

**К 90-ЛЕТИЮ
ВЛАДИМИРА ГРИГОРЬЕВИЧА ШАВРОВА**

УДК 537.622.6

**МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ ФАЗ
В ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ПЛЕНКЕ ФЕРРИТА-ГРАНАТА
ВБЛИЗИ ТОЧКИ КОМПЕНСАЦИИ**

© 2023 г. П. М. Ветошко^а, В. Н. Бержанский^б, С. Н. Полулях^б, Д. А. Суслов^{а, *},
А. В. Маширов^а, В. Г. Шавров^а, Е. И. Павлюк^б

^а Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

^б Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,
просп. Академика Вернадского, 4, Симферополь, 295007 Российская Федерация

*E-mail: sda_53@mail.ru

Поступила в редакцию 20.09.2022 г.

После доработки 03.10.2022 г.

Принята к публикации 03.10.2022 г.

Описан метод магнитооптической визуализации магнитных фаз в ферромагнетиках в окрестности точки компенсации в латеральном градиенте температур. На примере пленок висмут-гадолиниевого феррита граната наблюдались зоны, соответствующие коллинеарной и неколлинеарной магнитным фазам, в зависимости от температуры и величины магнитного поля в диапазоне от 0 до 10 Тл.

DOI: 10.31857/S0033849423040149, EDN: PFZUCD

ВВЕДЕНИЕ

Среди магнитных материалов особое место занимают ферромагнетики с точкой компенсации [1]. Разный ход температурных зависимостей намагниченностей противоположно направленных магнитных подрешеток приводит к появлению в таких магнетиках особой температурной точки — точки компенсации, т.е. температуры, при которой спонтанная намагниченность материала обращается в ноль. Во внешнем магнитном поле в окрестности точки компенсации возникает неколлинеарная магнитная фаза, обусловленная скосом намагниченностей различных подрешеток [2, 3]. Возрождение интереса к материалам с магнитной точкой компенсации обусловлено как особенностями их спиновой динамики [4], так и новыми возможностями практических применений в спинтронике [5], сенсорике [6] и при их сверхбыстром перемагничивании [7].

К магнитным диэлектрикам, обладающим точкой компенсации, относятся редкоземельные ферриты-гранаты, содержащие парамагнитные ионы в додекаэдрической подрешетке. В частности, феррит-гранат гадолиния $Gd_3Fe_5O_{12}$ имеет точку компенсации $T_c \approx 287$ К. Намагниченность железа в этом соединении обусловлена сильным отрицательным обменом тетраэдрических и октаэдрических ионов Fe^{3+} . Магнитная подрешетка гадолиния

является “слабой” — обменные взаимодействия между ионами Gd^{3+} практически отсутствуют и намагниченность гадолиния обусловлена отрицательным обменом с ионами железа Fe^{3+} . При температурах, ниже точки компенсации, преобладает намагниченность подрешетки гадолиния, а выше точки компенсации — результирующая намагниченность железных подрешеток.

Экспериментальные исследования температурной зависимости намагниченности в таких соединениях связаны с проблемами, обусловленными малой по величине намагниченностью соединения вблизи точки компенсации. В случае эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов дополнительные сложности возникают при использовании парамагнитной подложки, например, на основе гадолиний-галлиевого граната. Вместе с тем для исследования магнитных свойств эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов широко применяются методы, в которых используется магнитооптический эффект Фарадея. При этом основной вклад в поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света вносит подрешетка железа, и поэтому вкладом намагниченности гадолиния, в первом приближении, можно пренебречь.

Кроме того, при экспериментальном исследовании фазовых диаграмм подобных соединений в сильных магнитных полях возникают дополнительные сложности, связанные с возникновением

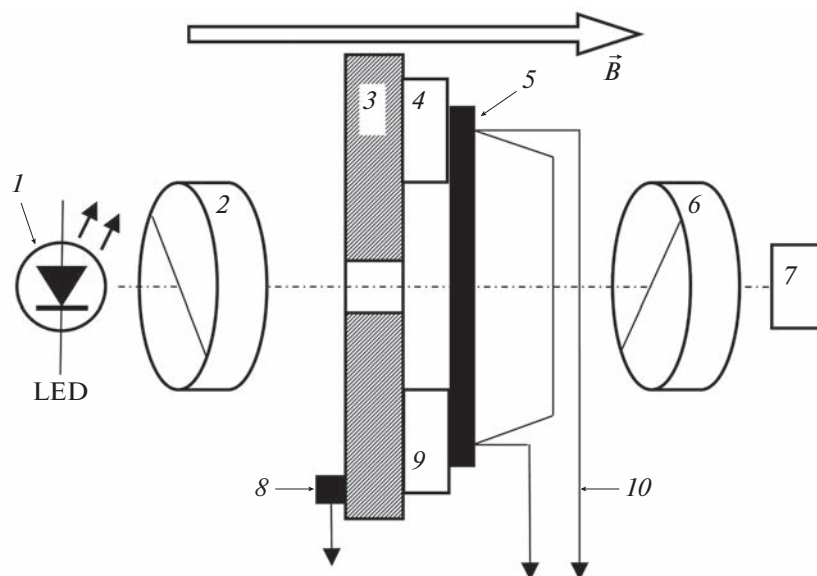


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — источник света (светодиод), 2 — поляризатор, 3 — термостатирующий столик, 4 — элемент Пельтье, 5 — исследуемый образец, 6 — анализатор, 7 — микроскоп, 8 — датчик температуры, 9 — элемент Пельтье, 10 — дифференциальная термопара.

ем и регистрацией неколлинеарных магнитных фаз в сравнительно узком температурном диапазоне.

В данной работе для визуализации магнитных фаз в тонких магнитных пленках предлагается подход, основанный на использовании магнитооптического эффекта Фарадея в специально сформированном температурном градиенте.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В установке используется термостатирующий столик, изготовленный из меди. Постоянная температура T обеспечивается термостатирующим устройством (термостатирующее устройство на рис. 1 не показано). На термостатирующем столике расположены два элемента Пельтье, обеспечивающих температуры T_1 и T_2 так, что $T_1 < T < T_2$. Исследуемый образец помещали на элементы Пельтье, в результате чего в плоскости образца имелась возможность сформировать градиент температур от 0 до 12°C.

Для магнитооптической визуализации распределения нормальной компоненты намагниченности в образце были использованы источник света, поляризатор, анализатор и микроскоп. Всю систему поместили в криостатирующую систему GFSG-510-2K-SCM10T-VTI29 (ООО «Криотрейд инжиниринг») со сверхпроводящим магнитом, обеспечивающим магнитные поля до 10 Тл. По-

стоянное магнитное поле направлено нормально плоскости пленки.

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Для проведения экспериментов использованы пленки висмут-гадолиниевого феррита граната состава $(\text{BiGd})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$ толщиной 5 мкм, синтезированные методом жидкофазной компенсации на подложку $(\text{GdCa})_3(\text{GaMgZr})_5\text{O}_{12}$ граната ориентации (111). Висмут, ионы которого входят в редкоземельную подрешетку, усиливает фарадеевское вращение, несколько повышает температуру Кюри, но приводит к снижению температуры компенсации. Диамагнитное разбавление железа алюминием и галлием, наоборот, точку компенсации повышает. Исследование температурной зависимости величины фарадеевского вращения показало, что точка компенсации в этом образце равна $T_c \approx 342$ К. Анализ магнитного состояния пленки методом ферромагнитного резонанса (ФМР) показал, что пленка характеризуется магнитной анизотропией типа «легкая ось».

