



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, тел.: +7 (343) 375-45-07  
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)  
e-mail: rector@urfu.ru, [www.urfu.ru](http://www.urfu.ru)  
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

16.12.2025 № 01.09 - 02/984  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по науке ФГАОУ ВО  
«УрФУ имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина»  
А.В. Германенко



» 12 2025 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

на диссертационную работу **Чиркова Кирилла Сергеевича**  
«Экситонная и рекомбинационная люминесценция гидрофильных коллоидных  
квантовых точек PbS», представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.6. Оптика

### Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Чиркова Кирилла Сергеевича посвящена экспериментальному исследованию механизмов люминесценции гидрофильных коллоидных квантовых точек (КТ) PbS, пассивированных короткоцепочечными тиоловыми лигандами, а также приёмов управления параметрами люминесценции. Свойства КТ PbS позволяют использовать их при разработке различных устройств, включая системы люминесцентной визуализации. Большое число известных научных работ посвящено исследованию оптических свойств КТ

PbS, полученных в результате синтеза в неполярных растворителях и стеклянных матрицах, в то же время характеристики КТ после синтеза в водных растворах остаются малоизученными. На сегодняшний день в литературе в недостаточной мере представлены исследования, посвящённые анализу механизмов свечения гидрофильных КТ PbS, а также методик управления параметрами люминесценции. Кроме того, отсутствуют данные о закономерностях размерного эффекта в спектрах свечения обсуждаемых КТ.

Помимо систем люминесцентной визуализации, КТ PbS являются перспективным объектом для приложений в области создания ИК-фотодетекторов. В качестве основы для устройств подобного рода обычно используются КТ PbS, полученные в неполярных средах и пассивированные длинноцепочечными лигандами с последующей заменой на короткоцепочечные. Особый интерес представляет также разработка систем генерации активных форм кислорода с использованием квантовых точек. При этом на сегодняшний день представленные в научной литературе данные о фотокаталитической активности КТ PbS также остаются довольно неполными.

Таким образом, диссертационное исследование Чиркова К.С. является **актуальным** с точки зрения решения как фундаментальных, так и прикладных задач в области оптики и оптических материалов.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка работ по теме диссертационной работы и списка литературы. Работа изложена на 151 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков, 3 таблицы. Список литературы содержит 228 наименований.

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая ценность, приведены основные научные положения, выносимые на защиту, степень надежности и достоверности полученных результатов, личный вклад автора, апробация работы, публикации, а также структура и объем диссертации.

**В первой главе** представлен обзор литературы по теме диссертационной работы и проведён анализ имеющихся на сегодняшний день данных о спектрально-люминесцентных свойствах КТ PbS. Глава 1 посвящена также анализу имеющихся на сегодняшний день данных о возможности управления люминесцентными и фотоэлектрическими свойствами КТ PbS с помощью модификации поверхности. Автор диссертации перечисляет ряд вопросов, остающихся на сегодняшний день нерешёнными. В частности, отмечается отсутствие систематических исследований, посвящённых спектрально-

люминесцентным свойствам КТ PbS, синтезированных в воде с использованием короткоцепочечных лигандов.

**Вторая глава** посвящена описанию методик синтеза образцов и основных методов исследования. Проведён анализ структурных свойств образцов методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Дано описание экспериментальных установок, использованных для изучения абсорбционных, люминесцентных и фотоэлектрических свойств КТ PbS.

**В третьей главе** диссертации приведены результаты исследования размерно-зависимой люминесценции КТ PbS. Продемонстрировано, что величина стоксова сдвига люминесценции определяется и размером КТ, и пассивирующим лигандом. Проведён анализ кинетики люминесценции КТ PbS, а также установлено существование двух каналов излучательной релаксации возбуждений, обусловленных излучательным распадом экситона и рекомбинационной люминесценцией. Установлено, что квантовый выход люминесценции КТ PbS, пассивированных тиогликолевой кислотой, зависит от длины волны возбуждающего излучения, что объясняется существованием дополнительного механизма локализации экситона с последующей излучательной рекомбинацией.

