

Структура доменных границ при спин-переориентационном фазовом переходе в феррит-гранатовой пленке со слабой осевой анизотропией

Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, А.В. Безус

Донецкий национальный университет, ул. Университетская, 24, г. Донецк, 83001, Украина

E-mail: uam@mail.donbass.com

Статья поступила в редакцию 31 марта 2010 г.

Экспериментально изучены особенности равновесной доменной структуры феррит-гранатовой пленки со слабой одноосной анизотропией в температурном интервале 90–450 К. Обнаружено два вида спин-переориентационных фазовых переходов, происходящих по разные стороны от температуры магнитной компенсации. Исследовано изменение структуры доменных границ при фазовых переходах. Предложены соответствующие эксперименту модели доменной структуры.

Експериментально вивчено особливості рівноважної доменної структури ферит-гранатової плівки зі слабкою одновісною анізотропією у температурному інтервалі 90–450 К. Виявлено два види спінь-переорієнтаційних фазових переходів, які відбуваються по різні боки від температури магнітної компенсації. Досліджено зміну структури доменних меж при фазових переходах. Запропоновано відповідні експерименту моделі доменної структури.

PACS: 75.30.Gw Магнитная анизотропия;
75.60.Ch Доменные стенки;
75.70.Kw Доменная структура.

Ключевые слова: доменная структура, спин-переориентационный фазовый переход, доменная граница.

1. Введение

Феррит-гранатовые пленки обладают смешанной анизотропией: наряду с кристаллографической кубической K_1 существует наведенная в процессе роста одноосная анизотропия K_U . Отношение констант одноосной и кубической анизотропии и намагничённость насыщения зависят от температуры: $K_U/K_1(T)$ и $M(T)$. Доменная структура (ДС) очень чувствительна к изменению магнитных характеристик пленки. В зависимости от соотношения констант анизотропии в пленке могут реализовываться различные виды ДС [1]. Особый интерес вызывает поведение ДС вблизи критической температуры, где равны магнитные моменты подрешеток (точка магнитной компенсации T_{comp}) или резко изменяется вид анизотропии (температура спиновой переориентации). По поведению ДС при изменении температуры или магнитного поля можно определить механизм спин-переориентационного фазового перехода (СПФП).

В работах [1–5] нами изучены особенности СПФП в пленках с разной величиной одноосной анизотропии и показано, что спин-переориентационным фазовым пе-

реходам в исследуемых пленках соответствуют разные механизмы поворота вектора намагничённости. В пленке с сильной одноосной анизотропией обнаружен безгистерезисный СПФП первого рода из осевой фазы в угловую фазу. Интервал сосуществования двух фаз 25 К. Зародышем новой фазы является доменная граница (ДГ) исходной фазы. Между осевой и угловой фазами граница не наблюдается. В пленке с малой одноосной анизотропией происходит СПФП второго рода без зародышеобразования из одной угловой фазы в другую путем скачкообразного поворота вектора намагничённости всего домена в энергетически более выгодное состояние. В работах [6,7] проведен теоретический расчет энергии ДГ нескольких типов с разными углами поворота вектора намагничённости и определены ориентации ДГ, удовлетворяющие минимуму энергии.

Настоящая работа — продолжение этих исследований. В работе поставлена задача определить особенности равновесной ДС при изменении температуры в пленке со слабой одноосной анизотропией и построить соответствующие эксперименту модели доменной структуры.

