

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук**

**На правах рукописи**

**Пляшечник Ольга Сергеевна**

**Комбинационное рассеяние света и «горячая» люминесценция  
в наноструктурах на основе полупроводников  $A_2B_6$   
и алмазоподобных структурах.**

**Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Москва - 2013**

Работа выполнена в Лаборатории физики неоднородных систем Отделения физики твёрдого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук  
Мельник Николай Николаевич  
(ФИАН)

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
Соболь Александр Александрович (ИОФАН)  
кандидат технических наук  
Екимов Евгений Алексеевич (ИФВД)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Физики им. Л.В.Киренского Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 20 января 2014 г. года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, с авторефератом – на сайте института [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2013 г.

Отзывы на автореферат просим присылать по адресу: 119991 г. Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН, Отделение физики твёрдого тела.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 002.023.03  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Шиканов А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Нанотехнологии являются одним из приоритетных направлений развития науки и техники. Для дальнейшего развития техники необходимо создавать и исследовать новые материалы и низкоразмерные структуры, в том числе, на полупроводниковой основе, обладающие заранее заданными свойствами. По этой причине изучение физических процессов, протекающих в полупроводниковых наноструктурах, является **актуальной** проблемой как на научном, так и в прикладном плане.

При переходе от массивного кристалла к наноразмерным объектам важную роль начинают играть квантовые эффекты, увеличивается влияние поверхности, возрастает роль ближайшего окружения. В реальных структурах нанобъекты всегда окружены материалом со свойствами, отличными от свойств материала нанобъекта. В целом ряде случаев это окружение оказывает существенное влияние на свойства нанобъектов, в частности, на процессы переноса и релаксации возбуждений в наноструктурах. При этом существует достаточно широкий круг еще не решенных задач, связанных с взаимодействием наноразмерных объектов с ближайшим окружением. Решению некоторых из них и посвящена данная диссертационная работа, в которой исследованы свойства и поведение системы неравновесных носителей заряда в оптически возбужденных наноструктурах на основе полупроводников  $A_2B_6$  и алмазоподобных структурах.

Задачи настоящей работы были поставлены с учетом некоторых результатов, полученных в предшествовавших исследованиях различных авторов. Так, изучение структур с квантовыми ямами (КЯ) на основе полярных полупроводников ( $ZnSe/ZnCdSe$ ) показало, что при внутриямном фотовозбуждении (свет поглощается в квантовой яме  $ZnCdSe$ ) в спектрах люминесценции присутствуют фононные повторения, отвечающие LO-фононам как материала ямы, так и материала барьера [1]. В короткопериодных сверхрешетках полярных полупроводников ( $AlAs-GaAs$ ) обнаружена миграция

неравновесных электронно-дырочных пар между слоями чередующихся полупроводников [2]. Спектры резонансного комбинационного рассеяния света (КРС) таких структур отражают влияние материалов сверхрешетки на релаксацию электронно-дырочных пар: в спектрах КРС присутствуют линии как обертонов, так и составных тонов частот продольных колебаний GaAs и AlAs.

Исследования углеродных структур, синтезированных различными способами, показали, что существуют углеродные наночастицы, обладающие фотолюминесценцией (ФЛ) в видимой области спектра, в которых поглощение света осуществляется «графитоподобным» ядром, а излучение – поверхностной областью наночастицы, представляющей собой «алмазоподобную» оболочку [3,4]. В пористых полупроводниках возникновение ФЛ достаточно хорошо описывается с помощью аналогичного механизма [5]. Примером другой системы, где наличие ближайшего окружения влияет на оптические свойства изучаемых структур, является система «наноалмаз + биологическая молекула». В работе [6] исследовались наноалмазы, на которые наносились молекулы лизоцима. Наличие молекул лизоцима на поверхности наноалмаза изменяло спектр ФЛ наноалмаза, хотя эти структуры были получены в результате физической адсорбции молекул лизоцима. Было показано, что графитизированные частицы, имеющиеся на поверхности наноалмаза, способствуют передаче возбуждений между молекулами лизоцима и наноалмазом.

Предварительные исследования, выполненные нашей группой в ФИАН, показали, что для нанообъектов различной природы и размерности при поглощении света нанообъектом рекомбинация электронов и дырок с испусканием фотонов может происходить как в самом нанообъекте, так и в его ближайшем окружении вследствие переноса возбуждений.

В представленной диссертационной работе исследовались процессы переноса возбуждений между различными нанообъектами. В качестве объектов исследования были выбраны нанообъекты на основе полупроводников  $A_2B_6$  (нанопроволоки, квантовые точки), алмазоподобные массивные подложки,

наноалмазы. Изучены оптические спектры образцов, процессы переноса возбуждений от нанообъектов в ближайшее окружение, а также влияние параметров материала ближайшего окружения на оптические свойства структур. Основными методами исследования служили: комбинационное рассеяние света (КРС), фотолюминесценция, «горячая» люминесценция, которая для полярных полупроводников является более эффективным инструментом, чем КРС [7].

### **Основные цели и задачи диссертации**

Целью данной работы являлось изучение процессов переноса возбуждений в структурах с квантовыми точками и квантовыми проволоками на основе полупроводниковых соединений  $A_2B_6$  и их твердых растворов, а также в углеродных структурах методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, фотолюминесценции и «горячей» люминесценции; исследование влияние ближайшего окружения нанообъектов на их оптические спектры и релаксацию возбуждений.

