

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

Исследуемые в работе нанопластины селенида кадмия, представляющие собой полупроводниковые нанокристаллы планарной геометрии с толщиной в несколько атомарных монослоев и латеральными размерами от нескольких десятков до сотен нанометров, привлекают внимание благодаря уникальным оптическим свойствам, являясь перспективными материалами для создания элементов управления оптическим излучением. Толщина таких нанопластинок соизмерима с длиной волны Де-Бройля носителя заряда в них, что приводит к проявлению квантово-размерного эффекта вдоль направления их поперечных размеров (размерное квантование для электрона и дырки). Это позволяет увеличить энергию связи экситонов в нанопластинках и в отличие от объёмных материалов обеспечивать работоспособность их экситонных переходов при комнатных температурах.

Несмотря на множество работ в этой области исследований, нелинейно-оптические свойства коллоидных растворов нанопластинок на основе селенида кадмия остаются мало изученными. Особенно это касается исследований двухфотонных экситонных переходов в нанопластинках при возбуждении в ближнем ИК диапазоне.

В рассматриваемой работе изучены нелинейно-оптические свойства в коллоидных растворах полупроводниковых квазидвумерных нанокристаллов на основе селенида кадмия (нанопластины CdSe с оболочкой из CdS) и выявлены особенности оптических явлений, возникающих в них под действием двухфотонного возбуждения экситонов в нанопластинках внешним мощным электромагнитным полем.

Тема диссертации Лактаева И.Д. является **актуальной** и важной как с точки зрения получения новых фундаментальных знаний, так и в практическом отношении, поскольку квазидвумерные гетероструктуры, такие как CdSe/CdS, перспективны для использования в качестве оптических ограничителей, биосенсоров, а также активной среды для лазерных усилителей.

Общая характеристика диссертации

Рецензируемая работа посвящена исследованию нелинейно-оптических процессов в планарных нанокристаллах типа ядро/оболочка на основе соединения CdSe/CdS при двухфотонном возбуждении их экситонных переходов под воздействием ультракоротких лазерных импульсов. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены новизна полученных научных результатов и их достоверность, а также основные положения научно-квалификационной работы, выносимые на защиту. В конце введения приводится список публикаций по теме диссертации и указаны научные конференции, на которых проходили апробацию основные результаты исследования.

В первой главе представлен теоретический анализ работ, посвященных исследованию оптических и нелинейно-оптических процессов в нанопластинках на основе селенида кадмия. Описано влияние квантово-размерного эффекта и кулоновского взаимодействия между электроном и дыркой на оптические свойства нанопластинок. Приведены возможные практические приложения коллоидных растворов нанопластинок селенида кадмия в современных оптоэлектронных устройствах.

Вторая глава посвящена исследованию двухфотонного поглощения в коллоидных растворах нанопластинок CdSe/CdS при интенсивном лазерном возбуждении их экситонов посредством известной экспериментальной

методики z-сканирования с открытой апертурой. Описан процесс синтеза исследуемых в работе нанопластинок, их кристаллическая структура, геометрические размеры и спектры линейного поглощения. В результате проведенных экспериментов были определены следующие нелинейно-оптические характеристики коллоидных растворов нанопластинок CdSe/2CdS: коэффициент двухфотонного поглощения $\beta=0,08$ см/ГВт, поперечное сечение двухфотонного поглощения $\sigma^{(2)} \approx 1,5 \times 10^6$ ГМ. Обнаружена ассиметричная форма зависимости z-сканирования с открытой апертурой коллоидного раствора нанопластинок CdSe/2CdS при их двухфотонном лазерном возбуждении. Сделан вывод о влиянии дефокусировки на сигнал z-сканирования и в данных условиях эксперимента определен нелинейный показатель преломления коллоидного раствора $n_2 \approx -5 \times 10^{-16}$ см²/Вт.

В третьей главе исследованы свойства двухфотонной фотолюминесценции коллоидных растворов нанопластинок CdSe/2CdS при различных интенсивностях импульсного возбуждения и концентрациях наноструктур в растворе. Обнаружена степенная зависимость интенсивности фотолюминесценции от интенсивности лазерной накачки с двумя различными участками роста. Нелинейный рост в диапазоне интенсивностей 30-200 ГВт/см² (первый участок роста фотолюминесценции) определяется вкладом в фотолюминесценцию биэкситонного излучения нанопластинок, а появление второго участка с практически линейным ростом при интенсивностях выше 200 ГВт/см² было связано с Оже-рекомбинацией экситонов и поглощением света на фотовозбужденных носителях. Также были выявлены участки насыщения и уменьшения интенсивности фотолюминесценции коллоидных растворов нанопластинок CdSe/2CdS связанные с концентрационным тушением фотолюминесценции нанопластинок при высокой концентрации наноструктур в коллоидном растворе.

В четвертой главе исследована генерация второй гармоники в коллоидных растворах нанопластинок CdSe/2CdS и CdSe/3CdS. Выявлено, что полученная зависимость интенсивности второй гармоники от интенсивности основной гармоники описывается квадратичным выражением с учетом ее рассеяния Тиндаля и сильного линейного поглощения на длине волны генерации. Описана роль фазового синхронизма в эффективности генерации второй гармоники в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия.

