

## Спонтанные фазовые переходы в феррит-гранатовых пленках

© Ю.А. Сирюк, А.В. Безус

Донецкий национальный университет,  
Донецк, Украина

E-mail: juliasiryuk@gmail.com

(Поступила в Редакцию 17 июля 2012 г.)

Изучены спонтанные фазовые переходы в пленках ферритов-гранатов. Показано, что при изменении температуры в доменной границе происходят фазовые переходы, которые вызывают спонтанные фазовые переходы в решетке цилиндрических магнитных доменов. Вблизи точки магнитной компенсации фазовый переход в доменной границе вызывает спин-переориентационный фазовый переход во всем образце. Характер фазового перехода в доменной границе определяет механизм спин-переориентационного фазового перехода.

### 1. Введение

Неоднородные структуры в твердых телах являются объектом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований, что объясняется быстрым внедрением их свойств в технику. Широко известны неоднородные структуры ферритов-гранатов, т.е. магнитные доменные структуры (ДС), которые представляют собой периодически чередующиеся области с антипараллельным направлением намагниченности, разделенные доменными границами. Доменные границы в свою очередь являются неоднородными структурами, в которых происходят изменения ориентации спинов от направления спинов в одном домене к направлению спинов в соседнем домене. При изменении температуры  $T$  изменяются магнитные характеристики феррита-граната: намагниченность насыщения  $4\pi M_S$ , характеристическая длина  $l$ , поверхностная плотность энергии доменных границ  $\sigma$ . Это сказывается на особенностях доменной структуры (ее виде, структуре доменных границ, фазовых переходах в ДС).

Эпитаксиальные пленки ферритов-гранатов, выращенные на монокристаллических подложках, имеют смешанную анизотропию. Наряду с кристаллографической кубической анизотропией  $K_1$  существует одноосная анизотропия  $K_u$ , индуцируемая в процессе роста. Отношение констант одноосной и кубической анизотропии  $K_u/K_1$  зависит от температуры, и при определенном соотношении  $K_u/K_1$  возможны спин-переориентационные фазовые переходы (СПФП).

Определение механизма фазовых переходов в ДС и СПФП актуально как для фундаментальной физики, так и в прикладном плане (например, в микроэлектронике). Процессы, подобные тем, что наблюдаются в феррит-гранатовых пленках, происходят и в других твердых телах: упорядочение и разупорядочение, фазовые переходы, СПФП и т.д., но, к сожалению, они недоступны для непосредственного наблюдения и изучаются косвенными методами. Преимущества феррит-гранатовых пленок состоит в том, что в них возможна визуализация происходящих процессов благодаря эффекту

Фарадея. Эпитаксиальные пленки ферритов-гранатов — прекрасный модельный объект для изучения механизма фазовых переходов и спин-переориентационных фазовых переходов в твердых телах.

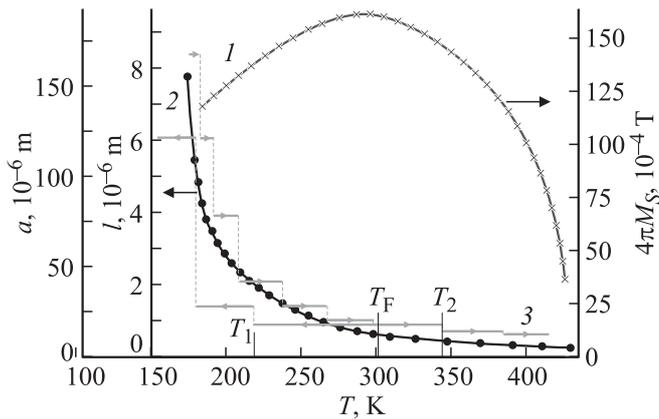
Экспериментально было обнаружено, что изменение температуры пленки вызывает не только изменение доменных фаз, но и структурные преобразования в доменных границах, которые можно рассматривать как фазовые переходы. Таким образом, фазовые переходы в ДС состоят из переходов в доменной границе и в самих доменах.

Цель настоящей работы — выяснить связь между фазовыми переходами в доменной границе, фазовыми переходами в доменах и спин-переориентационными фазовыми переходами во всем образце.

