

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ ԱՇՈՏ ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆԻ

**ՆԱՆՈՎԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ ՔՎԱԶԻՄԱՍՆԻԿԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿՆԵՐԻ ՎՐԱ
ԱՐՏԱՔԻՆ ԴԱՇՏԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄ՝ ՖՈՆՈՆԱՅԻՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԵՏ ՓՈԽԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ**

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

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2024

THE MINISTRY OF EDUCATION, SCIENCE, CULTURE AND SPORT OF RA
YEREVAN STATE UNIVERSITY

MOVSISYAN ASHOT

**STUDY OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FIELDS ON THE QUASI-PARTICLE
STATES IN NANOSTRUCTURES CONSIDERING THE INTERACTION WITH THE
PHONON SYSTEM**

ABSTRACT

Thesis for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Science
Speciality 01.04.07 – “Condensed Matter Physics”

YEREVAN – 2024

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում:
Գիտական ղեկավար՝ Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր **Ա. Լ. Վարդանյան**

Պաշտոնական
ընդդիմախոսներ՝ Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր **Դ. Հ. Բաղայան**
Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր **Ս. Վ. Մելքոնյան**

Առաջատար
կազմակերպություն՝ **ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտ**

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2024թ. հուլիսի 8-ին՝ ժամը
14:00-ին, Երևանի պետական համալսարանի ֆիզիկայի 049 մասնագիտական
խորհրդի նիստում
Հասցե՝ 0025, Երևան, Ալեք Մանուկյան փ. 1, ԵՊՀ

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2024թ. հունիսի 8-ին:

049 մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար՝  Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ
Վ. Պ. Քալանթարյան

The thesis theme is approved at the Yerevan State University.

Scientific supervisor: Doctor of Phys. Math. Sciences, Prof. **A.L. Vartanian**

Official opponents: Doctor of Phys. Math. Sciences, Prof. **D.H. Badalyan**
Doctor of Phys. Math. Sciences, Prof. **S.V. Melkonyan**

Leading organization: **Institute for Physical Research NAS RA**


The defense of the thesis will take place at 14:00 on July 08, 2024, during the session of
the Specialized Council 049 of Physics at the Yerevan State University.

Address: 1 Alex Manoogian Street, 0025 Yerevan, Armenia.

The thesis is available at the Yerevan State University library.

The abstract was distributed on 08 June, 2024.

Scientific secretary of the
Specialized Council

 Candidate of Phys. Math. Sciences
V. P. Kalantaryan

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՆԿԱՐԱԳՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Աշխատանքի արդիականությունը: Ժամանակակից պինդամարմնային նանոնյութերի սինթեզը եւ դրանց հենքի վրա նանոկառուցվածքների ստեղծումը բացել են խոստումնալից հեռանկարներ գիտական պրպտող մտքի և գիտահեն արտադրությունների համար ինչպես տպավորիչ հիմնարար ձեռքբերումների, այնպես էլ գիտական եւ արդյունաբերական սարքաշինության ոլորտում զարմանահրաշ հաջողությունների ապահովման տեսանկյունից: Պինդամարմնային նանոկառուցվածքների օպտոէլեկտրոնային հատկությունները կարելի է կառավարել բաղադրյալ նյութերի ընտրության, կառուցվածքների երկրաչափական բնութագրերի (չափեր եւ տեսք), արտաքին դաշտերի եւ այլ գործոնների միջոցով: Նանոկառուցվածքներում առկա բաժանման սահմանները (ազատ մակերեսայիններ եւ միջկերևայիններ) նյութերի ծավալային նմուշների համեմատ արմատականորեն փոխում են քվազիմասնիկների վարքը՝ այն դարձնելով կառավարելի:

Սա հնարավորություն է ընձեռում ունենալու պահանջված հատկություններով պինդամարմնային նանոկառուցվածքներ, որ ապահովում է մեծ հետաքրքրություն ոչ միայն գիտնականների, այլև արդյունաբերական հանրության շրջանում:

Մասնավորապես, գիտական առումով խիստ արդիական են նանոկառուցվածքներում բաղադրյալ նյութերի բաժանման սահմանների և ազատ մակերևայինների վերաբերյալ ուսումնասիրությունները, որոնք կարող են բացահայտել ֆիզիկական երեւոյթների կառավարելի վերահսկողության հնարավորություններ: Կառավարելիությունը նանոնյութերը դարձրել է [այն կիրառության միջոց ամենատարբեր ոլորտներում. դրանք պահանջված են նանոէլեկտրոնիկայի, հեռահաղորդակցության, վառելիքի և արևային մարտկոցների, գերկոնդենսատորների, բժշկական ախտորոշման, ընտրովի զգայնության էլեկտրոդների, բնապահպանության, բժշկության և բազմաթիվ այլ ոլորտներում: Պինդամարմնային նանոկառուցվածքների բացառիկ հատկությունները իրենց ծավալային նմուշների համեմատությամբ պայմանավորված են՝

- քվանտային չափային երևույթներով, որոնք դրսևորվում են կառուցվածքային նյութերի նանոչափերի դեպքում եւ էականորեն ազդում են քվազիմասնիկների գոտիական կառուցվածքի դինամիկայի և նանոկառուցվածքների ֆիզիկական եւ հատկապես օպտոէլեկտրոնային հատկությունների վրա,
- մակերես-ծավալ հարաբերակցության կտրուկ մեծացմամբ, որն ապահովում է քիմիական եւ ֆիզիկական փոխազդեցությունների համար ավելի մեծ մակերես և միջմակերեսային տիրույթ,

Վերոնշյալի հաշվառմամբ՝ ատենախոսության թեման, որը նվիրված է նանոլարերում եւ կոլոիդային քվանտային կետերում տարբեր քվազիմասնիկների հատկությունների վրա ֆոնոնային փոխազդեցությունների եւ արտաքին էլեկտրական եւ մագնիսական դաշտերի համատեղ ազդեցության ուսումնասիրմանը, խիստ արդիական է ինչպես հիմնարար գիտության, այնպես էլ հնարվոր սարքային կիրառությունների տեսանկյունից:

Աշխատանքի նպատակը: Տարբեր չափայնությամբ պինդմարմնային նանոկառուցվածքներում ուսումնասիրել քվազիմասնիկների (հաղորդականության էլեկտրոններ, խոռոչներ, պոլարոններ, էքսիտոններ) հատկությունների վրա արտաքին էլեկտրական եւ մագնիսական դաշտերի ազդեցությունը՝ միջնորդված ֆոնոնային մոդերի հետ դրանց փոխազդեցությամբ: Շնչ որում, հիմնականում հաշվի է առնվել նանոկառուցվածքներում առկա բաժանման սահմանների ազդեցությունը փոխազդեցություններին մասնակցող ֆոնոնային մոդերի դիսպերսային առնչությունների եւ տարբեր քվազիմասնիկների հետ դրանց փոխազդեցության ուժգնության վրա: Այս տեսանկյունից, աշխատանքի գլխավոր նպատակը ոչ միայն նոր հիմնարար արդյունքների ստացումն է, այլ նաեւ կիրառություններում՝ դիտարկվող ֆիզիկական երեւոյթների կառավարելի վերահսկողության հնարավորությունների բացահայտումը:

Գիտական նորույթը: Ատենախոսության մեջ առաջին անգամ

- Լի-Լուու-Փայնսի ունիտար ձեւափոխությունների օգտագործմամբ զարգացվել է տեսություն՝ ուսումնասիրելու համար կիրառված արտաքին էլեկտրական եւ մագնիսական դաշտերի ազդեցությունը վյուրցիտ-նիտրիդային նանոլարում ձեւավորվող ֆրյոհլիխյան պոլարոնի հիմնական պարամետրերի վրա: Ստացվել են վերլուծական արտահայտություններ պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի համար, որոնք հնարավորություն են ընձեռում մեկնաբանելու պոլարոնի հիմնական պարամետրերի վրա համակարգի բնութագրերի ազդեցությունը:
- Ֆոնոնային սահմանափակման երեւոյթի հաշվառմամբ տեսականորեն ուսումնասիրվել է լույսի ռեզոնանսային ռամանյան էքսիտոնային ցրումը միջուկ/ծածկույթ կոլոիդային քվանտային կետում՝ հաշվի առնելով քվանտային կետի միջուկի էլիպսոարդային տեսքը (ձգված կամ սեղմված), ինչպես նաեւ էլեկտրոն-խոռոչ փոխանակային փոխազդեցությունը՝ զործոններ, որոնք հանգեցնում են էքսիտոնի ութակի այլասերված հիմնական վիճակի տրոհմանը հինգ մակարդակի: Առաջին անգամ ստացվել են սահմանափակ եւ միջմակերեւոյթային ֆոնոնների վրա ցրման հետեւանքով էքսիտոնի հիմնական վիճակի տրոհված նուրբ կառուցվածքի մակարդակների միջեւ անցման մատրիցային տարրերի վերլուծական արտահայտություններ, որոնք այնուհետեւ օգտագործվել են ռամանյան ցրման դիֆերենցիալ կտրվածքի եւ ստոքսյան շեղման ուսումնասիրման համար: Ստացված տեսական արդյունքները լավ համաձայնության մեջ են InP/ZnSe կոլոիդային քվանտային կետի համար ստացված փորձարարական արդյունքների հետ:
- Կուբ-Գրինվուդի տեսության շրջանակներում բւեռային նանոլարի առանցքին ուղղահայաց կիրառված արտաքին էլեկտրական դաշտի առկայությամբ առաջին անգամ ուսումնասիրվել է էլեկտրոնների՝ օպտիկական ֆոնոնների վրա ցրման երով պայմանավորված շարժունությունը՝ սպին-ուղեծրային փոխազդեցության հաշվառմամբ: Բացահայտվել են շարժունության կախումները ջերմաստիճանից, էլեկտրական դաշտի լարվածությունից, Ռաշբայի եւ Դրեսելիաուսի սպին-ուղեծրային փոխազդեցության պարամետրերից:

Գործնական արժեքը: Նանոմաշտաբային օբյեկտները ապահովում են եզակի հանդիպման հնարավորություն այն հետազոտողների համար, ովքեր աշխատում են այնպիսի ոլորտներում, ինչպիսիք են ֆիզիկան և բժշկությունը, քիմիան եւ կենսաբանությունը, նյութագիտությունը և ճարտարագիտությունը: Պինդմարմնային նանոկառուցվածքները համակարգեր են թե՛ նանո մասշտաբներում տեղի ունեցող ոչ սովորական երևույթների ուսումնասիրման, թե՛ դրանք նորարարական կիրառություններում օգտագործելու համար: Նանոլարերի, կիսահաղորդչային նանոբյուրեղների եւ ցածր չափայնությամբ պինդմարմնային այլ հետերոկառուցվածքների ուսումնասիրությունը ձեավորել է դինամիկորեն զարգացող և բազմամասնագիտական հետազոտական դաշտ, որը մեծ ուշադրության է արժանանում ամբողջ աշխարհում ինչպես իր հիմնարար խնդիրների, այնպես էլ մի շարք գործող տեխնոլոգիաների առումով (լուսառաքող սարքեր, արևային մարտկոցներ, լուսարձակող արևային կուտակիչներ, օպտոէլեկտրոնիկա, զգայակներ, ջերմաէլեկտրականություն, կենսաբժշկական կիրառություններ, կատալիզ եւ այլն):

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները

1. Կյուբիտային կառուցվածքով GaN նանոլարում պոլարոնի հիմնական պարամետրերի վրա տարածական սահմանափակության ազդեցությամբ ձեավորված միջմակերեսային բեւեռային օպտիկական ֆոնոններն ունեն գերակայող դեր բարակ նանոլարերի դեպքում:
2. Կյուբիտային կառուցվածքով նիտրիդային նանոլարում քվազիսահմանափակ եւ միջմակերեսային բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների հետ փոխազդեցության արդյունքում ձեավորված պոլարոնի հիմնական բնութագրերի՝ պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի վրա նանոլարի առանցքին ուղղահայաց կիրառված համասեռ էլեկտրական դաշտն ունի ավելի մեծ ազդեցություն, քան լարի առանցքով կիրառված մագնիսական դաշտը:
3. Կյուբիտային կառուցվածքով նիտրիդային գլանային նանոլարում միջմակերեսային բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների հետ փոխազդեցությամբ ձեավորված միջմակերեսային պոլարոնի հիմնական պարամետրերի՝ մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից կախումը որակապես համընկնում է խորանարդային կառուցվածքով CdSe գլանային քվանտային լարում համասեռ մագնիսական դաշտում ստացված արդյունքների հետ:
4. Միջուկ/ծածկույթ կոլոիդային քվանտային կետում միջուկի ոչ գնդաձեւության եւ էլեկտրոն-խոռոչ փոխանակային փոխազդեցության հետեւանքով էքսիտոնի հիմնական վիճակի ութակի այլասերված վիճակում ձեավորվում է հնգամակարդակ նուրբ կառուցվածք, որի հաշվառմամբ բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների մասնակցությամբ լույսի ռեզոնանսային ռամանյան ցրման դիֆերենցիալ կտրվածքում սահմանափակված օպտիկական ֆոնոնային մոդերը միջմակերեսային օպտիկական մոդերի համեմատությամբ ունեն գերակայող ներդրում:
5. Հաշվարկված ռեզոնանսային ռամանյան ուժգնության սպեկտրային պրոֆիլները, այսինքն՝ ռեզոնանսային ռամանյան ցրման ուժգնության

կախումներն ընկնող եւ ցրվող ֆոտոնների էներգիաներից, ցուցադրում են էական կախում միջուկի էլիպսայնությունից՝ հիմնականում արտացոլելով էքսիտոնի նուրբ կառուցվածքի կախումը միջուկի ձեւից:

6. Ռեզոնանսային ռամանյան ցրման սթրքայան շեղումը՝ պայմանավորված էքսիտոնի նուրբ կառուցվածքով, միջուկի շառավղի նվազմանը զուգընթաց մեծանում է կլոլիդային քվանտային կետի էլիպսայնության եւ էլեկտրոն-խոռոչ փոխանակային փոխազդեցության ուժեղացմամբ, եւ դրա հաշվարկված արժեքները InP/ZnSe կլոլիդային քվանտային կետի դեպքում լավագույնս համընկնում են փորձարարական արդյունքների հետ ե՛ւ ըստ լայնության, ե՛ւ ըստ հաճախությունների:

Աշխատանքի արդյունքների փորձարկում

Աշխատանքի արդյունքները ներկայացվել են 11th Int. Symposium on Optics and its Applications (OPTICS11), July 11-15, 2023, Yerevan-Ashtarak, Armenia, եւ 22nd International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 22), Aug. 14-18, 2023, Münster, Germany գիտաժողովներում:

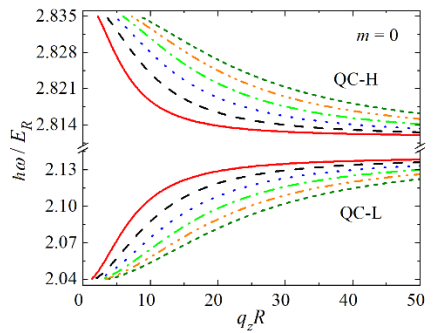
Ատենախոսության կառուցվածքը: Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, երեք գլխից, եզրակացությունից և գրականության ցանկից (200 հոլում): Ատենախոսության ծավալը 116 էջ է՝ ներառյալ 29 նկարները և 3 աղյուսակները:

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

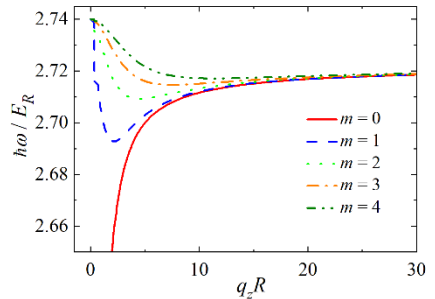
Ատենախոսության **ներածությունում** ներկայացված է գիտական ակնարկ և գիտական արդյունքների վերլուծություններ, որոնք սերտորեն կապված են ատենախոսության թեմային:

Ատենախոսության առաջին գլուխը նվիրված է ոչ բեւեռային միջավայրում վյուրցիտային նիտրիդային գլանաձեւ նանոլարում ֆոլյոլիխայան պոլարոնի խնդրի ուսումնասիրմանը: Լի-Լու-Փայնսի փոփոխակային մեթոդի շրջանակներում հետազոտվել է արտաքին էլեկտրական եւ մագնիսական դաշտերի եւ քվանտային չափային սահմանափակման երեւոյթի ազդեցությունը պոլարոնների սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի վրա՝ պայմանավորված էլեկտրոնների փոխազդեցությամբ քվազիսահմանափակ եւ միջմակերեւութային օպտիկական ֆոնոնների հետ: Վյուրցիտային կառուցվածքով GaN նանոլարի համար ստացված թվային արդյունքները համեմատվել են ցինկի խաբուսակի կառուցվածքով գլանաձեւ նանոլարերի համար ստացված արդյունքների հետ: Տարբեր ֆոնոնային մոդերի ներդրումների գնահատումը ցույց է տալիս, որ միջմակերեւութային բեւեռային օպտիկական ֆոնոններն ունեն գերակայող դեր համեմատաբար բարակ նանոլարերի

