

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт имени П.Н. Лебедева  
Российской академии наук

На правах рукописи

Трешин Илья Валерьевич

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНООТВЕРСТИЙ  
В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЁНКЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗЛУЧЕНИЕ  
ЭЛЕМЕНТАРНОЙ КВАНТОВОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 01.04.21 — Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Отделении квантовой радиофизики имени Н.Г. Басова Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель

доктор физико-математических наук **Климов Василий Васильевич**

Официальные оппоненты

**Капуткина Наталия Ефимовна**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Институт новых материалов и нанотехнологий, Кафедра физической химии, профессор.

**Вишневый Андрей Александрович**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ), Центр наноразмерной оптоэлектроники, Лаборатория нанооптики и плазмоники, научный сотрудник.

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Защита диссертации состоится «18» декабря 2017 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН, расположенном по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте по адресу: <http://www.lebedev.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 002.023.03  
доктор физико-математических наук

А.С. Золотко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертационной работы**

В настоящее время активно развиваются и создаются новые программные и технические инструменты для выявления сложных закономерностей внутри большого объёма данных. Это необходимо для автоматизации сложных процессов на производстве, для создания автоматических систем принятия решений. В связи с этим экспоненциально возрастает плотность потока информации, которую необходимо собирать, хранить и оперативно обрабатывать. Для решения подобных задач требуется создание новых более компактных, энергоэффективных, чувствительных детекторов и сенсоров, новых высокопроизводительных вычислительных систем.

Современный уровень развития технологии изготовления наноструктур позволяет искать решения для данного круга задач с помощью оптических устройств, в основе которых лежит управление распространением света в наномасштабах (нанооптика) [1 – 4]. В настоящее время активно исследуется возможность использования такого рода устройств для создания элементной базы (например, оптических нановолноводов и интерконнекторов) высокопроизводительных оптических компьютеров [5], устройств для хранения информации с высокой плотностью размещения данных [3], оптических биосенсоров для технологии секвенирования биополимеров [6].

При проектировании устройства в нанооптике важным является знание о влиянии наноструктуры на распространение света и процесс излучения элементарной квантовой системы (квантовой точки, молекулы, атома). Поэтому развитие аналитических и численных методов для решения задач об эффективном управлении распространением нанолокализованного электромагнитного излучения с помощью нанобъектов, а также о влиянии нанокружения на излучение элементарной квантовой системы, является **актуальным** как с научной, так и с практической точек зрения.

### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование оптических свойств решётки из наноотверстий и одиночного наноотверстия в металлической плёнке и возможности их применения для создания эффективных нанолокализованного источника света и планарного оптического устройства для нанооптики с асимметричным коэффициентом пропускания света, а также для эффективного управления спонтанным излучением элементарной квантовой системы.

### **Задачи диссертационной работы**

Для достижения указанной цели в рамках диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Теоретическое исследование эффекта экстраординарного пропускания света в оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых нанотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла.
2. Теоретическое исследование эффекта большой асимметрии коэффициента пропускания света с произвольной поляризацией в линейной немагнитной оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых нанотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла.
3. Теоретическое исследование скорости спонтанного излучения элементарной квантовой системы, расположенной около одиночного круглого нанотверстия в металлической плёнке.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Эффект экстраординарного пропускания света в оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых нанотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла, связан с усилением электромагнитного поля на границе между металлической плёнкой и фотонным кристаллом за счёт возбуждения оптического таммовского состояния.
2. Эффект большой асимметрии коэффициента пропускания света с произвольной поляризацией в линейной немагнитной оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых нанотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла, обусловлен двумя факторами: возбуждением в системе оптического таммовского состояния, наличием в системе нескольких побочных дифракционных максимумов.
3. Скорость спонтанного излучения элементарной квантовой системы, расположенной около одиночного круглого нанотверстия в металлической плёнке, существенно зависит от координаты её положения, величины поглощения в металлической плёнке и наличия подложки.

### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Установлено, что усиление электромагнитного поля, связанное с возникновением оптического таммовского состояния, приводит к эффекту экстраординарного пропускания света в оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых наноотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла.
2. Впервые найден и теоретически объяснён эффект большой асимметрии коэффициента пропускания света с произвольной поляризацией в линейной немагнитной оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых наноотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла.
3. Разработан подход к численному моделированию задачи о скорости спонтанного излучения элементарной квантовой системы, расположенной или около одиночной круглой апертуры в идеально проводящем бесконечно тонком плоском экране, или около одиночного круглого наноотверстия в металлической плёнке с конечными значениями проводимости и толщины. Показано существенное влияние положения элементарной квантовой системы, поглощения в металлической плёнке и наличия подложки на скорость спонтанного излучения.

