

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

Ю.А. Сирюк, А.В. Безус, В.В. Смирнов

## РОЛЬ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В МЕХАНИЗМЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ СОТОВОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПЛЕНОК ФЕРРИТА-ГРАНАТА

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

Статья поступила в редакцию 24 сентября 2012 года

*Экспериментально исследовано поведение двух видов сотовой доменной структуры (СДС) в температурном интервале от точки магнитной компенсации до температуры Нееля. Показано, что СДС сохраняется в температурном интервале  $\Delta T$ , на границах которого происходят фазовые переходы первого рода, отличающиеся своим характером: при приближении к точке компенсации в СДС происходит фазовый переход в двухфазную структуру с сохранением числа доменов и увеличением параметров СДС; при удалении от точки компенсации – фазовый переход с уменьшением числа доменов и увеличением параметров СДС. Для объяснения результатов исследования использована концепция магнитоэластического давления, что позволило определить механизм фазового перехода.*

**Ключевые слова:** феррит-гранатовая пленка, решетка ЦМД, сотовая доменная структура, фазовый переход, магнитоэластическое давление

*Експериментально досліджено поведінку двох видів стільникової доменної структури (СДС) в температурному інтервалі від точки магнітної компенсації до температури Нееля. Показано, що СДС зберігається в температурному інтервалі  $\Delta T$ , на границях якого відбуваються фазові переходи першого роду, що відрізняються своїм характером: при наближенні до точки компенсації у СДС відбувається фазовий перехід у двофазну структуру зі збереженням числа доменів і збільшенням параметрів СДС; при віддаленні від точки компенсації – фазовий перехід зі зменшенням числа доменів і збільшенням параметрів СДС. Для пояснення результатів досліджень використано концепцію магнітоеластичного тиску, що дало можливість визначити механізм фазового переходу.*

**Ключові слова:** ферит-гранатова плівка, ґратка ЦМД, стільникова доменна структура, фазовий перехід, магнітоеластичний тиск

### 1. Введение

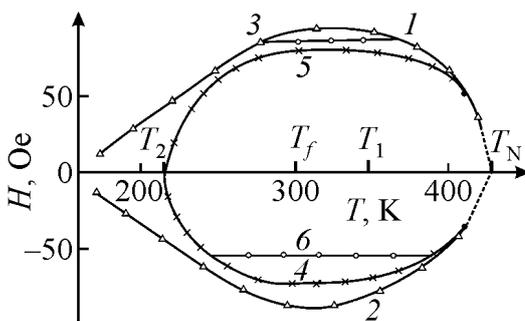
Проблема устойчивости доменных структур (ДС) при изменении поля смещения  $H$  и/или температуры  $T$  давно привлекает внимание экспериментаторов и теоретиков. Внешнее магнитное поле нарушает магнитное равно-

весие доменов, под его воздействием уменьшается область доменов с противоположной полю намагниченностью. Под действием поля смещения, совпадающего с направлением намагниченности внутри домена, ЦМД растет и при определенной величине поля смещения преобразуется в шестиугольник, а решетка ЦМД – в сотовую доменную структуру.

Исследование СДС началось с экспериментальной работы [1], а в [2] было получено аналитическое выражение для магнитостатической энергии СДС, что позволило установить зависимость между ее равновесными параметрами и характеристиками магнитной пленки, определить полевой интервал существования СДС, рассчитать поле перехода в мономерное состояние. Позже экспериментально было обнаружено, что при увеличении поля смещения и температуры СДС превращается в ячеистую структуру [3,4]. В работах [5,6] показано, что индуцируемый увеличением поля смещения переход от СДС к ячеистой ДС имеет характерные признаки фазового перехода первого рода.

В данной работе изучены особенности двух видов сотовой доменной структуры (СДС<sub>1</sub> и СДС<sub>2</sub>), отличающихся от исследованных в [3,7]. Свойства СДС, как и решетки ЦМД, зависят от способа формирования. В отличие от СДС, полученных действием  $H$  на аморфную решетку ЦМД [1,3,5,7], в настоящей работе исследуются «жесткие» СДС.

