

# Влияние параметров гармонического магнитного поля на динамические петли гистерезиса и доменную структуру пленки феррита-граната

© Г.С. Кандаурова, А.Г. Пашко, В.Х. Осадченко

Уральский государственный университет им. А.М. Горького, Екатеринбург, Россия

E-mail: gerta.kandaurova@usu.ru

(Поступила в Редакцию 5 мая 2008 г.

В окончательной редакции 25 августа 2008 г.)

Рассмотрены динамические свойства и доменная структура эпитаксиальной пленки феррита-граната (111) с перпендикулярной анизотропией в гармоническом магнитном поле амплитудой 0–170 Ое и частотой 0.2–7 кГц. Проведено прямое сопоставление вида динамических доменных структур конкретным участкам петель гистерезиса. Установлено, что с изменением параметров поля наблюдаются качественные изменения доменной структуры и соответственно формы и площади петель гистерезиса.

Частичная финансовая поддержка исследований осуществлена Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 08-02-99081 р\_офи).

PACS: 75.70.Ak, 75.70.Kw

## 1. Введение

При исследовании процессов перемагничивания пленок ферритов-гранатов были обнаружены некоторые особенности их динамической доменной структуры (ДДС) [1–3]. В настоящее время известны, например, такие виды ДДС: спиральные динамические домены, кольцевые концентрические домены, ведущие центры, гигантские динамические домены и др. Построены диаграммы состояний динамической доменной структуры. Но остался открытым вопрос о причинах существования тех или иных конфигураций доменов при определенных частотах  $f$  и амплитудах  $H_0$  внешнего магнитного поля.

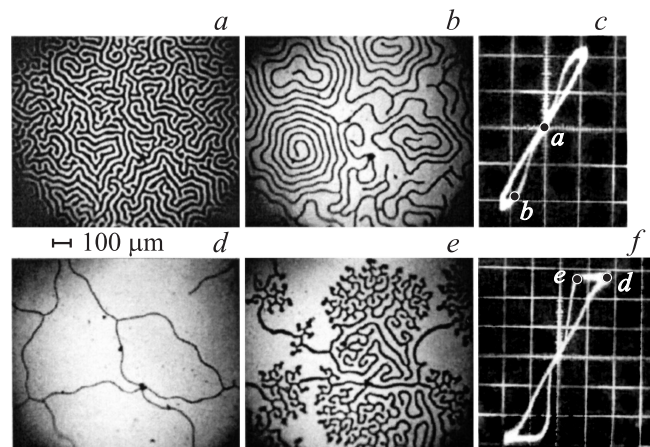
В настоящей работе особенности ДДС исследовались стробоскопическим методом, картины ДДС сопоставлялись с определенными участками петель гистерезиса (ПГ), на которых эти доменные структуры существовали. Впервые такого рода исследования были проведены в работе [4].

## 2. Методика эксперимента

В эксперименте использовалась эпитаксиальная пленка (111) феррита-граната площадью  $S = 16 \text{ mm}^2$ , толщиной  $d = 8 \mu\text{m}$  с исходной сквозной лабиринтной доменной структурой (рис. 1, *a*), со статическим полем насыщения  $H_s = 42 \text{ Oe}$  и фактором качества  $Q = K_U/2\pi M_s^2 = 72$ , где константа одноосной наведенной анизотропии  $K_U = 634 \cdot 10^2 \text{ erg/sm}^3$ . Образец помещался в пространственно однородное непрерывно действующее гармоническое магнитное поле диапазон частот  $f = 0.2\text{--}7 \text{ kHz}$  и амплитуд  $H_0 = 0\text{--}170 \text{ Oe}$ , ориентированное по нормали к образцу. Сначала для ряда значений  $f$  и  $H_0$  с помощью фотометрической приставки были измерены динамические петли гистерезиса.

Затем для тех же параметров поля получены картины динамических доменных структур. Доменная структура выявлялась с помощью метода Фарадея и фиксировалась на видеопленку. Видеозапись картин ДДС проводилась стробоскопическим методом — в моменты времени, соответствующие определенным мгновенным значениям поля (от 15 до 30 точек для каждой петли гистерезиса). Время экспозиции составляло  $3 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ .

Описание результатов проведем поэтапно: сначала выделим закономерности, которые наблюдаются



**Рис. 1.** Динамические доменные структуры (*a, b, d, e*) и петли гистерезиса (*c, f*) высокоанизотропной пленки феррита-граната во внешнем поле с частотой  $f = 1.6$  (*a-c*) и  $0.2 \text{ kHz}$  (*d-f*) и амплитудой  $H_0 = 40$  (*a-c*) и  $60 \text{ Oe}$  (*d-f*). Мгновенные значения напряженности поля составляют 0 (*a*),  $-35$  (*b*),  $60$  (*d*) и  $23 \text{ Oe}$  (*e*). На всех рисунках на петлях гистерезиса темными точками показаны моменты фиксирования приведенных доменных структур, в подписи указаны значения напряженности поля в эти моменты. Цена большого деления по оси полей  $39 \text{ Oe}$ .

в переменных полях с амплитудой  $H_0 \leq H_s$ , затем последовательно рассмотрим диапазоны амплитуд  $H_s \leq H_0 < 2.5H_s$  и  $2.5H_s \leq H_0 < 4H_s$  для  $f \sim 0.2$  kHz и для  $0.2 < f < 7$  kHz.

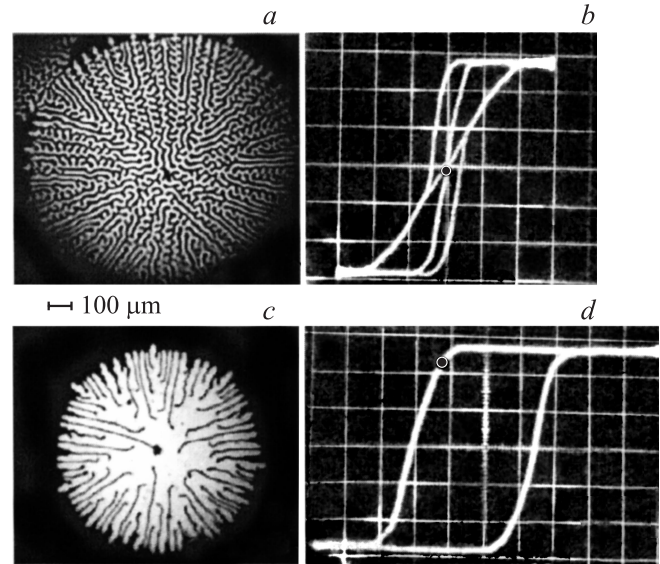
### 3. Результаты и их обсуждение

1) Во всей исследуемой области частот  $f = 0.2-7$  kHz при амплитуде поля  $H_0 \leq H_s$  наблюдались уже известные доменные структуры: лабиринтная ДДС, ангерное состояние, характеризующееся формированием спиральных динамических доменов (рис. 1, *b*), лабиринтная структура с вкраплением цилиндрических магнитных доменов обоих знаков при частотах  $f \sim 7$  kHz. Петли гистерезиса перетянутые, имеющие небольшие четко очерченные гистерезистные участки у верхушек (рис. 1, *c*). Коэрцитивная сила не превышает 4–7 Ое. Все отмеченные картины ДДС представляют собой систему неупорядоченных полосовых доменов, их ширина и количество на контролируемом участке пленки варьируется с изменением знака и величины мгновенного значения поля ( $H$ ).

Спиральные динамические домены, представленные на рис. 1, *b*, согласуются с результатами [1,2]. Они в течение периода сжимаются-расширяются, искажается форма их витков. Петля гистерезиса на рис. 1, *c* имеет характерный для ангерного состояния вид [5]. При наблюдении этой ПГ хорошо заметно изменение растворов гистерезисных участков у ее верхушек, связанное с появлением (рис. 1, *b*) и исчезновением (рис. 1, *a*) спиральных доменов (мигающая ПГ [5]).