### **Достоверность результатов работы**

Обоснованность и достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается достаточно хорошим согласием результатов численного моделирования с экспериментально измеренными данными для эффектов экстраординарного пропускания света [7, 8, 9] и большой асимметрии коэффициента пропускания света с произвольной поляризацией [10] в линейной немагнитной оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых наноотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла. Правильность используемых подходов для численного моделирования подтверждается совпадением результатов численных расчётов с аналитическими результатами, докладами на научных конференциях и публикациями в ведущих рецензируемых международных научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science.

## **Научная и практическая ценность диссертационной работы**

Результаты данной диссертационной работы посвящены актуальным научным проблемам, все они представляют теоретическую ценность и имеют перспективные научные и практические применения.

Эффекты экстраординарного пропускания света и большой асимметрии коэффициента пропускания света с произвольной поляризацией в линейной немагнитной оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых наноотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла, представляют большой интерес при создании нанолокализованного источника света и эффективного планарного оптического устройства для нанооптики с асимметричным коэффициентом пропускания света. Необходимость данных устройств связана с разработкой системы для хранения информации с высокой плотностью размещения данных, элементной базы для высокопроизводительного оптического компьютера. Рассмотренная оптическая система имеет достаточно простую для технологического изготовления структуру и состоит только из оптически линейных материалов.

Результаты исследования скорости спонтанного излучения элементарной квантовой системы (квантовой точки, молекулы, атома), расположенной около одиночного круглого наноотверстия в металлической плёнке, необходимы при планировании и интерпретации экспериментов по наблюдению флюоресценции одиночной молекулы, расположенной около одиночного круглого отверстия, с помощью апертурного сканирующего ближнепольного оптического микроскопа и при разработке наноустройств, основанных на управлении излучением элементарной квантовой системы с помощью наноотверстия.

## **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались автором на следующих научных конференциях:

1. ICONO / LAT 2013, International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2013), International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2013) (June 18 – 22, 2013). — Russia, Moscow.
2. VI Всероссийская молодёжная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (15 – 20 ноября 2015 года). — Россия, Москва, ФИАН.
3. 58-ая научная конференция МФТИ (23 – 28 ноября 2015 года). — Россия, Долгопрудный, МФТИ.

4. X Научно-техническая конференция молодых учёных ФГУП «ВНИИА имени Н.Л. Духова» (9 – 31 марта 2016 года). — Россия, Москва, ВНИИА.

Результаты, представленные в диссертационной работе, также докладывались автором на Научном семинаре Отделения квантовой радиофизики имени Н.Г. Басова в Физическом институте имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН). Работа автора была поддержана Учебно-научным комплексом ФИАН.

### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 научных работах, в том числе в 3 печатных работах в ведущих рецензируемых международных научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science, а также в 4 тезисах докладов в сборниках трудов и тезисов докладов научных конференций. Экспериментальные результаты, представленные в этих публикациях, получены соавторами автора диссертации.

### **Личный вклад автора**

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты были получены лично автором либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в выборе объектов исследования, постановке теоретических, экспериментальных и технологических задач, аналитическом решении и численном моделировании, а также при обсуждении и интерпретации полученных результатов, в подготовке графических материалов и написании статей по результатам исследований. Автор лично докладывал полученные результаты на научных конференциях. Непосредственно автором разработан подход к численному моделированию оптических свойств линейной немагнитной оптической системы, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых нанотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла, а также подход к численному моделированию скорости спонтанного излучения элементарной квантовой системы, расположенной около одиночного круглого нанотверстия в металлической плёнке.

Результаты экспериментальных исследований, приводимые в диссертационной работе и в научных работах [7 – 10], получены в Лаборатории лазерной спектроскопии в Институте спектроскопии РАН (ИСАН) А.Е. Афанасьевым, В.И. Балыкиным и П.Н. Мелентьевым.

Экспериментальные образцы исследуемых структур, описанных в диссертационной работе и в научных работах [7 – 10], изготовлены в Центре коллективного пользования Московского физико-технического института (государственного университета) (ЦКП МФТИ) А.А. Кузиным.

### **Структура и объём диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, благодарностей и списка цитируемой литературы. Общий объём работы составляет 137 страниц, включая 40 рисунков. Список используемой литературы состоит из 123 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована её цель, перечислены решаемые задачи. Указано, в чём заключаются научная новизна работы, её научная и практическая ценность. Сформулированы положения, выносимые на защиту, показано, чем подтверждается достоверность полученных результатов. Приведён список публикаций, которые содержат основные результаты диссертационной работы, обозначены объём, структура и краткое содержание работы.

