

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

Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, В.В. Смирнов

## РОЛЬ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ОСОБЕННОСТЕЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Донецкий национальный университет  
ул. Университетская, 24, г. Донецк, 83001, Украина  
E-mail: postmaster@univ.donetsk.ua

*Экспериментально изучены сосуществование разных доменных фаз и фазовые переходы (ФП) в доменных структурах (ДС) феррит-гранатовых пленок. Для объяснения экспериментальных результатов использована концепция магнитостатического давления. Показана результативность применения последнего при изучении особенностей ДС.*

**Ключевые слова:** феррит-гранатовая пленка, доменная структура, фазовый переход, магнитостатическое давление

### 1. Введение

Доменные структуры магнетиков в течение многих лет являются объектом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований, вызванных интересами как фундаментальной науки, так и прикладной.

Особое место среди магнетиков занимают эпитаксиальные пленки ферритов-гранатов, большое разнообразие ДС которых обусловлено физическими свойствами материала пленки, а также воздействием магнитных полей и температуры. Пленки ферритов-гранатов привлекают внимание исследователей, во-первых, благодаря оптической прозрачности и, во-вторых, ввиду высокой чувствительности доменной структуры к воздействию внешних факторов: магнитных полей, температуры, механических напряжений, лазерного излучения и т.д. С применением эффекта Фарадея можно визуально наблюдать все процессы, происходящие в ДС при изменении температуры  $T$  или магнитного поля  $H$ : упорядочение и разупорядочение ДС, кинетику спонтанных и индуцированных полем ФП в доменной структуре и т.д.

Определенный вид ДС создает доменную фазу. Наблюдается сосуществование разных доменных фаз, например решетки ЦМД и полосовой структуры, спирального домена и решетки ЦМД. Нами изучены сосуществование разных доменных структур и фазовые переходы в них.

Феррит-гранатовая пленка – это термодинамическая система, в которой каждый домен можно рассматривать как отдельную частицу. Для объяснения экспериментальных результатов мы применяли термодинамический подход с

использованием химпотенциала (т.е. энергии, приходящейся на один домен) и концепцию магнитоэлектрического давления. В результате появилась возможность провести сравнительную характеристику этих двух методов и выяснить, что концепция магнитоэлектрического давления является более результативной при описании особенностей ДС. Цель данной работы – показать эффективность применения концепции магнитоэлектрического давления при изучении сосуществования разных доменных фаз и фазовых переходов в ДС.

## 2. Образцы и методика исследований

Вид и поведение ДС при изменении температуры и магнитного поля зависят от выбранного кристаллографического направления пленки и условий формирования структуры. Учитывая это, необходимо хотя бы кратко описать образцы и методику экспериментальных исследований.

Нами изучены особенности ДС в феррит-гранатовых пленках разного химического состава, выращенных методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний-галлиевом гранате. Плоскость пленки перпендикулярна оси  $\langle 111 \rangle$ , фактор качества  $Q > 5$ . Исследования проведены на магнитооптической установке в температурном интервале  $90 \text{ К} - T_N$  ( $T_N$  – температура Нееля). Визуальное наблюдение и фотографическую регистрацию ДС осуществляли с помощью эффекта Фарадея. В установке предусмотрена возможность воздействия на ДС магнитными полями, перпендикулярными плоскости пленки (т.е. вдоль кристаллографического направления  $\langle 111 \rangle$  исследуемых пленок): импульсным монополярным и полем смещения двух направлений. Приняты следующие направления: если вектор  $\mathbf{H}$  антипараллелен вектору намагниченности  $\mathbf{M}$  внутри ЦМД, то  $H > 0$ ; если параллелен, то  $H < 0$ . Диапазоны величин напряженности магнитного поля смещения  $H = 0 - 200 \text{ Ое}$ , импульсного –  $H_{\text{imp}} = 0 - 60 \text{ Ое}$  (импульс в форме меандра).

