

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА



на правах рукописи

Гартман Александра Дмитриевна

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ
ФОТОННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ
И НИТРИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОМ
НА СУБВОЛНОВЫХ МАСШТАБАХ

Специальность: 1.3.6. Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре нанофотоники физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Федянин Андрей Анатольевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор РАН

Официальные оппоненты: **Тихонова Ольга Владимировна**
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и
микроэлектроники физического факультета Московского
государственного университета имени М.В. Ломоносова

Шерстюк Наталия Эдуардовна
доктор физико-математических наук, доцент
профессор кафедры наноэлектроники Института перспективных
технологий и индустриального программирования
МИРЭА–Российского технологического университета

Пикулин Александр Викторович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории лазерной нано-
модификации материалов отделения нелинейной динамики
и оптики Института прикладной физики имени А.В.
Галонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН)

Защита диссертации состоится «5» октября 2023 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета МГУ.013.6 на физическом факультете Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2., физическая аудитория имени Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский пр-т, д. 27) и в сети Интернет: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.6/2598>

Автореферат разослан « » августа 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета МГУ.013.6,
доктор физико-математических наук, доцент
kosareva@physics.msu.ru



О. Г. Косарева

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена численному моделированию и экспериментальному исследованию оптических эффектов в наноразмерных фотонных структурах для управления светом на субволновых масштабах. Разрабатывается оптимальный дизайн резонансной кремниевой метаповерхности (КМП) для пространственного разделения скалярных пучков типа Лагерра – Гаусса с орбитальным угловым моментом (ОУМ). Особое внимание уделяется созданию оптимального дизайна резонансной волноводной системы (РВС) на основе кремниевого волновода, центральная часть которого состоит из наноантенн с резонансами типа Ми и нанесенной на них тонкой пленкой селенида индия, и исследованию их эффективной взаимосвязи. Отдельно рассматривается использование нитрида кремния в качестве материала для создания на его основе резонансного волновода с тонкими пленками диалкоксидов переходных металлов (ДПМ).

Актуальность выбранной темы обусловлена растущим интересом к нанофотонике как для фундаментальных исследований, так и для прикладных задач по управлению излучением на микро- и наномасштабах в рамках интегрального оптического чипа, который может быть изготовлен по стандартам современной микроэлектроники. Такие оптические устройства за счет своих уникальных свойств часто превосходят возможности объемных аналогов по управлению излучением и открывают широкие перспективы для масштабирования. Отдельной областью фотоники, которая представляет особый интерес для задач квантовой криптографии, является исследование электромагнитного излучения с орбитальным угловым моментом (ОУМ) – составляющей частью углового момента светового луча, зависящей от пространственного распределения поля в каждой точке пространства. Примером излучения с орбитальным угловым моментом являются скалярные световые пучки Лагерра – Гаусса. В свою очередь, было доказано, что повышение размерности пространства за счет использования таких пучков не только способствует росту плотности кодирования оптической информации в одном канале, но и увеличивает секретность связи, делая его более устойчивым. Это связано в первую очередь с созданием надежных и защищенных широкополосных каналов связи для передачи и обработки информации. Однако несмотря на все преимущества работы со светом, обладающим таким большим числом степеней свободы, в настоящий момент существует не так много устройств, реализованных на компактной интегральной платформе. В связи с этим актуальным является поиск решений,

позволяющих осуществлять управление светом с ОУМ и основанных на новых подходах и принципах. Одной из ключевых задач в этой области является реализация пространственного разделения скалярных световых пучков с различными значениями ОУМ. Этого можно достичь с помощью планарных оптических устройств — метаповерхностей, представляющих собой двумерные массивы резонансных наноструктур, специально спроектированных для создания сложного фазового профиля ради эффективного управления и генерации высокоразмерных запутанных квантовых состояний.

Альтернативным решением в задачах по управлению светом на субволновых масштабах является использование интегральных оптических элементов — таких как оптические волноводы, адиабатические Y-разветвители, интерференционные делители и мультиплексоры. В связи с этим, большинство современных работ в области интегральной оптики направлены на разработку оптических элементов, совместимых с комплементарной полупроводниковой технологией (КМОП), для перехода классических оптических систем на наномасштаб. Однако проблема эффективной реализации и фабрикации подобных наноструктур до конца не решена. Высокие потери используемых материалов и сложность миниатюризации оптических структур приводят к необходимости поиска альтернативных методов и подходов к решению данной задачи. С этой точки зрения использование диэлектрических наноструктур для эффективного контроля света и управления им является привлекательным для широкого класса научных исследований и технических приложений, чем и обусловлен выбор данной тематики работы.

Цели и задачи

Цель диссертационной работы заключается в разработке и создании оптических кремниевых метаповерхностей для пространственного разделения световых пучков с различными значениями орбитального углового момента, а также волноводных структур на основе резонансных наночастиц из кремния и нитрида кремния для эффективной оптической связи с излучателями в тонких пленках прямозонных полупроводников.

В рамках поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

- Выполнить численное моделирование пространственного разделения скалярных пучков с различными значениями ОУМ при помощи фазовых поляризационно — нечувствительных кремниевых метаповерхностей.
- Провести экспериментальное определение и численный расчет эффек-

тивности оптической связи волноводных мод в цепочках кремниевых нанодисков и источников люминесценции в тонких пленках селенида индия.

- Реализовать численное моделирование эффекта люминесценции, связанной с межслоевыми экситонными излучателями, в гетероструктурах из монослоев дихалькогенидов переходных металлов на брэгговском волноводе из нитрида кремния.

Объект и предмет исследования

В роли объектов исследования в данной работе выступают тонкие пленки халькогенидов переходных металлов, монослойные гетероструктуры ДПМ, межслоевые экситонные переходы в тонких пленках, волноводные структуры на основе нанорезонаторов из полупроводниковых материалов (Si, SiN), а также диэлектрические метаповерхности, состоящие из нанодисков определенной геометрии, коллективные магнитные дипольные резонансы типа Ми и электромагнитное излучение с ОУМ. Предметом исследования являются оптические эффекты в РВС и пространственное разделение света с разными значениями ОУМ при помощи поляризационно-независимых диэлектрических метаповерхностей определенной топологии.

Методология диссертационного исследования

В работе используются следующие методы исследования:

- Численные расчеты по оптимизации геометрических параметров и исследования оптических свойств РВС и КМП были проведены методом конечных разностей во временной области (в коммерческом программном обеспечении Ansys Lumerical FDTD).
- Численное моделирование разделения скалярных пучков с ОУМ в пространстве с помощью КМП было проведено методом решения уравнений для дифракции Фраунгофера и реализовано в программном пакете Zemax Optic Studio.
- Мморфология экспериментальных образцов была исследована при помощи оптической, атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии.
- Характеризация резонансной волноводной структуры с тонкими пленками InSe проводилась методом спектроскопии комбинационного рассеяния.

- Для проведения экспериментов с резонансной волноводной структурой использовалась экспериментальная установка для микрофотолюминесценции с использованием гелиевого криостата проточного типа.
- Для исследования эффективности связи РВС с экситонными излучателями в тонких пленках InSe была использована экспериментальная установка оптической микроспектроскопии в схеме на отражение.

Научная новизна

- Впервые численно реализована пространственная селекция мод Лаггера-Гаусса с помощью субволновой полупроводниковой структуры, состоящей из нанодисков одинакового размера. В отличие от ранее предложенных аналогов наблюдаемый эффект не зависит от поляризации падающего излучения.
- В отличие от ранее изученных диэлектрических волноводов, в данной работе впервые предлагается объединение резонансного волновода с тонкой пленкой селенида индия. Особенность этой системы в том, что резонанс кремниевых нанодисков совпадает с экситонным переходом в тонких пленках халькогенида. Этот новый подход позволяет добиться эффективной генерации света на интегральном фотонном чипе.
- Впервые численно продемонстрировано эффективное заведение излучения люминесценции двумерной гетероструктуры на интегральный фотонный чип с помощью массива специально спроектированных диэлектрических наночастиц. Такое объединение монослоев дихалькогенидов переходных металлов с брэгговским волноводом в резонансную структуру ранее не изучалось.

