ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Վիգեն Լևոնի Ազիզ Աղչեգալա

ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ՆԱՆՈԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ԵՎ ԽԱՌՆՈՒԿԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿՆԵՐԻ ՎՐԱ ՓՈԽԱԴԱՐՁ ԴԻՖՈՒԶԻԱՅԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄ

Ա. 04. 10 – «Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ - 2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Азиз Ахчегала Виген Левонович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ И ПРИМЕСНЫЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01. 04. 10 - "Физика полупроводников"

ЕРЕВАН – 2011

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ, ֆիզ. մար. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Ա.Ա. Կիրակոսյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ՀՀ ԳԱԱ թղթակից անդամ ֆիզ. մար. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Ս.Գ. Պետրոսյան (ՌՀ(Ս)Հ), ֆիզ. մար. գիտ. դոկտոր Ս.Լ. Հարությունյան (ՀՊՃՀ, Գյումրու մասն.)

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Պաշտպանությունը տեղի կունենա 2012թ. հունվարի **25**-ին, ժամը 15^{00} -ին Երևանի պետական համալսարանի 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցեն՝ 0025, Երևան, Ա. Մանուկյան 1

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրը ցրված է 2011թ. դեկտեմբերի 25-ին

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝ ֆիզ. մար. գիտ. թեկնածու, դոցենտ Վ.Պ. Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете

Научный руководитель: член корр. НАН РА, доктор физ. мат. наук, профессор А.А. Киракосян

Официальные оппоненты: член корр. НАН РА, доктор физ. мат. наук, профессор С.Г. Петросян (РА(С)У), доктор физ. мат. наук С.Л. Арутюнян (ГИУА, Гюмрийский фил.)

Ведущая организация: Институт радиофизики и электроники НАН РА

Защита состоится 25-го января 2012г. в 15^{00} часов на заседании специализированного совета 049 Ереванского государственного университета по адресу: 0025, Ереван, ул. А. Манукяна 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 25-го декабря 2011 г.

Ученый секретарь специализированного совета — **кандидат физ. мат. наук, доцент В.П. Калантарян**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Достижения современных технологий предоставляют широкие возможности создания нанообъектов – низкоразмерных полупроводниковых систем, основанных на гетероструктурах, линейные размеры неоднородностей которых сопоставимы с дебройлевской длиной волны квазичастиц (электронов, дырок, экситонов, фононов, поляронов и др.) в них [1-4]. Важной особенностью нанообъектов является возможность манипулирования в широких пределах их физическими, в частности, кинетическими и оптоэлектронными свойствами посредством контролирования их размеров и геометрической формы, имплантации примесных центров, а также с помощью внешних воздействий, таких, как электрическое и магнитное поля, деформации, термический отжиг и т.д [5,6].

Основное различие между системами, состоящими из нескольких квантовых ям (КЯ) или квантовых точек (КТ) и сверхрешетками (СР) – это наличие квантового взаимодействия потенциальных ям. В СР, где барьеры, разделяющие КЯ или КТ, достаточно тонкие, ямы взаимодействуют посредством туннелирования частиц через барьеры, вследствие чего происходит гибридизация локализованных уровней и образование минизон, что было продемонстрировано экспериментально для ряда систем [7].

Двойные КЯ (ДКЯ) играют важную роль в исследованиях коррелированных электронных состояний двумерных электронных систем [8] и практически важны при проектировании и создании новых полевых транзисторов, благодаря возможности увеличения их функциональности посредством контролирования процессов переноса электрона между КЯ. Кроме того, исследование оптических свойств ДКЯ имеет важное применение, в частности, в лазерах на квантовых ямах [9].

За последние несколько лет проблемы резонансного туннелирования стали предметом детального изучения [10,11]. Квантовые состояния, в кото-

рых время жизни электрона намного больше по сравнению с временами жизни в других состояниях, часто называются квазисвязанными состояниями (КСС). Методы для получения КСС в одномерных резонансных структурах, основанные на приближнии трансфер-матрицы и комплексной энергии, были развиты в ряде работ [12,13]. Приближение комплексной энергии является очень эффективным и точным методом нахождения не только связанных состояний и узких резонансов, но и широких и перекрывающихся резонансных уровней.

Многие экспериментальные работы посвящены исследованию методов послеростовой обработки наносистем, основанных на взаимной диффузии составляющих компонент в области гетероперехода, какими являются быстрый термический отжиг, имплантация ионов и протонов [14]. Взаимная диффузия составляющих компонент гетероперехода приводит к его сглаживанию и, как следствие, к значительному изменению зонной структуры рассматриваемой системы [15-17]. В частности, в системах со многими КТ диффузия приводит к сужению распределения по размерам КТ и, следовательно, к сужению спектров поглощения и фотолюминесценции [18].

