

## Аксиально-симметричные доменные структуры в пленках ферритов-гранатов

© М.В. Четкин, Т.Б. Шапаева, Л.Л. Савченко

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119899 Москва, Россия

E-mail: shapaeva@magn145.phys.msu.su

(Поступила в Редакцию 25 октября 1999 г.  
В окончательной редакции 13 января 2000 г.)

С использованием усовершенствованного метода двухкратной высокоскоростной фотографии был исследован процесс возникновения и развития доменной структуры после намагничивания небольшого участка пленки феррита-граната до насыщения. Установлено, что радиальная деформация, действующая на образец со стороны намагничивающей катушки, нарушает одноосную анизотропию, в результате чего внутри перемагниченной области возникает аксиально-ориентированная полосовая доменная структура. Период этой структуры уменьшается с ростом амплитуды импульсного поля. Формирование полосовой аксиально-ориентированной доменной структуры осуществляется под действием магнитостатического аксиально-симметричного поля.

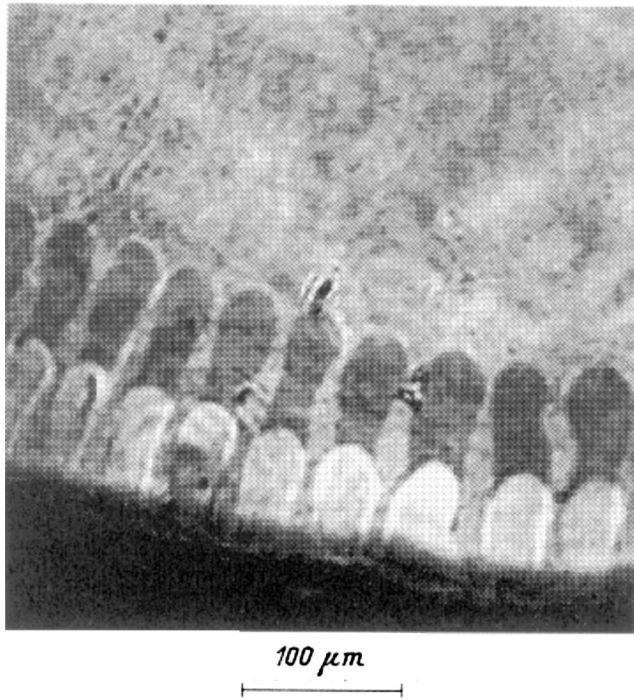
В последние годы наряду с упорядоченными доменными структурами, такими как гексагональная решетка цмд [1], решетка гантелевидных доменов [2] или полосовые домены [3], большой интерес вызывают такие магнитные состояния, которые характеризуются частичным или полным отсутствием порядка в расположении доменных границ. Примером таких доменных структур являются спиральные домены [4] и плотноупакованные структуры спиральных доменов [5]. В одноосных пленках ферритов-гранатов с осью легкого намагничивания, перпендикулярной поверхности пленки, нарушению упорядочения доменных границ способствует особый характер анизотропии, исключая выделенное направление [6].

В настоящей работе представлены результаты исследований возникновения и развития доменной структуры пленок феррита-граната после намагничивания небольшого участка образца с помощью катушки, наклеенной непосредственно на образец. Исследования проводили на пленках ферритов-гранатов  $(\text{BiLaTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  со следующими характеристиками:  $4\pi M_s = 100 \text{ Gs}$ , подвижность  $\mu = 120 \text{ cm/s} \cdot \text{Oe}$ . Плоскость подложки пленок была перпендикулярна оси [111]. Использовали усовершенствованный метод двухкратной высокоскоростной фотографии [7]. Этот метод позволяет зафиксировать два последовательных положения доменной границы через определенный интервал времени. Интервал времени между двумя импульсами света ( $\Delta t$ ) формировался электронной линией задержки. Его величину можно было менять от 1 до  $1000 \mu\text{s}$ . В настоящей работе в отличие от классического метода двухкратной высокоскоростной фотографии [8] изображение доменной структуры регистрировали с помощью телевизионной камеры. Дальнейшая обработка изображений и их визуализация осуществлялись с помощью персонального компьютера, что позволило регистрировать изображение в любой заданный момент времени. Достоинством усовершенствованного метода является также и то, что результаты

