

Отзыв

официального оппонента

о диссертации Сапегина Александра Андреевича

«Оптические свойства волноводов на дискретных наноразмерных элементах»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники,
квантовых устройств

Как известно, волноводное распространение электромагнитного излучения происходит либо в режиме полного внутреннего отражения (например, в оптоволокне), либо при сочетании рассеяния брэгговского типа и микроскопического резонансного рассеяния Ми, как это реализуется в волноводах фотонных кристаллов. Каждый рассеиватель фотонного кристалла, в простейшем случае представляющий собой частицу вещества или пору в веществе, имеющую сферическую или цилиндрическую форму, функционирует в последнем случае как резонатор. Применение кластеров наночастиц может быть востребовано в таких областях, как современная медицина, нанобиотехнологии, фотохимия, спектроскопия.

Электромагнитные свойства цепочек наночастиц-резонаторов зависят от ряда параметров, таких, как материал, форма, размер и величина зазора между частицами, число частиц в цепочке, форма цепочки, наличие подложки и свойства окружающей среды. В 1998 году было предложено использовать цепочку электродинамически связанных резонаторов (Coupled Resonator Optical Waveguide – CROW) в качестве волновода с существенно субволновым поперечным сечением. Такие волноводы могут обладать малыми потерями, что существенно при проектировании фотонных интегральных схем.

С научной точки зрения работа актуальна как применение известного в квантовой механике метода квази-сепарабельного Т-оператора рассеяния к задачам многократного рассеяния электромагнитных волн в плотных ансамблях частиц произвольной формы. Актуальность работы с прикладной точки зрения состоит в возможности усовершенствования с использованием её результатов характеристик коммутационных линий интегральных схем и «систем-на-кристалле», играющих ключевую роль в дальнейшем развитии микроэлектроники.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитированной литературы. Главы работы завершаются выводами. Диссертация изложена на 128 страницах, содержит 53 рисунка, 2 таблицы, список литературы из 140 источников, а также 4 приложения.

Во **введении** отражены актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, показана её научная новизна и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности и апробация результатов. Указан личный вклад автора диссертации. Введение завершается описанием структуры диссертационной работы.

В **первой** главе представлен аналитический обзор литературы по тематике диссертационной работы. Описаны ограничения электронных процессоров, обсуждается влияние RC-задержек и глобальных коммутационных линий на частоту работы процессоров. Далее обсуждается возможность использования интегрально-оптических волноводов в качестве альтернативы существующим линиям глобальной коммуникации, рассматриваются преимущества и недостатки основных технологических платформ интегральной фотоники. Логическим продолжением обзора выступают разделы о перспективах построения волноводных линий на основе поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) и дискретных волноводах на основе связанных волновым образом нанорезонаторов (CROW). Подробно обсуждаются существующие теоретические подходы к проблеме рассеяния электромагнитных волн на ансамблях частиц, возможности и ограничения в использовании этих подходов к задаче о дискретных волноводах. Из этой главы естественно следует необходимость проведения исследований, выполненных при работе по теме диссертации.

Вторая глава, по существу, является основной главой диссертации. В ней формулируется задача о распространении ЭМ возбуждения вдоль конечной линейной периодической цепочки металлических или диэлектрических частиц и приводятся основные уравнения для решения задачи. В данной главе в приближении волнового взаимодействия ближайших соседей формулируется точное резонансное условие возбуждения неизлучающей моды дальнего распространения и дается качественная физическая интерпретация данного условия. Выводятся соотношения, описывающие относительный вклад в токи волнового взаимодействия дальних частиц цепочки, а также описывающие токи, возникающие в случае возбуждения крайних частиц с противоположных концов короткой цепочки.

Третья глава посвящена результатам численных расчетов, полученных на основе уравнений, выведенных во второй главе. В главе предлагается для ряда металлов (Au, Ag, Al, Cu) и диэлектрика (Si) оригинальный алгоритм поиска резонансной частоты по данным частотной дисперсии для конкретного материала. На примере конкретных материалов (кремния и золота) численно показано, что в случае цепочки из металлических частиц (золото) возможно дальнейшее распространения электромагнитного возбуждения вдоль цепочки из наночастиц, тогда как для цепочки из диэлектрических частиц (кремний) дальнейшее распространение электромагнитного возбуждения вдоль цепочки невозможно, поскольку при положительной действительной части диэлектрической проницаемости электрическое поле локализовано в основном в объеме кремниевых частиц, что обуславливает слабую связь между частицами и быстрое затухание возбуждаемого сигнала.

