

**ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ**

**ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ**

**Բաղրամյան Հենրիխ Միքայելի**

**ԿՐԿՆԱԿԻ ԹՎԱՆՏԱՅԻՆ ԿԵՏԵՐԻ ԵՎ ՕՂԱԿՆԵՐԻ  
ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ԵՎ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ ԱՐՏԱԶԻՆ  
ԳՈՐԾՈՆՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՏԵՍԱԿԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄ**

**Ա.04.10 - «Կիսահաղորդչային ֆիզիկա» մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական  
աստիճանի հայցման ատենախոսության**

**ՍԵՂՍԱԳԻՐ**

**ԵՐԵՎԱՆ – 2013**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА  
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Баграмян Генрих Микаелович**

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА  
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВОЙНЫХ КВАНТОВЫХ  
ТОЧЕК И КОЛЕЦ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 - “Физика полупроводников”**

**Е Р Е В А Ն – 2013**

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝

ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ  
Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր  
Ա.Ա. Կիրակոսյան (ԵՊՀ)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ,  
Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր  
Հ.Ս. Կարայան (ԵՊՀ)  
Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր, դոցենտ  
Վ.Ա. Հարությունյան (ՌՀ(Ս)ՊՀ)

Առաջատար կազմակերպություն՝


ՀՀ ԳԱԱ ռադիոֆիզիկայի  
և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Պաշտպանությունը տեղի կունենա 2013թ. մայիսի 18-ին, ժամը 11<sup>00</sup>-ին  
Երևանի պետական համալսարանի ֆիզիկայի 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում:  
Հասցեն՝ Երևան 0025, Ալեք Մանուկյան 1

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրը ցրված է 2013թ. ապրիլի 18-ին:

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար՝



Ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ  
Վ.Պ. Զալանթարյան

**Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете  
Научный руководитель:**

**член-кор. НАН РА  
А.А. Киракосян**

**Официальные оппоненты:**

**член-кор. НАН РА,  
доктор физ. мат. наук, профессор  
Г.С. Караян (ЕГУ),  
доктор физ. мат. наук, доцент  
Вл.А. Арутюнян (РА(С)ГУ)**

**Ведущая организация:**

**Институт радиофизики  
и электроники НАН РА**

**Защита состоится 18-го мая 2013г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании специализированного  
совета по физике 049 Ереванского государственного университета по адресу: Ереван  
0025, ул. Алека Манукяна 1.**

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.**

**Автореферат разослан 18-ого апреля 2013 г.**

**Ученый секретарь  
специализированного совета**



**кандидат физ. мат. наук, доцент  
В.П. Калантарян**

ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅԱՆ ԱՐԴԻԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ցածր չափայնությամբ համակարգերը, որոնց ստեղծումը հնարավոր դարձավ շնորհիվ ժամանակակից տեխնոլոգիաների, վերջին տասնամյակների ընթացքում հեղափոխել են կիսահաղորդչային ֆիզիկան: Սա պայմանավորված է ոչ միայն հիմնարար գիտության բնագավառում առկա նշանակալի ձեռքբերումներով և կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքների բազմազան կիրառություններով, այլ նաև նշված բնագավառում նոր հաջողությունների խոստումնալից հեռանկարով: Այս ամենը հետևանք է ցածր չափայնությամբ կիսահաղորդչային հետերոկառուցվածքներում ֆիզիկական պրոցեսների կառավարման նոր հնարավորությունների: Օգտագործելով նանոկառուցվածքներում կիրառվող նյութերի բաղադրության, երկրաչափական ձևերի և չափերի, ինչպես նաև արտաքին ազդակների կառավարելի փոփոխման հնարավորությունը՝ կարելի է ապահովել նրանցում տարբեր քվազիմասնիկների և քվազիմասնիկային կոմպլեքսների քվանտային վիճակների, հետևաբար՝ նաև կառուցվածքների ֆիզիկական հատկությունների կառավարելի փոփոխություն [1]:

Վերջին տարիներին աճեցված նանոկառուցվածքներից են կրկնակի քվանտային կետերը (ԿԶԿ) [2] և կրկնակի քվանտային օղակները (ԿԶՕ) [3]: ԿԶԿ-երը կարևոր տեղ են զբաղեցնում կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքների շարքում, որոնց ուսումնասիրումն ունի ինչպես հիմնարար ֆիզիկական [4,5], այնպես էլ կիրառական նշանակություն: Ներկայումս դրանք կիրառվում են էլեկտրոնիկայում, օպտոէլեկտրոնիկայում և քվանտային տեղեկատվական տեխնոլոգիաներում օգտագործվող սարքավորումներում [6-8]: Կիսահաղորդչային ԿԶՕ-ներ բոլորովին վերջերս են աճեցվել [3], ուստի դրանց ֆիզիկական հատկությունների ուսումնասիրումը դեռ նախնական փուլում է: Սակայն արդեն հրապարակվել են մի քանի կարևոր աշխատանքներ, որոնք կարող են հիմնավորել օպտոէլեկտրոնային և քվանտային տեղակատվական տեխնոլոգիաների սարքավորումներում ԿԶՕ-ների ապագա կիրառության նպատակահարմարությունը [9,10]:

Մեծ քանակությամբ փորձարարական և տեսական հետազոտություններ են կատարվել ծավալային և ցածր չափայնությամբ կիսահաղորդչային կառուցվածքների ֆիզիկական հատկությունների վրա արտաքին հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցության ուսումնասիրման ուղղությամբ: Մասնավորապես, հիդրոստատիկ ճնշումը բերում է կիսահաղորդիչներում էներգիական սպեկտրի փոփոխման, միևնույն ժամանակ չփոփոխելով կիսահաղորդչային կառուցվածքի բյուրեղային համաչափությունը:

ԿԶԿ-երում և ԿԶՕ-ներում հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցությունը հանգեցնում է էներգիական սպեկտրի էական փոփոխությունների, որոնց ուսումնասիրումը կարող է կարևոր տեղեկություններ հաղորդել այս նանոկառուցվածքների տարբեր բնութագրերի մասին՝ նպաստելով նրանցում էլեկտրոնային, էքսիտոնային և խառնուկային վիճակների, ինչպես նաև օպտիկական հատկությունների ֆիզիկական մեկնաբանմանը:

Հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցությունները ԿԶԿ-երում էլեկտրոնային վիճակների և ԿԶԿ-երի օպտիկական հատկությունների վրա դեռևս բավարարչափով ուսումնասիրված չեն, իսկ ԿԶՕ-ների ֆիզիկական հատկությունների ուսումնասիրումը, ինչպես արդեն նշվեց, նախնական փուլում է:

Ատենախոսությունը նվիրված է կրկնակի գլանային քվանտային կետում (ԿԳԶԿ) և կրկնակի համակենտրոն քվանտային օղակում (ԿՀԶՕ) էլեկտրոնային և խառնուկային վիճակների, և այդ նանոկառուցվածքների օպտիկական հատկությունների վրա արտաքին գործոնների՝ հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմաստիճանի, էլեկտրական դաշտի, ինչպես նաև համակարգի բաղադրության և երկրաչափական բնութագրերի ազդեցության տեսական ուսումնասիրմանը:

#### ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՆՊԱՏԱԿԸ

1. Ուսումնասիրել InAs/GaAs ԿԳԶԿ-ում հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցությունն էլեկտրոնի հիմնական և առաջին գրգռված վիճակների էներգիաների վրա կառուցվածքի չափերի տարբեր արժեքների համար:
2. Հաշվարկել ծանր խոռոչի հիմնական վիճակից էլեկտրոնի հիմնական վիճակ օպտիկական անցումների շեմային էներգիաները InAs/GaAs ԿԳԶԿ-ում՝ կախված հիդրոստատիկ ճնշումից և ջերմաստիճանից կառուցվածքի չափերի տարբեր արժեքների դեպքում, ինչպես նաև այդ անցումներով պայմանավորված կլանման գործակցի կախումը հիդրոստատիկ ճնշումից և կառուցվածքի չափերից:
3. Հետազոտել հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմաստիճանի, ալյումինի կոնցենտրացիայի և էլեկտրական դաշտի ազդեցությունը GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ԿՀԶՕ-ում էլեկտրոնի հիմնական և գրգռված վիճակների էներգիաների վրա:
4. Հաշվարկել GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ԿՀԶՕ-ում ներգոտիական անցումների շեմային էներգիայի կախումները հիդրոստատիկ ճնշումից և ալյումինի կոնցենտրացիայից կառուցվածքի չափերի տարբեր արժեքների համար, ինչպես նաև գծային, ոչ գծային և լրիվ կլանման գործակցիցների կախումները ճնշումից, ալյումինի կոնցենտրացիայից և կառուցվածքի չափերից:

5. Հաշվարկել  $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  ԿՀՔՕ-ում ջրածնանման դոնորային խառնուկի կապի էներգիայի կախումները հիդրոստատիկ ճնշումից, ջերմաստիճանից, ալյումինի կոնցենտրացիայից, խառնուկի դիրքից և կառուցվածքի չափերից :
6. Ստանալ  $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  ԿՀՔՕ-ում խառնուկային 1s և 2s վիճակների էներգիաների կախումները հիդրոստատիկ ճնշումից, ալյումինի կոնցենտրացիայից, խառնուկի դիրքից և կառուցվածքի չափերից, ինչպես նաև հաշվարկել այդ վիճակների միջև անցումների շեմային էներգիայի կախումները նշված պարամետրերից և դրանց ազդեցությունը խառնուկային կլանման գործակցի վրա:

#### ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

1. Առաջին անգամ ուսումնասիրվել է հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցությունն էլեկտրոնային վիճակների վրա  $InAs/GaAs$  ԿԳՔԿ-ում: Օգտվելով տրանսֆեր-մատրիցների մեթոդից՝ արդյունաբար զանգվածի և ադիաբատական մոտավորության շրջանակներում ստացվել են էլեկտրոնի հիմնական և առաջին գրգռված վիճակների էներգիաների կախումները հիդրոստատիկ ճնշումից և ջերմաստիճանից կառուցվածքի չափերի տարբեր արժեքների համար:
2. Հաշվարկվել է  $InAs/GaAs$  ԿԳՔԿ-ում միջգոտիական օպտիկական անցումներով պայմանավորված կլանման գործակիցների՝ ընկնող ֆոտոնի էներգիայից կախման վրա հիդրոստատիկ ճնշման, ինչպես նաև կառուցվածքի չափերի փոփոխության ազդեցությունը:
3. Առաջին անգամ ուսումնասիրվել է հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմաստիճանի, ալյումինի կոնցենտրացիայի և էլեկտրական դաշտի ազդեցությունն  $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  ԿՀՔՕ-ում էլեկտրոնի հիմնական և գրգռված վիճակների էներգիաների վրա:
4. Խտության մատրիցի մեթոդով և երկմակարդակային մոտավորության շրջանակներում առաջին անգամ որոշվել են  $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  ԿՀՔՕ-ում ներգոտիական գծային և ոչ գծային կլանման գործակիցների կախումներն ընկնող ֆոտոնի էներգիայից հիդրոստատիկ ճնշման, ալյումինի կոնցենտրացիայի և կառուցվածքի չափերի տարբեր արժեքների դեպքում:
5. Առաջին անգամ հետազոտվել է  $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  ԿՀՔՕ-ում ջրածնանման դոնորային խառնուկի կապի էներգիայի վրա հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմաստիճանի, ալյումինի կոնցենտրացիայի և կառուցվածքի չափերի փոփոխության ազդեցությունը: Փոփոխակային մեթոդի կիրառմամբ ստացվել են 1s և 2s խառնուկային վիճակների կապի էներգիաների կախումները հիդրոստատիկ ճնշումից, ջերմաստիճանից, ալյումինի կոնցենտրացիայից, խառնուկի դիրքից և կառուցվածքի չափերից:

6. Հաշվարկվել է  $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  ԿՀԲՕ-ում խառնուկային ներգոտիական կլանման գծային գործակցի՝ ընկնող ֆոտոնի էներգիայից կախումը հիդրոստատիկ ճնշման, ալյումինի կոնցենտրացիայի, խառնուկի դիրքի և կառուցվածքի չափերի տարբեր արժեքների դեպքում:

#### ԳՈՐԾՆԱԿԱՆ ԱՐԺԵՔԸ

Ատենախոսության արդյունքները նշանակալի հետաքրքրություն են ներկայացնում ցածր չափայնությամբ կիսահաղորդչային համակարգերի տեսության տեսանկյունից: Դրանք կարող են օգտագործվել կրկնակի քվանտային կետերի և օղակների համար առկա փորձարարական արդյունքների բացատրման համար, ինչպես նաև հիմք ծառայել այդ կառուցվածքների հատկությունների ավելի խոր ուսումնասիրմանն ուղղված նոր փորձերի իրականացման համար: Որոշ արդյունքներ կարող օգտագործվել նշված կառուցվածքների հիման վրա ֆունկցիոնալ նոր տարրերի և սարքավորումների նախագրման, ինչպես նաև արդեն գործող սարքավորումների բնութագրերի բարելավման համար: **ՊԱՇՏՊԱՆՈՒԹՅԱՆ ՆԵՐԿԱՅԱՅՎՈՂ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԴՐՈՒՅԹՆԵՐԸ**

1.  $InAs/GaAs$  ԿԳԲԿ-ում հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցությամբ էլեկտրոնի հիմնական և առաջին գրգռված վիճակների էներգիաների փոփոխությունները հիմնականում պայմանավորված են էլեկտրոնի արդյունաբար զանգվածի՝ նշված պարամետրերից կախումներով:
2.  $InAs/GaAs$  ԿԳԲԿ-ում միջգոտիական օպտիկական անցումների շեմային էներգիաների՝ հիդրոստատիկ ճնշումից և ջերմաստիճանից կախումներն իրարից էապես տարբերվում են: Միջգոտիական կլանման սպեկտրի մաքսիմումի շեղման ուղղությունը կախված է նրանից, թե կառուցվածքի որ չափի փոփոխությունն է դիտարկվում, ինչպես նաև հիդրոստատիկ ճնշման ազդեցությունից:
3.  $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  ԿՀԲՕ-ում էլեկտրոնի հիմնական վիճակի էներգիայի վրա հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմաստիճանի և էլեկտրական դաշտի ազդեցության ուժգնությունը կախված է չափային քվանտացման դրսևորման աստիճանից (թույլ կամ ուժեղ չափային քվանտացում), իսկ հիդրոստատիկ ճնշման ազդեցությունն էլեկտրոնի հիմնական վիճակի էներգիայի վրա որոշվում է  $GaAs$ -ում և  $Ga_{1-x}Al_xAs$ -ում հաղորդականության գոտու մինիմումների փոխդասավորությամբ: Ճնշման և ալյումինի կոնցենտրացիայի փոփոխության միջոցով հնարավոր է էլեկտրոնի հավանականության խտության վերաբաշխում ներքին և արտաքին օղակների միջև:
4.  $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  ԿՀԲՕ-ում ներգոտիական օպտիկական անցումների շեմային էներգիայի՝ հիդրոստատիկ ճնշումից կախումը կրում է  $GaAs$ -ում և  $Ga_{1-x}Al_xAs$ -ում հաղոր-

դականության գոտու միմիումների փոխդասավորության ազդեցությունը, ուստի ճշմարտությունը և այլումիմի կոնցենտրացիան փոփոխելիս դիտվում են կլանման սպեկտրի ինչպես «կարմիր», այնպես էլ «կապույտ» շեղումներ, ինչպես նաև լրիվ կլանման գործակցում ոչ գծային կլանման ներդրման մեծացում և փոքրացում:

5. GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ԿՀՔՕ-ում ջրածնանման դոնորային խառնուկի հիմնական վիճակի կապի էներգիան էապես կախված է օղակներում էլեկտրոնի հավանականության խտության բաշխումից: Օղակների չափերի փոփոխությամբ կարելի է իրականացնել դրա վերաբաշխումն օղակների միջև, որի հետևանքով կապի էներգիայի՝ կառուցվածքի չափերից կախումը դրսևորում է ոչ մոնոտոն վարք:
6. GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ԿՀՔՕ-ում խառնուկային 1s և 2s վիճակների էներգիաների կախումները հիդրոստատիկ ճնշումից, այլումիմի կոնցենտրացիայից, խառնուկի դիրքից և կառուցվածքի չափերից իրարից էապես տարբերվում են. դրանց ազդեցությունը 1s վիճակի կապի էներգիայի վրա ավելի ուժեղ է, քան 2s վիճակի կապի էներգիայի վրա: Վերոնշյալ պարամետրերից խառնուկային 1s և 2s վիճակների միջև անցումների շեմային էներգիայի ոչ մոնոտոն կախման հետևանքով կլանման սպեկտրում դիտվում են ինչպես «կարմիր», այնպես էլ «կապույտ» շեղումներ:

#### ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՓՈՐՁԱՀԱՎԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները քննարկվել են ԵՊՀ պինդ մարմնի ֆիզիկայի ամբիոնի սեմինարներում, զեկուցվել են “Photonics & Micro- and Nano-structured Materials” (Yerevan, 2011), “8th International Conference on Semiconductor Micro- & Nanoelectronics” (Yerevan, 2011), “OPTICS-2011” (Yerevan-Ashtarak, 2011), “IONS-11/Paris” (Paris, 2012), “IONS-NA-4/New York” (New York, 2012) միջազգային գիտաժողովներում:

#### ՀՐԱՊԱՐԱԿՈՒՄՆԵՐ

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրված են **8 հոդվածում**, որոնց ցուցակը ներկայացված է սեղմագրի վերջում:

#### ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԸ

Ատենախոսությունը բաղկացած է գրականության ակնարկից, երեք գլխից, եզրակացությունից, ատենախոսության մեջ օգտագործված հասկացումների և գրականության ցանկից, որը պարունակում է 153 հղում: Ատենախոսության ծավալը 119 էջ է, այն պարունակում է 46 նկար և 4 աղյուսակ: Յուրաքանչյուր գլուխ սկսվում է նրանում քննարկվող հարցերին վերաբերող գրականության համառոտ ակնարկով:

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ատենախոսության **առաջին** գլխում, օգտվելով տրանսֆեր-մատրիցների մեթոդից, արդյունաբար զանգվածի և աղիաբատական մոտավորության շրջանակներում [11] ուսումնասիրվել է InAs/GaAs ԿԳՔԿ-ում էլեկտրոնային վիճակների և միջգոտիական օպտիկական կլանման վրա հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցությունը:

