

УДК 548:538.221:537.611

©1994

ВЛИЯНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ НА ИХ СТАБИЛИЗАЦИЮ, ОПРЕДЕЛЯЕМУЮ ЭФФЕКТАМИ МАГНИТНОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ

В.К.Власко-Власов, Л.С.Успенская, А.Ф.Хапиков

Экспериментально изучены релаксационные свойства доменных границ в пленке феррита-граната с эффектом магнитного последействия. Определены параметры стабилизирующего стенку потенциала. Впервые показано, что смещение блоховских линий может оказывать существенное влияние на стабилизацию доменной границы. Приводится качественное объяснение наблюдаемой релаксации амплитуды колебаний стенок при смещении блоховских линий.

На движение доменных границ в магнетиках существенное влияние оказывают эффекты магнитного последействия. Оно связано с тем, что смещение границ и соответствующие локальные изменения направления намагниченности вызывают перераспределение точечных дефектов (межузельных атомов, вакансий) или обмен валентностями между ионами, приводящее к формированию изменяющегося коэрцитивного рельефа и дополнительным потерям энергии движущимися доменными границами. Характер этих потерь отличается от вязкого затухания, а их величина зависит от предьстории образца. Вклад эффектов магнитного последействия в подвижность и коэрцитивность доменных границ исследуется сравнительно давно [1-7]. И хотя качественная картина явления в основном понятна, до сих пор не создано его последовательного количественного описания, что обусловлено отсутствием детального экспериментального анализа диффузионных процессов в объеме, заметаемом движущейся доменной границей.

Другим важным фактором, определяющим динамику доменных границ в магнетиках, является их внутренняя структура, наиболее существенным элементом которой являются линии Блоха [8]. Их генерация и движение определяют изменения массы и подвижности доменных границ и приводят к нелинейной зависимости скорости доменных границ от поля [8]. Совместное действие диффузионных эффектов и внутренней структуры на динамику границ до сих пор не рассматривалось.

В настоящей работе впервые показано, что наличие блоховских линий в значительной степени определяет связанные с магнитным последействием релаксационные процессы, лимитирующие коэрцитивность и подвижность доменных границ в тонкой магнитной пленке с перпендикулярной анизотропией. Изучены особенности формирования стабилизирующей границы диффузионной ямы, определены ее размеры. Установлено, что наблюдавшиеся ранее большие значения коэрцитивности линий Блоха обусловлены в основном магнитным последействием.

1. Методика эксперимента

Эксперименты проводились на тонкой магнитной пленке с перпендикулярной анизотропией состава $(\text{GdTmPrBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ толщиной $7.5 \mu\text{m}$ с намагниченностью $4\pi M_s = 185 \text{Gs}$ полем анизотропии $H_a = 1200 \text{Oe}$ и безразмерным параметром затухания Гильберта $\alpha = 0.1$.

Доменная структура пленки, состоявшая из полосовых доменов с намагниченностью, направленной нормально к поверхности, наблюдалась в прошедшем пленку поляризованном свете за счет эффекта Фарадея. Кроме того, с помощью модифицированной темнопольной методики [9] анализировалась внутренняя структура доменных границ (линии Блоха).

Амплитуда периодических колебаний отдельных доменных границ определялась измерением интенсивности выделенных диафрагмой участков изображения доменных стенок. Для улучшения отношения сигнал-шум и повышения чувствительности средняя амплитуда колебаний доменных границ измерялась по интенсивности первого дифракционного максимума прошедшего кристалл поляризованного света [10]. Кроме того, изображение доменных границ регистрировалось с помощью видеокамеры и анализировалось с помощью системы компьютерной обработки. Это позволяло измерять величины смещений доменных границ и блоховских линий как под действием однократных смещающих импульсов поля, так и при периодическом воздействии.

