

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор ФГБОУ ВО

«МИРЭА — Российский
технологический университет»

д.х.н., проф. Прокопов Н. И.



«27» октября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет» на диссертационную работу Федорова Андрея Сергеевича

«Магнитооптические и микроволновые свойства пленок и гетероструктур на основе висмут- и тулий-замещенных ферритов со структурой граната»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния»

Актуальность диссертационной работы

Висмут-замещенные ферриты-гранаты (Bi:IG) обладают повышенной магнитооптической добротностью, что делает их перспективными для оптических модуляторов, изоляторов, устройств хранения информации в интегральной оптики и спин-фотоники. Тулий-замещенные ферриты-гранаты (Tm:IG) интересны возможностью возбуждения когерентных колебаний намагниченности в терагерцовом диапазоне, значительной одноосной анизотропией в нанометровых плёнках и исследованием топологических эффектов, включая скирмионы. Высокое кристаллическое качество снижает плотность дефектов и энергетические барьеры для доменных границ и спиновых текстур. Перпендикулярная магнитная анизотропия в сочетании с взаимодействием Дзялошинского-Мория в гетероструктурах с тяжёлыми металлами способствует формированию и динамике скирмионов и доменных границ.

Висмут- и тулий-замещенные 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. Объединение свойств Bi - и Tm -замещенных ферритов-гранатов в одном материале (TmBi:IG) может продемонстрировать проявление действительно уникальных сочетаний магнитооптических и динамических свойств, что подтверждает **актуальность** исследования.

Кандидатская диссертация А.С. Федорова посвящена исследованию магнитооптических и микроволновых свойств пленок и гетероструктур на основе висмут- и тулий-замещенных ферритов со структурой граната. В работе проведен комплексный анализ этих свойств с целью выявления потенциала данных материалов для применения в устройствах спинтроники и спин-фотоники. Особое внимание уделено изучению влияния введения в феррит-гранат ионов висмута, тулия и галлия на физические характеристики ферритов, а также разработке методов исследования предельно тонких пленок.

Структура и содержание диссертации

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 ферромагнетиков. 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 спектров эффекта Фарадея, и магнитного циркулярного дихроизма исследуемых пленок ферритов-гранатов и других прозрачных магнетиков, например, FeVO_3 , 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. 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 пленок и методики расчета намагниченности ферритов-гранатов.

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. Показано, что энергии переходов в поликристаллических пленках ниже, чем для монокристаллических, что связано с различным вхождением ионов Bi в кристаллическую структуру феррита-граната. П. 3.2 посвящен исследованию гетероструктур Bi:IG/GGG/SiO₂. Показано, что при толщинах слоя Bi:IG менее 10 нм имеет место существенная диффузия ионов Ga³⁺ и Gd³⁺ из слоя GGG в слой Bi:IG. Это приводит к возникновению точки компенсации магнитного момента и снижению температуры Нееля слоя Bi:IG. Далее приведен анализ энергий диамагнитных переходов в гетероструктуре Bi:IG/GGG/SiO₂ при малой толщине слоя Bi:IG. Для пленок с толщиной слоя Bi:IG 10 нм и менее происходит изменение энергии диамагнитных переходов, связанных с октаэдрической ($E = 2.8\text{--}3.2$ эВ) и тетраэдрической ($E = 2.45\text{--}2.8$ эВ) подрешетками граната вблизи точки компенсации магнитного момента.

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. Показана применимость такой методики для исследования магнитооптических свойств предельно тонких пленок, с толщиной вплоть до одного периода кристаллической решетки граната.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования микроволновых свойств монокристаллических пленок BiTm:IG, в том числе легированных ионами Ga³⁺ и Gd³⁺. 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 BiTmGdGa:IG в широком диапазоне температур, включающем точку компенсации углового момента, где эффективная величина гиромагнитного отношения испытывает экстремум. Далее в п.п. 4.3, 4.4 исследования микроволновых свойств ферритов-гранатов сосредоточены на пленках состава BiTmGa: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 с различающимся эффективным гиромагнитным отношением, и характеризуются двумя величинами гиромагнитного отношения.

