

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

Разработка базовых принципов функционирования устройств интегральной фотоники, позволяющих осуществлять управление электромагнитным излучением на наномасштабах, является одной из наиболее обсуждаемых фундаментальных и практических задач в современной электронике. С развитием и совершенствованием технологий изготовления наноматериалов (в том числе двумерных графеноподобных материалов) высокого качества, были выявлены и исследованы новые впечатляющие эффекты и технические решения, открывающие возможности для создания фотонных устройств на компактной интегральной платформе, устройств квантовой криптографии, а также для разработки принципиально новых энергоэффективных решений для вычислительных систем.

Несмотря на значительное число теоретических работ в данной области, при переходе к практической реализации подобных устройств возникает необходимость в детальном и подробном рассмотрении конкретных систем для поиска оптимальной структуры или геометрии, обеспечивающей наиболее эффективное функционирование фотонных элементов и устройств, а также необходимость решения ряда конкретных практических задач в области материаловедения, нацеленных на разработку технологий получения nano- и метаматериалов. Представленные в диссертационной работе результаты способствуют дальнейшему расширению возможностей практического применения оптических метаповерхностей и интегральных фотонных структур на основе полупроводниковых (nano)материалов, а также развитию фундаментальных представлений о физических процессах, лежащих в основе управления светом на субволновых масштабах.

Таким образом, можно утверждать, что научная проблема, которой посвящена диссертационная работа А.Д. Гартман, отвечает современным направлениям исследований в области оптики и фотоники и является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, в которых изложены основные результаты и обоснованы защищаемые положения, заключения и списка

цитируемой литературы, включающего 162 наименования. Во **введении** сформулированы цели и основные задачи диссертационной работы, а также представлено обоснование актуальности выбранной темы, научной новизны и практической значимости работы, информация о методологии диссертационного исследования. **Первая глава** представляет собой обзор литературы по теме диссертации и дает весьма подробное представление о современном состоянии дел в данной области. Вторая, третья и четвертая главы содержат основные экспериментальные результаты диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты численного моделирования и расчета параметров кремниевых метаповерхностей (КМП) для пространственного разделения скалярных пучков с оптическим угловым моментом. Преимущества данных структур заключаются, прежде всего, в их совместимости с современными микроэлектронными технологиями. В представленной диссертационной работе рассматриваются структуры, представляющие собой периодические структуры из Ми-резонансных кремниевых нанодисков с различным периодом. Методом конечных разностей по временной области исследованы зависимости коэффициента пропускания и фазы прошедшей волны от периода структуры, обоснован выбор фазовой маски для КМП. Впервые продемонстрирована возможность пространственной селекции мод Лаггера-Гаусса при помощи разработанной волноводной структуры, при этом показано, что в отличие от аналогов наблюдаемый эффект не зависит от поляризации.

Третья глава посвящена исследованию условий эффективной интеграции излучателей с резонансными волноводными структурами, содержащими кремниевые нанорезонаторы (нанодиски), покрытые сверху тонкой пленкой селенида индия (InSe). Подобные структуры рассматриваются впервые. На основании результатов численного моделирования обсуждается возникновение магнитного дипольного Ми-резонанса при возбуждении точечным излучателем, расположенном в пленке InSe. На основе результатов моделирования выбраны параметры структуры, обеспечивающие наилучшие резонансные свойства, и изготовлены образцы резонансных волноводов с учетом этих параметров. Проведены экспериментальные исследования оптических и люминесцентных свойств разработанных структур, обнаружен эффект весьма заметного усиления фотолюминесценции в тонких пленках селенида индия, нанесенных на волноводные структуры, содержащие цепочки кремниевых нанодисков, по сравнению со структурой «пленка на подложке». Обсуждается влияние локализованных экситонных состояний в пленках InSe.

В четвертой, заключительной главе рассматриваются волноводные структуры на основе нитрида кремния, содержащие цепочку нанорезонаторов прямоугольной формы, расположенных между полосковыми волноводами. Эта структура сама по себе не является новой, однако в значительном числе работ была продемонстрирована ее эффективность для передачи сигнала в интегрированных фотонных системах. Особенность структуры, рассматриваемой в диссертационной работе, заключается в дополнении брэгговского волновода квази-двумерной гетероструктурой $\text{MoSe}_2 - \text{WSe}_2$. Подобные резонансные волноводы ранее не исследовались. В данном разделе численно продемонстрировано увеличение коэффициента оптической связи межслоевых экситонных излучателей в гетероструктурах, обсуждаются механизмы, определяющие наблюдаемые эффекты.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы, отражает принципиальные результаты исследования и дает представление об их научной новизне и практической значимости.

