

На правах рукописи

Павлов Сергей Игоревич

**РЕЗОНАНСНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ
И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
В ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУРАХ
НА ОСНОВЕ МАГНЕТИТА**

Специальность 01.04.07 —
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель: **Нацкеин Алексей Викторович**
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов и структур твердотельной электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Научный консультант: **Певцов Александр Борисович**
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории физики аморфных полупроводников ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: **Кричевцов Борис Борисович**
д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории оптических явлений в сегнетоэлектрических и магнитных кристаллах ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Колмычек Ирина Алексеевна

к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики физического факультета отделения экспериментальной и теоретической физики МГУ имени М.В. Ломоносова

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Защита состоится 24 июня 2021 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.01 на базе ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а также на сайте института www.ioffe.ru.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета ФТИ 34.01.01

PhD

Калашникова А. М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Исследование способов управления светом является одной из актуальных задач современной физики. Наиболее простым подходом для этого служит использование материалов, изменяющих свои оптические свойства при внешних воздействиях, таких как электрические и магнитные поля. Действие магнитного поля на свет привлекает внимание исследователей со времен открытия Фарадеем в 1845 году наиболее известного магнитооптического эффекта – вращения плоскости поляризации света при его прохождении через намагниченную среду. Наряду с эффектом Фарадея в магнитных материалах могут наблюдаться эффекты Керра: полярный, меридиональный (продольный) и экваториальный (поперечный). В эффектах Керра, аналогично эффекту Фарадея, происходит вращение плоскости поляризации и появление эллиптичности линейно поляризованного света при отражении от намагниченной среды, при этом в случае поперечного эффекта происходит также изменение интенсивности света при изменении намагниченности материала. Фактором, ограничивающим использование эффекта Керра, является малая величина относительного изменения интенсивности света в объемных магнетиках – в лучшем случае порядка 10^{-3} в традиционных ферромагнитных материалах, таких как железо, никель, кобальт [1].

Современные требования к повышению функциональности оптоэлектронных систем приводят к необходимости поиска новых материалов и структур, которые бы позволили увеличить эффективность оптических элементов. Развитие нанотехнологий позволило перейти к использованию объектов, свойства которых определяются в первую очередь их геометрией, а не объемными параметрами материалов. Структуры с периодической модуляцией на масштабах порядка длины волны света позволяют резонансно усиливать оптические и, в частности, магнитооптические эффекты в заданном спектральном диапазоне [2–4]. Среди резонансных структур можно выделить дифракционные одномерные и двумерные решетки, достоинством которых является их планарность, а также возможность, изменяя геометрию структуры достаточно простыми технологическими методами, управлять оптическим откликом. В ряде работ было показано, что создание на поверхности магнитного диэлектрика (висмут-замещенного феррит-граната) одномерно-периодического массива металлических полосок приводит к усилению поперечного эффекта

Керра до 10^3 раз [5–7]. Это достигается благодаря возбуждению в структурах поверхностных плазмонных или волноводных резонансов. При этом зависимость спектрального положения максимума эффекта Керра от угла падения света определяется дисперсионными кривыми соответствующих оптических мод, а тип возбуждения определяется геометрическими параметрами структуры [8]. Оценка величины усиления делается на основе теоретического расчета эффекта Керра, амплитуда которого для слоя магнитного диэлектрика без металлической структуры не превышает 10^{-5} . В связи с этим представляется интересным рассмотреть вопрос о возможности усиления поперечного эффекта Керра в резонансных структурах на основе материалов, обладающих значительной величиной означенного эффекта в естественном состоянии.

Одним из наиболее известных естественных магнитных материалов является магнетит – Fe_3O_4 . Он широко распространен в природе, обладает сильными магнитными свойствами, а также, в отличие от металлов, слабо подвержен окислению. Также магнетит обладает заметной величиной поперечного эффекта Керра в естественном состоянии [9] и имеет не такое сильное поглощение как у металлов, что позволяет наблюдать магнитооптические эффекты не только в отраженном, но и в проходящем свете. Нанодисперсные пленки на основе магнетита, полученные методом лазерного электродиспергирования (ЛЭД), демонстрируют даже лучшие магнитные свойства по сравнению с поликристаллическими пленками [10]. Уникальность метода ЛЭД состоит в том, что он позволяет изготавливать пленки практически на любых видах подложек, в отличие от эпитаксиальных методов получения магнитных пленок, требующих согласования подложек. Таким образом дифракционные структуры на основе пленок магнетита, полученных методом ЛЭД, представляются перспективными для применения в магнитооптических устройствах.

Для наиболее эффективного применения резонансных оптических эффектов необходимо понимание их физической природы и особенностей, характерных для данного возбуждения. Вышеизложенное обуславливает **актуальность** и определяет **цель** данной работы:

Определение эффектов, ответственных за резонансное усиление поперечного эффекта Керра в дифракционных структурах на основе магнетита с одномерно-периодическими массивами металлических полосок при вариации

геометрических параметров структуры и взаимного расположения магнитного слоя и массива полосок.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать оптические и магнитооптические свойства пленок магнетита, полученных методом ЛЭД. Определить спектральные зависимости компонент комплексных диэлектрической проницаемости и вектора гирации.
2. Исследовать спектральные и угловые зависимости поперечного магнитооптического эффекта Керра в пленках магнетита.
3. Изготовить структуры с периодическими массивами золотых полосок с различной толщиной магнитного слоя и шириной полосок.
4. Исследовать спектрально-угловые зависимости поперечного магнитооптического эффекта Керра в структурах с периодическими массивами золотых полосок.
5. Провести оценку эффективности усиления поперечного эффекта Керра в дифракционных структурах с периодическими массивами золотых полосок.

