

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'А. В. Гартман'.

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](mailto: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 поддержки 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.

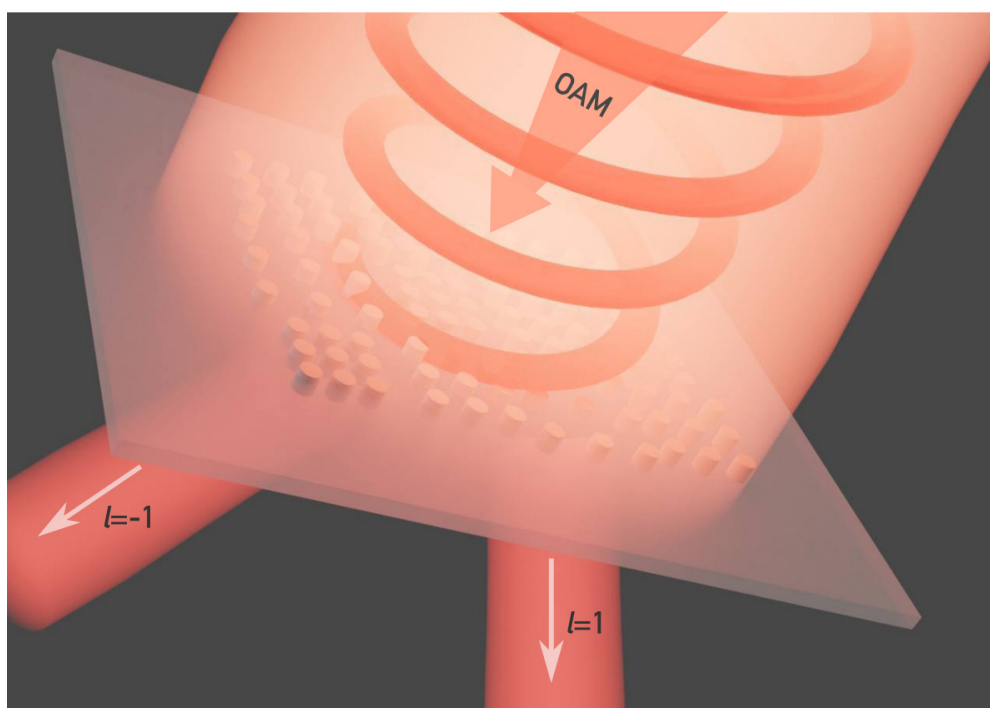


Рис. 1: Схематичное изображение принципа работы резонансной кремниевой метаповерхности для разделения скалярных пучков с разными значениями ОУМ (ОАМ – orbital angular momentum) в пространстве.

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  $1.5\pi$  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].

