

УДК 537.624

## О ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ ПЛЕНОК ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ СО СЛОЖНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ ПРИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ

© 2024 г. А. В. Матюнин<sup>1,\*</sup>, Г. М. Николадзе<sup>1</sup>, П. А. Поляков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
физический факультет, Москва, Россия

\* E-mail: physphak@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024

После доработки 25.06.2024

Принята к публикации 31.07.2024

Обсуждаются результаты, полученные при экспериментальном и теоретическом анализе квазистационарного перемагничивания пленок ферритов-гранатов со сложной анизотропией. С помощью магнитооптической установки, основанной на эффекте Фарадея, выявлены условия, при которых возможно уменьшение области возникновения доменной структуры, а также установлено наличие разрушений состояния однородного намагничивания магнитной пленки в четырех узких областях, расположенных относительно друг друга под прямыми углами. Предложена теория, хорошо согласующаяся с экспериментальными результатами.

DOI: 10.31857/S0367676524110072, EDN: FLQHAL

### ВВЕДЕНИЕ

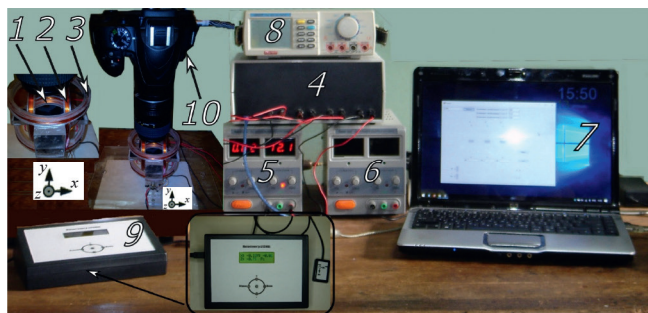
В основе физических принципов работы различных устройств спинтроники лежат механизмы перемагничивания однородно намагниченных тонких магнитных слоев. Например, в сенсорах магнитного поля на анизотропном магниторезистивном эффекте используются последовательно соединенные магнитные полоски нанометровой толщины [1–4]. В спин-вентильных и спин-туннельных устройствах используются многослойные магнитные структуры [5–8]. Для стабильной работы этих устройств важно добиться как можно более однородного перемагничивания магнитных слоев. В данной работе проводится экспериментальное исследование перемагничивания феррит-гранатовых пленок (с одноосной, двухосной и плоскостной анизотропией в их плоскости) магнитным полем, вектор напряженности которого вращается в плоскости пленки, при этом сохраняя постоянную свою величину. Выявлена доменная структура, возникающая при таком перемагничивании. Найдено, что путем варьирования перемагничивающего поля можно существенно сократить время переходного процесса. При проведении подобных экспериментов нашей научной группой использовалась современная магнитооптическая установка, значительно упрощающая визуализацию получающейся доменной структуры.

### ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СОВРЕМЕННОЙ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Общий вид магнитооптической установки представлен на рис. 1. На вставке на рис. 1 показана система катушек, создающих магнитные поля, необходимые для всестороннего проведения экспериментальных исследований. Для инициирования в исследуемой пленке процессов перемагничивания используются большие катушки 2 (ось  $X$ ), создающие перемагничивающее поле (с напряженностью до 40 Э), с помощью которых возможно задавать конечное положение вектора намагниченности; малые катушки 3, способные создавать поля до 16 Э (ось  $Z$ ), используемые для компенсации поля Земли, а также создающие необходимую для наблюдения эффекта Фарадея компоненту вектора намагниченности (так как вектор намагниченности выходит из плоскости пленки не более чем на  $5^\circ$ ).

С помощью блока сопряжения 4 (управляемого при помощи программного обеспечения, установленного на ноутбуке 7) можно создавать необходимые для экспериментальных исследований конфигурации полей (с определенными значениями напряженности данных полей, которые могут быть изменены с шагом в 0.1 Э). Блок сопряжения подключается к источнику питания 5 (Mastech HY3003), который необходим для энергетического обеспечения необходимых конфигураций полей (возможно

дополнительно задействовать еще один подобный источник питания 6 для создания полей большей напряженности). Значения напряженности поля контролируются при помощи магнитометра 9 (LIS3MDL). Получаемые изображения домённой структуры регистрируются при помощи цифровой камеры 10 (Nikon D3400).