դեպքում: Տույց է տրվել, որ էլեկտրական դաշտը գերակայող ազդեցություն ունի պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի վրա, մինչդեռ մագնիսական դաշտի ազդեցությունը փոքր է: Ստացված արդյունքները կարելի է նշանակություն ունեն վյուրցիտային կիսահաղորդչային ցածրչափային կառուցվածքներում ֆոնոնների մասնակցությամբ էլեկտրաօպտիկական հատկությունների հետագա ուսումնասիրության համար: Գլխի ներածությունում ներկայացված է վերոնշյալ հարցերին վերաբերող գրականության վերլուծություն: **§1.1**-ը նվիրված է բեւեռային վյուրցիտային նիտրիդային նանոլարում քվազիսահմանափակ և միջմակերեսային օպտիկական ֆոնոնային մոդերի դիսպերսային առնչությունների ուսումնասիրմանը: Ինչպես հայտնի է [1, 2], ոչ բեւեռային շրջապատով քվազիմիաչափ վյուրցիտ-նիտրիդային գլանային կառուցվածքում գոյություն ունեն երկու տեսակի բեւեռային օպտիկական ֆոնոնային մոդեր: Առաջինը քվազիսահմանափակ (QC) մոդերն են, որոնք ունեն տատանողական բնույթ բեւեռային նանոլարի $\rho < R$ տիրույթում եւ մարող են $\rho > R$ տիրույթում: Բացահայտվել եւ գրաֆիկորեն ներկայացվել են հաճախային այն տիրույթները, որոնցում կարող են գոյություն ունենալ այդ ֆոնոնային մոդերը վյուրցիտային գլանային կառուցվածքով նանոլարում: **Նկ. 1**-ում ներկայացված են քվազիսահմանափակ ֆոնոնների ցածրհաճախային եւ բարձրհաճախային տիրույթների առաջին վեց ճյուղերին համապատասխանող դիսպերսային կորերը GaN քվանտային լարում: Միջմակերեսային ֆոնոնների համար ստացված դիսպերսային հավասարման լուծմամբ ստացվել են այդ ֆոնոնների դիսպերսային առնչությունները, որոնց առաջին հինգ ճյուղերին համապատասխանող կորերը GaN քվանտային լարի համար ներկայացված են **Նկ. 2**-ում: **§1.2**-ը նվիրված է էլեկտրոն-ֆոնոնային համակարգի համիլտոնիանի ներկայացմանը վյուրցիտ-նիտրիդային քվանտային լարում՝ արտաքին լարի առանցքին ուղղահայաց ուղղված համասեռ էլեկտրական եւ լարի առանցքով ուղղված համասեռ մագնիսական դաշտերում:

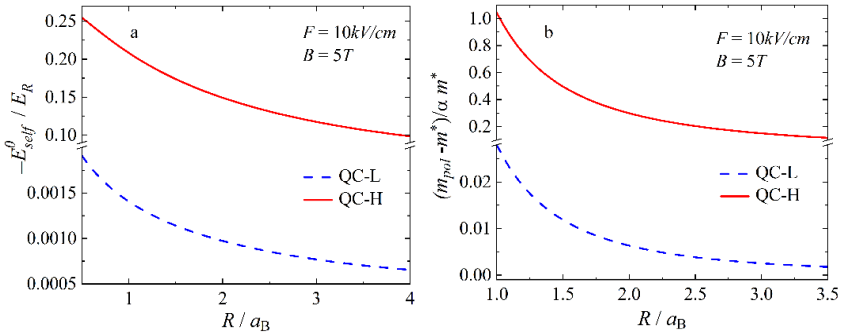


Նկար 1. Քվազիսահմանափակ ֆոնոնային մոդերի դիսպերսային կորերը GaN նանոլարում



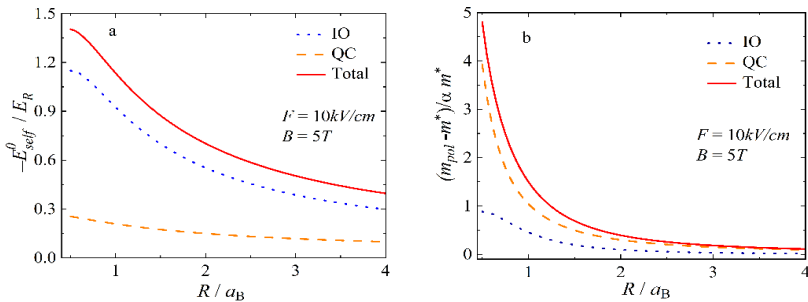
Նկար 2. Միջմակերեսային ֆոնոնային մոդերի դիսպերսային կորերը GaN նանոլարում

§1.3-ում նանուլարի դեպքում ներկայացված են Լի-Լոու-Փայնսի երկու ունիտար ձեւափոխությունները, որոնցից մեկը հնարավորություն է տալիս էլեկտրոն-



Նկար 3. Քվազհասահմանափակ պոլարոնի սեփական էներգիայի (a) և արդյունարար զանգվածի (b) կախումները GaN լարի շառավղից էլեկտրական դաշտի լարվածության $F=10$ կՎ/սմ եւ մագնիսական դաշտի ինդուկցիայի $B=5$ Տ արժեքների դեպքում

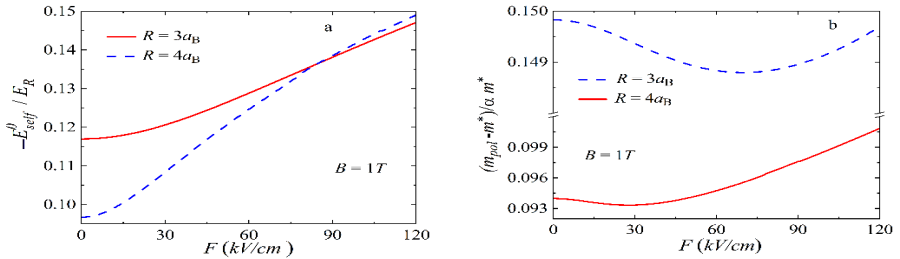
ֆոնոնային փոխազդեցության համիլտոնիանից արտաքսելու էլեկտրոնի կորդրինատը (ըստ նանուլարի առանցքի), իսկ մյուսը, որն ունի փոփոխակային բնույթ, կոչված է որոշելու էլեկտրոն-ֆոնոնային համակարգի էներգիան: Այս ձեւափոխությունների միջոցով հաշվարկվել են վյուրցիտ-նիտրիդային նանուլարում ձեւավորված ֆրոնիլիայան պոլարոնի հիմնական պարամետրերը՝ սեփական էներգիան եւ արդյունարար զանգվածը: Տույց է տրվել, որ այդ երկու մեծություններն էլ ունեն ադիտիվ բնույթ ըստ ֆոնոնային մոդերի: **§1.4**-ում պոլարոնի հիմնական պարամետրերի վերլուծական արտահայտությունների թվային ինտեգրման միջոցով



Նկար 4. Քվազհասահմանափակ եւ միջմակերեւութային պոլարոնների սեփական էներգիայի (a) եւ արդյունարար զանգվածի (b) կախումները GaN լարի շառավղից էլեկտրական դաշտի լարվածության $F = 10$ կՎ/սմ եւ մագնիսական դաշտի ինդուկցիայի $B = 5$ Տ արժեքների դեպքում

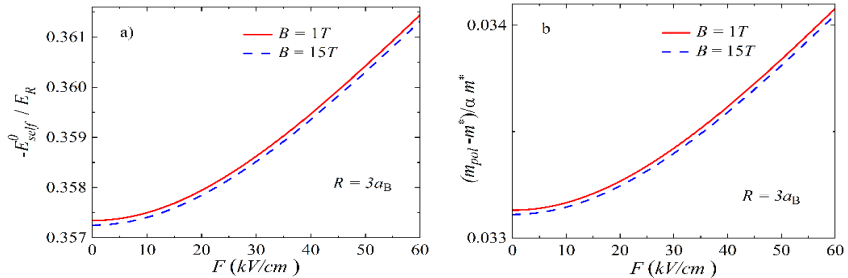
ուսումնասիրվել են ոչ բեւեռային շրջապատով զլանային քվանտային լարում շարժվող պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի կախումները լարի շառավղից եւ արտաքին դաշտերի բնութագրերից: **Նկ. 3**-ում պատկերված են քվազհասահմանափակ պոլարոնի սեփական էներգիայի (a) եւ արդյունարար

զանգվածի (b) կախումները լարի շառավղից ($F = 10$ կՎ/սմ, $B = 5$ Տ), բարձր- (հոծ կորեր) եւ ցածրահաճախային (զծիկավոր կորեր) ֆոնոնային մոդերի հետ էլեկտրոնի



Նկար 5. Քվազիսահմանափակ պոլարոնի սեփական էներգիայի (a) եւ արդյունաբար զանգվածի (b) կախումները էլեկտրական դաշտի լարվածությունից $R = 3a_B$ եւ $R = 4a_B$ շառավղիներով GaN լատեռի համար, երբ $B = 1$ Տ:

փոխազդեցության դեպքում: Երեւում է, որ քվազիսահմանափակ ֆոնոնների ցածրահաճախային ճյուղերի ներդրումը պոլարոնի սեփական էներգիայի (արդյունաբար զանգվածի) մեջ կարելի է անտեսել բարձրահաճախային ճյուղերի ներդրման համեմատ: Նկարներից երեւում է նաեւ, որ պոլարոնի սեփական էներգիան աճում է լարի շառավղի փոքրացմանը զուգընթաց (**նկ. 3.a**): Նույնպիսի օրինաչափություն է դիտվում քվազիմիաչափ պոլարոնի արդյունաբար զանգվածի՝ լարի շառավղից կախման մեջ (**նկ. 3.b**): Գնահատվել են նաեւ առանձին քվազիսահմանափակ եւ 10

