

На правах рукописи



Дорогов Александр Федорович

**ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ
СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ**

1.3.6 - Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов 2026

Работа выполнена на кафедре «Физика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Научный руководитель: Зимняков Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Официальные оппоненты:

1. Горин Дмитрий Александрович — доктор химических наук, профессор, профессор центра фотоники и фотонных технологий автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» (Сколтех), г. Москва.

2. Артемьев Дмитрий Николаевич — кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой лазерных и биотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»».

Защита диссертации состоится «29» октября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.392.06 при ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, корпус 10, ауд. 511.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» и на официальном сайте ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по электронному адресу: <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-06/kandidatskaya-dissertaciya-dorogova-aleksandra>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.392.06
д.ф.-м.н., доцент



Генина Э. А.

Общая характеристика работы

Лазерная спектроскопия флуоресцирующих сред является междисциплинарным научным направлением, базирующимся на методах и подходах нелинейной оптики, статистической физики, физики конденсированного состояния и других физических наук. Применение этих методов и подходов является весьма актуальным для дальнейшего развития таких современных прикладных направлений, как фотоника, нанооптика, оптоэлектроника, оптическая биомедицинская диагностика. Среди различных нелинейных эффектов, проявляющихся при импульсных лазерных воздействиях на многократно рассеивающие флуоресцирующие среды, особое внимание привлекает феномен так называемой стохастической лазерной генерации (random lasing) [1], по сути являющийся суперлюминисценцией флуоресцирующих случайно-неоднородных сред при значительных уровнях населенности возбужденного состояния центров флуоресценции и в отсутствие частотно-селективной оптической обратной связи во флуоресцирующей системе. Начиная с основополагающей работы В.С. Летохова [2] и вплоть до настоящего времени различным прикладным и фундаментальным аспектам стохастической лазерной генерации посвящено значительное число экспериментальных и теоретических работ отечественных и зарубежных исследователей (N.M. Lawandy, D.S. Wiersma, A. Lagendijk, A. H. Cao, S. K. Turitsyn, S. K. Stone, A. D. H. E. Türeci, Д.А. Зимняков, В.М. Маркушев, М.А. Ногинов). Несмотря на несравненно худшее качество излучения стохастических лазерных систем по временной и пространственной когерентности по сравнению с классическими лазерными системами с оптическими резонаторами [3], интерес к возможным практическим применениям этого явления продолжает оставаться на достаточно высоком уровне. В первую очередь это обусловлено диагностическими возможностями использования эффекта перехода от спонтанной флуоресценции в исследуемых средах к режиму эмиссии с существенным вкладом индуцированной составляющей флуоресценции с ростом интенсивности внешней лазерной накачки. Анализ характеристик этого перехода в системе координат «интенсивность накачки – полуширина спектра флуоресцентного отклика» позволяет, в частности, выявить особенности локального энергообмена между возбужденными центрами флуоресценции и рассеивающей матрицей в подобных системах в зависимости от их структурных и оптических свойств [4-8]. Следует особо отметить активный интерес к применению эффекта возбуждения стохастической лазерной генерации в биологических тканях и биосовместимых функциональных материалах для морфофункциональной диагностики подобных объектов [9]. В частности, выполненные в последнее время пилотные исследования [10-11] показали перспективность этого направления для ранней диагностики онкологических заболеваний. В последнее пятилетие наблюдается весьма активный исследовательский интерес к созданию и применению стохастических лазерных систем на основе перовскитов, выражающийся в появлении большого числа публикаций в высокорейтинговых международных журналах [12-14].

Таким образом, к настоящему времени достигнут значительный прогресс в понимании и практическом применении особенностей преобразования высокоинтенсивного излучения лазерной накачки в флуоресцентный отклик случайно-неоднородных сред, способствующий дальнейшему развитию таких прикладных областей, как фотоника, оптоэлектроника, физическое материаловедение, оптическая биомедицинская диагностика. В то же время некоторые аспекты нелинейного взаимодействия лазерного света с флуоресцирующими нано- и микроструктурированными материалами требуют дальнейших углубленных исследований. К подобным аспектам относится, в частности, фундаментальное ограничение спектрального качества флуоресцентного отклика зондируемых сред при интенсивностях накачки, существенно превышающих порог стохастической лазерной генерации в облучаемой среде. Также при теоретическом описании преобразования излучения накачки во флуоресцентный отклик случайным образом организованных сред вплоть до настоящего времени не учитывалось влияние гранулированной структуры светового поля накачки в среде, обусловленной высокой когерентностью лазерного излучения. Учет этих особенностей позволит существенно расширить функциональные возможности импульсной лазерной спектроскопии флуоресцирующих случайно-неоднородных сред в условиях значительного вклада индуцированной составляющей во флуоресцентный отклик зондируемых сред.

В связи с этим **целью диссертационной работы** явилось установление фундаментальных особенностей формирования флуоресцентного отклика случайно-неоднородных сред при высоких интенсивностях внешней лазерной накачки с учетом гранулированной (спекл-модулированной) структуры поля накачки и выявление факторов, ограничивающих спектральное качество флуоресцентного отклика зондируемых сред при их импульсной лазерной спектроскопии. Для реализации поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

- 1) разработка и экспериментальная верификация феноменологической кинетической модели формирования флуоресцентного отклика случайно-неоднородных сред при их импульсной лазерной накачке в условиях влияния спекл-модуляции поля накачки на перенос флуоресцентного излучения в среде;
- 2) анализ предельных населенностей возбужденного состояния центров флуоресценции в случайно-неоднородных средах для квазистационарного режима формирования флуоресцентного отклика при высоких интенсивностях накачки в рамках двухуровневой феноменологической модели;
- 3) разработка и верификация на основе эмпирических данных феноменологической модели энергообмена между ассоциируемыми со спеклами поля накачки локальными эмиттерами флуоресценции в случайно-неоднородной среде;
- 4) развитие и экспериментальная верификация вероятностной модели формирования квазистационарного флуоресцентного отклика случайно-неоднородной среды, накачиваемой в полосе поглощения флуоресцирующего компонента;

5) разработка метода восстановления спектрального контура усиления индуцированной составляющей флуоресценции на основе полученных в эксперименте спектров флуоресцентного отклика при различных интенсивностях накачки и анализ влияния морфологических особенностей накачиваемых сред на контур усиления.

Решение поставленных задач позволит не только расширить фундаментальные представления о процессах генерации и переноса флуоресцентного излучения в случайно-неоднородных средах, но и разработать новые диагностические подходы в импульсной лазерной спектроскопии подобных объектов.

Научная новизна полученных результатов

1. Впервые рассмотрен и теоретически обоснован эффект уширения зоны флуоресцентного отклика случайно-неоднородных сред при возрастании интенсивности лазерной накачки, обусловленный увеличением вероятности переноса парциальных составляющих поля флуоресцентного отклика в направлениях, перпендикулярных направлению распространения накачивающего лазерного пучка. Показано, что существенный вклад в этот процесс могут оказывать процессы самопоглощения квантов флуоресценции с последующим их переизлучением.

2. Впервые в рамках концепции спекл-модуляции светового поля лазерной накачки во флуоресцирующих случайно-неоднородных средах теоретически установлена и экспериментально верифицирована зависимость квазистационарной населенности возбужденного состояния центров флуоресценции от интенсивности накачки и параметров накачиваемой среды.

3. В рамках феноменологической модели энергообмена между локальными эмиттерами флуоресценции в накачиваемой случайно-неоднородной среде, ассоциируемыми со спеклами в поле накачки, получено и верифицировано соотношение для сечения радиационных потерь локальных эмиттеров, определяющего предельную населенность возбужденного состояния центров флуоресценции при высоких интенсивностях накачки.

4. Впервые установлено, что с ростом интенсивности лазерной накачки средняя характерный масштаб распространения стимулированного излучения индуцированной составляющей в среде стремится к предельному значению, не зависящему от абсорбционных и эмиссионных характеристик флуоресцирующего компонента среды и определяемому концентрацией центров флуоресценции в среде и характерным размером локальных эмиттеров флуоресценции.

