагниченности и пика восприимчивости, что характерно для фазового перехода второго рода.

При компьютерном моделировании удобнее работать с относительными величинами. С целью повышения точности сопоставления рассчитываемых характеристик с экспериментальными данными осуществляется перевод единиц измерения из относительных в СГС, использовался интеграл обменного взаимодействия $J_1 = 4.4 \cdot 10^{-14}$ эрг, соответствующий $a_{Co} = 3.54411 \text{ \AA}$, $a_{Cu} = 3.58191 \text{ \AA}$ [30]; значение магнетона Бора $\mu_B = 0.927 \cdot 10^{-20}$ эрг/Э.

Зависимость критической температуры гетероструктуры от толщины ферромагнитных пленок (рис. 2) характеризуется нелинейным поведением [31]. С увеличением толщины каждой ферромагнитной пленки наблюдается рост критической температуры. При увеличении толщины пленки более существенное влияние на магнитоориентационные процессы оказывает внутрислойное взаимодействие спинов в ферромагнитной пленке.

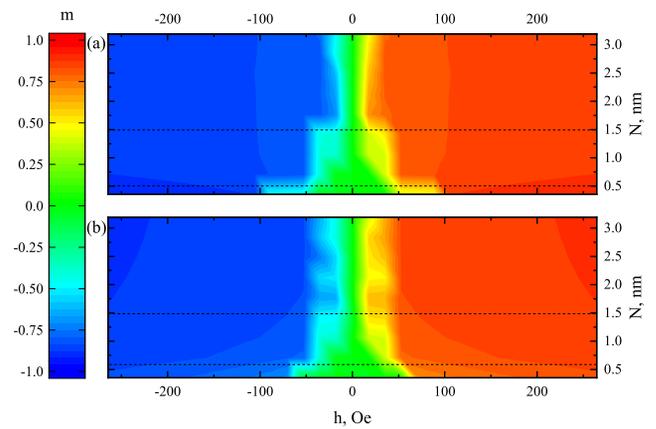


Рис. 3. Размерное влияние толщины пленок и поля на распределение намагниченности: (a) $T = T_C(N_i)/2$; (b) $T = 200$ К

4. ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Рассмотрено влияние толщин ферромагнитных пленок, обменного взаимодействия, магнитной анизотропии и температуры на гистерезисные явления мультислойной гетероструктуры. Петля гистерезиса мультислойных структур может схлопываться при достижении критической температуры. При этой температуре магнитные свойства материала изменяются, и он теряет свою ферромагнитную намагниченность, переходя в парамагнитное состояние. Для наблюдения гистерезисной петли устойчивой намагниченности при изменении внешнего магнитного поля выбраны температуры $T = T_C(N_i)/2 = 111-229, 135, 200$ К.

При уменьшении температуры коэрцитивная сила гетероструктуры увеличивается, поскольку требуется большее внешнее магнитное поле для достижения изменения намагниченности. В низкотемпературных условиях обменное взаимодействие между ферромагнитными слоями становится более выраженным. Спины в пленках стремятся выстроиться параллельно внешнему полю, конкурируя с обменным взаимодействием, которое стремится сохранить параллельную ориентацию спинов.

Уменьшение толщины ферромагнитных пленок (рис. 3) приводит к появлению ступенчатых петель гистерезиса [32], обозначенных штриховыми линиями. Каждая из ступеней размагничивания соответствует перевороту намагниченности в ферромагнитном слое. Обменное РККИ-взаимодействие усиливается при уменьшении толщины пленки и приводит к более выраженному размеру ступенек в гисте-

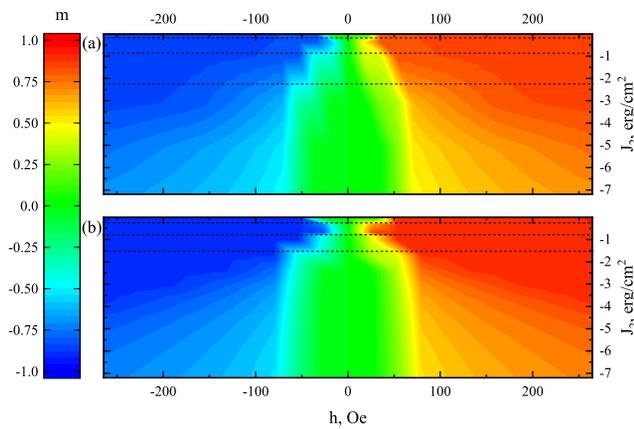


Рис. 4. Размерное влияние обменного интеграла и поля на двумерное распределение намагниченности: (а) $T = 200$ К; (б) $T = 135$ К