Поскольку при изменении температуры или магнитного поля в ДС происходят изменения, в основе которых лежат законы термодинамики, при экспериментальном изучении особенностей ДС необходимо знать ее начальное термодинамическое состояние, т.е. является ли исходная ДС термодинамически равновесной, или же она при данных значениях температуры и поля существует как метастабильная. В [1,2] созданы теоретические модели равновесных регулярных ДС: решетки ЦМД и полосовой структуры как функции характеристической длины пленки, намагниченности насыщения и напряженности внешнего магнитного поля. В результате стало возможным рассчитать параметры равновесной ДС. Например, для гексагональной решетки ЦМД, сформированной импульсным полем при отсутствии поля смещения, был получен параметр плотности упаковки  $y = d/a = 0.743$ , где  $d$  – диаметр ЦМД,  $a$  – период решетки [3].

В данной работе исследованы термодинамически равновесные ДС, способы формирования которых описаны в [4]. Основным фактором равновесности ДС можно считать число создаваемых доменов, при котором домен-

ной структуре соответствует состояние с минимальной энергией. Термодинамически равновесное число доменов в формируемой ДС можно получить в том случае, если на пленку действовать импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки, достаточно длительное время. Частоту, амплитуду и длительность импульса подбирают индивидуально. С ростом числа доменов уменьшается магнитостатическая энергия, но увеличивается энергия доменных границ. Когда между этими энергиями возникает такое соотношение, при котором свободная энергия ДС оказывается минимальной, мы получаем термодинамически равновесную ДС. При эксперименте критериями равновесности ДС являются два фактора: 1) ДС сохраняется неограниченно долго при сохранении условий формирования, т.е. температуры, поля смещения; 2) ДС можно вновь создать при тех же условиях с прежними параметрами. В работах [5,6] было показано экспериментально, что решетка ЦМД, сформированная импульсным полем в отсутствие поля смещения, имеет параметр порядка  $y = 0.74$ , что согласуется с результатами [1,2], и является равновесной только при температуре формирования  $T_f$ .

При изменении температуры пленки решетка сохраняется с прежними параметрами  $a$  и  $d$ , но она уже не является равновесной, так как ее энергия не соответствует минимуму.

### 3. Результаты и их обсуждение

Для объяснения результатов исследования сосуществования разных доменных фаз или ФП в ДС в работе используется концепция магнитостатического давления. Впервые эта концепция для решетки ЦМД была введена в работе [1], в которой ЦМД рассматриваются как частицы, обладающие одинаковым магнитным зарядом и расположенные в магнитной среде с противоположным зарядом. Между этими частицами действуют силы отталкивания. В результате благодаря центральным силам взаимодействия и создается решетка ЦМД. Таким образом, именно центральные силы взаимодействия между ЦМД создают магнитостатическое давление решетки  $P$ , введенное в [1] как величина удельной энергии, приходящаяся на единицу длины контура, охватывающего площадь данной ДС:  $P = -\partial U/\partial V$ , где  $U$  – магнитостатическая энергия решетки;  $V$  – объем, занимаемый решеткой; знак « $\rightarrow$ » указывает на то, что давление обусловлено отталкиванием частиц.

После преобразований [1]:

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

где  $a$  – период решетки,  $d$  – диаметр ЦМД,  $h$  – толщина пленки,  $M_s$  – намагниченность насыщения,  $C$  – константа.

По нашему представлению, магнитостатическое давление – это величина, численно равная силе, действующей на единицу площади поверхности, окружающей ДС (это сила магнитостатического происхождения, направленная

наружу по нормали к этой поверхности). Поскольку для равновесной решетки ЦМД  $y = d/a = 0.74$ , то ее магнитоэластическое давление имеет вид

$$P = BM_s^2 \frac{h}{a}, \quad (2)$$

где  $B$  – константа.

### 3.1. Сосуществование спирального домена и решетки ЦМД

С целью изучения условий сосуществования двух доменных фаз рассмотрим влияние поля смещения на поведение ДС пленки состава  $(Y\text{SmLuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$ .

