

ПРИДНЕСТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Т.Г. ШЕВЧЕНКО

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

СТАРЧУК Александр Сергеевич

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ
СТРУКТУРАХ

Специальность: 01.04.10 –

Физика полупроводников

автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ТИРАСПОЛЬ – 2006

Работа выполнена в Приднестровском государственном университете
им. Т.Г. Шевченко, г. Тирасполь

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор **Берил Степан Иорданович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Звягин Игорь Петрович**,
кандидат физико-математических наук,
доцент **Никитенко Владимир Роленович**

Ведущая организация: ФИАН им. П.Н. Лебедева,
г. Москва

Защита состоится “7” декабря 2006 г. в 16 час. на заседании
диссертационного Совета Д-501.001.70 при Московском государственном
университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2 г. Москва,
Ленинские горы, физический факультет МГУ, ауд. 2-05 ^А криогенного
корпуса

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического
факультета МГУ.

Автореферат разослан “ 1 ” ноября 2006 года

Ученый секретарь диссертационного
Совета Д-501.001.70 МГУ им. М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук,
профессор

Г.С. ПЛОТНИКОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Квантование электронного спектра сильно меняет характер физических процессов, и роль процессов квантования электронного спектра в наносистемах была хорошо и глубоко изучена. В то же время, в наносистемах меняется также и колебательный спектр – кроме объемных, появляются поверхностные моды. Для наносистем из полярного вещества последние оказывают очень сильное воздействие на кулоновское взаимодействие электронов и дырок, а также на их собственные состояния в этих системах (поляронный эффект).

Как показано в диссертационной работе, правильное объяснение оптических спектров в таких системах и экспериментальных измерений энергий состояния электрон-электронного и электрон-дырочного взаимодействий может быть дано только с учетом перенормировки как электронного, так и колебательного спектров, несмотря на сложность математических расчетов.

Использованные ранее модели с приближенными гамильтонианами электрон-фононного взаимодействия не могли вскрыть роль поляризационных размерных эффектов, а также влияние соседних сред на электрон-дырочно-фононные состояния в наноструктурах различной геометрии (квантовые ямы, квантовые нити, квантовые точки и т.д.). Точные гамильтонианы позволили всесторонне исследовать эти явления и предсказать возможность их прикладного использования для создания новых электронных приборов.

Объекты исследования. В работе теоретически исследованы кинетические свойства одиночных квантовых ям на основе $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, вольтамперная характеристика контакта металл-диэлектрик и экситонные состояния в квантовых нитях.

Подписано в печать 10.10.06
Тираж 100 экз. Заказ №121.

Отпечатано в РИО ПГУ им. Т.Г. Шевченко,
г. Тирасполь

Целью работы является: исследование эффектов электрон-фононного взаимодействия в квантово-размерных структурах: квантовых ямах, на контакте металл-диэлектрик и в квантовых нитях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Учет перенормировки спектра оптических фононов в полярном слое приводит к корректным зависимостям от толщины слоя коэффициента рассеяния и скорости релаксации импульса носителя заряда для рассеяния на полярных оптических фононах в квантовых ямах.
2. При расчете коэффициента поглощения света свободными носителями заряда в полярных полупроводниковых квантовых ямах с участием поверхностных и объемных продольных оптических фононов необходимо учитывать перенормировку спектра оптических фононов в полярном слое.
3. Влияние квантового характера сил изображения на вольтамперную характеристику контакта металл-диэлектрик сводится к эффективному изменению работы выхода электрона (в случае контакта кристалл – вакуум) и величины барьерной разности потенциалов (в случае контакта двух кристаллов).
4. Учет вкладов от оптических фононов в энергию связи поляронного экситона существенно улучшает согласие теории и эксперимента.

Научная новизна

Получены выражения для коэффициента рассеяния и скорости релаксации импульса носителя заряда для рассеяния на полярных оптических фононах в квантовых ямах с учетом перенормировки спектра полярных оптических фононов в полярном слое, которые приводят к корректным зависимостям от толщины слоя.