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 обусловлены особенностями распределения ионов Ga^{3+} по объему феррита-граната, причем разница в распределении ионов между подрешетками граната составляет всего ~1%. 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. Отдельно отметим уникальное сочетание высокой магнитооптической активности и динамических параметров ферритов-гранатов TmBiGa:IG , что придает перспективы для их применений в криогенных квантовых компьютерах и в спин-фотонных высокоскоростных системах хранения и обработки данных.

В заключительном разделе представлены основные результаты диссертационной работы и выводы.

Научная новизна представленной диссертационной работы заключается в том, что:

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/SiO₂ при толщинах слоя Bi:IG менее 10 нм имеет место существенная диффузия ионов Ga³⁺ и Gd³⁺ 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 Bi³⁺ в додекаэдрической подрешетке граната и ионов Fe³⁺ в октаэдрической и тетраэдрической подрешетках в широком диапазоне температур. Выявлены вклады магнитных подрешеток ферритмагнетика 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 гиромангнитного отношения в монокристаллических пленках тулий-содержащих ферритов-гранатов в 3-5 раз путем вариации замещения ионов Fe³⁺ в подрешетках граната при отсутствии точек магнитной и угловой компенсации ферритмагнетика.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертации обеспечивается использованием оптимальных режимов работы экспериментальных установок, использованием апробированных экспериментальных методик и применением современной приборной базы. Представленные положения и выводы не противоречат современным представлениям в предметной области исследования и соотносятся с литературными данными. Достоверность и обоснованность результатов подтверждается их апробацией на международных и всероссийских научных мероприятиях и в ведущих рецензируемых научных изданиях.

Публикации по результатам диссертационной работы

Результаты докладывались на российских и международных конференциях, а основные результаты диссертации опубликованы в 13 научных работах.

Практическая значимость работы

Результаты диссертации могут быть рекомендованы для ознакомления использованы в научных образовательных организациях, где осуществляются экспериментальные и теоретические исследования магнитоупорядоченных материалов и гетероструктур структур, например, ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова» (г. Москва),

ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург), ФГБОУ ВО МИРЭА – РТУ (г. Москва), ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), РКЦ (г. Москва), ИОФ им. А.М. Прохорова РАН (г. Москва), ИФМ РАН (г. Нижний Новгород), ИФТТ РАН (г. Черноголовка), НИУ ИТМО (г. Санкт-Петербург), НИТУ «МИСиС» (г. Москва), Саратовский НИУ им. Н.Г. Чернышевского (г. Саратов), ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» (г. Симферополь), ФГБОУ ВО «БашГУ» (г. Уфа) и других научно-исследовательских учреждениях

Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 2 и 4 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления»; «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности»; «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ» паспорта специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Замечания по диссертационной работе.

1. В представленной работе расчет температурных зависимостей намагниченности многоподрешеточных ферритов-гранатов выполнен на базе теории молекулярного поля с использованием программного обеспечения диссертанта. Вместе с тем, в диссертации отсутствует сравнительный анализ результатов, полученных с помощью разработанной программы, с данными, получаемыми при использовании альтернативных методов численного моделирования магнитных свойств и общедоступных программных комплексов.

2. В работе отмечено, что для регистрации ориентационных зависимостей ферромагнитного резонанса была разработана методика, предусматривающая модификацию штатного гониометра спектрометра Bruker ER-200 путем оснащения его шаговым двигателем с микроконтроллером и драйвером для автоматизации процесса вращения образца. Однако детальное описание разработанной методики отсутствует: не приведены технические параметры используемого шагового двигателя (разрешение шага, точность позиционирования, диапазон рабочих углов), характеристики системы управления. Кроме того, не проведено сравнение предложенной модификации с

существующими коммерческими системами автоматизированного позиционирования для ФМР измерений, что затрудняет оценку технических преимуществ, воспроизводимости и универсальности разработанного решения по сравнению с известными аналогами.