Для исследования выбраны пленки с развитой поверхностью  $\langle 111 \rangle$ , выращенные методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний-галлиевой подложке: пленка № 1 состава  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  ( $T_N = 437 \text{ K}$ ,  $T_C = 120 \text{ K}$ ); пленка № 2 состава  $(\text{YBi})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$  ( $T_N = 421 \text{ K}$ ,  $T_C = 223 \text{ K}$ ), где  $T_N$  — температура Нееля,  $T_C$  — температура магнитной компенсации. Обе пленки при комнатной температуре имеют фактор качества  $Q > 5$ . При такой величине фактора качества в доменной границе действием импульсного магнитного поля создаются вертикальные блоховские линии (ВБЛ) [1]. Доменная структура наблюдается с помощью эффекта Фарадея. СПФП определяется методом цветовой регистрации.

### 2. Спонтанные фазовые переходы в решетке цилиндрических магнитных доменов

Пленка № 1 имеет сильную одноосную анизотропию, вследствие чего в широком температурном интервале при  $T > T_C$  наблюдается осевая фаза, т.е. создаются цилиндрические магнитные домены (ЦМД). Гексагональная решетка ЦМД формируется импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки, в отсутствие поля смещения. Затем импульсное поле



**Рис. 1.** Температурные зависимости намагниченности насыщения  $4\pi M_S(T)$ , характеристической длины  $l$  (2) и параметра решетки ЦМД  $a$  (3) пленки № 1.

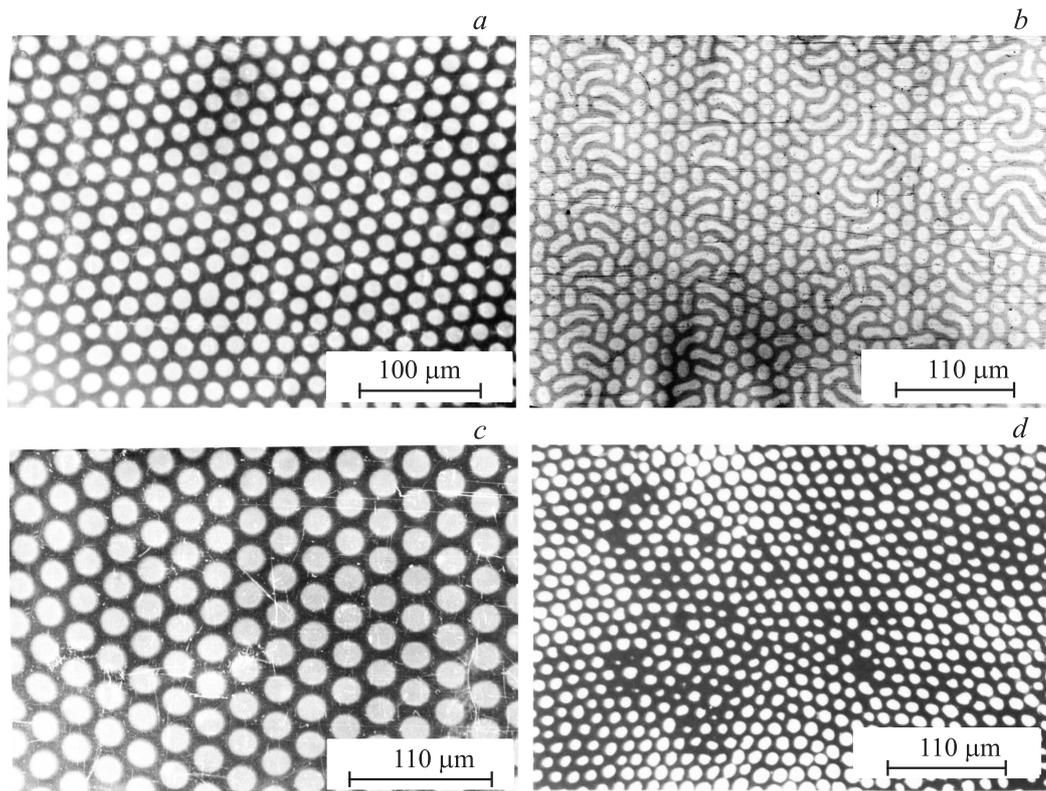
выключается. Такая решетка является равновесной при температуре формирования. В эксперименте в качестве критерия равновесности применяются два фактора: 1) решетка сохраняется неограниченное время при температуре формирования; 2) ее можно вновь создать с теми же параметрами (диаметром ЦМД и периодом решетки). На рис. 1 приведены температурные зависимости магнитных характеристик пленки № 1. При изменении температуры пленки решетка ЦМД, сформированная при определенной температуре, например при  $T_F = 300$  К (рис. 2, *a*), сохраняется (хотя является уже неравновесной) в температурном интервале  $\Delta T = T_1 - T_2$ , на обоих концах которого в решетке происходят фазовые переходы первого рода [2]. При удалении от точки компенсации происходит фазовый переход с сохранением числа доменов в двухфазную структуру, которая состоит из блоков новой равновесной при  $T_2$  решетки ЦМД с меньшими параметрами и страйпов (рис. 1, рис. 2, *b*). При приближении к точке компенсации в решетке происходит фазовый переход с уменьшением числа доменов в новую, равновесную при  $T_1$  решетку с большими параметрами (рис. 1, рис. 2, *c*). Таких фазовых переходов в исследуемом температурном интервале  $90$  К– $T_N$  имеется несколько. На рис. 1 наблюдается гистерезис этих переходов. Величина температурного интервала устойчивости  $\Delta T$  решетки ЦМД зависит от крутизны температурного изменения характеристической длины пленки [3].

