

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Гартман Александры Дмитриевны «Оптические метаповерхности
и интегральные фотонные структуры на основе кремния и нитрида
кремния для управления светом на субволновых масштабах»,
представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа А.Д. Гартман посвящена исследованию распространения света в периодических наноструктурных средах и разработке схем по управлению свойствами оптического излучения на субволновых масштабах.

Научные исследования, проводимые А.Д. Гартман, находятся на стыке нанофотоники и физики метаматериалов, которые на сегодняшний день являются одними из самых перспективных и быстроразвивающихся направлений современной физики. Помимо фундаментальной значимости, особый интерес к периодическим наноструктурным средам и метаматериалам связан с решением целого ряда прикладных задач волноводной оптики, разработкой оптических интегральных схем, развитием квантово-оптических технологий и квантовых систем связи. Кроме того, такие системы открывают новые возможности по управлению распространением и свойствами света на малых масштабах, что является крайне востребованным, поскольку позволяет осуществлять интеграцию устройств нанофотоники и оптоэлектроники «на чипе». Диссертационная работа А.Д. Гартман направлена на проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований оптических эффектов в резонансных волноводных фотонных структурах с целью разработки схем по управлению свойствами оптического излучения на субволновых масштабах. Таким образом, актуальность темы исследований не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения с основными выводами по результатам исследования и списка литературы. Объем диссертации составляет 142 страницы и включает в себя 84 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 162 библиографические ссылки.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, научная новизна диссертационной работы

и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации диссертационной работы.

Первая глава содержит подробный обзор литературы по теме работы. Представлен детальный анализ современного состояния научных исследований в нанофотонике. Обсуждаются резонансы Ми, имеющие место в диэлектрических наноструктурах, а также применение метаповерхностей в оптике и фотонике. Отдельное внимание уделено проблеме пространственного разделения пучков света с различными значениями орбитального углового момента и их применению в кодировании квантовой информации. Также обсуждаются свойства экситонных возбуждений в пленках диалкогенидов переходных металлов и возможность контроля их направленного распространения в схемах с резонансными волноводными структурами. На основе проведенного анализа делается вывод об актуальности разработки новых методов управления излучением на основе резонансных фотонных наноструктур, интегрируемых на чипах.

Вторая глава диссертации посвящена проблемам пространственного разделения скалярных световых пучков с различными значениями орбитального углового момента. На основе численного моделирования автором была разработана резонансная метаповерхность, состоящая из массива кремниевых цилиндрических наночастиц, обеспечивающая требуемые фазовые сдвиги светового пучка в различных точках пространства практически без потерь по пропусканию. Фактически была создана фазовая «маска», позволяющая осуществлять фазовый контроль пучка в поперечном направлении и при необходимости реализовать фазовое преобразование, обеспечивающее поляризационно независимое разделение световых компонент по проекции орбитального углового момента. Создание требуемого фазового профиля было реализовано экспериментально. Была продемонстрирована возможность управления пространственным распределением фазы светового пучка с возможностью интеграции такой схемы на чипе, что является важным результатом.

В третьей главе обсуждается проблема эффективной интеграции экситонных излучателей в тонких пленках селенита индия с резонансными волноводными системами на основе кремния. Первоначально с использованием программного пакета было проведено численное моделирование кремниевого

волновода с дисковыми нанорезонаторами в центральной части и выполнен дизайн оптимальной волноводной структуры. Затем были проведены экспериментальные исследования захвата и распространения излучения фотолюминесценции, возникающей в тонких пленках селенита индия, в изготовленном образце с резонансной волноводной структурой. Для образцов с дисковыми нанорезонаторами в волноводе обнаружен эффект усиления фотолюминесценции до 45 раз. При этом эффективность заведения излучения в резонансную волноводную систему оказалась в 2 раза больше чем для случая сплошного волновода. Таким образом, удалось эффективно реализовать интеграцию излучателей с волноводной системой на микронных масштабах.