Импульсным магнитным полем  $H_{\text{puls}}$ , перпендикулярным плоскости пленки, при  $H = 0$  формируется равновесная «жесткая» решетка ЦМД (РЦД<sub>1</sub>) с плотностью гексагональной упаковки  $y = d/a = 0.74$ , где  $d$  – диаметр ЦМД,  $a$  – период решетки [8]. Другая решетка ЦМД (РЦД<sub>2</sub>) формируется  $H_{\text{puls}}$  в присутствии поля смещения  $-15 < H < 30$  Ое [9–11]. На рис. 1 представлены температурные зависимости полей коллапса решеток ЦМД: кривая 3 –  $H_c(T)$  РЦД<sub>1</sub> и кривая 5 –  $H_c(T)$  РЦД<sub>2</sub>. При формировании  $H_{\text{puls}}$  в доменных границах создаются вертикальные блоховские линии [3,12,13]. При воздействии  $H$  на РЦД<sub>1</sub> число вертикальных блоховских линий в доменных границах уменьшается [3]. СДС<sub>1</sub> формируется воздействием  $H$  на уже сформированную РЦД<sub>1</sub>; СДС<sub>2</sub> – действием импульсного магнитного поля в присутствии  $H$  [9]. При этом в доменных границах СДС<sub>2</sub> создается меньшее число вертикальных блоховских линий [3,12], поэтому поле перехода в неупорядоченное состояние (поле «взрыва»  $H_{b_2}$ ) СДС<sub>2</sub> меньше поля  $H_{b_1}$  перехода СДС<sub>1</sub> (рис. 1).



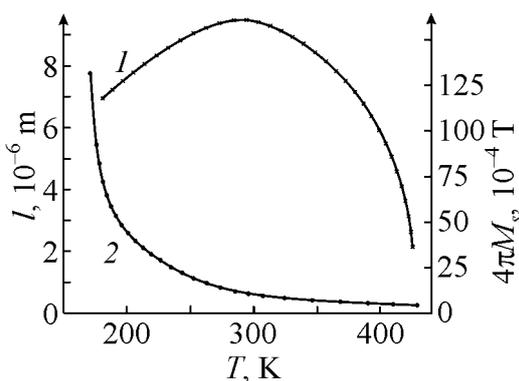
**Рис. 1.**  $H$ - $T$ -диаграмма пленки  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ : 1, 2 –  $H_c(T)$  ЦМД,  $H_m(T)$ ; 3, 5 –  $H_c(T)$  соответственно РЦД<sub>1</sub>, РЦД<sub>2</sub>; 4, 6 –  $H_b(T)$  соответственно СДС<sub>1</sub>, СДС<sub>2</sub>, где  $H_c$  – поле коллапса,  $H_m$  – поле перехода в мономерное состояние,  $H_b$  – поле «взрыва»,  $T_f$  – температура формирования ДС,  $(T_1 - T_2)$  – температурный интервал устойчивости РЦД<sub>1</sub> и РЦД<sub>2</sub> при  $H = 0$

ных границах создаются вертикальные блоховские линии [3,12,13]. При воздействии  $H$  на РЦД<sub>1</sub> число вертикальных блоховских линий в доменных границах уменьшается [3]. СДС<sub>1</sub> формируется воздействием  $H$  на уже сформированную РЦД<sub>1</sub>; СДС<sub>2</sub> – действием импульсного магнитного поля в присутствии  $H$  [9]. При этом в доменных границах СДС<sub>2</sub> создается меньшее число вертикальных блоховских линий [3,12], поэтому поле перехода в неупорядоченное состояние (поле «взрыва»  $H_{b_2}$ ) СДС<sub>2</sub> меньше поля  $H_{b_1}$  перехода СДС<sub>1</sub> (рис. 1).

В работе поставлена задача экспериментально исследовать в интервале температур  $90\text{ К} - T_N$  влияние поля смещения на фазовые переходы в СДС, а также определить закономерности и особенности механизма фазовых переходов, применяя концепцию магнитоэлектрического давления.

