

# ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ДО 40 ТЛ

## INVESTIGATION OF MAGNETOOPTICAL FARADAY EFFECT IN THIN FILMS UNDER MAGNETIC FIELD UP TO 40 T

*Р. В. Козабаранов<sup>1</sup>, Ю. Б. Кудасов<sup>1,2</sup>, И. В. Макаров<sup>2</sup>, В. В. Платонов<sup>1,2</sup>, О. М. Сурдин<sup>1,2</sup>,  
Д. А. Маслов<sup>1,2</sup>, А. С. Коршунов<sup>2</sup>, Е. Я. Попов<sup>1</sup>, А. С. Светлов<sup>1</sup>*

*R. V. Kozabaranov<sup>1</sup>, Yu. B. Kudasov<sup>1,2</sup>, I. V. Makarov<sup>2</sup>, V. V. Platonov<sup>1,2</sup>, O. M. Surdin<sup>1,2</sup>,  
D. A. Maslov<sup>1,2</sup>, A. S. Korshunov<sup>2</sup>, E. Ya. Popov<sup>1</sup>, A. S. Svetlov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Саровский физико-технический институт, НИЯУ «МИФИ», г. Саров

<sup>1</sup>Sarov Physics and Technology Institute, NRNU “MEPhI”, Sarov

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

<sup>2</sup>Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Разработана методика измерения малых углов поворота плоскости поляризации света в импульсном магнитном поле. Плоско поляризованное излучение лазера после прохождения через исследуемый образец разделяется на два ортогонально поляризованных луча. Температурный диапазон измеряемого образца от 77 К до 250 К. Методика применялась для исследования эффекта Фарадея в тонких пленках разбавленных феррит-гранатов  $(\text{LuBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$  вблизи точки температурной компенсации.

A technique of a small-angle rotation measurement of a polarization plane under pulsed magnetic field was developed. Linearly polarized laser light was split into two beams with mutually orthogonal polarization after propagation through a specimen. The measurements were carried out at different temperatures of the sample (77 K – 250 K). The technique was applied to Faraday Effect investigation in thin substituted ferrite garnet films  $(\text{LuBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$  near a temperature compensation point.

### Введение

Исследование магнитооптического эффекта Фарадея проводилось в лаборатории сильных магнитных полей СарФТИ НИЯУ «МИФИ», в которой имеется возможность создания импульсного магнитного поля до 40 Тл. В качестве исследуемого образца использовалась тонкая пленка феррит-граната. Если в додекаэдрической позиции (редкоземельный элемент) находится немагнитный ион, то магнитную подсистему феррит-граната составляют ионы  $\text{Fe}^{3+}$ , которые занимают октаэдрические и тетраэдрические положения и образуют две подрешетки. Наиболее сильное взаимодействие возникает между октаэдрическими и тетраэдрическими ионами железа. Это взаимодействие отрицательное и является более сильным, чем взаимодействия внутри решеток, поэтому намагниченности подрешеток антипараллельны [1]. При замещении ионов железа алюминием и галлием

происходит выравнивание намагниченностей подрешеток. Это приводит к тому, что при некоторой температуре, которая называется точкой компенсации, общая намагниченность феррит-граната обращается в нуль. Наличие данной точки упрощает наблюдение ориентационных переходов. Поэтому особое внимание уделено области температурной компенсации.

Настоящая работа посвящена методике и результатам магнитооптического исследования тонкой пленки  $(\text{LuBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$  на подложке  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ . Температура компенсации образца составляла  $\sim 95$  К. Пленки обладали наведенной одноосной анизотропией перпендикулярной плоскости подложки (легкая ось).

