

## **ОТЗЫВ официального оппонента**

на диссертацию представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук **Смирнова Александра Михайловича** на тему: «**Резонансные нелинейно-оптические явления в коллоидных растворах нанокристаллов**» по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников

В диссертационной работе А.М.Смирнова исследованы фундаментальные физические процессы, определяющих нелинейные оптические свойства коллоидных растворов полупроводниковых нанокристаллов при их взаимодействии с лазерным излучением, а также их роли в формировании динамических фотонных кристаллов.

Несомненна актуальность диссертации А.М.Смирнова, ибо поиск новых низкоразмерных систем, в которых возможно управление оптическими и электронными их свойствами путём воздействия оптическими методами в непрерывном и импульсном режимах при комнатных температурах, является важной задачей.

Автор разумно представил большой экспериментальный материал на 311 страницах в виде шести глав и объемного списка источников (615!)

В качестве исследуемых наносистем диссертантом были использованы коллоидные полупроводниковые наноструктуры на основе селенида кадмия (CdSe): нанопластинки – квази-двумерные полупроводниковые нанокристаллы и нульмерные структуры (квантовые точки – КТ), сферические и в форме тетраподов.

Эти наносистемы, как убедительно показал диссертант, отличаются возможностью перестройки оптических резонансов, высокой энергией связи экситонов, при этом линии экситонных резонансов достаточно узкие, а также возможностью эффективной перекачки энергии между резонансами. В частности, было показано, что фотолюминесценция (ФЛ) тетраподных нанокристаллов может эффективно управляться легированием ионами серебра, марганца, меди и др.

Следует согласиться с диссертантом, что актуальность и новизна поставленных задач обусловлена тем, что предлагаемые методы исследования нелинейно-оптических свойств новых полупроводниковых наноструктур на основе селенида кадмия позволили выявлять новые черты фундаментальных физических процессов в них.

Исследования А.М.Смирнова позволили проанализировать природу нелинейно-оптических эффектов в полупроводниковых наноструктурах, выявить особенности нестационарных переходных процессов, происходящих под внешним воздействием, исследовать возможности создания активных

элементов для компонентной базы, используемой для обработки и хранения информации, оптической фильтрации и нестационарной перекачки энергии.

С практической точки зрения это означает, что ряд конкретных задач, сформулированных в диссертации, может стать основой для создания базовых элементов для решения задач квантовой коммуникации и квантовой обработки информации. С их помощью возможно создание новых типов приборов современной наноэлектроники и спинтроники: сверхбыстрых зарядовых переключателей, устройств динамической памяти, микросенсоров и излучателей, генерирующих сверхкороткие импульсы, а также оптических фильтров.

Необходимо отметить, что экспериментальная составляющая диссертационной работы направлена на ранее не исследованную область нелинейной оптики: создание динамических структур с перестраиваемыми оптическими свойствами на основе полупроводниковых наноструктур в коллоидных растворах. Формируемые динамические фотонные кристаллы (ДФК) в коллоидных растворах полупроводниковых наноструктур обладают существенно отличными оптическими и нелинейно-оптическими свойствами по сравнению с традиционно создаваемыми статическими фотонными кристаллами.

Для изучения свойств поглощающих и прозрачных наноструктур, особенностей нелинейно-оптических процессов, кинетических характеристик и определения величин нелинейностей диссертант использовал следующие экспериментальные методы:

1. Метод накачки и зондирования: накачка осуществлялась излучением лазеров с пассивной синхронизацией мод, активной модуляцией добротности и их гармониками; зондирование – импульсами пикосекундного континуума и (оригинальный подход!) люминесценцией органических красителей.

2. Метод самодифракции на наведённой лазерным излучением одномерной амплитудно-фазовой дифракционной решётке (ДР): нелинейно-оптический метод, основанный на сильной связи между электрическими и оптическими свойствами полупроводниковых материалов, позволяет устанавливать особенности неравновесных электронных процессов. Вклад от амплитудной и фазовой составляющих динамической ДР значительно зависит от интенсивности возбуждающих импульсов и определяется тем, какие нелинейные процессы будут доминировать при данных значениях интенсивности. Кроме этого, в работе использовался метод вырожденного четырёхволнового взаимодействия (ВЧВВ) в геометрии на прохождение и отражение.

3. Необходимо отметить разработанный метод формирования резонансного одномерного, двумерного и трёхмерного ДФК в коллоидных растворах наночастиц: при взаимодействии двух, трёх или четырёх электромагнитных

волн, пересекающихся в нелинейно-оптической среде, из-за пространственной периодической модуляции диэлектрической проницаемости в наведённом интерференционном поле может быть сформирован одномерный, двумерный или трёхмерный ДФК, соответственно, на котором возможна самодифракция создавших его волн, а также брэгговская дифракция.