Поставленная цель включает в себя несколько задач:

1. Исследование спектральных свойств полупроводниковых наноструктур (нанопроволоки различного диаметра от 10 до 150 нм, квантовые точки на основе полупроводников  $A_2B_6$ , полученные методами коллоидной химии, алмазоподобные структуры), в том числе структур с различным окружением нанообъектов, в которых окружение влияет на релаксацию возбуждений.
2. Изучение релаксации фотовозбужденных электронов в нанопроволоках из тройных соединений элементов II и VI групп ( $ZnMnTe$ ,  $ZnMgTe$ ).
3. Исследование влияния ближайшего окружения на релаксацию возбуждений с использованием спектров ФЛ и КРС нанопроволок ядро-оболочка (core-shell) из материалов на основе полярных полупроводников  $A_2B_6$  ( $ZnSe/ZnTe$ ,  $ZnSe/ZnO$ ), а также подложек с

алмазоподобной пленкой и физически адсорбированными на нее белковыми молекулами.

4. Изучение влияния температуры на спектральные и электронные свойства исследуемых полупроводниковых наноструктур, а также на процессы релаксации неравновесных носителей заряда в этих наноструктурах.

### **Научная новизна работы**

Показано, что при возбуждении вдали от резонанса соотношение интенсивностей стоксовых и антистоксовых LO-фононных повторений в спектрах «горячей» люминесценции описывается классическим выражением для отношения интенсивностей стоксовых и антистоксовых компонент в спектрах КРС.

Обнаружено, что распределение интенсивностей LO-фононных повторений в спектрах «горячей» люминесценции нанопроволок на основе твердых растворов полупроводников  $A_2B_6$  может описываться статистическим подходом.

Показано, что в спектрах люминесценции нанопроволок на основе полупроводников  $A_2B_6$  сдвиг частоты nLO-фононного повторения изменяется с номером n, что объясняется взаимодействием с темновыми носителями заряда.

На примере нанопроволок ядро/оболочка (ZnTe/ZnSe) экспериментально продемонстрировано изменение оптических свойств нанопроволок вследствие влияния ближайшего окружения.

Обнаружено изменение спектра фотолюминесценции массивных алмазоподобных пленок при физической адсорбции биологических молекул (лизоцим, гемоглобин). Выявлена зависимость изменения формы спектров ФЛ наноалмазов от типа биологических молекул и показано, что температура слабо влияет на эти изменения.

## Научная и практическая значимость работы.

В нанопроволоках и квантовых точках на основе полупроводников  $A_2B_6$  изучено поведение LO-фононных повторений в спектрах «горячей» люминесценции: обнаружены перераспределение интенсивностей LO-фононных повторений и сдвиг частоты LO-фононов, испускаемых при рекомбинации носителей заряда с излучением фотонов в области частот краевой люминесценции, проанализированы отношения интенсивностей антистоксовой и стоксовой частей спектра для нанопроволок. Обнаружено уширение LO-компонент спектра КРС и изменение частоты продольных колебаний при переходе от массивного кристалла к квантовым точкам размером меньшим 2 нм.

В нанопроволоках ядро-оболочка на основе полупроводников  $A_2B_6$  и алмазоподобных пленках с физически адсорбированными на поверхности пленки биологическими молекулами экспериментально изучено влияние ближайшего окружения на свойства изучаемого объекта, проявляющееся в изменении спектров ФЛ последнего. В структурах с нанопроволоками ядро-оболочка обнаружена передача части энергии возбуждения ядра в оболочку. Обнаружено изменение формы спектров ФЛ алмазоподобных пленок при физической адсорбции на поверхность пленки биологических молекул, происходящее вследствие переноса части энергии возбуждающего излучения к биологическим молекулам (ближайшее окружение алмазоподобной пленки) и ее последующего поглощения. Оценена энергия, поглощенная молекулой.

Результаты работы вносят вклад в понимание механизмов релаксации фотовозбуждений в наноструктурах с отмеченными выше свойствами и могут быть полезны при разработке оптоэлектронных структур. Эксперименты, связанные с биологическими молекулами, говорят о перспективности дальнейшего развития этого направления и возможности использования данных результатов для разработки сенсоров биологических молекул.

## **Положения, выносимые на защиту.**

1. Перераспределение интенсивностей LO-фоонных повторений в нанопроволоках на основе  $A_2B_6$  обусловлено сдвигом краев зон, связанным с квантово-размерным эффектом.
2. При внерезонансном возбуждении отношение интенсивностей антистоксовых и стоксовых линий в спектре «горячей» люминесценции описывается формулой для отношения интенсивностей этих компонент в спектрах спонтанного комбинационного рассеяния света.
3. В спектрах люминесценции нанопроволок частоты фоонных повторений при их наложении на полосу краевого излучения претерпевают сдвиг, величина которого зависит от номера фоонного повторения. Этот эффект объяснен взаимодействием продольных фоонов с темновыми носителями заряда.
4. При уменьшении диаметра коллоидных наночастиц CdSSe до 2 нм линии, соответствующие продольным оптическим фоонам в спектре резонансного КРС, начинают уширяться и сдвигаться в низкочастотную область, что объясняется увеличением доли поверхностных атомов.
5. Предложенная вероятностная модель, позволяющая рассчитать распределение интенсивностей LO-фоонных повторений, адекватно описывает экспериментальные данные по «горячей» люминесценции в нанопроволоках и сверхрешетках.
6. В спектрах вторичного излучения нанопроволок ядро/оболочка (ZnTe/ZnSe) интенсивность линий, соответствующих продольным



оптическим фонам как ядра, так и оболочки существенно выше, чем в безоболочечных нанопроволоках на основе ZnTe или ZnSe. Это указывает на перенос фотовозбужденных электронов между ядром и оболочкой.