Научная новизна:

1. В работе исследованы оптические и магнитооптические свойства пленок магнетита, полученных методом лазерного электродиспергирования. Экспериментально измерены спектральные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости и вектора гирации.
2. Измерены спектрально-угловые зависимости поперечного магнитооптического эффекта Керра в пленках магнетита в геометриях на отражение и пропускание.
3. Исследован поперечный магнитооптический эффект Керра в структурах на основе пленок магнетита с периодическим массивом золотых полосок на поверхности. 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 ~ 200 нм возбуждение квазиволноводных резонансов в структуре.

4. Проведены измерения спектрально-угловых зависимостей пропускания и поперечного магнитооптического эффекта Керра в структуре с металлической решеткой под магнитной пленкой. Показано, что в такой структуре плазмонные резонансы, не влияющие на магнитооптические эффекты, эффективно подавляются, при этом усиление эффекта Керра за счет возбуждения квазиволноводных резонансов в магнитной пленке не ухудшается.
5. Предложен способ оценки эффективности структур, функционирующих на основе поперечного магнитооптического эффекта Керра, учитывающий величину полезного сигнала. Введен показатель эффективности, который определяется как произведение сигнала Керра (коэффициентов отражения (пропускания) света при изменении намагниченности) на среднюю величину коэффициента отражения (пропускания) структуры.

Практическая значимость работы заключается в исследовании магнитооптических свойств магнетита, полученного методом ЛЭД, а также в исследовании усиления поперечного магнитооптического эффекта Керра в структурах на основе пленок магнетита с периодическим массивом золотых полосок на поверхности и под магнитной пленкой. Кроме того, предложенный способ оценки эффективности поперечного эффекта Керра может быть полезен для оптимизации магнитооптических устройств, функционирующих на его основе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Формирование на поверхности пленки магнетита периодического массива золотых полосок приводит к усилению поперечного магнитооптического эффекта Керра благодаря возбуждению в структуре поверхностных плазмонных и квазиволноводных резонансов. Тип возбуждаемого резонанса определяется геометрическими параметрами структуры – периодом, шириной металлических полосок и толщиной магнитной пленки.
2. В дифракционных структурах на основе магнетита с периодическим массивом золотых полосок на поверхности магнитного слоя усиление поперечного магнитооптического эффекта Керра в геометрии на пропускание достигает величины 160 раз за счет воз-

буждения поверхностного плазмонного резонанса и до 100 раз за счет возбуждения квазиволноводного резонанса.

3. Формирование дифракционной структуры с периодическим массивом золотых полосок под пленкой магнетита, позволяет уменьшить влияние на оптический отклик структуры поверхностного плазмонного резонанса, возбуждаемого на границе раздела золото/воздух. При этом величина усиления поперечного эффекта Керра, связанная с возбуждением квазиволноводного резонанса, не уменьшается.
4. Выражение для показателя эффективности поперечного магнитооптического эффекта Керра, определенное как произведение сигнала Керра (модуль разности коэффициентов отражения (пропускания) света при изменении намагниченности) на среднюю величину коэффициента отражения (пропускания) структуры, позволяет количественно характеризовать структуры, функционирующие на основе данного эффекта, в том числе выявлять наиболее эффективный спектральный и угловой диапазон для применения эффекта Керра с учетом величины полезного сигнала.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного высокотехнологичного оборудования для изготовления образцов, высокоточных экспериментальных методов исследования и теоретических методов, показавших свою применимость в широком круге сходных задач. Полученные экспериментальные результаты согласуются с численными расчетами, а также с известной теорией оптических и магнитооптических эффектов в структурах с плазмонными и квазиволноводными резонансами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих международных конференциях:

26th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology" Минск, Беларусь, 18-24 Июня, 2018; III International Workshop on Electromagnetic Properties of Novel Materials, Moscow, Russia, 18-20 December, 2018; IV Международная Конференция по Метаматериалам и Нанопотонике METANANO 2019, Санкт-Петербург, Россия; Международная конференция ФизикА.СПб, Санкт-Петербург, 22-24 октября 2019.

Кроме того, промежуточные результаты работы неоднократно докладывались на лабораторных семинарах.

Личный вклад автора заключается 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. Также автор принимал активное участие в спектроскопических исследованиях изготовленных структур. Автором предложен оригинальный способ оценки эффективности структур, функционирующих на основе поперечного магнитооптического эффекта Керра и продемонстрирована полезность предложенного подхода.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science и Scopus и входящих в перечень ВАК.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, формулируется цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения работы, положения выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен анализ литературы по теме диссертации. В первом разделе приводится описание общей теории магнитооптических явлений и способы их усиления в наноструктурированных объектах. Во втором разделе описываются оптические особенности, наблюдаемые в дифракционных структурах – аномалии Вуда и их объяснение с точки зрения возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). Также рассматриваются условия существования волноводных мод в планарном волноводе и оптические особенности, возникающие при взаимодействии различных оптических мод.

В третьем разделе приводится теория, описывающая возбуждение плазмонных и волноводных мод в гиротропных средах и влияние оптических резонансов, связанных с этими модами на усиление поперечного эффекта Керра. При этом изменение интенсивности прошедшего/отраженного света происходит за счет смещения частоты плазмонных и волноводных резонансов при изменении намагниченности магнитного материала.