Используя большой объем экспериментальных данных А.М.Смирнов представил важные результаты, из которых можно выделить наиболее значимые:

(1). Основными эффектами, приводящими к нелинейной модуляции поглощения коллоидных растворов нанопластинок (*относительно новый нанобъект*) при однофотонном возбуждении, выступают процесс заполнения фазового пространства экситонов, экситон-фононное взаимодействие и обмен энергией между экситонами с тяжелыми и лёгкими дырками.

(2) Управление спектром фотолуминесценции (ФЛ) гетероструктурных нанотетраподов (*малоизученный нанобъект*) реализуется увеличением интенсивности возбуждения экситонов. Зависящий от интенсивности накачки коротковолновый сдвиг линии ФЛ, связанной с непрямым оптическим переходом в нанотетраподах CdTe/CdSe, достигает значения 0,13 эВ при стационарном возбуждении экситонов наносекундными импульсами с интенсивностью до 14 МВт/см<sup>2</sup> и объясняется ростом радиуса экситонов в процессе заполнения экситонных состояний.

(3). Самодифракция ультракоротких лазерных импульсов на нестационарной дифракционной решётке в сильно поглощающих коллоидных растворах нанокристаллов сопровождается самодифракцией типа Френеля на наведённом канале прозрачности и определяется модуляцией показателей поглощения и преломления при однофотонном возбуждении экситонов.

(4). Разработанный метод, основанный на формировании периодической модуляции показателя преломления и поглощения при возбуждении экситонного перехода  $1S_{n3/2} - 1S_e$  в коллоидном растворе КТ пикосекундными лазерными импульсами, *позволяет создавать одномерные, двумерные и трёхмерные перестраиваемые динамические фотонные кристаллы* при помощи двух, трёх и четырёх взаимодействующих некопланарных лазерных лучей, соответственно.

Следует также отметить важность проведенных исследований с двумерными наноструктурами CdSe<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>/CdS(ZnS), характеризующиеся атомарно точными толщинами. Благодаря уникальным атомарно-точным толщинам и строгому квантовому ограничению носителей заряда в одном измерении эти наноструктуры не подвержены эффекту неоднородного спектрального

уширения, что делает их важными как для различных приложений, так и для исследований фундаментальных свойств низкоразмерных полупроводниковых систем.

Работа имеет достаточно выраженную научную новизну полученных результатов. При выполнении работы использован целый комплекс современных методов исследования. Хорошее соответствие данных, полученных разными методами, подтверждает достоверность полученных результатов.

Рекомендации и выводы, вытекающие из содержания работы, несомненно, имеют высокую практическую и научную значимость и полностью обоснованы результатами экспериментов. В частности, нелинейная модуляция показателя преломления, необходимая для формирования ДФК, достижима с использованием современной лазерной техники, что позволит в будущем преобразовывать длины волны света с помощью динамической настройки показателя преломления и настраиваемого оптического отклика ДФК например для решения различных задач обработки, передачи и преобразования оптической информации в будущем.

По работе имеются следующие замечания:

(1). Необходимо пояснить каким образом квантовые точки в совокупности имеющие «высокую квантовую эффективность ФЛ» могут увеличить производительность солнечных элементов, чувствительность сенсоров и эффективность источников света, а также снизить порог генерации лазеров.

(2). Как правило, коллоидные квантовые точки различной геометрии обладают широким спектром дефектного излучения (пример см. детальный анализ в кандидатской диссертации А.В.Кацабы, ФИАН, 2021). В чем принципиальное отличие «дефектного» излучения для 3D и 2D систем?

(3). Необходима оценка эффективности переключения размерности ДФК «при изменении количества, геометрии и поляризации взаимодействующих лазерных лучей» (как у диссертанта!).

(4). Требуется дополнительные разъяснения модуляции экситонного поглощения в высоколегированных медью нанотетраподах CdSe. В частности, образование «индуцированного электрического поля, возникающего при заполнении дырками примесных уровней меди либо при разделении электронов и дырок в разных частях нанотетрапода».

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.11 – Физика полупроводников, а

также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Смирнов Александр Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор  
высококвалифицированный главный научный сотрудник Отдела люминесценции им. С.И. Вавилова,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Витухновский Алексей Григорьевич

контактные данные:

тел.: +7(499) 132-63-64,  
[vitukhnovsky@mail.ru](mailto:vitukhnovsky@mail.ru)

  
e-mail: [vitukhnovskiyag@lebedev.ru](mailto:vitukhnovskiyag@lebedev.ru),

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация: 01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский проспект, д.53,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Тел.+7 495 939 1682, Email : [office@lebedev.ru](mailto:office@lebedev.ru)

подпись сотрудника А.Г. Витухновского удостоверяю:



  
Савинов С.Ю.