Возможность управления зонной структурой низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур посредством индуцированной послеростовой диффузии позволяет создавать структуры с наперед заданными характеристиками, что подтверждает актуальность теоретических исследований в этой области.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Теоретическое исследование влияния взаимной диффузии составляющих компонентов гетероструктуры на примесные состояния в сферической КТ, основанное на модифицированном потенциале Вуда-Саксона, предоставляющем возможность нахождения аналитических выражений для волновых функций носителей заряда (НЗ).
2. Исследование совместного влияния взаимной диффузии и внешнего магнитного поля на энергию связи водородоподобной донорной примеси, внедрённой в систему со многими КЯ.
3. Исследование влияния взаимной диффузии на профиль ограничивающего потенциала, зонную структуру и межзонное поглощение электромагнитной волны в одномерной СР, а также в трехмерной СР, состоящей из изначально сферических КТ.
4. Исследование влияния взаимной диффузии на ограничивающий потенциал, зонную структуру и межподзонное поглощение электромагнитной волны в ДКЯ.
5. Исследование влияния взаимной диффузии и внешнего электрического поля на резонансные состояния и вольт-амперную характеристику двухбарьерной резонансной структуры (ДРС), состоящей из изначально прямоугольных барьеров.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

1. Впервые исследовано влияние взаимной диффузии и внешних полей на зонную структуру, оптоэлектронные свойства и примесные состояния в двумерных и нульмерных квантовых гетероструктурах. В задачах, где эффекты туннелирования относительно слабы, использована модель модифицированного потенциала Вуда-Саксона, а в других развиты соответствующие численные методы для определения энергетического спектра и волновых функций НЗ.
2. В рамках вариационного метода вычислена энергия связи примеси в сферической КТ. Впервые исследована зависимость энергии связи водородоподобной донорной примеси от диффузионной длины как для центрального, так и для нецентрального расположения примеси.
3. Исследовано совместное влияние взаимной диффузии и внешнего магнитного поля на энергию связи водородоподобной донорной примеси в системе со многими КЯ. Волновые функции и энергетический спектр электрона в такой системе получены численным методом.

Полученные результаты показывают, что положение примеси может значительно повлиять на зависимости энергии связи от диффузионной длины и от индукции магнитного поля.

4. Теоретически рассчитаны уширения энергетических минизон и "голубое" смещение спектра поглощения как следствие взаимной диффузии в одномерном и трехмерном сверхрешетках, и проведено сравнение с ранее имеющимися экспериментальными результатами. Исследовано также влияние взаимной диффузии на форму изначально сферической КТ и на величину и частотное поведение коэффициента межзонного оптического поглощения трёхмерной СР из КТ.
5. Впервые исследована возможность деформации и исчезновения межъямного барьера вследствие взаимной диффузии и её влияние на дуплетный характер энергетического спектра электрона в ДКЯ. Исследовано также влияние взаимной диффузии на поведение осциллляторной силы для переходов между энергетическими уровнями в ДКЯ и на термическую стабильность спектра оптического поглощения.
6. Впервые рассмотрена задача об одновременном воздействии взаимной диффузии и электрического поля на плотность резонансного тока в ДКЯ с учётом возможности преобразования квазисвязанных состояний первого рода в квазисвязанные состояния второго рода. Проведено также сравнение влияний взаимной диффузии и электрического поля на плотность резонансного тока в различных областях температуры системы.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

Полученные в диссертации теоретические результаты представляют значительный интерес с точки зрения теории низкоразмерных полупроводниковых систем. Они могут быть использованы для трактовки имеющихся экспериментальных данных и постановки новых экспериментов, направленных на углубление представлений о физических свойствах низкоразмерных

систем. Некоторые результаты могут служить физической основой конструирования новых функциональных элементов и приборов твердотельной электроники на базе низкоразмерных полупроводниковых структур с учётом реальных условий их функционирования, а также могут быть использованы при улучшении характеристик уже действующих приборов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Энергия связи примесного центра в КТ как функция от диффузионной длины имеет немонотонный характер как при центральном, так и при нецентральном расположении примеси. Влияние диффузии на энергию связи в значительной степени зависит от радиуса КТ и положения примеси. Увеличение магнитного поля приводит к усилению зависимости энергии связи от положения примеси в системе со многими КЯ. Результат совместного влияния диффузии и магнитного поля на энергию связи зависит от местоположения примесного центра в системе.
2. Взаимная диффузия приводит к уширению энергетических минизон одномерной и трехмерной СР, а также к "голубому" смещению спектра межзонного поглощения, которое сопровождается снижением его максимума.
3. Взаимная диффузия приводит к исчезновению сферической симметрии КТ, составляющих трехмерную СР, к уширению энергетических минизон и к значительному уменьшению коэффициента межзонного поглощения, не влияя на характер спектра поглощения.
4. В ДКЯ взаимная диффузия приводит к деградации дуплетного характера энергетического спектра, повышает термостабильность спектра поглощения и приводит к увеличению (уменьшению) силы осциллятора для переходов, соответствующих изменению квантового числа на единицу (на три).
5. Посредством индуцированной диффузии в ДРС можно контролиро-

вать преобразование квазисвязанных состояний первого рода в соответствующие состояния второго рода. При достаточно низких температурах взаимная диффузия приводит к ослаблению влияния электрического поля на плотность резонансного тока в то время как при высоких температурах влияние электрического поля усиливается вследствие диффузии.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационной работы обсуждались на семинарах кафедры физики твердого тела ЕГУ и докладывались на международной конференции "Photonics & Micro- and Nano-structured Materials" (Yerevan, Armenia, June 28-30, 2011).

