

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 537.62

## ИЗМЕНЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ЧАСТОТЫ ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЫ В АМОРФНОМ ФЕРРОМАГНЕТИКЕ ПРИ АДСОРБЦИИ МОЛЕКУЛ МЕТАНОЛА

В. Е. Зубов, А. Д. Кудаков, Н. Л. Левшин, Т. С. Федулова

(кафедра магнетизма)

E-mail: kudakov@magn.ru

**Магнитооптическим методом наблюдалось обратимое уменьшение частоты релаксации доменной границы на поверхности аморфного магнитомягкого ферромагнетика при адсорбции молекул метилового спирта. Обнаруженный эффект объяснен появлением магнитных дефектов, образующихся при адсорбции молекул метилового спирта на поверхности ферромагнетика, протекающей по механизму образования водородных связей. Результаты настоящей работы сравниваются с полученными ранее данными о влиянии обратимой адсорбции молекул воды на динамику доменных границ в ферромагнетиках.**

### Введение

Ранее нами было установлено, что обратимая адсорбция молекул воды при комнатной температуре на поверхности магнитомягкого аморфного ферромагнетика приводит к увеличению эффективного коэффициента торможения доменной границы (ДГ) в приповерхностной области. Результатом такого торможения является уменьшение частоты релаксации ДГ в несколько раз [1]. Наблюдаемый эффект был объяснен появлением на поверхности ферромагнетика точечных магнитных дефектов, обусловленных образованием водородных связей между адсорбированными молекулами воды и реальной поверхностью образца. Для выяснения детального механизма этого эффекта необходимо изучение влияния адсорбции других молекул, адсорбирующихся по механизму водородных связей, на магнитное состояние поверхности ферромагнетика. В настоящей работе исследовалось влияние обратимой адсорбции молекул метилового спирта на динамику ДГ в аморфном ферромагнетике. Молекулы метилового спирта и воды имеют близкие размеры, но отличаются тем, что указанные молекулы могут образовывать различное количество водородных связей.

### Образцы и методика измерений

Исследовались аморфные ферромагнитные ленты на основе железа, которые прошли специальную термовременную обработку расплава для повышения однородности сплава и улучшения его магнитомягких свойств [2]. Состав аморфного сплава  $\text{Fe}_{76.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_6$ . Толщина образцов составляла 25–30 мкм, ширина 0.55 мм и длина 15–20 мм. Магнитная структура образцов представляет собой два продольно намагниченных домена, разделенных одной 180-градусной доменной границей. Ширина ДГ на поверхности и коэрцитивная сила ДГ, из-

меренные магнитооптическим методом, составляют около 10 мкм и 0.01 Э соответственно [3]. Индукция насыщения образцов, измеренная с помощью вибрационного магнитометра, составила 12 кГс.

Исследование свойств ДГ на поверхности образцов проводилось при комнатной температуре с помощью магнитооптического микромагнетометра, подробно описанного в работе [4]. Для осуществления адсорбционно-десорбционных процессов микромагнетометр был дополнен вакуумной ячейкой, в которую помещался исследуемый образец, а также системой контролируемого напуска различных газов (подробнее см. [1]). Давление адсорбатов в ячейке можно было менять от атмосферного до  $10^{-3}$  Па. Измерялся экваториальный эффект Керра, обусловленный изменением намагниченности освещенного участка образца площадью 1 мкм<sup>2</sup>. Щель фотоэлектронного умножителя сканировала перпендикулярно длинной стороне образца. Внешнее переменное магнитное поле прикладывалось вдоль длинной стороны образца. Амплитуда поля составляла 3.5 Э, а частота варьировалась в диапазоне от 30 Гц до 20 кГц. Изучались частотные зависимости амплитуды колебаний доменной границы  $\Delta(f)$  на поверхности аморфного ферромагнетика. Релаксационная частота ДГ характеризует величину силы эффективного трения, действующую на движущуюся ДГ. Действительно, в рассматриваемом случае движение ДГ в переменном магнитном поле  $H = H_0 \cos 2\pi ft$  можно описать с помощью уравнения гармонического осциллятора, в котором слагаемое, содержащее эффективную массу ДГ, пренебрежимо мало:

$$b\dot{x} + kx = 2I_s H, \quad (1)$$

где  $b$  — коэффициент вязкого трения,  $k$  — постоянная эффективной возвращающей силы, обусловленной полем размагничивания образца,  $I_s$  — намагниченность насыщения образца,  $x(t) =$