2. Движение доменных границ

Сначала было изучено колебательное движение доменных стенок под действием переменного магнитного поля, приложенного вдоль оси легкого намагничивания. Зависимость амплитуды колебаний доменных границ A_0 от амплитуды переменного поля h_{z0} при частоте $f = 50 \text{kHz}$ показана на рис. 1. Видно, что при малых h_{z0} (меньше 1.5Oe) происходит обратимое движение границ с амплитудой, пропорциональной приложенному полю. Здесь $A_0 = kh_{z0}$, $k = 0.019 \mu\text{m}/\text{Oe}$. При увеличении амплитуды поля подвижность доменных границ резко возрастает, а при последующем уменьшении поля вновь падает, но при меньших h_{z0} . Нисходящую ветвь зависимости $A_0(h_{z0})$ можно экстраполировать прямой $A_0(h_{z0}) = k_1(h_{z0} - h_{c1})$, $k_1 = 0.11 \mu\text{m}/\text{Oe}$ и $h_{c1} = 1.08 \text{Oe}$, а нисходящую — прямой $A_0(h_{z0}) = k_2(h_{z0} - h_{c2})$, $k_2 = 0.13 \mu\text{m}/\text{Oe}$ и $h_{c2} = 1.82 \text{Oe}$. Эффективные поля коэрцитивности h_{c1} и h_{c2} отличаются почти в 2 раза.

Зависимости $A_0(h_{z0})$, подобные приведенной на рис. 1, наблюдаются вплоть до частоты 8MHz . При этом на частотах до 2MHz h_{ci} и k_i не зависят от частоты, а при более высоких частотах h_{ci} начинают изменяться (рис. 2). Измерения спектра колебаний ДГ $A_0(f)$ (рис. 3) выявили, что частота 2MHz , при которой начинаются изменения h_{ci} , совпадает с релаксационной частотой границ.

Как отмечено выше, зависимость $A_0(h_{z0})$ имеет гистерезис. Его наличие могло бы быть связано с закреплением границ на неподвижных дефектах. В таком случае увеличение амплитуды колебания границ должно происходить скачком при некотором пороговом значении h_{z0}

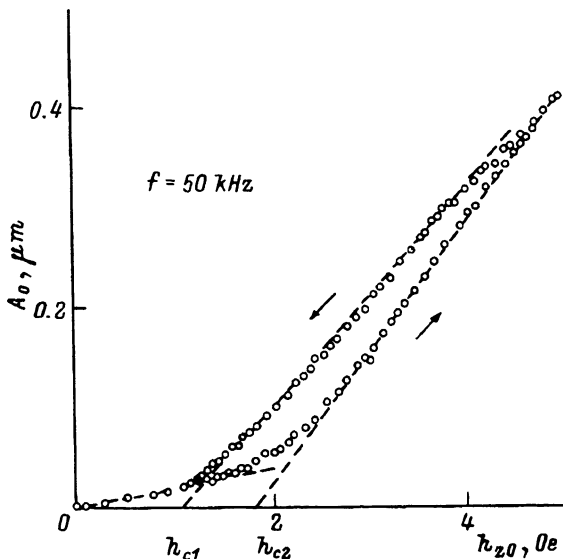


Рис. 1. Зависимость амплитуды колебаний доменной границы от амплитуды переменного магнитного поля при увеличении и уменьшении величины поля ($f = 50 \text{ kHz}$).

Штриховые линии — линейная экстраполяция.

и захват доменных границ (уменьшение A_0 при уменьшении h_{z0}) также должен быть резким. Реально, как видно из рис. 1, изменения амплитуды колебания доменных границ в окрестности h_{ci} происходит сравнительно плавно. Это, а также частотные зависимости $h_{ci}(f)$ свидетельствуют о том, что наблюдаемая коэрцитивность связана в основном с потенциальным рельефом для доменных границ, определяемым последствием. Из приведенной на рис. 1 кривой можно оценить ширину стабилизирующего потенциала по высоте обратимого участка $A_0(h_{z0})$. Она оказывается порядка $0.025 \mu\text{m}$, что примерно совпадает с шириной доменных границ ($\Delta = (A/K)^{1/2} \simeq 0.018 \mu\text{m}$).