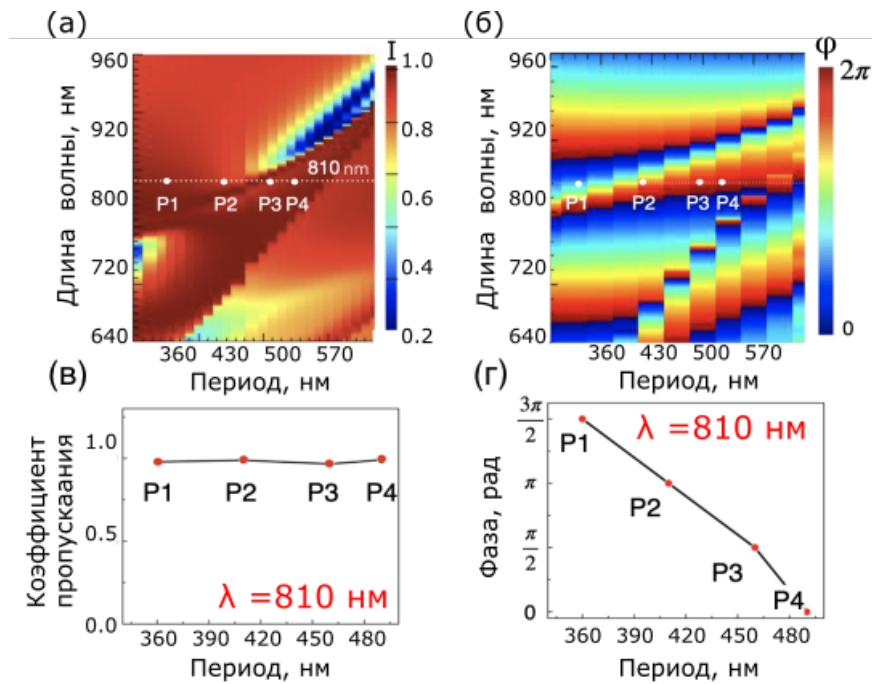


Рис. 2: (а, б) Графики зависимостей коэффициента пропускания и фазы прошедшей волны для ансамбля кремниевых нанодисков высотой  $h = 30$  нм и диаметром  $d = 210$  нм от длины волны падающего электромагнитного излучения и периода расположения нанорезонаторов; (в, г) графики зависимостей коэффициента 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  $1.5\pi$ . 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 ( $\text{KTiOPO}_4$ ), 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  $200\pi$  радиан. Расчетная область была задана в соответствии с реальными размерами структур и охватывала диапазон  $200 \times 200$  мкм<sup>2</sup> (см. рис. 3(а)). Затем эта поверхность была разбита на равные области – квадраты размером  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>, внутри которых

было проведено усреднение значений фазы и нормировка по диапазону от 0 до  $1.5\pi$  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)).

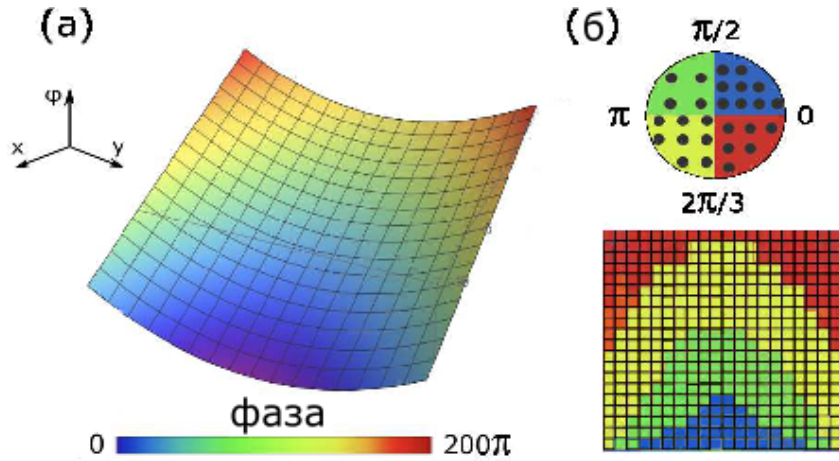


Рис. 3: (а) Фазовая поверхность, заданная преобразованием (1) и отображающая изменение фазового профиля в диапазоне от 0 до  $200\pi$  радиан; (б) схематичное изображение фазовой маски для КМП, представляющее собой массив квадратов размером  $20 \times 20$   $\mu\text{м}^2$ , каждому из которых соответствует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

