УДК 537.9

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-4-59-66

**Т.А. Тааев¹, К.Ш. Хизриев^{1,3}, А.К. Муртазаев^{1,2,3}, Ш.К. Хизриев¹, А.Я. Курбайтаев¹,
М.М. Исаева¹**

Кривые перемагничивания магнитотвердого/магнитомягкого бислоя

¹ Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН; Россия, 367015, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94;

² Дагестанский научный центр РАН; Россия, 367025, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 45;

³ Дагестанский государственный университет; Россия, 367001, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а; taaev89@mail.ru

Представлена модель для исследования магнитных свойств магнитотвердого/магнитомягкого бислоя во внешнем магнитном поле алгоритмом Метрополиса метода Монте-Карло. Впервые исследовано влияние на процессы перемагничивания модели магнитного бислоя значений констант обменного внутрислойного взаимодействия магнитомягкого J_{soft} и магнитотвердого J_{hard} слоев. Построены кривые перемагничивания общей намагниченности и ее продольной и поперечной составляющих для всех значений обменных констант. Показано, что образование одномерной гетерофазной спиновой пружины в магнитном бислое целиком и полностью зависит от внутрислойного обменного взаимодействия магнитомягкого слоя J_{soft} . Рассчитаны характеристические значения магнитных полей H_{irr} и H_{ex} для всех значений обменного параметра J_{hard} и J_{soft} . Впервые построены фазовые диаграммы «spring – non-spring» модели магнитного бислоя в зависимости от значений обменных констант. Показано, что поведение представленной модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя во внешнем магнитном поле хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями.

Ключевые слова: ХУ-модель, спиновая пружина, метод Монте-Карло, алгоритм Метрополиса, фазовая диаграмма.

Введение

Впервые изготовление магнитотвердых/магнитомягких гетероструктур было предложено в 1991 году [1]. Они представляют собой композитные материалы, состоящие из чередующихся магнитотвердых и магнитомягких слоев, в которых возникают необычные явления, в частности формирование во внешнем магнитном поле одномерной гетерофазной спиновой пружины [2]. Такие материалы получили название обменно-связанных или обменно-упругих магнитов. Главной особенностью этих магнитных структур является то, что они открывают возможность для увеличения энергетического произведения $(BH)_{max}$ [3]. Также большие надежды возлагаются на магнитотвердые/магнитомягкие гетероструктуры в свете их практического применения: изготовление постоянных магнитов, создание быстродействующих аттенюаторов, совершенных микро- и наноприборов для хранения, передачи и обработки информации и др.

Таким образом, магнитотвердые/магнитомягкие гетероструктуры представляют собой уникальные системы и вызывают большой интерес у исследователей. Выращивание таких пленок, получение подходящих магнитотвердых/магнитомягких гетеро-

структур и понимание их магнитного поведения – это целая область, которой посвящены многочисленные исследования [1–10].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния на процессы перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя величины констант обменного внутрислойного взаимодействия магнитомягкого и магнитотвердого слоев.

Модель и методика

Для исследования процессов перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя под действием внешнего магнитного поля была использована модель [8–10], обобщающая стандартную ХУ-модель.

Гамильтониан модели был представлен в виде:

$$H = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} J(S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) - \sum_i K(S_i^x)^2 - g\mu \sum_i H_0 S_i^z, \quad (1)$$

где первая сумма учитывает обменное взаимодействие каждого магнитного атома с ближайшими соседями внутри слоев с обменами $J = J_{hard}$ и $J = J_{soft}$ в магнитотвердом и магнитомягком слоях соответственно и межслойное взаимодействие с параметром $J = J_{int}$; вторая сумма учитывает вклад анизотропии в энергию системы, $K = K_{hard}$ и $K = K_{soft}$ – соответственно константы анизотропии магнитотвердого и магнитомягкого слоев; третья сумма – вклад внешнего магнитного поля в энергию системы, $g \approx 2$ – фактор Ланде, μ – магнетон Бора, H_0 – внешнее магнитное поле, $S_i^{x,y}$ – проекции спина S_i , локализованного на узле i .

Нами были использованы следующие значения параметров: $J_{soft} = 0.2 \div 1.0$, $J_{hard} = 0.1 \div 1.0$, $J_{int} = 0.6$, $K_{hard} = 1.0 \times 10^{-3}$, $K_{soft} = 0$, $|S_i| = 1$. В гамильтониане (1) значения обменных констант и констант анизотропии были нормированы к J_s . Угол между вектором внешнего магнитного поля и осью анизотропии магнитотвердого слоя равен 177° . Такое направление выбрано потому, что при строго антипараллельной ориентации направления поля не происходит образования спиновой пружины [2, с. 10].