Теоретическая и практическая значимость

Представленные в диссертационной работе результаты могут использоваться для разработки и создания оптических устройств, реализованных на интегральной платформе, для управления светом на наномасштабах. Кроме того, использование диэлектрических метаповерхностей, проводящих пространственное разделение электромагнитного излучения с ОУМ, позволит повысить надежность и защиту широкополосных каналов связи для передачи и обработки информации.

Положения, выносимые на защиту

1. Поляризационно-независимая кремниевая метаповерхность на основе нанодисков, поддерживающих одновременное возбуждение электрического и магнитного резонансов типа Ми, позволяет пространственно разделять скалярные пучки с различными значениями орбитального углового момента.
2. Возбуждение магнитного дипольного резонанса типа Ми в кремниевых нанодисках, формирующих волноводную цепочку, усиливает фотолюминесценцию тонких пленок селенида индия, размещенных на ней, и приводит к усилению перекачки излучения люминесценции в волновод.
3. Возбуждение дефектной ТМ моды брэгговского волновода из Ми-резонансных наночастиц приводит к усилению люминесценции межслоевых экситонных источников в гетероструктурах из монослоев диалкогенидов переходных металлов, расположенных на волноводе. При этом, возбуждение магнитного дипольного резонанса в наночастицах приводит к усилению перекачки излучения люминесценции в волновод.

Достоверность результатов

Результаты экспериментальных исследований были получены на современном оборудовании, воспроизводятся при повторении измерений, находятся в согласии с результатами расчетов и не противоречат существующим литературным данным. Результаты численного моделирования сохраняются при уменьшении шага сетки и согласуются с полученными аналитически. Указанные факторы свидетельствуют о высокой степени достоверности представленных результатов.

Апробация работы

Результаты, отраженные в настоящей диссертации, представлены в 11 докладах на международных научных конференциях: 2-я Российская школа по квантовым технологиям – 2019, 9th German-Russian Week of the Young Researcher at Moscow State University Focuses on Quantum Physics – 2019, METANANO-2020 и -2021, «Ломоносов»-2020, -2021, -2022, -2023, Молодежная школа-конференция «Наноструктуры. Свойства и применение» – 2022, School on Advanced Light-Emitting and Optical Materials – 2022, 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 61-я Международная научная студенческая конференция 2023 (МНСК-2023) и других конференциях, а также

обсуждались на научных семинарах кафедры нанофотоники физического факультета МГУ.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-32-90223 , 20-02-00897, 21-52-12036 и стипендии программы по поддержке молодых ученых «УМНИК».

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 10 печатных работах, в том числе 3 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих «Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова», 1 патенте и 6 публикациях в сборниках трудов и тезисов конференций. Список работ автора приведён в конце автореферата перед списком литературы.

Личный вклад

Все представленные в диссертационной работе результаты получены автором лично либо при его определяющем участии. Личный вклад автора включает в себя постановку задачи, проведение аналитических и численных расчетов, сборку и юстировку экспериментальных установок, автоматизацию измерений, получение и обработку экспериментальных данных, работу над публикациями.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, списка обозначений, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем работы составляет 142 страницы, включающие 84 рисунка и 3 таблицы. Библиография включает 162 наименования на 13 страницах.

Содержание работы

Первая глава содержит обзор литературы о физических и оптических свойствах двумерных материалов – таких, как метаповерхности и пленки халькогенидов переходных металлов. Подробно рассмотрены существующие типы метаповерхностей, принципы их работы и области применимости, в частности – для приложений квантовой оптики и криптографии. Описаны физические принципы и свойства скалярных пучков с орбитальным угловым моментом для приложений в квантовой оптике. Рассмотрены физические и оптические свойства межслоевых экситонных переходов в тонких пленках дихалькогенидов переходных металлов.

Вторая глава посвящена численному исследованию кремниевой метаповерхности (КМП) для пространственного разделения скалярных пучков с

ОУМ. Схематичное изображение принципа пространственного разделения излучения, прошедшего через КМП, представлено на рис. 1. Скалярный пучок с различными значениями ОУМ, проходя через КМП, разделяется в пространстве на две компоненты, соответствующие $l = -1$ и $l = 1$. Как было отмечено выше, использование таких оптических структур, как КМП, для решения данной задачи обусловлено их компактным размером, простотой изготовления и совместимостью с современной технологией производства микроэлектронной промышленности. В отличие от ранее представленных аналогов [1], предложенная в данной работе КМП со сложным поверхностным профилем является поляризационно-независимой. В начале главы описано численное моделирование диэлектрической КМП, состоящей из Ми-резонансных кремниевых нанодисков.

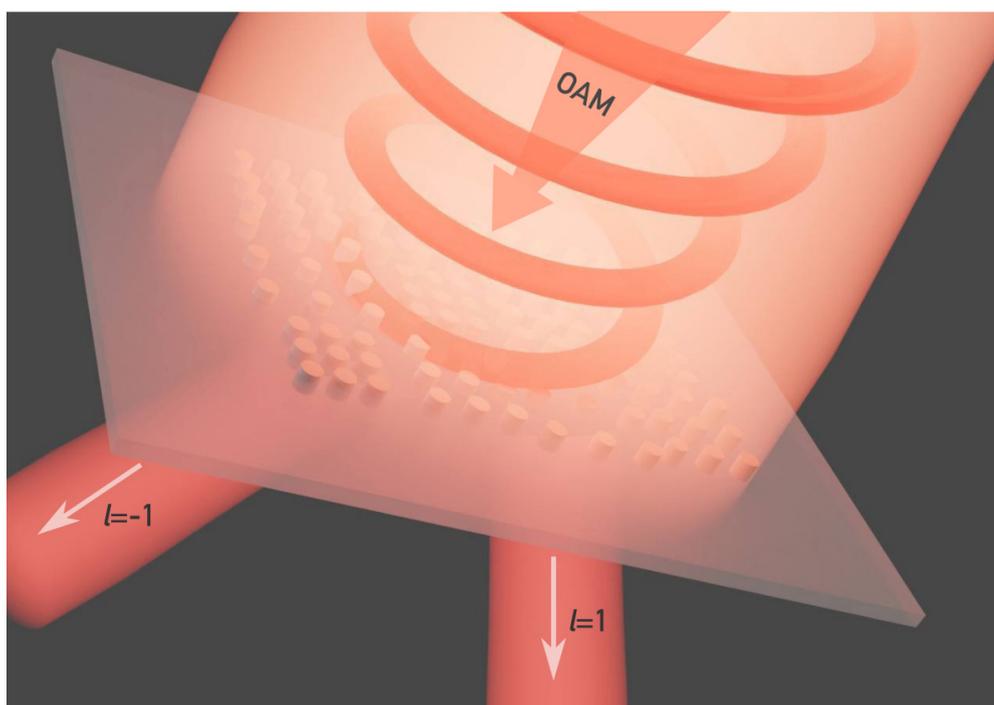


Рис. 1: Схематичное изображение принципа работы резонансной кремниевой метаповерхности для разделения скалярных пучков с разными значениями ОУМ (ОАМ – orbital angular momentum) в пространстве.

