

PACS: 75.70.Kw, 75.70.-i, 77.80.Bh

Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, А.В. Безус

ОСОБЕННОСТИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ СПИН-ПЕРЕОРИЕНТАЦИОННОМ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ В ПЛЕНКЕ СО СЛАБОЙ ОДНООСНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Донецкий национальный университет
ул. Университетская, 24, г. Донецк, 83001, Украина
E-mail: postmaster@univ.donetsk.ua

Изучен механизм спин-переориентационного фазового перехода (СПФП). Исследовано изменение структуры доменных границ при ФП. Предложены соответствующие эксперименту модели доменной структуры (ДС). Показано, что в связи с температурным изменением соотношения констант анизотропии изменяются структура доменных границ и вид ДС, происходят СПФП и ФП в доменных границах.

Ключевые слова: феррит-гранатовая пленка, доменная структура, спин-переориентационный фазовый переход, доменная граница, анизотропия

1. Введение

Феррит-гранатовые пленки обладают смешанной анизотропией: наряду с кристаллографической кубической K_1 существует одноосная ростовая K_u анизотропия. Ось одноосной ростовой анизотропии $\langle 111 \rangle$ ориентирована перпендикулярно плоскости пленки. Три оси кристаллографической анизотропии типа $\langle 111 \rangle$ ориентированы под углом к плоскости пленки. Отношение констант одноосной и кубической анизотропии и намагниченность насыщения зависят от температуры: $K_u/K_1(T)$ и $M_s(T)$. При температуре магнитной компенсации T_K и температуре Нееля T_N $M = 0$. Влияние смешанной анизотропии на поведение ДС изучено еще недостаточно. ДС очень чувствительна к изменению магнитных характеристик пленок и отражает все изменения анизотропии и намагниченности. Поэтому поведение ДС вблизи критической температуры, где равны магнитные моменты подрешеток (T_K) или изменяется анизотропия (температура спиновой переориентации), вызывает особый интерес исследователей. Благодаря оптической прозрачности эпитаксиальных пленок ДС можно визуально наблюдать с помощью эффекта Фарадея, а при спиновой переориентации применять метод цветовой регистрации. Поэтому пленки

ферритов-гранатов могут служить модельным объектом для изучения ФП и СПФП.

Как для фундаментальной, так и для прикладной науки очень важно знать, что происходит с ДС при изменении анизотропии, как изменяется доменная граница. Это актуальные исследования. Во-первых, СПФП можно использовать при термомагнитной записи в точке спиновой переориентации [1]. Во-вторых, вблизи СПФП многие физические величины (теплоемкость, магнитная восприимчивость, модуль Юнга, коэффициент затухания и т.д.) испытывают аномалии [2]. Поэтому такой магнитный материал может ограничивать диапазон работы технического устройства. Цель данной работы – изучить механизм СПФП.

2. Экспериментальные результаты

Исследования проведены на пленке состава $(\text{YBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$. Пленка выращена методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний-галлиевой подложке; развитая поверхность $\langle 111 \rangle$, $T_N = 421$ К, $T_K = 223$ К, намагниченность насыщения при комнатной температуре $4\pi M_s = 11 \cdot 10^{-3}$ Т. ДС наблюдали с помощью эффекта Фарадея на магнитооптической установке. Спиновую переориентацию определяли методом цветовой регистрации. На рис. 1 представлены температурные зависимости поля коллапса и периода ДС пленки.