ПУБЛИКАЦИИ

По теме диссертационной работы опубликовано 5 работ, список которых приводится в конце автореферата.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы из 157 наименований. Общий объем работы 107 страниц, включая 25 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертационной работы посвящена исследованию влияния взаимной диффузии на энергию связи водородоподобной донорной примеси в сферической КТ и в системе со многими КЯ. В системе со многими КЯ учтено также влияние внешнего магнитного поля с вектором индукции, параллельном направлению роста гетероструктуры.

Во ***введении*** дан обзор литературы по вопросам, рассмотренным в этой главе.

Для энергии связи электрона в случае примеси, локализованной на расстоянии t_i от центра сферической КТ, получено следующее выражение:

$$\varepsilon_b(t_i,\delta)=\delta^2+N_1\int_0^\infty y(t)^{2\beta}\{(1-\delta)I_1(t,t_i,\delta)-\delta T(t,L)(I_1(t,t_i,\delta)-\frac{t_i}{t}I_2(t,t_i,\delta))\}\times$$
$$\times|{}_2F_1(i\tau+\beta,i\tau+\beta+1,2\beta+1;y(t))|^2\,dt,$$

где δ – вариационный параметр, N_1 – постоянная нормировки,

$$I_1(t,t_i,\delta)=(2\delta tt_i)^{-1}(e^{-2\delta|t-t_i|}-e^{-2\delta(t+t_i)}),$$

$$I_2(t,t_i,\delta)=\frac{(t^2+t_i^2)I_1(t,t_i,\delta)}{2tt_i}-$$
$$-\frac{\left\{e^{-2\delta|t-t_i|}\left[(2\delta|t-t_i|+1)^2+1\right]-e^{-2\delta(t+t_i)}\left[(2\delta(t+t_i)+1)^2+1\right]\right\}}{16\delta^3t^2t_i^2},$$

$$I_3(t,t_i,\delta)=(4\delta^2tt_i)^{-1}\left\{e^{-2\delta|t-t_i|}(2\delta|t-t_i|+1)-e^{-2\delta(t+t_i)}(2\delta(t+t_i)+1)\right\}$$

$$y(t)=\left[1+\exp\left(\frac{t/t_0-q(L)}{\alpha(L)}\right)\right]^{-1},$$

$t_0=r_0/a_B$ – безразмерный радиус КТ до начала диффузии, $q(L)$ и $\alpha(L)$ – параметры модифицированного потенциала Вуда-Саксона, зависящие от диффузионной длины L.

На Рис. 1 представлены зависимости энергии связи от диффузионной длины для двух различных значений радиуса КТ. Из рисунка видно, что эти зависимости, монотонно убывающие в случае КТ с малым радиусом

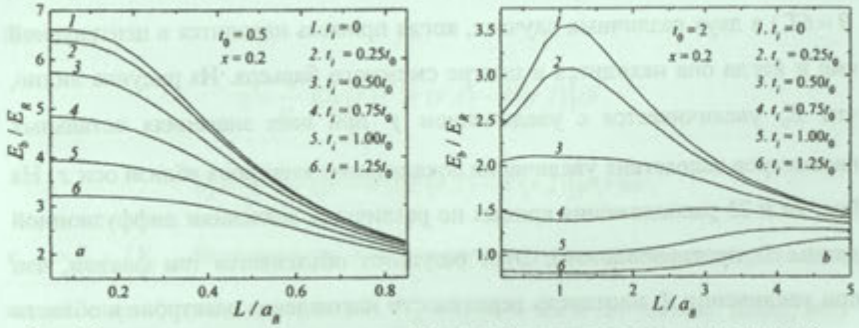

Рис. 1 Зависимости энергии связи от диффузионной длины для различных значений радиуса КТ и координаты примеси ($E_R=5.2$ мэВ-ридберговская энергия, $a_B=104$ Å-боровский радиус в GaAs).

(Рис.1*a*), имеют максимум в случае КТ с большим радиусом при всех значениях t_l. Для достаточно больших значений L энергия связи стремится к своему значению для массивного образца.

Энергия связи электрона в случае примеси, локализованной на оси роста системы со многими КЯ с координатой z_i при наличии внешнего однородного магнитного поля с вектором индукции, направленным по оси z, дается выражением

$$E_b(L,B,\delta,z_i) = N(L,B,\delta,z_i)^2 \left\{\delta^2 \iint Z(L;z)^2 R(B;\rho)^2 F_1(\delta,z_i;\rho,z)(1+\delta\sqrt{\rho^2+(z-z_i)^2})d\rho dz - \delta^2 \iint Z(L;z)^2 F_1(\delta,z_i;\rho,z)R(B;\rho)(3R(B;\rho)+2R'(B;\rho))d\rho dz + \delta^2 \iint Z(L;z)Z'(L;z)(z-z_i)F_1(\delta,z_i;\rho,z)R(B;\rho)^2 d\rho dz + 2\delta \iint Z(L;z)^2 F_1(\delta,z_i;\rho,z)R(B;\rho)^2 d\rho dz\right\},$$

где B–индукция магнитного поля, $Z(L,z)$ и $R(B,\rho)$–волновые функции электрона в направлении z и в плоскости, перпендикулярной этому направлению, соответственно, $N(L,B,\delta,z_i)$ – постоянная нормировки,

$$F_1(\rho,\delta,z,z_i) = \rho\left(\delta\sqrt{\rho^2+(z-z_i)^2}\right)^{-1}\exp(-2\delta\sqrt{\rho^2+(z-z_i)^2}).$$

