

МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ МЕТОД НАБЛЮДЕНИЯ ФАЗ МАГНИТНОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТИ ПЛЕНОК РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ФЕРРИТОВ-ГРАНАТОВ С ТОЧКОЙ КОМПЕНСАЦИИ

© 2024 г. Д. А. Суслов^{а,*}, П. М. Ветошко^а, А. В. Маширов^а, С. Н. Полулях^б,
В. Н. Бержанский^б, В. Г. Шавров^а

^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук
Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

^бКрымский федеральный университет им. В. И. Вернадского
Россия, 295007, Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

*e-mail: sda_53@mail.ru

Поступила в редакцию 25.04.2023 г.

После доработки 30.05.2023 г.

Принята к публикации 07.07.2023 г.

В целях изучения неколлинеарной фазы в пленках ферримагнетиков с точкой магнитной компенсации разработана методика и изготовлена экспериментальная установка для наблюдения фазовых переходов в пленках ферримагнетиков с помощью магнитооптического контраста. Особенностью установки со сверхпроводящим магнитом является наличие управляемого латерального градиента температуры, позволяющего одновременно наблюдать магнитооптическим методом различные фазовые состояния в пленках ферримагнетиков в диапазоне магнитных полей и температур. С помощью разработанной установки на примере редкоземельных ферритов-гранатов наблюдались зоны различной магнитной упорядоченности в диапазоне магнитных полей от 0 до 10 Тл и температур от 150 до 400 К. Латеральный градиент температуры в плоскости пленки можно было изменять от 0 до 12 градусов. С помощью данной методики наблюдались различные фазы спин-переориентационного перехода первого рода в пленках состава $(\text{BiYGd})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$.

DOI: 10.31857/S0032816224010262, EDN: DUTEOS

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что вблизи температуры магнитной компенсации многие физические свойства редкоземельных ферритов-гранатов меняются, образуя различные фазы магнитной упорядоченности. При определенных значениях магнитного поля при температуре магнитной компенсации возникает неколлинеарная фаза, когда намагниченности подрешеток не коллинеарны как друг другу, так и внешнему магнитному полю [1–4].

Пленки ферритов-гранатов обладают хорошей прозрачностью в области видимого спектра и характеризуются большим углом фарадеевского вращения. Поэтому визуальные методы на основе магнитооптического эффекта

Фарадея широко используются в экспериментах с ферритами-гранатами [5, 6].

Вместе с тем до настоящего времени остается широкий круг нерешенных задач, в которых стандартные методики магнитооптической визуализации недостаточно эффективны.

В данной работе с целью наблюдения и изучения неколлинеарной фазы предложена модернизация традиционного подхода магнитооптических методов исследования ферримагнетиков, основанных на эффекте Фарадея. В созданной установке был осуществлен управляемый латеральный градиент температуры вдоль плоскости образца. Данный подход позволил наблюдать одновременно несколько



Рис. 1. Вставка с держателем образца и цифровой камерой с микроскопом.



Рис. 2. Цифровая камера с микроскопом.

фаз магнитной упорядоченности, а также процесс возникновения и исчезновения неколлинеарной фазы в исследуемых ферромагнетиках. В созданной установке на основе сверхпроводящего магнита можно проводить измерения в диапазоне температур от 150 до 400 К и в диапазоне магнитных полей от 0 до 10 Тл. Латеральный градиент температуры можно регулировать от 0 до 12 градусов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследования магнитных свойств и магнитооптической визуализации распределения нормальной компоненты намагниченности

эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов была изготовлена специальная вставка, помещавшаяся в криостатирующую систему GFSG-510-2K-SCM10T-VTI29 (ООО “Криотрейд инжиниринг”) со сверхпроводящим магнитом. Все компоненты вставки были сделаны из немагнитных материалов. Вставка представляла собой трубку диаметром 28 мм и длиной 1000 мм, к которой крепился вакуумный фланец с контактной группой (рис. 1). Вставка включала в себя источник света, поляризатор, анализатор, цифровую видеокамеру с микроскопом с 500-кратным увеличением (рис. 2), держатель образца (рис. 3) с нагревателем и датчиком температуры. В средней части держателя



Рис. 3. Держатель образца.

