

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.111.01,**  
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова  
Российской академии наук, по диссертации на соискание ученой степени  
кандидата наук.

аттестационное дело N \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 19 мая 2023 г., № 6

**О присуждении Лактаеву Ивану Дмитриевичу, гражданину России,  
ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Диссертация на тему: «Нелинейно-оптические явления при двухфотонном возбуждении экситонов в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия» принята к защите 7 марта 2023, протокол № 5, диссертационным советом 24.1.111.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН) (125009, Москва, ул. Моховая, д.11. корп.7) (приказ Рособнадзора о создании совета № 2397-1776 от 07.12.2007 г.; приказ Минобрнауки РФ о продлении деятельности совета № 75/нк от 15.02.2013 г.)

Соискатель Лактаев Иван Дмитриевич, 1994 года рождения, в 2018 году окончил Физический факультет ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» по специальности 03.04.02 «Физика» с присвоением квалификации «Магистр».

С 01.10.2018 по 30.09.2022 г. проходил очное обучение в аспирантуре ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН по направлению подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия, направленности (профилю) – Физика конденсированного состояния. За время обучения сдал кандидатские экзамены по иностранному языку (английский), истории и философии науки (физико-математические науки) и по специальности «Физика конденсированного состояния». Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН 14.02.2023г.

В настоящее время работает в лаб. №190 «Оптоэлектронных и волоконно-оптических систем» ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН в должности научного сотрудника.

Работа выполнена в лаборатории «Оптоэлектронных и волоконно-оптических систем» №190 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук.

**Научный руководитель: Бутов Олег Владиславович**, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.21 – Лазерная физика), заместитель директора по научной работе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, руководитель лаборатории № 190 «Оптоэлектронных и волоконно-оптических систем» ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

### **Официальные оппоненты:**

**Худяков Дмитрий Владимирович**, доктор физико-математических наук, (специальность 01.04.21 – Лазерная физика), ведущий научный сотрудник Центра физического приборостроения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ЦФП ИОФ РАН),

**Цветков Виталий Анатольевич**, кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.10 – Физика полупроводников), старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» (ФИАН),

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

**Ведущая организация –** ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), **в своем положительном отзыве**, подписанном Битюриным Никитой Михайловичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим лабораторией лазерной наномодификации материалов ИПФ РАН, и утвержденном директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», доктором физико-математических наук, академиком РАН Денисовым Григорием Геннадьевичем, **указала**, что диссертация Лактаева Ивана Дмитриевича «Нелинейно-оптические явления при двухфотонном возбуждении экситонов в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия» является завершенным научным трудом и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор - Лактаев И.Д., **достоин** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния». В отзыве отмечено, что поставленные задачи решены на высоком теоретическом и экспериментальном уровне, цель диссертационного исследования достигнута. Основные положения работы и выводы сформулированы ясно и аргументированно. Полученные результаты обладают несомненной научной значимостью и новизной.

В отзыве указаны следующие замечания:

1. В работе измерение коэффициента двухфотонного поглощения произведено методом z-сканирования, что предполагает существенное ослабление интенсивности лазерного излучения за счет двухфотонного поглощения при его прохождении через образец. При этом для того, чтобы обеспечить заметное ослабление пришлось использовать достаточно большие (десятые доли  $\text{ТВт/см}^2$ ) лазерные интенсивности. Однако, при воздействии таких интенсивностей на сравнительно узкозонный полупроводник, которым является CdSe, кроме двухфотонного поглощения на экситонах, о котором говорится в диссертации, возможны сопутствующие эффекты, как-то генерация свободных электронов, эффекты накопления, связанные с созданием/заселением дефектных состояний, стрикционные эффекты, важные при рассмотрении сильно анизотропных частиц в растворе при облучении его (раствора) линейно-

поляризованным лазерным излучением, и т. д., которые не учитывались в работе.

2. Существуют другие методы измерения коэффициента двухфотонного поглощения, которые требуют существенно меньших интенсивностей. Один из них - это люминесцентный метод, когда сначала измеряют люминесценцию при линейном поглощении на удвоенной частоте (частоте второй гармоники), которая попадает в полосу поглощения в данном случае экситонов, тем самым ставя в соответствие количество возбужденных экситонов, которое легко подсчитывается, зная коэффициент линейного поглощения, и сигнал люминесценции. Затем, измеряя люминесценцию при двухфотонном поглощении на основной частоте, используя результаты этих калибровочных изменений, находят количество возбужденных экситонов при двухфотонной накачке, и, тем самым коэффициент двухфотонного поглощения. Как показывают результаты главы 3 диссертации, интенсивность люминесценции при накачке основной частотой квадратично зависела от интенсивности накачки при ГВт/см уровне этой интенсивности, что создавало идеальные условия для заявленных в диссертации измерений, однако этого сделано не было.