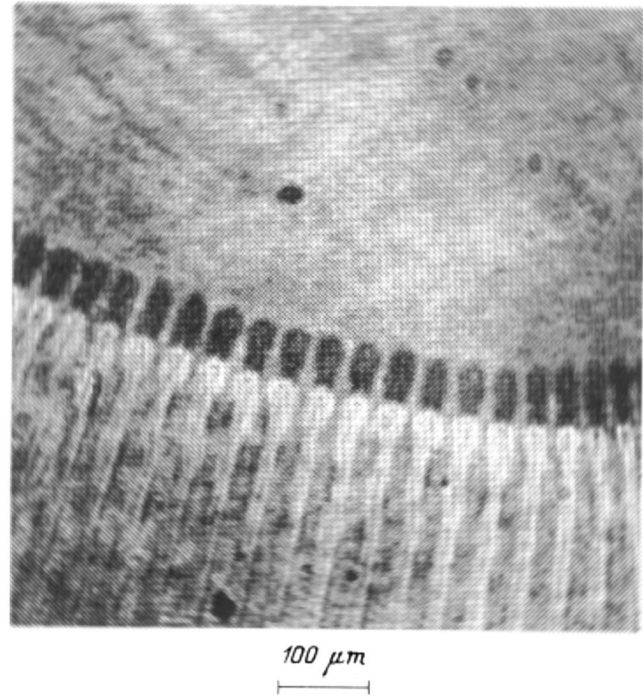
получаются непосредственно в процессе наблюдения, что в свою очередь позволяет гибко управлять экспериментом.

Исследование пленок феррита-граната проводили в импульсных магнитных полях частоты несколько Нз, с амплитудой ( $H_i$ ), превышающей величину поля насыщения. В эксперименте использовали импульсное магнитное поле, длительность которого можно было менять от 1 до  $10 \mu\text{s}$ . Это поле создавалось наклеенной непосредственно на образец круглой катушкой, радиус которой был существенно меньше размеров образца.

При использовании импульсного поля длительностью  $10 \mu\text{s}$  за первые  $8 \mu\text{s}$  с начала действия импульса поля образец намагничивался до насыщения. Система сохраняла это состояние в течение нескольких микросекунд после прекращения действия импульса поля. Для дальнейшего описания состояния системы отсчет времени ( $t$ ) начинался сразу после прекращения действия импульса поля. Через несколько десятков микросекунд после окончания действия импульса поля на краю области, ограниченной катушкой, начинает возникать аксиально-симметричная полосовая доменная структура с доменами, ориентированными вдоль радиуса катушки. На рис. 1 представлено двухкратное изображение полосовой аксиально-ориентированной доменной структуры в первые микросекунды ее развития. На этом рисунке светлые домены показывают состояние доменной структуры спустя  $60 \mu\text{s}$  после прекращения действия импульса поля ( $t = 60 \mu\text{s}$ ). Черные участки вокруг закругленных концов светлых доменов представляют области, пройденные доменной границей за время, прошедшее между двумя импульсами света ( $\Delta t = 5 \mu\text{s}$ ). Доменные границы двигаются в основном вдоль радиуса катушки. Скорость, с которой полосовая доменная структура прорастает внутрь катушки ( $V = 8 \text{ m/s}$ ), остается постоянной вплоть до того момента, когда полосовые домены сходятся в центре катушки. На рисунке заметны утолщения на концах полосовых доменов как в момент времени  $t$ , так и в



**Рис. 1.** Эволюция аксиально-симметричной доменной структуры в пленке феррита-граната за время, прошедшее между двумя импульсами света ( $\Delta t = 5 \mu s$ ). Первое положение доменной границы характеризует состояние доменной структуры спустя  $60 \mu s$  после прекращения действия импульса поля с амплитудой  $H_i = 520$  Ое ( $H_s = 160$  Ое) и длительностью  $t_i = 10 \mu s$ .



**Рис. 2.** Эволюция аксиально-симметричной доменной структуры в пленке феррита-граната за время, прошедшее между двумя импульсами света ( $\Delta t = 2 \mu s$ ). Первое положение доменной границы характеризует состояние доменной структуры спустя  $85 \mu s$  после прекращения действия импульса поля с амплитудой  $H_i = 520$  Ое ( $H_s = 238$  Ое) и длительностью  $t_i = 10 \mu s$ .