Расчеты проводились для модели магнитного бислоя (1) стандартным алгоритмом Метрополиса метода Монте-Карло [11] для систем с линейными размерами $L_x \times L_y \times L_z$ при температуре T намного ниже T_c . Вдоль x - и y -направлений линейные размеры системы были равны $L_x = L_y = 50$, а вдоль z -оси – $L_z = 100$, то есть рассматривалась модель при толщине магнитотвердого и магнитомягкого слоев по 50 атомных слоев соответственно. В процессе эксперимента совершалось до 5×10^5 МК шагов/спинов и проводилось усреднение термодинамических параметров. На систему накладывались периодические граничные условия в двух направлениях (вдоль x - и y -направлений) [10].

В процессе численного эксперимента проводилось наблюдение за намагниченностью всей системы M , ее продольной M_{long} и поперечной M_{tran} компонентами:

$$M = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^z \right\rangle, \quad (2)$$

$$M_{long} = M \cos \alpha, \quad (3)$$

$$M_{tran} = M \sin \alpha, \quad (4)$$

где N – число атомов, α – угол между направлением вектора намагниченности M и осью анизотропии магнитотвердого слоя типа «легкая ось». Угловые скобки означают усреднение по ансамблю.

Результаты исследования

На рис. 1 показаны кривые перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при различных значениях константы обменного взаимодействия магнитомягкого слоя J_{soft} . Значения обменных констант магнитотвердого слоя и межслойного взаимодействия принимали фиксированные значения: $J_{hard} = 0.4$ и $J_{int} = 0.6$ соответственно. Для магнитотвердых/магнитомягких гетероструктур существуют два характеристических значения внешнего магнитного поля H_{ex} и H_{irr} . Величина H_{ex} – значение магнитного поля, при котором магнитные моменты атомов магнитомягкого слоя начинают вращаться под воздействием внешнего магнитного поля, как в стенке Блоха. Чем выше значение H_{ex} , тем более выпуклая будет кривая размагничивания и соответственно тем больше будет значение энергетического произведения $(BH)_{max}$. H_{irr} – критическое значение магнитного поля, выше которого спиновая пружина разрушается, и все магнитные моменты атомов становятся параллельны направлению внешнего магнитного поля. Участок на кривой перемагничивания в интервале $H_{ex} \leq H_0 \leq H_{irr}$ является обратимым, и на этом участке образуется так называемая спиновая пружина. При выключении внешнего магнитного поля направление магнитных моментов атомов возвращается в первоначальное положение и намагниченность бислоя становится равной остаточной намагниченности.

Рис. 1. Кривые перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при различных значениях константы обменного параметра J_{soft}

Из рис. 1 видно, что при увеличении константы обменного взаимодействия магнитомягкого слоя J_{soft} критическое значение H_{irr} внешнего магнитного поля уменьшается, а значение H_{ex} , при котором магнитные моменты атомов магнитомягкого слоя начинают вращаться, увеличивается. Положительное обменное взаимодействие, как известно, соответствует ферромагнитному упорядочению, т. е. соседние магнитные моменты стремятся ориентироваться параллельно друг другу. Увеличение константы J_{soft} приводит к тому, что магнитные моменты атомов более жестко фиксированы в узлах решетки, поэтому требуется приложить большее значение магнитного поля, чтобы заставить их вращаться. Характеристическое значение H_{ex} растет, и петля становится более выпуклой. Также увеличение внутрислойного обмена приводит к тому, что при вращении магнитные моменты увлекают за собой магнитные моменты большего количества атомов соседних монослоев и намагниченность магнитомягкого слоя быстро достигает насыщения. Как только пружина достигает

ет границы между магнитотвердым и магнитомягким слоями, энергии внешнего магнитного поля H_0 становится достаточной, чтобы все магнитные моменты атомов бислоя ориентировались по направлению поля. В связи этим критическое значение H_{irr} уменьшается.

Рис. 2. Продольные M_{long} и поперечные составляющие M_{tran} кривых перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при различных значениях константы обменного параметра J_{soft}

На рис. 2 приведены продольные M_{long} и поперечные M_{tran} составляющие кривых перемагничивания общей намагниченности M магнитного бислоя при различных значениях константы обменного взаимодействия магнитомягкого слоя J_{soft} . Как и следовало ожидать, продольные составляющие плавно уменьшаются, а поперечные компоненты сначала возрастают до определенного максимума, а затем убывают до критического значения внешнего магнитного поля. При $H_0 > H_{irr}$ магнитный бислой полностью перемагничивается. Появление поперечной составляющей намагниченности обусловлено тем, что в магнитном бислое образуется спиновая пружина, закручивающаяся с предпочтительным направлением (приложенное внешнее магнитное поле слегка смещено относительно легкой оси, и вращение происходит преимущественно против часовой стрелки).