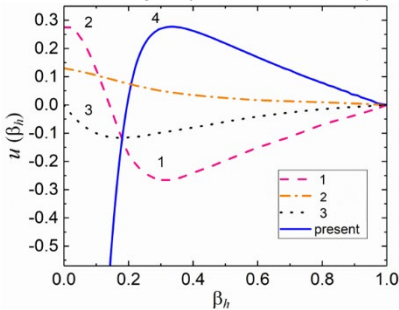


Նկար 6. Միջմակերեւութային պոլարոնի սեփական էներգիայի (a) եւ արդյունաբար զանգվածի (b) կախումները էլեկտրական դաշտի լարվածությունից $R = 3a_B$ շառավղով GaN լարի համար, երբ $B = 1$ Տ եւ $B = 15$ Տ:

ֆոնոնային մոդերի ներդրումները պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունաբար զանգվածի մեջ (**նկ. 4.a**): Պետք է նկատել, որ միջմակերեւութային օպտիկական ֆոնոնների ներդրումը պոլարոնի սեփական էներգիայի մեջ զգալիորեն գերազանցում է քվազիսահմանափակ ֆոնոնների ներդրումը, մինչդեռ արդյունաբար զանգվածի կախումներում (**նկ. 4.b**) լարի շառավղից կախումներում դիտվում է հակառակ պատկերը. վերջին դեպքում գերակայող ներդրում ունեն քվազիսահմանափակ ֆոնոն-

ները: Ուսումնասիրվել են պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի կախումները քվանտային լարի առանցքին ուղղահայաց էլեկտրական դաշտի լարվածությունից՝ պայմանավորված քվազիսահմանափակ (նկ. 5) եւ միջմակերեսային օպտիկական ֆոնոնների հետ փոխազդեցությամբ (նկ. 6): **նկ. 5.a**-ից երեւում է, որ պոլարոնի սեփական էներգիան էլեկտրական դաշտի աճմանը զուգընթաց աճում է, միջդեռ արդյունարար զանգվածը նախ նվազում է, ապա՝ աճում (նկ. 5.b): **նկ. 6**-ից երեւում է, որ միջմակերեսային պոլարոնի հիմնական պարամետրերը էլեկտրական դաշտից կախված մոնոտոն աճում են, մինչդեռ մագնիսական դաշտի ինդուկցիայի մեծացմանը զուգընթաց՝ նվազում:

Ատենախոսության երկրորդ գլխում զարգացվել է միջուկ/ծածկույթ կոլոիդային քվանտային կետում լույսի ռեզոնանսային ռամանյան ցրման տեսություն՝ հաշվի առնելով հիմնական վիճակում էքսիտոնի փոխազդեցությունը սահմանափակված եւ միջմակերեսային բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների հետ: էքսիտոն-ֆոնոն ֆրյուիլիսյան փոխազդեցության մատրիցային տարրերը հաշվարկելիս հաշվի են առնվել ինչպես խոռոչի հիմնական վիճակի էներգիայի ուղղումը՝ պայմանավորված նանոբյուրեղի միջուկի ոչ գնդաձեւությամբ, այնպես էլ էլեկտրոն-խոռոչ փոխանակային փոխազդեցության ներգործությունը էքսիտոնային հիմնական վիճակի վրա: Հաշ-



Նկար 7. խոռոչի հիմնական վիճակի էներգիական ճեղքի $u(\beta_n)$ անչափ ֆունկցիան սահմանափակման տարբեր պոտենցիալների դեպքում

վի առնելով էքսիտոնի հիմնական վիճակի նուրբ կառուցվածքը՝ հաշվարկվել են լույսի ռամանյան ցրման ուժգնությունը եւ դիֆերենցիալ կտրվածքը ինչպես սահմանափակված, այնպես էլ միջմակերեսային բեւեռային օպտիկական ֆոնոնային մոդերի դեպքում: Ցույց է տրվել, որ նանոբյուրեղի միջուկի էլիպսայնության մեծացումը էականորեն փոխում է ռամանյան ռեզոնանսային սպեկտրային պատկերը՝ ընդգծելով դրա առանցքային նշանակությունը փորձարարական տվյալների վերլուծության համար: Ռամանյան ցրման ֆոնոնային սատելիտների

հաշվարկված հարաբերական ուժգնությունը լավագույնս համընկնում է InP/ZnSe միջուկ/ծածկույթ կոլոիդային քվանտային կետերի համար ստացված փորձարարական տվյալների հետ: **Գլխի ներածությունում** համառոտ վերլուծված է թեմային առնչվող գիտական գրականությունը: **§2.1**-ում տրված են էքսիտոնի էներգիական սպեկտրը եւ ալիքային ֆունկցիաները ուղիղ ճեղքով եւ ցիկլի խաբուսակի կառուցվածքով միջուկ/ծածկույթ կիսահաղորդիչային գնդային եւ էլիպսարդային քվանտային կետերում՝ Լաթինջեր-Կոնի տեսության շրջանակներում՝ ենթադրելով, որ էլեկտրոնի եւ խոռոչի չափային քվանտացման էներգիաները շատ ավելի մեծ են, քան դրանց կոլոնյան փոխազդեցության էներգիան, որն այդ

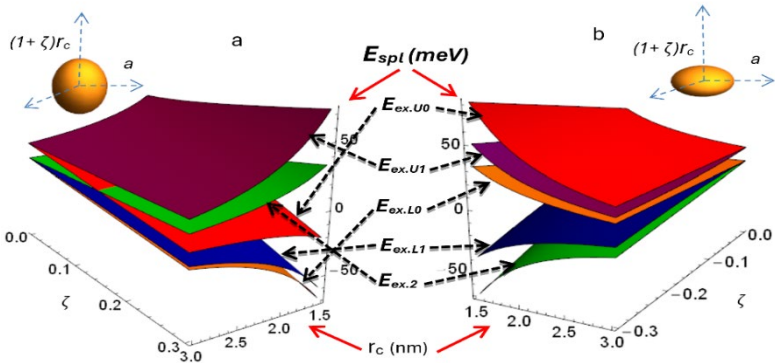
պատճառով անտեսվում է: Հայտնի է, որ խորանարդային ցանցով գնդաձե քվանտային կետում, անվերջ խոր պոտենցիալային փոսի մոտավորությամբ, տեղայնացված էլեկտրոնի հիմնական վիճակի էներգիան կրկնակի այլասերված է ըստ սպինի պրոյեկցիայի, իսկ $J = 3/2$ իմպուլսի մոմենտով խոռոչի հիմնական վիճակը՝ քառակի այլասերված ըստ իր M պրոյեկցիայի ($M = \pm 3/2, \pm 1/2$) [3, 4]: Այս վիճակի ալիքային ֆունկցիաները կարելի է ներկայացնել հետևյալ բանաձևերով՝

$$\psi_h^M(r) = 2 \sum_{l=0,2} R_l(r) \sum_{\mu+m=M} \begin{pmatrix} \frac{3}{2} & l & \frac{3}{2} \\ \mu & m & -M \end{pmatrix} Y_{lm}(\theta, \varphi) |u_\mu\rangle,$$

որտեղ $|u_\mu\rangle$ -ը Γ_8 արժեքական ենթագոտու Բլոխի ֆունկցիաներն են, ($\mu = \pm 3/2, \pm 1/2$), $\begin{pmatrix} \frac{3}{2} & l & \frac{3}{2} \\ \mu & m & -M \end{pmatrix}$ -ը՝ Վիգների $3j$ -սիմվոլները, $R_l(r)$ -ը՝ շառավղային ֆունկցիաները [3,4,5].

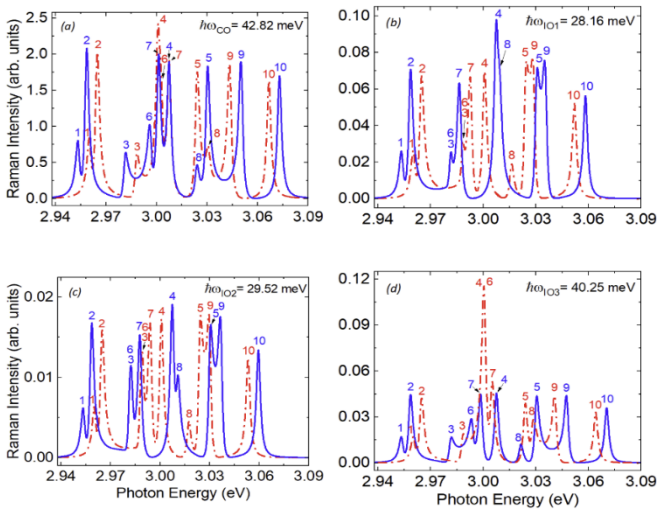
$$R_l(r) = \theta(r_c - r) \frac{C}{r_c^{3/2}} \left[j_l\left(\frac{kr}{r_c}\right) - (-1)^{l/2} \frac{j_0(k)}{j_0(\sqrt{\beta_h}k)} j_l\left(\frac{\sqrt{\beta_h}kr}{r_c}\right) \right],$$