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-

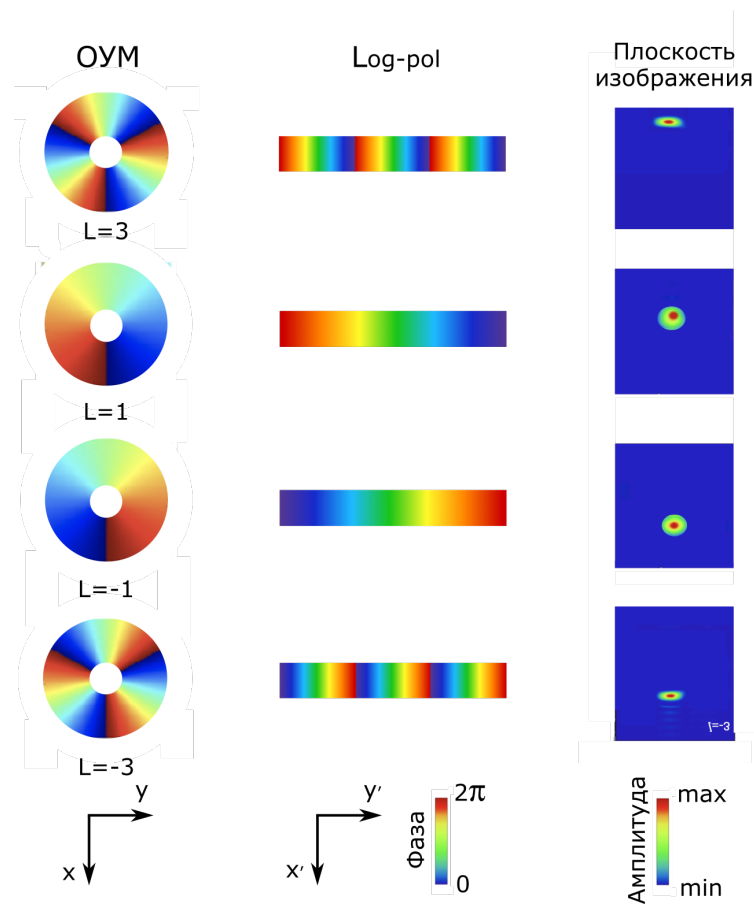


Рис. 4: Смоделированные фазовые профили и интенсивность сигнала в различных плоскостях оптической системы: перед КМП, после КМП и в плоскости изображения соответственно.

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

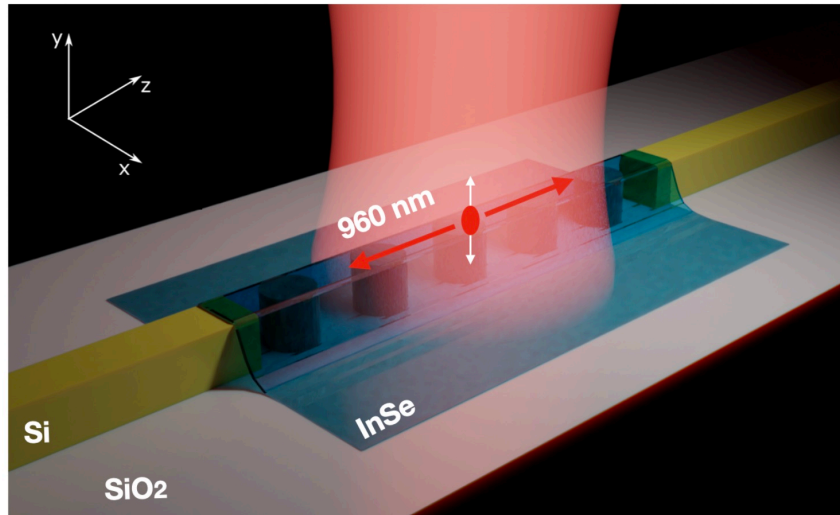


Рис. 5: Схематическое изображение резонансной волноводной системы – кремниевого волновода, центральная часть которого представляет собой нанорезонаторы, покрытые сверху 10-нм пленкой селенида индия; в центре пленки изображен диполь, белыми стрелками показано направление поляризации.

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

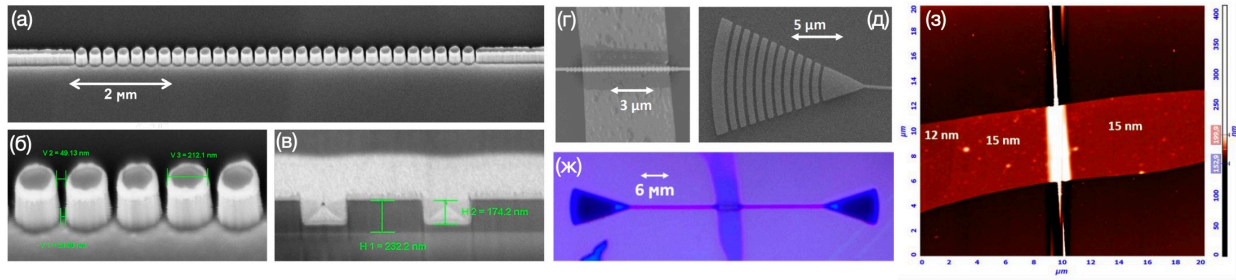


Рис. 6: Изображения, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии экспериментального волновода до переноса пленок InSe: (а) общий вид; (б) характерные горизонтальные размеры образца; (в) размеры экспериментального образца; изображения исследуемой резонансной структуры после переноса пленки 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  $^{\circ}$ 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-



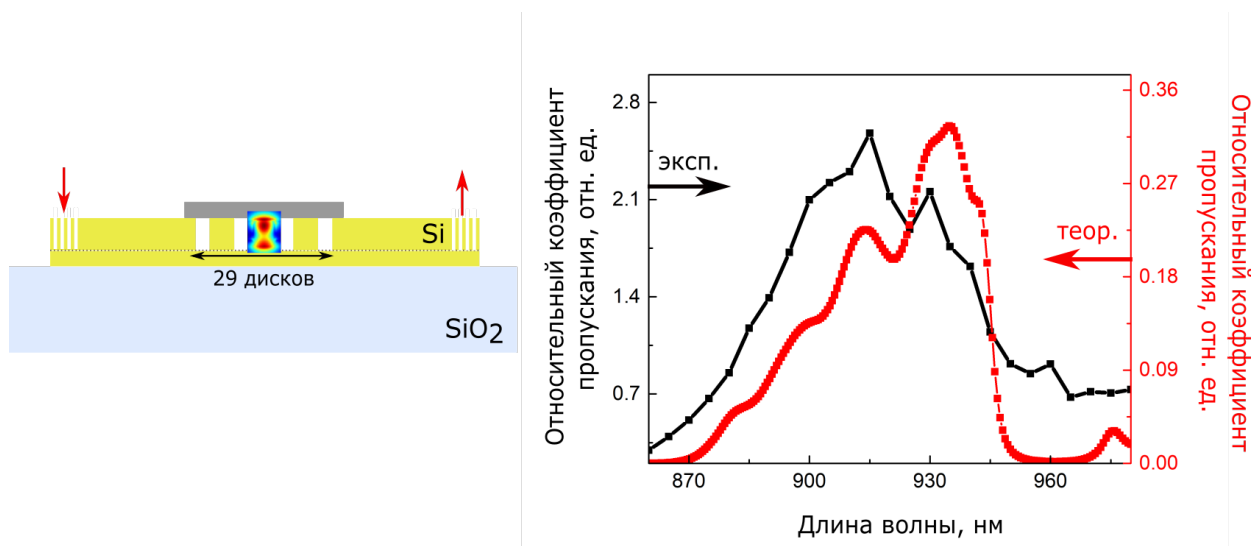


Рис. 7: Схематическое изображение цепочки нанодисков с тонкой пленкой InSe; графики зависимости коэффициента пропускания волноводной структуры от длины волны: чёрная кривая – экспериментальные данные, красная кривая – численное моделирование резонансных волноводных структур.

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  $\text{MoSe}_2$ – $\text{WSe}_2$ . 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