Химический состав магнитных пленок (табл. 1) был определен методом электронно-зондового микроанализа с использованием сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-6480LV с энергодисперсионным спектрометром INCA X-Maхn. Анализ проводили при ускоряющем напряжении 10 кВ и электрическом токе 1.4 нА. Стандартизация спектральных линий была произведена с использованием следующих стандартов: O — GdPO_4 , Sc — ScPO_4 , Fe — Fe, Se — PbSe ,

Таблица 1. Химический состав образцов

№ образца	Al	Cr	Fe	Cu	Ga	Gd	Pt	Bi	O	Gd + Bi	Fe + Ga + ..
1	0.029955	0.017973	4.221667	0.015976	0.561158	2.398402	0.105841	0.621068	12	3.019471	4.952571
2	0.041944	0.023968	4.202397	0.021971	0.571238	2.402796	0.105859	0.603196	12	3.005992	4.967377
3	0.039940	0.019970	4.213679	0.015976	0.579131	2.40639	0.109835	0.587119	12	2.993510	4.978532
4	0.043941	0.021971	4.230360	0.017976	0.593209	2.386818	0.101864	0.577230	12	2.964048	5.009321
5	0.029960	0.017976	4.224368	0.021971	0.581225	2.398802	0.105859	0.595206	12	2.994008	4.981358
6	0.045931	0.023964	4.221667	0.011982	0.583125	2.396405	0.105841	0.581128	12	2.977534	4.992511

Gd – GdPO₄, Yb – YbPO₄, Pt – Pt, Bi – BiTe₂. Se – PbSe, Gd – GdPO₄, Yb – YbPO₄, Pt – Pt, Bi – BiTe₂. Стандартное отклонение для элементов с концентрациями более 10% по массе не превышало 2%. Применялось усреднение по шести измерениям в различных точках образца.

Исходя из химического состава методом молекулярного поля была рассчитана зависимость намагниченности образца от температуры (рис. 2). Рассмотрены три магнитных подрешетки, соответствующие гадолинию в октаэдрических позициях в структуре граната (кривая *c*), ионам железа в октаэдрических (*a*) и тетраэдрических (*d*) позициях. Полагается, что на намагниченность каждой подрешетки действует эффективное магнитное поле:

$$\vec{H}_i = \sum_j \lambda_{ij} \vec{M}_j. \quad (1)$$

Здесь индексы *i* и *j* принимают значения *a*, *d* и *c*, соответствующие магнитным подрешеткам, λ_{ij} – параметры молекулярного поля ($\lambda_{ij} = \lambda_{ji}$), $\vec{H}_i$ – эффективное молекулярное магнитное поле, действующее на *i*-ю подрешетку, $\vec{M}_i$ – намагниченность *i*-й подрешетки. Намагниченность каждой подрешетки направлена вдоль магнитного поля, действующего на эту подрешетку.

При заданной температуре намагниченность рассчитывается с помощью функции Бриллюэна (см., например, [8]). Численные значения параметров молекулярного поля приведены в работе [9] для гадолиниевого феррит-граната Gd₃Fe₅O₁₂, имеющего такие же магнитные подрешетки, как и исследуемый образец. Параметры λ_{ij} из работы [9] взяты за основу, и в пересчете для исследованного соединения использовались значения (в единицах Э г/эме)

$$\lambda_{aa} = -64750, \lambda_{ad} = -96640, \lambda_{ac} = -3430,$$

$$\lambda_{dd} = -29880, \lambda_{dc} = -5970, \lambda_{cc} = 0.$$

На рис. 2 представлены рассчитанные температурные зависимости намагниченности в пленке исследованного висмут-гадолиниевого граната.

