

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Мушина Федора Юрьевича  
«Оптические и нелинейно-оптические свойства наноструктур с плазмонными  
компонентами и квантовыми излучателями»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.6 – оптика

Диссертационная работа Ф. Ю. Мушина посвящена исследованию фотофизических процессов в гибридных системах, содержащих квантовые излучатели (молекулы красителей, квантовые точки) и плазмонные наночастицы различной геометрии (сферические оболочечные, цилиндрические слоистые). Основная цель работы – выявление закономерностей и оптимизация условий для управления оптическими и нелинейно-оптическими процессами в таких наноструктурах.

Несмотря на значительное число теоретических работ в данной области, до сих пор **актуальными** остаются задачи оценки влияния плазмонного резонанса наночастиц на наномасштабные фотофизические процессы и определения оптимальных конфигураций наноразмерных устройств для эффективной генерации и усиления поверхностных электромагнитных волн. **Научная новизна** работы обусловлена применением слоистых (композитных) наночастиц в качестве плазмонной составляющей гибридных систем, что позволяет управлять частотой плазмонного резонанса путём варьирования геометрических параметров ядра и оболочки частицы. Представленные в диссертационной работе результаты способствуют дальнейшему развитию фундаментальных представлений о физических процессах, лежащих в основе генерации и управления светом на субволновых масштабах, а также открывают новые перспективы для их практического применения. Все это определяет высокую **фундаментальную и прикладную значимость** диссертационной работы Ф. Ю. Мушина.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, в которых изложены основные результаты исследований, заключения и списка библиографических источников. Материал изложен на 155 страницах, содержит 75 иллюстраций, 4 таблицы и список литературы из 150 наименований.



**Во введении** обоснована актуальность исследований, сформулированы цели и задачи, отражена новизна диссертационной работы, ее практическая значимость, представлена краткая информация о методологии исследования. Также во введении сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов работы и личном вкладе автора.

**В первой главе** приводится литературный обзор по теме диссертации. Кратко изложены особенности возбуждения, излучения и поглощения света, переноса энергии между квантовыми точками, атомами и молекулами вблизи металлических поверхностей и частиц. Рассмотрен вопрос нелинейного оптического отклика плазмонных наночастиц и их массивов. Показано влияние на интенсивность электродинамического взаимодействия активной (усиливающей) компоненты, межчастичного расстояния, структуры и размера частиц.

**Во второй главе** проведено теоретическое исследование оптических процессов в системах из возбужденных молекул, квантовых точек и сферических наночастиц с плазмонной оболочкой. Анализируются локализованные плазмонные моды в металлической оболочке, условия резонансного плазмон-экситонного взаимодействия. Рассчитаны скорости излучательных и безызлучательных переходов в квантовых точках вблизи металлических наночастиц, кинетика обмена энергией между ними. Особое внимание уделено безызлучательному переносу энергии в донорно-акцепторной паре молекул, где показана возможность усиления переноса за счет плазмонного канала. Показано, что вариация геометрических (радиус ядра, расстояние) и электродинамических параметров позволяет управлять скоростями релаксационных процессов.

**Третья глава** посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию влияния плазмонных наночастиц на оптические свойства органических красителей. Изготовлены образцы полимерных пленок, содержащих молекулы красителя и металлические наночастицы в различных концентрациях. Экспериментально обнаружено немонотонное изменение интенсивности (сначала рост, затем тушение) флуоресценции и фосфоресценции при увеличении концентрации наночастиц. Для объяснения этих эффектов разработана квантовомеханическая модель, учитывающая изменение скоростей спонтанного излучения и поглощения света молекулой, безызлучательного переноса энергии от молекулы к наночастице. Показано,

что максимальное усиление люминесценции достигается при некотором расстоянии между молекулой красителя и наночастицей (на расстояниях 4–8 нм для рассматриваемых значений параметров). Установлено, что присутствие наночастиц снижает порог генерации вынужденного излучения красителя, причем эта зависимость от концентрации также носит немонотонный характер. Предложенные теоретические модели качественно согласуются с экспериментальными данными. Также подтверждено, что в изменении интенсивности люминесценции молекулы важную роль играют ориентация переходного дипольного момента и расстояние между молекулой и наночастицей.

**В четвертой главе** получила развитие аналитическая теория генерации второй оптической гармоники монослоем сферических наночастиц с плазмонной оболочкой, расположенных на границе раздела двух прозрачных диэлектриков. Разработанная модель позволяет рассчитывать интенсивность отраженной волны удвоенной частоты с учетом плазмонных резонансов различных мультипольностей: учтены как дипольный, так и квадрупольный вклады в нелинейную поляризацию, возникающие на внутренней и внешней поверхностях металлической оболочки. Исследована зависимость положения плазмонных резонансов и спектральной области максимума интенсивности излучения удвоенной частоты от геометрических (радиус диэлектрического ядра) и электродинамических параметров частиц, угла падения излучения.