### Методика измерения

Магнитооптические измерения проведены на установке сильных импульсных магнитных полей

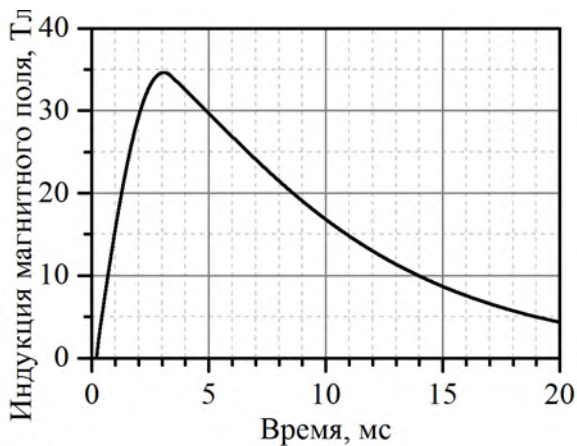


Рис. 2. Характерная форма импульса магнитного поля



Рис. 2. Внешний вид соленоида, охлаждаемого жидким азотом

СарФТИ НИЯУ «МИФИ» [2]. Источником импульсного магнитного поля служил соленоид, охлаждаемый жидким азотом. Исследуемая тонкая пленка феррит-граната располагалась в оптическом криостате, подробное описание которого представлено в работе [2]. Изменение температуры в пределах 80–250 К осуществлялось при помощи нагревательного элемента, расположенного вблизи исследуемого образца. Измерение температуры с погрешностью около 1 К производилось термопарой. Измерение магнитного поля около образца производилось с точностью около 4 % при помощи индукционного датчика. Внешний вид соленоида и характерная форма импульса магнитного поля представлены на рис. 1 и 2. Наличие установки сильных импульсных магнитных полей позволяет отработать методику измерения зависимости угла поворота плоскости поляризации в исследуемом образце вблизи точки компенсации, которое может сопровождаться ориентационными переходами. И таким образом, наблюдать вклад в эффект Фарадея от каждой подрешетки.

Схема постановки эксперимента представлена на рис. 3. Линейнополяризованное излучение He-Ne лазера 1 ( $\lambda = 633$  нм) пропускать через поляризатор 2, что позволяло при возникновении необходимости изменять угол поляризации излучения. Проходя через образец 4, расположенный в криостате и находящийся в магнитном поле соленоида 3, плоскость поляризации излучения поворачивалась. Далее в призме Волластона 5 происходило расщепление на два луча с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации, интенсивность каждой из которых измерялась при помощи 2-х фотоприемников 6. Такая постановка эксперимента позволяет устранить зависимость угла поворота от дрейфа интенсивности лазерного излучения. Поляризатор устанавливался в такое положение, чтобы углы между плоскостями поляризации излучения и поляризатором составляли 45 градусов.

Используемые в эксперименте фотоприемники были изготовлены на основе фотодиодов ФД24К, которые имеют максимальную спектраль-

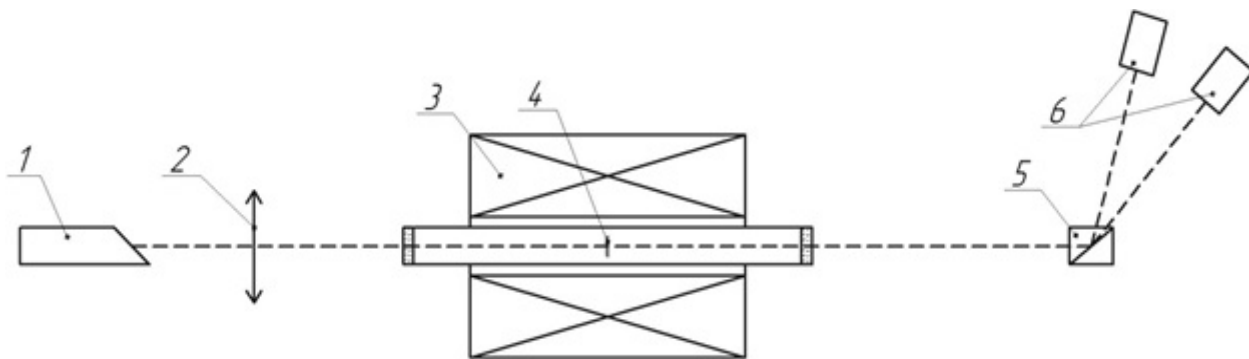


Рис. 3. Схема постановки эксперимента. 1 — источник излучения (He-Ne лазер), 2 — поляризатор, 3 — соленоид, 4 — исследуемый образец, находящийся в криостате, 5 — призма Волластона, 6 — фотоприемники

ную чувствительность в диапазоне 750–850 нм. Принципиальная схема предусилителя, собранная на основе операционного усилителя OP27, представлена на рис. 4. Время нарастания импульса фотоотклика составило менее 10 мкс.

