

На правах рукописи



КАЗАНОВ ДМИТРИЙ РОБЕРТОВИЧ

**ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
И ТРУБЧАТЫХ НАНОСТРУКТУРАХ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

Шубина Татьяна Васильевна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью

Официальные оппоненты:

Гиппиус Николай Алексеевич, доктор физико-математических наук, Автономная некоммерческая образовательная организация высшего профессионального образования «Сколковский институт науки и технологий», профессор центра фотоники и квантовых материалов

Кочерешко Владимир Петрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, профессор лаборатории спектроскопии твердого тела

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Защита состоится «числа» месяца 2020 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 34.01.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте www.ioffe.ru.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «числа» месяца 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук


Сорокин Л. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прогресс в области создания полупроводниковых приборов для нанофотонных применений, наблюдаемый в настоящее время, во многом связан с использованием оптических микрорезонаторов, совместимых с интегральными ("чиповыми") технологиями. Принцип действия этих устройств, предназначенных для селективного выделения и усиления оптического сигнала, основан на взаимодействии оптических мод и резонансов в активной среде. Реализация таких микрорезонаторов предполагает развитие физики фотонных наноструктур.

К приборам, использующим фотонные микрорезонаторы, можно отнести такие наноизлучатели, как источники неклассического света (одиночных фотонов) для квантовой криптографии и квантовой обработки информации [1]. Микрорезонаторы зачастую являются составной частью источников лазерного излучения [2], сверхчувствительных детекторов с узкими линиями детектирования, а также биологических и химических сенсоров [3, 4, 5]. Характерно, что активно применяются различные виды резонаторов, поддерживающих как моды Фабри-Перо, так и моды шепчущей галереи (МШГ).

Для ряда применений необходимы резонаторы на основе широкозонных АЗ-нитридов (GaN, AlN). Планарные брэгговские микрорезонаторы были бы вне конкуренции для этих целей, однако они крайне сложны в изготовлении для коротковолновой ультрафиолетовой (УФ) области. С другой стороны, узкозонные АЗ-нитридные соединения с большим содержанием In, перекрывающие важный ближний инфракрасный (ИК) диапазон приемлемый для телекоммуникационных сетей, зачастую не обладают достаточно хорошими структурно-оптическими качествами [6]. Создание эффективных приборов для этих спектральных диапазонов предполагает разработку нового дизайна микрорезонаторов высокого качества.

Особый интерес представляет возможный переход в системах обработки и передачи информации с электрических компонентов на оптические, создание фотонных квантовых симуляторов [7, 8]. Одним из важнейших компонентов таких систем является элемент для замедления

света. В этой области важно умение сверхбыстро управлять прохождением ультракоротких оптических импульсов пико- и фемтосекундной длительности. Для этого могут быть использованы брэгговские резонаторы, фотонные кристаллы и волноводы [9, 10]. Однако такие структуры имеют относительно большие размеры и ограниченную возможность обеспечения неискаженной формы и нужного времени задержки импульсов света. Одним из путей решения проблем является использование резонансных фотонных кристаллов, в которых происходит взаимодействие оптического (связанного с геометрией структуры) и материального (например, экситонного) резонансов. Подбор комбинации материальных систем, геометрии, включая применение активно изучаемых в последнее время двумерных (2D) слоев, открывает дополнительные возможности и обеспечивает гибкость контроля сверхкоротких импульсов света.

В последнее время ведутся активные исследования монослоев и вандер-ваальсовых гетероструктур на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), таких как MoS_2 и WS_2 . В монослойном пределе эти материалы обладают прямозонным экситонным переходом с гигантской силой осциллятора. Именно это определяет значительный интерес к их использованию в наноструктурах различного назначения. Нанотрубки из таких материалов были синтезированы более четверти века назад [11], однако проведенные исследования не касались их оптических и резонаторных свойств. Более того, фотолюминесценция (ФЛ) из синтезированных ДПМ трубок была обнаружена и проанализирована совсем недавно [12]. По аналогии с углеродными нанотрубками такие трубчатые системы могут быть использованы для создания поляризационно-чувствительных фотодетекторов или фильтров [13]. В режиме сильной связи в высококачественных трубках возможно существование экситон-поляритонов, что открывает возможность для создания разновидности поляритонных лазеров [14]. Также на основе нанотрубчатых резонаторов могут быть сформированы специфические фотонные кристаллы [15].

Цель настоящего исследования заключается в анализе эксперимен-

тальных данных и теоретическом моделировании оптических полупроводниковых резонансных структур нового типа: монокристаллических резонаторов на основе АЗ-нитридных соединений, резонансных фотонных кристаллов со сложной элементарной ячейкой на основе соединений A_2B_6 и 2D слоев и нанотрубчатых микрорезонаторов на основе ван-дер-ваальсовых ДПМ соединений.

Научная новизна работы состоит в решении конкретных задач:

1. Построение модели для численного моделирования собственных оптических мод чашеобразного микрорезонатора на основе АЗ-нитридов. Изучение влияния температуры на частоту собственных мод и на характер распределения электромагнитного поля в микрорезонаторе.
2. Объяснение усиления сигнала от вставки одиночной квантовой ямы (КЯ) InGaN внутри нанокolonки на основе GaN и в области побочного микрокольцевого резонатора, полученного в одном ростовом цикле с нанокolonкой.
3. Построение модели замедления света в резонансных фотонных кристаллах со сложной элементарной ячейкой на основе соединений A_2B_6 и объяснение их преимущества над классическими фотонными кристаллами с простой элементарной ячейкой. Разработка и описание нового типа резонансных фотонных кристаллов со вставками из 2D бислоев ДПМ.
4. Построение модели для объяснения особенностей в спектрах поляризованной микро-ФЛ в одиночных нанотрубках на основе MoS_2 . Рассмотрение перехода от сплошного цилиндра к трубке с конечным числом монослоев в стенке. Исследование влияния толщины стенки и ее флуктуации, а также неоднородности геометрических параметров вдоль оси нанотрубки на спектры излучения.
5. Определение условий формирования экситон-поляритонов в режиме сильной связи между экситонным резонансом и оптическими модами в нанотрубках на основе MoS_2 . Прогнозирование особенностей в спектрах излучения, связанных с экситон-поляритонами.

