

# Эволюция динамических спиральных доменов в течение периода переменного магнитного поля

© М.В. Логунов, М.В. Герасимов

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,  
430000 Саранск, Россия

E-mail: logunov@mrsu.ru

(Поступила в Редакцию 15 октября 2001 г.)

Стробоскопическим методом исследована эволюция динамических спиральных доменов в пленках ферритов-гранатов в переменном магнитном поле. Показано, что в течение периода поля значительно изменяется форма спирального домена; основные процессы перестройки формы имеют место в диапазоне фаз  $\pm\pi/4$  относительно момента времени смены полярности поля. За время формирования/распада спирального домена плавно изменяются площадь и форма петли гистерезиса участка пленки, на котором находится домен. Установлено, что существование верхней (по частоте) границы формирования спиральных доменов связано с преобразованиями структуры границ доменов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-02-03325).

Спиральные домены — интересный случай упорядочения доменной структуры магнитного материала, привлекающий внимание многих исследователей. Формирование динамических спиральных доменов возможно в одноосных магнитных пленках в определенном диапазоне частот и амплитуд переменного магнитного поля [1–4]. Спиральные домены могут быть сформированы также в импульсном поле [4–7], квазистатически [8,9], под действием лазерного излучения [10], в двухслойных пленках [11]; возможно образование спиральных структур в сверхтонких пленках [12].

Представленные в литературе экспериментальные результаты исследования динамических спиральных доменов в переменном магнитном поле не связаны жестко с фазой перемагничивающего поля. Из-за невысокого временного разрешения фотографии доменных структур часто отображают интегральное состояние структуры за время, сравнимое с периодом поля или превышающее его. Как следствие возможны лишь предположения относительно соответствия фотографий доменных структур той или иной фазе процесса перемагничивания, что затрудняет интерпретацию результатов экспериментов. В частности, нет однозначного ответа на вопрос, определяется ли процесс формирования спиральных доменов в переменном магнитном поле (частота поля  $f \sim 10^2 - 10^3$  Hz) динамическими механизмами движения доменных границ или является суперпозицией квазистатических процессов, незначительно изменяющихся от периода к периоду магнитного поля. Неясно также, какими механизмами перемагничивания определяются частотные границы области формирования динамических спиральных доменов.

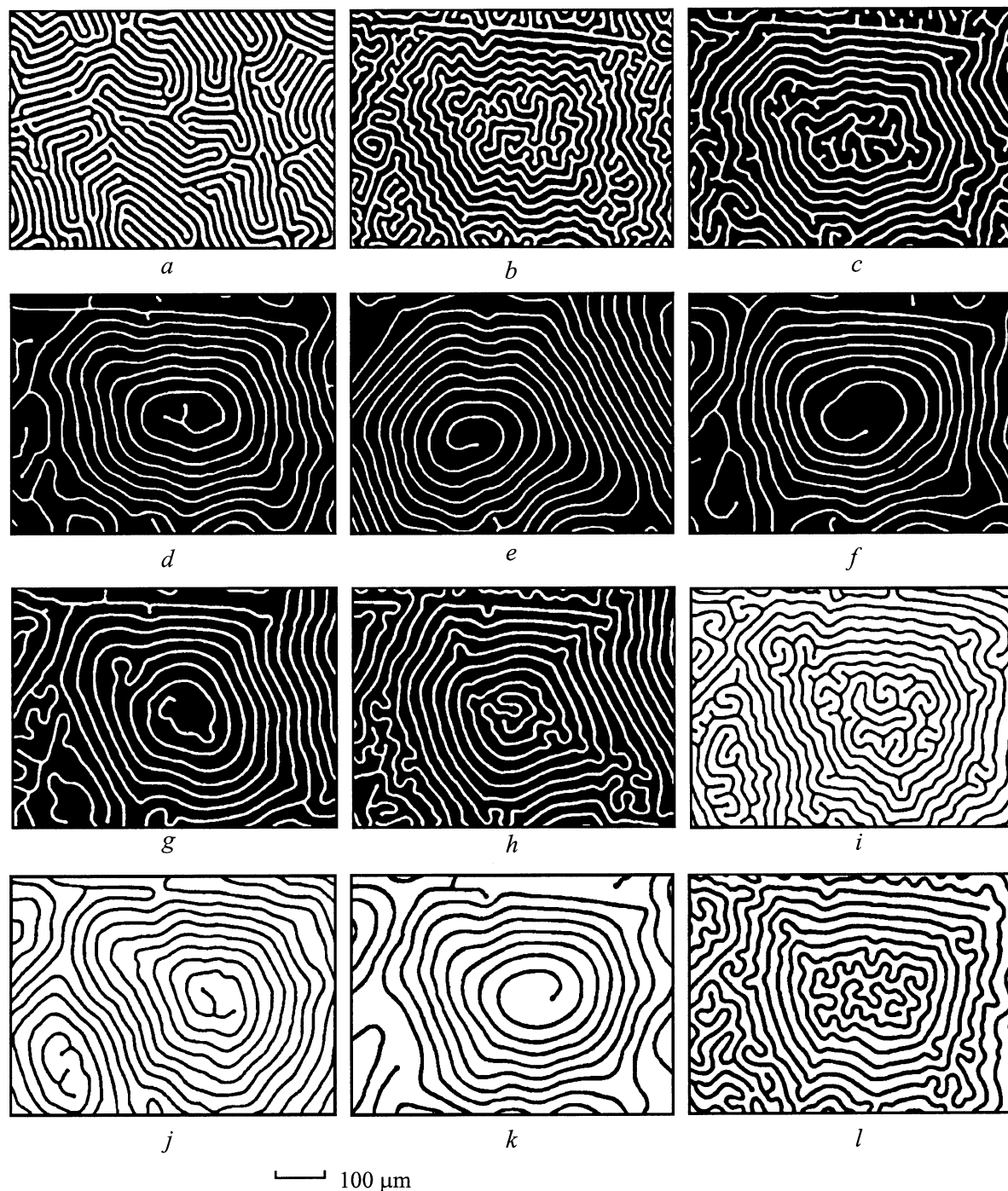
В настоящей работе с целью прямого изучения механизмов формирования динамических спиральных доменов исследована их эволюция в течение периода переменного магнитного поля путем регистрации