момент времени  $t + \Delta t$ . Кроме того, отчетливо видно, что доменная граница движется не только к центру катушки. Небольшие узкие белые области около светлого домена иллюстрируют сжатие концов полосовых доменов.

Напомним, что классический метод двухкратной высокоскоростной фотографии позволяет наблюдать смещение доменной границы за определенное время, получить же информацию о первоначальном состоянии доменной структуры в этом случае невозможно. В этом методе используются световые импульсы равной интенсивности. На рис. 1 помимо смещения доменной границы за интервал времени  $\Delta t$  хорошо видна возникающая доменная структура. Для этого мы использовали световые импульсы разной интенсивности.

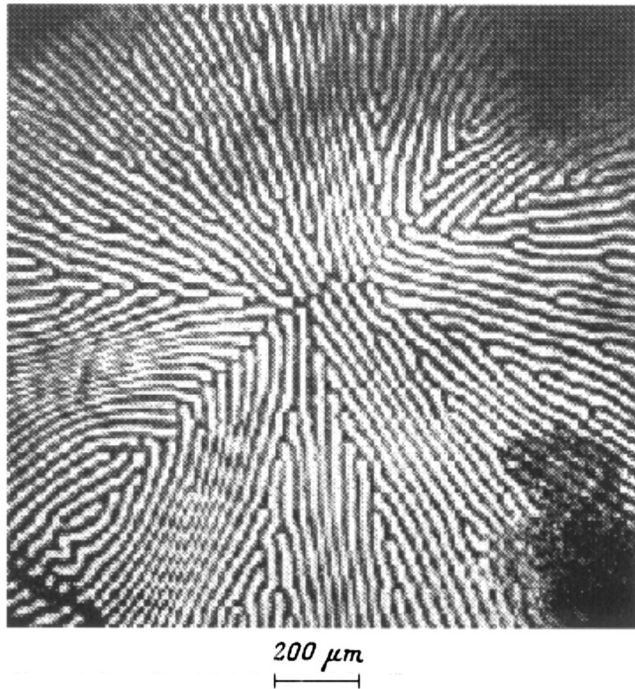
На рис. 2 представлено изображение доменной структуры в момент времени  $t = 85 \mu s$ . Период полосовой доменной структуры примерно в 1.5 раза меньше, чем период лабиринтной доменной структуры в отсутствие внешнего поля. При  $t = 140 \mu s$  полосовые домены сходятся в центре катушки, образуя квазистатическую аксиально-симметричную полосовую доменную структуру (рис. 3). Эта структура остается неизменной вплоть до начала действия следующего импульса поля. На рисунке видно, что по мере развития часть соседних доменов сливается друг с другом. С ростом амплитуды импульс-

ного поля период аксиально-ориентированной полосовой доменной структуры уменьшается.

Известно, что в пленках феррита-граната с ростом амплитуды плоскостного поля период доменной структуры уменьшается [9]. С ростом нормальной компоненты импульсного поля возрастает и плоскостная составляющая этого поля. Этот факт и объясняет указанную выше зависимость периода аксиально-ориентированной доменной структуры от амплитуды импульсного поля.

Качественное объяснение результатов, описанных в начале работы, состоит в следующем. Из-за радиальной деформации растяжения со стороны наклеенной на образец намагничивающей катушки возникает поправка к свободной энергии  $F_\sigma$  [10].  $F_\sigma \approx \lambda_{110} \cdot \sigma$ , где  $\lambda_{110}$  — константа магнитострикции вдоль оси [110] ( $\lambda_{110} = 1.4 \cdot 10^{-6}$ ),  $\sigma$  — механическое напряжение, возникающее в катушке при протекании по ней тока. Для используемых образцов  $F_\sigma$  составляет несколько процентов от энергии анизотропии. Таким образом, под действием радиальной деформации ось легкого намагничивания отклоняется от нормали к плоскости пленки на малый угол вдоль каждого радиуса. Совокупность этих осей образует конус легкого намагничивания.

После намагничивания до насыщения участка образца, ограниченного катушкой, в образце формируется акси-



**Рис. 3.** Аксиально-ориентированная полосовая доменная структура, сформированная в образце спустя  $140 \mu\text{s}$  после прекращения действия импульса поля с амплитудой  $H_i = 255 \text{ Oe}$  ( $H_s = 238 \text{ Oe}$ ) и длительностью  $t_i = 10 \mu\text{s}$ .

