

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Кройчук Марии Кирилловны
на тему: «Генерация третьей оптической гармоники и усиление
фотолюминесценции квантовых точек в полупроводниковых кластерах
наночастиц с резонансами типа Ми»
по специальности 1.3.19 – «лазерная физика»

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Кройчук М.К. посвящена исследованию генерации третьей оптической гармоники в олигомерах полупроводниковых наночастиц при различных условиях их возбуждения. Изучение рассматриваемых эффектов реализуется с помощью установки микроспектроскопии нелинейного отклика на основе фемтосекундного твердотельного лазера. Отдельное внимание в работе уделяется взаимодействию квантовых точек с рассматриваемыми нанокластерами для контроля интенсивности источников фотонов. **Актуальность** работы обусловлена активным использованием субволновых полупроводниковых наночастиц для задач управления, детектирования и преобразования оптического излучения на субмикронных масштабах.

Текст диссертационной работы состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 127 страниц, включая 87 рисунков. Список литературы насчитывает 91 наименование на 8 страницах. Постановки задач и результаты сопровождаются профессионально выполненными иллюстрациями и графиками. Работа написана логично, доказательно, ясным и строгим научным языком. Автореферат правильно отражает содержание диссертации и соответствует тексту диссертации.

Во **Введении** представлен краткий обзор современного состояния исследований по теме диссертации, обоснована актуальность темы диссертационного исследования, изложены цель и задачи исследования, методология диссертационного исследования, приведены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, степень достоверности и апробация результатов, и сформулированы защищаемые положения.

Первая глава содержит обзор литературы по теме диссертации. Он включает в себя описание оптических эффектов в олигомерах полупроводниковых наночастиц с резонансами типа Ми при возбуждении линейно или азимутально поляризованными пучками. Особое внимание уделяется рассмотрению генерации оптических гармоник в Ми-резонансных наносистемах и влиянию на них коллективных мод, возникающих в олигомерах за счет взаимодействия частиц в ближнем поле. Приведен также краткий обзор взаимодействия наносистем с источниками одиночных фотонов, причем особое внимание уделяется квантовым точками и влиянию оптических мод наночастиц на свойства их фотолюминесценции.

Вторая глава посвящена исследованию влияния коллективных оптических мод кремниевых олигомеров на модуляцию интенсивности третьей оптической гармоники. В начале главы представлены результаты оптической характеристики образцов: определено качество структур, получены спектры пропускания и численно исследованы возникающие в них резонансы. Далее подробно обсуждается экспериментальная установка и методика измерения, позволяющая точно фокусироваться на отдельный олигомер образца и снимать сигнал третьей гармоники, при этом осуществляя вращения образца. Показано, что вращение образца относительно фиксированной линейной поляризации возбуждающего излучения влияет на интенсивность третьей гармоники, линейный отклик системы при этом остается изотропным. Зависимость обладает периодичностью, характеризующей тип образца. В работе экспериментально доказано, что за возникающий эффект отвечает взаимодействие наночастиц в ближнем поле при возбуждении магнитного дипольного резонанса типа Ми.

Третья глава посвящена возбуждению коллективных магнитных мод олигомеров нормально падающими пучками с азимутальной поляризацией и усилению генерации третьей оптической гармоники за счет локализации поля на частоте данных резонансов. Впервые экспериментально показано, что коллективная магнитная мода, эффективно возбуждаемая азимутально-поляризованным импульсным излучением, позволяет увеличивать интенсивность третьей гармоники относительно неструктурированной пленки на два порядка, что недостижимо при возбуждении светом с линейной поляризацией.

В четвертой главе изучается результат объединения полупроводниковых олигомеров с квантовыми точками. Рассматриваются эффекты, возникающие при взаимодействии оптических мод нанокластеров с фотонными источниками и влияющие на интенсивность фотолюминесценции последних. Предложен механизм ее увеличения при возбуждении квантовых точек азимутально-поляризованным излучением на длине волны коллективной магнитной моды квадрумера, исследованной в третьей главе диссертации. Экспериментально продемонстрирован пятикратный рост детектируемого сигнала при накачке на длине волны магнитного дипольного резонанса при низких температурах.

Заключение четко отражает основные результаты диссертационного исследования.