2. Результаты эксперимента

Исследована пленка состава $(YBi)_3(FeGa)_5O_{12}$, выращенная методом жидкофазной эпитаксии на подложке из гадолиний-галлиевого граната. Ось легкого намагничивания перпендикулярна плоскости пленки и параллельна оси $\langle 111 \rangle$. Толщина пленки 18 мкм, температура Нееля $T_N = 421$ К, точка магнитной компенсации $T_{comp} = 223$ К, при комнатной температуре намагниченность насыщения $4\pi M_S = 0,011$ Тл, характеристическая длина $\ell = 3,11$ мкм и поверхностная плотность энергии ДГ $\sigma = 0,31 \cdot 10^{-7}$ Дж/м². Исследования проводились на магнитооптической установке, в которой предусмотрено изменение температуры в интервале 90–450 К. Точность определения температуры 1,0 К, стабилизация температуры 0,5 К. На пленку можно действовать магнитными полями, перпендикулярными ее поверхности, т.е. вдоль кристаллографического направления пленки $\langle 111 \rangle$: монополярным импульсным полем (H_{imp}) и полем смещения (H_{displ}) двух направлений. ДС наблюдалась с помощью магнитооптического эффекта Фарадея с идентификацией фаз по методу цветового контраста. Исследования проводились на равновесной доменной структуре, которая создавалась импульсным полем при каждой температуре. В качестве критерия равновесности приняты следующие требования: ДС сохраняется после выключения импульсного поля неограниченно долго при температуре формирования; ДС можно вновь создать с теми же параметрами.

На рис. 1 представлены температурные зависимости поля коллапса и периода доменной структуры пленки. В интервале температур $T_1 - T_2$ (рис. 1) импульсным полем формируется решетка цилиндрических магнитных доменов (ЦМД): темно-зеленые ЦМД на оранжевом поле (рис. 2,а). Возможность формирования ЦМД импульсным полем указывает на наличие осевой фазы при высоких температурах. При T_2 изменяется цвет решетки ЦМД: формируются зеленые домены на желтом фоне. Доменная граница узкая, темная. Изменение цвета указывает на изменение ориентации вектора на-

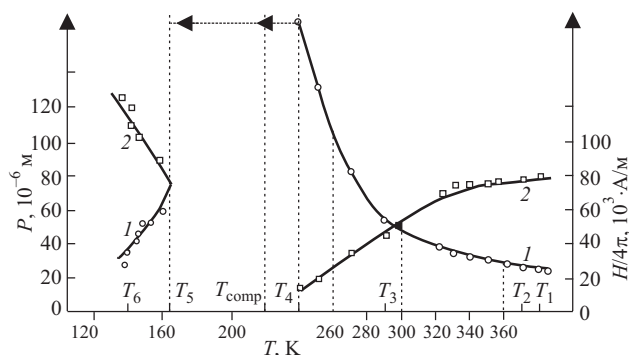


Рис. 1. Температурные зависимости параметров пленки: период ДС (1), поле коллапса (2).

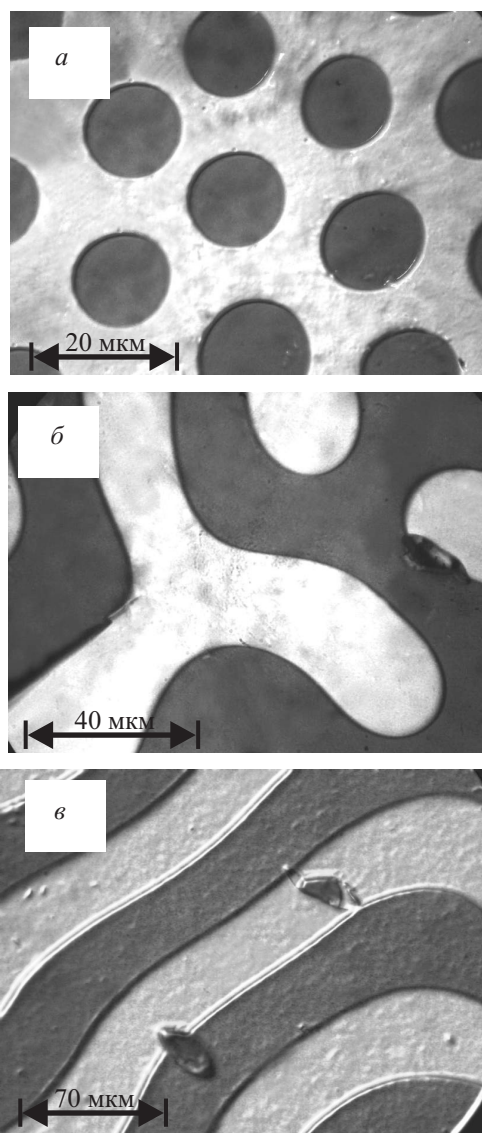


Рис. 2. Виды ДС пленки при изменении температуры: решетка ЦМД при 370 (а); 300 (б); 260 (в) К.