3. В работе установлено, что в структуре Bi:IG/GGG/SiO₂ происходит диффузия ионов галлия (Ga³⁺) и гадолиния (Gd³⁺) из буферного слоя GGG в объем пленки Bi:IG, что приводит к изменению магнитных и магнитооптических свойств приграничного слоя. Однако в диссертации не раскрыт в явном виде физический механизм наблюдаемой диффузии, не обсуждается природа диффузионных процессов

4. В диссертации не приведен расчет удельной величины эффекта Фарадея для исследуемых структур. Отсутствие количественных значений удельного вращения эффекта Фарадея для синтезированных пленок Bi:IG различных толщин и составов не позволяет в полной мере оценить качество синтезированных структур.

5. В названии диссертационной работы указано, что были исследованы микроволновые свойства плёнок. В тоже время среди положений, выносимых на защиту, результаты этих исследований в явном виде не фигурируют, что является не совсем корректным.

Отмеченные недостатки при этом не влияют на общее качество диссертации. Диссертационная работа А.С. Федорова представляет собой экспериментальное и теоретическое исследование, проведенное на высоком научном уровне. Работа обладает значительной научной и практической значимостью.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации и соответствует требованиям, предусмотренным п.25 «Положения о присуждении ученых степеней».

Заключение

Диссертационная работа Федорова А.С. выполнена на высоком уровне и представляет собой завершённый научный труд, результаты которого обладают новизной и существенной практической значимостью.

Автореферат диссертации в полном объеме отражает ее материал. Научные положения и выводы изложены корректно, лаконично и соответствуют содержанию исследования.

Считаем, что диссертационная работа Федорова Андрея Сергеевича на тему «Магнитооптические и микроволновые свойства пленок и гетероструктур на основе висмут- и тулий-замещенных ферритов со структурой граната», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния, является завершённой научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, имеющие значение для развития физики

конденсированного состояния. По своей актуальности, научному уровню, новизне и практической значимости диссертация Федорова А.С. удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Федоров Андрей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Отзыв заслушан и обсужден на заседании научного семинара ФКС № 203 от 23 октября 2025 г. кафедры нанoeлектроники (протокол №10).

Сведения о ведущей организации:

Полное наименование: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Сокращенное наименование: РТУ МИРЭА.

Почтовый адрес: 119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78

Телефон: +7 (499) 215-65-65, доб. 1140.

Адрес электронной почты: mirea@mirea.ru

Отзыв составили:

Заместитель заведующего кафедрой нанoeлектроники РТУ МИРЭА, доктор физико-математических наук, профессор, специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»
тел: 8(916)9141393

e-mail: yurasov@mirea.ru



А.Н. Юрасов

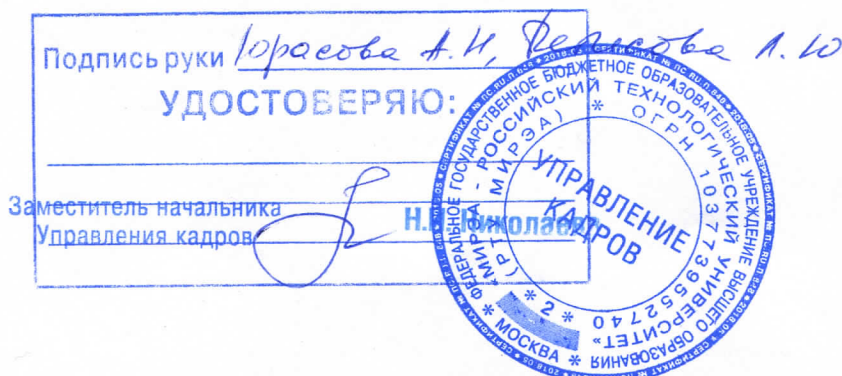
Заместитель заведующего кафедрой нанoeлектроники РТУ МИРЭА, доктор физико-математических наук, доцент, специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»
тел: 8(916)1287383

