

Динамические системы кольцевых концентрических магнитных доменов в высокоанизотропной пленке феррита-граната в магнитных полях инфразвуковых частот

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

Уральский государственный университет им. А.М. Горького,
620083 Екатеринбург, Россия

E-mail: gerta.kandaurova@usu.ru

(Поступила в Редакцию 27 сентября 2004 г.)

Впервые в магнитных полях инфразвуковых частот исследованы динамические доменные структуры в пленке феррита-граната с перпендикулярной анизотропией. Обнаружено ангерное состояние многодоменной среды, а также формирование устойчивых динамических структур с необычными свойствами в диапазоне частот 2–3 Hz.

Частичная финансовая поддержка исследований осуществлена фондом „The U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union“ (CRDF) (грант ЕК-500-Х1) и Министерством образования РФ (грант Е-3.4-258).

1. Известно [1], что в пленках с перпендикулярной анизотропией под действием переменного поля может реализоваться особое состояние — так называемое ангерное состояние (АС) — многодоменной магнитной среды. В этом состоянии в неупорядоченном динамическом коллективе доменов происходит самоорганизация, в результате которой формируются устойчивые упорядоченные динамические доменные структуры (ДДС) определенного типа. При частотах 10^2 – 10^4 Hz это спиральные домены (СД) и системы кольцевых концентрических доменов (ККД). Другой особенностью АС является то, что упорядоченные ДДС возникают, „живут“ некоторое время и разрушаются, потом вновь возникают, живут, исчезают и т.д. Таким образом, для описания АС наряду с конфигурационными параметрами ДДС следует вводить динамические параметры АС: „время жизни“ конкретной динамической структуры определенного вида T_g и время ожидания T_w появления подобных структур на контролируемой части образца.

В настоящее время относительно подробно экспериментально и теоретически изучены динамические СД, возникающие в АС в пленках ферритов-гранатов с перпендикулярной анизотропией в переменных магнитных полях частотой $f = 10^2$ – 10^4 Hz и амплитудой $H_0 < H_S$, где H_S — статическое поле насыщения (см., например, [1–4]). В работе [5] впервые демонстрировалась ограниченная по амплитуде и частоте область (H_0, f) , в которой наблюдалось формирование устойчивых упорядоченных ДДС. Как следовало из графика и фотографий ДДС, в интервале частот 200–6000 Hz наблюдаются динамические СД. Но в узком интервале 120–200 Hz образуются не спирали, а крупные устойчивые динамические системы ККД. Они, так же как и СД, живут, разрушаются, вновь возникают и т.д. Времена T_g и T_w того же порядка, что и в случае СД. В [6,7] приведены дополнительные краткие сведения о таких ККД. Однако фактически АС этого типа оставалось неизученным.

Более того, вопрос о возможности существования АС пленок при частотах $f < 100$ Hz до сих пор не поднимался.

В настоящей работе приведена часть результатов, полученных нами при исследовании ДДС пленок ферритов-гранатов в переменных полях низких частот, включая инфразвуковые. На высокоанизотропной пленке мы обнаружили АС и образование огромных, очень устойчивых динамических систем ККД в переменных магнитных полях с частотой 2–3 Hz и амплитудой, значительно превосходящей H_S . Первая информация об этом эффекте приведена в [8].

2. Исследовалась пленка (111) феррита-граната $(YLuBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ толщиной $8 \mu m$, площадью $\sim 16 mm^2$ с наведенной перпендикулярной анизотропией, фактором качества $Q \approx 80$, величиной $H_S = 42$ Oe (определялась по петлям гистерезиса на экране осциллографа) и коэрцитивной силой $H_C \sim 1.5$ Oe, обусловленной смещением доменных границ. Доменная структура наблюдалась с помощью магнитооптического эффекта Фарадея на площади $S \approx 12 mm^2$. В исходном размагниченном состоянии в пленке наблюдалась обычная лабиринтная структура (рис. 1, а). Период полосовых доменов P_0 в этой структуре, равный удвоенной ширине доменов, составляет $30 \mu m$. Для фиксирования изображения динамических доменов использовалась методика микровидеосъемки [9] с компьютерной обработкой массива экспериментальных данных, съемка производилась стробоскопическим способом с временем экспозиции 10^{-4} s.

Пленка помещалась в центр катушки с внутренним диаметром 6.5 mm и высокой 5 mm. Через катушку пропускался переменный ток, создающий магнитное поле $H_{\sim} = H_0 \sin(2\pi ft)$ частотой 2–15 Hz и амплитудой до 170 Oe. Поле ориентировалось по оси легкого намагничивания, т.е. перпендикулярно пленке. Таким образом, во время опыта пленка находилась в пространственно однородном непрерывно действующем переменном магнитном поле.

