



Минобрнауки России  
Федеральное государственное  
бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики  
им. А.В. Гапонова-Грехова  
Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

Ульянова ул., 46, Бокс-120, Нижний Новгород, 603950

Тел. (831) 436-62-02

Факс (831) 416-06-16

E-mail: dir@ipfran.ru

http://www.ipfran.ru

ОКПО 04683326, ОГРН 1025203020193,

ИНН/КПП 5260003387/526001001

УТВЕРЖДАЮ:

Директор

Федерального государственного  
бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики  
имени А. В. Гапонова-Грехова  
Российской академии наук»  
академик РАН  
Денисов Г.Г.  
«14» 04 2023 г.



№ \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## ОТЗЫВ

ведущей организации

федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики имени А. В.  
Гапонова-Грехова Российской академии наук»  
на диссертационную работу Лактаева Ивана Дмитриевича  
«Нелинейно-оптические явления при двухфотонном возбуждении экситонов в  
коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия», представленную на  
соискание учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

**Актуальность темы диссертационной работы.** Исследование нелинейно-оптических свойств и процессов в различных полупроводниковых материалах имеет огромное значение для создания элементной базы современных приборов на их

основе. Полупроводниковые материалы активно применяются в качестве насыщающихся поглотителей для модуляции добротности и пассивной синхронизации мод лазеров, активной среды, оптических ограничителей лазерного излучения и других технических применений.

Особый интерес для исследователей представляет изучение оптических свойств полупроводниковых низкоразмерных структур, поскольку их свойства можно варьировать в широком спектральном диапазоне за счет изменения морфологии наноструктур. В последние годы популярность среди научного сообщества приобрели коллоидные растворы нанопластинок на основе селенида кадмия. Нанопластинки являются квазидвумерными структурами, в которых квантовое ограничение движения носителя заряда реализуется в одном пространственном направлении – вдоль их толщины. Данные наноструктуры обладают рядом оптоэлектронных свойств, которые превосходят свойства хорошо изученных сферических нанокристаллов на основе селенида кадмия (квантовых точек), и могут в будущем заменить их в некоторых областях практического применения нульмерных структур, например, в биофотонике и светодиодной технике.

Диссертационное исследование посвящено изучению нелинейно-оптических явлений в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия. На сегодняшний день нелинейно-оптические процессы в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия изучены, в основном, только при однофотонном возбуждении экситонных переходов в нанопластинках. Аналогичных исследований в двухфотонно-возбужденных нанопластинках селенида кадмия крайне мало. Исследование данного вопроса важно, в первую очередь, для эффективного применения нанопластинок в качестве биомаркеров, поскольку при двухфотонном воздействии лазерного излучения минимизируется риск повреждения здоровых тканей исследуемого живого организма в отличие от случая однофотонного лазерного возбуждения. Кроме того, несмотря на несколько работ, посвященных исследованию генерации второй гармоники в квантовых точках и квантовых нитях на основе селенида кадмия, генерация в нанопластинках селенида кадмия не была

обнаружена до настоящей работы. Поэтому несомненно, что тема диссертации является актуальной и направлена на решение важных научных задач.

**Новизна исследования и полученных результатов.**

В диссертационной работе Лактаева И.Д. обнаружен ряд новых нелинейно-оптических явлений в коллоидных растворах нанопластинок CdSe/CdS. Исследованы особенности двухфотонного поглощения в коллоидном растворе нанопластинок CdSe/CdS при резонансном двухфотонном возбуждении лазерным излучением на длине волны 1064 нм экситонного перехода, связанного с легкими дырками (1h-e, 536 нм). Проанализировано влияние процесса самодефокусировки на нелинейное пропускание коллоидного раствора нанопластинок CdSe/CdS при его интенсивном двухфотонном лазерном возбуждении и определены его нелинейно-оптические характеристики (коэффициент двухфотонного поглощения  $\beta=0,08$  см/ГВт, поперечное сечение двухфотонного поглощения  $\sigma^{(2)} \approx 1,5 \times 10^6$  ГМ и нелинейный показатель преломления). Изучены фотолюминесцентные свойства двухфотонно-возбужденных коллоидных растворов нанопластинок CdSe/CdS при различном уровне лазерного возбуждения и концентрациях наноструктур в коллоидном растворе. Выявлен переход от двухфотонной экситонной фотолюминесценции нанопластинок на основе селенида кадмия к биэкситонной на участке интенсивностей лазерного возбуждения 30-200 ГВт/см<sup>2</sup>. Обнаружена генерация второй гармоники и исследованы ее особенности в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия.