Практическая значимость работы состоит в том, что впервые предложена методика определения комплексного показателя преломления материала монокристаллического микрорезонатора путем моделирования собственных частот оптических мод, наблюдаемых в спектрах микро-ФЛ, с учетом пространственного распределения электромагнитного поля, регистрируемого микро-катодолюминесценцией. Полученные монокристаллические оптические микрорезонаторы на основе Al-нитридов могут быть использованы для селективного усиления в УФ и ИК диапазонах. Предложен новый дизайн резонансных фотонных кристаллов на основе соединений A_2B_6 , а также 2D бислоев дихалькогенидов переходных металлов для замедления сверхкоротких импульсов света с малым искажением формы импульса, что необходимо для систем квантовой фотоники и криптографии. Проанализированы спектры нанотрубчатых структур на основе ДПМ соединений. Продемонстрировано, что они являются микрорезонаторами с модами шепчущей галереи, поляризованными по преимуществу вдоль оси трубки, что может быть использовано как для селективного усиления сигнала, так и для создания поляризационно-чувствительных фотодетекторов и фильтров. Показана возможность формирования экситон-поляритонов с большим расщеплением Раби в высококачественных нанотрубках. Это может служить базисом для создания "трубчатого" поляритонного лазера, совместимого с чиповой технологией.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Монокристаллические оптические микрорезонаторы на основе Al-нитридов с модами шепчущих галерей применимы для селективного усиления излучения в инфракрасном (InN, добротность 200) и в ультрафиолетовом (GaN, добротность 900) диапазонах, причем частоты оптических мод в спектрах излучения и характер их пространственного распределения определяются дисперсией комплексного показателя преломления материала микрорезонатора и ее изменением с температурой.
2. Резонансные фотонные кристаллы со сложными элементарными ячейками на основе полупроводников A_2B_6 или 2D бислоев дихаль-

когенидов переходных металлов, обладающих сильными экситонными резонансами, способны обеспечить задержку сверхкоротких (фемтосекундных, пикосекундных) импульсов света вплоть до 2 пикосекунд, с затуханием в 2-5 раз и малым искажением формы пикосекундного импульса.

3. Многослойные нанотрубки, синтезированные из дихалькогенидов переходных металлов, являются оптическими микрорезонаторами, поддерживающими моды шепчущих галерей, электромагнитная энергия которых локализована по преимуществу внутри стенок нанотрубок, а вектор электрического поля направлен вдоль оси трубки.
4. Частоты мод шепчущей галереи и возможность усиления фотолюминесценции в области экситонных резонансов определяются диаметром MoS_2 нанотрубки и числом монослоев в ее стенке, тогда как взаимодействие между экситоном и оптическими модами, вплоть до прогнозируемого формирования экситон-поляритонов, в основном контролируется дисперсией оптических мод.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на низкоразмерном семинаре ФТИ им. А.Ф. Иоффе, на XIV Российской конференции по физике полупроводников (Новосибирск, 2019), Международной конференции по физике полупроводников (ICPS-2018, Монпелье, Франция), международной конференции «Superlattices, Nanostructures and Nanodevices» (ICSNN-2018, Мадрид, Испания), молодежных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектроники (Санкт-Петербург, 2016, 2017), международных школах «Saint-Petersburg OPEN» (Санкт-Петербург, 2015, 2016, 2017) и международных симпозиумах «Нанозфизика и Нанозлектроника» (Нижний Новгород, 2015, 2017).

Публикации. По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 12 работ в реферируемых журналах. Список работ приведен в Заключении.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и списка литературы. Она содержит 130

страниц текста, включая 51 рисунок. Список цитируемой литературы содержит 188 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава диссертации посвящена обзору теоретических принципов функционирования микрорезонаторов. Описаны основные параметры микрорезонаторов, а также рассмотрены случаи слабой связи (эффект Парселла) и сильной связи, характеризуемой расщеплением Раби, между оптическим и материальным резонансами, влияющими на собственные характеристики микрорезонаторов. Представлены основные типы полупроводниковых резонаторных структур с модами Фабри-Перо, модами шепчущей галереи, а также резонансные фотонные кристаллы для нанофотонных применений. Кроме того, описаны основные экспериментальные методики исследования оптических свойств таких резонаторных структур.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию оптических свойств АЗ-нитридных микрорезонаторов для селективного усиления излучения в ультрафиолетовом (GaN) и в инфракрасном (InN) диапазонах, выращенных на профилированных сапфировых подложках с полусферическими выступами.

В разделе §2.1 описываются преимущества использования АЗ-нитридных микрорезонаторов на основе InN, GaN, InGaN с малым содержанием In, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), в которых резонатор и активная область формируются в едином ростовом процессе без использования пост-ростовых технологий [16].