Наибольшее значение имеет параметр молекулярного поля λ_{ad} , который в основном и определяет антиферромагнитное упорядочение магнитных подрешеток в данном соединении. Сплошной линией приведена суммарная намагниченность всего соединения, а пунктирными линиями – намагниченности подрешеток *a*, *d* и *c* соответственно. Отрицательные значения намагниченности *d*-подрешетки использованы для того, чтобы показать, что эта намагниченность антипараллельна намагниченностям двух других подрешеток. Температура компенсации, полученная в результате проведенных расчетов, хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемой.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

В отсутствие внешнего магнитного поля при температуре, близкой к температуре компенсации, в образце формируется крупноблочная доменная структура. Намагниченность в доменах направлена вдоль нормали к плоскости пленки, а

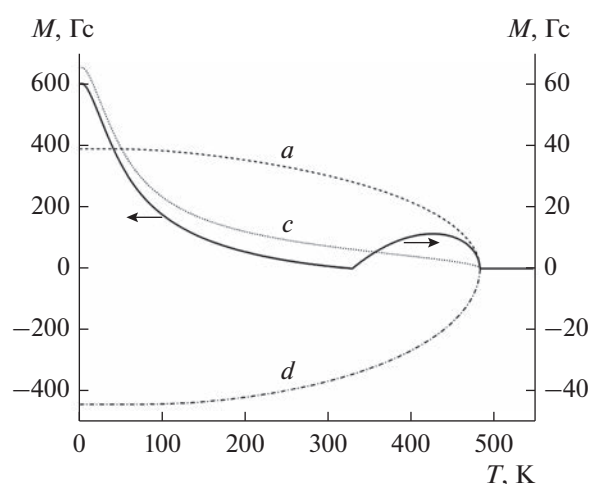


Рис. 2. Расчетная зависимость намагниченности подрешеток *a*, *d* и *c* от температуры; сплошная линия – суммарная намагниченность подрешеток гадолиния и железа (приведена в разных масштабах выше и ниже точки компенсации).

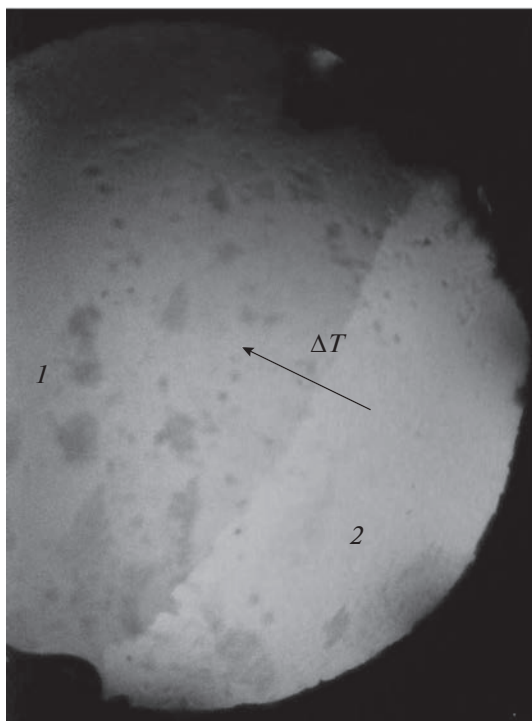


Рис. 3. Коллинеарные фазы 1 и 2 разной направленности.

домены различаются направлением намагниченности. Образец в полидоменном состоянии используется для настройки прибора: поляризатор и анализатор устанавливаются так, чтобы обеспечить максимальный контраст изображения доменной структуры.

В условиях температурного градиента, когда температура в центре образца соответствует точке компенсации, а магнитное поле превышает порог коэрцитивности (порядка 2 мТл), наблюдаемая картина представлена двумя областями различной яркости (рис. 3). При изменении температуры вклад каждой подрешетки меняется по-разному. При температуре, близкой к температуре компенсации, их вклад может сравняться, при этом результирующая спонтанная намагниченность кристалла обратиться в ноль. При дальнейшем повышении температуры влияние редкоземельной подрешетки возрастает быстрее и вдоль температурной линии, соответствующей точке компенсации, формируется компенсационная доменная граница.

