

6. Richter G., Stolz W., Thomas P. et al. // Superlatt. Microstruct. 1997. **22**. P. 475.
7. Jiang H.X., Lin J.Y. // J. Appl. Phys. 1988. **63**. P. 1984.
8. Ормонт М.А. // Тез. докл. III Всерос. конф. по физике полупроводников «Полупроводники '97». М. (изд. ФИАН), 1997. С. 80.
9. Туннельные явления в твердых телах / Под ред. Э. Бурштейна, С. Лундквиста. М.: Мир, 1973.
10. Beton P.H., Long A.P., Kelly M.J. // J. Appl. Phys. 1989. **65**. P. 3076.
11. Erdös P., Herndon R.C. // Adv. in Phys. 1982. **31**. P. 65.
12. Cota E., Jose J.V., Azbel M.Ya. // Phys. Rev. B. 1985. **32**. P. 6157.
13. Takhtamirov E.E., Volkov V.A. // Semicond. Sci. Technol. 1997. **12**. P. 77.
14. Soukoulis C.M., Jose J.V., Economou E.N., Ping Sheng. // Phys. Rev. Lett. 1983. **50**. P. 764.
15. Tsu R., Esaki L. // Appl. Phys. Lett. 1973. **22**. P. 562.

Поступила в редакцию
22.01.99

УДК 537.62

МЕХАНИЗМЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В ДВИЖУЩЕЙСЯ ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЕ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ЖЕЛЕЗА

В. Е. Зубов, А. Д. Кудakov, Н. Л. Левшин, П. А. Поляков

(кафедра магнетизма)

Аномально большое влияние физической адсорбции на подвижность 180-градусной доменной границы в приповерхностной области, наблюдаемое в нитевидных монокристаллах железа, объяснено повышенной коэрцитивностью, обусловленной образованием адсорбционных дефектов, а также нестационарным хаотическим характером движения приповерхностного участка доменной границы.

Введение

В работах [1, 2] было обнаружено аномально большое влияние физической адсорбции на подвижность 180-градусной доменной границы (ДГ) в приповерхностной области монокристаллов железа. Колебания ДГ возбуждались переменным полем H_y , коллинеарным векторам намагниченности в доменах (система координат приведена на рис. 1). Изучалась частотная зависимость амплитуды колебаний ДГ (Δ). При увеличении частоты магнитного поля (f) наблюдалось уменьшение Δ . Количественной характеристикой этого процесса служит частота релаксации f_r , при которой амплитуда $\Delta(f_r) = 0,7\Delta_0$, где $\Delta_0 = \Delta(f \rightarrow 0)$. При уменьшении давления воздуха в вакуумной ячейке, в которую помещался образец, от атмосферного (10^5 Па) до 10^3 Па частота релаксации ДГ на поверхности образца ($f_r^S \approx 1$ кГц при $p = 10^5$ Па) увеличилась более чем на порядок. Частота релаксации ДГ в объеме (f_r^V) составила

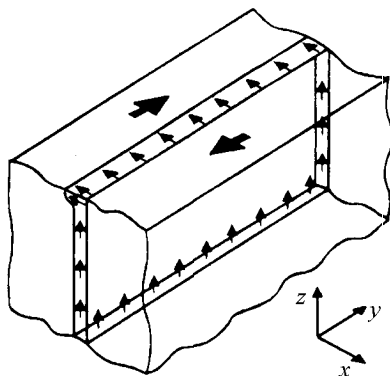


Рис. 1. Структура приповерхностной области 180-градусной доменной границы в железе

более 40 кГц. В переменном поле H_y на низкой частоте ($f \leq 100$ Гц) амплитуды колебаний ДГ на поверхности (Δ^S) и в объеме (Δ^V) совпадают (рис. 2), при повышении частоты Δ^S быстро уменьшается ($\Delta^S \cong 0$ при $f \sim 20$ кГц), а Δ^V практически не изменяется. В работах [1, 2] было предложено качественное объяснение наблюдаемого эффекта, основанное на том, что физическая адсорбция молекул воды протекает по механизму образования водородных связей на поверхности железа. Используя изотермы адсорбции паров воды на поверхности твердых тел [3], можно оценить концентрацию адсорбированных молекул

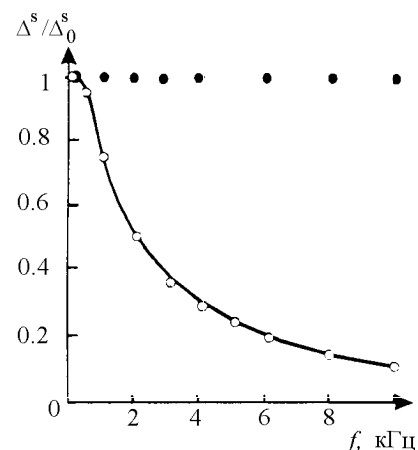


Рис. 2. Зависимость амплитуды колебаний ДГ от частоты переменного магнитного поля на поверхности нитевидных монокристаллов железа: темные кружки — при давлении воздуха над образцом $p = 10^3$ Па, светлые — при $p = 10^5$ Па (из работы [2]). Сплошная линия — расчетная зависимость $\Delta^S(f)/\Delta_0^S$, полученная с использованием формулы (5)

