

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
Университета ИТМО
д.т.н., профессор
_____ В.О. Никифоров

« ____ » _____ 20 ____ г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» на диссертацию Павлова Сергея Игоревича «Резонансные оптические и магнитооптические эффекты в дифракционных структурах на основе магнетита», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Актуальность работы

Актуальность диссертационной работы обусловлена активными в настоящее время исследованиями резонансных оптических структур для усиления различных оптических и, в частности, магнитооптических эффектов. В свою очередь поперечный эффект Керра, рассматриваемый в работе, может быть перспективным для разработки новых магнитооптических устройств, благодаря тому, что он заключается в изменении интенсивности света, а не состояния поляризации, в отличие от большинства магнитооптических эффектов. Выбранный автором магнитный материал – магнетит, представляет интерес для исследования возможности усиления магнитооптических эффектов благодаря сочетанию таких свойств как: сильные магнитные свойства, технологичность возможность наблюдения магнитооптических эффектов как в отраженном, так и в проходящем свете. Кроме того, в подавляющем большинстве работ в качестве магнитного материала применялись магнитные диэлектрики, эффект Керра в которых, в естественном состоянии, отсутствует. Таким образом, важным практическим вопросом является изучение влияния структурирования на поперечный эффект Керра в материалах, которые обладают значительной величиной эффекта в естественном состоянии.

В представленной работе автором исследуются оптические резонансные возбуждения, возникающие в одномерно-периодических дифракционных структурах на основе магнетита и их влияние на поперечный магнитооптический эффект Керра, а также проводится оценка их эффективности в зависимости от типа и геометрических параметров структур.

Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, 5-ти глав и Заключения.

Во **Введении** приводится общая характеристика работы, отражающая ее актуальность, цель и задачи, положения, выносимые на защиту, научную новизну, практическую значимость, степень достоверности, апробацию на конференциях и семинарах, личный вклад автора и публикации по теме работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней излагается общая теория

магнитооптических явлений и способы их усиления в наноструктурах. Приводится описание резонансных оптических эффектов в дифракционных структурах – плазмонных и волноводных резонансов, а также особенности, возникающие при их взаимодействии. Далее приводится теория, описывающая особенности плазмонных и волноводных резонансов в гиротропных средах и экспериментальные результаты по исследованию усиления поперечного эффекта Керра в структурах с такими резонансами, представленные в литературе. Также рассматриваются материалы, применяемые в магнитооптических приложениях, их преимущества и недостатки. Обосновывается выбор магнетита, сочетание магнитных, оптических и технологических свойства которого делает его перспективным для магнитооптических приложений.

Во **второй** главе описываются методы изготовления исследуемых образцов, экспериментальные методы оптических и магнитооптических измерений, а также теоретические методы, применявшиеся в работе.

Третья глава посвящена исследованию оптических и магнитооптических свойств пленок магнетита, полученного методом лазерного электродиспергирования. Представлены измерения спектральных и угловых зависимостей поперечного эффекта Керра в геометриях на отражение и пропускание, результаты которых согласуются с расчетами, полученными на основе данных по измерению компонент диэлектрической проницаемости и вектора гирации. Полученные результаты позволяют рассчитать геометрические параметры дифракционных структур таким образом, чтобы выделить тип резонансного возбуждения в заданном спектральном диапазоне.

В **четвертой** главе представлено исследование оптических резонансов в одномерно-периодических дифракционных структурах на основе магнетита и их влияние на поперечный магнитооптический эффект Керра. В начале главы исследуются структуры с толщиной пленки магнетита 50 нм. На основании расчетов оптических мод структуры и распределений электромагнитных полей, особенности, наблюдаемые в спектрах пропускания и отражения, интерпретируются как поверхностные плазмонные резонансы на границах раздела золота с вакуумом и подложкой. Измерения спектрально-угловых зависимостей поперечного эффекта Керра показали усиление амплитуды эффекта по сравнению с исходными пленками магнетита вблизи спектрального положения плазмонного резонанса золото/подложка. Далее проводятся исследования структур на пленке магнетита толщиной 220 нм. Особенности в спектрально-угловых зависимостях пропускания и эффекта Керра в такой структуре связаны с возбуждением квазиволноводных резонансов. Затем рассматривается структура с массивом золотых полосок под пленкой магнетита. Такая конфигурация позволяет подавить плазмонный резонанс, который проявляется в оптических спектрах наиболее интенсивно, но не проявляется в спектрах эффекта Керра. При этом усиление эффекта Керра связанное с квазиволноводным резонансом не уменьшается. В конце главы проводится анализ величины усиления поперечного эффекта Керра для различных структур. Показано, что уменьшение величины усиления при большем угле падающего света связано с ростом величины эффекта для исходной пленки магнетита. При этом наибольшее усиление (до 160 раз) достигается при

углах падения близких к нормальному для структуры с плазмонным резонансом в геометрии на пропускание. В геометрии на отражение усиление не превышает величины в 2.5 раза, однако формирование дифракционной структуры позволяет выделить спектральный и угловой диапазоны, в которых достигается наибольшая величина поперечного эффекта Керра.