§1.1-ը նվիրված է InAs/GaAs ԿԳՔԿ-ում էլեկտրոնային վիճակների վրա հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցության ուսումնասիրմանը: Էլեկտրոնի հիմնական և առաջին գրգռված վիճակների էներգիաների կախումները ճնշումից և ջերմաստիճանից որոշվում են  $m(P, T)$  արդյունաբար զանգվածի և  $E_g(P, T)$  արգելված գոտու՝ ճնշումից և ջերմաստիճանից կախումներով [12]՝

$$m(P, T) = m_0 \left( 1 + \frac{2|p_{cv}|^2}{m_0} \left( \frac{E_g(P, T) + \frac{2}{3}\delta}{E_g(P, T)(E_g(P, T) + \delta)} \right) \right)^{-1}, \quad (1.1)$$

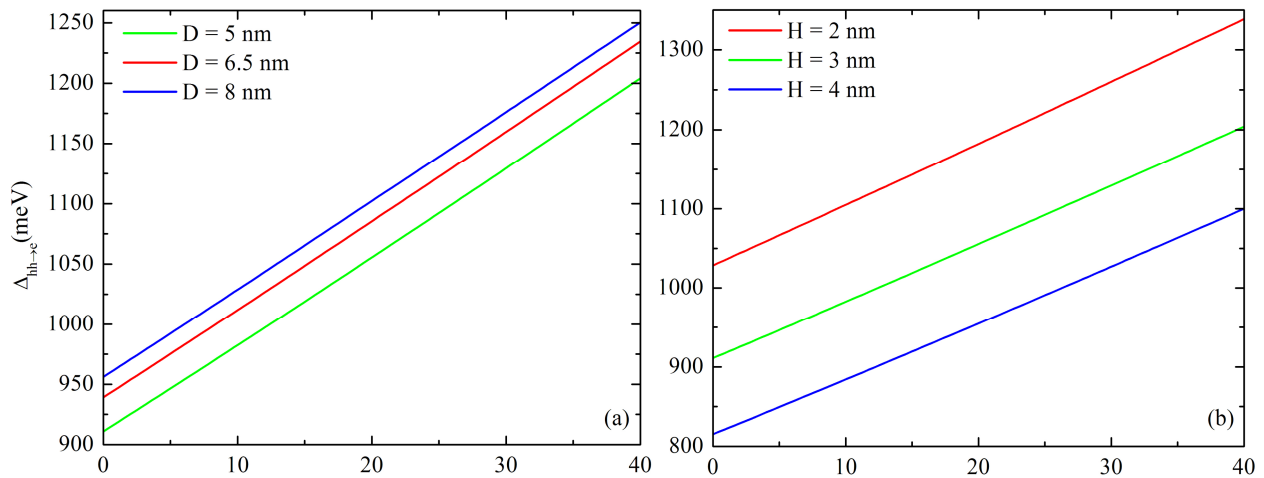
$$E_g(P, T) = E_g^0 + \alpha P - \frac{\beta T^2}{T + c}, \quad (1.2)$$

որտեղ  $m_0$ -ն ազատ էլեկտրոնի զանգվածն է,  $p_{cv}$ -ն՝ արժեքական գոտուց հաղորդականության գոտի անցումների համար իմպուլսի մատրիցական տարրը,  $\delta$ -ն՝ արժեքական գոտու սպին-ուղեծրային ճեղքման էներգիան,  $E_g^0$ -ն արգելված գոտու լայնությունն է, երբ  $P = 0$ ,  $T = 0$ , իսկ  $\alpha$ -ն,  $\beta$ -ն և  $\gamma$ -ն հայտնի գործակիցներ են [12]:

§1.2-ում ուսումնասիրվել է միջգոտիական օպտիկական անցումների շեմային էներգիայի վրա հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցությունն InAs/GaAs ԿԳՔԿ-ում: Հաշվարկվել են ծանր խոռոչի հիմնական վիճակից էլեկտրոնի հիմնական վիճակ օպտիկական անցումների շեմային էներգիաները՝ կախված հիդրոստատիկ ճնշումից և ջերմաստիճանից՝ կառուցվածքի չափերի տարբեր արժեքների դեպքում: Նկ. 1-ում ներկայացված է InAs/GaAs ԿԳՔԿ-ում շեմային էներգիայի կախումը հիդրոստատիկ ճնշումից: Դիտարկվել են տակդիրների միջև  $D$  հեռավորության (նկ. 1a) և ՔԿ-երի  $H$  բարձրության (նկ. 1b) տարբեր արժեքներ: Ցույց է տրվել, որ հիդրոստատիկ ճնշման փոփոխման ամբողջ տիրույթում՝

1) ճնշման մեծացմանը զուգընթաց մեծանում են սահմանափակող պոտենցիալի բարձրությունը և InAs-ի արգելված գոտու լայնությունը, իսկ կառուցվածքի չափերը փոքրանում են, ուստի շեմային էներգիան աճում է,



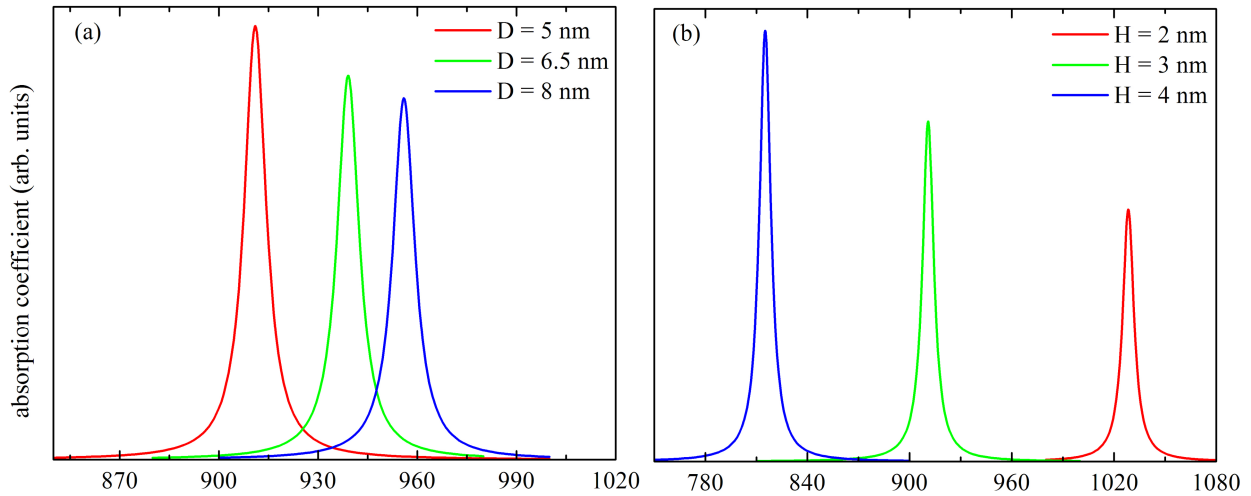


Նկ. 1. Միջգոտիական անցումների շեմային էներգիայի կախումը հիդրոստատիկ ճնշումից. (a)՝ տակդիրների միջև  $D$  հեռավորության ( $H = 3$  նմ,  $R = 12$  նմ) և (b)՝ ՔԿ-երի  $H$  բարձրության ( $D = 5$  նմ,  $R = 12$  նմ) տարբեր արժեքներ ի համար  $T = 4$  Կ ջերմաստիճանում

2) ճնշման մեծացմանը զուգընթաց էլեկտրոնի արդյունաբար զանգվածը մեծանում է, ուստի շեմային էներգիան նվազում է:

1-ին կետում նշված 3 գործոնների ազդեցությունն ավելի ուժեղ է, քան 2-րդ կետում նշված գործոնինը, ուստի շեմային էներգիան ճնշումից կախված աճում է: Նկ. 1a-ից ակնհայտ է, որ  $D$ -ի մեծացմանը զուգընթաց շեմային էներգիան աճում է, որի պատճառը էլեկտրոնի և խոռոչի համաչափ վիճակների էներգիական մակարդակների միջև հեռավորության մեծացումն է, իսկ  $H$ -ի (նկ. 1b) մեծացումը հանգեցնում է էլեկտրոնի և խոռոչի չափային քվանտացման թուլացման, որի հետևանքով շեմային էներգիան նվազում է:

§1.3-ում ուսումնասիրվել է հիդրոստատիկ ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցությունը միջգոտիական օպտիկական անցումների գծային կլանման գործակցի վրա InAs/GaAs ԿԳՔԿ-ում քվանտային կետերի շառավիղների հավասար արժեքների դեպքում՝  $R_1 = R_2 = R$ : Ստացվել է ծանր խոռոչի հիմնական վիճակից էլեկտրոնի հիմնական վիճակ օպտիկական անցումներով պայմանավորված կլանման գործակիցը՝ կախված հիդրոստատիկ ճնշումից և կառուցվածքի չափերից: Նկ. 2-ում ներկայացված են ծանր խոռոչի հիմնական վիճակից էլեկտրոնի հիմնական վիճակ միջգոտիական օպտիկական անցումներով պայմանավորված կլանման գործակցի կախումներն ընկնող ֆոտոնի էներգիայից՝ տակդիրների միջև  $D$  հեռավորության (նկ. 2a) և քվանտային կետերի (ՔԿ)  $H$  բարձրության (նկ. 2b) տարբեր արժեքների դեպքում: Նկ. 2a-ից երևում է, որ տակդիրների միջև հեռավորության մեծացման արդյունքում կլանման սպեկտրի