магниченности, т.е. появляется угловая фаза. Таким образом, происходит спин-переориентационный фазовый переход из осевой фазы в угловую фазу. При дальнейшем понижении температуры ЦМД не формируются. Сформированная ранее решетка при понижении температуры деформируется.

В интервале температур $T_2 - T_3$ создаются желтые и зеленые домены с отростками, направленными вдоль трех проекций оси $\langle 111 \rangle$ на плоскость пленки (рис. 2,б). С понижением температуры форма доменов изменяется, отростки исчезают. Вблизи T_4 наблюдается два вида доменных границ: узкая и широкая (рис. 2,в). Рельеф этой ДС четко виден на рис. 3, полученном после компьютерной обработки. При T_4 исчезают желтые домены и появляется монодоменность зеленого цвета, которая сохраняется в интервале температур $T_4 - T_{comp}$. Цвет монодоменности скачком изменяется с зеленого на желтый при T_{comp} . Это можно

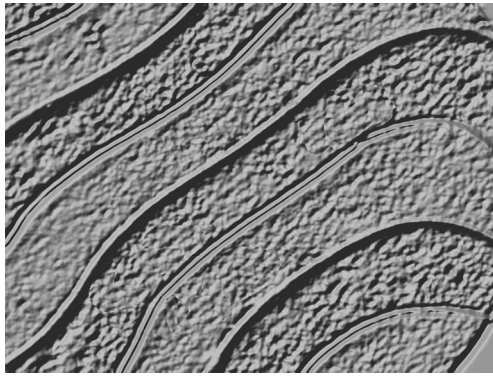


Рис. 3. Доменная структура при 260 К (компьютерная обработка).

объяснить тем, что достигнута температура магнитной компенсации T_{comp} , вследствие чего при $T \leq T_{comp}$ знак магнитного момента изменился. Монодоменность желтого цвета наблюдается до T_5 , а затем на желтом фоне появляются зеленые домены с четкой коричневой ДГ. С понижением температуры период зеленых доменов уменьшается, а величина поля коллапса растет (рис. 1). При T_6 резко изменяется ширина коричневой ДГ, а вместо зеленых доменов наблюдаются желтые домены (скачком произошло изменение цвета доменов), т.е. произошел СПФП из одной угловой фазы в другую угловую фазу. Теперь с понижением температуры уменьшается период желтых доменов.

Обобщим экспериментальные результаты, полученные при охлаждении пленки. В области высоких температур имеется осевая фаза. При T_2 происходит спин-переориентационный фазовый переход из осевой фазы в угловую. В узком интервале температур, близком к точке магнитной компенсации, наблюдаются два вида границ. Вблизи T_{comp} пленка находится в монодоменном состоянии. При удалении от точки компенсации (охлаждение пленки, температура T_6) происходит спин-переориентационный фазовый переход из одной угловой фазы в другую угловую фазу.

3. Модели доменной структуры

Для объяснения экспериментальных результатов нами предложены модели доменных структур.

При охлаждении пленки в интервале $T_1 - T_2$ (рис. 1) наблюдались две осевые фазы Φ_1^{axis} (оранжевая) и $\bar{\Phi}_1^{axis}$ (темно-зеленая), разделенные тонкой 180-градусной ДГ, плоскость которой параллельна оси $\langle 111 \rangle$ (рис. 4,а, табл. 1). В этом интервале температур импульсным полем формируется решетка ЦМД (рис. 2,а). При T_2 под влиянием кубической анизотропии вектор намагниченности \mathbf{M}_S отклоняется от $\langle 111 \rangle$ в одно из трех равновесных положений, соответствующих кубической симметрии, т.е. происходит СПФП от осевых фаз к угловым фазам Φ_1 (желтой) и $\bar{\Phi}_1$ (зеленой). При этом происходит изменение структуры и вида ДГ, т.е. в доменной границе происходит