Анализ диссертационной работы и публикаций автора по теме исследования свидетельствуют об **обоснованности защищаемых научных положений**, выносимых автором на защиту. Для экспериментальных результатов проведены подтверждающие расчеты, и предложено применение рассматриваемых систем. Результаты экспериментальных исследований были получены на современном оборудовании и находятся в согласии с расчетами, поэтому результаты являются **достоверными**. Результаты диссертации были лично представлены на 7 докладах на международных научных конференциях и опубликованы в 9 индексируемых статьях. В рамках работы над диссертацией был получен патент.

Результаты обладают **научной новизной**. Впервые показана модуляция интенсивности нелинейного отклика при изменении состояния поляризации возбуждающего излучения за счет коллективных эффектов в олигомерах. Представлен интересный механизм визуализации ближнепольных эффектов в нанокластерах через детектирование особенностей генерации третьей гармоники. Кроме того, показано дальнейшее развитие использования коллективных мод олигомеров для усовершенствования фотонных источников. **Научная значимость** полученных результатов обусловлена возможностью создания на основе полученных результатов эффективных наноразмерных источников и преобразователей частоты.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В работе детально исследованы эффекты генерации оптических гармоник от наноструктур. Однако не показано, какая существует практическая потребность в изучении данных эффектов. Хотелось бы увидеть в тексте работы или обзоре литературы прямые свидетельства потенциальной полезности получаемых результатов, так как существует большое множество эффективных и компактных преобразователей частоты лазерного излучения на основе тонких нелинейных кристаллов или волокон.
2. Из текста неясно почему проведенный расчет на Рис.32 показан не для всего экспериментального спектрального диапазона. Можно предположить, что на длинах волн более 1250 нм наблюдалось бы сильное расхождение теории с экспериментом, что может поставить под сомнение корректность используемого подхода для моделирования этой структуры.
3. В пункте 5.3 приводится описание метода доказательства того, что измеряемый сигнал является третьей гармоникой за счет анализа наклона зависимости сигнала от мощности падающего излучения (Рис. 40). Однако, как было показано в ряде работ по нелинейному возбуждению резонансных кремниевых наноструктур (см. например [Nano Letters 18 (1), 535-539 (2018)]), генерация гармоник зачастую сопровождается генерацией широкополосной люминесценции за счет рекомбинации “горячих” носителей, у которой зависимость от накачки также имеет степенную зависимость. Таким образом, без спектральных измерений приводимое в диссертационной работе доказательство выглядит неполным.
4. На Рис.62 представлено сравнение экспериментального спектра рассеяния от олигомера с теоретическим. Однако нет описания процедуры моделирования, не ясно является ли оно полным во все углы или только в какие-то определённые, а также каково влияние диаграммы направленности рассеянного излучения на измеряемые спектры. На основе проведённых расчётов не показано распределение ближнего поля на интересующих длинах волн, что дало бы важную информацию об эффективности взаимодействия олигомера с лазерным излучением в нелинейном режиме.
5. Автору удалось достичь пятикратного усиления эффективности генерации фотолюминесценции из квантовых точек в наночастицах, однако не приведено

значение начальной квантовой эффективности фотолюминесценции. Более того, желательно привести данные о зависимости квантовой эффективности от интенсивности накачки, так как многие полупроводниковые излучатели демонстрируют нелинейную зависимость. Это зачастую приводит к тому, что усиление сигнала фотолюминесценции возникает в основном из-за увеличения числа поглощенных фотонов, а не из-за повышения эффективности вывода излучения или эффекта Парселла.

6. Несмотря на то, что в названии фигурирует термин “полупроводниковые наночастицы”, местами в тексте они называются также диэлектрическими, что затрудняет восприятие текста.

Однако эти замечания не влияют на общую положительную оценку выполненной работы и не ставят под сомнение основные выводы диссертации.

Заключение

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19 – «лазерная физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Кройчук Мария Кирилловна безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»,
физический факультет, главный научный сотрудник

Макаров Сергей Владимирович

«27» 04 2023 г.

Контактные данные:

Тел.: +7 (812) 480-00-00

E-mail: s.makarov@metalab.ifmo.ru

Степень и шифр специальности, по которой официальным оппонентом была защищена диссертация:

01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А, Национальный исследовательский университет ИТМО, физический факультет