2) С увеличением амплитуды поля до значений  $H_0 \sim 1.5H_s$  при небольшой частоте  $f \sim 200$  Hz петля гистерезиса меняется — увеличиваются ее гистерезисные участки (рис. 1, *f*). Из рис. 1, *d* (точка *d* на рис. 1, *f*) видно, что при максимальном значении поля ( $H = H_0 = 60$  Ое), в 1.5 раза превышающем поле статического насыщения ( $H_s = 42$  Ое), в пленке присутствуют домены обратной магнитной фазы, т. е. гистерезисные участки ПГ объясняются задержкой роста остаточных доменов.

В начале снижения поля происходит утолщение остаточных доменов. При достижении полем какого-то, условно говоря, „притического значения“  $H_c$  (это точка начала отвесной „спинки“ ПГ, на рис. 1, *e*  $H_c \sim 25$  Ое) доменная структура разрастается почти мгновенно (скачком) и имеет вид фракталоподобной, древовидной ДДС (рис. 1, *e*, точка *e* на рис. 1, *f*). Структура „черных“ доменов действительно напоминает дерево. Каждая веточка „кроны дерева“ (рис. 1, *e*) на следующем этапе ветвления разделяется на две-три. Концы доменов расширены и по форме напоминают несимметричные гантели или копы, из чего можно сделать вывод, что домены растут не в одном направлении, а по крайней мере в двух-трех одновременно. Скорость прорастания концов полосовых доменов значительно превосходит



**Рис. 2.** Радиальные доменные структуры (*a, c*) и петли гистерезиса (*b, d*) образца в поле с различными параметрами. *a, b* —  $f = 0.2$  kHz,  $H_0 = 102$  Ое; *c, d* —  $f = 0.2$  kHz,  $H_0 = 170$  Ое. Мгновенные значения поля составляют 0 (*a*) и  $-56$  Ое (*c*).

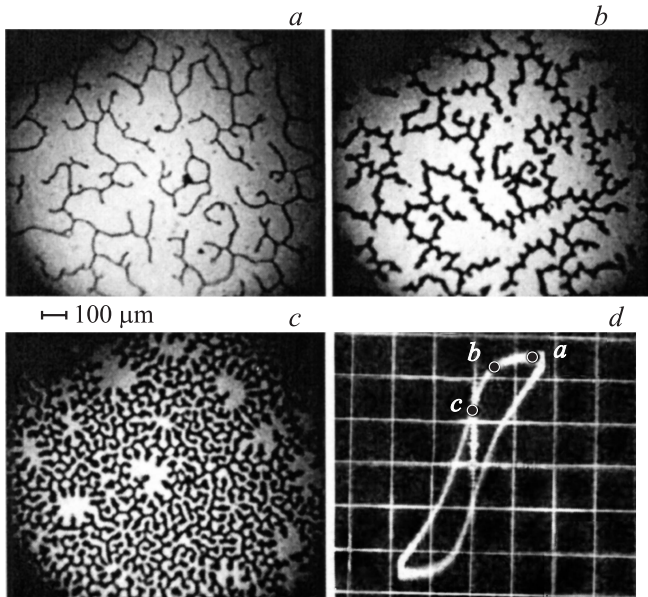
скорость бокового движения плоской стенки полосового домена [6], поэтому образование нескольких отростков должно быть энергетически выгодно. Домены, растущие одновременно в разных направлениях, займут большую площадь образца за кратчайший промежуток времени.

3) При достижении значения  $H_0 \sim 2.5H_s$  при  $f = 0.2$  kHz петля гистерезиса принимает вид, как на рис. 2, *b*. Точнее, на рис. 2, *b* видны две ПГ (одна с  $H_c \leq 4$  Ое, другая с  $H_{c1} = 19$  и  $H_{c2} = 11$  Ое), спинки обеих петель вертикальные. Присутствие двух ПГ на рисунке связано с неоднозначностью процесса перемагничивания [7].

При  $H = 0$  Ое (темная точка на рис. 2, *b*) видим полностью сформированную секторальную блочную ДДС (рис. 2, *a*), центром которой является дефект пленки. Разбиение на секторы позволяет равномерно заполнить круг доменами одинаковой ширины. Полосовые домены, из которых состоит ДДС на рис. 2, *a*, имеют множество отростков и напоминают древовидную доменную структуру.