резисной петле. Наблюдается критическая толщина (1.5 нм), при превышении которой восстанавливаются обычные формы гистерезисных петель без явных ступенек. Для $T = 200$ К наблюдается более выраженная асимметрия — пути намагничивания и размагничивания не совпадают. При $T = T_C/2$ в гистерезисных петлях намагниченность более устойчива. При понижении температуры ферромагнитные слои становятся более устойчивыми, поскольку антиферромагнитные взаимодействия, возникающие между ними, усиливаются. Это связано с тем, что в условиях более низких температур уменьшение термического возбуждения приводит к более четкому порядку магнитных моментов, что влияет на когерентность намагниченности в слоях.

Увеличение обменного РККИ-взаимодействия (рис. 4) приводит к уменьшению коэрцитивной силы из-за ослабления взаимодействия между ферромагнитными слоями. РККИ-взаимодействие влияет на гистерезисные петли, обуславливая их асимметрию и ступенчатость. С уменьшением температуры обменное взаимодействие между ферромагнитными слоями становится более выраженным. РККИ-взаимодействие вносит свой вклад в поддержку однородности магнитных моментов, что требует больших усилий для их разрыва в результате внешнего поля.

Представлено влияние обменного взаимодействия на изменения магнитной анизотропии гетероструктуры (рис. 5), что приводит к сильному изменению формы петли гистерезиса. Увеличение анизотропии приводит к увеличению коэрцитивной

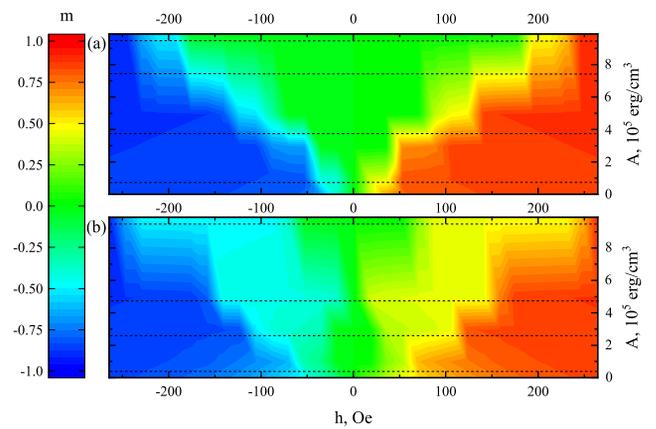


Рис. 5. Размерное влияние анизотропии и поля на двумерное распределение намагниченности при $T = 200$ К: (а) $J_2 = -1.03$ эрг/см²; (б) $J_2 = -3.08$ эрг/см²

силы. Это приводит к большему внешнему магнитному полю, необходимому для размагничивания.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенном численном моделировании гетероструктур, обладающих значительной технологической важностью в качестве носителей информации и датчиков магнитного поля, выявлено влияние толщин ферромагнитных пленок на магнитные свойства, такие как температура фазового перехода и гистерезисные эффекты трехслойных гетероструктур.

Обнаружена нелинейная зависимость критической температуры от толщины ферромагнитной пленки. Изменение критической температуры и эффекты запаздывания магнитного состояния обусловлены спецификой изменения магнитного состояния ферромагнитных пленок во внешнем поле. Переворот намагниченности осуществляется отдельным атомарным слоем, что обуславливает ступенчатую особенность в петле гистерезиса. Это свойство может быть использовано для создания более эффективных постоянных магнитов, когда возможность переключения между состояниями критически важна для производительности и функциональности устройств, использующих такие материалы.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0039).