**Глава 1** содержит обзор литературы по теме диссертационной работы. Приведено схематическое описание составных частей и принципа работы устройств нанооптики, основным элементом которых содержит одиночное наноотверстие (или массив из наноотверстий) в металлической плёнке. На Рисунке 1 показаны схематические изображения наконечника апертурного сканирующего ближнепольного оптического микроскопа и биосенсора с наноотверстием.

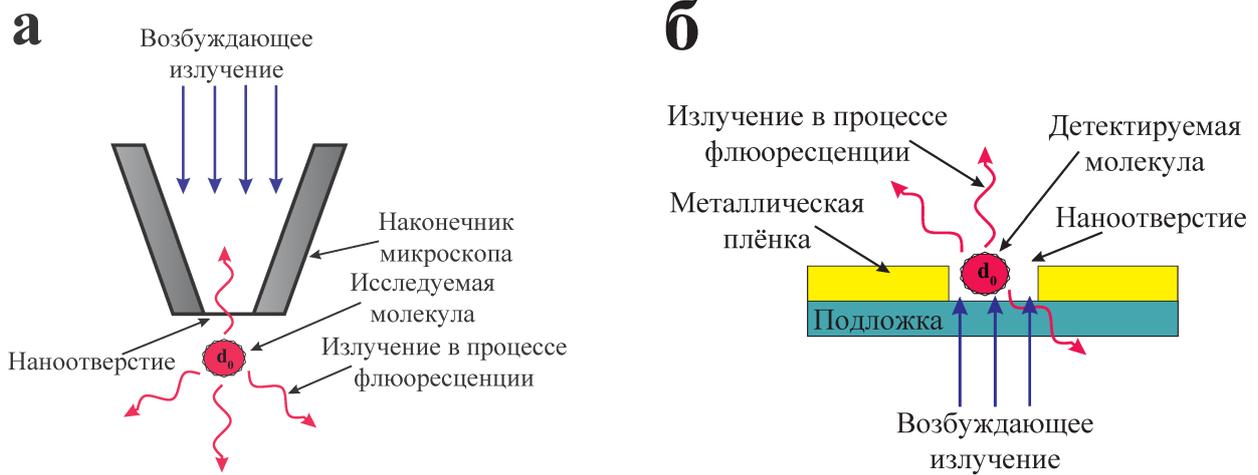


Рисунок 1 — (а) Схематическое изображение принципа работы апертурного сканирующего ближнепольного оптического микроскопа. (б) Схематическое изображение биосенсора, основанного на эффекте усиления электромагнитного поля около наноотверстия.

Также в Главе 1 представлено краткое описание научных исследований по решению задачи о дифракции электромагнитного излучения на одиночном отверстии или массиве из них, и определён эффект экстраординарного пропускания света. Приведены описание и примеры оптически асимметричной системы, то есть такого устройства, в котором коэффициент пропускания света существенно зависит от того, с какой стороны происходит облучение оптической системы. Также кратко описан метод решения задачи о скорости спонтанного излучения элементарной квантовой системы, расположенной около нанобъекта.

**Глава 2** содержит описание теоретического исследования оптических свойств линейной немагнитной оптической системы, состоящей из двумерной квадратной решётки из круглых наноотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла. Глава 2 состоит из четырёх разделов.

В **Разделе 2.1** приведено краткое описание структуры Главы 2.

В **Разделе 2.2** содержится описание теоретического исследования эффекта экстраординарного пропускания света в рассматриваемой оптической системе. Раздел 2.2 состоит из трёх подразделов.

В **Подразделе 2.2.1** приведено описание постановки решаемой задачи и модели для численного моделирования.

В основе численного моделирования лежит геометрия образца и принципиальная схема экспериментального исследования, описанного в

работах [7, 8]. Значения геометрических параметров и данные об оптических свойствах материалов, используемые в модели, если это особо не оговорено, взяты из данного исследования.

Экспериментальное исследование, описанное в работах [7, 8], проведено в Лаборатории лазерной спектроскопии в Институте спектроскопии РАН (ИСАН) А.Е. Афанасьевым, В.И. Балыкиным и П.Н. Мелентьевым. Экспериментальный образец исследуемой структуры, описанной в работах [7, 8], изготовлен в Центре коллективного пользования Московского физико-технического института (государственного университета) (ЦКП МФТИ) А.А. Кузиным.

Геометрия модели состоит из двухмерной квадратной решётки из круглых наноотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла (брэгговского зеркала). В численной модели геометрическая форма отверстия приближена усечённым конусом. При моделировании прохождения света через наноотверстия рассматривается нормальное падение плоской электромагнитной волны на всю решётку из наноотверстий.

В **Подразделе 2.2.2** рассмотрены оптические свойства сплошной металлической плёнки (т.е. без отверстий), расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла.