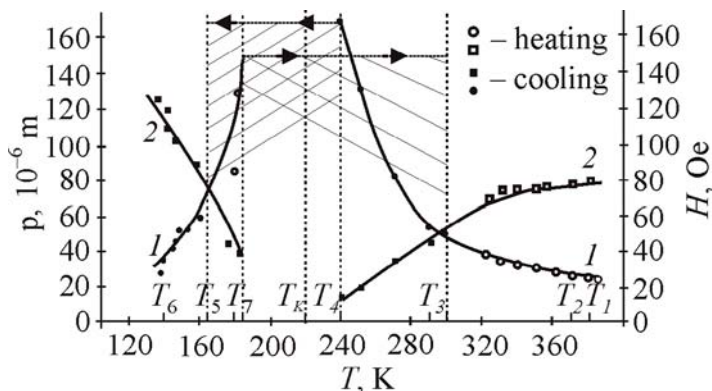


Рис. 1. Температурные зависимости характеристик пленки $(\text{YBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$: 1 – поле коллапса H_c ; 2 – период ДС p

Если ДС сформировать импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки (т.е. параллельным кристаллографической оси $\langle 111 \rangle$), а затем выключить поле, то такая ДС является равновесной при температуре формирования [3]. Ей соответствует минимум энергии, она сохраняется неограниченное время при сохранении условий формирования. Если же изменить температуру пленки, то в исследуемом температурном интервале эта ДС является неравновесной [4,5]. В данной работе СПФП наблюдали на неравновесной ДС, т.е. без действия магнитного поля. Исследование неравновесной ДС позволяет непосредственно «увидеть» механизм СПФП, т.к. спиновая переориентация вызвана од-

ним лишь температурным изменением K_u/K_1 , без дополнительной энергии магнитного поля.

В интервале температур T_1-T_2 (рис. 1) импульсным полем формируется решетка ЦМД (рис. 2,*а*), затем магнитное поле выключается. На оранжевом поле наблюдаются темно-зеленые ЦМД. Формирование ЦМД свидетельствует о наличии в этой области температур осевой фазы. С понижением температуры при T_2 некоторые участки доменной границы расширяются, и от этих участков в обе стороны наблюдается изменение цвета поля (от оранжевого к желтому) и ЦМД (от темно-зеленого к зеленому) (рис. 2,*б*). Происходит СПФП из осевой фазы в угловую.

