

# Особенности динамики доменов в монокристаллических пленках $(\text{Bi,Y,Lu,Pr})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (210)

© В.В. Рандошкин, В.А. Полежаев, Ю.Н. Сажин, Р.Р. Сысоев

Совместная хозрасчетная лаборатория „Магнитооптоэлектроника“ Института общей физики Российской академии наук при Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева, 430000 Саранск, Россия

(Поступила в Редакцию 31 июля 2002 г.  
В окончательной редакции 10 декабря 2002 г.)

Методом высокоскоростной фотографии исследованы динамические доменные структуры в висмутосодержащих монокристаллических пленках  $(\text{Bi,Y,Lu,Pr})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ , выращенных методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на подложках  $(\text{Gd,Ga})_3(\text{Mg,Zr,Ga})_5\text{O}_{12}$  с ориентацией (210). При разных температурах определены диапазоны импульсных магнитных полей, в которых имеют место однонаправленная анизотропия скорости доменных стенок и пространственные искажения движущейся доменной стенки.

Динамика доменных стенок (ДС) в висмутосодержащих монокристаллических пленках ферритов-гранатов (Вс-МПФГ) с ромбической магнитной анизотропией по сравнению с магнитоодноосными пленками обладает рядом особенностей, включая анизотропию скорости ДС, искажения формы динамических доменов, нестационарность движения ДС, локальное вращение намагниченности вблизи движущейся ДС и др. [1–10]. Наиболее сильно эти особенности проявляются в Вс-МПФГ  $(\text{Bi,Y,Lu,Pr})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ , выращенных методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на подложках  $(\text{Gs,Ca})_3(\text{Mg,Zr,Ga})_5\text{O}_{12}$  с ориентацией (210) [8].

Целью настоящей работы является исследование влияния импульсного магнитного поля и температуры на однонаправленную анизотропию скорости ДС и искажения формы динамических доменов в этих пленках.

Параметры Вс-МПФГ  $(\text{Bi,Y,Lu,Pr})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$  с ориентацией (210) при комнатной температуре

Параметр	Образец № 1	Образец № 2
$h, \mu\text{m}$	6.9	17.7
$w, \mu\text{m}$	14.0	20.2
$4\pi M_s, \text{G}$	70	83
$H_K, \text{Oe}$	3200	2700
$Q$	46	36
$H_{K_r}, \text{Oe}$	913	208

В работе приводятся данные для двух образцов, в одном из которых (образец № 1) однонаправленная анизотропия скорости ДС была ярко выражена, а в другом (образец № 2) она была незначительной, но наблюдались пространственные искажения ДС. Параметры образцов приведены в таблице, где  $h$  — толщина пленки,  $w$  — равновесная ширина полосовых доменов,  $4\pi M_s$  — намагниченность насыщения,  $H_K$  — поле одноосной магнитной анизотропии,  $Q$  — фактор качества материала,  $H_{K_r}$  — поле ромбической магнитной анизотропии.

Параметры магнитной анизотропии определялись методом фазовых переходов путем регистрации и Фурье-анализа азимутальных зависимостей планарной  $H_{in}^*$  и нормальной  $H_b^*$  компонент постоянного магнитного поля, при которых имеет место однородное зарождение доменов [11,12]. Азимутальные зависимости  $H_{in}^*(\varphi)$  и  $H_b^*(\varphi)$  показаны на рис. 1.

Регистрация динамических доменных структур проводилась на установке высокоскоростной фотографии с временем однократной экспозиции  $\sim 10 \text{ ns}$  [13]. Необ-