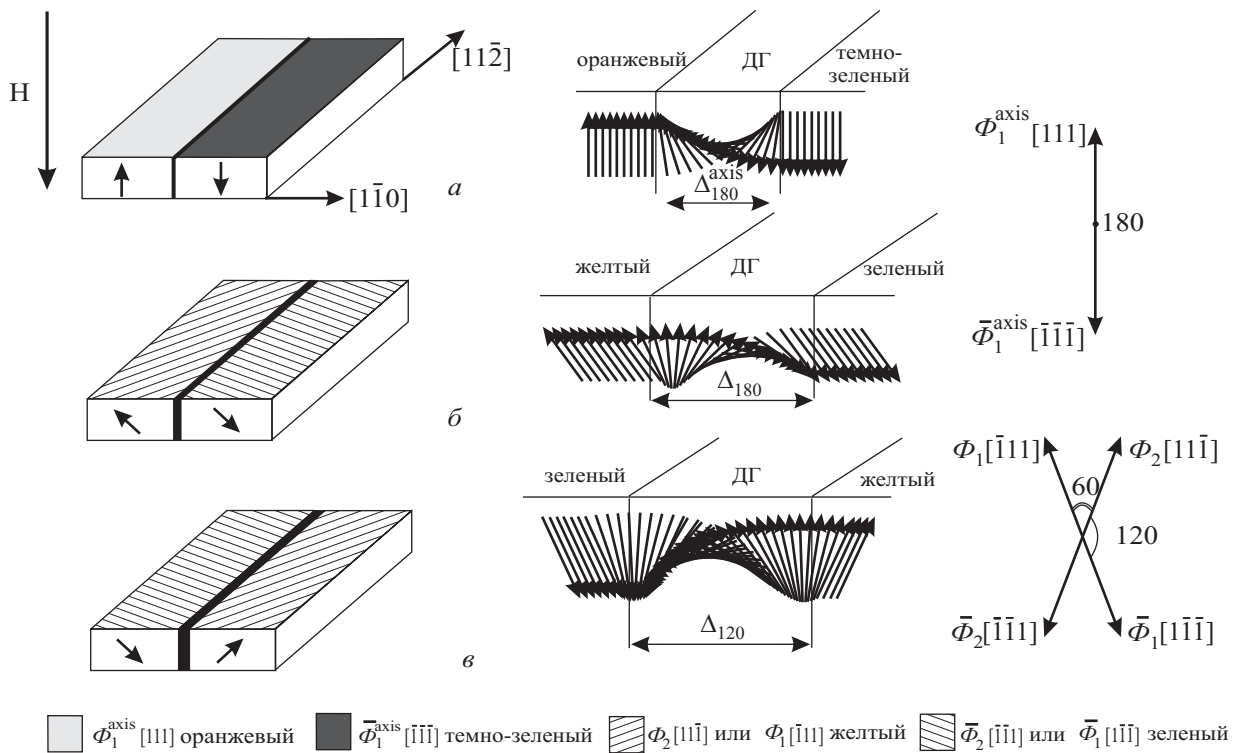


Рис. 4. Модели ДС и распределение намагниченности в доменной стенке: 180° осевая (а), 180° угловая (б), 120° (в); Δ — ширина ДГ.

Таблица 1. Фазовые переходы в равновесной доменной структуре в интервале температур 400–120 К