**Рис. 1.** Общий вид магнитооптической установки. 4 – блок коммутации, 5 – источник питания блока коммутации (Mastech HY3003), 6 – дополнительный источник питания блока коммутации (Mastech HY3003), 7 – ноутбук, 8 – мультиметр для контроля протекающих в цепях катушек токов (Mastech M9803R), 9 – магнитометр (LIS3MDL), 10 – цифровая камера для регистрации домённой структуры (Nikon D3400). На вставке: 1 – малые катушки, в основном используемые для насыщения исследуемой пленки, 2 – большие катушки, создающие перемангничивающее поле, 3 – малые катушки, используемые для компенсации поля Земли, а также создающие необходимую для наблюдения эффекта Фарадея компоненту вектора намагниченности.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ПОМОЩИ СОВРЕМЕННОЙ МАГНитоОПТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

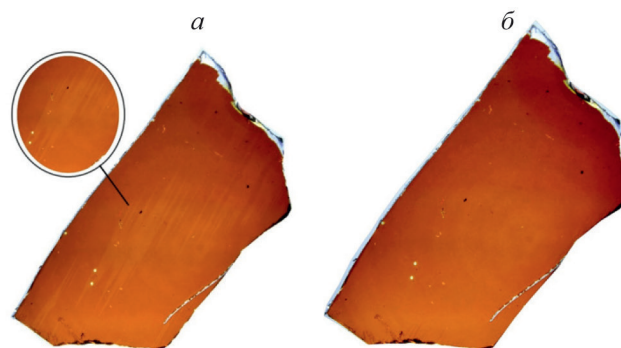
На рис. 2а приведена домённая структура, полученная при перемангничивании (от одной из осей легкого намагничивания (ОЛН)) феррит-гранатовой пленки со следующими параметрами (характерными для подобных материалов [9]): состав  $(\text{YLuBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ ; эффективные поля: плоскостной анизотропии  $H_{\text{кр}} = 1100$  Э, двухосной анизотропии  $H_{\text{к2}} = 36$  Э, одноосной анизотропии  $H_{\text{к1}} = 4$  Э; намагниченность насыщения  $M_s = 14$  Гс; поле технического насыщения  $H_{\text{sat}} = 2$  Э; толщина пленки  $h = 4$  мкм. Перемангничивающее поле  $H_p$  изменялось от 4 до 32 Э.

Видно, что при определенных значениях перемангничивающего поля (12 и 15 Э) домённая структура (которая отображается весьма отчетливо) представлена преимущественно клиновидными доменами. Данный факт подтверждает то важное обстоятельство, что перемангничивание исследуемой пленки вращающимся магнитным полем (с приведенной выше напряженностью) происходит,

в основном, посредством механизма прорастания клиновидных доменов вблизи направлений осей трудного намагничивания (ОТН). Из полученного магнитооптического изображения (рис. 2а) также следует, что клиновидные домены прорастают как от границы пленки, так и из внутренних ее областей (вставка на рис. 2а). Возможно, что причиной зарождения доменов вдали от границы являются дефекты в пленке, которые прослеживаются на приведенном изображении. Следует отметить, что в областях направлений ОЛН перемангничивание происходит, по-видимому, посредством однородного вращения вектора намагничивания. Описанное выше поведение исследуемой пленки следует связать, по всей видимости, с наличием в плоскости пленки двухосной анизотропии.

При увеличении перемангничивающего поля  $H_p$  до 32 Э домённая структура полностью пропадает и наблюдается равномерный контраст по всей площади исследуемой пленки (рис. 2б).

