

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ ОДНООСНОЙ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВОЙ ПЛЕНКИ

Ю.А. Сирюк¹, А.В. Безус¹, Е.Д. Бондарь², В.В. Смирнов¹

¹Донецкий национальный университет,
г.Донецк, ул. Университетская 24, 83001 Украина;

²Донецкий Физико-Технический Институт им. А.А. Галкина,
г.Донецк, ул. Розы Люксембург 72, 83114 Украина
e-mail: juliasiryuk@gmail.com

INDUCED PHASE TRANSITIONS IN DOMAIN STRUCTURE OF UNIAXIAL FERRITE-GARNET FILM

Ju.A. Siryuk¹, A.V. Bezus¹, E.D. Bondar², V.V. Smirnov¹

¹Donetsk National University, Donetsk,
24 Universitetskaya str., 83001 Ukraine;

²Donetsk Institute for Physics and Engineering n.a. A.A. Galkin,
72 Rosy Luksemburg str., Donetsk, 83114 Ukraine
e-mail: juliasiryuk@gmail.com

Изучены индуцируемые магнитным полем фазовые переходы в доменной структуре феррит-гранатовой пленки. При изменении магнитного поля происходят фазовые переходы первого рода как в доменной границе, так и в решетке ЦМД. Показано, что полевой интервал устойчивости решетки ЦМД зависит от структуры доменных границ.

The phase transitions induced by magnetic field in a domain structure of ferrite-garnet film have been studied. The first-order phase transitions occur both in a domain wall and in a bubble lattice at the change of magnetic field. It shown, that the stability interval of bubble lattice in magnetic field depends on the domain wall structure.

Введение:

Проблема устойчивости доменных структур при изменении магнитного поля смещения (H) давно привлекает внимание и экспериментаторов, и теоретиков. Магнитные доменные структуры (ДС) представляют собой периодически чередующиеся области с антипараллельным направлением намагниченности, разделенные доменными границами (ДГ). Так как доменная структура является термодинамической системой, то распределение доменов происходит таким образом, чтобы общая энергия системы была минимальна. Внешнее магнитное поле нарушает магнитное равновесие доменов, под его воздействием область доменов с противоположной полю намагниченностью уменьшается.

Аналитическая теория решетки ЦМД развита в работах [1,2], согласно которым учет поля не изменяет энергию ДГ и магнитостатическую энергию. В то же время учет поля приводит к необходимости учета энергии взаимодействия намагниченности с магнитным полем. При приближении поля смещения к полю коллапса происходит перестройка доменов, связанная с развитием неустойчивости [2]. При этом должен коллапсировать каждый третий ЦМД и увеличиваться период решетки a . В [3] экспериментально наблюдалась перестройка решетки ЦМД вблизи поля коллапса, связанная с появлением динамической неустойчивости. Было обнаружено, что значения поля, при которых происходит перестройка, отделены друг от друга конечными интервалами, уменьшающимися с ростом периода решетки.

В [4] исследовалось влияние поля смещения на плотность и температурную стабильность решетки ЦМД в широком температурном интервале. Было показано, что при формировании решетки ЦМД в поле смещения возникает термодинамически равновесная

решетка, а наложение внешнего поля на сформированную решетку приводит ее в неравновесное состояние. В [5] на основе экспериментальных результатов развита термодинамическая теория, позволяющая описать влияние внешних магнитных полей на фазовые переходы в решетке ЦМД. Теоретически были определены границы устойчивого, неустойчивого и метастабильного состояний решетки ЦМД в магнитных полях.

Но во всех этих работах не учитывалась роль ДГ в фазовых переходах (ФП) доменной структуры. В работах [6,7] изучены спонтанные фазовые переходы в ДС феррит-гранатовой пленки в температурном интервале от точки компенсации до температуры Нееля. Показано, что при изменении температуры ФП в доменной границе вызывают ФП в решетке ЦМД, а температурный интервал устойчивости решетки ЦМД зависит от структуры доменных границ. Таким образом, фазовые переходы в ДС состоят из ФП в доменной границе и в самих доменах.

Цель настоящей работы – при постоянной температуре исследовать влияние магнитного поля смещения на решетку ЦМД, на домены и на ДГ. Это исследование актуально как для фундаментальной физики, так и в прикладном плане, например в микроэлектронике и спинтронике.