Далее приводится описание представленных в литературе экспериментальных результатов по исследованию поперечного эффекта Керра в структурах с периодическими массивами металлических полосок на магнитных пленках. В качестве магнитного материала использовался диэлектрик – висмут-замещенный феррит-гранат (железо-висмутовый гранат, ЖВГ). Относительное изменение интенсивности света в пленках ЖВГ без металлических структур не превышало величины 10^{-5} . Изготовление плазмонной структуры на поверхности позволяло получить усиление эффекта Керра до 10^3 раз.

В конце раздела сравниваются различные магнитные материалы, применявшиеся для изучения поперечного эффекта Керра. Ферромагнитные металлы обладают значительной величиной поперечного эффекта Керра, однако сильное поглощение препятствует их использованию в проходящем свете. Магнитные диэлектрики, такие как железо-иттриевый гранат, обладают пренебрежимо малым поглощением, а при замещении ионов иттрия ионами висмута их магнитные свойства усиливаются. Однако получение феррит-гранатов с высоким содержанием висмута затруднено из-за различия ионного радиуса висмута и иттрия. Кроме того, для получения качественных монокристаллических пленок необходимо использование согласованных подложек, таких как галлий-гадолиниевый гранат или кристаллических подслоев. Использование материалов, сочетающих сильные магнитные свойства, слабое поглощение и простоту изготовления позволит расширить область применения поперечного магнитооптического эффекта Керра. С учетом вышесказанного, магнетит и нанодисперсные пленки на основе магнетита, полученные методом лазерного электродиспергирования представляются перспективными материалами для исследования возможности усиления эффекта Керра.

Во **второй главе** описываются экспериментальные и теоретические методы, применявшиеся в работе. В первом разделе описывается технология изготовления образцов – методы лазерного электродиспергирования и электронно-лучевой литографии, а также приводится описание дизайна изготовленных образцов. Во втором разделе описывается метод оптических и магнитооптических измерений – спектральная Фурье-микроскопия, принципы метода и описание экспериментальной установки для проведения измерений. В третьем разделе приводится описание теоретических методов, при-

менявшихся для численного расчета магнитооптических эффектов – метод связанных мод в пространстве Фурье и метод конечных элементов.

В третьей главе приводятся результаты исследования оптических и магнитооптических свойств пленок магнетита. В первом разделе приведены результаты измерений компонент тензора диэлектрической проницаемости и их сравнение с литературными данными. Во втором разделе представлены исследования поперечного эффекта Керра для пленок магнетита, полученных методом ЛЭД. Наибольшей величины относительное изменение интенсивности света достигает на длине волны ~ 800 нм. При увеличении угла падения света амплитуда эффекта Керра растет и достигает величины $\sim 10^{-2}$ при значении угла падения света 23° в геометрии на отражение. В геометрии на пропускание амплитуда эффекта Керра не превышает величины $5 \cdot 10^{-4}$.

В третьем разделе приводятся данные измерения магнитного поля насыщения в геометрии поперечного эффекта Керра. Измеренная величина (100 мТ) приблизительно в два раза меньше, чем в случае пленок магнитных диэлектриков и в несколько раз меньше, чем у эпитаксиальных пленок Fe_3O_4 такой же толщины, как следует из литературных данных. В конце главы приводятся расчеты критической толщины для планарного волновода из магнетита на кварцевой подложке и глубины проникновения электрического поля поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела золото/магнетит. Для возбуждения волноводных мод в диапазоне длин волн до 1000 нм, толщина слоя магнетита должна быть не менее 120 нм. Глубина проникновения поля ППП для диапазона длин волн 600-1000 нм больше 50 нм. На основе этих оценок выбраны толщины пленок магнетита для изучения влияния плазмонных и волноводных резонансов на эффект Керра в дифракционных структурах.

В четвертой главе представлено исследование оптических и магнитооптических эффектов в дифракционных структурах на основе магнетита с периодическими массивами золотых полосок (рис. 1). В первом разделе приводятся результаты исследования структур с пленкой магнетита толщиной 50 нм. Особенности, наблюдаемые на спектрально-угловых зависимостях отражения и пропускания в таких структурах, связаны с возбуждением поверхностных плазмонных резонансов (ППР) на границах раздела золото/воздух и золото/подложка (рис. 2 (а), (б)). Это подтверждается расчетами

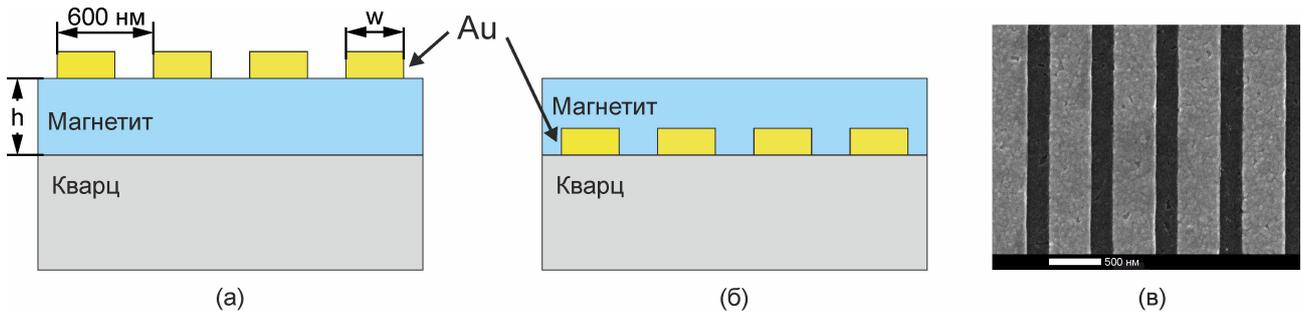


Рис. 1 — (а), (б) — схемы дифракционных магнитооптических структур, (в) — РЭМ изображение массива золотых полосок