В разделе §2.2 изучаются высококачественные чашеобразные микрорезонаторы на основе InN и GaN, выращенные с помощью МПЭ на сапфировых подложках с полусферическими выступами. Эксперименталь-

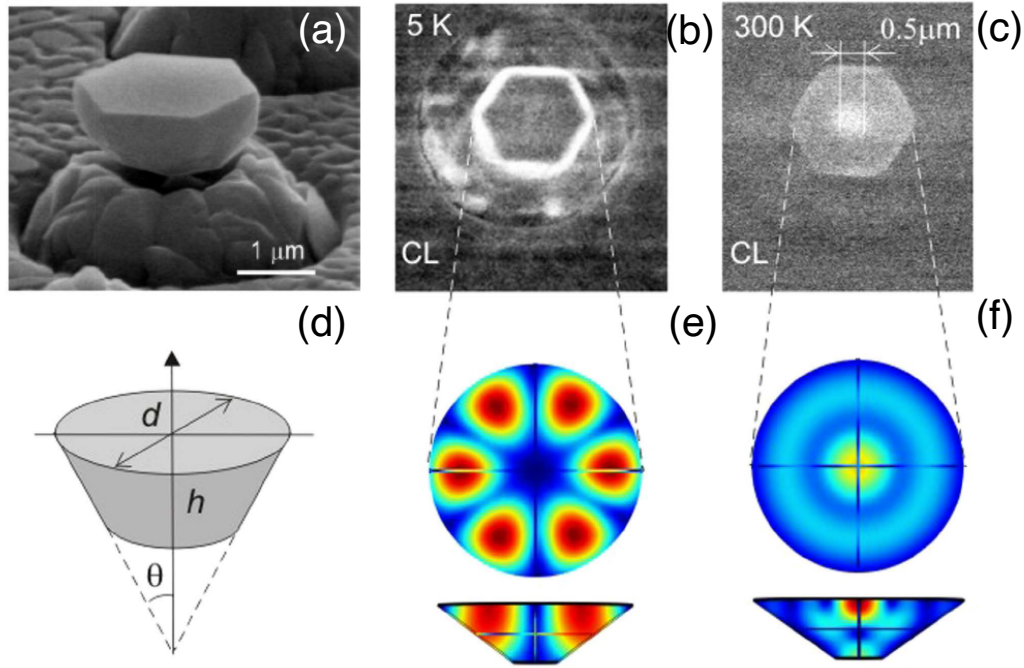


Рис. 1: (a) СЭМ изображение микрокристалла InN на полусферическом выступе; (b, c) микро-КЛ микрокристаллов InN при разных температурах; (d) схематическое изображение микрокристалла, используемое при моделировании оптических свойств; (e, f) расчет распределения электрического поля внутри микрорезонатора в зависимости от температуры.

но (с помощью измерений микро-катодолуминесценции (микро-КЛ) и микро-фотолуминесценции (микро-ФЛ)) и теоретически устанавливается, что в таких микрорезонаторах формируются квази-моды шепчущей галереи низкого порядка (рис. 1).

Сопоставление проведенного моделирования собственных оптических мод микрорезонатора с положением пиков в экспериментальных спектрах микро-ФЛ и их пространственным распределением позволяет с высокой точностью (погрешность $\sim 5\%$) определять показатель преломления микрорезонатора по сравнению с методом Крамерса-Кронига, с помощью которого можно определить только интегральный показатель преломления среды, включающий микрорезонатор и его окружение.

Обнаруженный эффект переключения мод при изменении температуры (рис. 1) объясняется изменением величины показателя преломления и сдвигом края поглощения InN. Резкое изменение параметров системы позволяет наблюдать перескок с одной оптической моды на

другую с возможностью излучения терагерцового кванта.

В разделе §2.3 изучаются нанокolonчатые микрорезонаторы на основе GaN с одиночной вставкой InGaN квантовой ямы (КЯ), сформированные методом МПЭ на профилированной подложке. Проведено теоретическое моделирование оптических мод в нанокolonнах и оптических переходов в КЯ на основе InGaN/GaN для различных составов и толщин.

Обнаружено значительное усиление сигнала за счет эффекта Парселла для оптических переходов внутри нанокolonн, связанное с наличием мод типа Фабри-Перо (рис. 2). Спектры микро-КЛ и спектры ФЛ с временным разрешением подтверждают наличие усиления сигнала КЯ внутри микрорезонатора.

Обнаружено, что наряду с формированием нанокolonчатого микрорезонатора наблюдается появление кольцевого микрорезонатора вокруг основания полусферического выступа (рис. 2b). Экспериментальные данные по микро-КЛ показывают усиление излучения из области кольцевого микрорезонатора, а моделирование оптических мод подтверждает возможность возбуждения оптических мод шепчущей галереи высокого порядка, позволяющих усилить излучение за счет эффекта Парселла.

В третьей главе диссертации теоретически описано взаимодействие света с резонансными фотонными кристаллами со сложными элементарными ячейками на основе соединений A_2B_6 или 2D бислоев ди-

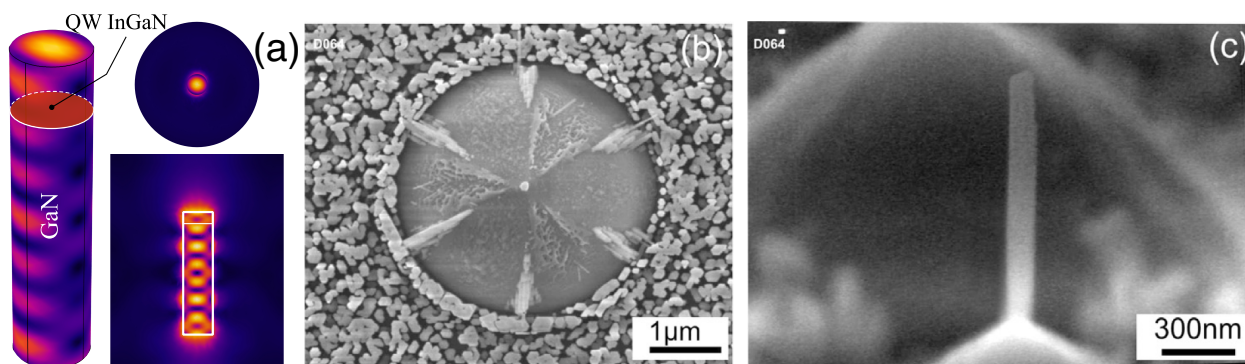


Рис. 2: (a) Рассчитанное распределение электромагнитного поля с энергией 2.6 эВ, соответствующее излучению КЯ InGaN/GaN. (b,c) СЭМ изображения исследуемой нанокolonки GaN с одиночной КЯ InGaN (вид сверху и крупный план).