Для исследования выбрана пленка с развитой поверхностью $\langle 111 \rangle$, выращенная методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний-галлиевой подложке состава $(TmBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ ($T_N = 437 K$, $T_C = 120 K$), где T_N – температура Нееля, T_C – температура магнитной компенсации. Пленка имеет при комнатной температуре фактор качества $Q > 5$. При такой величине фактора качества в ДГ действием импульсного магнитного поля создаются вертикальные блоховские линии (ВБЛ) [8]. Доменная структура наблюдается благодаря эффекту Фарадея.

Результаты и их обсуждение:

Пленка имеет сильную одноосную анизотропию, вследствие чего в широком температурном интервале при $T > T_C$ наблюдается осевая фаза, т.е. создаются ЦМД. Свойства решетки ЦМД зависят от условий формирования. В работе исследуется при $T = 300 K$ два вида решеток. Первая – РЦД₁, формируется импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки, при отсутствии поля смещения; вторая – РЦД₂, формируется импульсным полем в присутствии поля смещения. Затем импульсное поле выключается. Обе решетки являются равновесными, но при наложении поля смещения РЦД₁ оказывается неравновесной, а РЦД₂, формируемая при разных полях смещения, является равновесной.

Под действием импульсного магнитного поля создаются жесткие доменные границы с большим количеством ВБЛ. В жестких доменах имеются две силы (сила отталкивания ВБЛ и магнитостатическая сила), которые уравниваются сжимающими силами поверхностного натяжения стенки Блоха. Стенки Блоха и поле смещения дают статически устойчивый домен. Их теории [8] следует, что жесткие ЦМД квантуются, т.е. могут иметь дискретные состояния, различающиеся числом ВБЛ. Следовательно, квантуются и ДГ. Обнаружено, что для типичных гранатовых пленок разница в размерах доменов с различными состояниями порядка 0.1 мкм или меньше. Поэтому из-за таких малых размеров не было обнаружено убедительных экспериментальных квантования статических характеристик жестких доменов. В нашем эксперименте жесткие домены составляют решетку ЦМД, где действуют дипольные силы. В решетке ЦМД, как в любой термодинамической системе, происходит перераспределение сил таким образом, чтобы был минимум энергии. Поэтому в доменных границах ЦМД, составляющих решетку, импульсным магнитным полем хотя и формируется большое число ВБЛ, но, тем не менее, их количество меньше, чем в одиночных доменах.

Влияние внешнего магнитного поля на РЦД₁:

При $T = 300 K$ и $H = 0$ создана решетка ЦМД (рис.1 а). При формировании РЦД₁ импульсное поле создает такое количество ЦМД, при котором общая энергия решетки оказывается минимальной. Плотность упаковки такой решетки $u = d/a = 0.74$ [9, 10].

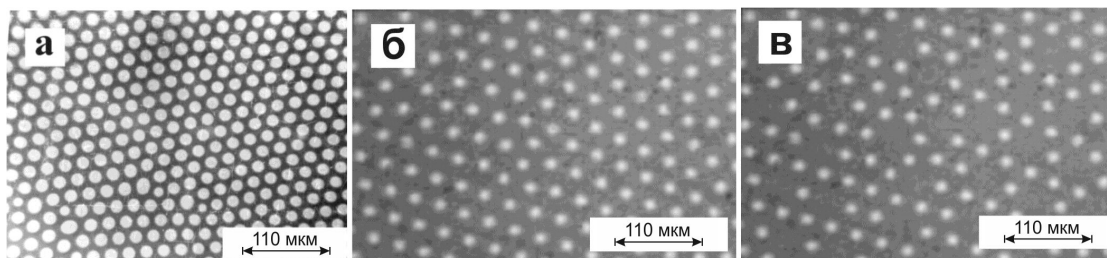


Рис.1 – Виды ДС пленки при различных магнитных полях: А– РЦД ($H=0$), Б– $H>0$, В– $H = H_k$

При наложении поля смещения к магнитоэлектронной энергии решетки добавляется зеemannовская энергия, плотность которой различна внутри и вне домена, что приводит к