Определяющее влияние магнитного последствия на движение границ в исследуемой пленке подтверждается изменением амплитуды колебаний границ во времени в полях выше 1.5 Oe . Если остановить развертку амплитуды поля при увеличении h_{z0} , то A_0 продолжает расти, и, наоборот, остановка при уменьшении h_{z0} сопровождается заметным уменьшением A_0 со временем. Однако установившиеся в результате релаксации значения A_0 для обоих случаев не совпадают. Это, по-видимому, свидетельствует о небольшом вкладе постоянных дефектов в наблюдаемый гистерезис. Хотя не исключено, что такое отличие связано с разной формой диффузионной ямы, получающейся при увеличении и при уменьшении амплитуды поля. Отметим, что на необратимом участке $A_0(h_{z0})$ время установления A_0 (рис. 4, кривая 1) порядка нескольких десятков секунд (при $h_{z0} < 1.5 \text{ Oe}$ амплитуда колебаний не зависит от времени). Однако релаксация не описывается одной постоянной времени τ , что может указывать на участие в ней различных точечных дефектов или электронных перескоков, порождающих спектр времен релаксации [1].

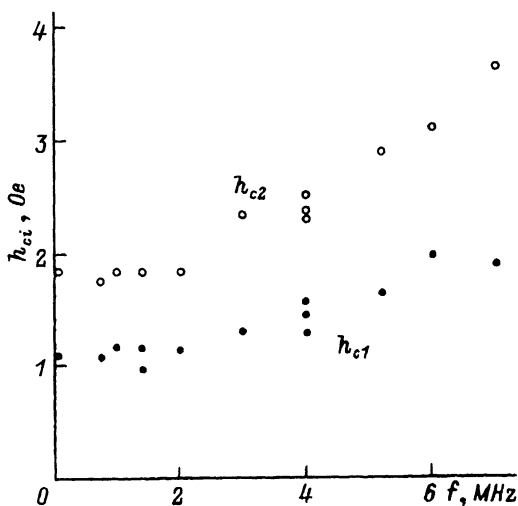


Рис. 2. Изменение эффективности полей коэрцитивности с частотой вынужденных колебаний доменных границ.
1 — h_{c1} , 2 — h_{c2} .

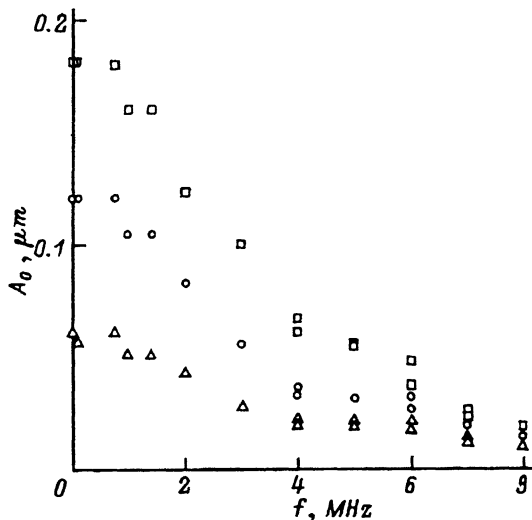


Рис. 3. Амплитудно-частотные зависимости для колебаний доменных границ при различных амплитудах магнитного поля.
1 — 2.25, 2 — 2.86, 3 — 3.2 Oe.

Было установлено, что на релаксацию колебаний доменных границ сильно влияет свет. Как видно из рис. 4 (кривая 1), при освещении образца нефокусированным лазерным пучком ($\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, $P = 1 \text{ mW}$ диаметр светового пятна 3 mm) после включения переменного магнитного поля $h_{z0} = 2.56 \text{ Oe}$ амплитуда колебания доменных границ достигает своего максимального значения примерно за 25 с. Дополнительная подсветка более мощным лазером ($\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, $P = 10 \text{ mW}$) не изменяла установившуюся амплитуду колебаний доменных границ. В то же время прерывание освещения образца сильно замедляло релаксацию, так что при последующем включении освещения изменение амплитуды колебания доменных границ продолжалось практически с того же значения амплитуды, которому было до прерывания (рис. 4, кривая 2). Ослабление освещения образца в 30 раз приводило к то-