Рис. 2 иллюстрирует зависимость энергии связи от безразмерной индукции магнитного поля γ (значению $\gamma=1$ соответствует индукция $B=6T$) в двух различных случаях, когда примесь находится в центральной яме и когда она находится в центре смежного барьера. Из рисунка видно, что E_b увеличивается с увеличением γ при всех значениях остальных параметров вследствие увеличения локализации электрона вблизи оси z. На Рис. 2*a* и 2*b* расположения кривых по различным значениям диффузионной длины L противоположны. Этот результат объясняется тем фактом, что при увеличении L плотность вероятности нахождения электрона в области ямы уменьшается, а в области барьера, наоборот, увеличивается.

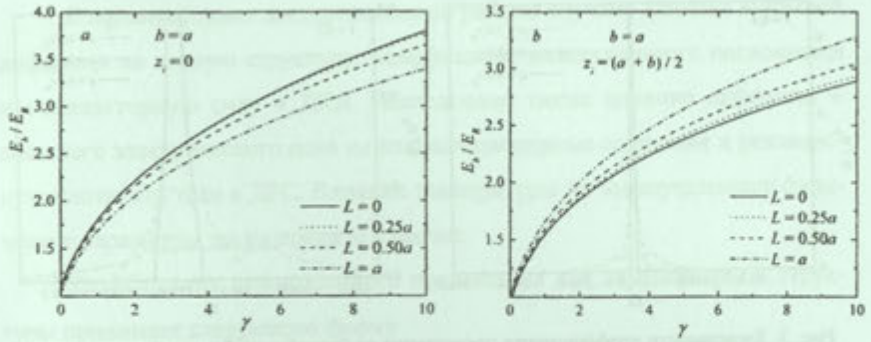

Рис. 2 Зависимости энергии связи от индукции магнитного поля для различных значений координаты примеси и диффузионной длины в системе со многими КЯ $GaAs/Ga_{0.8}Al_{0.2}As$.

Во второй главе диссертации исследовано влияние взаимной диффузии на зонную структуру и коэффициент межзонного поглощения в одномерной и трехмерной сверхрешетках с помощью модифицированного потенциала Вуда-Саксона в рамках приближения сильной связи.

Для трехмерной сверхрешетки кубической симметрии коэффициент поглощения монохроматической электромагнитной волны в случае переходов между первыми минизонами валентной зоны и зоны проводимости дается следующеим выражением:

$$\alpha = \alpha_0 \frac{1}{\Omega}\left|\int_{V_\alpha} \psi_c^*(\vec{r})\psi_v(\vec{r})d\vec{r}\right|^2 \int_0^\infty \cos[\beta(\varepsilon_c-\varepsilon_v+\eta-\Omega)]J_0^3(2\beta\varepsilon_a)d\beta,$$

где

$$\eta = \frac{1}{V_0}\int |\psi(\vec{r})|^2 \left[V(\vec{r},l)-W(r,l)\right]d\vec{r},$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{V_0}\int \psi^*(|\vec{r}+\vec{a}|)\left[V(\vec{r},l)-W(r,l)\right]\psi(r)d\vec{r},$$

$\varepsilon_{c(v)} = E_{c(v)}/V_0$ – безразмерная энергия основного состояния электрона (тяжелой дырки) в одиночной КТ, V_0–глубина ямы до начала диффузии, $V(\vec{r},l)$ и $W(r,l)$ – истинный диффузионный потенциал и модифицирован-

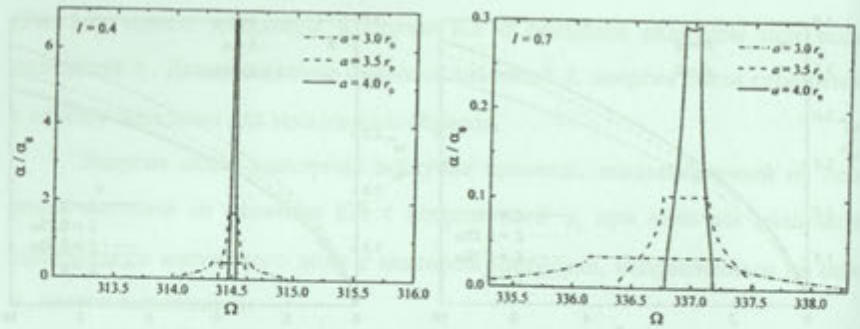

Рис. 3. Зависимости коэффициента поглощения от безразмерной энергии падающего фотона для различных значений периода СР и диффузионной длины в трехменой сверхрешётке $GaAs/Ga_{0.6}Al_{0.4}As$.

ный потенциал Вуда-Саксона, соответственно, $l = L/r_0$–безразмерная диффузионная длина, $\Omega = \hbar\omega / E_B$–безразмерная энергия падающего фотона, $J_0(x)$– функция Бесселя первого рода, нулевого порядка, α_0– постоянная.

