

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора

НИЦ «Курчатовский институт»,

А.В. Наружавников

«05» октября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения

«Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

(НИЦ «Курчатовский институт»)

на диссертационную работу

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 темы исследования

Лазерная спектроскопия флуоресцирующих сред является активно развивающимся междисциплинарным направлением, базирующимся на методах нелинейной оптики, статистической физики и физики конденсированного состояния. Среди различных нелинейных эффектов, проявляющихся при импульсных лазерных воздействиях на многократно рассеивающие флуоресцирующие среды, особое внимание привлекает феномен стохастической лазерной генерации (random lasing), по сути обусловленный некогерентным усилением флуоресцентного отклика флуоресцирующих случайно-неоднородных сред при их внешней лазерной накачке в условиях значимой населенности возбужденного состояния центров

флуоресценции и отсутствии частотно-селективной оптической обратной связи.

Интерес к практическим применениям этого явления продолжает оставаться на высоком уровне, в первую очередь благодаря диагностическим возможностям использования эффекта перехода от спонтанной флуоресценции к эмиссии с существенным вкладом индуцированной составляющей с ростом интенсивности лазерной накачки. Особый интерес представляет применение эффекта возбуждения стохастической лазерной генерации в биологических тканях и биосовместимых функциональных материалах для морфофункциональной диагностики.

Несмотря на значительный прогресс в понимании особенностей преобразования высокоинтенсивного излучения лазерной накачки во флуоресцентный отклик случайно-неоднородных сред, 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. Также при теоретическом описании преобразования излучения накачки во флуоресцентный отклик до настоящего времени не учитывалось влияние гранулированной структуры светового поля накачки в среде, обусловленной высокой когерентностью накачивающего лазерного излучения. Поскольку диссертационная работа А.Ф. Дорогова направлена на восполнение этих пробелов, можно заключить, что ее тема актуальна и соответствует современным тенденциям развития оптики и фотоники.

Диссертационная работа А.Ф. Дорогова выполнялась в соответствии с основными направлениями деятельности федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научная новизна

В диссертационной работе получен ряд результатов, обладающих несомненной научной новизной:

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.

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.

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

Впервые установлено, что с ростом интенсивности лазерной накачки средний характерный масштаб распространения индуцированной составляющей флуоресценции 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.

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.

Предложены новые феноменологические и вероятностные модели, учитывающие влияние спекл-модуляции поля накачки на формирование флуоресцентного отклика, и установлены фундаментальные ограничения, возникающие при импульсной флуоресцентной спектроскопии подобных сред.

Практическая значимость

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 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.

Результаты работы важны также для создания субмикронных источников света, новых жидкостных лазеров с управляемым спектром, а также для медицинских приложений (например, для фотодинамической терапии и биосенсоров), где требуются миниатюрные безрезонаторные излучатели.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для:

- анализа морфологических особенностей наноструктурированных материалов;
- ранней диагностики онкологических заболеваний на основе анализа характеристик перехода от спонтанной флуоресценции к режиму с существенным вкладом индуцированной составляющей;
- создания новых сенсорных систем на основе перовскитных материалов, интерес к которым активно растет в последнее пятилетие;
- развития методов неразрушающего контроля качества функциональных материалов.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, содержащего 141 наименование. Основное содержание изложено на 118 страницах и включает 41 рисунок и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, представлены научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований в области взаимодействия высокоинтенсивного лазерного излучения с флуоресцирующими случайно-неоднородными средами. Рассмотрены основные принципы импульсной лазерной спектроскопии подобных систем, особенности эффекта стохастической лазерной генерации и его возможные применения. Выявлены основные вопросы, требующие дальнейшего исследования.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований и теоретического моделирования распространения флуоресцентного отклика в слоях флуоресцирующих случайно-неоднородных сред на основе наночастиц SiO_2 и TiO_2 , насыщенных раствором родамина 6Ж. Проведена характеристика оптических свойств образцов, включая определение транспортной длины распространения излучения и их

эффективного показателя преломления. С использованием метода Монте-Карло осуществлено моделирование пространственных распределений возбужденных центров флуоресценции и поверхностной плотности флуоресцентного отклика. Показано, что существенное различие в поведении флуоресцентного отклика для SiO_2 и TiO_2 слоев обусловлено различиями в транспортной длине распространения излучения и, как следствие, в средних плотностях энергии накачки в накачиваемых слоях.

В третьей главе исследован эффект сужения спектра флуоресценции исследуемых образцов, насыщенных растворами красителей Р6Ж и DCM, с ростом интенсивности внешней лазерной накачки. Эффект характеризуется зависимостями фактора спектрального качества Q_E флуоресцентного отклика от интенсивности накачки. Рассмотрена роль спекл-модуляции поля накачки в формировании флуоресцентного отклика. Разработана кинетическая модель, связывающая населенность возбужденного состояния и интенсивность флуоресценции с учетом спекл-структуры поля накачки. В рамках квазистационарного приближения получены соотношения для предельной населенности и характерного масштаба распространения индуцированного излучения. Предложена феноменологическая модель для оценки усредненного по ансамблю сечения радиационных потерь локальных эмиттеров, учитывающая энергообмен между соседними эмиттерами и экранирующий эффект в средах с малой длиной рассеяния.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований эффекта насыщения спектральных характеристик флуоресценции и ограничений усиления индуцированной составляющей. Рассмотрена феноменологическая вероятностная модель формирования флуоресцентного отклика, основанная на концепции дискретных рассеивающих систем и статистической независимости актов индуцированного излучения. Разработан метод восстановления спектральных контуров усиления из наборов спектров флуоресценции, полученных при различных интенсивностях накачки. Показано, что восстанавливаемые

контуры усиления демонстрируют высокую чувствительность к особенностям взаимодействия центров флуоресценции с рассеивающими матрицами на микроскопическом уровне. Установлено, что усиление индуцированной флуоресценции ограничено диффузионным переносом излучения, и среднее число актов вынужденного излучения для исследованных образцов достигает насыщения на уровне порядка 3–4 актов.