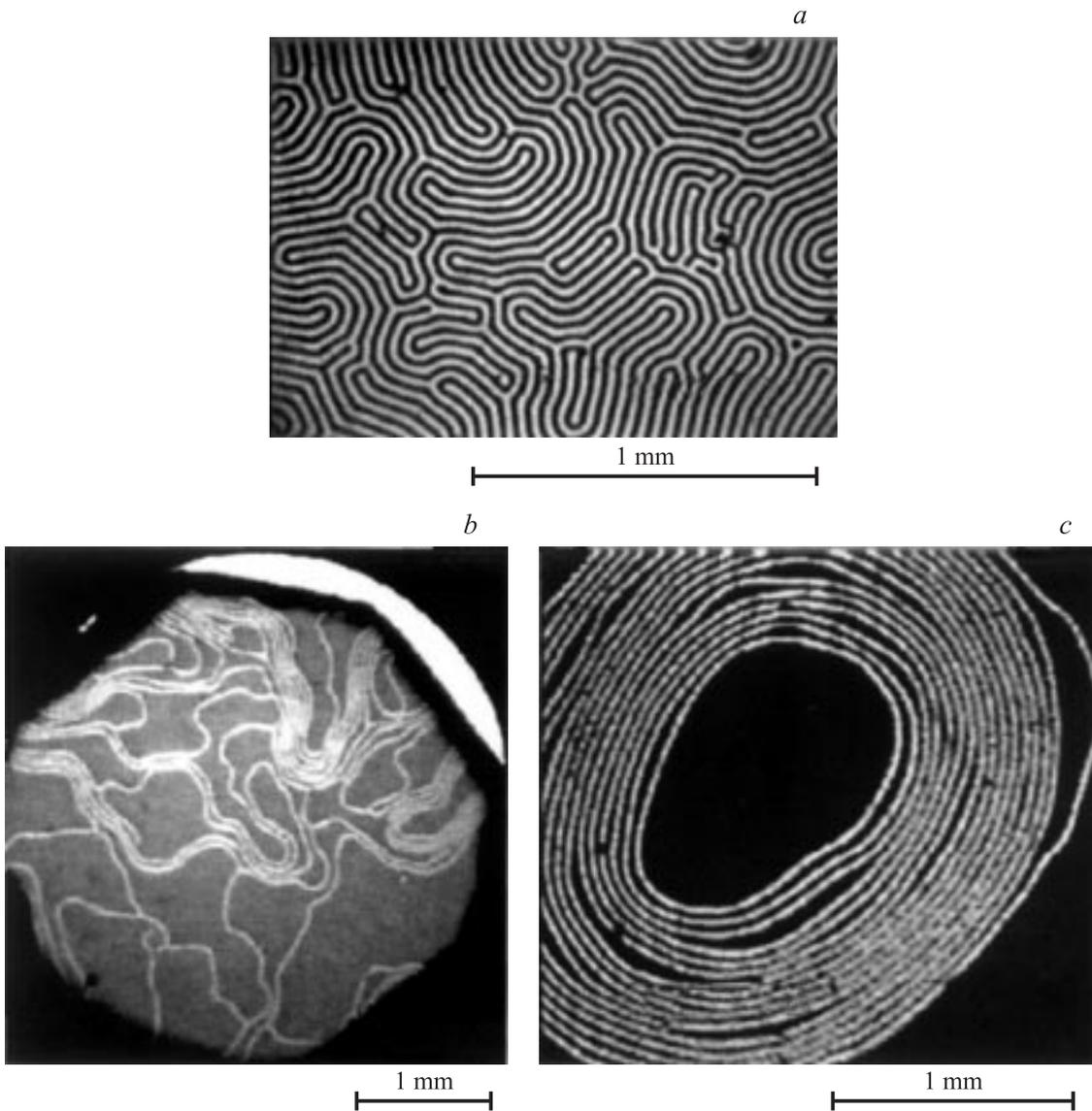


Рис. 1. Доменная структура образца в исходном состоянии (*a*) и в переменных полях с частотой $f = 2-3$ Hz и амплитудами $H_0 = 35$ (*b*) и 80 Oe (*c*). В „светлых“ и „темных“ доменах намагниченность направлена „к нам“ и „от нас“ соответственно.

