

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание учёной 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»

Исследования в области оптических и нелинейно-оптических явлений в низкоразмерных полупроводниковых системах продолжают находиться в фокусе исследований во всем мире несколько последних десятилетий, что безусловно доказывает их актуальность. Развитие технологий, позволяющих вырастить полупроводниковые нанокристаллы различной размерности и формы (квантовые точки, нанопластинки, нанотетраподы и т.д.), а также разнообразные возможности для управления их оптическими и электронными свойствами явились причиной активных фундаментальных и прикладных исследований таких систем. В диссертационной работе А.М. Смирнова выполнено комплексное экспериментальное исследование уникальных оптических и нелинейно-оптических свойств полупроводниковых наноструктур. Результаты, полученные в работе, позволили установить характерные черты фундаментальных нелинейно-оптических явлений в низкоразмерных полупроводниковых структурах. Выбор размера и размерности исследуемых нанокристаллов позволил проанализировать их резонансный отклик на воздействие короткими и ультракороткими лазерными импульсами, и изучить возможность их потенциального применения при обработке, передаче и хранении оптической информации, оптической фильтрации и нестационарной перекачке энергии. Решение сформулированных в диссертационной работе задач способно внести существенный вклад в создания базовых элементов квантовой коммуникации и квантовой обработки информации.

Особо отмечу новизну и практическую значимость вошедших в диссертацию А.М.Смирнова результатов в ранее практически не исследованной области нелинейной оптики – динамических фотонных кристаллов с перестраиваемыми оптическими характеристиками. Формируемые вследствие интерференции лазерных импульсов динамические фотонные кристаллы в резонансно возбуждаемых коллоидных растворах квантовых точек обладают весьма интересными как с фундаментальной, так и практической точки зрения нелинейно-оптическими свойствами, выделяющими их на фоне традиционных статических фотонных кристаллов, поскольку открывают новые возможности для управления света светом.

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, пяти оригинальных глав, описывающих основные результаты, заключения и списка литературы из 615 наименований. Работа содержит 139 рисунков.

Во введении приведена актуальность исследований, сформулированы цели, задачи и положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов. Во введении также описаны методы исследования, степень достоверности результатов и приведены данные об апробации результатов.

В первой главе представлен подробный анализ текущего состояния исследований оптических и электрооптических свойств полупроводниковых нульмерных и квази-двумерных нанокристаллов на основе селенида кадмия, описана структура экситонных уровней в нанокристаллах, влияние эффекта диэлектрического усиления экситонов на их энергию связи, особенности формирования биэкситонов и трионов. Рассмотрены теоретические аспекты эффекта насыщения поглощения, наведённого эффекта Штарка и процесса самодифракции на наведённых дифракционных решетках, а также приведены основные оптические свойства динамических фотонных кристаллов.

Во второй главе изучены процессы насыщения экситонного поглощения в коллоидных растворах квантовых точек CdSe/ZnS и CdSe, а также определено влияние на модуляцию пропускания и фотолюминесценции

экситон-фононного взаимодействия, штарковского сдвига при захвате носителей на поверхностные состояния, а также поглощения возбужденными носителями. При сравнении экспериментальных данных с результатами теоретического расчёта даны оценки величины красного сдвига уровней экситонного поглощения в квантовых точках.

В третьей главе сформулированы результаты по исследованию особенностей нелинейной модуляции оптических свойств двумерных коллоидных нанокристаллов CdSe в зависимости от наличия оболочки и ее материала, а также концентрации нанопластинок в растворе. Проведены измерения при различных вариантах возбуждения экситонов – резонансном возбуждении экситонов на лёгких и тяжелых дырках, возбуждении в область непрерывного спектра. Исследования проведены в стационарном (длительность лазерных импульсов существенно больше времени жизни экситонов) и нестационарном режимах возбуждения экситонов. В результате установлено, что особенности насыщения поглощения в нанопластинках относятся к процессам заполнения фазового пространства экситонов, сопровождаемого экситон-экситонным и экситон-фононным взаимодействиями и перекачкой энергии между экситонными состояниями.

В четвертой главе исследованы свойства нелинейной фотолюминесценции и нелинейного поглощения легированных медью коллоидных нанотетраподов CdSe в зависимости от концентрации примесных атомов. Показано, что с увеличением концентрации примесных атомов происходит рост интенсивности насыщения примесной фотолюминесценции с одновременным снижением экситонной фотолюминесценции. Установлено, что существует предел возможного количества меди, при котором начинает снижаться как модуляция экситонного поглощения, так и интенсивность примесной фотолюминесценции из-за роста безызлучательной потери энергии. Продемонстрирована возможность управления коротковолновым сдвигом линии фотолюминесценции на непрямом оптическом переходе гетероструктурных нанотетраподов CdTe/CdSe. Измеренный сдвиг величиной

0,13 эВ при возбуждении экситонов наносекундными импульсами с интенсивностью 14 МВт/см^2 объяснён ростом радиуса экситонов при заполнении экситонных состояний.