При фазовых переходах мы не учитывали изменение структуры доменных границ ЦМД с температурой и рассматривали доменную границу как простую  $180^\circ$ -ную блоховскую стенку [1]. В действительности доменная граница имеет сложную структуру. Поскольку решетка ЦМД формировалась импульсным магнитным полем, в доменных границах создавались ВБЛ. Количество ВБЛ при одинаковом способе формирования равновесных решеток ЦМД зависит от величины магнитных характеристик пленки при данной температуре, в частности на-

магниченности насыщения. Вблизи температуры Нееля и точки компенсации намагниченность насыщения мала (рис. 1), поэтому в доменной границе ЦМД создается небольшое количество ВБЛ. В работе [4] было показано, что температурный интервал устойчивости гексагональной решетки, сформированной импульсным полем вблизи температуры Нееля, т.е. с малым количеством ВБЛ, максимальный. Предельная температура, при которой еще можно сформировать гексагональную решетку ЦМД,  $T = 0.98T_N$  [4]. Как в теоретических, так и в экспериментальных работах было показано, что вблизи критических точек (т.е. температуры Нееля и температуры магнитной компенсации) гексагональная решетка ЦМД не может существовать. По мере приближения к этим температурам наблюдается аморфная решетка, а затем одиночные ЦМД [4–6]. Аморфная решетка ЦМД создается не только вблизи  $T_C$  и  $T_N$  (рис. 2, *d*). Ее можно создать при любой температуре, действуя на гексагональную решетку ЦМД планарным полем, которое уничтожает ВБЛ внутри доменных границ [7].

Экспериментально было показано, что самый большой температурный интервал устойчивости имеют любые аморфные решетки ЦМД, в доменных границах которых имеется минимальное число ВБЛ.

В работе [8] при изучении динамических свойств ДС (метод Вейла–Колейра) было показано, что при увеличении температуры по мере приближения к  $T_N$  уменьшается число ВБЛ, вблизи  $T_N$  все ЦМД преобразуются в домены с простой блоховской стенкой. В доменной границе ЦМД, сформированного импульсным магнитным полем, число ВБЛ сохраняется в некотором температурном интервале, а затем уменьшается скачком, т.е. в структуре доменной границы происходит фазовый переход. При этом уменьшается длина доменной границы, а следовательно, уменьшается диаметр ЦМД. Если имеется решетка ЦМД, то при этом уменьшаются оба ее параметра, т.е. в решетке происходит фазовый переход. В действительности температура фазового перехода в решетке зависит еще и от наличия разного рода дефектов в ее полотне [9]. Поэтому температура фазового перехода в доменной границе может и не совпадать с температурой фазового перехода в решетке ЦМД. При наличии идеальной гексагональной решетки (в которой отсутствуют дефекты) структурные изменения доменной границы, вызванные изменением  $T$  пленки, инициируют фазовый переход в решетке ЦМД. Температурные интервалы, в которых сохраняется число ВБЛ, совпадают с температурными интервалами устойчивости решетки ЦМД. Из этого можно заключить, что фазовые переходы в границе ЦМД связаны с фазовыми переходами в решетке ЦМД. При приближении к точке компенсации уменьшается намагниченность насыщения пленки, увеличиваются характеристическая длина и ширина доменной границы (рис. 1). В [10] было показано, что при увеличении ширины ДГ уменьшается число ВБЛ путем их раскрывания.



**Рис. 2.** Виды доменных структур. *a* — решетка ЦМД при  $T_F = 300$  К, *b* — неупорядоченная ДС при  $T_2$ , *c* — решетка ЦМД при  $T_1 = 215$  К, *d* — аморфная решетка вблизи  $T_N$ .