7. Характер изменения формы спектров фотолюминесценции алмазоподобных пленок и наноалмазов при физической адсорбции биологических молекул является отличительным признаком конкретной биологической молекулы.

### **Личный вклад автора.**

Личный вклад диссертанта состоит в участии в выборе и формулировании научных задач диссертационной работы, самостоятельном выполнении экспериментов и обработке полученных результатов, проведении расчетов и написании статей.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ФИАН, а также на следующих российских и международных конференциях:

10-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Санкт-Петербург, 2008; Комбинационное рассеяние света. 80 лет исследований. Москва, 2008; 11-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Санкт-Петербург, 2009; 19 International School – Seminar “Spectroscopy of molecules and crystals”. Beregovoe, Ukraine, 2009; XXIV Съезд по спектроскопии. Москва-Троицк, 2010; Конференция-конкурс молодых физиков. Москва, 2010; 13-я Всероссийская научная школа для молодежи «Актуальные проблемы физики и 4-я Школа-семинар «Инновационные аспекты фундаментальных исследований». Москва-

Звенигород, 2010; XV Международный Симпозиум «Нанозлектроника и нанофотоника». Нижний Новгород, 2011; Международный симпозиум Нанофотоника-2011. Кацевели, Украина, 2011; XIth International Conference on Molecular Spectroscopy. Wroclaw, Poland, 2011; 14 Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики». Москва-Звенигород, 2012; The 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, 2013.

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 20 работ, включая 7 статей в реферируемых журналах и 13 публикаций в материалах конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии. Объём диссертации составляет 112 страниц, включая 46 рисунков и 5 таблиц. Список цитированной литературы включает 60 наименований, список работ автора по теме диссертации - 20 наименований.

### **Основное содержание работы.**

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, показаны научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели и задачи работы, представлены сведения о структуре и содержании работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору современного состояния исследований, связанных с полупроводниковыми объектами пониженной размерности в условиях взаимодействия с ближайшим окружением. С учетом имеющихся в литературе данных были уточнены задачи настоящей работы.

**Во второй главе** описаны экспериментальные методы, использованные в диссертационной работе. Представлены схемы экспериментов по КРС, люминесценции, «горячей» люминесценции, приведены характеристики

использовавшихся приборов. Дана основная информация об исследовавшихся образцах:

1. полупроводники  $A_2B_6$  - общие сведения по структуре и физическим свойствам; ZnSe; ZnTe; ZnO - метод выращивания образцов с нанопроволоками;
2. алмазоподобные структуры - общие сведения о структуре и физических свойствах.

В **третьей главе** приведены экспериментальные результаты по изучению спектральных свойств структур на основе полупроводников  $A_2B_6$ : нанопроволок ZnTe, ZnSe, ZnO и квантовых точек CdSSe.

В **параграфе 3.1** показано, что резонансное комбинационное рассеяние света является эффективным методом исследования нанопроволок. Приведены спектры КРС для нанопроволок ZnTe, ZnSe и ZnO для разных энергий возбуждающего излучения, лежащих в диапазоне от 2.18 эВ до 2.8 эВ. Наблюдавшиеся LO-фононные повторения по-разному проявляют себя в резонансных и нерезонансных условиях.

В **п. 3.2.** исходя из сдвига пика краевой люминесценции оценены диаметры исследованных нанопроволок (рис.1). Оцененная величина диаметра составила 60А (для нанопроволок из ZnSe), что совпадает с результатами электронно микроскопических измерений.

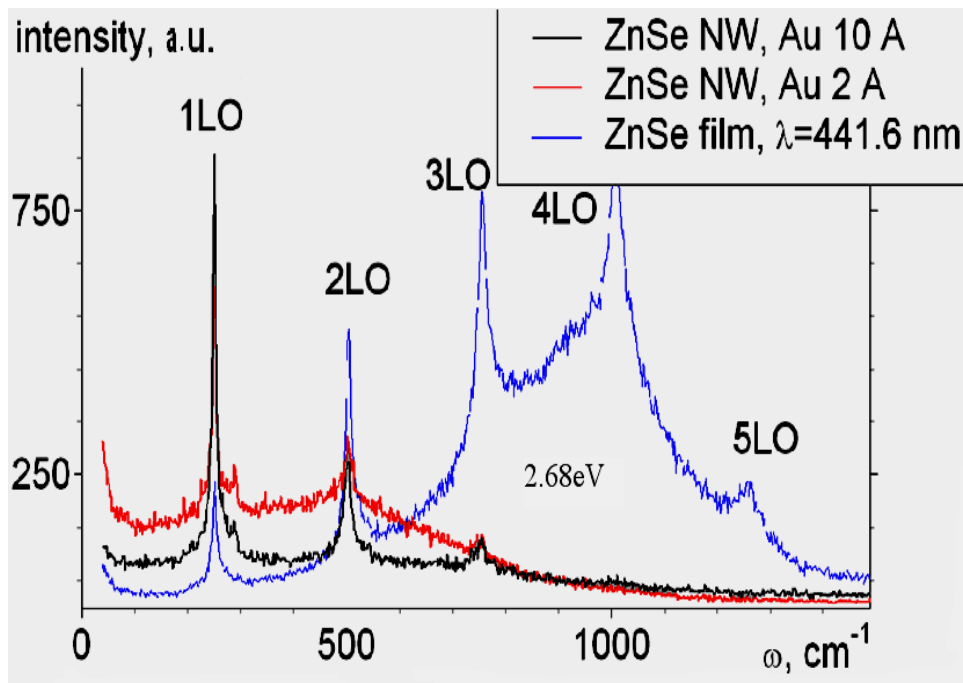


Рис. 1. Спектры «горячей» люминесценции для ZnSe пленки и образцов, содержащих нанопроволоки ZnSe с толщиной слоя катализатора 2А и 10А.

