

## Влияние магнитоэластического давления на стабилизацию двухфазной доменной структуры в тонких пленках ферритов-гранатов

© Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк

Донецкий государственный университет,  
83055 Донецк, Украина

(Поступила в Редакцию 18 октября 2000 г.)

В тонких одноосных пленках ферритов-гранатов экспериментально исследовано сосуществование двух доменных фаз: спирального домена и решетки цилиндрических магнитных доменов. Доказано, что в основе такого сосуществования лежит условие равновесия — равенство магнитоэластических давлений двух фаз.

Показано, что величина магнитоэластического давления определяет возможность образования спиральной доменной структуры и ее вид.

В эпитаксиальных пленках ферритов-гранатов с перпендикулярной анизотропией наблюдается большое многообразие доменных структур (ДС), которое обусловлено как физическими свойствами материала пленки, так и действием магнитных полей и температуры. В последние годы особый интерес вызывает новый вид доменной структуры — спиральные домены (СД), возникающие под действием переменного и постоянного магнитных полей. В зависимости от условий формирования они обладают разными свойствами. Впервые одно- и двухрукавная спиральная доменная структура наблюдалась на массивных образцах сплава  $MnAlGe$  [1]. В последующих работах СД наблюдались в пленках в ферритов-гранатов с осью легкого намагничивания, перпендикулярной поверхности, в переменных и постоянных магнитных полях [2–6]. В [2–4] спиральные домены создавались из лабиринтной доменной структуры при наличии поля смещения, если вместе с ним приложено импульсное или синусоидальное магнитное поле частотой 100 Hz–6 kHz. Полученная спиральная структура существовала лишь в определенном интервале частот и величин магнитных полей, плавно перемещалась по образцу и характеризовалась определенным временем существования, т.е. была динамической доменной структурой. После снятия поля на большей части поверхности образца наблюдалась лабиринтная ДС. В работах [5,6] спиральные домены формировались также из лабиринтной ДС при воздействии постоянного магнитного поля, перпендикулярного поверхности пленки. Полученные СД представляли устойчивые статические образования при наличии внешнего поля определенной величины. При снятии поля оставались СД с меньшим числом витков, окруженные лабиринтной СД. В [7] были получены спиральные домены, стабилизированные окружающей их решеткой цилиндрических доменов (ЦМД). Такая доменная структура существовала при отсутствии магнитного поля. СД, окруженные решеткой ЦМД, создавались под действием монополярных импульсов частоты 200–600 Hz и амплитуды  $\sim 60$  Oe при отсутствии постоянного магнитного поля. Затем импульсное поле выключалось. В результате такого воздействия в пленке можно получить домен в виде спирали с числом витков от 10 до 30, окруженный решеткой ЦМД. Направление закручивания

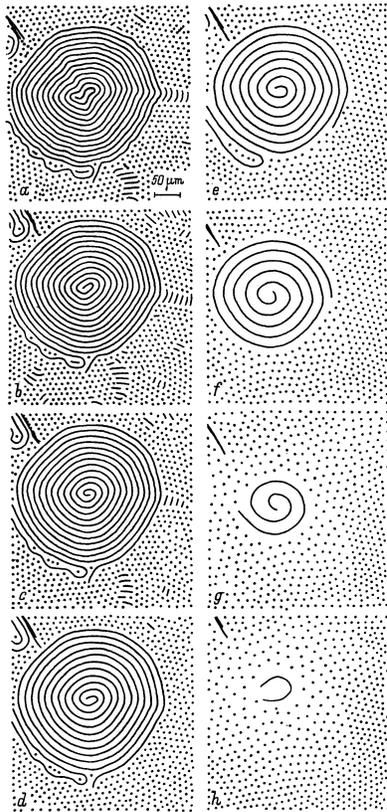
спирали любое, диаметр спирали от 100 до 1200  $\mu m$ . Если под действием магнитного поля или температуры СД разрушить, то можно заново создать СД, окруженный решеткой ЦМД, с теми же характеристиками.