**В четвёртой главе** приведены результаты экспериментального исследования влияния параметров поверхности на люминесцентные свойства КТ PbS. Установлено, что формирование структур ядро/оболочка PbS/SiO<sub>2</sub> приводит к тушению рекомбинационного свечения, а также сопровождается ростом квантового выхода экситонной люминесценции. Аналогичные закономерности наблюдались в результате модифицирования поверхности КТ PbS галогенидами калия. Формирование структур PbS/PbSe, в свою очередь, сопровождалось падением интенсивности люминесценции, что объясняется эффективным разделением носителей заряда в системе ядро/оболочка. Рассмотрены особенности фотостабильности абсорбционных и люминесцентных характеристик КТ PbS, а также влияние на них свойств поверхности.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментального исследования фотокаталитической активности растворов, а также фотоэлектрических свойств КТ PbS. Впервые продемонстрировано, что КТ PbS являются эффективными фотосенсибилизаторами активных форм кислорода. Показано, что КТ PbS, синтезированные с применением короткоцепочечных тиоловых пассиваторов, могут применяться для создания сэндвич-структур с повышенной фоточувствительностью в области 700–1250 нм. Продемонстрирована возможность управления фотокаталитическими и фотоэлектрическими свойствами КТ PbS посредством модификации интерфейсных областей.

Установлено, что блокировка основного канала безызлучательной рекомбинации приводит к одновременному увеличению квантового выхода люминесценции, росту эффективности генерации активных форм кислорода, а также к улучшению фотоэлектрических свойств сэндвич-структур на основе КТ PbS.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**Научная новизна** исследований заключается в следующем:

1) Впервые для гидрофильных коллоидных квантовых точек PbS проанализирован размерный эффект в спектрах люминесценции в области 800–1350 нм.

2) Установлено, что кинетика затухания люминесценции гидрофильных КТ PbS имеет неэкспоненциальный характер и проявляет слабую зависимость от размера.

3) Продемонстрировано, что модификация интерфейсов гидрофильных КТ PbS за счет формирования структур ядро/оболочка, а также галогенирования поверхности КТ растворами галогенидов калия, позволяет управлять квантовым выходом люминесценции.

4) Впервые показано, что квантовые точки PbS являются эффективными фотосенсибилизаторами для продуцирования супероксида, пероксида водорода и синглетного кислорода.

5) На основе гидрофильных квантовых точек PbS, синтезированных с использованием короткоцепочечного пассиватора, реализованы фоточувствительные сэндвич-структуры ИТО-КТ PbS-Al, полученные без дополнительной химической обработки КТ и обладающие фоточувствительностью в области 700–1250 нм.

**Практическая значимость** диссертационной работы обусловлена результатами исследований люминесцентных, фотокаталитических и фотоэлектрических свойств КТ PbS, которые могут быть использованы для разработки устройств люминесцентной визуализации, систем фотоиндуцированной генерации активных форм кислорода, а также для разработки ИК-фотодиодов.

**Достоверность полученных результатов** определяется применением современных взаимодополняющих методов исследования абсорбционных, люминесцентных, структурных, фотокаталитических и фотоэлектрических свойств, а также воспроизводимостью полученных результатов.

**Публикации по теме диссертации.** Научные работы по теме диссертации опубликованы в высокорейтинговых научных журналах. Основные результаты

работы изложены в 6 научных статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus. Результаты диссертации прошли необходимую апробацию на авторитетных российских конференциях.

### **Вопросы и замечания по диссертации**

К диссертационной работе имеется ряд вопросов и замечаний:

1. В работе утверждается, что квантовые точки PbS актуальны в сфере разработки биомаркеров. В то же время, известно, что свинец является достаточно токсичным элементом. Необходимо в этой связи пояснить, какие существуют перспективы у КТ PbS для биосовместимых приложений?

2. Чем обусловлены различные значения  $pH=10$  и  $12$  (см. таблицу 2.1, стр. 54), используемые при синтезе КТ PbS, пассивированных тиогликолевой (TGA) и 2-меркаптопропионовой (2-MPA) кислотами?

3. Из текста диссертации неясно, в каком виде использовались образцы КТ при исследовании методом рентгеновской дифракции, нет описания подготовки образцов для анализа с помощью просвечивающей электронной микроскопии, отсутствуют сведения о подготовке КТ для измерений спектров фотолюминесценции при температуре  $80\text{ K}$ .

4. На рисунке 3.8, стр. 81 представлена зависимость квантового выхода люминесценции от длины волны возбуждающего излучения для термообработанных КТ PbS/TGA в диапазоне  $500\text{--}1100\text{ нм}$ . По какой методике получена приведенная зависимость? Кроме того, в работе установлено, что галогенирование КТ PbS приводит к повышению квантового выхода ФЛ. Каковы возможные механизмы этого явления? Стоит ли ожидать аналогичного эффекта от галогенирования для КТ на основе других материалов?