собственных оптических мод и распределений электромагнитных полей. На спектрально-угловых зависимостях поперечного эффекта Керра наблюдается ряд максимумов и минимумов, расположенных вдоль дисперсионных кривых ППП (рис. 2 (в), (г)). В случае измерений на пропускание амплитуда эффекта Керра достигает в 6 раз больших значений по сравнению с измерениями на отражение. Кроме того, наличие поглощения в магнитной пленке приводит к тому, что резонансы эффекта Керра, связанные с ППП, распространяющимися в противоположные стороны, частично перекрываются. В результате максимум эффекта Керра в области малых углов падения (до 5°) наблюдается при постоянной длине волны.

Во втором разделе главы приводятся результаты исследования структур с магнитной пленкой толщиной 220 нм. При такой толщине плазмонный резонанс золото/подложка не возбуждается в измеряемом спектральном диапазоне. При этом на спектрально-угловых зависимостях пропускания структур с шириной полосок 400 нм наблюдаются особенности, связанные с возбуждением квазиволноводных резонансов (рис. 3 (а)). Наибольшей величины эффект Керра достигает вблизи этих резонансов. В результате на спектрально-угловых зависимостях наблюдаются два максимума с одинаковой амплитудой ($5.3 \cdot 10^{-3}$) и противоположными знаками (рис. 3 (б)).

При увеличении ширины золотых полосок до 500 нм возбуждение квазиволноводных резонансов затруднено из-за сильного поглощения в металле. В таких структурах оптические особенности смещаются от спектрального положения, характерного для квазиволноводных мод, к положению мод ППП. В результате в оптических спектрах в измеренном диапазоне проявляется только ППП золото/воздух. На спектрально-угловых зависимостях поперечного эффекта Керра наблюдается несколько максимумов и минимумов, спектраль-