11. Берил С.И., Покатилов Е.П., Старчук А.С.; «Кулоновское взаимодействие и экситоны Ванье-Мотта в полярных полупроводниковых квантовых нитях», *Вестник Приднестровского университета*, № 2, стр. 84 – 93 (2004)

12. Берил С.И., Старчук А.С.; «ИК-поглощение свободными носителями заряда с участием оптических фононов в структурах с квантовыми ямами»// *Физика твердого тела*, Т. 47, вып. 9, стр. 1698 – 1703 (2005)

13. С.И. Берил, И.Г. Стамов, Д.В. Ткаченко, В.В. Панасенко, С.Ю. Дубашевский, А.С. Старчук; «Фотоэлектрические свойства и перенос заряда в структурах металл-полупроводник на основе дифосфидов цинка и кадмия», II Международная конференция по физике электронных материалов, 24 – 27 мая, Калуга, Т. 2, стр. 131 – 133 (2005)

14. С.И. Берил, А.С. Старчук; «Влияние квантовых сил изображения на туннельные характеристики структуры металл-диэлектрик-металл», II Международная конференция по физике электронных материалов, 24 – 27 мая, Калуга, Т. 1, стр. 47 – 48 (2005)

15. С.И. Берил, А.С. Стамов, А.С. Старчук; «Влияние квантовых сил изображения на барьерный потенциал Шоттки в сильных электрических полях», В сб.: Математическое моделирование в образовании, науке и производстве. Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции (5 – 9 июня 2005 г.), Тирасполь, РИО ПГУ, стр. 55 (2005)

16. А.С. Старчук; «Биполярные состояния в цилиндрических квантовых структурах», В сб.: Математическое моделирование в образовании, науке и производстве. Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции (5 – 9 июня 2005 г.), Тирасполь, РИО ПГУ, стр. 70 (2005)

17. С.И. Берил, Е.П. Покатилов, А.С. Старчук. Кулоновское взаимодействие и экситоны Ванье-Мотта в полярных полупроводниковых квантовых нитях// *Вестник Московского университета*, сер. 3 Физика и астрономия (в печати).

4. Берил С.И., Покатилов Е.П., Старчук А.С.; «Биполярные состояния в квантовой нити», В сб.: Математические методы в образовании, науке и производстве. Тезисы докладов II Международной научно – практической конференции (27 – 30 июня 2001 г.), Тирасполь, РИО ПГУ, стр. 199 – 201 (2001)
5. Beril S.I., Sokovnich S.M., Starchuk A.S.; «Electron scattering by polarization optical vibrations in quantum well structures», Inf. conf. on materials science and matter physics. Chişinău, Moldova, July, 5 – 7, p. 86 (2001)
6. Beril S.I., Sokovnich S.M., Starchuk A.S.; «IR-Light absorption by free charge carriers with participation of phonons in structures with quantum wells», Inf. conf. on materials science and matter physics. Chişinău, Moldova, July, 5 – 7, p. 89 (2001)
7. Берил С.И., Старчук А.С.; «Проявление квантовых сил изображения электрона в авто- и термоэлектронной эмиссии на границе металл-диэлектрик», *Вестник Московского университета*, сер. 3 Физика и астрономия, № 5, стр. 46 – 49 (2002)
8. Берил С.И., Покатилов Е.П., Старчук А.С.; «Кулоновское взаимодействие в цилиндрических структурах», Международная конференция по физике электронных материалов, ФИЭМ 02, Калуга, Россия, 1 – 4 октября, стр. 1 (2002)
9. Берил С.И., Старчук А.С.; «Полярные состояния и эффекты самовоздействия в цилиндрических полярных структурах», В сб.: Математическое моделирование в образовании, науке и производстве. Тезисы докладов III Международной научно-практической конференции (17 – 20 сентября 2003 г.), Тирасполь, РИО ПГУ, стр. 96 (2003)
10. Берил С.И., Покатилов Е.П., Старчук А.С.; «Рассеяние электронов поляризационными оптическими колебаниями в структурах с квантовыми ямами», *Известия ВГПУ*, № 3, (04), стр. 27 – 36 (2003)

Получены выражения для коэффициента поглощения света свободными носителями заряда в полярных полупроводниковых квантовых ямах с участием поверхностных и объемных продольных оптических фононов с учетом перенормировки спектра оптических фононов в полярном слое. Результаты расчетов дают правильные асимптотические зависимости от толщины полярного слоя благодаря учету точного гамильтониана электрон-фононного взаимодействия.

Показано, что влияние квантового характера сил изображения на вольтамперную характеристику контакта металл-диэлектрик сводится к эффективному изменению работы выхода электрона (в случае контакта кристалл – вакуум) и величины барьерной разности потенциалов (в случае контакта двух кристаллов).

Рассчитаны энергия связи полярного экситона и полярные вклады в перенормировку ширины запрещенной зоны в полярной квантовой нити, помещенной в неполярную среду, с учетом размерного эффекта потери инерционной экранировки. Показано, что учет вкладов от оптических фононов существенно улучшает согласие теории и эксперимента.