В настоящей работе поставлена задача исследовать условие сосуществования двух доменных фаз: спирального домена и решетки ЦМД. Доменная структура наблюдалась с помощью эффекта Фарадея. Исследования проводились на магнитооптической установке, в которой предусмотрена возможность воздействия на пленку магнитных полей, векторы напряженности которых перпендикулярны плоскости пленки: монополярное импульсное поле и постоянное поле. Спиральная доменная структура создавалась способом, описанным выше. Для исследования были выбраны пленки ферритов-гранатов разного состава и толщины, в которых возможно сформировать решетку ЦМД импульсным магнитным полем. Исследуемые пленки выращены методом жидкофазной эпитаксии на подложке гадолиний-галлиевого граната с ориентацией (111). Осью легкого намагничивания перпендикулярна плоскости пленки. Фактор качества  $Q = (1.5–2.5)$ , намагниченность насыщения при комнатной температуре  $4\pi M_s = (140–280)$  G.

Условием равновесия двух доменных фаз является равенство их магнитоэластических давлений: давление решетки ЦМД должно быть равно давлению спирального домена. Концепция "магнитоэластического давления" введена в работе [8]. Авторами рассчитана термодинамическая величина, названная магнитоэластическим давлением решетки ЦМД и определенная как давление, приходящееся на единицу длины контура, охватывающего некоторую площадь решетки. Тогда магнитоэластическое давление представляет собой производную от энергии решетки ЦМД по площади с обратным знаком. В [8] показано, что для решетки ЦМД

$$P = 6(2\pi M_s)^2 C \left(\frac{d}{a}\right)^4 \frac{h}{a}, \quad (1)$$

где  $a$  — период решетки ЦМД,  $d$  — диаметр ЦМД,  $h$  — толщина пленки,  $M_s$  — намагниченность насыщения,  $C$  — константа. Поскольку для равновесной решетки ЦМД  $d/a \approx 0.74$ , т.е. величина постоянная [9], давление решетки уменьшается при увеличении  $a/h$ .

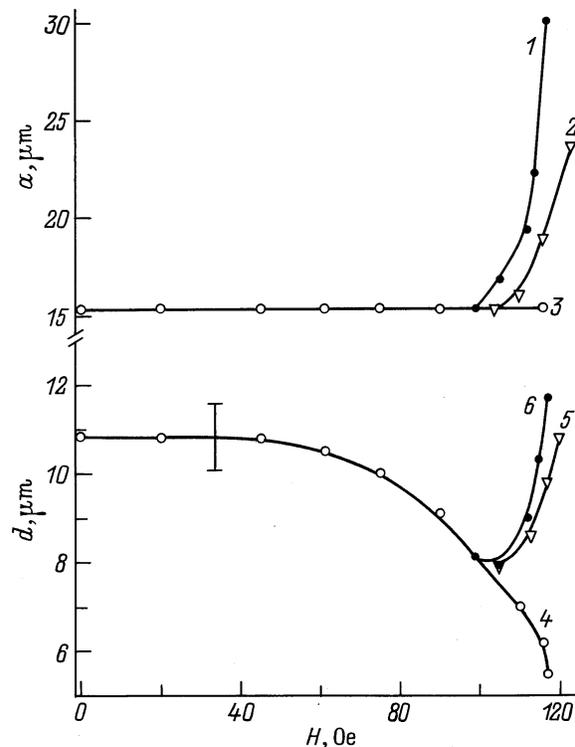


**Рис. 1.** Влияние магнитного поля смещения на спиральный домен.  $H$ , Oe:  $a - 0$ ,  $b - 60$ ,  $c - 75$ ,  $d - 90$ ,  $e - 105$ ,  $f - 112$ ,  $g - 115$ ,  $h - 117$ .