3. При амплитудах $H_0 < H_S$ наблюдаются хаотически движущиеся полосовые домены. Их форма, протяженность, направление движения меняются и в течение одного периода поля, и от периода к периоду, т.е. это неустойчивая неупорядоченная ДДС. Назовем ее пространственно-временным динамическим доменным хаосом (или просто „хаосом“), в котором все домены связаны дальнедействующим магнитостатическим взаимодействием. Следует отметить, что среди мелькающих полосовых доменов время от времени появляются четкие яркие одиночные полосовые домены. Они отличаются тем, что их конфигурация воспроизводится в течение нескольких периодов поля, т.е. эти домены более устойчивы.

4. Увеличение амплитуды поля до $H_0 \approx (1.1-1.5)H_S$ приводит к новому, неизвестному ранее кооперативному эффекту. Наиболее отчетливо он проявляется при

$f = 2-3$ Hz. В непрерывно изменяющемся неупорядоченном коллективе полосовых доменов формируются устойчивые комплексы параллельно упорядоченных изогнутых полосовых доменов (назовем их для краткости „пучками“). Конфигурация пучков сохраняется в течение нескольких периодов поля (15–50 периодов), поэтому они отчетливо видны в картине ДДС (рис. 1, *b*) ввиду более высокого контраста. В пучке может содержаться от трех тесно упакованных полосовых доменов. Период таких структур близок к периоду доменных структур в размагниченном состоянии.

Описанная устойчивая динамическая структура не имеет определенной постоянной геометрии, но возникает она в результате самоорганизации коллектива доменов, „живет“ ограниченное время ($T_g \approx 6-20$ s), а затем разрушается. В течение времени T_g к устойчивому исходному пучку либо пристраиваются новые полосовые