халькогенидов переходных металлов, обладающих сильными экситонными резонансами, для замедления сверхкоротких (фемтосекундных и пикосекундных) импульсов света.

В разделе §3.1 описываются возможные подходы для замедления групповой скорости света [17]. Основным принципом получения "медленного света" является использование резкого изменения показателя преломления в диспергирующих средах [18]. Однако этот метод обладает рядом недостатков, таких как сильное затухание и узкое окно прозрачности. Перспективный путь развития — использование фотонных кристаллов [19]. В работе сделан обзор опубликованных данных по замедлению света в фотонных кристаллах и показано, что в таких структурах получают задержки вплоть до 1.4 пс с затуханием до 1% от исходной величины [20].

В разделах §3.2-3.3 описан общий принцип прохождения и отражения света от структур с экситонными резонансами [21]. Описывается метод матриц переноса в базисе волн, бегущих в противоположных направлениях, рассчитывается дисперсия бесконечной периодической структуры с помощью матрицы переноса через период. Предполагается, что падающий импульс света аппроксимируется функцией Гаусса.

Рассмотрено три типа (А, В, С) резонансных фотонных структур на основе ZnSe/ZnMgSSe: тип А - с простой элементарной ячейкой, где частота экситонного резонанса КЯ ω_x отстроена от брэгговского резонанса $\omega_B = \pi c / (n_a d_a + n_b d_b)$; типы В и С — со сложными элементарными ячейками, содержащими две КЯ, где в первом случае КЯ отличаются по частоте $\omega_x \pm \delta\omega_x$ экситонного резонанса, во втором случае отличаются толщины барьеров $d \pm \delta d$ между КЯ. Для выбранных структур произведен расчет дисперсии, задержки импульсов, а также формы прошедшего импульса.

Расчеты показали, что в структурах типа В и С происходит расщепление центральной поляритонной моды на две более медленные моды, что является отличительной чертой сложной элементарной ячейки. Это приводит к уменьшению групповой скорости света. При этом полоса пропускания сохраняется достаточно широкой за счет присутствия

нескольких мод внутри запрещенной зоны. Показано, что для поиска оптимального затухания прошедшего импульса и его задержки требуется варьировать отстройку частоты падающего импульса света и параметры сложной элементарной ячейки.

В структуре типа В получены следующие показатели: для пикосекундного импульса света достигнуто замедление света 1.5 пс при затухании импульса в 2 раза и слабом изменении формы импульса. Фемтосекундный импульс света, широкий в частотном диапазоне, сильно искажает свою форму. В структуре типа С реализуется максимальная задержка пикосекундного импульса на 2-3 пс, что соответствует 50-ти кратному замедлению скорости света относительно скорости света в вакууме с затуханием импульса в 2-5 раз с небольшим искажением формы.

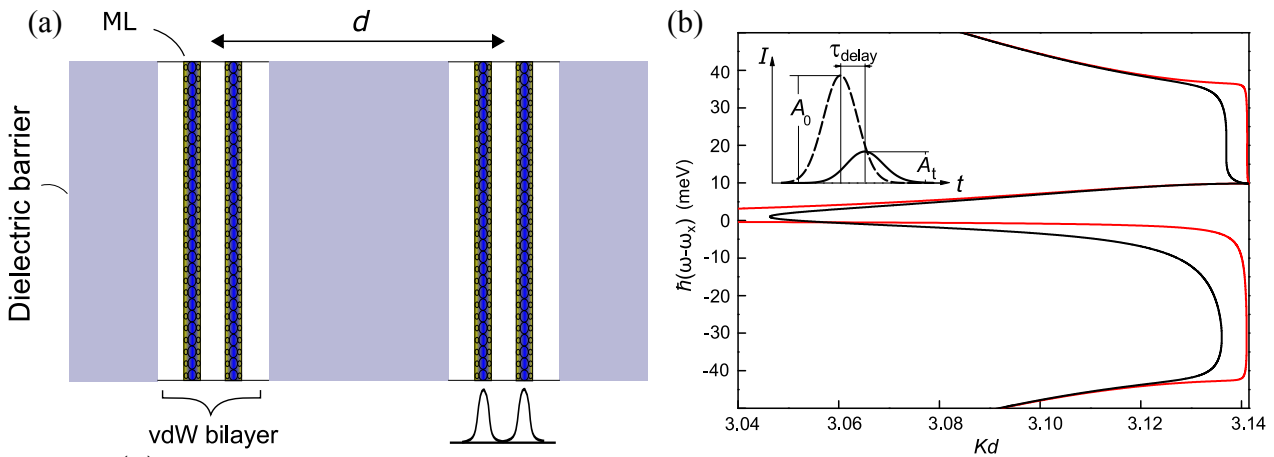


Рис. 3: (a) Дизайн резонансного фотонного кристалла со вставками из бислоев дихалькогенидов переходных металлов. (b) Дисперсия экситон-поляритонов в резонансном фотонном кристалле для двух разных параметров нерадикационного затухания экситонного резонанса 3 мэВ и 0.3 мэВ для черной и красной линии, соответственно. На вставке показано прохождение пикосекундного импульса света.