5. Впервые разработан и верифицирован с использованием экспериментальных данных метод восстановления спектрального контура усиления индуцированной составляющей флуоресценции из набора спектров флуоресцентного отклика, полученных при различных интенсивностях накачки.

Практическая значимость полученных результатов

Разработанный метод восстановления спектрального контура усиления индуцированной составляющей флуоресценции, демонстрирующего высокую

чувствительность к эффективности локального энергообмена между возбужденными центрами флуоресценции и матричной средой, является основой для создания новых эффективных диагностических подходов в физическом материаловедении и оптической биомедицинской диагностике. Разработанные экспериментальные подходы и теоретические модели позволяют расширить функциональные возможности импульсной лазерной спектроскопии случайно-неоднородных сред, содержащих флуоресцирующие компоненты.

Полученные в ходе выполнения работы результаты используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Техническая физика» при чтении специальных курсов лекций, выполнении лабораторно-исследовательских работ и подготовке выпускных квалификационных работ.

Методология исследования

При выполнении экспериментальных и теоретических исследований применены обоснованные и апробированные методы оптической диффузионной и флуоресцентной спектроскопии случайно-неоднородных сред, статистического моделирования переноса излучения в многократно рассеивающих субстанциях, физической кинетики неравновесных и квазиравновесных процессов, статистического анализа эмпирических и модельных данных.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием обоснованных и верифицированных экспериментальных методов исследований; воспроизводимостью полученных экспериментальных данных и их соответствием результатам теоретического анализа, полученных с использованием адекватных теоретических моделей. Также достоверность подтверждается соответствием полученных результатов аналогичным результатам, полученным другими исследовательскими группами.

На защиту выносятся следующие результаты и положения.

1. Предельная населенность возбужденного состояния центров флуоресценции в случайно-неоднородных средах при высокоинтенсивной импульсной лазерной накачке определяется отношением их сечения индуцированного излучения к сечению радиационных потерь локальных эмиттеров флуоресценции, ассоциируемых с лазерными спеклами в поле накачки.
2. Фактор улучшения спектрального отклика флуоресцирующей среды при импульсной лазерной накачке определяется отношением среднего времени нахождения квантов флуоресценции в среде к характерному времени усиления индуцированной составляющей флуоресценции и не зависит от интенсивности накачки при превышении интенсивностью порогового значения, определяемого транспортной длиной распространения излучения в среде.
3. Предложена вероятностная модель усиления индуцированной составляющей флуоресценции в накачиваемых лазерным излучением случайно-неоднородных средах, адекватно описывающая эволюцию флуоресцентного отклика при возрастании интенсивности импульсной лазерной накачки случайно-неоднородной среды.

4. Разработан метод восстановления спектрального контура фактора усиления индуцированной составляющей флуоресценции случайно-неоднородных сред по набору спектров флуоресцентного отклика, полученных при различных интенсивностях лазерной накачки. Восстанавливаемые спектральные контуры фактора усиления демонстрируют высокую чувствительность к особенностям взаимодействия центров флуоресценции с рассеивающими матрицами на микроскопическом уровне, приводящим к обеднению возбужденного состояния.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих российских и международных конференциях:

- 1) Saratov Fall Meeting -2022, -2023 (Саратов, Россия);
- 2) The 28th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'21) (Москва, Россия);
- 3) 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology (Самара, Россия);
- 4) XXI Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазм (Самара, Россия);
- 5) The 29th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'22) (Москва, Россия);
- 6) «Енисейская фотоника – 2022» (Красноярск, Россия);
- 7) XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Россия).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 12 работ в изданиях, входящих в список ВАК и индексируемых международными базами данных Scopus и WoS, в том числе 2 статьи в журналах, относящихся к уровню K1 «Белого списка научных журналов» и 1 статья в журнале уровня K2.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в постановке и решении основных задач работы, в разработке методов теоретического анализа, моделировании, верификации, получении, обработке и интерпретации получаемых экспериментальных и теоретических данных. Представленные в диссертационной работе результаты получены или лично автором, или совместно с д.ф.-м.н. Зимняковым Д.А. и к.ф.-м.н. Волчковым С.С.

Объем и структура диссертации

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных источников. Основное содержание работы изложено на 118 страницах и представлено на 41 рисунках и в 3 таблицах. Список литературы состоит из 141 источника.

Основное содержание диссертационной работы

Введение содержит обоснование актуальности исследования, формулировку цели и основных задач работы, описание научной новизны и практической значимости полученных результатов. Представлены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена рассмотрению установленных к настоящему времени фундаментальных особенностей взаимодействия высокоинтенсивного импульсного лазерного излучения с флуоресцирующими случайно-неоднородными средами и обсуждению основных принципов импульсной лазерной спектроскопии подобных систем. Особое внимание уделено эффекту стохастической лазерной генерации в случайно-неоднородных средах, обусловленному существенным возрастанием вклада индуцированной составляющей флуоресценции в спектральный отклик среды с ростом интенсивности лазерной накачки. Обсуждены возможные применения этого эффекта в фотонике, физическом материаловедении и оптической биомедицинской диагностике. Выявлены основные вопросы в данном направлении, требующие дальнейшего рассмотрения и определяющие совокупность основных задач диссертационного исследования.

Во **второй главе** представлены результаты экспериментальных исследований и теоретического моделирования особенностей распространения флуоресцентного отклика в слоях флуоресцирующих случайно-неоднородных сред, накачиваемых импульсным лазерным излучением в полосе поглощения флуоресцирующего компонента. В качестве исследуемых образцов использовались слои плотноупакованных наночастиц SiO_2 (продукт №637238, SigmaAldrich, средний размер частиц ≈ 20 нм) и TiO_2 (анатаз, продукт №637254, SigmaAldrich, средний размер частиц < 25 нм), насыщенные водным раствором родамина 6Ж. Объемная доля частиц в уплотненных слоях, определенная волюмометрически, составила ≈ 0.1 для SiO_2 и ≈ 0.22 для TiO_2 . Толщина слоев L составляла (820 ± 26) мкм для SiO_2 и (770 ± 24) мкм для TiO_2 . Важным этапом работы являлась характеристика оптических свойств сред. Для тестовых образцов, насыщенных чистым растворителем, с использованием интегрирующей сферы и метода инверсного Монте-Карло были определены транспортная длина распространения излучения l^* и эффективный показатель преломления n_{eff} . Параметр анизотропии рассеяния g , оцененный в рамках модели эффективной среды, не превышал 0.2 для обеих систем, что обосновывает использование приближения изотропного рассеяния в расчетах. Полученные значения составили: для SiO_2 слоев $l^* \approx 550$ мкм и $n_{eff} \approx 1.38$; для TiO_2 слоев $l^* \approx 4.01 * \approx 4.0$ мкм и $n_{eff} \approx 1.55$ на длине волны максимума флуоресценции (570 нм). Коэффициент поглощения раствора красителя на длине волны накачки (532 нм) составлял ≈ 1.74 мм⁻¹. Экспериментальные исследования флуоресцентного отклика осуществлялись путем регистрации спектров флуоресценции с использованием спектрометра Ocean Optics QE65000. Сбор и доставка излучения к спектрометру осуществлялась с помощью волоконно-оптического патчкорда с расположенным перед входным торцом светофильтром ОС-13, блокирующим излучение накачки. Также осуществлялась регистрация изображений зоны флуоресцентного отклика на поверхности образцов с помощью быстродействующей КМОП камеры Optronis-CamRecord CR3000x2. Теоретический анализ особенностей формирования зоны флуоресцентного

отклика в накачиваемых слоях производился на основе результатов Монте-Карло моделирования переноса излучения накачки и флуоресценции.

Рисунок 1 иллюстрирует эффект перехода от спонтанной флуоресценции к эмиссии со значительным вкладом индуцированной составляющей (проявление стохастической лазерной генерации) с ростом интенсивности накачки в TiO_2 слоях и отсутствие подобного эффекта в SiO_2 слоях. При этом характерный размер зоны флуоресцентного отклика на поверхности TiO_2 слоев увеличивался в существенно большей степени с ростом интенсивности накачки по сравнению с SiO_2 слоями.