Автором диссертационной работы предлагается приближенный метод расчета частоты резонансной моды. В резонансном случае выведена приближенная формула для параметра взаимодействия двух частиц, показывается, что данная формула справедлива только в узком диапазоне частот излучения, близком к резонансному случаю.

В данной главе излагается схема оптического компаратора, основанного на возбуждении цепочки частиц с двух сторон. Приводятся расчеты зависимости токов, наведенных в короткой цепочке кремниевых частиц, от отношения амплитуд электрического поля в двух пучках электромагнитного излучения, возбуждающих крайние частицы цепочки, а также обсуждаются экспериментальные возможности изготовления такого устройства.

В диссертационной работе получен ряд важных с научной и практической точек зрения результатов, которые могут быть использованы для создания волноводов и систем оптических межсоединений на основе линейных цепочек наночастиц. Среди них можно выделить следующие:

1. Объяснение связи между появлением неизлучающей моды дальнего распространения электромагнитного возбуждения и условием возбуждения собственной моды ансамбля частиц;
2. Вывод на основе анализа резонансного поведения комплексного параметра волнового взаимодействия соседних частиц об отсутствии дальнего распространения темной моды в цепочке полупроводниковых частиц кремния;
3. Метод использования цепочки наночастиц в качестве компаратора оптических сигналов различной амплитуды.

Представленные в диссертационной работе результаты являются вполне обоснованными, достоверными и надежными, поскольку получены с использованием комплексов современных методов исследования, сопровождались разносторонним анализом результатов и сопоставлением с известными литературными данными.

Однако, к представленной работе есть несколько замечаний.

1. Метод измерения токов, возбуждаемых в частицах, предложенный автором в главе 3, представляется сложно реализуемым на практике и требует дальнейшей проработки и экспериментальной проверки именно для случая компаратора оптических сигналов. Например, стоило дополнительно обсудить влияние подложки на распространение сигнала в коротких цепочках полупроводниковых наночастиц.
2. В работе не приведены температурные оценки и изменение условий формирования и дальности распространения темной моды при разогреве частиц электромагнитным излучением или другим тепловым источником. При этом, на странице 62 работы дается ссылка на литературные данные по дисперсии диэлектрической проницаемости при повышенной температуре, но никаких расчетов по этим данным в дальнейшем не производится.
3. В тексте диссертации встречаются опечатки и неточности. Так, в таблице 3.2.1 на страницах 66-67 диссертационной работы допущена опечатка для величины плазменной частоты металлов. Например, плазменная частота золота составляет 2068 ТГц, а не 206,8 ТГц.

Указанные замечания несколько не снижают высокий научный уровень проведенного исследования.

Диссертация Сапегина А.А. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне. Работа актуальна, а её результаты отличаются новизной, научной и практической значимостью. Считаю, что поставленная цель работы достигнута, а сформулированные конкретные задачи решены полностью. Материалы диссертации изложены логично и корректно. Все научные положения обоснованы в достаточной степени, их достоверность не вызывает сомнения. Результаты диссертационной работы представляют интерес для специалистов, работающих в области лазерной техники, нанооптики, комбинационного рассеяния, биотехнологий, современной медицины. Автореферат достаточно полно отображает содержание диссертационной работы.

В целом работа написана ясным, технически грамотным языком, хорошо оформлена и структурирована. Основные научные результаты диссертационной работы изложены в 13 публикациях, в том числе в 3 статьях, опубликованных в журналах, включенных ВАК РФ в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий для публикации результатов диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, и доложены на 4 всероссийских и 5 международных конференциях.

Диссертация Сапегина А.А. «Оптические свойства волноводов на дискретных наноразмерных элементах», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, отвечает требованиям п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в редакции утвержденного постановления Правительства РФ от 20.03.2021 г. № 426), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Сапегин Александр Андреевич **заслуживает** присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент:
член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук, профессор,
директор НПК «Технологический центр»



Светухин Вячеслав Викторович

" 11 " июня 2024 г.

федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
124498, г. Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1 стр.7
Телефон: 8 (499) 734-45-21, 8 (499) 729-77-02
<http://www.tcen.ru/> e-mail: tc@tcen.ru

Подпись: Светухин В.В. заверю
Инициалы: И.В. Зверев