

УДК 537.622.6

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ОПРОКИДЫВАНИЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ В ПЛЕНКАХ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ

М. В. Логунов, В. В. Рандошкин

Методами высокоскоростной фотографии и фотоотклика исследованы наносекундные процессы перемагничивания пленок феррит-гранатов в однородном и аксиально-симметричном импульсных полях, амплитуда которых сравнима с полем анизотропии пленок. Установлена справедливость критерия Стонера—Вольфарта для импульсного перемагничивания пленок. Предложена модель формирования волны опрокидывания магнитных моментов в пленках феррит-гранатов в аксиально-симметричном поле.

Исследования процессов перемагничивания монокристаллических пленок феррит-гранатов (МПФГ) показывают, что в импульсных аксиально-симметричных магнитных полях, сравнимых с полем анизотропии пленок, перемагничивание осуществляется волной опрокидывания магнитных моментов (ВОММ) [1]. ВОММ движется от периферии катушки к ее центру в виде широкой кольцеобразной области, в которой происходит процесс перемагничивания. Если в центре катушки напряженность поля недостаточна для вращения намагниченности, то движение ВОММ заканчивается формированием треугольного магнитного домена (ТМД) [2]. Движение ВОММ исследовалось методами высокоскоростной фотографии (ВСФ) [1-5] и электронно-оптической хронографии [6, 7], но механизм формирования ВОММ во многом остается непонятным.

В настоящей работе особенности ВОММ в МПФГ изучались совместно с исследованием процессов перемагничивания в однородных полях методами ВСФ и фотоотклика с временным разрешением 5 и 2 нс соответственно. Параметры некоторых из исследованных образцов, выращенных на подложках с ориентацией (111), приведены в таблице. Однородность МПФГ контролировали путем послойного травления пленок и исследования их методом ФМР [8], а также по форме кривой импульсного перемагничивания (КИП), регистрируя пороговое поле перехода к процессам вращения векторов намагниченности H^* [9]. В исходном состоянии МПФГ намагничивали до насыщения полем смещения H_{0z} , импульсное поле H_z прикладывали в противоположном направлении. Однородное импульсное поле создавали катушками Гельмгольца диаметром 2,5 мм, аксиально-симметричное поле — плоскими катушками диаметром 1—2 мм (поле характеризовали напряженностью в центре катушки).

Для выяснения природы ВОММ прежде всего необходимо исследование процессов перемагничивания вращением вектора намагниченности, т. е. установление критических полей перехода к процессам вращения, характерных времен протекания процессов в зависимости от ориентации и напряженности магнитных полей. Рассмотрим процессы перемагничивания в однородном поле.

При расчете критических полей перемагничивания МПФГ обычно используют критерий Стонера—Вольфарта, в соответствии с которым однородное перемагничивание локальных участков пленки будет происходить

образец №	R	h, мкм	$4\pi M_s$, Гс	H_k , Э	$10^7 \gamma \text{ Э}^{-1} \text{ с}^{-1}$	H^* , Э
1	Tm	12	150	2800	1.0	500
2	Tm	5.8	112	2400	1.1	1600
3	Y, Lu	8.3	272	880	1.8	620
4	Y, Lu	9.8	322	2400	1.8	1900

Примечание. h — толщина, $4\pi M_s$ — намагниченность насыщения, H_k — поле одноосной анизотропии, γ — гиромагнитное отношение, H^* — пороговое поле перехода к процессам вращения намагниченности.

в том случае, если действующее статическое поле удовлетворяет уравнению астроида [10, 11]

$$H_{\perp}^2 + H_{\parallel}^2 = H_{\text{KB}}^2. \quad (1)$$

Здесь H_{\perp} и H_{\parallel} — компоненты поля перпендикулярно и параллельно оси легкого намагничивания (ОЛН) соответственно, H_{KB} — эффективное поле анизотропии МПФГ. В [10] показано, что учет динамических эффектов приводит к ряду особенностей. В частности, под действием перепада поля перемагничивание может происходить при гораздо меньших амплитудах поля, чем в квазистатическом случае.

В эксперименте пороговое поле перехода к процессам вращения намагниченности по всему объему МПФГ $H_{\text{п}}$ определяли по перегибу на кривых импульсного перемагничивания и переходу к участку с коэффициентом переключения

$$S_w = \tau_{\text{п}}(H - H_{\text{п}}), \quad (2)$$

равным (1—5) Э·мкс. Здесь $\tau_{\text{п}}$ — время перемагничивания в действующем поле H . Отметим, что характерные времена перемагничивания уменьшаются на 1—3 порядка при переходе от участка КИП, на котором перемагничивание происходит зарождением доменов и движением их доменных стенок (ДС) (малые поля, $S_w \geq 100 \text{ Э} \times \text{мкс}$) к участку с $H > H_{\text{п}}$. При импульсном перемагничивании вдоль ОЛН $H_{\text{п}} \approx H_{\text{KB}}$ [9, 12], а процесс вращения вектора намагниченности в макроскопических областях порядка ширины ДС можно считать однородным [11], хотя в целом по пленке из-за дисперсии анизотропии, тепловых колебаний намагниченности и т. д. процесс протекает неоднородно. Наблюдение перемагничивания с помощью ВСФ при $H > H_{\text{п}}$ показало отсутствие структурирования по площади МПФГ в процессе перемагничивания в пределах разрешающей способности аппаратуры (0.5 мкм).

