

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Садовникова Александра Владимировича

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 специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Стремительное развитие информационных технологий ставит задачи по увеличению объемов хранения данных, ускорению их обработки и снижению энергопотребления. Перспективными направлениями физики, нацеленными на решение этих проблем, являются спинтроника и спин-фотоника. Данные области используют магнитную динамику и свойства спина электрона, предлагая новые подходы к обработке, хранению и передаче информации. В то время как спинтроника управляет магнитными моментами с помощью токов и сигналов, спин-фотоника объединяет управление магнитными свойствами с методами фотоники, делая акцент на диэлектрических материалах, что открывает перспективы для создания энергоэффективных и высокоскоростных устройств.

Ключевыми материалами для диэлектрической спинтроники и спин-фотоники служат ферриты со структурой граната. Изменение их состава может кардинально влиять на их свойства, что позволяет адаптировать параметры материалов под конкретные практические задачи. Особый интерес вызывают висмут- и тулий-замещенные ферриты-гранаты, которые обладают уникальными магнитными и магнитооптическими свойствами.

Кандидатская диссертация А.С. Федорова представляет собой комплексное исследование магнитооптических и микроволновых свойств тонких пленок и гетероструктур на основе тулий- и висмут-замещенных ферритов-гранатов. Работа направлена на оценку потенциала этих материалов для их дальнейшего применения в устройствах спинтроники и спин-фотоники. Ключевое внимание в исследовании уделяется анализу влияния ионов висмута, тулия и галлия на физические характеристики ферритов, а также развитию методик для изучения их свойств.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы.

Первая глава посвящена теоретическому анализу структурных и физических свойств ферритов-гранатов. Рассмотрена кристаллическая структура материалов, основы теории молекулярного поля для моделирования свойств ферритов-гранатов с редкоземельными ионами (включая тулий), а также особенности антиферромагнитного взаимодействия между подрешетками. Проанализированы магнитооптические свойства и влияние ионов висмута на их усиление. Описаны динамические характеристики ферритов-гранатов, методы их исследования

(ферромагнитный резонанс, ФМР), и теоретические основы, включая уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта и формулу Киттеля, с акцентом на константу затухания и гиромагнитное отношение. Завершается глава обзором существующих магнитооптических и микроволновых устройств на основе ферритов-гранатов.

Во **второй главе** описаны экспериментальные методики и оборудование, использованные в работе. Представлены методы измерения эффекта Фарадея и магнитного циркулярного дихроизма (МЦД). Спектрометр циркулярного дихроизма был модифицирован для проведения измерений в широком диапазоне температур (90–500 К), а также регистрации именно магнитооптических свойств был разработан и интегрирован в спектрометр электромагнит. Описаны методы регистрации спектров ФМР с использованием объемного резонатора (9.5 ГГц) и микрополосковой линии (до 40 ГГц). Спектрометр Bruker ER-200 был модернизирован для повышения точности измерений ориентационных (угловых зависимостей ФМР). Рассмотрены методы термического отжига для коррекции параметров пленок и химического травления для изменения их толщины. Приведены данные рентгеноструктурного анализа и методики расчета намагниченности.

В **третьей главе** приведены результаты магнитооптических исследований. Проанализированы спектры эффекта Фарадея и МЦД в диапазоне 1.5–4.0 эВ при температурах 90–450 К. Установлено, что энергии диамагнитных переходов в поликристаллических пленках ниже, чем в монокристаллических, из-за различий во вхождении ионов Bi^{3+} . В тонких (менее 10 нм) пленках Bi:IG обнаружена существенная диффузия ионов Ga^{3+} и Gd^{3+} из интерфейсного слоя GGG в гетероструктуре Bi:IG/GGG/SiO_2 . Это приводит к возникновению точки компенсации магнитного момента и скачкообразному изменению энергий диамагнитных переходов вблизи этой точки в октаэдрической и тетраэдрических подрешетках. Для пленок, синтезированных ионно-лучевым распылением, показана высокая однородность параметров при комнатной температуре. Разработана и апробирована методика восстановления спектров эффекта Фарадея из данных МЦД с помощью соотношения Крамерса-Кронига, что позволяет исследовать пленки толщиной вплоть до одного периода кристаллической решетки.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования динамических свойств пленок. Проведены измерения статических и динамических параметров, включая параметр затухания Гильберта (α) и эффективное гиромагнитное отношение (γ_{eff}). Оценены вклады в магнитную анизотропию. В пленке TmBiGdGa:IG исследованы спектры ФМР вблизи точки компенсации углового момента, где гиромагнитное отношение достигает экстремума. В пленках состава TmBiGa:IG , не имеющих точек компенсации, обнаружено значительное (до 5 раз) увеличение γ_{eff} . Измерения на частотах до 40 ГГц показали, что спектры ФМР состоят из двух компонент с разными гиромагнитными отношениями. Показано, что наличие двух

магнитных подсистем обусловлено незначительной ($\sim 1\%$) неоднородностью в распределении ионов Ga^{3+} по подрешеткам граната.