динамических доменных структур стробоскопическим методом.

## 1. Методика эксперимента

Изучение динамических спиральных доменов проводилось на магнитооптической установке с использованием эффекта Фарадея. Установка позволяет проводить запись петель гистерезиса в диапазоне частот магнитного поля  $f = 10^{-4} - 2 \cdot 10^5$  Hz и одновременно регистрировать изображения динамических доменных структур, соответствующих различным участкам петли гистерезиса, стробоскопическим методом с временным разрешением  $0.8 \mu\text{s}$  [13]. В качестве импульсного источника света применялся гелий-неоновый лазер с поперечной СВЧ-накачкой и модуляцией напряжения питания [14]. Возможности гибкого изменения режима модуляции лазера позволили реализовать стробоскопический метод с регулируемой кратностью стробирования  $K_{st} = 1, 2, 3, \dots$ . Для регистрации неповторяющихся процессов при записи динамических доменных структур с помощью видеокамеры мы путем изменения кратности стробирования выбирали режим работы установки, при котором на одном видеокadre регистрируется динамическая доменная структура с использованием одного импульса подсветки.

Наряду с обычным методом регистрации динамических петель гистерезиса с экрана осциллографа, когда на одном кадре регистрируется последовательность петель для многих циклов перемагничивания, установка позволяет стробировать и записывать на видеокамеру динамическую петлю гистерезиса для единичного цикла перемагничивания. Для этого, регулируя длительность импульса подсветки лазера, синхронизировали его по фазе и длительности с периодом переменного магнитного поля.



**Рис. 1.** Статическая ( $H = 0$ ) (a) и динамические доменные структуры в пленке феррита-граната, соответствующие различным фазам переменного магнитного поля с частотой  $f = 2$  kHz и амплитудой  $H_M = 38$  Oe: b —  $0^\circ$ , c —  $30^\circ$ , d —  $60^\circ$ , e —  $90^\circ$ , f —  $100^\circ$ , g —  $125^\circ$ , h —  $135^\circ$ , i —  $200^\circ$ , j —  $224^\circ$ , k —  $292^\circ$ , l —  $328^\circ$ .

Переменное магнитное поле формировалось с помощью колец Гельмгольца диаметром 2.5 mm и прикладывалось перпендикулярно плоскости пленки. Исследовалась область образца диаметром 1.5 mm.

В качестве образцов использовались монокристаллические пленки ферритов-гранатов. Для сопоставления полученных результатов с данными известных

работ по исследованию спиральных доменов выбрана пленка состава  $(\text{Tm}, \text{Bi})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$  с параметрами, сравнимыми с параметрами образцов, изученных в [2–4, 15–17]: толщина  $h = 5.8 \mu\text{m}$ , равновесная ширина полосовых доменов  $w = 8.7 \mu\text{m}$ , намагниченность насыщения  $M_s = 10$  Gs, константа одноосной анизотропии  $K_u = 1.3 \cdot 10^4$  erg/cm<sup>3</sup>, константа затухания  $\alpha = 0.09$ .