Данная структура является одномерной, и для исследования её оптических свойств используется полуаналитический подход, в рамках которого решение для электромагнитного поля в каждом отдельном слое представляется в виде суммы «падающей» и «отражённой» волн. Значения амплитуд этих волн находятся из условия непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного полей на границе слоёв. В результате получается система линейных алгебраических уравнений, численное решение которой реализовано в коммерческом программном пакете MATLAB.

Построены и проанализированы зависимости коэффициента отражения от длины волны и угла падения света для фотонного кристалла и металлической плёнки, расположенной на поверхности фотонного кристалла. Рассчитаны распределения электрического и магнитного полей и потока энергии внутри рассматриваемой оптической структуры. Построены зависимости коэффициента пропускания света от длины волны, угла падения и толщины металлической плёнки для металлической плёнки, расположенной на поверхности фотонного кристалла.

Показано качественное совпадение коэффициентов отражения света, полученных теоретически и экспериментально, для фотонного кристалла и металлической плёнки, расположенной на поверхности фотонного кристалла.

Выяснена физическая природа узкого резонансного пика в линии спектра отражения от металлической плёнки, расположенной на поверхности фотонного кристалла, которая связана с усилением электромагнитного поля на границе между металлической плёнкой и фотонным кристаллом за счёт возбуждения оптического таммовского состояния. Последнее приводит к увеличению коэффициента пропускания света для резонансного случая, то есть для случая возникновения оптического таммовского состояния.

В **Подразделе 2.2.3** рассмотрены оптические свойства решётки из нанотверстий в металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла.

Данная задача не имеет замкнутого аналитического решения, поэтому для её решения использовано численное моделирование, в рамках которого полная система уравнений Максвелла с заданным внешним источником тока решается численно для трёхмерной геометрии методом конечных элементов, который реализован в коммерческом программном пакете COMSOL Multiphysics.

Построены и проанализированы спектры коэффициента пропускания света через решётку из отверстий в металлической плёнке без фотонного кристалла для различных геометрических форм отверстия. Показано качественное согласие результатов эксперимента и численного расчёта для отверстия в форме цилиндра с диаметром равным 100 нм [7, 8, 9].

Построены и проанализированы спектры коэффициента пропускания света через решётку из отверстий в металлической плёнке, расположенной на поверхности фотонного кристалла, для различных геометрических форм отверстий. Показано, что в данной оптической структуре возникает экстраординарное прохождение света на резонансной длине волны. Показано качественное согласие результатов эксперимента и численного расчёта для отверстия в форме цилиндра с диаметром равным 100 нм [7, 8, 9]. Построено распределение квадрата напряжённости электрического поля внутри рассматриваемой оптической структуры для случая резонансной длины волны при нормальном угле падения света.

Показано, что эффект экстраординарного пропускания света в линейной немагнитной оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых нанотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла, связан с усилением электромагнитного поля на границе между металлической плёнкой и фотонным кристаллом за счёт возбуждения оптического таммовского состояния. Использование фотонного кристалла в резонансном случае приводит к увеличению коэффициента пропускания света

через решётку из наноотверстий в металлической плёнке примерно в 90 раз по сравнению со случаем отсутствия фотонного кристалла. Выявлено сильное влияние формы отверстия на коэффициент пропускания света.

В Разделе 2.3 приведено описание теоретического исследования эффекта большой асимметрии коэффициента пропускания света с произвольной поляризацией у решётки из наноотверстий в металлической плёнке, расположенной на поверхности фотонного кристалла. Раздел 2.3 состоит из трёх подразделов.

В Подразделе 2.3.1 содержится описание постановки решаемой задачи и модели для численного моделирования.

В основе данной модели лежит геометрия образца, в котором ранее было найдено экспериментально [7, 8] и объяснено теоретически (см. Раздел 2.2 или работу [9]) экстраординарное прохождение света через решётку из наноотверстий в металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла, при падении света со стороны одномерного фотонного кристалла.

Данная задача не имеет замкнутого аналитического решения, поэтому в основе численного моделирования лежит численное решение полной системы уравнений Максвелла с заданным внешним источником тока в частотной области методом конечных элементов. Используется реализация данного метода в коммерческом программном пакете COMSOL Multiphysics.

В исследовании коэффициент пропускания света определяется, как отношение потока энергии прошедшего света (вдоль направления перпендикулярном поверхности структуры) и полного потока падающего света. В случае «прямого» («forward») направления свет падает на структуру со стороны фотонного кристалла, и измеряется коэффициент пропускания света  $T_{\text{forward}}$ . В случае «обратного» («reverse») направления свет падает на структуру со стороны металлической плёнки, и измеряется коэффициент пропускания света  $T_{\text{reverse}}$ .