Полученные результаты демонстрируют уникальное сочетание высокой магнитооптической активности и динамических параметров в пленках TmBiGa:IG , что открывает перспективы для их использования в повышении быстродействия устройств спинтроники, а также в таких областях, как криогенные квантовые вычисления и спин-фотонные системы.

В работе получен ряд новых результатов. Из числа этих результатов можно выделить следующие, определяющие научную новизну работы:

1. Продемонстрирована методика получения магнитооптических спектров сверхтонких пленок ферритов-гранатов (с толщиной, сопоставимой с одним периодом кристаллической решетки), реализуемая в два этапа: измерение спектров магнитного циркулярного дихроизма с последующим расчетом спектров эффекта Фарадея для данных пленок на основе соотношения Крамерса-Кронига.

2. Установлено, что в гетероструктуре Bi:IG/GGG/SiO_2 при уменьшении толщины слоя Bi:IG до 10 нм и менее наблюдается значительная диффузия ионов Ga^{3+} и Gd^{3+} из буферного слоя GGG в пленку Bi:IG , что приводит к возникновению точки компенсации магнитного момента в слое Bi:IG .

3. Проведено исследование температурной зависимости диамагнитных переходов в пленках ферритов-гранатов с высоким замещением ионами Bi^{3+} в додекаэдрических позициях. Определены вклады отдельных магнитных подрешеток ферримагнетика в магнитный циркулярный дихроизм. Зафиксировано скачкообразное изменение энергий диамагнитных переходов октаэдрической и тетраэдрической подрешетках на величину $\pm 0,2$ эВ при прохождении через точку компенсации магнитного момента.

4. Продемонстрирована возможность повышения эффективного гиромагнитного отношения в монокристаллических тулий-содержащих пленках ферритов-гранатов в 3-5 раз посредством замещения ионов Fe^{3+} немагнитными ионами Ga^{3+} в подрешетках феррита-граната. Данная особенность возникает в отсутствии точек магнитной и угловой компенсации в ферримагнетике.

Основное содержание работы соответствует требованиям специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Замечания:

- 1) В тексте диссертации наблюдается непоследовательность в оформлении численных данных: в различных разделах работы используются разные разделители десятичных частей (точка и запятая), что противоречит требованиям единообразия представления результатов измерений.

- 2) В разделе, посвященном обоснованию актуальности исследования, при рассмотрении влияния гиромагнитного отношения γ на скорость доменных границ не отражено, что, помимо γ , существенный вклад в динамику доменных стенок вносит параметр затухания α .

3) В п. 3.2 для оценки предполагаемого состава исследуемых образцов применялась теория молекулярного поля, однако для пленок рассматриваемых толщин данный подход является ориентировочным, поскольку в тонкопленочных структурах существенную роль интерфейсные взаимодействия, не учитываемые в рамках приближения молекулярного поля.

4) В работе обсуждается заметный скачок энергии диамагнитных переходов в спектрах МЦД при приближении к точке компенсации магнитного момента. Какова роль ионов Bi^{3+} в наблюдаемом изменении энергии оптических переходов в окрестности точки магнитной компенсации?

5) В работе в явном виде не раскрывается почему преимущественное замещение ионов железа галлием в тетраэдрической подрешётке приводит к наблюдаемому росту γ ? Является ли определяющим фактором неравномерное изменение намагниченностей железных подрешёток при их различном разбавлении немагнитными ионами?

Приведенные замечания и вопросы ничуть не умаляют ценность полученных результатов и их качество.

Подводя итог, диссертационная работа Федорова А.С. представляет собой законченное научное исследование, удовлетворяющее всем требованиям п.9. «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013 в действующей редакции, а ее автор Федоров Андрей Сергеевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук по специальностям 01.04.03 и 01.04.05, доцент, доцент кафедры физики открытых систем Саратовского национального исследовательского университета имени Н. Г. Чернышевского.



Александр Владимирович Садовников

«11» 11 2025 г.

Рабочий почтовый адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83
Тел. +7 903 386 8480, e-mail: sadovnikovav@gmail.com

