

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.392.06, СОЗДАННОГО НА
БАЗЕ ФГБОУ ВО «САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО», ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 18.10.2021 №35/21

О присуждении Волчкову Сергею Сергеевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Локализованные резонансные взаимодействия «свет-вещество» в дисперсных наноструктурированных пассивных и активных средах» по специальности 1.3.6 – оптика принята к защите 7 июля 2021 года (протокол заседания № 28/21), диссертационным советом 24.2.392.06, созданным на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83. Совет 24.2.392.06 создан приказом Минобрнауки России №362/нк от 19.03.2020 г.

Соискатель Волчков Сергей Сергеевич, 09.12.1993 года рождения, в 2017 году окончил ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского». В период подготовки диссертации соискатель обучался в очной аспирантуре ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» и окончил её по направлению 03.06.01 – «Физика и астрономия» в 2021 году.

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

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

Официальные оппоненты:

Захаров Валерий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерных и биотехнических систем ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» дал **положительный отзыв**.

Кириллин Михаил Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории биофотоники Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» дал **положительный отзыв**.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук (СФ ИРЭ РАН), г. Саратов, в своём положительном отзыве, подписанном заместителем директора института, кандидатом физико-математических наук Фатеевым Денисом Васильевичем и утверждённом руководителем СФ ИРЭ РАН, доктором физико-математических наук Филимоновым Юрием Александровичем, указала, что диссертационная работа С.С. Волčkова посвящена

экспериментальным и теоретическим исследованиям проявлений резонансных и кооперативных эффектов при взаимодействии оптического излучения со случайно-неоднородными средами на основе полупроводниковых наночастиц. Диссертация является законченной и самостоятельной научно-исследовательской работой, выполненной автором на высоком научно-техническом уровне и направленной на решение современных задач оптики. По актуальности, степени научной новизны и практической значимости, объему выполненных исследований и их ценности работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Наиболее существенные замечания: 1) На рис. 2.5 диссертации приведены графики зависимости прошедшего и рассеянного излучения от интенсивности падающего излучения (накачки) для наночастиц анатаза в водном растворе. Длина волны падающего излучения 532 нм находится в полосе прозрачности анализируемого вещества (ширина запрещенной зоны анатаза 3,2 эВ). Автору следовало бы пояснить ход приведенных на графике зависимостей и необходимость включения графика в текст диссертации. 2) В Главе 3 при обсуждении спектров люминесценции частиц двуокиси титана в растворе родамина 6 Ж делается вывод о возбуждении лазерной генерации. Однако, этот вывод недостаточно подтвержден результатами экспериментов и теоретическими выкладками – говорится только о сужении спектра излучения люминесценции приблизительно в два раза. Может быть, здесь речь идет просто об усилении спонтанного излучения? Об этом косвенно говорит и вывод, приведенный в диссертации, что «можно отметить относительно малые значения отношения вынужденного излучения к спонтанному, а также большую ширину спектра вынужденного излучения». Автору следовало бы провести сопоставление режимов усиленного спонтанного излучения и лазерной генерации для порошковых лазеров (powder laser), которые анализируются в диссертации. 3) В главе 5 при экспериментальном исследовании фотопроводимости порошковой трехокси вольфрама при накачке в полосе поглощения и вблизи неё, модель этой фотопроводимости сформулирована недостаточно подробно. Ничего не говорится о том, каков механизм проводимости между отдельными порошковыми включениями. Читатель может составить представление лишь о влиянии накачки на проводимость отдельных частиц порошка, а не о всем порошковом массиве в целом. Автору следовало бы более подробно остановиться на этом вопросе. **Ответы на замечания:** 1) Эксперименты, проведенные в данной главе, проводились при очень больших плотностях мощности энергии до 10^{11} Вт/см², на длине волны 532 нм возможны переходы между валентной зоной и дефектными уровнями, расположенными ниже дна зоны проводимости, с последующими переходами в зону проводимости. Кроме того, существует вероятность двухфотонных процессов в межзонных переходах. Результаты для излучения накачки на длине волны 532 нм показывают незначительность эффекта модуляции диэлектрической функции и приведены в качестве сравнения с исследованиями в полосе поглощения анатаза. 2) Начиная с пионерских работ, в подобных системах была принята терминология - возбуждение стохастической лазерной генерации (random lasing). Однако в данной работе показано, что на самом деле имеет место не явление стохастической лазерной генерации, а скорее суперлюминесценции, характеризующейся сужением спектральной линии до порядка десятка нм и возникающей вследствие образования локализованных состояний внутри исследуемых образцов. Задача сравнения режимов не являлась приоритетной и выходит за рамки данной работы. 3) В главе 5 действительно была рассмотрена качественная модель, учитывающая интегральный отклик системы на лазерное воздействие, так как основной целью явилось установление макрорпроводимости