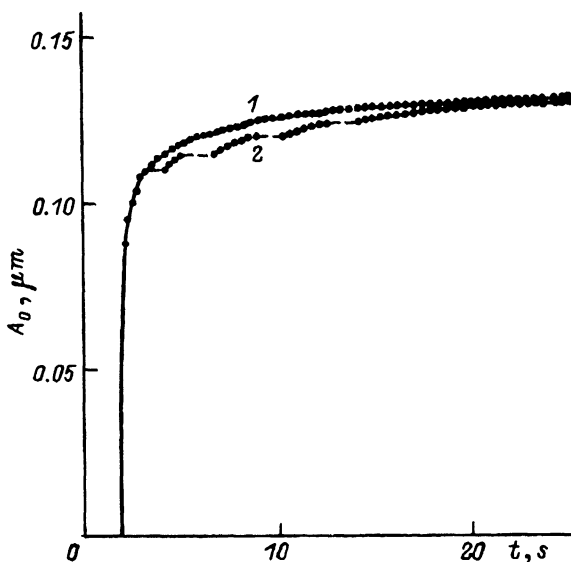


Рис. 4. Релаксация амплитуды колебания доменной границы при включении в момент времени $t = 3$ s переменного магнитного поля ($h_{z0} = 2.56$ Oe, $f = 50$ kHz). 1 — непрерывное освещение, 2 — с прерыванием света.

му, что в процессе релаксации устанавливалась меньшая амплитуда колебания доменных границ (примерно 0.7 от $A_{0\max}$).

Влияние света на релаксацию, обусловленную наведенной анизотропией, связывается обычно с электронными механизмами последствия (с процессами перескоков электронов между ионами железа в допированных образцах железо-иттриевого граната [1]), который, как представляется, и реализуется в нашем случае.

Согласно сделанной выше оценке, характерный размер диффузионной ямы для неподвижной доменной границы $\approx 0.025 \mu\text{m}$. Тогда при быстром по сравнению с временем релаксации смещения доменной границы на большие расстояния можно ожидать изменений в их динамическом поведении, обусловленных «освобождением» границ от стабилизирующих потенциалов. Как показывает рис. 5, действительно амплитуда колебания доменных границ резко возрастает при ее смещении более чем на $0.02 \mu\text{m}$, а затем медленно релаксирует к меньшему значению.

Возврат границ в прежнее положение через достаточно большое время Δt также приводил к быстрому росту и затем медленному уменьшению амплитуды их колебаний. Однако если Δt было меньше 5 s, при обратном смещении доменных границ, амплитуда их колебаний разнялась исходной и не релаксировала. Такая картина соответствует отрыву границы от диффузионной ямы и формированию нового стабилизирующего потенциала в окрестности нового положения равновесия, в то время как старый выравнивается. То, что при возвращении доменных границ через малое Δt их амплитуда равна той же, что и до смещения, еще раз подтверждает эффективность стабилизирующего потенциала, способствующего захвату границ в прежнее положение.

Отметим, что на релаксацию границ при их смещении в новое положение равновесия свет практически не влияет. Такое поведение представляется удивительным и может быть объяснено только в предположении, что процессы образования и размывания диффузионной ямы существенно различаются.

3. Влияние структуры доменных границ на релаксацию колебаний

В настоящее время отсутствуют какие-либо экспериментальные и теоретические работы, свидетельствующие о влиянии структуры доменных границ на их стабилизацию в материалах с эффектом магнитного последствия. Для выяснения этого вопроса были проведены следующие эксперименты. В плоскости магнитной пленки, доменные границы которой осциллировали под действием переменного поля h_{z0} , прикладывалось поле доменных границ (H_x), приводившее к смещению блоховских линий. При этом сами доменные границы оставались в прежнем положении равновесия, если увеличение H_x было достаточно медленным, поскольку при малых скоростях блоховских не происходит смещения доменных границ за счет гиротропных сил.