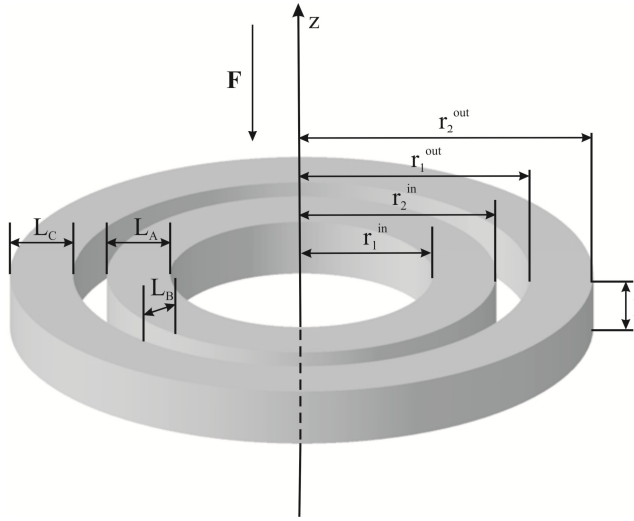


Նկ. 2. Միջգոտիական կլանման գործակցի կախումն ընկնող ֆոտոնի էներգիայից. (a)՝ տակդիրների միջև  $D$  հեռավորության ( $H = 3$  նմ,  $R = 12$  նմ), (b)՝ ՔԿ-երի  $H$  բարձրության ( $D = 5$  նմ,  $R = 12$  նմ) տարբեր արժեքների համար

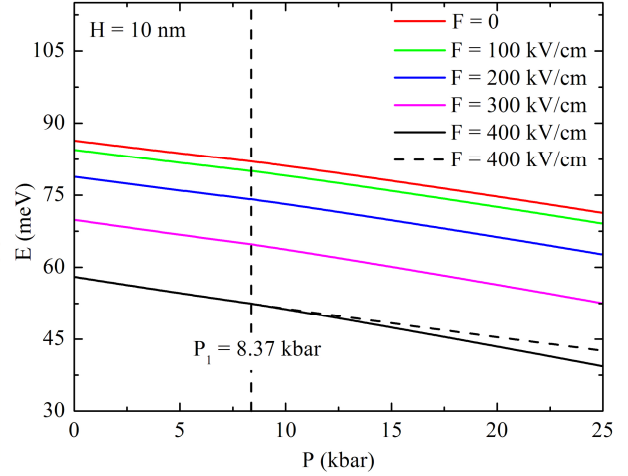
մաքսիմումը շեղվում է դեպի մեծ էներգիաների տիրույթ («կապույտ» շեղում): Այդպիսի վարքը պայմանավորված է շեմային էներգիայի աճով: Ընդ որում, տակդիրների միջև  $D$  հեռավորության մեծացման արդյունքում կլանման գործակցի առավելագույն արժեքը նվազում է, ինչը պայմանավորված է  $D$ -ի մեծացման հետևանքով սկզբնական և վերջնական վիճակների էներգիական մակարդակների միջև հեռավորության մեծացմամբ, որը բերում է ծածկման ինտեգրալների նվազման: Նկ. 2 b-ի կորերից հետևում է, որ  $H$ -ի մեծացման արդյունքում կլանման սպեկտրի մաքսիմումը շեղվում է դեպի փոքր էներգիաների տիրույթ («կարմիր» շեղում), և դիտվում է կլանման գործակցի առավելագույն արժեքի աճ: Վերջինիս պատճառն սկզբնական և վերջնական վիճակների էներգիական մակարդակների միջև հեռավորության փոքրացումն է:

Ատենախոսության **երկրորդ** գլուխը նվիրված է էլեկտրոնային վիճակների և ներգոտիական օպտիկական կլանման վրա  $\text{GaAs/Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  ԿՀԶՕ-ում հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմաստիճանի, ալյումինի կոնցենտրացիայի և էլեկտրական դաշտի ազդեցության ուսումնասիրմանը:

§2.1-ում, առաջին գլխում օգտագործված մեթոդներով, ուսումնասիրվել է  $\text{GaAs/Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  ԿՀԶՕ-ում (նկ. 3) էլեկտրոնի հիմնական վիճակի էներգիայի վրա հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմաստիճանի, ալյումինի կոնցենտրացիայի և էլեկտրական դաշտի ազդեցությունը: Էլեկտրոնի արդյունաբար զանգվածի և արգելված գոտու՝ կոնցենտրացիայից, ջերմաստիճանից և հիդրոստատիկ ճնշումից կախումները տրվում են հետևյալ արտահայտություններով՝



Նկ. 3. GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As կրկնակի համակենտրոն քվանտային օղակի սխեմատիկ պատկերը



Նկ. 4. Էլեկտրոնի հիմնական վիճակի էներգիայի կախումը հիդրոստատիկ ճնշումից

$$m(x, P, T) = m_0 \left[ 1 + \frac{\Pi^2(x)}{3} \left( \frac{2}{E_g^\Gamma(x, P, T)} + \frac{1}{E_g^\Gamma(x, P, T) + \Delta(x)} \right) + \delta(x) \right]^{-1}, \quad (1.3)$$

որտեղ  $\Pi^2(x) = a_\Pi + b_\Pi x$  -ը միջգոտիական մատրիցական տարրն է,  $\Delta(x) = a_\Delta + b_\Delta x$  -ն՝ արժեքական գոտու սպին-ուղեծրային ճեղքման էներգիան,  $\delta(x) = \delta_1 + \delta_2 x + \delta_3 x^2$  պարամետրի միջոցով հաշվի է առնվում հեռու գոտիների ներդրումը, իսկ

$$E_g^i(x, P, T) = a_i + b_i x + c_i x^2 + \alpha_i P - \frac{\beta_i T^2}{\gamma_i + T} \quad (1.4)$$

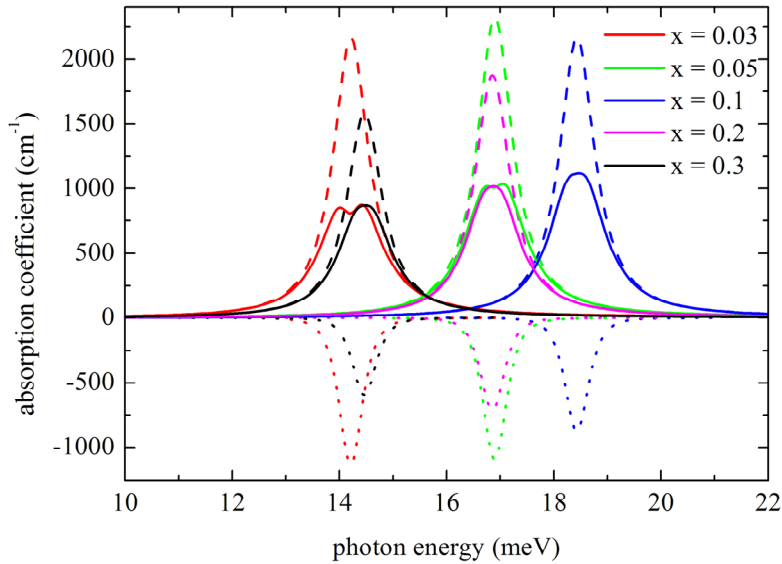
արտահայտությունն արգելված գոտու լայնությունն է Բրիլյուենի զոնայի  $\Gamma$ - և  $X$ -մինիմումներում ( $i = \Gamma, X$ ):  $a_\Pi, b_\Pi, a_\Delta, b_\Delta, \delta_1, \delta_2, \delta_3, a_i, b_i, c_i, \alpha_i, \beta_i$  և  $\gamma_i$  գործակիցները GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As հետերոկառուցվածքի համար հայտնի են:

Սահմանափակող պոտենցիալները սահմանվում են՝ հաշվի առնելով հաղորդականության գոտու  $\Gamma$ - և  $X$ -մինիմումների փոխդասավորությունը: Կան ճնշման երկու կրիտիկական արժեքներ՝  $P_1(x, T)$  և  $P_2(x, T)$ , որոնց դեպքում տեղի ունի մինիմումների համընկում: Բանն այն է, որ երբ  $P < P_1(x, T)$ , Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As-ում  $\Gamma$ -մինիմումն ավելի ցածր է, քան  $X$ -մինիմումը,  $P = P_1(x, T)$  դեպքում դրանք համընկնում են, իսկ  $P > P_1(x, T)$  դեպքում  $X$ -մինիմումը  $\Gamma$ -մինիմումից ցածր է: Ճնշման հետագա մեծացմանը զուգընթաց Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As-ում  $X$ -մինիմումը տեղաշարժվում է GaAs փոսի տիրույթում  $\Gamma$ -մինիմումից ներքև (դրանց համընկումը տեղի է ունենում  $P_2(x, T)$  ճնշման դեպքում): Նկ. 4-ում ներկայացված են էլեկտրոնի հիմնական վիճակի էներգիայի կախումները հիդրոստատիկ ճնշումից էլեկտրական դաշտի լարվածության տարբեր արժեքների համար: Արդյունք-