e-mail: fetisovl@yandex.ru



Л.Ю. Фетисов

Подписи сотрудников РТУ МИРЭА А.Н. Юрасова и Л.Ю. Фетисова заверяю



**Список избранных научных трудов работников организации по специальности
диссертации за последние 5 лет**

1. V.V. Kuts, A. V. Turutin, I.V. Kubasov, A.A. Temirov, A. M. Kislyuk, E. E. Maksumova, F. A. Fedulov, Y. K. Fetisov, M. D. Malinkovich, Y. N. Parkhomenko. Features of 2D mapping technique of Non-Uniform magnetic fields using Self-Biased Magnetoelectric composites based on “bidomain LiNbO₃/Ni/Metglas” structures, *Measurements*, 2025, 242, 115932 ,
2. N. V. Mitetelo, M. A. Stepanov, A. A. Guskov, S. D. Lavrov, A. P. Pyatakov, E. D. Mishina. Nonlinear optical microscopy for magnetic domain imaging in (210)-Oriented iron garnet film. *Optical Materials* 169, 117537 (2026).
3. D V Savelev, V I Musatov, F A Fedulov, L Y Fetisov, D A Burdin, Y A Alekhina, D V Chashin, E S Shakhurin and Y K Fetisov Magnetoelectric effects in a heterostructure of magnetostrictive fiber composite and piezopolymer film. *Smart Mater. Struct.* 2025, 34, 015030. Q1
4. М.А. Симдянова, Е.А. Ганышина, И.М. Припеченков, С.Н. Николаев, И.В. Быков, А.В. Дорофеев, А.Л. Васильев, А.В. Ситников, В.В. Рыльков, А.Н. Юрасов, А.Б. Грановский. Магнитооптическая спектроскопия мемристорных нанокompозитных пленок CoFeB-LiNbO₃. *ЖЭТФ* 168, 382-389 (2025).
5. V.I. Musatov, D.V. Savelev, F.A. Fedulov, L.Y. Fetisov, Y.K. Fetisov, Magnetoelectric effect in a ring-type ferromagnetic-piezoelectric composite heterostructure for different magnetization field directions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2025, 383, 116218. Q1
6. V. Bilyk, E. Mishina, T. Rasing, A. Kimel. Terahertz-induced second harmonic generation dynamics in antiferromagnetic Cr₂O₃. *Phys. Rev. B* 110, 174449 (2024).
7. Е.А. Ганышина, В.В. Гаршин, Н.Н. Перова, И.М. Припеченков, А.Н. Юрасов, М.М. Яшин, В.В. Рыльков, А.Б. Грановский. Магнитооптическая керр-спектроскопия нанокompозитов. *ЖЭТФ*, 164, 662–672 (2023).
8. E. Bolotina, D. Savelev, L. Fetisov, A. Turutin, I. Kubasov, A. Temirov, V. Kuts, Y. Qi , P. Zhou, A. Klimov, Y. Fetisov, Temperature characteristics of magnetoelectric effect in a monolithic langatate-metglas heterostructure: the effect of annealing, *J. Mater. Science and Technol. Res.*, 2025, v. 12. p. 1-7.
9. Y.K. Fetisov, D.V. Chashin, F.A. Fedulov, Magnetoelectric effect in a planar ring metglas – langatate heterostructure, *J. Phys D Appl. Phys.*, 2024, v. 57, p. 30LT01. Q1
10. L.Y. Fetisov, D.V. Savelev, L.A. Makarova, N.S. Perov, Y.J. Qi, P. Zhou, Y.K. Fetisov. Dynamics of resonant magnetoelectric effect in a magnetoactive elastomer based cantilever: magnetic field induced orientation transition and giant frequency tuning, *J. Mag. Magn. Mater*, 2024, v. 605, p. 172330. Q2
11. D.V. Savelev, F.A. Fedulov, V.I. Musatov, D. A. Burdin, E.V. Bolotina, L.Y. Fetisov, Y.K. Fetisov, Nonlinear resonant magnetoelectric effect in a circumferentially magnetized ferromagnetic-piezoelectric ring heterostructure, *App. Phys.Lett.*, 2023, Appl. Phys. Lett. 122, 192902 (2023) Q1
12. D.A. Burdin, D.V. Chashin, N.A. Ekonomov, L.Y. Fetisov, V.L. Preobrazhensky, Y.K. Fetisov, Low-frequency resonance magnetoelectric effects in layered heterostructures antiferromagnet-piezoelectric, *Sensors* 2023, 23(13), 5901 Q1