Также нами была исследована феррит-гранатовая пленка (с параметрами, аналогичными приведенным выше), имеющая лишь двухосную и плоскостную анизотропии. На рис. 3 представлены магнитооптические изображения домённых структур данной пленки при ее перемангничивании вращающимся магнитным полем. В первой строке на первом изображении (слева направо) представлена домённая структура в отсутствии внешнего магнитного поля. На втором изображении пленка находится в состоянии однородного намагничивания в результате воздействия однородного магнитного поля  $H_p = 4.7$  Э в плоскости пленки с вектором напряженности  $\vec{H}$ , направленным под углом  $45^\circ$  относительно горизонтальной оси.



**Рис. 2.** Изображения домённой структуры при квазистационарном перемангничивании феррит-гранатовой пленки, имеющей как двухосную, так и одноосную анизотропию в ее плоскости. Изображения получены при следующих значениях перемангничивающего поля  $H_p$ : 12 Э (а), 15 Э (б). Перемангничивающее поле направлено вдоль одной из осей легкого намагничивания – параллельно горизонтальной стороны кадра слева направо.

При повороте вектора  $\vec{H}$  на угол  $47^\circ$  состояние однородного намагничивания разрушается и возникают полосовые магнитные домены. При дальнейшем повороте вектора  $\vec{H}$  домены с энергетически выгодной ориентацией вектора намагниченности  $\vec{M}$  разрастаются и при угле  $60^\circ$  состояние однородного намагничивания восстанавливается. Следующие магнитные фазовые переходы – от состояния однородного намагничивания к состоянию с доменной структурой – происходят при повороте вектора  $\vec{H}$  приблизительно на  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ . На второй и третьей строке на рис. 3 изображены состояния с доменной структурой при углах, равных соответственно,  $57^\circ$ ,  $147^\circ$ ,  $234^\circ$ ,  $326^\circ$ . Из рисунков видно, что ориентации полосовых доменов в этих состояниях отличаются на  $90^\circ$ . Угловой сектор  $\beta$  ориентации вектора  $\vec{M}$ , при котором возникает доменная структура, уменьшается с увеличением напряженности магнитного

поля  $\vec{H}$ . В результате проведенных эксперименталь-

**Таблица 1.** Зависимость угла  $\beta$  от величины внешнего магнитного поля  $H_p$

$\beta,^\circ$	13	9	5	4	4	4	3	2
$H_p, \text{Э}$	4.7	8.6	13.2	20.5	26.7	31.5	35.2	39.9

ных исследований данной пленки для первого диапазона состояний с доменной структурой была получена зависимость угла  $\beta$  от величины внешнего магнитного поля  $\vec{H}$ , отраженная в табл. 1.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В случае пленки с двухосной и одноосной анизотропией в ее плоскости выяснилось, что конечное положение вектора намагниченности  $\vec{M}_f$  хорошо аппроксимируются следующей формулой:

$$\vec{M}_f = \vec{H}_p \cdot \sin \frac{\Phi}{2}, \tag{1}$$

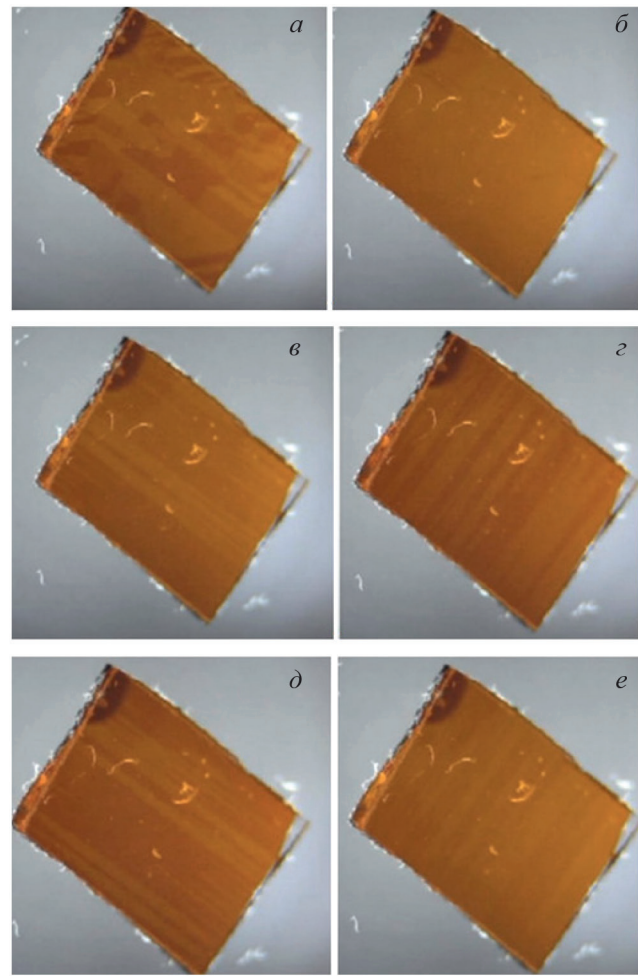
где  $\vec{H}_p$  – перемгничивающее поле,  $\Phi$  угол между ОЛН и конечным положением вектора  $\vec{M}$ .