В работе [10] было показано, что образование гетерофазной спиновой пружины в магнитном бислое зависит от поведения магнитомягкого слоя во внешнем магнитном поле. При включении магнитного поля магнитные моменты атомов магнитомягкого слоя начинают вращаться, как в стенке Блоха, и в магнитном бислое образуется одномерная гетерофазная спиновая пружина. Спиновая пружина есть некий аналог доменной стенки. Как известно, ширина доменной стенки δ зависит от константы внутрислойного обменного взаимодействия $\delta \sim J^{1/2}$. В связи с этим увеличение обменного взаимодействия магнитомягкого слоя приводит к увеличению ширины доменной стенки, и соответственно к росту поперечной составляющей M_{tran} общей намагниченности M магнитотвердого/магнитомягкого бислоя (рис. 2).

На рис. 3 приведены кривые перемагничивания данной модели при различных значениях обменного параметра магнитотвердого слоя J_{hard} . Значения обменных констант магнитомягкого слоя и межслойного взаимодействия принимали фиксированные значения: $J_{soft} = 0.4$ и $J_{int} = 0.6$.

Рис. 3. Кривые перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при различных значениях константы обменного параметра J_{hard}

Из рис. 3 видно, что с уменьшением значения J_{hard} критическое значение внешнего поля H_{irr} уменьшается, а значение H_{ex} практически не изменяется вплоть до значений $J_{hard} \leq 0.2$. Уменьшение внутрислойного обмена в магнитотвердом слое приводит к тому, что энергия тепловой флуктуации начинает превалировать над энергией обменного взаимодействия, магнитотвердый слой становится более мягким, в связи с чем требуется меньшее значение внешнего магнитного поля для перемагничивания бислоя. Стоит также отметить, что при значениях константы $J_{hard} \leq 0,2$ бислой проявляет достаточную жесткость по отношению к внешнему магнитному полю. Видимо, это связано также с тем, что в магнитотвердом слое существует отличная от нуля анизотропия и образец проявляет магнитотвердые свойства.

На рис. 4 показаны продольные M_{long} и поперечные M_{tran} составляющие кривых перемагничивания магнитного бислоя при различных значениях константы обменного взаимодействия магнитотвердого слоя J_{hard} . Как видно из графиков, продольные составляющие M_{long} медленно убывают, практически повторяя общие кривые перемагничивания, а поперечные составляющие M_{tran} сначала возрастают до определенного максимума, а затем плавно уменьшаются до значения внешнего магнитного поля $H_0 = H_{irr}$. Максимумы на кривых поперечных составляющих M_{tran} практически не зависят от значения константы обменного взаимодействия магнитотвердого слоя J_{hard} .

Рис. 4. Продольные M_{long} и поперечные составляющие M_{tran} кривых перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при значениях константы обменного параметра J_{hard}

На рис. 5 и 6 приведены фазовые диаграммы «spring – non-spring» модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя. Диаграммы представляют собой зависимость критического значения внешнего магнитного поля H_{irr} от значений констант обменного взаимодействия магнитотвердого J_{hard} и магнитомягкого J_{soft} слоев. «Spring» – область, соответствующая существованию в магнитном бислое спиновой пружины. Ниже фазовой кривой область «non-spring», в которой спиновая пружина разрушается. Точки на фазовой кривой – это критические значения внешнего магнитного поля H_{irr} .

Рис. 5. Фазовая диаграмма зависимости значения критического магнитного поля H_{irr} от константы обменного взаимодействия магнитотвердого слоя J_{hard}

Рис. 6. Фазовая диаграмма зависимости значения критического магнитного поля H_{irr} от константы обменного взаимодействия магнитомягкого слоя J_{soft}

На рис. 5 фазовая кривая претерпевает излом при значении константы обменного взаимодействия магнитотвердого слоя $J_{hard} = 0.5$. Выше и ниже точки излома изменение критического значения внешнего магнитного поля от константы обменного взаимодействия магнитотвердого слоя носит линейный характер.