H_2O на поверхности образца. Уменьшение давления воздуха от атмосферного до 10^3 Па соответствует изменению адсорбционного покрова поверхности молекулами H_2O от нескольких монослоев до нескольких десятых долей монослоя. Образование водородных связей приводит к сжатию поверхности образца [3], и вследствие магнитоупругого взаимодействия появляются поверхностные магнитные дефекты точечного типа. Движущаяся ДГ взаимодействует с поверхностными дефектами, теряя при этом свою энергию. Повышение плотности поверхностных дефектов приводит к увеличению энергетических потерь и, таким образом, к уменьшению частоты релаксации ДГ. В настоящей работе конкретизируются механизмы потерь энергии движущейся ДГ в приповерхностной области и предлагается количественное описание данного явления с помощью эффективно-го поверхностного параметра затухания в уравнении Ландау–Лифшица.

1. Стационарное движение ДГ в приповерхностной области

В работе [4] одним из авторов настоящей статьи теоретически исследовано влияние поверхностной диссипации энергии на характер движения 180-градусной ДГ во внешнем магнитном поле и ее форму во время движения в материалах с большим фактором качества, т. е. с большой одноосной перпендикулярной анизотропией. Для скорости стационарного движения ДГ было получено соотношение

$$v = \frac{\gamma H \delta_0}{\alpha + \alpha_s}, \quad (1)$$

где α — безразмерный параметр затухания в уравнении Ландау–Лифшица в форме Гильберга [5], α_s — эффективный поверхностный параметр затухания, $\delta_0 = \sqrt{A/K}$ — параметр ширины ДГ, A — обменная константа, K — константа анизотропии, γ — гиромагнитное отношение, H — внешнее поле, коллинеарное векторам намагниченности в магнитных доменах.

Структура ДГ в приповерхностной области монокристаллов железа отличается от структуры ДГ в материалах с большим фактором качества. Вместе с тем в области малых магнитных полей скорость ДГ пропорциональна напряженности магнитного поля H . Поэтому формула (1) при этих условиях может быть применена и для монокристаллов железа. На рис. 2 представлена экспериментально полученная в работе [2] частотная зависимость амплитуды колебаний ДГ при давлении воздуха 10^5 Па. Описание этой зависимости с помощью формулы (1) возможно, если задать $\alpha_s \approx 100$. Такое значение эффективного поверхностного параметра затухания на несколько порядков превышает значения α , наблюдаемые в экспериментах по исследованию ферромагнитного резонанса и движения доменных границ и представляется маловероятным. Поэтому результаты, приведенные на рис. 2, не могут быть объяснены ста-

ционарным движением ДГ в приповерхностной области.

2. Нестационарное движение ДГ в приповерхностной области

Согласно результатам работы [6], коэрцитивная сила (H_c) магнитных структурных элементов в ферромагнетиках резко возрастает при понижении размерности элементов (ДГ, блоховская линия и блоховская точка). Так, в нитевидных монокристаллах железа коэрцитивная сила вертикальной блоховской линии почти на три порядка превосходит коэрцитивную силу ДГ. Поскольку приповерхностная область 180-градусной ДГ в монокристаллах железа представляет собой одномерную структуру типа горизонтальной неелевской линии (ГНЛ) [7], то из этого можно сделать заключение о том, что эта ГНЛ обладает повышенной коэрцитивностью. Кроме того, коэрцитивная сила ГНЛ будет возрастать при увеличении концентрации адсорбированных молекул и, следовательно, плотности точечных магнитных дефектов.

Значение H_c определяется из условия равенства силы давления на структурный элемент со стороны внешнего поля и удерживающей силы со стороны дефектов кристалла. Для случая точечных дефектов удерживающая сила определяется флуктуациями числа дефектов в объеме элемента [6]. Поскольку, с одной стороны, флуктуации распределены неравномерно по поверхности кристалла, а с другой — рассматриваемая ГНЛ является частью ДГ, то картина движения приповерхностной области ДГ во внешнем поле представляется следующим образом. ГНЛ или ее часть задерживается на флуктуации дефектов. Часть ДГ, примыкающая к ГНЛ со стороны объема, а также соседние, незакрепленные участки ГНЛ продолжают двигаться под действием поля, в результате чего ДГ изгибается. Из-за изгиба ДГ в объеме, а также примыкающих к закрепленному участку ГНЛ соседних незакрепленных участков увеличивается давление на закрепленный участок и вследствие этого происходит срыв закрепленного участка ГНЛ и его ускоренное движение. Этот срыв представляет собой поверхностный скачок Баркгаузена. Затем ГНЛ закрепляется на очередной флуктуации, и далее процесс повторяется.