## 2. Образцы и методика исследований

Исследована пленка состава  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_3\text{O}_{12}$ , выращенная методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний-галлиево-гранате с развитой поверхностью  $\langle 111 \rangle$ . Толщина пленки  $h = 8.2 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ , температура Нееля  $T_N = 428\text{ К}$ , температура магнитной компенсации  $T_c = 120\text{ К}$ , при комнатной температуре намагниченность насыщения  $4\pi M_s = 16 \cdot 10^{-3}\text{ Т}$ , фактор качества  $Q \geq 5$  и  $l = 0.8 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ . На рис. 2 показаны температурные зависимости магнитных характеристик пленки. Исследования проводили на магнитооптической установке, в которой предусмотрено действие двух магнитных полей, перпендикулярных плоскости пленки: импульсного  $H_{\text{puls}}$  (частота  $400\text{ Гц}$ , амплитуда  $60\text{ Ое}$ ) и поля смещения  $H$ . Если направление  $H$  совпадает с направлением намагниченности внутри ЦМД, то  $H < 0$ , если их направления противоположны,  $H > 0$ . Для создания СДС применяется  $H < 0$ .



**Рис. 2.** Температурные зависимости намагниченности насыщения  $4\pi M_s$  (1) и характеристической длины  $l$  (2)

разом, именно центральные силы взаимодействия между ЦМД создают магнитоэлектрическое давление решетки.

В работе [15] рассчитано давление СДС:

$$P = 8\pi M_s^2 \left[ 12 \frac{R}{a} - \frac{H}{4\pi M_s} - 7 \right], \quad (1)$$

где  $a$  – период СДС,  $R$  – радиус окружности, вписанной в основание призматического домена,  $H$  – магнитное поле смещения,  $M_s$  – намагниченность насыщения.

### 3. Влияние $H$ на поведение двух СДС при $T = \text{const}$

При действии на РЦД<sub>1</sub> (рис. 3,а)  $H < 0$  диаметр ЦМД увеличивается. При  $H = -20$  Ое период гексагональной решетки остается постоянным, а размер домена увеличивается, и ЦМД приобретают форму шестиугольника. Образуется СДС<sub>1</sub>, плотность которой  $\gamma = 0.82$  (рис. 3,б). С увеличением  $H$  домены растут, и при  $H = H_{b_1}$  ( $H_{b_1} = -70$  Ое) происходит «взрыв» СДС<sub>1</sub>, т.е. фазовый