Температура	Существующие фазы	Схематическое изображение	Угол между фазами, град.	Описание границ и фаз
$T_1 - T_2$	$\Phi_1^{\text{axis}} \langle 111 \rangle$ и $\bar{\Phi}_1^{\text{axis}} \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$		180	Тонкие блоховские ДГ Φ_1^{axis} — оранжевая $\bar{\Phi}_1^{\text{axis}}$ — темно-зеленая
T_2	$\Phi_1^{\text{axis}} \langle 111 \rangle \rightarrow \Phi_1 \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$ $\bar{\Phi}_1^{\text{axis}} \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle \rightarrow \bar{\Phi}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$		180	СПФП Узкая темная ДГ Φ_1 — желтая, $\bar{\Phi}_1$ — зеленая
$T_2 - T_3$	$\Phi_1 \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$ и $\bar{\Phi}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$		180	Узкая темная ДГ Φ_1 — желтая, $\bar{\Phi}_1$ — зеленая
$T_3 - T_4$	$\Phi_1 \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$ и $\bar{\Phi}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$		180	Темная, широкая, скрученная ДГ. Узкая темная ДГ. Φ_1 — желтая, $\bar{\Phi}_1$ — зеленая
$T_4 - T_{\text{comp}}$	$\bar{\Phi}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$		Монодомен	Нет ДГ. $\bar{\Phi}_1$ — зеленая
T_{comp}	$\bar{\Phi}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle \rightarrow \Phi_2 \langle 11\bar{1} \rangle$			
$T_{\text{comp}} - T_5$	$\Phi_2 \langle 11\bar{1} \rangle$		Монодомен	Нет ДГ. Φ_2 — желтая
$T_5 - T_6$	$\Phi_2 \langle 11\bar{1} \rangle$ и $\bar{\Phi}_2 \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$		180	Темная, широкая, скрученная ДГ. Φ_2 — желтая, $\bar{\Phi}_2$ — зеленая
T_6	$\Phi_2 \langle 11\bar{1} \rangle \rightarrow \bar{\Phi}_2 \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$ $\bar{\Phi}_2 \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle \rightarrow \Phi_1 \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$			СПФП
$T < T_6$	$\bar{\Phi}_2 \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$ и $\Phi_1 \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$		120	Широкая ДГ коричневого цвета. Φ_1 — желтая, $\bar{\Phi}_2$ — зеленая

фазовый переход (табл. 1, рис. 4,б). Доменная граница в этом случае остается 180-градусной, но плоскость ее направлена под углом к оси $\langle 111 \rangle$. Ширина такой ДГ Δ_{180} значительно больше ширины 180-градусной границы $\Delta_{180}^{\text{axis}}$, плоскость которой параллельна оси легкого намагничивания. Особенностью в этом случае является то, что 180-градусный поворот вектора намагниченности совершается в необычно широкой границе (рис. 4,б). Объяснить это можно следующим образом. Равновесному состоянию ферримагнетика соответствует минимум энергии. Согласно [8], энергия ферримагнетика в магнитном поле H может быть представлена в виде суммы

$$W = W_A + W_H + W_M + W_K + W_w, \quad (1)$$

где W_A — энергия обменного взаимодействия между магнитными моментами соседних атомов, W_H — энергия магнетика во внешнем поле, W_M — магнито-статическая энергия полей рассеяния, W_K — энергия магнитной анизотропии и W_w — энергия доменных

стенок. При высокой температуре образец имеет слабую осевую анизотропию, которая уменьшается при понижении температуры. Обменная энергия границ обратно пропорциональна ее толщине [9]. Толщина переходного слоя и его энергия для 180-градусной ДГ определяются равновесием между силами обмена и силами анизотропии: первые стремятся увеличить толщину слоя, а вторые — уменьшить ее. Следовательно, уширение 180-градусной ДГ связано с ростом влияния сил обменного взаимодействия.

Блоховские границы выгоднее при малой магнито-статической энергии. В тонких пленках величина отношения S/V (S — площадь поверхности, V — объем) для доменов перестает быть пренебрежимо малой, поэтому вклад магнито-статической энергии в блоховской границе возрастает [10]. Согласно [10], поверхностная плотность энергии доменных стенок

$$\sigma_0^B = \frac{\pi \Delta^2}{(\Delta + h)} M_S^2, \quad \sigma_0^N = \frac{\pi h \Delta}{(\Delta + h)} M_S^2, \quad (2)$$

где Δ — ширина ДГ, h — толщина пленки, M_S — намагниченность насыщения. Видно, что при $h < \Delta$ плотность энергии неелевской границы меньше блоховской. При температуре T_2 $h > \Delta$, поэтому неелевская граница не может реализоваться. Плоскость ДГ поворачивается под углом к $\langle 111 \rangle$, но ДГ остается 180-градусной.

В интервале $T_2 - T_3$ пленка имеет псевдоодноосную доменную структуру: на зеленом фоне наблюдаются желтые полосовые домены неправильной формы (фазы Φ_1 и $\bar{\Phi}_1$ соответственно) с отрезками, направленными вдоль трех проекций $\langle 111 \rangle$ на плоскость пленки (рис. 1 и рис. 2,б). Доменная граница остается 180-градусной (табл. 1).

