

На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Федоров', is enclosed in a light gray rectangular box.

Федоров Андрей Сергеевич

**Магнитооптические и микроволновые свойства пленок
и гетероструктур на основе висмут- и тулий-замещенных ферритов
со структурой граната**

Специальность 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук
(ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН), г. Москва

Научный руководитель: **Логунов Михаил Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Официальные оппоненты: **Белотелов Владимир Игоревич**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, доцент, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра нанофотоники, г. Москва

Садовников Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, Саратовский национальный исследовательский университет имени Н.Г.Чернышевского, кафедра физики открытых систем, г. Саратов

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Защита диссертации состоится «12» декабря 2025 г., в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.111.01 на базе ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), расположенном по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН: <http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Fedorov/index.html>

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.111.01 (Д002.231.01)
доктор физико-математических наук, доцент

Кузнецова
Ирен Евгеньевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Для обеспечения стремительного развития информационных технологий необходимо увеличивать объём хранения данных, ускорять работу систем их обработки и снижать энергопотребление. Перспективными областями физики, направленными на решение этих задач, являются спинтроника и спин-фотоника [1–3, A10, A11]. Эти направления основываются на использовании магнитной динамики, свойств спина электронов и обеспечивают новые подходы к обработке, хранению и передаче информации. В спинтронике магнитные моменты частиц управляются токами и сигналами, а в спин-фотонике управление магнитными свойствами интегрируется с методами фотоники и делается упор на диэлектрических материалах, что позволяет в перспективе создавать энергоэффективные и высокоскоростные устройства.

Одними из основных материалов для диэлектрической спинтроники и спин-фотоники являются ферриты со структурой граната. Варьирование составов ферритов-гранатов может приводить к радикальным изменениям их свойств и, следовательно, к адаптации параметров материалов к требованиям практических приложений [2–6]. Особый интерес представляют висмут- и туллий-замещённые ферриты-гранаты, которые демонстрируют уникальные магнитные и магнитооптические свойства [7–11].

Висмут-замещённые ферриты-гранаты (Bi:IG) характеризуются высоким магнитооптическим эффектом Фарадея, а прозрачность в ближнем инфракрасном диапазоне спектра и высокая магнитооптическая добротность делают данный материал перспективным в качестве основы оптических модуляторов, изоляторов (аналоги диода в классической электронике), устройствах хранения информации, в интегральной оптике и спин-фотонике [12,13].

Туллий-замещённые ферриты-гранаты (Tm:IG), в свою очередь, привлекают внимание возможностью возбуждения когерентных колебаний намагниченности в терагерцовом диапазоне частот [8], большой одноосной

анизотропией даже в пленках нанометровых толщин [9] и как материал для исследования топологических эффектов, например, стабильных при комнатной температуре скирмионов [14]. Высокое кристаллическое качество ферритов-гранатов приводит к уменьшению плотности локальных дефектов, снижению энергетических барьеров для движения доменных границ и других спиновых текстур [15]. Перпендикулярная магнитная анизотропия [16, 17] в сочетании с взаимодействием Дзялошинского-Мория (DMI) в гетероструктурах с тяжелыми металлами [18] также способствуют формированию и быстрому движению доменных границ и скирмионов [15, 19, 20].

Таким образом, висмут- и тулий-замещённые ферриты-гранаты представляют собой важный класс материалов для разработки устройств спинтроники и спин-фотоники. Их уникальные свойства открывают широкие возможности для создания быстродействующих и энергоэффективных систем, что делает их ключевыми элементами в развитии современных информационных технологий и создании перспективной элементной базы [1].

Объединение свойств Bi- и Tm-замещённых ферритов-гранатов в одном материале (TmBi:IG) может продемонстрировать проявление действительно уникальных сочетаний магнитооптических и динамических свойств. Для комплексного исследования свойств таких материалов необходимо обеспечить как исследование основных магнитооптических эффектов в оптическом диапазоне спектра (эффект Фарадея, магнитный циркулярный дихроизм), так и в микроволновом диапазоне (ферромагнитный резонанс).

Целью диссертационной работы является поиск диэлектрических материалов для спин-фотоники и спинтроники, сочетающих одновременно повышенную магнитооптическую активность и высокое быстродействие, на основе тонких пленок и гетероструктур ферритов со структурой граната. В качестве объектов исследования выбраны монокристаллические пленки висмут- и тулий-замещённых ферритов-гранатов, в том числе легированные

ионами Ga^{3+} и Gd^{3+} , на подложках гадолиний-галлиевого граната GGG, а также поликристаллические пленки Bi:IG на кварцевых подложках SiO_2 .

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработка экспериментальной методики магнитооптического исследования пленок ферритов-гранатов предельно малых толщин, вплоть до одного периода кристаллической решетки граната.
2. Изучение магнитооптических спектров пленок ферритов-гранатов с различными замещениями ионов в подрешетках граната, выяснение влияния состава пленок на особенности их магнитооптических свойств.
3. Исследование магнитооптических и микроволновых свойств пленок ферритов-гранатов в окрестностях точек компенсации магнитного и углового моментов ферромагнетика.
4. Исследование микроволновых свойств пленок ферритов-гранатов с повышенным эффективным гиромагнитным отношением.

