

05 Фазовый переход „переключения“ нанодоменного состояния фрустрированной системы ферромагнетик—антиферромагнетик

© А.А. Берзин, А.И. Морозов, А.С. Сигов

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, Москва, Россия

E-mail: mor-alexandr@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 17 сентября 2012 г.)

За рамками обменного приближения с учетом энергии одноосной анизотропии проведено теоретическое исследование явления „переключения“ доменных стенок, порождаемых фрустрациями в двухслойной наноструктуре „ферромагнетик—антиферромагнетик“. Данное явление выражается в том, что с ростом магнитного поля ферромагнитный слой, разбитый на нанодомены доменными стенками, перпендикулярными плоскости слоев, становится мономерным, а антиферромагнитный слой, бывший в слабых полях однородным, разбивается на 180°-домены доменными стенками, перпендикулярными слою.

Получена фазовая диаграмма двухслойной наноструктуры в переменных „магнитное поле—характерное расстояние между краями атомных ступеней на границе раздела слоев“.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-02-12241-офи-м-2011).

1. Введение

Наличие атомных ступеней на границе раздела нанослоев ферромагнетик—антиферромагнетик с некомпенсированными атомными плоскостями, параллельными границе раздела, приводит к фрустрации межслойного обменного взаимодействия.

Если обменная жесткость ферромагнетика ниже, чем у антиферромагнетика, то при сравнимой толщине слоев в случае, когда характерное расстояние между краями соседних атомных ступеней на границе раздела R превосходит критическое значение, ферромагнитный слой вследствие фрустраций оказывается разбитым на 180°-домены. Доменные стенки нового типа, порожденные фрустрациями, зарождаются на краях атомных ступеней и пронизывают ферромагнитный слой, расширяясь по мере удаления от границы раздела (рис. 1) [1,2].

Внешнее поле, приложенное коллинеарно намагниченностям доменов, превысив критическое значение, делает более выгодным мономерное состояние ферромагнитного слоя. При этом доменные стенки, перпендикулярные плоскости слоев, разбивают на 180°-домены антиферромагнитный слой.

В работе [3] явление „переключения“ было рассмотрено в рамках обменного приближения, которое справедливо, когда все характерные геометрические размеры: толщины слоев и возникающих доменных стенок, а также параметр R намного меньше толщин традиционных (блоховских, неелевских или гибридных) доменных стенок, определяемых конкуренцией обменной энергии и энергии анизотропии.

Достижения технологий получения наноструктур открывают возможности создания наноструктур с R порядка десятков—сотен нанометров, что делает необходимым выход за рамки обменного приближения и учет энергии одноосной анизотропии при рассмотрении явления „пе-

реключения“. Такое рассмотрение и является предметом данной статьи.

2. Фазовый переход

В работе [3] было показано, что в области применимости обменного приближения процесс „переключения“ происходит непрерывно по полю и не является, строго говоря, фазовым переходом. Толщина возникших в антиферромагнитном слое доменных стенок, порожденных фрустрациями, зависит от приложенного магнитного поля и растет по мере его убывания. Полю „переключения“ соответствует поле, при котором доменные стенки, порожденные краями соседних атомных ступеней на границе раздела слоев, занимают все пространство между атомными ступенями и начинают перекрываться.

Как свидетельствуют наши предшествующие исследования (см. обзоры [1,2]), а также оценки по порядку величины, аналогичные проделанным в работе [3], толщина доменных стенок, порожденных фрустрациями,

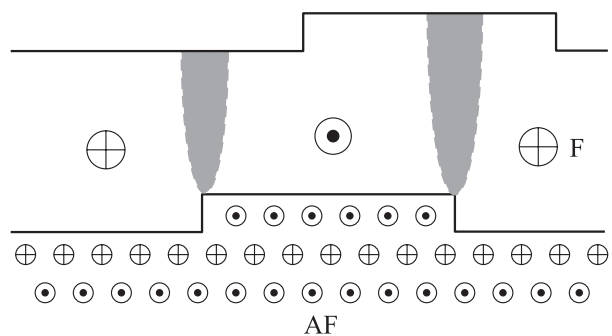


Рис. 1. Нанодоменная фаза двухслойной системы в случае подложки с большей обменной жесткостью.

растет с изменением толщин слоев или по мере убывания магнитного поля до тех пор, пока не сравняется с толщиной традиционной доменной стенки в данном материале. После этого рост толщины прекращается.