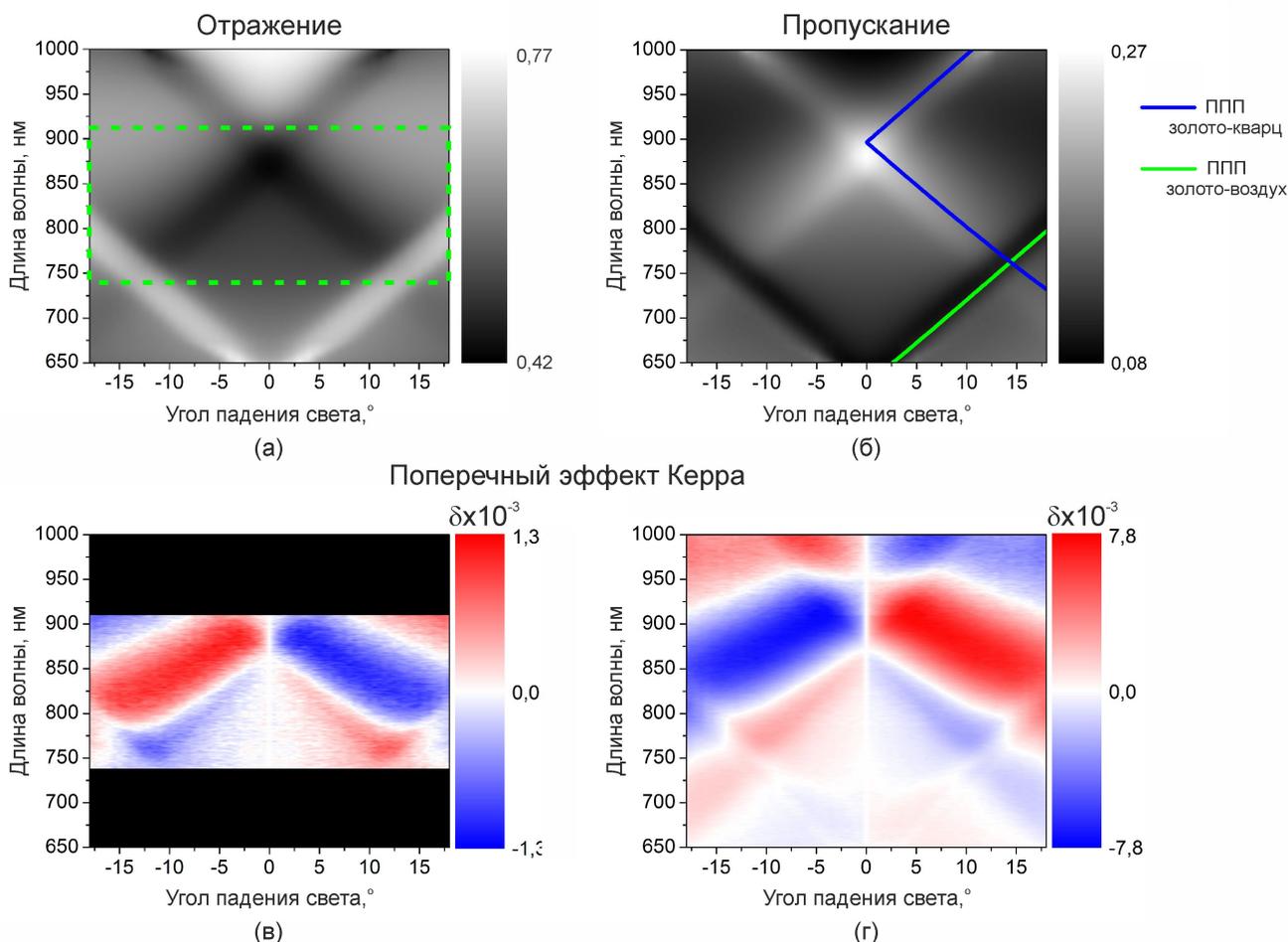


Рис. 2 — Спектрально-угловые зависимости: (а) – отражения, (б) – пропускания, (в) – поперечного эффекта Керра на отражение и (г) – на пропускание, измеренные для дифракционной структуры с толщиной слоя магнетита 50 нм. На (б) отмечены рассчитанные дисперсионные кривые ППП золото/кварц и золото/воздух

ное положение которых слабо зависит от угла падения, а амплитуда эффекта Керра растет при увеличении угла падения, подобно нерезонансному случаю магнитной пленки без периодической структуры.

В третьем разделе представлены результаты исследования дифракционной структуры с периодическим массивом золотых полосок, расположенным на кварцевой подложке под пленкой магнетита толщиной 100 нм (рис. 4 (а)). Выбор такой конфигурации обусловлен тем, что в случае периодического массива, расположенного на поверхности магнитной пленки в спектрах отражения/пропускания наиболее интенсивные резонансы связаны с возбуждением ППП золото/воздух, при этом в спектрах эффекта Керра этот резонанс проявляется крайне слабо, так как изменение намагниченности на него

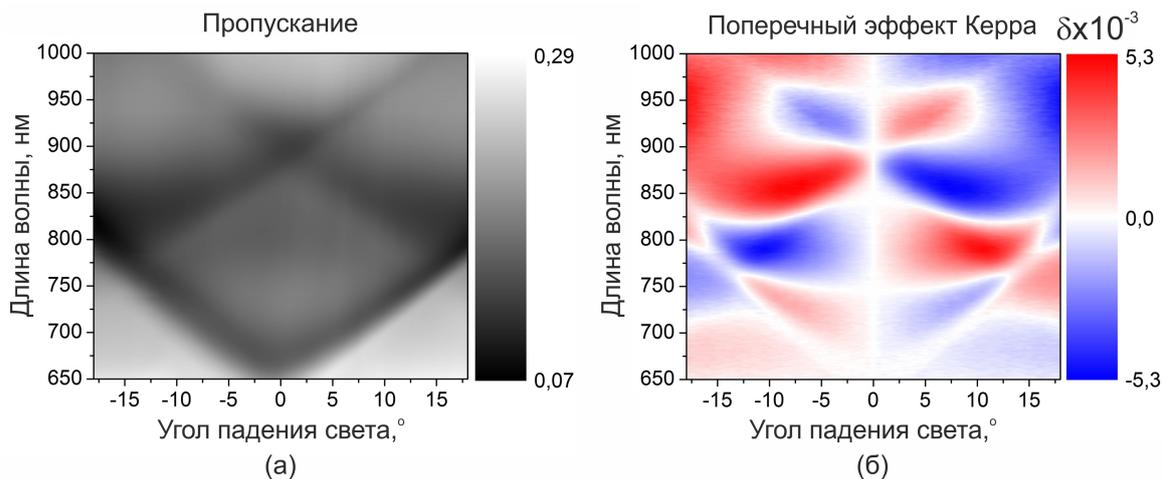


Рис. 3 — Спектрально-угловые зависимости, измеренные для дифракционной структуры с толщиной слоя магнетита 220 нм: (а) – пропускание, (б) – поперечный эффект Керра

почти не влияет. Помещение массива полосок под магнитную пленку позволяет эффективно подавить этот резонанс. При этом усиление поперечного эффекта Керра обусловлено возбуждением квазиволноводных резонансов в структуре (рис. 4 (б)-(г)).

В четвертом разделе проведен анализ величины усиления поперечного эффекта Керра от угла падения света для различных структур (рис. 5). Величина усиления для всех рассмотренных структур падает при увеличении угла. Это связано с тем, что амплитуда эффекта Керра для пленки магнетита растет с увеличением угла. В результате наибольшее усиление наблюдается при углах падения близких к нормали и достигает величины 160 раз для случая структуры с ППР в геометрии на пропускание. В геометрии на отражение усиление наблюдается только для углов падения приблизительно до 3° и не превосходит величины 2.5 раза. При больших углах величина эффекта Керра для пленки больше, чем для структуры. При этом структурирование позволяет выделить спектральный и угловой диапазон, в котором достигается наибольшая величина эффекта Керра.