Зависимости коэффициента поглощения от энергии падающего фотона для значений параметров $x_0 = 0.4$ и $r_0 = 0.5a_B$ представлены на Рис.3. Очевидно, что коэффициент поглощения не равен нулю только в определенном интервале значения Ω, что соответствует интервалу значений энергии электрона в первой минизоне зоны проводимости. Резкое увеличение и уменьшение коэффициента поглощения на боковых сторонах кривых обусловлены соответствующим увеличением и уменьшением числа состояний с одинаковой энергией в зоне Бриллюэна. Увеличение l приводит к "голубому" смещению, значительному уширению, а также к уменьшению максимумов спектра поглощения. В областях между максимумами кривых наблюдаются слабо выраженные минимумы, обусловленные уменьшением функции плотности состояний в середине минизоны. Из рисунка также можно усмотреть уменьшение ширины и увеличение максимумов спектра поглощения при увеличении периода сверхрешетки, что объясняется ослаблением туннелирования электронов через области барьеров.

В третьей главе диссертационной работы изучено влияние взаимной диффузии на зонную структуру, коэффициент межподзонного поглощения и осцилляторную силу в ДКЯ. Исследовано также влияние диффузии и внешнего электрического поля на квазистационарные состояния и резонансную плотность тока в ДРС. Влияние температуры на вышеуказанные физические параметры также принято в расчет.

Коэффициент межподзонного поглощения для двухбарьерной структуры принимает следующую форму

$$\alpha(\omega) = \frac{e^2 k_B T}{l_{eff} c n_r \hbar^2 \omega} \sum_{n_i, n_f} \frac{2\hbar^2}{m^*(E_{n_f} - E_{n_i})} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{n_i}^*(z) \phi_{n_f}'(z) dz \right|^2 \ln\left(\frac{1 + \exp\frac{\mu - E_{n_i}}{k_B T}}{1 + \exp\frac{\mu - E_{n_f}}{k_B T}} \right) \times$$

$$\times \frac{\Gamma/2}{(E_{n_f} - E_{n_i} - \hbar\omega)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

где l_{eff} – эффективная длина структуры, μ– химический потенциал, а $n_{i(f)}$ указывает на энергетические уровни, соответствующие квантовым состояниям по направлению z в начальном (конечном) состоянии. Здесь дельта - функция Дирака заменена лоренцианом с полушириной Γ.

На Рис. 4 представлены зависимости безразмерного коэффициента межподзонного поглощения (в единицах $\alpha_0 = 770\,см^{-1}$) от безразмерной энергии падающего фотона Ω для различных значений диффузионной длины. Из Рис. 4*а* можно увидеть, что при значении температуры $T = 0.6K$ в области малых значений Ω не наблюдаются значительные пики спектра поглощения. Это означает, что почти не происходят переходы между уровнями одного и того же дуплета ввиду равенства концентраций электронов, находящихся на этих уровнях. При $L = 0.06a_B$ (Рис. 4*а*, сплошная линия) только переходы (1,4) и (2,3) дают существенный вклад в поглощение, а при $L = 0.5a_B$ появляются дополнительные пики, соответствующие переходам (1,2) и (2,5) вследствие удаления уровней "1" и "2" и вследствие малого

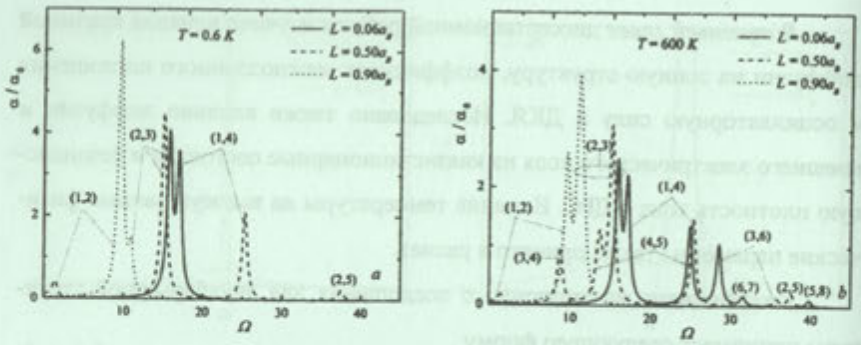

Рис.4 Зависимость коэффициента межподзонного поглощения от безразмерной энергии падающего фотона в двухбарьерной структуре GaAs/AlAs.

увеличения перекрытия состояний "2" и "5", соответственно. При $L = 0.9a_B$ существенны только переходы (1,2) и (2,3). Кроме того, переходы (1,2) более интенсивны вследствие относительно большой разности функции распределения электронов в этих состояниях (в данном случае химический потенциал практически совпадает с первым возмущенным уровнем энергии электрона). Из сравнения рисунков 4*a* и 4*b* следует, что при значении температуры $T = 600K$ количество пиков поглощения увеличивается в случаях $L = 0.06a_B$ и $L = 0.5a_B$ вследствие большого количества населенных состояний, которые могут быть возмущены фотоном. Однако при $L = 0.9a_B$ количество вышеуказанных пиков с увеличением температуры почти не меняется, так как интегралы перекрытия существенны только для смежных состояний.