Научная новизна работы

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований:

1. Показана возможность регистрации магнитооптических спектров предельно тонких (толщиной порядка одного периода кристаллической решетки) пленок ферритов-гранатов в два этапа: регистрация спектров магнитного циркулярного дихроизма и последующее восстановление спектров эффекта Фарадея в таких пленках с помощью соотношения Крамерса-Кронига.
2. Показано, что в гетероструктуре Bi:IG/GGG/ SiO_2 при толщинах слоя Bi:IG менее 10 нм имеет место существенная диффузия ионов Ga^{3+} и Gd^{3+} из слоя GGG в слой Bi:IG, приводящая к возникновению точки компенсации магнитного момента в слое Bi:IG.
3. Исследовано поведение диамагнитных переходов в пленках ферритов-гранатов с различным содержанием ионов Bi^{3+} в додекаэдрической подрешетке граната и ионов Fe^{3+} в октаэдрической и тетраэдрической

подрешетках в широком диапазоне температур. Выявлены вклады магнитных подрешеток ферримагнетика в магнитный циркулярный дихроизм ферритов-гранатов с высоким содержанием висмута. Обнаружено, что при переходе через точку компенсации магнитного момента энергии диамагнитных переходов скачкообразно изменяются на $\pm 0,2$ эВ.

4. Показана возможность повышения эффективного гиромагнитного отношения в монокристаллических пленках тулий-содержащих ферритов-гранатов в 3-5 раз путем вариации замещения ионов Fe^{3+} в подрешетках граната при отсутствии точек магнитной и угловой компенсации ферримагнетика.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в разработке нового подхода к исследованию магнитооптических спектров предельно тонких пленок ферритов-гранатов, что позволяет получать информацию не только о магнитооптических свойствах, но и об эволюции параметров и реальном составе на интерфейсе пленка/подложка. Показано, что при синтезе поликристаллических пленок Bi -замещенных ферритов-гранатов происходит диффузия ионов на интерфейсе с парамагнитным гранатом, приводящая, например, к возникновению точки компенсации магнитного момента. Это расширяет наши знания о свойствах пленок на интерфейсе и результаты могут быть использованы при разработке устройств спинтроники. Проведенное исследование диамагнитных переходов в феррите-гранате с различным содержанием ионов Bi и Ga позволило выявить вклады магнитных подрешеток в магнитооптические эффекты и прогнозировать их поведение в широком температурном диапазоне. Показана возможность значительного (в 3-5 раз) увеличения эффективного гиромагнитного отношения в тулий-содержащих ферритах-гранатах при разбавлении ионов железа ионами галлия, что открывает новые перспективы для динамического управления свойствами ферритов-гранатов и повышения быстродействия устройств спинтроники на их основе.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные методы анализа спектральных зависимостей магнитного циркулярного дихроизма предельно тонких пленок могут быть использованы для контроля качества и состава интерфейсных слоев пленок ферритов-гранатов в технологических процессах. Результаты исследования диффузии ионов на интерфейсе и возникновения точки компенсации магнитного момента важны для разработки новых наноструктурированных материалов с разнообразными заданными магнитными свойствами. Полученные данные о вкладах магнитных подрешеток в магнитооптические эффекты могут быть использованы для оптимизации состава ферритов-гранатов с целью повышения эффективности их использования в устройствах магнитооптической записи и обработки информации, в перспективных устройствах спин-фотоники. Продемонстрированный эффект получения высокого эффективного гиромагнитного отношения в тулий-содержащих ферритах-гранатах, не имеющих точки компенсации углового момента, может быть использован при разработке быстродействующих устройств спинтроники и спин-фотоники, так как скорость динамических процессов в магнетиках (скорость доменных границ, частота колебаний вектора намагниченности) пропорциональна гиромагнитному отношению, и его повышение – ключевой фактор повышения быстродействия устройств спинтроники на базе магнитных материалов.

Положения, выносимые на защиту:

1. В гетероструктуре Bi:IG/GGG/SiO₂ при предельно малой толщине слоя Bi:IG, сравнимой с постоянной кристаллической решетки граната (~1.25 нм), его свойства значительно отличаются от свойств слоев Bi:IG с толщиной 100 нм и более из-за диффузии ионов Gd³⁺ и Ga³⁺ из слоя GGG. В результате в слое Bi:IG толщиной менее 10 нм снижается температура Нееля и возникает точка компенсации магнитного момента.

2. В поликристаллических пленках ферритов-гранатов с содержанием висмута более 1.5 формульных единиц в результате уменьшения толщин

пленок вплоть до периода кристаллической решетки граната происходит изменение энергии диамагнитных переходов E в температурном диапазоне 100-300 К в октаэдрической ($E = 2.8 - 3.2$ эВ) и тетраэдрической ($E = 2.4 - 2.8$ эВ) подрешетках граната, причем при переходе через точку компенсации магнитного момента энергия диамагнитных переходов изменяется скачкообразно на ± 0.2 эВ.

3. В монокристаллических пленках TmBi:IG , не имеющих точек компенсации магнитного и углового моментов, разбавление ионов Fe^{3+} ионами Ga^{3+} в 3 - 5 раз увеличивает эффективное гиромагнитное отношение пленки.

4. Величина гиромагнитного отношения в монокристаллических пленках TmBiGa:IG зависит как от содержания ионов галлия, так и от их распределения между октаэдрической и тетраэдрической подрешетками феррита-граната. При изменении содержания ионов галлия в октаэдрической подрешетке от 5 до 20% гиромагнитное отношение изменяется более чем в 3 раза.

Методы исследования и достоверность полученных результатов.

