

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТАНТ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ МОДЕЛИ МАГНИТОТВЕРДОГО/МАГНИТОМЯГКОГО БИСЛОЯ

Т. А. Тааев<sup>a\*</sup>, К. Ш. Хизриев<sup>a,b</sup>, А. К. Муртазаев<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук  
367015, Махачкала, Россия

<sup>b</sup> Дагестанский государственный университет  
367000, Махачкала, Россия

Поступила в редакцию 16 января 2019 г.,  
после переработки 16 марта 2019 г.  
Принята к публикации 19 марта 2019 г.

Представлена модель для исследования магнитотвердого/магнитомягкого бислоя во внешнем магнитном поле методом Монте-Карло. Изучено влияние значений констант обменного внутрислойного и межслойного взаимодействий магнитотвердого и магнитомягкого слоев на процессы перемагничивания магнитного бислоя. Показано, что формирование спиновой пружины определяется, в первую очередь, величиной обменного взаимодействия в магнитомягком слое. Построены фазовые диаграммы магнитного бислоя.

DOI: 10.1134/S004445101908011X

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитные многослойные структуры, состоящие из чередующихся магнитотвердых и магнитомягких слоев, представляют собой уникальные системы и вызывают большой интерес у исследователей [1–15]. Впервые изготовление магнитотвердых/магнитомягких гетероструктур было предложено в работе Кнеллера и Хавига [1]. Такие материалы получили название обменно-связанных или обменно-упругих магнитов. Благодаря обменному взаимодействию между магнитомягким слоем, характеризующимся большим значением намагниченности насыщения, и магнитотвердым слоем, обладающим анизотропией типа «легкая ось», данные структуры открывают возможность для увеличения энергетического произведения  $(BH)_{max}$  [1,3], и в них возникает ряд необычных явлений, таких как формирование во внешнем магнитном поле одномерной гетерофазной спиновой пружины [2]. Также большие надежды возлагаются на магнитотвердые/магнитомягкие гетероструктуры в свете их практического примене-

ния: из-за возможности интегрирования в различные электронные устройства.

На получение идеальных и подходящих магнитных гетероструктур влияет много факторов (шероховатость интерфейсов, перемешивание атомов в процессе роста и др.). Структурные дефекты могут качественно изменить магнитное поведение и должны быть адекватно учтены при интерпретации экспериментальных данных. Все эти трудности получения и исследования магнитотвердых/магнитомягких гетероструктур можно преодолеть, если проводить численный эксперимент с использованием высокоэффективных методов Монте-Карло [16]. В недавних работах [17, 18] представлены результаты исследования температурных зависимостей термодинамических параметров и критического поведения магнитотвердого/магнитомягкого бислоя методом Монте-Карло. На температурных зависимостях теплоемкости и восприимчивости обнаружены двойные максимумы, которые являются результатом двух фазовых переходов, происходящих в системе [17]. С помощью соотношения конечно-размерного скейлинга были рассчитаны статические критические индексы теплоемкости  $\alpha$ , намагниченности  $\beta$ , восприимчивости  $\gamma$  и радиуса корреляции  $\nu$  [18], которые хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями для XY-модели. В работе [19] было изу-

\* E-mail: taeev89@mail.ru

чено влияние на процессы перемангничивания магнитного бислоя магнитомягкой фазы. Обнаружен перегиб на петле гистерезиса для магнитотвердого/магнитомягкого бислоя, который связан с поведением магнитомягкого слоя во внешнем магнитном поле.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния величин констант обменного внутрислойного и межслойного взаимодействий магнитомягкого и магнитотвердого слоев на процессы перемангничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя.

## 2. МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА

Исследование магнитотвердого/магнитомягкого бислоя (Sm–Co)/Fe методами мессбауэровской спектроскопии показало обменно-упругое упорядочение магнитных моментов в плоскости системы [13]. Поэтому для исследования магнитных свойств магнитотвердого/магнитомягкого бислоя под действием внешнего магнитного поля была использована модель [17–20], обобщающая стандартную ХУ-модель.