Мы полагаем, что это свидетельствует о переходе к полнодействующему механизму однородного вращения намагниченности во всем объеме пленки – как это было показано ранее в работе [10], в которой подробно изложены результаты экспериментальных исследований подобного материала при помощи индукционной методики (заключающейся в анализе получаемых при экспериментальных исследованиях осциллограмм сигналов  $180^\circ$  импульсного перемгничивания).

При интерпретации полученных при исследовании пленки с двухосной и плоскостной анизотропией экспериментальных результатов будем полагать, что разрушение состояния однородного намагничивания пленки при повороте вектора внешнего магнитного поля  $\vec{H}$  в плоскости пленки происходит при уменьшении проекции этого поля на ОЛН до значения поля коэрцитивности  $H_c$ . Величина же  $H_c$  определяется минимальным значением магнитного поля вдоль ОЛН, при котором начинает двигаться доменная граница. На основании этого можно записать следующее соотношение для условия разрушения однородного намагничивания пленки и возникновения доменной структуры:

$$|\vec{H}| \cdot |\sin \beta| = H_c, \tag{2}$$

где  $\beta$  – угол между вектором  $\vec{H}$  и направлением оси трудного намагничивания (которая, в свою



**Рис. 3.** Магнитооптические изображения магнитной структуры феррит-гранатовой пленки при различной ориентации вектора напряженности магнитного поля: доменная структура в отсутствии магнитного поля (а), угол поворота вектора  $\vec{H}$  равен  $45^\circ$  (б),  $57^\circ$  (в),  $147^\circ$  (г),  $234^\circ$  (д),  $326^\circ$  (е).



очередь, направлена под  $45^\circ$  относительно оси легкого намагничивания).

Значение  $H_c$  можно определить из экспериментальных значений, представленных в таблице 1. При нахождении значения  $H_c$  необходимо учесть, что в формуле (2) угол  $\beta$  берется в радианах. Перемножая значения первой и второй строк и выбирая среднее значение, найдем, что  $H_c = 88$  Э·град. На рис. 4 представлен теоретический график зависимости угла  $\beta$  от величины внешнего магнитного поля  $H_p$  и экспериментальные значения с учетом погрешности измерений.

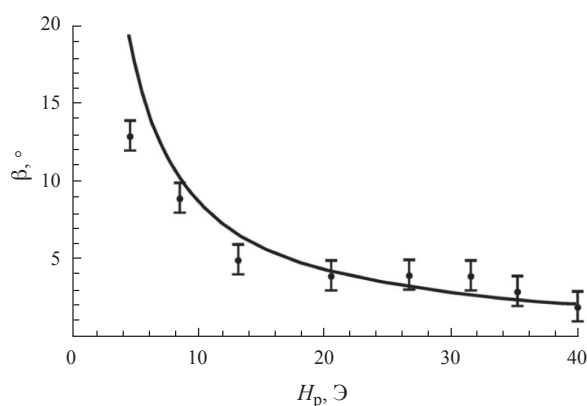


Рис. 4. Теоретический график зависимости угла  $\beta$  от величины внешнего магнитного поля  $H_p$  и экспериментально полученные значения с учетом погрешности измерений.