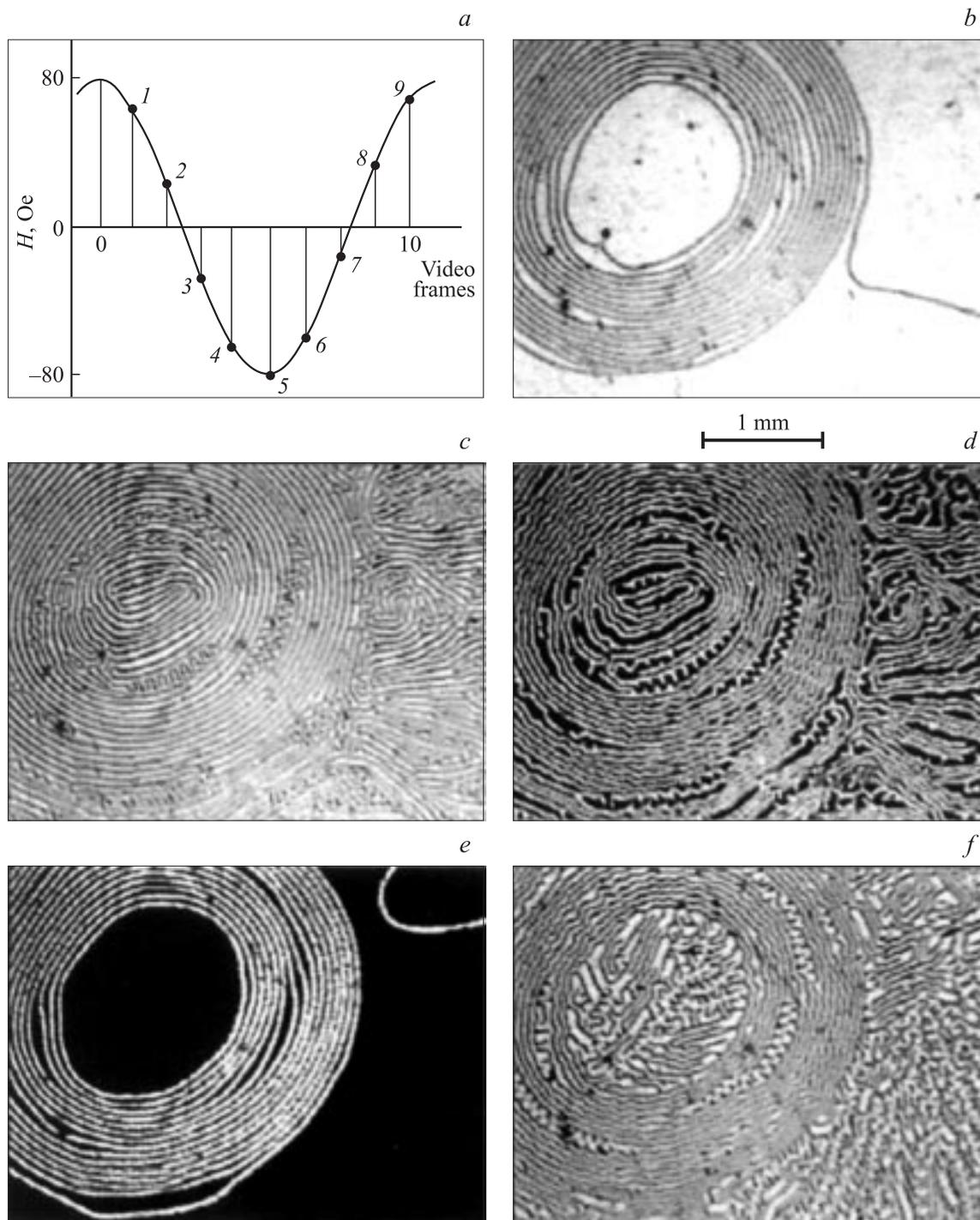


Рис. 2. Последовательные моменты времени в течение одного периода поля, в которые экспонировалась ДДС (а). Картины ДДС *b–f* соответствуют следующим точкам: *b* — 1, *c* — 3, *d* — 4, *e* — 5, *f* — 9.

домены, либо из него, наоборот, уходят один-два крайних домена. Время ожидания T_w появления таких пучков мало. При указанных параметрах поля фактически они присутствуют все время на наблюдаемой части образца. Как правило, в пленке одновременно существует несколько систем параллельно упорядоченных доменов, оканчивающихся на дефектах или краях образца.

Образование пучков полосовых доменов может быть обосновано так же, как это делалось для динамических СД [10]: в переменном поле формируется такая ДДС, в которой доменные границы быстрее достигают равновесных положений. В неупорядоченной ДДС, окружающей пучки (рис. 1, *b*), доменные границы за полпериода поля проходят расстояния $\sim 0.2–1$ mm, а в плотноупакован-

ной структуре полосовых доменов в пучке — менее 0.015 mm. Стабильности пучка способствует локальное уменьшение не только кинетической, но и магнитостатической энергии.

5. Необходимо отметить, что в поле с $H_0 > H_S$ иногда (в моменты времени, соответствующие снижению поля от амплитудного значения) из остатков полосовых доменов обратной магнитной фазы накручиваются маловитковые СД. Эти СД живут не более половины периода $T/2$ и исчезают в противоположном по знаку полупериоде поля. Скорее всего, здесь проявляется действие гиротропной силы на конец растущего полосового домена. Аналогично формируются и двухрукавные короткоживущие (полупериодные) СД.

6. С увеличением амплитуды поля до $H_0 = (2.0-2.8)H_S$ вместо комплексов параллельно упорядоченных полосовых доменов возникают крупные системы ККД. Одна из таких структур показана на рис. 1, с. Ее отличительные особенности: правильная геометрия; огромный внешний диаметр, соизмеримый с размерами образца; большое число колец (N_r может достигать значения 15–20); очень большое внутреннее ядро, которое, как и внешнее окружение всей системы ККД, может находиться в состоянии насыщения (рис. 1, с). Нам удалось проследить за преобразованиями одной и той же системы ККД в течение одного периода переменного поля при $f = 2-3$ Hz и $H_0 = 80$ Oe. Серия видеок кадров представлена на рис. 2. На фрагменте синусоиды $H \sim(t)$, соответствующем одному периоду поля, показаны последовательные моменты видеосъемки ДДС (рис. 2, а). В поле, близком по величине к амплитудному значению (точка 1), в пленке наблюдается одна крупная система ККД с внешним диаметром $D_{ex} \approx 2.5$ mm, внутренним $D_{in} \approx 1$ mm, состоящая из шестнадцати „темных“ и шестнадцати „светлых“ тонких полосовых доменов (рис. 2, б). Ядро системы и окружающая систему ККД область намагничены в положительном направлении поля („к нам“). В плотной упаковке колец видны нерегулярности — „просветы“. Далее поле убывает (точка 2), но состояние пленки не меняется, картина ДДС остается той же. Это свидетельствует о большом гистерезисе, связанном с задержкой роста зародышей перемагничивания в „светлых“ областях на рис. 2, б.

При дальнейшем уменьшении поля и смене его направления (точки 3, 4) картина ДДС меняется скачком (рис. 2, с, д). Состояние на рис. 2, с близко к размагниченному. Ядро исходной системы ККД и ее окружение заполняются полосовыми доменами различной формы (спиральные, радиальные, неупорядоченные) почти одинаковой ширины. Судя по более широким „темным“ доменам на рис. 2, д, эта картина ДДС соответствует уже частично перемагниченному состоянию.

