

УДК 538.221

УСТОЙЧИВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ДОМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ В ПЛЕНКЕ ФЕРРИТА-ГРАНАТА В НИЗКОЧАСТОТНОМ ПОЛЕ НАКАЧКИ

Г. С. Кандаурова, А. Я. Червоненкис, А. Э. Свидерский

Обнаружено, что под действием низкочастотного синусоидального поля (10^2 — 10^4 Гц) с амплитудой $\sim(0.60-0.75)$ от статического поля насыщения магнитоодносная монокристаллическая пленка с исходной лабиринтарной доменной структурой (ДС) переходит в особое возбужденное состояние, для которого характерно образование устойчивых спиральных доменов. Время жизни этих доменов на несколько порядков превышает период накачки. С увеличением частоты поля вид динамической доменной структуры (ДДС) меняется от отдельных витков полосовых доменов до плотноупакованной системы спиральных доменов (СД). При этом диаметр ядра спиралей уменьшается, а число таких доменов на единицу площади образца меняется с частотой немонотонно. Сам факт наблюдения упорядоченной устойчивой ДДС указывает на процессы самоорганизации в движении доменных границ. Предполагается, что рассматриваемое возбужденное состояние является автоволновым.

В ряде работ (см., например, обзор в [1]) исследовалось поведение ДС пленок ферритов-гранатов в высокочастотных полях. Обнаружены интересные эффекты, такие как выстраивание и переориентация полосовых доменов, формирование кольцевых доменов и различных решеток цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) и др. Все эти опыты относились к диапазону частот 10^6-10^9 Гц. Низкочастотная область 10^2-10^4 оказалась практически незатронутой. Настоящая работа посвящена выяснению закономерностей в поведении ДС феррит-гранатовых пленок с перпендикулярной анизотропией в переменных магнитных полях частотой 10^2-10^4 Гц.

1. Методика эксперимента и исходная ДС

Для опыта выбрана эпитаксиальная пленка (111) феррита-граната $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ толщиной $L \simeq 7$ мкм. Образец в форме диска диаметром 5 мм помещался в средней плоскости катушки с внутренним диаметром 6 мм. Постоянное поле H напряженностью до 80 Э или переменное синусоидальное поле H_{\sim} с такой же максимальной амплитудой прикладывалось по нормали к образцу, т. е. вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН). Частота магнитного поля могла варьироваться от 0 до 20 кГц. Доменная структура выявлялась с помощью магнитооптического эффекта Фарадея. Фотографирование ДС производилось с экспозицией $\Delta t_{\text{эксп}}=1.2$ или 0.5 мс. На рис. 1, а показана ДС образца в исходном состоянии. Это лабиринтарная ДС, типичная для тонких магнитоодносных пленок (пластинок) с плоскостью, перпендикулярной ОЛН. Последовательное изменение ДС при квазистатическом намагничивании хорошо известно (рис. 1, б—г). При $H=0$ (рис. 1, а) ширина «белых» d^+ и «черных» d^- доменов с направлением \mathbf{J} соответственно «к нам» и «от нас» одинакова, период ДС $(d^++d^-)=17.0$ мкм. В полях 40—50 Э $d^+ \gg d^-$ (рис. 1, в, г). В поле $H_s=68$ Э достигается намагниченность насыщения.

2. Возбужденное состояние динамической системы доменов

Опишем сначала визуально наблюдаемые изменения в ДС образца при приложении синусоидального поля H_{\sim} с некоторой выбранной частотой, например $f=1$ кГц. С увеличением амплитуды H_{\sim} доменные границы (ДГ) начинают «дрожать», беспорядочно двигаться и вся картина ДС при $H_{\sim}=40\div 44$ Э «расплывается». Так и должно быть, если движение ДГ остается хаотическим. Однако при дальнейшем увеличении амплитуды H_{\sim} до 46—50 Э происходит качественное изменение состояния многодоменного образца: на всей поверхности появляется контрастная, более или