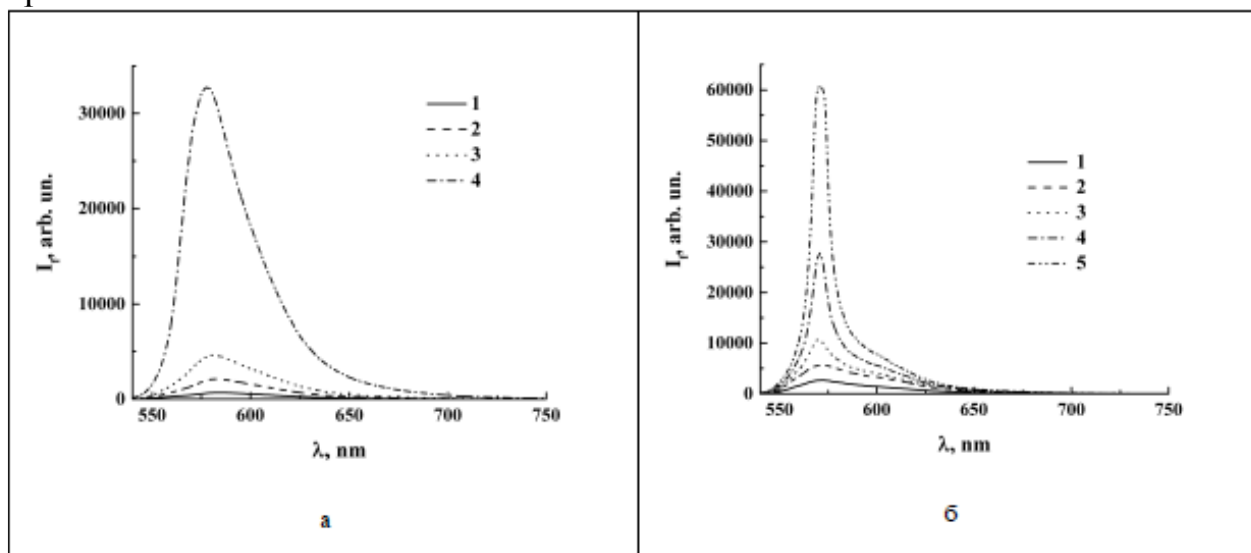


Рисунок 1 -Спектры флуоресценции исследуемых образцов при возбуждении на 532 нм; а – SiO_2 слой с раствором родамина 6Ж, 1 – $I_p = 5.88 \cdot 10^6$ Вт/см², 2 – $I_p = 1.37 \cdot 10^7$ Вт/см², 3 – $I_p = 2.65 \cdot 10^7$ Вт/см², 4 – $I_p = 1.96 \cdot 10^8$ Вт/см²; б – TiO_2 слой с раствором родамина 6Ж, 1 – $I_p = 2.94 \cdot 10^6$ Вт/см², 2 – $I_p = 5.88 \cdot 10^6$ Вт/см², 3 – $I_p = 1.37 \cdot 10^7$ Вт/см², 4 – $I_p = 2.65 \cdot 10^7$ Вт/см², 5 – $I_p = 3.92 \cdot 10^7$ Вт/см².

На (рис. 2) представлены результаты Монте-Карло моделирования квазистационарных пространственных распределений возбужденных центров флуоресценции в SiO_2 и TiO_2 слоях (а) и нормированной поверхностной плотности флуоресцентного отклика (б), формируемых при поглощении излучения накачки от точечного источника, локализованного на поверхности слоя в точке $r = 0$. Распределения возбужденных центров флуоресценции и плотности флуоресцентного отклика на поверхности слоев от протяженных источников накачки восстанавливаются путем сверки распределений (рис.2) с функцией распределения интенсивности накачки на поверхности слоев.

Анализ полученных экспериментальных и модельных данных показывает, что в случае SiO_2 слоев имеет место многократное превышение продольного и поперечного размеров прокачиваемого объема слоя по сравнению с TiO_2 слоями. Это приводит к существенно меньшим значениям средней плотности энергии накачки и, соответственно, к значительно меньшей населенности возбужденного состояния центров флуоресценции во время действия импульсов в первом случае.

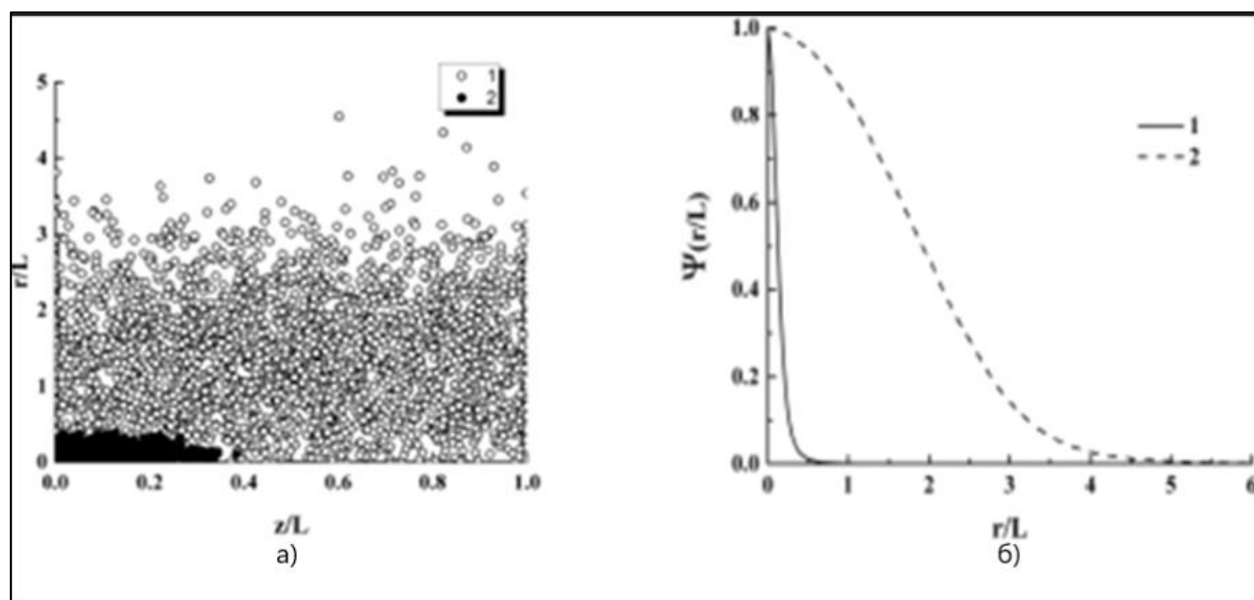


Рисунок 2 -а – модельные распределения возбужденных центров флуоресценции в SiO_2 (1) и TiO_2 (2) слоях; б – модельные функции импульсного отклика (1 - TiO_2 слой, 2 - SiO_2 слой, L – толщина слоя). $\Psi(r/L) = \{\Delta N_f(r/L)/\Delta S_{ub}\}/\{\Delta N_f(0)/\Delta S_{ub}\}$ для поверхностных распределений интенсивности флуоресценции.

Кроме того, существенно более равномерное пространственное распределение возбужденных центров в SiO_2 слоях (рис. 2,а) значительно увеличивает вероятность эмиссии нерегистрируемой части флуоресцентного отклика через нижнюю границу слоя. Совокупное действие этих факторов приводит к существенному вкладу во флуоресцентный отклик индуцированных составляющих флуоресценции, распространяющихся вдоль TiO_2 слоев на значительные расстояния вследствие множественных переотражений от верхней границы вглубь слоя (что может быть интерпретировано как «квази-волноводный» эффект). Также определенный вклад в расширение зоны флуоресцентного отклика в TiO_2 слоях могут давать акты самопоглощения флуоресценции с последующим переизлучением при больших значениях интенсивности индуцированной составляющей вблизи поверхности слоя.