В разделе §3.4 рассматривается замедление света резонансными фотонными кристаллами с экстремально двумерными вставками. В таких структурах мы заменяем КЯ на бислои из дихалькогенидов переходных металлов — WS_2 (рис. 3). Произведены корректировки модели пропускания света через двумерные вставки с использованием понятия поляризуемости. Для поиска материальных параметров монослоя WS_2 ($\hbar\omega_x$, $\hbar\Gamma_0$, $\hbar\Gamma$) были произведены подгонки экспериментального спек-

тра отражения от структуры с 2D монослоем [22] и получено хорошее согласование при следующих параметрах: $\hbar\omega_0 = 1.75$ эВ, $\hbar\Gamma_0 \sim 0.3$ мэВ и $\hbar\Gamma \sim 3$ мэВ. При использовании бислоев радиационная ширина увеличивается в два раза. Кроме того, в расчетах используются различные величины нерадиационной ширины экситонного резонанса 3 мэВ (черный цвет) и 0.3 мэВ (красный цвет), в предположении, что в будущем качество монослоев будет улучшено.

Медленная ветвь дисперсии экситон-поляритонов в запрещенной зоне (рис. 3) является практически линейной по сравнению со структурами на основе A_2B_6 и перекрывает почти половину запрещенной зоны, что позволяет иметь минимальное искажение формы прошедшего импульса света. Произведены расчеты интенсивности и задержки прошедшего импульса света с вариацией расстройки центральной частоты падающего света, экситонного и брэгговского резонансов. Из расчетов получено, что пикосекундный импульс замедляется на 2 пс с уменьшением интенсивности до 20-30% от исходной величины.

Четвертая глава посвящена нанотрубкам на основе ван-дер-ваальсовых слоев, созданных из дихалькогенидного соединения MoS_2 и их оптическим свойствам.

В разделе §4.1 описываются существующие типы трубчатых микрорезонаторов, большинство из которых сделаны из свернутых тонких пленок или мембран [23]. Симметрия трубок определяет, что такие микрорезонаторы могут поддерживать моды шепчущей галереи. Открытие углеродных нанотрубок [24] способствовало активизации исследований неорганических нанотрубок, в частности ван-дер-ваальсовых нанотрубок на основе ДПМ [25]. Эти материалы уникальны, так как обладают прямой оптической щелью и большой силой осциллятора в монослойном приближении.

В разделе §4.2 описываются структурные свойства синтезированных нанотрубок на основе MoS_2 [26]. Они обладают низкой плотностью дефектов и имеют следующие размеры: радиус может варьироваться в пределах 0.1-1 мкм, толщина стенки изменяется от 10 до 100 нм, длина может достигать нескольких миллиметров. Оптические свойства таких

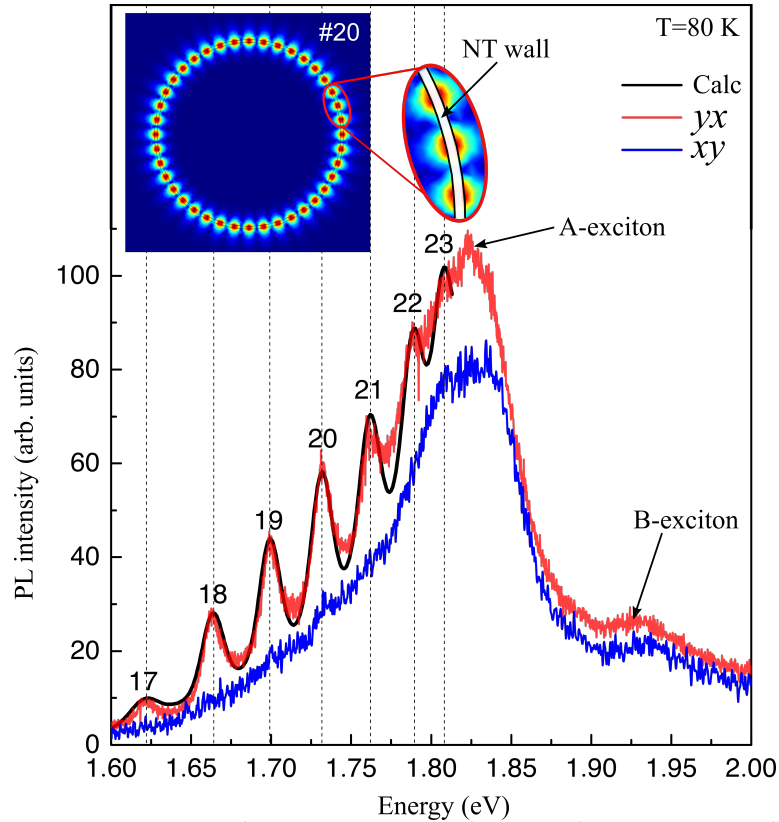


Рис. 4: Спектр микро-ФЛ в yx (красная линия) и xy (синяя линия) конфигурациях поляризации при накачке лазером 1 мВт. В спектре yx наблюдаются резкие пики, обусловленные оптическими модами в резонаторе. Расчетный спектр ФЛ в той же конфигурации показан черной линией. Числами над пиками показаны номера азимутальных мод. На вкладке показано распределение модуля электрического поля в yx -поляризации для моды шепчущей галереи с азимутальным индексом моды $m = 20$.

многослойных нанотрубок исследованы с помощью микро-ФЛ. Было показано, что в спектрах излучения трубок наблюдаются резкие пики оптических мод, которые не регистрируются в многослойных пленках из этого материала [12]. Также были проведены эксперименты по исследованию микро-ФЛ в двух различных поляризационных конфигурациях: xy — накачка вдоль оси нанотрубки, направленной по оси x , детектирование поперек оси; yx — накачка перпендикулярно оси нанотрубки, детектирование вдоль оси. Обнаружено, что при детектировании вдоль оси нанотрубки наблюдаются пики излучения значительной интенсивности, которые соответствуют усилению сигнала на частотах мод шепчущей галереи (рис. 4).