Следует особо отметить, что из приведенных результатов видно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных значений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как было отмечено во введении, во многих устройствах спинтроники используются однородно намагниченные пленочные магнитные элементы. При этом важным для нормальной работы этих устройств является то обстоятельство, чтобы под воздействием магнитного поля эти пленочные элементы перемагничивались однородно. В данной работе показано, что при визуализации получающейся доменной структуры можно наблюдать интересные особенности поведения исследуемых магнитных пленок: в частности, в случае пленки с двухосной и одноосной анизотропией при увеличении значения перемагничивающего поля  $H_p$  до 32 Э возможно значительное сокращение диапазона появления доменной структуры. В случае же пленки с одной лишь двухосной анизотропией однозначно установлено наличие разрушений состояния

однородного намагничивания магнитной пленки в четырех узких областях, расположенных относительно друг друга под прямыми углами.

Необходимо особо отметить тот факт, что полученные экспериментальные результаты хорошо совпадают с результатами, полученными нами ранее при использовании метода скоростного динамического перемагничивания [10]: в частности, при  $180^\circ$  перемагничивании рассматриваемой в работе феррит-гранатовой пленки — имеющей как двухосную, так и одноосную анизотропию — наблюдается отчетливый переход к полному действующему механизму однородного вращения.

Установленные в данной работе результаты и закономерности, несомненно, помогут разработчикам устройств спинтроники избежать тех нежелательных режимов перемагничивания пленочных элементов, при которых разрушается состояние с однородной намагниченностью, что, естественно, приведет к значительному увеличению быстродействия данных устройств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Demirci E. // J. Supercond. Nov. Magn. 2020. V. 33. P. 3835.
- Шевцов В.С., Каминская Т.П., Поляков О.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 11. С. 1662; Shevtsov V.S., Kaminskaya T.P., Polyakov O.P. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 11. P. 1719.
- Sreevidya P.V., Khan Jakeer, Barshilia Harish C. et al. // JMMM. 2018. V. 448. P. 298.
- Jun Zhao Chong, Li Min, Li Jian-Wei et al. // JMMM. 2014. V. 368. P. 328.
- Шевцов В.С., Амеличев В.В., Васильев Д.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 9. С. 1247; Shevtsov V.S., Amelichev V.V., Vasilyev D.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 9. P. 1233.
- Singh Sadhana, Kumar Pawan, Gupta Ajay et. al. // JMMM. 2020. V. 513. Art. No. 167186.
- Поляков О.П., Касаткин С.И., Амеличев В.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 11. С. 1554; Polyakov O.P., Kasatkin S.I., Amelichev V.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 11. P. 1217.
- Bhatti Sabpreet, Sbiaa Rachid, Hirohata Atsufumi et al. // Today. 2017. V. 20. No. 9. P. 530.
- Матюнин А.В., Николадзе Г.М., Поляков П.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 9. С. 1239; Matyunin A.V., Nikoladze G.M., Polyakov P.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 9. P. 1026.
- Колотов О.С., Матюнин А.В., Поляков П.А. // ФТТ. 2017. Т. 59. № 10. С. 1892; Kolotov O.S., Matyunin A.V., Polyakov P.A. // Phys. Solid State. 2017. V. 59. No. 10. P. 1913.

## **On the domain structure of ferrite-garnet films with complex anisotropy under quasi-stationary magnetization reversal**

**A. V. Matyunin<sup>1,\*</sup>, G. M. Nikoladze<sup>1</sup>, P. A. Polyakov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Chair of General Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia*

<sup>\*</sup> *e-mail: physphak@mail.ru*

We presented the results obtained in the experimental and theoretical analysis of quasi-stationary magnetization reversal of ferrite-garnet films with complex anisotropy. Using a magneto-optical setup based on the Faraday effect, the conditions under which it is possible to reduce the area of occurrence of the domain structure are revealed, and the presence of destruction of the state of homogeneous magnetization of the magnetic film in four narrow regions located relative to each other at right angles is also established. A theory that is in good agreement with the experimental results is proposed.