



«Утверждаю»
Директор ИФТТ РАН

чл.-корр. РАН А.А. Левченко
5. 06. 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Сапегина Александра Андреевича

«Оптические свойства волноводов на дискретных наноразмерных элементах»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовые устройства

Кандидатская диссертация Сапегина А.А. посвящена достаточно актуальной в последнее время и активно экспериментально и теоретически изучаемой проблеме передачи сигналов в наноразмерной области электроники. В диссертации теоретически, в том числе компьютерным моделированием, проводится исследование распространения электромагнитного возбуждения вдоль конечной линейной цепочки немагнитных изотропных диэлектрических или металлических сферических малых (в масштабе длины волны) частиц при возбуждении крайней или двух крайних частиц внешним коллимированным электромагнитным излучением, поляризованным перпендикулярно оси цепочки.

Диссертация построена по традиционной схеме: введение, в котором обосновывается актуальность темы диссертации, трех глав, где приводятся аналитический обзор литературных данных по современному состоянию интегральной фотоники и возможности построения волноводных линий на основе плазмон-поляритонов, формулируется задача о распространении ЭМ возбуждения вдоль конечной линейной периодической цепочки металлических частиц, приведены результаты численных расчетов по выведенным формулам.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и основные задачи, показана научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора.

В первой главе приведен обзор литературных данных по тематике диссертации. В частности, рассмотрены возможности повышения производительности микропроцессоров и физические ограничения на скорость их работы, возможности многоядерных процессоров и методов передачи сигналов между элементами системы. Одним из принципиальных ограничений в работе таких электронных устройств являются электромагнитные наводки соседних проводников и RC задержки для таких линий передачи. В качестве возможного

преодоления этих ограничений предлагается применять волноводы с различными модами, расчеты возможных затуханий цепочек из наночастиц составляют основное направление представленной диссертации.

В первой главе диссертации наиболее интересной и полезной для понимания логики проведенных автором расчетов является часть, посвященная ретроспективному развитию теоретических подходов к проблеме рассеяния электромагнитных (ЭМ) волн на ансамблях частиц и применимость таких подходов к задаче о дискретных волноводах. Рассмотрены такие подходы как, теория векторного рассеяния классического поля на основе потенциалов Дебая и техники функции Грина для учета эффектов многократного рассеяния, теория рассеяния Ми, модифицированная на основе теоремы сложения сферических гармоник, метод «порядка рассеяния», формализм многоцентрового рассеяния и многих других с оценкой их применимости к случаю рассеяния и распространения волн вдоль цепочки металлических и диэлектрических частиц с размерами много меньше длины волны.

Во второй главе формулируется задача о распространении ЭМ возбуждения вдоль линейной периодической цепочки металлических или диэлектрических частиц и приводятся основные уравнения для решения задачи. При постановке задачи предполагается, что только крайняя частица цепочки возбуждается, при этом условие возбуждения неизлучающей моды дальнего распространения состоит в равенстве нулю мнимой части параметра парного взаимодействия частиц.

Выведены уравнения, описывающие относительный вклад в токи волнового взаимодействия дальних частиц цепочки и описывающие токи, возникающие в случае возбуждения крайних частиц с противоположных концов короткой цепочки.

В третьей главе приведены результаты численных расчетов по выведенным во второй главе формулам. При этом в численных расчетах использовались величины частотной дисперсии ряда металлов (Au, Ag, Al, Cu) и Si.

Так, исследование комплексного параметра волнового взаимодействия соседних частиц показало, что неизлучающая мода дальнего распространения, возбуждаемая перпендикулярно поляризованным светом в линейной конечной цепочке сферических *металлических* частиц с дипольным взаимодействием ближайших соседей, отсутствует в цепочке частиц ряда *диэлектрических* материалов. Такое поведение цепочки частиц из кремния объясняется тем, что на резонансной частоте моды дальнего распространения мнимая часть диэлектрической проницаемости кремния мала, в то время как при положительной величине действительной части диэлектрической проницаемости, электрическое поле возбуждения локализовано в основном в объеме кремниевых частиц, что обуславливает быстрое затухание возбуждения.

Показано, что ближние и дальние поля дают противоположный по знаку вклад в токи в металлических частицах цепочки. В частности, дальние волновые поля вносят вклад порядка

20% в токи проводимости в частицах и порядка 33% в токи поляризации в частицах золота (Au).

В предложенном диссертантом приближенном методе расчета частоты резонансной моды, распространяющейся по линейной цепочке частиц без рассеяния в окружающее пространство и затухающей только за счет истинного поглощения в материале частиц, было показано, что выведенная приближенная формула справедлива только для частот электромагнитного излучения, на которых мнимая часть диэлектрической проницаемости материала частиц имеет локальный минимум, близкий к нулю, при отрицательной величине действительной части.

В приложениях приведена детализация теоретических уравнений и расчетных схем, использованных в проведении расчетов в диссертации, приведены комплексные величины частотной дисперсии для материалов, используемых при расчетах в качестве возможных кандидатов на дискретные цепочки наночастиц, приведены соотношения для собственных мод димера.

Замечания по диссертационной работе.

При указании степени достоверности полученных результатов автором приводится список конференций, на которых были доложены результаты работы (в основном 2017-2020 годы).