На рис. 1 представлены расчетные астроиды перемагничивания двух наиболее однородных образцов, для которых

$$H^* \approx H_{\text{KB}} \approx H_k - 4\pi M_s. \quad (3)$$

Экспериментальные результаты близки к расчетным, т. е. критерий «Стонара—Вольфарта» выполняется при импульсном перемагничивании МПФГ вдоль ОЛН в присутствии постоянного поля $H_{\text{пл}}$, перпендикулярного легкой оси. Динамический эффект снижения пороговых полей перемагничивания не обнаружен. Это можно объяснить как геометрией экспе-

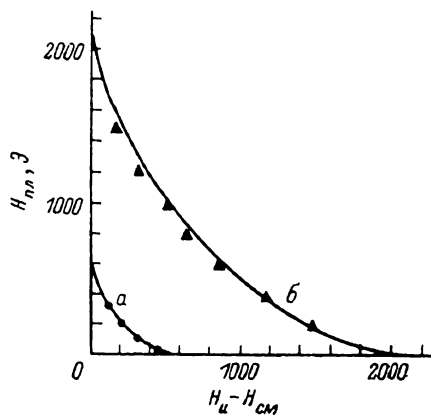


Рис. 1. Астроида перемагничивания для МПФГ № 3 (а), № 4 (б).

Сплошные линии соответствуют критерию Стонара—Вольфарта, точки — данные эксперимента.

римента (в плоскости МПФГ прикладывали постоянное поле), так и конечным временем установления импульса поля (10—20 нс), в то время как в [10] рассмотрен процесс перемагничивания, происходящий при приложении ступеньки поля. Следует отметить, что исследование наносекундных процессов перемагничивания МПФГ в однородных полях произвольной ориентации затруднено из-за необходимости создания импульсных полей $H_x \geq 1$ кЭ в значительных объемах. Нами проведены эксперименты для трех ориентаций импульсного магнитного поля относительно ОЛН: 0° , 45° , 90° , которые также показали удовлетворительное согласие с астройдой. В этом случае образцы вырезались в виде прямоугольников размерами 1×5 мм, исследовалась область МПФГ диаметром 0.5 мм.

Изучение механизмов перемагничивания МПФГ различных составов в аксиально-симметричном поле показало, что в МПФГ с ярко выраженным переходным слоем (образец № 1) сквозной ТМД формируется через 100—

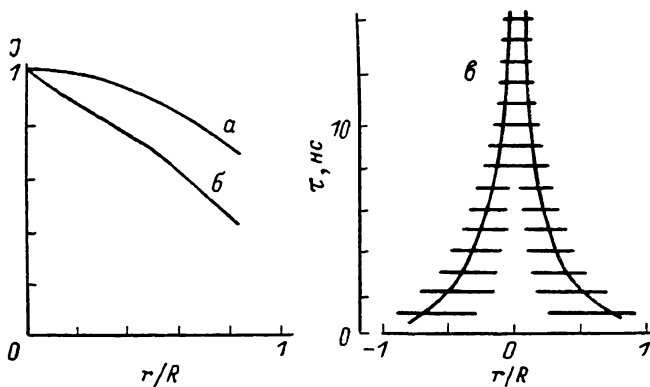


Рис. 2.

a, б — расчетные зависимости положения участков в МПФГ от величины тока J в плоской катушке радиуса R ($J=1$ соответствует $H=H_{кв}$ в центре катушки), где достигается значение магнитного поля, соответствующее: *a* — $H=H_{кв}$, *б* — астройде перемагничивания; *в* — расчетная хронограмма для МПФГ при $H=H_{кв}$ в центре катушки.

300 нс после приложения H_x (как и в [1, 2]), в пленках с близкими H^* и $H_{кв}$ (№ 2) — через 40—70 нс, а в наиболее однородных (№ 3, 4) — через 10—20 нс. Время перемагничивания движением ВОММ ($H > H^*$) и время формирования сквозного ТМД ($H < H^*$) практически совпадают и для образцов с $H^* \ll H_{кв}$ близки к времени перемагничивания движением торцевой ДС в однородном поле с учетом $H_{пл}$ [9]. Это свидетельствует, что при $H < H_{кв}$ в неоднородных МПФГ через несколько десятков наносекунд после достижения H_x амплитудного значения фронт ВОММ преобразуется в ДС, наклонную по толщине пленки. В этом случае замедление движения ВОММ по мере продвижения к центру катушки, а также ее переменение в установившемся поле представляют собой по существу процесс изменения наклона плоскости ДС до тех пор, пока она не станет перпендикулярной плоскости пленки. В однородных МПФГ небольшой толщины наклон ДС, формирующейся через 10—20 нс после окончания фронта H_x , мал, и соответственно процесс формирования сквозного ТМД значительно ускоряется [6].