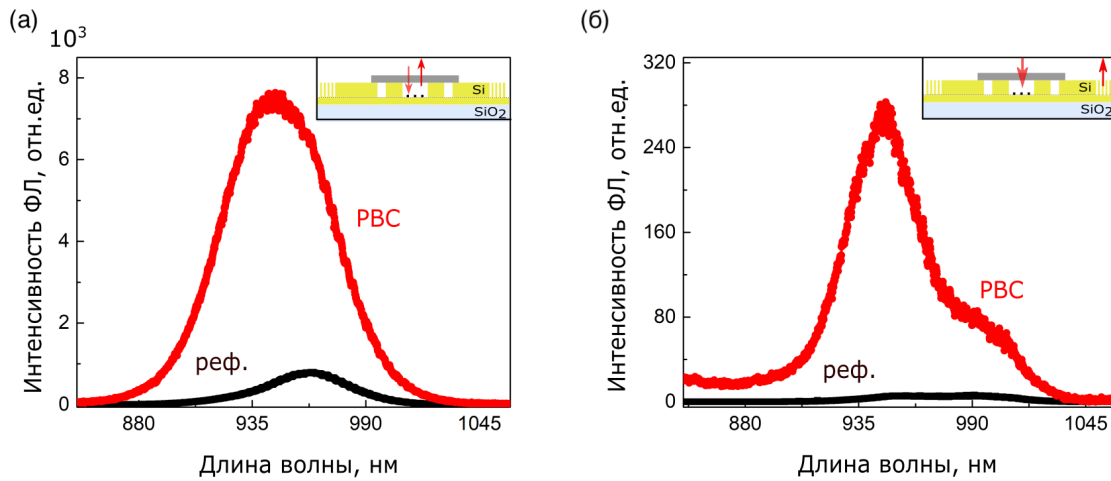


Рис. 8: Сравнение фотолюминесценции резонансного (красные кривые) и сплошного (черные кривые) волноводов: (а) спектры для случая накачки пленки на волноводе и измерения фотолюминесценции, излученной в обратном направлении; (б) спектры для случая накачки пленки на волноводе и измерения фотолюминесценции, 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 РВС. 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 РВС (вдоль координаты  $x$ ). Определим усиление эффекта Парселла через коэффициент  $A_{eff} = P/P_0$ , где  $P$  — мощность излучающего диполя при наличии РВС, 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-

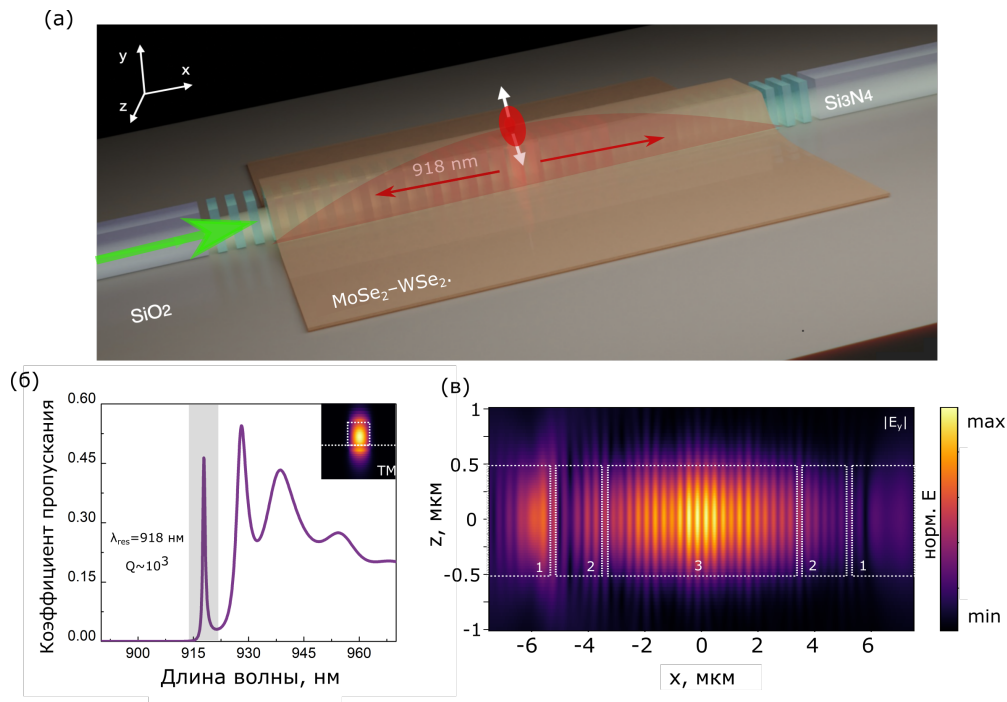


Рис. 9: (а) Схематическое изображение эффективной радиационной связи между волноводной системой и межслойевыми экситонами в гетероструктурах из монослоев ДПМ; (б) спектр пропускания структуры и распределение ближнего поля источника ТМ-моды в поперечном сечении участка сплошного волновода (СВ) на резонансной 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%