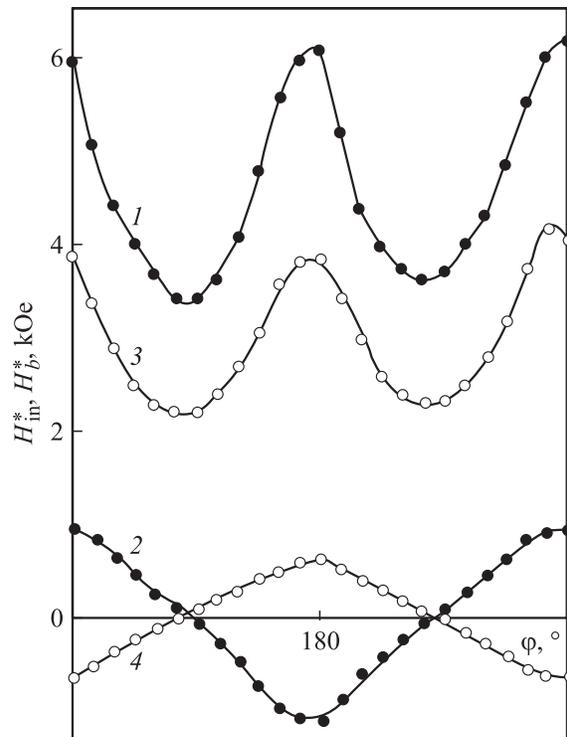
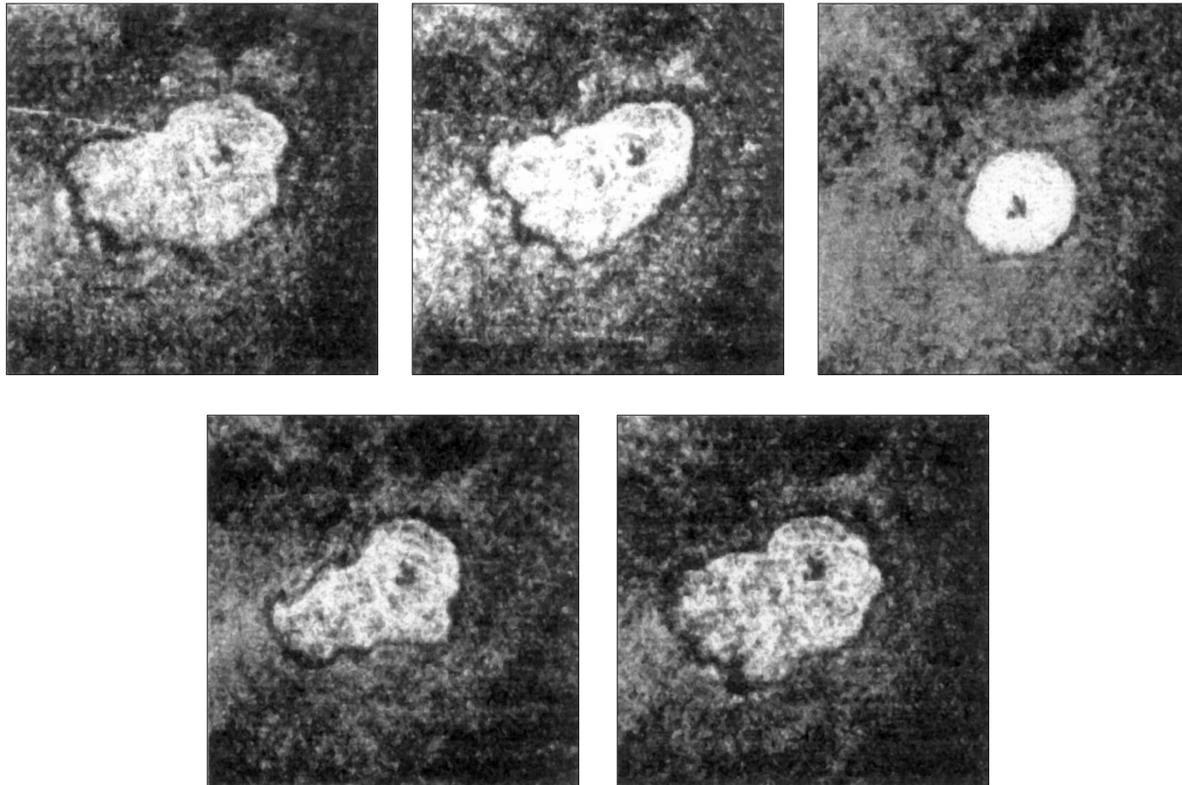


Рис. 1. Азимутальные зависимости планарной  $H_{in}^*$  (1, 3) и нормальной  $H_b^*$  (2, 4) компонент постоянного магнитного поля, при которых имеет место однородное зарождение доменов в образцах № 1 (1, 2) и № 2 (3, 4)



**Рис. 2.** Конфигурации ДОН в образце № 2 при поле смещения  $H_p = -127$  Ое в один и тот же момент времени действия импульса магнитного поля с амплитудой  $H_p = 284$  Ое.

ходимость использования этого метода обусловлена тем, что при проведении экспериментов в одних и тех же условиях детали конфигурации динамических доменных структур не повторяются (рис. 2). В исходном состоянии Вс-МПФГ намагничивались до насыщения полем смещения  $H_b$ , приложенным вдоль нормали к плоскости пленки. Импульсное магнитное поле  $H_p$  прикладывалось в противоположном направлении с помощью пары плоских катушек, в центре между которыми располагался исследуемый образец. Регистрировалось изображение расширяющихся полосовых доменов, находящихся в исходном состоянии в поле  $H_b$ , близком к полю насыщения Вс-МПФГ, или изображение доменов с обратной намагниченностью (ДОН), зарождающихся на дефектах пленки при импульсном перемагничивании. В последнем случае при достаточно большом удалении ДС от центра зародышеобразования действующее магнитное поле равно [14]