Импульсным магнитным полем создается гигантский спиральный домен (СпД), окруженный решеткой ЦМД, затем поле выключается (рис. 1,а). Такая

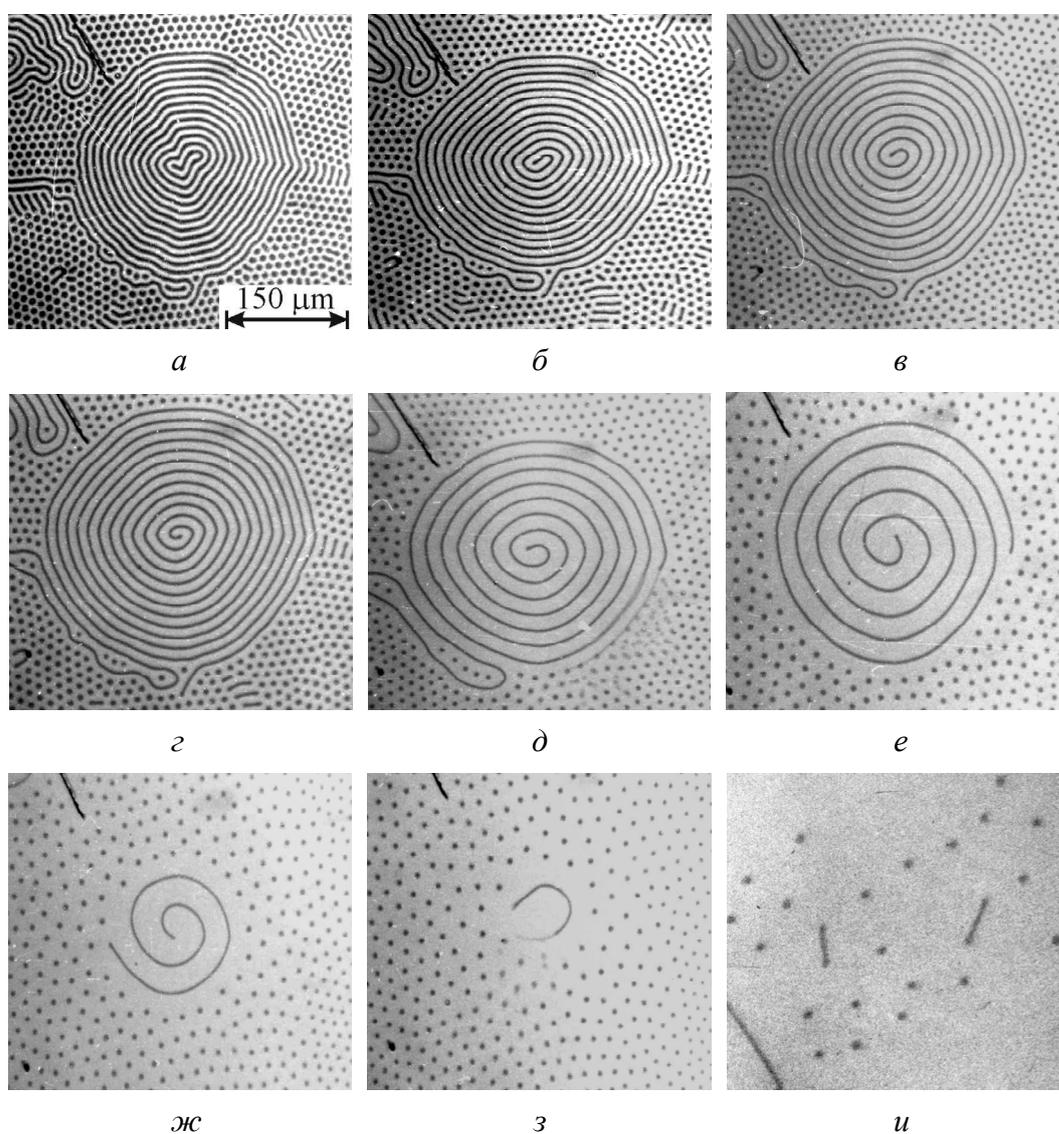


Рис. 1. Влияние на спиральный домен поля смещения  $H$ , Ое: а – 0, б – 60, в – 75, г – 90, д – 105, е – 112, ж – 115, з – 117

двухфазная система является равновесной при отсутствии поля смещения. Условие равновесия фаз – равенство их магнитоэластических давлений. В [7] рассчитана полная энергия СпД, в [8] теоретически показано, что давление СпД повышается с увеличением его радиуса.

Если на ДС действовать полем  $H > 0$ , то диаметр ЦМД уменьшается, что согласно (1) приводит к уменьшению давления решетки. Следовательно, нарушается равновесие между спиралью и решеткой ЦМД. В результате внешний конец спирали отрывается, она начинает раскручиваться (рис. 1, д), уменьшается ее давление, и равновесие восстанавливается. При этом решетка ЦМД занимает освободившееся место. На рис. 1 зафиксирован процесс восстановления равновесия между спиралью и решеткой ЦМД при определенных величинах поля.

Таким образом, благодаря оптической прозрачности пленки с помощью эффекта Фарадея можно визуально наблюдать процесс уравнивания давлений. Это наглядный пример роли магнитоэластического давления в сосуществовании разных доменных фаз.

### 3.2. Спонтанный фазовый переход в решетке ЦМД

Исследования проведены на пленке состава  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  ( $T_N = 437$  К, температура магнитной компенсации  $T_k = 120$  К). Температурные зависимости магнитных характеристик пленки представлены на рис. 2.

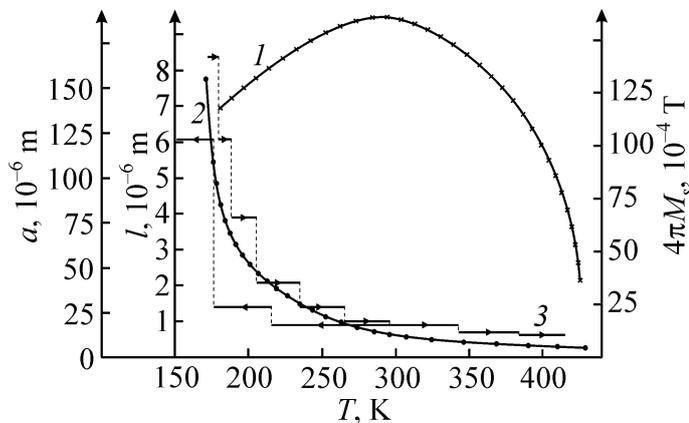


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности насыщения  $4\pi M_s$  (—x—), характеристической длины  $l$  (—●—) и параметра решетки ЦМД  $a$  (—) пленки  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$

Решетка ЦМД, сформированная при температуре  $T_f$ , сохраняется в некотором температурном интервале (хотя при других температурах является уже неравновесной), на границах которого происходят ФП первого рода. Например, решетка, сформированная при  $T_f = 300$  К, сохраняется при понижении температуры до 215 К и при повышении до 345 К (рис. 2). Вновь сформированные решетки ЦМД, в свою очередь, сохраняются при изменении температуры в некотором интервале. При температуре ФП период решетки изменяется скачком (рис. 2, кривая 3).

Фазовые переходы, происходящие при понижении и повышении температуры, отличаются своим характером. Наличие гистерезиса и характер ФП

определяются температурной зависимостью характеристической длины пленки (рис. 2, кривая 2). При приближении к точке компенсации (понижение  $T$ ) в решетке происходит ФП с уменьшением числа доменов в новую решетку с большими параметрами. На рис. 3, *a, б, в* показан такой переход (решетки *a* в решетку *в*). Нам удалось зафиксировать кинетику этого перехода (рис. 3, *б*). На снимке видно, что одни домены уменьшаются в размере и исчезают, а оставшиеся домены увеличиваются.

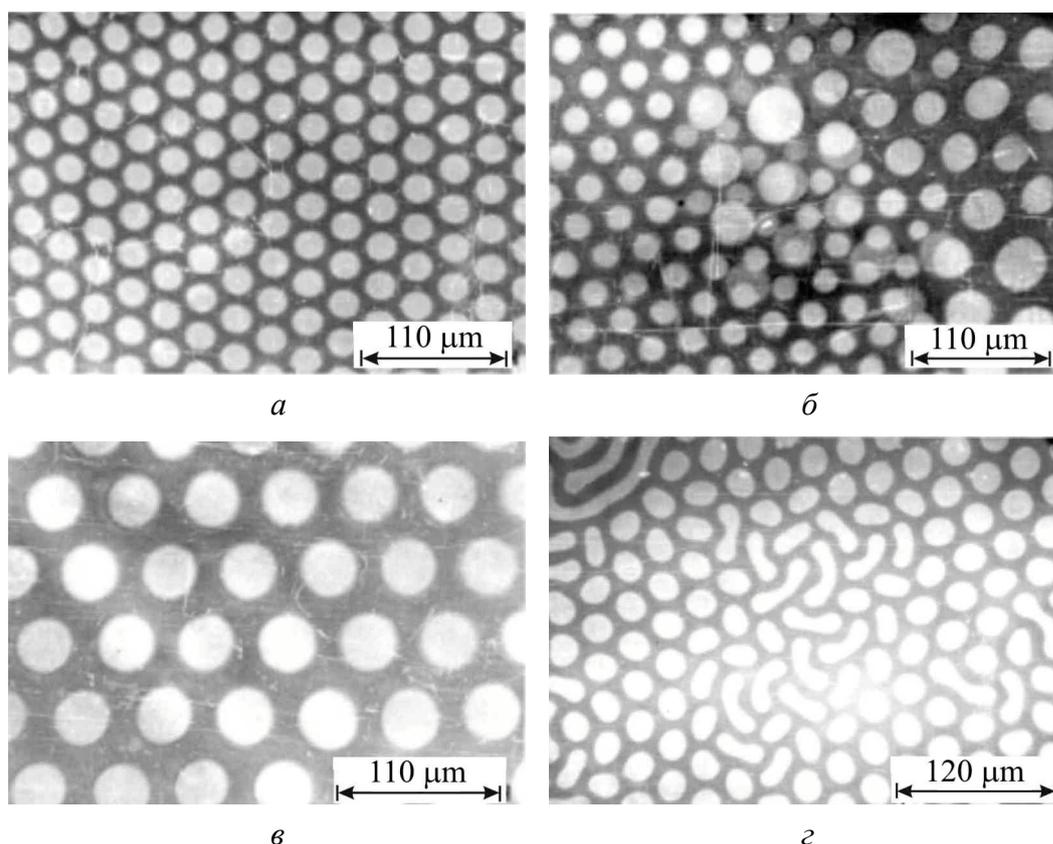
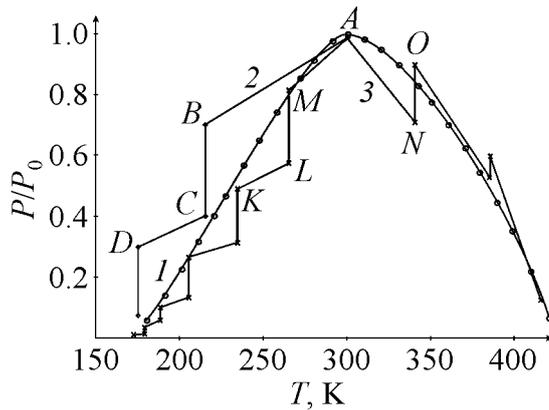


Рис. 3. Виды ДС пленки  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  при  $T$ , К: *a* – 215, *б* – 175, *в* – 175, *г* – 232

При удалении от  $T_k$  в решетке происходит ФП первого рода с сохранением числа доменов в двухфазную систему, состоящую из разделенных стрипами блоков новой решетки с меньшими параметрами (рис. 3, *г*).

С учетом экспериментальных данных по формулам (1) и (2) вычислены магнитоэлектрические давления как равновесных решеток ЦМД, сформированных при каждой точке температуры, так и неравновесных, т.е. стабильных в исследуемом температурном интервале. На рис. 4 представлены температурные зависимости относительных величин давлений этих решеток. По этим кривым можно проследить, что происходит с давлением ДС при ФП.

