

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук**

Гулькина Дмитрия Николаевича

**на тему: «Микроскопия резонансных оптических состояний в фотонных
кристаллах и полупроводниковых метаповерхностях»
по специальности 1.3.19 – «лазерная физика»**

Актуальность темы диссертации

В диссертационной работе Гулькина Д.Н. исследуется распространение электромагнитных волн видимого диапазона в фотонных структурах с характерным размером на масштабе длины волны излучения и в метаповерхностях на субволновом масштабе. Пространственная периодичность приводит к брэгговской дифракции излучения на частотах в фотонной запрещенной зоне. Это позволяющей локализовать поверхностные волны в сочетании с полным внутренним отражением в планарных и прямоугольных волноводах. Возбуждение поверхностных волн использует дифракцию на решетке и магнито-дипольные резонансы наночастицы. Для увеличения добротности резонансов и длины пробега поверхностных волн рассматриваются полностью диэлектрические структуры. В качестве материалов использованы высокопреломляющие тонкие пленки пентаоксида тантала, полимерные структуры, непрямоугольные (кремний) и прямоугольные (арсенид галлия) полупроводники. В последнем случае оптическое индуцирование и релаксация свободных носителей допускает управление световыми потоками с характерным временем модуляции около 200 фс. Получение структур, характеристика образцов и измерение оптических явлений используют ряд передовых технологий и методов: микроскопия утечки и задней фокальной плоскости, метод зонд-накачка, атомно-силовая и растровая электронная микроскопия, двухфотонная полимеризация, эпитаксиальный рост и атомно-слоевое осаждение, электронно-лучевая

литография, реактивное ионное травление, обратный лазерно-индуцированный перенос кремниевой наночастицы.

Для научного сообщества значительный интерес к фундаментальным вопросам распространения блоховских поверхностных волн в фотонных интегральных схемах связан также с возможностью их практического приложения для реализации фемтосекундных систем обработки оптической информации, а также широкого класса оптических устройств: фильтров, сенсоров, микролазеров. В связи с этим тема диссертационной работы Д.Н. Гулькина, безусловно, **актуальна и перспективна**.

Структура и содержание диссертации

Диссертация Д.Н. Гулькина состоит из введения и четырех глав, заключения и приложений. Библиографический список включает 202 наименования, он подобрал в себя основополагающие классические и современные работы по теме диссертации. Текст диссертации изложен на 178 страницах, постановка задач и результаты сопровождаются профессионально выполненными иллюстрациями и графиками.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, описана научная новизна диссертационной работы, приведены защищаемые положения и список публикаций автора по теме работы.

В главе 1 проведен исторический экскурс и анализ современных работ по теме диссертационного исследования. Введен набор понятий, необходимый для понимания основного содержания. Сделан обзор объектов и методов исследования, экспериментальных и теоретических. Объединяющим началом всех приведенных в диссертации исследований оказывается поставленная и отработанная автором методика обнаружения и изучения резонансных оптических состояний в фотонных кристаллах и волноводных структурах. В первую очередь это микроскопия задней фокальной плоскости с фильтрацией в пространстве волновых векторов рассеянного излучения; подключение к

установке второй камеры черед 4f-систему позволяет поставить также микроскопию утечки излучения поверхностных состояний. Для изучения быстрых оптических процессов в прямозонных полупроводниковых метаповерхностях поставлена спектроскопия «накачка-зонд» с временем разрешения 6.6 фс, что соответствует задержке импульса на пути в 2 мкм.

Глава 2 подробно описывает эффект возбуждения блоховских поверхностных волн на поверхности распределенного брэгговского отражателя с помощью одиночной кремниевой наночастицы за счет магнитодипольного резонанса типа Ми. Возбуждение волны в прямом и обратном направлениях при наклонном падении излучения оказывается спектрально-селективным в пределах спектрального диапазона 30 нм. По мере увеличения частоты света вблизи магнитного дипольного резонанса частицы преимущественно прямое возбуждение на длине волны 750 нм плавно преобразуется в преимущественно обратное на длине волны 720 нм.

В **главе 3** метод оптической микроскопии утечки излучения применён для характеристики модового состава блоховских поверхностных электромагнитных волн в волноводных структурах. Профили первых трех мод и их комбинации в прямоугольных волноводах с высотой от 170 нм до 215 нм и шириной от 1.4 мкм до 2 мкм находится в соответствии с прямыми расчетами и измерениями методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии. Многомодовая интерференция позволяет осуществить планарных разветвителях с высотой 215 нм и шириной до 4.4 мкм, эффективность преобразования сопоставлена с реализованными разветвителями Х- и Y-типа.

В **главе 4** продемонстрировано субпикосекундное оптическое перераспределение энергии света в дифракционных порядках метаповерхностей, состоящих из тримеров ми-резонансных частиц арсенида галлия и оптимизированных под перераспределение энергии в направлении одного из двух боковых порядков дифракции. Оптически индуцированная модуляция интенсивности дифракционных максимумов достигает 15% при

плотности энергии накачки 4.5 мкДж/см^2 . Эффект модуляции происходит вследствие оптической генерации свободных носителей в арсениде галлия, разного изменения показателя преломления разных частиц тримера и соответствующего изменения диаграммы рассеяния метаповерхности. Характерное время модуляции составляет приблизительно 200 фс, а при характерном времени релаксации свободных носителей 1.5 пс.

