

ЛАБОРАТОРНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 537.622.6

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

© 2023 г. Д. А. Суслов<sup>а\*</sup>, П. М. Ветошко<sup>а</sup>, А. В. Маширов<sup>а</sup>,  
С. Н. Полулях<sup>б</sup>, В. Н. Бержанский<sup>б</sup>, В. Г. Шавров<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук  
Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

\*e-mail: sda\_53@mail.ru

<sup>б</sup>Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского  
Россия, 295007, Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

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 ферромагнетиков с точкой магнитной компенсации разработана методика и изготовлена экспериментальная установка для наблюдения фазовых переходов в пленках ферромагнетиков 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 ферромагнетиков 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  $(\text{BiYGd})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ .

## 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 ферромагнетиков, основанных на эффекте Фарадея. В созданной установке был осуществлен управляемый латеральный градиент температуры вдоль плоскости образца. Данный подход позволил наблюдать одновременно несколько 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 образца находится полый цилиндр из тефлона, внутри которого закреплены светодиод и поляризатор. Поляризатор неподвижен относительно держателя образца. Анализатор крепится непосредственно на объектив микроскопа и неподвижен относительно трубки 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 М2. Таким образом снаряженная вставки 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  $(\text{BiY}\text{Gd})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ , полученные при эпитаксиальном синтезе на подложке граната  $(\text{CdMg})_3(\text{GaZrCa})_5\text{O}_{12}$ . Размер образцов –  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ , 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.

Рис. 4

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

Рис. 5

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 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.

Рис. 6

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем результаты настоящей работы.

1) Создана экспериментальная установка для наблюдения с помощью магнитооптического эффекта Фарадея доменных структур ферримагнитных 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  $(\text{BiY}\text{Gd})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ .

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  $(\text{BiY}\text{Gd})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ .

#### 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](https://doi.org/10.1063/1.1656100)
6. *Шаринов М.З., Соколов Б.Ю.* Магнитооптические свойства редкоземельных феррит-гранатов. Deutschland: Lap Lambert Academic Publishing, 2014. ISBN: [978-3-659-53823-0](https://doi.org/10.1063/1.1656100)
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>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

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

**Рис 2.** Цифровая камера с микроскопом.

**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.

**Рис 5.** Криостатирующая система GFSG-510-2K-SCM10T-VTI29 (ООО "Криотрейд инжиниринг") с сверхпроводящим магнитом и ее схема.