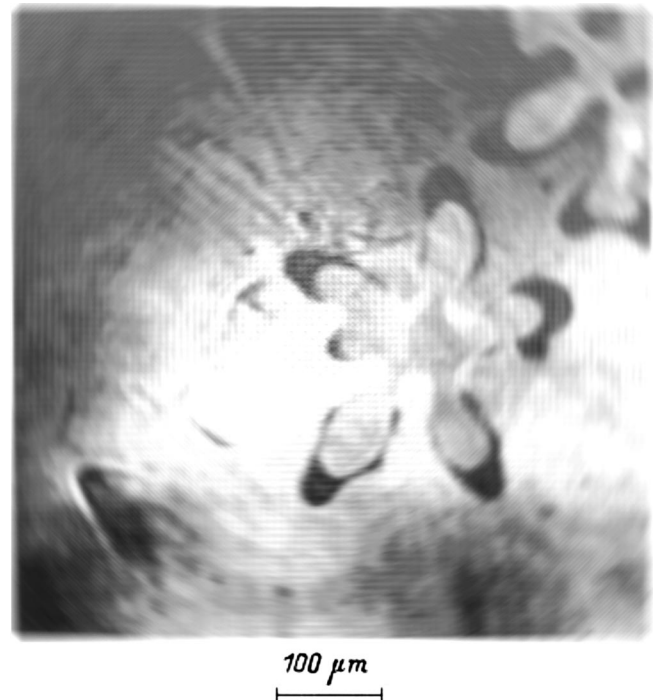
аксиально-симметричное магнитостатическое поле, которое и определяет характер развития радиально-ориентированной полосовой доменной структуры. Именно наличие этого поля объясняет зарождение и развитие аксиально-симметричных полосовых доменов в образце.

Определяющая роль радиальной деформации в формировании аксиально-ориентированной полосовой доменной структуры была экспериментально проверена следующим образом. Для создания магнитного поля использовали не наклеенную на образец катушку, а катушки Гельмгольца, такие, что зазор между ними и образцом составлял  $\approx 0.5 \text{ mm}$ . В данном случае восстановление доменной структуры происходило в основном за счет разрастания случайно возникающих областей с лабиринтной доменной структурой. Поэтому единой ориентации доменов не наблюдалось.

Итак, при намагничивании образца до насыщения импульсным полем, создаваемым наклеенной на образец катушкой, радиальное растягивающее напряжение, действующее на образец со стороны катушки, определяло ориентацию возникающей полосовой доменной структуры. Опираясь на это утверждение, для формирования полосовой доменной структуры использовали магнитное поле, создаваемое наклеенной на образец прямоугольной катушкой с внутренним размером  $1.5 \times 7 \text{ mm}$ . Полосовые домены, период которых приблизительно в 1.4 раза меньше периода лабиринтной доменной структуры в отсутствие внешнего поля, выстраивались вдоль нормали

к области, ограниченной катушкой. В средней части катушки при смыкании полосовых доменов не происходит слияния одинаково намагниченных доменов, прорастающих с противоположных сторон катушки. Домены, намагниченные в одном направлении и проросшие с одной стороны, встают напротив доменов, проросших с противоположной стороны и намагниченных обратно. При выключении импульсного поля полосовая доменная структура остается неизменной. Незначительные искривления доменов возможны лишь в области смыкания полосовых доменов, проросших с разных сторон. Результаты этого эксперимента согласуются с качественным объяснением причин возникновения радиально-ориентированной полосовой доменной структуры.

При амплитудах импульсного поля, незначительно превышающих величину поля насыщения, в намагниченном до насыщения образце могут хаотично возникать зародыши обратной намагниченности. Они представляют собой цмд, радиус которых возрастает с течением времени  $t$  под действием аксиально-симметричного размагничивающего поля. После достижения максимального радиуса форма цмд начинает искажаться; домен становится эллиптическим цмд. Со временем у него появляются разветвленные отростки, при этом центральная часть домена сжимается. Так формируется область с лабиринтной доменной структурой. На рис. 4 представлено двухкрат-



**Рис. 4.** Эволюция зародыша обратной намагниченности в пленке феррита-граната за время, прошедшее между двумя импульсами света ( $\Delta t = 3 \mu\text{s}$ ). Первое положение доменной границы характеризует состояние зародыша обратной намагниченности спустя  $25 \mu\text{s}$  после прекращения действия импульса поля с амплитудой  $H_i = 193 \text{ Oe}$  ( $H_s = 110 \text{ Oe}$ ) и длительностью  $t_i = 10 \mu\text{s}$ .