Важно отметить, что при анализе нелинейных эффектов в условиях высокоинтенсивной импульсной накачки (длительность импульса 10 нс, частота 10 Гц) нагрев образца не оказывает определяющего влияния на наблюдаемые закономерности. Высокая скважность импульсов и теплоемкость водонасыщенных слоев препятствуют накоплению тепла. Оценки показывают, что характерная длина распространения температурного фронта за время импульса не превышает единиц нанометров, исключая изменение макроскопических свойств среды в течение импульса. Отсутствие термоиндуцированных искажений спектров и деградации красителя при интенсивностях накачки ниже порога лучевой прочности подтверждает, что тепловые эффекты не являются доминирующим фактором при использовании условий проведения эксперимента.

Третья глава посвящена рассмотрению влияния спекл-модуляции поля лазерной накачки на процессы суперлюминесценции и перехода к стохастической лазерной генерации в случайно-неоднородных флуоресцирующих

средах. В качестве модельных сред для экспериментальных исследований выбраны слои плотноупакованных наночастиц TiO_2 (анатаза), насыщенные растворами родамина 6Ж.

В качестве характеристики спектров флуоресцентного отклика рассматривается фактор спектрального качества $Q_E = \overline{\lambda}_E / \Delta\lambda_E$, для исследуемых систем изменяющийся от 20 при малых интенсивностях накачки $I_p (< 5 \times 10^5 \text{ Вт/см}^2)$ до 115 при $I_p > 3 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$. На (рис. 3) приведена типичные зависимости $Q_E(I_p)$ для исследуемых образцов, накачиваемых импульсным лазерным излучением на 532 нм.

В главе рассмотрена роль спекл-модуляции поля накачки, обусловленная когерентностью лазерного излучения, в формировании флуоресцентного отклика накачиваемой среды. Многократное рассеяние света в случайно-неоднородной среде приводит к образованию локализованных «горячих зон» (локальных эмиттеров флуоресценции). Эти зоны, ассоциируемые с лазерными спеклами, являются в рамках рассматриваемой модели основными областями генерации флуоресцентного отклика. Модель описывается системой кинетических уравнений (1), связывающих населенность возбужденного состояния молекул флуорофора (f) и усредненную по спектру интенсивность флуоресценции $\langle I_f(t) \rangle_\lambda$

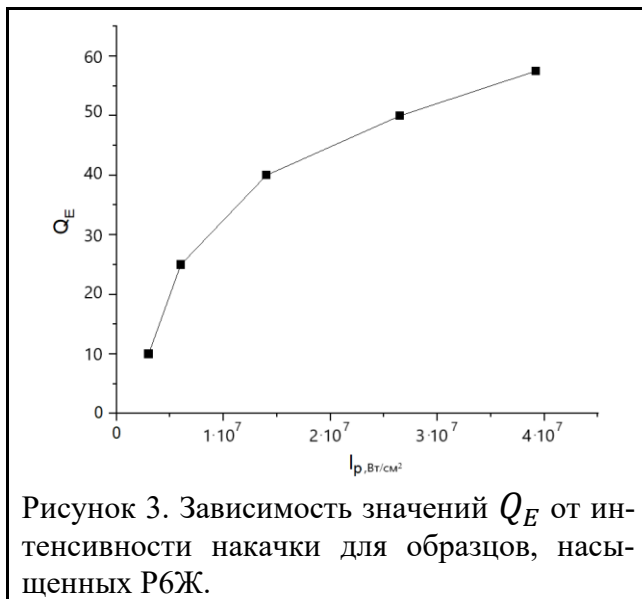


Рисунок 3. Зависимость значений Q_E от интенсивности накачки для образцов, насыщенных Р6Ж.

рассматриваемой модели основными областями генерации флуоресцентного отклика. Модель описывается системой кинетических уравнений (1), связывающих населенность возбужденного состояния молекул флуорофора (f) и усредненную по спектру интенсивность флуоресценции $\langle I_f(t) \rangle_\lambda$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{df}{dt} = \frac{\sigma_a}{h\nu_f} I_p(t) \{1 - f\} - \frac{\langle \sigma_{st} \rangle_\lambda}{\langle h\nu_f \rangle_\lambda} \langle I_f(t) \rangle_\lambda \cdot f + \frac{\langle \sigma_{sa} \rangle_\lambda}{\langle h\nu_f \rangle_\lambda} \langle I_f(t) \rangle_\lambda \{1 - f\} - \delta f; \\ \frac{d\langle I_f(t) \rangle_\lambda}{dt} = \left\{ \frac{\langle \sigma_{st} \rangle_\lambda}{\langle h\nu_f \rangle_\lambda} \langle I_f(t) \rangle_\lambda \cdot f + \delta f - \frac{\langle \sigma_{sa} \rangle_\lambda}{\langle h\nu_f \rangle_\lambda} \langle I_f(t) \rangle_\lambda \{1 - f\} - \right. \\ \left. - \frac{\sigma_{rad}(d_{em}, \langle I_f(t) \rangle_\lambda)_{PL}}{\langle h\nu_f \rangle_\lambda} \langle I_f(t) \rangle_\lambda \right\} n_0 \langle h\nu_f \rangle_\lambda \cdot v. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь f – нормированное значение населенности возбужденного состояния молекул флуорофора в объеме локального эмиттера $f = n(t)/n_0$, n_0 – концентрация молекул флуорофора, σ_a – сечение поглощения молекул флуорофора на длине волны накачки, $h\nu_f$ – энергия кванта накачки, $\langle \sigma_{st} \rangle_\lambda$ – усредненное по спектру флуоресценции сечение индуцированного излучения молекул флуорофора, $\langle h\nu_f \rangle_\lambda$ – усредненная по спектру энергия кванта флуоресценции, $\langle I_f(t) \rangle_\lambda$ – усредненное по спектру текущее значение интенсивности флуоресцентного отклика, $\langle \sigma_{sa} \rangle_\lambda$ – усредненное по спектру значение сечения самопоглощения флуоресценции, δ – скорость спонтанной релаксации возбужденных состояний, $\sigma_{rad}(d_{em}, \langle I_f(t) \rangle_\lambda)_{PL}$ – сечение радиационных потерь локального эмиттера, v – скорость света в среде, d_{em} –

характерный размер локального эмиттера. Значение $\langle \sigma_{rad} \rangle$ соответствует усредненной по ансамблю локальных эмиттеров с различными значениями d_{em} величине $\sigma_{rad}(d_{em}, \langle \langle I_f(t) \rangle \rangle_{\lambda PL})$. Можно показать, что максимальное сечение радиационных потерь для изолированного локального эмиттера определяется выражением: $\sigma_{rad}^{max} \approx 3/2n_0d_{em}$.

Было установлено, что время переходных процессов в начале и конце воздействия лазерного импульса в РБЖ-насыщенных случайно-неоднородных средах не превышает 0.1 от длительности лазерного импульса даже при относительно небольших уровнях накачки (порядка $3,0 \times 10^6$ Вт/см²). Соответственно, увеличение интенсивности накачки приводит к дальнейшему сокращению времени переходных процессов. В квази-стационарном режиме, когда длительность импульса накачки существенно превышает длительность переходных процессов в накачиваемой среде и вклад самопоглощения в f по сравнению с остальными процессами мал, система (1) сводится к следующим соотношениям:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_a}{hv_f} I_p(t) \{1 - f\} - \frac{\langle \sigma_{st} \rangle_{\lambda}}{\langle hv_f \rangle_{\lambda}} \langle I_f(t) \rangle_{\lambda} \cdot f - \delta f = 0; \\ \frac{\langle \sigma_{st} \rangle_{\lambda}}{\langle hv_f \rangle_{\lambda}} \langle I_f(t) \rangle_{\lambda} \cdot f + \delta f - \frac{\sigma_{rad}(d_{em}, \langle \langle I_f(t) \rangle \rangle_{\lambda PL})}{\langle hv_f \rangle_{\lambda}} \langle I_f(t) \rangle_{\lambda} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Из выражений (2) следует, что при $I_p \rightarrow \infty$ населенность возбужденного состояния стремится к предельному значению $f \rightarrow \sigma_{rad} / \langle \sigma_{st} \rangle_{\lambda}$. Принимая во внимание, что характерный масштаб распространения индуцированной составляющей флуоресценции в случайно-неоднородной среде между последовательными актами индуцированного излучения может быть определен как $l_{st} \approx (\langle \sigma_{st} \rangle_{\lambda} n_0 f)^{-1}$, приходим к выводу, что характерный масштаб распространения индуцированной составляющей флуоресценции при $I_p \rightarrow \infty$ стремится к предельному значению $l_{st} \rightarrow \approx (n_0 / \sigma_{rad})^{-1}$.

