

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ
ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Ղուկասյան Տիգրան Կարենի

**ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴԱՅԻՆ ՆԱՆՈԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ
ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆ-ՖՈՆՈՆ
ՓՈԽԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՌՄԱՐ**

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА РА

ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Гукасян Тигран Каренович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
НАНОСТРУКТУР С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

ЕРЕВАН – 2022

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:

Գիտական ղեկավար՝ Ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր **Արշակ Լյուդվիգի Վարդանյան**
Պաշտոնական Ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր **Դավիթ Հայրապետի Բաղայան**
ընդդիմախոսներ՝ Ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր **Սլավիկ Վուրդյայի Մելքոնյան**
Առաջատար կազմակերպություն՝ **ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտ**

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2023թ. հունվարի 27-ին՝ ժամը 12:00-ին, Երևանի պետական համալսարանի ֆիզիկայի 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցե՝ 0025, ք. Երևան, Ա. Մանուկյան փ. 1):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2022թ.-ի դեկտեմբերի 17-ին:

049 մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝  Ֆ.մ.գ. թ., դոցենտ **Վիտալի Պետրոսի Քալանթարյան**

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научный руководитель: д.ф.м.н., профессор **Аршак Людвигович Варданян**

Официальные оппоненты: д.ф.м.н., профессор **Давид Айрапетович Бадалян**
д.ф.м.н., профессор **Славик Володяевич Мелконян**

Ведущая организация: **Институт физических исследований НАН РА**

Защита диссертации состоится 27-го января 2023 г. в 12:00 часов на заседании специализированного совета 049 по физике Ереванского государственного университета по адресу: 0025, г. Ереван, ул. А. Манукяна, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 17-го декабря 2022г.

Ученый секретарь специализированного совета,  к.ф.м. н., доцент **Виталий Петросович Калантарян**

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Թեմայի արդիականությունը

Վերջին մի քանի տասնամյակում գրանցված գիտատեխնիկական առաջընթացի մասին խոսելիս անհնար է յուրահատուկ կերպով չչեշտել դրանում նանոֆիզիկայի վիթխարի ներդրման դերը: Ժամանակակից նանոֆիզիկայի և մասնավորապես կիսահաղորդչային նանոէլեկտրոնիկայի գլխավոր խնդիրը նանոչափային կիսահաղորդչային կառուցվածքների և դրանց հենքի վրա գործող սարքերի ստեղծումն ու բազմակողմանի հետազոտումն է: Այդպիսի սարքերի օրինակներ են օպտիկամոլումային [1] և ֆոտովոլտային մարտկոցները [2], չափային դաշտային տրանզիստորները (scale field-effect transistors (FETs)) [3]-[6], լուսառաքիչ դիոդները (LEDs), երկբևեռ հանգույցով տրանզիստորները, ներդաշնակող փոխարկիչները (complementary inverters) [5], p-n տիպի դիոդները [7], նանոչափային լազերները [8], բարդ կառուցվածքով էլեկտրոնային տրամաբանական տարրերը, գազի զգայակները [9], [10], նանոռեզոնատորները [11], [12], նանոգեներատորները [13] և այլն: Վերջին տարիներին Մուրի օրենքից [14] նկատելի շեղումները և լայն հետաքրքրությունը քվանտային համակարգիչների նկատմամբ [15] ապացուցում են, որ նանոֆիզիկայի դերը նորագույն տեխնոլոգիաների զարգացման գործում շարունակում է մնալ առանցքային:

Նանոֆիզիկայի ուսումնասիրության առարկան 100 նմ և ավելի փոքր տարածական չափերով կառուցվածքներն են: Ի տարբերություն մակրո- և միկրո- չափային նմուշների՝ նանոչափային նմուշներում «մակերևույթ-ծավալ» հարաբերակցությունը զգալի մեծ է: Նանոչափային նմուշների ֆիզիկական հատկություններն էապես տարբերվում են մակրոնմուշների հատկություններից, քանի որ այսպիսի համակարգերում դիտվում են այսպես կոչված քվանտային չափային երևույթներ, երբ նմուշում քվազիմասնիկի դը Բրոյլի ալիքի երկարությունը որևէ ուղղությամբ համակարգի չափերի կարգի է:

Նանոչափային սարքաշինության տեսանկյունից կարևորվում է ֆիզիկական պրոցեսների կառավարելիության աստիճանի մեծացումը, որը հնարավոր է իրագործել ոչ միայն պահանջված փոխազդեցությունների ապահովմամբ, այլ նաև ոչ ցանկալի փոխազդեցությունների ճնշման միջոցով: Պինդարմային նանոկառուցվածքներում գործնականում անխուսափելի է լիցքակիրների փոխազդեցությունը ցանցի տատանումների քվանտի՝ ֆոնոնի հետ: Ֆոնոնային համակարգի հետ տարբեր քվազիմասնիկների փոխազդեցության կառավարումը դարձել է

գիտական նոր ճյուղի՝ ֆոնոնիկայի կամ ֆոնոնային ճարտարագիտության հիմնական խնդիրը: Այն, որպես կանոն, լուծվում է բաղադրյալ նյութերի ճիշտ ընտրությամբ և ակտիվ տիրույթի երկրաչափական ձևի և չափերի փոփոխությամբ:

1980-ական թվականներին նանոէլեկտրոնիկայում կատարված մի շարք հայտնագործություններ, մասնավորապես այն դիտարկումը, որ սպինային բևեռացումով հոսանքները հնարավոր է ֆեռոմագնիսական մետաղից «ներարկել» սովորական մետաղ [16], ինչպես նաև «հսկայական» մագնիսադինամոդոսկոպիայի հայտնագործումը [17],[18], հիմք հանդիսացան նանոէլեկտրոնիկայի նոր ուղղության՝ սպինտրոնիկայի ստեղծման: Այն, ի տարբերություն ավանդական կիսահաղորդչային նանոէլեկտրոնիկայի, ուսումնասիրում է ոչ թե էլեկտրոնի լիցքի, այլ նրան բնութագրող մյուս հիմնարար մեծության՝ սպինի կիրառությունը որպես ինֆորմացիայի կրիչ և տեղափոխիչ: Առանձնակի ուշադրության են արժանի Ռաջբայի և Դրեսելիաուսի սպին-ուղեծրային (ՍՈւ) փոխազդեցությունները, որոնցից առաջինը նանոկառուցվածքում լիցքակիրների շարժումը սահմանափակող պոտենցիալի անհամաչափության, իսկ երկրորդը՝ բյուրեղի պարբերական պոտենցիալային դաշտի ինվերսային համաչափության բացակայության հետևանք է [19]:

Բազմաթիվ տեսական և փորձարարական աշխատանքներում ցույց է տրվել, որ ցածրչափային համակարգերում լիցքակիրների և ֆոնոնների միջև առաջանում է ուժեղ կապված վիճակ [20]-[26], որը կարող է էականորեն փոխել այդ կառուցվածքների ֆիզիկական հատկությունները: Հաղորդականության գոտու էլեկտրոնների դեպքում այս կապը հանգեցնում է նոր քվազիմասնիկի՝ պոլարոնի առաջացման: Բևեռային կիսահաղորդիչներում տարածական սահմանափակումը կարող է առաջացնել նոր տիպի ֆոնոններ, հետևաբար՝ նաև տարբերվող ֆիզիկական հատկություններով պոլարոններ: Այսպես, օրինակ, ոչ բևեռային դիէլեկտրական միջավայրում տեղադրված բևեռային կիսահաղորդիչ նանոլարերում և քվանտային կետերում առաջանում են երկու նոր տիպի՝ սահմանափակված և մակերևութային օպտիկական ֆոնոններ [27]-[29]:

Խառնուկային վիճակներն առաջնային դեր են խաղում «կիսահաղորդչային հեղափոխության» մեջ. առանց խառնուկների չէին ստեղծվի կիսահաղորդչային դիոդները, տրանզիստորները, ինչպես նաև բազմաթիվ հեղափոխական տեխնոլոգիաներ: Լեգիրման միջոցով հնարավոր է մեծ ճշտությամբ կառավարել կիսահաղորդչային սարքերի հաղորդականությունը, որը դարձել է վերջին տասնամյակներում պինդմարմնային էլեկտրոնիկայում առկա հզոր առաջընթացի հիմնական պատճառը: Նանոէլեկտրոնիկայի դարաշրջանում խառնուկներն ունեն նաև այլ