Гамильтониан модели представлен в виде

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

где первая сумма учитывает обменное взаимодействие каждого магнитного атома с ближайшими соседями внутри слоев с  $J = J_{hard}$  и  $J = J_{soft}$  соответственно в магнитотвердом и магнитомягком слоях и межслойное взаимодействие с параметром  $J = J_{int}$ ; вторая сумма учитывает вклад анизотропии в энергию системы,  $K = K_{hard}$  и  $K = K_{soft}$  — константы анизотропии соответственно магнитотвердого и магнитомягкого слоев; третья сумма — вклад внешнего магнитного поля в энергию системы,  $g \approx 2$  — фактор Ланде,  $\mu$  — магнетон Бора,  $H_0^{x,y}$  — проекции внешнего магнитного поля  $\mathbf{H}_0$ ,  $S_i^{x,y}$  — проекции спина  $\mathbf{S}_i$ , локализованного на узле  $i$ ,  $|\mathbf{S}_i| = 1$ .

Мы использовали следующие значения параметров:  $J_{soft} = 0.2-1.0$ ,  $J_{hard} = 0.1-1.0$ ,  $J_{int} = 0.2-1.0$ ,  $K_{hard} = 0.001$ ,  $K_{soft} = 0$ . 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  $177^\circ$ . Такое направление выбрано в связи с тем, что при строго антипараллельной

ориентации направления магнитного поля не происходит образование спиновой пружины [2, 19]. Магнитные моменты атомов магнитомягкого и магнитотвердого слоев расположены в узлах простой кубической решетки.

Расчеты проводились для модели магнитного бислоя (1) стандартным алгоритмом Метрополиса метода Монте-Карло [21] для систем с линейными размерами  $L_x \times L_y \times L_z$ , при температуре  $T$  намного ниже  $T_c$ . Вдоль направлений  $x$  и  $y$  линейные размеры системы были равны  $L_x = L_y = 50$ , а вдоль оси  $z$  —  $L_z = 100$ , т. е. рассматривалась модель при толщине магнитотвердого и магнитомягкого слоев по 50 атомных слоев. В процессе эксперимента совершалось до  $5 \cdot 10^5$  МК-шагов/спин и проводилось усреднение термодинамических параметров.

Для устранения влияния граничных эффектов при моделировании макросистем, содержащих сравнительно небольшое число частиц, используются так называемые периодические граничные условия (ПГУ). В сложных системах это просто означает отождествление  $(n + 1)$ -го слоя (спина) с первым. При этом не возникают свободные границы и стенки. В нашей модели мы вводили ПГУ в двух направлениях (вдоль направлений  $x$  и  $y$ ), чтобы результат моделирования не зависел от размеров компьютерной модели [19]. Зависимость термодинамических параметров от размеров системы приведена в работах [17, 18].

В процессе численного эксперимента проводилось наблюдение за намагниченностью всей системы  $M$ , ее продольной  $M_{long}$  и поперечной  $M_{tran}$  компонентами, а также за намагниченностями каждого  $j$ -го магнитного монослоя  $M_j$ :

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

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

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

$$M_j = \left\langle \frac{1}{L_x \times L_y} \sum_{i=1}^{L_x \times L_y} \mathbf{S}_i \right\rangle_j, \quad (5)$$

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

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для магнитотвердых/магнитомягких гетероструктур существуют два характеристических

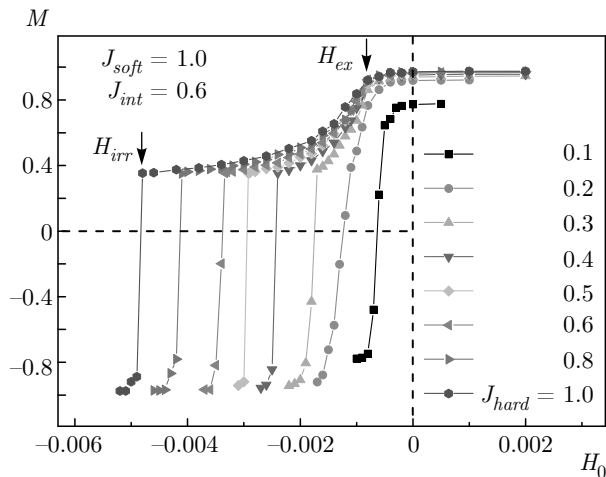


Рис. 1. Кривые перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при различных значениях константы обменного параметра  $J_{hard}$

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.