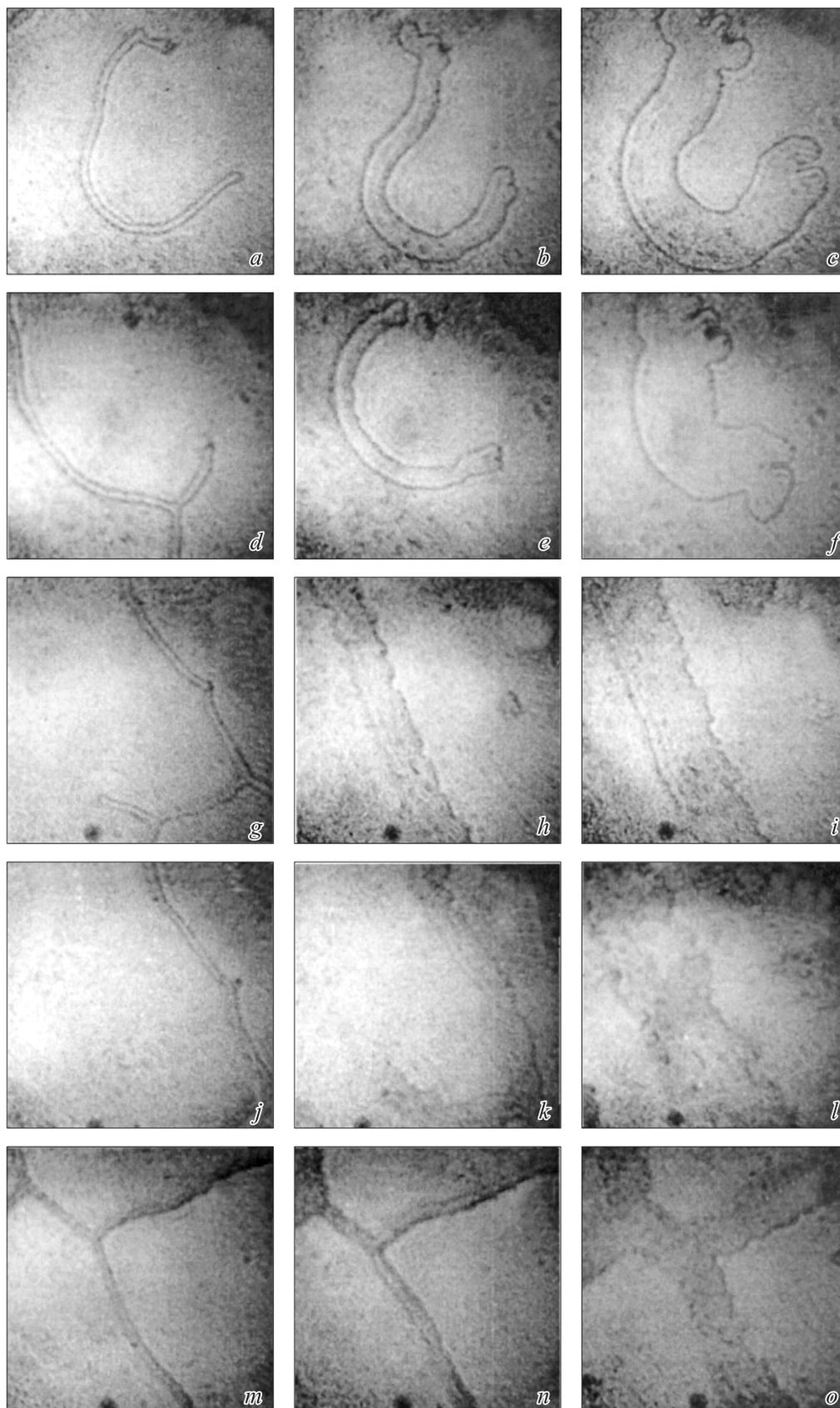
$$H = H_p - H_b. \quad (1)$$

Тот факт, что поле  $H_K$  для образца № 1 в 4.3 раза выше, чем для образца № 2 (см. таблицу), по-видимому, является причиной отсутствия однонаправленной анизотропии скорости ДС в образце № 1 из-за более высокого эффективного значения безразмерного параметра затухания, зависящего от планарного (внешнего или эффективного внутреннего) магнитного поля [15–18].

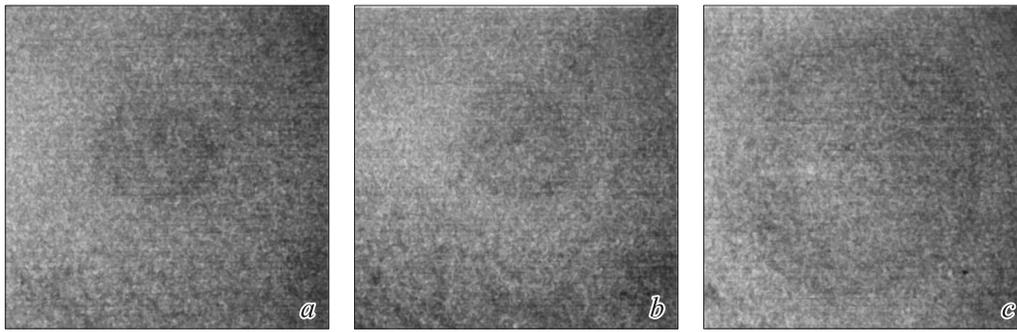
Пространственные искажения движущейся ДС полюсового домена в образце № 1 наиболее ярко проявляются на рис. 3,  $h$ ,  $i$ ,  $k$ ,  $l$  и  $o$ . Для ДОН, зарождающегося на точечном дефекте, искажения движущейся ДС также имеют место, хотя и не слишком ярко выражены (рис. 4).

Зависимость скорости ДС  $V$  от действующего магнитного поля  $H$  для образца № 1 приведена на рис. 5,  $a$ . Видно, что первый линейный участок кривой  $V(H)$  пересекает ось абсцисс при отрицательных значениях  $H$ . Это, как и в работе [19], объясняется наклоном оси легкого намагничивания [20,21] в Вс-МПФГ с ориентацией (210), поэтому действующее магнитное поле нельзя рассчитывать с помощью соотношения (1).

