

**ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՒ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ**

ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ ԿԱՐԵՆ ԱՐՇԱԿԻ

**ՍՊԻՆ-ՈՐԲԻՏԵՐԱՅԻՆ ՓՈԽԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ
ԱՌԱՋՆԱՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ
ՆԱՆՈՎԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ**

**Ա.04.07– «Կոնդենսացված վիճակի ֆիզիկա» մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի
հայցման ատենախոսության**

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2018

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

ВАРДАНЯН КАРЕН АРШАКОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ СПИН-ОРБИТАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 01.04.07 – “Физика конденсированного состояния”**

Е Р Е В А Ն 2018

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երեւանի պետական համալսարանում:

Գիտական ղեկավար՝	ՀՀ ԳԱԱ թղթ.անդամ, ֆիզ.մաթ.գիտ.դոկտոր, պրոֆեսոր Ա. Կիրակոսյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս ֆիզ.մաթ.գիտ.դոկտոր, պրոֆեսոր Է. Ղազարյան ֆիզ.մաթ.գիտ.դոկտոր, պրոֆեսոր Դ. Բաղայան
Առաջատար կազմակերպություն՝	ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի եւ Էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ

Պաշտպանությունը տեղի կունենա 2018թ. ապրիլի 21-ին, ժամը 12⁰⁰-ին Երեւանի պետական համալսարանի ֆիզիկայի 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցեն՝ Երեւան 0025 Ալեք Մանուկյան 1

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրը ցրված է 2018թ. մարտի 19-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝	ֆիզ.մաթ.գիտ.թեկնածու, դոցենտ Վ.Զալանթարյան
--	---

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете

Научный руководитель:	Член корр. НАН РА доктор физ. мат. наук, профессор А. Киракосян
Официальные оппоненты:	Академик НАН РА доктор физ. мат. наук, профессор, Э. Казарян доктор физ. мат. наук, профессор Д. Бадалян
Ведущая организация:	Институт радиофизики и электроники НАН РА

Защита состоится 21-го апреля 2018г. в 12⁰⁰ 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 19-го марта 2018 г.

Ученый секретарь специализированного совета	кандидат физ. мат. наук, доцент В. Калантарян
--	--

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅԱՆ ԱՐԴԻԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Նանտտեխնոլոգիաների դերը կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքների ֆիզիկայում դժվար է գերազնահատել: Նանոմասշտաբային համակարգերի նախագծմամբ եւ ստեղծմամբ չափային քվանտամեխանիկական երեւոյթների տեսական եւ փորձարարական ուսումնասիրումը դարձել է բացառիկ կարեւոր՝ առաջադրելով նոր պահանջներ առեւտրային էլեկտրոնիկայի հաջորդ սերնդի սարքերի փորձարարական բնութագրերին: Այս տեսանկյունից զարգացումն ընթանում է կիսահաղորդչային նանոհամակարգերում ֆիզիկական պրոցեսների կառավարելիության աստիճանի մեծացման ուղղությամբ: Սա, մասնավորապես, ենթադրում է ինչպես որոշ փոխազդեցությունների ճնշում եւ, նույնիսկ, ընդհուպ միջեւ կասեցում, այնպես էլ որոշ (ցանկալի) փոխազդեցությունների ապահովում եւ կառավարում:

Պինդմարմնային կառուցվածքներում գործնականում չբացառվող փոխազդեցություններից է տարբեր քվազիմասնիկների փոխազդեցությունը ֆոնոնային համակարգի հետ: Այս փոխազդեցության կառավարման խնդիրը գիտական նորագույն ուղղության՝ ֆոնոնիկայի կամ ֆոնոնային ճարտարագիտության հիմնական խնդիրն է [1], որը սովորաբար լուծվում է կառուցվածքների բաղադրյալ նյութերի, ինչպես նաեւ ակտիվ միջավայրի ձեւի եւ չափերի ընտրությամբ: Նանոկառուցվածքներում բաժանման սահմանների առկայությունը կարող է արմատապես փոխել ձայնային եւ օպտիկական ֆոնոնային մոդերի դիսպերսիան եւ վիճակների խտությունը, պայմանավորելով նոր տիպի ֆոնոնային համակարգի առաջացում: «Ֆոնոնային սահմանափակում» հասկացությունը հենց համարժեք է նշված ֆոնոնային համակարգի ձեւավորմանը: Ֆոնոնային սահմանափակման հաշվառումը հնարավորություն է տալիս այդ համակարգի հետ փոխազդեցություններում ոչ միայն հնարավորինս ճշգրիտ մոդելավորելու ֆիզիկական իրողությունը, այլ նաեւ ստանալու այդ փոխազդեցությունների կառավարման հնարավորություն: Կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքներում ֆոնոնային փոխազդեցությունները դիտարկվում են կամ քվազիմասնիկների ցրման, կամ դրանց էներգիաների վերանորմավորման (պոլարոնային վիճակների առաջացման) տեսանկյունից [2]:

Ֆիզիկական պրոցեսների կառավարելիության աստիճանի մյուս ճանապարհը ավելի փոքր չափերով կիսահաղորդչային նանոհամակարգերի ստացման և դրանցում էլեկտրոնների թվի հոսալի հսկման ուղղությունն է: Այդպիսի խոստումնալից հեռանկարը նախ եւ առաջ առաջնահերթորեն վերաբերում է հաղորդականության էլեկտրոնների կամ խոռոչների հնարավորինս փոքր քանակությամբ քվանտային կետերով (ԶԿ) համակարգերին: Եթե ԶԿ-երի համակարգում յուրաքանչյուր ԶԿ պարունակում է մեկ կամ մի քանի լիցքակիր, ապա դրանց հետ կապված տեղափոխման, օպտիկական անցումների, ռելաքսացման, վերամիավորման եւ այլ դինամիկական երեւոյթներ կարելի է վերահսկել արտաքին գործոնների միջոցով: Այդ երեւոյթներում կարող է դրսեւորվել էլեկտրոնային գրգռումների ինչպես լիցքը, այնպես էլ սպինը: Կիսահաղորդչային նանոֆիզիկայի բնագավառում տեսական եւ փորձարարական

հետազոտություններում խնդիրների այսպիսի դրվածքը հնարավորություն է ընձեռել ստեղծելու էլեկտրոնային եւ սպինային պահանջված հատկություններով նանոհամակարգեր [3-9].

Վերջին երկու տասնամյակում շատ մեծ է հետաքրքրությունը նանոկառուցվածքներում էլեկտրոնային գրգռումների սպինին առնչվող երեւույթների վերաբերյալ [10]: Արդեն ձեւավորվել է ժամանակակից պինդ մարմնի ֆիզիկայի նոր բնագավառ՝ սպինտրոնիկան, հիմնարար գիտական ձեռքբերումներով եւ առեւտրային նշանակության նորաբնույթ էլեկտրոնային սարքերի ստեղծման հեռանկարով: Ի տարբերություն ավանդական պինդմարմնային էլեկտրոնիկայի, որում սպինի դերը սովորաբար անտեսվում է, սպինտրոնիկայի հիմնական հայեցակարգը հիմնված է մի կողմից միկրո- եւ նանոէլեկտրոնային, մյուս կողմից՝ սպինային երեւույթների համատեղ դիտարկման եւ կիրառական հնարավորությունների իրականացման վրա:

Կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքներում ֆոնոնների մասնակցությամբ անցումների ուսումնասիրման նկատմամբ մեծ հետաքրքրությունը, մասնավորապես, պայմանավորված է այդ հենքի վրա նախագծվող եւ ստեղծվող լազերներով: Հայտնի է, որ լազերային դիողի ակտիվ տիրույթում ցածր չափայնությամբ էլեկտրոնային համակարգերի օգտագործումը պահանջված է այն հնարավոր առավելությունների շնորհիվ, որոնք արդյունք են նշված համակարգերում էլեկտրոնային վիճակների խտության առանձնահատկությունների [11-13]: Այս առումով, բարձր կատարելիության ՔԿ-երի համակարգերի ստեղծումը եւ դրանց օպտոէլեկտրոնային հատկությունների ուսումնասիրումը կարող է կիսահաղորդչային լազերների ուսումնասիրման եւ տեխնոլոգիաների բնագավառում հանգեցնել արմատական փոփոխությունների՝ նկատի ունենալով դրանց փոքր շեմային հոսանքները, փոքր ջերմային զգայունությունը եւ համեմատաբար մեծ մոդուլման արագությունը [14,15]: Օպտոէլեկտրոնային հատկությունների տեսանկյունից հատկապես կարեւորվում է ՔԿ-երում լիցքակիրների դինամիկայի ջերմաստիճանային կախման տեսական եւ փորձարարական ուսումնասիրումը [15,16]: Արգելքի տիրույթից ՔԿ-ի հիմնական վիճակ լիցքակրի էներգիական ռելաքսացիայի արագությունը, որով պայմանավորված է լազերային մոդուլման արագության հիմնարար սահմանը, ուսումնասիրվել է գերարագ օպտիկական մեթոդների (մոլումային տեսածրող սպեկտրադիտում (pump-probe spectroscopy), ժամանակային լուծունակությամբ ֆոտոլումինեսցենստային փորձեր (time resolved photoluminescence experiments)) կիրառմամբ: Տարբեր փորձարարական խմբերի գրանցած ռելաքսացիայի փոքր ժամանակները [17-20] խոստովանալից են ՔԿ-երով լազերների արագագործության առումով, եթե, հատկապես, հաշվի առնվի նաեւ ՔԿ-երի էներգիական սպեկտրի ճարտարագիտության [21], ինչպես նաեւ թունելացման միջոցով էլեկտրոնի՝ ՔԿ-ի հիմնական վիճակ ուղիղ ներարկման [22] հնարավորությունը:

Ներկայում, ՔԿ-երով լազերների հետ կապված, մեծ է հետաքրքրությունը նաեւ կասկադային անցումների նկատմամբ, երբ քվանտային անցումները տեղի են ունենում նախ էլեկտրոն-ֆոնոն (ԷՖ), ապա էլեկտրոն-էլեկտրոն (օժե-պրոցես) ցրումների արդյունքում: Օժե-պրոցեսներն ունեն կարեւորագույն դեր նանոմասշտաբային կառուցվածքներում ֆոտոգեներացված վիճակների դինամիկայում: Լիցքակիրների սահմանափակումը փոքր ծավալներում մե-

ծացնում է կուլոնյան փոխազդեցությունը եւ հետեւաբար՝ «լիցքակիր-լիցքակիր» ցրումների արդյունավետությունը: ԶԿ-երում օժե-պրոցեսները կառավարում են լիցքակիրների [23] եւ էքսիտոնների [24-27] դինամիկան եւ ազդում ԶԿ-ի ֆոտոյումինեսցենստման վրա [28]:

Շատ կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքների հենքն իոնային կիսահաղորդչային միացություններ են, որոնցում էլեկտրոնի փոխազդեցությունն օպտիկական ֆոնոնների հետ կարող է լինել ուժեղ (Ֆրյոլիխի հաստատունը մեծ է 1-ից): Բացի այդ, հայտնի է [29], որ նանոկառուցվածքներում էլեկտրոնի տեղայնացումը եւս հանգեցնում է «էլեկտրոն-օպտիկական ֆոնոն» փոխազդեցության ուժեղացման: Այսպիսի կառուցվածքներում ուժեղ է նաեւ սպին-ուղեծրային (ՍՈւ) փոխազդեցությունը: Հետեւաբար՝ կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքներում ԷՖ եւ ՍՈւ փոխազդեցությունների համատեղ դիտարկումը կարելու է ինչպես պոլարոնային վիճակների [30,31], այնպես էլ օպտիկական եւ ռելաքսային երեւույթների տեսական ուսումնասիրման տեսանկյունից:

Սպինտրոնիկայի եւ քվանտային տրանսպորտի կարելորագույն խնդիրներից մեկը ԶԿ-երում տեղայնացված սպինային վիճակների արագ եւ արդյունավետ մանիպուլումն է՝ պարամետրերի թռիչքաձեւ փոփոխությամբ մոդուլումը: Այն հնարավորություն կտա նախագծելու քվանտային հաշվարկումներում (quantum computing) եւ հիշողության պահոցներում (memory storage) կիրառվող արագագործ եւ էներգախնայող քվանտային սարքեր [10,32]: Սպինային մանիպուլումը պահանջում է սպինային ռելաքսացիայի եւ կոհերենտության երկար ժամանակ, ուստի շատ կարելու է պարզել ԶԿ-երում սպինային ռելաքսացիայի եւ սպինային վիճակների ապակոհերենտության մեխանիզմները եւ հաշվարկել համապատասխան ժամանակները: Այս տեսանկյունից կարելու է ՍՈւ փոխազդեցությունը՝ միջնորդված ֆոնոնային ցրումներով:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՆՊԱՏԱԿԸ

Ատենախոսության գլխավոր նպատակը կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքներում ֆոնոնային սահմանափակման հաշվառմամբ ԷՖ փոխազդեցության դերի ուսումնասիրումն է այնպիսի էլեկտրոնային երեւույթներում, որոնցում էլեկտրոնի սպինը կամ ՍՈւ փոխազդեցությունը կարող են ունենալ կարելու նշանակություն: Այն նվիրված է կիսահաղորդչային քվանտային կառուցվածքներում էլեկտրոնային եւ ֆոնոնային ենթահամակարգերի որոշ բնութագրերի վրա ԷՖ եւ ՍՈւ փոխազդեցությունների (Ռաշբա, Դրեսելիաուս) ազդեցությունների տեսական հաշվարկմանը:

ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

1. Առաջին անգամ ուսումնասիրվել է ֆոնոնային սահմանափակման ազդեցությունը ԶԿ-ի հիմնական վիճակում էլեկտրոնի կալանման վրա, որը կարող է տեղի ունենալ մեկֆոնոնային, երկֆոնոնային կամ կասկադային անցման արդյունքում, երբ արգելի տիրույթից էլեկտրոնն օպտիկական ֆոնոնի առաքմամբ նախ անցնում է ԶԿ-ի զրգռված վիճակ, ապա՝ օժե-ցրման հետեւանքով կալանվում հիմնական վիճակում:

2. Ցածր չափայնությամբ կիսահաղորդչային էլեկտրոնային համակարգերի համար զարգացվել է ֆոյոլիիայան պոլարոնի տեսությունը Ռաշբայի (ՌՍՈՆ) եւ Դրեսելիաուսի (ԴՍՈՆ) ՍՈԼ փոխազդեցությունների, ինչպես նաեւ ֆոնոնային սահմանափակման հաշվառմամբ:
3. Էլեկտրոնի սպինային վիճակի կոհերենտության ժամանակի մեծացման համար առաջարկվել է մոդել (սպինային վիճակ՝ ֆոնոնային ռեզոնատորում տեղակայված երկչափ ԶԿ-ում) եւ առաջին անգամ ուսումնասիրվել սպինային վիճակի ռելաքսացիան՝ պայմանավորված ձայնային ֆոնոններով եւ ՍՈԼ փոխազդեցությամբ:

ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ԱՐԺԵԶԸ

Ատենախոսությունը կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքների կարեւորագույն ժամանակային բնութագրերի եւ պոլարոնային վիճակների հիմնական բնութագրերի հիմնարար գիտական ուսումնասիրությունը է: Որպես այդպիսին, այն ոչ միայն արժեքավոր է փորձարարական արդյունքների մեկնաբանման առումով, այլ նաեւ առաջնահերթորեն կարեւորվում է կիրառական նշանակությամբ, քանի որ ցածր չափայնությամբ էլեկտրոնային համակարգերով կիսահաղորդչային կառուցվածքներն անընդհատ մեծացող տեմպով կիրառվում են ժամանակակից էլեկտրոնային սարքաշինությունում: Այնպիսի կարեւոր ժամանակային բնութագրի՝ ԶԿ-ում էլեկտրոնի կալանման արագության, ուսումնասիրումը՝ կախված արտաքին գործոններից (ջերմաստիճան, ԶԿ-ի չափեր, ներարկվող կամ ֆոտոզեներացվող էլեկտրոնային կոնցենտրացիա), ունի որոշիչ դեր ԶԿ-երով լազերների, լուսադիոդների, արեւային մարտկոցների հիմնական բնութագրերի կատարելագործման տեսանկյունից: Ազատ կայանած նանոչափային հաստությամբ կիսահաղորդչային շերտում ստեղծված երկչափ ԶԿ-ում էլեկտրոնի՝ ձայնային ֆոնոններով եւ ՍՈԼ փոխազդեցությամբ պայմանավորված սպինային ռելաքսացիայի ժամանակի կախման ուսումնասիրումը համակարգի պարամետրերից ունի գործնական նշանակություն՝ սպինտրոնային սարքերի նախագծման եւ ստեղծման համար եւ, մասնավորապես, կարեւոր է ԶԿ-երում սպինային վիճակների կոհերենտության խնդրի տեսանկյունից, քանի որ այդպիսի վիճակները որպես քուբիթներ, համարվում են հեռանկարային քվանտային հաշվարկումներում:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները

1. Ե՛վ մեկֆոնոնային, ե՛ւ երկֆոնոնային կալանման դեպքում գոյություն ունեն ԶԿ-ի շառավղի արժեքների տիրույթներ (գոտիներ), որոնցում կալանումն էներգիապես թույլատրված է: Ծավալատիպ կամ միջմակերեւութային ֆոնոնի առաքմամբ մեկֆոնոնային կալանումը շառավղից կախված ունի ուժեղ արտահայտված ռեզոնանսային բնույթ, եւ յուրաքանչյուր գոտու եզրերին մոտենալիս կալանման արագությունը նվազում է: Գոտիների առաջացումը պայմանավորված չէ ֆոնոնային սահմանափակման երեւույթով: Ֆոնոնային սահմանափակման հաշվառումը շառավղի նվազմանը զուգընթաց հանգեցնում է պիկերի բարձրությունների նվազման:

2. Միեւնույն պայմաններում երկֆոնոնային կալանման արագությունը մեկֆոնոնայինի համեմատությամբ մեկ կարգով ավելի փոքր է : «Ծավալատիպ + ծավալատիպ», «ծավալատիպ + միջմակերեւութային» եւ «միջմակերեւութային + միջմակերեւութային» երկֆոնոնային պրո-

ցեսներում անընդհատ միջանկյալ վիճակներով ընթացող կալանումների արագությունը մեծ է ընդհատ վիճակներով ընթացողների համեմատությամբ:

3. ԶԿ-ում ԷՖ ԵՆ Էլեկտրոն-Էլեկտրոն (օժե-պրոցես` սպինային վիճակների հաշվառմամբ) ցրմամբ Էլեկտրոնի կասկադային անցման ժամանակը` ցանցային ջերմաստիճանի փոփոխման լայն տիրույթում (25 Կ-ից մինչև 250 Կ), ունի թույլ ջերմաստիճանային կախում ԵՆ ընկած է 80 պվ-ից մինչև 100 պվ տիրույթում:

4. ՌՍՈՒ ԵՆ ԴՍՈՒ փոխազդեցությունների համատեղ հաշվառումը ցինկի խաբուսակի կառուցվածքով նանոհամակարգում հանգեցնում է երկչափ ֆրոյլիխյան պոլարոնի սեփական Էներգիայի կախման ալիքային վեկտորի ուղղությունից ԵՆ քիրալային թվից: Ընդ որում, պոլարոնի Էներգիան որպես ալիքային վեկտորի մոդուլից ֆունկցիա, փոխում է մոնոտոնությունը` կախված քիրալային թվից: ՍՈՒ փոխազդեցության անդամներից միայն որեւէ մեկի հաշվառումը միշտ հանգեցնում է պոլարոնի սեփական Էներգիայի մեծացման ինչպես «սպին-վեր», այնպես էլ «սպին-վար» դեպքում, մինչդեռ երկու անդամների համատեղ դիտարկմամբ պոլարոնային ազդեցությունը որոշակի ուղղություններով ՍՈՒ փոխազդեցության անտեսմամբ ստացված արդյունքի համեմատ կարող է ոչ միայն ուժեղանալ, այլ նաեւ թուլանալ:

5. Վյուրցիտային կառուցվածքով նիտրիդային քվանտային փոսում, ի տարբերություն ցինկի խաբուսակի կառուցվածքով հետերոկառուցվածքների, երկչափ ֆրոյլիխյան պոլարոնի Էներգիան (նաեւ սեփական Էներգիան) ՌՍՈՒ ԵՆ ԴՍՈՒ փոխազդեցությունների համատեղ հաշվառման դեպքում ինչպես «սպին-վեր», այնպես էլ «սպին-վար» վիճակներում օժտված չէ անկյունային անիզոտրոպությամբ, իսկ արդյունարար զանգվածի անիզոտրոպությունը պայմանավորված է նշված համակարգերում օպտիկական ֆոնոնային մոդերի անիզոտրոպ բնույթով:

6. ՌՍՈՒ ԵՆ ԴՍՈՒ փոխազդեցություններն առանձին-առանձին ԵՆ համատեղ ունեն միատեսակ ազդեցություն միաչափ ֆրոյլիխյան պոլարոնի սեփական Էներգիայի ԵՆ արդյունարար զանգվածի վրա: ՍՈՒ փոխազդեցությունների հաշվառումը, փոքրացնում է (մեծացնում է) «սպին-վար» («սպին-վեր») պոլարոնային վիճակի սեփական Էներգիան ԵՆ արդյունարար զանգվածն ինչպես ծավալատիպ ԵՆ միջմակերելության թեւեռային օպտիկական ֆոնոնների վրա ցրումների առանձին-առանձին, այնպես էլ համատեղ հաշվառման դեպքում:

7. Սպինի ռելաքսացիայի արագությունը` կախված մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից, փոխվում է լայն տիրույթում, որը կարող է օգտագործվել մագնիսական դաշտի միջոցով ռելաքսացիայի պահանջված արագության ապահովման համար: Այդ կախմանը բնորոշ է անցման թույլատրված ԵՆ արգելված տիրույթների առկայությունը, որը հետեւանք է ֆոնոնային մոդերի չափային քվանտացման: Սպինային անցումների թույլատրելի տիրույթներում, Ռաշբայի ԵՆ Դրեսելիաուսի պարամետրերի միեւնույն արժեքի դեպքում, դրեսելիաուսյան ռելաքսացիայի արագությունը զգալիորեն գերազանցում է ռաշբայան ռելաքսացիայի արագությանը:

8. ԶԿ-ի առաջին զրգռված վիճակից` հիմնական վիճակ սպինային ռելաքսացիայի արագության կախումը սահմանափակման Էներգիայից չունի ռեզոնանսային բնույթ, անկախ ՌՍՈՒ, ԵՆ ԴՍՈՒ փոխազդեցություններից: Սահմանափակման Էներգիայից ռեզոնանսային կախում

դիտվում հաջորդ՝ ավելի մեծ էներգիայով վիճակից սպինի շրջամաբ հիմնական վիճակ անցման դեպքում:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄԸ

Աշխատանքի արդյունքները գեկուցվել են ԵՊՀ պինդ մարմնի ֆիզիկայի, Հայ-ռուսական (Սլավոնական) համալսարանի ընդհանուր ֆիզիկայի եւ քվանտային նանոկառուցվածքների ամբիոնների սեմինարներում, ներկայացվել 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18) Kobe, Japan, July 19 – 24/July, 2009, 20th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology” , Saint Petersburg, Russia, 24-30/June, 2012, 22nd International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology” , Saint Petersburg, Russia, 23-27/June, 2014, 19th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures, Salamanca, Spain, 29/June - 2/July, 2015, 17th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials, Paris, France, 13-18/September, 2015, International Symposium and young scientist school on disordered and ordered materials analyses and characterization , Yerevan, Armenia, 24-30/September, 2015, 3rd International Symposium “Optics and its Applications”, Yerevan-Ashtarak, Armenia, 01-10/October, 2015, 2nd International Symposium on Optics and its Applications. ICTP OPTICS-2014, Yerevan, 1-5/September, 2014, միջազգային գիտաժողովներում:

ՀՐԱՊԱՐԱԿՈՒՄՆԵՐԸ

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրված են 10 հոդվածում, որոնց ցանկը տրված է սեղմագրի վերջում:

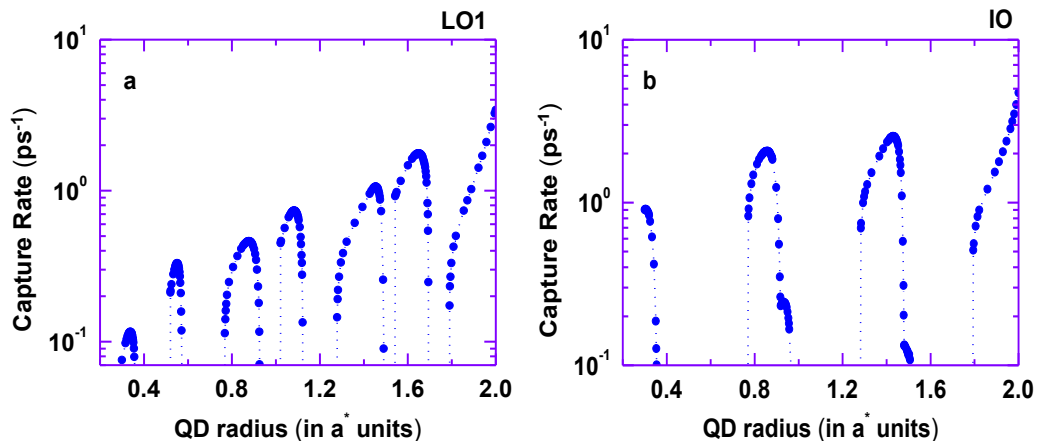
ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԸ ԵՒ ԾԱՎԱԼԸ

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, երեք գլխից, եզրակացությունից, մեկ հավելվածից եւ 120 անուն գրականության ցանկից: Այն շարադրված է 110 էջում եւ ներառում է 37 նկար եւ 2 աղյուսակ: Ատենախոսության հիմնական արդյունքները հրատարակված են ատենախոսության [40-43, 66-70, 94] աշխատանքներում:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ատենախոսության ընդհանուր ներածությունը ներկայացնում է այն գիտական արդյունքների վերլուծությունը, որոնք սերտորեն առնչվում են ատենախոսության թեմային:

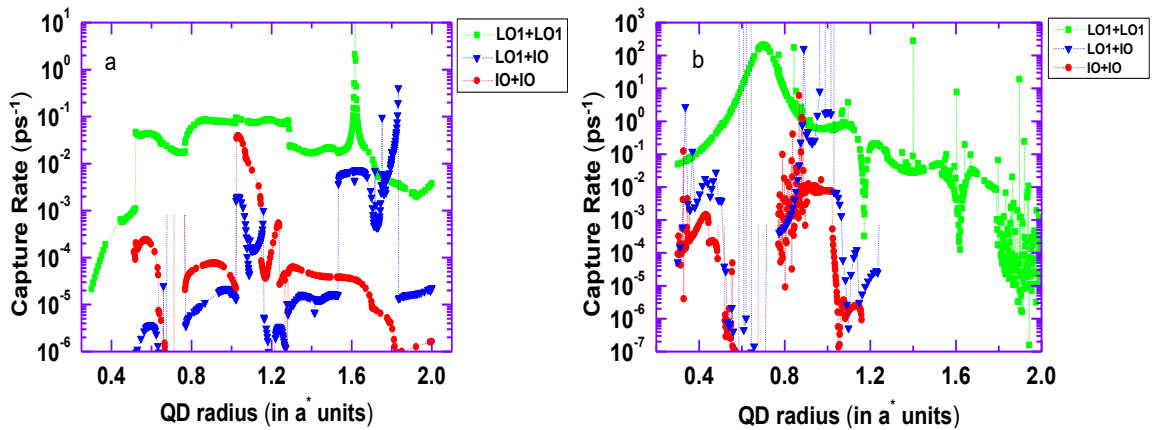
Ատենախոսության առաջին գլուխը նվիրված է ԶԿ-ի հիմնական վիճակում էլեկտրոնի կալանման մի քանի կարեւոր ընթացուղիների ուսումնասիրմանը բեւեռային կիսահաղորդչային ԶԿ-ով կառուցվածքում օպտիկական ֆոնոնների մասնակցությամբ: Մասնավորապես, դիտարկվում են մեկֆոնոնային, երկֆոնոնային կամ օպտիկական ֆոնոններով միջնորդված օժեցրմամբ ԶԿ-ի արգելքի տիրույթում ֆոտոգեներացված էլեկտրոնի անցում ԶԿ-ի հիմնական վիճակ: Ընդ որում, բոլոր դեպքերում հաշվի է առնվում ֆոնոնային սահմանափակումը, որը պայմանավորված է կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքում միջավայրերի բաժանման սահման-



Նկ.1. Մեկֆոնոնային կալանման արագության կախումը GaAs/AlAs/վակուում ՔԿ-ով գնդային հետերոկառուցվածքի շառավղից (Բոռի առոուևառառ շառավղի միասոններով):