В **пятой главе** вводится и обосновывается выражение, позволяющее оценивать эффективность структур, функционирующих на основе поперечного магнитооптического эффекта Керра. В большинстве работ посвященных исследованию способов усиления эффекта Керра, внимание уделяется только относительному изменению пропускания/отражения света при изменении намагниченности. При этом, поскольку поперечный эффект Кер-

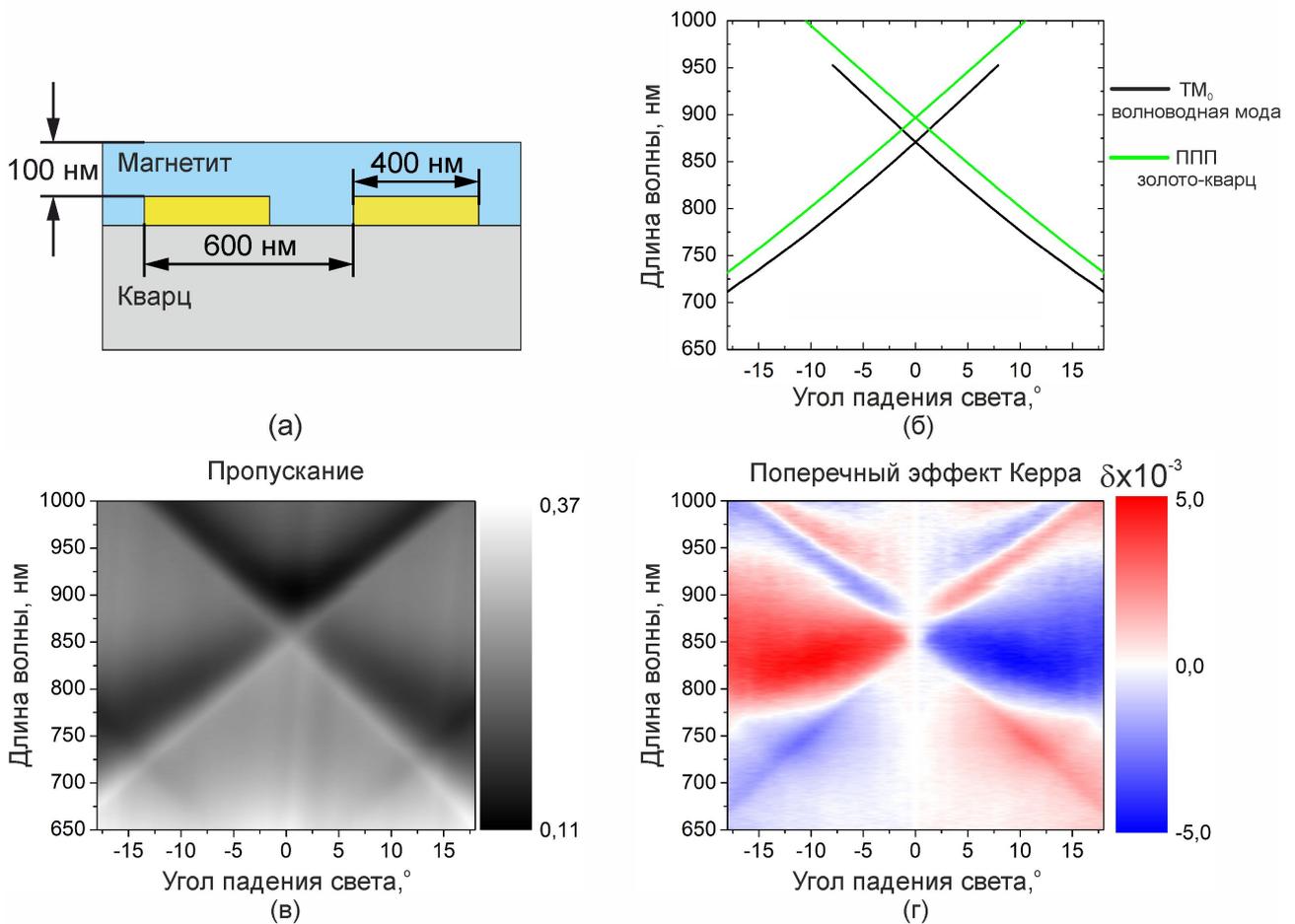


Рис. 4 — (а) — схема дифракционной структуры с массивом полосок под магнитной пленкой; спектрально-угловые зависимости: (б) — оптических мод, (в) — пропускания и (г) — поперечного эффекта Керра

ра в резонансных структурах пропорционален производной спектра отражения/пропускания, в большинстве работ усиление достигается вблизи минимума соответствующего оптического отклика. Однако, для практических применений желательно иметь как большое изменение интенсивности, так и непосредственно высокую интенсивность принимаемого детектором света. Для количественной оценки эффективности магнитооптических структур, в основе функционирования которых лежит поперечный эффект Керра с учетом коэффициента пропускания/отражения предложено следующее определение показателя эффективности:

$$FOM = S_k \cdot I_0$$

где $S_k = |I(+M) - I(-M)|$ — сигнал Керра, а $I_0 = (I(+M) + I(-M))/2$ — коэффициент пропускания/отражения. Сигнал Керра выбран в виде модуля