Для изучения магнитооптических свойств пленок ферритов-гранатов использованы методы магнитооптической спектроскопии на основе эффекта Фарадея и магнитного циркулярного дихроизма. Для исследования магнитных и динамических свойств пленок ферритов-гранатов использованы методы ферромагнитного резонанса для объемного резонатора и для микрополосковой линии. Достоверность основных положений и выводов диссертационной работы подтверждаются воспроизводимостью полученных экспериментальных результатов и их согласованием с теоретическими расчетами, опубликованными в рецензируемых журналах. Надежность полученных результатов обеспечивается использованием оптимальных режимов работы экспериментальных установок, использованием апробированных экспериментальных методик и применением современной приборной базы.

Апробация работы

Результаты исследований, вошедших в диссертационную работу, были представлены на всероссийских и международных конференциях:

- 63, 64, 65, 66, 67 Всероссийских научных конференциях МФТИ (2020, 2021, 2023, 2024, 2025)
- ICFM - International Conference Functional Materials (2021)
- XXV, XXVII, XXVIII Международных симпозиумах «Нанопфизика и наноэлектроника» (2021, 2023, 2024)
- EASTMAG-2022 – VIII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (2022),
- Заседания секции «Магнетизм» Научного совета РАН по физике конденсированных сред (2022, 2023)
- I и II Всероссийских научных школах для молодых исследователей, аспирантов и студентов старших курсов по проблемам исследований в сильных и сверхсильных магнитных полях (2023, 2024)
- 21-м Молодежном конкурсе имени Ивана Анисимкина (2025)

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.

Личный вклад автора

Экспериментальные и теоретические исследования проведены автором лично либо совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации. Автор участвовал в планировании, постановке экспериментов и обсуждении полученных результатов.

Публикации

По материалам диссертации опубликованы 13 научных работ, в том числе: 8 – в журналах, входящих в международные и российские реферативные базы данных и системы цитирования Scopus, Web of Science, РИНЦ и в перечень изданий, рекомендованный ВАК Минобрнауки РФ, 2 патента, 3 – в трудах международных и российских конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем исследования составляет 112 страниц, и содержит 51 рисунок и 2 таблицы. Список литературы содержит 110 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и определены ее цели. Сформулированы научная новизна, практическая ценность работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу структурных и физических свойств ферритов-гранатов. Описана кристаллическая структура ферритов-гранатов, основы теории молекулярного поля и ее применение для моделирования свойств ферритов-гранатов с редкоземельными ионами, включая ионы тулия, и особенности антиферромагнитного взаимодействия между подрешетками феррита-граната. Рассмотрены магнитооптические свойства ферритов-гранатов и влияние ионов висмута на магнитооптическую активность. Приведены основные динамические особенности ферритов-гранатов, методы исследования их свойств с помощью ферромагнитного резонанса (ФМР) и теоретические основы, включая уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта и формулу Киттеля, с упором на исследование константы затухания и гиромагнитного отношения ферритмагнетиков. Завершается глава обзором применения ферритов-гранатов в магнитооптических и микроволновых устройствах.

Вторая глава посвящена методам исследования и характеристики исследуемых образцов. В п. 2.1 описаны методы магнитооптической спектроскопии для изучения эффекта Фарадея и магнитного циркулярного дихроизма. Спектрометр циркулярного дихроизма модифицирован для обеспечения регистрации и спектров эффекта Фарадея, и магнитного циркулярного дихроизма исследуемых пленок ферритов-гранатов и других прозрачных магнетиков, например FeVO_3 [A3], в диапазоне температур 90–

500 К. П. 2.2 посвящен методам регистрации микроволновых спектров с использованием объемного резонатора на частоте 9.5 ГГц и микрополосковой линии для широкополосных измерений в диапазоне частот до 40 ГГц. Спектрометр Bruker ER-200 модернизирован для повышения точности регистрации ориентационных зависимостей спектров ФМР [A2]. В п. 2.3 рассмотрены методы обработки пленок – отжиг при температурах до 1000 °С для коррекции параметров монокристаллических пленок и изменения фазового состава поликристаллических пленок, травление в ортофосфорной кислоте для коррекции толщины пленок. Приведены данные рентгеноструктурного анализа и послойного элементного анализа пленок, сведения о методике моделирования намагниченности пленок ферритов-гранатов на базе теории молекулярного поля.

Третья глава сосредоточена на результатах магнитооптических исследований монокристаллических и поликристаллических пленок Bi -замещенных ферритов-гранатов. В п. 3.1 проанализированы спектры эффекта Фарадея и магнитного циркулярного дихроизма в диапазоне энергий 1.5–4.0 эВ (Рис. 1а) и температур 90–450 К, приведены результаты анализа температурных особенностей энергий диамагнитных переходов для поликристаллических и монокристаллических пленок (Рис. 1б) [A5, A13].