В рамках главы рассмотрена феноменологическая модель для оценки усредненного по ансамблю сечения радиационных потерь локальных эмиттеров флуоресценции, ассоциируемых со спеклами поля накачки. На рис. 4 приведена графическая интерпретация модели, отображающая случайным образом выбранный локальный эмиттер, участвующий в квазистационарном энергообмене потоками флуоресцентного излучения с соседними эмиттерами. В отсутствие энергообмена сечение радиационных потерь выбранного локального эмиттера равно $\sigma_{rad}^{max} \approx 3/2n_0d_{em}$. Учет энергообмена в предположении об изотропном угловом распределении флуоресценции, испускаемой эмиттерами, позволил получить следующее приближенное выражение для усредненного по ансамблю сечения радиационных потерь локальных эмиттеров флуоресценции:

$$\langle \sigma_{rad}(I_p) \rangle \approx \frac{3}{2n_0 \langle d_{em}(I_p) \rangle} \cdot \left\{ 1 - \frac{1.07\pi \langle d_{em}(I_p) \rangle^2 l}{\Xi^3 \langle d_{sp} \rangle^3} \exp - \left(\frac{1.15 \langle d_{em}(I_p) \rangle}{l} \right) \right\}. \quad (3)$$

В выражении (3) l – длина рассеяния излучения флуоресценции в накачиваемой среде, $\langle d_{sp} \rangle$ – средний размер спеклов в поле накачки, Ξ – характерное

расстояние между соседними спеклами в поле накачки; запись $\langle d_{em}(I_p) \rangle$ предполагает зависимость среднего размера локальных эмиттеров от интенсивности накачки.

Экспериментальные исследования возрастания параметра Q_E при увеличении I_p , проведенные на образцах с различными значениями l и n_0 , показали слабую зависимость среднего сечения радиационных потерь $\langle \sigma_{rad} \rangle$ в образцах от интенсивности накачки при значениях I_p , превышающих $3,0 \times 10^7$ Вт/см². Установлено, что $\langle \sigma_{rad} \rangle$ монотонно уменьшается с ростом I_p при малых интенсивностях накачки, что объясняется возрастанием энергообмена между локальными эмиттерами флуоресценции. В рамках модели учитывается «экранирующий эффект» в средах с малой длиной рассеяния l , что ограничивает радиационный обмен между соседними локальными эмиттерами вследствие интенсивного рассеяния флуоресценции в среде.



Рисунок 4. Модель ансамбля локальных эмиттеров флуоресцентного излучения в накачиваемой случайно-неоднородной среде и взаимодействии между ними.

Следует отметить, что оцениваемые в рамках рассмотренной феноменологической модели характерные размеры локальных эмиттеров флуоресценции слабо зависят от интенсивности накачки, однако существенно различаются для систем с различными значениями длины рассеяния l .

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований эффекта насыщения спектральных характеристик флуоресценции случайно-неоднородных сред в условиях высокоинтенсивной лазерной накачки и ограничений усиления индуцированной составляющей флуоресценции в подобных условиях. Проведено феноменологическое рассмотрение явления сужения спектра флуоресцентного отклика с ростом интенсивности накачки в литературе интерпретируемое как переход от спонтанной флуоресценции к режиму стохастической лазерной генерации (random lasing).

Экспериментальные исследования проводились на модельных образцах двух типов: - насыщенных растворами лазерных красителей (родамина 6Ж и DCM) слоях плотноупакованных наночастиц анатаза и суспензиями рассеивающих частиц в растворах лазерных красителей. В качестве растворителя при подготовке растворов красителей использован этиленгликоль. Первый тип образцов включал слои наночастиц анатаза, насыщенные растворами красителей, а второй — суспензии наночастиц в тех же красителях с варьируемой объемной долей рассеивающих частиц. В концентрированном растворе DCM с объемной долей красителя 6.1×10^{-2} М роль рассеивающих центров выполняли нано- и микрочастицы DCM, присутствующие вследствие конечной

растворимости красителя. Для накачки использовался импульсное лазерное излучение с длиной волны 532 нм, а флуоресцентный отклик регистрировался спектрометром через оптоволоконный патч-корд. Интенсивность накачки регулировалась изменением энергии импульсов и положений образцов относительно фокальной плоскости фокусирующего объектива. На рис. 5 представлены типичные спектры флуоресцентного отклика модельных образцов при различных интенсивностях накачки (в течение действия лазерного импульса).

В главе рассмотрена феноменологическая вероятностная модель формирования флуоресцентного отклика накачиваемых случайно-неоднородных сред в предположении о его квазистационарности, рассмотренном в 3 главе. В модели применена концепция дискретных рассеивающих систем, в соответствии с которой многократно рассеянное световое поле в случайной среде можно рассматривать как суперпозицию статистически независимых парциальных составляющих (волн), распространяющихся по случайным траекториям (рис. 6, а). Каждая парциальная составляющая поля флуоресценции появляется в результате случайного акта спонтанного излучения и претерпевает последовательность случайных блужданий до момента выхода из среды и регистрации детектором. В результате n взаимодействий с возбужденными молекулами флуорофора, приводящим к актам вынужденного излучения, детектируемой парциальной составляющей соответствует пакет из $n+1$ квантов флуоресценции. Регистрируемый интегральный флуоресцентный отклик формируется в результате некогерентного суммирования большого числа парциальных составляющих с различными длинами волн. Средний путь распространения парциальных составляющих между последовательными актами индуцированного излучения, определяющий характерный масштаб распространения стимулированного излучения индуцированной составляющей в среде, зависит от концентрации n_0 флуорофора в среде, населенности f возбужденного состояния и сечения индуцированного излучения:

$$l_{st}(\lambda) = [\sigma_{st}(\lambda)n_0f]^{-1} \quad (5)$$

Рассматривая спектральную плотность флуоресцентного отклика $S(\lambda, I_p)$ при заданном уровне интенсивности накачки I_p , можно определить безусловную вероятность испускания средой кванта флуоресценции с длиной волны λ как:

$$p(\lambda, I_p) = \frac{(\lambda/hc)S(\lambda, I_p)}{\int_0^\infty (\lambda/hc)S(\lambda, I_p)d\lambda} \quad (6)$$

Предполагая статистическую независимость актов индуцированного излучения при распространении парциальных составляющих, представим $p(\lambda, I_p)$ как:

$$\begin{aligned} p(\lambda, I_p) &= \tilde{K}(I_p) \cdot p_{sp}(\lambda) \cdot p_{st,1}(\lambda) \cdots p_{st,i}(\lambda) \cdot p_{st,\langle n_{st} \rangle}(\lambda) \\ &= \tilde{K}(I_p) \cdot p_{sp}(\lambda) \cdot \prod_{i=0}^{\langle n_{st} \rangle} p_{st,i}(\lambda) \quad (7) \end{aligned}$$

где $p_{sp}(\lambda)$ – вероятность спонтанного испускания фотона флуоресценции на длине волны λ , определяемая уравнением (6) при $I_p \rightarrow 0$, $p_{st,i}(\lambda)$ – условная вероятность индуцированного излучения на той же длине волны, $\tilde{K}(I_p)$ – нормировочный коэффициент, зависящий от интенсивности накачки. Очевидно, если $I_p \rightarrow 0$, то $\tilde{K}(I_p) \rightarrow 1$, $\langle n_{st} \rangle \rightarrow 0$ и, соответственно, $p(\lambda, I_p) \rightarrow p_{sp}(\lambda)$. Выражение (7) может быть приведено к следующему виду:

$$p(\lambda, \langle n_{st} \rangle) = K(\langle n_{st} \rangle) p_{sp}(\lambda) \{\Gamma(\lambda)\}^{\langle n_{st} \rangle} \quad (8)$$

где $\Gamma(\lambda)$ – спектральный контур усиления индуцированной составляющей флуоресценции для данной накачиваемой системы, $\langle n_{st} \rangle$ – среднее по системе число актов индуцированного излучения при данной интенсивности накачки, а $K(\langle n_{st} \rangle)$ предполагается зависящим от этого числа с учетом взаимосвязи между $\langle n_{st} \rangle$ и I_p . Поскольку $p_{sp}(\lambda)$ определяет спектр спонтанной эмиссии, то в рамках рассмотренной вероятностной модели модификация спектра флуоресценции при увеличении интенсивности накачки определяется только $\langle n_{st} \rangle$ и $\Gamma(\lambda)$. Отметим, что $\Gamma(\lambda)$ стремится к 1 на краях спектральной полосы флуоресцентного отклика и существенно превышает 1 вблизи максимума флуоресценции.