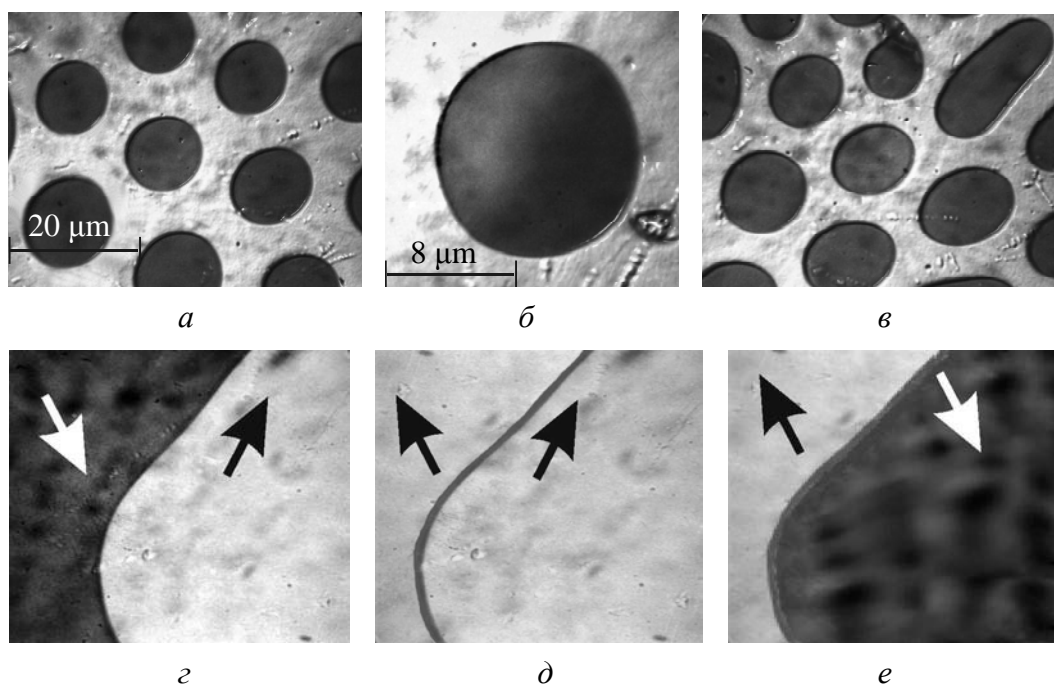


Рис. 2. Виды ДС пленки $(YBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ при изменении T : *а* – решетка ЦМД, 370 К; *б* – ЦМД, 365 К; *в* – ДС, 290 К; *г*, *д*, *е* – стрелками показана проекция намагниченности внутри домена на плоскость пленки соответственно при 173, 176 и 178 К

Зародышем СПФП является доменная граница. Тот участок круглой доменной границы ЦМД, ширина которого увеличилась, является зародышем угловой фазы. В самой доменной границе произошел ФП, который и вызвал СПФП. Эти два фазовых перехода взаимосвязаны, они происходят одновременно: ФП в доменной границе и, как следствие, – СПФП.

Существование одноосной и угловой фаз наблюдается в интервале температур $\Delta T = 15^\circ$. Следует особо подчеркнуть, что визуально граница между одноосной и угловой фазами не наблюдается. С понижением температуры, по мере приближения к T_K , доменная структура оказывается неустойчивой. Некоторые ЦМД уменьшаются в размере и затем, как ртутные капли, сливаются с большими ЦМД (рис. 2,*в*). Последние тоже

перемещаются, при этом неравномерно изменяется ширина доменных границ. Движение происходит вдоль проекций оси легкого намагничивания на плоскость пленки. В этих направлениях доменная граница оказывается более широкой. Вблизи T_4 ЦМД теряют свою форму и превращаются в полосовые домены.

В области температуры магнитной компенсации, в отличие от равновесной ДС (т.е. при действии магнитных полей), монодоменность не наблюдается, так как образец многодоменный.

Вблизи температуры T_7 (173–178 К) (см. рис. 1) наблюдается интересный цветовой обмен. Изменился цвет доменной границы, резко увеличилась ее ширина. Зеленые домены приобрели желтый цвет окружающего поля, и на сплошном желтом поле видна только широкая коричневая доменная граница. Потом те домены, что раньше были желтыми, приобрели зеленый цвет (рис. 2, *z-e*). Таким образом, вблизи температуры T_7 произошел СПФП, который без действия магнитного поля осуществляется медленно. При нагревании пленки СПФП повторяется при тех же температурах в обратном порядке, т.е. является безгистерезисным и обратимым.

Подведем итоги эксперимента. В результате изучения поведения неравновесной ДС при изменении температуры пленки обнаружены два СПФП, происходящие по обе стороны от T_K . В области высоких (T_1 – T_2) температур (см. рис. 1) существует одноосная фаза, СПФП наблюдается на решетке ЦМД. Вблизи T_2 происходит СПФП из осевой фазы в угловую. Зародышем новой (угловой) фазы является доменная граница исходной (одноосной) фазы. Одновременно в доменной границе наблюдается фазовый переход. Имеется температурный интервал сосуществования одноосной и угловой фаз в 15° . Визуально граница между одноосной и угловой фазами не наблюдается.

В области низких температур T_7 происходит СПФП из одной угловой фазы в другую. Он осуществляется без зародышеобразования, путем поворота вектора намагниченности \mathbf{M}_s всего домена в энергетически более выгодное состояние. Этот СПФП является обратимым и безгистерезисным. Одновременно происходит ФП в доменной границе.

Оба СПФП отличаются своим механизмом, который обусловлен величиной соотношения констант анизотропии K_2/K_1 .

Изучение поведения ДС при изменении температуры пленки позволяет сделать вывод: ФП в доменной границе вызывает СПФП в области как низких, так и высоких температур.