Для оптически асимметричных систем, при одинаковой интенсивности и длине волны падающего света, значения коэффициентов пропускания света в «прямом» («forward»),  $T_{\text{forward}}$ , и «обратном» («reverse»),  $T_{\text{reverse}}$ , направлениях не совпадают. Последнее означает, что основной особенностью подобного класса устройств является сильное отличие друг от друга коэффициентов пропускания света при изменении направления света, облучающего систему.

Асимметрию коэффициента пропускания света через рассматриваемую оптическую систему можно характеризовать коэффициентом асимметрии, определённым отношением  $T_{\text{forward}} / T_{\text{reverse}}$ .

В Подразделе 2.3.2 проведён теоретический анализ причины возникновения асимметрии коэффициента пропускания света.

Для нахождения зависимости коэффициента асимметрии ( $T_{\text{forward}} / T_{\text{reverse}}$ ) от длины волны падающего света и диаметра отверстий в металлической плёнке проведено численное моделирование для различных геометрий задачи.

Показано, что поверхность коэффициента асимметрии имеет чётко выраженный глобальный максимум для диаметра отверстия равного 150 нм. В области резонанса по длине волны (когда длина волны падающего света приблизительно равна 800 нм) для маленьких и больших (по сравнению со 150 нм) значений диаметра отверстия отношение между коэффициентами пропускания света (или асимметрия) убывает.

Для понимания причины происхождения максимума коэффициента асимметрии проведено сравнение спектров коэффициента асимметрии ( $T_{\text{forward}} / T_{\text{reverse}}$ ), коэффициента пропускания света в «прямом»  $T_{\text{forward}}$  и «обратном»  $T_{\text{reverse}}$  направлениях, коэффициента пропускания света структуры без отверстий. Также проведён анализ распределения энергии прошедшего света по дифракционным лепесткам диаграммы направленности  $T_{\text{forward},nm}$  и  $T_{\text{reverse},nm}$ , где  $\sum_{nm} T_{\text{forward},nm} = T_{\text{forward}}$  и  $\sum_{nm} T_{\text{reverse},nm} = T_{\text{reverse}}$ ,  $n$  и  $m$  — целые числа. Построена зависимость коэффициента асимметрии прошедшего света от периода квадратной решётки из наноотверстий в металлической плёнке для фиксированных значений диаметра отверстия и длины волны падающего света.

Показано, что эффект большой асимметрии коэффициента пропускания света с произвольной поляризацией в линейной немагнитной оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых наноотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла, обусловлен двумя факторами: возбуждением в системе оптического таммовского состояния, наличием в системе нескольких побочных дифракционных максимумов.

Также показано, что при наличии асимметрии коэффициента пропускания света, принцип взаимности по лемме Лоренца для рассматриваемой оптической системы выполняется в пределах точности численного моделирования, и парциальные коэффициенты пропускания света  $T_{\text{forward},00}$  и  $T_{\text{reverse},00}$  (в главном дифракционном лепестке) совпадают друг с другом, несмотря на то, что при математически строгом доказательстве леммы Лоренца о взаимности для произвольного бесконечного объекта возникают существенные трудности.

В Подразделе 2.3.3 приведено описание методики проведения и анализа результатов реального физического эксперимента по подтверждению

асимметрии коэффициента пропускания света в рассматриваемой оптической системе.

Соответствующие экспериментальные измерения, описанные в работе [10], проведены в Лаборатории лазерной спектроскопии в Институте спектроскопии РАН (ИСАН) А.Е. Афанасьевым, В.И. Балыкиным и П.Н. Мелентьевым. Экспериментальный образец исследуемой структуры, описанной в работе [10], изготовлен в Центре коллективного пользования Московского физико-технического института (государственного университета) (ЦКП МФТИ) А.А. Кузиным.

Измерения проводились для двух типов образцов: металлическая плёнка из золота с наноотверстиями, расположенная на поверхности подложки из кварца; металлическая плёнка из золота с наноотверстиями, расположенная на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла. Металлические плёнки и массивы из наноотверстий в обоих образцах одинаковые. Для обоих образцов измерялось излучение, прошедшее через образец, и сравнивалась величина прошедшего излучения в «прямом» и «обратном» направлениях.

Эффект асимметрии коэффициента пропускания света продемонстрирован визуально для образца, состоящего из металлической плёнки с отверстиями, расположенной на поверхности фотонного кристалла. Эффект наблюдается как для случая освещения оптической системы лазерным лучом, так и для случая использования широкополосного светового источника излучения.

Также были проведены количественные измерения спектра коэффициента пропускания света перфорированной металлической плёнки, расположенной на поверхности фотонного кристалла, в «прямом» («forward») и в «обратном» («reverse») направлениях. Для измерения спектра пропускания света в качестве источника излучения использовалась лампа накаливания с широким и гладким спектром излучения.