В п. 3.3 анализировалось отношение интенсивностей антистоксовых и стоксовых линий спектров «горячей» люминесценции квантовых проволок ZnTe при энергиях фотонов возбуждающего излучения 2.18, 2.33, 2.41 и 2.54 эВ (энергия 2.18 эВ меньше ширины запрещенной зоны). Отношение интенсивностей этих компонент в спектрах КРС определяется заселенностью колебательных состояний и описывается формулой:

$$I_{aS}/I_S = [(\omega_{\text{laser}} + \omega_{\text{LO}})/(\omega_{\text{laser}} - \omega_{\text{LO}})]^4 \exp(-\hbar\omega_{\text{LO}}/kT) \quad (1),$$

где  $I_{aS}$  – интенсивность антистоксовых линий и  $I_S$  – интенсивность соответствующих стоксовых линий. Зависимости отношения  $I_{aS}/I_S$  от рамановских сдвигов частоты линий, соответствующих mLO-фононным повторениям в спектрах «горячей» люминесценции, представлены в полулогарифмическом масштабе на рис.2. На этом рисунке также приведена теоретическая зависимость, рассчитанная по формуле (1). Сделано заключение о возможности использования выражения (1) не только для КРС, а и для описания спектров «горячей» люминесценции.

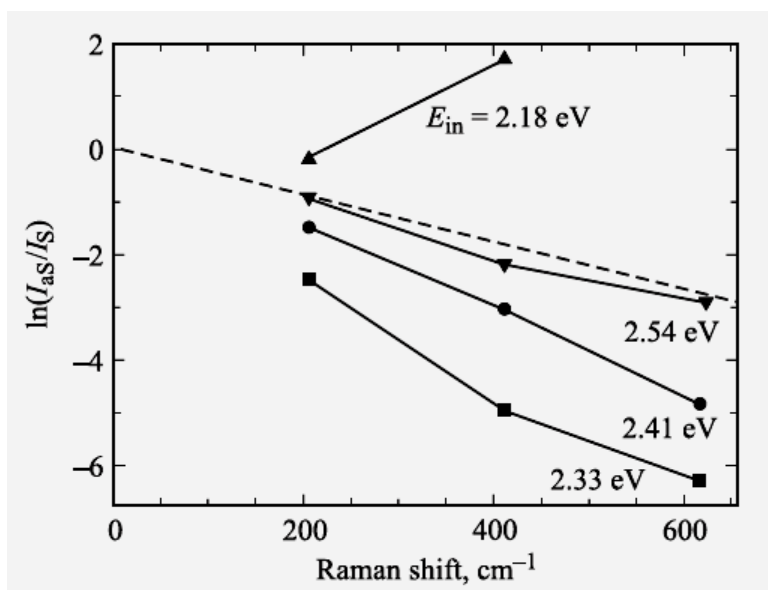


Рис.2. Отношение интенсивностей антистоксовых и стоксовых линий в зависимости от рамановских сдвигов частоты, соответствующих mLO-фононным повторениям, для различных энергий фотонов возбуждения квантовых проволок ZnTe. Штриховая линия – расчет по формуле (1).

Также при исследовании нанопроволок ZnTe и ZnSe обнаружен сдвиг частоты nLO-фононных повторений относительно значений  $n\hbar\omega_{LO}$  (рис.3), что описано в п. 3.4. главы 3. Обнаруженный эффект может быть объяснен взаимодействием фононов с темновыми носителями заряда (плазмон-фононное взаимодействие). Частотная зависимость плазмон-фононных мод от плазменной частоты описывается выражением:

$$\omega_{\pm}^2 = \left\{ (\omega_p^2 + \omega_{LO}^2) \pm \left[ (\omega_p^2 - \omega_{LO}^2)^2 + 4\omega_p^2(\omega_{LO}^2 - \omega_{TO}^2) \right]^{1/2} \right\} / 2 \quad (2)$$

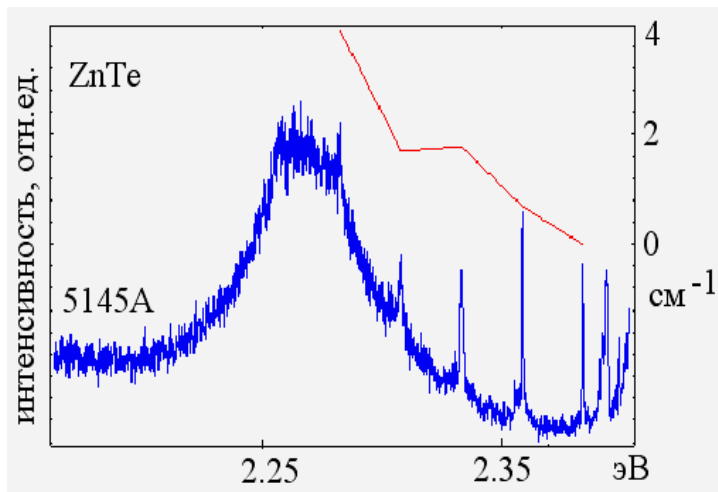


Рис.3 Спектр «горячей» лиминесценции и изменение частоты LO-фонона (верхняя кривая) в зависимости от номера пика.