В разделе §4.3 построена модель фотолюминесценции многослойных

нанотрубок на основе MoS_2 . Для ее решения используется принцип взаимности Лоренца, с помощью которого задача о ФЛ заменяется на задачу о рассеянии света на нанотрубке [27]. Модель заключается в том, что падающий поляризованный свет на частоте ω_{exc} с x или y поляризацией генерирует пространственное распределение экситонов $P^{(x,y)}$, которые в свою очередь быстро релаксируют в нижнее состояние и переизлучаются в поле $E^{(x,y)}$ с потерей поляризации. Тогда спектр ФЛ в yx -конфигурации находится следующим образом:

$$\text{PL}_{yx}(\omega) = \iint |E_x^{(x)}(r, \theta; \omega)|^2 P^{(y)}(r, \theta, \omega_{\text{exc}}) dr d\theta, \quad (1)$$

где интеграл берется по сечению трубки. Диаметр исследуемых нанотрубок известен из экспериментов по сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), тогда как толщина стенки нанотрубки находится путем подгонки расчетного спектра (рис. 4, черная линия) к экспериментальному спектру (рис. 4, красная линия). Было достигнуто идеальное согласование при толщине стенки в 45 монослоев и ее флуктуации в 1 монослой. Расчет показал, что моды соответствуют модам шепчущей галереи в yx -поляризации, тогда как в xy -поляризации реализуются моды шепчущей галереи очень низкого порядка, которые не наблюдаются в эксперименте. Кроме того, был прослежен переход от трубчатого случая к цилиндрическому. Разница исчезает при размере полости менее 20% от внешнего радиуса. Изучены зависимости энергии оптических мод от внешнего радиуса и толщины стенки.

В разделе §4.4 обсуждаются особенности спектров, возникающие из-за наклонного угла детектирования, а также возможность формирования экситон-поляритонов в таких нанотрубках. Были проведены исследования микро-ФЛ вдоль оси нанотрубки и продемонстрированы спектры, характерные для планарных и трубчатых структур от плоской геометрии к трубчатой. Показано, что сдвиг и уширение пиков в спектрах ФЛ происходит за счет монослойных флуктуаций внутри стенки нанотрубки и конечного угла детектирования.

Варьирование волнового вектора вдоль оси трубки путем измене-

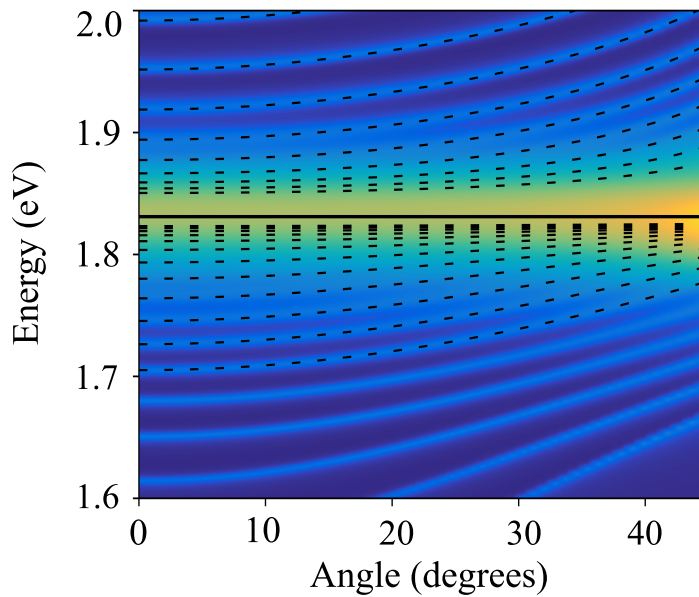


Рис. 5: Спектр ФЛ в зависимости от угла детектирования без учета неоднородного уширения экситонного резонанса при расщеплении Раби ~ 100 мэВ. Пунктирами показаны дисперсии экситон-поляритонов. Черной сплошной линией показана энергия экситона.

ния угла регистрации позволяет теоретически достичь формирования экситон-поляритона при условии, что частота оптических мод совпадает с частотой экситонного резонанса. Сделана оценка максимально достижимого продольно-поперечного расщепления (114 мэВ) и расщепления Раби (400 мэВ) в нанотрубках и рассмотрено влияние формирования экситон-поляритонов на спектр ФЛ (рис. 5) для ненулевого значения расщепления Раби в идеальном случае без учета затухания на экситонном резонансе. При увеличении значения расщепления Раби пики мод вблизи экситонного резонанса уплотняются и перекрываются, что может указывать на наличие экситон-поляритонов в такой системе. Это рассмотрение дает идеализированную картину, поскольку учет затухания приводит к гашению оптических мод на частоте экситонного резонанса. Учет затухания является необходимым при исследовании ФЛ полупроводниковых микрорезонаторов.

В **Заключении** обобщены основные результаты работы:

- Продемонстрирована возможность получения совершенных чашеобразных микрорезонаторов на основе III-нитридов с помощью МПЭ на профилированных подложках. Показано, что в таких микроре-

зонаторах реализуется селективное усиление сигнала оптическими модами типа мод шепчущей галереи низких порядков.

- Обнаружено, что изменение комплексной диэлектрической функции материала резонатора с ростом температуры влияет на характер распределения электромагнитного поля и энергии оптических мод. Моделирование оптических мод и сопоставление с экспериментальными пиками в спектрах микро-ФЛ является новым способом определения дисперсии показателя преломления собственного материала полупроводникового микрорезонатора.
- Продемонстрировано, что изолированные наноклонны GaN с одиночными вставками InGaN КЯ, выращенные на профилированных сапфировых подложках, представляют собой микрорезонаторы с модами типа Фабри-Перо. Совместный анализ результатов моделирования собственных мод такого микрорезонатора, спектров микро-КЛ и спектров ФЛ, измеренных с временным разрешением, показал, что усиление излучения из InGaN КЯ обусловлено эффектом Парселла.
- Показана возможность формирования кольцевого резонатора с модами шепчущей галереи в основании полусферического выступа на профилированной подложке, который также способен усиливать интенсивность сигнала за счет эффекта Парселла.
- Рассмотрены новые типы структур для замедления света — резонансные фотонные кристаллы со сложной элементарной ячейкой. Показаны преимущества использования этих структур над резонансными фотонными кристаллами с простой элементарной ячейкой. Теоретически, используя метод матриц переноса, описано явление замедления света в таких структурах. Показано, что задержка пикосекундных импульсов может достигать 2 пс.
- Представлен дизайн резонансных фотонных кристаллов, где вместо классических КЯ используется новый тип материалов - 2D бислои