Теоретическое исследование предсказывает резонансный характер оптической асимметрии для перфорированной плёнки, расположенной на поверхности фотонного кристалла. В эксперименте также наблюдается резонанс в области длины волны, которой соответствует возбуждение оптического таммовского состояния в исследуемом образце. Максимальное значение асимметрии коэффициента пропускания света достигается в резонансе, и его теоретическое значение для рассматриваемой оптической системы составляет величину 21. Экспериментально измеренное значение составляет величину 31 [10]. Возникновение отличия может быть вызвано наличием

погрешности при технологическом изготовлении перфорированной металлической плёнки, расположенной на поверхности фотонного кристалла.

В Разделе 2.4 сформулированы основные результаты, полученные в Главе 2.

Глава 3 содержит описание теоретического исследования влияния одиночного круглого нанотверстия в плоской металлической плёнке на изменение скорости спонтанного излучения элементарной квантовой системы (квантовой точки, молекулы, атома).

В Главе 3 рассматривается случай слабого взаимодействия молекулы с электромагнитным полем, рассеянным нанотверстием, поэтому нахождение скорости спонтанного излучения молекулы, расположенной около нанотверстия, сводится к решению классической задачи о дифракции электромагнитного поля осциллирующего дипольного источника (с оптической частотой  $\omega_0$  и с дипольным моментом перехода  $\mathbf{d}_0$ ) на нанотверстие.

В Разделе 3.1 приведено краткое описание структуры Главы 3.

В Разделе 3.2 содержится описание детального теоретического анализа изменения скорости спонтанного излучения элементарной квантовой системы, расположенной около одиночной круглой апертуры в идеально проводящем бесконечно тонком плоском экране. Раздел 3.2 состоит из пяти подразделов.

В Подразделе 3.2.1 приведено описание постановки решаемой задачи.

В Подразделе 3.2.2 содержится описание аналитического метода решения в рамках квазистатического приближения.

В Подразделе 3.2.3 приведено описание аналитического метода решения с учётом эффекта запаздывания.

В Подразделе 3.2.4 приведено описание метода численного моделирования задачи с учётом эффекта запаздывания.

Аналитическое решение задачи о спонтанном излучении элементарной квантовой системы, расположенной около круглой апертуры с радиусом  $a$  в идеально проводящем бесконечно тонком экране, с учётом эффекта запаздывания, описанное в Подразделе 3.2.3, опирается на использование сфероидальных функций. Вычисление последних до сих пор является не простой задачей. Поэтому разработан численный метод решения с учётом эффекта запаздывания задачи об изменении скорости спонтанного излучения молекулы, расположенной около круглой апертуры в идеально проводящем бесконечно тонком плоском экране. Метод основан на численном решении полной системы уравнений Максвелла с заданным внешним осциллирующим дипольным источником тока методом конечных элементов. Для этого использована

реализации метода конечных элементов в коммерческом программном пакете COMSOL Multyphysics.

В **Подразделе 3.2.5** содержится анализ и сравнение результатов, полученных аналитическими методами решения (см. Подраздел 3.2.2, Подраздел 3.2.3) и численным моделированием (см. Подраздел 3.2.4).

Показано, что при удалении молекулы от центра апертуры на расстояние большее, чем  $3a$ , влияние апертуры становится очень слабым. В этом случае для вычисления скорости спонтанного излучения молекулы хорошо работает простое выражение, которое описывает излучение молекулы, расположенной около идеально проводящего плоского экрана без апертуры. Если расстояние менее, чем радиус отверстия  $a$ , то для описания процесса хорошо работает аналитическое решение в рамках квазистатического приближения, рассмотренное в Подразделе 3.2.2. Для описания излучения молекулы на переходном отрезке от  $a$  до  $3a$  требуется использовать либо аналитический расчёт с учётом эффекта запаздывания с применением сфероидальных функций (см. Подразделе 3.2.3), либо проводить численное моделирование. Заметим, что при увеличении длины волны излучения, комбинация аналитического решения в рамках квазистатического приближения и аналитического решения для случая идеально проводящего плоского экрана без апертуры становится всё более точной.

В **Разделе 3.3** проведено описание теоретического исследования изменения скорости спонтанного излучения элементарной квантовой системы, расположенной около одиночного круглого наноотверстия в металлической плёнке с конечными значениями проводимости и толщины. Раздел 3.3 состоит из трёх подразделов.