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Dey and J. N. Roy, *Giant Magnetoresistance (GMR)*, in *Spintronics*, Springer, Singapore (2021).
2. C. Abert, *Eur. Phys. J. B* **92**, 120 (2019).
3. D. Apalkov, B. Dieny, and J. M. Slaughter, *Proc. IEEE* **104**, 1796 (2016).
4. Y. Chen and R. H. Victora, *Sci. Rep.* **13**, 11479 (2023).
5. C. J. Lin, G. L. Gorman, C. H. Lee, R. F. C. Farrow, E. E. Marinero, H. V. Do, H. Notarys, and C. J. Chien, *J. Magn. Magn. Mater.* **93**, 194 (1991).
6. Л. А. Чеботкевич, А. В. Огнев, Ю. П. Иванов, К. Lenz, А. И. Ильин, К. С. Ермаков, *ФТТ* **51**, 1761 (2009).
7. T. Lucinski and P. Chomiuk, *Cent. Eur. J. Phys.* **9**, 276 (2011).
8. R. Morgunov, A. Hamadeh, T. Fache, G. Lvova, O. Koplak, A. Talantsev, and S. Mangin, *Superlattices Microstruct.* **104**, 509 (2017).
9. L. Chen, Y. Li, T. Ben, Z. Zhang, and L. Jing, *AIP Adv.* **14**, 015225 (2024).
10. C. Reig, S. Cardoso, and S. C. Mukhopadhyay, *Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors*, in *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*, Springer, Berlin (2013).
11. G. Antarnusa, A. Esmawan, P. D. Jayanti, S. R. Fitriani, A. Suherman, E. K. Palupi, and R. Umam, *J. Magn. Magn. Mater.* **563**, 169903 (2022).
12. A. Albarbar, A. Badri, J. K. Sinha, and A. Starr, *Measurement: J. Int. Measurement Confederation* **42**, 790 (2009).
13. А. В. Огнев, Дисс... д-ра физ.-мат. наук, ДФУ, Владивосток (2016).
14. Л. А. Чеботкевич, Ю. Д. Воробьев, А. С. Самардак, А. В. Огнев, *ФТТ* **45**, 863 (2003).
15. Л. Г. Корзунин, И. М. Изможеров, *ФММ* **122**, 183 (2021).
16. А. В. Свалов, И. А. Макаровичкин, А. А. Пасынкова, А. А. Феценко, Е. В. Кудюков, В. Н. Лепаловский, Г. В. Курляндская, *ФММ* **123**, 1138 (2022).
17. A. V. Makarov and E. E. Shalygina, *SPIN* **13**, 2340010 (2023).
18. M. Tokac, *Appl. Magn. Reson.* **55**, 13892 (2024).
19. M. Ebrahimi, B. Luo, Q. Wang, and S. Attarilar, *Materials* **17**, 2124 (2024).
20. М. В. Мамонова, М. Ю. Макеев, Д. С. Калинин, А. А. Зенова, *ФТТ* **63**, 1787 (2021).
21. D. M. Polishchuk, M. Persson, M. M. Kulyk, G. Baglioni, B. A. Ivanov, and V. Korenivski, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 062405 (2023).
22. D. P. Landau and K. Binder, *Phys. Rev. B* **17**, 2328 (1978).
23. U. Wolff, *Phys. Lett. B* **228**, 379 (1989).
24. R. H. Swendsen and J. S. Wang, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 86 (1987).
25. J. S. Wang and R. H. Swendsen, *Physica A* **167**, 565 (1990).
26. T. N. A. Nguyen, Y. Fang, V. Fallahi, N. Benatmane, S. M. Mohseni, R. K. Dumas, and J. Akerman, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 172502 (2011).
27. M. Pajda, J. Kudrnovsky, I. Turek, V. Drchal, and P. Bruno, *Phys. Rev. B* **64**, 174402 (2001).
28. J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK (2009).
29. V. V. Prudnikov, P. V. Prudnikov, M. V. Mamonova, M. M. Firstova, and A. A. Samoshilova, *J. Phys. Commun.* **3**, 015002 (2019).
30. A. Vaitkus, A. Merkys, T. Sander, M. Quiros, P. A. Thiessen, E. E. Bolton, and S. Grazulis, *J. Cheminform.* **15**, 123 (2023).
31. В. Н. Кушнир, *Сверхпроводимость слоистых структур*, БИТУ, Минск (2010).
32. M. Knobel, L. C. Sampaio, E. H. C. P. Sinnecker, P. Vargas, and D. Altbir, *J. Magn. Magn. Mater.* **249**, 60 (2002).