На рис. 1 приведены кривые перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при различных значениях обменного параметра магнитотвердого слоя  $J_{hard}$ . Значения обменных констант магнитомягкого слоя и межслойного взаимодействия принимали фиксированные значения соответственно  $J_{soft} = 1.0$  и  $J_{int} = 0.6$ .

На рис. 1 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 обменного взаимодействия в

магнитотвердом слое приводит к тому, что тепловые флуктуации начинают доминировать над силами обменного взаимодействия. Магнитные моменты в магнитотвердом слое становятся слабосвязанными между собой, в связи с чем, требуется меньшее значение внешнего магнитного поля для перемагничивания бислоя. Однако стоит отметить, что даже при значениях константы  $J_{hard} \leq 0.2$  бислой проявляет достаточную жесткость по отношению к внешнему магнитному полю. Видимо, это связано с тем, что в магнитотвердом слое за счет отличной от нуля анизотропии образец проявляет магнитотвердые свойства при относительно малых значениях обменного взаимодействия  $J_{hard}$ .

На рис. 2 показаны кривые перемагничивания данной модели при различных значениях константы обменного взаимодействия магнитомягкого слоя  $J_{soft}$ . Обменные константы магнитотвердого слоя и межслойного взаимодействия принимали значения  $J_{hard} = 0.4$  и  $J_{int} = 0.6$ .

Как видно на рис. 2, 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. Тем самым, увеличение константы  $J_{soft}$  приводит к тому, что магнитные моменты атомов более жестко связаны между собой и, соответственно, требуется приложить большую величину магнитного поля, чтобы заставить их вращаться. Характеристическое значение  $H_{ex}$  растет, и петля становится более выпуклой. Увеличение внутрислойного обмена приводит к тому, что в результате поворота магнитные моменты магнитомягкого слоя увлекают за собой спины все большего количества соседних монослоев и намагниченность магнитомягкого слоя быстро достигает насыщения.

Образуется некое подобие спиновой пружины толщиной  $\delta$ , которое состоит из определенного количества монослоев, у которых угол между внешним магнитным полем и вектором намагниченности монослоя изменяется от 0 до 180°. Крайний верхний монослой в этой пружине ориентирован по направлению поля, а нижний монослой — против поля. С ростом внешнего магнитного поля пружина смещается к границе магнитотвердого и магнитомягкого слоев. Как только пружина достигает границы, энергии внешнего магнитного поля  $H_0$  становится