հետաքրքիր կիրառություններ: Տաճր ջերմաստիճաններում առանձին խառնուկներ կարող են տարածականորեն սահմանափակել լիցքակիրների շարժումը՝ ատոմային շառավղից մեծ, սակայն քվանտային կետերի չափերից փոքր հեռավորությունների վրա: Խառնուկների այս առանձնահատկությունը ոչ միայն պատճառ է դառնում քվանտային երևույթների ի հայտ գալուն, այլև հնարավորություն է ստեղծում իրականացնելու ալիքային ֆունկցիայի նախագծում (wave-function engineering)՝ որպես կառավարման մեխանիզմ օգտագործելով արտաքին էլեկտրական կամ մագնիսական դաշտերը [30], [31]: Ավելին, արդեն կան խառնուկային վիճակների հետաքրքիր կիրառություններ քվանտային համակարգիչներում [32]:

Աշխարհի նպատակը

Ատենախոսության գլխավոր նպատակը կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքներում էլեկտրոն-ֆոնոն փոխազդեցության հաշվառմամբ օպտիկական երևույթների առանձնահատկությունների ուսումնասիրումն է՝ հաշվի առնելով ինչպես կառուցվածքի երկրաչափությամբ և արտաքին դաշտերով, այնպես էլ քվազիմասնիկների միջև լրացուցիչ փոխազդեցություններով պայմանավորված ներդրումները:

Գիրական նորույթը

- Առաջին անգամ ուսումնասիրվել են պարաբոլային սահմանափակմամբ գլանային քվանտային լարում երկայնական մագնիսական դաշտում ջրածանման խառնուկին կապված պոլարոնային և էլեկտրոնային վիճակները, դրանց կապի էներգիան և այդ վիճակների միջև անցումներով պայմանավորված տատանակի ուժը, գծային, ոչ գծային և գումարային կլանման գործակիցները և բեկման ցուցչի փոփոխությունը:
- Պարաբոլային սահմանափակմամբ գլանային քվանտային լարում, լարի առանցքին ուղղահայաց համասեռ էլեկտրական դաշտում հետազոտվել են ֆոնոններով միջնորդավորված ներենթագոտիական և միջենթագոտիական անցումներով պայմանավորված կլանման գործակիցները՝ սպին-ուղեծրային փոխազդեցության և ֆոնոնների տարածական սահմանափակման հաշվառմամբ:
- Անիզոտրոպ գնդային քվանտային կետում էլեկտրական դաշտում առաջին անգամ լուծվել է պոլարոնի խնդիրը և որոշվել ռամանյան ցրման դիֆերենցիալ կտրվածքի և էներգիական սպեկտրի բնութագրիչների կախումները խնդրի ֆիզիկական պարամետրերից ինչպես էլեկտրոնի, այնպես էլ պոլարոնի համար:

Կիրառական նշանակությունը

Կիսահաղորդիչային նանոկառուցվածքներն ու դրանցում առկա բաժանման սահմանները (միջերեսները) մեծ հետաքրքրություն են առաջացնում ոչ միայն հետազոտողների, այլև արդյունաբերական հանրության շրջանում: Իրականում, ժամանակակից կիսահաղորդչային արդյունաբերության հաջողությունները հիմնականում կախված են կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքների միջերեսների և ազատ մակերևույթների կառավարելի վերահսկողությունից: Նանոնյութերն այսօր ամենուր են. դրանք օգտագործվում են բժշկական ախտորոշման, դեղերի մշակման և մարդու օրգանիզմում դրանց հասցեական մատակարարման, էլեկտրոնիկայի և անլար կապի, առաջատար գործառնական նյութերի և դրանց կիրառությունների, վառելիքի և արևային մարտկոցների, գերկոնդենսատորների, ընտրովի զգայնության էլեկտրոդների և բազմաթիվ այլ ոլորտներում:

Երկչափ քվանտային փոսերով կառուցվածքների համեմատությամբ քվազիմիաչափ և զրոչափանի նանոկառուցվածքները երկու կամ երեք ուղղություններով էլեկտրոնների քվանտային սահմանափակման հետևանքով ավելի արդյունավետ են փոխազդում լույսի հետ և, հետևաբար, կարող են օգտագործվել որպես էլեկտրալյումինեսցենտային և ֆոտոգալվանային սարքերում: Ֆոնոնային մոդերի մասնակցությունը էլեկտրոն-ֆոտոն փոխազդեցությանը նանոկառուցվածքներում օպտիկական երևույթների կառավարման նոր հնարավորություններ է բացում: Այս կառուցվածքների եզակի սպեկտրային բնութագրերը էլեկտրոնային միջենթագոտիական կամ ներենթագոտիական անցումների առանձնահատկությունների հետևանք են: Մեր հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ կլանման պիկերի ինտենսիվությունն ու դիրքերը չափազանց զգայուն են նանոկառուցվածքների երկրաչափության և արտաքին գործոնների նկատմամբ, որը այդպիսի կառուցվածքների օպտիկական հատկությունների կիրառությունների լայն տիրույթ է բացում:

Գիտական դրույթներ

1. Ջրածնանման խառնուկի տեղաշարժը դեպի նանոլարի մակերևույթ y ուղղությամբ հանգեցնում է պոլարոնի կապի էներգիայի նվազեցման $1s$ -, $2p_x$ - և $2p_z$ -անման վիճակներում, բայց ոչ $2p_y$ -անման վիճակում: Վիրտուալ CO ֆոնոնների միջին թիվը, կախված խառնուկի դիրքից է նվազում է այն դեպքում, երբ IO ֆոնոնների միջին թիվն աճում է, որն արտահայտվում է կապի էներգիայում նաև դրանցով պայմանավորված պոլարոնային շեղման մեջ և կարող է հանգեցնել պոլարոնի կապի էներգիայում էքստրեմումների առաջաց-

ման: $2p_x$ -անման վիճակում էլեկտրոնի փոխազդեցությունն ավելի արդյունավետ է $1O$ ֆոնոնների, քան CO ֆոնոնների հետ՝ անկախ խառնուկի դիրքից:

2. Մագնիսական դաշտի լարվածության աճը հանգեցնում է պոլարոնի կապի էներգիայի աճի, երբ խառնուկը լարի առանցքի վրա է: Պարաբոլային սահմանափակող պոտենցիալը կապի էներգիայի վրա ունի նույն ազդեցությունը, ինչ մագնիսական դաշտի լարվածությունը, և դրանցից կապի էներգիայի կախումներում կարող են դիտվել էքստրեմումներ այն դեպքում, երբ խառնուկը շեղված է լարի առանցքից:
3. Էլեկտրոն-ֆոնոն փոխազդեցությունը հանգեցնում է տատանակի ուժի և պոլարոնային անցումների հավանականության մեծացման և կլանման գործակիցների պիկերի կապույտ շեղման: $1s \rightarrow 2p_x$ անցումներում պոլարոնային երևույթի ազդեցությունը օպտիկական բնութագրերի վրա նկատելի է, երբ էլեկտրոնը փոխազդում է կա՛մ միայն CO , կա՛մ միայն $1O$ ֆոնոնների հետ: $1s \rightarrow 2p_y$ էլեկտրոնային անցումների համար բեկման ցուցչի փոփոխության էքստրեմումները մագնիսական դաշտի լարվածության տարբեր արժեքների դեպքում դիտվում են ֆոտոնի էներգիայի միևնույն արժեքի մոտակայքում, այն դեպքում, երբ պոլարոնային անցումների համար դրանք միմյանցից հեռացված են:
4. Ազատ լիցքակիրների օպտիկական կլանման գործակցի մեջ մակերևութային ֆոնոնների հետ փոխազդեցությունն ավելի մեծ ներդրում ունի, քան սահմանափակված ֆոնոնների հետ փոխազդեցությունը: Կլանման գործակցի կախումն ընկնող ճառագայթման ֆոտոնի էներգիայից ունի պիկեր, որոնք դիտվում են ֆոնոններով միջնորդավորված անցումներին համապատասխանող էներգիաների դեպքում: Սպին-ուղեծրային փոխազդեցության հաշվառումը հանգեցնում կլանման գործակցի աճի և պիկերի շեղման դեպի մեծ էներգիաների տիրույթ («կապույտ» շեղում):
5. Կլանման գործակցի ջերմաստիճանային կախումն ունի հազեցող բնույթ, ընդ որում $50^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$ տիրույթում դիտվում է կլանման կտրուկ աճ: Կախված սահմանափակող պոտենցիալի հաճախությունից կլանման գործակիցն աճում է ավելի արագ սպին-ուղեծրային փոխազդեցության հաշվառմամբ, քան անտեսմամբ: Էլեկտրական դաշտի լարվածության աճին զուգընթաց սպին-ուղեծրային փոխազդեցության ներդրումը կլանման գործակցի մեջ նվազում է, որը էլեկտրոն-մակերևութային օպտիկական ֆոնոն փոխազդեցության թուլացման հետևանք է:

6. Ազատ լիցքակիրների՝ ֆոնոններով միջնորդավորված օպտիկական կլանման գործակցում դեպի ցածր էներգիական մակարդակներ միջենթագոտիական անցումների ներդրումը գերակայում է ավելի բարձր մակարդակներ անցումների նկատմամբ: Ընկնող ֆոտոնի էներգիայից γ_{IO}/γ_{CO} հարաբերության կախման առաջին երկու պիկերը պայմանավորված են ներենթագոտիական անցումներով, իսկ երրորդ պիկը՝ $E_{0,0} \rightarrow E_{1,0}$ անցումով: Լարի շառավղի փոքրացումը հանգեցնում է կլանման գործակցի աճի ինչպես մակերևութային, այնպես էլ սահմանափակված ֆոնոնների հետ փոխազդեցության դեպքում: Էլեկտրական դաշտի լարվածության ազդեցությունն ավելի զգալի է հիմնական վիճակից $m = 1$ քվանտային թվով զրգոված վիճակներ անցումներով պայմանավորված կլանման գործակցի վրա:
7. Քվանտային կետի շառավղի մեծացմանը զուգընթաց էլեկտրոնի և պոլարոնի առանձին վիճակներին համապատասխանող էներգիաները և դրանց միջև տարբերությունը փոքրանում է: Ռամանյան ցրման դիֆերենցիալ կտրվածքի՝ արձակվող ճառագայթման էներգիայից կախման ռեզոնանսային պիկերի պոլարոնային շեղումները հետևանք են էներգիական սպեկտրների առանձնահատկությունների:

Աշխատանքի արդյունքների փորձարկում

Աշխատանքի արդյունքները ներկայացվել են “Laser physics 2019” International conference, 17-20 September, Ashtarak, Armenia 2019, “Advanced Nanomaterials And Methods”, International Workshop Sep. 25–Oct 2, Yerevan, Armenia, 2019, և “Global Summit on Nanotechnology And Materials Science”, August 17-21, Nice, France, 2022, գիտաժողովներում:

Արենախոսության կառուցվածքը

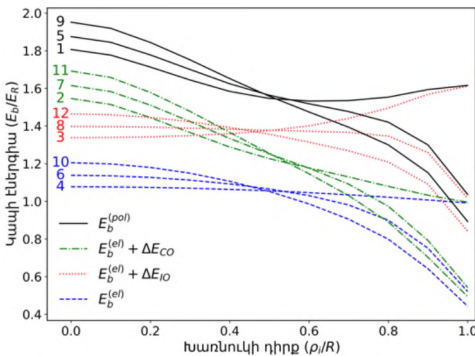
Արենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, երեք գլխից, եզրակացությունից և գրականության ցանկից (171 հղում): Արենախոսության ծավալը 111 էջ է՝ ներառյալ 30 նկարները և 7 աղյուսակները:

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Արենախոսության ներածությունում ներկայացված է գիտական ակնարկ և գիտական արդյունքների վերլուծություններ, որոնք սերտորեն կապված են արենախոսության թեմային:

Ատենախոսության առաջին գլուխը նվիրված է պարաբոլային սահմանափակմամբ գլանային քվանտային լարում համասեռ երկայնական մագնիսական դաշտում ջրածնանման խառնուկին կապված պոլարոնային վիճակների ուսումնասիրությանը Լանդաու-Պեկարի փոփոխակային մեթոդի կիրառմամբ: Ուսումնասիրվել է ֆոնոնային համակարգի տարածական սահմանափակման ազդեցությունը պոլարոնի կապի էներգիայի վրա: Հաշվի են առնվել սահմանափակված (CO) և մակերևութային (IO) օպտիկական ֆոնոնների ինչպես առանձին-առանձին, այնպես էլ գումարային ներդրումները: **§1**-ում ներկայացված է վերոնշյալ հարցերին վերաբերող գրականության վերլուծություն: **§2.1**-ում և **§2.2**-ում համապատասխանաբար տրված են էլեկտրոնի վիճակները համակարգում խառնուկի բացակայությամբ և առկայությամբ: **§3**-ում ներկայացված են հոծ դիէլեկտրական միջավայրի մոտավորությամբ գլանային քվանտային լարում առաջացող նոր՝ սահմանափակված և մակերևութային ֆոնոնային տիպերը: **§4**-ում լուծվել է ջրածնանման խառնուկին կապված պոլարոնի խնդիրը Լանդաու-Պեկարի փոփոխակային մեթոդի կիրառմամբ: **§5.1**-ում թվային հաշվարկի միջոցով ստացվել են $CdSe$ նանոլարում դրա կապի էներգիայի կախումները սահմանափակող պոտենցիալ հաճախությունից, մագնիսական դաշտի լարվածությունից և խառնուկի դիրքից:

Նկ. 1-ում տրված են հիմնական վիճակում էլեկտրոնի և պոլարոնի կապի էներգիաների կախումները խառնուկի դիրքից: Առանձին-առանձին ներկայացվել են սահմանափակված և մակերևութային ֆոնոնների ներդրումները: 1,2,3,4 կորերը համապատասխանում են $H=1S$, 5,6,7,8 կորերը՝ $H=3S$, և 9,10,11,12 կորերը՝ $H=5S$



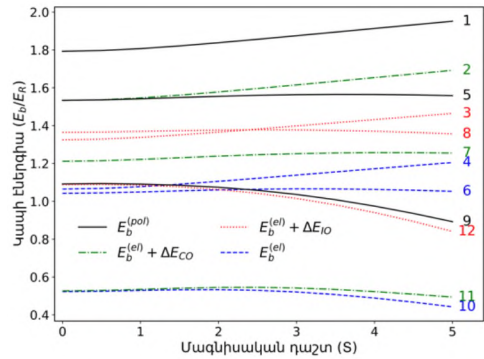
Նկար 1. Հիմնական վիճակում էլեկտրոնի և պոլարոնի կապի էներգիայի կախումը խառնուկի դիրքից:

արժեքներին: էլեկտրոնի կապի էներգիան առանց էլեկտրոն-ֆոնոն փոխազդեցության հաշվառման, լարի առանցքի և խառնուկի միջև հեռավորությունը մեծացնելիս մոնոտոն նվազում է, որը կարելի է մեկնաբանել՝ դիտարկելով նանոլարում էլեկտրոնային լիցքի բաշխումը և կոլոնյան կենտրոնից նրա արդյունաբար հեռավորությունը: Պոլարոնի կապի էներգիան որոշվում է պոլարոնային ամպում վիրտուալ CO և IO ֆոնոնների միջին թվով, որոնցից առաջինը խառնուկի և լարի առանցքի միջև

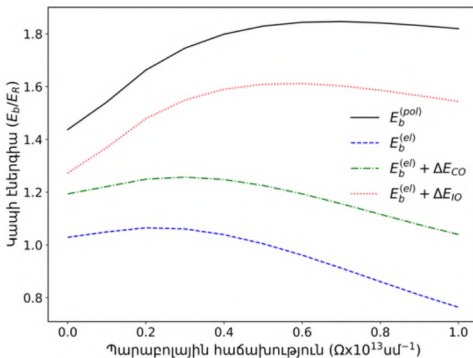
հեռավորության մեծացմանը զուգընթաց աճում է, իսկ երկրորդը՝ նվազում, որն էլ կարող է հանգեցնել կապի էներգիայում էքստրեմումի առաջացման, ինչպես դատելի ներկայացված է **Նկ. 1**-ի 1 կորում խառնուկի $\rho_i \approx 0.6R$ դիրքում:

Նկ. 2-ում պատկերված են հիմնական վիճակում էլեկտրոնի և պոլարոնի կապի էներգիաների կախումները մագնիսական դաշտի լարվածությունից: 1,2,3,4 կորերը համապատասխանում են խառնուկի $\rho_i = 0, 5, 6, 7, 8$ կորերը՝ $\rho_i = 0.5R$, իսկ 9,10,11,12 կորերը՝ $\rho_i = R$ դիրքերին: Էլեկտրոնի կապի էներգիայի կախումը մագնիսական դաշտի լարվածությունից հնարավոր չէ բացատրել՝ հաշվի առնելով միայն էլեկտրոնային

ամպի և կոլոնյան կենտրոնի միջև արդյունաբար հեռավորությունը: Ինչպես հետևում է կապի էներգիայի սահմանումից, մագնիսական դաշտի և սահմանափակող պոտենցիալի ներդրումները կապի էներգիայում արտահայտվում են ոչ միայն արդյունաբար հեռավորության միջոցով, այլ նաև ուղղակիորեն: Կապի էներգիայի պոլարոնային շեղումների կախումները մագնիսական դաշտի լարվածությունից կարելի է հիմնավորել՝ նկատի ունենալով խառնուկի դիրքը և էլեկտրոնային լիցքի տարածական բաշխումը: Անկախ խառնուկի դիրքից, մագնիսական դաշտի լարվածության մեծացումը հանգեցնում է էլեկտրոնի տեղայնացման լարի առանցքի շուրջ և, հետևաբար, հանգեցնում *CO* ֆոնոնների հետ էլեկտրոնի փոխազդեցության հավանականության մեծացման, իսկ *IO* ֆոնոնների հետ այդ հավանականության նվազման: Խառնուկի՝ լարի առանցքին մոտ դիրքերում



Նկար 2. Հիմնական վիճակում էլեկտրոնի և պոլարոնի կապի էներգիայի կախումը մագնիսական դաշտի լարվածությունից:

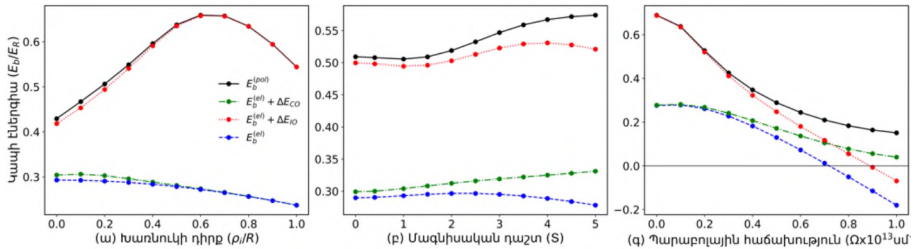


Նկար 3. Հիմնական վիճակում էլեկտրոնի և պոլարոնի կապի էներգիայի կախումը պարաբոլային հաճախությունից:

դա հանգեցնում է կապի էներգիայի աճի, մակերևույթին մոտ դիրքերում՝ նվազման:

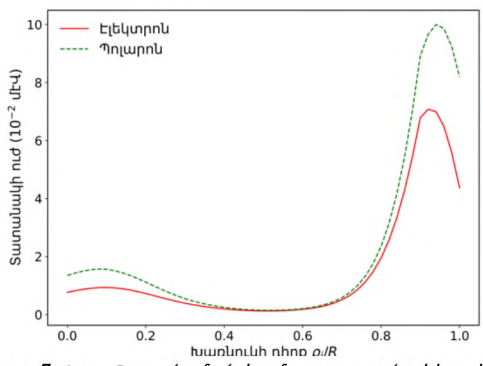
Հիմնական վիճակում էլեկտրոնի և պոլարոնի կապի էներգիայի կախումները սահմանափակող պոտենցիալի հաճախությունից $H = 3S$ և $\rho_i = 0.5R$ արժեքների դեպքում պատկերված են **Նկ. 3**-ում: Բնական է, որ պոլարոնի կապի էներգիայի կախումը սահմանափակող պոտենցիալի հաճախությունից նման է մագնիսական դաշտի լարվածությունից ունեցած կախմանը, քանի որ սահմանափակող պոտենցիալը նույնպես տեղայնացնում է էլեկտրոնային լիցքի բաշխումը լարի առանցքի շուրջ:

Նկ. 4-ում տրված է $2p_x$ -անման վիճակում էլեկտրոնի և պոլարոնի կապի էներգիաների կախումները (ա) խառնուկի դիրքից, (բ) մագնիսական դաշտի լարվածությունից, (գ) պարաբոլային սահմանափակող պոտենցիալի հաճախությունից: Այս դեպքում նույնպես կապի էներգիայի վարքը կախված ֆիզիկական պարամետրերից կարելի է մեկնաբանել՝ հաշվի առնելով էլեկտրոնային լիցքի բաշխման առանձնահատկությունները:



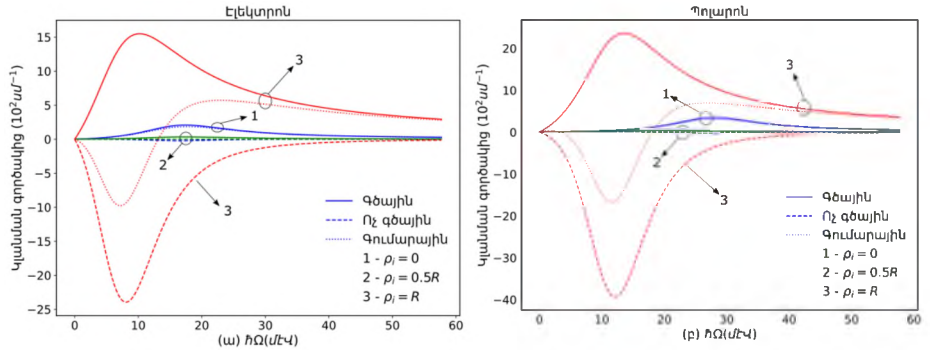
Նկար 4. $2p_x$ -անման վիճակում էլեկտրոնի և պոլարոնի կապի էներգիաների կախումները (ա) խառնուկի դիրքից, (բ) մագնիսական դաշտի լարվածությունից, (գ) պարաբոլային սահմանափակող պոտենցիալի հաճախությունից:

Հիմնական վիճակից առաջին մի քանի գրգռված վիճակներ անցումներով պայմանավորված օպտիկական բնութագրերը՝ տատանակի ուժը, գծային և ոչ գծային կլանման գործակիցները (ԿԳ) և բեկման ցուցչի փոփոխությունները (ԲՑՓ), հետազոտվել են **§6**-ում: **Նկ. 5**-ում պատկերված է $1s \rightarrow 2p_x$ անցման տատանակի ուժի կախումը խառնուկի դիրքից $H = 3S$ արժեքի դեպքում, պոլարոնային երևույթի հաշվառմամբ և անտեսմամբ: Ինչպես տեսնում ենք, էլեկտրոն-ֆոնոն փոխազդեցության հաշվառումը հանգեցնում է տատանակի ուժի մեծացման, ինչը նշանակում է, որ մեծանում է նաև ֆոտոնների կլանման կամ արձակման հավանականությունը տվյալ վիճակների միջև: Իր հերթին, սա նշանակում է, որ պոլարոնային երևույթի ազդեցությունը օպտիկական բնութագրերի վրա զգալի է այն դեպքում, երբ



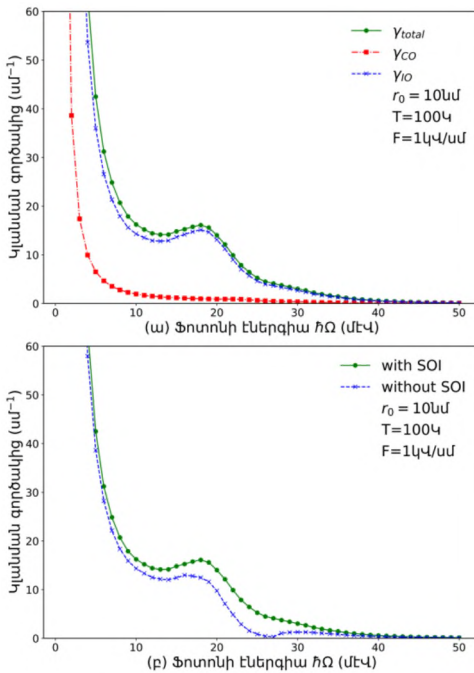
Նկար 5. $1s \rightarrow 2p_x$ անցման համար տարանակի ուժի կախումը խառնուկի դիրքից $H = 3S$ դեպքում պոլարոնային երևույթի անտեսմամբ և հաշվառմամբ