ներն ստացվել են ջերմաստիճանի  $T = 4 \text{ Կ}$ , ալյումինի կոնցենտրացիայի  $x = 0,3$  արժեքի և համակարգի հետևյալ չափերի դեպքում՝  $H = 10 \text{ նմ}$ ,  $r_1^{\text{in}} = 20 \text{ նմ}$ ,  $L_A = 10 \text{ նմ}$ ,  $L_B = 5 \text{ նմ}$ ,  $L_C = 10 \text{ նմ}$ :  $0 < P \leq P_1$  տիրույթում շառավղային ուղղությամբ սահմանափակող պոտենցիալի բարձրությունը ճնշումից կախված չի փոփոխվում, ուստի այս տիրույթում էներգիայի նվազելը պայմանավորված է միայն արդյունաբար զանգվածի՝ ճնշումից կախված աճով:  $P_1 < P < P_2$  միջակայքում սահմանափակող պոտենցիալի բարձրությունը ճնշումից կախված նվազում է, որն, իր հերթին, փոքրացնում է էլեկտրոնի էներգիան, և արդյունաբար զանգվածի աճի հետ միասին ստիպում, որ ճնշումից կախված էներգիան էլ ավելի կտրուկ նվազի: Էլեկտրական դաշտի լարվածության  $400 \text{ կՎ/սմ}$  արժեքի համար նաև ցույց է տրված էլեկտրոնի էներգիայի կախումը՝ առանց  $\Gamma$ - և  $X$ -մինիմումների հատման հաշվառման: Բացի դրանից, երևում է, որ կորերի միջև հեռավորություններն էլեկտրական դաշտի լարվածությունից կախված մեծանում են, ինչը պայմանավորված է էներգիայի՝ էլեկտրական դաշտից ոչ գծային կախումով:

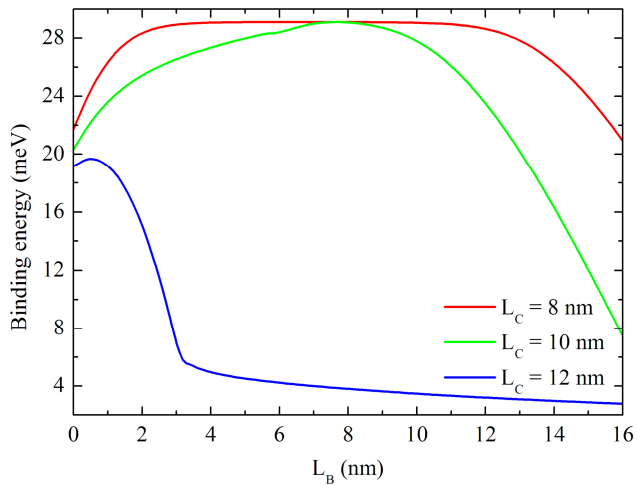
§2.2-ը նվիրված է  $\text{GaAs/Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  քվազիերկշափ ( $H \ll R$ )  $\text{ԿՀԶՕ}$ -ում ներգոտիական գծային և ոչ գծային կլանման վրա հիդրոստատիկ ճնշման և ալյումինի կոնցենտրացիայի ազդեցության ուսումնասիրմանը: Խտության մատրիցի մեթոդով, երկմակարդակային մոտավորության շրջանակներում ստացվել են ներգոտիական անցումների շեմային էներգիայի կախումները հիդրոստատիկ ճնշումից և ալյումինի կոնցենտրացիայից կառուցվածքի չափերի տարբեր արժեքների համար, ինչպես նաև գծային, ոչ գծային և լրիվ կլանման գործակիցների կախումները ճնշումից, ալյումինի կոնցենտրացիայից և կառուցվածքի չափերից: Նկ. 5-ում պատկերված են նշված գործակիցների կախումներն ընկնող ֆոտոնի էներգիայից ալյումինի կոնցենտրացիայի տարբեր արժեքների համար: Երևում է, որ կոնցենտրացիայի փոփոխումը  $x = 0,03$ -ից  $x = 0,1$  միջակայքում բերում է «կապույտ» շեղման, այն դեպքում, որ  $x = 0,1$ -ից  $x = 0,3$  միջակայքում դիտվում է «կարմիր» շեղում: Բացի դրանից, տեղի ունի կլանման լրիվ գործակցի մաքսիմումի տրոհում երկու՝ իրար մոտ մաքսիմումների, երբ  $x = 0,03$  և  $x = 0,05$ , որի պատճառը կլանման ոչ գծային գործակցի բավականաչափ մեծ լինելն է:

Ատենախոսության **երրորդ** գլխում հետազոտվել է  $\text{GaAs/Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$   $\text{ԿՀԶՕ}$ -ում ջրածնանման դոնորային խառնուկի կապի էներգիայի և ներգոտիական խառնուկային օպտիկական կլանման վրա հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմաստիճանի և ալյումինի կոնցենտրացիայի ազդեցությունը:

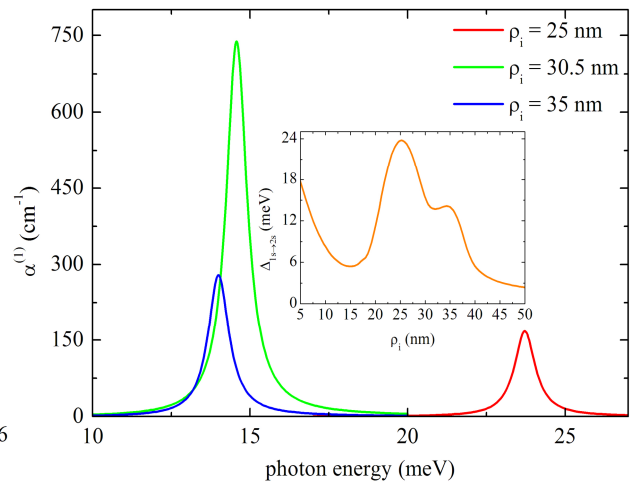


Նկ. 5. Կլանման գործակցի կախումն ընկնող ֆոտոնի էներգիայից այլումինի կոնցենտրացիայի տարբեր արժեքների դեպքում: Ընդհատ գծերով ներկայացված են գծային, կետագծերով՝ ոչ գծային, հոծ գծերով՝ լրիվ կլանման գործակիցները: Արդյունքներն ստացված են  $P = 0$ ,  $T = 4$  Կ,  $r_1^{\text{in}} = 20$  նմ,  $L_A = 10$  նմ,  $L_B = 1$  նմ,  $L_C = 10$  նմ և ինտենսիվության  $I = 6 \cdot 10^3$  Վտ/սմ<sup>2</sup> արժեքների համար:

§3.1-ում ուսումնասիրվել է ջրածնանման դոնորային խառնուկի 1s վիճակի կապի էներգիայի վրա հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմաստիճանի, այլումինի կոնցենտրացիայի և կառուցվածքի չափերի փոփոխության ազդեցությունը GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ԿՀԶՕ-ում: Նկ. 6-ում պատկերված է ներքին օղակում  $\rho_i = 25$  նմ և  $z_i = 0$  սևեռված կետում խառնուկի հիմնական վիճակի կապի էներգիայի կախումն արգելքի տիրույթի  $L_B$  լայնությունից, արտաքին օղակի  $L_C$  լայնության տարբեր արժեքների համար: Երբ  $L_B = 0$ , էլեկտրոնի հավանականության խտության առավելագույն արժեքը խառնուկի դիրքից աջ կողմում է, և  $L_B$ -ի մեծացման հետ այն տեղաշարժվում է դեպի ներքին օղակի կենտրոն, որտեղ խառնուկն է, ինչը բերում է էլեկտրոն-խառնուկ փոխազդեցության ուժեղացման, և, որպես հետևանք, կապի էներգիայի աճի: Երբ  $L_C = 8$  նմ,  $L_B$ -ի հետագա աճի ընթացքում կապի էներգիան մնում է գրեթե հաստատուն, քանի որ  $L_B$ -ի փոփոխման որոշակի տիրույթում էլեկտրոնային ամպը տեղայնացված է միայն ներքին օղակում և նրա կենտրոնում ունի առավելագույն արժեք:  $L_B \cong 10$  նմ-ից մեծ արժեքների դեպքում կապի էներգիան նվազում է, քանի որ հավանականության խտության առավելագույն արժեքը տեղաշարժվում է դեպի արտաքին օղակ:  $L_C = 10$  նմ արժեքի դեպքում նորից առկա են կապի էներգիայի՝  $L_B$ -ից կախման բոլոր տեսակները, սակայն  $L_B$ -ի այն տիրույթը, որտեղ կապի էներգիան հաստատուն է, շատ ավելի փոքր է: Սրա պատճառն այն է, որ



Նկ. 6. Կապի էներգիայի կախումն արգելքի տիրույթի  $L_B$  լայնությունից արտաքին օղակի  $L_C$  լայնության տարբեր արժեքների դեպքում: Արդյունքներն ստացված են  $P = 0$ ,  $T = 4 \text{ Կ}$ ,  $x = 0,3$ ,  $H = 4 \text{ նմ}$ ,  $r_1^{\text{in}} = 20 \text{ նմ}$ ,  $L_A = 10 \text{ նմ}$ ,  $\rho_i = 25 \text{ նմ}$  և  $z_i = 0$  արժեքների համար:



Նկ. 7. Գծային կլանման գործակցի կախումը ֆոտոնի էներգիայից խառնուկի տարբեր դիրքերում: Արդյունքներն ստացվել են  $P = 0$ ,  $T = 4 \text{ Կ}$ ,  $x = 0,3$ ,  $H = 4 \text{ նմ}$ ,  $r_1^{\text{in}} = 20 \text{ նմ}$ ,  $L_A = 10 \text{ նմ}$ ,  $L_B = 1 \text{ նմ}$ ,  $L_C = 8 \text{ նմ}$ ,  $z_i = 0$  արժեքների համար (ներդիրում խառնուկային 1s վիճակից 2s վիճակ անցման շեմային էներգիայի կախումը  $\rho_i$ -ից):

այս դեպքում, երբ օղակների հաստությունները հավասար են, նրանցում շառավղային ուղղությամբ տեղայնացումը նույնն է:  $L_C = 12 \text{ նմ}$  արժեքի դեպքում կապի էներգիան  $L_B$ -ի փոփոխման գրեթե ամբողջ տիրույթում նվազում է, բացառությամբ  $L_B$ -ի զրոյական արժեքին մոտ փոքր տիրույթի, որտեղ այն աճում է:  $L_B$ -ի արդեն բավականաչափ փոքր արժեքների դեպքում գրեթե ամբողջ էլեկտրոնային ամպը տեղայնացվում է արտաքին օղակում, այդ պատճառով  $L_B \cong 3 \text{ նմ}$ -ից սկսած կապի էներգիան արդեն շատ փոքր է և ավելի դանդաղ է նվազում, քան  $L_C = 8 \text{ նմ}$  և  $L_C = 10 \text{ նմ}$  դեպքերում: Վերջինս բացատրվում է նրանով, որ էլեկտրոն-խառնուկ փոխազդեցությունը թույլ է, և կապի էներգիան դառնում է  $L_B$ -ից գրեթե անկախ: Կապի էներգիայի նվազելը բացատրվում է նրանով, որ այս դեպքում հավանականության խտությունն իր առավելագույն արժեքն ընդունում է արտաքին օղակում, և  $L_B$ -ի մեծացման հետ այս օղակը հեռանում է խառնուկից:  $L_C$ -ի մեծացման հետևանքով էլեկտրոնային ամպը տեղաշարժվում է դեպի արտաքին օղակ, որը բերում է կապի էներգիայի նվազման:

§3.2-ում ուսումնասիրվել է GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ԿՀԲՕ-ում խառնուկային օպտիկական գծային կլանման վրա հիդրոստատիկ ճնշման, այլումինի կոնցենտրացիայի և կառուցվածքի չափերի փոփոխության ազդեցությունը: Ստացվել են խառնուկային 1s և 2s վիճակների էներգիաների կախումները հիդրոստատիկ ճնշումից, այլումինի կոնցեն-

տրացիայից, կառուցվածքի չափերից և խառնուկի դիրքից: Հաշվարկվել են այդ վիճակների միջև անցումների շեմային էներգիայի կախումները նշված պարամետրերից և դրանց ազդեցությունը խառնուկային գծային կլանման գործակցի վրա: Գծային կլանման գործակցի կախումն ընկնող ֆոտոնի էներգիայից խառնուկի տարբեր դիրքերում ներկայացված է նկ. 7-ում: Դիտարկված են խառնուկի երեք տարբեր դիրքեր. խառնուկը ներքին օղակի կենտրոնում է՝  $\rho_i = 25$  նմ, օղակների միջև արգելքի տիրույթի կենտրոնում է՝  $\rho_i = 30,5$  նմ և արտաքին օղակի կենտրոնում է՝  $\rho_i = 35$  նմ: Խառնուկի նշված դիրքերում կլանման սպեկտրում դիտվում է «կարմիր» շեղում, թեև ներդիրում պատկերված շեմային էներգիայի՝  $\rho_i$ -ից կախման կորից երևում է, որ կլանման սպեկտրը  $\rho_i$ -ից կախված ավելի բարդ տեսք ունի, մասնավորապես, առկա են շեղումներ նաև դեպի մեծ էներգիաների տիրույթ: Նշենք նաև, որ կլանման գործակցի առավելագույն արժեքը չունի հստակ արտահայտված մոնոտոն կախում  $\rho_i$ -ից:

### ԵԶՐԱԿԱՅՈՒԹՅՈՒՆ

1. Կառուցվածքի չափերի սևեռված արժեքների դեպքում հիդրոստատիկ ճնշման ազդեցությունը բերում է InAs/GaAs ԿԳԶԿ-ում համաչափ և հակահամաչափ վիճակների էներգիաների նվազման, իսկ ջերմաստիճանի ազդեցությունը՝ դրանց մեծացման: Էներգիաների այսպիսի վարքը հիմնականում պայմանավորված է էլեկտրոնի արդյունաբար զանգվածի՝ ճնշումից և ջերմաստիճանից ուժեղ արտահայտված կախումներով: Ցույց է տրվել, որ կառուցվածքի ուղղաձիգ չափերի փոփոխության ազդեցությունը հիմնական և գրգռված վիճակների էներգիաների վրա ավելի ուժեղ է, քան շառավղային չափերի փոփոխության ազդեցությունը:
2. Հիդրոստատիկ ճնշման մեծացումը InAs/GaAs ԿԳԶԿ-ում չափերի ընտրված բոլոր արժեքների դեպքում բերում է շեմային էներգիայի մեծացման, իսկ ջերմաստիճանի բարձրացումը՝ շեմային էներգիայի նվազման: Շեմային էներգիաների այսպիսի վարքը հիմնականում պայմանավորված է ճնշման և ջերմաստիճանի ազդեցությամբ InAs-ի արգելված գոտու փոփոխությամբ: Միջգոտիական անցումների համար ստացվել է ծանր խոռոչի և էլեկտրոնի անկյունային քվանտային թվերի համար ջոկման կանոն՝  $\mu_{hh} = \mu_e$ , ինչպես նաև կանոն, որը թույլատրում է անցումներ միայն նույն համաչափությամբ վիճակների միջև: ԶԿ-երի բարձրությունների և շառավիղների մեծացումը բերում է կլանման սպեկտրի «կարմիր» շեղման և կլանման ուժեղացման, իսկ տակդիրների հեռավորության և հիդրոստատիկ ճնշման մեծացումը՝ «կապույտ» շեղման և կլանման թուլացման:

3. GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ԿՀԶՕ-ում հիդրոստատիկ ճնշման և էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ էլեկտրոնի հիմնական վիճակի էներգիան նվազում է, ընդ որում էներգիայի՝ հիդրոստատիկ ճնշումից կախման կորի նվազման արագությունը մեծանում է Դ- և X-մինիմումների հատմանը համապատասխանող ճնշման արժեքից մեծ արժեքների համար: Այլումինի կոնցենտրացիան մեծացնելիս և ջերմաստիճանը բարձրացնելիս հիմնական վիճակի էներգիան մեծանում է: Հիդրոստատիկ ճնշման, ջերմաստիճանի և էլեկտրական դաշտի ազդեցությունն էլեկտրոնի հիմնական վիճակի վրա ավելի ուժեղ է դրսևորվում ուժեղ չափային քվանտացման դեպքում:  $0 < P < 8,37$  կբար տիրություն դիտվել է էլեկտրոնի հավանականության խտության առավելագույն արժեքի աճ ներքին օղակում, իսկ արտաքին օղակում՝ նվազում:  $8,37$  կբար  $< P < 29,67$  կբար տիրություն դիտվում է հակառակ երևույթը: Ջերմաստիճանի բարձրացման հետևանքով հավանականության խտությունը փոքրանում է ներքին օղակում և մեծանում արտաքինում, իսկ այլումինի կոնցենտրացիայի փոքրացումը բերում է էլեկտրոնային ամպի «լողման» կառուցվածքի ամբողջ մակերեսով:
4. GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ԿՀԶՕ-ում ներգոտիական օպտիկական անցումների համար ստացվել է  $\mu_e - \mu_g = \pm 1$  ջոկման կանոնը: Անցման շեմային էներգիայի՝ հիդրոստատիկ ճնշումից կախման կորը Դ- և X-մինիմումների հատման պատճառով փոխում է նվազման արագությունը, ընդ որում արտաքին օղակի լայնության  $L_c = 10$  նմ արժեքի դեպքում այն կարող է ինչպես նվազել, այնպես էլ աճել: Շեմային էներգիայի՝ այլումինի կոնցենտրացիայից կախման կորն ունի աճի և նվազման տիրույթներ: Օղակների միջև արգելքի տիրույթի և արտաքին օղակի լայնության մեծացումը բերում է կլանման սպեկտրի «կարմիր» շեղման և կլանման թուլացման: Ծնշման և այլումինի կոնցենտրացիայի փոփոխման ազդեցությունը բերում է կլանման սպեկտրի ինչպես «կարմիր», այնպես էլ «կապույտ» շեղման և կլանման ուժեղացման: Կոնցենտրացիայի փոքր՝  $x = 0,03$  և  $x = 0,05$  արժեքների դեպքում դիտվել է ոչ գծային կլանման ուժեղ արտահայտված մեծացում, և դրա հետևանքով՝ կլանման լրիվ գործակցի մաքսիմումի տրոհում երկու մաքսիմումի:
5. Կախված օղակների միջև արգելքի տիրույթի և արտաքին օղակի լայնության արժեքներից՝ GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ԿՀԶՕ-ում էլեկտրոնի հավանականության խտության առավելագույն արժեքը կամ ներքին, կամ արտաքին օղակում է: Հավանականության խտության առավելագույն արժեքի՝ ներքին օղակից արտաքին օղակ տեղափոխումների հետևանքով խառնուկի հիմնական վիճակի կապի էներգիայի՝ արգելքի տիրույ-



