

УДК 538.221
© 1991

О ФОРМЕ КРИВОЙ ИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ПЛЕНОК ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ

Димитр Йоргов, О. С. Колотов, В. А. Погожев

Показано, что в перемагничивании пленок ферритов-гранатов принимают участие в основном два механизма, связанных соответственно с ростом зародышей обратной намагниченности и начальным вращением намагниченности с последующим движением торцевых доменных границ. Сложная же форма кривой импульсного перемагничивания (наличие на ней до 8—11 участков), с одной стороны, является проявлением сложного характера зависимости скорости движения динамических доменных границ от перемагничивающего поля, а с другой — определяется несовершенством структуры реальных пленок: наличием в них нескольких классов дефектов, а также слоев, отличающихся, в частности, характером распределения порогового поля необратимого вращения.

Основной импульсной характеристикой магнетиков является кривая импульсного перемагничивания (КИП), представляющая собой зависимость обратного времени перемагничивания τ^{-1} от напряженности перемагничивающего поля H_n [1^{-3}]. Кривая эта не только характеризует временные свойства магнетика, но и дает представление об энергетических затратах, которые необходимы для обеспечения того или иного быстрого действия технических устройств на магнетиках. В то же время она несет важную информацию и о физике импульсного перемагничивания. Еще в конце 50-х годов было установлено [$1, 2$], что КИП исследованных к тому времени магнетиков состоят из нескольких участков. Было высказано предположение, что подобно кривой намагничивания сложная форма КИП обусловлена проявлением различных механизмов импульсного перемагничивания. Таким образом, исследование формы КИП и ее связи с реальными механизмами импульсного перемагничивания, а также структурой и основными параметрами магнетиков представляет собой центральную задачу физической и прикладной магнитодинамики. До сих пор подобную задачу удалось решить (и то в основном качественно) лишь применительно к тонким Fe—Ni-пленкам [$3-5$], для перемагничивания которых требуются импульсные поля относительно небольшой амплитуды (не более 40—60 Э), и имеется возможность непосредственного исследования механизмов импульсного перемагничивания путем наблюдения неравновесных динамических доменов (регистрируемых магнитооптическим методом [$3, 4, 6$] и методом просвечивающей электронной микроскопии [$3, 4, 7$]).

К магнитным материалам, в которых также возможно наблюдение динамических доменов, относятся пленки ферритов-гранатов (ПФГ). Однако для инициирования импульсного перемагничивания ПФГ нужны существенно более мощные импульсы (амплитудой от 0.1 до 1.5—2.5 кЭ и длительностью до 50—100 мкс). По-видимому, по этой причине исследование КИП ПФГ носило фрагментарный характер [$8-13$]. В последнее время на физическом факультете МГУ проведено систематическое исследование импульсных свойств ПФГ практически во всем возможном интервале полей H_n . Его нижней естественной границей является поле H_{n1} , при ко-

тором достигается состояние насыщения пленки. Верхняя граница определена не столь четко, поскольку зависит от достижимой точности измерения времени перемагничивания τ . В настоящее время точность измерения τ определяется конечным значением реально достижимого времени установления перемагничивающего поля $\sim 5 \div 8$ нс, что позволяет проводить исследования КИП в полях, сравнимых с эффективным полем анизотропии H_k ($\sim 1.5 \div 2.5$ кЭ). В данной работе обобщены основные результаты исследования формы КИП и ее связи с механизмами импульсного перемагничивания ПФГ.

1. Методика эксперимента

Исследования выполнены на универсальной магнитооптической установке [14], позволяющей наблюдать динамические домены и исследовать поведение суммарной намагниченности. С целью повышения точности проводимых исследований установка была подвергнута ряду переделок [15]. Так, увеличение максимальной длительности перемагничивающего импульса (до ~ 100 мкс) при одновременном уменьшении времени установления поля (до $\sim 5 \div 8$ нс в зависимости от значения H_H) позволило существенно расширить диапазон длительностей исследуемых процессов. Для уменьшения шага изменения поля (до ~ 5 Э при среднем значении поля $H_H \sim 1 \div 2$ кЭ), что необходимо для детального исследования структуры КИП, было использовано намагничивающее устройство [16], состоящее из двух обмоток, каждая из которых питалась от отдельного источника импульсов тока. Чтобы уменьшить время установления канала регистрации магнитооптического сигнала, был использован режим двойного стробирования. Неоднородность поля в пределах исследуемого участка пленки (диаметром ~ 0.5 мм) не превышала 2 %.