3. Более того, в диссертации показано, что при субтераваттных интенсивностях квадратичная зависимость интенсивности люминесценции сменяется кубичной. В диссертации это объясняется образованием биэкситонов. Однако кубичная зависимость может быть связана с трехфотонным возбуждением электронов проводимости, что совсем не обсуждается в диссертации.

4. При оценке коэффициента действительной части кубичной нелинейности с использованием z-сканирования не выделен вклад инерционной нелинейности, включая ориентационную нелинейность. Если дефокусировка связана с образованием тепловой линзы, то эта линза, может быть связана с тепловым расширением растворителя. В этом случае измеренная нелинейность не имеет отношения к нанопластинкам. Если речь идет о быстрой нелинейности, при условии, что тепловая дефокусировка не существенна, то результирующий ответ является суммой вкладов нелинейности разных типов разных компонентов образца (стенки, растворитель, сами пластинки).

5. Коэффициент квадратичной нелинейности в изотропной среде равен нулю. Экспериментально обнаруженная в диссертации генерация второй гармоники говорит о том, что изучаемая среда анизотропна. В диссертации этот вопрос совершенно не обсуждается. Например, анизотропия может быть связана с оседанием пластинок в растворителе в поле тяжести, или с пристеночной ориентировкой нанопластинок. Появление второй гармоники может быть также связано с нелинейностью более высокого порядка через ориентирующее действие линейно поляризованного поля.

Основные результаты диссертационной работы изложены в 9 работах, в том числе 4 – в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus и входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, и 5 публикаций в трудах международных и российских конференций. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание.

**Наиболее значимые работы по теме диссертации:**

1. Laktaev I. D., Saidzhonov B.M., Vasiliev R.B., Smirnov A.M., Butov O.V., Second harmonic generation in colloidal CdSe/CdS nanoplatelets //Results in Physics. – 2020. – Vol. 19. – P. 103503.
2. Laktaev I. D., Przhiialkovskii D. V., Saidzhonov B.M., Vasiliev R.B., Smirnov A.M., Butov O.V., Two-photon exciton absorption in CdSe/CdS nanoplatelets colloidal solution //Semiconductors. – 2020. – Vol. 54. – No. 14. – P. 1900-1903.
3. Laktaev I. D., Saidzhonov B.M., Vasiliev R.B., Smirnov A.M., Butov O.V., Amplified spontaneous emission in colloidal solutions of two-photon-excited CdSe/CdS nanoplatelets //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1851. – No. 1. – P. 012012.
4. Laktaev I. D., Saidzhonov B.M., Vasiliev R.B., Smirnov A.M., Butov O.V., Two-photon excited biexciton photoluminescence in colloidal nanoplatelets CdSe/CdS //Journal of Luminescence. – 2022. – Vol. 252–P. 119414.

**В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.**

На автореферат диссертации поступили отзывы из:

- Из ФГБОУ ВО Петербургский государственный Университет путей сообщения Императора Александра I от д.ф.-м.н., профессора кафедры «Физика» Данилова В.В. Отзыв положительный. (замечание: В нескольких местах автореферата автор употребил термин «двухфотонная люминесценция» (стр. 12 и 18). Такая люминесценция действительно существует, но никакого отношения к работе не имеет. Надеюсь, что это всего лишь описка, вызванная небрежностью автора. Также не очень ясно почему, по мнению автора, изучение свойств наноструктур стало вызовом научному сообществу (стр.3));
- Из ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» от к.ф.м.-н., доцента института перспективных систем передачи данных Университет ИТМО Рочаса С.С. Отзыв положительный. (замечания: недостаточно подробно описаны характеристики исследуемых экспериментальных образцов: отсутствуют сведения о размерах нанопластинок в коллоидных системах; на стр. 10 автореферата упоминается выражение, с помощью которого были аппроксимированы экспериментальные данные, измеренные посредством метода z-сканирования с открытой апертурой, однако само выражение в автореферате не приводится.)
- Из ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» от к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Кузнецова К.А. Отзыв положительный. (замечание: В качестве замечания по содержанию автореферата можно отметить небольшое количество опечаток в тексте)

**Обоснование выбора официальных оппонентов и ведущей организации:**

**Худяков Дмитрий Владимирович**, доктор физико-математических наук, (специальность 01.04.21 – Лазерная физика), ведущий научный сотрудник Центра физического приборостроения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ЦФП ИОФ РАН) является крупным специалистом в области нелинейной оптики и лазерной физики.