$= \Delta \cos(2\pi ft - \varphi)$  — смещение ДГ из положения равновесия,  $\varphi$  — разность фаз между внешним полем и колебаниями ДГ. Для относительной амплитуды колебаний ДГ можно получить выражение

$$\frac{\Delta}{\Delta_0} = \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_r} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

где

$$\Delta_0 = \Delta(f=0) = \frac{2I_s H_0}{k}, \quad f_r = \frac{k}{2\pi b}. \quad (3)$$

Используя соотношение (2), получим, что при  $f = f_r$   $\Delta = \Delta_0/\sqrt{2} \cong 0.7\Delta_0$ . Из формулы (3) видно, что с ростом коэффициента вязкого трения частота релаксации ДГ уменьшается.

На основе экспериментальных кривых  $\Delta(f)$  на уровне  $0.7\Delta_0$  определялись частоты релаксации ДГ при различных давлениях паров метилового спирта в измерительной ячейке. Эксперимент производился на реальной поверхности образца, которая сформировалась после пребывания аморфного ферромагнетика на воздухе. После вакуумирования системы с образцом производился напуск паров метилового спирта.

Исследование колебаний доменной границы в объеме осуществлялось индукционным методом, для чего на образец наматывалась измерительная катушка. Сигнал с нее был пропорционален намагниченности образца, которая в свою очередь пропорциональна смещению доменной границы в объеме.

### Результаты и обсуждение

Магнитооптическое исследование динамики доменной границы в аморфных лентах показало, что частота релаксации доменной границы на поверхности уменьшается после адсорбции молекул метилового спирта, при этом амплитуда колебаний границы в объеме в исследованном диапазоне частот остается постоянной. Частота релаксации доменной границы на поверхности в вакууме составила 13.5 кГц. Напуск паров метилового спирта с давлением 10 кПа (что составляет около 70% от давления насыщающих паров метилового спирта при комнатной температуре) приводит к уменьшению частоты релаксации до 2.6 кГц, т. е. более чем в 5 раз (см. рис. 1). Пользуясь известной формулой для подвижности границы [5]

$$\mu = \frac{v}{H} = \frac{\Delta_0 2\pi f_r}{H}, \quad (4)$$

можно оценить величину подвижности ДГ на поверхности образца, которая в условиях вакуума составила  $\mu = 14$  м/(с · Э). Небольшая величина  $\mu$  по сравнению с ее значением в других ферромагнитных сплавах (см., напр., [6]) может быть объяснена влиянием поверхностных дефектов на движущуюся ДГ [7]. При адсорбции метилового спирта подвижность ДГ уменьшилась более чем в 5 раз по сравнению с ее значением в условиях вакуума.

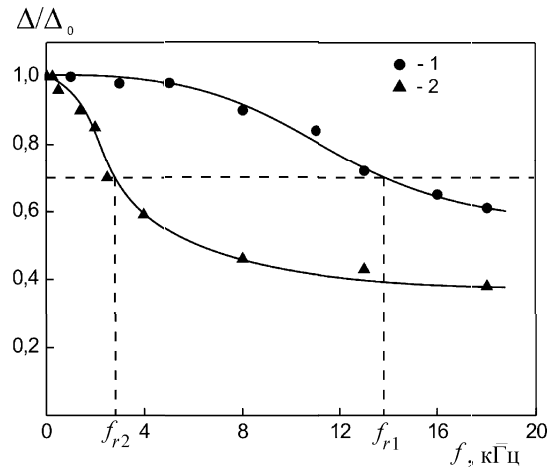


Рис. 1. Зависимость амплитуды колебаний доменной границы на поверхности образца от частоты магнитного поля в вакууме (1) и при адсорбции метилового спирта (2)

