

РОЛЬ ЗАРОДЫШЕЙ В СПИН-ПЕРЕОРИЕНТАЦИОННОМ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ ПЕРВОГО РОДА

Ю. А. Мамалуй, Ю. А. Сирюк, А. В. Безус

Изучен механизм спин-переориентационного фазового перехода (СПФП). Исследовано изменение структуры доменных границ при фазовом переходе. Предложены соответствующие эксперименту модели доменной структуры (ДС). Показано, что фазовый переход путем зародышеобразования в доменной границе вызывает СПФП I рода из осевой фазы в угловую фазу. Механизм СПФП не зависит от величины соотношения между константами анизотропии.

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

Введение. В настоящее время спин-переориентационные фазовые переходы (СПФП) хорошо изучены только в кубических феррогранатах. В отличие от кубических феррогранатов феррит-гранатовые пленки обладают смешанной анизотропией: наряду с кристаллографической кубической (K_1) существует одноосная ростовая анизотропия (K_u). Ось ростовой одноосной 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_C и температуре Нееля T_N намагниченность насыщения равна нулю. Влияние смешанной анизотропии на поведение доменной структуры (ДС) изучено еще недостаточно. ДС очень чувствительна к изменению магнитных характеристик пленок и отражает все изменения анизотропии и намагниченности. В связи с этим поведение ДС вблизи критической температуры, где равны магнитные моменты подрешеток (T_C) или изменяется анизотропия (T 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 фазовых переходов (ФП) и спин-переориентационных фазовых переходов.

В работе [1] экспериментально изучены СПФП в феррит-гранатовой пленке. В [2] теоретически исследован механизм СПФП. Показано, что зародышем СПФП I рода является дефект пленки в виде 0-градусной границы. В [3] изучена структура 0-градусной границы и найден энергетический порог перехода из 0-градусной границы в 180-градусную границу.

Задачей настоящей работы является определение механизма СПФП на основе экспериментальных исследований [1]. Для решения этой задачи использован метод моделирования доменных границ (ДГ). Как для фундаментальной науки, так и для прикладной 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 [4]. Во-вторых, вблизи СПФП многие физические величины (теплоемкость, магнитная восприимчивость, модуль Юнга, коэффициент затухания и т.д.) испытывают аномалии [5]. Поэтому такой магнитный материал может ограничивать диапазон работы технического устройства.

Описание результатов исследования. Для решения поставленной задачи исследуется влияние смешанной анизотропии на особенности доменных структур пленок ферритов-гранатов с разной величиной одноосной анизотропии в температурном интервале $90\text{K} - T_N$. В работе приведены результаты исследования двух пленок. Обе пленки имеют развитую поверхность $\langle 111 \rangle$ и фактор качества $Q > 5$. Пленка №1 со слабой одноосной анизотропией состава $(YBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ ($T_N = 421\text{K}$, точка магнитной компенсации $T_C = 223\text{K}$ и намагниченность насыщения при комнатной температуре $4\pi M_S = 11 \cdot 10^{-3} \text{ Т}$) имеет осевую фазу в узком температурном интервале при $T > 360\text{K}$. Пленка №2 с сильной одноосной анизотропией состава $(TmBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ ($T_N = 437\text{K}$, $T_C = 120\text{K}$, $4\pi M_S = 17.5 \cdot 10^{-3} \text{ Т}$ при комнатной температуре) имеет осевую фазу в широком температурном интервале при $T > T_C$. Изучены особенности СПФП в этих пленках. На основе экспериментальных данных построены модели доменных структур и доменных границ.

Особенности ДС пленки № 1 при изменении температуры. В интервале температур $T_1 - T_2$ (рис. 1) импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки, формируется решетка ЦМД (рис. 2, А), затем магнитное поле выключается. Формирование ЦМД свидетельствует о наличии в этой области температур осевой фазы. На оранжевом поле наблюдаются темно-зеленые ЦМД. Это две осевые фазы. При T_2 некоторые участки доменной границы уширяются, 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 первого рода из осевой фазы в угловую фазу [6]. Зародышем спин-переориентационного фазового перехода является доменная граница. Тот участок доменной границы ЦМД, ширина которого увеличилась, является зародышем угловой фазы. В самой ДГ произошел фазовый переход, который и вызвал СПФП во всем образце. Эти два фазовых перехода взаимосвязаны. Сосуществование осевой и угловой фаз наблюдается в интервале температур $\Delta T = 15^\circ$. Следует особо подчеркнуть, что визуально граница между осевой и угловой фазами не наблюдается.