По величине наибольшего сдвига с помощью выражения (2) оценена концентрация носителей. Для величины сдвига  $2 \text{ см}^{-1}$  получено значение  $(3 \pm 1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

В п.3.5 представлены результаты исследования коллоидных наночастиц CdSSe. Показано, что в спектре «горячей» люминесценции квантовых точек полосы, соответствующие продольным колебаниям, уширяются и смещаются в низкочастотную область относительно этих линий в объемном кристалле.

Заканчивается глава краткими выводами.

В четвертой главе анализируется релаксация возбуждений в сверхрешетках (AlAs-GaAs), нанопроволоках твердых растворов ZnMnTe и ZnMgTe, нанопроволоках ядро/оболочка ZnTe/ZnSe.

В п.4.1 спектр резонансного КРС сверхрешеток (AlAs-GaAs) из статьи [2] был проанализирован с применением каскадной модели рассеяния возбужденных электронов и вероятностным подходом при рассмотрении их релаксации в процессе миграции по сверхрешетке. Показана применимость каскадной модели для описания соотношения интенсивностей пиков, соответствующих LO-фононам, их обертонам, и пиков, отвечающих сумме продольных колебаний материалов AlAs и GaAs.

В п.4.2. описаны результаты экспериментального исследования нанопроволок из твердого раствора ZnMgTe (рис. 4а) и их обработка с применением каскадной модели рассеяния возбужденных электронов. Для анализа интенсивностей было произведено разделение контуров. Показано, что коэффициенты пропорциональности в отношении интенсивностей полос для n-го шага рассеяния можно получить из разложения  $((1-r)+r)^n$ , где  $r$  – вероятность рассеяния электрона на продольных фононах, соответствующих колебаниям ZnTe-подобной моды, а  $(1-r)$  вероятность рассеяния на фононах MgTe-подобной моды.

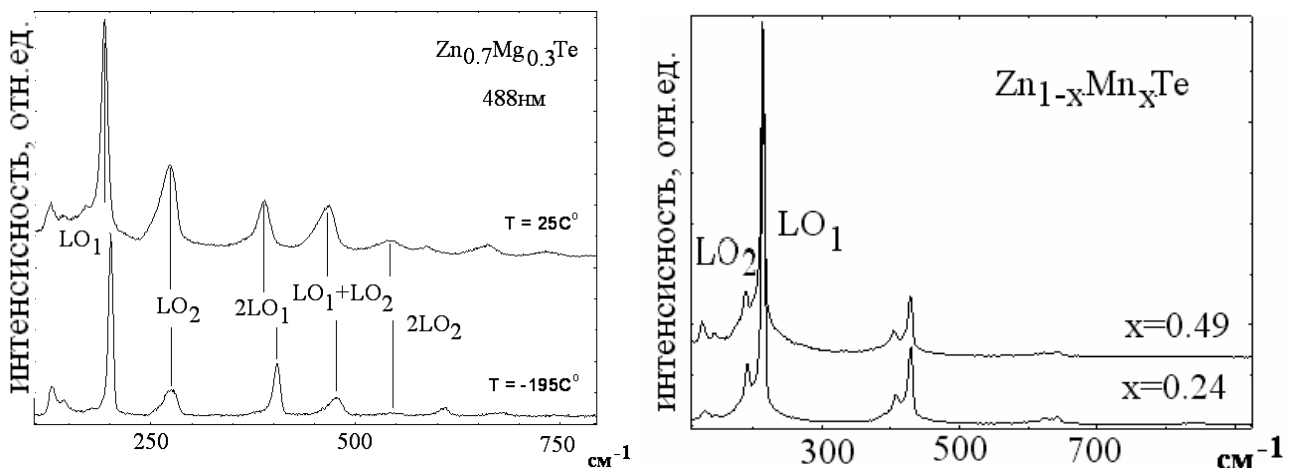


Рис. 4 Спектры «горячей» люминесценции нанопроволок ZnMgTe при двух температурах (а) и ZnMnTe для различных концентраций Mn (б) при возбуждении лазером с длиной волны 488 нм.

В **п.4.3** приведены результаты исследования спектров «горячей» люминесценции нанопроволок из твердого раствора ZnMnTe. Обнаружено относительное увеличение интенсивности низкочастотного пика в дублетах, отвечающих последовательным шагам релаксации (см. рис. 4б), с ростом  $n$  ( $n$  – номер шага или число LO фононов, испущенных перед актом рекомбинации). Показано, что подобное поведение так же хорошо описывается предложенной вероятностной моделью.

В **п.4.4** проведен анализ релаксации возбуждений по спектрам «горячего» излучения нанопроволок ядро/оболочка ZnTe/ZnSe для различных энергий квантов возбуждающего излучения. В спектрах наблюдались  $LO_{ZnSe}$  и  $LO_{ZnTe}$  пики, не проявляющиеся в спектрах безоболочечных нанопроволок ZnTe и ZnSe при тех же условиях возбуждения. Полученные экспериментальные результаты указывают на проникновение волновой функции неравновесных электронов из ядра в оболочку.