системы для проведения оценки энергии Урбаха, исходя из скорости нарастания фотопроводимости всей системы. Основным механизмом переноса заряда на границе соседних частиц является эффект туннелирования. Вопросы локализации электрического поля во встречно-штыревых конструкциях и модель переноса заряда, основанная на теории перколяции, выходят за рамки диссертации и являются объектами дальнейших исследований.

Соискатель имеет 17 опубликованных работ по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, установленных Министерством образования и науки РФ для публикации результатов диссертационных исследований. Наиболее значимые публикации автора:

1. Zimnyakov D. A., Yuvchenko S. A., **Volchkov S. S.** Effective dielectric function of laser-pumped anatase nanoparticles: influence of free carriers trapping and depletion of valence band //Optics express. – 2018. – Vol. 26. – №. 25. – P. 32941-32957.

Объем – 17 стр.

Автором обсуждается восстановление эффективной комплексной диэлектрической функции наночастиц анатаза диоксида титана с помощью модифицированного метода z-сканирования с одновременной регистрацией интенсивности релеевского рассеяния. Результаты восстановления сопоставлены с разработанной моделью эволюции мобильных носителей заряда и одноосцилляторной моделью Лоренца.

2. Zimnyakov D. et al. Band-Limited Reference-Free Speckle Spectroscopy: Probing the Fluorescent Media in the Vicinity of the Noise-Defined Threshold/ Zimnyakov D.A., Isaeva E.A., Isaeva A.A., **Volchkov S.S.** //Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – №. 5. – p. 1629.

Объем – 20 стр.

Автором представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований особенностей переноса флуоресценции при непрерывной лазерной накачке случайно-неоднородных сред на основе полупроводниковых наночастиц, насыщенных лазерным красителем Р6Ж с использованием метода безопорной низкокогерентной рефлектометрии со спектральной селекцией детектируемого излучения (БНКР), где в качестве канала передачи сигнала от блока сбора света до блока детектирования используется многомодовое оптоволокно, принудительно уменьшающее длину когерентности флуоресцентного излучения.

3. Зимняков Д. А. и др. 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. – 2020. – Т. 50. – №. 11. – С. 1007-1014.

Объем – 8 стр.

Автором рассмотрен эффект аномального уширения зоны флуоресцентного отклика в зависимости от интенсивности импульсной лазерной накачке случайно-неоднородных сред на основе полупроводниковых наночастиц, допированных лазерным красителем Р6Ж. Экспериментальные данные и данные моделирования методом Монте-Карло доказывают влияние отрицательного поглощения флуоресценции в исследуемых системах.

4. Zimnyakov D.A. et al. Speckle patterning of a pumping laser light as a limiting factor for stimulated fluorescence emission in dense random media/ Zimnyakov D.A., **Volchkov S.S.**, Kochkurov L.A., Kochubey V.I., Melnikov A.G., Melnikov G.V. //Optics Express. – 2021. – Vol. 29. – №. 2. – P. 2309-2331.

Объем – 23 стр.