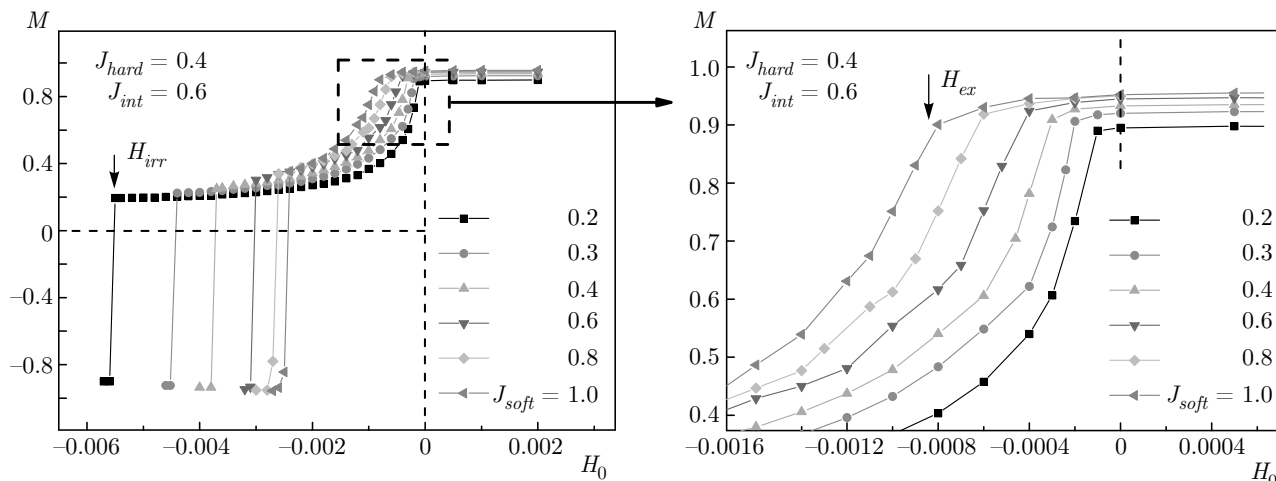


Рис. 2. Кривые перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при различных значениях константы обменного параметра  $J_{soft}$

достаточно, чтобы все магнитные моменты атомов бислоя ориентировались по направлению поля.

Продольные  $M_{long}$  и поперечные  $M_{tran}$  составляющие кривых перемагничивания общей намагниченности  $M$  магнитного бислоя при различных значениях константы обменного взаимодействия магнитомягкого слоя  $J_{soft}$  приведены на рис. 3. Как следует из графиков, продольные составляющие  $M_{long}$  плавно уменьшаются, а поперечные компоненты  $M_{tran}$  сначала возрастают до определенного максимума и затем убывают до значения внешнего магнитного поля  $H_0 = H_{irr}$ . 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 в одном из направлений). Также на рис. 3 видно, что при увеличении значения обменного параметра  $J_{soft}$  максимум на кривой поперечной составляющей  $M_{tran}$  растет. При  $H_0 > H_{irr}$  магнитный бислой полностью перемагничивается.

В работе [19] 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. В свою очередь, спиновую пружину можно представить как аналог

«доменной стенки». Как известно, ширина доменной стенки  $\delta$  зависит от константы внутрислойного обменного взаимодействия:  $\delta \propto J^{1/2}$ . На рис. 4 показаны углы поворота векторов намагниченности монослоев  $M_j$  при различных значениях константы обменного взаимодействия  $J_{soft}$ . Значение внешнего магнитного поля  $H_0 = H_{irr}$ . С помощью этих углов можно наблюдать детальную картину образования одномерной гетерофазной спиновой пружины. В рассматриваемой модели перемагничивание всей структуры происходит скачком, как только спины магнитотвердого слоя на границе с магнитомягким слоем поворачиваются на угол более  $90^\circ$ . В реальных обменно-связанных композитах критическое поле перемагничивания определяется коэрцитивной силой магнитотвердого слоя.

На рис. 4 видно, что увеличение обменного взаимодействия магнитомягкого слоя  $J_{soft}$  приводит к увеличению ширины «доменной стенки» (спиновой пружины)  $\delta$  и, соответственно, к росту максимума на поперечной составляющей  $M_{tran}$  намагниченности магнитотвердого/магнитомягкого бислоя (рис. 3).