При увеличении амплитуды до  $H_0 \sim 4H_s$  при  $f = 0.2$  kHz задержка зародышеобразования доменов обратной фазы на дефектах значительно увеличивается (на ПГ рис. 2, *d*  $H_{c1} = 80$  Ое и  $H_{c2} = 55$  Ое). Доменная структура радиальная (рис. 2, *c*, темная точка на ПГ рис. 2, *d*), но вид ее отличается от вида ДС на рис. 2, *a* — радиальные отростки не ветвятся. При снижении поля „белая“ фаза на рис. 2, *c* разрастается и занимает весь образец. В следующем полупериоде поля аналогично ведет себя „черная“ фаза. Подобные ДДС были исследованы в [3].





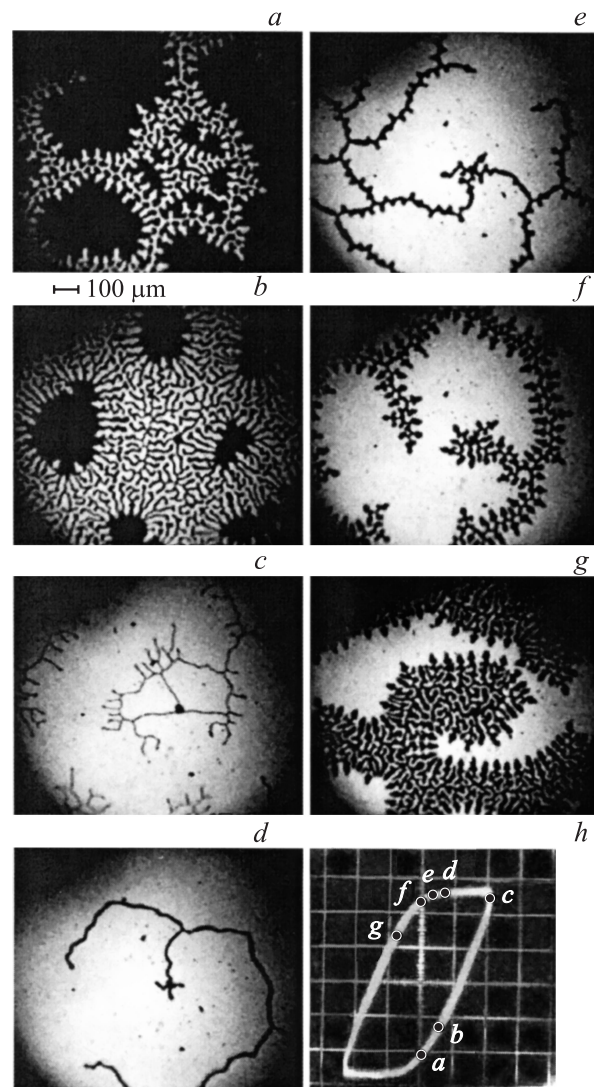
**Рис. 3.** Динамические доменные структуры (*a-c*) и петля гистерезиса (*d*) образца в поле с параметрами  $f = 3.2$  kHz,  $H_0 = 60$  Oe. Мгновенные значения поля составляют 60 (*a*), 14 (*b*) и 0 Oe (*c*).

4) Изменение динамических ПГ и ДДС с увеличением частоты поля до 3.2 kHz (диапазон амплитуд  $H_0 \sim (1.5-2)H_s$ ) показано на рис. 3. На рис. 3, *d* параметры петли гистерезиса составляют  $H_{c1} = 8$  Oe,  $H_{c2} = 11$  Oe; при снижении напряженности поля от амплитудного значения нет резкого скачка намагниченности. Нисходящая часть ПГ плавная, что указывает на замедление процессов перемагничивания при данных  $f = 3.2$  kHz и  $H_0 = 60$  Oe. Неоднозначность, подобная имеющей место на рис. 2, *b*, отсутствует — перемагничивание в различные периоды поля происходит по одному устойчивому циклу. Последовательность фотографий доменных структур на рис. 3 демонстрирует процесс образования древовидных ДДС. Они формируются из остаточных полосовых доменов (рис. 3, *a*), на которых при снижении поля по всей длине в обе стороны вырастают отростки (рис. 3, *b*). Они развиваются в древовидные доменные структуры (рис. 3, *c*). Вид ДДС зависит от количества доменов обратной фазы в пленке при амплитудной величине поля. ДДС на рис. 1, *e* и 3, *c* сформировались соответственно из структур на рис. 1, *d* и 3, *a*. На последнем рисунке доменов обратной фазы больше; они прерывистые, изогнутые. Соответственно образовавшиеся из них древовидные домены характеризуются высокой степенью разветвленности (рис. 1, *e*, 3, *c*).