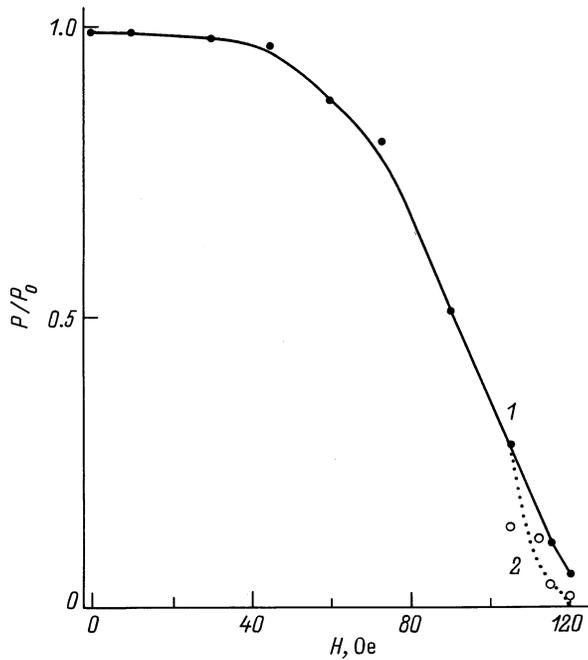
В [10] было рассчитано магнитоэлектрическое давление СД. Показано, что с ростом числа витков СД (или его радиуса) давление увеличивается. Таким образом, спиральный домен, окруженный решеткой ЦМД, может находиться в равновесии при вполне определенном соответствии между радиусом спирали и относительной величиной периода решетки цилиндрических доменов (РЦД)  $a/h$ .

Исследование сосуществования двух доменных фаз показало, что параметры решетки ЦМД  $a$  и  $d$  увеличиваются по мере удаления от спирального домена (рис. 1). Связано это с тем, что при создании СД импульсным магнитным полем в начальный момент формирования СД его магнитоэлектрическое давление ниже давления решетки ЦМД, так как радиус мал. В процессе формирования спирального домена растет число его витков и радиус, а следовательно, растет и магнитоэлектрическое давление СД. Когда наступает равенство давлений спирали и решетки ЦМД, рост СД прекращается. Число витков и радиус спирального домена заданы равновесными параметрами решетки ЦМД. Но число ЦМД измениться не может, что приводит к изменению параметров решетки по мере удаления от СД. Следовательно, окружающая спиральный домен решетка ЦМД является квазиравновесной. Равновесной является решетка ЦМД, которая создается без спирального домена, т. е. вдали от СД.

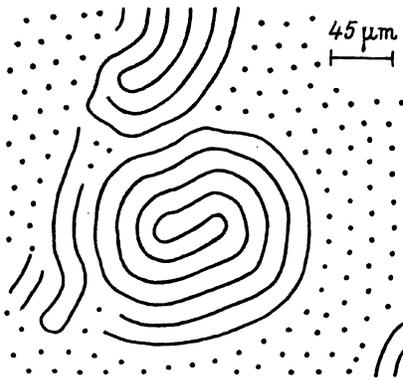
Проведено исследование влияния магнитного поля смещения на характеристики спирального домена и окружающей его решетки ЦМД (рис. 1). Отмечено, что параметры решетки ЦМД на разных расстояниях от спирали по-разному изменяются с ростом поля (рис. 2), сохраняя тенденцию уменьшения  $d$  при постоянном значении  $a$ . Затем, когда постоянная решетка  $a$  начинает расти, диаметр ЦМД, расположенных вблизи спирали, также растет. Причиной увеличения периода решетки является не уменьшение числа ЦМД, а расширение решетки ЦМД при уменьшении радиуса спирали за счет выравнивания давлений при стремлении к равновесию двух доменных фаз. Характерно, что  $a$  и  $d$  увеличиваются в этом интервале магнитного поля так, что  $d/a$  остается порядка 0.74 в пределах точности определения параметров ( $\sim 10\%$ ). Построенная по экспериментальным данным с использованием формулы (1) теоретическая кривая зависимости магнитоэлектрического давления решетки ЦМД от величины поля смещения (рис. 3) позволяет сделать следующие выводы. В определенном интервале полей давление решетки изменяется слабо, поэтому спиральный домен и решетка ЦМД остаются квазиравновесными. При достижении некоторого критического поля начинает двигаться внешний конец спирали, что приводит к уменьшению давления спирали и нарушению равновесия, сопровождающемуся перестройкой решетки ЦМД. Этот процесс завершается тем, что спираль исчезает, а всю плоскость пленки занимает решетка ЦМД.



