

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

Ю.А. Сирюк, А.В. Безус, Е.Д. Бондарь, В.В. Смирнов

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ РЕШЕТОК ЦМД В ОДНООСНОЙ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВОЙ ПЛЕНКЕ

Донецкий национальный университет

Статья поступила в редакцию 13 июля 2017 года

Изучены спонтанные фазовые переходы в доменной структуре феррит-гранатовой пленки в температурном интервале от точки компенсации до температуры Нееля. При изменении температуры фазовые переходы в доменной границе вызывают фазовые переходы в решетке цилиндрических магнитных доменов (ЦМД). Показано, что температурный интервал устойчивости решетки ЦМД зависит от структуры доменных границ.

Ключевые слова: феррит-гранатовая пленка, решетка ЦМД, фазовый переход, вертикальная блоховская линия

1. Введение

Неоднородные структуры ферритов-гранатов, т.е. магнитные доменные структуры, представляют собой периодически чередующиеся области с антипараллельным направлением намагниченности, разделенные доменными границами. Последние, в свою очередь, являются неоднородными структурами, в которых происходят изменения ориентации спинов от их направления в одном домене к их направлению в соседнем домене. Структура доменных границ зависит от выбранного кристаллографического направления пленки, ее толщины, температуры и действия магнитных полей. При рассмотрении распределения спинов в доменной границе предполагается, что при переходе через нее нормальная составляющая спинового магнитного момента не испытывает изменений, поскольку в данном случае полная магнитостатическая энергия минимальна. Намагниченность в доменной границе лежит в плоскости стенки, и на ее поверхности не возникают магнитные заряды. Это означает, что поворот спинов по толщине доменной границы можно уподобить винтовому вращению. Такие доменные стенки называются доменными границами Блоха и представляют собой наиболее общий тип доменных границ в ЦМД-материалах, поскольку они минимизируют энергию размагничивания. Симметрия допускает два возможных направления поворота намагниченности в доменной границе – право- и левовинтовое. В доменной границе Нееля спины распределяются с нарушением правила

непрерывности нормальной составляющей. При этом оказывается более выгодным поворот в плоскости, параллельной плоскости пленки.

В эпитаксиальных пленках с осью легкого намагничивания, перпендикулярной развитой поверхности пленки, доменная граница Блоха наблюдается в широком температурном интервале вплоть до температуры Нееля. И только при приближении к точке компенсации, где растут величины константы кубической анизотропии и характеристическая длина пленки, доменная граница Блоха переходит в доменную границу Нееля. Если в пленке формировать решетку ЦМД импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки, то создается доменная граница ЦМД, имеющая сложную структуру. В этой границе образуется большое число поворотов спинов лево- и правовинтовых направлений (полярностей). Линия, разделяющая два участка стенки Блоха с различными полярностями, проходит вертикально через пленку, и такую структуру назвали вертикальной блоховской линией (ВБЛ). Число линий Блоха в ЦМД должно быть четным, т.е. в стенке домена могут находиться только пары линий Блоха. 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, s – расстояние между ВБЛ [1].

Для ЦМД с диаметром 4–13 μm получено максимальное значение $N = 90$, что соответствует 180 блоховским линиям.

При изменении температуры T изменяются магнитные характеристики феррита-граната: намагниченность насыщения $4\pi M_s$, характеристическая длина l , поверхностная плотность энергии доменных границ $\sigma = 4\pi M_s^2 l$. Это сказывается на особенностях доменной структуры: ее виде, фазовых переходах в ней, структуре доменных границ.

Определение механизма фазовых переходов в доменной структуре актуально как для фундаментальной физики, так и в прикладном плане, например в микроэлектронике и спинтронике. И в других твердых телах происходят процессы, подобные тем, что имеют место в феррит-гранатовых пленках: упорядочение и разупорядочение, фазовые переходы и т.д., но, к сожалению, они недоступны для непосредственного наблюдения и изучаются косвенными методами. Преимущества феррит-гранатовых пленок состоят в том, что в них возможна визуализация происходящих процессов благодаря эффекту Фарадея. Эпитаксиальные пленки ферритов-гранатов – это прекрасный модельный объект для изучения механизма фазовых переходов в твердых телах.

Экспериментально было обнаружено, что изменение температуры пленки вызывает не только изменение доменных фаз, но и структурные преобразования в доменных границах, которые можно рассматривать как фазовые переходы. Таким образом, фазовые переходы в доменной структуре состоят из фазовых переходов в доменной границе и в самих доменах.

В работе исследованы равновесные и неравновесные решетки ЦМД. Поставлена цель – показать, что температурный интервал устойчивости неравновесной решетки ЦМД определяется структурой доменной границы.

Для исследования выбрана пленка с развитой поверхностью $\langle 111 \rangle$, выращенная методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний-галлиевой подложке состава $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, при температуре Нееля $T_N = 437$ К и температуре магнитной компенсации $T_c = 120$ К. В условиях комнатной температуры пленка имеет фактор качества $Q > 5$. При такой величине Q в доменной границе действием импульсного магнитного поля создавали ВБЛ [1]. Доменную структуру наблюдали благодаря эффекту Фарадея.