С достижением отрицательного амплитудного значения поля (точка 5) наблюдается снова одна система ККД с однородно намагниченным „от нас“ „темным“ ядром в „темном“ однодоменном окружении остальной части образца (рис. 2, е). Эта ДДС долго сохраняется

при уменьшении поля (точки 6, 7 на рис. 2, а), а затем с изменением знака и увеличением амплитуды поля (точки 8, 9 на рис. 2, а) скачком переходит в частично перемагниченное состояние (рис. 2, ф).

Можно сравнить ДДС, показанные на рис. 2, д и ф. Они похожи, но на рис. 2, ф большую площадь занимают „светлые“ домены с намагниченностью, направленной „к нам“, а на рис. 2, д — „темные“ домены с противоположной ориентацией вектора намагниченности. С приближением к положительному амплитудному значению поля ДДС преобразуется в структуру, подобную показанной на рис. 2, б.

Отметим еще некоторые особенности в изменении ДДС (рис. 2). Если на рис. 2, б, с границы кольцевых доменов ровные, гладкие, неискаженные, то на рис. 2, д, ф четко видны волнообразные искажения доменов и их границ. Вероятно, в этом проявляется известный эффект несинхронного движения двух границ кольцевого домена при увеличении/уменьшении поля [11,12]. Наблюдаемую периодическую структуру в „темных“ (рис. 2, д) или „светлых“ (рис. 2, ф) „просветах“ можно связывать с ростом боковых отростков у полосовых доменов, окаймляющих этот „просвет“.

7. На рис. 2 показано изменение ДДС с устойчивой системой ККД в течение одного периода поля. Изменения касались в основном ядра и окружения системы ККД. Сама система изменялась лишь в деталях. Однако подобные кольцевые структуры существуют в течение не одного, а нескольких таких периодов переменного поля. И за это время — время жизни T_g — они могут претерпевать кардинальные преобразования, особенно в начале и конце жизни. Доменные структуры в наиболее значимые моменты жизни одной системы ККД показаны на рис. 3, а–с. Картины типичны и для других систем.

Сначала вокруг какого-либо дефекта образуется одиночное устойчивое кольцо или от дефекта прорастает полосовой домен, который изгибается и замыкается в кольцо. Затем к нему начинают пристраиваться полосовые домены из окружающего хаоса (рис. 3, а). Число колец растет, а их форма приближается к кругу. Так образуется целая устойчивая система ККД (рис. 3, б). В дальнейшем она может увеличиваться или уменьшаться по диаметру, изменяя число колец N_r , и перемещаться по образцу. Часто происходит расслоение системы ККД на две концентрические системы, которые затем снова могут соединиться в одну. Иногда концентричность систем временно нарушается. За время T_g этот процесс может повторяться многократно. В конце жизни система ККД быстро теряет кольца, особенно если рядом начинают формироваться другие кольцевые домены, как это видно из рис. 3, с.

Для одной из долгоживущих систем ККД ($T_g \approx 21$ min) на рис. 3, д представлены подробные данные по измерению числа колец N_r за все время ее жизни. Видно, что очень резко (скачком) нарастает число колец в самом начале жизни (за 10 s сформировалось семь колец). Довольно быстро N_r убывает в конце