Характеристические значения магнитных полей  $H_{irr}$  и  $H_{ex}$  мы рассчитали для всех значений обменных параметров магнитотвердого и магнитомягкого слоев. На рис. 5–7 приведены фазовые диаграммы модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя. Диаграммы представляют собой зависимости характеристических значений магнитных полей  $H_{irr}$  и  $H_{ex}$  от величины констант обменного взаимодействия магнитотвердого  $J_{hard}$  и магнитомягкого

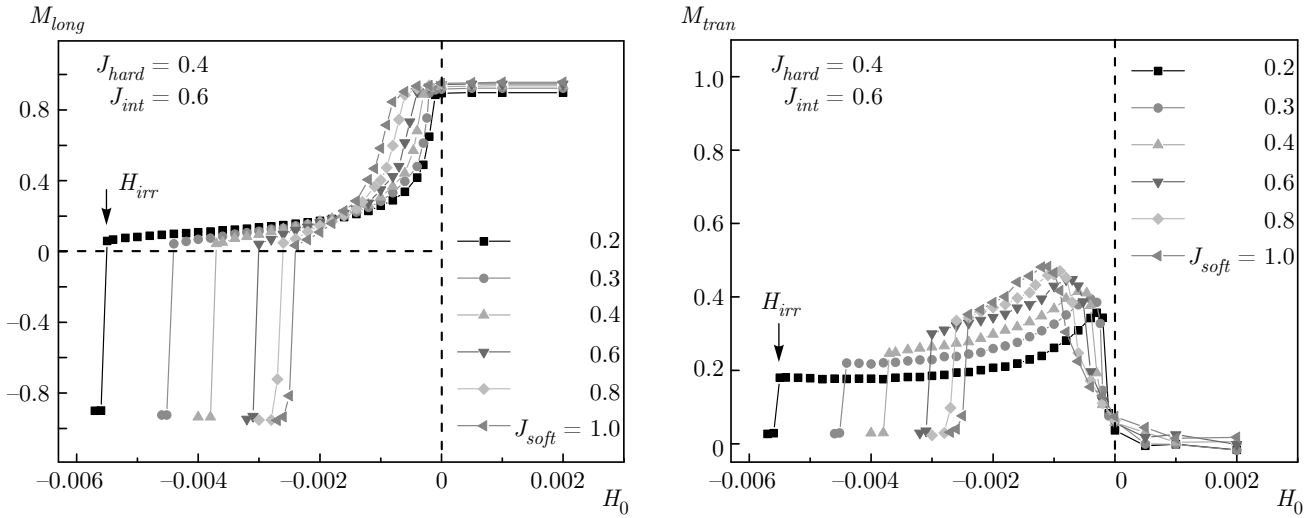


Рис. 3. Продольные  $M_{long}$  и поперечные  $M_{tran}$  составляющие кривых перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя при различных значениях константы обменного параметра  $J_{soft}$