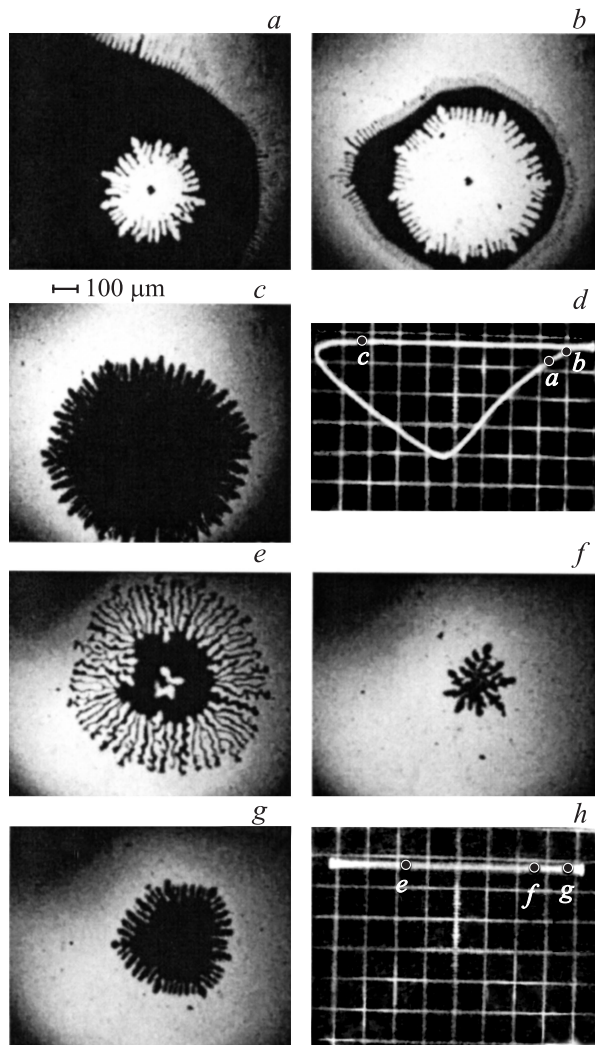
Разное количество доменов обратной магнитной фазы в максимальном поле  $H = H_0$  обусловлено соотношением скорости движения доменной границы и скорости изменения поля. С увеличением частоты и амплитуды скорость изменения поля растет, и доменная граница

сильнее отстает от поля. Поэтому в момент  $H = H_0$  на рис. 3, *a* (точка *a* на рис. 3, *d*) доменов обратной фазы остается больше, чем на рис. 1, *d* (точка *d* на рис. 1, *f*).

Если при частоте 3.2 kHz продолжать увеличивать амплитуду поля, происходит расширение петли гистерезиса (на рис. 4, *h* коэрцитивная сила  $H_c \sim 45$  Oe). Восходящая и нисходящая ветви ПГ несколько размыты, т. е. перемагничивание происходит хотя и по близким, но разным циклам. На рис. 4, *c* (точка *c* на рис. 4, *h*) пленка находится практически в состоянии насыщения при максимальном значении поля. Присутствует небольшое количество доменов обратной магнитной фазы неопределенной конфигурации. При снижении поля состояние, близкое к насыщению, сохраняется до  $H \sim 30$  Oe (рис. 4, *d*, точка *d* на рис. 4, *h*). Вид остаточных доменов меняется — основные крупные протяженные домены становятся шире, а небольшие к ним стягиваются.