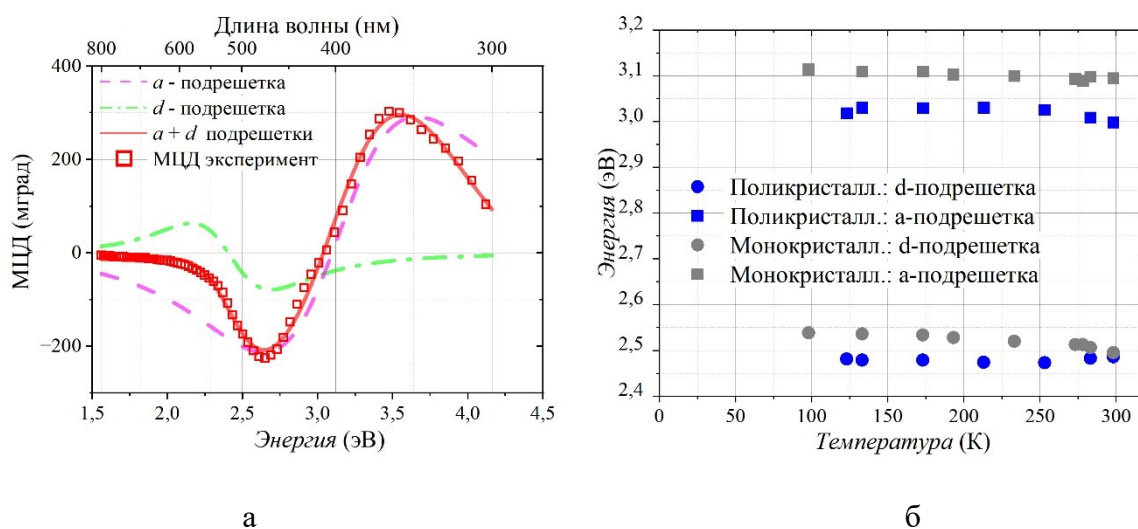


Рис. 1. а) Спектры магнитного циркулярного дихроизма МЦД: экспериментально измеренный спектр (красные маркеры), расчетные спектры

вкладов диамагнитных переходов октаэдрической (a -подрешетка, розовый штрих), тетраэдрической (d -подрешетка, зеленый штрих пунктир) подрешеток и суммарный расчетный МЦД от вкладов a - и d -подрешеток феррита-граната (красная линия). б) Зависимости энергий перехода в октаэдрической (a -подрешетка, квадраты) и тетраэдрической (d -подрешетка, круги) подрешетках от температуры. Серыми маркерами отмечены данные для монокристаллической пленки, синими – для поликристаллической пленки.

Показано, что энергии переходов в поликристаллических пленках ниже, чем для монокристаллических, что связано с различным вхождением ионов Bi в кристаллическую структуру феррита-граната [A5, A13]. П. 3.2 посвящен исследованию гетероструктур Bi:IG/GGG/SiO_2 . Показано, что при толщинах слоя Bi:IG менее 10 нм имеет место существенная диффузия ионов Ga^{3+} и Gd^{3+} из слоя GGG в слой Bi:IG . Это приводит к возникновению точки компенсации магнитного момента (рис. 2) и снижению температуры Нееля слоя Bi:IG [A9].

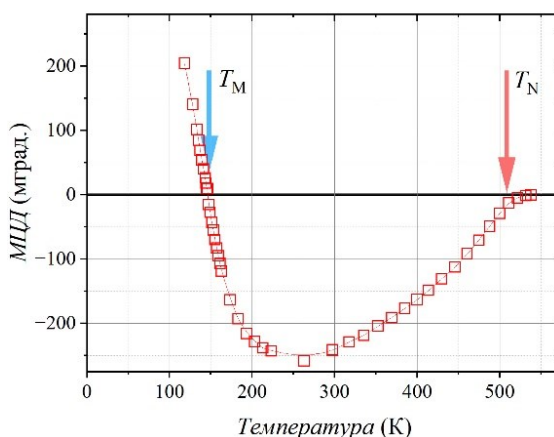


Рис. 2. Температурная зависимость магнитного циркулярного дихроизма МЦД слоя феррита-граната в гетероструктуре Bi:IG/GGG/SiO_2 , длина волны света $\lambda=450$ нм. Стрелками отмечены температура компенсации магнитного момента $T_M \sim 150$ К и температура Нееля $T_N \sim 500$ К ферритамагнетика.

Далее приведен анализ энергий диамагнитных переходов в гетероструктуре Bi:IG/GGG/SiO_2 при малой толщине слоя Bi:IG (рис. 3). Для

пленок с толщиной слоя Bi:IG 10 нм и менее происходит изменение энергии диамагнитных переходов, связанных с октаэдрической ($E = 2,8...3,2$ эВ) и тетраэдрической ($E = 2,45...2,8$ эВ) (рис. 3) подрешетками граната вблизи точки компенсации магнитного момента [A5].

В п. 3.3 для поликристаллических пленок Bi:IG, синтезированных ионно-лучевым распылением, продемонстрирована высокая однородность магнитооптических параметров (эффекта Фарадея, магнитного циркулярного дихроизма) и энергии диамагнитных переходов по толщине пленки при комнатной температуре, что подтверждает пригодность метода для формирования пленок большой площади. Далее описана методика регистрации магнитного циркулярного дихроизма с последующим восстановлением спектров эффекта Фарадея с использованием соотношения Крамерса-Кронига [A9]. Показана применимость такой методики для исследования магнитооптических свойств предельно тонких пленок, с толщиной вплоть до одного периода кристаллической решетки граната.

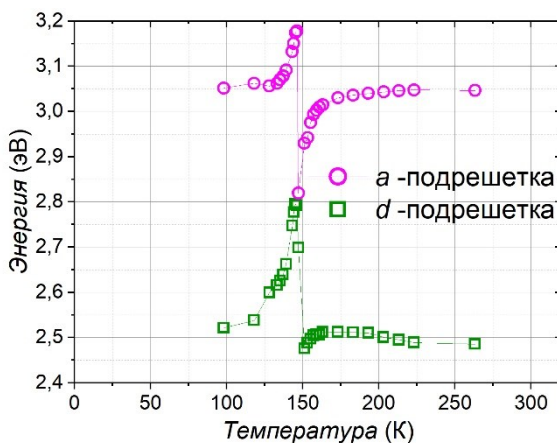


Рис. 3. Энергии диамагнитных переходов для слоя Bi:IG с $h \sim 10$ нм в зависимости от температуры. Маркеры: красные круги – данные для октаэдрической (a -), зеленые квадраты – для тетраэдрической (d -) подрешеток.