Полученные результаты иллюстрируются на примере пленки состава $(YLuBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ со следующими параметрами: поле $H_{rp} = 60$ Э, намагниченность насыщения $M_s = 8$ Гс, среднее значение эффективного поля анизотропии (измеренное методом ферромагнитного резонанса) $H_k = 1.63$ кЭ, толщина $d = 5.6$ мкм. Пленка получена известным методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного расплава на подложку из гадолиний-галлиевого граната [17].

2. Основные результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что по сравнению с КИП других ранее исследованных материалов КИП ПФГ имеет более сложный вид — на ней выявляется до 8—11 участков (в зависимости от пленки). Здесь мы рассмотрим наиболее характерную КИП. Поскольку время перемагничивания ПФГ изменяется на несколько порядков, для отражения всех основных деталей КИП пришлось воспользоваться двумя рисунками. На рис. 1 показаны первые пять участков КИП и начало шестого участка, на рис. 2 — пятый и последующие участки, наблюдаемые в более высоких полях.

Важный ключ к пониманию структуры и физического смысла КИП найден в результате анализа магнитооптических сигналов перемагничивания ПФГ. Ранее в работах [11, 18] было обнаружено, что в некоторых условиях на магнитооптических сигналах ПФГ четко разделяются начальная «быстрая» и следующая за ней «медленная» части. Информации о характерных длительностях указанных частей сигнала и их зависимости от поля H_H в [11, 18] не приводилось. Проведенные нами исследования показали, что в общем случае существуют две разновидности механизма перемагничивания, для которых характерны сигналы с различающимися «быстрой» и «медленной» частями (рис. 3). Для одной из них «быстрая» часть имеет длительность $\sim 10^{-7}$ с (рис. 3, а), для другой, наблюдаемой в более высоких полях, длительность «быстрой» части не превышает 15—

20 нс и с ростом поля уменьшается до единиц наносекунд. Оказалось, что поле $H_{кр1}$, при котором на сигнале появляется «быстрая» часть с характерной длительностью $\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$ с, совпадает с началом одного из средних изломов КИП (рис. 2). С увеличением поля H_n напряжение сигнала A_1 , достигаемое в конце «быстрой» части, растет и при некотором поле $H_{кр2}$ становится равным амплитуде сигнала A_n . На рис. 2 указаны значения полей $H_{кр1}$ и $H_{кр2}$. Анализ динамических доменов показал, что поле $H_{кр1}$ действительно имеет важное значение, поскольку поведение намагниченности при перемагничивании ПФГ в интервале полей $H_{гр} < H_n < H_{кр1}$ отличается от поведения намагниченности в интервале полей $H_{кр1} < H_n < H_{кр2}$.

В первом интервале перемагничивание происходит путем роста зародышей обратной намагниченности, причем в пределах значительной

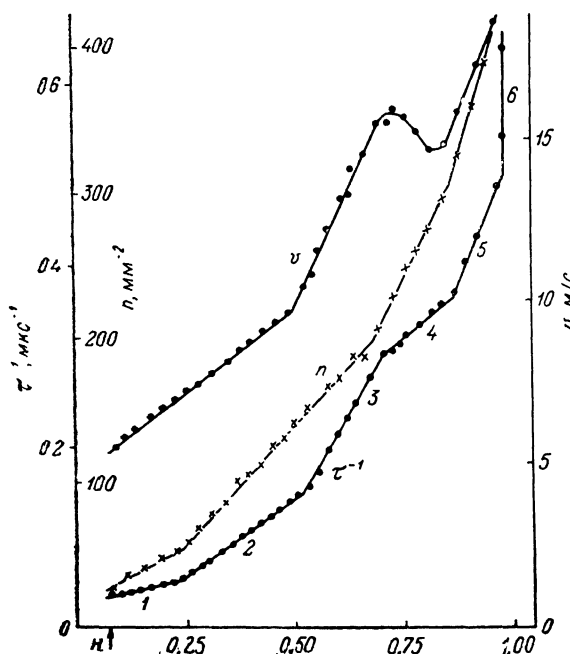


Рис. 1. Начальная часть кривой импульсного перемагничивания и зависимости плотности n зародышей обратной намагниченности и скорости v движения границ зародышей от поля H_n .

части интервала (для участков КИП с 1-го по 5-й) зародыши являются сквозными и формируются на дефектах. О последнем свидетельствует то, что место формирования зародышей и их форма повторяются от одного цикла перемагничивания к другому, так что их стробоскопические изображения достаточно резкие.