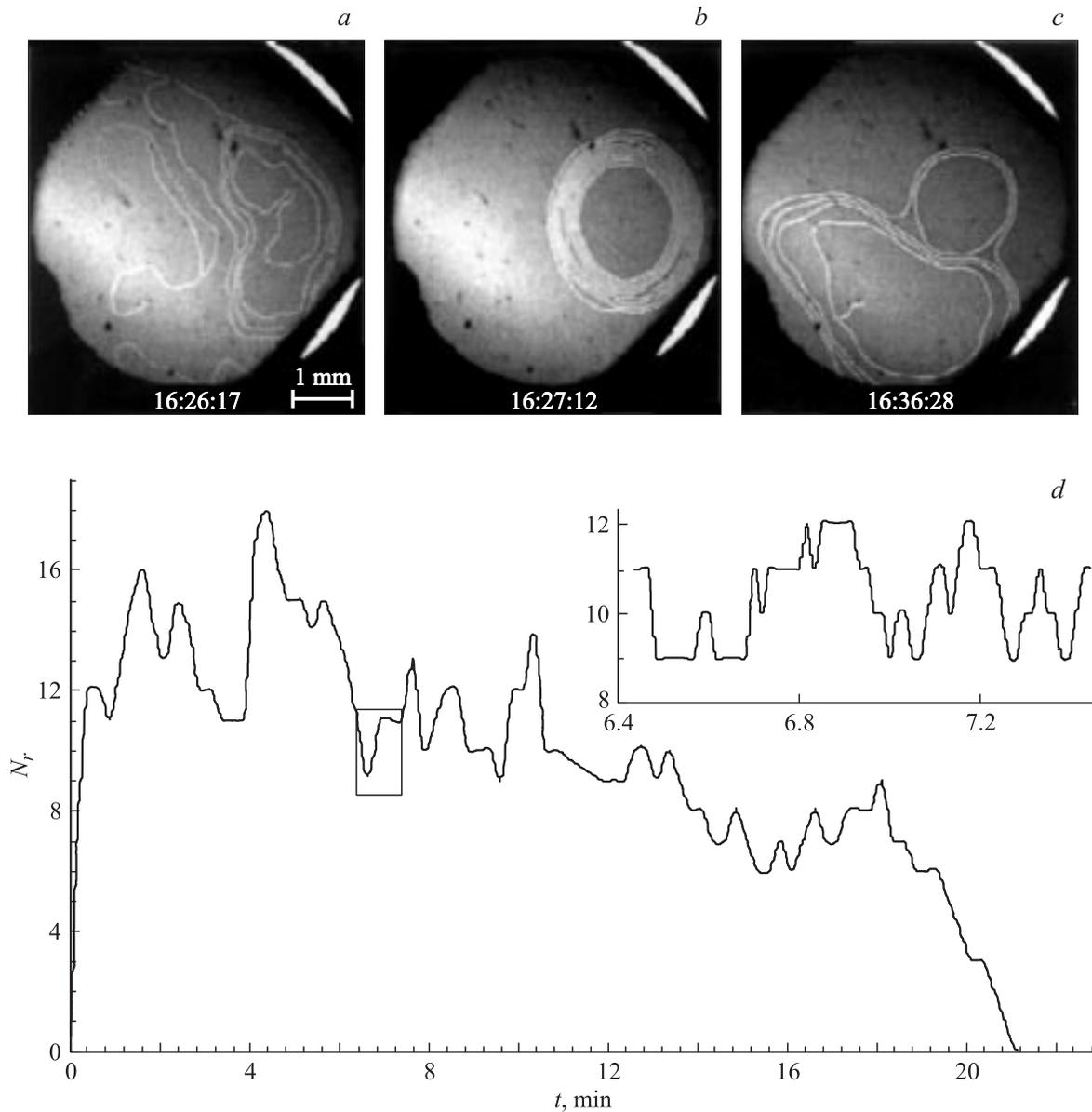


Рис. 3. Характерный вид одной и той же системы ККД в самом начале ее жизни (*a*), в течение жизни (*b*) и при разрушении (*c*). *d* — изменение числа колец в течение жизни одной системы ККД. На вставке — зависимость $N_r(t)$ в увеличенном временном масштабе.

жизни. За все время существования кольцевой системы, как следует из рис. 3, *d*, число колец N_r изменяется нерегулярно. Скачки $N_r(t)$ носят фрактальный характер, что продемонстрировано на вставке к рис. 3, *d*, где представлены данные для $N_r(t)$ в увеличенном временном масштабе. Отметим также, что на некоторых крупных системах ККД за время жизни наблюдалось резкое уменьшение N_r вплоть до одного кольца. Но данная структура не исчезала, число колец снова начинало возрастать, и она продолжала существовать.

8. Все, что описывалось выше, относилось к одиночным системам ККД. Однако в пленке может существовать одновременно несколько таких систем. Тогда наблюдается весьма своеобразное взаимодействие меж-

ду ними. На рис. 4 показан этот процесс на примере двух кольцевых систем. Первой возникла и разрослась структура на рис. 4, *a*. К 61-й секунде ее жизни в левой части образца появилась и выросла вторая система ККД, которая начала поглощать первую, перераспределяя ее кольца „поверх“ своих (рис. 4, *b*).

Через некоторое время (показано на фрагментах рис. 4) от первой системы осталось одно искаженное кольцо (рис. 4, *c*). Далее она исчезла, и вторая система ККД превратилась в кольцевую структуру с огромным внутренним ядром. За время дальнейшего существования второй системы ее внешний диаметр возрастал до 3.2 мм, а число колец нерегулярно изменялось как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения.

