

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

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 диссертационной работы**

Полупроводниковые низкоразмерные системы и структуры привлекают большое внимание ученых в течение последних 30 лет. Пространственные ограничения, возникающие в таких системах при уменьшении их размеров, усиливают эффекты межчастичных взаимодействий, и дают возможность управлять электронным спектром наноструктур, изменяя их дизайн: архитектуру, геометрические размеры и форму. В результате можно управлять оптическими свойствами наноструктур с целью последующего их применения в современных оптоэлектронных приборах. Широкое распространение получили нульмерные нанокристаллы селенида кадмия (квантовые точки), которые уже сегодня применяются в QLED-дисплеях и в качестве активной среды для лазеров. Непосредственно коллоидные растворы нанокристаллов CdSe активно используются в качестве биомаркеров для визуализации биологических процессов в живых организмах.

Диссертационная работа Лактаева Ивана Дмитриевича посвящена исследованию нелинейно-оптических процессов, индуцированных в коллоидных растворах нанопластинок CdSe/CdS в результате двухфотонного лазерного возбуждения их экситонных переходов. Речь в диссертации идет о двумерных нанокристаллах (нанопластинках) – структурах с квантово-размерным эффектом, проявляющимся при малых толщинах нанопластинок. Коллоидные растворы нанопластинок CdSe являются новыми объектами исследования в физике наносистем. Несмотря на это, многие оптоэлектронные свойства и процессы в них уже исследованы и продемонстрированы их возможные практические приложения. Однако ряд вопросов остается не до конца изученными. В частности, практически отсутствуют исследования двухфотонного поглощения и фотолюминесценции (ФЛ) в коллоидных растворах нанопластинок CdSe, а также не изучена генерация второй гармоники лазерного излучения в них. Таким образом, текущее состояние научных знаний о нелинейно-оптических свойствах и

процессах в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия позволяет сделать вывод о том, что избранная тема диссертационной работы Лактаева И.Д. является **актуальной**.

### **Общая характеристика диссертации**

Работа состоит из введения, четырех глав (обзора литературы и трех оригинальных), заключения и списка литературы, включающего 186 наименований. Общий объем работы – 104 страницы текста, включая 37 рисунков.

Во **введении** рассматривается актуальность темы исследования, приводятся цель и задачи работы, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Сформулированы основные защищаемые положения диссертационной работы. Представлены степень достоверности результатов исследования и апробация основных результатов научно-квалификационной работы.

**Первая глава** содержит литературных обзор современного состояния знаний об оптических свойствах и процессах в коллоидных растворах полупроводниковых нанопластинок CdSe, а также описаны их возможные практические применения.

Во **второй главе** рассматриваются особенности нелинейного поглощения в коллоидных растворах нанопластинок CdSe/2CdS при двухфотонном возбуждении их экситонов. Представлены краткое описание процесса синтеза исследуемых нанопластинок и результаты их электронной микроскопии и дифракции. Измерено двухфотонное поглощение в нанопластинках CdSe/2CdS с помощью методики z-сканирования с открытой апертурой и определены их 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  $n_2 \approx -5 \times 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт. Показано, что несимметричная зависимость z-сканирования с открытой апертурой нанопластинок CdSe/2CdS при высоком уровне возбуждения может быть объяснена частичным переходом z-установки в режим работы с закрытой апертурой.

**Третья глава** посвящена исследованию фотолюминесцентных свойств двухфотонно-возбужденных коллоидных нанопластинок на основе селенида кадмия. Проанализированы зависимости интенсивности ФЛ от интенсивности лазерной накачки. Обнаружено, что двухфотонная ФЛ нанопластинок в диапазоне интенсивностей лазерного возбуждения 30–200 ГВт/см<sup>2</sup> в

значительной степени состоит из излучения биекситонов. Установлено, что при превышении значения  $200 \text{ ГВт/см}^2$  рост интенсивности их ФЛ описывается степенной функцией с показателем 0,8 и связан с увеличением темпа безызлучательной рекомбинации из-за экситон-экситонного взаимодействия и друдовского поглощения. Кроме того, в работе были исследованы концентрационные зависимости ФЛ нанопластинок и обнаружено насыщение интенсивности ФЛ при средней концентрации, которое было объяснено концентрационным тушением ФЛ.

В **четвертой главе** обсуждаются причины и особенности генерации второй гармоники излучения фемтосекундного лазера в коллоидных растворах нанопластинок CdSe/CdS одновременно с двухфотонным возбуждением этим лазером экситонов в пластинках. Обнаружено, что для корректного описания генерации второй гармоники излучения в нанопластинках необходимо модернизировать квадратичное выражение, которое обычно используется для ее описания, с учетом линейного поглощения и рассеяния Тиндаля излучения второй гармоники. Показано, что эффективная генерация второй гармоники в коллоидном растворе нанопластинок CdSe/CdS обеспечивается только частью хаотично ориентированных наноструктур в растворе, удовлетворяющих условию фазового синхронизма основной и второй гармоник лазерного излучения

В **заклучении** приведены основные результаты, полученные в ходе работы.

Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

### **Новизна и достоверность работы**

В диссертационной работе представлен ряд новых сведений о нелинейно-оптических процессах и их особенностях в коллоидных растворах нанопластинок CdSe/CdS при различных интенсивностях двухфотонного лазерного возбуждения. Следует отметить следующие результаты:

1. Определены нелинейно-оптические параметры (коэффициент двухфотонного поглощения  $\beta = 0,08 \text{ см/ГВт}$ , поперечное сечение двухфотонного поглощения  $\sigma^{(2)} \approx 1,5 \times 10^6 \text{ ГМ}$  и нелинейный показатель преломления  $n_2 \approx -5 \times 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$ ) в коллоидном растворе нанопластинок CdSe/2CdS при их двухфотонном возбуждении излучением в резонанс экситонного перехода, связанного с легкими дырками.