ное изображение доменной структуры, иллюстрирующее развитие зародышей обратной намагниченности с течением времени. Светлый домен на рисунке показывает вид зародыша обратной намагниченности спустя  $25 \mu\text{s}$  после прекращения действия импульса поля ( $t = 25 \mu\text{s}$ ). Черные области вокруг этого домена показывают путь, пройденный доменной границей за время  $\Delta t$ , прошедшее между первым и вторым импульсами света ( $\Delta t = 3 \mu\text{s}$ ). В течение всей описанной эволюции зародышей обратной намагниченности максимальная скорость доменной границы не превышает  $8 \text{ m/s}$ . Домены, аналогичные зародышам обратной намагниченности, представленным на рис. 4, были описаны в работе [11].

Исследования показали, что основной рост доменов происходит на краях зародыша обратной намагниченности. В определенный момент времени наряду с хаотично возникающими областями с лабиринтной доменной структурой в образце появляются аксиально-ориентированные полосовые домены. С течением времени размер областей с лабиринтной доменной структурой возрастает, а полосовые домены развиваются так, как описано выше. Совместное существование различных типов доменной структуры в образце продолжается вплоть до завершения формирования аксиально-ориентированной полосовой доменной структуры. Аксиально-симметричное магнитное поле является причиной развития и областей с лабиринтной доменной структурой, и аксиально-ориентированных доменов.

Возникновение зародышей обратной намагниченности в образце после воздействия на него импульса поля с амплитудой, близкой к величине поля насыщения, связано, по-видимому, с тем, что после действия импульса поля внутри образца остаются неперемагниченные области, вокруг которых в дальнейшем и начинают развиваться зародыши обратной намагниченности. Случайный характер расположения этих областей является причиной хаотичного возникновения зародышей обратной намагниченности. Если амплитуда импульсного поля велика, образец перемагничивается полностью и описанный выше эффект не наблюдается.

С помощью усовершенствованного метода двукратной высокоскоростной фотографии удалось проследить и зафиксировать развитие аксиально-ориентированной полосовой доменной структуры. В результате экспериментов было установлено, что ориентация этой доменной структуры однозначно определяется радиальной деформацией растяжения, создаваемой наклепной непосредственно на образец катушкой при протекании по ней импульсного тока, и аксиально-симметричным магнитостатическим полем.

## Список литературы

- [1] В.Г. Показаньев, В.Ю. Политов, Ю.И. Ялышев. ФММ **58**, 4, 637 (1984).  
 [2] Ф.В. Лисовский, Е.Г. Мансветова, Е.Г. Николаева, А.В. Николаев. ЖЭТФ **103**, 1, 213 (1993).

- [3] А. Эшенфельдер. Физика и техника цмд. Мир, М. (1983).  
 [4] Г.С. Кандаурова, А.Э. Свидерский. ЖЭТФ **97**, 4, 1218 (1990).  
 [5] М.В. Четкин, А.И. Ахуткина, Т.Б. Шапаева. Микроэлектроника **27**, 5, 370 (1998).  
 [6] И.Е. Дикштейн, Ф.В. Лисовский, Е.Г. Мансветова, Е.С. Чижик. ЖЭТФ **100**, 5(11), 1606 (1991).  
 [7] М.В. Четкин, И.В. Парыгина, Л.Л. Савченко. ЖЭТФ **110**, 5(11), 1873 (1996).  
 [8] М.В. Четкин, С.Н. Гадетский, А.П. Кузьменко, В.Н. Филатов. ФТТ **26**, 9, 2655 (1984).  
 [9] V.G. Bar'jakhtar, M.V. Chetkin, B.A. Ivanov, S.N. Gadetskiy. Dynamics of Topological Magnetic Solitons. Experiment and Theory. V. 129. Springer tracts in modern physics, Berlin (1994).  
 [10] В.С. Вонсовский. Магнетизм. Наука, М. (1967).  
 [11] В.В. Рандошкин, Л.Р. Иванов, Р.В. Телеснин. ЖЭТФ **105**, 3(9), 960 (1978).