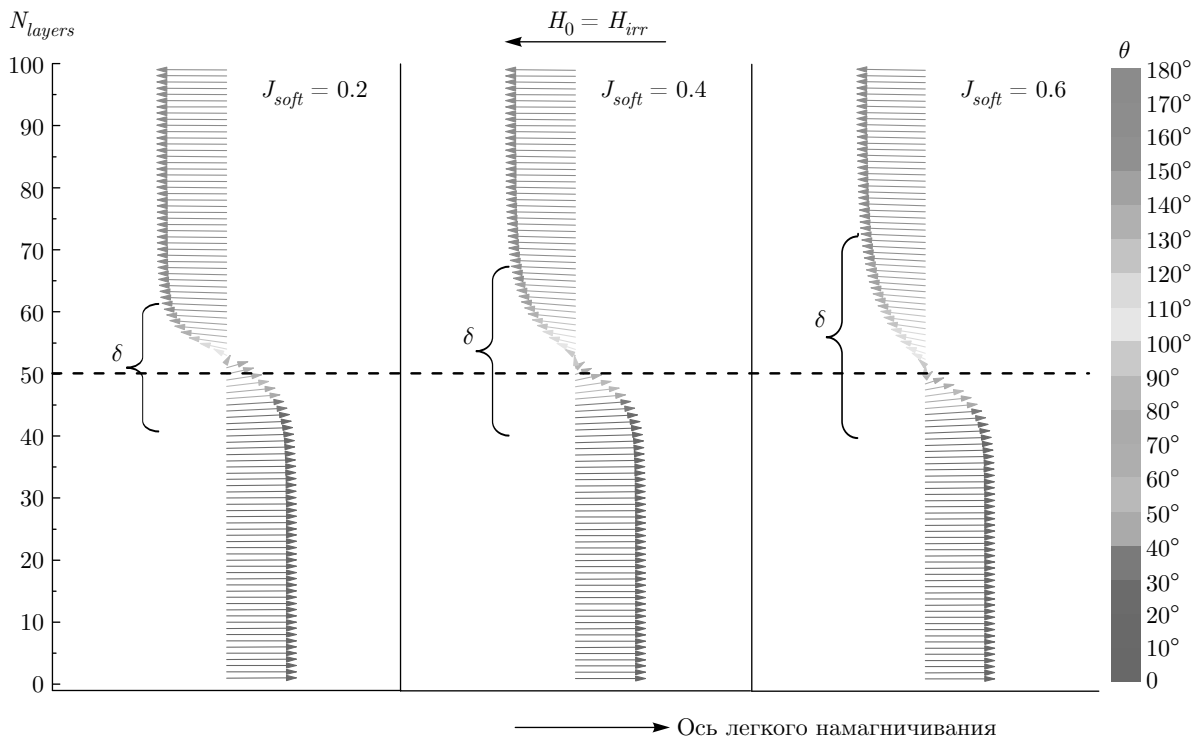


Рис. 4. Углы поворота  $\theta$  вектора намагниченности монослоев  $M_j$  модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя во внешнем магнитном поле. По оси ординат отложен номер атомного слоя по направлению  $z$ , справа на цветовой диаграмме указаны углы поворота в градусах. Стрелка показывает направление вектора намагниченности  $j$ -го монослоя  $M_j$ . Штриховая линия — граница раздела магнитотвердого и магнитомягкого слоев

$J_{soft}$  слоев, а также межслойного обменного взаимодействия  $J_{int}$ . Область «пружина» соответствует значениям внешнего магнитного поля и обменных

параметров, при которых в магнитном бислое образуется спиновая пружина во внешнем магнитном поле. Точки на фазовых кривых — это характери-

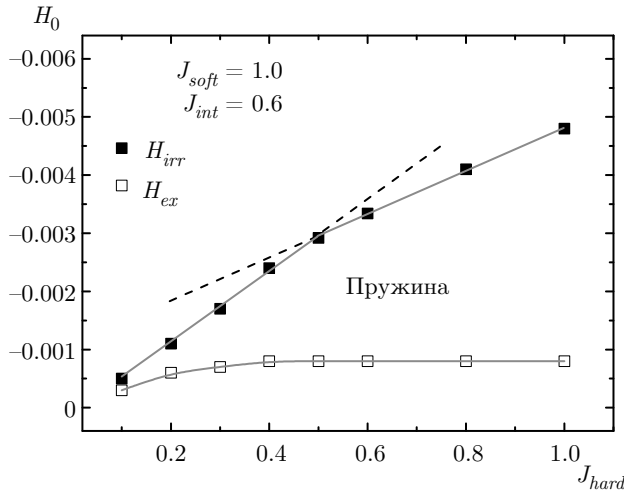


Рис. 5. Фазовая диаграмма зависимости характеристических значений магнитных полей  $H_{irr}$  (темные квадраты) и  $H_{ex}$  (светлые квадраты) от константы обменного взаимодействия магнитотвердого слоя  $J_{hard}$