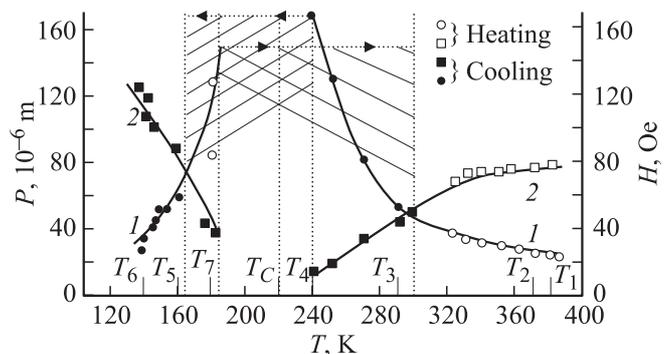
Таким образом, на основе анализа экспериментальных данных можно утверждать, что при изменении температуры пленки происходят структурные изменения доменной границы, т. е. внутри доменной границы происходят фазовые переходы, которые вызывают спонтанные фазовые переходы в решетке ЦМД.

### 3. Спин-переориентационные фазовые переходы

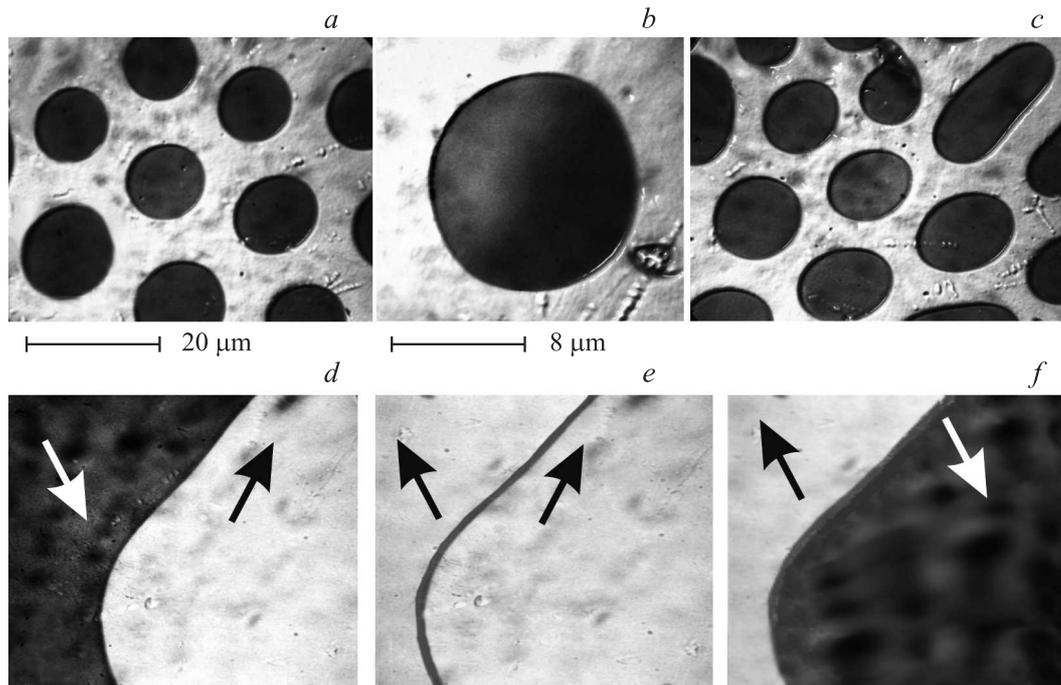
В исследуемых пленках вблизи точки компенсации наблюдаются СПФП. При  $T > T_C$  в обеих пленках наблюдается СПФП первого рода из осевой фазы в угловую фазу. В пленке № 2 при  $T < T_C$  наблюдается СПФП второго рода из одной угловой фазы в другую угловую фазу. На рис. 3 приведены температурные зависимости характеристик пленки № 2. Рассмотрим оба вида СПФП на примере пленки № 2. Эта пленка имеет слабую одноосную анизотропию, поэтому ЦМД и решетка ЦМД наблюдаются только в интервале температур  $T_1 - T_2$  (рис. 4, *a, b*). 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. 4, *b*). Происходит СПФП

первого рода из осевой фазы в угловую фазу. Зародышем ВПФП является доменная граница. Тот участок доменной границы ЦМД, ширина которого увеличилась, является зародышем угловой фазы. В самой доменной границе произошел фазовый переход, который и вызвал СПФП во всем образце [11].