из дихалькогенидов переходных металлов. Показано, что применение таких монослоев позволит получать задержку света вплоть до 2 пс с уменьшением интенсивности падающего импульса до 20-30% от исходной величины. Практически линейная дисперсия медленной моды в ван-дер-ваальсовых структурах покрывает почти половину стоп зоны, что позволяет получить минимальное искажение формы прошедшего импульса света.

- Обнаружено, что спектр ФЛ многостеночной нанотрубки содержит пики, поляризованные вдоль оси трубки, возникновение которых связано с модами шепчущих галерей. Получено хорошее соответствие между экспериментальными данными в разных поляризационных конфигурациях и теоретической моделью при учете неоднородности в толщинах стенки нанотрубки и наличия дисперсии показателя преломления. Объяснено различие между xu и ux конфигурациями поляризованной ФЛ.
- Продемонстрировано, что моды шепчущей галереи по преимуществу заковантованы в стенке нанотрубки между внутренней и внешней границей. Проанализирован плавный переход от режима нанотрубки к цилиндрическому режиму. Отмечено, что при размере полости меньше чем 20% от внешнего радиуса, эффектами квантования в стенке можно пренебречь. Моделирование оптических мод является неразрушающим методом определения толщины стенки нанотрубки.
- Показано, что положения пиков ФЛ, связанных с модами шепчущей галереи, изменяются в зависимости от числа монослоев в стенке нанотрубки, тогда как их уширение связано с конечностью угла детектирования.
- Предсказана возможность реализации режима сильной связи между экситоном и оптической модой с формированием экситон-поляритонов в ультра-качественных нанотрубках с малым неоднородным уширением и описано, как такое взаимодействие влияет на спектр ФЛ.

Основные результаты работы изложены в публикациях:

- [A1] D.R. Kazanov, V.H. Kaibyshev, V.U. Davydov, A.N. Smirnov, V.N. Jmerik, N.V. Kuznetsova, S.V. Ivanov, T.V. Shubina. Mode switching in InN microresonators // *Journal of Physics: Conference Series* **643**, 012061 (2015).
- [A2] T.V. Shubina, G. Pozina, V.N. Jmerik, V.Yu. Davydov, C. Hemmingsson, A.V. Andrianov, D.R. Kazanov, S.V. Ivanov. III-nitride tunable cup-cavities supporting quasi whispering gallery modes from ultraviolet to infrared // *Scientific Reports* **5**, 17970 (2015).
- [A3] Д.Р. Казанов, В.Х. Кайбышев, В.Ю. Давыдов, А.Н. Смирнов, В.Н. Жмерик, Н.В. Кузнецова, П.С. Копьев, С.В. Иванов, Т.В. Шубина. Температурное переключение резонаторных мод в микрокристаллах InN // *Физика и техника полупроводников* **49**, 11 (2015).
- [A4] T.V. Shubina, V.N. Jmerik, V.Yu. Davydov, D.R. Kazanov, A.N. Smirnov, D.V. Nechaev, N. Kuznetsova, G. Pozina, C. Hemmingsson, S.V. Ivanov. III-nitride microcrystal cavities with quasi whispering gallery modes grown by molecular beam epitaxy // *Physica Status Solidi B* **253**, 845 (2016).
- [A5] D.R. Kazanov, N. Kuznetsova, D.S. Zolotukhin, V.N. Jmerik, V.Yu. Davydov, A.N. Smirnov, T.V. Shubina. Mode adjustment in hexagonal microresonators with an active region // *Journal of Physics: Conference Series* **741**, 012126 (2016).
- [A6] Д.Р. Казанов, А.В. Пошакинский, Т.В. Шубина. Замедление света резонансными фотонными кристаллами со сложной элементарной ячейкой // *Письма в ЖЭТФ* **105**, 10-14 (2017).
- [A7] D.R. Kazanov, A.V. Poshakinskiy, T.V. Shubina. Resonant photonic crystals based on van der Waals heterostructures for effective light pulse retardation // *Superlattices and Microstructures* **112**, 639-643 (2017).
- [A8] D.R. Kazanov, A.V. Poshakinskiy, S.V. Sorokin, T.V. Shubina. Light propagation through conventional and extreme-2D van-der-Waals resonant photonics crystals // *Journal of Physics: Conference Series* **917**, 062022 (2017).

- [A9] D.R. Kazanov, G. Pozina, V.N. Jmerik, T.V. Shubina. Ring resonator optical modes in InGaN/GaN structures grown on micro-cone-patterned sapphire substrates // *Journal of Physics: Conference Series* **993**, 012020 (2018).
- [A10] D.R. Kazanov, A.V. Poshakinskiy, V. Yu. Davydov, A.N. Smirnov, I.A. Eliseyev, D.A. Kirilenko, M. Remskar, S. Fathipour, A. Mintairov, A. Seabaugh, B. Gil, T.V. Shubina. Multiwall MoS₂ tubes as optical resonators // *Applied Physics Letters* **113**, 101106 (2018).
- [A11] D.R. Kazanov, E.A. Evropeytsev, T.V. Shubina. The cavity-effect in site-controlled GaN nanocolumns with InGaN insertions // *Semiconductors* **53**, 2085-2089 (2019).
- [A12] D. Kazanov, M. Rakhlin, A. Poshakinskiy, T. Shubina. Towards exciton-polaritons in an individual MoS₂ nanotube // *Nanomaterials* **10**, 373 (2020).