Изображения динамических доменных структур, наблюдающихся в образце № 2 при разном действующем магнитном поле, приведены на рис. 6. Зарождение ДОН происходит в полях  $H \geq 25$  Ое. В малых действующих полях ДОН имеет цилиндрическую форму, а при  $60 \leq H \leq 70$  Ое — эллиптическую, причем искажения ДС отсутствуют. При достижении значения  $H \approx 110$  Ое в одном из направлений начинает проявляться однонаправленная анизотропия скорости ДС. При этом появляется клиновидный участок ДС (остальная часть ДС остается цилиндрической). При дальнейшем повышении поля  $H$  участки ДС, движущиеся с повышенной скоростью, занимают все большую часть периметра



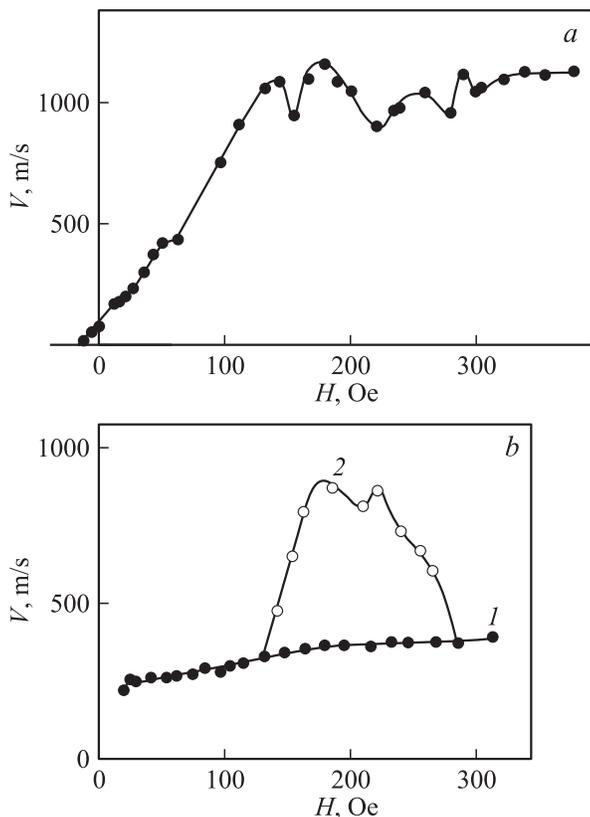
**Рис. 3.** Конфигурация расширяющихся полосовых доменов в образце № 1 при поле смещения  $H_b = -34$  Oe во время действия импульса магнитного поля с амплитудой  $H_p = 43$  (a-c), 59 (d-f), 74 (g-i), 115 (j-l), 147 Oe (m-o) в моменты времени  $t = 0$  (a), 29 (b), 98 (c); 0 (d), 17 (e), 80 (f); 0 (g), 19 (h), 39 (i); 0 (j), 20 (k), 40 (l); 0 (m), 18 (n), 34 ns (o).



**Рис. 4.** Конфигурация ДОН в образце № 1 при поле смещения  $H_b = -49$  Ое во время действия импульса магнитного поля с амплитудой  $H_p = 134$  Ое в различные моменты времени.  $t$ , нс:  $a$  — 20,  $b$  — 27,  $c$  — 39.

ДОН (остальные участки ДС движутся без искажений), а однонаправленная анизотропия скорости ДС достигает максимума (рис. 6,  $a-f$ ).

Далее при увеличении  $H$  однонаправленная анизотропия скорости ДС уменьшается, однако почти вся ДС становится искаженной, а изображение некоторых ее участков уширяется (рис. 6,  $g-l$ ). При действующем магнитном поле более  $H \geq 280$  Ое однонаправленная анизотропия скорости ДС исчезает (рис. 6,  $m-o$ ), а при  $H \geq 340$  Ое ДС уширяется по всему периметру (рис. 6,  $p-q$ ).