В заключении обобщены основные результаты работы и намечены перспективные направления дальнейших исследований.

К диссертации имеется ряд **замечаний**, не меняющих общей положительной оценки диссертационного исследования:

1. В диссертации недостаточно внимания уделено рассмотрению эффекта нагрева флуоресцирующих сред в зоне воздействия лазерного излучения при импульсно-периодической лазерной накачке. Отсутствуют измерения, а также оценки температуры среды в процессе лазерного облучения. Существует вероятность, что при высоких плотностях мощности накачки в накачиваемом объеме образца может происходить взрывное кипение жидкой фазы.
2. Как правило, при характеристике погрешностей экспериментальных измерений (в частности, при отображении планок погрешностей) диссертант использует уровень значимости 0.1. Следовало бы более четко обосновать выбор именно этого значения, а не, например, 0.05 или 0.01.
3. При высоких интенсивностях импульсно-периодической накачки существенное влияние на эффективность поглощения излучения накачки может оказывать эффект фотообесцвечивания красителя при длительных воздействиях излучения на образцы. В работе отмечается, что накачка осуществлялась пакетами импульсов малой длительности, однако отсутствует обсуждение критериев выбора длительности пакетов.
4. В диссертации Дорогова А.Ф. следовало бы рассмотреть работы Харенкова В.А. и его кандидатскую диссертацию, защищенную в 2016 году в Томском Государственном Университете, «Пороговые и спектральные характеристики

генерации в красителе Р6Ж с агломератами наночастиц Ag, Al, Al₂O₃, TiO₂” с точки зрения отличительных особенностей.

Следует отметить, что указанные замечания носят частный и рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки выполненного исследования.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность результатов обеспечивается использованием обоснованных и апробированных экспериментальных методов (диффузионная и флуоресцентная спектроскопия, методы прямого и инверсного Монте-Карло моделирования), воспроизводимостью экспериментальных данных и их соответствием теоретическим моделям, построенным на основе методов статистической физики и физической кинетики. Полученные результаты согласуются с данными других исследовательских групп, опубликованными в рецензируемых научных изданиях. Надежность экспериментальных результатов обеспечивалась использованием современного измерительного оборудования (спектрометр Ocean Optics QE65000, высокоскоростная КМОП камера Optronis-CamRecord CR3000x2) и применением стандартизированных методик измерений. Все выявленные закономерности основаны на тщательном анализе полученных данных с использованием общепринятых статистических методов обработки.

Качество оформления работы, грамотность языка, стиль написания диссертации и автореферата находятся на должном уровне. Соблюдены принципы соответствия содержания автореферата и диссертации, а также содержания диссертации и опубликованных работ.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в научных изданиях, неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях и подробно изложены в публикациях автора диссертации.

Диссертация, автореферат и отзыв на работу Дорогова Александра Федоровича на тему «Импульсная лазерная спектроскопия флуоресцирующих

случайно-неоднородных сред: фундаментальные ограничения и прикладные аспекты» рассмотрены, обсуждены и одобрены на заседании НТС Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», протокол заседания № 9 от 29.09.2026 по п. 2 повестки.

Заключение

Диссертационная работа А.Ф. Дорогова является законченным, самостоятельно выполненным научным исследованием, содержащим решение актуальной задачи установления фундаментальных ограничений, возникающих при использовании импульсной лазерной спектроскопии флуоресцирующих случайно-неоднородных сред, и разработки новых диагностических подходов на основе учета спекл-модуляции поля накачки.

Научные положения и результаты диссертации четко обоснованы. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Результаты диссертационной работы опубликованы в 12 изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science, в том числе в журналах, относящихся к уровням K1 и K2 «Белого списка научных журналов». Результаты работы в достаточной степени апробированы путем представления докладов на российских и международных конференциях.

По актуальности решаемых задач, объему выполненных исследований, уровню их обсуждения и научной значимости диссертация А.Ф. Дорогова является законченным научным исследованием. Диссертация «Импульсная лазерная спектроскопия флуоресцирующих случайно-неоднородных сред: фундаментальные ограничения и прикладные аспекты» полностью соответствует требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Дорогов Александр Федорович, заслуживает присуждения ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 –
Оптика.

Руководитель Отделения
Институт фотонных технологий
Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники
НИЦ «Курчатовский институт»
доктор физико-математических наук

 Соколов Владимир Иванович

Главный научный сотрудник, Заведующий лабораторией
Отделения Институт фотонных технологий
Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники
НИЦ «Курчатовский институт»
доктор физико-математических наук

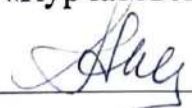
 Свиридов Александр Петрович

Ведущий научный сотрудник
Отделения
Институт фотонных технологий
Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники
НИЦ «Курчатовский институт»
доктор физико-математических наук

 Минаев Никита Владимирович

Подписи Соколова В.И., Свиридова А.П. и Минаева Н.В. удостоверяю:

Заместитель директора –
главный учёный секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»

 Алексеева О.А. 05 октября 2026 г.



Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный
исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1
Тел.: +7 (499) 196-95-39
E-mail: nrcki@nrcki.ru
Официальный сайт: <https://www.nrcki.ru/>