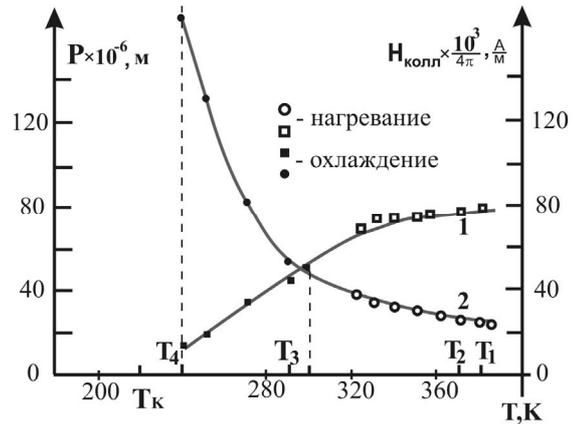


Рис.1. Температурные зависимости пленки №1: 1– поле коллапса; 2– период ДС

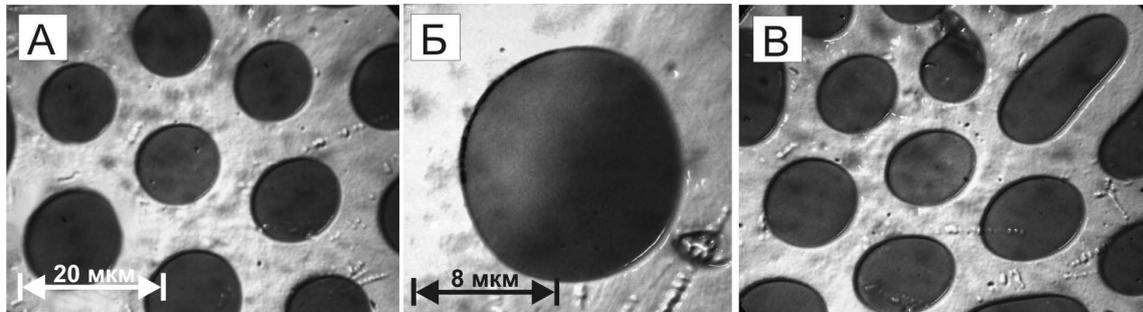


Рис.2. Виды ДС пленки №1 при изменении T: А– Решетка ЦМД, 370К; В– ЦМД, 365К; С– ДС, 290К

Особенности ДС пленки № 2. Решетка ЦМД сформирована при 215К. Получены две осевые фазы Φ_1 и Φ_2 : оранжевые ЦМД на коричневом поле. При 185К некоторые участки круглых границ ЦМД стали более широкими. Вблизи этих участков изменился цвет поля с коричневого на зеленый, а ЦМД с оранжевого на белый. Это свидетельствует о начале процесса спиновой переориентации и появлении двух новых фаз, вектора намагниченности которых направлены под углом к плоскости пленки: $\Phi_3 < \bar{1}\bar{1}1 >$ – белый цвет ЦМД и $\Phi_4 < \bar{1}11 >$ – зеленое поле. В пленке с сильной одноосной анизотропией происходит безгистерезисный СПФП из осевой фазы в угловую фазу. Это СПФП первого рода [6]. Как и в образце №1, зародышем угловой фазы является 180° -ная доменная граница. Фазовый переход в ДГ вызывает СПФП. Область сосуществования осевых и угловых фаз 25К. Граница между осевой и угловой фазами не наблюдается.

Анализ фазовых переходов в доменной структуре. Для объяснения экспериментальных результатов проведено моделирование доменных границ. Поскольку эксперимент показал, что СПФП из осевой фазы в угловую фазу происходит одинаково в пленках с разной осевой анизотропией, приведены модели доменных структур только одной пленки – пленки № 1.