Практическая значимость

Результаты работы можно применить при проектировании и создании новейших электронных и оптоэлектронных систем, применения развитой теории для описания ряда экспериментальных результатов по экситонному поглощению света в квантовых нитях и измерению вольтамперных характеристик на контакте металл-диэлектрик и в МДП-структурах.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде международных научных конференций: Международная научно-практическая конференция (28 июня – 1 июля 1999 г.); Тирасполь, Юбилейная конференция профессорско-

преподавательского состава, посвященная 70-летию ПГУ им. Т. Г. Шевченко, Тирасполь, 2000 г.; Inf. conf. on materials science and matter physics. Chişinău, Moldova, July, 5 – 7, 2001; II Международная научно-практическая конференция (27 – 30 июня 2001 г.), Тирасполь; Международная конференция по физике электронных материалов ФИЭМ 02, Калуга, Россия, 1 – 4 октября 2002 г.; III Международная научно-практическая конференция (17 – 20 сентября 2003 г.), Тирасполь; II Международная конференция по физике электронных материалов, 24 – 27 мая 2005 г., Калуга; IV Международная научно-практическая конференция (5 – 9 июня 2005 г.), Тирасполь; а также на научных семинарах кафедры общей физики и молекулярной электроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, отделения физики твердого тела ФИАН им. П.Н. Лебедева, физико-математического факультета ПГУ им. Т.Г. Шевченко и на научно-исследовательских конференциях профессорско-преподавательского состава ПГУ им. Т.Г. Шевченко (2001 – 2006 гг.).

Достоверность результатов теоретических исследований, полученных в диссертационной работе, обеспечена адекватностью выбора соответствующих физических моделей, надежностью аналитических и численных математических методов, положительно зарекомендовавших себя при решении близких по тематике задач. Результаты теоретических расчетов лучше согласуются с экспериментальными данными, чем имевшие место в других исследованиях.

Публикации. Содержание работы отражено в 17 публикациях. Список опубликованных работ, в котором отражены основные результаты диссертации, приведен в конце автореферата.

7. Показано, что влияние квантового характера сил изображения эффекта сводится к эффективному изменению работы выхода электрона (в случае контакта кристалл – вакуум) и величины барьерной разности потенциалов (в случае контакта двух кристаллов).
8. Рассчитаны энергия связи поляронного экситона и поляронные вклады в перенормировку ширины запрещенной зоны в полярной квантовой нити, помещенной в неполярную среду, с учетом размерного эффекта потери инерционной экранировки.
9. Показано, что учет вкладов от оптических фононов существенно улучшает согласие теории и эксперимента при определении пика экситонного поглощения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Берил С.И., Старчук А.С.; «Критерии асимптотической аппроксимации туннельного тока в проблеме термо- и автоэлектронной эмиссии», в сб.: Математические методы в образовании, науке и промышленности. Тезисы докладов Международной научно-практической конференции (28 июня – 1 июля 1999 г.), Тирасполь, РИО ПГУ, стр. 45 (1999)
2. Берил С.И., Покатилов Е.П., Старчук А.С.; «Рассеяние электронов полярными оптическими колебаниями в структурах с квантовыми ямами». *Вестник Приднестровского университета*, № 2, стр. 28 – 38 (1999)
3. Берил С.И., Покатилов Е.П., Старчук А.С.; «Проявление квантовых сил самовоздействия в авто- и термоэлектронной эмиссии на границе металл-диэлектрик», *Материалы юбилейной конференции преподавательского состава, посвященной 70-летию ПГУ им. Т. Г. Шевченко*, Тирасполь, РИО ПГУ, стр. 189 – 195(2000)

полученных результатов при проектировании и создании новейших электронных и оптоэлектронных систем.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Получены выражения для коэффициента рассеяния и скорости релаксации импульса носителя заряда для рассеяния на полярных оптических фононах в квантовых ямах с учетом перенормировки спектра оптических фононов в полярном слое, которые приводят к корректным зависимостям от толщины слоя.
2. Показано, что величиной вкладов в рассеяние на поверхностных оптических фононах можно «управлять» специальным подбором параметров граничащих сред.
3. Получены выражения для коэффициента поглощения света свободными носителями заряда в полярных полупроводниковых квантовых ямах с участием поверхностных и объемных продольных оптических фононов с учетом перенормировки спектра оптических фононов в полярном слое.
4. Показано, что в области малых толщин результаты диссертационной работы дают физически корректные результаты для вероятности поглощения и коэффициента поглощения света.
5. Показано, что подбором вещества соседних слоев с большими значениям диэлектрических проницаемостей можно существенно уменьшить коэффициент поглощения света в квантовой яме.
6. С учетом квантового характера сил изображения рассчитана вольтамперная характеристика контакта металл-диэлектрик. Получены предельные формулы Фаулера – Нордгейма для автоэлектронной эмиссии и Ричардсона – Шоттки для термоэлектронной эмиссии.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, одной обзорной и трех оригинальных глав, заключения и списка цитированной литературы из 117 наименований. Работа изложена на 117 страницах, включая 16 рисунков и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность тематики диссертационной работы, описаны изучаемые объекты исследований, сформулированы цели и задачи работы, методы исследований, новизна и практическая значимость работы, а также выносимые на защиту положения. Приводятся сведения об апробации и данные о количестве публикаций по теме работы.