**Цветков Виталий Анатольевич**, кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.10 – Физика полупроводников), старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» (ФИАН) является высококвалифицированным специалистом в области физики оптоэлектронных процессов в полупроводниковых низкоразмерных структурах.

Официальные оппоненты широко известны своими достижениями в данных отраслях науки, имеют многочисленные научные труды в рецензируемых научных журналах, способны определить актуальность, новизну, научную и практическую ценность оппонируемой диссертации.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» известно своими разработками и исследованиями в области лазерной физики и взаимодействия мощного когерентного излучения с веществом, в том числе с наноструктурами. Многочисленные работы его сотрудников в области оппонируемой диссертации свидетельствуют об их способности адекватно оценить результаты, представленные автором для защиты.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:** В диссертационной работе обнаружен ряд новых нелинейно-оптических процессов в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия и изучены их особенности. Измерен коэффициент двухфотонного поглощения  $\beta=0,08$  см/ГВт и рассчитано поперечное сечение двухфотонного поглощения  $\sigma^{(2)} \approx 1,5 \times 10^6$  ГМ в нанопластинках селенида кадмия при резонансном двухфотонном возбуждении экситонов в них. Показано, что двухфотонное поглощение и самодефокусировка в коллоидном растворе нанопластинок селенида кадмия сосуществуют при высоком уровне лазерной накачки до  $\approx 0,25$  ТВт/см<sup>2</sup>. Установлено, что излучение биэкситонов становится основным источником фотолюминесценции в коллоидном растворе нанопластинок селенида кадмия при интенсивностях их двухфотонного лазерного излучения 30-200 ГВт/см<sup>2</sup>. Впервые выявлена генерация второй гармоники в нанопластинках селенида кадмия.

**Теоретическая значимость исследования:** Проанализированы результаты измерений нелинейного поглощения коллоидного раствора нанопластинок селенида кадмия при различном уровне двухфотонного лазерного возбуждения экситонных переходов в них. На основе теоретического анализа определены

коэффициент и поперечное сечение двухфотонного поглощения нанопластинок селенида кадмия и обнаружено явление самодефокусировки высокоинтенсивного лазерного излучения прошедшего через коллоидный раствор. Теоретически исследована зависимость фотолюминесценции от интенсивности возбуждающих лазерных импульсов и выявлена кубическая скорость роста фотолюминесценции в диапазоне интенсивностей 30-200 ГВт/см<sup>2</sup>, связанная с преобладающим вкладом биэкситонного излучения. Изучены особенности генерации второй гармоники в коллоидном растворе нанопластинок селенида кадмия. Полученные в работе результаты, несомненно, уточняют и углубляют фундаментальные знания о нелинейно-оптических явлениях в низкоразмерных полупроводниковых структурах на основе селенида кадмия.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:** Представленные в диссертации новые сведения о нелинейно-оптических процессах в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия могут быть использованы при проектировании современных элементов оптоэлектроники. Обнаруженную биэкситонную фотолюминесценцию необходимо учитывать при создании биосенсоров на основе нанопластинок селенида кадмия. Генерация второй гармоники в нанопластинках селенида кадмия может применяться для улучшения спектрального и временного разрешения в оптоэлектронных приборах, разработанных на основе данных наноструктур.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:** Для исследования нелинейно-оптических явлений в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия в работе использованы широко известные экспериментальные методики: z-сканирование с открытой апертурой и фотолюминесцентная спектроскопия.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждается их воспроизводимостью, согласованностью с результатами других авторов, использованием современного оборудования и стандартных математических методов обработки данных.

Основные результаты диссертационного исследования были опубликованы в ведущих международных и российских журналах, а также апробированы на специализированных международных и отечественных конференциях.

**Личный вклад соискателя состоит в том, что** все материалы и результаты, вошедшие в данную диссертационную работу, подготовлены лично автором или при его непосредственном участии.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. На все заданные в ходе заседания вопросы Лактаев И.Д. дал аргументированные ответы.

На заседании 19 мая 2023 г. диссертационный совет принял решение за решение научной задачи, развивающей представления о нелинейно-оптических явлениях в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия, имеющей значение для развития фундаментальных знаний в области физики низкоразмерных структур, присудить Лактаеву И.Д. ученую степень кандидата

физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования участвующие в заседании члены диссертационного совета в количестве 17 человек, из которых 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из общего числа 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, академик РАН

С.А.Никитов

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор  
физико-математических наук



И.Е.Кузнецова

«19» мая 2023 г.