

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.01  
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
по диссертации  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 24.06.2021 № \_\_\_\_\_

О присуждении Павлову Сергею Игоревичу,  
гражданину Российской Федерации,  
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Резонансные оптические и магнитооптические эффекты в дифракционных структурах на основе магнетита» по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» принята к защите 22 апреля 2021 г., протокол №4, диссертационным советом ФТИ 34.01.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г. и Приказом Директора ФТИ от 19.01.2021 об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.01.

Соискатель Павлов Сергей Игоревич, 1987 г.р., в 2011 году окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлению подготовки «Техническая физика». В 2014 окончил обучение в аспирантуре Федерального бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по направлению 03.06.01 - физика и астрономия. Кандидатские экзамены по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» успешно сданы соискателем в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе. В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории диагностики материалов и структур твердотельной электроники - заместителя ученого секретаря Федерального бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории диагностики материалов и структур твердотельной электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Нащекин Алексей Викторович, старший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов и структур твердотельной электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе.  
Научный консультант – кандидат физико-математических наук Певцов Александр Борисович, старший научный сотрудник лаборатории физики аморфных полупроводников ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

1. Кричевцов Борис Борисович, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах ФТИ им. А.Ф. Иоффе дал положительный отзыв на диссертацию. Отзыв содержит 5 замечаний:

- В работе исследованы дифракционные структуры с периодом 600 нм для возбуждения резонансов в области минимума поглощения магнетита. Возможно ли получить большее усиление эффекта Керра или эффективность при изменении периода? Проводились ли такие расчеты?
- Термин “эффект Керра в пропускании”, в принципе, возможен, но вызывает некоторое отторжение, поскольку, согласно устоявшимся представлениям, магнитооптические эффекты Керра – это эффекты в отражении света. То, что имеется в виду – это эффект, предсказанный теоретически В.М. Маевским и Г.А. Болотиным в 1973 и обнаруженный в 1979 А.В. Дружниным, который можно описать, как нечетный поперечный магнитооптический эффект в прохождении.
- Представляется, что в списке литературы было бы уместно привести недавний обзор по наноструктурам на основе магнетита - X. Wang et al. A review of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> thin films: Synthesis, modification and applications. Journal of Materials Science & Technology, V. 34, 8, 2018, p. 1259-1272, 2018, а также дать ссылку на книгу А.К. Zvezdin, V.A. Kotov, Modern Magnetooptics and Magneto-optical Materials, 1997.
- Поскольку работа посвящена изучению магнитоупорядоченных пленок магнетита, было бы желательно уделить чуть больше внимания магнитным свойствам исследованных структур.

- В работе показано, что структурах с золотыми полосками величина эффекта Керра увеличивается более, чем на два порядка по сравнению со структурами без полосок. Для убедительности было бы желательно показать в диссертации угловые зависимости эффекта в обоих случаях.

2. Колмычек Ирина Алексеевна, к.ф.м.н., доцент кафедры общей физики физического факультета отделения экспериментальной и теоретической физики МГУ имени М.В. Ломоносова, дала положительный отзыв на диссертацию. Отзыв содержит 4 замечания:

- 1. В качестве магнитного материала в работе исследуется нанодисперсный магнетит, полученный методом ЛЭД. При этом не объясняется как наличие наночастиц приводит к улучшению магнитных свойств магнетита, а также учитывалось ли рассеяние на наночастицах при анализе оптических спектров.
- Не указаны порядки поверхностных плазмон-поляритонов, возбуждение которых наблюдается в эксперименте.
- Было бы более наглядно и проще для восприятия, если бы на всех полученных спектрально-угловых зависимостях пропускания, отражения и величины поперечного эффекта Керра для дифракционных структур были нанесены рассчитанные дисперсионные кривые различных резонансов, как это сделано на рис. 4.2 (б).
- В работе есть несколько орфографических ошибок и опечаток, например, «сфокусирована на мишене» (стр. 40), «волноводна» (стр. 61), «разщепляется» (стр. 63) и др.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» предоставила положительное заключение на диссертацию. Заключение подписано деканом физического факультета Университета ИТМО к.ф.-м.н. Мельчаковой Ириной Валерьевной и старшим научным сотрудником физического факультета Университета ИТМО к.ф.-м.н. Самусевым Антоном Кирилловичем и утверждено проректором по научной работе Университета ИТМО д.т.н., профессором В.О. Никифоровым. В заключении указано, что содержание диссертации Павлова С. И. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», а соискатель Павлов С. И. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук. Заключение ведущей организации содержит 4 замечания:

- Исследуемые структуры являются решеткой на волноводе, т.е. собственные моды будут в таких структурах вероятно будут гибридными модами, а не чистыми плазмонными или волноводными. Были ли строго рассчитаны дисперсии таких гибридных мод в системе?
- Было бы уместно провести более детальный сравнительный анализ полученных результатов по поперечному эффекту Керра, усиленному за счет высокодобротных резонансов в метаповерхностях.
- На Рисунках 5.2 и 5.3 приведены карты FOM и параметра дельта как функции частоты и угла падения. Угол падения менялся в диапазоне от 0 до 15 градусов. Однако из построенных карт видно, что FOM и параметр дельта увеличивается с углом падения для некоторых длин волн и можно ожидать, что при углах больше 15 градусов результат был бы лучше. Было бы разумным провести такие измерения.
- Теория резонансных решеток, в том числе плазмонных решеток на волноводных структурах, развита достаточно хорошо. В том числе соавторами соискателя. Было бы разумно развить аналитическую теорию рассматриваемых в диссертации эффектов и привести аналитические выражения для FOM и параметр дельта, которые выражались бы через параметры структур, частоту падающего поля и угол падения.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что один из них имеет ученую степень доктора наук, другой - кандидата наук, они работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» ведет активные исследования в области физики конденсированного состояния, фотоники, метаматериалов. На физическом факультете несколько групп ведут активные исследования в области экспериментальной и теоретической фотоники, спиновой физики, взаимодействия электромагнитного излучения различных диапазонов во структурированными средами. К.ф.-м.н., Мельчакова И. В. - специалист в области радиофизики, источников и усилителей электромагнитного излучения, взаимодействия

такого излучения с различными структурами. К.ф.-м.н., Самусев А, К. является признанным специалистом в области взаимодействия оптического излучения с фотонными и плазмонными структурами. В Национальный исследовательский университет ИТМО имеется диссертационный совет Д 999.069.02. по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Основное содержание диссертации представлено в 5 научных статьях, опубликованных в журналах, индексируемых в международной системе цитирования Web of Science:

1. Transverse magneto-optical Kerr effect in magnetite covered by array of gold nanowires / S.A. Dyakov, F. Spitzer, I. Akimov, D.A. Yavsin, S.I. Pavlov, S.Y. Verbin, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius, A.B. Pevtsov, M. Bayer // *Semiconductors*.— 2018.— Vol. 52, no. 14.— Pp 1857-1860.
2. Wide-band enhancement of the transverse magneto-optical Kerr effect in magnetite-based plasmonic crystals / S.A. Dyakov, I.M. Fradkin, N.A. Gippius, L. Klompmaker, F. Spitzer, E. Yalcin, I.A. Akimov, M. Bayer, D.A. Yavsin, S.I. Pavlov, A.B. Pevtsov, S.Y. Verbin, S.G. Tikhodeev // *Phys. Rev. B*.— 2019.— Vol. 100, no. 21.— P.214411.
3. Transverse magneto-optical Kerr effect in magnetoplasmonic waveguide structures based on Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> / S.I. Pavlov, A.B. Pevtsov, S.A. Dyakov, D.A. Yavsin, F. Spitzer, I. Akimov, S.Y. Verbin, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius, A.V. Nashchekin, M. Bayer // *J. Phys.: Conf. Ser.*.—2019.— Vol. 1400, no. 6.— P.066014
4. Efficiency evaluation of the transverse magneto-optical Kerr effect in magnetoplasmonic structures / S.I. Pavlov, A.B. Pevtsov, S.A. Dyakov, D.A. Yavsin, A.V. Nashchekin // *J. Phys.: Conf. Ser.*.—2019.— Vol. 1400, no. 6.— P.066013
5. Wide band enhancement of transverse magneto-optic Kerr effect in magnetite / S.A. Dyakov, F. Spitzer, I. Akimov, D.A. Yavsin, S.I. Pavlov, S.Y. Verbin, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius, A.B. Pevtsov, M. Bayer // *J. Phys.: Conf. Ser.*.—2019.— Vol. 1461, no. 1.— P.012033

На автореферат поступило 4 отзыва.