իսկ $\beta_h = m_l/m_h$ պարամետրը թեթեւ եւ ծանր խոռոչների արդյունարար զանգվածների հարաբերությունն է: C հաստատունը որոշվում է նորմավորման պայմանից, իսկ k -ն $j_0(k)j_2(\sqrt{\beta_h}k) + j_2(k)j_0(\sqrt{\beta_h}k) = 0$ հավասարման առաջին արմատն է: Խոռոչի էներգիան տրվում է $E_h = \hbar^2 k^2 / 2m_h r_c^2$ բանաձևերով: Համարելով որ էլիպսարդը քիչ է տարբերվում գնդից, տեսականորեն հաշվարկվել է ԿՔԿ-ի անհամաչափության հետեանքով խոռոչի հիմնական վիճակի էներգիայի տրոհմամբ առաջացած էներգիական ճեղքի մեծությունը, որը ներկայացվել է $\Delta = \zeta E_h u(\beta_h)$ տեսքով, որտեղ ζ -ն էլիպսայնության աստիճանն է, իսկ $u(\beta_h)$ վերլուծականորեն հաշվարկված ֆունկցիայի կախումը β_h -ից ներկայացված է **նկ. 7**-ում, որտեղ հոծ կորով ներկայացված են մեր՝



Նկար 8. InP/ZnSe միջուկ/ծածկույթ ԿՔԿ-ի տրոհման հետեանքով առաջացած էքսիտոնային նուրբ կառուցվածքի էներգիական մակարդակների կախումները միջուկի միջին շառավղից եւ էլիպսայնության ζ պարամետրից՝ (a) ձգված՝ $\zeta > 0$ եւ (b) սեղմված՝ $\zeta < 0$ միջուկների դեպքում: Էքսիտոնային նուրբ կառուցվածքի էներգիական մակարդակները համարակալված են ըստ էքսիտոնի իսպուլսի մոմենտի F պրոյեկցիայի

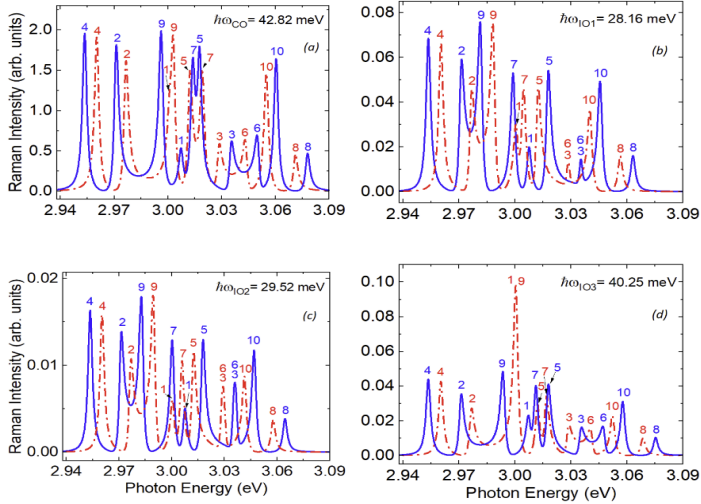
պարաբոլային սահմանափակող պոտենցիալով ստացված արդյունքները այլ մոդելների դեպքում ստացված արդյունքի հետ համեմատությամբ: Յինկի խաբուսակի կառուցվածքով քվանտային կետում էլեկտրոն-խորոչ փոխանակային փոխազդեցությունը էքսիտոնի հիմնական վիճակը տրոհում է երկու այլասերված վիճակների, որոնցից մեկը հնգապատիկ այլասերված է ըստ $F = \sigma + J$ իմպուլսի լրիվ մոմենտի $F = 2$ սեփական արժեքի, իսկ մյուսը՝ եռապատիկ այլասերված ըստ $F = 1$ սեփական արժեքի [6, 7]: Այսպիսով, առաջանում են օպտիկապես ակտիվ եւ պասիվ էքսիտոնային վիճակներ: ԿՔ-ի միջուկի էլիպսայնության եւ էլեկտրոն-խորոչ փոխանակային փոխազդեցության հաշվառման հետեւանքով էքսիտոնի ութակի այլասերված հիմնական վիճակը տրոհվում է հինգ էներգիական մակարդակների: **Ֆ2.2-**ում ներկայացված են օպտիկական ֆոնոնային սեփական մոդերը եւ էքսիտոն-ֆոնոն փոխազդեցության մատրիցային տարրերը ծածկույթով քվանտային կետում: Միջմա-



Նկար 9. Ռամանյան ցրման ուձգնության կախումը ֆոնոնի էներգիայից ֆոնոնային (a) CO, (b) IO1, (c) IO2 եւ (d) IO3 մոդերի համար միջուկ/ծածկույթ InP/ZnSe ԿՔԿ-ում 4 Կ ջերմաստիճանում, $r_c = 2$ նմ ($r_s = 2.9$ նմ) շառավղով ձգված միջուկի դեպքում: Պիկերի 1, 2, 3, 4, 5 եւ 6, 7, 8, 9, 10 համարակալումները համապատասխանում են մուտքային եւ ելքային ռեզոնանսներին (համապատասխանաբար Ex_1^b , Ex_1^c , Ex_0^d , Ex_2 , Ex_1^d էներգիաներով էքսիտոնային մակարդակներին): Յոժ կապույտ կորերը համապատասխանում են ձգված միջուկի էլիպսայնության $\zeta = 0.28$ արժեքին, իսկ կետ-գծիկային կորերը՝ էլիպսայնության $\zeta = 0.21$ արժեքին: Յաշվարկներում օգտագործված է $\Gamma_{\sigma M} = 3$ մԷԿ արժեքը

կերելության օպտիկական ֆոնոնի հաճախության վրա քվանտային կետերի էլիպսայնության ազդեցության տեսական ուսումնասիրությունները եւ դրանց չափերից կախման փորձնական տվյալները ցույց են տալիս, որ գնդաձեւ եւ խիստ ձգված ԿՔԿ-երում ֆոնոնային սպեկտրները մոտավորապես նույն հաճախային տիրույթում են եւ, հետեւաբար, ԿՔԿ ձեւի ազդեցությունը ֆոնոնային սպեկտրի վրա կարելի է անտեսել [8, 9]: Ստացվել են վերլուծական արտահայտություններ էքսիտոնի հիմնա-

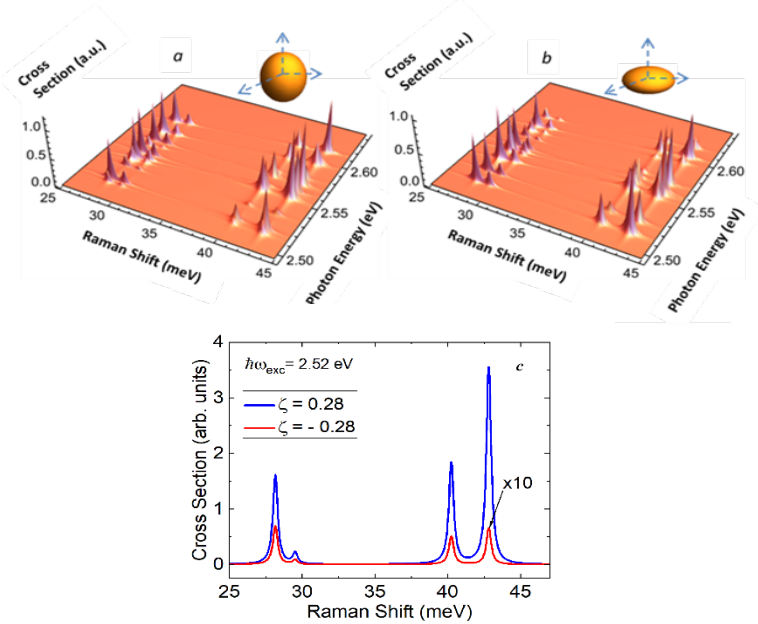
կան վիճակի նուրբ կառուցվածքում ֆոնոնային տարրեր մոդերի հետ փոխազդեցության հետեւանքով անցումների մատրիցային տարրերի համար՝ հաշվի առնելով ֆոնոնային սահմանափակության երեսույթը: Ստացված արդյունները կարող են օգտագործվել ցինկի խաբուսակի կառուցվածքով տարրեր, ոչ գնդաձեւ ԿՔԿ-երի դեպքում: **§2.3**-ում ներկայացված է լույսի ռեզոնանսային ռամանյան էքսիտոնային ցրման ուժգնության հաշվարկը՝ դիտարկելով անցումները էքսիտոնի հիմնական վիճակի նուրբ



Նկար 10. Ռամանյան ցրման ուժգնության կախումը ֆոտոնի էներգիայից ֆոնոնային (a) CO, (b) IO1, (c) IO2 եւ (d) IO3 մոդերի համար միջուկ/ծածկույթ InP/ZnSe ԿՔԿ-ում 4 4 ջերմաստիճանում. $r_c = 2$ նմ $r_s = 2.9$ նմ շառավղով ձգված միջուկի դեպքում: Պիկերի 4, 2, 1, 5, 3 եւ 9, 7, 6, 10, 8 համարակալումները համապատասխանում են մուտքային եւ ելքային ռեզոնանսներին (համապատասխանաբար Ex_2 , Ex_1^L, Ex_0^L , Ex_1^U , Ex_0^U էներգիաներով էքսիտոնային մակարդակներին): Հոծ (կապույտ) կորերը համապատասխանում են ձգված միջուկի էլիպսայնության $\zeta = -0.28$ արժեքին, իսկ կետ-գծիկային կորերը՝ էլիպսայնության $\zeta = -0.21$ արժեքին: Հաշվարկներում օգտագործված է $\Gamma_{\sigma M} = 3$ մԷՎ արժեքը