В четвертой главе приведены результаты исследования микроволновых свойств монокристаллических пленок BiTm:IG, в том числе легированных ионами Ga^{3+} и Gd^{3+} . В п. 4.1 представлены данные измерений статических магнитных параметров и микроволновых спектров на частоте

ФМР 9.53 ГГц, рассчитаны динамические параметры - параметр затухания Гильберта α и эффективное гиромагнитное отношение γ_{eff} . На основе ориентационных зависимостей ФМР проведена оценка вкладов кубической и одноосной компонент в анизотропию феррита-граната. В п. 4.2 представлены результаты исследований спектров ФМР пленки TmBiGdGa:IG в широком диапазоне температур, включающем точку компенсации углового момента, где эффективная величина гиромагнитного отношения испытывает экстремум (Рис. 4) [A1].

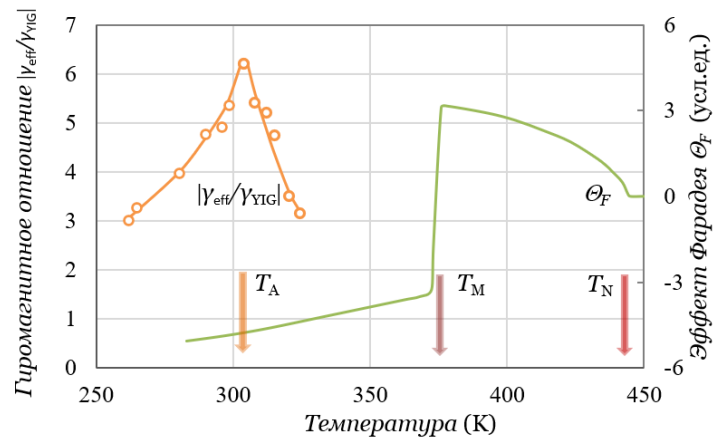


Рис. 4. Температурные зависимости относительного эффективного гиромагнитного отношения $\gamma_{\text{eff}}/\gamma_{\text{YIG}}$ для пленки TmBiGdGa:IG (относительно гиромагнитного соотношения для железо-иттриевого граната YIG, оранжевые маркеры) и эффекта Фарадея θ_F (зеленая кривая). Отмечены температуры компенсации углового момента T_A , магнитного момента T_M и температура Нееля T_N феррита-граната.

Далее в п.п. 4.3, 4.4 исследования микроволновых свойств ферритов-гранатов сосредоточены на пленках состава TmBiGa:IG, не имеющих точек компенсации магнитного и углового моментов. Обнаружено значительное (до 5 раз) повышение эффективного гиромагнитного отношения в таких пленках. Для обеспечения условий расчета собственных частот однородного ФМР в пленках с высоким гиромагнитным отношением измерения спектров ФМР проведены в диапазоне частот до 40 ГГц. В частности, показано, что спектры описываются двумя лоренцианами (рис. 5а), с различающимся эффективным

гиромагнитным отношением, и характеризуются двумя величинами гиромагнитного отношения (рис. 5б) [А6].

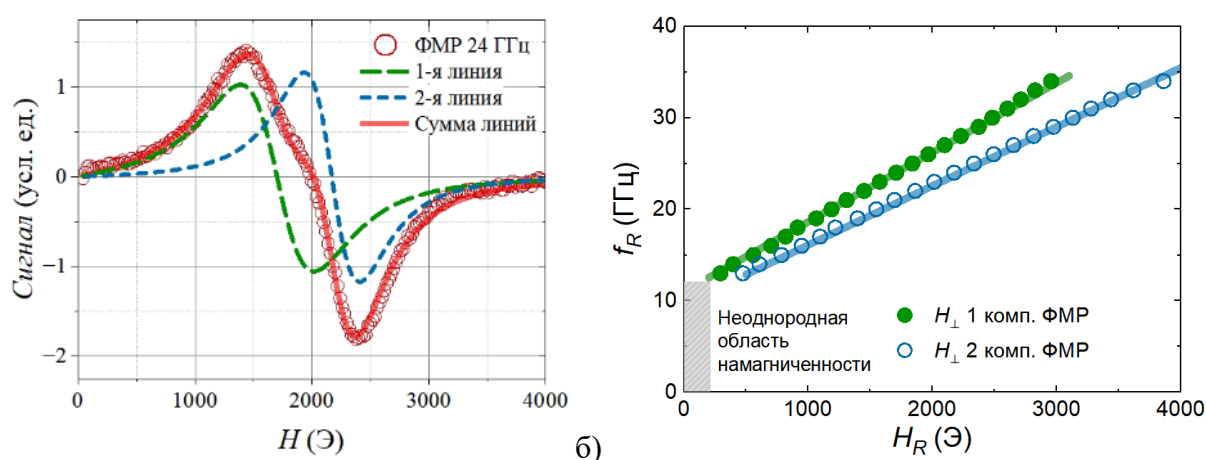


Рис. 5. а). Экспериментальный сигнал ФМР на частоте 24 ГГц в магнитном поле, приложенном перпендикулярно плоскости пленки (красные маркеры) и результаты аппроксимации сигнала ФМР двумя компонентами-лоренцианами (синяя линия – короткие штрихи и зеленая линия – длинные штрихи) и суммой двух компонентов (красная линия). б) Зависимость резонансной частоты ФМР f_R от резонансного поля H_R , приложенного перпендикулярно плоскости пленки (маркеры – кружочки). Данные основаны на представлении сигналов ФМР в виде двух компонентов-лоренцианов (см. рис. 5а). Для первого компонента сигнала ФМР данные показаны зеленым цветом и закрашенными маркерами, для второго – синим и открытыми маркерами. Серым цветом выделена область, соответствующая неоднородному состоянию намагниченности образца.