Для того, чтобы осуществить разделение скалярных пучков с разными значениями ОУМ в пространстве с помощью КМП, необходимо обеспечить выполнение ряда условий, накладываемых на ее фазовый профиль. Во-первых, необходимо реализовать такую геометрию фазовой маски КМП, чтобы на выбранной (рабочей) длине волны коэффициент пропускания был

высоким (наиболее приближенным к 1) и не изменялся для всего диапазона вариаций геометрических параметров структуры. Во-вторых, необходимо обеспечить возможность изменения фазы прошедшего электромагнитного излучения в диапазоне от 0 до 1.5π радиан.

Основываясь на этих требованиях, в программном пакете Lumerical FDTD методом конечных разностей по временной области было проведено численное моделирование зависимостей коэффициента пропускания (рис. 2(а)) и фазы прошедшей волны (рис. 2(б)) для кремниевых нанодисков высотой $h = 130$ нм и диаметром $d = 210$ нм. Данный выбор геометрических параметров обусловлен наличием перекрытия электрического и магнитного дипольных резонансов у кремниевых нанодисков в заданном спектральном диапазоне [2].

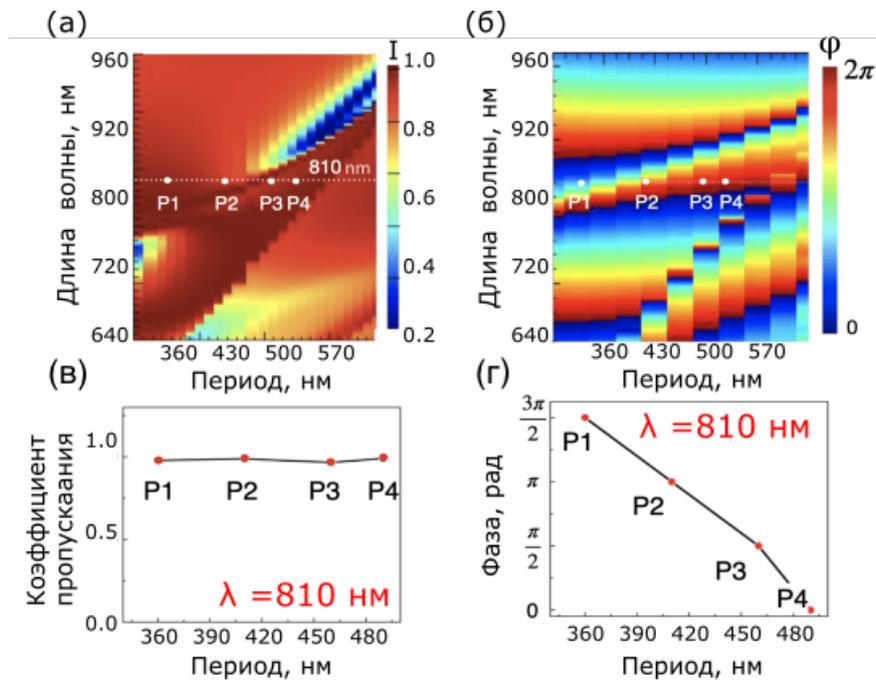


Рис. 2: (а, б) Графики зависимостей коэффициента пропускания и фазы прошедшей волны для ансамбля кремниевых нанодисков высотой $h = 30$ нм и диаметром $d = 210$ нм от длины волны падающего электромагнитного излучения и периода расположения нанорезонаторов; (в, г) графики зависимостей коэффициента пропускания и фазового профиля на выделенной длине волны $\lambda = 810$ нм для ансамбля кремниевых нанодисков высотой $h = 130$ нм и диаметром $d = 210$ нм в зависимости от периода их расположения.

На выбранной длине волны 810 нм были подобраны четыре значения периода кремниевых нанодисков, для которых коэффициент пропускания

принимает максимально близкое к единице значение (рис. 2(в)), а фаза прошедшей волны (рис. 2(г)) изменяется в диапазоне от 0 до 1.5π . Выбор длины волны обусловлен тем, что во многих работах квантовое излучение с ОУМ реализуется на базе диодного лазера с длиной волны 405 нм и нелинейного кристалла – например, кристалла титанил-фосфата калия (KTiOPO_4), настроенного в режиме коллинеарной генерации бифотонов [3].

Аналитически, задача о разделении излучения с различными значениями ОУМ в пространстве имеет классическое решение, которое может быть описано как [4]:

$$\phi_1(x, y) = \frac{2\pi a}{\lambda f} \left[y \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - x \ln\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{b}\right) + x \right], \quad (1)$$

$$\phi_2(x, y) = -\frac{2\pi ab}{\lambda f} \exp\left(-\frac{U}{a}\right) \cos\left(\frac{V}{a}\right). \quad (2)$$

Первое преобразование совершает конформное отображение координат $(x; y) \rightarrow (u; v)$, переводя спиральный фазовый профиль в линейный градиент фазы, где $u = -a \ln(\sqrt{x^2 + y^2}/b)$, $v = a \arctan(y/x)$, $a = g/2\pi$, а g – поперечный размер преобразованного луча, а параметр b отвечает смещению сформированного изображения в направлении u . Это соответствует преобразованию входного излучения, состоящего из концентрических окружностей, в выходное изображение из параллельных линий. Сопоставление каждой входной окружности с выходной линией дает необходимое отклонение в направлении луча и, следовательно, фазовый профиль преобразующего оптического элемента. Однако возникающее в результате изменение длины оптического пути означает, что преобразование (1) вносит фазовое искажение в профиль излучения. Для его корректировки используется преобразование (2). Таким образом система изменения фазы электромагнитного излучения спирального профиля включает в себя два преобразования: первое для преобразования координат, а второе – для коррекции фазовых искажений [5].

Согласно преобразованиям (1) и (2) была подобрана фазовая маска для КМП. Для этого в программном пакете *Wolfram Mathematica* была построена поверхность, заданная преобразованием (1) и отображающая изменение фазового профиля в диапазоне от 0 до 200π радиан. Расчетная область была задана в соответствии с реальными размерами структур и охватывала диапазон 200×200 мкм² (см. рис. 3(а)). Затем эта поверхность была разбита на равные области – квадраты размером 20×20 мкм², внутри которых

было проведено усреднение значений фазы и нормировка по диапазону от 0 до 1.5π радиан. Каждой такой области было поставлено в соответствие определенное значение периода кремниевых нанодисков, полученное ранее и наилучшим образом описывающее изменение фазы этого квадрата поверхности (рис. 3(б)).

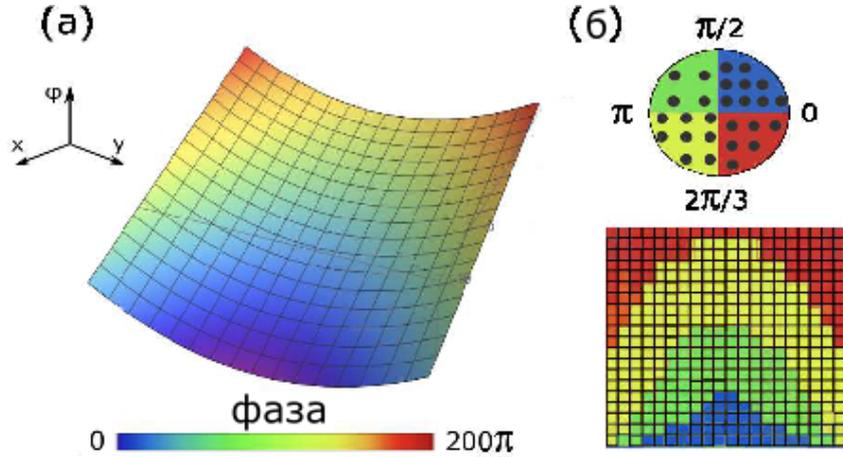


Рис. 3: (а) Фазовая поверхность, заданная преобразованием (1) и отображающая изменение фазового профиля в диапазоне от 0 до 200π радиан; (б) схематичное изображение фазовой маски для КМП, представляющее собой массив квадратов размером 20×20 $\mu\text{м}^2$, каждому из которых соответствует определенное значение фазы, отмеченное цветом: синим – значения в диапазоне от 0 до $\pi/2$; зеленым – от $\pi/2$ до π ; желтым – от π до $3\pi/2$; красным – от $3\pi/2$ до 2π .