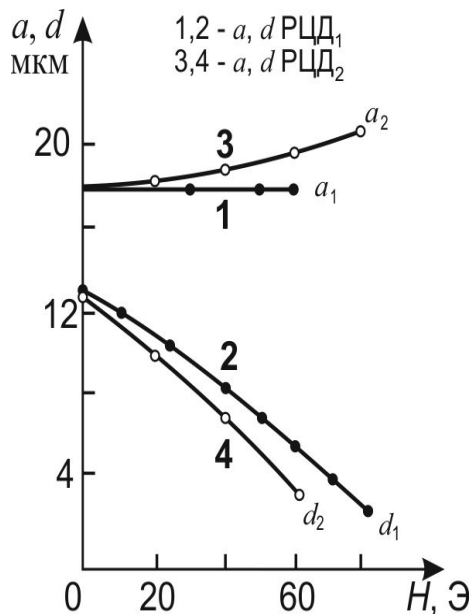


Рис.2 – Полевые зависимости периода РЦД (a) и диаметра ЦМД (d):
1, 2– РЦД формируется при $H=0$;
3, 4– РЦД формируется при $H \neq 0$

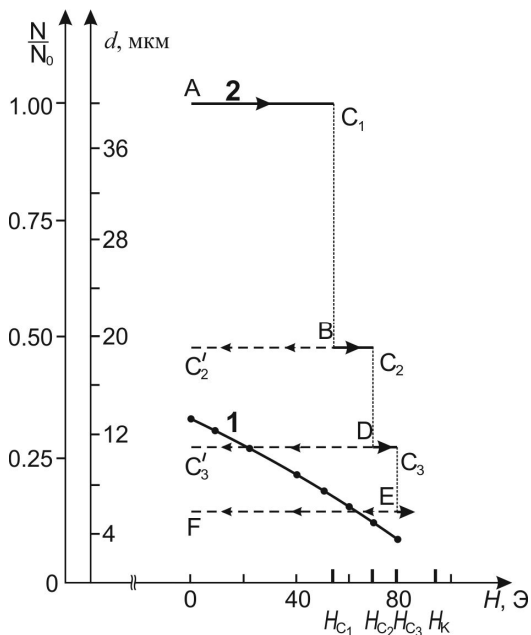


Рис.3 – Полевые зависимости параметров пленки при $T=\text{const}$:
1– диаметр ЦМД равновесной РЦД (d);
2– число ВБЛ в доменной границе

изменению диаметра ЦМД. Но эти энергии не могут изменить количества ЦМД, поэтому период РЦД₁ остается постоянным при наложении поля смещения, учитывая силы, действующие на ДГ и температурные зависимости характеристик пленки, при температуре 300 K создается максимальное (N_0) число ВБЛ в доменной границе. С увеличением поля смещения H диаметр ЦМД уменьшается, а период РЦД остается постоянным (рис.1 б, рис.2 кривые 1, 2). При $H = H_{c1}$ наблюдается коллапс РЦД₁, при котором исчезает каждый центральный домен гексагональной упаковки (рис.1 в, рис.3 т. C_1). Т.е. происходит ФП I рода в решетке ЦМД. Нарушается магнитное равновесие системы. При этом в доменной границе ЦМД резко уменьшается количество ВБЛ (рис.3, отрезок C_1B). При кратковременном действии импульсного магнитного поля восстанавливается полотно гексагональной решетки ЦМД с меньшей плотностью упаковки u , с меньшим диаметром домена и большим периодом a . Параметры этой решетки соответствуют параметрам РЦД₂ при значении поля $H = H_{c1}$ (рис.2, кривые 3, 4).

Экспериментально наблюдается процесс последовательного коллапсирования решеток при увеличении магнитного поля смещения до $H = H_{c3} = H_{k\text{ЦМД}}$ (рис.3, рис.2). Из рис.3 видно, что значения полей, при которых происходит перестройка, отделены друг от друга конечными интервалами, уменьшающимися с ростом периода решетки ($DC_3 < BC_2 < AC_1$). Есть предельная, максимальная величина периода, при которой решетка может существовать в поле

$H \leq H_C$ РЦД₂, т.е. $a \leq a_{CРЦД_2}$. Таким образом, как процесс формирования РЦД₂ в поле $H \leq H_{C_3}$, так и наблюдение последовательного коллапсирования решеток, полученных из исходной РЦД₁, приводит к одинаковому выводу: есть предельный, максимальный период, при котором еще может существовать решетка ЦМД, т.е. при котором еще силы дипольного взаимодействия удерживают систему в динамическом равновесии. РЦД₁ сформированная при $H = 0$, неравновесна, но динамически устойчива в интервале поля $0 \leq H < H_{C_1}$. В доменной границе ЦМД содержится максимальное число ВБЛ ($N/N_0 = 1$). При $H = H_{C_1}$ динамическая устойчивость нарушается. В РЦД₁ происходит ФП I рода. При этом уменьшается диаметр ЦМД. Длина окружности ЦМД представляет собой граничное условие, которое заставляет линии Блоха сближаться до интервала $S = \pi d/2N$, где d – диаметр ЦМД, N – число оборотов спинов, $2N$ – число ВБЛ. В итоге при $H = H_{C_1}$ происходит резкое уменьшение количества ВБЛ в доменной границе путем аннигиляции, т.е. квантуется как сам домен, так и его ДГ, что и было теоретически предсказано. В доменной границе происходит ФП I рода. На рис.3 этот переход отмечен отрезком С₁В. Таких переходов при увеличении поля наблюдается несколько. При всех ФП в решетках типа РЦД₁, ее доменах и доменных границах предельное значение периода решетки, диаметра домена d и числа ВБЛ в ДГ определяются соответствующими величинами равновесной решетки РЦД₂.