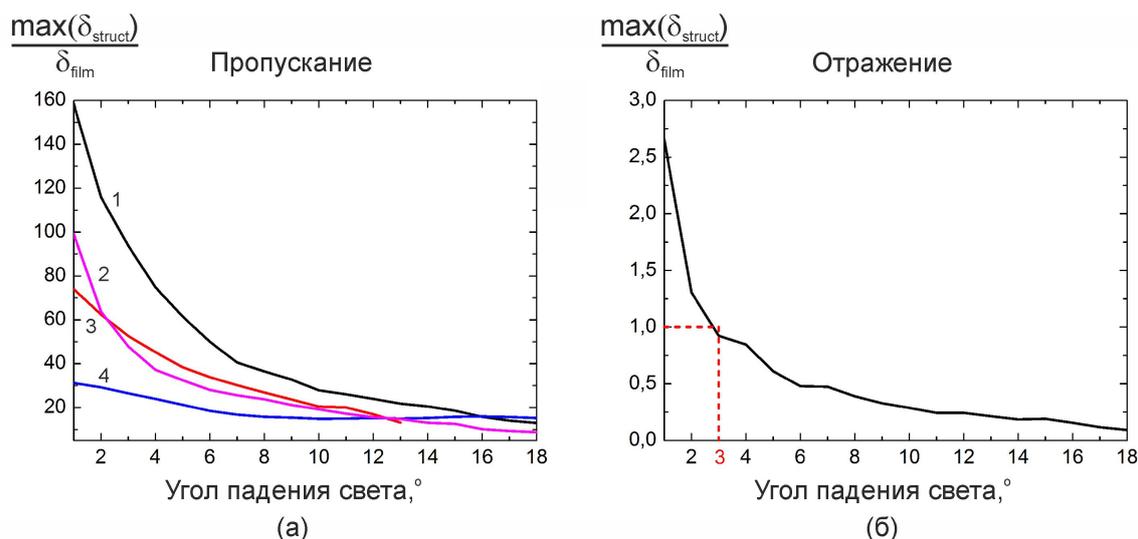


Рис. 5 — Угловая зависимость усиления эффекта Керра дифракционных магнитооптических структур: (а) – на пропускание, (б) – на отражение. На изображении (а) кривые соответствуют дифракционным структурам: 1 – на пленке магнетита толщиной 50 нм, 2 – под пленкой магнетита, 3 – на пленке магнетита толщиной 220 нм, 4 – с широкими полосками на пленке магнетита толщиной 220 нм

разности коэффициента пропускания/отражения при противоположных направлениях намагниченности, так как отрицательный/положительный знак поперечного эффекта Керра определяется только выбором положительного направления оси намагниченности.

Во втором разделе главы приводятся примеры применения показателя эффективности на основе структур, рассмотренных в предыдущих главах (рис. 6). Показано, что при сопоставимой величине эффекта Керра, значение показателя эффективности может отличаться на порядок за счет большой разницы в величине пропускания. Наибольшего значения FOM достигает для структуры с периодическим массивом полосок под магнитной пленкой. В случае структуры с магнитными пленками толщиной 50 нм максимум эффекта Керра в режиме на пропускание в 6 раз больше, чем на отражение, при этом FOM дает значение в 1.5 раза меньше. Кроме того, в случае отражения положение максимума FOM повторяет положение максимума эффекта Керра на спектрально-угловых зависимостях, а в случае пропускания максимум FOM занимает более узкий угловой и спектральный диапазон.

Последним рассмотренным примером использования показателя эффективности в предложенном виде является сравнение структур, подобран-

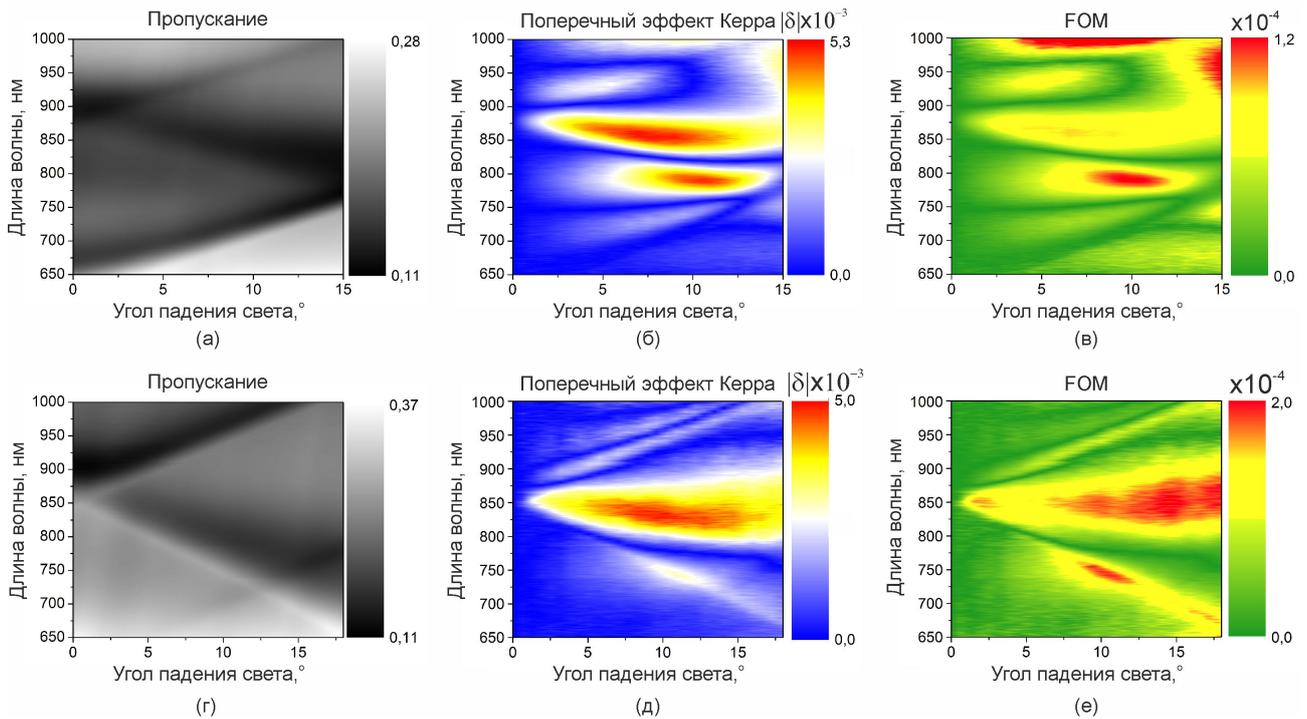


Рис. 6 — Спектрально-угловые зависимости, полученные для структур с квазиволноводными резонансами с дифракционной решеткой на поверхности (верхний ряд) и под магнитной пленкой (нижний ряд): (а), (г) — пропускания; (б), (д) — модуля эффекта Керра; (в), (е) — показателя эффективности