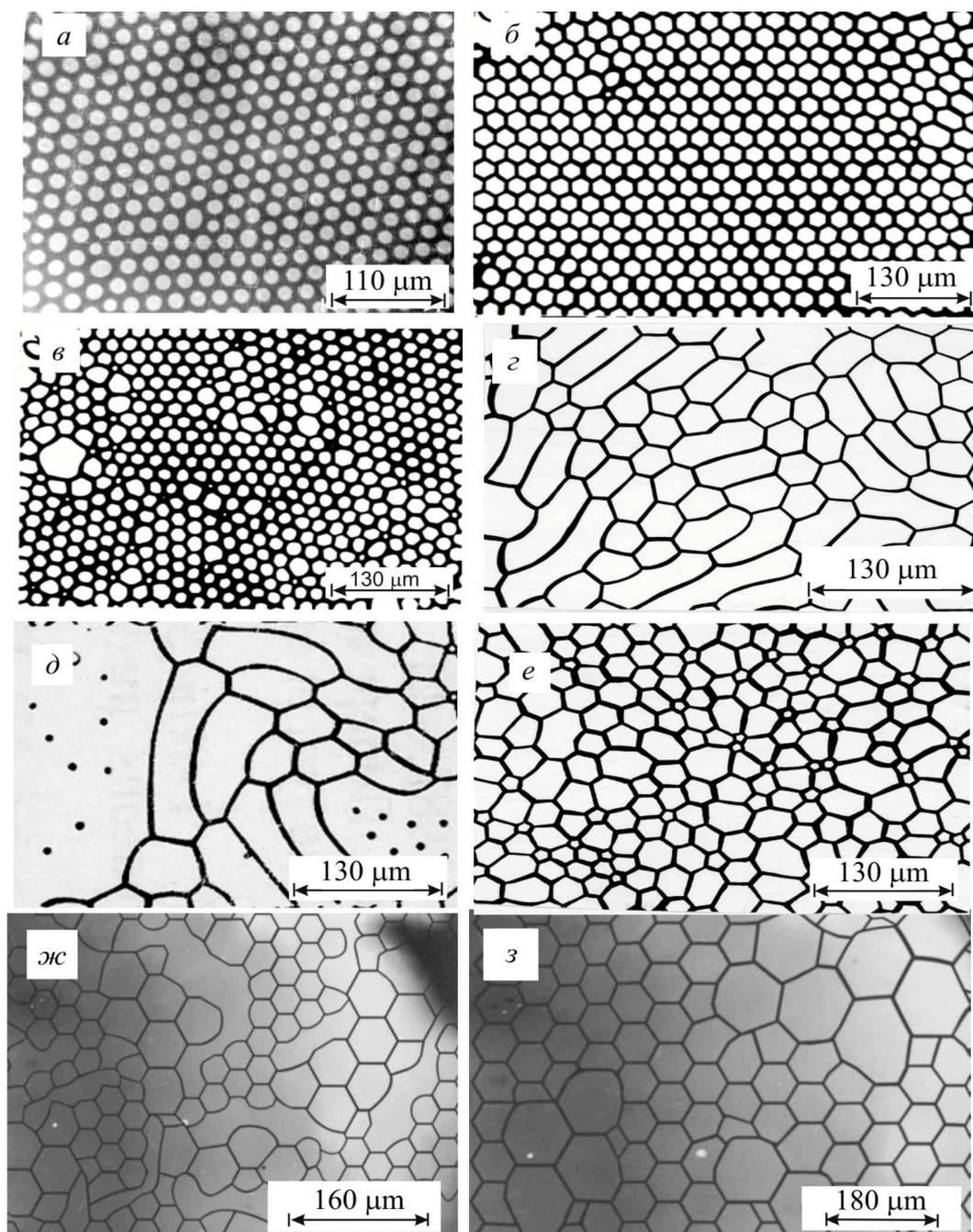


Рис. 3. Виды ДС при  $T = \text{const}$ : а – РЦД, б – СДС, в – СДС<sub>1</sub> при  $H_{b_1}$ , г – «сети», д – ДС при  $H = -120$  Ое, е – СДС<sub>2</sub> при  $H_{b_2}$ , ж – СДС при  $T_2$ , з – СДС при  $T_1$

переход первого рода СДС в ячеистую ДС [5,6,10] (рис. 3,в). Новая ДС представляет собой нерегулярно расположенные пяти- и семилепестковые «цветы». В каждом «цветке» центральный домен маленький, круглый (при увеличении  $H$  именно он удерживает от развала всю структуру), а «лепестки» – крупные домены, имеющие форму неправильного шестиугольника. При наличии дефектов в СДС «взрыв» происходит на неоднородностях при поле, на 2–3 Ое меньше  $H_{b_1}$ . При воздействии  $H_{\text{puls}}$  на ДС, образующуюся после «взрыва», возникает новая ДС (крупные домены в виде вытянутых шестиугольников), напоминающая сети (рис. 3,з). При  $H = -120$  Ое и действии  $H_{\text{puls}}$  эта ДС исчезает. При дальнейшем воздействии на пленку импульсным полем и полем смещения  $H = -120$  Ое формируется решетка ЦМД с малой плотностью упаковки ( $y = 0.3$ ), причем домены в ней имеют противоположную полярность (рис. 3,д). При  $H = -135$  Ое пленка переходит в монодоменное состояние. Если на ДС, наблюдающуюся после «взрыва», не действовать  $H_{\text{puls}}$ , то с увеличением  $H$  домены растут, и пленка переходит в монодоменное состояние.