**Рис. 5.** Зависимости скорости ДС  $V$  от действующего магнитного поля  $H$  в образцах № 1 ( $a$ ) и 2 ( $b$ ).

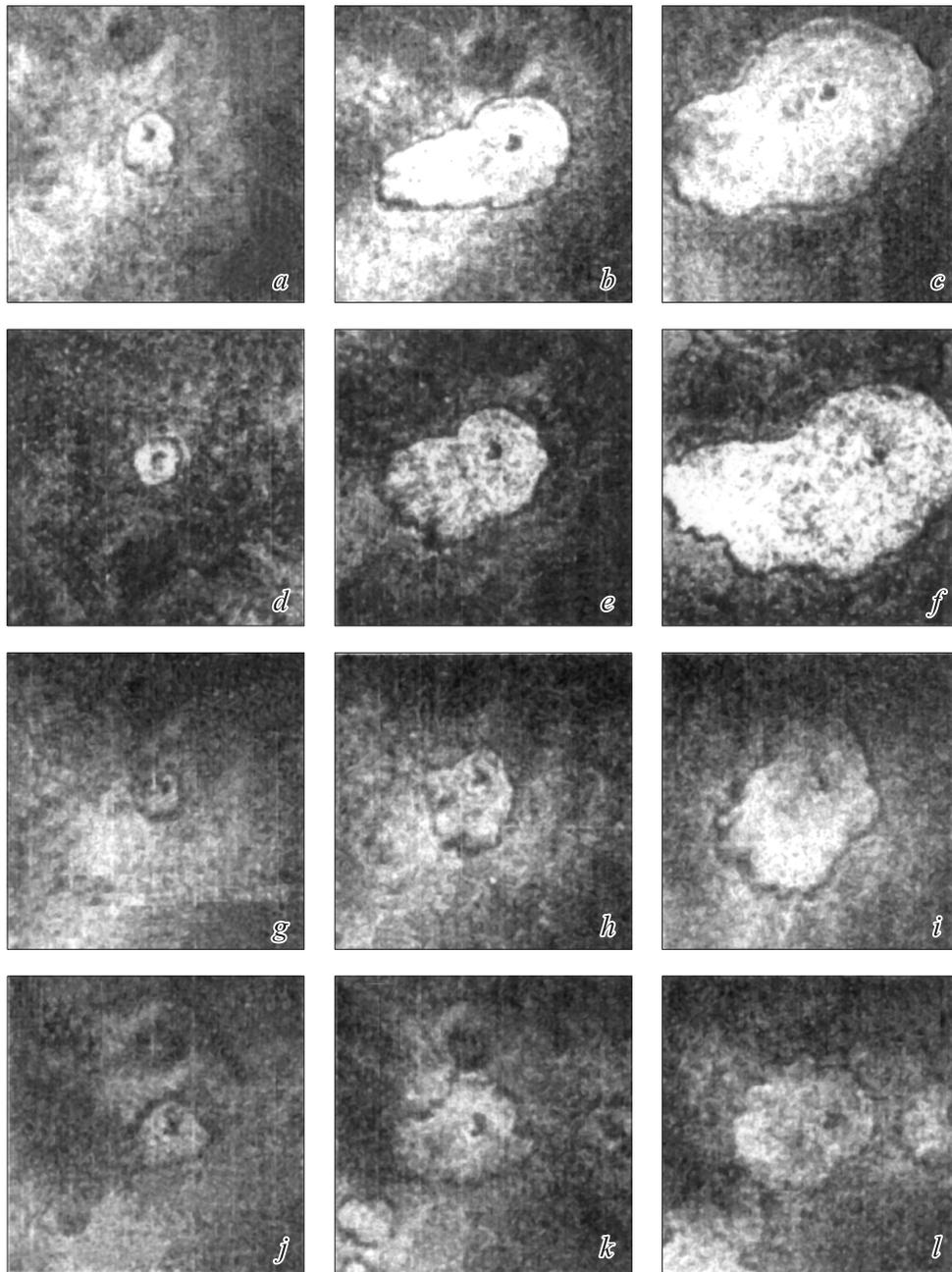
Из сравнения рис. 6,  $b, e$  и  $i$  видно, что ориентация оси однонаправленной анизотропии (направление, вдоль которого участок ДС движется с максимальной скоростью) меняется при изменении действующего магнитного поля.

При  $H_b$ , меньшем поля насыщения, в пленке выстраивалась полосовая доменная структура, ориентация которой связана с магнитной анизотропией в плоскости Вс-МПФГ (рис. 7,  $a$ ).

При импульсном перемагничивании пороговое поле зарождения ДОН составляло  $H \approx 45$  Ое. Форма ДОН зависела от действующего магнитного поля. В относительно малых полях  $H \leq 110$  Ое ДОН имеют форму эллипса, оси которого различаются на 30–40%, причем изображение ДС достаточно тонкое и гладкое. При превышении действующим магнитным полем этого значения на одном из участков ДС появляются искажения, а ее изображение уширяется (остальная часть изображения ДС остается тонкой и гладкой). При увеличении  $H$  участок ДС, где имеют место искажения, расширяется по периметру ДОН. Наибольшей величины искажения достигают при  $H \approx 150$  Ое, когда размеры ДОН в двух взаимно перпендикулярных направлениях различаются более чем вдвое (сри. 7,  $b$ ). Заметим, что ориентация оси однонаправленной анизотропии скорости ДС не связана с ориентацией осей магнитной анизотропии в плоскости пленки (ср. рис. 7,  $a$  и  $b$ ).

Зависимости  $V(H)$  для участков ДС, движущихся с минимальной и максимальной скоростью, которые показаны на рис. 5,  $b$  (кривые 1 и 2 соответственно), также свидетельствуют о том, что однонаправленная анизотропия скорости ДС имеет место в ограниченном диапазоне изменения действующего магнитного поля.

Приведенные результаты указывают на то, что причиной однонаправленной анизотропии скорости ДС может быть излучение ею спиновых волн (СВ), которые вызывают локальное вращение намагниченности вблизи движущейся ДС. Заметим, что ДС излучают СВ в диапазоне  $H^* \leq H \leq H^{**}$  [15,16], причем пороговые поля  $H^*$  и  $H^{**}$ , как и пороговое поле вращения намагниченности  $H_{\text{rot}}$ ,



**Рис. 6.** Конфигурация ДОН в образце № 2 при действующем магнитном поле  $H = 130$  (*a-c*),  $154$  (*d-f*),  $228$  (*g-i*),  $257$  (*j-l*),  $286$  (*m-o*),  $350$  (*p-r*),  $400$  (*s-u*),  $500$  Oe (*v-x*) в моменты времени  $t = 30$  (*a*),  $110$  (*b*),  $190$  (*c*);  $40$  (*d*),  $100$  (*e*),  $200$  (*f*);  $30$  (*g*),  $80$  (*h*),  $130$  (*i*);  $30$  (*j*),  $60$  (*k*),  $100$  (*l*);  $20$  (*m*),  $40$  (*n*),  $70$  (*o*);  $10$  (*p*),  $30$  (*q*),  $60$  (*r*);  $5$  (*s*),  $18$  (*t*),  $24$  (*u*);  $3$  (*v*),  $14$  (*w*),  $20$  ns (*x*).