Научная новизна диссертационной работы состоит в исследовании резонансных волноводных структур нового типа, а также в получении новых экспериментальных результатов (в том числе результатов численного моделирования), способствующих решению конкретных практических задач в области интегральной фотоники.

Результаты диссертационной работы изложены в 3 публикациях в рецензируемых научных журналах и 6 публикациях в сборниках и тезисах докладов, а также прошли апробацию на профильных всероссийских и международных конференциях. По результатам диссертационной работы получен патент РФ на изобретение.

Вместе с несомненными достоинствами диссертации, к которым, в том числе, следует отнести подробный и тщательный обзор литературы по теме исследования, по представленным результатам можно сделать следующие **замечания**.

1. При выборе оптимальных параметров автор уделяет явно недостаточно внимания описанию методик оптимизации, в том числе обоснованию параметров, по которым проводилась оптимизация. Это замечание можно отнести ко всем результатам 2-4 глав, на основании которых выбраны оптимальные параметры рассматриваемых структур.

2. Результаты численного моделирования зависимостей коэффициента пропускания и фазы прошедшей волны для ансамбля кремниевых нанодисков от

длины волны падающего электромагнитного излучения и периода расположения нанорезонаторов (Гл. 2, рис. 39), на основании которых была проведена оптимизация параметров исследуемых структур, представлены некорректно. Выбор точек P1-P4 на рис. 39(а,б) не соответствует шкале на рис. 39(в,г), что оставляет вопросы о корректности отбора оптимальных значений. Кроме того, непонятен выбор именно этих точек, т.к., судя по графикам, точки P2 и P3 находятся вблизи сильных локальных неоднородностей. Кроме того, осталось неясным соответствие значений цветовой шкалы на рис. 39(б) данным графика 39(г). Выбор длины волны 810 нм на основании зависимостей, приведенных на рис. 38, также не представляется обоснованным, т.к. на этом рисунке не наблюдается «перекрытие ED и MD резонансов в выбранном спектральном диапазоне» (в тексте диссертации указано MQ, но это, очевидно, опечатка). Так как на основании этих зависимостей автор делает выводы об оптимальных параметрах структуры, к представлению данных результатов следовало бы отнестись с большей ответственностью.

3. В гл.2 не приведена структура КМП в явном виде и не обсуждается влияние границ областей с разным периодом.

4. В гл. 3 рассматривается только один тип дифракционной решетки, при этом делается вывод о выборе оптимальных параметров. Считаю, что выбор именно такой структуры решетки должен быть обоснован.

5. В гл. 4 рассматривается структура, содержащая квази-двумерную пленку $\text{MoSe}_2 - \text{WSe}_2$. Помимо сомнений в возможности практической реализации такой системы, сомнение вызывает также рассмотрение только процессов вблизи верхней части структуры, тогда как боковые поверхности в представленной модели обладают сходными параметрами и, вероятно, также вносят вклад в результирующие свойства. Приведенное обсуждение природы межслойного излучения, на мой взгляд, явно недостаточно.

6. В качестве последнего замечания следует отметить обескураживающее количество грамматических ошибок и опечаток в тексте, а также некоторые термины, смысл и необходимость использования которых весьма туманны. В качестве примера назову используемое во всем тексте работы слово «фабрикация», а также оставшиеся без пояснений термины «наноатом» и «метаатом».

Сделанные замечания, хотя и указывают на определенную небрежность в представлении результатов, тем не менее, не исключают новизны и практической ценности диссертационной работы. В целом работа оставляет положительное впечатление.

Считаю, что диссертационная работа Александры Дмитриевны Гартман на тему «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 степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент

профессор кафедры наноэлектроники

Института перспективных технологий и индустриального программирования

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

доктор физико-математических наук,

доцент

Шерстюк Наталия Эдуардовна

21.09.2023

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА),
119454 Москва, проспект Вернадского, д. 78.

Тел. +7(499) 600-80-80 доб. 23026

e-mail: sherstyuk@mirea.ru