По мере приближения к  $T_C$  ДС оказывается неустойчивой (рис. 4, *c*). Вблизи  $T_7$  (рис. 3) в доменах наблюдается цветовой обмен. Изменился цвет доменной границы, резко увеличилась ее ширина. Зеленые домены приобрели желтый цвет окружающего поля, и на сплош-



**Рис. 3.** Температурные зависимости характеристик пленки № 2. 1 — поле коллапса, 2 — период ДС.



**Рис. 4.** Виды ДС пленки № 2 при изменении  $T$ .  $a$  — решетка ЦМД, 370 К;  $b$  — ЦМД, 365 К;  $c$  — ДС, 290 К;  $d-f$  — стрелками показана проекция намагниченности внутри домена на плоскость пленки при 173 ( $d$ ), 176 ( $e$ ), 178 К ( $f$ ).

ном желтом поле видна только широкая коричневая доменная граница. Потом те домены, которые раньше были желтыми, приобрели зеленый цвет (рис. 4,  $d-f$ ). Таким образом, в интервале температур 173–178 К произошел спин-переориентационный фазовый переход. Этот СПФП является безгистерезисным и обратимым.

Обнаружено, что в пленке № 2 при 173–178 К поэтапно происходит фазовый переход из  $180^\circ$ -ной скрученной в  $60^\circ$  доменную границу, а затем в  $120^\circ$ -ную границу. Фазовый переход в доменной границе вызывает безгистерезисный спин-переориентационный фазовый переход второго рода из одной угловой фазы в другую угловую фазу по всему образцу. В соответствии с характером фазового перехода в доменной границе при спиновой переориентации происходит последовательная смена угловых фаз [11].

#### 4. Заключение

Результаты исследования поведения решетки ЦМД при изменении температуры показали, что доменная граница наиболее чувствительна к изменению магнитных характеристик пленки. При изменении температуры происходят структурные изменения в доменной границе, в результате чего изменяются доменные фазы. Фазовые переходы в доменной границе вызывают спонтанные фазовые переходы в решетке ЦМД. При приближении к температуре Нееля в доменной границе скачком уменьшается число ВБЛ, что вызывает в решетке ЦМД

фазовый переход первого рода в двухфазную структуру с сохранением числа доменов. При приближении к точке компенсации в доменной границе происходит фазовый переход путем раскручивания ВБЛ, что вызывает фазовый переход первого рода в решетке ЦМД с уменьшением числа доменов.

Вблизи точки компенсации в пленках с разной величиной магнитной анизотропии фазовый переход в доменной границе путем зародышеобразования вызывает СПФП первого рода из осевой фазы в угловую фазу во всем образце. Механизм СПФП не зависит от величины соотношения констант анизотропии  $K_u/K_1$ . В пленке со слабой осевой анизотропией при  $T < T_C$  поэтапно происходит фазовый переход в доменной границе, который вызывает СПФП второго рода из одной угловой фазы в другую угловую фазу. Характер фазового перехода в доменной границе определяет вид СПФП.

#### Список литературы

- [1] А. Малоземов, Дж. Слозуски. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. Мир, М. (1982). 382 с.
- [2] Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, А.В. Безус. ФТТ **45**, 1645 (2003).
- [3] В.А. Заблоцкий, Э.А. Завадский, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк. Докл. АН УССР. Сер. А, **11**, 49 (1986).
- [4] Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк. Препринт ДонФТИ АН УССР № 2 (110), Донецк (1986). 43 с.

- [5] Ju. Gorobets, I. Melnichuk, Ju. Pimenov. *J. Magn. Magn. Mater.* **115**, 204 (1992).
- [6] К.Б. Толпыго, В.А. Заблоцкий, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк. Докл. АН УССР. Сер. А, *4*, 74 (1987).
- [7] А.П. Круликовский, А.И. Подолян, И.К. Пухов. В сб.: Элементы и устройства на ЦМД и ВБЛ. М. (1987). С. 70.
- [8] Ф.Г. Барьяхтар, А.И. Линник, А.Н. Прудников, Е.Ф. Ходосов. *ФТТ* **27**, 2503 (1985).
- [9] Ф.Г. Барьяхтар, М.И. Еремина, А.О. Хребтов. *ФТТ* **27**, 1542 (1985).
- [10] М.В. Логунов, С.В. Юдина, М.В. Герасимов. Сб. тр. XIX Междунар. школы-семинара НМММ-2004. М. (2004). С. 150.
- [11] Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, А.В. Безус. *ФНТ* **37**, 150 (2011).