

ОТЗЫВ

официального оппонента Артемьева Дмитрия Николаевича
на диссертацию Дорогова Александра Федоровича
«Импульсная лазерная спектроскопия флуоресцирующих случайно-неоднородных сред: фундаментальные ограничения и прикладные аспекты»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика

Актуальность темы диссертации

Переход от спонтанной флуоресценции к излучению с преобладанием индуцированной составляющей в многократно рассеивающих средах с усилением (так называемая стохастическая лазерная генерация, random lasing) остаётся одним из активно исследуемых направлений оптики неупорядоченных сред. Интерес к нему обусловлен как фундаментальными вопросами переноса излучения в средах с усилением, так и перспективами использования спектральных характеристик флуоресцентного отклика при интенсивной накачке для диагностики наноструктурированных материалов. Хорошо известной, но до сих пор не получившей удовлетворительного объяснения особенностью таких систем является насыщение спектрального сужения: при превышении порога ширина спектра перестаёт уменьшаться, хотя интегральная интенсивность продолжает расти. Стандартные диффузионные модели переноса излучения с усилением не учитывают когерентной (спекл-модулированной) структуры поля накачки в среде, которая может влиять на распределение возбуждённых центров.

Диссертация А.Ф. Дорогова посвящена именно этим вопросам: установлению механизмов, ограничивающих спектральное качество флуоресцентного отклика случайно-неоднородных сред при высокоинтенсивной импульсной накачке, и разработке способа извлечения из набора спектров информации о спектральном контуре усиления. Тема диссертации актуальна и соответствует паспорту специальности 1.3.6 – Оптика.

Структура и краткое содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 141 наименования; основной текст изложен на 118 страницах, содержит 41 рисунок и 3 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и пять задач исследования, научная новизна, практическая значимость и четыре положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор физики взаимодействия лазерного излучения с флуоресцирующими случайно-неоднородными средами: многократное рассеяние и локализация света, искажения спектров и кинетики флуоресценции в мутных средах, β -фактор, механизмы ап-конверсии, режимы ASE и стохастической генерации, ограничения импульсной лазерной спектроскопии.

Во **второй главе** экспериментально и методом Монте-Карло исследовано уширение зоны флуоресцентного отклика на поверхности слоёв наночастиц SiO_2 и TiO_2 , насыщенных водным раствором родамина 6Ж, при росте интенсивности накачки 532 нм. Показано, что в сильно рассеивающих TiO_2 -слоях ($l^* \approx 2,5\text{--}4$ мкм) рост радиуса зоны отклика существенно превышает предсказания модели без усиления уже ниже порога сужения спектра, что интерпретируется как проявление усиления и «квазиволноводного» распространения флуоресценции вдоль слоя.

В **третьей главе** развита феноменологическая модель флуоресцентного отклика среды как ансамбля локальных эмиттеров, ассоциированных со спеклами поля накачки. Получено выражение для усреднённого по ансамблю сечения радиационных потерь $\langle \sigma_{\text{rad}} \rangle$ с учётом радиационного обмена между эмиттерами и обратного рассеяния; по экспериментальным зависимостям $\langle \sigma_{\text{rad}}(I_p) \rangle$ восстановлены характерный размер эмиттеров $\langle d_{\text{em}} \rangle$ и параметр обмена $1 - K(I_p)$.

В **четвёртой главе** на слоях и суспензиях наночастиц анатаза с красителями Р6Ж и DCM экспериментально изучено насыщение спектрального сужения (сужение в 7–10 раз). В рамках кинетической модели получено предельное значение населённости $f_{\text{ext}} = \sigma_{\text{rad}} / \langle \sigma_{\text{st}} \rangle$ и предельной длины усиления $l_{\text{st,ext}} \approx (n_0 \sigma_{\text{rad}})^{-1} \approx 20\text{--}30$ мкм. Предложена вероятностная модель формирования спектра как суперпозиции фотонных пакетов, испытавших случайное число актов вынужденного излучения, и на её основе — метод восстановления спектрального контура усиления $\Gamma(\lambda)$ и среднего числа актов усиления $\langle n_{\text{st}} \rangle$ из серии спектров при различных интенсивностях накачки. Показано, что форма $\langle \Gamma(\lambda) \rangle$ изменяется при смене рассеивающей матрицы.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты и направления дальнейших исследований.