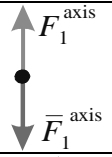
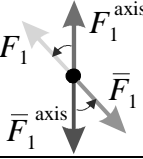
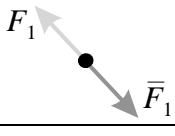
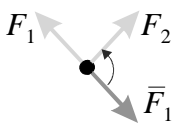
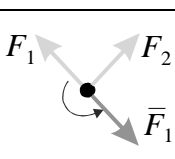
3. Модели неравновесной доменной структуры

Предложены модели ДС, объясняющие экспериментально изученные особенности неравновесной ДС в температурном интервале 400–120 К.

В области высоких (T_1-T_2) температур (см. рис. 1) наблюдаются осевые фазы $F_1^{\text{axis}} \langle 111 \rangle$ и $\bar{F}_1^{\text{axis}} \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$. Доменная граница 180-градусная блоховская (таблица, рис. 3,a).

Таблица

Фазовые состояния и фазовые переходы в неравновесной ДС в интервале температур 450–120 К

Температура	Существующие фазы	Схематическое изображение	Градусность	Описание доменных границ (ДГ)
$T_1 - T_2$	$F_1^{\text{axis}} \langle 111 \rangle$ и $\bar{F}_1^{\text{axis}} \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle$		180	Тонкие блоховские ДГ F_1^{axis} – оранжевая \bar{F}_1^{axis} – темно-зеленая
T_2	$F_1^{\text{axis}} \langle 111 \rangle \rightarrow F_1 \langle \bar{1}11 \rangle$ $\bar{F}_1^{\text{axis}} \langle \bar{1}\bar{1}\bar{1} \rangle \rightarrow \bar{F}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$		180	СПФП Узкая темная ДГ F_1 – желтая \bar{F}_1 – зеленая
$T_2 - T_7$	$F_1 \langle \bar{1}11 \rangle$ и $\bar{F}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$		180	Узкая темная ДГ F_1 – желтая \bar{F}_1 – зеленая
T_7	$F_1 \langle \bar{1}11 \rangle$ $\bar{F}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle \rightarrow F_2 \langle 11\bar{1} \rangle$		60	Очень широкая ДГ коричневого цвета F_1 – желтая F_2 – желтая
$T < T_7$	$F_1 \langle \bar{1}11 \rangle \rightarrow \bar{F}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$ $F_2 \langle 11\bar{1} \rangle$		120	Широкая ДГ коричневого цвета F_2 – желтая \bar{F}_1 – зеленая

При понижении температуры до T_2 уменьшается величина одноосной анизотропии. Под влиянием кубической анизотропии на некоторых участках круглых границ ЦМД изменяется ориентация спинов. Это приводит к изменению ориентации спинов в прилежащих к доменной границе областях, т.е. наблюдается изменение цвета поля (от оранжевого к желтому) и ЦМД (от темно-зеленого к зеленому). Появляются угловые фазы $F_1 \langle \bar{1}11 \rangle$ (желтая) и $F_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$ (зеленая). Таким образом, под влиянием кубической анизотропии происходит ФП в доменной границе, который, в свою очередь, вызывает СПФП из осевой фазы в угловую. В этом случае доменная граница исходной осевой фазы выступает зародышем новой, угловой фазы, т.е. СПФП из осевой фазы в угловую осуществляется путем зародышеобразования. Поскольку поворот спинов вызван только температурным изменением K_u/K_1 , без действия магнитного поля, то переход протекает медленно. Имеется температурный интервал сосуществования осевой и угловой фаз в 15° .

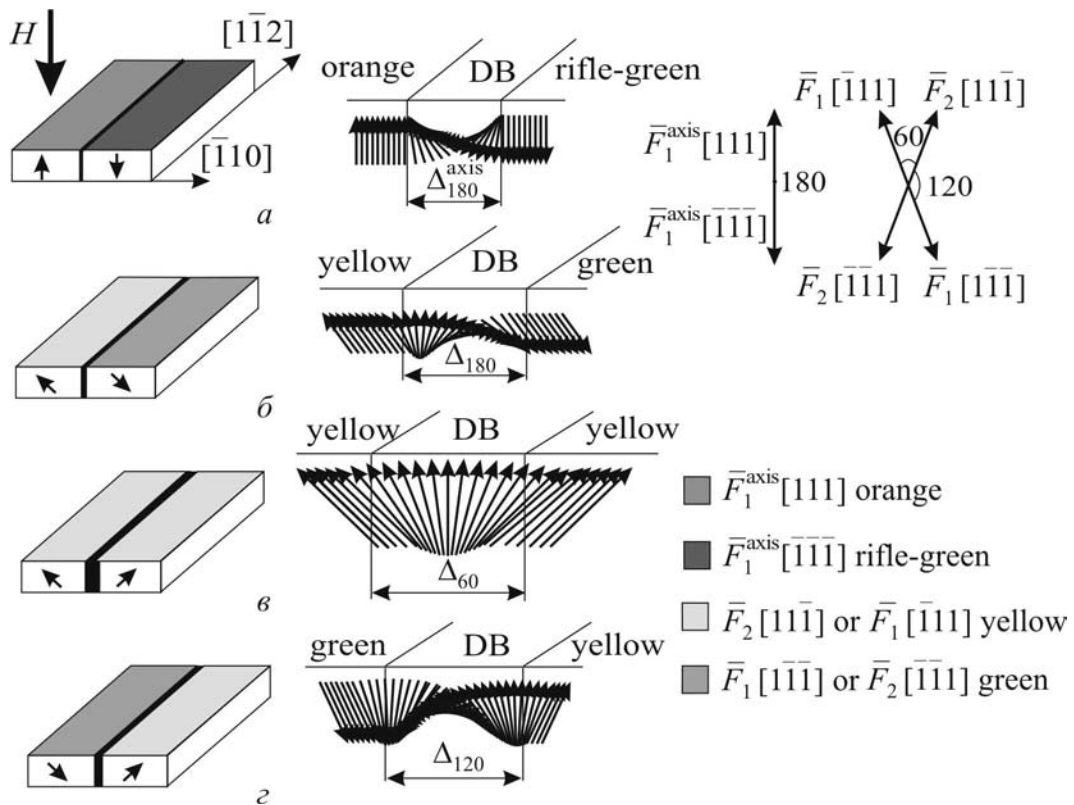


Рис. 3. Модели доменных структур и распределение намагниченности в доменной стенке: *a* – 180-градусная осевая; *б* – 180-градусная угловая; *в* – 60-градусная; *г* – 120-градусная (Δ – ширина доменной границы)

Как показано в работах [6,7], СПФП, происходящий путем зародышеобразования из осевой фазы в угловую, является ФП первого рода.

После ФП доменная граница осталась 180-градусной, но ее плоскость ориентирована под углом к оси $\langle 111 \rangle$. В этом случае разворот спинов на 180° происходит в более широкой доменной границе (рис. 3,б). Такой переход в доменной границе соответствует минимуму ее энергии.

В температурном интервале T_2 – T_7 (см. рис. 1) сохраняются угловые фазы $F_1 \langle \bar{1}11 \rangle$ и $\bar{F}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$ и разделяющая их 180-градусная доменная граница.

При наблюдении неравновесной ДС в области T_K пленка находится в многодоменном состоянии. Для образца с малой осевой анизотропией монодоменное состояние невыгодно, так как это приводит к увеличению размагничивающего поля. Чтобы перевести образец в монодоменное состояние, необходима добавочная энергия подмагничивающего поля (как в равновесной ДС).