Для плотности тока в ДРС можно воспользоваться выражением

$$J(T) = -\frac{em^* k_B T}{2\pi^2\hbar^3}\int_0^\infty T(E_\perp)\ln\left(\frac{1+\exp\frac{\mu(T)-E_\perp}{k_BT}}{1+\exp\frac{\mu(T)-E_\perp+2eFa_0}{k_BT}}\right)dE_\perp,$$

где $E_\perp$–энергия электрона в направлении z, $T(E_\perp)$–вероятность перехода через резонансную структуру, которая может быть представлена в виде

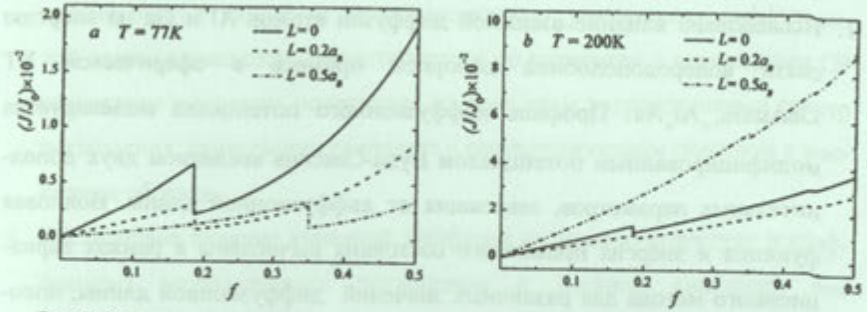

Рис.5 Зависимости плотности резонансного тока от напряженности безразмерного электрического поля (значению $f = 1$ соответсвует напряжённость поля $F = 5kV/cm$).

лоренциана [19], F–напряженность электрического поля. Расчеты сделаны для двухбарьерной структуры $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ при различных значениях диффузионной длины и температуры. Начальные ширины ямы и барьеров, соответственно, равны: $a = 2a_B$, $b_1 = b_2 = 0.5a_B$.

На Рис.5 представлены зависимости плотности резонансного тока от напряженности электрического поля для различных значений диффузионной длины и температуры. Для всех значений диффузионной длины, увеличение F приводит к почти линейному увеличению плотности тока, а затем к его резкому спаду. Этот спад связан с тем фактом, что первое КСС первого рода заменяется КСС второго рода с уровнем энергии пренебрежимо малой ширины. После резкого спада увеличение плотности тока происходит нелинейным образом, что обусловлено увеличением населённости второго КСС первого типа под влиянием электрического поля. Из сравнения рисунков 6a и 6b можно заметить, что увеличение температуры приводит к увеличению плотности тока вследствие большего вклада высших резонансных уровней.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Vladimir V. Mitin, Viatcheslav A. Kochelap, Michel A. Stroscio, *Quantum Heterostructures*, Cambridge University Press, 1999.
2. J. H. Davies, *The Physics of Low-dimensional Semiconductors*, Cambridge University Press, 1998.
3. P. Villamil, N. Porras-Montenegro, J. Granada, "Infrared transitions between hydrogenic states in cylindrical GaAs quantum well wires under applied magnetic fields", Phys. Rev. B 59, pp. 1605-1608 (1999).
4. A. Corella-Madueno, R. Rosas, J. Marin, R. Riera, "Hydrogenic impurities in spherical quantum dots in a magnetic field", J. Appl. Phys. 90, 2333 (5 pages) (2001).
5. M. V. Artemyev, A. I. Bibik, L. I. Gurinovich, S. V. Gaponenko, and U. Woggon, "Evolution from individual to collective electron states in a dense quantum dot ensemble", Phys. Rev. B 60, pp. 1504-1506 (1999).
6. P. K. Basu, *Theory of Optical Processes in Semiconductors, Bulk and Microstructures*. Clarendon Press, Oxford, 1997.
7. D. L. Nika, E. P. Pokatilov, Q. Shao, A. A. Balandin, "Charge-carrier states and light absorption in ordered quantum dot superlattices", Phys. Rev. B 76, 125417 (9 pages) (2007).
8. J.P. Eisenstein, L.N. Pfeiffer, K.W. West, "Field-induced resonant tunneling between parallel two-dimensional electron systems", Appl. Phys. Lett. 58, 1497 (3 pages) (1991).
9. J. T. Verdeyen, Laser Electronic, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 361 (1989).
10. E. T. Yu and T. C. McGill, "III-V/II-IV double barrier resonant tunneling structures", Appl. Phys. Lett. 53, 60 (3 pages) (1988).
11. Mohsan Razavy, *Quantum theory of tunneling*, World Scientific, Singapore, 2003.