В программном пакете *Lumerical FDTD* были заданы скалярные пучки с различными значениями ОУМ. В данном случае они задавались как моды Лагерра – Гаусса (ЛГ) с определенным орбитальным угловым моментом, соответствующие формуле (3) (m, n)-го порядка, где m, n – целые числа, w_0 – радиус перетяжки гауссова пучка. Было проведено численное моделирование, демонстрирующее это изменение фазового профиля электромагнитного излучения. Через построенную ранее КМП на резонансной длине волны 810 нм были пропущены скалярные пучки с $L = \pm 1, 3$. Сигнал, прошедший через оптическую систему, измерялся монитором, расположенным в задней фокальной плоскости КМП.

$$\Psi_{nm}(x) = \left(\frac{2x}{w_0}\right)^m \exp\left(-\frac{x^2}{w_0^2}\right) L_n^m\left(\frac{2x^2}{w_0^2}\right) \quad (3)$$

На заключительном этапе демонстрации пространственного разделения скалярных пучков с разными значениями ОУМ было проведено числен-

ное моделирование методом решения уравнений для дифракции Фраунгофера, реализованным в программном пакете *Zemax Optic Studio* в модуле физической оптики. В качестве источника электромагнитного излучения использовались записанные ранее и импортированные из программного пакета *Lumerical FDTD* дальнепольные распределения излучения (far field), прошедшего через метаповерхность КМП, совершающую конформное преобразование координат. Затем сфокусированное системой линз (с фокусным расстоянием $F = 8$ мм) излучение проходило через фазокорректирующую поверхность, заданную преобразованием (2). На мониторе (на рис. 4 Плоскость изображения) наблюдалось пространственное разделение скалярных пучков.

Наблюдается пространственное разделение скалярных пучков разных знаков относительно центральной оптической оси системы, причем каждое значение l точно локализовано в плоскости $X'Y'$ и смещено по координате Y' относительно нуля по разные стороны в зависимости от знака и модуля ОУМ. Можно заметить, что пучки с положительными значениями ОУМ $l = 1; 3$ смещаются выше оси OX , а пучки с $l = -1; -3$, соответственно, ниже. Смещение равных по модулю компонент l одинаково, но различно по направлению (см. рис. 4).

Третья глава диссертационной работы посвящена вопросу эффективной интеграции излучателей с резонансными волноводными системами на основе кремниевого волновода, центральная часть которого представляет собой нанорезонаторы – нанодиски, покрытые сверху тонкой пленкой селенита индия (InSe) (схематическое изображение исследуемой резонансной волноводной системы представлено на рис. 5). Использование тонкой пленки халькогенида обусловлено наличием в ней так называемых серых экситонных переходов, дипольный момент которых может иметь ярко выраженные анизотропные свойства и ориентацию вне плоскости самой пленки [6].

В начале главы с помощью метода конечных разностей по временной области было проведено численное моделирование в программном пакете *Lumerical FDTD* системы полоскового кремниевого волновода высотой 160 нм и шириной 140 нм, центральная часть которого представляет собой нанорезонаторы в виде дисков с высотой $h = 160$ нм и периодом $s = 50$ нм, покрытых сверху 10 нм пленкой InSe с точечным дипольным источником внутри нее на длине волны 960 нм (согласно данным [7]); экситонный пе-

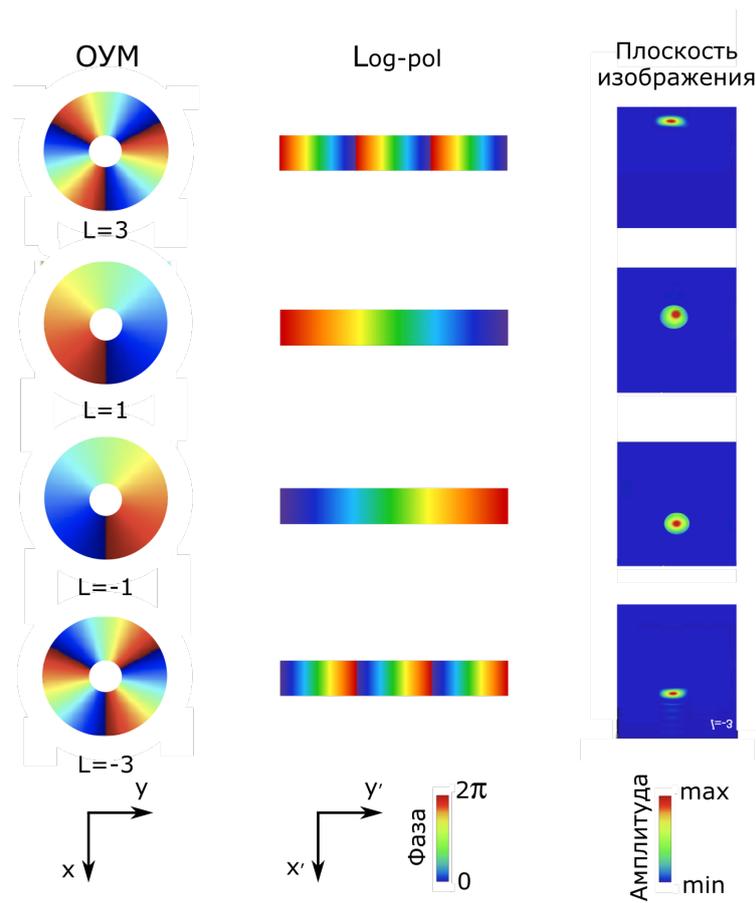


Рис. 4: Смоделированные фазовые профили и интенсивность сигнала в различных плоскостях оптической системы: перед КМП, после КМП и в плоскости изображения соответственно.

реход в InSe составляет 1.29 эВ (для тонких пленок толщиной 10-30 нм), что в пересчете на длины волн составляет 960 нм). Численно полученное распределение магнитного и электрического полей в сечении центрального кремниевого диска диаметром 260 нм демонстрирует образование магнитного дипольного Ми-резонанса в наноантеннах при возбуждении точечным излучателем, расположенным в пленке InSe.

Таким образом, были найдены оптимальные параметры для дизайна дифракционной решетки РВС. Исходя из условий и технических ограничений, связанных с изготовлением экспериментальных образцов, длина всей РВС (включая входную и выходную дифракционные решетки) варьируется от 78.9 мкм (для системы, состоящей из 5 нанодисков диаметром 210 нм) до 87.2 мкм (для системы, состоящей из 29 нанодисков диаметром 280 нм). Каждая дифракционная решетка имеет дугообразную форму и состоит из 10 штрихов шириной 0.45 мкм каждый и еще одного 11-го штриха шириной 1 мкм. Значение коэффициента заполнения для такой конфигурации

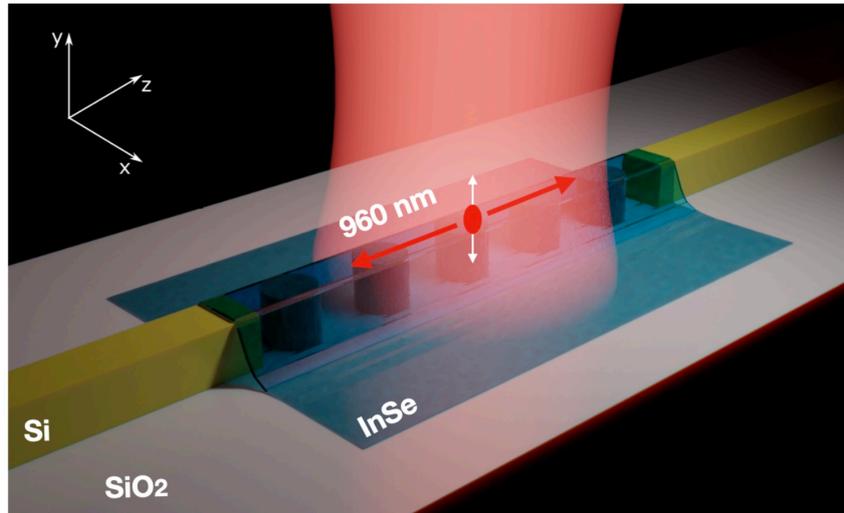


Рис. 5: Схематическое изображение резонансной волноводной системы – кремниевого волновода, центральная часть которого представляет собой нанорезонаторы, покрытые сверху 10-нм пленкой селенида индия; в центре пленки изображен диполь, белыми стрелками показано направление поляризации.