Научная новизна и значимость полученных результатов

К наиболее существенным новым результатам работы, по мнению оппонента, относятся:

– экспериментальное обнаружение и количественная характеристика насыщения спектрального сужения флуоресценции в серии модельных систем с различными красителями и транспортными длинами и установление того, что предельная длина усиления (20–30 мкм) оказывается близкой для систем с существенно различающимися параметрами флуорофора;

– интерпретация предельных потерь в накачиваемой среде через ансамбль локальных эмиттеров, связанных со спекл-структурой поля накачки, и учёт радиационного обмена между ними;

– метод восстановления спектрального контура усиления $\Gamma(\lambda)$ из набора спектров при разных интенсивностях накачки, основанный на коллинеарности логарифмических отношений плотностей вероятности; экспериментально показано, что форма восстановленного контура универсальна для данной системы и чувствительна к типу рассеивающей матрицы;

– экспериментальные данные об опережающем (по сравнению с моделью без усиления) росте размера зоны флуоресцентного отклика в сильно рассеивающих слоях ниже порога сужения спектра.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Экспериментальная часть работы выполнена на современном оборудовании (импульсный Nd:YAG-лазер LS-2134, спектрометр QE65000, интегрирующая сфера, ОКТ-контроль толщины слоёв, СЭМ), на нескольких типах модельных объектов, с усреднением по сериям измерений и по различным участкам образцов, что обеспечивает воспроизводимость основных экспериментальных закономерностей: сужения спектра, его насыщения, универсальности формы восстановленного контура $\Gamma(\lambda)$. Теоретический анализ опирается на теорию переноса излучения, моделирование методом Монте-Карло и кинетические уравнения для населённостей.

Практическая значимость

Предложенный метод восстановления спектрального контура усиления может использоваться для характеристики наноструктурированных флуоресцирующих композитов и изучения взаимодействия молекул красителя с поверхностью твёрдой фазы. Полученные оценки предельной длины усиления и числа актов вынужденного излучения полезны при проектировании и интерпретации экспериментов с безрезонаторными источниками излучения. Результаты используются в учебном процессе по направлению «Техническая физика».

Публикации и апробация

Основные результаты опубликованы в журналах «Письма в ЖЭТФ», «Квантовая электроника», «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика» (перечень ВАК, категории K1 и K2), а также в журналах Journal of Luminescence и Nanomaterials, индексируемых Web of Science и Scopus. Результаты прошли апробацию на семи российских и международных конференциях. Количество и уровень публикаций удовлетворяют требованиям п. 13 Положения о присуждении учёных степеней. Следует, однако, отметить, что формулировка «12 работ в изданиях, входящих в список ВАК и индексируемых Scopus и WoS» неточна: к таким изданиям относятся пять журнальных статей и одна публикация в трудах конференции IEEE ITNT, остальные работы — материалы и тезисы конференций.

Замечания по диссертационной работе

1. Обзорная глава 1 охватывает широкий круг вопросов (ап-конверсия, β -фактор, статистика Леви, ОКТ, оптоакустика), значительная часть которых с предметом исследования связана достаточно опосредованно. В то же время, отдельным вопросам, имеющим непосредственное отношение к теме диссертации, и соответствующим им ключевым публикациям в обзоре не уделено должного внимания. В частности, не проанализированы работы [7] (D.S. Wiersma, A. Lagendijk, 1996) и [94] (S. John, G. Pang, 1996), в которых насыщение спектрального сужения объясняется в рамках диффузионных моделей с усилением. В обзоре не рассмотрены некоторые теоретические и экспериментальные данные, полученные ранее другими исследователями и используемые в других главах диссертации, хотя ссылки на соответствующие публикации в этих главах есть.
2. Описание моделирования методом Монте-Карло переноса флуоресцентного излучения во флуоресцирующих слоях (глава 2) весьма лаконично. Непонятно, учитывались ли переотражения обратно в слои на их нижних границах (слой/стеклянная подложка) и в областях контакта слоев с металлическими стенками контейнеров. Если это не делалось, то почему? Аналогичный вопрос возникает по поводу возможного влияния самопоглощения флуоресценции в накачиваемых слоях. При описании методики проведения эксперимента отсутствует информация о возможном влиянии испарения жидкой фазы из открытых контейнеров на результаты эксперимента.
3. Модель ассоциируемых со спеклами локальных эмиттеров флуоресценции (глава 3). Эта модель требует дополнительных пояснений и более развернутого обсуждения. В частности, модулирующая излучение накачки

спекл-структура описывается только одним масштабом длины $\langle d_{sp} \rangle$, экспоненциальная статистика интенсивности спекл-поля не учитывается. Кроме того, оценочные размеры эмиттеров (70–150 нм) меньше длины волны, тогда как перенос излучения между ними рассчитывается в лучевом приближении (судя по соответствующему рисунку). В модели, помимо $\langle d_{sp} \rangle$, присутствуют другие размерные параметры и безразмерные множители, однако их физический смысл и взаимосвязь между ними требуют дополнительных пояснений. Следовало бы также обсудить возможность экспериментальной верификации модели независимыми методами.

4. Насыщение спектрального качества флуоресцентного отклика при возрастании интенсивности накачки иллюстрируется в работе экспериментальными кривыми, полученными для флуоресцирующих систем на основе растворов Р6Ж и DCM в комбинации с различными рассеивающими матрицами (слои плотноупакованных наночастиц, суспензии наночастиц). В тексте диссертации говорится об эффекте насыщения спектрального качества, в то время как для некоторых систем экспериментальные данные (например, рис. 4.7) демонстрируют лишь тенденцию к насыщению. Следовало бы более строго определить наблюдаемое в экспериментах поведение.