Как правило, каждый из участков КИП в пределах первого интервала хорошо аппроксимируется прямой линией, причем значение коэффициента переключения S_w (пропорционального, как известно [1, 3], котангенсу угла наклона кривой $\tau^{-1}(H_n)$ к оси абсцисс) уменьшается при переходе от одного участка к другому по мере роста H_n . Однако возможны и исключения. Одно из них имеет место для КИП рассматриваемой здесь пленки: при переходе от участка 3 к участку 4 S_w не уменьшается, а возрастает (рис. 1). Анализ результатов исследования большого числа пленок показывает, что форма КИП в обсуждаемом интервале определяется особенностями зависимостей плотности зародышей n и скорости движения v их границ от амплитуды перемагничивающего поля H_n . Эти зависимости показаны на рис. 1. Для обеспечения однозначности плотность зародышей измерялась при одном и том же значении относительной величины намагниченности $M(t)/M_s = -0.8$, определяемом из магнитооптического сиг-

пала перемагничивания. Здесь $M(t)$ — мгновенное значение средней намагниченности пленки. Для исходного состояния $M(0)/M_s$ полагалось равным -1 .

Сравнивая КИП и кривые $n(H_n)$ и $v(H_n)$, можно убедиться, что первый из изломов КИП вызван резким возрастанием темпа роста плотности зародышей, второй — резким возрастанием подвижности динамических доменных границ. Ход КИП в районе участка 4 определяется совместным влиянием зависимостей $n(H_n)$ и $v(H_n)$: появление на кривой $v(H_n)$ участка с отрицательной подвижностью приводит к уменьшению крутизны участка 4, т. е. упомянутому выше увеличению S_w . Наконец, появление участка 5 вызвано новым увеличением подвижности динамических доменных границ и возрастанием темпа роста их числа.

В пределах участка 6 в перемагничивании также принимают участие зародыши обратной намагниченности. Однако в отличие от случаев перемагничивания ПФГ в пределах предыдущих участков КИП форма и место образования большинства зародышей не повторяются от одного цикла

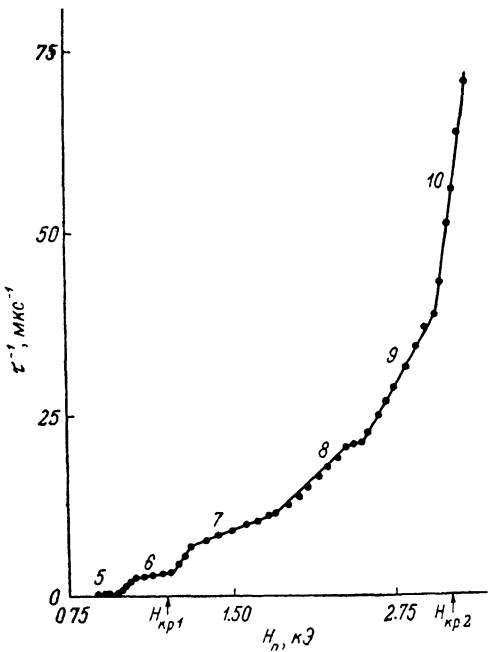


Рис. 2. Форма кривой импульсного перемагничивания в больших полях.

повторяются от одного цикла

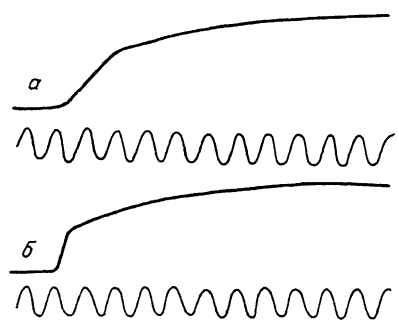


Рис. 3. Магнитооптические сигналы перемагничивания, полученные в полях $H_n=1.09$ (а) и 1.54 кЭ (б). Частота равна 10 (а) и 50 МГц (б).

перемагничивания к другому и их регистрация возможна только в режиме скоростной фотографии. По-видимому, эти зародыши имеют термофлюктуационную природу. Анализ магнитооптических изображений показывает, что зародыши не являются сквозными. В целом в пределах участка 6 КИП действует механизм перемагничивания, обнаруженный ранее в [11, 18]. Перемагничивание начинается с образования несквозных зародышей, которые, сливаясь, формируют торцевые доменные границы, в среднем параллельные поверхности пленки. Далее перемагничивание происходит движением торцевых границ. Одним из внешних признаков этого механизма является появление «быстрой» части на магнитооптическом сигнале с характерной длительностью $\sim 10^{-7}$ с, причем «быстрая» часть сигнала отражает формирование несквозных зародышей, «медленная» — движение торцевых границ. Другим внешним признаком является заметное насыщение скорости перемагничивания в интервале полей, где действует этот механизм (рис. 2, участок 6). Наш опыт показывает, что механизм перемагничивания, связанный с формированием торцевых границ путем слияния несквозных зародышей обратной намагниченности, проявляется далеко не у всех пленок. Легче всего он выявляется у ПФГ с достаточно большим различием величин $H_{кГ2}'$ и $H_{кГ1}$ (как и у рассматриваемой пленки).