**Рис. 4.** Динамические доменные структуры (*a-g*) и петля гистерезиса (*h*) образца в поле с параметрами  $f = 3.2$  kHz,  $H_0 = 81$  Oe. Мгновенные значения поля составляют 0 (*a*), 25 (*b*), 81 (*c*), 28 (*d*), 14 (*e*), 0 (*f*) и -28 Oe (*g*).



**Рис. 5.** Динамические доменные структуры (*a-c, e-g*) и петли гистерезиса (*d, h*) образца в поле с различными параметрами. *a-d* —  $f = 1.6 \text{ kHz}$ ,  $H_0 = 170 \text{ Oe}$ ; *e-h* —  $f = 6.8 \text{ kHz}$ ,  $H_0 = 170 \text{ Oe}$ . Мгновенные значения поля составляют 130 (*a*), 157 (*b*),  $-135$  (*c*),  $-68$  (*e*), 101 (*f*) и 146 Oe (*g*).

В момент  $H \sim 15 \text{ Oe}$  (рис. 4, *e*, точка *e* на рис. 4, *h*) на остаточных доменах появляются отростки — „почки“, которые удлиняются, а затем на них в свою очередь появляются выросты, формируется структура, как на рис. 4, *f*. Назовем ее тоже древовидной (надо заметить, что ее вид отличен от вида ДДС на рис. 1, *e* и напоминает ожерелье). Рис. 4, *f* получен при мгновенном значении поля  $H = 0 \text{ Oe}$  (точка *f* на рис. 4, *h*).

В следующий момент поле меняет знак, и обратная фаза („черная“ на рис. 4, *f*) становится преимущественной (основной). При росте основной „черной“ фазы ее домены расширяются по всему периметру (рис. 4, *g*, точка *g* на рис. 4, *h*), и хотя наблюдаются отростки, конфигурация доменов на указанном рисунке отличается от древовидной. Все указанное справедливо и для роста „белой“ фазы, представленной на рис. 4, *a, b*.

5) С увеличением амплитуды поля до значений  $H_0 \sim 2.5H_s$  при частотах  $f \geq 1.6 \text{ kHz}$  наблюдается переход к необычной по форме треугольной петле гистерезиса (рис. 5, *d*). Впервые такая динамическая ПГ наблюдалась в [8]. Соответствующая доменная структура представлена гигантскими динамическими доменами (ГДД) (рис. 5, *a-c*), которые в течение периода поля растут от дефекта в центре кадра. Этот результат согласуется с данными, полученными в [3,8]. Домены на рис. 5, *a-c* существуют при разных мгновенных значениях поля (точки *a, b, c* на рис. 5, *d*). Несмотря на различие в размерах (радиусы ГДД равны соответственно 130, 270 и  $350 \mu\text{m}$ ), домены имеют одинаковое количество лучей (отростков) на единицу длины их окружности  $0.03 \mu\text{m}^{-1}$ . У радиальных доменов на рис. 5, *a, b* можно выделить восемь основных лучей — более длинных (длина лучей  $> 30 \mu\text{m}$ ) по сравнению с остальными (длина лучей  $10-30 \mu\text{m}$ ); ширина основных лучей  $40-50 \mu\text{m}$ , неосновных  $14-30 \mu\text{m}$ .

„Черный“ ГДД на рис. 5, *c* не имеет ярко выраженных основных лучей. С чем связаны эти особенности формы доменов, пока трудно сказать. Если предположить влияние кристаллографической анизотропии, то ось симметрии лучей радиальных доменов должна быть шестого порядка, в нашем эксперименте лучи несимметричны. Возможно, такая форма доменов обусловлена наличием упругих напряжений в пленке.