$\rho_i = R$ դիրքին: ԿԳ- ների արժեքների տարբերությունը խառնուկի տարբեր դիրքերի համար կարելի է բացատրել՝ հաշվի առնելով տատանակի ուժն այդ դիրքերում: Իրոք, $\rho_i = R$ դիրքում տատանակի ուժը մոտ 6 անգամ մեծ է, քան $\rho_i = 0$ դիրքում և մոտ 40 անգամ մեծ, քան $\rho_i = 0.5R$ դիրքում: Էլեկտրոն-ֆոնոն փոխազդեցությունը հանգեցնում է բոլոր ԿԳ-ների էքստրեմումների «կապույտ» շեղման: Պետք է նաև նշել, որ պոլարոնային անցումներին համապատասխանող ԿԳ-ների էքստրեմումներն ընդունում են ավելի մեծ արժեքներ, քան նույն դեպքում էլեկտրոնային անցումներին համապատասխանող ԿԳ-երի էքստրեմումները:



Նկար 6. $1s \rightarrow 2p_x$ անցման համար կլանման գործակից կախումը ֆոտոնի էներգիայից $H = 3S$ դեպքում, (ա) պոլարոնային երևույթի անտեսմամբ և (բ) հաշվառմամբ:

Ատենախոսության երկրորդ գլխում ուսումնասիրվել է ազատ լիցքակիրների՝ ֆոնոններով միջնորդավորված օպտիկական կլանումը նանոլարում ուղղահայաց համասեռ էլեկտրական դաշտում, հաշվի առնելով սպին-ուղեծրային փոխազդեցու-



Նկար 7. Ներենթագոտիական անցումներով պայմանավորված կլանման գործակցի կախումը ֆոտոնի $\hbar\Omega$ էներգիայից, երբ $r_0 = 10$ նմ, $T = 100$ Կ, $F = 14$ Կ/սմ, $\alpha = \beta = 4.5 \cdot 10^{-9}$ էՎ.սմ: (ա)-ում պատկերված են CO և IO ֆոնոնների ներդրումները, (բ)-ում՝ սպին-ուղեծրային փոխազդեցության ներդրումը:

այնպես էլ միջենթագոտիական անցումները: **Նկ. 7**-ում պատկերված է ԿԳ-ի կախումը ֆոտոնի $\hbar\Omega$ էներգիայից: Կարելի է տեսնել, որ IO ֆոնոնների ներդրումը կլանման գործակցում գերակշռում է CO ֆոնոնների ներդրումը, որը նանոլարի շառավղի փոքրության հետևանք է: ՍՈւ փոխազդեցության հաշվառման դեպքում ռեզոնանսային պիկեր են դիտվում ֆոտոնի էներգիայի $\hbar\Omega = 18$ մէՎ և 16 մէՎ արժեքների, և $\hbar\Omega = 30$ մէՎ՝ դրա անտեսման դեպքում: Այս պիկերը համապատասխանում են էլեկտրոնի ներենթագոտիական այն անցումներին, որոնցում էլեկտրոնը կլանում (արձակում) է ֆոտոն և միաժամանակ արձակում (կլանում) է ֆոնոն՝ ապահովելով էներգիայի և իմպուլսի պահպանումը:

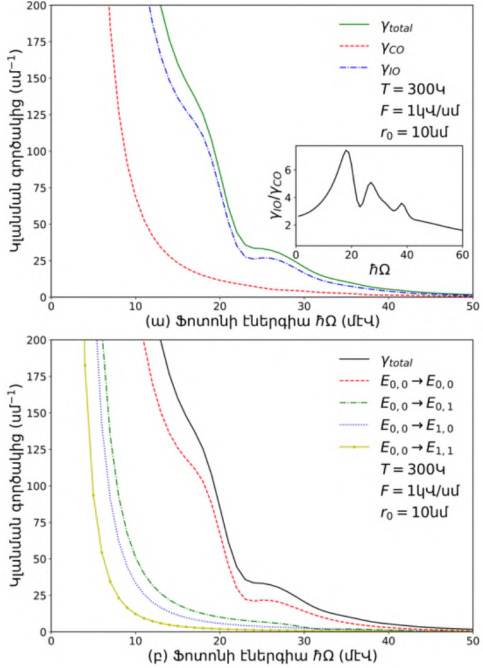
Միջենթագոտիական անցման կլանման գործակցում CO և IO ֆոնոնների ներդրումները տրված են **Նկ. 8** (ա)-ում: Կարելի նկատել, որ IO ֆոնոնների ներդրումը

թյան և տարածական սահմանափակման ազդեցությունը: **Ֆ1**-ում համառոտ վերլուծված է թեմային առնչվող գիտական գրականությունը, ինչպես նաև արտադրված են Ռաշբայի և Դրեսելիաուսի սպին-ուղեծրային փոխազդեցությունների համիլտոնիաները: **Ֆ2.1**-ում տրված են էլեկտրոնային վիճակները նանոլարում, Ռաշբայի և Դրեսելիաուսի սպին-ուղեծրային փոխազդեցությունների հաշվառմամբ: **Ֆ2.2**-ում ստացվել է վերլուծական արտահայտություն ֆոնոններով միջնորդավորված օպիկական կլանման գործակցի համար: Թվային հաշվարկի միջոցով **Ֆ3**-ում ստացվել են կլանման գործակցի կախումներն ընկնող ճառագայթման ֆոտոնի էներգիայից, լարի շառավղից և ջերմաստիճանից, ինչպես նաև էլեկտրական դաշտի լարվածությունից: Դիտարկվել են ինչպես էլեկտրոնի ներենթագոտիական,

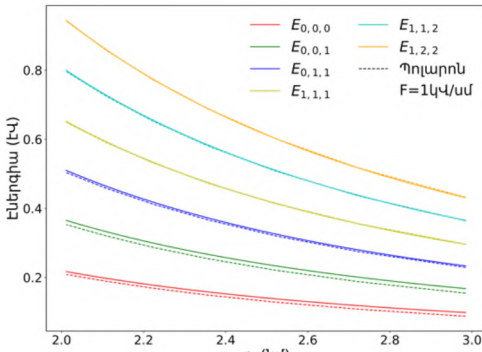
գերակշռում է CO ֆոնոնների ներդրումը, որը հետևանք է լարի շառավղի փոքրության: **Նկ. 8** (ա)-ի ներդրումն պատկերված է ԿԳ-ում IO և CO ֆոնոնների ներդրումների հարաբերությունը (Y_{IO}/Y_{CO}): Դիտվում է երեք պիկ ֆոտոնի էներգիայի 18մէՎ, 27մէՎ և 38մէՎ արժեքների համար, որոնցից առաջին երկուսը ֆոնոններով միջնորդավորված ներենթագոտիական անցումների հետևանք են, իսկ երրորդը համապատասխանում է ֆոնոններով միջնորդավորված միջենթագոտիական $E_{0,0} \rightarrow E_{1,0}$ անցմանը, քանի որ անցման էներգիան որոշվում է $\Delta E_{0,0}^{1,0} + \hbar\omega_j = 37$ մէՎ արտահայտությամբ: Այստեղից կարելի է եզրակացնել, որ $E_{0,0} \rightarrow E_{1,0}$ անցման դեպքում գերակշռում է IO ֆոնոնների արձակումը: Ներենթագոտիական և միջենթագոտիական անցումների ներդրումները ԿԳ-ում տրված են **նկ 8**. (բ)-ում: Կարելի է տեսնել, որ անցումները դեպի ավելի ցածր էներգիական մակարդակներ ունեն ավելի մեծ ներդրում ԿԳ-ում, քան դեպի բարձր էներգիական մակարդակներ անցումները, իսկ ներենթագոտիական անցումներն ունեն առավելագույն ներդրում:

Ատենախոսության երրորդ գլուխը նվիրված է էլեկտրական

դաշտում պարաբոլային սահմանափակմամբ գնդային անիզոտրոպ քվանտային կետում պոլարոնի ռամանյան ցրումների հետազոտմանը: **§1**-ում համառոտ վերլուծված է խնդիրն առնչվող գիտական գրականությունը, իսկ **§2**-ում պոլարոնային վիճակները համակարգում հետազոտվել են խոտորումների տեսության մոտավորության շրջանակներում: Ռամանյան ցրման դիֆերենցիալ կտրվածքը ներկայացված է **§3**-ում: **§4**-ում թվային հաշվարկների միջոցով ստացվել են պոլարոնի և էլեկտրոնի էներգիաների կախումները $CdSe$ քվանտային կետի արդյունաբար շառավղից, ինչպես նաև ռամանյան ցրումների դիֆերենցիալ կտրվածքների կախումներն արձակված ֆոտոնի

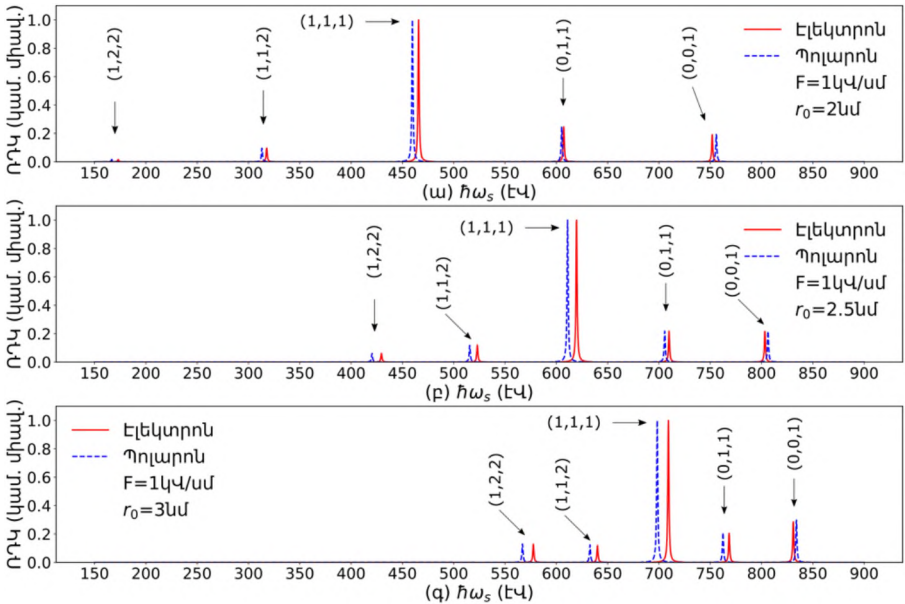


Նկար 8. Միջենթագոտիական անցման կլանման գործակցի կախումը ֆոտոնի $h\Omega$ էներգիայից: (ա) փարբեր ֆոնոնային մոդերի ներդրումները, (բ) փարբեր անցումների ներդրումները:



Նկար 9. Պոլարոնի և էլեկտրոնի էներգիաների կախումները քվանտային կետի շառավղից հիմնական և մի քանի գրգռված վիճակների համար, երբ $F = 1 \text{ eV/}\mu\text{m}$:

տասխանող էներգիաների միջև տարբերությունը փոքրանում է ինչպես ՔԿ-ի շառավղի, այնպես էլ քվանտային թվերի մեծացմանը զուգընթաց:



Նկար 10. Մի քանի գրգռված վիճակներից հիմնական վիճակ անցումով պայմանավորված ռամանյան ցրման դիֆերենցիալ կրկրվածքի (ՌԴԿ) կախումը արձակված ֆոտոնի $\hbar\omega_s$ էներգիայից, երբ $\hbar\omega_i = 900 \text{ մեՎ}$, $F = 1 \text{ eV/}\mu\text{m}$ և ՔԿ-ի շառավղի (ω) $r_0 = 2 \text{ նմ}$, (ρ) $r_0 = 2.5 \text{ նմ}$ (q) $r_0 = 3 \text{ նմ}$ արժեքների դեպքում:

Գնդային քվանտային կետում $F = 1$ կՎ/սմ լարվածությամբ համասեռ էլեկտրական դաշտում ռամանյան ցրման դիֆերենցիալ կտրվածքի կախումը արձակված ֆոտոնի էներգիայից ՔԿ-ի տարբեր շառավիղների դեպքում պատկերված է **Նկ. 10**-ում: Հոծ (կարմիր) կորերը համապատասխանում են էլեկտրոնների, իսկ զծավորները (կապույտ)՝ պոլարոնների ցրմանը: Ինչպես տեսնում ենք, ՔԿ-ի շառավիղ նույն արժեքի դեպքում էլեկտրոն-ֆոնոն փոխազդեցության հաշվառումը հանգեցնում է բոլոր անցումներով պայմանավորված ռեզոնանսային պիկերի շեղման դեպի ցածր էներգիական տիրույթ («կարմիր» շեղում), բացառությամբ՝ $E_{0,0,1} \rightarrow E_{0,0,0}$ անցման: Սա հետևանք է այդ վիճակներում պոլարոնային շեղումների առանձնահատկությունների: Ի տարբերություն մնացած գրգռված վիճակների՝ $(0,0,1)$ և հիմնական վիճակների էներգիական մակարդակների միջև հեռավորությունը ավելի փոքր է պոլարոնային երևույթի անտեսմամբ, քան հաշվառմամբ, այսինքն՝ դրա հաշվառումը այս դեպքում հանգեցնում է ռեզոնանսային պիկերի շեղման դեպի բարձր էներգիական տիրույթ:

Եզրակացություններ

1. Պարաբոլային պոտենցիալով գլանային քվանտային լարում երկայնական մագնիսական դաշտում ֆոնոնային սահմանափակման հաշվառմամբ ուսումնասիրվել են ջրածնաման խառնուկին կապված պոլարոնային վիճակները Լանդաու-Պեկարի փոփոխակային մեթոդով: Ստացվել է վերլուծական արտահայտություն կապի էներգիայի համար: Հաստատվել է, որ, կախված խառնուկի դիրքից, CO ֆոնոնների միջին թիվը ունի նվազող, իսկ IO ֆոնոնների միջին թիվը՝ աճող բնույթ, որը նրանցով պայմանավորված պոլարոնի կապի էներգիայում արտահայտվում է էքստրեմումի առաջացմամբ: Ցույց է տրվել, որ $1s$ - $2p_x$ - և $2p_z$ -անման վիճակներում y ուղղությամբ խառնուկի տեղաշարժը դեպի լարի մակերևույթ հանգեցնում է պոլարոնի կապի էներգիայի նվազման, իսկ $2p_y$ -անման վիճակում՝ էքստրեմումի առաջացման: Պարզվել է, որ էլեկտրոնի փոխազդեցությունը $2p_x$ -անման վիճակում ավելի արդյունավետ է IO ֆոնոնների, քան CO ֆոնոնների հետ, անկախ խառնուկի դիրքից:
2. Ուսումնասիրվել են մագնիսական դաշտի լարվածության և պարաբոլային պոտենցիալի հաճախության ազդեցությունները կապի էներգիայի վրա: Պարզվել է, որ մագնիսական դաշտը տեղայնացնում է էլեկտրոնային ամպը լարի առանցքի մոտ, և, հետևաբար, երբ խառնուկը գտնվում է առանցքի վրա, նրա աճը հանգեցնում է նաև պոլարոնի կապի էներգիայի աճի: Ցույց է տրվել, որ

պարաբոլային սահմանափակող պոտենցիալի հաճախության և մագնիսական դաշտի լարվածության ազդեցությունը պոլարոնի կապի էներգիայի վրա նույնական է: Ընդ որում, դրանցից կապի էներգիայի կախման մեջ կարող են դիտվել էքստրեմումներ, երբ խառնուկը չի գտնվում լարի առանցքի վրա:

3. Գլանային քվանտային լարում ուսումնասիրվել են կապված պոլարոնային վիճակների միջև անցումներով պայմանավորված տատանակի ուժը, գծային, ոչ գծային և գումարային կլանման գործակիցները և բեկման ցուցչի փոփոխությունը: Պարզվել է, որ էլեկտրոն-ֆոնոն փոխազդեցության հաշվառումը հանգեցնում է ինչպես կլանման գործակցի պիկերի «կապույտ» շեղման, այնպես էլ տատանակի ուժի և պոլարոնային վիճակների միջև անցումների հավանականության մեծացման: Տույց է տրվել, որ պոլարոնային երևույթի ազդեցությունը $1s \rightarrow 2p_x$ անցումներով պայմանավորված օպտիկական բնութագրերի վրա նկատելի է այն դեպքերում, երբ էլեկտրոն փոխազդում է միայն CO , կամ միայն IO ֆոնոնների հետ: Պարզվել է, որ մագնիսական դաշտի լարվածության տարբեր արժեքների դեպքում $1s \rightarrow 2p_y$ էլեկտրոնային անցումներով պայմանավորված բեկման ցուցչի փոփոխության էքստրեմումները դիտվում են ֆոտոնի էներգիայի միևնույն արժեքի մոտակայքում, այն դեպքում, երբ պոլարոնային երևույթների հաշվառմամբ այդ պիկերը միմյանցից հեռացած են:
4. Պարաբոլային սահմանափակող պոտենցիալով գլանային քվանտային լարում, լարի առանցքին ուղղահայաց էլեկտրական դաշտում հետազոտվել է ֆոնոններով միջնորդավորված ներենթագոտիական և միջենթագոտիական էլեկտրոնային անցումներով պայմանավորված օպտիկական կլանման գործակիցը, հաշվի առնելով սպին-որոշմային փոխազդեցության և ֆոնոնային համակարգի տարածական սահմանափակման երևույթների ազդեցությունը: Տույց է տրվել, որ մակերևութային ֆոնոնների հետ փոխազդեցությունը ազատ լիցքակիրների օպտիկական կլանման գործակցի մեջ ունի ավելի մեծ ներդրում, քան սահմանափակված ֆոնոնների հետ փոխազդեցությունը: Պարզվել է, որ կլանման գործակիցը՝ կախված ընկնող ճառագայթման ֆոտոնի էներգիայից, ունի պիկեր, որոնք դիտվում են ֆոնոններով միջնորդավորված անցումներին համապատասխանող էներգիաների դեպքում: Տույց է տրվել նաև, որ կլանման գործակիցը սպին-որոշմային փոխազդեցության հետևանքով մեծանում է, և դիտվում է պիկերի շեղում դեպի մեծ էներգիաների տիրույթ («կապույտ» շեղում):
5. Թվային հաշվարկմամբ ստացվել է ազատ լիցքակիրների ներենթագոտիական օպտիկական կլանման գործակցի կախումը ջերմաստիճանից, լարի շառավղից

և էլեկտրական դաշտի լարվածությունից: Պարզվել է, որ դրա ջերմաստիճանային կախումն ունի հագեցող բնույթ, և նկատվում է կտրուկ աճ 50Կ – 200Կ տիրույթում: Ցույց է տրվել, որ կախված սահմանափակող պտտենցիալ էներգիայից կլանման գործակիցն աճում է ավելի արագ սպին-ուղեծրային փոխազդեցության հաշվառմամբ, քան անտեսմամբ: Պարզվել է նաև, որ սպին-ուղեծրային փոխազդեցության ներդրումը կլանման գործակցի մեջ նվազում է էլեկտրական դաշտի լարվածության աճին զուգընթաց՝ էլեկտրոն-մակերևութային օպտիկական ֆոնոն փոխազդեցության թուլացման հետևանքով:

6. Ուսումնասիրվել է ազատ լիցքակիրների միջենթագոտիական օպտիկական կլանման գործակցի կախումը ընկնող ֆոտոնի էներգիայից: Պարզվել է, որ կլանման գործակցում դեպի ցածր էներգիական մակարդակներ անցումների ներդրումը գերակայում է ավելի բարձր մակարդակներ անցումների նկատմամբ: Ցույց է տրվել, որ γ_{IO}/γ_{CO} հարաբերությունը, կախված ֆոտոնի էներգիայից, ունի երեք պիկ, որոնցից առաջին երկուսը համապատասխանում են ներենթագոտիական անցումներին, իսկ երրորդ պիկը՝ $E_{0,0} \rightarrow E_{1,0}$ անցմանը: Պարզվել է նաև, որ հիմնական վիճակից $m = 1$ քվանտային թվով գրգռված վիճակ անցումով պայմանավորված կլանման գործակցում ներդրման վրա էլեկտրական դաշտի լարվածության ազդեցությունն ավելի զգալի է, քան $m = 0$ քվանտային թվով գրգռված վիճակ անցնելիս:
7. Պարաբոլային սահմանափակմամբ անիզոտրոպ գնդային քվանտային կետում համասեռ էլեկտրական դաշտում ուսումնասիրվել է պոլարոնային երևույթի ազդեցությունը ռամանյան ցրման և էներգիական սպեկտրի վրա: Ցույց է տրվել, որ քվանտային կետի շառավղի մեծացմանը զուգընթաց փոքրանում են ինչպես էլեկտրոնի և պոլարոնի առանձին վիճակներին համապատասխանող էներգիաները, այնպես էլ դրանց միջև տարբերությունը: Պարզվել է, որ, կախված երկրորդային ճառագայթման էներգիայից, ռամանյան ցրման դիֆերենցիալ կտրվածքում առաջանում են ռեզոնանսային վիճակներ, որոնք համապատասխանում են պոլարոնային անցումներին: Հաստատվել է, որ էլեկտրոն-ֆոնոն փոխազդեցության հաշվառմամբ ռեզոնանսային պիկերի շեղումները էներգիական սպեկտրների առանձնահատկությունների հետևանք են:

Հղված գրականություն

- [1] V. I. Klimov, Ed., *Nanocrystal Quantum Dots*. CRC Press, 2017.
- [2] N. C. Greenham, et al, *Phys. Rev. B*, **54**, pp. 17628–17637, 1996.
- [3] I. Taghavi, et al, *Applied Physics Letters*, **100**, p. 231114, 2012.
- [4] X. Duan, et al, *Nature*, **409**, pp. 66–69, 2001.
- [5] Y. Cui and C. M. Lieber, *Science*, **291**, pp. 851–853, 2001.
- [6] M. S. Arnold, et al, *The Journal of Physical Chemistry B*, **107**, pp. 659–663, 2002.
- [7] I. P. Marko et al., *Scientific Reports*, **6**, 2016.
- [8] M. H. Huang et al., *Science*, **292**, pp. 1897–1899, 2001.
- [9] E. Comini, et al, *Applied Physics Letters*, **81**, pp. 1869–1871, 2002.
- [10] M. B. Wootten, et al, *Semiconductor Science and Technology*, **29**, p. 115014, 2014.
- [11] X. D. Bai, et al, *Applied Physics Letters*, **82**, pp. 4806–4808, 2003.
- [12] B. A. Buchine, et al, *Nano Letters*, **6**, pp. 1155–1159, 2006.
- [13] Z. L. Wang and J. Song, *Science*, **312**, pp. 242–246, 2006.
- [14] G. E. Moore, *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, **11**, pp. 33–35, 2006.
- [15] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, 2012.
- [16] M. Johnson and R. H. Silsbee, *Physical Review Letters*, **55**, pp. 1790–1793, 1985.
- [17] M. N. Baibich et al., *Physical Review Letters*, **61**, pp. 2472–2475, 1988.
- [18] G. Binasch, et al, *Physical Review B*, **39**, pp. 4828–4830, 1989.
- [19] Կ. Ա. Վարդանյան, *Արհեստագիտական Նյարդեր*, ԵՊՀ, 2018
- [20] S. Hameau et al., *Physical Review B*, **65**, 2002.
- [21] D. Sarkar, et al., *Physical Review B*, **71**, 2005.
- [22] P. A. Knipp, et al., *Physical Review B*, **56**, pp. 1516–1519, 1997.
- [23] S. Hameau et al., *Physical Review Letters*, **83**, pp. 4152–4155, 1999.
- [24] O. Verzelen, et al., *Physical Review B*, **62**, pp. R4809–R4812, 2000.
- [25] T. Inoshita and H. Sakaki, *Physical Review B*, **56**, pp. R4355–R4358, 1997.
- [26] X.-Q. Li and Y. Arakawa, *Physical Review B*, **57**, pp. 12285–12290, 1998.
- [27] H.-J. Xie and C.-Y. Chen, *The European Physical Journal B*, **5**, pp. 215–218, 1998.
- [28] E. Roca, et al., *Physical Review B*, **49**, pp. 13704–13711, 1994.
- [29] J. C. Marini, et al., *Physical Review B*, **50**, pp. 14302–14308, 1994.
- [30] G. P. Lansbergen et al., *Nature Physics*, **4**, no. 8, pp. 656–661, 2008.
- [31] F. R. Bradbury, et al, *Physical Review Letters*, **97**, 2006.
- [32] R. Rahman et al., *Physical Review B*, **80**, 2009.

