

УДК 538.221

©1995

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ

Г.С.Кандаурова, Ж.А.Кипшакбаева

Уральский государственный университет им. А.М. Горького, Екатеринбург
(Поступила в Редакцию 15 августа 1994 г.)

Впервые для тонких магнитных пленок с перпендикулярной анизотропией построены и изучены полные динамические доменные фазовые диаграммы в широком интервале частот и амплитуд переменного поля. На каждой диаграмме выделены области, которым соответствуют различные по геометрии и динамическому поведению доменные структуры (фазы). Обозначены области динамической самоорганизации. Обнаружены совершенно новые динамические доменные структуры.

Известно [1,2], что явление самоорганизации динамической системы магнитных доменов имеет место в определенной области частот f и амплитуд H_0 переменного магнитного поля. Для исследованных в [1,2] пленок ферритов-гранатов (ФГ) эта область ограничивалась значениями $f = 10^2 - 10^4$ Hz и $H_0 < H$ — статического поля насыщения. Здесь формировались кольцевые и спиральные динамические доменные структуры (ДДС), а также имела место самогенерация периодических процессов возникновения/исчезновения ДДС. Это область ангарного состояния (АС) многодоменной среды [3]. На границах области реализуются переходы хаотическая ДДС—упорядоченная ДДС. В [4] была найдена еще одна ограниченная область АС, где формировалась ДДС типа «ведущий центр». Ведущий центр — это система концентрических кольцевых доменов с гребенчатыми [5] или гладкими [6] границами. В центре системы периодически возникают и расширяются цилиндрические домены чередующейся полярности. Частота f_s работы ведущего центра на несколько порядков меньше f . В [7] наблюдались и другие виды упорядоченных ДДС (однородные и смешанные решетки цилиндрических, эллиптических, гантелевидных доменов) и фазовые переходы между ними. Большое разнообразие ДДС найдено в [3,8].

Учитывая все это, мы поставили перед собой задачу построения и анализа полных динамических доменных фазовых диаграмм (ФД) для каждого из исследованных образцов в широкой области значений амплитуд и частот переменного магнитного поля. При этом к разным динамическим доменным фазам отнесли ДДС, четко различающиеся

по конфигурации и динамическому поведению. Оказалось, что построенные таким образом ФД несут богатейшую информацию о кооперативных явлениях в динамической системе магнитных доменов.

Исследовались эпитаксиальные ФГ пленки (111) с одноосной перпендикулярной анизотропией, толщиной 2–9 μm , намагниченностью насыщения 5–30 Gs, полями анизотропии 1–15 kOe. Образцы площадью 15–25 mm^2 помещались в среднюю плоскость катушки диаметром 6.5 mm и высотой 5 mm. Переменное поле $H(t) = H \sin 2\pi ft$ ориентировалось по нормали к образцу. Частота и амплитуда варьировались в пределах $f = 0\text{--}140$ kHz и $H_0 = 0\text{--}100$ Oe. Пределы по амплитуде поля ограничивались аппаратными возможностями и требованием постоянства температуры во время каждого опыта. Доменная структура (ДС) выявлялась с помощью магнитооптического эффекта Фарадея и фотографировалась с экспозицией ~ 1 ms.

В качестве иллюстрации приведем большой и наиболее интересный фрагмент ФД для пленки $(\text{YBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ толщиной 2 μm (рис. 1). У этого образца температура магнитной компенсации находится несколько ниже комнатной. Поэтому в исходном состоянии (рис. 2, а) он имеет нерегулярную, «рваную» ДС с произвольной формой доменов. Коэрцитивность границ велика, и в статическом поле намагничивание происходит скачками. После магнитной «тряски» частотой 50 Hz и $H_0 = 3\text{--}4$ Oe структура становится похожей на плоскую лабиринтарную ДС, но с изломанными границами. Такой характер ДС сохраняется до больших частот. Это область 1 на ФД (рис. 1). Здесь границы доменов только «дрожат». Домены не меняют конфигурацию. При больших амплитудах проявляется эффект снижения коэрцитивности в переменном поле [9]. Домены начинают перемещаться, и в результате формируется подвижная лабиринтарная ДДС с гладкими границами. Ширина доменов ~ 50 μm . Это область 2 на рис. 1.

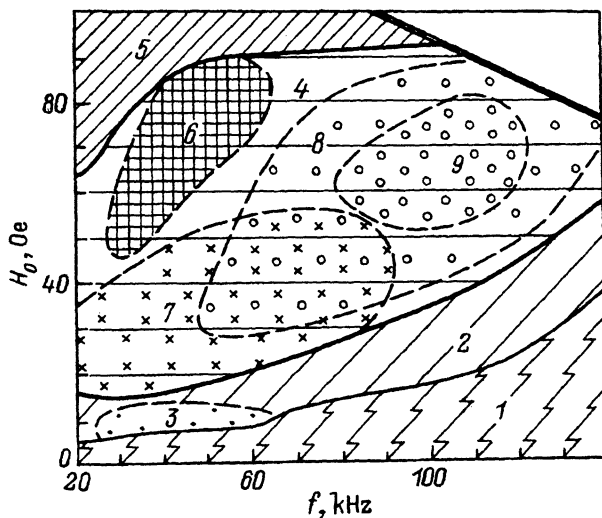


Рис. 1. Доменная динамическая фазовая диаграмма пленки феррита-граната при температуре 29°C.