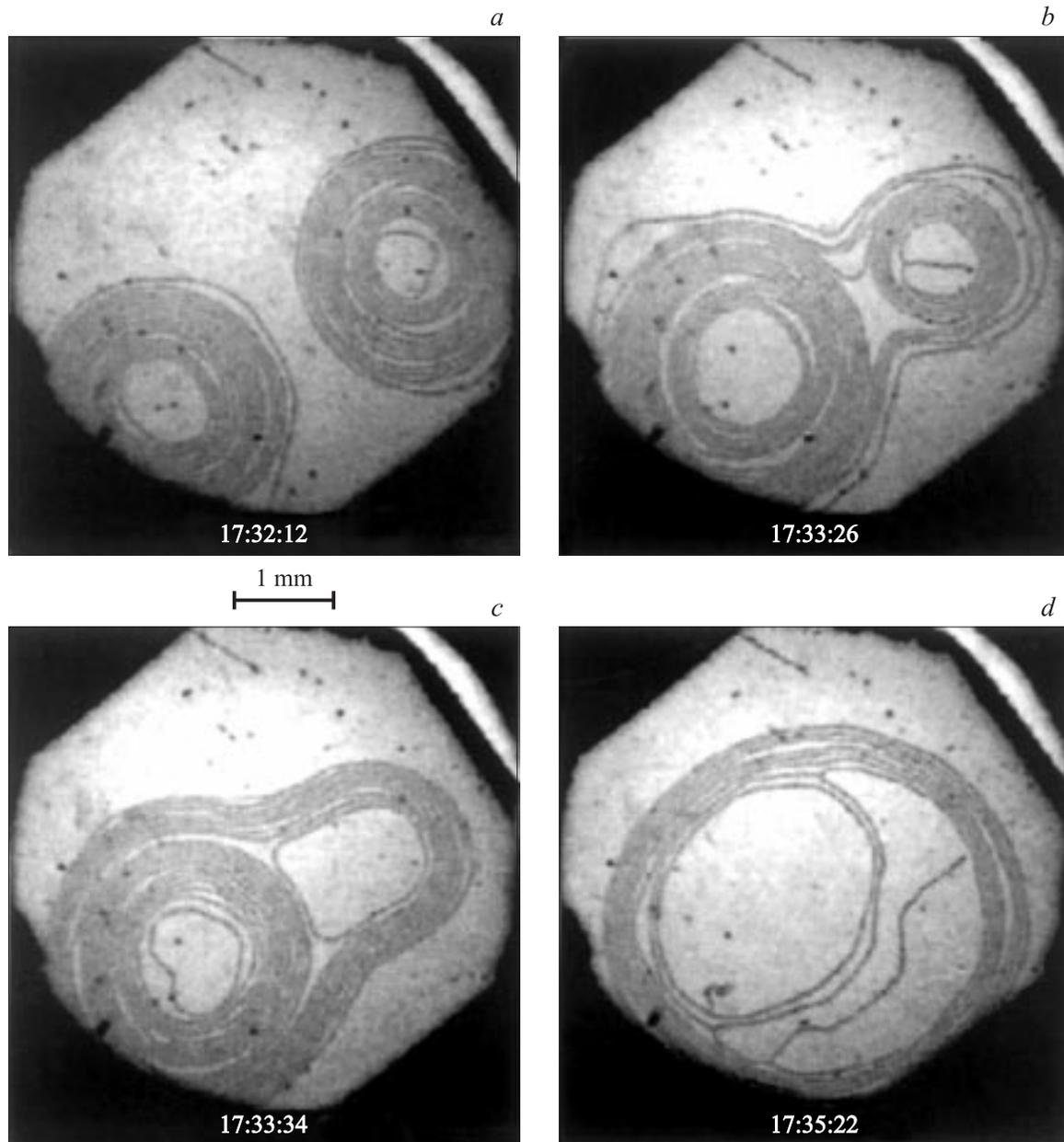


Рис. 4. Изменение ДДС в результате взаимодействия двух систем ККД. Время, указанное на частях рисунка, соответствует реальному времени наблюдения этой ДДС.

Внутри этой системы ККД неоднократно возникали и исчезали системы концентрических колец меньших размеров.

9. Как отмечалось выше, крупные системы ККД в пленках ферритов-гранатов наблюдались ранее в интервале частот 120–200 Hz [5–7]. Хотя они изучены слабо, все же имеет смысл сравнить некоторые количественные параметры АС (T_g , T_w) и кольцевых систем из указанных работ с аналогичными данными, полученными нами. Это сравнение представлено в таблице. Видно, что в инфразвуковой области частот наблюдаются более крупные и значительно более устойчивые упорядоченные ДДС в виде систем ККД. Отметим, что имеется ряд тео-

ретических исследований статических и динамических кольцевых доменных структур (см., например, [11–16]). Однако системы динамических ККД с теми особенностями, которые описаны в настоящей работе, насколько нам известно, никем не рассматривались.

10. Таким образом, в результате изучения ДДС высокоанизотропной пленки феррита-граната в переменных гармонических полях инфразвуковой частоты установлено следующее.