По мере приближения к точке компенсации Δ растет, но не достигает величины h , и поэтому неелевские ДГ не реализуются. В работе [6] показано, что тонкая 180-градусная ДГ обладает наибольшей энергией во всем интервале значений параметра $\nu = K_U/K_1$, характеризующего относительное влияние одноосной (K_U) и кристаллографической кубической (K_1) анизотропии и являющегося функцией температуры. Поэтому существование такой ДГ в интервале температур $T_2 - T_3$ обусловлено воздействием на пленку внешних магнитных полей, как импульсного, так и поля смещения, которое происходит при формировании равновесной ДС. Поля вносили в энергию ДС слагаемое W_H . В роли подмагничивающего поля они обеспечивали образец необходимой энергией для поддержания высокоэнергетичной границы.

В интервале $T_3 - T_4$ (рис. 1) наиболее вероятно существование доменной границы скрученного типа [10]. На рис. 5 представлена структура такой ДГ. Начало координат совпадает с серединой толщины пленки. Тогда вблизи поверхностей пленки будут находиться участки ДГ неелевского типа. По мере приближения к началу координат ДГ преобразуется в границу блоховского типа. Такое строение границ возможно, если учесть, что в окрестности линии пересечения ДГ с поверхностью пленки возникают большие тангенциальные составляющие магнитных полей. Вектор намагниченности в центре ДГ под действием размагничивающего поля, создаваемого магнитными «зарядами», разворачивается на 180 градусов вдоль оси z (рис. 5). Влияние внешнего поля на структуру ДГ зависит от его направления. Если компонента размагничивающего поля H_y направлена параллельно M_S в центре пластины, то при увеличении H_y структура ДГ стремится к блоховской. При антипараллельной ориентации поле H_y еще более закручивает спины на поверхности пластинки. Согласно [11], намагниченность в ДГ стремится ориентироваться вблизи поверхности пленки перпендикулярно плоскости границы, т.е. вдоль большого тангенциального поля. При этом возникают два участка неелевских границ с противоположным направлением вращения M_S в них.

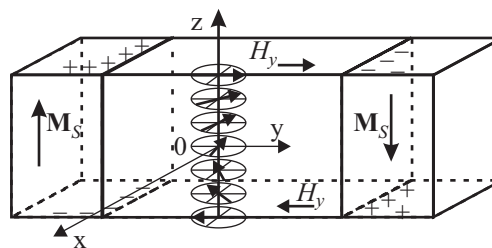


Рис. 5. Схематическое изображение модели скрученной ДГ, реализующейся в магнитоодносных пластинах [10].

В глубине пленки тангенциальная составляющая магнитного поля ослабевает, поэтому границе энергетически невыгодно иметь неелевскую структуру. В середине пленки размагничивающее поле равно нулю, и граница приобретает блоховскую структуру. На остальных участках граница имеет промежуточную структуру между неелевской и блоховской.

Предположение о существовании скрученной ДГ в интервале температур $T_3 - T_4$ согласуется с экспериментальным наблюдением. Было обнаружено, что при действии на ДС небольшого внешнего поля между фазами Φ_1 и $\bar{\Phi}_1$ через период домена исчезает широкая ДГ, а вместо нее появляется узкая темная 180-градусная ДГ (рис. 2,в и рис. 3). Как было сказано, структура ДГ зависит от направления внешнего поля. В нашем случае направления поля смещения и вектора намагниченности фазы $\bar{\Phi}_1$ (зеленая) близки, поэтому под влиянием поля граница становится узкой блоховской, а не скрученной. Узкая 180-градусная ДГ наблюдается в очень малом температурном интервале.

С понижением температуры площадь доменов желтого цвета уменьшается (фаза Φ_1 невыгодна), ширина ДГ увеличивается. Увеличение ширины ДГ объясняется тем, что с понижением температуры уменьшается энергия анизотропии W_K (1), а следовательно, возрастает влияние сил обменного взаимодействия, стремящихся расширить границу. Вблизи T_4 ДГ становятся широкими, практически неелевского типа (ширина границы уже близка к толщине пленки: $\Delta \approx h$).