## 2. Результаты эксперимента

В равновесном состоянии в пленке существовала доменная структура в виде полосовых или лабиринтных доменов (рис. 1, *a*); для получения равновесного состояния структура была подвергнута „отжигу“ в переменном магнитном поле частотой  $f = 50$  Hz с медленно уменьшающейся до нуля амплитудой.

Процессы формирования спиральных доменов происходили в диапазоне частот переменного магнитного поля  $f = 0.5–5$  kHz при амплитудах магнитного поля  $H_M = 43 \pm 5$  Oe. Процессы закручивания полосовых доменов в микроспирали возможны в значительно более широком частотном диапазоне полей (0.1–20 kHz), но мы учитывали спиральные домены с числом витков не менее двух. При этом для частоты  $f \sim 2$  kHz время существования спиральных структур было наибольшим (3–8 s), а время ожидания — наименьшим (5–8 s). Эта частота и была выбрана нами для изучения процесса эволюции спирального домена в течение периода переменного поля (рис. 1, *b–l*). При съемке на видеокамеру между соседними кадрами проходит 80 периодов поля. Поскольку „время жизни“ спирального домена от зарождения до распада составляет  $\sim 10^4$  периодов поля, за несколько десятков периодов число витков в спирали изменяется незначительно.

Спиральные домены могли быть сформированы и в полях более высоких частот [4,17] — до  $f \sim 100$  kHz, но для их формирования необходимо наличие постоянного поля смещения  $H_b$  (перпендикулярного плоскости пленки), увеличивающегося по мере роста частоты, при одновременном уменьшении амплитуды переменного поля  $H_M$ . При увеличении частоты амплитуда поля  $H_M$  и поле  $H_b$  изменялись, как и в [4], монотонно; интервалы частот, в которых невозможно зарождение спиральных доменов [17], отсутствовали. Во всем диапазоне частот максимальная напряженность действующего магнитного поля  $H_M + H_b$  соответствовала гистерезисной области между однородно намагниченным состоянием и лабиринтной доменной структурой [4].

Представленные на рис. 1, *b–l* спиральные домены наиболее характерны для указанных фаз магнитного поля. Они сформированы на одном и том же участке образца в различные моменты времени. Направление закрутки спиралей может быть различным, поскольку постоянное поле смещения  $H_b = 0$  [3].

В момент смены полярности поля спиральный домен сильно искажен (рис. 1, *b*). По мере нарастания поля уменьшаются амплитуда квазипериодических искажений витков спирали (рис. 1, *c*) и величина отростков (ветвлений) на витках спирали. Процессы сглаживания витков спирали практически завершаются при фазе  $60^\circ$  (рис. 1, *b–d*). Далее при прохождении пикового значения поля имеет место небольшое раскручивание центральной части спирали (рис. 1, *f*), сменяющееся процессом искажения витков спирали (рис. 1, *g, h*). При смене

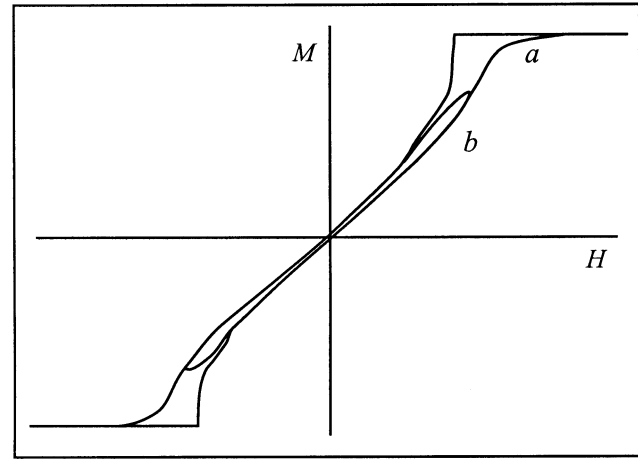


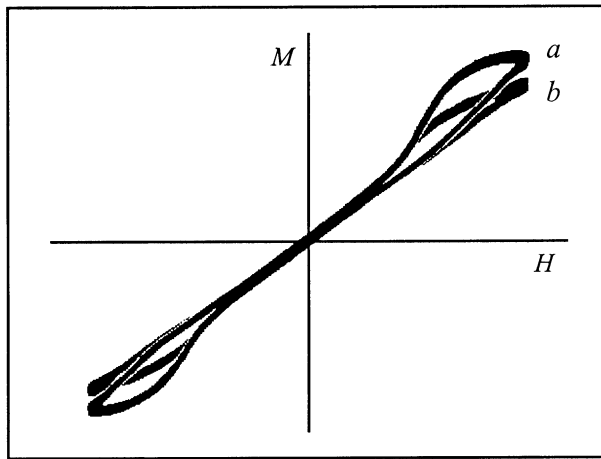
Рис. 2. Предельная ( $H_M = 120$  Oe) (*a*) и частная ( $H_M = 38$  Oe) (*b*) петли гистерезиса пленки феррита-граната при квазистатическом изменении магнитного поля.