Влияние смещения линий на амплитуду колебания доменных границ было аналогично смещению границ в новые нестабилизированные положения. При этом уже небольшие (на несколько микрон) смещения блоховских линий приводили к увеличению амплитуды колебания доменных границ и ее последующей релаксации. С увеличением смещения линий этот эффект вырастал и был максимальным при почти полном намагничивании границ. В этих условиях блоховские линии объединялись в кластеры небольшого размера, сегменты доменных границ между которыми все были поляризованы в направлении поля H_x . При

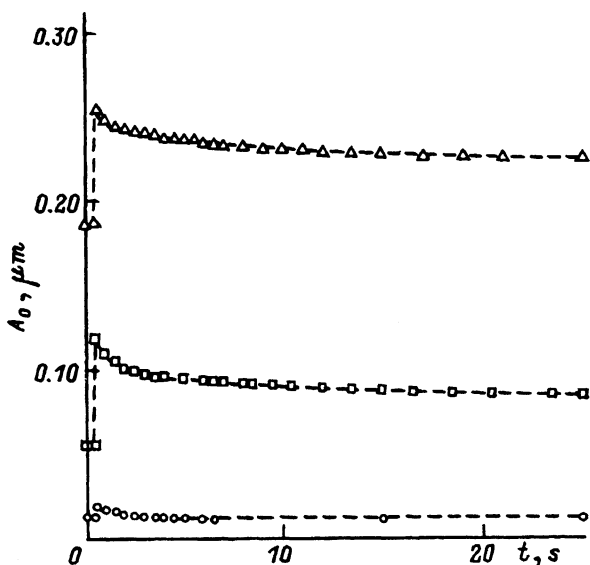


Рис. 5. Релаксация амплитуды колебания доменной границы при ее смещении полем H_x на $0.5 \mu\text{m}$ при различных амплитудах возбуждающего поля h_{z0} . 1 — 0.64, 2 — 1.92, 3 — 3.2 Ое.

таким намагничиванием стенки релаксационные кривые были такие же, как и при смещении доменных границ полем H_z на достаточно большие расстояния (рис. 5). Значения амплитуды колебаний доменных границ в первый момент после смещения линий и установившиеся в результате релаксации показаны на рис. 6 в сравнении с соответствующими величинами при смещении стенок в новые нестабилизированные положения равновесия. Свет не влиял на релаксацию амплитуды колебаний стенок при смещении линий, как и при смещении доменных границ в новые положения равновесия. Подтверждением того, что эффект связан со смещением блоховских линий, является отсутствие изменений амплитуды колебания границ при включении плоскостного поля, если доменные границы были исходно поляризованы вдоль поля.

4. Обсуждение

Описание динамики доменных границ в кристаллах с магнитным последствием проводится обычно на основе нелинейного интегродифференциального уравнения, полученного Неелем [11]. В случае колебательного движения доменной границы в переменных полях оно может быть проанализировано лишь численно. Качественная картина сводится к тому, что стабилизирующий потенциал, сформировавшийся на доменной границе за счет диффузии примесей (или электронов), стимулируемой зависимостью их энергии от направления намагнитченности, изменяется при колебаниях доменных границ. С ростом амплитуды колебания диффузионная потенциальная яма, соответствующая