Заканчивается глава краткими выводами.

**Пятая глава** посвящена исследованию оптических свойств алмазоподобных структур с адсорбированными биологическими молекулами (лизоцим и гемоглобин).

В **п.5.1** на основании ранее сделанных экспериментов авторов работы [6] сформулированы задачи данного исследования.

В **п.5.2** представлены экспериментальные результаты экспериментального исследования свойств алмазоподобных подложек методами сканирующей электронной микроскопии и КРС.

В **п. 5.3** приведены результаты исследований фотолюминесценции алмазоподобных массивных подложек. Обнаружено изменение формы спектра люминесценции алмазных подложек при физической адсорбции лизоцима. Данный эффект можно объяснить исходя из предположения, что между алмазом, графитоподобными наночастицами, которые присутствуют на поверхности алмаза, и биологической молекулой происходит миграция возбужденных электронов. Свет поглощается графитоподобными

наночастицами. Возбуждение передается биологической молекуле, в которой теряется часть энергии, а затем возвращается в алмазоподобную структуру, где происходит излучательная рекомбинация. Таким образом, здесь, как и в экспериментах, описанных выше, наблюдается миграция фотовозбужденных электронов между нанообъектами.

**П.5.4** посвящен исследованию температурной зависимости спектров фотолюминесценции наноалмазов размером 300 нм, на которые адсорбировались биологические молекулы лизоцима или гемоглобина (рис.5). Сделан вывод о том, что изменение формы люминесцентного пика зависит от типа биологической молекулы и слабо зависит от температуры.

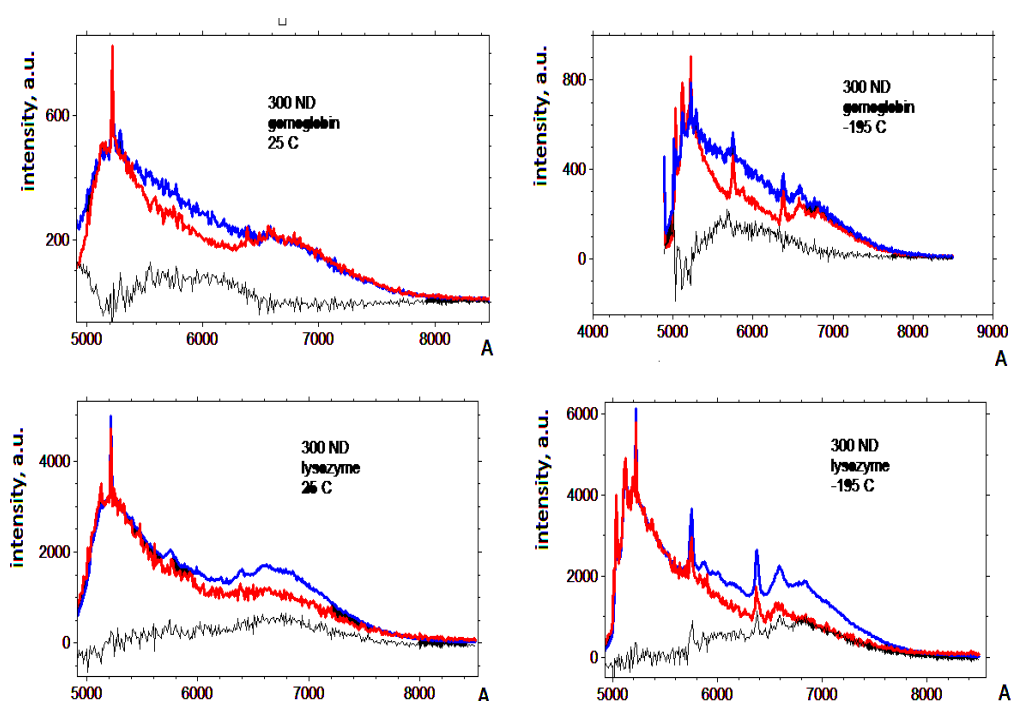


Рис. 5. Спектры ФЛ системы «наноалмаз + физически адсорбированная биологическая молекула» при разных температурах. Верхние кривые на каждом из рисунков соответствуют спектрам наноалмазов с адсорбированными на них молекулами. Средние кривые – спектры наноалмазов без нанесенных молекул. Нижние кривые - разности этих спектров.

Заканчивается глава краткими выводами.

В **заключении** сформулированы основные выводы работы.

1. Изучение спектров КРС и «горячей» люминесценции нанообъектов (нанопроволоки, квантовые точки) на основе полярных полупроводников A2B6 (ZnSe, ZnTe, ZnO и их твердые растворы) позволило сделать вывод о том, что «горячая» люминесценция является более чувствительным методом для исследования оптических фононов, чем КРС.