Ների առկայությամբ: §1-ում համառոտ վերլուծված է վերոնշյալ հարցերին առնչվող գիտական գրականությունը, իսկ §2-ում ներկայացված կալանման պրոցեսի հավասարումները եւ հիմնական բնութագրերը: §3-ում բերված են գնդային ՔԿ-ով հետերոկառուցվածքում մեկ-լեկտրոնային վիճակների եւ բեւեռային օպտիկական ֆոնոնային մոդերի վերաբերյալ հայտնի արդյունքները, որոնք հիմք են ծառայում ֆոնոնների մասնակցությամբ էլեկտրոնի կալանման երեւոյթի ուսումնասիրման համար: Մեկֆոնոնային առաքմամբ ՔԿ-ում էլեկտրոնի կալանման տեսական ուսումնասիրմանը նվիրված է §4-ը: Թվային հաշվարկմամբ մեկֆոնոնային կալանման երեւոյթն ուսումնասիրվել է CdSe/ZnS/H₂O եւ GaAs/AlAs/վակուում ՔԿ-ով գնդային հետերոկառուցվածքներում: **Նկ.1a**-ում պատկերված է մեկֆոնոնային կալանման արագության կախումը GaAs/AlAs/վակուում ՔԿ-ով գնդային հետերոկառուցվածքի գնդի շառավղից T=300Կ եւ 10¹⁷ սմ⁻³ էլեկտրոնային կոնցենտրացիայի դեպքում, երբ առաքվում է ծավալատիպ (LO1) ֆոնոն, իսկ **Նկ.1b**-ում միջմակերեւոյթային (IO) ֆոնոն: Կարելի է ասել, որ գոյություն ունեն ՔԿ-ի շառավղի գոտիներ, որոնցում կալանումն էներգիապես թույլատրված է: Ընդ որում, կալանման արագությունը նվազում է գոտու յուրաքանչյուր եզրին մոտենալիս: Այս փաստը համաձայնության մեջ է նախկինում ստացված արդյունքների հետ [33,34]: Սա նշանակում է, որ այդ գոտիների առաջացումը պայմանավորված չէ ֆոնոնային սահմանափակման երեւոյթով: Ստացված պիկերի բարձրությունները շառավղի նվազմանը զուգընթաց նվազում են, որը հետեւանք է ֆոնոնային սահմանափակման երեւոյթի հաշվառման, քանի որ այն հանգեցնում է ԷՖ փոխազդեցության համիլտոնիանի ուժեղ կախման ՔԿ-ի շառավղից: Մեկֆոնոնային առաքման դեպքում ուսումնասիրվել է կալանման արագության կախումը նաեւ ջերմաստիճանից եւ էլեկտրոնային կոնցենտրացիայից: Կալանման արագությունը, որի ջերմաստիճանային վարքը հիմնականում որոշվում է Բոզե-Այնշտայնի բաշխման ֆունկցիայով, GaAs/AlAs/վակուում հետերոկառուցվածքում ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց մեծանում է:

Տեղին է նկատել, որ ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց կալանման արագության աճ փորձականորեն դիտվել է InAs/GaAs ՔԿ-երի համակարգում [35]: CdSe/ZnS/H₂O հետերոկառուցվածքում դիտվում է կալանման արագության կտրուկ աճ կախված էլեկտրոնային կոն-

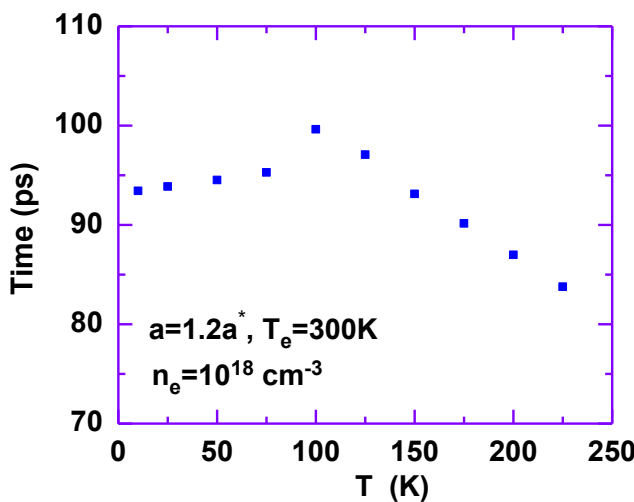


Նկ.2. Երկֆոնոնային կալանման արագության կախումը *GaAs/AlAs* վակուոում ՔԿ-ով գնդային հետերոկառուցվածքի շառավղից: Անցում *a.* ընդհատ միջանկյալ վիճակ, *b.* անընդհատ միջանկյալ վիճակ:

ցնտրացիայից: Սակայն արդեն մեծ կոնցենտրացիաների դեպքում այդ աճը դանդաղում է, եւ կալանման արագությունն սկսում է նվազել: Դա հետեւանք է այն բանի, որ ՔԿ-երում մեծանում է էլեկտրոններով զբաղեցված վիճակների խտությունը, որը եւ փոքրացնում է կալանման պրոցեսի արագությունը: **§5-**ում ուսումնասիրվել է էլեկտրոնի կալանումը ՔԿ-ում՝ երկֆոնոնային առաքմամբ, եւ ՔԿ-ի հիմնական վիճակում էլեկտրոնի կալանման արագության համար ստացվել է վերլուծական արտահայտություն: Կալանման երեւույթը թվային հաշվարկմամբ ուսումնասիրվել է *GaAs* ՔԿ-ով *GaAs/AlAs* վակուոում հետերոկառուցվածքում: Ընդ որում դիտարկվել է անցման երկու ընթացուղի՝ ընդհատ եւ անընդհատ միջանկյալ վիճակներով: **Նկ.2-**ում պատկերված է երկֆոնոնային կալանման արագության կախումը ՔԿ-ի շառավղից $LO1+LO1$, $LO1+IO$ եւ $IO + IO$ ֆոնոնային զույգերի առաքմամբ: Կալանման երկֆոնոնային տարբեր պրոցեսներում կալանման արագության շառավղային կախումը դրսեւորում է մի շարք ընդհանուր առանձնահատկություններ: Ստացված կորերի դիտարկումը, ինչպեսեւ մեկֆոնոնային կալանման դեպքում, ցուցադրում է ըստ գնդի շառավղի գոտիների առկայություն: Դա հատկապես հստակ երեւում է ընդհատ միջանկյալ վիճակներով ընթացող կալանման դեպքում: Դիտարկված բոլոր երկֆոնոնային պրոցեսներում անընդհատ միջանկյալ վիճակներով ընթացող կալանումների արագությունը մեծ է ընդհատ վիճակներով ընթացողների համեմատությամբ: Երկֆոնոնային կալանման արագությունը մեկ կարգով փոքր է մեկֆոնոնայինի համեմատությամբ: Ուսումնասիրվել է նաեւ երկֆոնոնային կալանման արագության կախումները ցանցային ջերմաստիճանից եւ արգելքի տիրույթում էլեկտրոնային կոնցենտրացիայից: Ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց կալանման արագությունը մեծանում է, որը, ինչպես եւ մեկֆոնոնային կալանման դեպքում, պայմանավորված է բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների միջին թվի մեծացմամբ:

Մեկֆոնոնային կալանման երեւույթի համեմատությամբ համարյա չի փոխվում նաեւ կալանման արագության վարքը՝ կախված էլեկտրոնային կոնցենտրացիայից, միայն այն տարբերությամբ, որ եթե մեկֆոնոնային կալանման արագության մաքսիմումը դիտվում է 10^{16} սմ³ կոնցենտրացիայի դեպքում, ապա երկֆոնոնային կալանման պարագայում այն դիտվում է ավելի

մեծ կոնցենտրացիաների դեպքում: §6-ում ուսումնասիրվել է բեւեռային գնդային ՔԿ-ում լիցքակրի՝ ֆոնոնով միջնորդված կալանումը եւ ներկետային օժե-ռելաքսացիան: ՔԿ-ը տեղակայված է ոչ բեւեռային դիէլեկտրական միջավայրում: Նախ ֆոնոնային սահմանափակման հաշվարկմամբ ուսումնասիրվել է օպտիկական ֆոնոնի առաքմամբ ՔԿ-ի որելէ գրգռված վիճակում էլեկտրոնի կալանման արագությունը: Այնուհետեւ այդ էլեկտրոնն օժե-ցրմամբ իջնում է ՔԿ-ի հիմնական մակարդակ՝ ավելցուկային էներգիան փոխանցելով կամ ՔԿ-ում կապված, կամ արգելքի տիրույթի մեկ այլ էլեկտրոնի: ՔԿ-ում էլեկտրոնների զույգի սկզբնական վիճակը (սինգլետ կամ տրիպլետ) դիտարկվում է Պաուլիի կոռելացիայի տեսանկյունից: ՔԿ-ի արգելքի տիրույթում ֆոտոգեներացված էլեկտրոնի ծավալատիպ եւ/կամ միջմակերեւութային ֆոնոններով միջնորդված օժե-ռելաքսացիայի արագությունը հաշվարկվում է խոտորումների տեսության երկրորդ մոտավորությամբ: Ստացված բանաձեւը հնարավորություն է տալիս կասկադային անցման դեպքում հաշվարկելու էլեկտրոնի ռելաքսացիայի ժամանակը՝ կախված համակարգի պարամետրերից եւ արգելքի տիրույթում էլեկտրոնային գազի ջերմաստիճանից: Նկ.3-ում ներկայացված է օժե-ցրմամբ էլեկտրոնի կասկադային անցման ժամանակը՝ կախված ցանցային ջերմաստիճանից, երբ $n_e = 10^{18} \text{ սմ}^{-3}$,