Если характерное расстояние между краями соседних атомных ступеней на границе раздела R превосходит толщину традиционной доменной стенки в антиферромагнетике Δ_{af} , то приведенный выше сценарий „переключения“ не может реализоваться. Вместо плавного перехода имеет место фазовый переход первого рода в критическом магнитном поле. Энергия доменных стенок в антиферромагнитном слое выше, чем в ферромагнитном. Величина критического магнитного поля h_{cr} находится из условий равенства выигрыша в зеемановской энергии и проигрыша в энергии доменных стенок.

3. Доменная стенка

Выход за рамки обменного приближения становится необходимым, когда толщина доменной стенки, найденная в обменном приближении (формула (21) работы [3]), сравнивается со значением Δ_{af} . Соответствующее

этому магнитное поле h_0 может быть найдено из формулы (23) работы [3] заменой R на Δ_{af}

$$h_0 \sim \left(\frac{b}{\Delta_{af}}\right)^2 \frac{|J_{af}|d_{af}}{d_f}, \quad (1)$$

где b — межатомное расстояние, $J_{af} < 0$ — обменный интеграл, описывающий взаимодействие ближайших спинов в антиферромагнетике, d_{af} и d_f — значения толщин антиферро- и ферромагнитного слоев.

Моделирование структуры доменной стенки в области магнитных полей $h_{cr} < h < h_0$ проводилось методом, описанным в работе [3]. Ее вид изображен на рис. 2. Для оценки характерной толщины стенки мы ограничились рассмотрением случая $d_{af}|J_{af}| > d_f J_f$, где J_f — обменный интеграл, описывающий взаимодействие ближайших спинов в ферромагнетике. Простой энергетический расчет, аналогичный проделанным в работе [3], но с учетом энергии одноионной анизотропии, дает для толщины доменной стенки оценку

$$\tilde{\Delta} \approx b \left(\frac{|J_{af}|d_{af}}{K_f d_f + K_{af} d_{af}}\right)^{1/2}, \quad (2)$$

где K_f и K_{af} — константы одноосной анизотропии ферро- и антиферромагнетика. Уточненное значение h_0 можно получить, подставив в формулу (1) вместо Δ_{af} значение $\tilde{\Delta}$

$$h_0 \sim K_f + K_{af} d_{af}/d_f. \quad (3)$$

4. Поле „переключения“

Основной вклад в энергию доменной стенки дает часть стенки, расположенная в антиферромагнетике. Ее структура и поверхностная плотность энергии аналогичны таковым для традиционной блоховской доменной стенки в антиферромагнетике

$$\tilde{\epsilon} \approx b^{-2} [|J_{af}|(K_{af} + K_f d_f/d_{af})]^{1/2}. \quad (4)$$

Проигрыш в энергии доменной стенки в результате „переключения“ в расчете на единицу длины края атомной ступени составляет $d_{af} \tilde{\epsilon}$.

Выигрыш в энергии взаимодействия с магнитным полем в результате „переключения“ в домене, ограниченном краями двух соседних атомных ступеней, равен в расчете на единицу длины края атомной ступени $2Rd_f h/b^3$, где $h = \mu B$ — зеемановская энергия одной ячейки, μ — магнитный момент элементарной ячейки, а B — индукция внешнего магнитного поля.

Из баланса энергий получаем значение критического поля h_{cr}

$$h_{cr} = \frac{\tilde{\epsilon} d_{af} b^3}{R d_f}. \quad (5)$$

Множитель 2 исчезает из-за того, что на один переориентирующийся ферромагнитный домен приходится две доменные стенки.