В процессе понижения температуры изменяется величина K_u/K_1 , в результате чего изменяется энергия доменной границы и, как следствие, ориентация спинов внутри границы. При T_7 спины разворачиваются на 60° внутри более широкой доменной границы (рис. 3,в). Это приводит к измене-

нию ориентации намагниченности всего домена: угловая фаза $\bar{F}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$ переходит в угловую фазу $F_2 \langle 11\bar{1} \rangle$ (таблица). Теперь имеются две фазы $F_1 \langle \bar{1}11 \rangle$ и $F_2 \langle 11\bar{1} \rangle$, разделенные широкой 60-градусной доменной границей. Визуально наблюдается широкая коричневая доменная граница на желтом поле.

Образование 60-градусной доменной границы схематически изображено на рис. 4 поворотом вектора намагниченности от одного домена фазы $\bar{F}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$ (зеленая) к другому домену фазы $F_2 \langle 11\bar{1} \rangle$ (желтая). Угол между этими фазами отмечен штриховой линией со стрелкой. На вставке рис. 4 показано изменение ориентации вектора намагниченности внутри 60-градусной доменной границы.

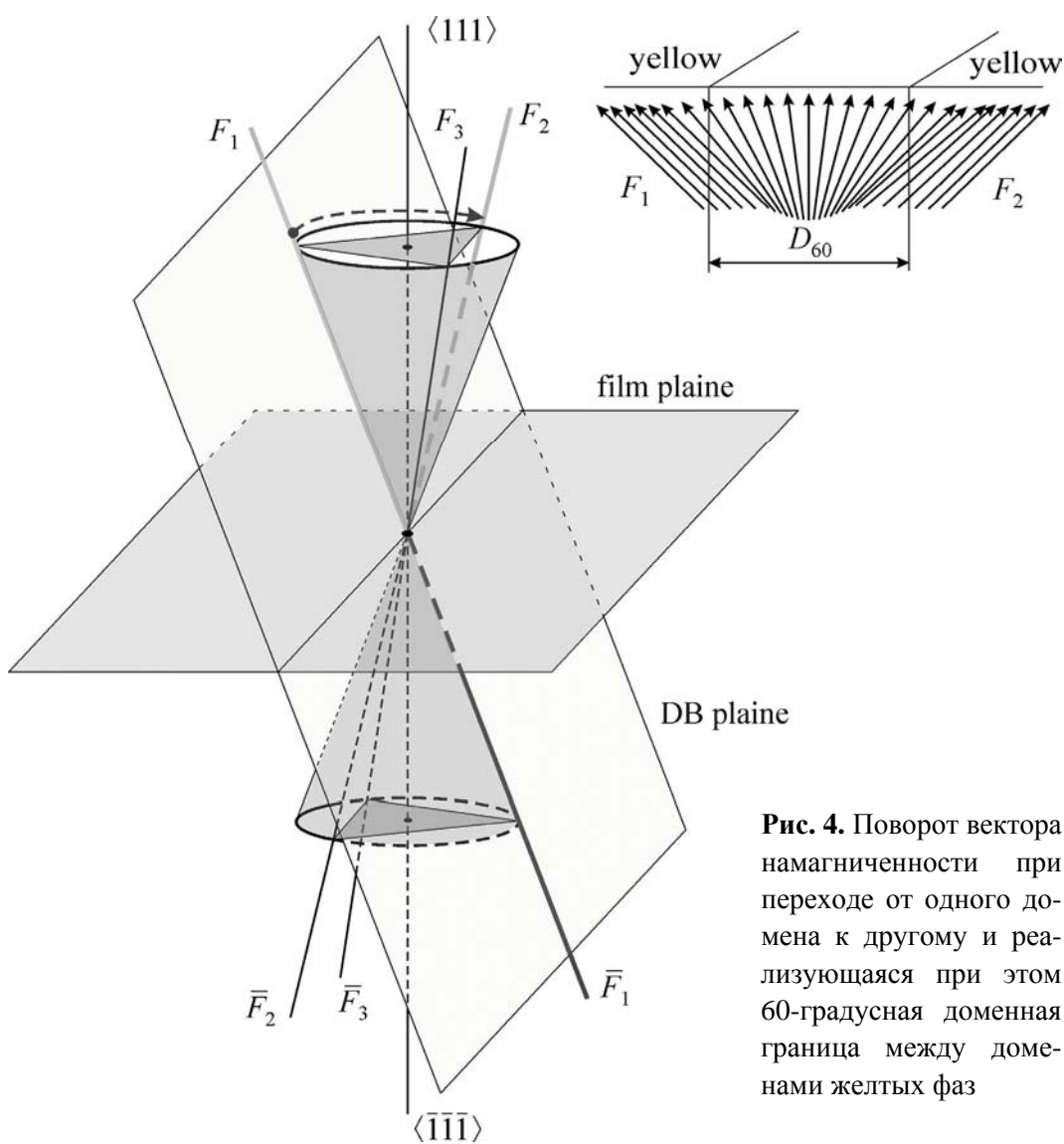


Рис. 4. Поворот вектора намагниченности при переходе от одного домена к другому и реализующаяся при этом 60-градусная доменная граница между доменами желтых фаз

При дальнейшем понижении температуры изменение ориентации спинов внутри доменной границы продолжается, и при $T < T_7$ спины теперь разворачиваются на 120° внутри более узкой доменной границы (рис. 3,з). Это приводит к изменению ориентации вектора намагниченности в другом домене: фаза $F_1 \langle \bar{1}11 \rangle$ заменяется фазой $\bar{F}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$. В результате цветового обмена снова наблюдаются домены желтого (фаза $F_2 \langle 11\bar{1} \rangle$) и зеленого (фаза $\bar{F}_1 \langle 1\bar{1}\bar{1} \rangle$) цвета, разделенные 120° -градусной доменной границей (таблица). Таким образом, в результате температурного изменения анизотропии вблизи температуры T_7 происходит поэтапно фазовый переход в доменной границе из 180° - в 60° -градусную, а затем в 120° -градусную границу. Визуально граница как бы «дышит». Фазовый переход в доменной границе вызывает спин-переориентационный фазовый переход из одной угловой фазы в другую угловую фазу (таблица). Как было показано в работах [8–12], СПФП из одной угловой фазы в другую угловую фазу, наблюдаемый вблизи T_7 на неравновесной ДС (и вблизи T_6 на равновесной) является ФП второго рода.

Выводы

Существуют отличия в поведении равновесной и неравновесной ДС при изменении температуры, которые обусловлены наличием дополнительной энергии магнитного поля, полученной равновесной ДС при ее формировании. Во-первых, при изучении особенностей равновесной ДС вблизи температуры компенсации наблюдается монодоменное состояние. Во-вторых, СПФП происходит при более низкой температуре T_6 и является необратимым [9].

Особенности неравновесной ДС, наблюдаемые при изменении температуры образца, обусловлены только температурным изменением констант анизотропии, поэтому они позволяют определить механизм СПФП и его связь с ФП в доменной границе. Стало очевидным, что доменная граница более чувствительна к изменению $K_u/K_1 = f(T)$, так как в ней существует большой набор спинов разной ориентации. При определенной температуре (т.е. при определенной величине K_u/K_1) соответствующая ориентация спинов в доменной границе оказывается энергетически наиболее выгодной, что и вызывает процесс перестройки в доменной границе, т.е. ФП. Изменение ориентации спинов в доменной границе вызывает изменение фаз в доменах, т.е. СПФП.

1. А.М. Балбашов, А.Я. Червоненкис, Магнитные материалы для микроэлектроники, Энергия, Москва (1979).
2. К.П. Белов, А.К. Звездин, А.М. Кадомцева, Р.З. Левитин, Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках, Наука, Москва (1979).