В пленках висмут-замещенных феррит-гранатов в видимой области спектра кроме фарадеевского вращения может присутствовать заметный круговой дихроизм [3]. При прохождении эллиптически поляризованного излучения через поляризационную призму две комплексные компоненты  $E_x$  и  $E_y$  могут быть описаны в формализме матриц Джонса [4]:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\psi) \\ i \sin(\psi) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $E_0$  – начальная комплексная амплитуда,  $\theta = \theta_0 + \delta\theta$  – угол наклона,  $\theta_0$  – начальный угол,  $\delta\theta$  – вращение в магнитном поле,  $\psi$  – угол эллиптичности излучения.

Сигналы с фотоприемников пропорциональны мощности падающего излучения ( $I_1 = |E_x|^2$  и  $I_2 = |E_y|^2$ ). После преобразований получаем:

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \cos(2\theta)\cos(2\psi). \quad (2)$$

При начальном угле  $\theta_0 = \pi/4$  это отношение становится равным  $\sin(2\delta\theta)\cos(2\psi)$ . Следует отметить, что при малых углах эллиптичности это

выражение совпадает с полученным из закона Малюса [3]  $\approx \sin(2\delta\theta)$ .

Перед проведением экспериментов проводилась калибровка, которая заключалась в измерении сигналов с фотоприемников при различных положениях поляризатора. Данная процедура позволяла определять угол поворота плоскости поляризации при отсутствии внешнего магнитного поля, а также предоставляла возможность нормировки сигналов с фотоприемников.

Необходимо учитывать, что исследуемый феррит-гранат  $(\text{LuBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$  расположен на подложке  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ , который также вносит вклад в фарадеевское вращение. Однако известно, что на длине волны He-Ne лазера ( $\lambda = 633$  нм) температурная зависимость константы Верде для подложки является очень слабой [4], что сильно облегчает обработку экспериментальных данных. Помимо этого, на основании работ [3,6] можно считать, что в слабых магнитных полях используемая длина волны лежит достаточно далеко от полосы поглощения. Это позволяет избежать погрешности измерения, связанного с сильным циркулярным дихроизмом.

Используемые в эксперименте фотоприемники были изготовлены на основе фотодиодов ФД24К, которые имеют максимальную спектральную чувствительность в диапазоне 750–850 нм. Принципиальная схема предусилителя, собранная на основе операционного усилителя OP27, представлена на рис. 4. Время нарастания импульса фотоотклика составило  $\sim 10$  мкс.