полярности поля (в следующем полупериоде поля) картина повторяется (рис. 1, *i–l*). Таким образом, в течение периода магнитного поля происходит существенное изменение формы спирального домена при практически неизменном числе витков в спирали.

Характерно различие формы доменов одной и той же полярности при изменении напряженности поля в течение полупериода: нарастание изгибных искажений при уменьшении поля (рис. 1, *g, h, l*) и формирование отростков при увеличении поля (рис. 1, *c, i*).

Форма петель гистерезиса тесно связана с возможностью формирования спиральных доменов [4,15]. Предельная и частная петли гистерезиса исследованной пленки при квазистатическом изменении магнитного поля являются типичными для пленок ферритов-гранатов с малой коэрцитивной силой (рис. 2; время записи петель  $\sim 200$  s). В переменном поле при формировании/распаде спирального домена мы одновременно с регистрацией домена записывали и петлю гистерезиса, фокусируя луч подсветки на участке образца, занятого спиралью. Площадь петли гистерезиса плавно изменялась в течение нескольких секунд при формировании и свертывании спирали. Разумеется, от периода к периоду поля площадь петли изменялась ступенчато. Но, как показали результаты стробирования записи динамических петель гистерезиса для единичных циклов перемагничивания, размер „ступенек“ незначителен. При частоте поля  $f \sim 2$  kHz они не заметны при наблюдении изменений петли гистерезиса обычным методом на экране осциллографа и проявляются как увеличение диаметра луча осциллографа на отдельных участках петли.

Наименьшая площадь петли гистерезиса, как и в [15], имела место для спиральной доменной структуры (рис. 3, *b*). Увеличение площади петли и рост максимальной намагниченности пленки (рис. 3, *a*) соответствуют распаду спирали и переходу к лабиринтной доменной



**Рис. 3.** Частные петли гистерезиса в переменном магнитном поле с амплитудой  $H_M = 38$  Ое и частотой  $f = 2$  kHz для одной и той же области пленки, занятой лабиринтными доменами (a) или спиральным доменом (b).

структуре. „Скачков“ петли, как в [15], мы не наблюдали. Для петли гистерезиса спирального домена характерно отклонение восходящей ветви петли вниз от ветви петли гистерезиса полосовой структуры (рис. 3). Величина отклонения меньше, чем показывают теоретические расчеты [18].

### 3. Обсуждение результатов

Сжатие/расширение полосового домена, образующего спираль, в течение периода магнитного поля сопровождается изменением структуры его доменных границ и как следствие перераспределением эффективной массы вдоль них. Об этом свидетельствует формирование отростков на участках спирального домена, ясно различимых на протяжении части периода магнитного поля (рис. 1, c, i). Ранее формирование боковых отростков отмечалось при исследовании процессов формирования спиральных доменов, но только в импульсном поле во время действия импульса [6,7] или после его окончания, в „замороженной“ структуре [4,5].

Наличие отростков и ветвлений витков спирального домена связано с конечной величиной скорости насыщения доменных границ [19], составляющей для данного образца, согласно результатам высокоскоростной фотографии со временем экспозиции 5 ns [20],  $V_s \sim 10$  m/s. Несмотря на малую среднюю скорость движения доменных границ в течение периода поля при частоте  $f \sim 2$  kHz, отдельные участки спирального домена из-за скачкообразного характера движения во время „скачков“ достигают критической скорости  $V_{cr}$ , при которой изменяется структура доменных границ, образуются участки границ с различной эффективной массой и соответственно с различной скоростью движения. Такие явления наблюдались нами как в центре спирального

домена при формировании/распаде спирали, так и на периферии — при перестройке ответвлений. Причиной „скачков“ являются локальные закрепления доменных границ на дефектах пленки с последующими отрывами при изменении мгновенных значений переменного поля, а также наличие гистерезиса при переходе полосовой-цилиндрический магнитный домен и обратно [21].