Рассмотрим механизм формирования ВОММ при $H \geq H_{кв}$. На рис. 2, *a* показано положение участков пленки, где действующее поле достигает критического значения $H=H_{кв}$, в зависимости от тока в катушке. Катушка находится на расстоянии $\sim 0.15 R$ (типичное значение) от плоскости пленки. Используя результаты эксперимента в однородном поле, показавшие справедливость критерия Стонера—Вольфарта для импульсного перемагничивания МПФГ, учтем отклонение H_x от ОЛН пленки. Различие между линией $H=H_{кв}$ и линией, соответствующей астройде перемагничивания (рис. 2, *б*) в аксиально-симметричном поле, весьма значительно, а область однородности поля (с точки зрения перехода к процессам вра-

щения) практически отсутствует. Результаты исследования КИП позволяют рассчитать хронограммы движения ВОММ, используя выражение

$$\tau_{\pi}(r) = S_w / (H(r) (\sin^{2/3} \varphi + \cos^{2/3} \varphi)^{3/2} - H_{кв}), \quad (4)$$

основанное на (1), (2). Здесь $\tau_{\pi}(r)$, $H(r)$, φ — время перемагничивания, действующее поле и угол отклонения вектора поля от ОЛН в точке с координатой r . Считая, что в центре ВОММ процесс перемагничивания наполовину завершен, для типичных значений $S_w = 2$ Э мкс, $H = H_{кв} = 1000$ Э и ступенчатого перепада импульса поля имеем хронограмму (рис. 2, в), близкую к экспериментальным [6, 7]. Для простоты предполагается, что процесс перемагничивания характеризуется линейным изменением намагниченности со временем, а S_w не зависит от ориентации H . Здесь заштрихованная часть характеризует ширину ВОММ δ_0 — область МПФГ, где происходит процесс перемагничивания (на уровне 0.1—0.9 сигнала фотоотклика). В эксперименте δ_0 несколько меньше из-за повышения контраста при фотографировании и конечного времени нарастания поля, так как движение ВОММ начинается на фронте H_{π} [3, 6, 7].

Из рис. 2, в ясно, что движение ВОММ отражает пространственное распределение аксиально-симметричного поля и вызванного им различия времени перемагничивания по площади пленки, ограниченной катушкой. Таким образом, наблюдавшиеся экспериментально основные особенности ВОММ — время формирования, форма хронограммы — могут быть объяснены на основе результатов исследования механизмов перемагничивания МПФГ в однородных полях.

Л и т е р а т у р а

- [1] Логгинов А. С., Непокойчицкий Г. А. Письма в ЖЭТФ, 1982, т. 35, № 1, с. 22—25.
- [2] Иванов Л. П., Логгинов А. С., Непокойчицкий Г. А. ЖЭТФ, 1983, т. 84, № 3, с. 1006—1022.
- [3] Куделькин Н. Н., Рандошкин В. В. Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 38, № 10, с. 481—483.
- [4] Куделькин Н. Н., Прохоров А. М., Рандошкин В. В., Сигаев В. Б., Тимошецкий М. И. ДАН СССР, 1985, т. 281, № 4, с. 848—851.
- [5] Дудоров В. Н., Логгинов М. В., Рандошкин В. В. ЖТФ, 1986, т. 56, № 5, с. 949—951.
- [6] Иванов Л. П., Логгинов А. С., Непокойчицкий Г. А., Никитин Н. И. ЖЭТФ, 1985, т. 88, № 1, с. 260—271.
- [7] Иванов Л. П., Логгинов А. С., Непокойчицкий Г. А., Никитин Н. И. ЖТФ, 1986, т. 56, № 10, с. 2006—2009.
- [8] Телеснин Р. В., Зюзин А. М., Рандошкин В. В., Старостин Ю. В. ФТТ, 1982, т. 24, № 4, с. 1166—1171.
- [9] Логгинов М. В., Рандошкин В. В. ФТТ, 1986, т. 28, № 5, с. 1559—1562.
- [10] Лебедев Ю. Г., Раевский Е. И. Тезисы докладов VIII Всесоюзной школы-семинара «Новые магнитные материалы для микроэлектроники», Донецк, 1982, с. 121—122.
- [11] Филиппов Б. Н., Шматов Г. А., Миляев Ю. К. ЖТФ, 1983, т. 53, № 10, с. 2032—2038.
- [12] Колотов О. С., Погожев В. А., Телеснин Р. В. ЖТФ, 1985, т. 55, № 4, с. 761—764.

Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарева
Саранск

Поступило в Редакцию
10 июля 1987 г.