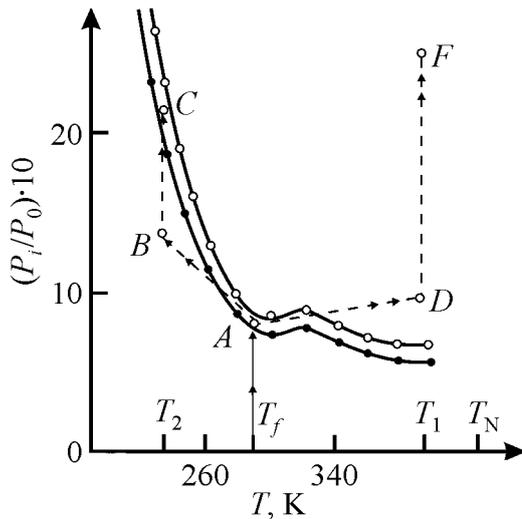
СДС<sub>2</sub> создается  $H_{\text{puls}}$  при  $H = -45$  Ое. Визуально СДС<sub>2</sub> и СДС<sub>1</sub> неотличимы. «Взрыв» СДС<sub>2</sub> происходит при  $H_{b_2} = -55$  Ое, т.е.  $|H_{b_2}| < |H_{b_1}|$  (см. рис. 1).

Новая ДС имеет тоже вид пятилепестковых «цветков» с редкими вкраплениями семилепестковых (рис. 3,е).

Таким образом, в СДС при  $H_{b_1}$  и  $H_{b_2}$  происходят фазовые переходы первого рода, при которых СДС<sub>1</sub> и СДС<sub>2</sub> переходят из упорядоченной ДС в неупорядоченную ячеистую структуру с уменьшением числа доменов [5,6,10].

#### 4. Влияние $T$ и $H$ на фазовые переходы в СДС

СДС<sub>1</sub>, сформированная при определенной температуре  $T_f$ , является равновесной и имеет плотность упаковки  $y = 0.82$ . Она сохраняется, хотя является неравновесной, в некотором температурном интервале  $\Delta T$ , на границах которого происходят фазовые переходы первого рода [10,11,16]. Величина  $\Delta T$  зависит от поля смещения  $H$ , под действием которого находится СДС (см. рис. 1). Например, СДС<sub>1</sub>, сформированная при  $T_f$  и  $H = -50$  Ое, сохраняется в интервале  $T_1 - T_2$  (рис. 4). При приближении к  $T_c$  ( $T_2$ ) СДС<sub>1</sub> скачком распадается на разделенные страйпами блоки новой СДС с большими параметрами  $d$  и  $a$ , соответствующими равновесной СДС<sub>1</sub> при  $T_2$ , но соотношение этих параметров при  $T_2$  остается  $y = 0.82$  (см. рис. 3,ж). Это один вид фазового перехода первого рода с сохранением числа доменов. При удалении от  $T_c$  ( $T_1$ ) СДС скачком переходит в новую СДС с большими параметрами, соответствующими равновесной СДС при  $T_1$ , и плотностью  $y = 0.82$  без образования страйпов (рис. 3,з). Это другой вид фазового перехода первого рода с уменьшением числа доменов.



**Рис. 4.** Температурная зависимость  $P/P_0$  СДС: ●, ○ – равновесная СДС соответственно при  $-35$  и  $-65$  Ое; точка  $A$  – равновесная СДС при  $-50$  Ое;  $AB$  и  $AD$  – неравновесная СДС при  $-50$  Ое

Для объяснения экспериментальных результатов по формуле (1) рассчитано магнитостатическое давление двух СДС, образованных при  $H = -35$  Ое и  $H = -65$  Ое, формируемых при разных  $T$ . Это равновесные СДС. На рис. 4 представлены температурные зависимости отношения  $P/P_0$ , где  $P_0$  – давление равновесной СДС<sub>1</sub>, сформированной при  $T_f$  и  $H = -20$  Ое,  $P$  – давление СДС при разных  $T$ . Если СДС сформировать при  $T_f$  и  $H = -50$  Ое, то ее  $P/P_0$  будет отвечать точке  $A$  (рис. 4). С понижением  $T$  эта СДС сохраняется до  $T_2$ , но уже не является равновесной. Намагниченность насыщения при охлаждении пленки уменьшается (см. рис. 2), поэтому  $P/P_0$  СДС отвечает точке  $B$ . При нагревании СДС сохраняется до  $T_1$ , при которой давление отвечает точке  $D$ . Анализ рис. 4 показывает, что оба вида фазовых переходов отличаются только тем, что при первом виде давление неравновесной СДС (точка  $B$ ) меньше, чем давление равновесной (точка  $C$ ). Поэтому возможно появление зародышей страйпов. При втором виде фазового перехода давление неравновесной СДС (точка  $D$ ) больше, чем равновесной, т.е. зародыши страйпов не могли образоваться.

