

Отзыв официального оппонента

Горина Дмитрия Александровича

на диссертацию Дорогова Александра Федоровича

«ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Актуальность диссертационной работы

Диссертационная работа Дорогова А.Ф. посвящена исследованию фундаментальных физических ограничений спектральных характеристик флуоресценции, имеющих место при импульсной лазерной спектроскопии флуоресцирующих случайно-неоднородных сред. Актуальность темы обусловлена активной разработкой наноматериалов и композитных систем, содержащих флуоресцирующие компоненты, которые находят широкое применение в фотонике, оптоэлектронике, биомедицинской диагностике и других областях современных технологий. В частности, явление стохастической лазерной генерации (random lasing) в подобных случайно-неоднородных средах привлекает внимание исследователей благодаря своим диагностическим возможностям и перспективам создания новых типов источников излучения.

Несмотря на значительный прогресс в понимании этого явления, остаются нерешёнными вопросы, связанные с фундаментальными ограничениями спектрального качества флуоресцентного излучения случайно-неоднородных сред при высоких интенсивностях внешней лазерной накачки. Автором предпринята успешная попытка преодолеть ограничения традиционных диффузионных моделей, не учитывающих стохастическую интерференционную структуру поля накачки, что определяет высокую научную значимость и актуальность представленной работы.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна диссертационного исследования не вызывает сомнений. Автором впервые предложена и экспериментально верифицирована феноменологическая модель, учитывающая спекл-модуляцию поля лазерной накачки как один из ключевых факторов, определяющих формирование флуоресцентного отклика. В рамках этой модели введено фундаментальное понятие сечения радиационных потерь локальных эмиттеров, ассоциируемых с лазерными спеклами, и показано, что именно конкуренция между вынужденным излучением и радиационными потерями ограничивает предельную населённость возбуждённого состояния в локальных эмиттерах.

Особого внимания заслуживает установленный автором результат о том, что длина усиления индуцированной составляющей флуоресценции при высоких интенсивностях накачки стремится к предельному значению, определяемому исключительно характеристиками локальных эмиттеров и не зависящему от свойств флуорофора. Этот вывод вносит существенный вклад в фундаментальную физику случайных лазеров и имеет важное значение для разработки новых диагностических подходов.

Практическая значимость работы заключается в разработке метода восстановления спектрального контура фактора усиления $\Gamma(\lambda)$ из набора экспериментальных спектров, полученных при различных интенсивностях накачки. Восстановленные контуры демонстрируют высокую чувствительность к особенностям взаимодействия центров флуоресценции с рассеивающей матрицей, что открывает возможности для создания новых методов диагностики наноструктурированных материалов и биологических тканей. Результаты исследования уже используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров, что подтверждает их практическую значимость.

Степень обоснованности и достоверность научных положений

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных экспериментальных методик, использованием современного измерительного оборудования, воспроизводимостью экспериментальных данных, а также согласованностью результатов теоретического анализа с экспериментальными данными. Особо следует отметить использование комплекса взаимодополняющих методов: импульсной лазерной спектроскопии, спектрофотометрии с интегрирующей сферой, Монте-Карло моделирования переноса излучения и статистического анализа.

Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертационной работы. Основные результаты опубликованы в 12 работах в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых международными базами данных Scopus и WoS, в том числе в журналах высокого уровня («Письма в ЖЭТФ», «Квантовая электроника», «Nanomaterials»), что свидетельствует о научной новизне и значимости проведённых исследований.

Анализ содержания диссертационной работы

Диссертация имеет классическую структуру и состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Основное содержание работы изложено на 118 страницах и включает 41 рисунок и 3 таблицы. Список литературы содержит 141 наименование.

Во **введении** сформулированы цель и задачи исследования, обоснована актуальность, представлены научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту. Все защищаемые положения являются обоснованными и соответствуют полученным результатам.

Первая глава представляет собой содержательный обзор литературы, в котором автор демонстрирует глубокое понимание современного состояния исследований в области лазерной спектроскопии случайно-неоднородных сред. Особое внимание уделено анализу фундаментальных ограничений существующих методов, что логично подводит к постановке собственных задач исследования.

Вторая глава содержит результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния эффектов насыщенного поглощения и реэмиссии флуоресценции на оптические транспортные параметры. Автором убедительно продемонстрирован квази-волноводный эффект в сильно рассеивающих средах, заключающийся в распространении диффузных составляющих флуоресцентного поля вдоль слоёв на расстояния, существенно превышающие их толщину. Монте-Карло моделирование,

проведённое в главе, верифицирует экспериментальные данные и устанавливает связь между статистикой путей фотонов и условиями накачки и излучения.