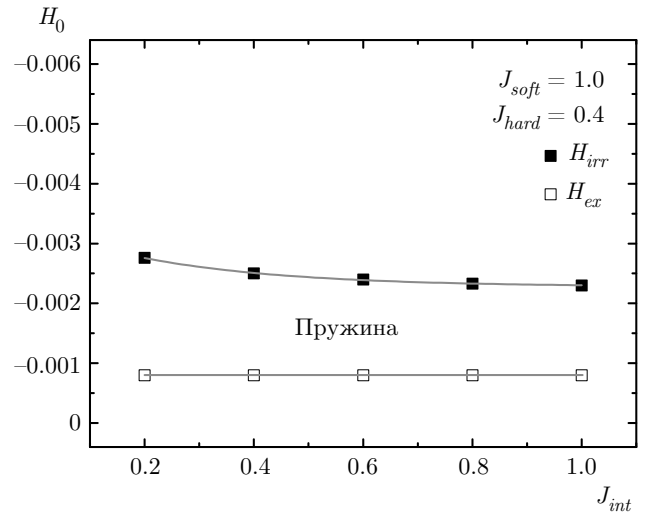


Рис. 7. Фазовая диаграмма зависимости характеристических значений магнитных полей  $H_{irr}$  (темные квадраты) и  $H_{ex}$  (светлые квадраты) от константы межслойного обменного взаимодействия  $J_{int}$

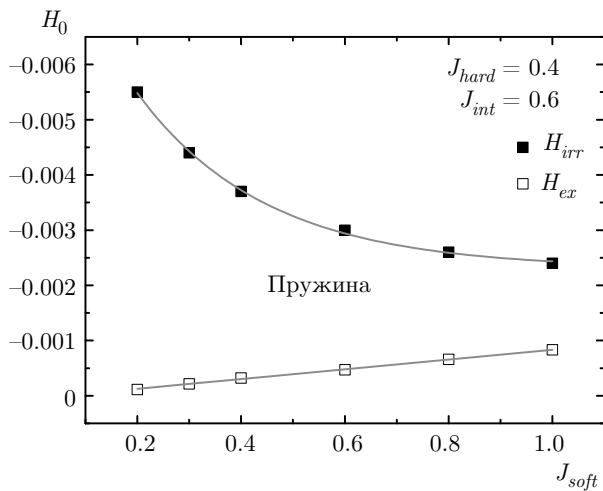


Рис. 6. Фазовая диаграмма зависимости характеристических значений магнитных полей  $H_{irr}$  (темные квадраты) и  $H_{ex}$  (светлые квадраты) от константы обменного взаимодействия магнитомягкого слоя  $J_{soft}$

стические значения магнитных полей  $H_{irr}$  и  $H_{ex}$ ;  $H_0$  — внешнее магнитное поле.

Кривая на фазовой диаграмме, соответствующая значениям критического магнитного поля  $H_{irr}$ , претерпевает излом при значении константы обменного взаимодействия магнитотвердого слоя  $J_{hard} = 0.5$  (рис. 5). Выше и ниже точки излома изменение кривой зависимости критического поля  $H_{irr}$  от константы обменного взаимодействия магнитотвердого слоя носит линейный характер. Стоит также отметить, что при уменьшении величины обменного взаимо-

действия магнитотвердого слоя  $J_{hard}$  характеристические поля  $H_{irr}$  и  $H_{ex}$  стремятся к одному значению.

Известно, что во внешнем магнитном поле, направленном против вектора намагниченности магнитотвердого слоя, намагниченность магнитомягкого слоя остается сонаправленной и параллельной намагниченности магнитотвердого слоя вплоть до значений внешнего поля [4]:

$$H_{ex} = \pi^2 J_{soft} / 2M_{soft}t^2, \quad (6)$$

где  $J_{soft}$  — обменная константа взаимодействия между спинами внутри магнитомягкого слоя,  $t$  — толщина магнитомягкого слоя,  $M_{soft}$  — намагниченность насыщения магнитомягкого слоя.

Из формулы (6) следует, что характеристическое значение поля  $H_{ex}$  зависит линейно от обменного взаимодействия магнитомягкого слоя  $J_{soft}$  ( $H_{ex} \propto J_{soft}$ ). В рамках погрешности значения  $H_{ex}$  (светлые квадраты) практически ложатся на прямую (рис. 6), что свидетельствует о хорошем согласии наших данных с формулой (6).