**В пятой главе** изложены результаты теоретического исследования спазера – квантового генератора поверхностных плазмон-поляритонов – на основе слоистой цилиндрической нанопроволоки с металлической оболочкой. В рамках развитой модели получены законы дисперсии для осесимметричных и неосесимметричных плазмонных мод. В качестве активной среды предложена трехуровневая активная среда, что позволяет реализовать генерацию плазмонов на двух частотах, соответствующих переходам между возбужденными и основным состояниями. На основе формализма матрицы плотности и уравнения Гейзенберга выведена система уравнений динамики спазера и рассчитаны ключевые параметры (скорость затухания плазмонов, частота Раби, скорость безызлучательного переноса энергии). Показано, что скорость релаксации между возбужденными состояниями трехуровневой системы критически влияет на режим генерации. Результаты главы могут быть полезны при разработке спазеров на основе цилиндрических нанопроволок с управляемыми характеристиками.

**В заключении** систематизированы основные результаты диссертационного исследования, намечены перспективы дальнейшей разработки темы.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением апробированных методов теоретической физики, а также согласием разработанных моделей с экспериментальными данными и результатами других авторов.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в журналах из перечня ВАК и доложены на крупных всероссийских и международных конференциях.

Имеются следующие **замечания** по оформлению и содержательной части диссертационной работы:

1. Методика проведения экспериментальных исследований изложена чрезмерно кратко, что не всегда позволяет оценить влияние различных факторов на получаемые результаты. В частности, в работе не поясняется, учитывался ли при регистрации спектров люминесценции (раздел 3.1 диссертации) процесс поглощения излучения при распространении в толще самих образцов. Учет этого фактора в определенных условиях необходим для корректной интерпретации немонотонных концентрационных зависимостей интенсивности люминесценции.
2. В главе 3 экспериментально измеренные зависимости приведены без указания погрешностей и без описания статистической обработки данных. Отсутствуют сведения о количестве повторных измерений и о воспроизводимости полученных результатов. Таким образом, полученные числовые значения оптимальных расстояний и пороговых концентраций наночастиц не подкреплены оценкой их точности.
3. Приведённые в работе значения «оптимальных» параметров – например, указанное в пункте 2 Заключения расстояние 4–8 нм между наночастицей и молекулой красителя, при котором достигается усиление люминесценции, – получены для конкретных параметров системы. По этой причине они не являются универсальными и могут быть не «оптимальными» для систем с другими параметрами. В

работе не обсуждаются границы применимости полученных численных результатов.

4. Моделирование металлических (серебряных, золотых) наночастиц выполнено с использованием упрощенной модели диэлектрической проницаемости, которая не учитывает зависимость скорости релаксации электронов от размера частиц. Между тем, рассеяние электронов проводимости на границе частицы диаметром менее 10 нм приводит к увеличению скорости затухания плазмонов, что, в свою очередь, влияет на ширину и интенсивность плазмонных резонансов (Хлебцов, Н. Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом, Квантовая электроника, 38, 504–529 (2008)). Учёт данного эффекта позволяет получить результаты, которые точнее соответствуют реальному объекту моделирования.
5. Задача о генерации второй гармоники монослоем плазмонных наночастиц, расположенным вблизи плоской границы раздела двух полубесконечных диэлектрических сред, решена с использованием упрощённой модели. Более корректный подход должен основываться на микроскопической теории, в которой излучение монослоя рассматривается как результат когерентного сложения полей от решётки индуцированных диполей, находящихся в ближнепольном взаимодействии как между собой, так и с границей раздела сред.
6. В качестве последнего замечания следует отметить допущенные ошибки и неточности в тексте диссертации: значения параметров модели диэлектрических проницаемостей для серебряных наночастиц и квантовых точек CdSe приведены без ссылки на источники данных (стр. 49); в подписи к рис. 2.5 не указано, какие величины соответствуют сплошным, штриховым и штрихпунктирным линиям; на стр. 54 дана ошибочная ссылка на рис. 2.5 вместо рис. 2.9; на рис. 3.11 неправильно расставлены индексы на графике.

Сделанные замечания не снижают значимости полученных в диссертации результатов.

Диссертационная работа «Оптические и нелинейно-оптические свойства наноструктур с плазмонными компонентами и квантовыми излучателями» является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней»,

утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Мушин Федор Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – оптика.

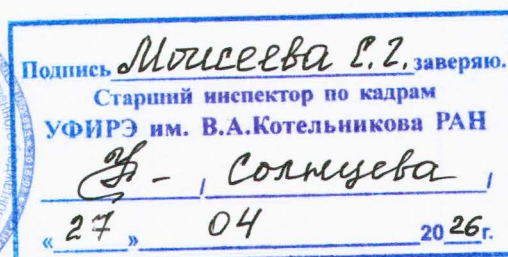
Официальный оппонент

канд. физ.-мат. наук (по специальности 01.04.05 - Оптика), доцент, старший научный сотрудник Ульяновского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук

Моисеев Сергей Геннадьевич

27 апреля 2026 г.

Подпись С. Г. Моисеева заверяю:



Ульяновский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук  
Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова 48/2  
Тел.: (8422) 44-29-96  
E-mail: serg-moiseev@yandex.ru