3. А. с. 1341681 СССР, МКИ⁴ G 11 C 11/14, Способ формирования решетки цилиндрических магнитных доменов в магнитоодноосной пленке, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Г.С. Ярош, Опубл. 30.09.87, Открытия. Изобрет. № 36 (1987), с. 235.
4. В.Г. Барьяхтар, Э.А. Завадский, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, ФТТ **26**, № 8, 2381 (1984).
5. Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Препринт ДонФТИ-86-2(110), Донецк (1986).
6. А.В. Безус, А.А. Леонов, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Труды Международ. симп. «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» ОДРО-2003, сентябрь 2003 г., Сочи (2003), с.182.
7. Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, А.В. Безус, А.А. Леонов, ФТТ **46**, 277 (2004).
8. Ja.I. Granovskii, A.A. Leonov, Ju.A. Mamalui, Ju.A. Siryuk, Abstracts International conference «Functional materials» ICFM-2005, Partenit (2005), p. 37.
9. Я.И. Грановский, А.А. Леонов, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Труды VIII Междунар. симп. «Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах» ОМА-2005, сентябрь 2005 г., Сочи (2005), ч. 1, с. 223.
10. А.А. Леонов, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Изв. РАН. Сер. физ. **69**, 1011 (2005).
11. Я.И. Грановский, А.А. Леонов, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Изв. РАН. Сер. физ. **70**, 956 (2006).
12. Ja.I. Granovskii, A.A. Leonov, Ju.A. Mamalui, Ju.A. Siryuk, Functional Materials **13**, 526 (2006).

Ю.О. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, О.В. Безус

ОСОБЛИВОСТІ НЕРІВНОВАЖНОЇ ДОМЕННОЇ СТРУКТУРИ ПРИ СПІН-ПЕРЕОРІЄНТАЦІЙНОМУ ФАЗОВОМУ ПЕРЕХОДІ У ПЛІВЦІ ЗІ СЛАБКОЮ ОДНОВІСНОЮ АНІЗОТРОПІЄЮ

Вивчено механізм спіну-переорієнтаційного фазового переходу (СПФП). Досліджено зміну структури доменних меж під час фазових переходів (ФП). Запропоновано відповідно до експерименту моделі доменної структури (ДС). Показано, що у зв'язку з температурною зміною співвідношення констант анізотропії змінюються структура доменних меж та вид ДС, відбуваються СПФП та ФП у доменних межах.

Ключові слова: ферит-гранатова плівка, доменна структура, спіну-переорієнтаційний фазовий перехід, доменна межа, анізотропія

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

THE PECULIARITIES OF NONEQUILIBRIUM DOMAIN STRUCTURE AT SPIN-REORIENTATION PHASE TRANSITION IN THE FILM WITH LOW UNIAXIAL ANISOTROPY

The mechanism of spin-reorientation phase transition (SRPT) has been studied. The structure change of domain walls at phase transitions has been investigated. The models of domain structures corresponding to the experiment have been offered. The investigations have shown that the structure of a domain wall and the type of domain structure are

changed as a result of temperature change of anisotropy constant ratio. Thus, the spin-reorientation phase transitions and phase transitions occur in domain walls.

Keywords: ferrite-garnet film, domain structure, spin-reorientation phase transition, domain wall, anisotropy

Fig. 1. The temperature dependences of characteristics of $(\text{YBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ film: 1 – the collapse field H_c , 2 – the period of DS p

Fig. 2. The types of DS in $(\text{YBi})_3(\text{FeCa})_5\text{O}_{12}$ film at the temperature change: a – the bubble lattice, 370 K; b – the bubble, 365 K; c – DS, 290 K; z, ∂, e – arrows mark the projection of magnetization within a domain onto the film plate at 173, 176 and 178 K

Fig. 3. The models of domain structures and magnetization distribution in the domain wall: a – 180° axial; b – 180° angular; c – 60°; z – 120° (Δ – the width of domain boundary)

Fig. 4. The turn of magnetization vector at the transition from one domain to another one and the wall 60 degree realized here between the domains of yellow phases