

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.150.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ИНСТИТУТА ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ И ГОРЕНИЯ  
ИМ. В. В. ВОЕВОДСКОГО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело №\_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 24.12.2025, № 17

О присуждении Подшивайлову Эдуарду Андреевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «*Теоретические модели долговременных изменений параметров люминесценции в одиночных полупроводниковых квантовых точках и нанокристаллах*» в виде рукописи по специальности 1.3.17 – «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» принята к защите 24 октября 2025 г., протокол № 12, диссертационным советом 24.1.150.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН), Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 3, приказ о создании диссертационного совета № 1511/нк-от 25.11.2016 года.

Соискатель, *Подшивайлов Эдуард Андреевич*, 1998 года рождения, на момент защиты диссертации работает в должности младшего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН). В 2025 году соискатель окончил аспирантуру ИХКГ СО РАН. С 2021 года Э.А. Подшивайлов работает в ИХКГ СО РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории теоретической химии ИХКГ СО РАН.

*Научный руководитель* – кандидат физико-математических наук **Французов Павел Анатольевич**, заведующий лабораторией теоретической химии ИХКГ СО РАН.

*Официальные оппоненты:*

1. **Родина Анна Валерьевна**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках отделения физики твердого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе), г. Санкт-Петербург;
2. **Дресвянский Владимир Петрович**, доктор физико-математических наук, доцент, руководитель Иркутского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ ИЛФ СО РАН), г. Иркутск;

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

*Ведущая организация*, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН), г. Новосибирск, в своём **положительном заключении**, подписанном кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории 02 (нелинейной спектроскопии газов) **Томилиным Владимиром Александровичем**, утверждённом врио директора, кандидатом физико-математических наук, **Донцовой Екатериной Игоревной**, указала, что данная диссертационная работа полностью отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Подшивайлов Э.А., заслуживает присвоения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.17 – «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

В положительном заключении ведущей организации имеются следующие замечания и вопросы.

- (1) При описании явления задержанной люминесценции вводится дополнительная экспоненциальная компонента интенсивности с более длинными характерными временами. Не вполне ясно, почему исключается возможность аппроксимации большим числом компонент с различными характерными временами, или (в наиболее общем случае) стрейч-экспоненциальной функцией.
- (2) В разделе 6.5 строятся кинетические уравнения для концентраций носителей заряда с учетом временной динамики глубоких ловушек. При этом никак не пояснен выбор численных значений для вероятности разрушения ловушечных уровней в результате безызлучательной рекомбинации (формула (177))
- (3) В тексте работы не отражена связь параметров логистической кривой, которая описывает эффект оптического восстановления (формула (130)), с внутренними параметрами модели кинетики заряда, введенной в главе 6.

Соискатель имеет 7 научных работ (из них 5 по теме диссертации) опубликованных в отечественных и международных рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК. Пять работ опубликованы в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

*Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:*

1. **Podshivaylov, E.**, Kniazeva, M., Eremchev, I., Naumov, A., Frantsuzov, P. Correlation between the maximum wavelength and the line width in the emission of a single semiconductor colloidal quantum dot at different temperatures // EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Vol. 190. – P. 02003.
2. **Podshivaylov, E. A.**, Kniazeva, M. A., Gorshelev, A. A., Eremchev, I. Y., Naumov, A. V., Frantsuzov, P. A. Contribution of electron-phonon coupling to the

luminescence spectra of single colloidal quantum dots // The Journal of Chemical Physics. – 2019. – Vol. 151, № 17. – P. 174710

3. Seth, S., **Podshivaylov, E. A.**, Li, J., Gerhard, M., Kiligaridis, A., Frantsuzov, P. A., Scheblykin, I. G. Presence of maximal characteristic time in photoluminescence blinking of MAPbI<sub>3</sub> perovskite // Advanced Energy Materials. – 2021. – Vol. 11, № 44. – P. 2102449.