На (рис. 6, б) приведены модельные спектры флуоресцентного отклика, полученные в соответствии с разработанной моделью (8) для РБЖ и DCM-насыщенных слоев сильно рассеивающей среды с транспортной длиной распространения излучения, равной 4 мкм, в зависимости от $\langle n_{st} \rangle$. Величина $\langle n_{st} \rangle$ определялась как $\langle s \rangle / l_{st}$, где $\langle s \rangle$ – средняя длина распространения флуоресцентного излучения в слое, вычисляемая с помощью метода Монте-Карло.

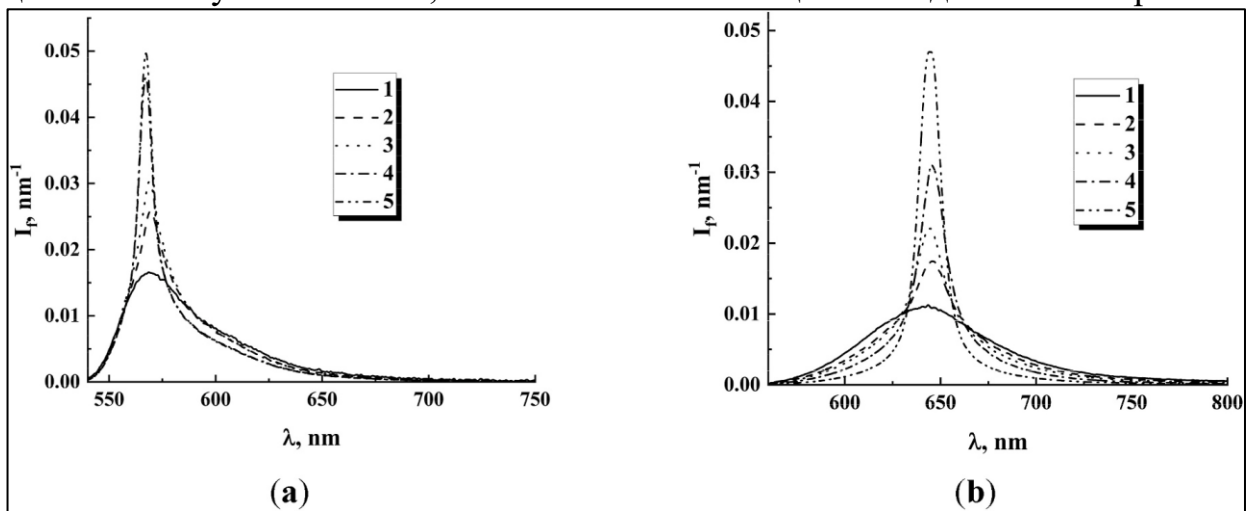


Рисунок 5 Примеры нормированных спектров флуоресценции исследованных флуоресцентных систем при различных интенсивностях накачки. (а) – слой, легированный РБЖ; мольная доля красителя в легирующем растворе составляет $3,4 \times 10^{-3}$ М; значения интенсивности накачки составляют: (1) - $I_p \approx 3,8 \times 10^6$ Вт/см²; (2) - $I_p \approx 7,6 \times 10^6$ Вт/см²; (3) - $I_p \approx 1,8 \times 10^7$ Вт/см²; (4) - $I_p \approx 5,1 \times 10^7$ Вт/см²; (5) - $I_p \approx 7,0 \times 10^7$ Вт/см²; (б) – слой, легированный DCM; мольная доля красителя в легирующем растворе составляет $6,1 \times 10^{-2}$ М; значения интенсивности накачки составляют: (1) - $I_p \approx 4,1 \times 10^6$ Вт/см²; (2) - $I_p \approx 6,8 \times 10^6$ Вт/см²; (3) - $I_p \approx 8,9 \times 10^6$ Вт/см²; (4) - $I_p \approx 2,2 \times 10^7$ Вт/см²; (5) - $I_p \approx 3,9 \times 10^7$ Вт/см²

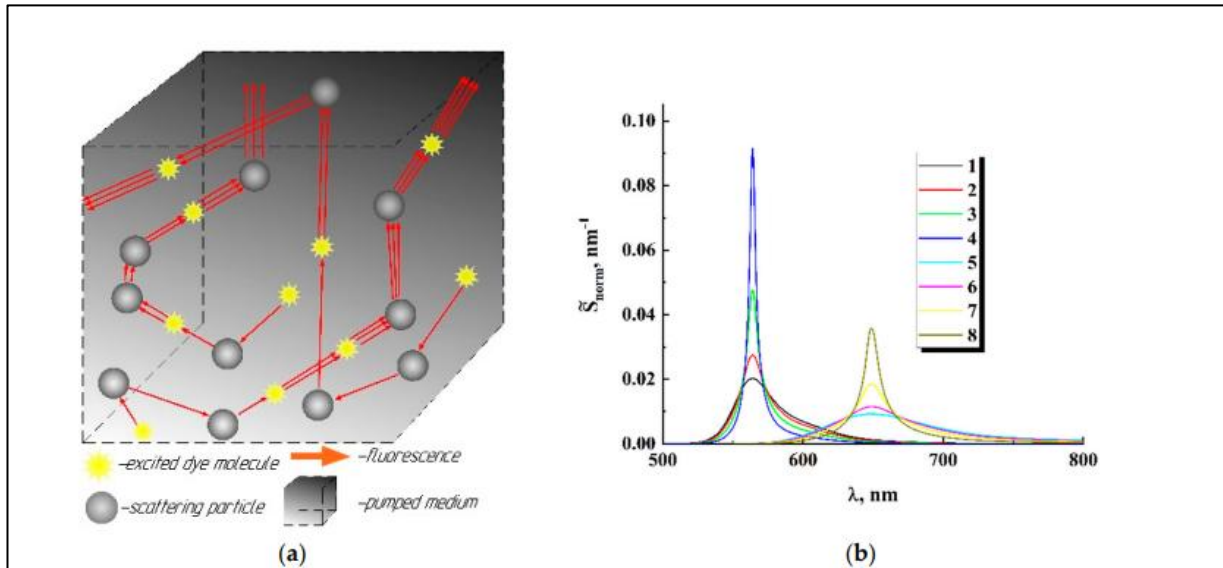


Рисунок 6 (а) Иллюстрация рассматриваемой вероятностной модели; (b) – модельные нормированные спектры выхода флуоресценции случайно-неоднородных слоев с $l^* = 4$ мкм, насыщенных Р6Ж (1–4) и DCM (5–8); (1, 5)– $l_{cm} = 1000$ мкм; (2, 6) – $l_{cm} = 250$ мкм; (3, 7) – $l_{cm} = 62,5$ мкм; (4, 8) – $l_{cm} = 15,63$ мкм.

Модельные данные (рис. 6, б) сопоставимы с экспериментальными результатами, представленными на (рис. 5). Очевидно, что увеличение интенсивности накачки должно приводить к уменьшению l_{st} вследствие роста населенности возбужденного состояния молекул флуорофора. С другой стороны, этот рост ограничен условием $f_{ext} = \sigma_{rad} / \langle \sigma_{st} \rangle_{\lambda}$ при высоких интенсивностях накачки, что приводит к наблюдаемому в экспериментах ограничению фактора спектрального качества флуоресцентного отклика.