Автором рассмотрены особенности излучения флуоресценции в плотных многократно рассеивающих случайно-неоднородных средах на основе полупроводниковых частиц анатаза диоксида титана, легированных лазерным красителем РБЖ при импульсной лазерной накачке с точки зрения возбуждения флуоресценции в спекл-ассоциированных «горячих» зонах, связанных с неоднородностью лазерного возбуждения. Экспериментальные результаты сопоставлены с данными разработанной модели эволюции флуоресценции и демонстрируют, что спекл-модуляция поля лазерной накачки является фактором, существенно ограничивающим преобразование излучения накачки в вынужденную составляющую флуоресцентного отклика вследствие обеднения основного состояния молекул флуорофора и радиационных потерь в локальных эмиттерах флуоресценции.

Опубликованные работы показывают высокий уровень проведенных соискателем исследований. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах.

На диссертацию и автореферат поступило 7 положительных отзывов. В них отмечается высокий уровень работы, научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость. Отзывы поступили от:

1) Главного научного сотрудника лаборатории оптической локации федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), доктора физико-математических наук **В.П. Аксенова** (г. Томск) – *с замечаниями.*

Наиболее существенное: разработанная теоретическая модель для восстановления диэлектрической функции наночастиц по данным z-сканирования характеризуется определенными ограничениями, связанными с предположением о релеевском рассеянии в системе. В автореферате отсутствует какая-либо информация о влиянии размера частиц на систематическую погрешность восстановления эффективной диэлектрической функции при переходе от релеевского рассеяния к режиму рассеяния Ми. Возможно, подобные данные представлены в тексте диссертации. **Ответ на замечание:** Алгоритм допускает адаптацию для случая более крупных частиц, и был рассмотрен ранее, однако используемые аналитические соотношения должны быть заменены на результаты численного моделирования, которые устанавливают взаимосвязь между геометрическим сечением частиц, их сечениями рассеяния и поглощения и действительной и мнимой частями эффективной диэлектрической функции. При наличии таких соотношений допускается применение данного алгоритма.

2) Старшего научного сотрудника лаборатории экстремальной нелинейной оптики федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), кандидата физико-математических наук **Е.А. Анашкиной** (г. Нижний Новгород) – *с замечаниями.*

Наиболее существенное: в главе 2 обсуждается кинетическая модель фотовозбуждения наночастиц анатаза, описываемая системой рекуррентных уравнений и учитывающая вероятности фотоионизации поглощающих центров за время действия лазерного импульса, рекомбинации подвижных носителей заряда и их захвата ловушками за время между двумя последовательными импульсами. В работе приведена оценка только последнего из этих параметров для исследованных наночастиц анатаза. Следовало бы дать

ожидаемые значения и для двух других параметров, оказывающих ключевое влияние на генерацию и перенос носителей заряда в наночастицах анатаза при лазерном облучении.

Ответ на замечание: Параметр, отвечающий за эффективность рекомбинации носителей заряда за время действия импульса был оценен из многочисленных данных о фотолюминесценции анатаза, которая при комнатных температурах практически отсутствует. В соответствии с этим параметр β был установлен равным 0. Параметр, отвечающий за эффективность фотоионизации в модели использовался в качестве варьируемого параметра в диапазоне от 0 до 1.

3) Сотрудников кафедры радиофизики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный университет», доктора физико-математических наук, профессора **К.М. Фирсова** и кандидата физико-математических наук, доцента **В.Н. Храмова** (г. Волгоград) - **С.С. Волчков с замечанием согласен;**

4) Заведующего кафедрой общей физики физико-технического института ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», доктора физико-математических наук, профессора **А.В. Воляра** (г. Симферополь) – **с замечаниями.**

Наиболее существенное: Из текста автореферата не очевидна методика восстановления статистических моментов интенсивности второго и третьего порядка как информативных параметров при применении оптоволоконного патч-корда в качестве канала передачи сигнала от конфокального блока к блоку детектирования в предложенной модификации метода безопорной рефлектометрии. Кроме того, следовало бы указать предельные параметры патч-корда (длину и числовую апертуру), при которых ещё возможно восстановление полезного сигнала. **Ответ на замечание:** Параметр β в работе был оценен, как $2 \cdot 10^{-3}$, а флуктуации интенсивности регистрируются на уровне 0.0001 от среднего значения. Ожидается, что при дальнейшем увеличении числовой апертуры или длины патч-корда восстановление сигнала будет невозможно и описываемый в работе случай является близким к предельному с точки зрения возможности восстановления.