соответствует $d = 0.5$ для $\lambda_0 = 960$ нм и $l_e = 50$ нм.

Экспериментальные образцы на основе кремниевой волноводной системы были изготовлены совместно с учеными из Лаборатории фотоники и наноматериалов университета имени Фридриха Шиллера в Йене, Германия. Изготовление серии экспериментальных образцов происходило комбинацией методов электронно-лучевой литографии с последующим реактивным ионным травлением (рис. 6(а-в)). На заключительном этапе фабрикации экспериментальных образцов в лаборатории ФТИ им. А.Ф. Иоффе методом механической эксфолиации на центральную часть волноводов были перемещены тонкие пленки селенида индия InSe толщиной порядка 15 нм (рис. 6(г-з)).

Во второй части главы были проведены экспериментальные исследования РВС. Для линейно-оптической спектроскопии образцов РВС излучение накачки создавалось комбинацией источника света суперконтинуума (SC-Pro, YSL Photonics) с акустооптическим перестраиваемым фильтром (AOTF-Pro, YSL Photonics) и могло изменяться в широком спектральном диапазоне 770 – 1430 нм. Излучение, прошедшее через интегральный волновод с цепочкой дисков, выводилось через дифракционную решетку и детектировалось с помощью КМОП-камеры и диода в режиме синхронного

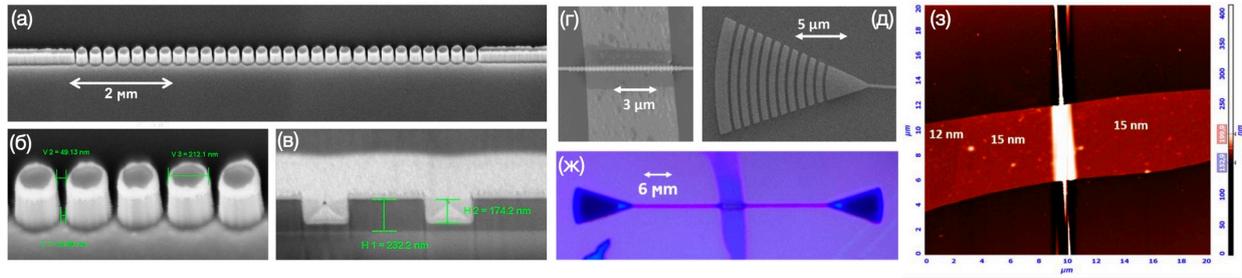


Рис. 6: Изображения, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии экспериментального волновода до переноса пленок InSe: (а) общий вид; (б) характерные горизонтальные размеры образца; (в) размеры экспериментального образца; изображения исследуемой резонансной структуры после переноса пленки InSe, полученные различными методиками: (г, д) сканирующей электронной микроскопией; (ж) оптической и (з) атомно-силовой микроскопией.

усиления.

На рис. 7 представлены результаты зависимостей коэффициента пропускания, полученные экспериментально (черная кривая) и путем численного расчета (красная кривая) для экспериментального образца, представляющего собой кремниевый волновод, центральная часть которого состоит из 29 нанорезонаторов диаметром $d = 230$ нм, покрытых сверху пленкой селенида индия толщиной 15 нм. Под относительным пропусканием в обоих случаях понимается нормированное пропускание, определенное как отношение пропускания волновода с нанодисками к пропусканию сплошного волновода с теми же геометрическими параметрами. Наблюдаются максимумы коэффициентов пропускания $T_{exp.} = 2.6$ ($\lambda = 917$ нм) и $T_{teor.} = 0.32$ ($\lambda = 937$ нм). Причиной смещения резонансной длины волны экспериментальной кривой в коротковолновую область спектра может являться несовершенство процесса фабрикация экспериментальных образцов и вариации размеров нанорезонаторов в центральной части волновода.

Исследование спектральной зависимости фотолюминесценции (ФЛ) образцов РВС было проведено в условиях криогенных температур. Экспериментальный образец помещался в криостат при температуре 8 °К. В качестве накачки использовался перестраиваемый фемтосекундный лазер на длине волны 532 нм (так как экситонный переход в селениде индия составляет 1.29 эВ). На рис. 8 представлены спектральные зависимости ФЛ для РВС (красные кривые) и для сплошного волновода с такими же гео-

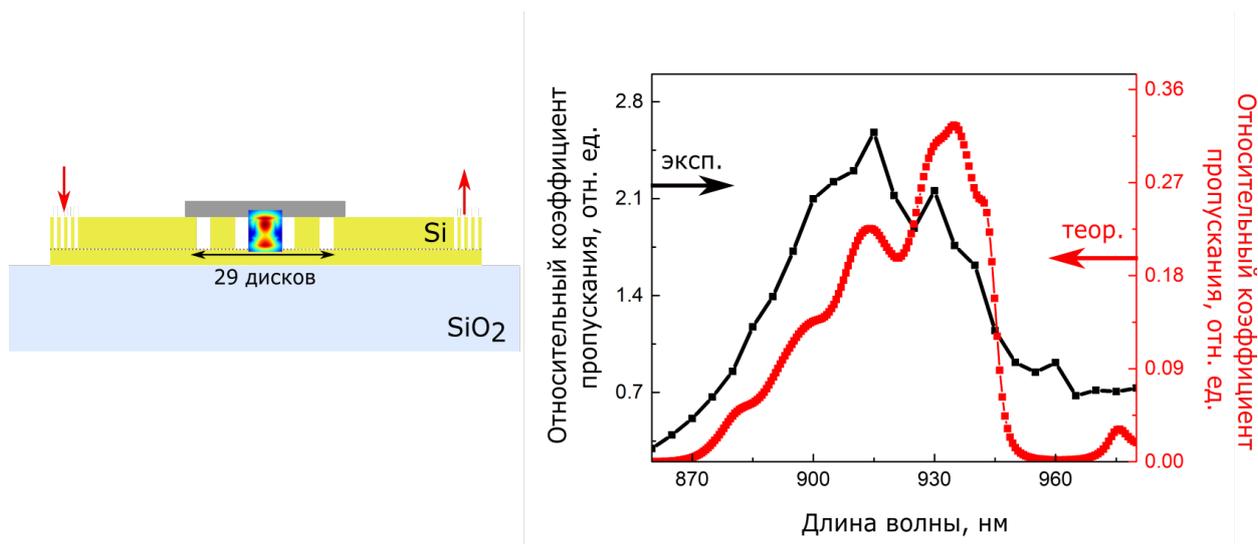


Рис. 7: Схематическое изображение цепочки нанодисков с тонкой пленкой InSe; графики зависимости коэффициента пропускания волноводной структуры от длины волны: чёрная кривая – экспериментальные данные, красная кривая – численное моделирование резонансных волноводных структур.