Описанный процесс будет приводить к хаотическому искажению формы ДГ и к нерегулярным колебаниям вектора намагниченности в приповерхностной части ДГ. По этой причине движение ДГ в приповерхностном слое будет носить сложный нестационарный и нерегулярный характер. Известно, что усредненная скорость ДГ при нестационарном режиме ее движения, когда внешнее поле достигает критического значения, резко уменьшается и становится равной [4, 8]

$$v = \frac{\alpha_s}{1 + \alpha_s} \delta_0 \gamma H. \quad (2)$$

Уменьшение скорости ДГ вызвано возникновением нестационарной периодической прецессии намагни-

ченности в ДГ при действии больших полей, в результате которой увеличивается диссипация магнитной энергии. Отметим, что вывод формулы (2) предполагал только наличие нестационарной квазипериодической прецессии с периодом, много меньшим времени перехода ДГ в новое стационарное состояние при изменении внешнего поля.

Учитывая размагничивающее поле, возникающее вследствие конечной длины нитевидных кристаллов железа, и предполагая $\alpha_s \ll 1$ (в соответствии с экспериментами, упомянутыми в п. 1), из выражения (2) получаем зависимость координаты середины ДГ (x) от времени:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha_s \delta_0 \gamma (H - H_{\text{STR}}) = \alpha_s \delta_0 \gamma \left(H - \frac{x}{k} \right), \quad (3)$$

где $H_{\text{STR}} = x/k$ — размагничивающее поле, параметр k определяется из эксперимента, зависит от размеров образца и обычно составляет $k = 1 \div 5$ мкм/Э [6].

Решение уравнения (3) имеет вид

$$x = x_0 \left(1 - \exp \left\{ - \frac{\alpha_s \delta_0 \gamma t}{k} \right\} \right), \quad (4)$$

где $x_0 = kH$. Формула (4) может быть использована для определения частотной зависимости амплитуды колебаний ДГ на поверхности в переменном магнитном поле H_y . Полагая в (4) $t \approx T/4$, где $T = 1/f$ — период колебаний поля H_y , $x = \Delta^S$, $x_0 = \Delta_0^S$, получаем

$$\Delta^S = \Delta_0^S \left(1 - \exp \left\{ - \frac{\alpha_s \delta_0 \gamma}{4kf} \right\} \right). \quad (5)$$

Для релаксационной частоты на поверхности $f = f_r$ значение Δ^S/Δ_0^S равно 0,7. Из рис. 2 видим, что $f_r = 1,2$ кГц. Для железа $\delta_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ см, $\gamma = 1,76 \cdot 10^7$. Полагая $k = 2$ мкм/Э, из (5) получаем:

$$\alpha_s \approx \frac{4,8k f_r}{\delta_0 \gamma} \cong 3,27 \cdot 10^{-2}. \quad (6)$$

Расчетная зависимость $\Delta^S(f)/\Delta_0^S$ (5) при $\alpha_s = 3,27 \cdot 10^{-2}$ представлена на рис. 2. Наблюдается очень хорошее совпадение экспериментальной и

теоретической зависимостей, что свидетельствует в пользу модели нестационарного хаотического движения приповерхностной части ДГ.

Заключение

Предложена теория, объясняющая anomalously большое влияние физической адсорбции на подвижность 180-градусной ДГ в монокристаллах железа на основе механизма нестационарного хаотического движения ДГ в приповерхностной области, которое инициируется задержкой ДГ на флуктуациях числа поверхностных дефектов, обусловленных адсорбцией. Получено хорошее количественное согласие экспериментальной и теоретической зависимостей амплитуды колебаний ДГ на поверхности от частоты. Разработанная теория позволяет определить поверхностный параметр затухания α_s в уравнении Ландау–Лифшица из экспериментальной частотной зависимости амплитуды колебаний ДГ на поверхности образца.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 97-03-32409а) и гранта Минобразования РФ (Санкт-Петербургский конкурсный центр).

Литература

1. *Зубов В.Е., Кудakov А.Д., Левшин Н.Л., Пилипенко В.В.* // Письма в ЖТФ. 1994. **20**. С. 69.
2. *Zubov V.E., Kudakov A.D., Levshin N.L., Pilipenko V.V.* // J. Magn. Magn. Mater. 1996. **160**. P. 19.
3. *Киселев В.Ф., Крылов О.В.* Адсорбционные процессы на поверхности полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1978.
4. *Поляков П.А.* // ФММ. 1995. **79**, № 4. С. 23.
5. *Кринчик Г.С.* Физика магнитных явлений. М.: Изд-во МГУ, 1985.
6. *Зубов В.Е., Кринчик Г.С., Кузьменко С.Н.* // ЖЭТФ. 1991. **99**. С. 551.
7. *Зубов В.Е., Кринчик Г.С., Кузьменко С.Н.* // ЖЭТФ. 1992. **102**. С. 235.
8. *Малоземов А., Слонзуски Дж.* Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1977.

Поступила в редакцию
22.02.99