В заключении представлены основные результаты работы.

Новизна и достоверность работы

В качестве научной новизны диссертационного исследования можно выделить: регистрация двухфотонного поглощения в коллоидном растворе нанопластинок селенида кадмия при возбуждении мощными фемтосекундными лазерными импульсами (при интенсивностях до $0,25 \text{ ТВт/см}^2$) и определение таких величин как коэффициент и сечение двухфотонного поглощения.

Впервые обнаружена кубическая зависимость интенсивности двухфотонной фотолюминесценции нанопластинок от интенсивности возбуждающего лазерного излучения (при интенсивностях $30\text{-}200 \text{ ГВт/см}^2$), которая обуславливается доминированием биэкситонного излучения фотолюминесценции над экситонным.

Впервые выявлена генерация второй гармоники в планарных наноструктурах селенида кадмия и выполнено исследование ее особенностей.

Положения, выносимые на защиту и научные выводы, сделанные в ходе диссертационного исследования, являются обоснованными, что подтверждается адекватностью избранных методов исследования, системностью проведенного анализа экспериментальных данных, согласованностью полученных результатов между собой и с литературными данными.

Научная и практическая значимость работы

В представленной работе получены новые знания о нелинейно-оптические явлениях в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия, которые способствуют более глубокому пониманию физики оптических процессов в данных наноструктурах и стимулируют их дальнейшее исследование. Кроме того, результаты диссертации могут быть использованы при проектировании новых современных элементов оптоэлектроники. В целом, полученные в диссертации результаты могут быть полезны для исследователей, занимающихся экспериментальным изучением оптических свойств коллоидных растворов нанопластинок селенида кадмия и разработкой приборов на основе данных наноструктур.

Замечания

К изложению работы можно сформулировать ряд вопросов и замечаний, которые носят несущественный характер и не влияют на основные результаты исследования.

1. Вопрос о выборе объекта исследований. Почему были выбраны именно нанопластины CdSe/CdS. В чем особенность этих нанопластинок по сравнению с другими наночастицами на основе соединений полупроводниковой группы A_2B_6 , таких как ZnS, CdTe, CdZnS ?

2. На рисунках первой и второй главы появляются обозначения на английском языке. Если англоязычный текст оправдан на рисунках литобзора первой главы, то во второй главе в описании установки z-сканирования на Рис. 2.7 более приемлим перевод на русский язык.

3. В описании нанопластинок отсутствует расшифровка коэффициентов 2 и 3 в сокращениях CdSe/2CdS и CdSe/3CdS.

4. Одна из причин появления нелинейного сигнала самодефокусировки в эксперименте z-сканирования (вторая глава) связана с образованием термолинзы при поглощении излучения наночастицами и разогреве коллоидного раствора в области фокусировки излучения. Сила термолинзы

меняться в зависимости от частоты следования импульсов, что может приводить к соответствующему изменению нелинейного показателя преломления.

5. В четвертой главе приведены экспериментальные зависимости интенсивности генерации второй гармоники от интенсивности накачки. Также есть теоретические кривые, описывающие экспериментальные точки согласно уравнению (4.3). Однако отсутствуют найденные из аппроксимации экспериментальных данных коэффициенты a - линейного поглощения и b - потерь на рассеяние Тиндаля.

Заключение

Представленная научно-квалификационная работа Лактаева И.Д. является самостоятельным законченным исследованием, направленным на решение актуальной научной задачи – исследования нелинейно-оптических процессов и свойств новых гетероструктурных наносред. Полученные автором результаты исследования имеют существенное научную и практическую значимость в области фотоники полупроводниковых нанокристаллов и могут использоваться специалистами для разработки систем оптоэлектроники. Выводы и защищаемые положения диссертационной работы являются аргументированными и обоснованными.

Работа прошла апробацию на 5 российских и международных научных конференциях. Основные результаты исследования опубликованы соискателем в соавторстве в 4 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и включённых в международные реферативные базы (Scopus, Web of Science), а также в 5 сборниках трудов конференции. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа **«Нелинейно-оптические явления при двухфотонном возбуждении экситонов в коллоидных растворах нанопластинок селенида кадмия»** выполнена на высоком научном уровне и соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Лактаев Иван Дмитриевич,

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

Худяков Дмитрий Владимирович, д.ф.м.-н., 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). Специальность, по которой официальным оппонентом была защищена диссертация: 01.04.21 – Лазерная физика.

Адрес: 108840, Москва, Троицк, Калужское ш., д.4/1, Центр физического приборостроения ИОФ РАН. E-mail: dimakh65@gmail.com; тел.: +7 (903) 729 40 26. Сайт организации: <https://www.gpi.ru/>

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

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ЦФП ИОФ РАН

«21» апреля 2023 г.

Худяков Д.В.

Подпись ведущего научного сотрудника ЦФП ИОФ РАН д.ф.-м.н.
Худякова Д.В. удостоверяю

Директор ЦФП ИОФ РАН к.т.н.



Коренский М.Ю.