2. 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. В отсутствие поля смещения гексагональная решетка ЦМД формируется импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки. Затем импульсное поле выключается. Такая решетка является равновесной при температуре формирования. При эксперименте в качестве критериев равновесности применяются два условия: 1) решетка сохраняется неограниченное время при температуре формирования; 2) ее можно вновь создать с теми же параметрами (диаметром ЦМД и периодом решетки a). На рис. 1 приведены температурные зависимости магнитных характеристик пленки. Под действием импульсного магнитного поля формируются жесткие доменные границы с большим количеством ВБЛ. В жестких доменах имеются две силы (сила отталкивания ВБЛ и магнитостатическая сила), которые уравновешиваются сжимающими силами поверхностного натяжения стенки Блоха.

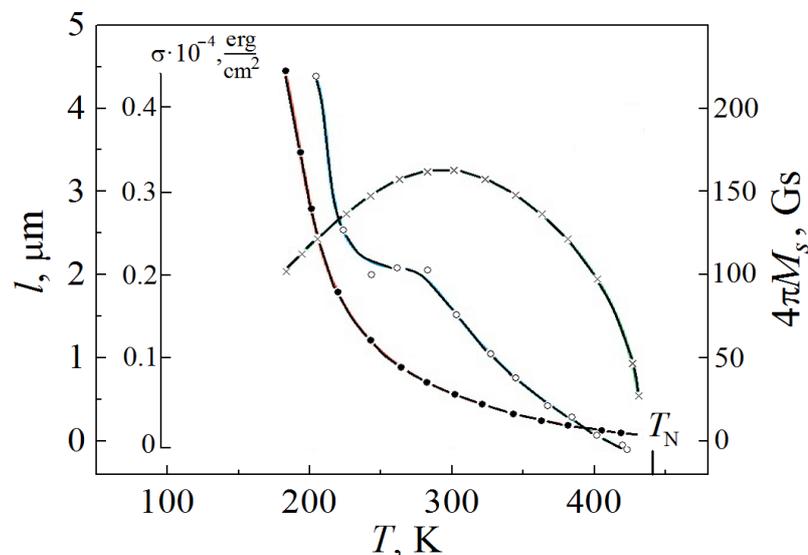


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности насыщения $4\pi M_s$ (\times), характеристической длины l (\bullet) и плотности энергии доменной границы σ (\circ)

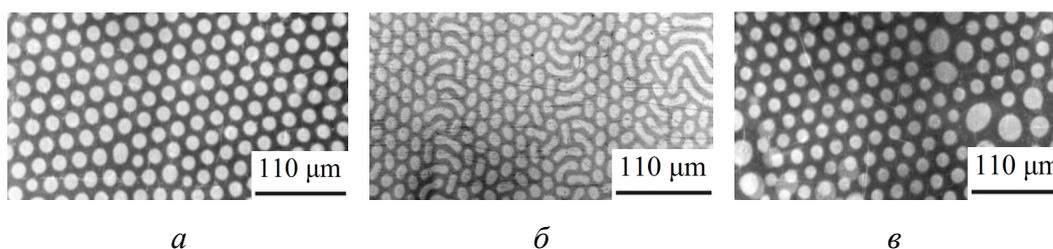


Рис. 2. Виды доменных структур пленки: *a* – решетка ЦМД при $T = 300$ К; *б*, *в* – фазовые переходы в решетке при нагревании соответственно при T_1 и T_3

При $T = 300$ К образуется решетка ЦМД (рис. 2,*a*). Это равновесная решетка при температуре формирования T_f [2]. Температурные зависимости периода решетки $a(T)$ и диаметра ЦМД $d(T)$ подобны зависимости $l(T)$. Согласно [1] в границе ЦМД создаются ВБЛ. 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 формируется хотя и большое число блоховских линий, но, тем не менее, их количество меньше, чем в одиночных доменах. Благодаря силам, действующим на доменную границу и температурным зависимостям характеристик пленки (см. рис. 1), при $T = 300$ К создавали максимальное число блоховских линий в доменной границе (точка *A* на рис. 3). Для равновесной решетки ЦМД температурная зависимость числа ВБЛ изображена кривой *l* на рис. 3.