Различной штриховкой и номерами обозначены области существования динамических доменных структур различного вида. Верхний правый угол не заполнен из-за ограничений экспериментальной методики.

Примечательна область 3 на ФД. Здесь лабиринтарная ДС исчезает. На однородном темном фоне видны мелкие не очень правильной формы цилиндрические домены, закрепленные на каких-то точечных дефектах. Размер доменов $\sim 150 \mu\text{m}$. Эти домены колеблются, дрожат, мигают, но не перемещаются по образцу. Визуально они очень похожи на звездочки.

Прежде чем описывать обширную область 4 на ФД, отметим область 5. Ей соответствует очень подвижная неупорядоченная структура из различных доменов (изогнутые полосы, искаженные круги, гантели, эллипсы, кольца и др.). Все домены интенсивно двигаются, меняют размеры, форму, исчезают и появляются. Таким образом, в областях 1, 2 и 5 имеют место хаотические, но весьма различные ДДС, поэтому мы их выделили как разные динамические доменные фазы.

Область 4 на ФД обозначена редкой, горизонтальной штриховкой. Границы ее обведены жирными линиями. При увеличении H_0 в этой области начинают «работать» (нижняя граница), активно действуют, а затем прекращают «работать» (верхняя граница) различные доменные источники (ДИ). Они расположены на краю образца или на некоторых локальных дефектах. Именно здесь периодически возникают, растут и отрываются от дефекта все новые и новые домены. Среди ДИ есть ведущие центры. Есть ДИ, которые испускают последовательно друг за другом отдельные цилиндрические домены или целые группы цилиндрических доменов. Впервые о них сообщено в [6]. В этой работе такие ДИ относились к «своеобразным ведущим центрам». Однако целесообразно термин «ведущий центр» сохранить только за ДДС в виде системы концентрических колец, в центре которой находится генератор цилиндрических доменов. Есть ДИ, которые при изменении f или H_0 меняют свой характер и вместо одних по форме доменов начинают испускать другие. Среди ДИ есть и такие, которые работают нестабильно, со сбоями, генерируют неопределенные по форме домены. Такие ДИ порождают хаос. Надо подчеркнуть, что во всех случаях собственная частота f_s работы ДИ на несколько порядков меньше частоты переменного поля f . Продолжительность работы ДИ определяется временем действия внешнего переменного поля. Это время ограничивается лишь требованием постоянства температуры образца.

При вариации H_0 и f создаются благоприятные условия для интенсивной работы одного (одних) ДИ и, наоборот, неблагоприятные условия для другого (других). В итоге один из ДИ становится лидирующим, а остальные или слабо и со сбоями генерируют домены, или совсем перестают действовать. Так, при значениях H_0 и f , приближающихся к границам области 6 на ФД (рис. 1), лидирует ДИ, который испускает крупные цилиндрические домены. Внутри области 6 почти 3/4 площади образца занято устойчивой решеткой из крупных подвижных цилиндрических доменов (рис. 2, б). Диаметр их достигает $\sim 250 \mu\text{m}$.

В области 7 на ФД (рис. 1) активно действует ведущий центр, показанный на рис. 2, с. Количество кольцевых доменов в нем составляет 4–5 штук. Ширина доменов, образующих кольца, составляет $\sim 50 \mu\text{m}$. Диаметр внешнего кольца достигает $\sim 1 \text{mm}$. Отметим, что в работе этого ведущего центра часто происходят сбои. Вместо кольца в центре генерируется несколько цилиндрических доменов. Однако, как показал опыт, с повышением температуры этот ведущий центр работает более стабильно, а количество колец значительно увеличивается.

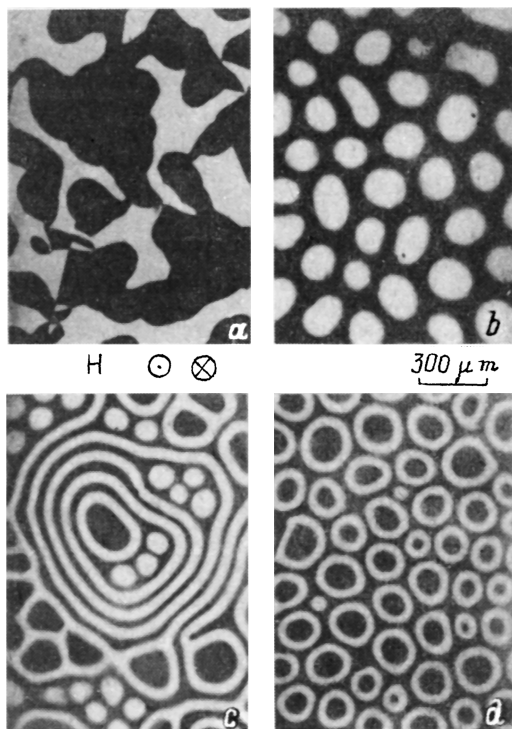


Рис. 2. Фотографии доменной структуры в отсутствие поля (а) и в переменном поле с различными f и H_0 (b-d).

f (kHz) и H_0 (Oe): b — 40 и 81, c — 60 и 51, d — 100 и 55. $T = 29^\circ\text{C}$.