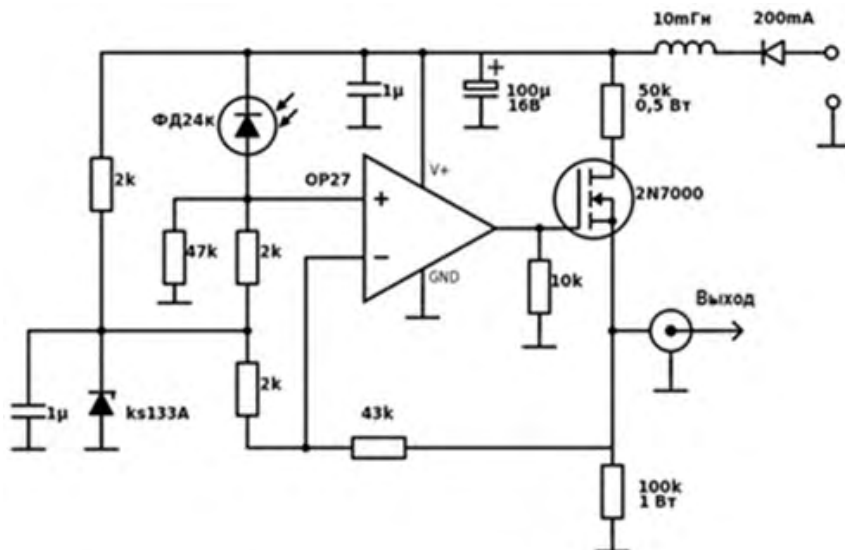


Рис. 4. Принципиальная схема предусилителя фотоприемника

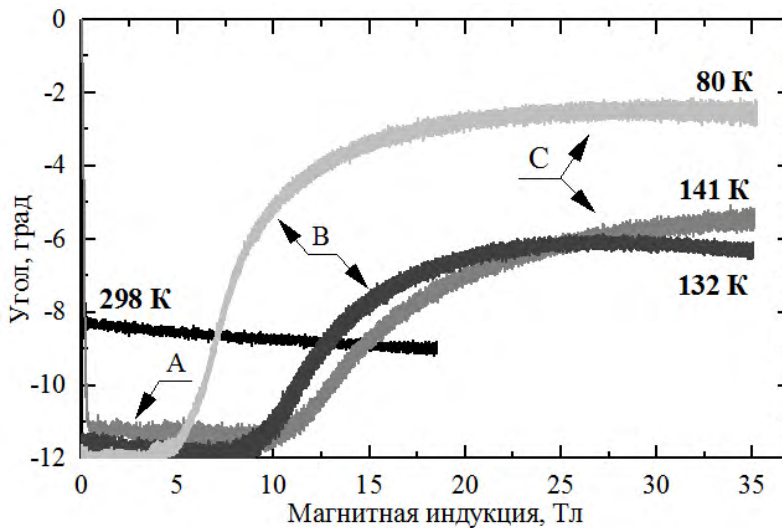


Рис. 5. Зависимость угла поворота плоскости поляризации в пленке  $(\text{LuBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$  от величины индукции магнитного поля при различных температурах

### Результаты работы

С целью устранения вклада в поворот плоскости поляризации от подложки  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  предварительно был проведен опыт при комнатной температуре. Вращение плоскости поляризации в подложке было линейным, коэффициент пропорциональности составил 0,366 град/Тл. Затем была произведена серия опытов для исследуемого образца  $(\text{LuBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$  при различных температурах.

Результаты (без влияния подложки) представлены на рис. 5. В слабых магнитных полях ( $B \ll 1$  Тл) происходило резкое изменение угла поворота плоскости поляризации, что можно объяснить скачком намагниченности образца при разрушении его доменной структуры. При этом при температуре 141 К и выше после окончания импульса магнитного поля угол поворота возвращался в исходное положение, что не наблюдалось при температуре ниже 141 К. Это явление связано с исчезновением поля размагничивания при приближении к точке компенсации. На представленных графиках (см. рис. 5) отчетливо видны три участка: в слабых магнитных полях (область А) наблюдалась слабая зависимость угла поворота от величины магнитного поля, что объясняется противоположно направленной ориентацией намагниченностей подрешеток (коллинеарная фаза), затем наблюдался переход в угловую фазу (область В), которая в сильных магнитных полях должна перейти в ферромагнитную. Причин возникновения плато в области С может быть несколько: либо в полученных полях возникала кол-

линейная (ферромагнитная) фаза, либо сказалось увеличение влияния кругового дихроизма. Для разрешения данного вопроса необходимо дополнительное исследование.

Полученные результаты позволяют построить фазовую диаграмму пленки  $(\text{LuBi})_3(\text{FeAlGa})_5\text{O}_{12}$  и разработать модель ее магнитной системы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-08-00337).

### Список литературы

1. Боков В. А. Физика магнетиков. СПб.: Невский Диалект, 2002.
2. Кудасов Ю. Б., Макаров И. В., Маслов Д. А. и др. Компактная исследовательская установка сильных импульсных магнитных полей до 50 Тл // ПТЭ. 2015. № 6. С. 78–83.
3. Deb M., Popova E., Fouchet A., Keller N. Magneto-optical Faraday spectroscopy of completely bismuth-substituted  $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  garnet thin films // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45. P. 455001.
4. Zvezdin A. K., Kotov V. A. Modern magneto-optics and magneto-optical materials. London: Institute of Physics Publishing, 1997.
5. Звездин А. К., Копчик С. В., Кринчик Г. С., и др. Аномальная полевая зависимость эффекта Фарадея в парамагнитном  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  при 4,2 К // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т.37. Вып. 7. С. 331–334.
6. Helseth L. E., Hansen R. W., Il'yashenko E. I. etc. Faraday rotation spectra of bismuth-substituted ferrite garnet films with in-plane magnetization // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 64, P. 174406.