քի և արտաքին օղակի լայնությունից կախման կորերն ունեն աճի, նվազման և անփոփոխ վարքի տիրույթներ: Հիդրոստատիկ ճնշման ազդեցությունը բերում է կապի էներգիայի աճի, ընդ որում  $\Gamma$ - և  $X$ -մինիմումների հատման հետևանքով աճի արագությունը կարող մեծանալ և փոքրանալ՝ պայմանավորված արգելքի տիրույթի և արտաքին օղակի լայնության համապատասխան ընտրությամբ ներքին օղակից արտաքին օղակ էլեկտրոնային ամպի տեղաշարժով: Ջերմաստիճանի բարձրացումը բերում է կապի էներգիայի նվազման, ընդ որում  $T > 200$  Կ տիրույթում նվազման արագությունը մեծանում է: Կապի էներգիայի՝ խառնուկի դիրքից կախումները համապատասխանում են հավանականության խտության կորերին և ալյումինի կոնցենտրացիայի մեծ արժեքների դեպքում ունեն երկու մաքսիմում ներքին և արտաքին օղակների շրջանային շերտերի կենտրոնական շրջանագծերի վրա, սակայն կոնցենտրացիայի փոքրացումը բերում է նշված շրջանագծերից այդ մաքսիմումների շեղման և կապի էներգիայի նվազման:

6. GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ԿՀԲՕ-ում էլեկտրոն-խառնուկ փոխազդեցության ազդեցությունը խառնուկային 1s և 2s վիճակների  $E_{1s}$  և  $E_{2s}$  էներգիաների վրա առավել ուժեղ է դրսևորվում այդ վիճակների՝ արտաքին օղակի լայնությունից, հիդրոստատիկ ճնշումից և խառնուկի դիրքից կախումների վրա, և թույլ է դրսևորվում  $E_{1s}$ -ի և  $E_{2s}$ -ի արգելքի տիրույթի լայնությունից և ալյումինի կոնցենտրացիայից կախումների վրա: Խառնուկային 2s վիճակի վրա նշված պարամետրերի ազդեցությունն ավելի թույլ է, քան 1s վիճակի կապի էներգիայի վրա՝ վերջինիս ավելի ուժեղ տեղայնացման հետևանքով: Արգելքի տիրույթի լայնության, հիդրոստատիկ ճնշման և ալյումինի կոնցենտրացիայի մեծացումը բերում է կլանման սպեկտրի «կապույտ» շեղման, իսկ արտաքին օղակի լայնության մեծացումը՝ «կարմիր» շեղման: Խառնուկի դիրքի ( $\rho_i$ ) դիտարկված արժեքների դեպքում կլանման համար ստացվել է «կարմիր» շեղում, սակայն շեմային էներգիայի՝ խառնուկի դիրքից կախման կորի ուսումնասիրումը հնարավորություն է տալիս պնդելու, որ կան խառնուկի դիրքի փոփոխման այնպիսի տիրույթներ, որտեղ հնարավոր է կլանման «կապույտ» շեղում: Խառնուկի դիրքի, արգելքի տիրույթի լայնության և ալյումինի կոնցենտրացիայի մեծացման արդյունքում կլանման գործակցի առավելագույն արժեքն ունի ոչ մոնոտոն վարք, իսկ արտաքին օղակի լայնության և հիդրոստատիկ ճնշման մեծացումը բերում է կլանման գործակցի առավելագույն արժեքի մոնոտոն նվազման:

## ՀՂՎԱԾ ՔՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1. Է.Ս. Վազարյան, Ս.Գ. Պետրոսյան, Կիսահաղորդչային մանրէլեկտրոնիկայի ֆիզիկական հիմունքները, Ռ-ՀՀ Հրատարակչություն, Երևան (2005):
2. Z.R. Wasilewski, S. Fafard, and J.P. McCaffrey. Size and shape engineering of vertically stacked self-assembled quantum dots. *J. Crystal Growth* **201/202**, 1131-1135 (1999).
3. T. Mano, T. Kuroda, S. Sanguinetti, T. Ochiai, T. Taten, J. Kim, T. Noda, M. Kawabe, K. Sakoda, G. Kido, N. Koguchi. Self-assembly of concentric quantum double rings. *Nano Lett.* **5**, 425-428 (2005).
4. M. Bayer, P. Hawrylak, K. Hinzer, S. Fafard, M. Korkusiński, Z.R. Wasilewski, O. Stern, A. Forchel. Coupling and entangling of quantum states in quantum dot molecules. *Science* **291**, 451-453 (2001).
5. B.D. Gerardot, S. Strauf, M.J.A. de Dood, A.M. Bychkov, A. Badolato, K. Hennessy, E.L. Hu, D. Bouwmeester, P.M. Petroff. Photon statistics from coupled quantum dots. *Phys. Rev. Lett.* **95**, 137403-137406 (2005).
6. G. Yusa, H. Sakaki. Trapping of photogenerated carriers by InAs quantum dots and persistent photoconductivity in novel GaAs/n-AlGaAs field-effect transistor structures. *App. Phys. Lett.* **70**, 345-347 (1997).
7. S. Maimon, E. Finkman, G. Bahir, S.E. Schacham, J.M. Garcia, P.M. Petroff. Intersublevel transitions in InAs/GaAs quantum dots infrared photodetectors. *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2003-2005 (1998).
8. L. Harris, D.J. Mowbray, M.S. Skolnick, M. Hopkinson, G. Hill. Emission spectra and mode structure of InAs/GaAs self-organized quantum dot lasers. *Appl. Phys. Lett.* **73**, 969-971 (1998).
9. J. Planelles, J.I. Climente. Semiconductor concentric double rings in a magnetic field. *Eur. Phys. J. B* **48**, 65-70 (2005).
10. F.J. Culchac, N. Porrás-Montenegro, J.C. Granada, A. Latgé. Energy spectrum in a concentric double quantum ring of GaAs-(Ga,Al)As under applied magnetic fields. *Microelectron. J.* **39** 402-406 (2008).
11. В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган. Задачи по квантовой механике. М.: Наука (1981).
12. E. Reyes-Gómez, N. Raigoza, L.E. Oliveira. Effects of hydrostatic pressure and aluminum concentration on the conduction-electron g-factor in GaAs-(Ga,Al)As quantum wells under in-plane magnetic fields. *Phys. Rev. B* **77**, 115308-115313 (2008).

13. A.H. Rodríguez, C. Trallero-Giner, C.A. Duque, G.Z. Vázquez. Optical transition in self-assembled InAs/GaAs quantum lens under high hydrostatic pressure. *J. Appl. Phys.* **105**, 044308-044313 (2009).

#### ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

1. Г.М. Баграмян, М.Г. Барсегян, А.А. Киракосян. Влияние гидростатического давления и тем-пературы на электронные состояния в двойной цилиндрической квантовой точке InAs/GaAs. *Известия НАН Армении, Физика* **46**, 234-242 (2011).
2. H.M. Baghramyan. Effect of hydrostatic pressure on energies of interband transitions in InAs/GaAs coupled cylindrical double quantum dots. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference “Semiconductor Micro- and Nanoelectronics”*, 167-170 (2011).
3. H.M. Baghramyan, M.G. Barseghyan, A.A. Kirakosyan. Effects of hydrostatic pressure and temperature on interband optical transitions in InAs/GaAs vertically coupled double quantum dots. *Journal of Physics: Conference Series* **350**, 012017-012022 (2012).
4. H.M. Baghramyan, M.G. Barseghyan, C.A. Duque, A.A. Kirakosyan. Hydrostatic pressure and electric field effect on electronic states. *Proc. of SPIE* **8414**, 84140C-84140C-10 (2011).
5. H.M. Baghramyan, M.G. Barseghyan, C.A. Duque, A.A. Kirakosyan. Effects of hydrostatic pressure, temperature, electric field and aluminum concentration on the electronic states in GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As concentric double quantum rings. *J. of Phys: Conf. Series* **350**, 012016-012022 (2012).
6. H.M. Baghramyan, M.G. Barseghyan, A.A. Kirakosyan, R.L. Restrepo, C.A. Duque. Linear and nonlinear optical absorption coefficients in GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As concentric double quantum rings: Effects of hydrostatic pressure and aluminum concentration. *J. of Lumin.* **134**, 594-599 (2013).
7. H.M. Baghramyan, M.G. Barseghyan, C.A. Duque, A.A. Kirakosyan. Binding energy of hydrogenic donor impurity in GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As concentric double quantum rings: Effects of geometry, hydrostatic pressure, temperature, and aluminum concentration. *Phys. E* **48**, 164-170 (2013).
8. A.A. Kirakosyan, M.G. Barseghyan, H.M. Baghramyan, V.N. Mughnetsyan. Effect of some external factors on characteristics of nanostructures. “Актуальные вопросы физики низкоразмерных систем” *Материалы конференции посвященной 70-летию академика НАН Э.М. Казаряна.* 35-57 (2012).