Предложенные модели ДС объясняют ее особенности в интервале $400 - T_C$ (рис. 3). В области $T_1 - T_2$ (рис. 1) наблюдаются осевые фазы $\Phi_1^{ocb} < \bar{1}11 >$ и $\bar{\Phi}_1^{ocb} < \bar{1}\bar{1}\bar{1} >$. Доменная граница 180° -наяблочовская (рис. 3, А). При охлаждении до T_2 уменьшается одноосная анизотропия. Под влиянием кубической анизотропии на некоторых участках границ ЦМД изменяется ориентация спинов. Это приводит к изменению ориентации спинов в прилежащих к доменной границе областях, т.е. наблюдается изменение цвета поля и ЦМД (рис. 2, Б). Появляются угловые фазы $\Phi_1 < \bar{1}11 >$ (желтая) и $\bar{\Phi}_1 < \bar{1}\bar{1}\bar{1} >$ (зеленая). Таким образом, под влиянием кубической анизотропии происходит фазовый переход в доменной границе, который в свою очередь вызывает СПФП из осевой фазы в угловую фазу во всем образце. В этом случае доменная граница осевой фазы выступает зародышем угловой фазы. СПФП из осевой фазы в

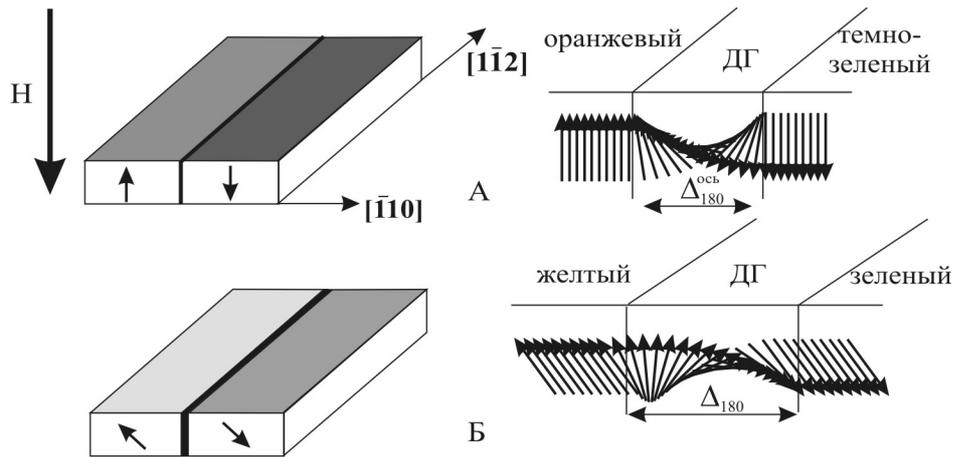


Рис.3. Модели доменных структур и распределение намагниченности в доменной стенке:
А– 180° осевая; Б– 180° угловая

угловую фазу происходит путем зародышеобразования. После фазового перехода доменная граница осталась 180°-ной, но ее плоскость ориентирована под углом к оси $\langle 111 \rangle$. В этом случае разворот спинов на 180 градусов происходит в более широкой ДГ (рис.3, Б). Такой переход в доменной границе соответствует минимуму ее энергии.

Обсуждение результатов. Результаты исследований показали, что в связи с изменением соотношения между константами анизотропии K_u/K_1 при изменении температуры изменяется структура доменных границ и вид доменной структуры, т.е. происходят фазовые переходы в доменных границах и спин-переориентационные фазовые переходы. Выяснено, что доменные границы наиболее чувствительны к температурному изменению K_u/K_1 . Доменную границу можно рассматривать как магнитную неоднородность, в которой существует большой набор спинов разной ориентации. При определенной температуре соответствующая ориентация спинов в доменной границе оказывается энергетически наиболее выгодной. Это и вызывает процесс перестройки, т.е. фазовый переход. Фазовый переход в доменной границе вызывает спин-переориентационный фазовый переход во всем образце. Характер фазового перехода в доменной границе определяет механизм СПФП.

Особенности спин-переориентационного фазового перехода из осевой фазы в угловую фазу объяснены представлением о зародыше новой фазы как о статическом солитоне, размеры которого растут с изменением соотношения между константами анизотропии (рис. 4). В [2, 7] статический солитон представлен как магнитная неоднородность, плотность распределения спинов в которой убывает с расстоянием по экспоненте. Такая неоднородность с определенной ориентацией спинов, соответствующей угловым фазам, возникает в центре доменной границы. Поскольку плотность распределения спинов убывает с расстоянием по экспоненте, то на границе раздела осевой и угловой фаз нет скачка плотности спинов угловой фазы. Поэтому визуально граница между осевой и угловой фазами не наблюдается. Представление о зародыше новой фазы как о статическом солитоне позволяет понять характер фазового перехода в доменной границе и объяснить визуальное отсутствие границы между осевой и угловой фазами. Изучение механизма СПФП в образцах с разной величиной одноосной анизотропии показали, что механизм спин-переориентационного фазового перехода из осевой фазы в угловую фазу не зависит от величины соотношения между константами анизотропии.