Заключение

Исследовано влияние на процессы перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя значений констант внутрислойного обменного взаимодействия магнитотвердого J_{hard} и магнитомягкого J_{soft} слоев. Впервые построены кривые перемагничивания и фазовые диаграммы для всех значений обменных параметров. Образование одномерной гетерофазной спиновой пружины в магнитном бислое зависит от внутрислойного обменного взаимодействия магнитомягкого слоя J_{soft} . Показано, что приведенная модель хорошо описывает поведение магнитотвердого/магнитомягкого бислоя во внешнем магнитном поле.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-32-00526).

Литература

1. Kneller E.F., Hawig R. The exchange-spring magnet: a new material principle for permanent magnets // IEEE Trans. Magn. – 1991. – Vol. 27, № 4. – P. 3588–3600.
2. Fullerton E.E., Jiang J.S., Grimsditch M. et. al. Exchange-spring behavior in epitaxial hard/soft magnetic bilayers // Phys. Rev. B. – 1998. – Vol. 58, № 18. – P. 12193–12200.
3. Coey J.M.D., Skomski R. New magnets from interstitial intermetallics // Phys. Scripta. – 1993. – Vol. 49, № 315. – P. 315–321.
4. Djedai S., Talbot E., Berche P.E. A Monte-Carlo study of the magnetization reversal in $DyFe_2/YFe_2$ exchange-coupled superlattices // JMMM. – 2014. – Vol. 368. – P. 29–35.
5. Guo Guang-hua, Zhang Guang-fu, et. al. Irreversible magnetic exchange-spring processes in antiferromagnetic exchange-coupled bilayer systems // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 93, № 10. – P. 102505-1–102505-3.

6. *Uzdin V.M., Vega A.* The magnetization reversal process in spin spring magnets // *Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 19, № 31. – P. 315401 (5p).
7. *Montaigne F., Mangin S., Henry Y.* Transitions of magnetic configuration at the interface of exchange-coupled bilayers: TbFe/GdFe as a model system // *Phys. Rev. B*. – 2003. – Vol. 67, № 14. – P. 144412-1–144412-13.
8. *Тааев Т.А., Хизриев К.Ш., Муртазаев А.К.* Термодинамические свойства модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя // *ЖЭТФ*. – 2016. – Т. 149, вып. 5. – С. 1022–1029.
9. *Taaev T.A., Khizriev K.Sh., Murtazaev A.K. et. al.* Investigation of critical phenomena of the hard/soft magnetic bilayer model by the Monte-Carlo method // *J. Alloys and Comp.* – 2016. – Vol. 678. – P. 167–170.
10. *Тааев Т.А., Хизриев К.Ш., Муртазаев А.К.* Исследование процессов перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя методом Монте-Карло // *ЖЭТФ*. – 2017. – Т. 151, вып. 6. – С. 1084–1091.
11. *Metropolis N., Rosenbluth W., Rosenbluth N., et. al.* Equation of state calculations by fast computing machines // *J. Chem. Phys.* – 1953. – Vol. 21. – P. 1087–1092.

Поступила в редакцию 3 октября 2018 г.

UDC 537.9

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-4-59-66

The magnetization reversal curves of hard/soft magnetic bilayer

T.A. Taaev¹, K.Sh. Khizriev^{1,3}, A.K. Murtazaev^{1,2,3}, Sh.K. Khizriev¹, A.Ya. Kurbaitaev¹, M.M. Isaeva¹

¹ *Institute of Physics DSC RAS; Russia, 367015, Makhachkala, M. Yaragsky st., 94;*

² *Dagestan Scientific Center of RAS; Russia, 367025, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 45;*

³ *Dagestan State University; Russia, 367001, Makhachkala, M. Gadzhiev st., 43a; taaev89@mail.ru*

A model is presented for investigating the magnetic properties of hard/soft magnetic bilayer in the external magnetic field of the Metropolis algorithm by the Monte Carlo method. For the first time, the influence of the constant of the exchange interlayer interaction of the soft J_{soft} and the hard J_{hard} layers on the magnetization reversal of the magnetic bilayer model is studied. The magnetization reversal curves of the total magnetization and its longitudinal and transverse components for all values of the exchange constants are constructed. The study has shown that the formation of a one-dimensional heterophase spin spring in a magnetic bilayer entirely depends on the intralayer exchange interaction of the soft magnetic layer. The characteristic values of the magnetic fields H_{irr} and H_{ex} are calculated for all values of the J_{hard} and J_{soft} exchange parameter. For the first time the phase diagrams "spring-not spring" for the magnetic bilayer model are constructed depending on the values of exchange constants. The research has shown that the behavior of the presented model of hard/soft magnetic bilayer in an external magnetic field is in good agreement with theoretical predictions.

Keywords: *XY-model, spin spring, Monte-Carlo method, Metropolis algorithm, phase diagram.*

Received 3 October, 2018