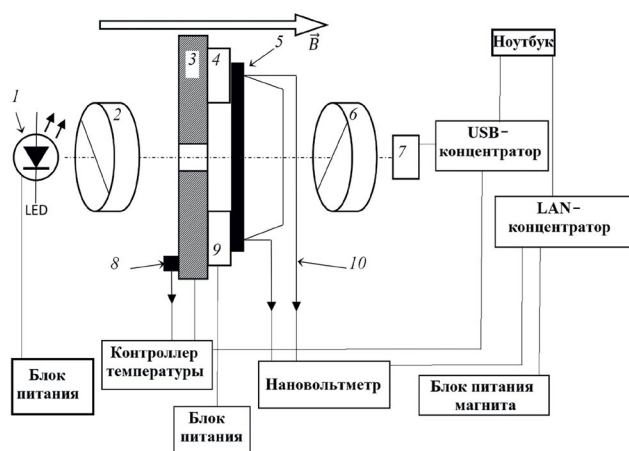


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – источник света, 2 – поляризатор, 3 – термостатирующий столик, 4 – элемент Пельтье, 5 – исследуемый образец, 6 – анализатор, 7 – микроскоп, 8 – датчик температуры, 9 – элемент Пельтье, 10 – дифференциальная термопара.

образца находится полый цилиндр из тефлона, внутри которого были закреплены светодиод и поляризатор. Поляризатор неподвижен относительно держателя образца. Анализатор крепился непосредственно на объективе микроскопа неподвижно относительно вставки. Образцы размещались таким образом, чтобы плоскость пленки была перпендикулярна направлению внешнего магнитного поля.

Перед началом эксперимента проводилась настройка пары поляризатор-анализатор. Держатель с образцом помещался в трубку вставки. Диаметр нижней части держателя образца подбирался так, чтобы плотно входить в трубку вставки. Держатель образца вращался вокруг оси вставки, меняя выделенное направление поляризатора. После достижения максимального контраста изображения доменов в микроскопе положение держателя образца закреплялось латунными винтами M2. Таким образом снаряженная вставка помещалась в криостат со сверхпроводящим магнитом.

Для создания градиента температуры по плоскости образца использовались два элемента Пельтье, создающих тепловые потоки в противоположных направлениях (рис. 3). Градиент температур измерялся дифференциальной термопарой. Поляризатор и источник света размещались на держателе образца, а анализатор помещался перед объективом микроскопа. Управление микроскопом и камерой осуществлялось через USB-порт.

Образцы представляли собой пленки феррита-граната $(\text{BiYGd})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$, полученные при эпитаксиальном синтезе на подложке граната $(\text{CdMg})_3(\text{GaZrCa})_5\text{O}_{12}$. Размер образцов – 10×10 мм², толщина пленки феррита граната – 5 мкм. Диаметр наблюдаемой в микроскоп области – 3 мм. Температура компенсации образцов составляла 325–345 К.

В отсутствие внешнего магнитного поля при температуре ниже точки магнитной компенсации в образце формируется крупноблочная доменная структура. Намагниченность в доменах направлена вдоль нормали к плоскости пленки, а домены различаются направлением намагниченности. Полидоменное состояние образца используется для настройки прибора: поляризатор и анализатор устанавливаются так, чтобы обеспечить максимальный контраст изображения доменной структуры. Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.

Вставка помещалась в криостатирующую систему GFSG-510-2K-SCM10T-VTI29 (ООО “Криотрейд инжиниринг”) со сверхпроводящим магнитом, обеспечивающую постоянное магнитное поле до 10 Тл, направленное по нормали к плоскости образца (рис. 5).