Экспериментально было обнаружено, что при изменении поля смещения исходная решетка РЦД₁ может существовать в интервале поля $0 \leq H < H_{C_1}$ (рис.3, отрезок АС₁), полученная при H_{C_1} решетка сохраняется в интервале $0 < H < H_{C_2}$ (рис.3, отрезок С₂С₂'¹) и, наконец, решетка, полученная при $H = H_{C_2}$, может сохраняться в интервале поля $0 < H < H_{C_3}$ (рис.3, отрезок С₃С₃'¹). Таким образом, полевой интервал динамической устойчивости решетки увеличивается с уменьшением числа ВБЛ в доменных границах ЦМД. При $H < H_K$ коллапса домен имеет простую блоховскую стенку. Решетка, созданная из таких доменов, сохраняется в максимальном полевом интервале.

Выводы:

Изучено влияние магнитного поля на доменную структуру: решетку ЦМД, домен и доменную границу. Исследовано два вида решеток: неравновесной РЦД₁ и равновесной РЦД₂.

Экспериментально обнаружено, что при увеличении магнитного поля наблюдается процесс последовательных фазовых переходов в РЦД₁, в домене и доменной границе. При фазовом переходе в решетке исчезает каждый центральный домен в гексагональной упаковке, диаметр оставшихся доменов уменьшается, а период решетки увеличивается. Фазовый переход в границе ЦМД происходит путем аннигиляции ВБЛ. Параметры неравновесной РЦД₁ приобретают значения, равные параметрам равновесной РЦД₂ при данной величине поля смещения.

Значения полей, при которых происходят переходы, отделены друг от друга конечными интервалами, уменьшающимися с ростом периода решетки.

Полевой интервал динамической устойчивости решетки увеличивается с уменьшением количества ВБЛ в доменных границах ЦМД. При поле, близком к полю коллапса ЦМД, домен имеет простую блоховскую стенку. Решетка, созданная из таких доменов, сохраняется в максимальном полевом интервале.

Список использованных источников:

1. Барьяхтар В.Г., Ганн В.В., Горобец Ю.И. // ЖТФ. –1975. –Т.45, №2. –С. 386-395.
2. Барьяхтар В.Г., Ганн В.В., Горобец Ю.И. // ФТТ. –1976. –Т.18, №7. –С. 1990-1995.
3. Барьяхтар В.Г., Горобец Ю.И., Ильчишин О.В., Петров Н.В. // ФТТ. –1977. –Т.24, №9. –С. 1829-1830.

4. *Мамалуй Ю.А., Сирюк Ю.А.* Влияние магнитного поля на фазовые переходы в гексагональных решетках ЦМД. Препринт –Д.: ДонФТИ АН УССР, 1986. –38 с.
5. *Заблоцкий В.А., Мамалуй Ю.А., Сирюк Ю.А.* Фазовые превращения в решетках цилиндрических магнитных доменов. Препринт –Д.: ДонФТИ АН УССР, 1989. –33 с.
6. *Сирюк Ю.А., Безус А.В.* // ФТТ. –2013. –Т.55, №3. – С.547-551.
7. *Сирюк Ю.А., Безус А.В., Бондарь Е.Д., Смирнов В.В.* // ФТВД. –2017. –Т.27, №4. –С.110-115.
8. Малоземов А., Слонзуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. –М.: Мир, 1982. –384 с.
9. *Мамалуй Ю.А., Сирюк Ю.А., Безус А.В.* // ФТТ. –2003. –Т.45, №9. –С. 1645-1652.
10. *Мамалуй Ю.А., Сирюк Ю.А.* Фазовые переходы в гексагональных решетках ЦМД. Препринт –Д.: ДонФТИ АН УССР, 1986. –43 с.