Рассмотрим ФП в решетке при приближении к температуре  $T_k$  (рис. 2, 4). Решетка, сформированная при 300 К, является равновесной, и ее  $P/P_0 = 1$  (рис. 4, точка *A*). При понижении температуры решетка сохраняется в интервале



**Рис. 4.** Температурные зависимости  $P/P_0$  решеток ЦМД пленки  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ : 1 – для равновесных решеток ЦМД; 2, 3 – для решеток ЦМД, стабильных в некотором температурном интервале соответственно при приближении к точке магнитной компенсации и удалении от  $T_k$

температур 300–215 К, при этом ее давление падает за счет уменьшения  $M_s$  (см. формулу (1)) (отрезок  $AB$ ). Тем не менее в точке  $B$  давление этой решетки значительно больше давления равновесной решетки, соответствующей 215 К (точка  $C$ ). Решетка с прежними параметрами оказывается энергетически невыгодной. Поскольку характеристическая длина пленки  $l$  при приближении к  $T_k$  растет, а для равновесной решетки параметр  $y = \text{const}$ , должны расти значения  $a$  и  $d$ , что возможно лишь при уменьшении числа доменов. Поэтому большое магнитоэлектрическое давление способствует коллапсу части доменов (отрезок  $BC$ ), в результате чего происходит ФП к равновесной решетке ЦМД с большими параметрами.

Рассмотрим ФП в решетке ЦМД при удалении от температуры  $T_k$ . Например, равновесная решетка, сформированная при 232 К (точка  $K$ ), сохраняется в температурном интервале 232–265 К. При этом давление ее увеличивается (отрезок  $KL$ ), но при 265 К оно значительно меньше давления равновесной решетки, соответствующей этой температуре (точка  $M$ ). Для равновесной решетки при росте  $M_s(T)$  повышается и  $P(T)$ . Поскольку при равновесии  $y = \text{const}$ , с уменьшением  $l$  уменьшается как период решетки, так и диаметр ЦМД, т.е. число доменов должно расти. Но для возникновения новых доменов необходима затрата добавочной энергии, например энергии импульсного магнитного поля. Поэтому число доменов сохраняется, и возникают блоки решетки ЦМД с меньшими параметрами при  $y = \text{const}$ , а все пространство между ними занимают страйпы, образовавшиеся из оставшихся вне блоков ЦМД. Такое соотношение между давлениями решеток способствует росту объема, занимаемого страйпами. Давление такой ДС меньше давления равновесной решетки ЦМД при этой температуре (точка  $L$ ). Когда импульсным полем из страйпов создается дополнительное число ЦМД, решетка переходит в равновесное состояние (точка  $M$ ).

### Выводы

На механизм ФП при приближении к точке компенсации оказывают влияние два вида давления: магнитоэлектрическое давление решетки ЦМД и давление внутри ЦМД. При приближении к температуре  $T_k$  увеличивается

характеристическая длина пленки, т.е. растет поверхностная плотность энергии доменных границ ЦМД ( $\sigma = 4\pi M_s^2 l$ ). Силы поверхностного натяжения создают внутри ЦМД давление (подобно давлению внутри мыльного пузыря), которое обратно пропорционально диаметру домена. Роль магнито-статического давления решетки ЦМД сводится к тому, что, будучи больше равновесного, оно, в свою очередь, приводит к сжатию и исчезновению части доменов до тех пор, пока давление не уменьшится до равновесной величины.

В механизме ФП при удалении от температуры  $T_k$  основную роль играет магнито-статическое давление решетки ЦМД. Будучи меньше равновесного, оно позволяет части ЦМД увеличить свои размеры. Ввиду анизотропии давления решетки эти ЦМД растут, вытягиваются в страйпы вдоль направления  $\langle 112 \rangle$ , т.е. ЦМД являются зародышами новой фазы – страйпов. При этом давление оставшейся решетки ЦМД повышается до равновесной величины. Как показано в [9,10], сосуществующие фазы решетки ЦМД и страйп-доменов находятся в равновесии, если в точке перехода равны их магнито-статические давления. Из всего вышесказанного видно, что характер ФП в решетках ЦМД определяется магнито-статическим давлением решетки.