Как видно на рис. 7, уменьшение константы  $J_{int}$  приводит к незначительному росту значения критического поля  $H_{irr}$ . Это связано с тем, что уменьшение значения короткодействующего межслойного обменного параметра приводит к ослаблению взаимодействия магнитных атомов магнитомягкого слоя с магнитными атомами магнитотвердого слоя на границе раздела, и при включении внешнего магнитного поля магнитомягкий слой, который быстро

переориентируется по направлению поля, не может увлечь за собой магнитные моменты магнитотвердого слоя. Характеристические значения  $H_{ex}$  при этом не изменяются и на образование спиновой пружины константа межслойного взаимодействия практически не влияет.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние на процессы перемагничивания модели магнитотвердого/магнитомягкого бислоя значений констант внутрислойного обменного взаимодействия магнитотвердого  $J_{hard}$ , магнитомягкого  $J_{soft}$  слоев и межслойного обменного взаимодействия  $J_{int}$ . Построены кривые перемагничивания и фазовые диаграммы для всех значений обменных параметров. В рамках нашей модели показано, что образование одномерной гетерофазной спиновой пружины зависит слабо от величины обменного взаимодействия магнитотвердого слоя  $J_{hard}$  и межслойного обменного взаимодействия  $J_{int}$ . Формирование спиновой пружины в магнитном бислое целиком и полностью определяется значением внутрислойного обменного взаимодействия магнитомягкого слоя  $J_{soft}$ .

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-32-00526).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E. F. Kneller and R. Hawig, IEEE Trans. Magn. **27**, 3588 (1991).
2. E. E. Fullerton, J. S. Jiang, M. Grimsditch et al., Phys. Rev. B **58**, 12193 (1998).
3. R. Skomski and J. M. D. Coey, Phys. Rev. B **48**, 15812 (1993).
4. E. Goto, N. Hayashi, T. Miyashita et al., J. Appl. Phys. **36**, 2951 (1965).
5. K. Mibu, T. Nagahama, and T. Shinjo, J. Magn. Magn. Mat. **163**, 75 (1996).
6. R. Coehoorn, D. B. de Mooij, and C. De Waard, J. Magn. Magn. Mat. **80**, 101 (1989).
7. M. Amato, M. G. Pini, and A. Rettori, Phys. Rev. B **60**, 3414 (1999).
8. R. Andreescu and M. J. O'Shea, J. Appl. Phys. **91**, 8183 (2002).
9. Shi-Shen Yan, M. Elkawni, D. S. Li et al., J. Appl. Phys. **94**, 4535 (2003).
10. Guang-hua Guo, Guang-fu Zhang et al., Appl. Phys. Lett. **93**, 102505 (2008).
11. F. Montaigne, S. Mangin, and Y. Henry, Phys. Rev. B **67**, 144412 (2003).
12. J. McCord, Y. Henry, T. Hauet et al., Phys. Rev. B **78**, 094417 (2008).
13. V. M. Uzdin, A. Vega, A. Khrenov et al., Phys. Rev. B **85**, 024409 (2012).
14. P. Chowdhury, M. Krishnan et al., J. Magn. Magn. Mat. **342**, 74 (2013).
15. S. Djedai, E. Talbot, and P. E. Berche, J. Magn. Magn. Mat. **368**, 29 (2014).
16. И. К. Камилов, А. К. Муртазаев, Х. К. Алиев, УФН **169**, 773 (1999).
17. Т. А. Тааев, К. Ш. Хизриев, А. К. Муртазаев, ЖЭТФ **149**, 1022 (2016).
18. Т. А. Тааев, К. Ш. Хизриев, А. К. Муртазаев et al., J. Alloys and Comp. **678**, 167 (2016).
19. Т. А. Тааев, К. Ш. Хизриев, А. К. Муртазаев, ЖЭТФ **151**, 1084 (2017).
20. Т. А. Тааев, К. Ш. Хизриев, and А. К. Муртазаев, J. Alloys and Comp. **785**, 1253 (2019).
21. N. Metropolis, W. Rosenbluth, N. Rosenbluth et al., J. Chem. Phys. **21**, 1087 (1953).