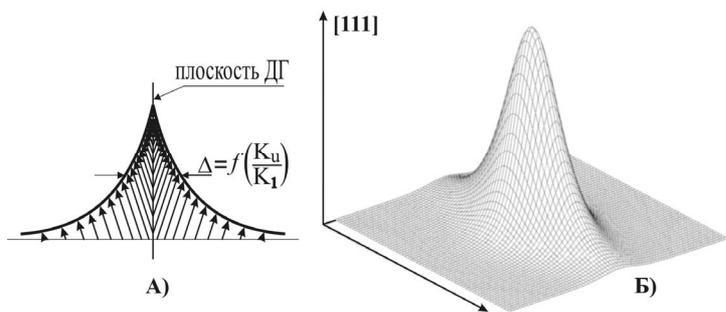


Рис.4. Статический солитон: А– распределение спинов, Б– трехмерное изображение.

Выводы. Визуально доказано, что механизм безгистерезисного спин-переориентационного фазового перехода первого рода из осевой фазы в угловую фазу происходит путем зародышеобразования. Зародышем «новой» фазы является граница исходной фазы. Имеется температурный интервал сосуществования осевой и угловой фаз. Граница между осевой и угловой фазами не наблюдается. Отсутствие границы между осевой и угловой фазами впервые объяснено представлением о зародыше новой фазы как о статическом солитоне, размеры которого растут с изменением соотношения между константами анизо-

тропии. Экспериментально показано, что спин-переориентационный фазовый переход из осевой фазы в угловую фазу происходит одинаково в пленках с разной величиной одноосной анизотропии. Механизм СПФП не зависит от величины соотношения между константами анизотропии.

РЕЗЮМЕ

Вивчено механізм спин-переорієнтаційного фазового переходу (СПФП). Досліджено зміну структури доменних меж при фазовому переході. Запропоновані відповідні до експерименту моделі доменної структури (ДС). Показано, що фазовий перехід шляхом зародкоутворення у доменній межі призводить до СПФП I роду із осьової фази у кутову фазу. Механізм СПФП не залежить від величини співвідношення між константами анизотропії.

Ключові слова: доменна структура, доменна межа, анизотропія, спин-переорієнтаційний фазовий перехід.

SUMMARY

The mechanism of spin-reorientation phase transition (SRPT) has been studied. Changes in structure of domain boundaries during phase transition have been investigated. Domain structure (DS) models appropriate for the experiment are proposed. It has been shown that the phase transition through nucleation in the domain boundary induces the first-order phase transition from axial to angular phase. The SRPT mechanism does not depend on the value of ratio between anisotropy constants.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bezus A.V. Spin-reorientation phase transitions in thin magnetic film of different anisotropy / A.V.Bezus, Ju.A.Mamalui, Ju.A.Siryuk // *Functional Materials*. – 2008. – Vol. 15, No 2. – P. 218-222.
2. Вахитов Р.М. Процессы зародышеобразования при спин-переориентационных фазовых переходах в реальных кристаллах / Р.М.Вахитов, Е.Р.Гареева, М.М.Вахитова // *Физика низких температур*. – 2006. – Т. 32, № 2. – С. 169-175.
3. Магадеев Е.Б. Магнитные неоднородности уединенного типа в тонкой ферромагнитной пленке / Е.Б.Магадеев, Р.М.Вахитов // *Доклады РАН*. – 2011. – Т. 439, № 3. – С. 329-332.
4. Балбашов А.М. Магнитные материалы для микроэлектроники / А.М. Балбашов, А.Я. Червоненкис. – М.: Энергия, 1979. – 216 с.
5. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках / К.П. Белов, А.К. Звездин, А.М. Кадомцева, Р.З. Левицин. – М.: Наука, 1979. – 320 с.
6. Фазовые переходы в ЦМД-структурах при спиновой переориентации в феррит-гранатовых пленках / Ю.А.Мамалуй, Ю.А.Сирюк, А.В.Безус, А.А.Леонов // *Физика твердого тела*. – 2004. – Т. 46, № 2. – С. 277-281.
7. Вахитов Р.М. Об одном механизме зародышеобразования в кристаллах с комбинированной анизотропией / Р.М.Вахитов, А.Р.Юмагузин // *Физика твердого тела*. – 2001. – Т. 43, № 1. – С. 65-71.

Поступила в редакцию 22.02.2012 г.