Использование приближения идеально проводящего бесконечно тонкого экрана для объяснения реальных физических экспериментов по наблюдению флюоресценции одиночной молекулы, расположенной около наноотверстия в металлической плёнке, очень часто обладает только оценочным характером. В этом случае важную роль начинает играть конечная проводимость металла и конечная толщина металлической плёнки, в которой сделано отверстие. Учёт последних факторов приводит к возможности возбуждения поверхностного плазмона на границе между металлической плёнкой и диэлектрическим слоем, а также к тепловым потерям в реальном металле (т.е. система обладает нерадиационным каналом распада).

В **Подразделе 3.3.1** приведено описание постановки решаемой задачи и модели для численного моделирования.

В **Подразделе 3.3.2** рассмотрен случай спонтанного излучения молекулы, расположенной около одиночного круглого отверстия в металлической плёнке, расположенной в вакууме.

Показано, что нерадиационный канал спонтанного распада молекулы, который в данной постановке включает в себя тепловое поглощение в металле и возбуждение поверхностного плазмона, даёт существенный вклад в полную скорость спонтанного излучения молекулы, расположенной около наноотверстия. При расположении молекулы около или внутри отверстия для случая горизонтальной ориентации дипольного момента перехода этот вклад, примерно, в 4 раза больше, чем для случая вертикальной ориентации дипольного момента. (Ориентация дипольного момента перехода  $\mathbf{d}_0$  определяется относительно оси  $z$  симметрии круглого отверстия, то есть для случая вертикальной ориентации  $\mathbf{d}_0$  направлен параллельно оси  $z$ , а для случая горизонтальной —  $\mathbf{d}_0$  направлен перпендикулярно оси  $z$ .)

В **Подразделе 3.3.3** содержится анализ случая спонтанного излучения молекулы, расположенной около одиночного круглого отверстия в металлической плёнке, расположенной на поверхности подложки из диэлектрика.

Показано, что наличие подложки может кардинально изменить соотношение между радиационным и нерадиационным каналами спонтанного излучения молекулы. Особенно ярко этот эффект проявляется при возбуждении в системе «вытекающей» поверхностной волны.

В **Разделе 3.4** сформулированы основные результаты, полученные в Главе 3. Приведённые результаты позволяют получить достаточно ясную картину о спонтанном излучении молекулы, расположенной около круглого наноотверстия в металлической плёнке.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты:

1. Объяснён эффект экстраординарного пропускания света в оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых наноотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла, который связан с усилением электромагнитного поля на границе между металлической плёнкой и фотонным кристаллом за счёт возбуждения оптического таммовского состояния. Использование фотонного кристалла в резонансном случае приводит к увеличению коэффициента пропускания света через решётку из наноотверстий в металлической плёнке примерно в 90 раз по сравнению со случаем отсутствия фотонного кристалла. Полученные результаты численного расчёта для наноотверстия цилиндрической формы с диаметром равным 100 нм качественно согласуются с результатами эксперимента [7, 8, 9].
2. Теоретически предсказан и объяснён эффект большой асимметрии коэффициента пропускания света с произвольной поляризацией в линейной немагнитной оптической системе, состоящей из двухмерной квадратной решётки из круглых наноотверстий в плоской металлической плёнке, расположенной на поверхности планарного диэлектрического фотонного кристалла, который обусловлен двумя факторами: возбуждением в системе оптического таммовского состояния, наличием в системе нескольких побочных дифракционных максимумов. Теоретически предсказанный эффект подтверждён экспериментально в работе [10], в которой показано, что величина коэффициента пропускания света при изменении направления облучения системы может отличаться в 31 раз.
3. Разработан подход к численному моделированию задачи о скорости спонтанного излучения элементарной квантовой системы, расположенной или около одиночной круглой апертуры в идеально проводящем бесконечно тонком плоском экране, или около одиночного круглого наноотверстия в металлической плёнке с конечными значениями проводимости и толщины. Показано существенное влияние положения элементарной квантовой системы, поглощения в металлической плёнке и наличия подложки на скорость спонтанного излучения.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 7 научных работах, в том числе в 3 печатных работах в ведущих рецензируемых международных научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science, а также в 4 тезисах докладов в сборниках трудов и тезисов докладов научных конференций. Экспериментальные результаты, представленные в этих публикациях, получены соавторами автора диссертации.

### Список опубликованных статей в рецензируемых научных журналах:

1. Treshin, I.V. Optical Tamm state and extraordinary light transmission through a nanoaperture / I.V. Treshin, V.V. Klimov, P.N. Melentiev, V.I. Balykin // *Phys. Rev. A.* — 2013. — Т. 88. — С. 023832.
2. Klimov, V.V. Optical Tamm state and giant asymmetry of light transmission through an array of nanoholes / V.V. Klimov, I.V. Treshin, A.S. Shalin, P.N. Melentiev, A.A. Kuzin, A.E. Afanasiev, V.I. Balykin // *Phys. Rev. A.* — 2015. — Т. 92. — С. 063842.
3. Klimov, V.V. Spontaneous decay rate of an excited molecule placed near a circular aperture in a perfectly conducting screen: an analytical approach / V.V. Klimov, D.V. Guzatov, I.V. Treshin // *Phys. Rev. A.* — 2015. — Т. 91. — С. 023834.