На основе предложенной вероятностной модели разработан метод восстановления спектральных контуров усиления индуцированной составляющей флуоресценции в случайно-неоднородных флуоресцирующих средах, исходя из наборов спектров флуоресцентного отклика, полученных при различных интенсивностях внешней лазерной накачки. Метод основан на перенормировке спектров в соответствии с выражением (6), их последующем логарифмическом преобразовании, исключении не зависящей от λ постоянной составляющей, перемасштабировании по амплитуде и последующем усреднении по набору модифицированных спектров.

На (рис. 7) показаны восстановленные спектральные контуры $\langle \Gamma(\lambda) \rangle$ и спектральные распределения $p_{sp}(\lambda)$ для Р6Ж- и DCM-модельных сред. В случае Р6Ж-насыщенных слоев плотноупакованных частиц анатаза размером не более 25 нм и смеси частиц анатаза-рутила размером не более 100 нм (рис. 7,а) переход от «крупнозернистой» к «мелкозернистой» структуре рассеивающей матрицы приводит к определенным изменениям в форме $\langle \Gamma(\lambda) \rangle$, заключающимся в небольшом «красном» смещении максимума $\langle \Gamma(\lambda) \rangle$ (около 2.4 нм) и возрастании значений контура усиления в длинноволновой области (до

630 нм). Эти различия коррелируют с различиями в распределениях $p_{sp}(\lambda)$ (наборы данных 2, 4 на рис.7, а).

На (рис.7, б) представлены аналогичные зависимости $\langle \Gamma(\lambda) \rangle$ и $p_{sp}(\lambda)$ для модельных систем на основе (DCM-насыщенные слои плотноупакованных частиц анатаза-рутила с размерами менее 100 нм (1, 3) и суспензии DCM кристаллитов в растворе DCM (2, 4)). Уменьшение значения и «красное» смещение максимума $\langle \Gamma(\lambda) \rangle$ обусловлено переходом от одного типа рассеивающей матрицы (плотнупакованные частицы анатаза-рутила) к другому (ансамбли нано- и микрокристаллитов DCM).

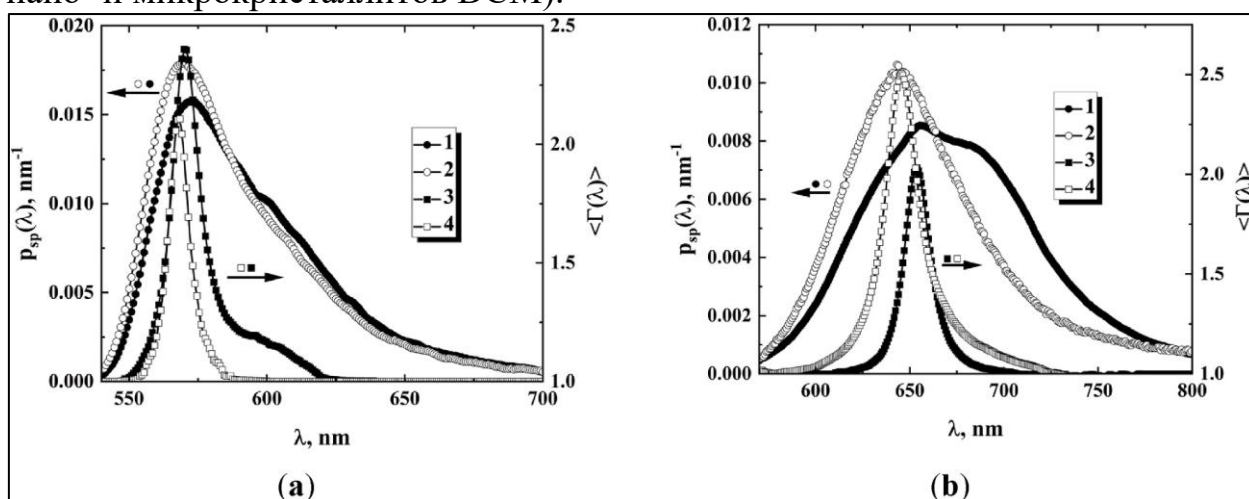


Рисунок 6. Восстановленные спектральные контуры усиления индуцированной составляющей $\langle \Gamma(\lambda) \rangle$ (1, 2) и распределения плотности вероятности $p_{sp}(\lambda)$ (3, 4) для модельных систем. а) системы на основе; б) системы на основе DCM.

Проявлением эффекта взаимодействия твердофазной рассеивающей матрицы с возбужденными молекулами красителя являются существенные изменения $\langle \Gamma(\lambda) \rangle$ в случае суспензий частиц DCM в сравнении с DCM-насыщенными слоями плотноупакованных частиц анатаза-рутила. Значительное уменьшение максимального значения и полуширины контура предположительно обусловлено возрастанием вероятности безызлучательного переноса энергии от возбужденных молекул DCM в растворе к молекулам DCM в кристаллитах. Существенное красное смещение пикового значения (≈ 8.4 нм), может быть обусловлено перераспределением энергии возбужденного состояния по колебательным подуровням вследствие взаимодействия красителя с матрицей.

Ключевым фактором, влияющим на сужение спектра флуоресценции, является отношение средней длины распространения $\langle s \rangle$ флуоресцентного излучения в накачиваемой среде к характерной длине l_{st} . Соответственно, значение фактора спектрального качества Q_{sp} возрастает с увеличением отношения $\langle s \rangle / l_{st} \approx \langle n_{st} \rangle$. В режиме многократного рассеяния средняя длина распространения излучения, испускаемого равномерно распределенными центрами флуоресценции в слое толщиной L , определяется соотношением L/l^* , где l^* - транспортная длина распространения излучения в среде. Монте-Карло моделирование позволило установить основные тенденции в поведении отношения

$\langle s \rangle / L$ с ростом L / l^* . В процедуре моделирования для дальнейшей обработки накапливались пути распространения фотонов флуоресценции, покидающих слой через верхнюю границу. В процедуре учитывались возможные френелевские отражения фотонов от границы обратно в слой (эффективный показатель преломления слоя принимался равным 1,5, а показатель преломления среды над слоем - 1,0). Установлено, что в режиме слабого рассеяния ($L / l^* < 1,0$) отношение $\langle s \rangle / L$ сравнимо с 1. При увеличении L / l^* выше 1,0 происходит резкое увеличение отношения $\langle s \rangle / L$ вследствие перехода к диффузионному режиму переноса излучения в слое. При больших значениях L / l^* средняя длина распространения проявляет тенденцию, характерную для диффузии излучения в слое: $\langle s \rangle \propto L^2 / l^*$. Таким образом, следовало бы ожидать, что уменьшение l^* приведет к увеличению $\langle s \rangle$ и, соответственно, $\langle n_{st} \rangle$. С другой стороны, уменьшение l^* приводит к уменьшению толщины прокачиваемого слоя в среде, что уменьшает величину среднего пути распространения.

Таким образом, усиление индуцированной флуоресценции в случайно-неоднородных средах ограничено факторами, связанными с диффузионным переносом излучения. С ростом интенсивности накачки среднее число актов вынужденного излучения достигает насыщения на уровне 3–4, и его дальнейшее увеличение вплоть до порога лучевой прочности среды становится несущественным.

Предложенная вероятностная модель адекватно описывает сужение спектра флуоресценции и позволяет оценить число актов индуцированного излучения в зависимости от интенсивности накачки. Чувствительность спектрального контура усиления индуцированной составляющей к свойствам рассеивающей матрицы открывает возможности для флуоресцентного анализа особенностей взаимодействия возбужденных молекул с поверхностью твердой фазы.

Заключение содержит основные выводы по работе, подчеркивающие научную новизну и практическую значимость полученных результатов. Также рассмотрены перспективные направления дальнейших исследований в области импульсной лазерной спектроскопии флуоресцирующих случайно-неоднородных сред.