Вероятность достижения критической скорости доменной границы  $V_{cr}$  при скачкообразном движении участков границ достаточно велика: критическая скорость, согласно проведенным нами расчетам с использованием различных моделей движения доменных границ [19], для данного образца достигается в продвигающемся поле  $H_{cr} = 1.2-2$  Ое, что сравнимо с коэрцитивной силой пленки ( $H_c \sim 0.6$  Ое для квазистатической петли и  $H_c > 1$  Ое для динамической петли гистерезиса при  $f > 0.1$  kHz).

Следует отметить, что существование верхней (по частоте) границы области формирования спиральных доменов  $f_h$  в переменном магнитном поле обусловлено динамическими свойствами доменных границ и зависит от максимальной скорости изменения магнитного поля. При возрастании частоты поля, во-первых, увеличивается площадь петли гистерезиса; во-вторых, преобразования структуры границ динамических доменов, образование участков с различной эффективной массой доменных границ приводят не только к ветвлениям, но и все чаще — к разрывам полосовых доменов (подобно механизму образования цилиндрических магнитных доменов в импульсном поле [19]). Все это препятствует формированию спирального домена, представляющего собой, по существу, длинный изогнутый полосовой домен. Нахождение обобщенного параметра, определяющего частотные границы формирования спиральных доменов, является предметом дальнейших исследований; трудности его нахождения в немалой степени связаны со значительными изменениями формы и параметров спиральных доменов, а также амплитуды колебаний их доменных границ с изменением частоты магнитного поля.

### Список литературы

- [1] S.M. Hanna, F.J. Friedlaender, R.L. Gunshor, H. Sato. IEEE Trans. Magn. **MAG-19**, 5, 1802 (1983).
- [2] Г.С. Кандаурова, А.Е. Свидерский. Письма в ЖЭТФ **47**, 8, 410 (1988).
- [3] Г.С. Кандаурова, А.Е. Свидерский. ЖЭТФ **97**, 4, 1218 (1990).
- [4] И.Е. Дикштейн, Ф.В. Лисовский, Е.Г. Мансветова, Е.С. Чижик. ЖЭТФ **100**, 5, 1606 (1991).
- [5] Ф.В. Лисовский, Е.Г. Мансветова. ФТТ **31**, 5, 273 (1989).
- [6] А.В. Николаев, В.Н. Онищук, А.С. Логинов. Тез. докл. XV шк.-сем. „Новые магнитные материалы микроэлектроники“, (1996). С. 398.
- [7] М.В. Четкин, А.И. Ахуткина, Т.В. Шапаева. Микроэлектроника **27**, 5, 396 (1998).

- [8] М.В. Логунов, В.В. Рандошкин. Тез. докл. XVII Всесоюз. конф. по физике магнитных явлений. Калинин (1988). С. 235.
- [9] А.П. Гесь, В.В. Федотова, А.К. Богуш, Т.А. Горбачевская. Письма в ЖЭТФ **52**, 9, 1079 (1990).
- [10] В.Е. Argyle, J.C. De Luca. IEEE Trans. Magn. **MAG-17**, 1, 1141 (1981).
- [11] I.B. Puchalska. J. Appl. Phys. **50**, 3, 2242 (1981).
- [12] E.Yu. Vedmedenko, A. Ghasali, J.-C.S. Lévy. Phys. Rev. **B59**, 1, 1 (1999).
- [13] M.V. Logunov, M.V. Gerasimov. EASTMAG-2001. Abstract Book. Ekaterinburg (2001). P. 281.
- [14] А.П. Наумов, В.В. Коровин. ПТЭ 2, 162 (1988).
- [15] Г.С. Кандаурова, В.Х. Осадченко. Письма в ЖТФ **20**, 21, 24 (1994).
- [16] Г.С. Кандаурова, В.Х. Осадченко, А.А. Русинов, Е.А. Русина. Письма в ЖЭТФ **63**, 6, 453 (1996).
- [17] Г.С. Кандаурова, А.А. Русинов. Письма в ЖЭТФ **65**, 1, 60 (1997).
- [18] V.E. Ivanov, G.S. Kandaurova. EASTMAG-2001. Abstract Book. Ekaterinburg (2001). P. 141.
- [19] A.P. Malozemoff, J.C. Slonczewski. Magnetic Domain Walls in Bubble Materials. Acad. Press, N.Y. (1979).
- [20] М.В. Логунов, В.В. Рандошкин, В.В. Сигачев. ПТЭ 5, 247 (1985).
- [21] F.A. De Jonge, W.F. Druyvesteyn. Festkörperprobleme **XII**, 531 (1972).