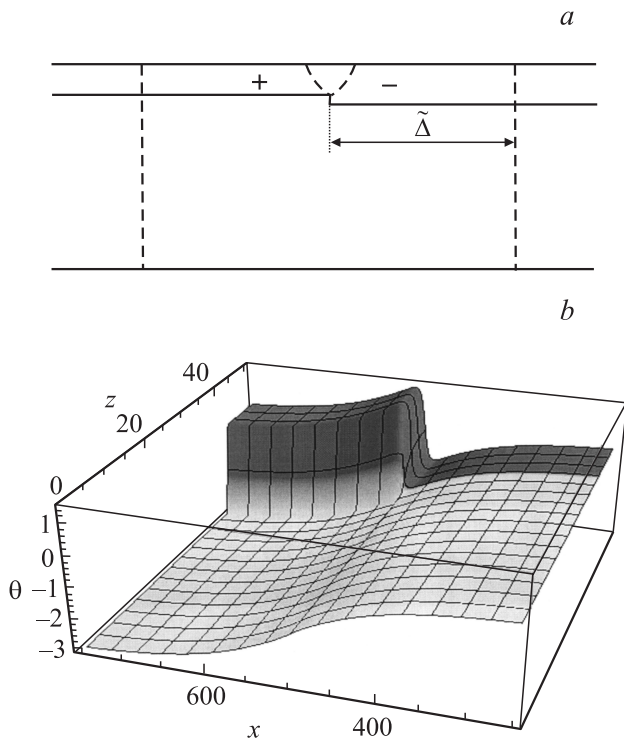


Рис. 2. Доменная стенка, порожденная атомной ступенью, в области слабых ($h = 0.0001$) магнитных полей: схематическое изображение (a) и угол θ разворота параметра порядка в плоскости слоя, отсчитанный от направления легкой оси для случая $J_{af} = -1$, $J_f = J_{f,af} = 0.1$, $K_f = K_{af} = 5 \cdot 10^{-5}$ (b) ($J_{f,af}$ — обменный интеграл, описывающий взаимодействие ближайших спинов, принадлежащих разным слоям, на границе раздела слоев). Ступени на границе раздела между ферромагнетиком ($z > 40$) и антиферромагнетиком ($z < 40$) соответствует координата $x = 500$.

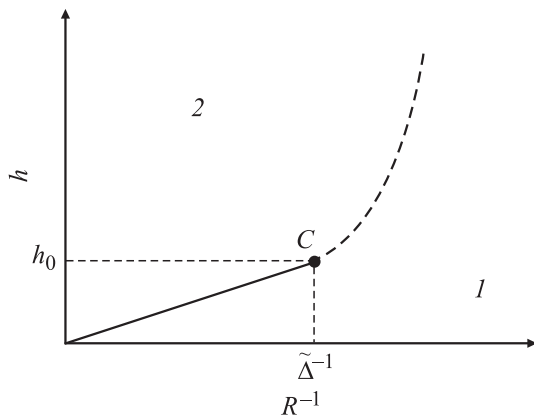


Рис. 3. Фазовая диаграмма двухслойной наноструктуры „ферромагнетик-антиферромагнетик„ в переменных „магнитное поле — характерное расстояние между краями атомных ступеней на границе раздела слоев“. Фаза *1* — фаза с доменными стенками в ферромагнитном слое, фаза *2* — фаза с доменными стенками в антиферромагнитном слое. Сплошная линия соответствует линии фазовых переходов первого рода, *C* — критическая точка.

В отличие от области применимости обменного приближения, где $h_{cr} \propto R^{-2}$, критическое поле ведет себя как $h_{cr} \propto R^{-1}$. Поскольку в области применимости обменного приближения фазовый переход в строгом смысле этого слова отсутствует, на фазовой диаграмме „магнитное поле — характерное расстояние между краями атомных ступеней на границе раздела слоев“ при $h \approx h_0$ имеет место критическая точка (рис. 3).

5. Заключение

Сформируем основные результаты работы.

1. С выходом за рамки обменного приближения и с учетом энергии одноионной анизотропии получена структура доменной стенки, возникающей в результате „переключения“ фрустрированной наноструктуры ферромагнетик–антиферромагнетик внешним магнитным полем.
2. Получена величина критического магнитного поля, соответствующего фазовому переходу „переключения“ первого рода.
3. Предсказано наличие критической точки на фазовой диаграмме „магнитное поле — характерное расстояние между краями атомных ступеней на границе раздела слоев“.

К сожалению, нам не известны экспериментальные наблюдения предсказанного явления „переключения“. Переход слоя (ферро- или антиферромагнитного) из нанодоменного в однородное состояние можно наблюдать, исследуя его поверхность методами спин-поляризационной сканирующей туннельной микроскопии [4,5].

Список литературы

- [1] А.И. Морозов, А.С. Сигов. ФТТ **46**, 385 (2004).
- [2] А.И. Морозов, А.С. Сигов. ФТТ **54**, 209 (2012).
- [3] А.А. Берзин, А.И. Морозов, А.С. Сигов. ФТТ **54**, 2090 (2012).
- [4] U. Schlickum, N. Janke-Gilman, W. Wulfhchel, J. Kirschner. Phys. Rev. Lett. **92**, 107 203 (2004).
- [5] W. Wulfhchel, U. Schlickum, J. Kirschner. Microscopy Res. Techn. **66**, 105 (2005).