Для анализа фазовых переходов в СДС приведена таблица, которая позволяет связать характер фазовых переходов, происходящих в СДС при изменении  $T$ , с характеристиками пленки. Из рис. 4 и таблицы видно, что давление равновесной СДС при понижении  $T$  увеличивается, а при повышении – уменьшается, т.е. давление равновесной СДС зависит от знака изменения характеристической длины  $\Delta l$  с изменением температуры (см. рис. 2). Характер фазовых переходов в СДС также зависит от знака изменения  $\Delta l$ .

Таблица

**Фазовые переходы в СДС**

Изменение характеристик пленки с температурой	Фаза, наблюдаемая после ФП
$\downarrow T$	$M_s \downarrow, l \uparrow, P \uparrow \Rightarrow a \uparrow, d \uparrow, n = \text{const}$ Двухфазная система, состоящая из блоков СДС и страйпов
$\uparrow T$	$M_s \downarrow, l \downarrow, P \downarrow \Rightarrow a \uparrow, d \uparrow, n \downarrow$ Сотовая доменная структура

### Выводы

В результате проведенного анализа можно сделать такой вывод. Давление равновесной СДС и характер фазовых переходов зависят от знака изменения характеристической длины пленки. При  $\Delta l > 0$  (приближение к точке компенсации (рис. 2)) давление равновесной СДС растет, при  $\Delta l < 0$  (удаление от  $T_c$ ) – уменьшается. Характер фазовых переходов в СДС зависит от  $\Delta l$  следующим образом: при  $\Delta l > 0$  в СДС происходит фазовый переход в двухфазную структуру с увеличением параметров СДС и сохранением числа доменов; при  $\Delta l < 0$  – фазовый переход в новую СДС с большими параметрами и уменьшением числа доменов.

1. *I. Kaczer, R. Gemperle, Czech. J. Phys.* **11**, 510 (1961).
2. *В.С. Герасимчук, Ю.И. Горобец, ФММ* **45**, 660 (1978).
3. *H. Gemperle, L. Murtinova, J. Kaczer, Acta Phys. Slov.* **35**, 216 (1985).
4. *В.А. Заблоцкий, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, УФЖ* **33**, 403 (1988).
5. *K.L. Babcock, R.M. Westervelt, Phys. Rev.* **A40**, 2022 (1989).
6. *K.L. Babcock, R. Seshadri, and R.M. Westervelt, Phys. Rev.* **A41**, 1952 (1990).
7. *В.А. Заблоцкий, Ю.А. Мамалуй, Е.Н. Сойка, ФТВД* **3**, № 4, 16 (1993).
8. *А. с. 1461259 СССР. Способ формирования равновесной решетки цилиндрических магнитных доменов, В.А. Заблоцкий, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Г.С. Ярош, Дата под. О. 18.09.1987.*
9. *А. с. 1341681 СССР. Способ формирования решетки цилиндрических магнитных доменов в магнитоодноосной пленке, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Г.С. Ярош, Дата под. О. 05.05.1986.*
10. *Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Э.А. Завадский, Изв. РАН. Сер. физ.* **69**, 1023 (2005).
11. *Э.А. Завадский, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк, Изв. РАН. Сер. физ.* **70**, 966 (2006).
12. *А. Малоземов, Дж. Слонзуски, Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами, Мир, Москва (1982).*
13. *В.К. Власко-Власов, А.Ф. Хатиков, ФТТ* **32**, 2034 (1990).
14. *В.Г. Барьяхтар, Ю.И. Горобец, Цилиндрические магнитные домены и их решетки, Наукова думка, Киев (1988).*
15. *В.А. Заблоцкий, Автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. наук, Донецк (1995).*
16. *Ю.А. Сирюк, Автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. наук, Донецк (2009).*