1) Обнаружено АС при частотах возбуждающего поля 2–3 Hz. В этом состоянии при амплитуде поля, меньшей напряженности статического поля насыщения ($H_0 < H_S$), формируются устойчивые системы парал-

Сравнение параметров АС и динамических систем ККД (по данным, полученным из различных источников)

Параметр	Литературная ссылка	
	[5–7]	Наст. раб.
Форма поля $H(t)$	Симметричный меандр	$H \sim H_0 \sin 2\pi f t$
Частота f , Hz	100–200	2–3
Амплитуда H_0	$H_0 < H_S$	$H_0 > H_S$
Приведенный интервал амплитуд $\Delta H_0/H_S$	0.85–0.95	2.0–2.8
T_g , s	5–10	600–2500
T_g/T^*	500, 1000–2000	1500–6000
D_{ex} , mm	0.8–1	1–4
D_{in} , mm	0.4–0.8	0.5–3

* T — период поля. T_g/T — число периодов поля, приходящихся на время жизни кольцевой доменной структуры.

лельно упорядоченных динамических полосовых доменов. Время жизни такого пучка доменов может достигать 20 s. При амплитуде поля, превышающей в 2.0–2.8 раза величину H_S , образуются системы ККД (содержащие до 20 колец) с большим внутренним ядром, намагниченным до насыщения или заполненным неупорядоченной ДДС. Время их жизни достигает 40 min. Максимальный диаметр систем ККД может быть близок к размеру образца (~ 4 mm).

2) Впервые на серии видеок кадров зафиксировано около десяти последовательных эпизодов эволюции одной и той же системы ККД за один период переменного поля. Наглядно показано, что большой гистерезис в процессах перемагничивания пленки связан с динамической устойчивостью системы ККД, существующей при амплитудных значениях поля, и задержкой размагничивания ядра системы ККД и окружающей ее части пленки.

3) Выявлены неизвестные ранее механизмы преобразования динамической упорядоченной структуры за время ее жизни. В течение времени T_g система ККД может не только терять или приобретать снаружи или внутри кольцевые домены, но и расслаиваться, образуя внутри систему ККД меньшего диаметра с центром, смещенным относительно центра исходной системы. Возможно также, что внутри системы ККД с большим ядром формируется новая система меньшего размера.

4) Впервые исследовано взаимодействие разных систем ККД. Установлен ряд особенностей во взаимодействии двух систем ККД, например: „перематывание“ витков от одной структуры к другой; образование колец, объединяющих обе системы. полное поглощение одной системы другой.

Список литературы

- [1] Г.С. Кандаурова. УФН **172**, *10*, 1165 (2002).
- [2] Г.С. Кандаурова, В.Х. Осадченко. ФММ **97**, *2*, 38 (2004).
- [3] М.В. Логунов, М.В. Герасимов. ФТТ **44**, *9*, 162 (2002).
- [4] В.Н. Мальцев, Г.С. Кандаурова, Л.Н. Картагулов. ФТТ **45**, *4*, 658 (2003).
- [5] Г.С. Кандаурова, А.Э. Свицерский. Письма в ЖТФ **14**, 777 (1988).
- [6] Г.С. Кандаурова, А.Э. Свицерский. ЖЭТФ **97**, 1218 (1990).
- [7] А.Э. Свицерский. Автореф. канд. дис. УрГУ, Екатеринбург (1994).
- [8] В.Х. Осадченко, Г.С. Кандаурова, А.Г. Пашко, А.А. Шинкоренко. В сб.: Материалы XIX Междунар. школы-семинара „Новые магнитные материалы микроэлектроники“, М. (2004).
- [9] Г.С. Кандаурова, В.Х. Осадченко, А.А. Русинов, Е.А. Русинова. Письма в ЖЭТФ **63**, *6*, 453 (1996).
- [10] Г.С. Кандаурова, Ю.В. Иванов. ФММ **76**, *1*, 49 (1993).
- [11] А.В. Антонов, А.М. Балбашов, В.А. Балтинский, А.И. Червоненкис. ФТТ **14**, *7*, 1901 (1972).
- [12] F.A. Ijnge, W.F. Dryvesteyn, C.H. Verhulst. J. Appl. Phys. **42**, 1270 (1974).
- [13] K.V. Lamonova, Yu.A. Mamalui, Yu.A. Siryk. ФТВД **6**, *4*, 49 (1996).
- [14] А.Ф. Гальцев, Ю.М. Ялышев. ФММ **85**, *4*, 5 (1998).
- [15] А.Ф. Гальцев, Ю.М. Ялышев. ФММ **89**, *3*, 24 (2000).
- [16] V.N. Maltsev, G.S. Kandaurova. Phys. Met. Metallogr. **92**, Suppl 1, 22 (2001).