метрическими размерами (черные кривые) для случаев (а) накачки пленки на волноводе и измерения фотолюминесценции, излученной в обратном направлении, и (б) накачки пленки на волноводе и измерения фотолюминесценции, выведенной через дифракционную решетку на концах волновода. В обоих случаях наблюдается усиление интенсивности ФЛ для РВС по сравнению со сплошным волноводом до 8 раз в случае (а) и до 300 в случае (б).

В **четвертой главе** предложена оптимизированная конструкция резонансной волноводной системы из нитрида кремния (РВС типа №2 см. рис. 9(а)), состоящая из оптически связанных резонансных наноантенн для эффективной связи с дипольными излучателями в гетероструктурах на основе тонких пленок MoSe_2 – WSe_2 . Под дипольными излучателями в этих гетероструктурах понимаются локализованные межслоевые экситонные состояния, связанные с дефектами в гетероструктурах на основе тонких пленок дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) [8].

Все результаты по численному моделированию исследуемой системы «резонансная волноводная система (РВС) типа №2», описанные в данной главе, были получены в программном пакете Lumerical FDTD с помощью метода конечных разностей по временной области. РВС типа №2 представляет собой цепочку нанорезонаторов прямоугольной формы (см. рис.9), расположенных между двумя полосковыми волноводами с высотой $h = 400$ нм

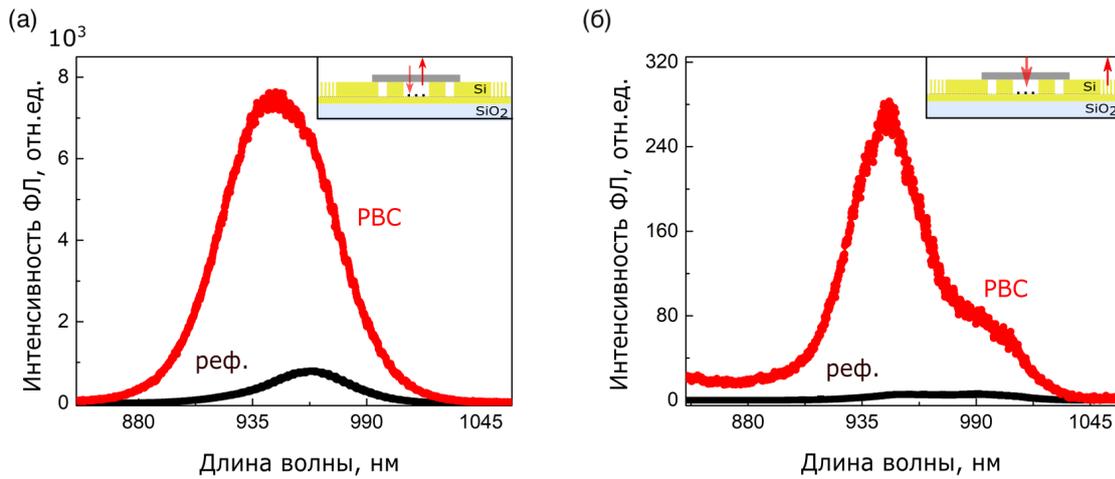


Рис. 8: Сравнение фотолюминесценции резонансного (красные кривые) и сплошного (черные кривые) волноводов: (а) спектры для случая накачки пленки на волноводе и измерения фотолюминесценции, излученной в обратном направлении; (б) спектры для случая накачки пленки на волноводе и измерения фотолюминесценции, выведенной через дифракционную решетку на концах волновода.

и шириной $w = 850$ нм. Соотношение сторон (высота/ширина) наночастиц выбиралось по аналогии с [9] и оптимизировалось в соответствии с экситонным переходом гетероструктуры из ДПМ, равному межслоевому экситону на $\lambda_{res} = 918$ нм. Центральную область структуры условно можно разделить на три части: первая и последняя части состоят из десяти одинаковых наночастиц с шириной $a = 243$ нм. Общая длина этих областей 6.8 мкм. Средняя часть имеет длину 2.6 мкм и включает в себя двадцать частиц разной ширины. Следуя параболическому профилю для сохранения высокой добротности в нанорезонаторах [10], значение параметров варьировалось от 243 нм на краях до 205 нм в центре цепочки. На рис. 9(б) представлена зависимость коэффициента пропускания от длины волны для PBC. Как видно из спектра пропускания, возникает высокодобротный резонанс ($Q \sim 10^3$, на длине волны $\lambda_{res} = 918$ нм), как и в [11].

Была численно исследована зависимость эффекта Парселла и эффективности оптической связи от положения дипольного излучателя вдоль PBC (вдоль координаты x). Определим усиление эффекта Парселла через коэффициент $A_{eff} = P/P_0$, где P — мощность излучающего диполя при наличии PBC, а P_0 — мощность света, которую излучал бы этот диполь в вакууме. На рисунке 10(а) показана зависимость коэффициента усиления A_{eff} от длины волны излучения для различных положений диполей внутри струк-

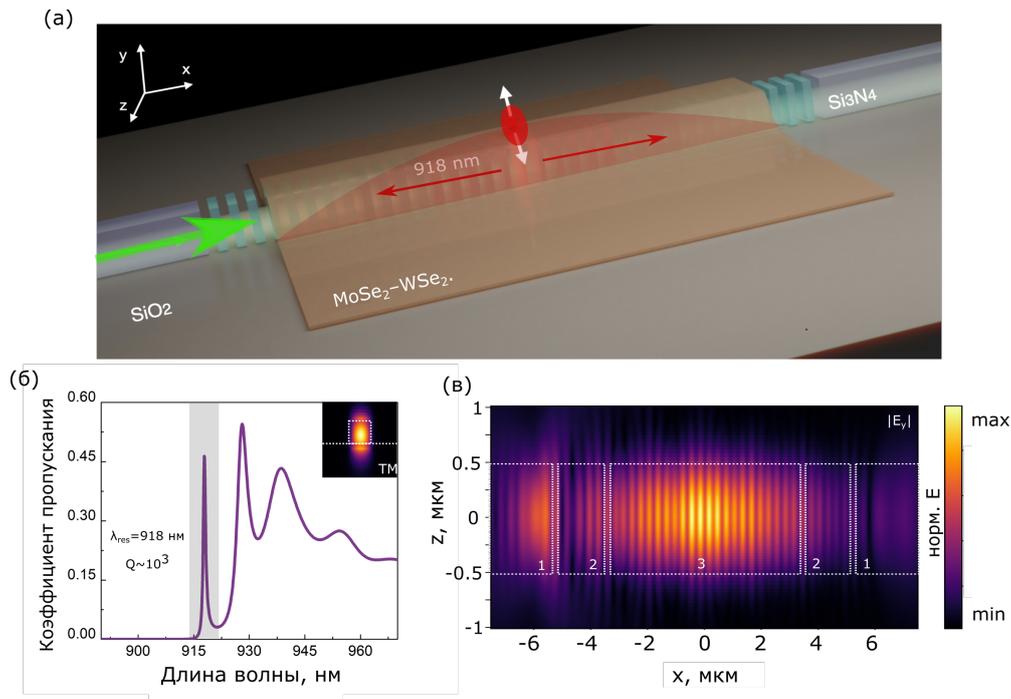


Рис. 9: (а) Схематическое изображение эффективной радиационной связи между волноводной системой и межслойевыми экситонами в гетероструктурах из монослоев ДПМ; (б) спектр пропускания структуры и распределение ближнего поля источника ТМ-моды в поперечном сечении участка сплошного волновода (СВ) на резонансной длине волны дефектного состояния; (в) вид сверху на распределение ближнего поля в центральной части структуры для $\lambda_{res} = 918$ нм.