**Степень обоснованности и достоверности сформулированных положений.**

Достоверность защищаемых положений и результатов работы определяется применением надежных экспериментальных методик в совокупности с обоснованным анализом экспериментальных данных, подкрепленных теорией. Результаты исследований докладывались на профильных российских и международных научных конференциях, а основные результаты диссертации опубликованы в специализированных научных журналах (Results in Physics, Journal of Luminescence, Semiconductors, Journal of Physics: Conference Series).

### **Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертанта.**

В рамках диссертационной работы Лактаева И.Д. впервые обнаружена нелинейность второго порядка (генерация второй гармоники) в коллоидных растворах нанопластинок CdSe/CdS и установлен ряд особенностей нелинейного поглощения (сосуществование процессов самодефокусировки и двухфотонного поглощения) и фотолюминесценции (биэкситонное излучение фотолюминесценции) в них при двухфотонном лазерном возбуждении их экситонных переходов. Кроме научной значимости работы можно также отметить ее практическую ценность. Например, обнаруженные явления генерации второй гармоники лазерного излучения и биэкситонной фотолюминесценции могут быть полезны при разработке биомаркеров на базе нанопластинок. Таким образом, полученные результаты углубляют фундаментальные знания об оптических свойствах коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия и могут быть использованы предприятиями, ведущими разработку современных оптоэлектронных устройств на основе данных наноструктур.

**Соответствие работы требованиям, предъявляемых к кандидатским диссертациям.** Диссертация Лактаева Ивана Дмитриевича «Нелинейно-оптические явления при двухфотонном возбуждении экситонов в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия» соответствует требованиям 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния: п.1 – «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные, и квантовые системы»; п.4 – «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ».

**Соответствие содержание автореферата содержанию диссертации.** Автореферат соответствует требованиям, предусмотренным п. 25 «Положения о

присуждении ученых степеней», его содержание полностью отражает содержание диссертации, полученные результаты и выводы.

**Оценка содержания и оформление диссертации.** Диссертационное исследование Лактаева И.Д. является законченной научной работой и содержит новые достоверные результаты об оптических свойствах коллоидных растворов нанопластинок селенида кадмия. Все задачи диссертационного исследования выполнены на высоком экспериментальном уровне, цель диссертации достигнута. Основные положения и выводы в диссертации ясно сформулированы и обоснованы. Научная новизна и значимость полученных результатов не вызывает сомнений.

Диссертация и автореферат подготовлены согласно предъявляемым к ним требованиям. Стил изложения материала в диссертации соответствует научному.

Диссертационная работа хорошо апробирована. Результаты научно-квалификационной работы представлены в виде докладов на 5 международных и российских конференциях и опубликованы в 9 печатных работах: 4 статьи в научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus и рекомендованных для публикаций научных результатов ВАК РФ, и 5 работ в сборниках трудов конференции.

Диссертационная работа не свободна от недостатков.

### **Замечания по работе**

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 ТВт/см<sup>2</sup>) 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  $\text{ГВт/см}^2$  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 субтераватных интенсивностях квадратичная зависимость интенсивности люминесценции сменяется кубической. В диссертации это объясняется образованием биэкситонов. Однако кубическая зависимость может быть связана с трехфотонным возбуждением электронов проводимости, что совсем не обсуждается в диссертации.

4. При оценке коэффициента действительной части кубической 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.

Указанные замечания не снижают общей научной и практической значимости диссертационной работы. Полученные в работе результаты в полной мере опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

### **Заключение**

Диссертационная работа **«Нелинейно-оптические явления при двухфотонном возбуждении экситонов в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия»** является законченным 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».

Отзыв составлен по результатам обсуждения диссертационной работы Лактаева И.Д. на семинаре отделения Нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН ( протокол №1 от «14» апреля 2023 г).

**Отзыв подготовил:**

Заведующий лабораторией лазерной  
наномодификации материалов ИПФ РАН,  
доктор физико-математических наук, профессор

Н. М. Битюрин



«14» апреля 2023 г

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Адрес сайта: <https://ipfran.ru/>

Телефон: +7 (831) 436-64-21

E-mail: [bit@ipfran.ru](mailto:bit@ipfran.ru)

Подпись Битюрина Никиты Михайловича заверяю.

Ученый секретарь ИПФ РАН

к. ф.-м.н.



Корюкин И. В.