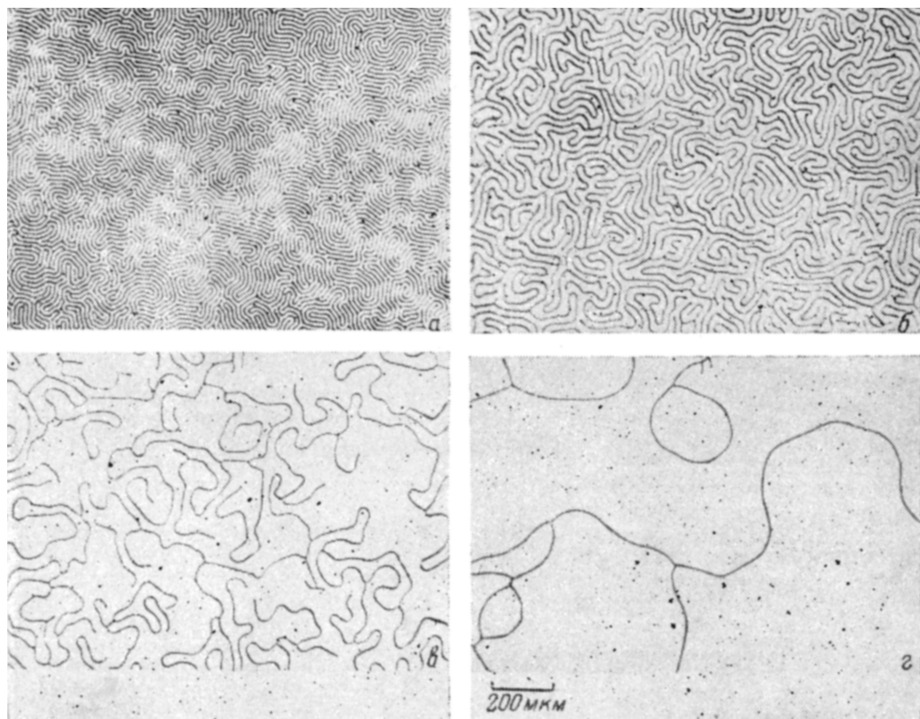


Рис. 1. Доменная структура пленки $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ в магнитном поле.

$a - 0$, $b - 36.6$, $v - 43.2$, $z - 51.5$ Э.

менее упорядоченная, устойчивая ДДС, состоящая из систем полосовых доменов, закрученных в многовитковые спирали. Такая ДДС показана на рис. 2 (снимок сделан с $\Delta t_{\text{экп}}=1.2$ мс). Из сравнения с рис. 1, з, который соответствует примерно (по величине поля) рис. 2, видно, что статическая и динамическая ДС различаются кардинальным образом по конфигурации, по протяженности ДГ на единицу площади образца. Последний параметр в случае ДДС на несколько порядков больше, чем в случае статической ДС. Высокий контраст картины ДДС на рис. 2, особенно в участках сгущения полосовых доменов, где ширина «белых» и «черных» доменов одинакова ($d^+ \approx d^- \approx 5$ мкм), свидетельствует о том, что за каждый период H_{\sim} ДГ смещаются незначительно. Границы колеблются около устойчивых положений равновесия. Это, в свою очередь, указывает на изменение характера движения ДГ от хаотического к упорядоченному. Как видно из рис. 2, полосовые домены могут закручиваться как по, так и против часовой стрелки. Средний размер ядра спиральных доменов составляет $D \approx 120$ мкм при $f=1$ кГц и $H_{\sim}=52$ Э, а размер области, занятой одним СД, порядка 0.25 мм².

Вся наблюдаемая картина ДДС является подвижной, изменчивой. Отдельные спирали появляются, перемещаются, исчезают, на их месте формируются новые, и так все время, пока действует поле накачки H_{\sim} . Можно увидеть деление ядра спирали и образование из одной двух спиралей. На рис. 2, а—в показана ДДС на одном и том же месте образца, но сфотографированная с интервалом в несколько минут. Видно, что общий характер ДДС сохранился, а в деталях картины изменились полностью. Время «жизни» отдельного СД или целого комплекса таких доменов составляет секунды и десятки секунд, что на несколько порядков превышает период поля H_{\sim} . Поэтому мы относим наблюдаемую ДДС к устойчивой, стационарной во времени структуре. При увеличении амплитуды H_{\sim} до ≥ 52 Э ДДС не наблюдается. Таким образом, при $f = 1$ кГц ДДС формируется в довольно узком интервале полей $\Delta H_{\sim} = 44 \div 52$ Э, что составляет 0.65—0.76 от статического поля насыщения H_s . На рис. 3 представлена зависимость полевого интервала существования устойчивой ДДС от частоты внешнего поля накачки. Видно, что этот интервал имеет наибольшую величину при частотах $f = 150 \div 500$ Гц, далее ΔH_{\sim} с ростом f уменьшается и в диапазоне $f = 2.5 \div 17.5$ кГц остается практически постоянным и равным $\Delta H_{\sim} = 40 \div 46$ Э, т. е. (0.59—0.68) H_s . При $f > 18$ кГц и $H < 80$ Э устойчивая ДДС не наблюдалась.