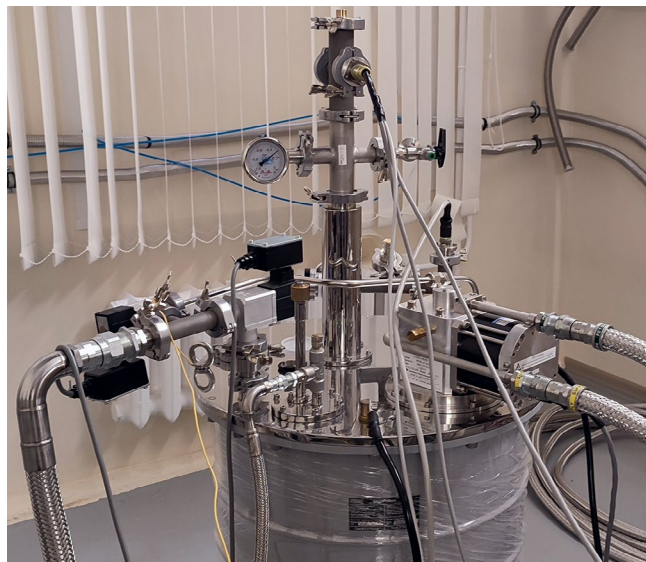
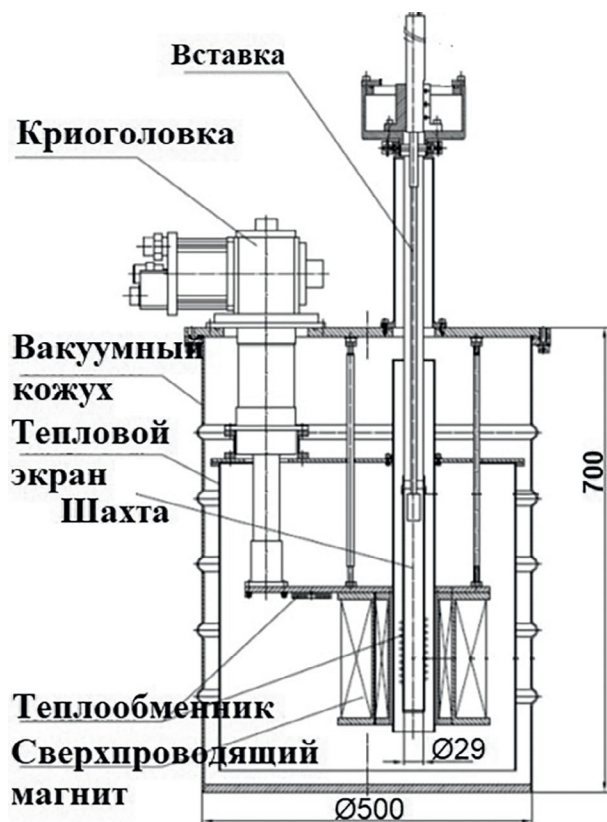


Рис. 5. Криостатирующая система GFSG-510-2K-SCM10T-VT129 (ООО “Криотрейд инжиниринг”) со сверхпроводящим магнитом и ее схема.

Все измерительные приборы и блок питания магнита были объединены в единую сеть и управлялись компьютером с помощью программ, написанных с использованием среды разработки и программной платформы LabVIEW. Это позволило автоматизировать режимы изменения величины магнитного поля