4. **Podshivaylov, E. A.**, Kniazeva, M. A., Tarasevich, A. O., Eremchev, I. Y., Naumov, A. V., Frantsuzov, P. A. A quantitative model of multi-scale single quantum dot blinking // Journal of Materials Chemistry C. – 2023. – Vol. 11, № 25. – P. 8570-8576.

5. **Podshivaylov, E. A.**, Frantsuzov, P. A. The model of sub-bandgap light induced all-optical luminescence switching of lead-halide perovskite microcrystals // The Journal of Chemical Physics. – 2025. – Vol. 162, № 19. – P. 194105

На автореферат диссертации поступило 3 отзыва. Все отзывы положительные, из них два содержат замечания. Отзывы поступили от:

- доктора физико-математических наук, доцента **Звекова Александра Андреевича**, профессора кафедры химии твердого тела и химического материаловедения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Кемеровский государственный университет".
- кандидата физико-математических наук, **Шендрика Романа Юрьевича**, старшего научного сотрудника лаборатории физики монокристаллов Федерального государственного учреждения науки Института геохимии им А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук
- кандидата физико-математических наук, **Марьясова Александра Георгиевича**, старшего научного сотрудника лаборатории магнитной радиоспектроскопии Федерального государственного учреждения науки Новосибирского института органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук;

Из отзывов на автореферат один не содержит замечаний (*Звеков А.А.*). В остальных имеются следующие вопросы и замечания: (1) о неясности механизма образования глубоких ловушек под воздействием света с энергией ниже ширины запрещенной зоны, какова должна быть плотность мощности возбуждающего излучения, идет ли речь о перезарядке существующих ловушек (*Шендрек Р.Ю.*); (2) о возможном туннельном механизме рекомбинации носителей заряда в ловушках для объяснения немоноэкспоненциального затухания люминесценции и модели мерцания для нанокристаллов  $\text{CsPbBr}_3$  (*Шендрек Р.Ю.*); (3) какова точность определения параметров аппроксимации  $\alpha$  и  $\epsilon_X$ , соответствующих уравнению (1) и рисункам 1, 2 автореферата (*Марьясов А.Г.*); также есть замечание терминологического характера, об англоязычном термине «бин» и возможности использования его русскоязычного эквивалента (*Марьясов А.Г.*).

В **положительных отзывах** оппонентов имеются следующие замечания и вопросы:

***Родина А.В.:***

- Не понятно, что именно учтено в энергии  $E_0$ , включает ли она в себя энергию размерного квантования электрона и дырки в КТ данного размера и энергию их кулоновского взаимодействия (в том числе, его спин-зависимой части, т.е. так называемого обменного взаимодействия)? Известно, что уширение линии ФЛ одиночной КТ может быть связано не только с электрон-фононным взаимодействием, но и с расщеплениями тонкой энергетической структуры экситона, обусловленный обменным взаимодействием и анизотропными расщеплениями. Равновесная заселенность уровней тонкой структуры зависит от температуры. Каким образом данные факты учтены в предложенной теоретической модели?
- Приложима ли развитая модель спектральной диффузии к КТ другого типа? Например, наблюдалась ли спектральная диффузия и описывается

ли она такой же моделью в КТ без полупроводниковой оболочки или в структурах ядро/оболочка с общим атомом на интерфейсе? Может ли быть основным механизмом электрон-фононного взаимодействия, параметры которого должны перестраиваться в предложенной модели, взаимодействие с интерфейсными фононами, которые в случае структур без общего атома на интерфейсе, таких как CdSe/ZnS, могут отвечать также за флюктуации электрической поляризации на интерфейсе?

- О предсказательных возможностях модели, предложенной в главе 4. Имеет ли место в ансамбле КТ CdSeS/ZnS явление спектральной диффузии и предсказывается ли оно теоретически на основе параметров, описывающих их мерцание? Будет ли иметь место явление деградации фотолюминесценции при постоянном возбуждении ансамбля таких КТ и каким законом оно будет описываться?
- Не указано при какой температуре проводились измерения, описанные в главе 5. Есть ли зависимость обнаруженных корреляций от температуры и как её учитывает построенная теоретическая модель? Известно, что энергия связи экситона в  $CsPbBr_3$  порядка 30 мэВ, а радиус экситона меньше или порядка размера КТ. Возможна ли локализация экситона как целого на ловушке с последующей рекомбинацией? Может ли наблюдавшийся экспериментально второй пик фотолюминесценции соответствовать такому процессу?