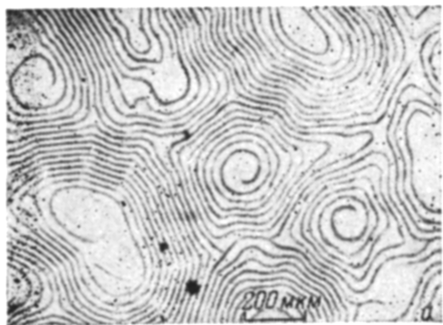


Рис. 2. Динамическая доменная структура пленки при частоте магнитного поля $f = 1$ кГц и амплитуде $H_{\sim} = 52$ Э.

3. Частотный спектр картин динамической доменной структуры

Как показывает опыт, конфигурация динамических доменов и общий вид устойчивой ДДС существенно зависят от частоты поля H_{\sim} . На рис. 4 приведена серия картин ДДС, сфотографированных при различных частотах f с $\Delta t_{\text{эксп}} = 0.5$ мс и в синусоидальных полях H_{\sim} , соответствующих по амплитуде приблизительно середине интервала ΔH_{\sim} на рис. 3. При частотах $f = 120 \div 150$ Гц появляются первые, достаточно устойчивые двух-трехвитковые системы полосовых доменов (рис. 4, а), хорошо различимые визуально. С увеличением f вид ДДС изменяется (рис. 4, б). Полосовые домены закручиваются в многовитковые неправильной формы спирали. Картина на рис. 4, а, б очень подвижна. Системы витков перемещаются, исчезают, появляются новые.

На рис. 4, а, б спирали состоят из «черных» полосовых доменов с намагниченностью J , направленной «от нас». Если временной интервал засветки $\Delta t_{\text{эксп}}$ попадает на полупериод поля H_{\sim} другого знака, то можно получить картину белых спиралей на сером фоне. Если $\Delta t_{\text{эксп}}$ захватывает

вает интервал, где $H_{\sim}(t)$ проходит через нуль, то на фотографиях фиксируется и лабиринтарная ДС в размагниченном состоянии. Этот побочный методический эффект наиболее заметен при $f=500-1500$ Гц, когда период поля T и время экспозиции $\Delta t_{\text{эксп}}$ близки. Избавиться от него при нашей

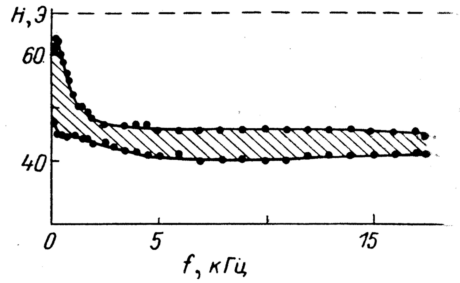


Рис. 3. Зависимость области существования динамической доменной структуры от частоты поля накачки.

Птриховой линией отмечена величина поля насыщения H_s при квазистатическом намагничивании.

методике эксперимента не удастся. Положительный момент здесь заключается в том, что мы «успеваем» заметить, во что превращаются крупно-