Третья глава является теоретическим ядром диссертации. В ней разработана феноменологическая модель радиационного обмена между локальными эмиттерами, возникающими вследствие спекл-модуляции поля накачки. Введение сечения радиационных потерь и вывод аналитического выражения для него представляют собой ключевое достижение автора. Модель позволяет объяснить экспериментально наблюдаемое насыщение населённости возбуждённого состояния и оценить характерные размеры локальных эмиттеров. Полученные результаты демонстрируют, что радиационный обмен между эмиттерами является одним из ключевых факторов, контролирующих флуоресцентный отклик системы.

Четвёртая глава посвящена экспериментальной верификации предложенных теоретических концепций на широком классе систем — плотноупакованных слоях и суспензиях наночастиц TiO_2 , насыщенных красителями Р6Ж и DCM. Автор разрабатывает оригинальный вероятностный подход к описанию усиления флуоресценции, основанный на статистике путей распространения фотонов. Особого внимания заслуживает метод восстановления спектрального фактора усиления $\Gamma(\lambda)$ из набора экспериментальных спектров. Восстановленные контуры $\Gamma(\lambda)$ демонстрируют высокую чувствительность к морфологическим особенностям рассеивающей матрицы, что подтверждает диагностический потенциал метода. Показано, что среднее число актов вынужденного излучения насыщается при высоких уровнях внешней накачки до величин порядка 1,5–4, что объясняет фундаментальные ограничения спектрального качества.

В **заключении** подведены итоги исследования, сформулированы основные результаты и определены перспективы дальнейших исследований.

Замечания по диссертационной работе

При общей высокой оценке работы считаю необходимым высказать ряд замечаний и пожеланий:

1. Влияние фотодегradации. В разделе 4.3 автор описывает методику предотвращения фотодегradации путём латерального смещения образца. Однако не приводятся результаты контроля стабильности спектров во времени, что было бы полезно для оценки надёжности экспериментальных данных при высоких интенсивностях накачки, близких к порогу разрушения.

2. Статистический анализ. На графиках, представляющих экспериментальные данные, планки погрешностей соответствуют уровню значимости 0,9. В тексте работы отсутствует обоснование выбора именно этого уровня значимости.

3. Автор утверждает, что эффекты поляризации подавлены из-за многократного рассеяния, однако не приводит экспериментальных подтверждений (например, измерение степени деполаризации флуоресценции). Для строгости следовало бы измерить поляризационные характеристики отклика и показать, что они действительно не зависят от поляризации накачки.

4. Для восстановленных значений $\langle nst \rangle$ и предельной длины усиления автор не приводит сравнения с аналогичными оценками из других работ (например, для случайных

лазеров на основе красителей). Такое сравнение помогло бы подтвердить универсальность полученных результатов или выявить особенности исследованных систем.

5. Для кольцевого контейнера высотой 1.0 мм и внутренним диаметром 20.0 мм при объёмной доле частиц $\rho \approx 0.22$ указано, что свободному объёму соответствует около 0.25 мкл раствора (с. 77). Геометрическая оценка даёт свободный объём порядка 0.25 мл.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки представленной работы.

Заключение

Диссертационная работа Дорогова Александра Федоровича «Импульсная лазерная спектроскопия флуоресцирующих случайно-неоднородных сред: фундаментальные ограничения и прикладные аспекты» является самостоятельным, завершённым научным исследованием, выполненным на высоком научно-методическом уровне. Полученные результаты имеют важное значение для развития нелинейной оптики и лазерной спектроскопии.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.6. – Оптика. Диссертационная работа в полной мере соответствует требованиям пунктов 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации, Дорогов Александр Федорович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика.

Официальный оппонент: Горин Дмитрий Александрович
профессор центра фотоники и
фотонных технологий
автономной некоммерческой
образовательной организации
высшего образования
«Сколковский институт науки и
технологий» (Сколтех), доктор
химических наук, профессор



Дата: «28» сентября 2026 г.

Я, Горин Дмитрий Александрович, даю согласие на обработку моих персональных данных (приказ Минобрнауки России от 01.07.2015 №662) и на включение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук Дорогова Александра Федоровича.

 /Горин Д.А.

Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30 стр.1

Е-mail: gorinda@mail.ru, d.gorin@skoltech.ru

Тел.: +7 (495) 280-14-81

Подпись Горина Д.А. заверяю:

Руководитель отдела
кадрового администрирования
Гук О.С.



28.09.2026