С дальнейшим увеличением амплитуды и частоты поля раствор треугольной петли гистерезиса уменьшается по оси ординат, и при  $f \sim 7 \text{ kHz}$ ,  $H_0 \sim 4H_s$  она схлопывается — доменная структура образца переходит в состояние так называемой динамической однодоменности [1,7] — образец перестает перемагничиваться (рис. 5, *h*). Несмотря на то что ПГ на рис. 5, *h* параллельна оси полей, т.е. изменение в намагниченности образца практически незаметно, на стробоскопических снимках виден ГДД, трансформирующийся в течение периода поля, как показано на рис. 5, *e-g* (соответствующие точки на рис. 5, *h*). По-видимому, фотометрическая приставка не реагирует на изменения освещенности, связанные с преобразованиями площади „черного“ домена (его площадь менее  $1/32$  площади образца). Вид ГДД на рис. 5, *e-g* обусловлен значительными фазовыми задержками между движением доменной стенки и изменением поля, а также несимметричностью дефекта — зарождение „черных“ доменов на нем энергетически выгоднее, чем „белых“.

Как видно из рис. 5, *e-g*, радиус и форма домена меняются в зависимости от мгновенного значения напряженности поля. Домен то стягивается к дефекту, то разрастается. Похожая структура была получена в [3]. С ростом поля домер на рис. 5, *e* уменьшается, и в максимальном поле  $H \sim 170 \text{ Oe}$  от него остаются тонкие нитевидные, едва различимые в микроскоп структуры, похожие по форме на показанные на рис. 4, *c*. Можно утверждать, что ширина этих нитей не более  $1 \mu\text{m}$ .

Не исключено, что такие домены образованы  $360^\circ$  доменными стенками.

б) Эксперимент четко показал наличие в исследуемой области ( $H_0-f$ ) трех типов доменных структур, сменяющих друг друга при изменении амплитуды внешнего магнитного поля — полосовые ДДС ( $H_0 \leq H_s$ ), древовидные ДДС ( $H_s \leq H_0 < 2.5H_s$ ), радиальные ДДС ( $2.5H_s \leq H_0 < 4H_s$ ). Выделенные структуры принципиально различны, это может свидетельствовать о смене механизмов перемагничивания с ростом амплитуды поля. Мы полагаем, что при достижении амплитудой величины  $H_0 \sim 1.5H_s$  происходит не только последовательное перемещение доменной стенки, но и образование неоднородностей типа вихрей (блоховских линий, блоховских точек) в локальных областях доменной границы, за счет чего она движется неравномерно. Об этом свидетельствуют впервые наблюдаемые полосовые домены с „почками“, которые предваряют формирование древовидной доменной структуры.

Наблюдаемые древовидные структуры образуются на нисходящей части петель гистерезиса при снижении поля от амплитудного значения. Таким образом, древовидная доменная структура наиболее выгодна для максимально быстрого роста доменов обратной фазы, а значит, снижения неравновесности доменной структуры. Конфигурации древовидных доменов, как видно из рис. 1, e, 3, b, c, 4, a, b, e, f, g, могут быть весьма и весьма различными в зависимости от параметров поля.

Найдено, что в максимальных исследованных полях в пленке с наивысшим фактором качества образуются нитевидные домены шириной менее микрона. Этот результат требует продолжения наблюдений динамических доменных структур в еще больших полях с использованием оптической микроскопии высокого разрешения.

Авторы выражают благодарность А.Я. Червоненкису за предоставленные образцы пленок ферритов-гранатов.

## Список литературы

- [1] Г.С. Кандаурова. УФН **172**, 1165 (2002).
- [2] М.В. Логунов, М.В. Герасимов. ФТТ **44**, 1627 (2002).
- [3] М.В. Логунов, М.В. Герасимов. ФТТ **45**, 1031 (2003).
- [4] М.В. Логунов, М.В. Герасимов, П.М. Малышева. Сб. тр. XVIII Междунар. школы-семинара „Новые магнитные материалы микроэлектроники“. М. (2002). С. 428.
- [5] Г.С. Кандаурова, В.Х. Осадченко. Письма в ЖТФ **20**, 24 (1994).
- [6] Я.А. Моносов, П.И. Набокин, Л.В. Николаев. ЖЭТФ **68**, 1821 (1975).
- [7] Г.С. Кандаурова, В.Х. Осадченко. ДАН **365**, 181 (1999).
- [8] Г.С. Кандаурова, В.Х. Осадченко. Письма в ЖТФ **21**, 11 (1995).