5) Заведующего лабораторией лазерной химии Института фотонных технологий РАН федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, доктора физико-математических наук **А.П. Свиридова** (г. Троицк) – **без замечаний;**

6) Заведующего лабораторией лазерной биомедицины ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, кандидата физико-математических наук **Е.В. Хайдукова** (г. Москва). – **с замечаниями.**

Наиболее существенное: В экспериментах по оценке вынужденной составляющей флуоресценции при лазерной накачке многократно рассеивающих флуоресцирующих слоев, для большей показательности можно было бы повaryировать не только матрицу, изменяющую значение транспортной длины, но и использовать другой флуорофор, испускающий на другой длине волны света, а на кривых рисунка 4а более четко объяснить наличие трех участков с разным наклоном. **Ответ на замечание:** Использование других флуорофоров является предметом дальнейших исследований и ожидается, что основные механизмы возбуждения вынужденной флуоресценции останутся такими же, как и рассмотренные в работе. На рис. 4а автореферата, первый участок характеризует спонтанную компоненту флуоресценции, второй участок характеризует интенсивное увеличение вклада вынужденной компоненты за счет увеличения числа спекл-ассоциированных зон при увеличении накачки. Третий участок

демонстрирует насыщение системы при больших интенсивностях накачки, связанное с постепенным обеднением основного состояния флуорофора и возрастанием сечения радиационных потерь.

7) Старшего научного сотрудника, ИМАШ УрО РАН, доктора технических наук, **А.П. Владимирова** (г. Екатеринбург) – *С.С. Волчков с замечанием согласен.*

Выбор официальных оппонентов обоснован их авторитетом и профессионализмом в области исследований по теме диссертации. Выбор ведущей организации обоснован тем, что СФ ИРЭ РАН является известной научной организацией РАН, имеющей большой опыт теоретических и экспериментальных исследований в области исследования фундаментальных особенностей резонансных проявлений в наноструктурированных средах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований разработаны новые методы оптической диагностики пассивных и активных дисперсных систем на основе полупроводниковых наночастиц, реализующие принципы модуляции оптических и диэлектрических свойств зондируемых систем в условиях резонансного и около-резонансного взаимодействия зондирующего излучения с веществом подобных систем. Модифицированный метод z - сканирования с одновременной регистрацией релеевского рассеяния под углом 90 градусов к направлению распространения зондирующего пучка экспериментально верифицирован в исследованиях нелинейно-оптических свойств суспензий наночастиц анатаза и является перспективным для исследований диэлектрических свойств наноструктурированных полупроводниковых материалов в оптическом диапазоне. Впервые предложена модификация метода безпорной низкокогерентной рефлектометрии со спектральной селекцией детектируемого излучения, основанная на применении оптоволоконного канала доставки излучения от блока сбора к блоку спектральной селекции в совокупности с разработанной методикой компенсации шумовых составляющих регистрируемого сигнала. Данная модификация позволяет адаптировать чувствительность низкокогерентного рефлектометра к зондируемым дисперсным средам с малыми значениями транспортной длины распространения излучения.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что изучены особенности возбуждения и переноса флуоресценции в случайно-неоднородных дисперсных средах, насыщенных лазерными красителями. К подобным особенностям относятся: ограничение выхода индуцированной составляющей флуоресценции из локальных спекл-ассоциированных эмиттеров, рассматриваемых в качестве стохастических микрорезонаторов с малой добротностью; аномальное уширение зоны флуоресцентного отклика в накачиваемых средах при увеличении интенсивности лазерной накачки. Полученные экспериментальные результаты подтверждены разработанными теоретическими моделями, основанными на моделировании методом Монте-Карло и использовании диффузионного приближения теории переноса излучения. Особый интерес вызывает новая методика анализа зонной структуры по экспериментальным данным о кинетике нарастания фотоиндуцированной низкочастотной проводимости слоев наноструктурированных полупроводниковых материалов в условиях импульсно-периодической лазерной накачки вблизи края фундаментальной полосы поглощения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что они могут использоваться в актуальных практических приложениях оптики и фотоники и других областях (в частности, в сенсорике и