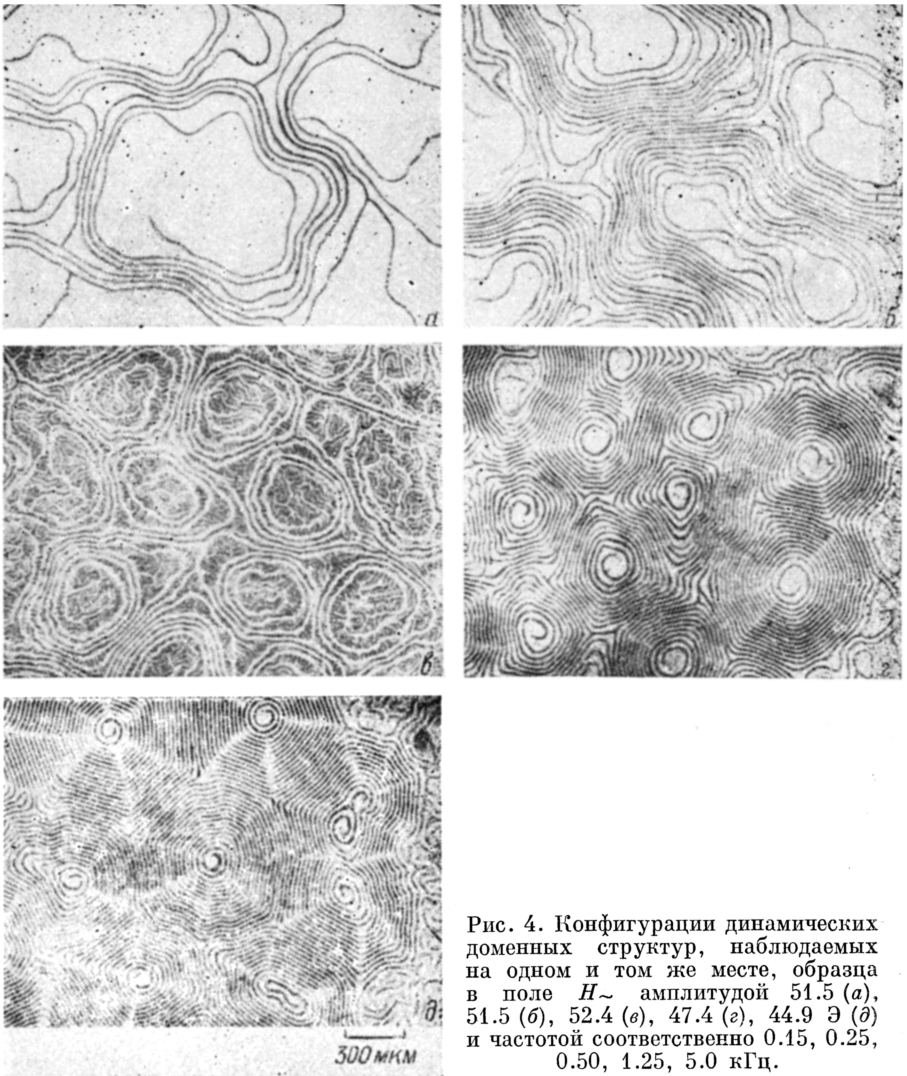


Рис. 4. Конфигурации динамических доменных структур, наблюдаемых на одном и том же месте, образца в поле H_{\sim} амплитудой 51.5 (а), 51.5 (б), 52.4 (в), 47.4 (г), 44.9 Э (д) и частотой соответственно 0.15, 0.25, 0.50, 1.25, 5.0 кГц.

масштабные динамические СД в то время, когда $H_{\sim}=0$. Дважды за период СД переходят в лабиринтарную ДС. Но в этой структуре есть уже такие элементы порядка, которые позволяют при многократном (более 100) достижении амплитудного значения H_{\sim} границам доменов распола-

гаться в среднем на одних и тех же местах, в результате чего мы видим устойчивую ДДС.

Из сравнения рис. 4, в с рис. 4, а, б видно, что с увеличением f до 500 Гц, двух-четырёхвитковые СД становятся более правильной формы и более компактными. Уменьшается средний размер ядра спирали D . При дальнейшем повышении частоты продолжается уменьшение D и увеличение числа витков в спиралах до 6—12 (рис. 2 и 4, а). Многовитковые СД, расположенные близко друг к другу, взаимодействуют как упругие системы независимо от их топологического заряда. На это указывают области сгущения витков. На рис. 4, г вместе с более или менее упорядоченной ДДС справа виден участок с неорганизованной структурой. Картина ДДС при $f=1.25$ кГц (рис. 4, г) более стабильна, чем при $f \leq 500$ Гц. Если при $f=500$ Гц (рис. 4, в) время жизни T_p одного СД в среднем ~ 7 с, то в случае $f=1.25$ кГц (рис. 4, г) оно составляет 12 с. Заметно также, что в процессе перемагничивания внутри ядер СД формируются ЦМД.