2. Обнаружено перераспределение (по отношению к объемному материалу) интенсивностей LO-фононных повторений в нанопроволоках ZnSe, связанное с изменением ширины запрещенной зоны из-за квантово-размерного эффекта.
3. Показано, что в спектрах «горячей» люминесценции соотношение интенсивностей стоксовых и антистоксовых LO-фононных повторений при возбуждении вдали от резонанса, полученное из экспериментальных данных, находится в согласии с классическим выражением, описывающим это отношение в спектрах КРС.
4. Установлено, что при уменьшении диаметра коллоидных наночастиц CdSSe до 2 нм линии, соответствующие продольным оптическим фононам в спектре резонансного КРС, начинают уширяться и сдвигаться в низкочастотную область.
5. Выявлено, что в нанопроволоках (ZnTe, ZnSe) частоты фононных повторений в спектрах люминесценции при их наложении на полосу краевого излучения претерпевают сдвиг, величина которого зависит от номера фононного повторения. Этот эффект объяснен взаимодействием продольных фононов с темновыми носителями заряда.
6. Предложена основанная на каскадном механизме испускания оптических фононов вероятностная модель для описания отношения интенсивностей LO-фононных повторений с энергиями, заметно превышающими ширину запрещенной зоны, хорошо описывающая полученные экспериментальные данные и результаты других работ по «горячей» люминесценции.
7. Найдено, что при возбуждении ядра нанопроволок ядро/оболочка ZnTe/ZnSe наблюдается вторичное излучение с испусканием продольных оптических фононов как ядра, так и оболочки. Проявление фононов оболочки связано с проникновением волновой функции электронов в потенциальный барьер (в оболочку).

8. Обнаружено изменение спектра фотолюминесценции массивных алмазоподобных пленок и наноалмазов при физической адсорбции биологических молекул (лизоцим, гемоглобин). Изменение формы люминесцентного пика наноалмазов зависит от типа биологической молекулы и слабо зависит от температуры. Эффект объясняется миграцией возбужденных электронов графитоподобного приповерхностного слоя в биологические молекулы.

#### **Список публикаций по теме диссертации.**

- 1) Н.Н.Мельник, В.С.Виноградов, И.В.Кучеренко, Г.Карчевски, О.С.Пляшечник, Каскадные процессы при неупругом рассеянии света в структурах с нанопроволоками ZnSe // Физика твердого тела, 2009, Том 51, вып. 4, с. 787-790
- 2) А.Е.Раевская, Г.Я.Гродзюк, А.В.Коржак, А.Л.Строюк, С.Я.Кучмий, В.Н.Джаган, М.Я.Валах, В.Ф.Плюснин, В.П.Гривин, Н.Н.Мельник, Т.Н.Заварицкая, И.В.Кучеренко, О.С.Пляшечник, Получение и оптические свойства коллоидных квантовых точек CdSe и CdS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>, стабилизированных полиэтиленгликолем // Теоретическая и экспериментальная химия, 2010, Том 46, № 6, с. 397-402
- 3) Мельник Н.Н. Заварицкая Т.Н., Кучеренко И.В., Пляшечник О.С., Валах М.Я., Джаган В.Н., Раевская А.Е., Резонансное комбинационное рассеяние света в ультрамалых коллоидных частицах CdS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> // КСФ, 2011, т.38, № 2, с. 30-37
- 4) Н.Н.Мельник, Т.Н.Заварицкая, И.В.Кучеренко, E.Janik, Wojtowicz, О.С.Пляшечник, Проявление резонанса по рассеянному свету в стоксовых и антистоксовых спектрах квантовых проволок ZnTe и ZnMgTe // ФТТ, 2011, т.53, вып.8, с. 1635-1639
- 5) Volodymyr Dzhagan, Nikolai Mel'nik, Olexandra Rayevska, Galyna Grozdyuk, Viktor Strel'chuk, Olga Plyashechnik, Stepan Kuchmii, and Mykhailo Valakh, Vibrational Raman spectra of CdS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> magic-size nanocrystals // Phys. Status Solidi RRL, 2011, 5, №7 p. 250-252

- 6) Виноградов В.С., Джаган В.Н., Заварицкая Т.Н., Кучеренко И.В., Мельник Н.Н., Новикова Н.Н., Janik E., Wojtowicz T., Пляшечник О.С., Zahn D.R.T., Оптические фононы в объеме и на поверхности нанопроволок ZnO и ZnTe/ZnO в спектрах комбинационного рассеяния света // ФТТ, 2012, т.54, вып.10 с. 1956-1962
- 7) Н.Н. Мельник, Д.Ю. Коробов, Ю.А. Коробов, О.С. Пляшечник, В.В. Савранский, Спектры комбинационного рассеяния света карбинофуллереновых структур // КСФ, 2013, т. 40, вып. 7, с. 24-28
- 8) О.С. Пляшечник, Н.Н. Мельник, Комбинационное рассеяние света на ZnSe нанопроволоках // 10-я Всероссийская конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Россия, Санкт-Петербург, 1 – 5 декабря 2008, Тезисы конференции, с. 69
- 9) Н.Н. Мельник, И.В. Кучеренко, В.С. Виноградов, О.С. Пляшечник, Оптические исследования наноструктур на основе полупроводников типа A2B6 // Комбинационное рассеяние. 80 лет исследований. Международная конференция, Россия, Москва, 8 – 10 октября 2008, Тезисы конференции, с. 44
- 10) О.С. Пляшечник, Н.Н. Мельник, Оптическое измерение полупроводниковых нанопроволок A2B6 // 11-я Всероссийская конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Россия, Санкт-Петербург, 30 ноября - 4 декабря 2009, Тезисы конференции, с. 72
- 11) N.N.Melnik, V.S.Vinogradov, I.V.Kucherenko, G.Karchevski, O.S.Plyashechnik, Optical studies of A2B6 semiconductor nanowires // 19 International School – Seminar “Spectroscopy of molecules and crystals”, Beregovoe, Crimea, Ukraine, September 20 – 27, 2009, Book of abstract, p. 191
- 12) В.С. Виноградов, Т.Н. Заварицкая, Г. Карчевски, И.В. Кучеренко, Н.Н. Мельник, О.С. Пляшечник, Особенности «горячей люминесценции» в твердых растворах и низкоразмерных полупроводниковых структурах // 24 Съезд по спектроскопии, Россия, Троицк, 28 февраля – 5 марта 2010, Тезисы конференции, с. 131