В автореферате диссертации указано, что «**Предметом** диссертационной работы являются линейные конечные цепочки.», что звучит несколько странно.

«Данная работа является **актуальной**, поскольку её результаты получены с помощью достаточно простых алгебраических уравнений...»

В тексте диссертации достаточно поверхностно дано физическое объяснение процессов описываемых изменением параметров действительного и мнимого взаимодействия при росте частоты сигнала.

При расчетах взаимодействия двух nano частиц металла (золото), имеет действительное взаимодействие и мнимое для частотной зависимости $a_{12}=a_{12}'+ia_{12}''$. Условию $a_{12}''\approx 0$ отвечает случай резонансного распространения сигнала вдоль цепочки и затухание такого распространения происходит в области высоких частот, что определяется отклонением a_{12}'' от 0 (в область отрицательных значений). При расчетах для Au такое отклонение (и рост поглощения) начинается при частоте оранжевого цвета (Рис. 3.2.1 для частиц с размерами в 20 нм). Для Si (схожих размеров 13 нм) такое отклонение начинается в ультрафиолетовой области частот, но на графиках расчетов приведены несколько точек отклонения от 0, с чем связано такое поведение (Рис. 3.2.2) или это условия расчетных ограничений? Стоит заметить, что в тексте везде написано «нулевое значение a'' », «мнимая часть, $a''_{12}=0$ » и указывается частота, соответствующая этому, хотя, как не трудно видеть из Рис. 3.2.1 а) и 3.2.2, это начало перехода

в область отрицательных величин a''_{12} и при меньших частотах величина a''_{12} находится вблизи 0 и по условиям расчетов предполагается, что $a''_{12}=0$, если $a''_{12}<10^{-3}$.

Какое физическое объяснение может быть для немонотонного поведения реальной части как функции радиуса наночастиц меди, хотя по проводимости и медь, и золото с серебром близки?

Какая физическая интерпретация минимума реальной части взаимодействия двух частиц Rea_{12} , приведенная на графиках 3.2.3 и 3.2.4?

В диссертации имеются недостатки оформительского характера. Так в ссылке 7 Розеншер Э., Оптоэлектроника Б. В. изд. «Техносфера», М. – 2004. упущен автор Винтер Б. В приложение 2 в формулах Ми для расчета рассеяния на потенциале сферической частицы (П.2.1а) и (П.2.1б) отсутствует сферическая функция Бесселя, обозначенная в расшифровке как $y_n(z)$. Местами в тексте диссертации теряется смысл. Что означает выражение «частота протекания» в предложении «Это условие соответствует частоте протекания в приближении взаимодействия ближайших соседей работы [114].

Есть замечания к иллюстрациям в диссертации. Например, на рис. 2.2.4 величина параметра вспомогательного комплексного переменного обозначена как θ , тогда как в тексте ϑ . Указанные в тексте «рисунки 1(а) и 1(б)» соответственно, относятся к рис. 3.4.1 (а) и 3.4.1 (б). В графиках приложения 3 величины действительного и мнимого коэффициента диэлектрической проницаемости и коэффициента преломления приведены в виде функций от энергии эВ, частоты рад/сек, гц и длин волн в графиках ПЗ.1–ПЗ.6. Такой разнотой усложняет понимание поведения величин, используемых для расчетов.

Отмеченные недостатки написания диссертации не умаляют научную ценность проведенной работы и ее значение для понимания процессов передачи информации в наноструктурах.

Научно-квалификационная работа Сапегина Александра Андреевича решает задачи о распространении электромагнитного возбуждения в различных условиях вдоль конечной периодической линейной цепочки немагнитных изотропных диэлектрических или металлических наночастиц, взаимодействующих волновым образом. Математическая модель и её программная реализация позволяют дать численные оценки возможности дальнего распространения неизлучающей моды или реализации режима оптического компаратора в цепочках частиц различных материалов.

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором на высоком уровне. Полученные результаты оригинальны, выводы и заключения обоснованы, достаточно полно освещены в открытой печати. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Стоит отметить, что автореферат написан более аккуратно, последовательно и логично, чем текст самой диссертации.

Работа была выполнена АО «НИИМЭ», Зеленоград. Работа была заслушана на объединенном семинаре ИФТТ РАН им. Ю.А.Осипьяна и ИТФ РАН им. Л.Д.Ландау «Нелинейные динамические системы» и получила одобряющие оценки.

Представленный материал свидетельствует о высоком профессионализме соискателя. По актуальности темы, объему и значимости выводов диссертация Сапегина А.А. полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с требованием п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Александр Андреевич Сапегин, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовые устройства.

Отзыв утвержден на заседании Ученого Совета ИФТТ РАН 3 июня 2024 г.
(протокол №13)

Отзыв составлен: доктором физико-математических наук,
ведущим научным сотрудником Лаборатории квантовых кристаллов,
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики
твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук
Виктором Борисовичем Ефимовым

29 мая 2024 г.

Подпись В.Б.Ефимова заверяю
Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук,
к.ф.-м.н.

Терещенко А.Н.

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН). Адрес: 142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна д. 2. Тел.: 8(496)52 219-82. E-mail: adm@issp.ac.ru