в Вс-МПФГ с ромбической магнитной анизотропией являются анизотропными величинами [18]. Следовательно, при разном действующем магнитном поле различны и направления в плоскости пленки, вдоль которых ДС движется с наибольшей скоростью.

Температурные зависимости минимальной и максимальной скорости ДС в образце № 2 приведены на рис. 8 (кривые 1 и 2 соответственно). Видно, что как сами эти величины, так и соотношение между ними уменьшаются при нагревании.

На рис. 9 показаны температурные зависимости верхней  $H_d^{**}(T)$  и нижней  $H_d^*(T)$  границ диапазона, в котором ДС полосовых доменов в образце № 2 искажены, а также зависимость амплитуды импульсного магнитного поля  $H_{pd}(T)$ , при которой эти искажения максимальны. На рис. 10 приведены температурные зависимости верхней  $H_a^{**}(T)$  и нижней  $H_a^*(T)$  границ диапазона, в котором в образце № 2 имеет место однонаправленная анизотропия скорости ДС, а также зависимость амплитуды импульсного магнитного поля  $H_{pa}(T)$ , при которой

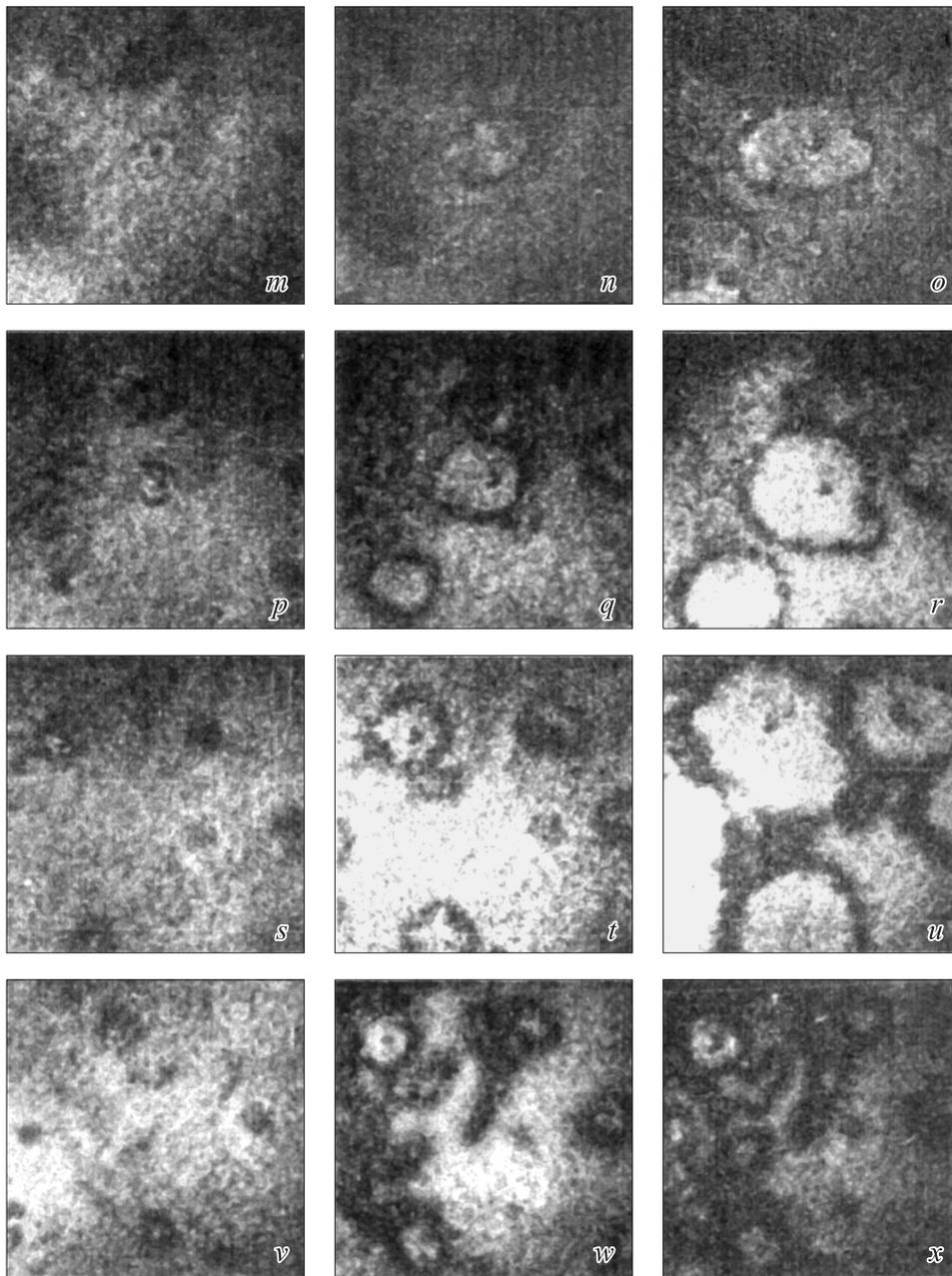
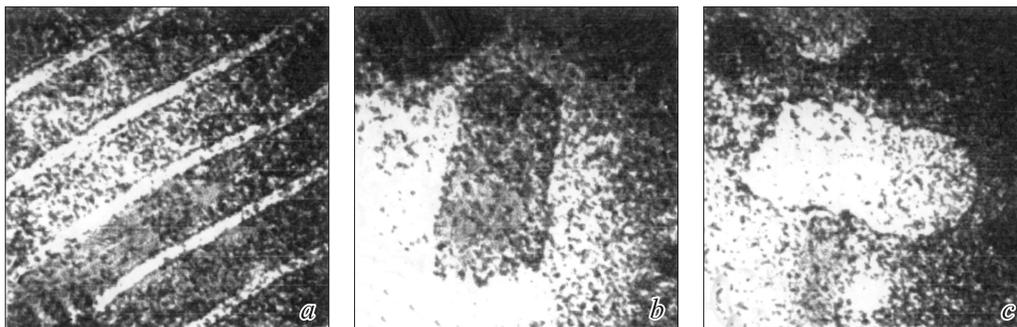