1. Отзыв Барышева Александра Вячеславовича, д.ф.-м.н. , профессора, сотрудника Федерального государственного унитарного предприятия “Всероссийский научно-исследовательский Институт автоматике им. Н. Л. Духова”, положительный, содержит 1 замечание:

- Следует отметить, что при обсуждении результатов автор описывает наблюдаемые особенности в спектрах, не давая при этом интерпретации. Например (стр. 10 и 17), чем обусловлен рост величины эффекта Керра на длине волны 800 нм для плёнок магнетита?
2. Отзыв Акимова Андрея Владимировича, д.ф.м.н, профессора, старшего научного сотрудника школы физики и астрономии Университета Ноттингема, положительный, замечаний не содержит.
  3. Отзыв Липовского Андрея Александровича, д. ф.-м. н., профессора, ст. н. с.заведующего кафедрой физики и технологии наногетероструктур СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова, положительный, содержит 1 замечание:
    - Вообще говоря, утверждение о том, что «для практических применений желательно иметь как большое изменение интенсивности (света), так и непосредственно высокую интенсивность...» (стр. 15 автореферата) представляется тривиальным. Требование высокого пропускания в сочетании с глубиной модуляции предъявляется к любым модуляторам света и не является оригинальным, т.е. не требует глубокого обоснования, которому, согласно автореферату, посвящена пятая глава диссертации. В то же время представленный в этой главе анализ эффективности магнитооптических структур представляется вполне правомерным.
  4. Отзыв Сидорова Александра Ивановича, д.ф.м.н., ведущего научного сотрудника научно-исследовательского центра материаловедения Университета ИТМО, положительный, замечаний не содержит.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем исследований по получению структур с плазмонными и квазиволноводными резонансами на основе поликристаллических пленок магнетита и по усилению в них магнитооптического отклика получен ряд результатов, важных для развития оптики и магнитооптики конденсированного состояния.

1. Определены магнитные свойства и спектральные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости и вектора гирации в видимом диапазоне длин волн для пленок магнетита, осажденных методом лазерного электродиспергирования. Обнаружено, что в исследованных пленках магнетита наибольшей величины нечетный по намагниченности интенсивностный магнитооптический эффект (экваториальный, или поперечный, эффект Керра) достигает на длине волны 800 нм. При увеличении угла падения света амплитуда эффекта монотонно растет и в

случае отражения достигает значений на порядок больше, чем в случае пропускания.

2. Изготовлены дифракционные структуры с периодическими массивами золотых полосок на поверхности пленок магнетита с различной толщиной магнитного слоя и шириной полосок. Показано, что в случае пленок толщиной 50 нм определяющую роль в спектральных зависимостях эффекта Керра играет возбуждение поверхностного плазмонного резонанса на границе раздела золото/подложка, а в случае пленок толщиной 220 нм - возбуждение квазिवолноводных резонансов в структуре. В дифракционных структурах достигнуто усиление поперечного эффекта Керра по сравнению с пленками без массива полосок 2.5 раза в геометрии на отражение и 160 раз в геометрии на пропускание.
3. Показано, что в в структуре с периодическим массивом золотых полосок, расположенных под магнитной пленкой поверхностный плазмонный резонанс на границе раздела золото/воздух эффективно подавляется, при этом усиление эффекта Керра, связанное с возбуждением квазिवолноводных резонансов не ухудшается.

Научная новизна и практическая значимость обусловлена тем, что соискателем исследованы оптические и магнитооптические свойства поликристаллических пленок магнетита, полученных методом лазерного электродиспергирования. На основе таких пленок различной толщины созданы дифракционные структуры с золотыми нанометровыми полосками либо на поверхности пленки, либо под пленкой. Изучено и объяснено усиление нечетного по намагниченности интенсивностного магнитооптического эффекта в таких структурах, показано преимущество структур с золотыми полосками, расположенными под магнитной пленкой. Представляется, что развитие работ по созданию таких структур может содействовать разработке новых магнитооптических модуляторов света для устройств фотоники.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждена применением современных технологических подходов, методов моделирования взаимодействия света со структурами, методов оптической спектроскопии. Полученные результаты прошли апробацию на 4 международных и российских конференциях, представлены на семинарах ФТИ им. А. Ф. Иоффе и опубликованы в 5 рецензируемых журналах.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Личный вклад автора состоял в

разработке дизайна и изготовлении образцов дифракционных оптических структур с периодическими массивами золотых полосок методом электронно-лучевой литографии, моделировании магнитооптических эффектов методом конечных элементов в программном пакете Comsol Multiphysics, а также в анализе полученных экспериментальных и теоретических результатов. Постановка задач и анализ полученных результатов осуществлялись автором совместно с научным руководителем и научным консультантом.

Диссертация Павлова С. И. является законченным научным исследованием, вносящим существенный вклад в развитие таких актуальных направлений современной физики конденсированного состояния как магнитоплазмоника и магнитофотоника.

На заседании 24 июня 2021 года диссертационный совет принял решение присудить Павлову С. И. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния».

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 11 докторов по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 12, против – 0, воздержались – 0.

Председатель

диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

Кусраев Юрий Георгиевич

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
PhD

Калашникова Александра Михайловна

24 июня 2021 г.