В последней, **пятой** главе обосновывается необходимость учета не только величины поперечного эффекта Керра, но и величины полезного сигнала, принимаемого детектором. С этой целью вводится показатель эффективности структур, функционирующих на основе поперечного эффекта Керра в виде: $FOM = S_k \cdot I_0$, где $S_k = |I(+M) - I(-M)|$ – сигнал Керра, а $I_0 = (I(+M) + I(-M))/2$ – коэффициент пропускания или отражения. Полезность предложенного подхода иллюстрируется примерами на основе результатов, полученных в работе. Показано, что при сопоставимой величине эффекта Керра, значение показателя эффективности может различаться более чем на порядок величины. В **заключении** приводятся основные результаты и выводы работы. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Научная новизна

В работе впервые представлены экспериментальные измерения поперечного магнитооптического эффекта Керра в пленках магнетита в геометриях на отражение и пропускание. Проведен анализ резонансных возбуждений, наблюдаемых в одномерно-периодических дифракционных структурах в зависимости от толщины пленок магнетита, и показано их влияние на усиление поперечного эффекта Керра. Кроме того, предложен способ оценки эффективности структур, функционирующих на основе поперечного магнитооптического эффекта Керра.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением экспериментальных методов, адекватных поставленным задачам, а также теоретических методов, зарекомендовавших свою применимость в широком круге сходных задач. Экспериментальные результаты согласуются с численными расчетами, а также с известной теорией оптических и магнитооптических эффектов в плазмонных и плазмон-волноводных структурах.

Научная и практическая ценность работы

Результаты работы представляют ценность как с точки зрения фундаментальной физики магнитооптических явлений, так и с точки зрения прикладных задач магнитооптики. В работе проанализированы резонансные возбуждения и определена величина усиления поперечного эффекта Керра в дифракционных структурах на основе магнетита с различной геометрией. Дифракционные структуры, исследованные в работе, могут послужить основой для будущих магнитооптических приборов. Кроме того, предложенный автором способ оценки эффективности поперечного эффекта Керра может быть полезен для оптимизации магнитооптических устройств, функционирующих на его основе.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертации могут быть использованы в фундаментальных исследованиях магнитооптических явлений, а также при разработке магнитооптических устройств, таких как оптические изоляторы, переключатели, датчики магнитного поля и др.

При изучении материалов диссертационной работы возникает **ряд замечаний:**

1. 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?

2. Было бы уместно провести более детальный сравнительный анализ полученных результатов по поперечному эффекту Керра, усиленному за счет высокодобротных резонансов в метаповерхностях.

3. 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.

4. 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.

Сделанные замечания не снижают качества и научной значимости представленной диссертационной работы.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих международных конференциях: 26th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology" Минск, Белоруссия, 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 Нанофотонике METANANO 2019, Санкт-Петербург, Россия, Международная конференция ФизикА.СПб, Санкт-Петербург, 22-24 октября 2019, а также на семинарах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Заключение

По актуальности поставленных задач, новизне, научной и практической

значимости, достоверности полученных результатов, степени обоснованности выводов и рекомендаций, объему выполненных исследований, уровню апробации и публикаций основных положений диссертация Павлова Сергея Игоревича «Резонансные оптические и магнитооптические эффекты в дифракционных структурах на основе магнетита» представляет собой завершённую научную работу. Автореферат полностью отражает основные положения диссертации.

Диссертационная работа Павлова С.И. «Резонансные оптические и магнитооптические эффекты в дифракционных структурах на основе магнетита» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Отзыв рассмотрен и принят на оптическом семинаре Физического факультета Университета ИТМО 2 апреля 2021 года.

Отзыв ведущей организации подготовил: к.ф.-м.н., с.н.с. А.К. Самусев

Адрес: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, литер А.

Декан физического факультета
Университета ИТМО,
к.ф.-м.н.

Мельчакова Ирина Валерьевна

Старший научный сотрудник
физического факультета
Университета ИТМО,
к.ф.-м.н.

Самусев Антон Кириллович