В пятой главе изучены особенности процессов самовоздействия ультракоротких лазерных импульсов в сильно поглощающих растворах резонансных наночастиц. Обнаружено сосуществование самодифракции двух лазерных импульсов на наведенных круглых диафрагмах (что подробно изучено отдельно для одиночных пикосекундных импульсов) и дифракционной решетке. В данном разделе для объяснения явления самодифракции при однофотонном резонансном возбуждении экситонов в КТ использованы результаты второй главы, которые позволили указать на нелинейно-оптические процессы, ответственные за формирование излучения в новых направлениях. Кроме этого, представлены результаты, указывающие на изменение кубической нелинейной восприимчивости в зависимости от интенсивности возбуждения из-за штарковского сдвига спектра экситонов, а также на влияние смещения суммарной энергии двух фотонов от энергии экситонного перехода на эффективность самодифракции.

В шестой главе разработан метод формирования одномерных, двумерных и трехмерных динамических фотонных кристаллов, основанный на создании периодической модуляции показателя преломления и поглощения в резонансно возбуждаемых коллоидных растворах наночастиц двумя, тремя и четырьмя лазерными импульсами, соответственно. Экспериментально установлена возможность применения теории Лауэ для определения направления формирования новых волн в результате самодифракции на создаваемых фотонных кристаллах, а также продемонстрирован механизм переключения размерности фотонных кристаллов за счет изменения количества и поляризации взаимодействующих лазерных лучей.

В заключении приведены основные выводы диссертационной работы.

Достоверность и новизна результатов, представленных в диссертации, подтверждается использованием современных экспериментальных методов,

адекватно выбранных теоретических приближений для объяснения достигнутых результатов, сравнением с результатами, полученными другими научными группами, а также воспроизводимостью экспериментальных результатов. Все результаты апробированы на профильных научных симпозиумах, школах и конференциях, а также прошли всестороннее рецензирование в профильных ведущих российских и международных журналах.

Отмечу некоторые недостатки диссертации.

1. Исследованные в Главе 2 механизмы оптической нелинейности в коллоидных растворах квантовых точек CdSe/ZnS (вследствие заполнения состояний и эффекта Штарка) должны иметь совершенно разную временную динамику, существенно затянутую в случае эффекта Штарка. Поскольку его связывают с электрическими полями, возникающими в квантовой точке из-за захвата зарядов поверхностными ловушками. Время жизни таких заряженных центров весьма велико, и, мне представляется, их вклад в изменение спектров поглощения квантовых точек можно было бы однозначно экспериментально выделить с помощью pump-probe эксперимента с временной задержкой.
2. В Главах 5 и 6 диссертации продемонстрирована возможность создания динамических решеток и динамических фотонных кристаллов за счет исследованных в Главе 2 экситонных нелинейностей в коллоидных растворах квантовых точек. Однако оптическое качество полученных динамических решеток довольно невысоко, см. напр., на рис. 6.8 в диссертации. С точки зрения практических применений было бы, безусловно, важно, проанализировать способы улучшения контрастности, например, увеличивая сечение интерферирующих лазерных пучков.
3. С точки зрения использования реализованных в диссертации динамических фотонных кристаллов в информатике, для управления

света светом, было бы очень важно оценить энергетическую цену переключения таким устройством.

4. В разделе 6 диссертации продемонстрирована возможность изменять геометрию динамического фотонного кристалла, меняя направление линейной поляризации одного из интерферирующих лазерных пучков на перпендикулярное. Представляется, что возможности использовать векторную природу электромагнитного поля здесь могут быть гораздо более широкими - если, например, использовать циркулярно-поляризованные волны.
5. Имеется некоторое незначительное количество опечаток и терминологических неточностей, как в диссертации, так и в автореферате. Например, обозначение квантовых точек с однослойным покрытием CdSe/1CdS иногда превращается в CdSe1/CdS (на сс. 126-128 диссертации и на с. 21 автореферата). Также и CdSe/2CdS. Статический эффект Штарка в диссертации называется длинноволновым, низкочастотным, или индуцированным.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертационная работа отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» (по физико-математическим наукам), 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.

Соискатель Смирнов Александр Михайлович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН
профессор кафедры общей физики
и физики конденсированного состояния
физического факультета
ФГБОУВО «МГУ имени М.В.Ломоносова»

ТИХОДЕЕВ Сергей Григорьевич

Контактные данные:

тел.: +7(499) 503-8777 доб. 102, e-mail: tikh@gpi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защита диссертация:

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, Дом 1, строение 2.

ФГБОУВО «МГУ имени М.В.Ломоносова», физический факультет

Тел.: +7 495 939-16-82; e-mail: info@physics.msu.ru

Подпись сотрудника МГУ имени М.В.Ломоносова

С.Г. Тиходеева удостоверяю:

Ученый секретарь физического факультета

МГУ им. М.В. Ломоносова

д.ф.-м.н. профессор

В.А. Карavaев