- 13) Пляшечник О.С., И.В. Кучеренко, Т.Н. Заварицкая, Н.Н. Мельник, Исследование нанопроволок на основе полупроводников A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> методом комбинационного рассеяния света // Конференция-конкурс молодых физиков, Россия, Москва, 19 апреля 2010, Тезисы конференции, с. 45
- 14) Н.Н.Мельник, О.С.Пляшечник, Т.Н.Заварицкая, И.В.Кучеренко, Оптическое измерение полупроводниковых нанопроволок A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> // 13-я Всероссийская научная школа для молодежи «Актуальные проблемы физики и 4-я Школа-семинар «Инновационные аспекты фундаментальных исследований», Россия, Звенигород, 14 – 19 ноября 2010, Сборник трудов, с. 179-180
- 15) Н.Н.Мельник, И.В. Кучеренко, Т.Н. Заварицкая, О.С. Пляшечник, T. Wojtowicz, E. Janic, Резонансное рассеяние света в нанопроволоках ZnTe, ZnMnTe // XV Международный Симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», Россия, Нижний Новгород, 14 – 18 марта 2011, Сборник трудов, с. 514 – 515
- 16) Джаган В.Н., Валах М.Я., Мельник Н.Н., Пляшечник О.С., Раевская А.Е., Гродзюк Г.Ю., Стрюк А.Л., Кучмий С.Я., Фононные спектры ультрамалых коллоидных наночастиц полупроводников A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> // Международный симпозиум Нанофотоника-2011, Кацевели, Крым, Украина, 3-8 октября, 2011, Тезисы докладов, у-27.
- 17) Dzhagan V., Mel'nik N.N, Yaremko A., Plyashechnik O.S, Rayevska O., Grozdyuk G., Vibrational Raman spectroscopic study of polyethyleneimine-stabilized CdS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> nanoclusters // XIth International Conference on Molecular Spectroscopy, Wroclaw-Kudowa Zdroj, Poland, September 17-21, 2011, Book of abstract, p. 101
- 18) Мельник Н.Н., Пляшечник О.С., Переведенцева Е.В., Взаимодействие биологических молекул с алмазоподобными структурами // 14 Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», Россия, Звенигород, 11 – 15 ноября 2012, Сборник трудов, с. 195
- 19) Н.Н. Мельник, О.С. Пляшечник, А.Е. Алексенко, Б.В. Спицин, Е.В. Переведенцева, С.-L. Cheng, Исследование взаимодействия биологических молекул с алмазоподобными структурами // Всероссийская конференция

«Комбинационное рассеяние – 85 лет исследований» и 4-й Сибирский семинар «Спектроскопия комбинационного рассеяния света», Россия, Красноярск, 26-29 августа 2013, Сборник трудов, с. 37 – 38

20) Elena Perevedentseva, Artashes Karmenyan, Nikolai Melnik, Jani Mona, Denis Shepel, Yu-Chung Lin, Lin-Wei Tsai, Olga Plyashechnik and Chia-Liang Cheng, Surface effects on nanodiamond photoluminescence // the 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, September 16-20, 2013, Abstracts, 17p-PM3-5

### **Список цитированной в автореферате литературы:**

[1] N. N. Melnik, Yu. G. Sadofyev, T. N. Zavaritskaya and L. K. Vodop'yanov, Multiphonon relaxation in ZnSe thin films and ZnSe/ZnCdSe MQW structures // *Nanotechnology*, 2000, 11, p.252–255.

[2] А.М.Бордин, М.Я.Валах, В.И.Гавриленко, М.П.Лисица, А.П.Литвинчук, В.Г.Литовченко, К.Плоог, Многофононное резонансное комбинационное рассеяние света и эффекты туннелирования электронных возбуждений в короткопериодных сверхрешетках GaAs- AlAs // *Письма в ЖЭТФ*, 1990, том 51, вып.3, стр. 157-160.

[3] N.N. Melnik , T.N. Zavaritskaya , V.A. Karavanski, Surface and bulk states of disordered carbon and their optical properties // *Proc. SPIE*, 2004, Vol.5507, pp. 103-109.

[4] Н.Н. Мельник, Комбинационное рассеяние – 80 лет исследований: коллективная монография // Москва, ФИАН, 2008, с. 147-162

[5] В.А. Караванский, Н.Н. Мельник, Т.Н. Заварицкая // *Письма в ЖЭТФ*, 2001, том 74, вып. 3, с. 204-208.

[6] E. Perevedentseva, N. Melnik, C.-Y. Tsai, Y.-C. Lin, M. Kazaryan, and C.-L. Cheng, Effect of surface adsorbed proteins on the photoluminescence of nanodiamond // *Journal of Applied Physics*, 2011, 109, 034704

[7] Питер Ю, Мануэль Кардона, Основы физики полупроводников // Москва, Физматлит, 2002, с. 364-365.