БАГРАМЯН ГЕНРИХ МИКАЕЛОВИЧ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА  
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВОЙНЫХ КВАНТОВЫХ  
ТОЧЕК И КОЛЕЦ

АННОТАЦИЯ

Ключевые слова: GaAs/GaAlAs, InAs/GaAs, двойная квантовая точка, двойное квантовое кольцо, электронные и примесные состояния, энергия связи, оптическое поглощение, давление, температура, электрическое поле, концентрация алюминия

В диссертации теоретически исследовано влияние внешних факторов – гидростатического давления, температуры, электрического поля, а также состава и геометрических характеристик системы на электронные и примесные состояния в двойной цилиндрической квантовой точке (ДЦКТ) и двойном концентрическом квантовом кольце (ДККК). Исследованы также оптические переходы и вычислены связанные с ними коэффициенты поглощения. Ниже приведены основные выводы, следующие из результатов диссертационной работы.

1. При фиксированных значениях размеров структуры влияние давления приводит к уменьшению энергии симметричных и антисимметричных состояний в InAs/GaAs ДЦКТ, а воздействие температуры – к их увеличению. Такое поведение энергий в основном обусловлено сильной зависимостью эффективной массы электрона от давления и температуры. Показано, что влияние изменения вертикальных размеров структуры на энергии основных и возбужденных состояний сильнее, чем радиальных размеров.
2. Увеличение давления при всех выбранных значениях размеров InAs/GaAs ДЦКТ приводит к увеличению пороговой энергии, а повышение температуры – к ее уменьшению. Для межзонных переходов получено правило отбора  $\mu_{hh} = \mu_e$  для азимутальных квантовых чисел тяжелой дырки и электрона, а также правило, разрешающее переходы только между состояниями одинаковой симметрии. Увеличение высот и радиусов квантовых точек приводит к “красному” смещению спектра поглощения, а увеличение давления и расстояния между подложками к “голубому” смещению.
3. В ДККК GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As влияние давления и напряженности электрического поля приводит к понижению основного состояния энергии, причем скорость убывания кривой зависимости от давления увеличивается для значений, больших, чем давление, которое соответствует пересечению Г- и X-минимумов. При увеличении концентрации алюминия и повышении температуры энергия основного состояния

- увеличивается. В интервале  $0 < P < 8,37$  кбар наблюдается увеличение максимального значения плотности вероятности электрона во внутреннем кольце и ее уменьшение во внешнем кольце. В интервале  $8,37 \text{ кбар} < P < 29,67$  кбар наблюдается обратное явление. С повышением температуры плотность вероятности уменьшается во внутреннем кольце и увеличивается во внешнем, а уменьшение концентрации алюминия приводит к “размазыванию” электронного облака по всей структуре.
4. В GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ДККК для внутризонных оптических переходов получено правило отбора  $\mu_e - \mu_g = \pm 1$ . Кривая зависимости пороговой энергии от давления, вследствие пересечения Г- и X-минимумов, меняет скорость убывания, при этом для значения  $L_c = 10$  нм она может как убывать, так и возрастать. Увеличение ширины барьера между кольцами и внешнего кольца приводит к “красному” смещению спектра поглощения и ослаблению поглощения. Влияние давления и концентрации алюминия приводит как к “голубому”, так и “красному” смещению поглощения, а также к усилению поглощения. При малых значениях концентрации  $x = 0,03$  и  $x = 0,05$  имеет место расщепление максимума полного коэффициента поглощения на два максимума.
  5. Вследствие перемещения максимума плотности вероятности из внутреннего кольца во внешнее, зависимости энергии связи основного состояния примеси от ширины барьера и внешнего кольца имеют области возрастания, убывания и постоянства. Рост давления приводит к увеличению энергии связи, причем вследствие пересечения Г- и X-минимумов, скорость возрастания может как увеличиваться, так и уменьшаться. Повышение температуры приводит к уменьшению энергии связи, причем в области  $T > 200$  К скорость уменьшения возрастает. При больших значениях концентрации энергия связи имеет два максимума во внутреннем и внешнем кольцах, а уменьшение концентрации приводит к их смещению и понижению энергии связи.
  6. В ДККК GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As влияние электрон-примесного взаимодействия на энергии 1s и 2s примесных состояний сильнее сказывается на зависимости этих энергий от ширины внешнего кольца, давления и положения примеси, и сравнительно слабо на зависимости от ширины барьера и концентрации. Влияние упомянутых параметров на 2s состояние выражено слабее, чем на 1s состояние вследствие сильного квантования последнего. Увеличение ширины барьера, давления и концентрации приводит к “голубому” смещению, а увеличение ширины внешнего кольца – к “красному” смещению. При увеличении рассмотренных значений положения примеси получено “красное” смещение, хотя исследование зависимости пороговой энергии от положения примеси показывает, что имеются промежутки, где возможно “голубое” смещение.

THEORETICAL INVESTIGATION OF EXTERNAL FACTOR INFLUENCES ON  
ELECTRONIC STATES AND OPTICAL PROPERTIES OF QUANTUM RINGS AND  
QUANTUM DOTS

SUMMARY

Key words: GaAs/GaAlAs, InAs/GaAs, double quantum dot, double quantum ring, electronic and impurity states, binding energy, optical absorption, pressure, temperature, electric field, Al concentration

In this dissertation the influence of hydrostatic pressure, temperature, electric field, as well as the composition and the geometrical characteristics of the system on electronic and impurity states in double cylindrical quantum dot (DCQD) and double concentric quantum ring (DCQR) is theoretically investigated. Also, in these structures the optical transitions are studied and related absorption coefficients are calculated too. Below are presented the main conclusions, which are the consequence of dissertation work:

1. For fixed values of structure sizes of InAs/GaAs DCQD the influence of hydrostatic pressure leads to the decrease of the symmetric and antisymmetric state energies, and the influence of temperature to their increase. This behavior is mainly resulted by the strong dependence of electron effective mass on pressure and temperature. It is shown that the influences of structure's vertical sizes changes on the energies of the ground and the first excited states are stronger than influence of the variation of radial sizes.
2. In the InAs/GaAs DCQD the increase of pressure brings to the increase of threshold energy for all the chosen values of sizes, whereas the increase of temperature leads to its decrease. For interband transitions the selection rule  $\mu_{hh} = \mu_e$  is obtained for angular quantum numbers and also the selection rule which allows the transitions between the states with the same symmetry. The increasing of the heights and the radii of quantum dots result in the "redshift" of the absorption spectrum, whereas the increase of the distance between the wetting layers and pressure leads to the "blueshift".
3. In the GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As DCQR the influence of pressure and electric field strength brings to the decrease of the ground state energy, and the decrease speed of the pressure dependence curve increases for pressure values greater than value for  $\Gamma$ - and X-minima crossover. With the increase of aluminum concentration and temperature the ground state energy increases. In  $0 < P < 8,37$  kbar region the increasing of electron probability density in

inner ring and the decrease of it in the outer one is observed. The opposite effect is observed in the  $8,37 \text{ kbar} < P < 29,67 \text{ kbar}$  region.

4. For intraband transitions in the GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As DCQR the selection rule  $\mu_e - \mu_g = \pm 1$  is obtained. Because of the  $\Gamma$ - and X-minima crossover the curve of threshold energy dependence on pressure changes the decreasing speed, and in the case of  $L_c = 10 \text{ nm}$  for threshold energy there are both the decreasing and increasing regions. The increase of the barrier width between rings and the width of the outer ring result in the “redshift” of the absorption spectrum, and to the weakening of absorption. The influence of pressure and aluminum concentration brings to both the “blueshift” and the “redshift” and also to the strengthening of absorption. For smaller values of concentration  $x = 0,03$  and  $x = 0,05$  the splitting of total absorption coefficient maximum was obtained.
5. The impurity ground state energy dependences on the barrier and the outer ring widths have intervals of increasing, decreasing and constant behaviors, resulting from the shift of the probability density maximum value from the inner ring to the outer. The hydrostatic pressure increase leads to binding energy increase, and because of the  $\Gamma$ - and X-minima crossover the increasing speed can both decrease and increase. The increase of temperature brings to the decrease of binding energy, with the increase of decrease speed in  $T > 200 \text{ K}$  region. For greater values of concentration the binding energy has two maxima in the inner and outer rings, but the decrease of concentration results in the shifting of them and in decrease of binding energy.
6. In the GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As DCQR the influence of electron-impurity interaction on 1s and 2s energies of impurity states is stronger on the dependences of these energies on the outer ring width, pressure and the impurity position, and are relatively weaker for the dependences on barrier width and concentration. The influence of the above mentioned parameters is weaker on the 2s state than on 1s state, because of the strong size-quantization of the latter. The increasing of the barrier width, pressure and concentration leads to the “blueshift” and the increase of the outer ring width – to the “redshift”. With decreasing the examined values of impurity position the “redshift” of the spectrum was obtained, although from the threshold energy dependence can be inferred also the “blueshift”.