При температуре T_4 исчезает фаза Φ_1 (желтая) и появляется монодоменность зеленого цвета — фаза $\bar{\Phi}_1$, которая наблюдается до точки магнитной компенсации (табл. 1). При T_{comp} цвет монодоменности скачком изменяется с зеленого на желтый, т.е. происходит смена фазы $\bar{\Phi}_1$ на фазу Φ_2 . Фаза Φ_2 существует до температуры T_5 , при которой появляются домены фазы Φ_2 (зеленые) с широкими 180-градусными ДГ. Появление доменов обратной намагниченности свидетельствует о том, что происходит рост магнитостатической энергии пленки W_M , основной вклад в которую дает намагниченность одной из железных подрешеток. Чтобы уменьшить эту энергию, образец вновь разбивается на домены, разделенные 180-градусной скрученной ДГ.

При дальнейшем понижении температуры наблюдается уменьшение периода доменной структуры (рис. 1), в результате чего увеличивается энергия и число доменных границ. Ширина ДГ уменьшается, что и наблюдается экспериментально. При температуре T_6 происходит спин-переориентационный фазовый переход, сопровождающийся сменой фаз и изменением доменных границ. Фаза Φ_2 переходит в фазу $\bar{\Phi}_2$, затем $\bar{\Phi}_2$ переходит в фазу Φ_1 (табл. 1). Таким образом, после СПФП наблюдаются две доменные фазы: Φ_2 (зеленая) и Φ_1 (желтая), разделенные широкой темно-коричневой ДГ. Под действием поля смещения теперь коллапсируют желтые домены. В доменной границе происходит фазовый переход, 180-градусная скрученная доменная граница превращается в 120-градусную ДГ, ширина которой больше ширины 180-градусной ДГ. Как показано в [6], такое преобразование структуры доменной границы энергетически выгодно. Образование 120-градусной доменной границы схематически изображено на рис. 6 поворотом вектора намагниченности от одного домена фазы Φ_1 (желтая) к другому домену фазы $\bar{\Phi}_2$ (зеленая). Вращение вектора \mathbf{M}_S по

боковой поверхности большого конуса, пересекающего плоскость пленки, отмечено пунктиром. Плоскость ДГ направлена под углом к оси $\langle 111 \rangle$. На вставке рис. 6 показано изменение ориентации вектора намагниченности внутри 120-градусной ДГ.

4. Заключение

Проведенные исследования доменной структуры в феррит-гранатовой пленке со смешанной анизотропией показывают, что существует прямая связь между магнитными параметрами пленки и особенностями ДС. В связи с изменением соотношения констант анизотропии изменяется структура доменных границ и вид ДС, происходят спин-переориентационные фазовые переходы и фазовые переходы в ДГ. В исследуемой пленке наблюдаются два СПФП, которые происходят по обе стороны от точки компенсации (см. табл. 1). В области высоких температур ($T_2 > T_1$) существует осевая анизотропия, поэтому возможно формирование ЦМД и решетки ЦМД. При температуре T_2 соотношение констант анизотропии достигает такой величины [6], при которой появляется угловая фаза и происходит СПФП из осевой фазы в угловую. При этом происходит фазовый переход в доменной границе. Доменная граница переходит из 180-градусной блоховской в более широкую 180-градусную скрученную ДГ. В области низких температур (T_6 , рис. 1) происходит спин-переориентационный фазовый переход из одной угловой фазы в другую угловую фазу. В ДГ происходит фазовый переход из 180-градусной скрученной границы в 120-градусную ДГ.

Из приведенных результатов видно, что существует и обратная связь: по поведению ДС можно определить изменение магнитного состояния пленки и механизм перехода из одного состояния в другое. Таким образом, благодаря оптической прозрачности феррит-гранатовые пленки являются прекрасным модельным объектом для изучения магнитных состояний магнетиков и фазовых переходов в них.