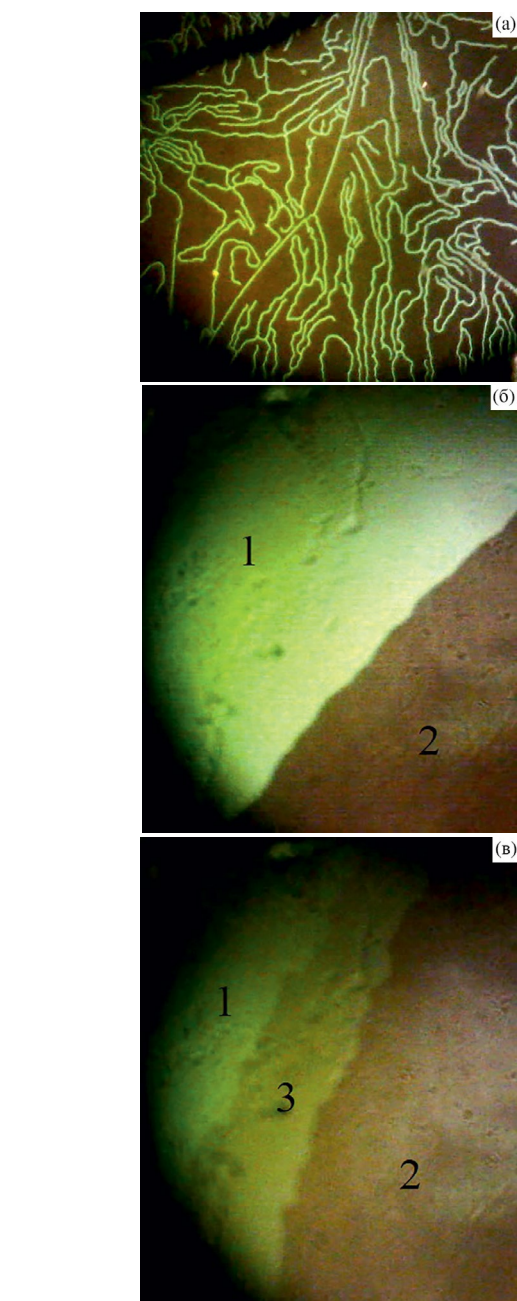


Рис. 6. а) Домены в отсутствие внешнего магнитного поля. б) Коллинеарные фазы разной направленности (области 1, 2) во внешнем магнитном поле 0.5 Тл в области магнитной компенсации. в) Магнитные фазы во внешнем магнитном поле 1 Тл в области магнитной компенсации: области 1, 2 — коллинеарные фазы противоположной направленности, область 3 — неколлинеарная фаза.

и температуры. Все наблюдаемые величины автоматически записывались в файл, а наблюдаемые процессы и численные значения параметров магнитного поля, температуры и градиента температур записывались в видеофайл.

Данная конструкция позволяет наблюдать доменную структуру образцов и фазовые переходы в диапазоне температур от 150 до 400 К. Градиент температур в плоскости образца может изменяться в диапазоне от 0 до 12 К. Результаты проведенных экспериментов показаны на рис. 6.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем результаты настоящей работы:

1) Создана экспериментальная установка для наблюдения с помощью магнитооптического эффекта Фарадея доменных структур ферромагнитных пленок, которая обеспечивает возможность одновременно наблюдать области, соответствующие различным магнитным фазам благодаря наличию управляемого латерального градиента температуры в плоскости образца.

2) С помощью установки обнаружены условия возникновения двух коллинеарных магнитных фаз, разделенных компенсационной доменной границей, а также условия существования неколлинеарной магнитной фазы в материалах $(\text{BiYGd})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$.

3) Результаты экспериментов показали, что данная установка позволяет непосредственно наблюдать доменную структуру и процессы магнитных фазовых спин-переориентационных переходов в пленках редкоземельных ферритов-гранатов в области магнитной компенсации.

В дополнение к известным результатам исследований неколлинеарных фаз [6–8] исследования с помощью описанной установки позволили выявить новые различия в характере поведения фазовых диаграмм пленок магнетиков состава $(\text{BiYGd})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00754).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов К.П. // УФН. 1996. V. 166. P. 669.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199606f.0669>
2. Bernasconi J., Kuse D. // Phys. Rev. 1971. V. 3. P. 811.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.3.811>
3. Clark A., Callen E. // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. P. 5972.
<https://doi.org/10.1063/1.1656100>
4. Звездин А., Попков А.Ф. // ФТТ. 1974. Т. 16. № 4. С. 1082.
5. Филиппов Б.Н. Микромагнитные структуры и их нелинейные свойства. Екатеринбург: Уро РАН. 2019. С. 166. ISBN: 978-5-7691-2537-9
6. Шарипов М.З., Соколов Б.Ю. Магнитооптические свойства редкоземельных феррит-гранатов. Deutschland: Lap Lambert Academic Publishing, 2014. ISBN: 978-3-659-53823-0
7. Лисовский Ф.В., Шаповалов В.И. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. С. 128.
8. Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Шаповалов В.И. // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. С. 1443.
<http://jetp.ras.ru/cgi-bin/r/index/r/71/4/p1443?a=list>