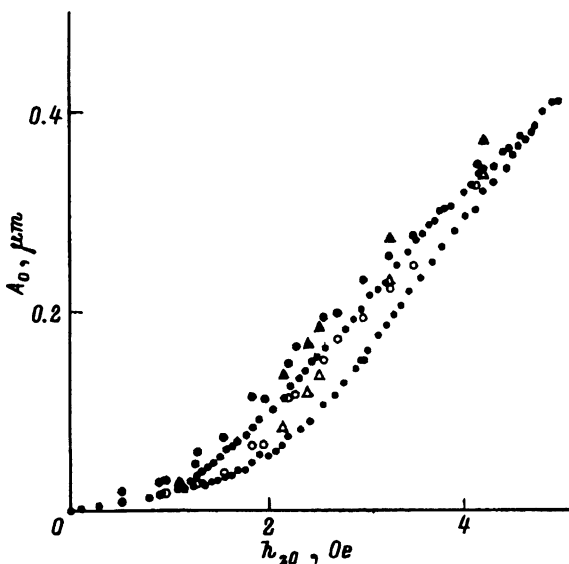


Рис. 6. Значения амплитуды колебаний границ сразу после быстрого (по сравнению с временем релаксации) смещения блоховских линий вдоль стенок полем H_x (1) и установившиеся через $t = 200$ с в процессе релаксации (2).

Показаны также начальные (3) и конечные (4) значения амплитуды колебаний при быстром смещении границы в нестабилизированное положение полем H_x (ср. с рис. 5) и кривая намагничивания $A_0(h_{z0})$ (5), приведенная на рис. 1.

неподвижной границе, превращается в две более мелкие, локализованные в крайних положениях границы (местах, где она находится дольше всего) [4]. Таким образом, по мере увеличения амплитуды колебаний происходит постепенное сглаживание, а при уменьшении — образование более глубокого потенциала стабилизации. Очевидно, что наиболее заметные изменения амплитуды колебаний границ и соответственно трансформации потенциала должны происходить, когда граница выходит за пределы исходной ямы. Это и определяет вид экспериментальной зависимости $A_0(h_{z0})$. В свою очередь наблюдаемая релаксация A_0 при $h_{z0} > 1.5$ Ое отвечает рассасыванию стабилизирующего потенциала.

В зависимости от соотношения параметра вязкого затухания α и константы наведенной анизотропии K (характеризующей последствие) вид кривой $A_0(h_{z0})$ должен быть различным [2,12]. Для нашего случая при $\alpha = 0.1$ численной подгонкой экспериментальной кривой $A_0(h_{z0})$ по параметру последствия на основе расчета [12] удалось получить его величину в образце: $K = 30 \text{ erg/cm}^3$.

Описанный сценарий колебаний доменных границ в диффузионном потенциале является общепринятым и давно используется для описания эффектов последствия. Однако роль блоховских линий в этом явлении ранее не обсуждалась. Приведенные выше результаты показывают, что эта роль может быть весьма существенной. При этом основное влияние линий на потенциал стабилизации для границы, очевидно, связано с переполаризацией сегментов доменных границ при смещениях блоховских линий. В предположении об электронном механизме последствия (на определяющую роль которого указывает

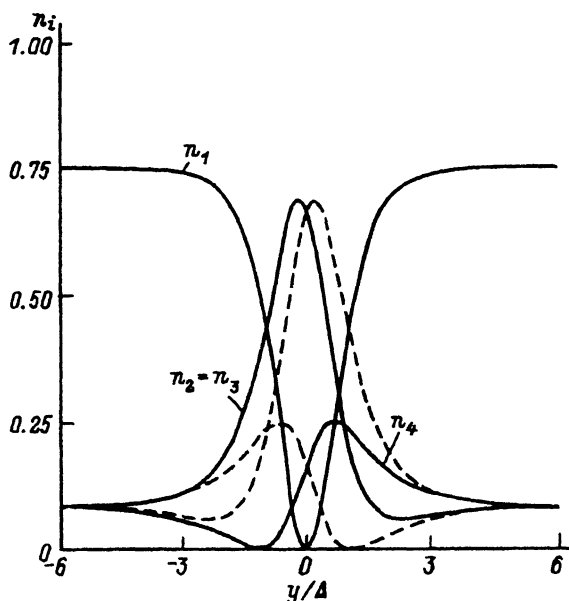


Рис. 7. Относительные равновесные заселенности четырех неэквивалентных позиций в направлениях типа $\langle 111 \rangle$ в зависимости от расстояния от центра границы для двух возможных поляризаций доменной стенки (сплошные и штриховые линии соответственно).