материаловедении). Модифицированный метод z-сканирования в совокупности с исследованиями низкочастотной фотопроводимости могут быть применены для уточнения фундаментальных особенностей генерации и переноса подвижных носителей заряда в различных полупроводниковых материалах. Полученные результаты являются значимыми для различных приложений в оптике и лазерной физике, каталитической химии, микро- и наносенсорике. Результаты проведенных исследований особенностей возбуждения вынужденной флуоресценции в случайно-неоднородных дисперсных средах могут представлять интерес с точки зрения дальнейшего развития методов фотобиологии и лазерной медицины.

Достоверность результатов исследований основана на корректном рассмотрении исследуемых физических процессов с использованием адекватных моделей, использовании хорошо обоснованных теоретических методов и подходов, воспроизводимости и статистической значимости полученных экспериментальных данных и их соответствием результатам исследований других исследовательских групп.

Личный вклад соискателя состоит в проведении аналитического и численного моделирования, разработке и экспериментальной верификации предложенных оптических методов, анализе, обсуждении и интерпретации полученных результатов, подготовке публикаций. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания и вопросы:

1. В цели работы заявлено установление фундаментальных особенностей взаимодействия электромагнитных волн с веществом. Что установлено фундаментального?
2. Из эксперимента интенсивность поля в рассеивающей среде возрастает в 16 раз. Механизм состоит в локальной перекачке среды? Исходя из этого интерпретируются обсуждаемые процессы?
3. Обычно диаграммы Коула-Коула строятся в виде параметрических зависимостей диэлектрической функции от частоты. В вашем случае они построены от интенсивности накачки. Почему используется такое отображение и зачем они сравниваются с моделью Лоренца?
4. В чем новизна полученных результатов исследований фотопроводимости?

Соискатель ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Одной из фундаментальных особенностей взаимодействия лазерного излучения с дисперсными наносредами, насыщенными флуорофором, является проявление спекл-модуляции лазерного излучения и возникновение локализованных состояний, определяющих индуцированную компоненту флуоресценции. Кроме того, радиационные потери в локальных эмиттерах ограничивают отклик флуоресценции и длину когерентности выходящего излучения.
2. Существует ненулевая вероятность существования локальных эмиттеров флуоресценции с подобной высокой интенсивностью накачки. Да, процессы действительно интерпретируются, исходя из этого механизма.
3. Модуляция диэлектрической функции определена интенсивностью зондирующего излучения и последовательностью импульсов, в связи с этим возможно отображение в зависимости от этих параметров. Полученные значения диэлектрической функции в

зависимости от интенсивности накачки были сравнены с аналогичными зависимостями от частоты излучения накачки. Показана возможность взаимного преобразования экспериментальных параметров в модельные в рамках модели Лоренца.

4. Кривые, полученные из экспериментов, были использованы в качестве исходных данных. Новизна состоит в оценке энергии Урбаха, исходя из скорости нарастания проводимости при зондировании импульсно-периодическим лазерным излучением.

На заседании 18 октября 2021 года диссертационный совет принял решение: за исследования фундаментальных особенностей локализованных резонансных эффектов в наноструктурированных активных и пассивных средах, имеющие существенное значение для дальнейшего развития оптики, присудить Волчкову Сергею Сергеевичу учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – оптика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из которых 10 докторов наук по специальности 1.3.6 – оптика, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, проголосовали за – 18, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета

д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН



Тучин Валерий Викторович

Учёный секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н., доцент

Генина Элина Алексеевна

18.10.2021