

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего лабораторией теории полупроводниковых наноструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН) Тиходева Сергея Григорьевича (адрес: 117942, ГСП-1, Москва, ул.Вавилова, 38, телефон: +7 (499) 503-81-02, e-mail: tikh@gpi.ru)

на диссертацию

Родиной Анны Валерьевны

«ОПТИЧЕСКИЕ И СПИНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОЛЛОИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛАХ»,

представленную в диссертационный совет No Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Диссертация Анны Валерьевны Родиной посвящена теоретическому исследованию множества важных с фундаментальной и прикладной точки зрения оптических и спиновых явлений в коллоидных нанокристаллах кубических и гексагональных полупроводников, обусловленных эффектами размерного квантования и взаимодействием с поверхностью. Эта бурно развивающаяся в последнее тридцатилетие область физики полупроводников, помимо фундаментальных результатов, к настоящему времени принесла важные применения в оптоэлектронике, биологии и медицине. Более ранние из вошедших в диссертацию работ автора заложили основы развития этой области физики и стали классическими и многократно цитировались в литературе. (По данным Web of Science, на момент написания данного отзыва вошедшие в диссертацию работы цитировались 1134 раз.) Более поздние работы автора посвящены самым актуальным и обсуждаемым в настоящее время задачам. Поэтому **актуальность и востребованность** вошедших в диссертацию исследований, а также их **теоретическая и практическая значимость** не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из Введения, 7 глав и заключения. В списке литературы, помимо впечатляющего списка работ автора, вошедших в диссертацию (26 статей, включая статьи в ФТТ, ЖЭТФ, JOSA B – 538 цитирований, Phys. Rev. B – 14 статей, ACS Nano, Nature Nanotech, Nano Lett. – 3 статьи) – 284 публикации.

Во Введении показывается актуальность избранной темы, – исследования коллоидных полупроводниковых наночастиц, убедительно аргументируется

актуальность, новизна и практическая значимость вошедших в диссертацию работ. Формулируются цели диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту, приводится апробация работы (весьма внушительная), кратко описывается структура диссертации и содержание ее глав.

В главах 1-7 диссертации А.В. Родиной получен впечатляющий объем фундаментальных результатов, среди которых я хотел бы выделить следующие.

1. В рамках восьмизонной $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ модели эффективной массы сформулированы (в Главах 1 и 2) обобщенные граничные условия и проведено размерное квантование носителей, вычислены энергии кулоновского взаимодействия в сферических и эллипсоидальных полупроводниковых нанокристаллах; проанализированы правила отбора для оптических переходов и показано их существенное отличие от предсказаний однозонной модели; впервые идентифицированы пики в спектрах поглощения нанокристаллов CdSe. Основное отличие полученных автором обобщенных граничных условий от стандартных для бесконечного потенциального барьера на поверхности – возможность учесть подмешивание (за счет поверхностного вклада) дырочных состояний в электронные. Это приводит, в частности, к поверхностному вкладу в магнитный момент электрона.

2. Проанализированы (в Главе 3) различные механизмы активации излучательной рекомбинации темного экситона, за счет подмешивания состояний светлого экситона, вычислены скорость излучательной рекомбинации и ее поляризация. Отмечу здесь предложенный автором новый механизм такой активации, связанный с обменным взаимодействием спина электрона в экситоне со спином оборванной связи на поверхности. Это единственный (в нулевом магнитном поле) механизм, приводящий к наблюдающейся на эксперименте поляризации излучения перпендикулярно оси анизотропии нанокристалла. Также в Главе 3 изучены температурные и поляризационные характеристики излучательной рекомбинации темного экситона с участием акустических или оптических фононов.

3. В Главе 4 теоретически предсказано и исследовано новое удивительное явление – возникновение макроскопического магнитного момента у *немагнитных* полупроводниковых нанокристаллов (направленного вдоль оси анизотропии нанокристалла), обусловленное динамической поляризацией спинов оборванных связей на поверхности анизотропного нанокристалла. Такая динамическая поляризация возникает при температурах ниже критической и приводит к образованию поверхностного магнитного полярона, сопровождающемуся красным сдвигом линии излучения – последнее делает возможным оптическое наблюдение эффекта.

4. В Главе 5 построена теория памяти линейной поляризации фотолюминесценции ансамбля анизотропных нанокристаллов при возбуждении линейно-поляризованным светом, с учетом различных механизмов активации излучательной рекомбинации темного экситона. Показано, что в магнитном поле возникает магнитоиндуцированная циркулярная поляризация фотолюминесценции ансамбля произвольно ориентированных анизотропных нанокристаллов. Эти эффекты возникают благодаря анизотропии действующего локального электрического поля, наведенной анизотропией формы нанокристаллов.