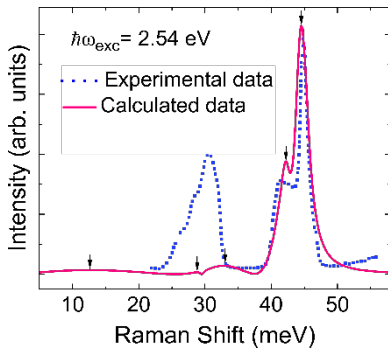
կառուցվածքի մակարդակների միջեւ: Մեկֆոնոնային ռեզոնանսային ռամանյան ցրման հավանականության հաշվարկներում ենթադրվում է, որ էլիպսարդային միջուկով ԿՔԿ-ում ֆոտոնի կլանմամբ հիմնական վիճակում առաջացած էքսիտոնը՝ փոխազդելով նանկառուցվածքում առկա սահմանափակված կամ միջմակերեսության ֆոնոնային մոդի հետ, անցնում է հիմնական վիճակի նուրբ կառուցվածքի մեկ այլ մակարդակ եւ այնուհետեւ վերամիավորվում՝ առաքելով ֆոտոն: Այս պրոցեսի դեպքում տեսական հաշվարկմամբ ստացվել է ռեզոնանսային ռամանյան ցրման հավանականության լայնույթի վերլուծական արտահայտություն, որը հնարավորություն է տալիս հաշվարկելու ինչպես ռամանյան ցրման ուժգնությունը, այնպես էլ ցրման միավոր մարմնային անկյանը բաժին ընկնող դիֆերենցիալ կտրվածքը: Քանի որ

փորձարարական ուսումնասիրություններում քվանտային կետերի անսամբլում բաշխումն ըստ կետերի չափերի եւ ձեւի համասեռ չէ, առաջանում է ռամանյան ցրման սպեկտրի անհամասեռ լայնացում, եւ սպեկտրի ընդհանուր տեսքը ստանալու համար ռամանյան ցրման ուժգնության եւ դիֆերենցիալ կտրվածքի արտահատությունները միջինացվում են ըստ ԿՔԿ-երի չափերի բաշխման: **ՖՁ.4**-ում նախորդ բաժիններում կատարված տեսական հաշվարկների կարելությունը ընդգծելու համար կատարվել է թվային հաշվարկ InP/ZnSe միջուկ/ծածկույթ ԿՔԿ-ի համար, որը տեղակայված է ոչ բեւեռային միջավայրում: Հաշվի է առնվել, որ երբ ԿՔԿ-ի միջուկի շառավիղը փոքր է,



Նկար 11. Ռամանյան ցրման արդյունարար կտրվածքի կախումները ռամանյան շեղումից եւ ընկնող ֆոտոնի էներգիայից՝ (a) սեղմված, (b) ձգված էլիպսարդային միջուկով միջուկ/ծածկույթ ԿՔԿ-ում: Ռամանյան շեղման կախումն արդյունարար կտրվածքից էքսիտոնի 2.52 էՎ էներգիայի դեպքում (c): Հաշվարկներում օգտագործվել են պարամետրերի հետևյալ արժեքները. $T = 4$ Կ, $r_c = 2.3$ նմ, $r_s = 2.5$ նմ, $|\zeta| = 0.28$, $\Gamma_{\sigma M} = 3$ մԷՎ

ապա նշված կառուցվածքի դեպքում՝ էլեկտրոնը՝ ի տարբերություն խոռոչի, կարող է ներթափանցել ծածկույթի տիրույթ, երկու նյութերի հաղորդականության գոտիների փոքր փոխձածկման, ինչպես նաեւ էլեկտրոնի փոքր արդյունարար զանգվածի պատճառով: Թվայնորեն հաշվարկվել են քվանտային կետի ոչ գնդաձեւության եւ փոխանակային փոխազդեցության հաշվառմամբ էքսիտոնի հիմնական վիճակի ութապատիկ մուլտիպլետի տրոհման հինգ էներգիաները՝ կախված InP միջուկի միջին շառավիղից եւ ζ էլիպսայնության պարամետրից (**Նկ. 8**): **Նկ. 8.a**-ից երեւում է, որ սեղմված միջուկի դեպքում էքսիտոնի նուրբ կառուցվածքը ցուցադրում է Ex_2 եւ Ex_0^U մակարդակների վերադասավորում՝ կախված ζ -ի արժեքից: **Նկ. 8**-ում



Նկար 12. *InP/ZnSe* միջուկ/ծակույթով ԿԲԿ-ի փորձում չափված (կետերով կոր) և հաշվարկված (հոծ կոր) ռամանյան ցրման սպեկտրները 4 Կ ջերմաստիճանում, միջուկի միջին շառավիղը՝ 2.9 նմ: Ընկնող ֆոտոնի էներգիան՝ 2.54 էՎ է: Սլաքներով նշված են հինգ ռամանյան շեղումների հաճախությունները, որոնք համապատասխանում են հինգ ճեղքված էքսիտոնային անցումներին (**Նկ. 8**)

շեղման և ֆոտոնների էներգիայի ֆունկցիա, ներկայացված է **Նկ. 11**-ում (a) $\zeta = 0.28$ և (b) $\zeta = -0.28$ դեպքերում՝ միջուկի ավելի մեծ միջին շառավիղով ($r_c = 2.3$ նմ) *InP/ZnSe* ԿԲԿ-ի համար՝ դրանով իսկ փոքրացնելով ռեզոնանսային ռամանյան ցրման իրականացման համար ֆոտոնների անհրաժեշտ էներգիան: Դիտվում է կրկնակի պիկերի երկու սերիա, մեկը՝ պայմանավորված սահմանափակ օպտիկական (CO) և միջմակերեսային բարձրհաճախային օպտիկական (IO3) ֆոնոնային մոդերով՝ ընկած ռամանյան շեղման 40 ÷ 43 մէՎ տիրույթում, իսկ մյուսը՝ պայմանավորված ցածրհաճախային IO1 և IO2 ֆոնոնային մոդերով՝ ընկած 28 ÷ 30 մէՎ տիրույթում: Յուրաքանչյուր պիկ համապատասխանում է էքսիտոնի հիմնական վիճակի նուրբ կառուցվածքով պայմանավորված կլանումային և առաքումային ռեզոնանսային ցրմանը: Նկ. 11.Ե-ն 2.52 էՎ զրգոման էներգիայի դեպքում ցուցադրում է, որ ռամանյան ցրման կտրվածքը սեղմված էլիպսարդային միջուկի դեպքում զգալիորեն ավելի փոքր է, քան ձգված էլիպսարդի դեպքում: **Նկ. 11.ա**-ի և **11.բ**-ի համեմատությունը ցույց է տալիս, որ միջուկի էլիպսայնության փոփոխությունը (ձգվածից մինչև սեղմված) հանգեցնում է ռեզոնանսային ռամանյան պրոֆիլի կարելուր փոփոխությունների, ինչպես ուժգնության, այնպես էլ դիտվող ռեզոնանսային պիկերի հաճախության առումով: Սա հստակորեն ընդգծում է ռամանյան ռեզոնանսային սպեկտրադիտման մեթոդի զգայնությունը և կարող է մանրամասն տեղեկություններ տալ բաղադրյալ նյութերի և կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքների երկրաչափական առանձնահատկությունների մասին: Ձգված միջուկով ($\zeta = 0.28$) *InP/ZnSe* նանոբյուրեղի ռեզոնանսային ռամանյան ցրման սպեկտրի՝ ռամանյան շեղումից ունեցած կախման մեր ստացած արդյունքները համեմատվել են փորձարարական արդյունքների հետ

ներկայացված էքսիտոնային նուրբ կառուցվածքի էներգիական մակարդակները ζ պարամետրի փոքր արժեքների դեպքում համընկնում են [10] աշխատանքում *InP/ZnSe/ZnS* նանոբյուրեղների համար ստացված էներգիական մակարդակների հետ: Ձգված և սեղմված *InP* միջուկների համար ստացված ռամանյան ցրման ուժգնության կախումները ֆոտոնի էներգիայից պատկերված են **Նկ. 9**-ում և **Նկ. 10**-ում, երբ դիտարկվում է էքսիտոնի փոխազդեցությունը կառուցվածքում առկա ֆոնոնային մոդերի հետ: Ռեզոնանսային ռամանյան ցրման դիֆերենցիալ կտրվածքի հաշվարկված կախումը՝ որպես ռամանյան

[11, 12] եւ, ինչպէս տեսնում ենք, հաճախության տեսական տվյալները լավագոյնս համընկնում են փորձարարական արդյունքների հետ (**նկ. 12**):