туры, показанных разными цветами на вставке (один шаг равен 1.8 мкм). Максимальное значение $A_{eff} = 16$ соответствует случаю, когда электрический диполь, ориентированный вне плоскости пленки, локализован над центральной частью РВС (центральная часть нанорезонатора). Такое положение излучателя совпадает с область РВС, где плотность оптических состояний электрического поля максимальна (см. рис. 9(в)).

На вставке к рис. 10(а) показана спектральная зависимость коэффициента пропускания для аналогичных положений излучателей в РВС. Можно отметить, что почти 35% всего испускаемого излучения передается через РВС в SiN-отрезок сплошного волновода. Этот результат в 11 раз выше по сравнению с обычным СВ из SiN с такими же параметрами (шириной и высотой), что демонстрирует усиление эффективности оптической связи разработанной РВС. Фактор Парселла, а также эффективность оптической связи уменьшаются при смещении диполя вдоль цепочки наночастиц. A_{eff} уменьшается примерно в 4 раза, а пропускание падает примерно на 10%

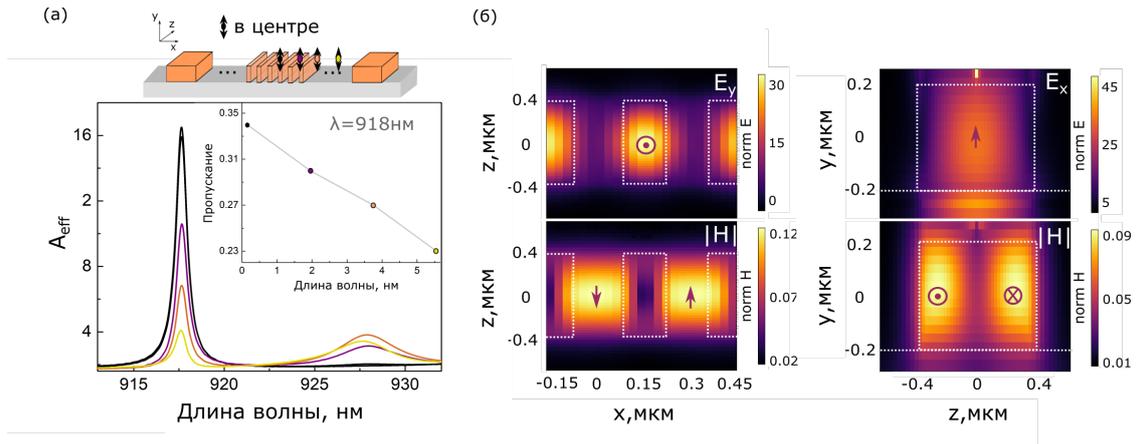


Рис. 10: (а) Спектральная зависимость коэффициента A_{eff} для дипольного излучателя, размещенного в разных частях РВС, показанных на вставке; (б) карты распределения компонент y и x электрического поля (верхняя строка) и магнитного поля ТМ-моды (нижняя строка) в горизонтальном и вертикальном сечениях центральной части РВС соответственно.

при движении диполя от центра РВС к его краю. В то же время, оба эффекта преобладают над случаем обычного СВ как минимум в 4 раза. На рис. 10(б) показаны нормированные распределения y -компоненты электрического поля (вверху) и амплитуды магнитного поля (внизу) для средних сечений xz и yz через одну из центральных наночастиц РВС для случая, когда дипольный источник расположен прямо в зазоре между центральными частицами.

Также было проведено исследование зависимости эффекта Парселла и эффективности оптической связи от поперечного смещения дипольного излучателя относительно РВС. Рассмотрены два случая: диполь в центре и на краю РВС (см. рис. 11). Это наиболее возможные положения локализованных экситонов в перенесенных 2D-пленках, образованные за счет механической деформации ДПМ о РВС [12]. Спектры мощности излучения (фиолетовые кривые), прошедшего вдоль РВС, и спектры коэффициента A_{eff} (черные кривые) показаны сплошными линиями на рис. 11 для случая дипольного излучателя, расположенного в центре (а) и на краю (б) РВС. Аналогичные результаты представлены для обычного полоскового волновода (пунктирные линии). Вблизи резонансной длины волны РВС $\lambda_{res} = 918$ нм эффективность оптической связи для обоих положений поперечного диполя у РВС более чем в 11 раз выше, чем у обычного СВ. Результаты для коэффициента A_{eff} демонстрируют усиление эффекта Парселла в центре РВС

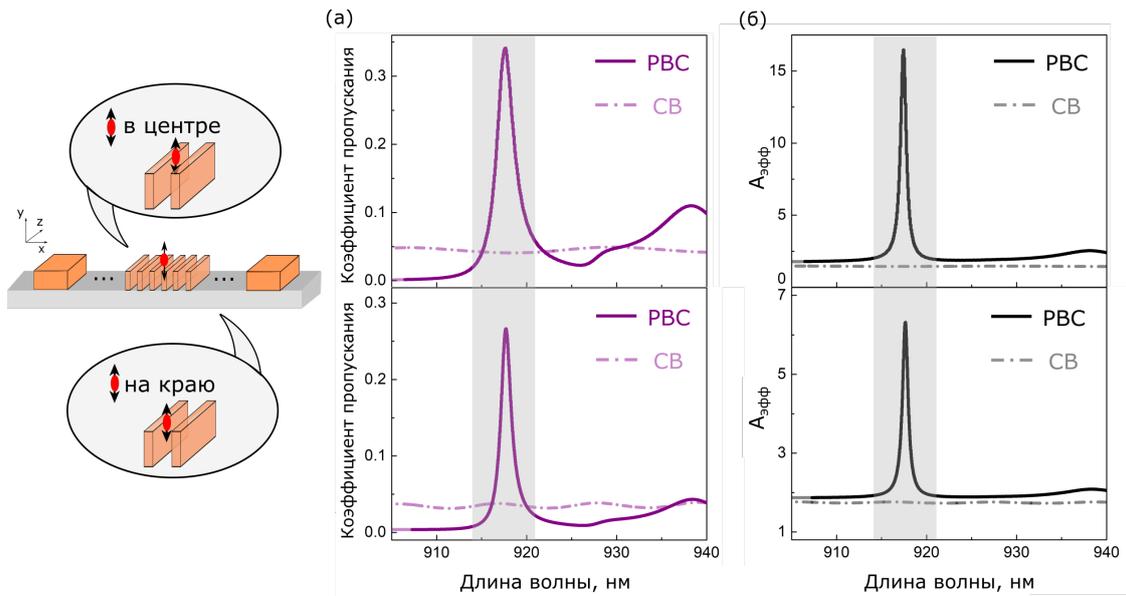


Рис. 11: Спектральные зависимости коэффициента пропускания и коэффициента A_{eff} для дипольного излучателя в центре (а) и на краю (б) относительно двух центральных нанорезонаторов PBC.

до 12 раз по сравнению с обычным СВ, а в случае краевого положения A_{eff} падает в 3 раза из-за уменьшения локального электрического поля. Тем не менее, A_{eff} в 4 раза больше для PBC по сравнению с обычным СВ, что демонстрирует эффективность интеграции 2D-излучателей на PBC.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Предложена модель резонансной оптической метаповерхности, состоящей из массива кремниевых цилиндрических наночастиц, для пространственного разделения скалярных пучков света с различными значениями орбитального углового момента. Метаповерхность обеспечивает пропускание света не менее 96% и управление фазой прошедшей волны в диапазоне от 0 до 1.5π при длине волны 810 нм. Численно продемонстрировано пространственное разделение прошедших оптических пучков со значениями орбитального углового момента $0, \pm 1, \pm 3$.
2. Обнаружен эффект усиления фотolumинесценции в тонких пленках селенида индия, нанесенных на волноводные структуры из цепочек кремниевых нанодисков. Для пленки толщиной 15 нм и волновода из 29 дисков диаметром 230 ± 10 нм интенсивность фотolumинесценции возрастает в 45 раз по сравнению со случаем пленки на подложке. Эф-

фективность заведения излучения фотолюминесценции в резонансную волноводную систему в 2 раза больше, чем в сплошной кремниевый волновод тех же размеров, что обусловлено усилением оптической связи волноводных мод и локализованных экситонных состояний в пленках селенида индия.