Если решетку ЦМД сформировать при 300 К, а затем изменять температуру пленки, то решетка сохраняется (хотя является уже неравновесной) в температурном интервале T_1-T_3 , на обеих температурных границах которого

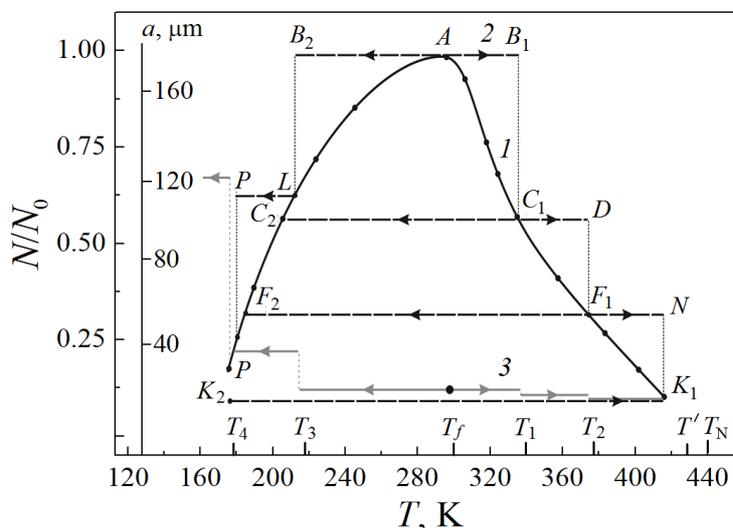


Рис. 3. Температурные зависимости параметров решеток ЦМД: *1*, *2* – N/N_0 ВБЛ в доменной границе соответственно равновесной и неравновесной решетки; *3* – период неравновесной решетки

происходят фазовые переходы. При T_1 в решетке ЦМД наблюдается фазовый переход первого рода в двухфазную структуру с сохранением числа доменов (см. рис. 2,б), вызванный фазовым переходом в доменной границе. При этом число ВБЛ в доменной границе уменьшается путем аннигиляции (точка C_1 на рис. 3). При T_3 в решетке происходит фазовый переход первого рода в новую решетку ЦМД с уменьшением числа доменов (рис. 2,в) [3]. При этом в доменной границе происходит фазовый переход с уменьшением числа ВБЛ путем раскручивания (точка C_2 на рис. 3). В исследуемом температурном интервале наблюдается несколько таких фазовых переходов в доменной границе и в решетке ЦМД [2]. Полученные экспериментальные данные приведены в таблице.

Таблица

Механизм фазовых переходов первого рода в доменной границе

Температурный интервал	Изменение магнитных характеристик пленки с изменением температуры	Механизм фазового перехода
$T_f - T_1$	$T \uparrow, M_s \downarrow, l \downarrow, \sigma \downarrow \Rightarrow d \downarrow, a \downarrow, N \downarrow$	Путем аннигиляции
$T_f - T_3$	$T \downarrow, M_s \downarrow, l \uparrow, \sigma \uparrow \Rightarrow d \uparrow, a \uparrow, N \downarrow$	Путем раскручивания

Из рис. 3 видно, что температурные интервалы устойчивости ΔT неравновесных решеток ЦМД зависят от числа ВБЛ в доменной границе. Так, при максимальном числе ВБЛ (точка A на рис. 3) температурный интервал устойчивости равен $B_1 - B_2$, при меньшем числе ВБЛ (точка C_1) этот интервал увеличивается ($C_2 - D$). При простой блоховской стенке, которая создается при $T = 0.98T_N$ [3], температурный интервал устойчивости максимален ($K_1 - K_2$).

Выводы

Структура доменной границы ЦМД очень чувствительна к температурному изменению параметров пленки. В ней происходят спонтанные фазовые переходы первого рода, которые вызывают фазовые переходы в решетке ЦМД. Механизм фазовых переходов в доменной границе при нагревании и охлаждении пленки имеет существенные отличия. Число ВБЛ в доменной границе при нагревании уменьшается путем аннигиляции, а при охлаждении – путем раскручивания. Температурный интервал устойчивости ЦМД зависит от структуры доменной границы. С уменьшением числа ВБЛ в доменной границе температурный интервал устойчивости решетки ЦМД увеличивается. Решетка ЦМД с простой блоховской стенкой наиболее устойчива и сохраняется в широком температурном интервале.

1. *А. Малоземов*, Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами, Мир, Москва (1982).
2. *Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, А.В. Безус*, ФТТ **45**, 1645 (2003).
3. *Ю.А. Сирюк, А.В. Безус*, ФТТ **55**, 547 (2013).

Ju.A. Siryuk, A.V. Bezus, E.D. Bondar, V.V. Smirnov

THERMAL STABILITY OF BUBBLE LATTICES IN AN UNIAXIAL FERRITE-GARNET FILM

Spontaneous phase transitions in the domain structure of a ferrite-garnet film in the temperature range from the point of magnetic compensation to the Neel temperature have been studied. The phase transitions in the domain wall cause phase transitions in the bubble lattice at the temperature change. It is shown that the temperature range of stability of the bubble lattice depends on the structure of domain walls.

Keywords: ferrite-garnet film, bubble lattice, phase transition, vertical Bloch line

Fig. 1. Temperature dependences of saturation magnetization $4\pi M_s$ (\times), characteristic length l (\bullet) and the energy density of a domain boundary σ (\circ)

Fig. 2. Types of domain structures in a film: a – bubble lattice at $T = 300$ K; b, c – phase transition in a lattice under heating at T_1 and T_3 , respectively

Fig. 3. Temperature dependences of the parameters of bubble lattices: $1, 2$ – N/N_0 vertical Bloch lines in the domain boundary of an equilibrium and nonequilibrium lattice; 3 – period of a nonequilibrium lattice