12. E. Anemogiannis, E. N. Glytsis, and T. K. Gaylord, "Quasibound state determination of arbitrary-geometry quantum heterostructures", Microelectron. J. 30, pp. 935-951 (1999).
13. S. A. Rakityansky, "Unified treatment of bound, scattering, and resonant states in one-dimensional semiconductor nanostructures", Phys. Rev. B 68, 195320 (17 pages) (2003).
14. O. Gunawan, H. S. Djie, B. S. Ooi, "Electronic states of interdiffused quantum dots", Phys. Rev. B 71, 205319 (10 pages) (2005).
15. V. L. Aziz Aghchegala, V. N. Mughnetsyan and A. A. Kirakosyan, "Effect of interdiffusion on impurity states in quantum dots of spherical symmetry", Physica E 42, pp. 1567-1570 (2010).
16. V. L. Aziz Aghchegala, V. N. Mughnetsyan, A. A. Kirakosyan, "Effect of interdiffusion on band structure and intersubband absorption coefficient of GaAs/GaAlAs double quantum well", Superlattices and Microstructures 49, pp. 99-108 (2011).
17. V. L. Aziz Aghchegala, V. N. Mughnetsyan, A. A. Kirakosyan, "Effect of interdiffusion and electric field on resonant states and current-voltage characteristic of GaAs/$Ga_{1-x}Al_xAs$ double barrier resonant structure", Armenian J. of Phys. 4, pp. 211-220 (2011).
18. V. N. Mughnetsyan, A. A. Kirakosyan, " Effect of In and Al interdiffusion on electron states and light absorption in $In_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$ quantum dots", J. Cont. Phys. (Armenian Academy of Sciences) 42, pp. 55-61 (2007).
19. A. Uma Maheswari, P. Prema, S. Mahadevan and C. S. Shastry, "Quasi-bound states, resonance tunneling, and tunneling times generated by twin symmetric barriers", Prama-J. of Phys. 73, pp. 969-988 (2009).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. V. L. Aziz Aghchegala, V. N. Mughnetsyan and A. A. Kirakosyan, "Effect of interdiffusion on impurity states in quantum dots of spherical symmetry", Physica E 42, pp. 1567-1570 (2010).
2. V. L. Aziz Aghchegala, V. N. Mughnetsyan, A. A. Kirakosyan, "Effect of interdiffusion on electronic states and absorption coefficient of semiconductor superlattice of cubic symmetry", Physica E 42, pp. 1950-1953 (2010).
3. V. L. Aziz Aghchegala, "Effect of interdiffusion on the band structure and absorption coefficient of a one-dimensional semiconductor superlattice", Journal of Contemporary Physics. (Armenian Academy of Sciences) 46, pp. 80-85 (2011).
4. V. L. Aziz Aghchegala, V. N. Mughnetsyan, A. A. Kirakosyan, "Effect of interdiffusion on band structure and intersubband absorption coefficient of GaAs/GaAlAs double quantum well", Superlattices and Microstructures 49, pp. 99-108 (2011).
5. V. L. Aziz Aghchegala, V. N. Mughnetsyan, A. A. Kirakosyan, "Effect of interdiffusion and electric field on resonant states and current-voltage characteristic of GaAs/$Ga_{1-x}Al_xAs$ double barrier resonant structure", Armenian Journal of Physics 4, pp. 211-220 (2011).

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ատենախոսությունը նվիրված է ցածր չափայնությամբ համակարգերում էլեկտրոնային և խառնուկային վիճակների, ինչպես նաև համակարգի օպտոէլեկտրոնային որոշ բնութագրերի վրա դրա բաղադրամասերի փոխադարձ դիֆուզիայի և արտաքին էլեկտրական և մագնիսական դաշտերի ազդեցության տեսական ուսումնասիրմանը:

Ատենախոսության առաջին գլխում փոփոխակային մեթոդով և արդյունավետ զանգվածի մոտավորության շրջանակներում ուսումնասիրված է փոխադարձ դիֆուզիայի ազդեցությունը գնդային քվանտային կետում և բազմաթիվ քվանտային փոսերից բաղկացած համակարգում խառնուկային վիճակների վրա:

Երկրորդ գլխում, Վուդ-Սաքսոնի ձևափոխված պոտենցիալի կիրառմամբ, ուսումնասիրված է փոխադարձ դիֆուզիայի ազդեցությունը միաչափ և եռաչափ գերցանցերի գոտիական կառուցվածքի և միջգոտիական կլանման գործակցի վրա:

Ատենախոսության երրորդ գլուխը նվիրված է կրկնակի քվանտային փոսում էլեկտրոնի էներգիական սպեկտրի, ներենթագոտիական կլանման գործակցի, ինչպես նաև երկարգելք ռեզոնանսային կառուցվածքի վոլտ-ամպերային բնութագծի վրա փոխադարձ դիֆուզիայի ազդեցության ուսումնասիրմանը:

Ստացվել են հետևյալ հիմնական արդյունքները.

1. Ներմուծելով քվանտային փոսի սկզբնական շառավիղն ու խորությունը բնութագրող և դիֆուզային երկարության ֆունկցիա հանդիսացող լրացուցիչ պարամետրեր Վուդ-Սաքսոնի պոտենցիալում, կարելի է մեծ ճշտությամբ միայնակ քվանտային փոսի դիֆուզային պոտենցիալը փոխարինել այդ պոտենցիալով: Բազմաթիվ նանոօբյեկտներից բաղկացած համակարգերում ավելի հարմար է օգտվել քվային կամ կիսաքվային մեթոդներից:
2. Գնդային քվանտային կետում ջրածնանման դոնորային խառնուկի կապի էներգիայի կախումը դիֆուզային երկարությունից ունի ոչ մոնոտոն բնույթ ինչպես խառնուկի կենտրոնական, այնպես էլ ոչ կենտրոնական դիրքի դեպքում, ինչը հետևանք է այն բանի, որ սկզբնական էտապում դիֆուզիան հանգեցնում է քվանտային կետում էլեկտրոնի տեղայնացման աստիճանի մեծաց-

ման, որից հետո միայն էլեկտրոնային ամպը լրոզվում է պոտենցիալի լրոզման հետևանքով:

3. Էլեկտրոնի էներգիական սպեկտրը և ալիքային ֆունկցիաները բազմակի քվանտային փոսերից բաղկացած համակարգում նպատակահարմար է հաշվարկել թվային եղանակով քանի որ այս համակարգում դժվար է հասնել Վուդ-Սաքսոնի ձևափոխված և իրական դիֆուզային պոտենցիալների լավ համընկման: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ խառնուկի դիրքն էապես ազդում է համակարգի աճի ուղղությամբ ուղղված մագնիսական դաշտի իոնուկցիայից և դիֆուզային երկարությունից կապի էներգիայի կախումների վարքի վրա:
4. Փոխադարձ դիֆուզիան բերում է միաչափ գերցանցի մինիգոտիների լայնացման, միջգոտիական կլանման գործակցի "կապույտ" շեղման և դրա մաքսիմումի նվազման, ինչը նախապես դիտվել է փորձերում: Դիֆուզիայի ազդեցությունը գերցանցի գոտիական կառուցվածքի վրա էապես կախված է քվանտային փոսերի սկզբնական լայնությունից և խորությունից:
5. Փոխադարձ դիֆուզիայի հետևանքով վերանում է եռաչափ գերցանցը կազմող քվանտային կետերի գնդային համաչափությունը և մեծանում է մինիգոտիների լայնությունը: Դիֆուզիան բերում է միջգոտիական կլանման գործակցի զգալի նվազման՝ առանց խախտելու կլանման սպեկտրի որակական վարքը:
6. Կրկնակի քվանտային փոսում դիֆուզիան հանգեցնում է էներգիական սպեկտրի զուգականային բնույթի վերացման, բարձրացնում է ներենթագոտիական կլանման սպեկտրի ջերմակայունությունը և մեծացնում է (փոքրացնում է) այն անցումներին համապատասխանող տատանականային ուժերը, որոնք համապատասխանում են քվանտային թվի մեկով (երեքով) փոփոխվելուն:
7. Փոխադարձ դիֆուզիայի օգնությամբ կարելի է ղեկավարել երկարգելք համակարգում առաջին և երկրորդ սեռի քվազիկապված վիճակների փոխակերպումներն արտաքին էլեկտրական դաշտում: Ցածր ջերմաստիճաններում դիֆուզիան բերում է էլեկտրական դաշտի լարվածությունից հոսանքի խտության կախման թուլացման, մինչդեռ բարձր ջերմաստիճաններում համապատասխան կախումներն ուժեղանում են:

SUMMARY

The dissertation is devoted to the theoretical investigation of the effect of interdiffusion of material species and external electric and magnetic fields on electronic and impurity states as well as on opto-electronic characteristics in low-dimensional systems.

In the first chapter of dissertation, using a variational procedure and the effective-mass approximation, the effect of interdiffusion on impurity binding energy in a spherical quantum dot and the simultaneous effect of interdiffusion and magnetic field on impurity binding energy in multiple quantum wells are studied.

In the second chapter of dissertation the effect of interdiffusion on band structure and interband absorption coefficient in one and three dimensional superlattices is investigated using the modified Wood-Saxon potential model.

In the third chapter of dissertation the effect of interdiffusion on band structure and intersubband absorption coefficient in a double quantum well is investigated. The effect of interdiffusion on the resonant states and volt-amper characteristic of a double barrier resonant structure is investigated as well.

The obtained main results are:

1. By introducing additional parameters as functions of diffusion length in the known Wood-Saxon potential, it is possible to replace the potential of a single diffused quantum well with the modified Wood-Saxon potential. In systems composed of multi-nano-objects it is more appropriate to use numerical or semi-numerical methods.
2. The dependence of the binding energy of the donor impurity in quantum dot on diffusion length has non-monotonic behavior in both cases of on-and off-center impurities which is due to the fact that at the initial stage, diffusion leads to the increase of electron localization degree in quantum dot, after

which only the electronic cloud smears due to the smearing of potential profile.

3. It is more appropriate to calculate the wave functions and energy spectrum of electron in a multiple quantum well system numerically because it is difficult to achieve a good aggriment between the modified Wood-Saxon and the real potentials. The obtained results show that the impurity position significantly affects the dependence of impurity binding energy on diffusion length and magnetic field induction directed along the growth axis.
4. The interdiffusion leads to the widening of the energy minibands, to the "blueshift" of the absorption spectrum and decrease of its maximum in one-dimensional superlattices which are observed in experiments. The effect of interdiffusion on band structure strongly depends on the depth of wells and on the heights of barriers.
5. The interdiffusion leads to the disappearance of quantum dots' spherical symmetry, to the widening of the energy minibands and to the significant decrease in the interband absorption coefficient in three-dimensional superlattices without violating the shape of the absorption spectrum.
6. In double quantum well systems the interdiffusion leads to the degradation of doublet character of the electron energy spectrum. The increase of diffusion length, leads to the increase (decrease) of oscillator strength for the transitions corresponding to the increase of quantum number by one (three) and raises the thermal stability of the absorption spectrum.
7. By means of interdiffusion it is possible to control the first and second quasi band states transformations in double barrier systems in the presence of external electric field. At lower temperatures interdiffusion leads to the weakening of the effect of electric field on resonant current density while at higher temperatures the effect of electric field is stronger for enough large values of diffusion length.