3. Численно продемонстрировано увеличение коэффициента оптической связи межслоевых экситонных излучателей в гетероструктурах из ди-халькогенидов переходных металлов с волноводами на основе Ми-резонансных частиц. Для гетероструктуры из монослоя MoSe_2 и монослоя WSe_2 на брэгговском волноводе из наночастиц нитрида кремния коэффициент оптической связи возрастает в 11 раз по сравнению со сплошным волноводом с теми же параметрами и составляет 35%. Полученное значение достигается при возбуждении магнитного дипольного резонанса в наночастицах на длине волны экситонного перехода. Показано, что на резонансной длине волны дефектной моды брэгговского волновода 918 нм коэффициент Парселла возрастает в 12 раз по сравнению со сплошным волноводом.

Список публикаций по теме работы

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ:

- [A1] *Гартман А.Д., Кройчук М.К., Шорохов А.С., Федянин А.А.* Эффективная интеграция однофотонных излучателей в тонких пленках InSe с резонансными кремниевыми волноводами. // *Письма в ЖЭТФ.*– 2020.– т.112, – №11.– с.730-735, **IF = 1.412 (WoS)**.
- [A2] *Гартман А.Д., Устинов А.С., Шорохов А.С., Федянин А.А.* Пространственное разделение скалярных световых пучков с орбитальным угловым моментом с помощью фазовой метаповерхности. // *Письма в ЖЭТФ.*– 2021.– т.114.– №8.– с.509-514, **IF = 1.412 (WoS)**.
- [A3] *Gartman A.D., Shorokhov A.S., Fedyanin A. A.* Efficient Light Coupling and Purcell Effect Enhancement for Interlayer Exciton Emitters in 2D Heterostructures Combined with SiN Nanoparticles. // *Nanomaterials.*– 2023.– Vol.13.–No.12.–P.1821, **IF = 5.719 (WoS)**.

Патент Российской Федерации:

- [A4] *Гартман А.Д., Шорохов А.С., Федянин А.А.* Интегрально-оптическая система для пространственного разделения скалярных пучков с орбитальными угловыми моментами (ОУМ), Патент РФ RU 2021121525 от 10.09.2022.

Статьи в сборниках и тезисы докладов:

- [A5] *Gartman A.D., Mitetelo N.V., Svyakhovskiy S.S., Maydykovskiy A.I.* Enhanced nonlinear-optical response of composites based on plasmonic nanoparticles. // *Frontiers in Optics/Laser Science Conference (FiO/LS)*. Rochester, New York, United States, –2016.– Vol.2016.
- [A6] *Гартман А.Д., Майдыковский А.И., Свяховский С.Е., Митетело Н.В., Кудринский А.А.* Спектроскопия двухфотонного поглощения в композитных плазмонных структурах на основе пористого кварца. // *VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов.* – 2018. – Vol.57. – No.2. – с.120-121.
- [A7] *Gartman A.D., Shorokhov A.S., Fedyanin A.* Optical Metasurfaces and Integral Photonic Structures for Control of Nonclassical Light on Subwave-Scale. // *The 9th Russian-German Young Scientist Week.* – 2019. – с.62.
- [A8] *Гартман А.Д., Антипов Т.В., Шорохов А.С.* Оптическая связь межслоевых экситонов в тонких пленках с резонансными кремниевыми наноструктурами. // *Материалы 65-й Всероссийской научной конференции МФТИ к 115-летию Л.Д.Ландау. Сборник тезисов.* – 2023. – т.535.3.
- [A9] *Гартман А.Д., Антипов Т.В., Шорохов А.С.* Оптическая связь межслоевых экситонов в тонких пленках с резонансными кремниевыми наноструктурами. // *61-я Международная научная студенческая конференция (МНСК-2023). Сборник тезисов. Новосибирск.* – 2023.
- [A10] *Гартман А.Д., Антипов Т.В., Шорохов А.С.* Оптическая связь межслоевых экситонов в тонких пленках с резонансными кремниевыми наноструктурами. // *XXX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов–2023». Секция «Физика». Сборник тезисов.* – М. Физический факультет МГУ. – 2023. – с.974-975.

Список цитируемой литературы

- [1] *Ruffato G., Girardi M., Massari M.* A Compact Diffractive Sorter for High-Resolution Demultiplexing of Orbital Angular Momentum Beams. // *Scientific Reports.* – 2018. – v. 8, no. 1. – p. 10248.

-
- [2] *Decker M., Staude I., Falkner M.* High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces // *Advanced Optical Materials*.– 2015.– v. 3, no. 6.– pp. 813–820.
- [3] *Kovlakov E. V., Straupe S. S., Kulik S. P.* Quantum State Engineering with Twisted Photons via Adaptive Shaping of the Pump Beam // *Phys. Rev. A*.– 2018.– v. 98, no. 6.– p. 060301.
- [4] *Bryngdahl O.* Reversed-Radial-Shearing Interferometry // *JOSA*.– 1970.– v. 60, no. 7.– pp. 915-917.
- [5] *Berkhout G. C., Lavery M. P., Courtial J., Beijersbergen M. W., Padgett M. J.* Efficient Sorting of Orbital Angular Momentum States of Light // *Phys. Rev. Lett.*– 2010.– v. 105, no. 15. – p. 153601.
- [6] *Shubina T. V., Desrat W., Moret M., Tiberj A., Briot O., Davydov V. Y. et al.* InSe as a Case Between 3D and 2D Layered Crystals for Excitons // *Nat. Commun.*– 2019.– v. 10, no. 1.– p. 3479.
- [7] *Brotons-Gisbert M., Proux R., Picard R., Andres-Penares D., Branny A., Molina-Sanchez A., Gerardot B. D.* Out-of-Plane Orientation of Luminescent Excitons in Two-Dimensional Indium Selenide // *Nat. Commun.*– 2019.– v. 10, no. 1.– p. 3913.
- [8] *Rivera P., Schaibley J. R., Jones A. M., Ross J. S., Wu S., Aivazian G., Xu X.* Observation of Long-Lived Interlayer Excitons in Monolayer MoSe₂–WSe₂ Heterostructures // *Nat. Commun.*– 2015– v. 6 no. 1.– p. 6242.
- [9] *Ding L., Yu, Y. F., Morits D., Yu M., Ang T. Y., Chu H. S., Kuznetsov A. I.* Low Loss Waveguiding and Slow Light Modes in Coupled Subwavelength Silicon Mie Resonators // *Nanoscale*.– 2020.– v. 12 no. 42.– pp. 21713-21718.
- [10] *Desiatov B., Goykhman I., Levy U.* Parabolic Tapered Photonic Crystal Cavity in Silicon // *Appl. Phys. Lett.*– 2012.– v. 100, no. 4.– p. 041112.
- [11] *Bakker R. M., Yu Y. F., Paniagua-Domínguez R., Luk'yanchuk B., Kuznetsov A. I.* Resonant Light Guiding Along a Chain of Silicon Nanoparticles // *Nano Lett.*– 2012.– v. 17 no. 6.– pp. 3458-3464.
- [12] *Peyskens F., Chakraborty C., Muneeb M., Van Thourhout D., Englund D.* Integration of Single Photon Emitters in 2D Layered Materials with a Silicon Nitride Photonic Chip // *Nat. Commun.*– 2019– v. 10 no. 1.– p. 4435.