

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 вопросов, связанных с применением резонансных наноструктур для управления светом в субмикронном масштабе в задачах интегральной оптики и фотоники.

Появление целого спектра технологий формирования двумерных и трехмерных массивов наноструктур произвольных конфигураций из различных материалов позволяет создавать метаматериалы, обладающие свойствами, не встречающимися у природных материалов, а также устройства на их основе, такие как метаповерхности или фотонные кристаллы с запрограммированными дефектами. Такие устройства могут применяться в качестве оптических элементов — преобразователей амплитуды, фазы и поляризации пучка (планарные линзы, голограммы, фазовые пластинки и др.).

С другой стороны, технологии прецизионного наноструктурирования материалов позволяют создавать компактные интегральные устройства для манипуляции как классическими, так и квантовыми световыми полями. Здесь задача эффективного сопряжения волноведущих систем и источников фотонов является актуальной, и как показано в данной работе, она может эффективно решаться с помощью резонансных устройств на основе наноструктур.

Другая часть диссертационной работы связана с разработкой устройств для управления пучками с орбитальным угловым моментом. Уникальные свойства таких пучков находят применение в различных областях, включая манипулирование нано- и микрочастицами, приведение в действие микромашин, оптику высокого разрешения, микроскопия, квантовые информационные технологии, системы связи в свободном пространстве, и создание хиральных 3D и поверхностных наноструктур. Вихревые пучки с азимутальной или радиальной поляризацией обладают способностью к более острой фокусировке по сравнению с обычными пучками с радиальной или линейной поляризацией. Поверхностные плазмоны, включая темные моды, могут эффективно возбуждаться вихревыми пучками, что позволяет найти возможные применения в биохимическом зондировании и наноразмерной лазерной генерации.

Таким образом, представленная работа имеет сейчас особую актуальность.

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.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, обозначаются объект, предмет и методология исследования, формулируются научная новизна диссертационной работы и практическая значимость полученных результатов, представляются положения, выносимые на защиту, а также сведения о достоверности результатов и апробации работы.

Первая глава посвящена обзору основных вопросов, связанных с использованием метаповерхностей для управления параметрами излучения, включая распределение амплитуды, фазы и поляризации светового пучка. Это позволяет использовать метаповерхности в качестве планарных линз, фазовых пластинок, различных конверторов и детекторов структуры поля в пучке, а также для формирования метаголограмм. Отдельная часть обзора посвящена применению метаповерхностей для формирования, преобразования и разделения пучков с орбитальным угловым моментом. Другая часть обзора посвящена использованию и интеграции экситонных излучателей на основе тонких пленок селенида индия и гетероструктур на основе диалкогенидов переходных металлов.

Во **второй главе** диссертации автор производит численное моделирование кремневой метаповерхности, позволяющей проводить пространственное разделение пучков с различными значениями орбитального углового момента. Метаповерхность составлена из отдельных областей, где субволновые кремниевые наноцилиндры расположены с различным периодом. Автором была проведена оптимизация параметров периодической системы наноцилиндров, чтобы создать разный локальный набег фазы при коэффициенте пропускания близком к единице.

Метаповерхность, сформированная из областей с разным периодом следования наноцилиндров, позволяет управлять формой и дальнейшим направлением распространением пучка в зависимости от значения орбитального углового момента. Автором было проведено моделирование распространения пучков Лагерра-Гаусса с помощью комбинации методов FDTD и решения уравнений дифракции Фраунгофера. Важной особенностью данного метода построения метаповерхности является независимость от поляризации падающего пучка.

Третья глава посвящена моделированию и экспериментальным исследованиям интеграции экситонных источников излучения с резонансными кремниевыми волноведущими системами. Исследовалась система, состоящая из планарного кремниевого волновода, в который встроена резонансная структура, состоящая из периодической системы кремниевых нанодисков, а также экситонного излучателя, представляющий собой накрывающую волновод

пленку InSe. За счет совпадения длины волны экситонного перехода и резонанса периодической системы удалось усилить фотолюминесценцию тонких пленок селенида индия, размещенных на ней, повысить эффективность перекачки излучения люминесценции в волновод по сравнению с неструктурированным образцом. Проведенное моделирование качественно совпадает с экспериментальными результатами, также полученными в рамках представленной работы.

Данные исследования нашли продолжение в численном моделировании, проведенном в **четвертой главе**. Здесь волноведущая система была оптимизирована за счет применения вместо кремния нитрида кремния, обладающего меньшим поглощением. В качестве дипольных излучателей в этой главе взяты локализованные межслоевые экситонные состояния, связанные с дефектами в гетероструктурах на основе тонких пленок дихалькогенидов переходных металлов. В работе были подобраны геометрические параметры элементов, составляющих брэгговскую резонансную систему, встроенную в волновод. Для этого ширины нескольких центральных элементов модулировались параболической зависимостью, что позволило повысить добротность резонансной системы. Было проведено исследование зависимости факторов усиления поля и коэффициента Парселла от параметров дипольного источника, таких как его положение и поляризация. Продемонстрирована возможность эффективной резонансной перекачки излучения в волновод.

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

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне, апробирована публикациями в авторитетных журналах и докладами на российских и международных конференциях. Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

1. Среди публикаций автора хотелось бы видеть больше работ в международных высокорейтинговых изданиях. На мой взгляд уровень полученных результатов и актуальность тематики это позволяют.
2. В Главе 2 не освещен алгоритм перехода от требуемого континуального распределения фазы в преобразующем фильтре, задаваемого формулой (35) к дискретному массиву квадратных участков размером 20×20 , где каждый участок создает один из 4 вариантов фазового сдвига: 0 , $\pi/2$, π или $3\pi/2$, в зависимости от периода следования нанодисков. На размерах всего фильтра фаза достаточно плавно изменяется в диапазоне $0-200\pi$, следовательно масштаб изменения фазы на каждом квадратном участке составляет порядка 10π . Поэтому результат сильно зависит от алгоритма усреднения

фазы на участке и выбора одного из 4 вариантов периода следования нанодисков.

3. Есть небрежность в оформлении работы (например, буквы (в) и (г) в описании рис. 57 не соответствуют буквам в самом рисунке, названия пунктов 3.1 и 3.2 главы 4 повторяются, есть битая ссылка на рисунок на странице 119 и др.)

Указанные замечания не умаляют заслуг соискателя в получении важных и интересных результатов, равно как и их высокой оценки и не влияют на общее впечатление от диссертации.

Таким образом, результаты, представленные в диссертационной работе, вносят существенный вклад в исследование методов фотоники в общем и управления световым излучением с помощью резонансных структур в частности.

Общее впечатление о диссертационной работе положительное. 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 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 учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории лазерной наномодификации материалов отделения нелинейной динамики и оптики Института прикладной физики имени А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН)

Пикулин Александр Викторович

25.09.2023 г.

603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46

Телефон: +7 (831) 416-48-89

E-mail: pikulin@ipfran.ru

Подпись А.В. Пикулина ЗАВЕРЯЮ:

учёный секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м.н.

И.В. Корюкин