Рис. 6 (продолжение).



**Рис. 6.** Конфигурация полосовых доменов (*a*) и ДОН в образце № 2 при противоположных направлениях (*b* и *c*) действующего магнитного поля  $H = 150$  Ое через промежуток времени  $t = 0.16 \mu\text{s}$  после приложения импульса магнитного поля.

эта анизотропия максимальна. Из сравнения рис. 9 и 10 видно, что хотя указанные диапазоны и перекрываются, но всегда выполняются соотношения

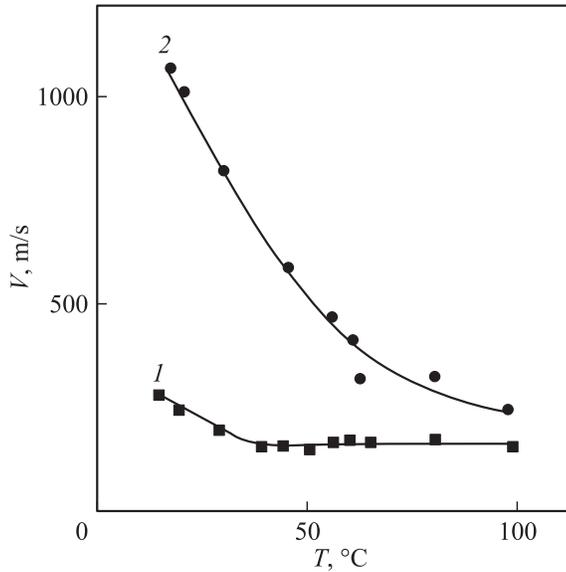
$$H_d^* < H_a^*, \quad (2)$$

$$H_d^{**} < H_a^{**}, \quad (3)$$

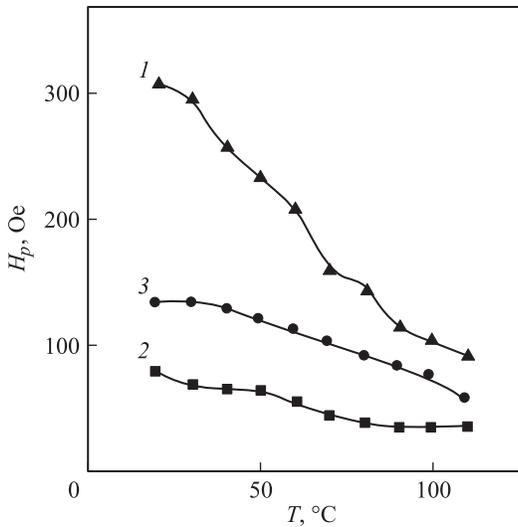
$$H_d^* < H_{pd} < H_d^{**}, \quad (4)$$

$$H_a^* < H_{pa} < H_a^{**}. \quad (5)$$

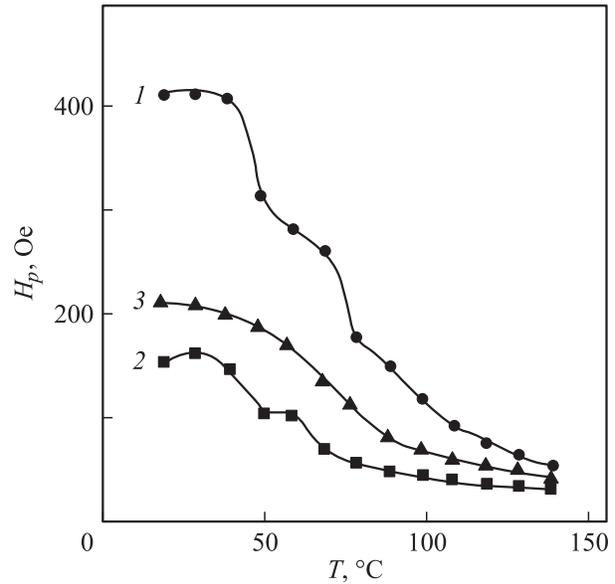
С ростом температуры все указанные величины снижаются.