После повторного вакуумирования частота релаксации возвращается к первоначальному значению, что свидетельствует об обратимости наблюдаемого эффекта. Полученные результаты качественно согласуются с результатами работ [1, 8], в которых было обнаружено, что адсорбция молекул воды при комнатной температуре на поверхности аморфного ферромагнетика на основе железа и вискерсов железа приводит к обратимому уменьшению релаксационной частоты доменной границы на поверхности. Такое уменьшение частоты связано с образованием приповерхностных магнитных дефектов, индуцируемых адсорбцией молекул воды по механизму водородных связей. Отличие результатов работы [1] и настоящей работы состоит в том, что изменение частоты релаксации в аморфном ферромагнетике при адсорбции молекул воды не превысило 2.5 раза, т. е. оказалось существенно меньше, чем при адсорбции молекул метилового спирта.

Исследуемая реальная поверхность ферромагнетика покрыта слоем оксида, имеющего достаточно сложную структуру, которая состоит из смеси различных оксидов железа [9]. В результате пребывания образцов на воздухе на их поверхности формируется гидратный покров, состоящий из координационно-связанных молекул воды  $H_2O_K$ , гидроксильных групп, а также молекул воды, адсорбированных на поверхности по механизму образования водородных связей  $H_2O_*$ . Координационная связь молекулы  $H_2O_*$  с координационно-насыщенным атомом железа образуется путем затягивания неподеленной пары электронов кислорода на частично заполненные  $d$ -орбитали атома железа. Гидроксильные группы насыщают свободные валентности поверхностных атомов железа. После того как все активные центры адсорбции заняты  $H_2O_K$  и ОН-группами, дальнейшая гидратация поверхности может происходить в результате адсорбции молекул  $H_2O_*$ . Отметим, что вероятность адсорбции  $H_2O_*$  на  $H_2O_K$  существенно выше вероятности адсорбции на ОН-группах [10]. Молекула  $H_2O_K$  может образовывать две водородные связи с молекулами  $H_2O_*$ , которые в свою

очередь могут присоединять к себе другие молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ . Упрощенная схема поверхности исследуемых образцов с адсорбированными молекулами  $\text{H}_2\text{O}$  представлена на рис. 2, а. При вакуумировании поверхности образца происходит десорбция молекул воды, адсорбированных по механизму образования водородных связей, а также части координационно-связанных молекул. Доказательством последнего является обнаруженное изменение заряда поверхности оксида в результате ее вакуумирования [11]. Отметим, что адсорбция и десорбция молекул, адсорбированных на поверхности с образованием водородных и ван-дер-ваальсовых связей, не изменяет заряд поверхности оксида. Напуск метилового спирта в измерительную ячейку приводит к адсорбции его молекул первоначально на центры, освобожденные координационно-связанными молекулами воды, а затем к адсорбции по механизму образования водородных связей. Таким образом, молекулы метанола замещают и часть координационно-связанных молекул воды, и слабосорбированные молекулы воды.

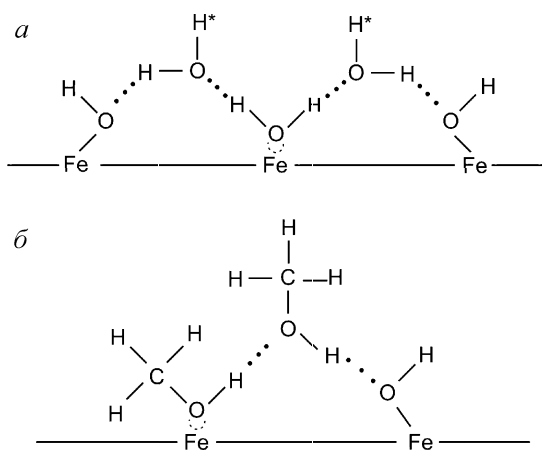


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая адсорбцию молекул воды (а) и метилового спирта (б) на поверхности образцов аморфного ферромагнетика;  $\text{H}^*$  — атомы водорода, способные к образованию водородных связей с другими молекулами воды

Схема, иллюстрирующая адсорбцию молекул метилового спирта на поверхности образцов аморфного ферромагнетика, представлена на рис. 2, б.