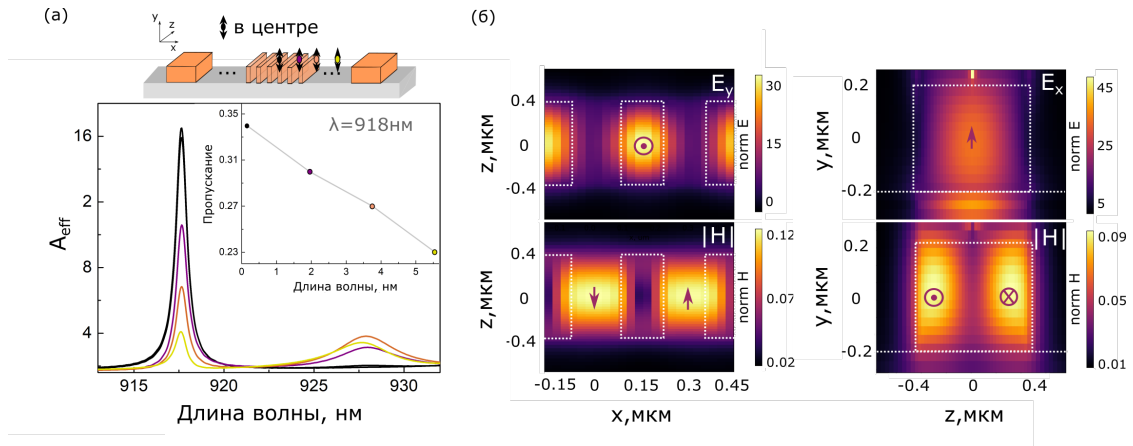


Рис. 10: (а) Спектральная зависимость коэффициента  $A_{eff}$  для дипольного излучателя, размещенного в разных частях РВС, показанных на вставке; (б) карты распределения компонент  $y$  и  $x$  электрического поля (верхняя строка) и магнитного поля ТМ-моды (нижняя строка) в горизонтальном и вертикальном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

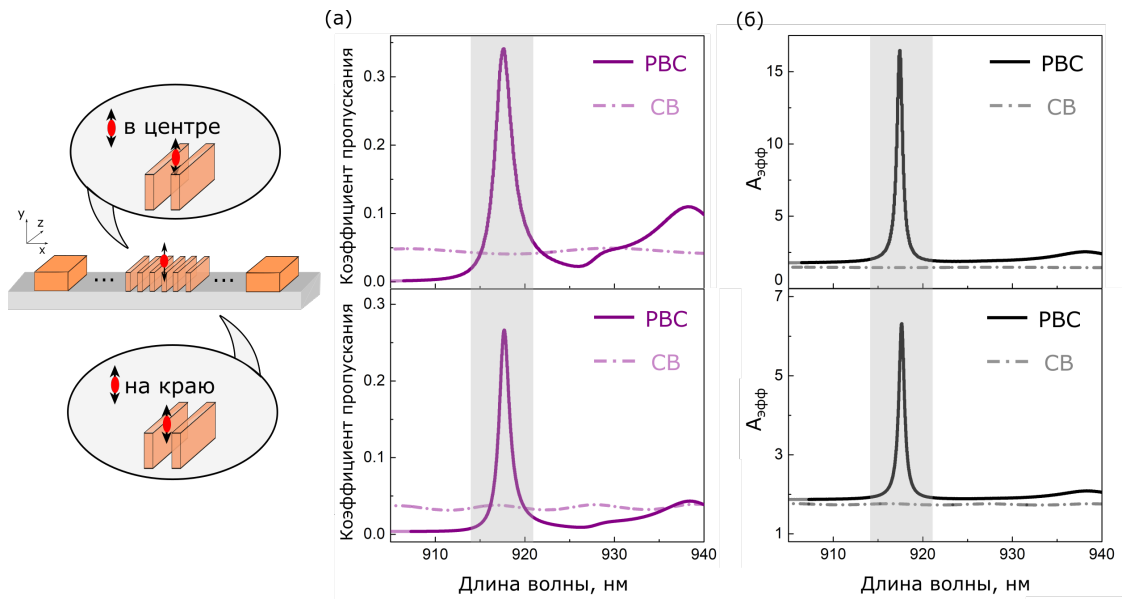


Рис. 11: Спектральные зависимости коэффициента пропускания и коэффициента  $A_{eff}$  для дипольного излучателя в центре (а) и на краю (б) относительно двух центральных нанорезонаторов PBC.

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  $1.5\pi$  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  $230 \pm 10$  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  $\text{MoSe}_2$  и монослоя  $\text{WSe}_2$  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  $\text{InSe}$  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 MoSe<sub>2</sub>–WSe<sub>2</sub> 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.