выявленное влияние света на релаксацию A_0) можно прямо показать зависимость потенциала стабилизации от полярности границы.

В самом деле, ответственные за локальную наведенную анизотропию электроны путем термической активации стремятся перескочить в позиции с тригональной осью, составляющей возможно меньший угол с локальной ориентацией намагниченности. В пленке [111] с осью анизотропии вдоль нормали к ее плоскости электроны в доменах занимают преимущественно позиции с тригональной осью совпадающей с осью z . Напротив, внутри доменных границ электроны стремятся занять позиции, тригональные оси которых близки к плоскости пленки. Пусть нормаль к доменной границе совпадает с осью $[110]$. Тогда в предположении обычной для пленок с большой перпендикулярной анизотропией структуры доменных границ [8] относительные заселенности соответствующих позиций n_i могут быть записаны в виде

$$n_1 = \frac{3}{4} \text{th}^2 y,$$

$$n_2 = n_3 = \frac{2 + \text{sh}^2 y \pm 2\sqrt{2}\text{sh} y}{12\text{ch}^2 y},$$

$$n_4 = \frac{8 + \text{sh}^2 y \mp 2\sqrt{2}\text{sh} y}{12\text{ch}^2 y},$$

где верхний и нижний знаки соответствуют доменной границе противоположной поляризацией, а y — нормированное на ширину стенки расстояние от центра доменной границы по нормали к ее плоскости.

Соответствующие изменения n_i по ширине доменных границ для двух разных поляризаций показаны на рис. 7. Заселенности n_1 совпадают для обеих поляризаций. Заселенности же n_2, n_3, n_4 становятся неравновесными при изменении поляризации доменной границы путем смещения блоховских линий. При этом наведенный стенкой потенциал перестает быть стабилизирующим и амплитуда колебаний границ в начальный момент увеличивается. По мере изменения заселенности во времени потенциал вновь становится стабилизирующим и амплитуда колебаний уменьшается. Отметим, что этот эффект объясняет наблюдавшееся в [9] уменьшение коэрцитивности для движения доменной границы в поле h_z под действием подмагничивающего переменного поля в плоскости пленки.

При большой плотности блоховских линий в доменной границе на ее динамику могут оказывать влияние индуцированные блоховскими линиями собственные стабилизирующие потенциалы [12].

Таким образом, в настоящей работе экспериментально определены параметры стабилизирующего потенциала для доменных границ в одноосной пленке феррита-граната и показано, что существенное влияние на его изменение может оказывать движение блоховских линий.

Список литературы

- [1] Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. Т. 2. М.: Мир. 1976. 504 с.
- [2] Janak J.F. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 4. P. 1119–1120.
- [3] Власов Н.М., Лобов Б.Я. // ФММ. 1974. Т. 37. № 3. С. 455–460.

- [4] Hanus K. // Czech J. Phys. 1987. V. B37. N 1. P. 47-54.
- [5] Кащеев В.Н. // Изв. АН Латвии. Сер. физ. и техн. наук. 1985. № 2. С. 20-28.
- [6] Berkov D.V. // J. Magn. and Magn. Mat. 1992. V 111. N 3. P. 327-329.
- [7] Иванов Б.А. и др. // ЖЭТФ. 1992. Т. 101. № 6. С. 1894-1907.
- [8] Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982. 382 с.
- [9] Успенская Л.С., Власко-Власов В.К. // ЖЭТФ. 1992. Т. 101. № 3. С. 944-956.
- [10] Власко-Власов В.К., Хапиков А.Ф. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 7. С. 91-99.
- [11] Neel M.L. // J. Phys. Rad. 1952. V. 13. N 2. P. 249-253.
- [12] Хапиков А.Ф. // ФТТ. 1994. Т. 36. № 7. С. 0000-0000.

Институт физики твердого тела РАН
Черноголовка
Московская область

Поступило в Редакцию
16 декабря 1993 г.