Четвертая глава посвящена дальнейшей оптимизации резонансной волноводной системы за счет использования нитрида кремния с более низким коэффициентом поглощения, а также тонких пленок на основе дихалькогенидов переходных металлов как источников излучения возбуждаемых экситонных переходов. На основе численного моделирования был разработан оптимальный дизайн волноводной структуры с включенными в нее наноантеннами прямоугольной формы. Был исследован спектр пропускания такой структуры, а также проанализировано влияние положения и ориентации дипольного излучателя на величину оптической связи с резонансным волноводом и коэффициент усиления излучения в волноводе. На основе проведенных теоретических исследований в случае нанорезонатора продемонстрировано возрастание коэффициента оптической связи и коэффициента Парселла более чем на порядок по сравнению со сплошным волноводом.

В заключении приводятся основные результаты диссертации, список работ автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Следует отметить, что диссертационная работа А.Д. Гартман представляет собой масштабное научное исследование, выполненное на высоком уровне. Результаты работы апробированы публикациями в авторитетных журналах, патентом и докладами на российских и международных конференциях. Несомненным достоинством работы является согласованное и взаимосвязанное применение теоретических и экспериментальных методов исследования, что открывает возможности для решения прикладных задач. Одним из важных результатов, полученных в диссертации, является проектирование и экспериментальная реализация фазовой «маски» микронных размеров,

демонстрирующей возможность высокоточного управления пространственным распределением фазы светового пучка с субволновым разрешением.

Таким образом, в диссертации получен целый ряд важных результатов, новизна и научная значимость которых, не вызывает сомнений. Достоверность результатов подтверждается согласием проведенного теоретического анализа и полученных экспериментальных результатов.

Автореферат полностью соответствует тексту диссертационной работы.

Тем не менее, по работе имеется ряд замечаний:

1. В работе во многих случаях свойства резонансной наноструктуры рассчитываются исходя из анализа одиночного наноструктурного элемента (например, нанодиска). При этом остается не ясным, как отдельные элементы влияют друг на друга в цепочке и как проявляются коллективные эффекты, возникающие в случае упорядоченного и периодического расположения таких наномантенн.

2. Представляется важным дать более подробное физическое объяснение и проанализировать физические механизмы обнаруженного эффекта возрастания интенсивности фотолюминесценции в 45 раз для образцов с дисковыми нанорезонаторами по сравнению со сплошными волноводами.

3. В работе в численном анализе источник дипольного излучения характеризовался малыми размерами и фактически рассматривался точечным. В этом случае остаются не учтенными возможные достаточно большие размеры и область локализации экситонов, выступающих в качестве излучателей, а также эффекты их множественного рождения и взаимодействия друг с другом.

4. Следует также отметить, что работа не свободна от опечаток и неточностей. В ряде случаев указаны ссылки на неверные номера рисунков или формул. Имеются опечатки в формулах.

Приведенные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационного исследования, а также его достоверность, актуальность и научную значимость.

Диссертационная работа Гартман А.Д. является целостной научно-исследовательской работой, которая выполнена на высоком научном уровне, содержит новые решения актуальных задач и представляет собой важный вклад в

физику распространения электромагнитных полей в периодических наноструктурных средах и метаматериалах.

Считаю, что диссертация «Оптические метаповерхности и интегральные фотонные структуры на основе кремния и нитрида кремния для управления светом на субволновых масштабах» соответствует специальности 1.3.6. Оптика и отвечает всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор — Гартман Александра Дмитриевна — заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники
физического факультета Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова

Тихонова Ольга Владимировна

Дата составления отзыва: 18 сентября 2023 года

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Телефон: +7 (495) 939-13-04

E-mail: ovtikhonova@physics.msu.ru

Подпись Тихоновой Ольги Владимировны УДОСТОВЕРЯЮ:

Учёный секретарь учёного совета
физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
д.ф.-м.н., профессор

В.А. Караваев