### Список опубликованных тезисов докладов в сборниках трудов и тезисов докладов научных конференций:

1. Treshin, I.V. Optical Tamm states and extraordinary light transmission through nanohole in metallic film / I.V. Treshin, V.V. Klimov, P.N. Melentiev, V.I. Balykin // *ICONO / LAT 2013, International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2013), International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2013) (June 18 – 22, 2013), Technical digest.* — Russia, Moscow. — IThH5.
2. Климов, В.В. Оптическое таммовское состояние и большая асимметрия коэффициента пропускания света через решётку из наноотверстий / В.В. Климов, И.В. Трешин, А.С. Шалин, П.Н. Мелентьев, А.А. Кузин, А.Е. Афанасьев, В.И. Балыкин // VI Всероссийская молодёжная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (15 – 20 ноября 2015 года), Сборник трудов. — Россия, Москва, ФИАН. — С. 56.

3. Трешин, И.В. Спонтанное излучение молекулы, расположенной около одиночного круглого отверстия в металлической плёнке / И.В. Трешин, В.В. Климов, Д.В. Гузатов // 58-ая научная конференция МФТИ (23 – 28 ноября 2015 года), Сборник тезисов. — Россия, Долгопрудный, МФТИ. — URL: [http://conf58.mipt.ru/static/reports\\_pdf/860.pdf](http://conf58.mipt.ru/static/reports_pdf/860.pdf).
4. Трешин, И.В. Оптическое таммовское состояние и большая асимметрия коэффициента пропускания света через решётку из наноотверстий / И.В. Трешин, В.В. Климов, А.С. Шалин, П.Н. Мелентьев, А.А. Кузин, А.Е. Афанасьев, В.И. Балыкин // X Научно-техническая конференция молодых учёных ФГУП «ВНИИА имени Н.Л. Духова» (9 – 31 марта 2016 года), Сборник тезисов. — Россия, Москва, ВНИИА. — С. 87.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ЦИТИРОВАННОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ**

1. Novotny, L. Principles of nano-optics / L. Novotny, B. Hecht. — USA, NY, New York : Cambridge University Press, 2006.
2. Klimov, V.V. Nanoplasmonics / V.V. Klimov. — Singapore : Pan Stanford Publishing, 2014.
3. Chon, J.W.M. Nanoplasmonics: advanced device applications / J.W.M. Chon, K. Iniewski. — USA, FL, Boca Raton : CRC Press, Taylor and Francis Group, 2013.
4. Schuller, J.A. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation / J.A. Schuller, E.S. Barnard, W. Cai, Y.C. Jun, J.S. White, M.L. Brongersma // Nat. Mater. — 2010. — Т. 9, № 3. — С. 193 – 204.
5. Vlasov, Y.A. Silicon integrated nanophotonics: from fundamental science to manufacturable technology (Presentation Video) / Y.A. Vlasov // Proc. SPIE, Silicon Photonics X. — 2015. — Т. 9367. — С. 93671X.
6. Shendure, J. Next-generation DNA sequencing / J. Shendure, H. Ji // Nat. Biotechnol. — 2008. — Т. 26, № 10. — С. 1135 – 1145.
7. Melentiev, P.N. Single nanohole and photonic crystal: wavelength selective enhanced transmission of light / P.N. Melentiev, A.E. Afanasiev, A.A. Kuzin, A.V. Zablotskiy, A.S. Baturin, V.I. Balykin // Opt. Express. — 2011. — Т. 19, № 23. — С. 22743 – 22754.
8. Melentiev, P.N. Extremely high transmission of light through a nanohole inside a photonic crystal / P.N. Melentiev, A.E. Afanasiev, A.A. Kuzin, A.V. Zablotskiy, A.S. Baturin, V.I. Balykin // J. Exp. Theor. Phys. — 2012. — Т. 115, № 2. — С. 185 – 193.

9. Treshin, I.V. Optical Tamm state and extraordinary light transmission through a nanoaperture / I.V. Treshin, V.V. Klimov, P.N. Melentiev, V.I. Balykin // *Phys. Rev. A.* — 2013. — T. 88. — C. 023832.
10. Klimov, V.V. Optical Tamm state and giant asymmetry of light transmission through an array of nanoholes / V.V. Klimov, I.V. Treshin, A.S. Shalin, P.N. Melentiev, A.A. Kuzin, A.E. Afanasiev, V.I. Balykin // *Phys. Rev. A.* — 2015. — T. 92. — C. 063842.