**Рис. 2.** Влияние магнитного поля смещения на период решетки и диаметр цилиндрического магнитного домена, которые измерены на различных расстояниях от спирали,  $\mu\text{m}$ : 1, 6 — 30, 2, 5 — 90, 3, 4 — 180.



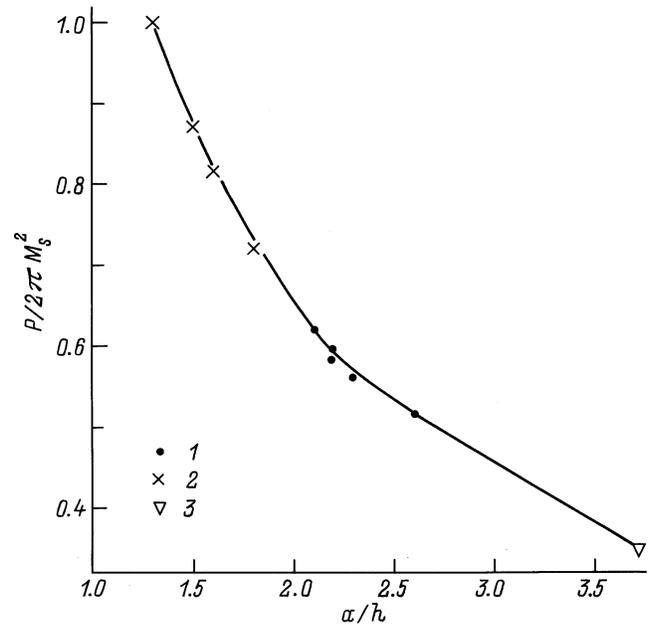
**Рис. 3.** Магнитостатическое давление решетки цилиндрических магнитных доменов в относительных единицах в зависимости от поля смещения. Характеристики решетки измерены на различных расстояниях от спирали,  $\mu\text{m}$ : 1 — 180, 2 — 30.



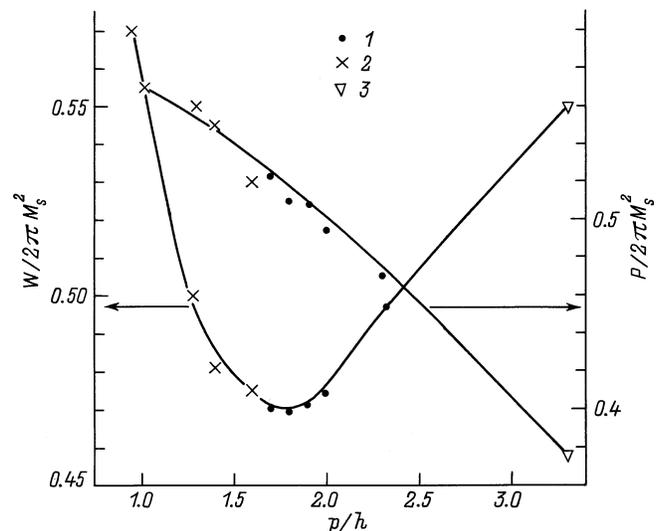
**Рис. 4.** Вид спирали, свернутой в петлю (спираль-петля).

Исследования на пленках различного состава и толщины показали, что магнитостатическое давление решетки ЦМД не только влияет на стабилизацию СД, но и определяет вид спиральной доменной структуры. СД, окруженный решеткой ЦМД, формируется в пленках, для которых  $2.0 \leq a/h \leq 2.7$ . Если  $a/h \leq 2.0$ , то образуется другой вид спиральной доменной структуры — спираль, свернутая в виде петли (спираль-петля). Как и СД, спираль-петля окружена решеткой ЦМД и находится в равновесном состоянии в отсутствие магнитного поля. В отличие от СД, имеющего внутренний и внешний концы, спираль-петля имеет два внешних конца (рис. 4). При действии на пленку поля смещения спираль-петля всегда разворачивается изнутри.