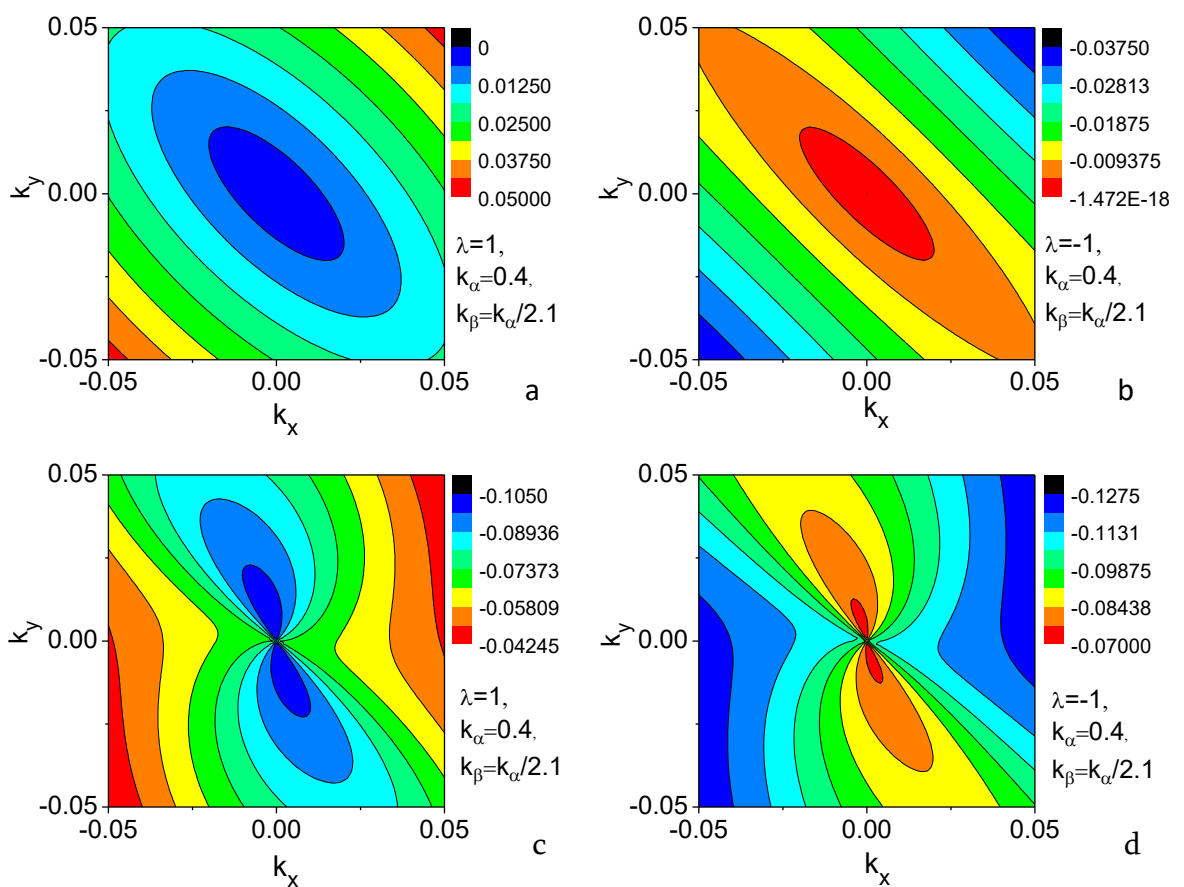
Նկ.3. GaAs ՔԿ-ում էլեկտրոնի՝ օպտիկական ֆոնոններով միջնորդված օժե-ռելաքսացիայի ժամանակի կախումը ցանցային ջերմաստիճանից:

էրբ $n_e = 10^{18} \text{ սմ}^{-3}$, ՔԿ-ի շառավիղը՝ $r_c = 1,2a^*$ եւ էլեկտրոնային ջերմաստիճանը՝ $T_e = 100\text{K}$: Հարկ է նշել, որ ռելաքսացիայի ժամանակը ցանցային ջերմաստիճանի փոփոխման ամբողջ տիրույթում (25Կ-ից մինչեւ 250Կ) ընդունում է 80 պվ-ից մինչեւ 100 պվ արժեքներ եւ բավարար համաձայնության մեջ է ավելի վաղ ստացված փորձնական արդյունքների հետ [36]: Վերջերս կատարված մի փորձում ստացված արդ-

յունքների հիման վրա [37] աշխատանքի հեղինակները, հղելով մեր [38] աշխատանքը, ուղղակիորեն փաստում են մեր տեսականորեն կանխատեսած արդյունքների ճշմարտացիությունը:

Ատենախոսության երկրորդ գլխում ցինկի խաբուսակի եւ վյուրցիտային կառուցվածքով բյուրեղների հենքի վրա ստեղծված երկչափ էլեկտրոնային գազում ֆոնոնային սահմանափակման եւ ՌՍՈւ ու ԴՍՈւ փոխազդեցության հաշվառմամբ ուսումնասիրվել է ֆրոյլիխյան պլարոնի հիմնական բնութագրերը: Համանման խնդիր դիտարկվել է նաեւ նանոլարում: §1-ում ներկայացված է ցինկի խաբուսակի կառուցվածքով բյուրեղի հենքի վրա ստեղծված երկչափ էլեկտրոնային համակարգում ՌՍՈւ եւ ԴՍՈւ փոխազդեցությունների համիլտոնիանները, իսկ

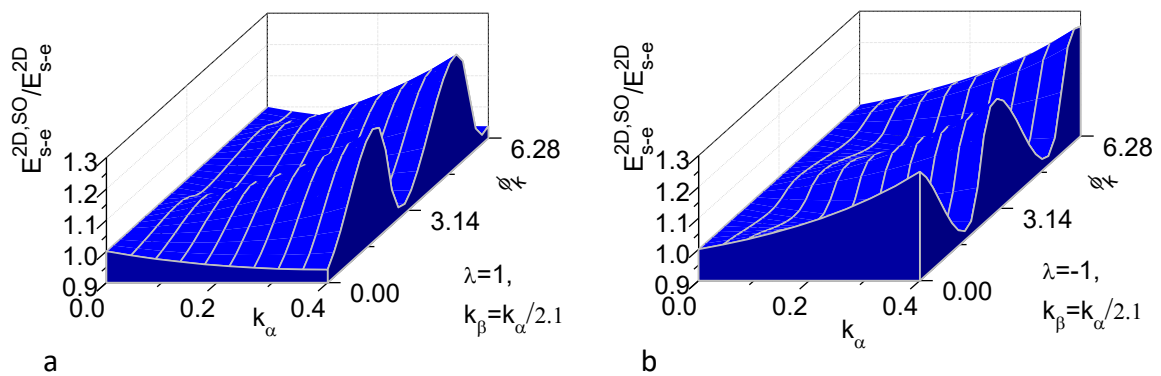
§2-ում հաշվարկվել երկչափ էլեկտրոնային վիճակներն այդ փոխազդեցությունների համատեղ հաշվառմամբ: §3-ը նվիրված է ՌՍՈԼ եւ ԴՍՈԼ փոխազդեցությունների համատեղ հաշվառմամբ երկչափ էլեկտրոն-օպտիկական ֆոնոն փոխազդեցության համիլտոնիանի եւ խոտորումների տեսության երկրորդ մոտավորությամբ ֆոյնիլիսյան պոլարոնի էներգիայի հաշվարկմանը: Դիտարկված դեպքերում հաշվարկվել են պոլարոնային վիճակի էներգիայի կախումը երկչափ քվազիալիքային վեկտորից, ինչպես նաեւ պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի կախումները ՍՈԼ փոխազդեցության բնութագրական պարամետրերից: **Նկ.4**-ում կոնտուրային պատկերմամբ ներկայացված է էլեկտրոնի չափազուրկ էներգիան՝ $E\Phi$ փոխազդեցության անտեսմամբ եւ հաշվառմամբ, քիրալության ցուցչի $\lambda = 1$ եւ $\lambda = -1$ արժեքների դեպքում: $E\Phi$ փոխազդեցության հաշվառումը, ձեւախախտելով ՍՈԼ փոխազդեցու-



Նկ. 4. *InAs/GaAs քվանտային փոսում երկչափ էլեկտրոնի (a,b) եւ երկչափ պոլարոնի (c,d) չափազուրկ էներգիաների կոնտուրային պատկերումն ալիքային վեկտորի հարթության վրա, քիրալության ցուցչի $\lambda = 1$ (a,c) եւ $\lambda = -1$ (b,d) արժեքների դեպքում:*

թյան հաշվառմամբ առկա անկյունային անհզոտրոպությունը, այնուամենայնիվ, պահպանում է էներգիայի փոփոխության պարբերականությունը:

Նկ.5-ում 3D պատկերմամբ ցուցադրված է երկչափ պոլարոնի չափազուրկ սեփական էներգիան $\lambda = 1$ եւ $\lambda = -1$ դեպքերում ՍՈԼ փոխազդեցության երկու անդամների համատեղ հաշվառմամբ: ՌՍՈԼ եւ ԴՍՈԼ փոխազդեցությունների համատեղ հաշվառման դեպքում պոլարոնի սեփական էներգիան անհզոտրոպ է, այսինքն՝ նրանում առկա է կախում բեւեռային ϕ_k



Նկ.5. 3D պատկերմամբ՝ InAs/GaAs քվանտային փոսում *a.* $\lambda = 1$ եւ *b.* $\lambda = -1$ դեպքերում երկչափ պոլարոնի չափազուրկ սեփական էներգիան սպին-ուղեծրային փոխազդեցության երկու անդամների համատեղ հաշվառմամբ:

անկյունից: Ընդ որում, պոլարոնի սեփական էներգիան $\lambda = 1$ եւ $\lambda = -1$ արժեքների դեպքում բեւեռային անկյունից կախված փոխվում է այնպես, որ եթե λ -ի որեւէ արժեքի դեպքում ϕ_k -ի փոփոխման որեւէ տիրույթում այն աճում է, ապա λ -ի մյուս արժեքի դեպքում նույն տիրույթում այն նվազում է, եւ ընդհակառակը: **§4**-ը նվիրված է Ֆրյոնիլիխյան երկչափ պոլարոնի հիմնական բնութագրերի վրա ՌՍՈւ եւ ԴՍՈւ փոխազդեցությունների ներգործության հաշվառմանը վյուրցիտային կառուցվածքով նիտրիդային քվանտային փոսում: Ստացված արդյունքներից հետեւում է. որ *ա)* պոլարոնի սեփական էներգիան գործնականում կախված չէ քիրալության ցուցչից եւ Ռաշբայի պարամետրի մեծացմանը զուգընթաց մեծանում է, *բ)* փոսի լայնության մեծացումն է՛լ միջմակերեւութային, է՛լ ծավալատիպ ֆոնոնային մոդերի դեպքում հանգեցնում է պոլարոնի սեփական էներգիայի նվազման, *գ)* դիտարկված պայմաններում գերակայում է միջմակերեւութային մոդերի ներդրումը: Զվազմիաչափ պոլարոնային վիճակները ՌՍՈւ եւ ԴՍՈւ փոխազդեցության համատեղ հաշվառմամբ դիտարկվել են **§5**-ում: Համարելով, որ Ֆրյոնիլիխի հաստատունը մեկի կարգի է, պոլարոնային վիճակների վրա ՍՈւ փոխազդեցության դերն ուսումնասիրվել է Լի-Լոու-Փայնսի մեթոդի կիրառմամբ: Պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի համար ստացվել են վերլուծական արտահայտություններ, եւ գնահատվել ՍՈւ փոխազդեցության ներդրումն այդ պարամետրերում:

Ատենախոսության երրորդ գլուխը նվիրված է երկչափ ԶԿ-ում էլեկտրոնի՝ ձայնային ֆոնոններով եւ ՍՈւ փոխազդեցությամբ պայմանավորված սպինային ռելաքսացիայի ուսումնասիրմանը: ԶԿ-ն փականային լարումների կիրառմամբ ստեղծված է ազատ կայանած նանոչափային հաստությամբ կիսահաղորդչային շերտում (ֆոնոնային ռեզոնատոր): **§1**-ում համառոտ վերլուծված է ինդրին առնչվող գիտական գրականությունը, իսկ **§2**-ում ներկայացված էլեկտրոնային վիճակները երկչափ ԶԿ-ում մագնիսական դաշտում ՍՈւ փոխազդեցության հաշվառմամբ: **§3**-ում եւ **§4**-ում համապատասխանաբար ներկայացված են սահմանափակված ձայնային ֆոնոնային մոդերն ազատ կայանած կիսահաղորդչային շերտում եւ «էլեկտրոն-ձայնային ֆոնոն» փոխազդեցության համիլտոնիանը: Էլեկտրոնի՝ սպինի շրջմամբ ֆոնոնային

ռելաքսացիան երկչափ ԲԿ-ում շերտի մակերեւոյթին ուղղահայաց մագնիսական դաշտում ուսումնասիրվել է §5-ում, եւ զենմանյան առաջին գրգռված վիճակներից հիմնական վիճակ անցումների արագութիւնների համար ստացվել են վերլուծական արտահայտութիւններ՝ կախված մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից, սահմանափակող պոտենցիալի ուժգնութիւնից եւ ջերմաստիճանից: Էլեկտրոնի ցրումները դիտարկվել են ընդարձակումային (dilatational) եւ ճկումային (flexural) ձայնային ֆոնոնների վրա եւ գնահատվել է սպինային ռելաքսացիայի արագութիւնը:

ԵՃՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆ

1. Ֆոնոնային սահմանափակման հաշվառմամբ, վերջավոր խորութեամբ գնդային փոսի մոդելի հիման վրա ուսումնասիրվել է բեւեռային կիսահաղորդչային ԲԿ-ի արգելքի տիրոյթում ֆոտոզեներացված Էլեկտրոնի կալանումը ԲԿ-ի հիմնական վիճակում, մեկ կամ երկու օպտիկական ֆոնոնի առաքմամբ: Ստացվել են կալանման արագութեան վերլուծական արտահայտութիւններ մեկֆոնոնային եւ երկֆոնոնային պրոցեսների համար: Ցույց է տրվել, որ գոյութիւն ունեն ԲԿ-ի շառավղի արժեքների տիրոյթներ (գոտիներ), որոնցում կալանումն Էներգիապես թույլատրված է: Պարզվել է, որ ծավալատիպ կամ միջմակերեւութային ֆոնոնի առաքմամբ մեկֆոնոնային կալանումը շառավղից կախված ունի հստակ արտահայտված ռեզոնանսային բնույթ, իսկ կալանման արագութիւնը յուրաքանչյուր գոտու եզրերին մոտենալիս նվազում է: Գոտիների առաջացումը պայմանավորված չէ ֆոնոնային սահմանափակման երեւոյթով: Հաստատվել է, որ ֆոնոնային սահմանափակման հաշվառումը հանգեցնում է ռեզոնանսային պիկերի բարձրութիւնների նվազման, երբ ԲԿ-ի շառավիղը նվազում է:
2. «Ծավալատիպ + ծավալատիպ», «ծավալատիպ + միջմակերեւութային» եւ «միջմակերեւութային + միջմակերեւութային» երկֆոնոնային պրոցեսների դիտարկմամբ ուսումնասիրվել է Էլեկտրոնի երկֆոնոնային կալանման արագութեան կախումը ԲԿ-ի շառավղից, արգելքի տիրոյթում ֆոտոզեներացված Էլեկտրոնների կոնցենտրացիայից եւ ջերմաստիճանից: Որպես Էլեկտրոնի անցման միջանկյալ վիճակ դիտարկվել են ինչպէս քվազիստացիոնար (անընդհատ), այնպէս էլ ԲԿ-ի գրգռված (ընդհատ) վիճակները: Համեմատվել են մեկֆոնոնային եւ երկֆոնոնային կալանման արագութիւնները: Ցույց է տրվել, որ միեւնույն պայմաններում երկֆոնոնային կալանման արագութիւնը մեկ կարգով փոքր է մեկֆոնոնայինի համեմատ: Պարզվել է, որ երկֆոնոնային պրոցեսներում անընդհատ միջանկյալ վիճակներով ընթացող կալանումների արագութիւնը մեծ է ընդհատ վիճակներով ընթացողների համեմատութեամբ: Ցույց է տրվել նաեւ, որ մեկֆոնոնային եւ երկֆոնոնային կալանման արագութիւնները՝ կախված Էլեկտրոնային կոնցենտրացիայից, ունեն միեւնույն վարքը, միայն այն տարբերութեամբ, որ երկֆոնոնային կալանման արագութեան մաքսիմումը դիտվում է ավելի մեծ կոնցենտրացիաների դեպքում: Բանն այն է, որ երկֆոնոնային կալանման փոքր արագութեան պատճառով ԲԿ-երում Էլեկտրոններով զբաղեցված մակարդակների հագեցումը Պաուլիի

արգելման սկզբունքի հետեւանքով իրականանում է արգելքի տիրույթում էլեկտրոնային կոնցենտրացիայի համեմատաբար մեծ արժեքների դեպքում:

3. Ուսումնասիրվել է ԶԿ-ում ֆոտոգրգռված էլեկտրոնի անցումը ԶԿ-ի հիմնական մակարդակ՝ կասկադային ռելաքսացիայի ընթացուղիով, երբ էլեկտրոնը, առաքելով ծավալատիպ կամ միջմակերեւութային օպտիկական ֆոնոն, նախ՝ անցնում է ԶԿ-ի որեւէ գրգռված մակարդակ, եւ ապա էլեկտրոն-էլեկտրոն ցրմամբ (օժե-պրոցես) իջնում ԶԿ-ի հիմնական մակարդակ՝ ավելցուկային էներգիան փոխանցելով կամ ԶԿ-ում կապված, կամ արգելքի տիրույթի մեկ այլ էլեկտրոնի: ԶԿ-ում էլեկտրոնների զույգի սկզբնական վիճակը (սինգլետ կամ տրիպլետ) դիտարկվում է Պաուլիի կոռելացիայի տեսանկյունից: Ցույց է տրվել, որ կասկադային անցման ժամանակը՝ ցանցային ջերմաստիճանի փոփոխման լայն տիրույթում (25 Կ-ից մինչեւ 250 Կ), ունի թույլ ջերմաստիճանային կախում եւ ընկած է 80 պվ-ից մինչեւ 100 պվ տիրույթում: Տեսական այս կանխատեսումը վերջերս հաստատվել է փորձով:
4. Առաջին անգամ լուծվել է երկչափ ֆրյոնդիլիայան պոլարոնի խնդիրը ՌՍՈւ եւ ԴՍՈւ փոխազդեցությունների համատեղ հաշվառմամբ: Ցույց է տրվել, որ ՍՈւ երկու փոխազդեցությունների համատեղ ազդեցությունը ցինկի խաբուսակի կառուցվածքով նանոհամակարգում հանգեցնում է երկչափ պոլարոնի սեփական էներգիայի կախման ալիքային վեկտորի ուղղությունից եւ քիրալություն ցուցչից: Ցույց է տրվել նաեւ, որ պոլարոնի էներգիան որպես ալիքային վեկտորի մոդուլի ֆունկցիա, փոխում է մոնոտոնությունը՝ կախված քիրալության ցուցչից: ՌՍՈւ կամ ԴՍՈւ փոխազդեցություններից միայն որեւէ մեկի հաշվառումը միշտ հանգեցնում է պոլարոնի սեփական էներգիայի մեծացման եւ «սպին-վեր», եւ «սպին-վար» դեպքերում, մինչդեռ երկու անդամների համատեղ ազդեցությամբ պոլարոնի սեփական էներգիան ՍՈւ փոխազդեցության անտեսմամբ ստացված արդյունքի համեմատ որոշակի ուղղություններով կարող է ոչ միայն մեծանալ, այլեւ փոքրանալ:
5. Ուսումնասիրվել են վյուրցիտային կառուցվածքով նիտրիդային նանոհամակարգում երկչափ ֆրյոնդիլիայան պոլարոնի հիմնական բնութագրերը՝ սեփական էներգիան եւ արդյունարար զանգվածը, ՌՍՈւ եւ ԴՍՈւ փոխազդեցությունների համատեղ հաշվառմամբ: Ցույց է տրվել, որ, ի տարբերություն ցինկի խաբուսակի կառուցվածքով հետերոկառուցվածքներում գոյացած երկչափ պոլարոնի, այս դեպքում պոլարոնի էներգիան (նաեւ սեփական էներգիան) ՌՍՈւ եւ ԴՍՈւ փոխազդեցությունների համատեղ հաշվառման դեպքում օժտված չէ անկյունային անիզոտրոպությամբ ինչպես «սպին-վեր», այնպես էլ «սպին-վար» վիճակներում, իսկ արդյունարար զանգվածի անիզոտրոպությունը պայմանավորված է վյուրցիտային կառուցվածքով համակարգերում օպտիկական ֆոնոնային մոդերի անիզոտրոպությամբ: Թվային հաշվարկմամբ ստացվել են պոլարոնային հիմնական բնութագրերի կախումները Ռաշբայի եւ Դրեսելիաուսի պարամետրերից, ինչպես նաեւ պոլարոնի արդյունարար զանգվածի կախումը քվազիալիքային վեկտորի մոդուլից, քիրալային թվի տարբեր արժեքների դեպքում:

Ցույց է տրվել, որ «սպին-վեր» վիճակում դիտվում է արդյունարար զանգվածի պոլարոնային ուղղման մոնոտոնության փոփոխություն:

6. Լի-Լոու-Փայսի տեսության շրջանակներում, ՌՍՈԼ եւ ԴՍՈԼ փոխազդեցությունների հաշվառմամբ լուծվել է ֆրոյլիխյան պոլարոնի խնդիրը քվանտային լարում: Ստացվել են վերլուծական արտահայտություններ պոլարոնի էներգիայի, սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի համար: Ցույց է տրվել, որ ծավալատիպ եւ միջմակերելության ֆոնոնային մոդերի ներդրումները պոլարոնի էներգիայում եւ սեփական էներգիայում, ի տարբերություն պոլարոնի արդյունարար զանգվածի, ունեն ադիտիվ բնույթ նաեւ ՍՈԼ փոխազդեցությունների հաշվառմամբ: Պարզվել է, որ միաչափ ֆրոյլիխյան պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի վրա ՍՈԼ փոխազդեցություններն առանձին-առանձին եւ համատեղ ունեն միատեսակ ազդեցություն : ՍՈԼ փոխազդեցությունների հաշվառումը փոքրացնում է (մեծացնում է) «սպին-վար» («սպին-վեր») պոլարոնային վիճակի սեփական էներգիան եւ արդյունարար զանգվածն ինչպես ծավալատիպ եւ միջմակերելության բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների վրա ցրումների առանձին-առանձին, այնպես էլ դրանց համատեղ հաշվառման դեպքում:
7. Ուսումնասիրվել է Էլեկտրոնի սպինի ռելաքսացիան երկչափ ԶԿ-ում, որն ստեղծված է երկչափ Էլեկտրոնային գազով ազատ կայանած կիսահաղորդչային նանոշերտում՝ շերտին ուղղահայաց մագնիսական դաշտում: Դիտարկվել է ՍՈԼ եւ «Էլեկտրոն-ձայնային ֆոնոն» փոխազդեցություններով ներկայացվող սպինային ռելաքսացիայի մեխանիզմ: Ստացվել են ռելաքսացիայի արագության վերլուծական արտահայտություններ՝ ձայնային ընդարձակումային եւ ճկումային ֆոնոնային մոդերի վրա ցրումների դեպքում: Ցույց է տրվել, որ սպինի ռելաքսացիայի արագությունը՝ կախված մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից, փոխվում է լայն տիրույթում, որը կարող է օգտագործվել մագնիսական դաշտի միջոցով ռելաքսացիայի պահանջված արագության ապահովման համար: Բացահայտվել է, որ մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից ռելաքսացիայի արագության կախմանը բնորոշ է թույլատրված եւ արգելված տիրույթների առկայություն, որը հետեւանք է ֆոնոնային մոդերի չափային քվանտացման: Ցույց է տրվել, որ սպինային անցումների թույլատրելի տիրույթներում Ռաշբայի եւ Դրեսել-հաուսի պարամետրերի միեւնույն արժեքի դեպքում դրեսել-հաուսյան ռելաքսացիայի արագությունը զգալիորեն գերազանցում է ռաշբայան ռելաքսացիայի արագությունը:
8. Ուսումնասիրվել է սպինային ռելաքսացիայի արագության կախումը սահմանափակման էներգիայի ուժգնությունից: Ցույց է տրվել, որ այդ կախումը ԶԿ-ի առաջին գրգռված վիճակից՝ հիմնական վիճակ սպինի շրջամբ անցման դեպքում՝ անկախ ՍՈԼ փոխազդեցության տեսակից (Ռաշբայի, թե Դրեսել-հաուսի), չունի ռեզոնանսային բնույթ: Սահմանափակման էներգիայից ռեզոնանսային կախում դիտվում է հաջորդ՝ ավելի մեծ էներգիայով վիճակից սպինի շրջամբ հիմնական վիճակ անցման դեպքում:

ՀՂՎԱԾ ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1. Balandin A.A., Nika D.L., *Materials Today* **15** (2012) pp.266–275.
2. Devreese J.T., *Phys. Stat. Sol. B* **215** (1999) pp.465–469.
3. Folk J.A., et al, *Phys. Rev. Lett.* **86** (2001) pp.2102–2105.
4. Fujisawa T., Tokura Y., Hirayama Y., *Physica B* **298** (2001) pp.573–579.
5. Fujisawa T., et al, *Nature (London)* **419** (2002) pp.278–281.
6. R. Hanson, et al, *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) id.196802 (4 pages).
7. Hanson R., et al, *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) id.196802 (4 pages).
8. Andergassen S., et al, *Nanotechnology* **21** (2010) id.272001 (25pages).
9. Ganichev S.D., Prettl W., *Journ. of Phys.: Condens. Matt.* **15** (2003) pp.R935–R983.
10. *Semiconductor Spintronics and Quantum Computing*, edited by D. D. Awschalom, D. Loss, and N. Samarth (Springer, New York, 2002).
11. Arakawa Y., Sakaki H., *Appl. Phys. Lett.*, **40** (1982) pp.939–941.
12. Asada M., Miyamoto Y., Suematsu Y., *IEEE J. Quantum Electron.*, **22** (1986) pp.1915–1921.
13. Arakawa Y., Yariv A., *IEEE J. Quantum Electron.*, **22** (1986) pp.1887–1899.
14. Kirstaedter N., et al, *Electron. Lett.*, **30** (1994) pp.1416–1417.
15. Gundogdu K., et al, *Appl. Phys. Lett.* **85** (2004) pp.4570–4572.
16. Urayama J., et al, *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) pp.2162–2164.
17. Sosnowski T.S., et al, *Phys. Rev. B* **57** (1998) pp.R9423–R9426.
18. Zhang L., et al, *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) pp.1222–1224.
19. Marcinkevičius S., Leon R., *Phys. Rev. B* **59** (1999) pp.4630–4633.
20. Yuan Z.L., et al, *Physica B* **272** (1999) pp.12–14.
21. Boggess T.F., et al, *Appl. Phys. Lett.* **78** (2001) pp.276–278.
22. Bhattacharya P., et al, *IEEE J. Quantum Electron.* **39** (2003) pp.952–962.
23. Hendry E., et al, *Phys. Rev. Lett.* **96** (2006) id.057408 (4 pages).
24. Schaller R.D., Klimov V.I., *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) id.186601 (4 pages).
25. Ellingson R.J., et al, *Nano Lett.* **5** (2005) pp.865–871.
26. Beard M.C., et al, *Nano Lett.* **10** (2010) pp.3019–3027.
27. McGuire J.A., et al, *Nano Lett.* **10** (2010) pp.2049–2057.
28. Wang X., et al, *Nature* **459** (2009) pp.686–689.
29. Marini J.C., Stebe B., Kartheuser E., *Phys. Rev. B* **50** (1994) pp.14302–14308.
30. Panda S., Panda B.K., *Modern Physics Letters B* **25** (2011) pp.2461–2468.
31. Shan S.-P., Chen, S.-H., Xiao J.-L., *Low Temperature Physics* **40** (2014) pp.552–555.
32. Wolf S.A., et al, *Science* **294** (2001) pp.1488–1495.
33. Magnusdottir I., et al, *Appl. Phys. Lett.* **92** (2002) pp. 5982–5990.
34. Markussen T., et al, *Phys. Rev. B* **74** (2006) id.195342 (6 pages).
35. Chauhan K.N., et al, *J. Appl. Phys.* **113** (2013) id.203710 (7 pages).

36. Sanguinetti S., et al., *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) pp.613–615.
37. Leyman R.R., et al., *Laser & phononics Rev.* **10** (2016) pp.772–779.
38. Vartanian A.L., et al, *Physica E* **42** (2010) pp.878–880.