Для выяснения причин формирования двух магнитных подсистем проведено моделирование гиромагнитного отношения γ в ферримагнетике на основе формулы Киттеля и теории молекулярного поля. Показано, что экспериментально наблюдаемые компоненты сигнала ФМР с разными гиромагнитными отношениями $\gamma_{\text{eff1}}=7.6$ МГц/Э и $\gamma_{\text{eff2}}=6.46$ МГц/Э (рис. 5) обусловлены особенностями распределения ионов Ga^{3+} по объему феррита-граната, причем разница в распределении ионов между подрешетками граната

составляет всего $\sim 1\%$ (рис. 6) [A6]. Гиромагнитное отношение – ключевой параметр, определяющий скорость протекания процессов в спиновой системе магнетика, и полученные результаты имеют важное значение для значительного повышения быстродействия устройств спинтроники, создаваемых на базе ферримагнетиков. Уникальное сочетание высокой магнитооптической активности и динамических параметров ферритов-гранатов TmBiGa:IG придает перспективы для их применений в криогенных квантовых компьютерах и в спин-фотонных высокоскоростных системах хранения и обработки данных.

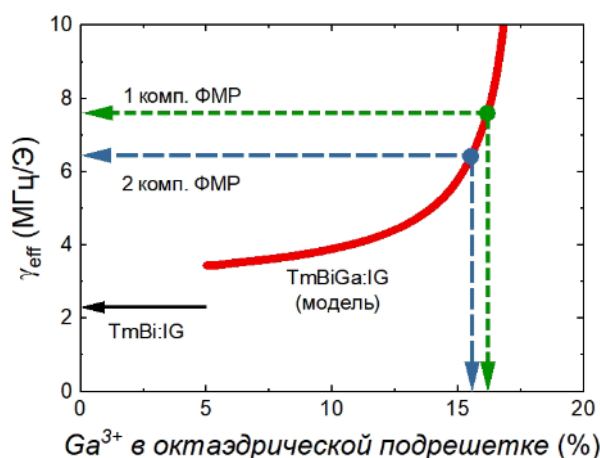


Рис. 6. Зависимость эффективного гиромагнитного отношения γ_{eff} феррита-граната состава TmBiGa:IG от вхождения ионов Ga^{3+} в октаэдрическую подрешетку (красная линия, расчет на основе теории молекулярного поля и формулы Киттеля). Пунктирными линиями синего и зеленого цветов показаны экспериментальные данные гиромагнитного отношения для двух компонентов сигнала ФМР (см. рис. 5) и соответствующие ожидаемые концентрации ионов Ga^{3+} в октаэдрической подрешетке граната. Черной стрелкой показана экспериментально измеренная величина гиромагнитного отношения для феррита-граната TmBi:IG [9].

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Показано, что при исследовании магнитооптических свойств пленок Bi:IG предельно малых толщин, сравнимых с периодом кристаллической решетки граната, эффективна методика регистрации спектров магнитного циркулярного дихроизма с последующим восстановлением спектров эффекта

Фарадея путем моделирования с использованием соотношения Крамерса-Кронига.

2. В поликристаллических пленках ферритов-гранатов с высоким содержанием висмута при изменении толщин в диапазоне от 300 нм и вплоть до одного периода кристаллической решетки граната энергии диамагнитных переходов при комнатной температуре изменяются незначительно, не более чем на 0,07 эВ.

3. В гетероструктуре Bi:IG/GGG/SiO₂ обнаружен интерфейсный слой Bi:IG/GGG с эффективной толщиной до 10 нм. Показано, что интерфейсный слой возникает из-за диффузии ионов Gd³⁺ и Ga³⁺ из слоя GGG, что приводит к снижению температуры Нееля и возникновению точки компенсации магнитного момента в слоях Bi:IG толщиной менее 10 нм. Появление точки компенсации в наноразмерных пленках Bi:IG из-за диффузии ионов на интерфейсе Bi:IG/GGG подчеркивает необходимость учета интерфейсных эффектов в тонких и предельно тонких пленках.

4. Исследованы особенности диамагнитных переходов, обусловленных вхождением ионов Fe³⁺ в различные подрешетки феррита-граната. Обнаружено скачкообразное изменение энергии диамагнитных переходов в окрестности точки компенсации магнитного момента ферримагнетика.

5. Экспериментально продемонстрировано, что в ферритах-гранатах TmBiGa:IG замещение ионов Fe³⁺ ионами Ga³⁺ на уровне 1.6-2.2 формульных единиц приводит к значительному, в 3-5 раз увеличению эффективного гиромангнитного отношения.

6. Возможность достижения высокого гиромангнитного отношения в ферримагнетиках, не имеющих точек компенсации магнитного и углового моментов, впервые обнаружена экспериментально и подтверждена теоретически.

7. Моделирование температурных зависимостей намагниченности и гиромангнитного отношения феррита-граната TmBiGa:IG на базе теории молекулярного поля и формулы Киттеля с учетом распределения ионов галлия в октаэдрической и тетраэдрической подрешетках показало хорошее согласие с экспериментальными результатами.