Используя экспериментальные данные по параметрам решетки ЦМД в различных пленках, по формуле (1) было рассчитано магнитостатическое давление решетки (рис. 5). На рис. 6 построена по формулам из [10] зависимость энергии и давления СД в относительных единицах



**Рис. 5.** Зависимость магнитостатического давления решетки цилиндрических магнитных доменов в относительных единицах от параметра решетки  $a/h$ : 1 — пленки, в которых формируется спиральный домен, 2 — пленки, в которых формируется спираль-петля, 3 — пленка, в которой спиральная доменная структура не формируется.



**Рис. 6.** Зависимость энергии и магнитостатического давления спирального домена, выраженных в относительных единицах, от периода спирали  $p/h$ : 1 — пленки, в которых формируется спиральный домен, 2 — пленки, в которых формируется спираль-петля, 3 — пленка, в которой спиральная доменная структура не формируется.

от  $p/h$  при  $N = 20$  и  $l/h = 0.1$  для исследованных пленок разной толщины и состава. Здесь  $p$  — период СД,  $N$  — число витков спирали,  $l$  — характеристическая длина пленки.

Сравнение рис. 5 и 6 позволяет объяснить, почему при разных  $a/h$  решетки ЦМД формируются различные виды СД. Видно, что для пленок, в которых  $2.0 \leq a/h \leq 2.7$ , формируется СД с  $1.5 < p/h < 2.5$ , для которых энергия минимальна. Если  $a/h > 2.7$ , давление решетки ЦМД мало, и условие равенства давлений магнитных фаз осуществляется лишь для  $p/h > 3.0$ , что, как видно из рис. 6, во-первых, уже не отвечает минимуму энергии СД, во-вторых, должно выполняться для СД большого радиуса ( $R = N \cdot p/h$ ), поэтому такая доменная структура не образуется, и на всей поверхности пленки будет образована решетка ЦМД.

При  $a/h \leq 2.0$  давление образовавшейся решетки ЦМД велико, поэтому радиус спирали, отвечающий условию равновесия фаз, фиксируется сразу при образовании первого витка, а затем рост числа витков до значения, отвечающего минимуму энергии, происходит за счет движения внутреннего конца спирали. Поэтому образуется спираль-петля с двумя внешними концами.

Таким образом, проведенные исследования показали, что магнитостатическое давление сосуществующих доменных фаз определяет их устойчивость. Кроме того, показано, что величина магнитостатического давления решетки ЦМД определяет возможность образования спиральной доменной структуры и ее вид.

## Список литературы

- [1] Г.С. Кандаурова. Изв. вузов. Физика **8**, 148 (1971).
- [2] Г.С. Кандаурова, А.Э. Свицерский. Письма в ЖЭТФ **47**, 8, 410 (1988).
- [3] Ф.В. Лисовский, Е.Г. Мансветова. ФТТ **31**, 5, 273 (1989).
- [4] Г.С. Кандаурова, Ю.В. Иванов. ФММ **76**, 1, 49 (1993).
- [5] А.П. Гесь, В.В. Федотова, А.К. Богущ, Т.А. Горбачевская. Письма в ЖЭТФ **52**, 9, 1079 (1990).
- [6] В.В. Федотова, А.П. Гесь, Т.А. Горбачевская. ФТТ **37**, 9, 2835 (1995).
- [7] К.В. Ламонова, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк. ФТВД **6**, 1, 33 (1995).
- [8] В.Г. Барьяхтар, Ю.И. Горобец. Цилиндрические магнитные домены и их решетки. Наук. думка, Киев (1988).
- [9] В.Г. Барьяхтар, Э.А. Завадский, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк. ФТТ **26**, 9, 2381 (1984).
- [10] J.A. Mamalui, K.V. Lamonova, E.N. Soika. J. Phys. IV France **8**, 2, 393 (1988).