Обратим внимание на то, что при плотной упаковке СД витки спиралей принимают форму ломаных линий (рис. 4, г). Особенно ярко это проявля-

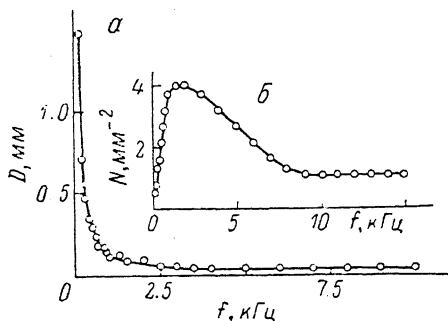


Рис. 5. Зависимость от частоты возбуждающего магнитного поля среднего диаметра ядра спиральных доменов (а) и среднего количества спиралей на единицу площади образца (б).

ется при больших частотах. Так, показанная на рис. 4, д ДДС при $f=5$ кГц имеет вид мозаики. Четко видны отдельные блоки мозаики с параллельными полосовыми доменами. Средний размер блоков составляет ~ 400 мкм, а число витков в СД — порядка 10—15. Как и в предыдущих случаях (рис. 2, 4, а—г), топологический заряд СД в плотноупакованной структуре может быть и $+q$, и $-q$. Как видно из рис. 4, д, СД состоят из «белых» и «черных» доменов одинаковой ширины ($d^+=d^-=10$ мкм). Величина (d^++d^-) во много раз меньше среднего периода статической ДС (рис. 1, а) в поле H , равном амплитудному значению H_* , и близка к d^++d^- в размагниченном исходном состоянии (рис. 1, а). Это значит, что за полупериод от $+H_*$ до $-H_*$ площадь границ практически не меняется. Надо отметить особую устойчивость ДДС типа мозаики. Здесь в среднем время жизни СД составляет 20 с, а у отдельных СД оно достигает 1 мин. Но, подчеркнем, как и в предыдущих случаях (рис. 2, 4, а—г), ДДС на рис. 4, д является подвижной структурой. Непрерывно происходят изменения в общей картине ДДС: исчезают одни СД и появляются другие, вытягиваются ядра у некоторых СД и делятся на 2—3 новых; распространяются волнообразные возмущения внутри СД, связанные с изменением структуры ядра при переключении поля. Мозаичный характер в ДС просматривается и после выключения H_* , хотя последующая небольшая «тряска» в поле $H_*=20 \div 30$ Э и $f=20 \div 30$ Гц снимает такое упорядочение и переводит ДС в исходную лабиринтарную. Динамическая ДС типа мозаики существует до $f=18$ кГц.

На рис. 5 представлены частотные зависимости таких количественных характеристик ДДС, как D — средний размер ядра СД, N — поверхностная плотность СД. Видно (рис. 5, а), что величина D резко падает от $D=1$ мм при $f=150 \div 200$ Гц до $D=0.1$ мм при $f=1$ кГц. Начиная с $f=7 \div 8$ кГц и вплоть до конца частотного интервала существования ДДС диаметр ядра СД остается практически постоянным ($D \sim 25$ мкм) и почти одинаковым для всех СД. По-видимому, это предельно минимальное значение D является функцией материальных констант и толщины пленки.

Как следует из рис. 5, б, величина N меняется с частотой немонотонно. Максимум N составляет $\sim 4 \text{ мм}^{-2}$ и приходится на $f=1\div 1.2 \text{ кГц}$. Далее с ростом f величина N падает до 0.9 мм^{-2} при $f=9 \text{ кГц}$ и остается на этом уровне вплоть до $f=15 \text{ кГц}$. Постоянство значений D и N в широком интервале частот является характерной особенностью мозаичной ДДС. Отметим, наконец, что при приложении к исследуемому образцу вместо синусоидального поля H_{\sim} поля $H(t)$ типа меандра той же частоты и амплитуды никакие из описанных выше эффектов не наблюдались.

Таким образом, при подходящих условиях внешней энергетической накачки в магнитоодноосном кристалле наблюдаются процессы самоорганизации в движении доменных границ и формирование упорядоченных динамических структур. Процессы самоорганизации характерны для нелинейных активных сред, далеких от состояния равновесия. Подвижные системы спиральных магнитных доменов, по-видимому, можно рассматривать как автоволновые стационарные диссипативные структуры, подобные тем, которые в определенных ситуациях возникают в жидких, газообразных и других средах [2, 3].

В заключение авторы выражают большую благодарность В. И. Чани за пленки, предоставленные для исследования.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Малоземов А., Слоззуски Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982.
- [2] Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985.
- [3] Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987.

Уральский государственный
университет им. А. М. Горького
Свердловск

Поступило в Редакцию
27 июня 1988 г.
В окончательной редакции
6 февраля 1989 г.