**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.

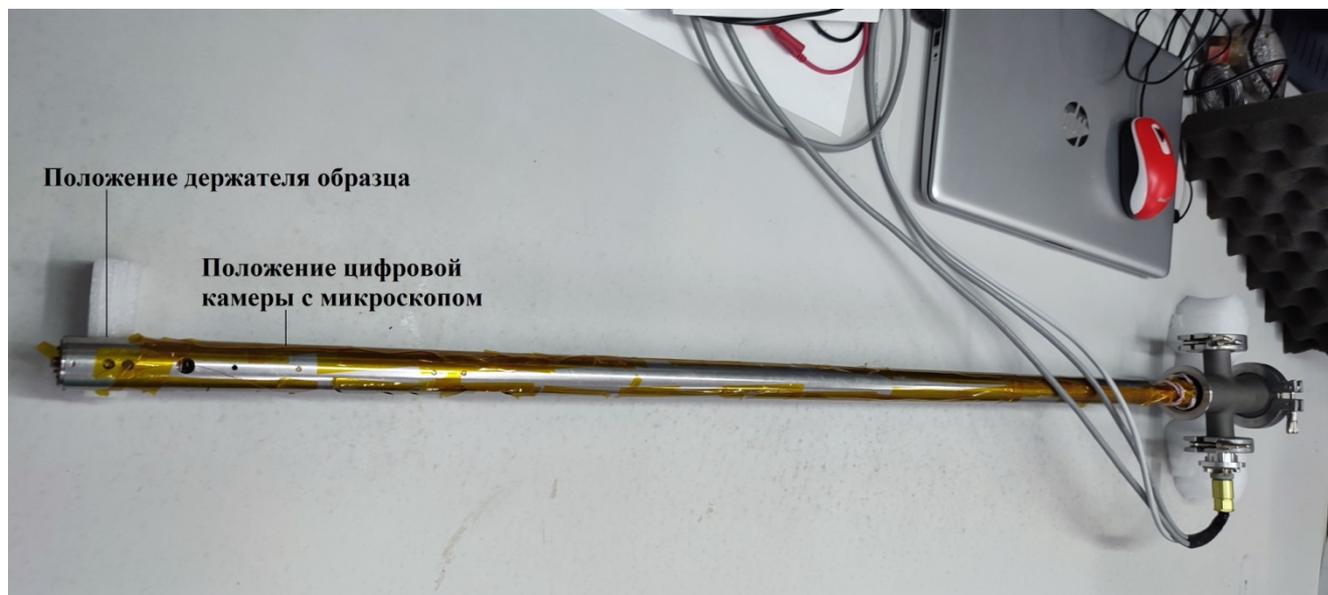


Рис.1



Рис.2



Рис.3

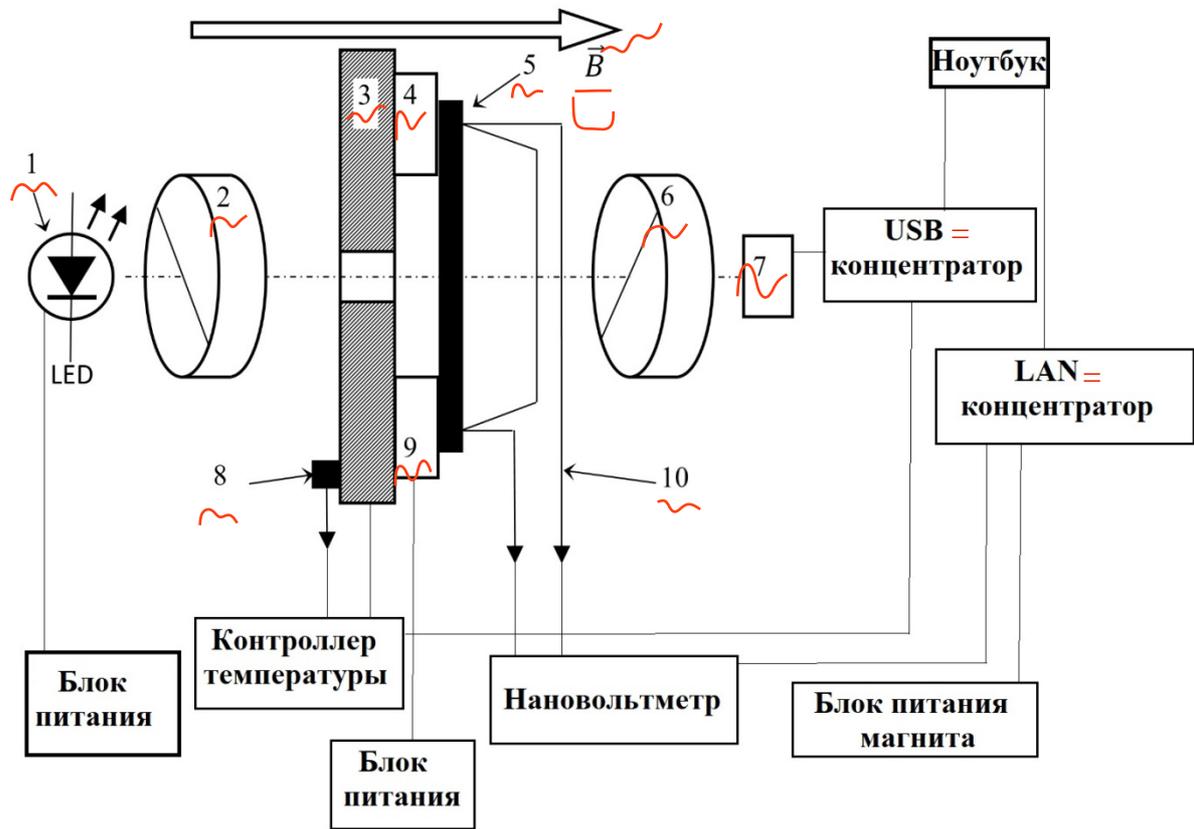


Рис. 4

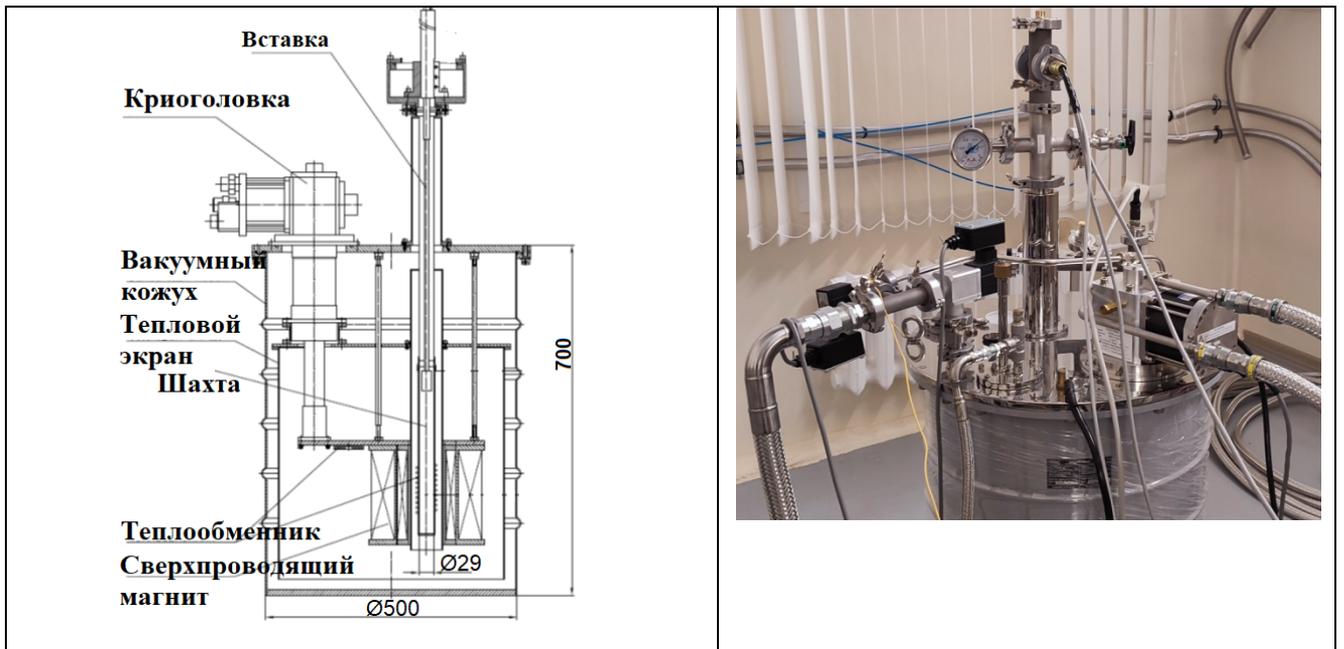
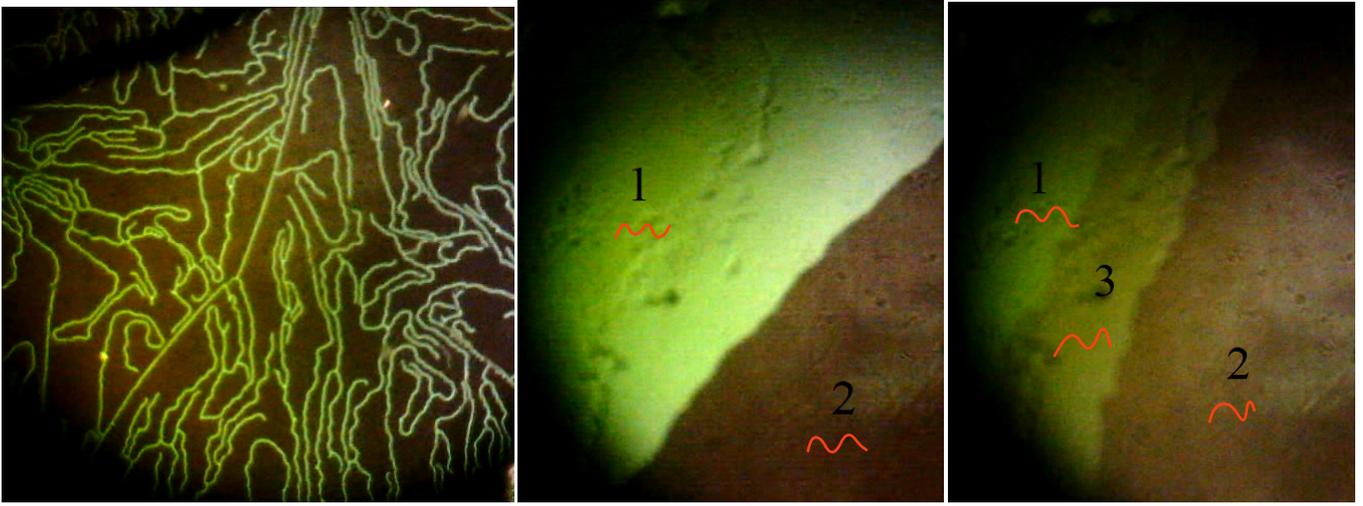


Рис.5



(a)

(б)  
~~в)~~

(в)  
~~с)~~

Рис. 6

Для связи с автором:

Суслов Дмитрий

*sda\_53@mail.ru*

**В помощь переводчику:**

**Magneto-optical method for observing the phases of magnetic ordering in rare earth ferrite films using a compensating point**

Аннотация:

For the purpose of studying the non-collinear phase in ferrimagnetic films with a magnetic compensation point, a technique has been developed and an experimental setup has been fabricated for observing phase transitions in ferrimagnetic films using magneto-optical contrast. The unique feature of the setup with a superconducting magnet is the presence of a controllable lateral temperature gradient that allows simultaneous observation of various phase states in ferrimagnetic films in the range of magnetic fields and temperatures using the magneto-optical method. Using the developed setup, zones of different magnetic ordering were observed for rare earth garnet ferrites in the range of magnetic fields from 0 to 10 T and temperatures from 150 K to 400 K. The lateral temperature gradient in the film plane could be varied from 0 to 12 degrees. Different phases of the first-order spin-reorientation transition were observed in films with a composition of  $(\text{BiYGd})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  using this technique.