В первой главе диссертационной работы представлен краткий обзор исследований по теме диссертации.

В последующих оригинальных главах детально рассмотрены кинетические характеристики носителей заряда в квантовой яме с учетом взаимодействия с поверхностными и объемными фононами, влияние электрон-фононного взаимодействия на вольтамперную характеристику контакта металл-диэлектрик и экситонные состояния в квантовой нити.

Во второй главе получены выражения для коэффициента рассеяния и скорости релаксации импульса носителя заряда для рассеяния на полярных оптических фононах в квантовых ямах, основанные на точном гамильтониане электрон-фононного взаимодействия Берила – Покатилова – Фомина, учитывающем перенормировку не только электронного спектра, обусловленную эффектом размерного квантования, но и спектра оптических фононов в полярном слое. Последний находится при помощи процедуры квантования спектра нормальных колебаний в рассматриваемой структуре. По теоретическим результатам проведены численные расчеты, и их результаты сравниваются с экспериментальными данными и результатами,

полученными в рамках других теоретических моделей, не учитывающих перестройку спектра оптических колебаний. Показано, что выводы, следующие из результатов настоящей работы, согласуются с экспериментальными данными и дают корректные размерные зависимости рассчитанных величин, в отличие от результатов других исследований. Кроме того, показано, что величиной вкладов в рассеяние на поверхностных оптических фононах можно «управлять» специальным подбором параметров граничащих сред.

Далее в этой же главе теоретически исследовано ИК-поглощение света свободными носителями заряда в полярных полупроводниковых квантовых ямах с участием поверхностных и объемных продольных оптических фононов на основе точного гамильтониана электрон-фононного взаимодействия, полученного Бериллом, Покатиловым, Фоминым. Показано, что, как и в случае рамановского рассеяния, в оптическом спектре поглощения появляются дополнительные пики, обусловленные поверхностными фононами. В результате анализа численных расчетов показано, что в области малых толщин результаты вычислений вероятности поглощения света с использованием объемного гамильтониана Фрелиха дают физически некорректные результаты для вероятности поглощения и коэффициента поглощения света, в отличие от результатов настоящей диссертационной работы; сделан вывод о возможности фотон-фононного резонанса для структур с квантовыми ямами из неполярного материала, граничащими с соседними полярными слоями, благодаря существованию поверхностных оптических фононов; показано, что подбором вещества соседних слоев с большими значениями диэлектрических проницаемостей можно существенно уменьшить коэффициент поглощения света в квантовой яме.

В третьей главе рассмотрено проявление квантовых сил изображения в авто- и термоэлектронной эмиссии на границе металл-

диэлектрик. Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что квантовая природа сил изображения начинает заметно проявляться в полях $F > 10^6$ В/см. Как в случае автоэлектронной эмиссии, так и для термоэлектронной эмиссии влияние этого эффекта сводится к эффективному изменению работы выхода электрона (в случае контакта кристалл – вакуум) и величины барьерной разности потенциалов (в случае контакта двух кристаллов).

Показано, что, как и при классическом описании сил изображения, при учете их квантового характера остаются справедливыми формулы Фаулера – Нордгейма (автоэлектронная эмиссия) и Ричардсона – Шоттки (термоэлектронная эмиссия), однако в области значений полей, при которых ширина туннельного потенциального барьера сравнима по порядку величины с радиусом электронного полярона ($F \sim 5 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^7$ В/см), отклонение в плотности тока, от результатов, полученных по точной формуле, составляет $\sim 10 \div 20$ %.

В четвертой главе рассмотрены экситонные состояния в квантовых нитях. Вариационным методом на основе гамильтониана электрон-фононного взаимодействия, полученного при помощи корректной процедуры квантования поляризационных оптических мод в цилиндрической структуре, рассчитаны энергия связи поляронного экситона и поляронные вклады в перенормировку ширины запрещенной зоны в полярной квантовой нити, помещенной в неполярную среду, с учетом размерного эффекта потери инерционной экранировки. Проведено сравнение теории с экспериментом для квантовых нитей селенида кадмия и арсенида галлия в диэлектрической матрице из хризотиласбеста. Из сравнения теоретических и экспериментальных данных показано, что учет вкладов от оптических фононов существенно улучшает согласие теории и эксперимента.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе, и сделан вывод о перспективности применения