Список литературы

- [1] A versatile source of single photons for quantum information processing / M. Förtsch, J. U. Fürst, C. Wittmann et al. // *Nature Communications*. — 2013. — Vol. 4. — P. 1818.
- [2] Hill M. T., Gather M. C. Advances in small lasers // *Nature Photonics*. — 2014. — Vol. 8. — P. 908.
- [3] Vollmer F., Arnold S. Whispering-gallery-mode biosensing: label-free detection down to single molecules // *Nature Methods*. — 2008. — Vol. 5. — P. 591.
- [4] Whispering gallery mode microresonators : Fundamentals and applications / G. Righini, Y. Dumeige, P. Féron et al. // *Rivista del Nuovo Cimento*. — 2011. — Vol. 34, no. 7. — P. 435.
- [5] Room-temperature continuous-wave lasing in GaN/InGaN microdisks / A. C. Tamboli, E. D. Haberer, R. Sharma et al. // *Nature Photonics*. — 2007. — Vol. 1, no. 1. — P. 61.
- [6] Effects of non-stoichiometry and compensation on fundamental parameters of heavily-doped inn / T. V. Shubina, M. M. Glazov,

- S. V. Ivanov et al. // *physica status solidi c*. — 2007. — Vol. 4, no. 7. — P. 2474.
- [7] Aspuru-Guzik A., Walther P. Photonic quantum simulators // *Nature Physics*. — 2012. — Vol. 8, no. 4. — P. 285.
- [8] Monroe C. Quantum information processing with atoms and photons // *Nature*. — 2002. — Vol. 416, no. 6877. — P. 238.
- [9] Ultrafast optical signal processing with bragg structures / Y. Liu, S. Fu, B. A. Malomed et al. // *Applied Sciences*. — 2017. — Vol. 7, no. 6. — P. 556.
- [10] Real-Space Observation of Ultraslow Light in Photonic Crystal Waveguides / H. Gersen, T. J. Karle, R. J. P. Engelen et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2005. — Vol. 94, no. 7. — P. 4.
- [11] Polyhedral and cylindrical structures of tungsten disulphide / R. Tenne, L. Margulis, M. Genut, G. Hodes // *Nature*. — 1992. — Vol. 360, no. 6403. — P. 444.
- [12] Excitonic emission in van der waals nanotubes of transition metal dichalcogenides / T. V. Shubina, M. Remškar, V. Y. Davydov et al. // *Annalen der Physik*. — 2019. — Vol. 531, no. 6. — P. 1800415.
- [13] Broadband, polarization-sensitive photodetector based on optically-thick films of macroscopically long, dense and aligned carbon nanotubes / S. Nanot, A. W. Cummings, C. L. Pint et al. // *Scientific Reports*. — 2013. — Vol. 3, no. 1. — P. 1335.
- [14] Nonequilibrium condensates and lasers without inversion: Exciton-polariton lasers / A. Imamoglu, R. J. Ram, S. Pau, Y. Yamamoto // *Physical Review A*. — 1996. — Vol. 53, no. 6. — P. 4250.
- [15] Phonon-polariton excitations in photonic crystals / K. C. Huang, P. Bienstman, J. D. Joannopoulos et al. // *Physical Review B*. — 2003. — Vol. 68, no. 7. — P. 075209.
- [16] Direct observation of whispering gallery mode polaritons and their dispersion in a ZnO tapered microcavity / L. Sun, Z. Chen, Q. Ren et al. // *Physical Review Letters*. — 2008. — Vol. 100. — P. 156403.

- [17] *Aleksandrov E. B., Zapasskii V. S.* Chasing 'slow light' // *Phys. Usp.* — 2006. — Vol. 49, no. 10. — P. 1067.
- [18] *The Slow Light in Gallium Nitride / T. V. Shubina, M. M. Glazov, N. Gippius, B. Gil.* — Oxford University Press, 2013.
- [19] *Baba T.* Slow light in photonic crystals // *Nature Photonics.* — 2008. — Vol. 2. — P. 465.
- [20] *Tunable slow light in bragg-spaced quantum wells / J. P. Prineas, W. J. Johnston, M. Yildirim et al.* // *Applied Physics Letters.* — 2006. — Vol. 89, no. 24. — P. 241106.
- [21] *Ivchenko E., Nesvizhskii A. I., Jorda S.* Bragg reflection of light from quantum-well structures // *Phys. Solid State.* — 1994. — Vol. 36. — P. 1156.
- [22] *Valley dynamics probed through charged and neutral exciton emission in monolayer WSe₂ / G. Wang, L. Bouet, D. Lagarde et al.* // *Phys. Rev. B.* — 2014. — Vol. 90. — P. 075413.
- [23] *Optical properties of rolled-up tubular microcavities from shaped nanomembranes / G. S. Huang, S. Kiravittaya, V. A. Bolaños Quñones et al.* // *Applied Physics Letters.* — 2009. — Vol. 94, no. 14. — P. 141901.
- [24] *Iijima S.* Helical microtubules of graphitic carbon // *Nature.* — 1991. — Vol. 354, no. 6348. — P. 56.
- [25] *Colloquium: Excitons in atomically thin transition metal dichalcogenides / G. Wang, A. Chernikov, M. M. Glazov et al.* // *Reviews of Modern Physics.* — 2018. — Vol. 90, no. 2. — P. 021001.
- [26] *MoS₂ as microtubes / M. Remškar, Z. Skraba, F. Cléton et al.* // *Applied Physics Letters.* — 1996. — Vol. 69, no. 3. — P. 351.
- [27] *One-dimensional ZnO exciton polaritons with negligible thermal broadening at room temperature / A. Trichet, L. Sun, G. Pavlovic et al.* // *Physical Review B.* — 2011. — Vol. 83, no. 4.