Сравним структуру адсорбционного слоя, возникающего при адсорбции молекул воды и метанола. Из рис. 2 видно, что в отличие от адсорбированной молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ , которая может присоединять к себе еще две адсорбированные по механизму образования водородных связей молекулы, метиловый спирт способен присоединять только одну молекулу  $(\text{CH}_3\text{OH})^*$  [12], не образуя разветвленных цепочек при адсорбции. Образование цепочек молекул адсорбата, которые замыкаются с помощью образования водородной связи с ОН-группами, приводит к деформации сжатия поверхности. Благодаря магнитоупругому взаимодействию деформация сжатия поверхности приводит к появлению точечных магнитных дефектов на поверхности образца, которые тормозят доменную границу при ее движении.

Возможным объяснением существенного разли-

чия во влиянии адсорбции молекул метилового спирта и воды на динамику доменных границ является образование разветвленных цепочек слабосвязанных молекул воды (см. рис. 2, а), которое приводит к уменьшению деформации из-за усреднения действия сил, имеющих различное направление. Уменьшение деформации поверхности приводит в результате к снижению эффективности образования магнитных дефектов, тормозящих движение доменной границы под действием поля.

### Заключение

1. Магнитооптическим методом установлено, что обратимая адсорбция молекул метилового спирта на поверхности аморфного магнитомягкого ферромагнетика при комнатной температуре приводит к уменьшению частоты релаксации и подвижности доменной границы более чем в 5 раз.

2. Этот эффект аналогичен ранее обнаруженному авторами влиянию слабой адсорбции молекул воды, протекающей по механизму образования водородных связей, на динамику доменных границ в аморфных ферромагнетиках. Отличие состоит в том, что влияние адсорбции молекул метанола на динамику доменной границы существенно выше, чем влияние адсорбции молекул воды.

3. Предложен механизм, объясняющий указанное отличие влияния адсорбции метилового спирта и воды на динамику доменной границы в аморфных ферромагнетиках.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 01-03-32946 и 02-02-16627).

### Литература

1. *Зубов В.Е., Кудаков А.Д., Левшин Н.Л., Федулова Т.С.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 2. С. 52.
2. *Стародубцев Ю.Н., Сон Л.Д., Цепелев В.С. и др.* // Расплавы. 1992. 4. С. 76.
3. *Зубов В.Е., Кудаков А.Д., Цепелев В.С.* // Письма в ЖЭТФ. 1999. 70, № 2. С. 528.
4. *Зубов В.Е., Криничик Г.С., Кузьменко С.Н.* // ЖЭТФ. 1991. 99, № 2. С. 551.
5. *Криничик Г.С.* Физика магнитных явлений. М., 1985.
6. *О'Делл Т.* Ферромагнитодинамика. Динамика ЦМД, доменов и доменных стенок. М., 1983.
7. *Зубов В.Е., Кудаков А.Д., Федулова Т.С.* // Письма в ЖЭТФ. 2000. 71, № 1. С. 34.
8. *Zubov V.E., Kudakov A.D., Levshin N.L., Pilipenko V.V.* // J. Magn. Magn. Mater. 1995. 140–144. P. 1895.
9. *Sewell P.B., Stokbridge C.D., Cohen M.* // J. Electrochem. Soc. 1961. 108, № 10. P. 933.
10. *Киселев В.Ф., Козлов С.Н., Зомеев А.В.* Основы физики поверхности твердого тела. М., 1999.
11. *Kiselev V.F., Kozlov S.N., Levshin N.L.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1981. 66, № 1. P. 93.
12. *Соколов Н.Д.* // УФН. 1955. 57, № 2. С. 205.