

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 завершенную 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