В заключении четко сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Анализ диссертационной работы и публикации автора по теме исследования свидетельствуют об **обоснованности защищаемых научных положений**, выносимых автором на защиту. Результаты получены экспериментально. Проведены подтверждающие расчеты и предложено применение подобных фотонных структур. Результаты обладают **научной новизной**.

Практическая значимость работы

На основе современных методов нанофотоники, включая микроскопию в задней фокальной плоскости, проведено последовательное экспериментальное исследование распространения блоховских поверхностных волн в диэлектрических фотонных структурах. Научная и практическая значимость полученных результатов обусловлена возможностью создания новых волноведущих, резонаторных и фокусирующих устройств на основе фотонных интегральных схем.

Замечания по диссертационной работе:

- 1) В обзорной главе при введении понятия числовой апертуры на стр. 18 отмечается: «Если фокус линзы равен f , то радиус основания конуса r на линзе равен $f * \sin \theta$ ». С учетом использованных в исследовании объективов большой числовой апертуры следует указать границы применимости данного соотношения.
- 2) В Главе 2 волновой вектор блоховской поверхностной волны (БПВ) измеряется методом микроскопии задней фокальной плоскости (ЗФП).

Описание измерений приведено на стр. 97: “БПВ, имеющая постоянное значение волнового вектора независимо от направления распространения, на изображении ЗФП выглядит как кольцо с ненулевой толщиной с $\Delta n_{\text{эфф}} \sim 0.03$. К такому кольцу на изображении ЗФП, составленном из пикселей камеры, можно применить теорию об окружностях на решётках”. Стоит объяснить, какими физическими причинами обусловлена ненулевая толщина кольца, помимо размера пикселя камеры.

3) Изученный в главе 3 эффект многомодовой интерференции блоховских поверхностных волн представляется тесно связанным с эффектом Тальбота для дифракционных решеток. С учетом зеркальных граничных условий на краях волновода было бы полезно сопоставить полученные закономерности с аналитической формулой для периода Тальбота.

4) При объяснении вводимых терминов в тексте диссертации часто приводятся англоязычные аналоги. Это полезно, поскольку часть терминов не успела устояться в русскоязычной литературе:

- методы пред-создания (англ. preprocessing) и пост-создания (англ. post-processing),
- «двухцветный» метод (англ. two-color pump-probe interferometry),
- управление направленностью рассеяния света на структуре (англ. «beam steering»),
- «вытекающие» поверхностные моды (англ. «leaky»),
- Свободнорадикальная полимеризация (англ. free-radical photopolymerization mechanism),
- бокскап (англ. boxcar averager),
- плотность энергии накачки (флюенс, англ. fluence),
- суперячейка (англ. Supercell) и т.д.

Наличие таких терминов обусловлено бурным развитием направления, поэтому в соответствии с приведенными в диссертации ценными методическими замечаниями, в продолжение списка сокращений на стр. 158 было бы вполне уместно составление краткого глоссария. Авторский стиль

изложения оставляет сильное положительное впечатление не только с научной, но также и с методической точки зрения. Несмотря на это в тексте замечен ряд опечаток и неточностей. В некоторых местах на рисунках не указаны оси, масштабы микрофотографий. В ссылке на пространственное преобразование Фурье ([9] Сивухин Д. В., Курс общей физики. IV том. Оптика, М.: Наука, 2002) стоило указать в каком именно параграфе учебника следует искать преобразование. Не ясно, что понимается под «наилучшим удержанием энергии» и «наилучшей величиной рассеяния» на стр. 119 и 123.

Сделанные замечания не затрагивают выносимые на защиту положения и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений

Результаты исследования, вошедшие в диссертацию, могут считаться научно достоверными на основании использования строго научных методов исследования и, в частности, математически корректной количественной проверки совпадения теоретических выводов и экспериментальных данных. Основные результаты опубликованы в ведущих журналах по оптике и апробированы на передовых научных конференциях.

Заключение

Считаю, что в целом диссертационная работа Д.Н. Гулькина «Микроскопия резонансных оптических состояний в фотонных кристаллах и полупроводниковых метаповерхностях» выполнена на актуальную тему, на высоком научном уровне. Текст диссертации выдержан в строгом научном стиле и для ясности сопровождается качественными иллюстрациями. **Автореферат** соответствует тексту диссертации, правильно и полно передаёт её содержание.

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную исследовательскую работу, отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.19 – «лазерная физика» (по физико-

математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Гулькин Дмитрий Николаевич безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией фотоники молекулярных систем
Института физики им. Л. В. Киренского ФГБНУ «Федеральный
исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского
отделения Российской академии наук»
Тимофеев Иван Владимирович

«__» _____ 2023г.

Контактные данные:

Тел.: +7 (3912) 90-56-37. E-mail: tiv@iph.krasn.ru

Степень и шифр специальности, по которой официальным оппонентом была
защищена диссертация: ☐

Доктор физико-математических наук, 01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

660036, г.Красноярск, ул.Академгородок, 50, Институт физики им. Л. В.
Киренского ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский
научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»,
лаборатория фотоники молекулярных систем

Подпись официального оппонента

Тимофеева Ивана Владимировича удостоверяю:

Ученый секретарь ИФ СО РАН, к.ф.-м.н.



Злотников А.О.

«__» _____ 2023 г.