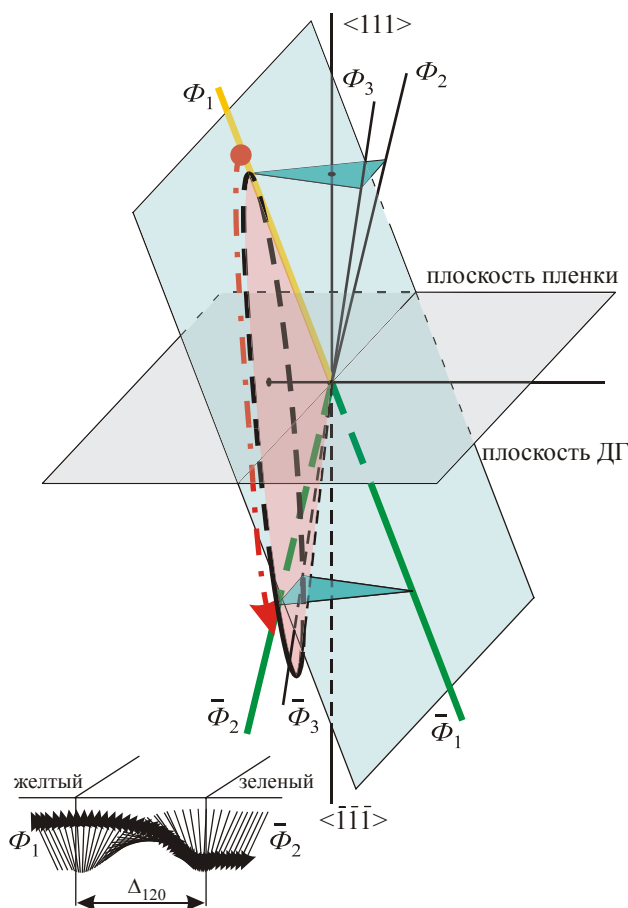


Рис. 6. Поворот вектора намагниченности при переходе от одного домена к другому и реализующаяся при этом 120° ДГ между доменами зеленой и желтой фаз.

1. А.В. Безус, А.А. Леонов, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, *ФТТ* **46**, 277 (2004).
2. Ю.А. Сирюк, Ю.О. Мамалуй, *Фізика і хімія твердого тіла* **7**, 650 (2006).
3. A.V. Bezus, Ju.A. Mamalui, and Ju.A. Siryuk, *Functional Materials* **15**, 218 (2008).
4. Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, *Труды 11 Международного симпозиума «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ODPO-11, 16–21 сентября 2008 г.*, Ростов-на-Дону, пос. Лоо, Россия, Т. 2, с. 112 (2008).
5. А.А. Леонов, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, *Известия РАН, серия физическая* **69**, 1011 (2005).
6. Я.И. Грановский, А.А. Леонов, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, *Известия РАН, серия физическая* **70**, 956 (2006).

7. Ja.I. Granovskii, A.A. Leonov, Ju.A. Mamalui, and Ju.A. Siryuk, *Functional Materials* **13**, 526 (2006).
8. В.Г. Барьяхтар, Ю.И. Горобец, *Цилиндрические магнитные домены и их решетки*, Наукова Думка, Киев (1988).
9. Ч. Киттель, *Введение в физику твердого тела*, Физматгиз, Москва (1963).
10. Г.С. Кандаурова, Л.Г. Оноприенко, *Доменная структура магнетиков. Основные вопросы*, Свердловск (1986).
11. А. Малоземов, Дж. Слонзуски, *Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами*, Мир, Москва (1982).

The structure of domain boundary at spin-reorientation phase transition in the ferrite-garnet film with low uniaxial anisotropy

Ju.A. Mamalui, Ju.A. Siryuk, and A.V. Bezus

The peculiarities of an equilibrium domain structure in the ferrite-garnet film with a low uniaxial anisotropy have been experimentally studied in the 90–450 K temperature range. It is found that there are two types of spin-reorientation phase transition that occur on both sides of the magnetic compensation point. The structural changes of domain boundaries at phase transitions are investigated. Domain structure models consistent with the experimental data are proposed.

PACS: 75.30.Gw Magnetic anisotropy;
75.60.Ch Domain boundaries;
75.70.Kw Domain structure.

Keywords: domain structure, spin-reorientation phase transition, domain boundary.