ных таким образом, чтобы максимальное значение эффекта Керра в геометрии на пропускание для одной структуры было равно максимальному значению в геометрии на отражение для другой. При этом величина FOM для рассмотренных структур различается на 3 порядка.

Таким образом, на основе рассмотренных примеров делается вывод о полезности предложенного способа оценки эффективности структур, функционирующих на основе поперечного магнитооптического эффекта Керра.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Экспериментально исследованы оптические и магнитооптические свойства пленок магнетита, осажденных методом лазерного электродиспергирования. Определены спектральные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости и вектора гирации в видимом диапазоне длин волн. Измеренная величина магнитного поля насыщения (100 мТ) приблизительно в два раза меньше, чем в случае пленок магнитных диэлектриков и в несколько раз меньше

эпитаксиальных пленок Fe_3O_4 такой же толщины, как следует из литературных данных.

2. Исследованы спектрально-угловые зависимости поперечного магнитооптического эффекта Керра в пленках магнетита в геометриях на отражение и пропускание. Наибольшей величины относительное изменение интенсивности света достигает на длине волны 800 нм. При увеличении угла падения света амплитуда эффекта Керра монотонно растет и в случае отражения достигает значений на порядок больше, чем в случае пропускания.
3. 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.
4. Проведены измерения спектрально-угловых зависимостей пропускания и поперечного магнитооптического эффекта Керра в структуре с периодическим массивом золотых полосок, расположенных под магнитной пленкой. Показано, что в такой структуре поверхностный плазмонный резонанс на границе раздела золото/воздух эффективно подавляется, при этом усиление эффекта Керра, связанное с возбуждением квазिवолноводных резонансов не ухудшается.
5. Предложено выражение для оценки эффективности структур, функционирующих на основе поперечного магнитооптического эффекта Керра, учитывающая как величину изменения коэффициента пропускания (отражения) при изменении намагниченности, так и среднюю величину коэффициента пропускания (отражения) структуры.

Публикации автора по теме диссертации

- A1 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.
- A2 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.
- A3 Transverse magneto-optical Kerr effect in magnetoplasmonic waveguide structures based on Fe₃O₄ / **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
- A4 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
- A5 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

Список литературы

1. *Krinchik G.S., Artem'ev V.A.* Magneto-optical Properties of Ni, Co, and Fe in the Ultraviolet Visible, and Infrared Parts of the Spectrum // *JETP*. — 1968. — Vol. 26, no. 6. — P. 1080.
2. Magneto-optical properties of one-dimensional photonic crystals composed of magnetic and dielectric layers / M. Inoue, K. Arai, T. Fujii, M. Abe // *Journal of Applied Physics*. — 1998. — Vol. 83, no. 11. — Pp. 6768–6770.

3. Zvezdin A.K., Belotelov V.I. Magneto-optical properties of two dimensional photonic crystals // *Eur. Phys. J. B.* — 2004. — Vol. 37. — Pp. 479–487.
4. Enhancement of optical and magneto-optical effects in three-dimensional opal/Fe₃O₄ magnetic photonic crystals / V.V. Pavlov, P. A. Usachev, R.V. Pisarev et al. // *Applied Physics Letters.* — 2008. — Vol. 93, no. 7. — P. 072502.
5. Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals / V.I. Belotelov, M. Pohl, V.A. Kotov et al. // *Nature Nanotechnology.* — 2011. — Vol. 6. — P. 370–376.
6. Tuning of the transverse magneto-optical Kerr effect in magneto-plasmonic crystals / M. Pohl, L. E. Kreilkamp, V. I. Belotelov et al. // *New Journal of Physics.* — 2013. — Vol. 15, no. 7. — P. 075024.
7. Waveguide-Plasmon Polaritons Enhance Transverse Magneto-Optical Kerr Effect / L. E. Kreilkamp, V. I. Belotelov, J. Y. Chin et al. // *Phys. Rev. X.* — 2013. — Vol. 3. — P. 041019.
8. Extraordinary transmission and giant magneto-optical transverse Kerr effect in plasmonic nanostructured films / V.I. Belotelov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich et al. // *J. Opt. Soc. Am. B.* — 2009. — Vol. 26, no. 8. — Pp. 1594–1598.
9. Optical and magneto-optical polar Kerr spectra of Fe₃O₄ and Mg²⁺- or Al³⁺-substituted Fe₃O₄ / W. F. J. Fontijn, P. J. van der Zaag, M. A. C. Devillers et al. // *Phys. Rev. B.* — 1997. — Vol. 56. — Pp. 5432–5442.
10. Наноструктурированные магнитные пленки оксидов железа, полученные методом лазерного электродиспергирования / Б.Т. Мелех, Д.А. Курдюков, Д.А. Явсин и др. // *Письма В Журнал Технической Физики.* — 2016. — Т. 42, № 19. — С. 62–69.