Հրատարակած աշխատանքների ցուցակ

1. T. K. Ghukasyan and A. L. Vartanian, “Polaronic effects on the impurity-related linear and nonlinear optical properties in a nanowire with magnetic field,” *Superlattices and Microstructures*, **137**, p. 106339, Jan. 2020.
2. A. L. Vartanian, T. K. Ghukasyan, A. L. Asatryan, K. A. Vardanyan, and A. A. Kirakosyan, “Simultaneous effects of the confinement of polar optical phonons and spin-orbit coupling on the free carrier absorption of a nanowire,” *Micro and Nanostructures*, **168**, p. 207287, Aug. 2022.
3. T. K. Ghukasyan, “Optical absorption in semiconductor nanowire mediated by electron-polar optical phonon and spin-orbit interactions”, *Proc. YSU A: Phys. Math. Sci.*, **56**, no. 3 (259), pp. 116–127, Oct. 2022.
4. T.K. Ghukasyan, A.L. Asatryan , L.A. Vardanyan , A.A. Kirakosyan , A.L. Vartanian, “Polaronic Effects on the Electron Raman Scattering in a Spherical Anisotropic Quantum Dot”, *Armenian Journal of Physics*, **15**, Issue 4, pp. 175-181, Dec. 2022.

TIGRAN KAREN GHUKASYAN

ELECTRON-PHONON INTERACTION EFFECTS ON THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR NANOSTRUCTURES

ANNOTATION

The dissertation is devoted to the theoretical studies of the influences of electron-phonon interactions on optical characteristics of electron states in semiconductor nanostructures. The effects of external fields, spatial confinement, spin-orbit interaction and presence of impurities on electron and polaron states in nanostructures of different geometry have been investigated. Particularly:

- Impurity bound polaron states in a cylindrical nanowire with a parabolic confining potential in a homogenous longitudinal magnetic field have been studied using the Landau-Pekar variational method. Numerical results have been obtained for the binding energy of the polaron, as well as the linear, non-linear and total absorption coefficients and refractive index change dependency from various physical parameters. It was shown that in the ground state the average number of virtual CO phonons decreases as a function of impurity position, while the opposite is true for IO phonons which is also reflected in the total binding energy of the polaron. It was shown that the effect of the magnetic field strength and confining potential frequency

on the binding energy of the polaron is qualitatively the same and results in spatial confinement of the electron around the wire axis.

- It was found that the electron-phonon interaction leads to blue shifts in the absorption coefficient and refractive index change peaks and also to an increase in the oscillator strength. It was shown, that in case of $1s \rightarrow 2p_x$ transition, the polaronic effect on the optical characteristics is noticeably manifested when the electron interacts mainly with either CO or IO phonons. The refractive index changes corresponding to $1s \rightarrow 2p_y$ electronic transition reach their extrema near the same photon energy, while the extrema for this polaron transition are somewhat distant, for all values of the magnetic field.
- The phonon mediated intra- and intersubband free carrier absorption in a cylindrical nanowire with a parabolic confining potential in a transverse electric field was investigated. It was shown that IO phonon interactions have a more significant contribution in the intra- and intersubband absorption coefficients than CO phonons. It was found that the absorption coefficient as a function of incident photon energy has peaks corresponding to phonon mediated transitions. The spin-orbit interaction leads to blue-shifts in the absorption coefficient peaks and increases their amplitude. Transitions from the ground state to lower energy states contribute more significantly in the absorption coefficient than transitions to higher energy states.
- It was shown, that the intrasubband absorption coefficient as a function of temperature increases rapidly in the range $50K - 200K$. Also, the intrasubband absorption coefficient increases rapidly with increasing the confining potential. It was found, that with an increase in the electric field strength, the contribution of the spin-orbit interaction decreases, which is a consequence of the weakening of the role of the dominant electron-interface phonon interaction
- Polaronic effects on the electron Raman scattering in a spherical anisotropic quantum dot have been studied analytically and numerically. It was found that the electron and polaron energies and also their difference decrease with increasing the effective radius of the quantum dot. It was shown that the Raman differential cross-section as a function of secondary emitted photon energy has peaks corresponding to transitions between polaron states. It was found that the shifts in the Raman differential cross-section peaks due to the electron-phonon interaction reflect the features of the polaron energy spectrum.

ГУКАСЯН ТИГРАН КАРЕНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
НАНОСТРУКТУР С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

АННОТАЦИЯ

Диссертация посвящена теоретическому исследованию влияния электрон-фононного взаимодействия на оптические характеристики электронных состояний в

полупроводниковых наноструктурах. Исследовано влияние внешних полей, пространственного ограничения, спин-орбитального взаимодействия и наличия примесей на электронные и поляронные состояния в наноструктурах различной геометрии. В частности:

- Вариационным методом Ландау-Пекара исследованы примесно-связанные состояния полярона в цилиндрической нанопроволоке с параболическим ограничивающим потенциалом в однородном продольном магнитном поле. Вычислены для энергии связи полярона, а также зависимости линейного, нелинейного и полного коэффициентов поглощения и изменения показателя преломления от различных физических параметров. Показано, что в основном состоянии среднее число виртуальных CO фононов уменьшается в зависимости от положения примеси, а число IO фононов увеличивается, что также отражается на полной энергии связи полярона. Показано, что влияние напряженности магнитного поля и частоты ограничивающего потенциала на энергию связи полярона качественно одинаково и приводит к пространственному ограничению электрона вокруг оси проволоки.
- Обнаружено, что электрон-фононное взаимодействие приводит к “голубому” сдвигу пиков изменения коэффициента поглощения и показателя преломления, а также к увеличению силы осциллятора. Показано, что при переходе $1s \rightarrow 2p_x$ поляронное влияние на оптические характеристики заметно проявляется, когда электрон взаимодействует в основном либо с CO , либо с IO -фононами. Изменения показателя преломления, соответствующие электронному переходу $1s \rightarrow 2p_y$, достигают своих экстремумов вблизи одной и той же энергии фотонов, в то время как экстремумы поляронного перехода удалены друг от друга.
- Исследовано опосредованное фононами внутри- и межподзонное поглощение свободных носителей в цилиндрической нанопроволоке с параболическим ограничивающим потенциалом в перпендикулярном оси проволоки электрическом поле. Показано, что IO фононные взаимодействия вносят более существенный вклад во внутризонный и межподзонный коэффициенты поглощения, чем CO фононы. Было обнаружено, что коэффициент поглощения как функция энергии падающего фотона имеет пики, соответствующие переходам, опосредованным фононами. Спин-орбитальное взаимодействие приводит к “голубому” сдвигу пиков коэффициента поглощения и увеличивает их амплитуду. Переходы из основного состояния в состояния с более низкой энергией вносят более значительный вклад в коэффициент поглощения, чем переходы в состояния с более высокими энергиями.
- Показано, что коэффициент внутривозонного поглощения в зависимости от температуры резок возрастает в диапазоне 50 – 200К. Также было показано, что коэффициент внутривозонного поглощения резок возрастает с увеличением ограничивающего потенциала. Обнаружено, что с увеличением напряженности

электрического поля вклад спин-орбитального взаимодействия уменьшается, что является следствием ослабления роли доминирующего взаимодействия электрона с 10 фононами.

- Аналитически и численно изучены поляронные эффекты комбинационного рассеяния электронов в сферической анизотропной квантовой точке. Обнаружено, что энергии электронов и поляронов, а также их разность уменьшаются с увеличением эффективного радиуса квантовой точки. Показано, что дифференциальное сечение комбинационного рассеяния в зависимости от энергии вторичного излучаемого фотона имеет пики, соответствующие переходам между состояниями полярона. Обнаружено, что смещения пиков дифференциального сечения комбинационного рассеяния, обусловленные электрон-фононным взаимодействием, отражают особенности энергетического спектра поляронов.