5. Как были определены положения уровней HOMO и LUMO для схемы гетероструктуры PbS/PbSe, представленной на рисунке 4.5, стр. 95? Какие экспериментальные данные, полученные в работе, свидетельствуют о формировании системы второго типа? Почему КТ PbS/PbSe не использовались для создания фоточувствительных структур?

6. В качестве замечаний необходимо отметить: отсутствие сравнений полученных фотокаталитических характеристик для исследуемых водорастворимых КТ PbS с данными независимых работ. Кроме того, на наш взгляд, местами присутствует путаница между терминами тушение и затухание люминесценции. Так на стр 77 в разделе 3.2 «Кинетика люминесценции коллоидных КТ PbS» таблица 3.2 имеет заголовок «Данные аппроксимации кривых тушения люминесценции уравнениями (2.5) и (3.2)».

7. Текст диссертации содержит неточности и ошибки, а также различного рода опечатки:

- Стр. 57. «Данная полоса интерпретировали как вклад аморфной фазы ...»;
- Стр 67. «Сэндвич-структуры на основе конденсатов КТ, синтезированные и исследованные в данной работе, изготавливали методом drop-coasting...»;
- В подписи к рисунку 3.8 на стр. 80 речь о пике люминесценции 1280 нм, тогда как на рисунке отмечено значение 1260 нм;
- Стр. 84. «На рисунке 3.10 представлены спектры люминесценции и спектры возбуждения люминесценции образцов КТ PbS/2-MPA размером от 2.5 до 4.5 нм (табл. 3.1) [188]». При этом таблица 3.1 посвящена КТ PbS/TGA;
- В разделе 3.3 указано, что подробное описание термообработки коллоидных растворов КТ PbS приведено в разделе 2.2. Однако, указанный раздел посвящен формированию структур ядро/оболочка PbS/SiO<sub>2</sub> и PbS/PbSe;
- и некоторые другие.

Вышеуказанные вопросы и замечания носят главным образом дискуссионный и рекомендательный характер, поэтому не снижают научной и практической ценности проведенных исследований, а также общего положительного впечатления от диссертации. Автореферат диссертации **Чиркова Кирилла Сергеевича** оформлен в соответствии с требованиями ВАК, полностью соответствует диссертации и отражает её содержание и актуальность темы исследования, а также новизну и значимость полученных результатов.

### **Заключение**

Диссертация **Чиркова Кирилла Сергеевича** «Экситонная и рекомбинационная люминесценция гидрофильных коллоидных квантовых точек PbS» является законченным научным исследованием, выполненным автором на высоком научном уровне. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.3.6. Оптика, в частности, пунктам 9 «Спектроскопия одиночных атомов, молекул, ионов и квантоворазмерных объектов, а также газовых, плазменных и конденсированных сред», 10. «Фундаментальные исследования воздействия света на вещество и одиночные частицы. Передача энергии-импульса, динамические процессы при взаимодействии света с веществом, процессы выделения энергии веществом при световом воздействии. Оптика сред при внешних воздействиях». Оформление текста диссертации и автореферата выполнено на высоком уровне и соответствует требованиям ВАК.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно заключить, что диссертация **Чиркова Кирилла Сергеевича** «Экситонная и рекомбинационная люминесценция гидрофильных коллоидных квантовых точек PbS» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с п. 9-14 Положения, утвержденного Правительством РФ «О присуждении ученых степеней» от

24.09.2013 г. № 842 (ред. от 25.01.2024 г.). Автор диссертации **Чирков Кирилл Сергеевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Диссертационная работа **Чиркова Кирилла Сергеевича** «Экситонная и рекомбинационная люминесценция гидрофильных коллоидных квантовых точек PbS» и настоящий отзыв были обсуждены на объединенном научном семинаре Научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» и Физико-технологического института УрФУ 19 ноября 2025 года. Отзыв ведущей организации на диссертацию Чиркова К.С. утвержден на заседании Ученого совета Физико-технологического института УрФУ 15 декабря 2025 года (протокол № 4).

**Отзыв составил:**

Директор Научно-образовательного центра  
«Наноматериалы и нанотехнологии» УрФУ,  
д.ф.-м.н., профессор, профессор РАН

«15» декабря 2025



Вайнштейн Илья Александрович

Тел.: +7 343 375 93 74

E-mail: [i.a.weinstein@urfu.ru](mailto:i.a.weinstein@urfu.ru)

**Контактные данные:**

Научно-образовательный центр «Наноматериалы и нанотехнологии»  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

Тел.: +7(343) 375-44-44

E-mail: [contact@urfu.ru](mailto:contact@urfu.ru)

Сайт: <https://urfu.ru/ru/>