Закономерности поведения намагниченности в интервале полей $H_{кр1} < H_n < H_{кр2}$ исследовались нами ранее [13, 19]. Поэтому мы ограничимся здесь сводкой полученных результатов в той мере, в какой это необходимо для получения общего представления о форме и физическом смысле КИП. Перемагничивание ПФГ в полях $H_n > H_{кр1}$ начинается с вращения намагниченности в слое пленки, в пределах которого внешнее поле H_n превышает локальные значения порогового поля необратимого вращения. Этой стадии перемагничивания соответствует «быстрая» часть сигнала длительностью $\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$ с. «Медленная» часть сигнала отражает процесс движения торцевой доменной границы, разделяющей перемагниченный и еще неперемагниченный слой пленки. С ростом поля увеличивается толщина слоя, перемагничиваемого начальным вращением намагниченности, и соответственно уменьшается длина пути, проходящего торцевой доменной границей. В итоге с ростом поля величина A_1/A_n возрастает, стремясь к единице. Поля $H_{кр1}$ и $H_{кр2}$ являются соответственно минимальным и максимальным значениями порогового поля необратимого вращения.

Показано, что каких-либо принципиальных изменений обсуждаемого механизма перемагничивания вблизи изломов КИП, наблюдаемых в интервале $H_{кр1} < H_n < H_{кр2}$, не имеет места. Сложная же структура КИП в этом интервале является следствием слоистой структуры реальных ПФГ, получаемых методом жидкофазной эпитаксии. По мере роста поля происходят резкие увеличения толщины слоя, перемагничиваемого вращением намагниченности, и соответствующие уменьшения пути, проходящего торцевой границей, что, естественно, сопровождается изменением скорости перемагничивания и отражается на КИП в виде изломов.

В полях $H_n > H_{кр2}$ перемагничивание ПФГ, по-видимому, происходит путем лишь вращения намагниченности. Точное исследование поведения намагниченности в полях $H_n > H_{кр2}$ пока невозможно из-за большой скорости процесса.

Список литературы

- [1] Humphrey F. B., Gyorgy E. M. // J. Appl. Phys. 1959. V. 30. N 6. P. 935—939.
- [2] Shevel W. L. // J. Appl. Phys. 1959. V. 30. N 3S. P. 47S—48S.
- [3] Колотов О. С., Погожев В. А., Телеснин Р. В. // УФН. 1974. Т. 113. № 4. С. 579—595.
- [4] Колотов О. С., Мусаев Т. Ш., Погожев В. А., Телеснин Р. В. // ФММ. 1978. № 6. С. 1182—1189.
- [5] Кашищев А. С., Колотов О. С., Погожев В. А. // ФММ. 1987. Т. 64. № 5. С. 891—895.
- [6] Kryder M. H., Humphrey F. B. // Rev. Sci. Instrum. 1969. V. 40. N 6. P. 829—840.
- [7] Durasova Ju. A., Kolotov I. S., Kolotov O. S., Petrov V. I., Spivak G. V., Telesnin R. V. // Czechosl. J. Phys. 1971. N 3. P. 451—453.
- [8] Колотов О. С., Куделькин Н. Н., Погожев В. А., Телеснин Р. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 4. С. 761—764.
- [9] Логунов М. В., Рандошкин В. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 6. С. 1199—1201.
- [10] Логунов М. В., Рандошкин В. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 10. С. 1937—1991.
- [11] Дудоров В. Н., Логунов М. В., Рандошкин В. В. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 5. С. 1549—1551.
- [12] Логунов Н. А., Логунов М. В., Рандошкин М. В. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 14. С. 1315—1318.
- [13] Йоргов Димитр, Колотов О. С., Погожев В. А. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 8. С. 120—123.
- [14] Колотов О. С., Погожев В. А., Телеснин Р. В. // ПТЭ. 1986. № 1. С. 182—185.
- [15] Кашищев А. С., Колотов О. С., Погожев В. А. // Тез. докл. VII Всес. конф. «Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры». Л., 1989. Ч. II. С. 260—261.
- [16] Йоргов Димитр, Колотов О. С., Погожев В. А. // ПТЭ. 1990. № 4. С. 225—227.
- [17] Лисовский Ф. В. Физика цилиндрических магнитных доменов. М., 1979. 192 с.
- [18] Дудоров В. Н., Логунов М. В., Рандошкин В. В. // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 6. С. 949—951.
- [19] Йоргов Димитр, Колотов О. С., Погожев В. А. // Вестник МГУ, сер. 3. Физика, астроном. 1988. Т. 29. № 3. С. 94—97.