При $f = 50$ kHz и выше начинает действовать источник, испускающий последовательно, друг за другом, кольцевые домены. Диаметр этих доменов значительно меньше, чем, например, диаметр наружных колец в ведущем центре. Поэтому мы назвали их «колечками» (область 8 на рис. 1). С увеличением H_0 и f интенсивность генерации колечек усиливается. Работа других ДИ подавляется. В результате при значениях H_0 и f , соответствующих области 9 на ФД (рис. 1), более 2/3 площади образца занято устойчивой, малоподвижной решеткой из колечек (рис. 2, d). При ширине доменов, образующих колечки, 20–40 μm , внешний диаметр колечек составляет 50–250 μm . Такая упорядоченная доменная структура наблюдается впервые.

Таким образом, при определенных сочетаниях H_0 и f в области 4 на ФД в пленке термодинамически выгодным становится существование упорядоченных ДДС того или иного типа (решетки ДД, ВЦ, цилиндрических доменов, ведущие центры, решетки колечек). Тогда из имеющихся дефектов — потенциальных генераторов доменов — выбирается тот (или те), на котором формирование данного типа ДДС происходит легче всего. Этот дефект и оказывается лидирующим источником динамических доменов. Поскольку в области 4 на ФД (рис. 1) имеют место динамическая самоорганизация (образование упорядоченных ДДС) и самогенерация периодических процессов (работа ДИ), то ее можно отнести к области АС. По терминологии [4] это область АС-2. Заметим, что для описываемого образца при температурах 20–30°C при низких частотах 10^2 – 10^3 Hz нет области АС-1, где на других пленках ФГ формируются подвижные, многovitковые спиральные или кольцевые динамические домены.

Итак, на ФД выделено несколько областей, которым соответствуют различные по конфигурации и динамическому поведению ДДС: ломанный, малоподвижный лабиринт (1); гладкий, подвижный лабиринт (2); приколотые звездочки (3); полный, очень подвижный хаос (5); регулярно работающие источники динамических доменов (4), в том числе ведущий центр (7); упорядоченная подвижная решетка цилиндрических доменов (6); упорядоченная малоподвижная решетка колечек (9). Переход между фазами может быть постепенным, как между 6 \rightleftharpoons 4, или довольно резким, как между 1 \rightleftharpoons 2, 4 \rightleftharpoons 5, 2 \rightleftharpoons 4.

Таким образом, ФД дает более полную картину различных состояний динамической системы магнитных доменов, чем отдельные ее фрагменты, такие, например, как области АС, введенные нами ранее [2,4]. Можно надеяться, что доменные динамические ФД станут столь же необходимыми и полезными в физике магнитных доменов, как диаграммы магнитных фазовых переходов в физике магнитных (атомных) структур.

В заключение отметим, что требуют специального рассмотрения экспериментальные данные относительно количественных динамических и геометрических параметров доменных фаз; гистерезисных эффектов, которые наблюдаются при изменении частоты и амплитуды переменного поля; влияния формы поля $H(t)$ и температуры на вид ФД и др. Естественно, встает вопрос о природе наблюдаемых явлений и теоретических моделях, адекватных реальным ДДС.

Авторы выражают большую благодарность В.П. Клину и А.Я. Червоненкису за предоставленные для исследований пленки ферритов-гранатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 03-02-16340).

Список литературы

- [1] Кандаурова Г.С., Свицерский А.Э. Письма в ЖЭТФ 47, 8, 410 (1988).
- [2] Кандаурова Г.С., Свицерский А.Э. Письма в ЖТФ 14, 9, 777 (1988).
- [3] Кандаурова Г.С., Свицерский А.Э. ЖЭТФ 97, 4, 1218 (1990).
- [4] Кандаурова Г.С., Иванов Ю.В. ФММ 76, 1, 49 (1993).
- [5] Kandaurova G.S., Sviderskiy A.E. Physica B 176, 213 (1992).
- [6] Кандаурова Г.С. ДАН 331, 4, 428 (1993).
- [7] Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Николаева Е.П., Николаев А.В. ЖЭТФ 103, 1, 213 (1993).
- [8] Кандаурова Г.С., Червоненкис А.Я., Свицерский А.Э. ФТТ 31, 6, 238 (1989).
- [9] Власко-Власов В.К., Тихомиров О.А. ФТТ, 33, 12, 3490 (1991).