### **Дресвянский В.П.:**

- о корректности названия экспериментальной схемы, изображенной на рисунке 10 диссертации, «Типичной схемой эксперимента по времязависимому коррелированному счету одиночных фотонов».
- о наблюдаемом разбросе в оценках двумерных распределений вида времязависимости – интенсивность (FLID), например, на рисунке 16 диссертации. Большой разброс величин времен затухания, по всей видимости, обусловлен малым числом фотонов в каждой группе.

- о корректности использования термина «задержанная люминесценция» по отношению к экспериментальным данным, представленным на странице 25 диссертации. Без знания конкретного механизма формирования длительного компонента нельзя его отнести к категории задержанной люминесценции, в соответствии с критериями, установленными IUPAC (см. «Delayed Luminescence» in IUPAC Compendium of Chemical Terminology, 3<sup>rd</sup> ed. International Union of Pure and Applied Chemistry; 2006, а также «Measurements of the kinetics of slowly decaying luminescence excited by vacuum and deep ultraviolet radiation» (<https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.117081>).
- о необходимости дополнительных пояснений в утверждении о высокой эффективности модели, предложенной в главе о модели мерцания люминесценции квантовых точек CdSeS/ZnS, с учетом того, что результаты аппроксимации для двух конкретных квантовых точек, представленных на рисунке 19, показывают, что свойства мерцания этих квантовых точек сильно различаются друг от друга. Числовые значения параметров аппроксимации, представленные в работе, также имеют существенные отличия. При этом в тексте диссертации отсутствует упоминание о каких-либо критериях или показателях, позволяющих оценить эффективность предложенной модели.
- указывается ряд замечаний технического характера.

Во всех отзывах отдельно отмечается, что указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы. Все отзывы заканчиваются выводом, что диссертационная работа Подшивайлова Э.А. **полностью соответствует** требованиям, которые ВАК предъявляет к кандидатским диссертациям, а её автор – Подшивайлов Э. А. – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – «химическая физика, горение и взрывы, физика экстремальных состояний вещества».

*Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается компетентностью оппонентов и сотрудников ведущей организации в области квантовой оптики и люминесценции одиночных излучателей, что подтверждается наличием у них публикаций ряда научных работ в данной области исследований, в том числе соответствующих тематике докторской диссертации соискателя и опубликованных в ведущих российских и международных журналах и изданиях.*

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

*- Показано, что модель спектральной диффузии, основанная на гипотезе о медленно флюктуирующем параметре электрон-фононного взаимодействия, описывает наблюдаемые корреляции между шириной линии и положением пика при различных температурах для одиночных квантовых точек CdSe/ZnS.*

*- Предложены и реализованы новые методы анализа результатов экспериментов по время-коррелированному счету одиночных фотонов.*

*- Показано, что предложенная модель мерцания люминесценции и задержанной люминесценции, основанная на гипотезе о медленно изменяющемся параметре электрон-фононного взаимодействия, описывает все измеряемые экспериментально закономерности исследуемых процессов. На примере квантовых точек CdSeS/ZnS и нанокристаллов CsPbBr<sub>3</sub> впервые достигнуто количественное согласие между экспериментальными результатами и моделью*

*- Продемонстрировано, что разработанная модель полностью оптического переключения люминесценции одиночных микрокристаллов со структурой перовскита с избытком свинца при помощи света с энергией ниже ширины запрещенной зоны позволяет качественно воспроизводить все наблюдаемые в экспериментах зависимости для данного явления,*

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в работе последовательно предложены модели спектральной диффузии, мерцания**

люминесценции и мерцания задержанной люминесценции, основанные на гипотезе, связанной с долговременными флюктуациями параметра электрон-фононного взаимодействия в одиночных квантовых точках и нанокристаллах. Дальнейшее обобщение этих моделей на нанообъекты другой природы, а также создание единой теории, основанной на флюктуациях электрон-фононного взаимодействия, является актуальной теоретической задачей.