5. Построена (в главе 6) теория биэкситона, а также отрицательно и положительно заряженных трионов в нанокристаллах CdSe и композитных наногетероструктурах ядро/оболочка CdSe|CdS с резким и плавным потенциальными барьерами на границе. В Главе 7 проанализирована тонкая структура спектра фотолюминесценции трионов в композитных наногетероструктурах CdSe|CdS в магнитном поле и показано, что наблюдающийся на эксперименте знак циркулярной поляризации означает, что резидентным зарядом при толщине CdS оболочки является электрон. В таких композитных наноструктурах поперечное (к оси анизотропии структуры) магнитное поле подмешивает к $\pm 3/2$ состояниям дырок состояния с проекцией (на ось анизотропии наногетероструктуры) момента дырок $\pm 1/2$. Максимальная скорость спиновой релаксации между зеемановскими подуровнями дырок с проекциями момента дырок $\pm 3/2$, нарастающая с ростом магнитного поля, достигается в нанокристаллах, ориентированных перпендикулярно магнитному полю.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается внутренней непротиворечивостью результатов, использованием совершенного аппарата теоретической и математической физики, симметричного анализа, сопоставления полученных результатов с данными эксперимента.

Высокая научная и практическая значимость этих результатов обусловлена тем, что в диссертации построена теория ряда фундаментальных оптических и спиновых явлений в коллоидных квантовых нанокристаллах, обусловленных поверхностью нанокристалла и анизотропией их формы.

Диссертация не лишена некоторых, впрочем, весьма незначительных, **недостатков**.

1. Во второй главе диссертации выведены обобщенные граничные условия для полупроводниковых гетероструктур с резкими границами в рамках восьмизонной $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ модели эффективной массы и показано, что эти условия, по

сути, соответствуют некоторой параметризации гетерограницы. Параметры обобщенных граничных условий могут быть найдены как подгоночные параметры к эксперименту. Однако где гарантия, что успешная параметризация отвечает физике дела? Представляется важным провести такую процедуру параметризации для гетерограницы, где возможно более точное решение проблемы, например, т.н. «первопринципное» (или какую-нибудь упрощенную но точно решаемую модель) и сравнить получающиеся результаты.

2. Изучаемые в диссертации нанокристаллы либо сферической формы, либо, если изучаются эффекты анизотропии формы, эллипсоидальной. Однако необходимо отметить, что малые (по сравнению с длиной волны света) эллипсоидальные диэлектрические нанокристаллы в однородном диэлектрическом окружении с точки зрения электродинамической являются выделенным объектом, поскольку в однородном электрическом поле поляризуются также однородно. В результате внутреннее действующее поле в эллипсоидальных наноструктурах оказывается однородным. Тогда как в «угловатых» нанокристаллах, либо даже сферических, но помещенных на резкую границу между разными диэлектриками (например, на поверхности коллоидной смеси), возникают сильно неоднородные внутренние поля. Можно ли ожидать каких-то качественно новых поляризационных эффектов типа рассмотренных в Главе 5 для таких коллоидных наноструктур? Мне кажется, было бы интересно провести исследования в этом направлении.
3. Можно ли управлять обобщенными граничными условиями при помощи внешних электромагнитных полей? В диссертации кратко рассмотрен случай магнитного поля, но более полный анализ представляется потенциально интересным.
4. Имеются небольшие технические погрешности в тексте диссертации, например, на с. 46 (в предпоследнем абзаце) в формулах для кулоновских энергий электронов и дырок пропущены множители $1/a$, наличие которых обсуждается в следующей фразе.

Указанные недостатки ни в коей мере не уменьшают ценности диссертации, выполненной на чрезвычайно высоком и современном научном уровне.

В целом диссертационная работа А. В. Родиной «Оптические и спиновые явления в полупроводниковых коллоидных нанокристаллах» заслуживает самой высокой

оценки благодаря высокому научному уровню ее выполнения, новизне и важности результатов, ясности изложения. Одним из важнейших достоинств работы автора является тесная связь с экспериментом. Существенная часть вошедших в диссертацию результатов стали классическими и прошли не просто апробацию экспериментом, а в значительной части определили развитие эксперимента в области физики коллоидных полупроводниковых наноструктур. Диссертация является законченным и внутренне согласованным научным трудом, заслуживающим публикации в виде книги, которая безусловно будет востребована специалистами.

Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации.

Диссертация А. В. Родиной является законченной научно-квалификационной работой и полностью отвечает требованиям п. 9 Положения "О порядке присуждения ученых степеней" № 842, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников, а её автор Анна Валерьевна Родина несомненно заслуживает присвоения ей искомой степени.

Заведующий лабораторией теории полупроводниковых наноструктур ИОФ РАН, д. ф.-м. н., проф.

Сергей Григорьевич Тиходеев

Подпись Сергея Григорьевича Тиходеева удостоверяю:
Ученый секретарь ИОФ РАН, д.ф.-м.н.

Степан Николаевич Андреев

31 октября 2016