Ատենախոսության երրորդ գլուխը նվիրված է բեւեռային միջավայրում տեղակայված գլանային բեւեռային կիսահաղորդչային նանոլարում բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների վրա ցրված էլէկտրոնի շարժունության ուսումնասիրմանն արտաքին էլէկտրական դաշտում: Սպին-ուղեծրային փոխազդեցության հաշվառմամբ ստացվել են էլէկտրոնի շարժունության կախումներն էլէկտրական դաշտի լարվածությունից, էլէկտրոնների գծային կոնցենտրացիայից եւ ջերմաստիճանից: Տույց է տրվել, որ սպին-ուղեծրային փոխազդեցության հաշվառումը հանգեցնում է էլէկտրոնի շարժունության զգալի աճի, ընդ որում աճի արագությունը համեմատաբար մեծ է ցածր ջերմաստիճաններում: **Գլխի ներածությունում** համառոտ վերլուծված է թեմային առնչվող գրականությունը: **§3.1**-ը նվիրված է պինդարմնային նանոլարում էլէկտրոնային վիճակների ներկայացմանը՝ սպին-ուղեծրային փոխազդեցության հաշվառմամբ, ընդ որում ենթադրվում է, որ նանոլարը դիէլէկտրական բեւեռային միջավայրում է և նանոլարի առանցքին ուղղահայաց կիրառված է *F* համասեռ էլէկտրական դաշտ: Այդ դաշտի ստեղծած անհամաչափության հետեւանքով էլէկտրոնները ենթարկվում են Ռաշբայի սպին-ուղեծրային փոխազդեցության: Ենթադրվում է նաեւ էլէկտրոնների վրա ազդող Դրեսելիաուսի սպին-ուղեծրային փոխազդեցության առկայությունը, որն առաջանում է ինվերսային համաչափություն չունեցող բյուրեղային համակարգերում: Այս մոդելի շրջանակներում նանոլարում հաշվարկվել են էլէկտրոնի սեփական ֆունկցիաները եւ սեփական արժեքները [13]: **§3.2**-ը նվիրված է քվազիմիաչափ դեպքում Կուբ-Գրինվուդի բանաձեւով [198] էլէկտրոնի շարժունության հաշվարկին բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների վրա ցրման դեպքում: **§3.3**-ում թվային հաշվարկմամբ ուսումնասիրվել է *n*-տիպի CdSe կիսահաղորդչային քվանտային լարում քիմիական պոտենցիալի կախումը նանոլարի շառավղից, էլէկտրական դաշտի ուժգնությունից, ջերմաստիճանից, ինչպէս նաեւ Ռաշբայի եւ Դրեսելիաուսի հաստատուններից: Այդ արդյունքները այնուհետեւ օգտագործվել են էլէկտրոնի շարժունության՝ վերոնշյալ պարամետրերից կախումներն ուսումնասիրելու համար:

Եզրակացություններ

1. Ֆոնոնային սահմանափակման հաշվառմամբ, անվերջ խոր փոսի մոդելի հիման վրա ուսումնասիրվել է վյուրցիտային կառուցվածքով GaN նանոլարում ձեւավորված պոլարոնի հիմնական բնութագրերի վրա արտաքին էլէկտրական եւ մագնիսական դաշտերի ազդեցությունը: Ստացվել են պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի վերլուծական արտահայտություններ: Տույց է տրվել, որ բարակ նանոլարերի դեպքում պոլարոնի հիմնական բնութագրերում միջմակերելության բեւեռային օպտիկական ֆոնոնները քվազիսահմանափակ ֆոնոնների համեմատ ունեն գերակայող դեր:
2. Ուսումնասիրվել է վյուրցիտային կառուցվածքով նիտրիդային նանոլարի առանցքին ուղղահայաց հաստատուն էլէկտրական դաշտի եւ նանոլարի առանցքով ուղղված համասեռ մագնիսական դաշտի ազդեցությունը պոլարոնի

հիմնական բնութագրերի վրա: Տույց է տրվել, որ նանոլարում քվազիսահմանափակ եւ միջմակերեսության բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների հետ փոխազդեցության արդյունքում ձեւավորված պոլարոնի սեփական էներգիայի եւ արդյունարար զանգվածի վրա նանոլարի առանցքին ուղղահայաց էլեկտրական դաշտն ունի ավելի մեծ ազդեցություն, քան լարի առանցքով ուղղված մագնիսական դաշտը:

3. Իրականացվել է վյուրցիտային նիտրիդային եւ խորանարդային կառուցվածքներով գլանային նանոլարերում պոլարոնի հիմնական բնութագրերի վրա արտաքին էլեկտրական եւ մագնիսական դաշտերի ազդեցության համեմատական վերլուծություն: Տույց է տրվել, որ միջմակերեսության բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների հետ փոխազդեցությամբ ձեւավորված միջմակերեսության պոլարոնի հիմնական պարամետրերի՝ մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից կախումները որակապես համընկնում են խորանարդային կառուցվածքով գլանային քվանտային լարի համար համասեռ մագնիսական դաշտում ստացված արդյունքների հետ:
4. Միջուկ/ծածկույթ կոլոիդային քվանտային կետում, միջուկի էլիպսայնության եւ էլեկտրոն-խոռոչ փոխանակային փոխազդեցության հաշվառմամբ ուսումնասիրվել է լույսի էքսիտոնային ռամանյան ցրումը՝ միջնորդված ֆոնոնային սահմանափակվածության հաշվառմամբ ձեւավորված ֆոնոնային մոդերով: Տույց է տրվել, որ միջուկի էլիպսայնության եւ էլեկտրոն-խոռոչ փոխանակային փոխազդեցության հետեւանքով էքսիտոնի հիմնական վիճակի ութակի այլասերված վիճակում ձեւավորված հնգամակարդակ նուրբ կառուցվածքի հաշվառմամբ եւ բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների մասնակցությամբ լույսի ռեզոնանսային ռամանյան ցրման դիֆերենցիալ կտրվածքում սահմանափակված օպտիկական ֆոնոնային մոդերը միջմակերեսության օպտիկական մոդերի համեմատությամբ ունեն գերակայող ներդրում:
5. Ուսումնասիրվել են լույսի ռեզոնանսային էքսիտոնային ռամանյան ցրման ուժգնության սպեկտրային կախումներն ընկնող եւ ցրվող ֆոտոնների էներգիայից InP/ZnSe կոլոիդային քվանտային կետում: Ուժգնության սպեկտրային կորերը ցույց են տալիս ցրման ուժգնության ուժեղ կախում միջուկի էլիպսայնությունից՝ հիմնականում արտացոլելով էքսիտոնի նուրբ կառուցվածքի անմիջական կապը միջուկի երկրաչափական բնութագրերի հետ:
6. Ուսումնասիրվել է ռեզոնանսային ռամանյան ցրման սթոքսյան շեղումը InP/ZnSe կոլոիդային քվանտային կետում՝ պայմանավորված էքսիտոնի նուրբ կառուցվածքով: Տույց է տրվել, որ այն մեծանում է միջուկի շառավղի նվազման դեպքում եւ հետեւանք է կոլոիդային քվանտային կետի էլիպսայնության եւ էլեկտրոն-խոռոչ փոխանակային փոխազդեցության ուժեղացման: Տույց է տրվել, որ ռամանյան ցրման սթոքսյան շեղման հաշվարկված արժեքները դիտված կոլոիդային քվանտային կետի դեպքում լավագույնս համընկնում են փորձարարական արդյունքների հետ եւ ըստ լայնույթի, եւ ըստ ֆոտոնի էներգիայի:

7. Կուբո-Գրինվուդի տեսության շրջանակներում ուսումնասիրվել է արտաքին էլեկտրական դաշտում բեւեռային նանոլարում էլեկտրոնների շարժունության վրա սպին-ուղեծրային փոխազդեցության ներգործությունը: Շարժունությունը ուսումնասիրվել է, հաշվի առնելով այն փաստը, որ սենյակային ջերմաստիճաններում գերակայում է էլեկտրոնների ցրումը բեւեռային օպտիկական ֆոնոնների վրա: Ցույց է տրվել, որ նանոլարում սպին-ուղեծրային փոխազդեցության հաշվառմամբ էլեկտրոնների շարժունությունը զգալի աճում է ջերմաստիճանի բարձրացման եւ զգալի նվազում՝ էլեկտրոնների գծային կոնցենտրացիայի մեծացմանը զուգընթաց:

Հղված գրականություն

1. L. Zhang, J.-j. Shi, T. Tansley, Polar vibration spectra of interface optical phonons and electron-interface optical phonon interactions in a wurtzite GaN-AlN nanowire, *Physical Review B* **71**, 245324 (2005).
2. L. Zhang, J.-J. Shi, Polar oscillation and dispersion properties of quasi-confined optical phonon modes in a wurtzite GaN/Al_xGa_{1-x}N nanowire, *Applied surface Science* **252**, 7815–7822 (2006).
3. J. M. Luttinger, Quantum theory of cyclotron resonance in semiconductors: general theory, *Physical Review* **102**, 1030 (1956).
4. A. L. Efros, Luminescence polarization of CdSe microcrystals, *Physical Review B* **46**, 7448 (1992).
5. A. L. Efros, A. V. Rodina, Band-edge absorption and luminescence of nonspherical nanometer-size crystals, *Physical Review B* **47**, 10005 (1993).
6. A. V. Rodina, A. L. Efros, Radiative recombination from dark excitons in nanocrystals: activation mechanisms and polarization properties, *Physical Review B* **93**, 155427 (2016).
7. T. Takagahara, Theory of exciton doublet structures and polarization relaxation in single quantum dots, *Physical Review B* **62**, 16840 (2000).
8. F. Comas, C. Trallero-Giner, N. Studart, G. Marques, Interface optical phonons in spheroidal dots: Raman selection rules, *Physical Review B* **65**, 073303 (2002).
9. V. Dzhegani, Y. M. Azhniuk, A. Milekhin, D. Zahn, Vibrational spectroscopy of compound semiconductor nanocrystals, *Journal of Physics D: Applied Physics* **51**, 503001 (2018).
10. E. Prin, C. Xia, Y.-H. Won, E. Jang, S. V. Goupalov, P. Tamarat, B. Lounis, Revealing the band-edge exciton fine structure of single InP nanocrystals, *Nano Letters* **23**, 6067–6072 (2023).
11. A. Brodu, M. V. Ballottin, J. Buhot, E. J. Van Harten, D. Dupont, A. La Porta, P. T. Prins, M. D. Tessier, M. A. Versteegh, V. Zwiller, et al., Exciton fine structure and lattice dynamics in InP/ZnSe core/shell quantum dots, *ACS Photonics* **5**, 3353–3362 (2018).
12. P. Cavanaugh, I. Jen-La Plante, C. Ippen, R. Ma, D. F. Kelley, A. M. Kelley, Resonance raman study of shell morphology in InP/ZnSe/ZnS core/shell/shell nanocrystals, *The Journal of Physical Chemistry C* **125**, 10549–10557 (2021).
13. A. Vartanian, T. Ghukasyan, A. Asatryan, K. Vardanyan, 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**, 207287 (2022).

14. R. Kotlyar, B. Obradovic, P. Matagne, M. Stettler, M. Giles, Assessment of room-temperature phonon-limited mobility in gated silicon nanowires, *Applied Physics Letters* **84**, 5270–5272 (2004).

Ատենախոսության թեմայով հրապարակումներ

1. L. Asatryan, A. H. Movsisyan, A. L. Vartanian, External electric and magnetic field effects on the polaron in a wurtzite nitride nanowire embedded in a nonpolar matrix, *The European Physical Journal B* **94**, 1–8 (2021),
2. V. Mughnetsyan, A. Movsisyan, A. Kirakosyan, Electron-hole interaction in cylindrical quantum dots, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* **144**, 115366 (2022),
3. V. Mughnetsyan, A. Manaselyan, A. Movsisyan, and A. Kirakosyan, Effect of two-dimensional non-local screening on characteristics of transition metal dichalcogenide monolayers, *Semiconductor Science and Technology* **39**, 045016 (2024),
4. А. Мовсисян, Влияние спин-орбитального взаимодействия на подвижность электрона в нанопроволоке при рассеянии на полярных оптических фононах, Доклады НАН РА, **124**, 25-32 (2024):
5. A. Asatryan, A. Movsisyan, S. Avetisyan, T. Hayriyan, A. Vartanian, First-order Raman spectra induced by the Fröhlich excitation-lattice interaction in a non-spherical core/shell nanocrystals. 11th International Symposium on Optics and its Applications (OPTICS11), July 11-15, 2023, Yerevan-Ashtarak, Armenia, p.95.
6. A. Asatryan, A. Movsisyan, L. Vardanyan, A. Vartanian, Exciton Resonant Raman Scattering in Colloidal Quantum Dots: The Role of the Fröhlich-Type Interaction. 22nd International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 22), August 14-18, 2023, Münster, Germany, p.177.

ASHOT MOVSISYAN

STUDY OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FIELDS ON THE QUASI-PARTICLE STATES IN NANOSTRUCTURES CONSIDERING THE INTERACTION WITH THE PHONON

SYSTEM

CONCLUSION

1. Based on the phonon confinement model, the influence of external electric and magnetic fields on the main characteristics of a polaron formed in anGaN nanowire a wurtzite structure has been studied. Analytical expressions for the intrinsic energy and effective mass of the polaron are obtained. It is shown that in the case of thin nanowires, intersurface polar optical phonons play a dominant role in the main characteristics of the polaron compared to quasi-confined phonons.
2. The influence of a constant electric field applied perpendicular to the axis of wurtzite nitride nanowire and a uniform magnetic field applied in the direction of the

nanowire axis on the main characteristics of the polaron was studied. It is shown that the electric field applied perpendicular to the nanowire axis has a greater influence than the magnetic field applied along the nanowire axis on the intrinsic energy and effective mass of the polaron formed as a result of interaction contained and interface polar optical phonons.

3. A comparative analysis of the influence of external electric and magnetic fields on the main characteristics of the polaron in cylindrical nanowires with wurtzite nitride and a cubic structure was carried out. It is shown that the dependence of the main parameters of the interface polaron formed due to interaction with intersurface polar optical phonons on the magnetic field induction qualitatively coincides with the results obtained in a uniform magnetic field for cylindrical quantum wire with a cubic structure.
4. In a colloidal core/shell quantum dot, taking into account the ellipticity of the core and the electron-hole exchange interaction, excitonic Raman scattering of light with phonon modes formed taking into account indirect phonon confinement was studied. It is shown that limited optical phonon modes in the differential cross section of resonant Raman scattering of light with the participation of polar optical phonons have a dominant contribution compared to intersurface optical modes.
5. The spectral dependences of the intensity of resonant exciton Raman scattering on the energy of incident and scattered photons in a InP/ZnSe colloidal quantum dot have been studied. The spectral dependences of the intensity show a strong dependence of the scattering intensity on the ellipticity of the nucleus, reflecting mainly the direct connection of the fine structure of the exciton with geometric characteristics of the nucleus.
6. The Stokes shift of resonant Raman scattering in an InP/ZnSe colloidal quantum dot, caused by the fine structure of excitons, was studied. It is shown that it increases with decreasing radius of the nucleus and is a consequence of the ellipticity of the colloidal quantum dot and the strengthening of the electron-hole exchange interaction. It is shown that the calculated values of the Stokes shift Raman scattering for the observed colloidal quantum dot are in best agreement with the experimental results in both photon width and energy.
7. Within the framework of the Kubo-Greenwood theory, the influence of spin orbit interaction on the mobility was studied taking into account the fact that at room temperatures electron scattering is dominated by polar optical phonons. It is shown that electron mobility increases significantly with increasing temperature and decreases significantly with increasing linear electron concentration

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ПОЛЕЙ НА КВАЗИЧАСТИЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ФОНОННОЙ СИСТЕМОЙ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе модели фононного ограничения исследовано влияние внешних электрических и магнитных полей на основные характеристики полярона, образующегося в нанопроволке GaN со структурой вюрцита. Получены аналитические выражения собственной энергии и эффективной массы полярона. Показано, что в случае тонких нанопроволок в основных характеристиках полярона межповерхностные полерные оптические фононы играют доминирующую роль по сравнению с квазиорганиченными фононами.
2. Исследовано влияние постоянного электрического поля, приложенного перпендикулярно оси вюрцит-нитридной нанопроволоки, и однородного магнитного поля, приложенного вдоль оси нанопроволоки, на основные характеристики полярона. Показано, что электрическое поле оказывает большее влияние, чем магнитное поле на собственную энергию и эффективную массу полярона, образованного в результате взаимодействия с квази-ограниченными и межповерхностными полярными оптическими фононами.
3. Проведен сравнительный анализ влияния внешних электрических и магнитных полей на основные характеристики полярона в цилиндрических с вюрцит-нитридной и кубической структурами. Показано, что зависимость основных параметров межповерхностного полярона, образованного при взаимодействии с межповерхностными полярными оптическими фононами, от индукции магнитного поля качественно совпадает с результатами, полученными в однородном магнитном поле для цилиндрической квантовой проволоки с кубической структурой.
4. В коллоидной квантовой точке ядро/покрытие изучено экситонное комбинационное рассеяние света, опосредованное ограниченными фоннными модами. Показано, что в дифференциальном сечении рамановского рассеяния ограниченные оптические фоннные моды, (формированные с учетом пятиуровневой тонкой структуры вследствие восьмикратного вырожденного из-за эллиптичности ядра и электро-дырочного обменного взаимодействия) имеют превалирующий вклад по сравнению с межповерхностными оптическими модами.

5. Исследованы спектральные зависимости интенсивности резонансного экситонного комбинационного рассеяния света от энергии падающих и рассеянных фотонов в коллоидной квантовой точке InP/ZnSe. Спектральные зависимости интенсивности показывают сильную зависимость интенсивности рассеяния от эллиптичности ядра, отражающую главным образом непосредственную связь тонкой структуры экситона с геометрическими характеристиками ядра.
6. Изучено стоксовское смещение резонансного комбинационного рассеяния света в коллоидной квантовой точке InP/ZnSe, обусловленное тонкой структурой экситонов. Показано, что оно увеличивается с уменьшением радиуса ядра и является следствием эллиптичности коллоидной квантовой точки и лучше всего согласуется с экспериментальными результатами как для амплитуды, так и для энергии фотонов.
7. В рамках теории Кубо-Гринвуда исследовано влияние спин-орбитального взаимодействия на подвижность электронов в полярной нанопроволоке во внешнем электрическом поле. Подвижность изучена с учетом того, что при комнатных температурах в рассеянии электронов преобладают полярные оптические фононы. Показано, что подвижность электронов существенно возрастает с ростом температуры и существенно снижается с увеличением линейной концентрации электронов.