**Рис. 7.** Температурные зависимости минимальной (1) и максимальной (2) скорости ДС в образце № 2 при действующем магнитном поле  $H = 180$  Ое.



**Рис. 8.** Температурные зависимости верхней  $H_d^{**}(T)$  (1) и нижней  $H_d^*(T)$  (2) границ диапазона, в пределах которого ДС полосовых доменов в образце № 2 испытывают искажения, а также зависимость амплитуды импульсного магнитного поля  $H_{pd}(T)$  (3), при которой эти искажения максимальны.



**Рис. 9.** Температурные зависимости верхней  $H_a^{**}(T)$  (1) и нижней  $H_a^*(T)$  (2) границ диапазона, в пределах которого в образце № 2 имеет место однонаправленная анизотропия скорости ДС, а также зависимость амплитуды импульсного магнитного поля  $H_{pa}(T)$  (3), при которой эта анизотропия максимальна.

Таким образом, на основании исследования Вс-МПФГ  $(\text{Bi}, \text{Y}, \text{Lu}, \text{Pr})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$  с ориентацией (210) получены следующие основные результаты.

1) Как искажения движущихся ДС, так и однонаправленная анизотропия скорости ДС имеют место в ограниченных диапазонах изменения действующего магнитного поля ( $H_d^* \leq H \leq H_d^{**}$  и  $H_a^* \leq H \leq H_a^{**}$  соответственно), при этом  $H_d^* < H_a^*$  и  $H_d^{**} < H_a^{**}$ .

2) Ориентация оси однонаправленной анизотропии скорости ДС меняется при изменении действующего магнитного поля.

3) Экспериментально наблюдающиеся особенности динамического поведения доменных структур находят объяснение, если предположить, что они связаны с излучением СВ движущейся ДС, а соответствующие пороговые поля  $H^*$  и  $H^{**}$  являются анизотропными величинами.

### Список литературы

- [1] В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев, В.И. Чани, А.Я. Червоненкис. Новые магнитные материалы микроэлектроники. Тез. докл. X Всесоюз. шк.-семинара. Рига (1986). Т. 1. С. 21.
- [2] Ф.В. Лисовский, А.С. Логгинов, Г.А. Непокойчицкий, Т.В. Розанова. Письма в ЖЭТФ **45**, 7, 339 (1987).
- [3] Г.Ю. Жарков, А.С. Логгинов, Г.А. Непокойчицкий, Б.Ю. Терлецкий. ФТТ **29**, 9, 2800 (1987).
- [4] А.М. Балбашов, А.С. Логгинов, Г.А. Непокойчицкий, Е.П. Шабаетва. Письма в ЖТФ **13**, 4, 231 (1987).
- [5] В.В. Рандошкин, В.Б. Сигачев, В.И. Чани, А.Я. Червоненкис. ФТТ **31**, 7, 70 (1989).

- [6] В.В. Рандошкин, М.В. Логунов, Ю.Н. Сажин. ФТТ **32**, 5, 1456 (1990).
- [7] А.М. Балбашов, А.С. Логгинов, Е.П. Шабаева. ЖТФ **61**, 6, 159 (1991).
- [8] В.В. Рандошкин, М.В. Логунов, Ю.Н. Сажин. ЖТФ **66**, 2, 201 (1996).
- [9] В.В. Рандошкин, Ю.Н. Сажин. ЖТФ **66**, 8, 83 (1996).
- [10] В.В. Рандошкин, Ю.Н. Сажин. ФТТ **44**, 5, 893 (2002).
- [11] И.Е. Дикштейн, Ф.Л. Лисовский, Е.Г. Мансветова, В.В. Тарасенко. Микроэлектроника **13**, 4, 337 (1984).
- [12] Ф.В. Лисовский, И.Е. Дикштейн, Е.Г. Мансветова, В.В. Тарасенко. Микроэлектроника **19**, 1, 51 (1990).
- [13] В.В. Рандошкин, М.В. Логунов, В.Б. Сигачев. ПТЭ **5**, 247 (1985).
- [14] В.В. Рандошкин. ПТЭ **2**, 155 (1995).
- [15] В.В. Рандошкин. ФТТ **37**, 10, 3056 (1995).
- [16] В.В. Рандошкин, М.В. Логунов. ФТТ **36**, 12, 3498 (1994).
- [17] В.В. Рандошкин. Письма в ЖТФ **21**, 23, 74 (1995).
- [18] В.В. Рандошкин. ФТТ **39**, 8, 1421 (1997).
- [19] В.В. Рандошкин, Ю.Н. Сажин. ФТТ **44**, 5, 858 (2002).
- [20] Е.Н. Ильичева, А.В. Дубова, В.К. Петерсон, Ю.Н. Федюнин, А.Г. Шишков. ФТТ **35**, 5, 1167 (1993).
- [21] Е.Н. Ильичева, Ю.Н. Федюнин, А.Г. Шишков, А.В. Клушина. ЖТФ **63**, 11, 143 (1993).