Список публикаций автора, соответствующий требованиям ВАК

- A1. Logunov M.V., Safonov S.S., Fedorov A.S., Danilova A.A., Moiseev N.V., Safin A.R., Nikitov S.A., Kirilyuk A. Domain Wall Motion Across Magnetic and Spin Compensation Points in Magnetic Garnets // Physical Review Applied. - 2021. - Vol. 15. - No. 6. - P. 064024.
- A2. Федоров А.С., Демидов В.В., Никитов С.А., Логунов М.В. Регистрация и анализ ориентационных зависимостей ферромагнитного резонанса // Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии. - 2025. - Т.17. - № 4. - С. 403-408.
- A3. Снегирёв Н.И., Куликов А.Г., Любутин И.С., Федорова А.А., Федоров А.С., Логунов М.В., Ягунов С.В., Стругацкий М.Б. Эволюция магнитной доменной структуры в монокристаллах бората железа FeBO_3 во внешних полях по данным рентгенодифракционных и магнитооптических исследований // Кристаллография. - 2025. - Т. 70. - № 4. - С. 643-649.
- A4. Суслов Д.А., Коледов В.В., Пойманов В.Д., Ветошко П.М., Щеглов В.И., Колесов К.А., Маширов А.В., Федоров А.С., Логунов М.В., Шавров В.Г. Фазовые диаграммы редкоземельных ферритов-гранатов с точкой компенсации в области взаимодействия фазовых переходов // Челябинский физико-математический журнал. - 2025. - Т. 10. - № 2. - С. 354-365.
- A5. Федоров А.С., Никитов С.А., Логунов М.В. Магнитооптические свойства гетероструктуры BiIG/GGG/SiO_2 в окрестности точки компенсации магнитного момента // Радиотехника и электроника. - 2025. - Т. 70 - № 7. - С. 695-699.
- A6. Федоров А.С., Демидов В.В., Логунов М.В. Высокое гиромангнитное отношение в тулий-содержащих ферритах-гранатах // Письма в ЖЭТФ. - 2025. - Т. 122. - № 8. - С. 507-512.
- A7. Федоров А.С., Митрофанова А.Ю., Логунов М.В. Программа расчета намагниченности многоподрешеточных ферримагнетиков с WEB-

интерфейсом // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2024619961. - 2024.

- A8. Федоров А.С., Демидов В.В., Логунов М.В. Программа управления вращением гониометра в спектрометре с помощью шагового двигателя // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2025664895. - 2025.

Дополнительные публикации автора

- A9. Fedorov A.S., Fedorova A.A., Safonov S.S., Kotov V.A., Nikitov S.A., Stognii A., Logunov M.V. Magnetic circular dichroism and Faraday effect of Bi-containing nanometer-thick garnet films // International Conference «Functional Materials» ICFM-2021 Book Of Abstracts. P. 191 (2021). eLIBRARY ID: 46686364
- A10. Вилков Е.А., Сафонов С.С., Темирязов А.Г., Федоров А.С., Федорова А. А., Логунов М.В. Исследование свойств магнитооптических пленок и пленочных наноструктур для интегрально-оптических невзаимных устройств межсоединений верхнего уровня УБИС // Вестник РФФИ. - 2023. - Том 2. - №. 118. – С.141-151.
- A11. Никитов С.А., Логунов М.В., Сафонов С.С., Федоров А.С., Сафин А.Р. Терагерцовая спин-фотоника и магноники: Коллективная монография. - Российская академия наук. - Москва, 2023. – С. 110-151.
- A12. Федоров А.С., Демидов В.В., Федорова А.А., Сафонов С.С., Никитов С.А., Логунов М.В. Ферромагнитный резонанс в тулий-замещенных ферритах-гранатах. Нанопизика и наноэлектроника // Труды XXVIII Международного симпозиума (Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 г.). 388–389 с. ISBN: 978-5-8048-0123-7
- A13. Павлов М.С., Федоров А.С., Сафонов С.С., Федорова А.А., Никитов С.А., Логунов М.В. Диамагнитные переходы и спектры магнитного циркулярного дихроизма пленок ферритов-гранатов с высоким содержанием висмута // Труды 66-й Всероссийской научной конференции

МФТИ 1-6 апреля 2024 г Электроника, фотоника и молекулярная физика.
- М: Физматкнига, 2024. - С. 124. ISBN978-5-89155-413-9

Список литературы

1. Никитов С.А., Сафин А.Р., Калябин Д.В., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Логунов М.В., Морозова М.А., Одинцов С.А., Осокин С.А., Шараевская А.Ю., Шараевский Ю.П., Кирилюк А.И. Диэлектрическая магноника - от гигагерцев к терагерцам // Успехи физических наук. - 2020. - Т. 190. - № 10. - С. 1009-1040.
2. Aparnadevi N., Saravana Kumar K., Manikandan M., Santhosh Kumar B., Stella Punitha J., Venkateswaran C. Structural properties, optical, electrical and magnetic behavior of bismuth doped $Gd_3Fe_5O_{12}$ prototype garnet // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. - 2020. - Vol. 31. - No. 3. - P. 2081-2088.
3. Pintus P., Ranzani L., Pinna S., Huang D., Gustafsson M.V., Karinou F., Casula G.A., Shoji Y., Takamura Y., Mizumoto T., Soltani M., Bowers J.E. An integrated magneto-optic modulator for cryogenic applications // Nature Electronics. - 2022. - Vol. 5. - No. 9. - P. 604-610.
4. Pyatakov A., Kaminskiy A., Lomov E., Ren W., Cao S., Zvezdin A. Routes to Low-Energy Magnetic Electronics // SPIN. - 2019. - Vol. 09. - No. 02. - P. 1940004.
5. Berzhansky V., Mikhailova T., Shaposhnikov A., Prokopov A., Karavainikov A., Kotov V., Balabanov D., Burkov V. Magneto-optics of nanoscale Bi:YIG films // Applied Optics. - 2013. - Vol. 52. - No. 26. - P. 6599.
6. Zhang Y., Feng X., Zheng Z., Zhang Z., Lin K., Sun X., Wang G., Wang J., Wei J., Vallobra P., He Y., Wang Z., Chen L., Zhang K., Xu Y., Zhao W. Ferrimagnets for spintronic devices: From materials to applications // Applied Physics Reviews. - 2023. - Vol. 10. - Ferrimagnets for spintronic devices. - No. 1. - P. 011301.