*Yu.A. Siryuk, A.V. Bezus, V.V. Smirnov*

### THE ROLE OF MAGNETOSTATIC PRESSURE IN THE MECHANISM OF PHASE TRANSITIONS OF HONEYCOMB DOMAIN STRUCTURE OF FERRITE-GARNET FILMS

The features of two types of honeycomb domain structure (HDS) are experimentally studied at the change of the magnetic displacement field ( $H$ ) and the temperature ( $T$ ). HDS is created by the effect of  $H < 0$  on the formed lattice of cylindrical magnetic do-

mains (LCD). The field  $H < 0$  is aligned with magnetization of saturation within CMD. HDS properties are determined by the method of lattice formation. LCD is formed by the pulse magnetic field which is perpendicular to the film plane: LCD<sub>1</sub> at  $H = 0$ ; LCD<sub>2</sub> at  $H \neq 0$ . Being formed in such a way, HDS<sub>1</sub> and HDS<sub>2</sub> are rigid because pulse field produces vertical Bloch lines in domain boundaries. Field and temperature effect on phase transitions in HDS are studied in the present work. The conception of magnetostatic pressure is applied to estimation of regularities and peculiarities of the mechanism of the phase transitions. Under  $H$  effect, at  $T = \text{const}$ , the first-order phase transitions (PTs) occur in HDS, when HDS<sub>1</sub> and HDS<sub>2</sub> are transformed from the ordered domain structure to disordered cellular structure with lower number of domains. When the temperature changes, HDS stays in the temperature interval  $\Delta T$ . At the ends of the interval, the first-order phase transitions take place, being different in the character. The pressure of equilibrium HDS and the character of PT are determined by the sign of the change of the characteristic length of the film  $l$ . When  $\Delta l > 0$  (at the approach to the compensation point ( $T_c$ )), the pressure of equilibrium HDS increases; at  $\Delta l < 0$  (at the motion away of  $T_c$ ) the pressure is reduced. The character of phase transitions in HDS depends on  $\Delta l$  as follows: at  $\Delta l > 0$ , phase transition to diphasic structure with increased number of HDS parameters and conserved domain number occurs; at  $\Delta l < 0$ , the phase transition forms new HDS with large parameters and lower number of domains.

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

**Fig. 1.**  $H$ - $T$ -diagram of the  $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  film: 1, 2 –  $H_c(T)$  CMD,  $H_m(T)$ ; 3, 5 –  $H_c(T)$  LCD<sub>1</sub>, LCD<sub>2</sub>, respectively; 4, 6 –  $H_b(T)$  HDS<sub>1</sub>, HDS<sub>2</sub>, respectively, where  $H_c$  is collapse field,  $H_m$  is the field of transition to the monodomain state,  $H_b$  is «blast» field,  $T_f$  is the temperature of DS formation,  $(T_1 - T_2)$  is the temperature interval of LCD<sub>1</sub>, LCD<sub>2</sub> stability at  $H = 0$

**Fig. 2.** The temperature dependences of the saturation magnetization  $4\pi M_s$  (1) and the characteristic length  $l$  (2)

**Fig. 3.** The type of DS at the  $T = \text{const}$ :  $a$  – LCD,  $b$  – HDS,  $c$  – HDS<sub>1</sub> at  $H_{b_1}$ ,  $d$  – «nets»,  $e$  – DS at  $H = -120$  Oe,  $e$  – HDS<sub>2</sub> at  $H_{b_2}$ ,  $ж$  – HDS at  $T_2$ ,  $з$  – HDS at  $T_1$

**Fig. 4.** The temperature dependences of  $P/P_0$  of the HDS: ●, ○ – an equilibrium HDS at  $-35$  and  $-65$  Oe; point  $A$  – the equilibrium HDS at  $-50$  Oe;  $AB$  and  $AD$  – the nonequilibrium HDS at  $-50$  Oe