Таким образом, магнито-статическое давление не только позволяет понять механизм ФП перехода в решетке ЦМД, но и определяет характер этого перехода. Что касается сосуществования доменных фаз, то результат действия магнито-статического давления можно визуально наблюдать на примере спирали и решетки ЦМД. Да и сам гигантский СпД является равновесным и устойчивым в отсутствие магнитного поля только потому, что его стабилизирует решетка ЦМД, т.е. его удерживает магнито-статическое давление решетки.

1. В.Г. Барьяхтар, Ю.И. Горобец, Цилиндрические магнитные домены и их решетки, Наукова думка, Киев (1988).
2. А.Н. Богданов, Д.А. Яблонский, ФТТ **22**, 680 (1980).
3. А. Эшенфельдер, Физика и техника цилиндрических магнитных доменов, Мир, Москва (1983).
4. А. с. 1341681 СССР, МКИ<sup>4</sup> G 11 C 11/14, Способ формирования решетки цилиндрических магнитных доменов в магнитоодноосной пленке, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Г.С. Ярош, Опубл. 30.09.87, Открытия. Изобрет. № 36 (1987), с. 235.
5. В.Г. Барьяхтар, Э.А. Завадский, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, ФТТ **26**, 2381 (1984).
6. Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Препринт ДонФТИ-86-2(110), Донецк (1986).
7. К.В. Ламонова, Ю.А. Мамалуй, ФТВД **7**, № 2, 82 (1997).
8. Ju.A. Matalui, K.V. Lamonova, E.N. Soika, J. Phys IV France **8**, 393 (1998).
9. V.A. Zablotskii, Ju.A. Matalui, Mod. Phys. Lett. **9**, 1352 (1995).
10. В.А. Заблоцкий, К.В. Ламонова, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, ФТВД **6**, № 2, 34 (1996).

Ю.О. Мамалуй, Ю.А. Сірюк, В.В. Смірнов

## РОЛЬ МАГНІТОСТАТИЧНОГО ТИСКУ ПРИ ВИВЧЕННІ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДОМЕННОЇ СТРУКТУРИ

Експериментально вивчено співіснування різних доменних фаз та фазові переходи у доменних структурах ферит-гранатових плівок. Для пояснення експериментальних результатів використано концепцію магнітостатичного тиску. Показано результативність застосування магнітостатичного тиску під час вивчення особливостей доменної структури.

**Ключові слова:** ферит-гранатова плівка, доменна структура, фазовий перехід, магнітостатичний тиск

*Ju.A. Mamalui, Ju.A. Siryuk, V.V. Smirnov*

## THE ROLE OF MAGNETOSTATIC PRESSURE AT STUDYING THE PECULIARITIES OF DOMAIN STRUCTURE

The coexistence of different domain phases and phase transitions in domain structures of the ferrite-garnet films have been experimentally studied. The concept of magnetostatic pressure is used to explain the experimental data. The effectiveness of using the magnetostatic pressure to study the peculiarities of domain structure has been shown.

**Keywords:** ferrite-garnet film, domain structure, phase transition, magnetostatic pressure

**Fig. 1.** Spiral domain influenced by displacement field  $H$ , Oe:  $a - 0$ ,  $b - 60$ ,  $c - 75$ ,  $d - 90$ ,  $e - 105$ ,  $f - 112$ ,  $g - 115$ ,  $h - 117$

**Fig. 2.** The temperature dependences of saturation magnetization  $4\pi M_s$  ( $-x-$ ), characteristic length  $l$  ( $-●-$ ) and bubble lattice parameter  $a$  ( $-$ ) of  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  film

**Fig. 3.** Types of DS in  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  film at  $T$ , K:  $a - 215$ ,  $b - 175$ ,  $c - 175$ ,  $d - 232$

**Fig. 4.** The temperature dependences of  $P/P_0$  of bubble lattice in  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  film:  $1$  – for equilibrium bubble lattices;  $2, 3$  – for bubble lattices stable in some temperature range (at approaching the point of magnetic compensation and at a distance from  $T_k$ , accordingly)