7. Popova E., Shengelaya A., Daraselia D., Japaridze D., Cherifi-Hertel S., Bocher L., Gloter A., Stéphan O., Dumont Y., Keller N. Bismuth iron garnet $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$: A room temperature magnetoelectric material // *Applied Physics Letters*. - 2017. - Vol. 110. - No. 14. - P. 142404.
8. Blank T.G.H., Grishunin K.A., Mashkovich E.A., Logunov M.V., Zvezdin A.K., Kimel A.V. THz-Scale Field-Induced Spin Dynamics in Ferrimagnetic Iron Garnets // *Physical Review Letters*. - 2021. - Vol. 127. - No. 3. - P. 037203.
9. Zhang X., Jin L., Zhang D., Liu B., Meng H., Zhang L., Zhong Z., Tang X. Strong Perpendicular Anisotropy and Anisotropic Landé Factor in Bismuth-Doped Thulium Garnet Thin Films // *Frontiers in Materials*. - 2022. - Vol. 9. - P. 879711.
10. Zhang T., Yang Y., Wu D., Wang J., Wei Z., Yan W., Bi L. Silicon integrated $\text{Bi}_2\text{TbFe}_5\text{O}_{12}$ thin films for O-band nonreciprocal photonic device applications // *Optical Materials Express*. - 2024. - Vol. 14. - No. 3. - P. 767.
11. Omar G.J., Gargiani P., Valvidares M., Lim Z.S., Prakash S., Suraj T.S., Ghosh A., Lim S.T., Lourembam J., Ariando A. Room Temperature Strong Orbital Moments in Perpendicularly Magnetized Magnetic Insulator // *Advanced Functional Materials*. - 2025. - Vol. 35. - No. 4. - P. 2414188.
12. Gilleo M.A. Ferromagnetic insulators: Garnets // *Handbook of Ferromagnetic Materials*. - Elsevier, 1980. - Vol. 2. - P. 1-53.
13. Ignatyeva D.O., Karki D., Voronov A.A., Kozhaev M.A., Krichevsky D.M., Chernov A.I., Levy M., Belotelov V.I. All-dielectric magnetic metasurface for advanced light control in dual polarizations combined with high-Q resonances // *Nature Communications*. - 2020. - Vol. 11. - No. 1. - P. 5487.
14. Ahmed A.S., Lee A.J., Bagués N., McCullian B.A., Thabt A.M.A., Perrine A., Wu P.-K., Rowland J.R., Randeria M., Hammel P.C., McComb D.W., Yang F. Spin-Hall Topological Hall Effect in Highly Tunable Pt/Ferrimagnetic-Insulator Bilayers // *Nano Letters*. - 2019. - Vol. 19. - No. 8. - P. 5683-5688.
15. Vélez S., Schaab J., Wörnle M.S., Müller M., Gradauskaite E., Welter P., Gutgsell C., Nistor C., Degen C.L., Trassin M., Fiebig M., Gambardella P. High-

- speed domain wall racetracks in a magnetic insulator // Nature Communications. - 2019. - Vol. 10. - No. 1. - P. 4750.
16. Tang C., Sellappan P., Liu Y., Xu Y., Garay J.E., Shi J. Anomalous Hall hysteresis in $\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$ with strain-induced perpendicular magnetic anisotropy // Physical Review B. - 2016. - Vol. 94. - No. 14. - P. 140403.
 17. Lee A.J., Guo S., Flores J., Wang B., Bagués N., McComb D.W., Yang F. Investigation of the Role of Rare-Earth Elements in Spin-Hall Topological Hall Effect in Pt/Ferrimagnetic-Garnet Bilayers // Nano Letters. - 2020. - Vol. 20. - No. 6. - P. 4667-4672.
 18. Caretta L., Rosenberg E., Büttner F., Fakhrul T., Gargiani P., Valvidares M., Chen Z., Reddy P., Muller D.A., Ross C.A., Beach G.S.D. Interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction arising from rare-earth orbital magnetism in insulating magnetic oxides // Nature Communications. - 2020. - Vol. 11. - No. 1. - P. 1090.
 19. Avci C.O., Rosenberg E., Baumgartner M., Beran L., Quindeau A., Gambardella P., Ross C.A., Beach G.S.D. Fast switching and signature of efficient domain wall motion driven by spin-orbit torques in a perpendicular anisotropy magnetic insulator/Pt bilayer // Applied Physics Letters. - 2017. - Vol. 111. - No. 7. - P. 072406.
 20. Avci C.O., Rosenberg E., Caretta L., Büttner F., Mann M., Marcus C., Bono D., Ross C.A., Beach G.S.D. Interface-driven chiral magnetism and current-driven domain walls in insulating magnetic garnets // Nature Nanotechnology. - 2019. - Vol. 14. - No. 6. - P. 561-566.