ՀՐԱՏԱՐԱԿԱԾ ԱՇԽԱՏԱԼՔՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

1. Vartanian A.L., Asatryan A.L., Vardanyan K.A., Kirakosyan A.A. , Quantum capture of electrons and intra-dot relaxation by means of Auger processes in quantum dots, *Physica E* **42** (2010) pp.878–880.
2. Vartanian A.L., Mughnetsyan V.N., Vardanyan K.A., Dvurechenskii A.V., Kirakosyan A.A., Influence of optical phonon confinement on two-phonon capture processes in quantum dots, *Proceedings of the Yerevan State University: Physical and Mathematical Sciences*, **2** (2014) pp.50–53.
3. Vardanyan K. A., Vartanian A. L., Mughnetsyan V. N., Dvurechenskii A. V., Kirakosyan A. A., Effect of phonon confinement on one- and two-polar optical phonon capture processes in quantum dots, *Physica E* **66** (2015) pp.268–274 .
4. Vardanyan K. A., Vartanian A. L., Kirakosyan A. A., Effect of Phonon Confinement on Optical Phonon-Mediated Carrier Capture into CdSe/ZnS Quantum Dots, *Journal of Electronic Materials* **44** (2015) pp.2779–2785.
5. Vardanyan K. A., Vartanian A. L., Kirakosyan A. A., Two-dimensional Fröhlich polaron with Rashba and Dresselhaus spin-orbit coupling, *The European Physical Journal B* **85** (2012) id.367 (5 pages).
6. Vardanyan K.A., Influence of the Rashba and Dresselhaus spin-orbit interactions on the polaron properties of a two-dimensional electrons in semiconductor heterostructures, *Proceedings of the Yerevan State University: Physical and Mathematical Sciences* **3(229)** (2012) pp.60–64.
7. Yerosyan M.A., Vartanian A. L., Vardanyan K. A., Influence of spin-orbit interactions on the polaron properties in wurtzite semiconductor quantum well, *Physica E* **75** (2016) pp.330–335.
8. Vartanian A. L., Kirakosyan A. A., Vardanyan K. A., Fröhlich polaron in nanowire with Rashba and Dresselhaus spin-orbit couplings, *Superlattices and Microstructures* **109** (2017) pp.655-661.
9. Vardanyan K. A., Kirakosyan A. A., Vartanian A. L., One-dimensional Fröhlich polaron with spin-orbit coupling, *Вестник РАУ, Физико-математические и естественные науки* **1** (2017) стр. 41–46.
10. Vardanyan K. A., Vartanian A. L., Stepanyan A.G., Kirakosyan A. A., Confined acoustic phonon-mediated spin relaxation in a two-dimensional quantum dot in the presence of perpendicular magnetic field, *Journal of Physics: Conference Series* **647** (2015) id.012043 (4 pages).

PECULIARITIES OF SPIN-ORBITAL INTERACTION IN
SEMICONDUCTOR NANOSTRUCTURES

The dissertation is devoted to the theoretical studies of the influences of electron-phonon and spin-orbit (Rashba, Dresselhaus) interactions on certain characteristics of the electronic and phonon subsystems in semiconductor quantum structures. The time characteristics of various dynamic processes in semiconductor quantum structures, as well as the influence of the spin-orbit interaction on the low-dimensional polaron states have been investigated. Particularly:

- The capture of photogenerated electrons in the structure by spherical quantum dots caused by the emission of polar optical phonons has been theoretically studied. The capture rate in one- and two-phonon processes was studied by taking into account the phonon confinement. The explicit analytic expressions for carrier capture rates have been derived which can be conveniently applied to practical calculations for the spherical quantum dot systems. It has been shown that the capture rate of an electron from the barrier region to the quantum dot ground-state, via emission of one and two phonons, exhibits the existence of the bands of dot radii where capture is energetically allowed. It was found that the height of the capture rate peaks obtained for one-phonon assisted processes is lowered as QD radius decreases when the phonon confinement is taken into account. Carrier capture is shown to proceed with rates as high as 10^{10} s^{-1} at temperature $T > 100\text{K}$. A short capture time is also achieved for a low carrier density.
- The LO phonon-assisted electron capture and the intra-dot Auger relaxation in quantum dots have been studied. The electron capture efficiency is investigated as a function of the lattice temperature and quantum dot radius for different injected electron concentration taking into account the confinement effect for the polar optical phonons in spherical quantum dots with non-polar environment. It has been shown that the Auger scattering time (having a value in the range 80–100ps) has weak temperature dependence over the whole temperature range from 25 up to 250K which are in sufficient agreement with experiment.
- The simultaneous effect of Rashba and Dresselhaus spin-orbit interactions on the formation of Fröhlich polarons in two-dimensional semiconductors (with zinc-blende and wurtzite structures) in weak electron-phonon coupling approximation has been investigated. The results illustrate that the spin-orbit coupling terms may significantly affect the polaron properties. It has been shown that in the presence of both SO coupling terms the self-energy correction of the electron energy as well as the polaron effective mass exhibit an angular anisotropy in zinc-blende structures unlike the case when only one of the spin-orbit coupling terms (Rashba or Dresselhaus) is considered. The simultaneous consideration of the Rashba and Dresselhaus mechanisms shows that polaronic effect may become either stronger or weaker depending on

directions, a phenomenon which does not occur when the spin-orbit interaction is not taken into account.

- The Lee-Low-Pines variational method has been used to clarify the effects of the spin-orbit couplings on the properties of the quasi-one-dimensional Fröhlich polaron in the weak and intermediate coupling limits of the electron-phonon interaction. Analytical expressions for the polaron self-energy and effective mass are obtained as functions of the spin-orbit coupling parameters. Polaron energy and polaronic shift are investigated numerically. We have shown that the basic parameters of the polaron in nanowire can be effectively manipulated by the Rashba and Dresselhaus spin-orbit couplings, and thus they can be used for controlling the various physical processes in nanowires.
- The spin-relaxation of an electron mediated by acoustic phonons due to the spin-orbit interaction in a two-dimensional quantum dot created in a free-standing semiconductor nanolayer in the presence of a perpendicular magnetic field is studied. It was shown that the spin relaxation rate varies with the magnetic field in a wide region, which allows one to control the relaxation rate. The existence of allowed and forbidden regions in the dependence of the spin relaxation rate on the magnetic field is revealed. It was shown that the spin relaxation rate, as a function of the confinement potential strength, has no resonance character for the spin-flip transition from the first excited state to the ground state, independent of the type of spin-orbit interaction (Rashba or Dresselhaus). Resonance behavior was revealed for the transition from a higher energy state to the ground state.

ВАРДАНЯН КАРЕН АРШАКОВИЧ

ОСОБЕННОСТИ СПИН-ОРБИТАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

Диссертация посвящена теоретическому исследованию влияния электрон-фононного и спин-орбитального (Рашба, Дрессельхаус) взаимодействий на некоторые характеристики электронной и фононной подсистем в полупроводниковых квантовых структурах. Исследованы временные характеристики различных динамических процессов в полупроводниковых квантовых структурах, а также влияние спин-орбитального взаимодействия на поляронные состояния в низкоразмерных системах. В частности:

- Теоретически изучен захват фотогенерированных электронов в структуре со сферическими квантовыми точками при испускании одного или двух полярных оптических фононов. С учетом фононного ограничения изучено поведение скорости захвата носителей в одно- и двухфононных процессах. Для скоростей захвата носителей выведены явные аналитические выражения, которые могут быть использованы в расчетах систем, состоящих из сферических квантовых точек. Показано,

что скорость захвата электрона из барьерной области в основное состояние квантовой точки посредством излучения одного и двух фононов состоит из чередующихся разрешенных и запрещенных полос в зависимости от радиуса квантовой точки. При этом, высоты пиков скорости захвата однофононных процессов, при учете фононного ограничения, снижаются по мере уменьшения радиуса квантовой точки. Показано также, что значение скорости захвата носителей порядка 10^{10} с^{-1} при температурах $T > 100 \text{ K}$. Уменьшение времени захвата наблюдается при низких плотностях электронов.

- Изучена релаксация электрона в квантовых точках посредством оптических фононов и внутриточечного оже-рассеяния. Исследована эффективность захвата электрона в зависимости от температуры решетки и радиуса квантовой точки для различных концентраций инжектированных электронов с учетом эффекта ограничения полярных оптических фононов в сферических квантовых точках, находящихся в неполярной среде. Показано, что время оже-рассеяния (характерные значения в диапазоне 80–100 пс) имеет слабую температурную зависимость во всем диапазоне температур от 25 до 250 К, что находится в удовлетворительном согласии с экспериментом.
- Исследовано одновременное влияние спин-орбитальных взаимодействий Рашбы и Дрессельхауса на формирование поляронов Фрелиха в двумерных полупроводниках (со структурами цинковой обманки и вюрцита) в приближении слабой связи электрон-фононного взаимодействия и показано, что члены спин-орбитальной связи могут существенно повлиять на свойства полярона. При наличии обоих членов спин-орбитального взаимодействия коррекция собственной энергии электрон, а также эффективная масса полярона проявляют угловую анизотропию в структурах цинковой обманки, в отличие от случая, когда рассматривается только один тип спин-орбитального взаимодействия (Рашбы или Дрессельхауса). При совместном рассмотрении механизмов Рашбы и Дрессельхауса поляронный эффект может стать сильнее или слабее в зависимости от направления импульса носителя в импульсном пространстве – явление, которое отсутствует при пренебрежении спин-орбитальным взаимодействием.
- Вариационным методом Ли-Лоу-Пайнса исследовано влияние спин-орбитального взаимодействия на свойства квазиодномерного полярона Фрелиха при малых и промежуточных значениях постоянной электрон-фононного взаимодействия. Получены аналитические выражения для собственной энергии и эффективной массы полярона в зависимости от параметров спин-орбитального взаимодействия. Энергия полярона и поляронный сдвиг исследованы численно. Показано, что спин-орбитальными взаимодействиями Рашбы и Дрессельхауса можно эффективно манипулировать основными параметрами полярона в нанопроволоке, поэтому они могут быть использованы для управления различными физическими процессами в 1D-системах.

- Изучена спиновая релаксация электрона, опосредованная акустическими фононами, за счет спин-орбитального взаимодействия в двумерной квантовой точке, созданной в свободно стоящем полупроводниковом нанослое в присутствии перпендикулярного слою магнитного поля. Показано, что скорость спиновой релаксации в зависимости от магнитного поля изменяется в широкой области, состоящей из разрешенных и запрещенных интервалов, что позволяет контролировать скорость релаксации в зависимости от магнитного поля. Скорость спиновой релаксации в зависимости от силы ограничивающего потенциала не имеет резонансного характера для спин-флип-перехода из первого возбужденного состояния в основное состояние, независимо от типа спин-орбитального взаимодействия (Рашбы или Дрессельхауса). Резонансное поведение выявлено для переходов на более высокие энергетические состояния.