Список цитируемых источников

1. Wiersma D. S. The physics and applications of random lasers // *Nature Physics*. 2008. Vol. 4. No. 5. P. 359–367.
2. Летохов В. С. Генерация света рассеивающей средой с отрицательным резонансным поглощением // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1968. Т. 53. № 4(10). С. 1442–1449.
3. Lagendijk A. van Soest G., Beta factor in a random laser // *Physical Review E*. 2002. Vol. 65. No. 4. Art. no. 047601. DOI: 10.1103/PhysRevE.65.047601.
4. Маркушев В. М., Золин В. Ф., Брискина Ч. М. Люминесценция и стимулированное излучение неодима в порошках молибдата натрия-лантана // *Квантовая электроника*. 1986. Т. 13. № 2. С. 444–445].
5. Noginov M. A., Novak J., Grigsby D., Zhu G., Bahoura M. Optimizing the performance of random lasers // *Optics Express*. 2005. Vol. 13. No. 22. P. 8829–8836.
6. Lawandy N. M., Balachandran R. M., Gomes A. S. L., Sauvain E. Laser action in strongly scattering media // *Nature*. 1994. Vol. 368. P. 436–438.
7. Wiersma D. S., Lagendijk A. Light diffusion with gain and random lasers // *Physical Review E*. 1996. Vol. 54. No. 4. P. 4256–4265.
8. Zimnyakov D. A., Volchkov S. S., Kochkurov L. A., Kochubey V. I., Melnikov A. G., Melnikov G. V. Hyperspectral speckleometry of random lasing in a dye-doped polymer film with ZnO nanoparticles // *Optics Express*. 2021. Vol. 29. No. 2. P. 2309–2324.
9. Gayathri K., Karthick R., Suresh Kumar P., et al. Biomedical Applications of Random Lasing // *Lasers in Medical Science*. 2023. Vol. 38. Art. no. 223. DOI: 10.1007/s10103-023-03888-x.
10. Chen R., Xiong Q., Tong F., et al. Properties and Applications of Random Lasers as Emerging Light Sources and Optical Sensors: A Review // *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22. No. 18. P. 17311–17324. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3199684.
11. Leuzzi L., De S. L., Di D. M., et al. A new class of optical sensors: a random laser based device // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. Art. no. 35225. DOI: 10.1038/srep35225.
12. Roy S., Mondal A., Yadav V., et al. Graphene–Perovskite-based ultrasensitive random laser // *Advanced Optical Materials*. 2018. Vol. 6. No. 14. Art. no. 1800382.
13. Hong Y., Kao T. S. Room-temperature random lasing of metal-halide perovskites with low-threshold and high-reliability // *Nanoscale Advances*. 2020. Vol. 2. No. 12. P. 5833–5840. DOI: 10.1039/d0na00794c.
14. Woli Y., Hoang T. B. Observation of plasmon-enhanced random lasing in hybrid perovskite films with silver nanocube scattering centers // *Optical Materials Express*. 2025. Vol. 15. No. 1. P. 128–136.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. О предельной длине усиления флуоресценции при лазерной накачке случайно-неоднородных сред / Зимняков Д.А., Волчков С.С., Кочкуров Л.А., **Дорогов А.Ф.** // Письма в ЖЭТФ, том 116, вып. 2, с. 67 – 73, (Журнал ВАК категория К1, «Белый список» 1-й уровень, включен в Scopus, WoS, RSCI).

2. Особенности переноса флуоресценции в многократно рассеивающих случайно-неоднородных слоях при интенсивной лазерной накачке / Зимняков Д.А., Волчков С.С., Кочкуров Л.А., **Дорогов А.Ф.** // «Квантовая электроника», 50, № 11 (2020).- С. 1007-10014 (Журнал ВАК категория К1, «Белый список» 1-й уровень, включен в Scopus, WoS, RSCI).

3. Эффект радиационных потерь в локализованной флуоресценции при лазерной накачке флуоресцирующих случайно-неоднородных сред/ Зимняков Д.А., Волчков С.С., Кочкуров Л.А., **Дорогов А.Ф.**, Токарев А.С., Никифоров А.А., Маркова Н.С.// Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т.21, вып.2. С.145–156 (Журнал ВАК категория К2, «Белый список» 2-й уровень, включен в Scopus, WoS, RSCI).

Статьи, опубликованные в иных научных изданиях

4. Fluorescence amplification in laser-pumped random media: Fundamental limitations / Zimnyakov, D.A., Volchkov, S.S., Kochubey, V.I., Plekhanova, I.A., **Dorogov, A.F.**// Journal of Luminescence., 2024, 272, 120667, («Белый список» 1-й уровень, включен в Scopus, WoS, RSCI).

5. Saturated Emission States in Fluorescent Nanostructured Media: The Role of Competition between the Stimulated Emission and Radiation Losses in the Local Emitters of Fluorescence. / Zimnyakov, D.A.; Volchkov, S.S.; Kochkurov, L.A.; **Dorogov, A.F.** // Nanomaterials 2022, 12, 2450, («Белый список» 1-й уровень, включен в Scopus, WoS, RSCI).

6. Low coherence reflectometry of randomly inhomogeneous media: basic approaches to data processing / Ushakova E.V., **Dorogov A.F.**, Zimnyakov D.A.//2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). - IEEE, 2020. - pp. 1-3, (включен в Scopus, WoS).

7. Features of the laser-pump-induced fluorescence response of multiple scattering random media / Zimnyakov, D.A., Volchkov, S.S., **Dorogov, A.F.**// Материалы Международной научно-практической конференции. Саратов, 2021. Издательство: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «КУБиК» (Саратов) Тип: статья в сборнике трудов конференции Язык: английский Год издания: 2021 Страницы: 39-44

8. Optical non-linearity and light diffusion in laser- pumped fluorescent nanocomposites: from a spontaneous fluorescence emission to a random lasing./ Zimnyakov, D.A.; Volchkov, S.S.; Kochkurov, L.A.; **Dorogov, A.F.** // ADVANCED LASER TECHNOLOGIES ALT`21 Book of abstracts the 28th International Conference. Moscow, 2021

9. Насыщение спектрального качества флуоресценции при лазерной накачке флуоресцирующих случайно-неоднородных сред: влияние спекл-модуляции светового поля накачки в среде. / Зимняков Д.А., Волчков С.С., **Дорогов А.Ф.**, Кочкуров Л.А. // Сборник статей девятой Всероссийской научной школы-семинара. Саратов, 2022. Страницы: 145-147.

10. Индуцированная флуоресценция при лазерной накачке случайно-неоднородных сред: фундаментальные ограничения, обусловленные когерентностью излучения накачки / Зимняков Д.А., Волчков С.С., **Дорогов А.Ф.**, Кочкуров Л.А. // XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике 26 — 28 января 2022 года

11. Quasi-equilibrium saturated states of fluorescence emission by laserpumped fluorescent random media: the fundamental role of characteristic scales of radiative transfer/ Zimnyakov, D.A.; Volchkov, S.S.; Kochkurov, L.A.; **Dorogov, A.F.** // ALT`22 INTERNATIONAL CONFERENCE Advanced Laser Technologies September 11-16, 2022г.

12. Предельные состояния флуоресцентного отклика случайно-неоднородных сред при интенсивной лазерной накачке: лимитирующее влияние характерных масштабов переноса излучения в среде и нелинейного отклика активных центров флуоресценции. / Зимняков Д.А., Волчков С.С., **Дорогов А.Ф.**, Кочкуров Л.А. // ЕНИСЕЙСКАЯ ФОТОНИКА – 2022 Всероссийская научная конференция с международным участием тезисы докладов Том 1. Красноярск 2022г.

Дорогов Александр Федорович

**ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ
СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ**

1.3.6 - Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 08.06.2026г. Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,31
Гарнитура «Times New Roman». Печать цифровая. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО «Типография ТИСАР»
410044, Россия, г. Саратов, пр. Строителей, 1 корпус 3А
Тел.: 8 (8452) 33-84-54, 400-420
www.tisarprint.ru