В полях более 2.8 Тл наблюдаемая картина становится пространственно неоднородной. Выделяются светлые и темные области, соответствующие противоположному направлению намагниченности. Эти области разделены переходной областью, соответствующей неколлинеарной фазе (рис. 4). При дальнейшем увеличении поля площадь области, соответствующей неколлинеарной фазе, растет (см. рис. 4) и в полях свыше 3 Тл об-

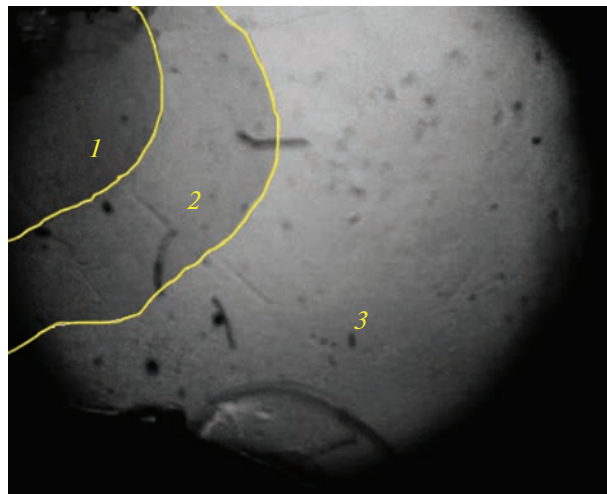


Рис. 4. Магнитные фазы в поле 2.8499 Тл: 1 — коллинеарная фаза, 2 — неколлинеарная фаза, 3 — коллинеарная фаза противоположной направленности.

ласть неколлинеарной фазы заполняет все пространство наблюдения и картина вновь становится однородной.

Отсутствие неколлинеарной фазы в полях меньше 2.8 Тл хорошо согласуется с фазовой диаграммой, полученной в теоретической работе [3]. Проведенный в этой работе анализ показал, что при намагничивании пленки с анизотропией типа “легкая ось” существует некоторое критическое поле, ниже которого неколлинеарная фаза не формируется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен магнитооптический метод визуализации магнитных фаз в тонких пленках ферри-магнетиков вблизи точки компенсации. Использование температурного градиента в плоскости пленки позволяет одновременно наблюдать области, соответствующие различным магнитным фазам. В полях ниже критического наблюдаются две коллинеарные магнитные фазы, разделенные компенсационной доменной границей. В полях выше критического, наряду с коллинеарными магнитными фазами, экспериментально наблюдается область неколлинеарной магнитной фазы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00754).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов К.П. // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 6. С. 669.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199606f.0669>

2. *Clark A.E., Callen E.* // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. № 13. P. 5972.
<https://doi.org/10.1063/1.1656100>
3. *Звездин А.К., Попков А.Ф.* // ФТТ. 1974. Т. 16. № 4. С. 1082.
4. *Davydova M.D., Zvezdin K.A., Kimel A.V., Zvezdin A.K.* // J. Phys.: Cond. Matt. 2020. V. 32. № 1. Article No. 01LT01.
<https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab42fa>
5. *Geprägs S., Kehlberger A., Coletta F.D. et al.* // Nat. Commun. 2016. V. 7. Article No. 10452.
<https://doi.org/10.1038/ncomms10452>
6. *González J.A., Andrés J.P., Anton R.L.* // Sensors. 2021. V. 21. № 16. P. 5615.
<https://doi.org/10.3390/s21165615>
7. *Medapalli R., Razdolski I., Savoini M. et al.* // Europ. Phys. J. B. 2013. V. 86. № 4. Article No. 183.
<https://doi.org/10.1140/epjb/e2013-30682-6>
8. *Bernasconi J., Kuse D.* // Phys. Rev. B. 1971. V. 3. № 3. P. 811.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.3.811>
9. *Dionne G.F.* // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. № 9. P. 4220.
<https://doi.org/10.1063/1.323204>