Для полностью оптического переключения люминесценции одиночных микрокристаллов перовскита с избытком свинца при помощи света с энергией ниже ширины запрещенной зоны предложена первая в своём роде модель, учитывающая временную динамику ловушечных состояний внутри запрещенной зоны. Дальнейшее развитие предложенной модели, а также изучение предложенных механизмов образования и распада ловушечных состояний может послужить отправной точкой для теоретических исследований других явлений, связанных с нестабильностью фотофизического отклика перовскитных материалов.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики заключается в** возможности использования предложенных моделей спектральной диффузии, мерцания люминесценции и полностью оптического переключения для оптимизации стратегий синтеза полупроводниковых квантовых точек и нанокристаллов с целью создания полезных устройств на их основе. Разработанные методы анализа экспериментов по времякоррелированному счету одиночных фотонов позволяют рассматривать явления, связанные с нестабильностью излучения одиночных квантовых точек и нанокристаллов, на значительных масштабах времен.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:** сделанные выводы и полученные научные результаты основаны на квалифицированном применении современных теоретических методов статистической физики и теории случайных процессов; проведено тщательное сопоставление полученных результатов моделирования с большой совокупностью имеющихся экспериментальных данных по люминесценции

одиночных полупроводниковых квантовых точек и нанокристаллов. Результаты работы прошли экспертизу перед опубликованием в научных журналах и неоднократно обсуждались на отечественных и международных конференциях с известными специалистами, работающими в области квантовой оптики и люминесценции одиночных излучателей.

**Личный вклад соискателя состоит в** аналитическом рассмотрении процессов спектральной диффузии, мерцания люминесценции, мерцания задержанной люминесценции и полностью оптического переключения люминесценции, в самостоятельном написании компьютерных программ для статистической обработки экспериментальных данных, а также в численном моделировании исследуемых процессов. Соискатель участвовал в постановке задач, проведении исследований, обсуждении результатов и их оформлении для публикации в рецензируемых журналах. Подготовка публикаций по теме диссертации осуществлялась совместно с соавторами работ и научным руководителем.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченное исследование с актуальными задачами и содержательными, фундаментальными и практически важными результатами. Материалы диссертации соответствуют требованиям специальности 1.3.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» (п. 1 «молекулярная, энергетическая, химическая и спиновая динамика элементарных процессов, физика и физические теории химических реакций и экспериментальные методы исследования химической структуры и динамики химических превращений.» и п. 2 «структура и свойства вандерваальсовых молекул, комплексов, ритберговских молекул, кластеров, ассоциатов, пленок, адсорбционных слоев, интеркалятов, межфазных границ, мицелл, дефектов; структура и свойства кристаллов, аморфных тел, жидкостей;»). Соискатель Подшивайлов Э.А. успешно ответил на все задаваемые ему вопросы присутствующими на заседании, на замечания, приведенные в отзыве ведущей организации и отзывах на автореферат. Соискатель дал четкие

аргументированные ответы по научным вопросам и согласился со всеми техническими замечаниями и пожеланиями.

На заседании 24 декабря 2025 г. диссертационный совет постановил: за решение научной задачи построения теоретических моделей долговременных изменений параметров люминесценции в одиночных полупроводниковых квантовых точках и нанокристаллах присудить *Подшивайлову Эдуарду Андреевичу* учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 11 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании и голосовании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени - 17, против присуждения учёной степени - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Заместитель председателя диссертационного совета,

д-р физ.-мат. наук, профессор

 Дзюба Сергей Андреевич

Ученый секретарь диссертационного совета,

канд. хим. наук

Поздняков Иван Павлович

26.12.2025 г.