2. Обнаружено, что процессы двухфотонного поглощения и самодефокусировки сосуществуют в коллоидном растворе нанопластинок селенида кадмия при интенсивном возбуждении пластинок лазерным излучением в резонанс экситонного перехода (до  $\approx 0,25$  ГВт/см<sup>2</sup>).
3. Показано, что ФЛ коллоидного раствора нанопластинок селенида кадмия при интенсивностях двухфотонного лазерного возбуждения 30–200 ГВт/см<sup>2</sup> в значительной степени состоит из излучения биэкситонов.
4. Впервые исследована генерация второй гармоники лазерного излучения в нанопластинках на основе селенида кадмия

Достоверность положений, выносимых на защиту, результатов, выводов и заключений не вызывает сомнений и подтверждается использованием известных экспериментальных методик и современной приборной базы, многократными и воспроизводимыми измерениями, а также публикацией основных результатов диссертации в 9 печатных работах, в том числе в рецензируемых журналах: Results in Physics, Journal of Luminescence, Semiconductors, Journal of Physics: Conference Series, и неоднократно докладами на Международных и Российских научных конференциях.

### **Научная и практическая значимость работы**

Результаты, полученные соискателем в ходе работы, расширяют область знаний о нелинейно-оптических процессах в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия и имеют высокую научно–практическую значимость. Они могут быть использованы специалистами и предприятиями, которые ведут работы в направлении разработки и изготовления современных оптоэлектронных устройств. Например, биэкситонную фотолюминесценцию нанопластинок, обнаруженную в ходе работы, необходимо учитывать при создании и применении биосенсоров на основе коллоидных растворов нанопластинок селенида кадмия.

### **Замечания**

Несмотря на положительные стороны работы, она не лишена недостатков:

1. В рецензируемой работе нет обсуждения правомерности использования в измерительной установке для исследования нелинейно-оптических свойств коллоидных растворов в качестве источника возбуждающего излучения импульсного фемтосекундного лазера с частотой следования

импульсов 100 кГц. Учитывая, что для регистрации излучений в установке используются фотодетекторы, меряющие только среднюю по всем импульсам мощность.

2. Отсутствует оценка влияния на результаты работы однофотонного возбуждения экситонов в нанопластинках CdSe второй гармоникой излучения фемтосекундного лазера.
3. В работе интенсивность лазерного возбуждения представлена в единицах Вт/см<sup>2</sup>. Однако, более удобно приводить интенсивность лазерного взаимодействия с материалом в Дж/см<sup>2</sup> на импульс, как это обычно делают в физике твердого тела при возбуждении образцов импульсами излучения, длительность которых существенно меньше времен жизни неравновесных носителей заряда.
4. В качестве растворителя нанопластинок CdSe/CdS в работе используется N-метилформамид. Однако из текста диссертации не совсем ясно: может ли оказывать влияние данный растворитель на нелинейно-оптические явления рассматриваемые в работе?
5. Имеется небольшое число опечаток, стилистических и пунктуационных ошибок.

По моему мнению, приведенные выше замечания не являются критичными и не влияют на общую положительную оценку представленной диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа Лактаева И.Д. представляет собой законченную научную работу, в которой содержится обстоятельное исследование нелинейно-оптических явлений в двухфотонно-возбужденных коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия. Основной материал работы изложен понятным научным языком, без нарушений логики повествования, последовательно и аргументировано. Результаты работы обладают научной новизной. Выводы и положения, сформулированные по итогам работы, являются обоснованными. Работа была апробирована на 5 Российских и Международных научных конференциях. В ходе выполнения данной работы Лактаев И.Д. опубликовал 4 статьи в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus (в том числе журналах

с высоким импакт-фактором) и рекомендованных ВАК РФ для научных публикаций. А также – 5 статей в материалах Международных и Российских конференций.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа **«Нелинейно-оптические явления при двухфотонном возбуждении экситонов в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия»** удовлетворяет всем требованиям 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. и паспорту специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния». А ее автор: Лактаев Иван Дмитриевич, безусловно заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

**Официальный оппонент:**


Цветков Виталий Анатольевич, канд. физ.-мат. наук (специальность 01.04.10 – «Физика полупроводников»); раб. почтовый адрес: 119991, ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН; тел.: +7(499)132-63-45; e-mail: [svetkovva@lebedev.ru](mailto:svetkovva@lebedev.ru); название организации: ФГБУН «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» (ФИАН); сайт организации: <https://www.lebedev.ru/ru/>; звание: старший научный сотрудник; должность: старший научный сотрудник ФИАН; Отделение физики твердого тела.

Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.111.01 (Д002.231.01) на базе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и их дальнейшую обработку.

**Официальный оппонент**

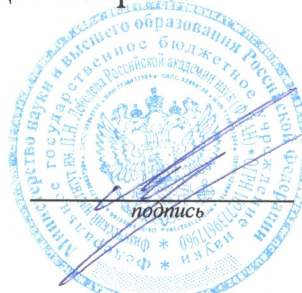
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

«10» апреля 2023 г.

 /Цветков В.А./  
подпись

Подпись Цветкова Виталия Анатольевича удостоверяю.

Ученый секретарь ФИАН  
кандидат физико-математических наук



подпись /Колобов А.В./