5. Результаты определения числа актов индуцированного излучения по наблюдаемому в экспериментах сужению спектров флуоресцентного отклика (глава 4), приводят к несколько неоднозначным выводам о средней длине распространения флуоресценции в накачиваемых средах, необходимой для достижения эффекта насыщения. Следовало бы провести дополнительный статистический анализ длин путей распространения парциальных составляющих флуоресценции и количеств актов индуцированного излучения для этих составляющих на основе дополнительных данных Монте-Карло моделирования. Кроме того, было бы полезно провести дополнительную экспериментальную проверку (например, путем измерения кинетики флуоресценции).

6. В работе упоминается, что коэффициент поглощения раствора Р6Ж оценивался по спектру коллимированного пропускания при толщине кюветы 1 мм. Вместе с тем, приведенное в работе значение 190 см^{-1} при такой толщине кюветы даст исчезающе малую величину коэффициента коллимированного пропускания. Этот момент требует дополнительных пояснений.

7. Результаты восстановления контуров спектрального фактора усиления $\langle \Gamma(\lambda) \rangle$ (глава 4) показывают существенное влияние рассеивающей матрицы (в частности, удельной поверхности) на форму и положение контура. В

диссертации предложена интерпретация этого влияния, предположительно обусловленного переносом энергии возбуждения молекул флуорофора на поверхность матрицы или на кристаллиты в суспензиях DCM и перераспределением энергии по колебательным подуровням возбужденного состояния. Подобная интерпретация представляет собой перспективную гипотезу, проверка которой требует проведения дополнительных объемных исследований с применением независимых экспериментальных методов (например, измерений кинетики флуоресценции).

8. Все измерения в диссертационной работе выполнены при одной длительности импульса (10 нс). Переходные процессы занимают доли наносекунды (рис. 4.13), т. е. исследован квазистационарный режим, и выводы о «фундаментальных ограничениях» следует относить именно к нему. Следовало бы это специально оговорить в тексте диссертации.

9. К вопросу о практической значимости результатов работы. Тезис о «новых диагностических подходах» повторяется многократно, но конкретные возможные применения не обсуждаются. Не указано, какой параметр среды извлекается из $\Gamma(\lambda)$ и в чём преимущество перед флуоресцентной спектроскопией при малой накачке. Используемые потоки энергии накачки значительно превышают допустимые для биотканей уровни; в связи с этим возможные применения в биомедицине ограничены.

10. К оформлению диссертации имеются определенные замечания:

- существуют некоторые расхождения в приводимых в различных главах значениях оптических транспортных параметров (в частности, транспортной длины переноса излучения) для однотипных исследуемых образцов; в тексте работы следовало бы объяснить причины подобных расхождений;
- в тексте работы используются различные обозначения для одних и тех же физических величин (в частности, фактора спектрального качества флуоресцентного отклика) в различных главах; следовало бы ввести в диссертацию полный список используемых в работе обозначений;
- определенные вопросы возникают к списку используемых в диссертации источников; основное замечание относится к отсутствию в списке большей части работ соискателя (и, соответственно, отсутствию ссылок на эти работы в тексте); в то же время, в автореферате список работ соискателя представлен в полном объеме; в списке цитируемых источников также имеет место дублирование некоторых источников (например, [8] и [138], [108] и [139]);
- часть рисунков представлена скриншотами из статей с англоязычными обозначениями в полях рисунков.

Следует отметить, что замечания (3, 5, 7, 8) имеют в значительной степени рекомендательный характер и должны побудить соискателя к

активной научной деятельности в части дальнейшего развития используемых теоретических подходов. В целом, несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа производит хорошее впечатление.

Заключение

Диссертация Дорогова Александра Федоровича «Импульсная лазерная спектроскопия флуоресцирующих случайно-неоднородных сред: фундаментальные ограничения и прикладные аспекты» является завершённой научно-квалификационной работой. В ней на основе экспериментальных исследований и теоретического моделирования решена научная задача выявления факторов, ограничивающих спектральное сужение флуоресцентного отклика случайно-неоднородных сред при высокоинтенсивной импульсной лазерной накачке, и предложен метод восстановления спектрального контура усиления индуцированной составляющей флуоресценции. Эта задача имеет значение для оптики неупорядоченных сред и лазерной спектроскопии наноструктурированных материалов.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.6 – Оптика. Автореферат в целом правильно отражает содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях и апробированы на научных конференциях.

Несмотря на высказанные замечания, диссертационная работа удовлетворяет требованиям пп. 9–14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Дорогов Александр Федорович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой лазерных и биотехнических систем ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»



/ Артемьев Д.Н. /

«08» 10

2026 г.

Подпись Артемьева Д.Н. удостоверяю

Ученый секретарь Самарского университета



Васильева И.П.

« 8 »

август

2026 г.

Я, Артемьев Дмитрий Николаевич, даю согласие на обработку моих персональных данных и на включение их в аттестационные документы соискателя учёной степени кандидата физико-математических наук Дорогова Александра Федоровича.

 / Артемьев Д.Н. /

443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34. Тел.: +7 (846) 267-45-50.
E-mail: artemyevdn@ssau.ru

Подпись Артемьева Д.Н. заверяю:

