

**Մարգարյան Նարեկ Բարիկի  
ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՍՏԱՏՈՒՄ**

Դիէլեկտրիկական սահմանափակմամբ կիսահաղորդչային  
նանոկառուցվածքներում կուեկտիվ վիճակների և օպտիկական

երևոյթների հետազոտումը

**Ա.04.10 – «Կիսահաղորդչների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական  
աստիճանի հայցման ատենախոսության**

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2016

---

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

**Маргарян Нарек Бабикович**

**Исследование коллективных состояний и оптических явлений в  
полупроводниковыхnanoструктурах с диэлектрическим  
ограничением**

**Ա Յ Տ Օ Ր Ե Փ Ե Ր Ա Տ**

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

ԵՐԵՎԱՆ – 2016

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում

Գիտական դեկավար՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, դոցենտ

Կ.Հ.Ահարոնյան, ՀԱՊՀ

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր

Հ.Ա.Սարգսյան, ՀՈՀ

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու,

Մ.Գ.Բարսեղյան, ԵՊՀ

Առաջատար կազմակերպություն՝

ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և Էլեկտրոնիկայի

ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2016թ. դեկտեմբերի 24-ին, ժամը 12<sup>00</sup>-ին Երևանի պետական համալսարանի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցեն՝ 0025, Երևան, Ա. Մանուկյան 1

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրը ցրված է 2016թ. նոյեմբերի 23-ին:

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար՝

Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր

Կ.Մ.Ղամբարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, доцент

К.Г. Агаронян, АНПУ

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор

Ա.Ա. Саркисян, РАУ

канд. физ.-мат. наук

Մ.Գ. Барсегян, ЕГУ

Ведущая организация:

Институт радиофизики и электроники

НАН РА

Защита диссертации состоится 24-го декабря 2016г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании специализированного совета 049 по физике при Ереванском государственном университете. Адрес: 0025, Ереван, ул. А. Манукяна 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 23-го ноября 2016г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

доктор физ.-мат. наук, профессор  
Կ.Մ.Ղամբարյան

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՆԿԱՐԱԳԻՐԸ

### ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅԱՆ ԱՐԴԻԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Կիսահաղորդչային նանոկառուցվածքները, շնորհիվ իրենց բացառիկ ֆիզիկական հատկությունների և աննախադեպ կիրառական նշանակության, ներկայում ինտենսիվ հետազոտությունների և համընդիանուր ուշադրության առարկա են [1,2]: Նրանց առանձնահատուկ է ներքին պոտենցիալ, որը ոչ միայն խթանում է հիմնարար գիտության զարգացումը, այլև հնարավոր է դարձնում նախապես տրված բնութագրերով նոր նանոչափային համակարգերի գոյությունը:

Նանոկառուցվածքների աճեցման ներկայումս գործող մեթոդները թույլ են տալիս ստեղծել անսովոր դասի հետերզեն համակարգեր, որոնք ունեն մեծ պահանջարկ և կիրառություն: Նրանցում միջավայրերի բաժանման հետերոսահմանին առկա է նյութական պարամետրերի (դիէլեկտրիկական թափանցելիություն, լիցքակիրների (ԼԿ) արդյունարար զանգված, էներգիական արգելված գոտի) արժեքների թոփքային փոփոխություն: Դրանց թվին են դասվում ԼԿ-ի միջև կուլոնյան փոխազդեցության դիէլեկտրիկական ուժեղացմամբ օժտված նանոհամակարգերը (դիէլեկտրիկական քվանտային կառուցվածքներ (ԴՔԿ)) [3-5]:

Կիսահաղորդչային ԴՔԿ-ներում կուլոնյան փոխազդեցության ուժեղացումը տեղի ունի արդյունարար դիէլեկտրական թափանցելիության փոփոխության հետևանքով, ինչը պայմանավորված է ԼԿ-ի արգելքային տիրույթ էլեկտրական դաշտի ներթափանցմամբ և վերաբաշխմամբ: Դա բերում է քվանտային սահմանափակման (ՔՍ) երևույթի հետ մեկտեղված ԼԿ-ի լրացուցիչ տարածական տեղայնացման, որն առավել հայտնի է որպես դիէլեկտրիկական սահմանափակման (ԴՍ) երևույթը բնորոշմամբ [3]: Արդյունքում, կիսահաղորդչային ԴՔԿ-ի չափերից ու ծևից կանված՝ լիցքային արտապատկերման պոտենցիալ կտրուկ մեծացնում է ԼԿ-ի կապված զույգերի փոխազդեցության արդյունարար պոտենցիալը [6, 7]:

Նախօրոք ընտրելով ԴՔԿ-ում կիսահաղորդչային նանոնմուշի և դրան շրջապատող միջավայրի դիէլեկտրիկական բնութագրերը՝ կարենի է լայն սահմաններում փոփոխել կուլոնյան էներգիական մակարդակների սպեկտրային բնույթը: Դա արտահայտվում է միջգոտիական անցումների հաճախության և օսցիլյատորի ուժի լրացուցիչ աճով (դիէլեկտրիկական կապույտ շեղում)՝ միամասնիկային էներգիական մակարդակների և օպտիկական կլանման եզրի հիմնական տեղաշարժի (քվանտային չափային կապույտ շեղում) ֆոնի վրա: Մեծացնելով միաժամանակ կուլոնյան կապված զույգի էներգիան (դիէլեկտրիկական կարմիր շեղում)՝ տվյալ երևույթը մասամբ կոմպենսացնում է միջգոտիական հաճախության

ընդհանուր կապուտ շեղումը օպտիկական ճեղքի եզրին:

Փաստորեն, ՔՍ և ԴՍ երևոյթների համատեղ առկայությամբ քվանտային վիճակների էներգիական քանակական հաշվենշիող հիմնականում որոշվում է ԴՔԿ-ի ակտիվ տիրույթի մեզոսկոպիկ չափերի, ինչպես նաև ակտիվ և արգելքային միջավայրերի դիէլեկտրիկական թափանցելությունների հարաբերակցության կրեյսացիայով։ Արդյունքում, ԴՔԿ-ի օպտիկական հատկությունները հնարավոր է կառավարել ֆիզիկական պրոցեսներին մասնակցող կուլոնյան գույգերի դիէլեկտրականապես ուժեղացված կուլոնյան փոխազդեցության ինտենսիվության փոփոխությամբ։ Դա թույլ է տալիս ընդունված “գոտիհական ճարտարագիտությանը” գուգահեռ իրականացնել նաև այսպես կոչված “կուլոնյան փոխազդեցության ճարտարագիտություն”[4]:

Ներկայում նանոկառուցվածքների ֆիզիկայում ծևավերվել է տպավորիչ փորձարարական և տեսական հենք՝ ԴՍ երևոյթի տարբեր ֆիզիկական դրսորումների ուսումնասիրության վերաբերյալ։ Արդեն իսկ առկա են ԴՔԿ-ներ քվանտային փոսերի (ԴՔՓ), [8,9], քվանտային լարերի (ԴՔԼ) [10,11] և քվանտային կետերի [12] հենքի վրա:

Ինչպես փորձնականորեն ցույց է տրված այդ աշխատանքներում, ՔՍ և ԴՍ երևոյթների համակցված ազդեցությունն իրենից ներկայացնում է նոր՝ իրավես արդյունավետ միջոց կիսահղորդչային ԴՔԿ-ի ֆիզիկական և, մասնավորապես, օպտիկական հատկությունների կառավարման գործում։ Այդ մասին են վկայում վերոնշյալ աշխատանքներում ստացված էքսիտոնի հիմնական վիճակի կապի էներգիայի և օպտիկական անցումների օսցիյատորի ուժի՝ կախված նմուշի չափերից էական աճերը [13-15], էլեկտրամագնիսական ալիքի երկու փոխուղղահայաց քևեռացումների դեպքում էքսիտոնների օսցիյատորի ուժի մեծ անհզուտրոպությունը [16], շտարլյան անհամաշափ շեղման ի հայտ գալը էքսիտոն-պոլարիտոնային ռեզոնանսում [17]:

ԴՔԿ-ների ուսումնասիրությունն արդիական է ոչ միայն հիմնարար հետազոտությունների տեսանկյունից, այլ պայմանավորված է նաև կիսահղորդչային օպտոէլեկտրոնիկայում նրանց կիրառության հեռանկարով։ Այդ առումով, Ա.Բ. ընտանիքին պատկանող ներ էներգիական գոտիներով կիսահղորդչային նյութերի (կապարի սուլֆիդ, սելենիդ և թելլուրիդ, ինչպես նաև նրանց եռակի և քառակի մոդիֆիկացիաներ) հենքով նանոկառուցվածքներն առանձնանում են որպես խոստումնայից կիսահղորդչային ԴՔԿ-ներ [8,12,15,18]:

Կապարի աղերի հենքով կիսահղորդչային սարքերը միշտ ունեցել են լայն գործնական կիրառություն որպես ինֆրակարմիր (ԻԿ) ճառագայթման աղբյուրներ և ընդունիչներ, շերմաստիճանային ծևափոխիչներ,

տենգոտվիշներ, սենսորներ և այլն [18]: Ներկայումս ընդլայնվուած է այդ միացությունների հենքով քվանտային կառուցվածքների կիրառությունը միջին հԿ դիապազոնում աշխատող ճառագայթման լազերներում, որոնցուած տեղի ունեն շեմային հոսանքների մեծության իջեցուած, ինչպես նաև ակտիվ տիրույթի ցերմային դիսփլացիայի բարեւակում:

Այսպիսով, կարեի է վատահրենն եղրակացնել, որ կոլեկտիվ վիճակների և օպտիկական երևույթների տեսական ուսումնասիրությունը ԴՔԿ-ներում հանդիսանուած է կիսահաղորդչային համակարգերի ֆիզիկայի զարգացման ժամանակակից փոփի արդիական խնդիրներից մեկը:

Ներկայացվող ատենախոսական աշխատանքը նվիրված է կիսահաղորդչային ԴՔՓ-ում և ԴՔԼ-ում կոլեկտիվ վիճակների (էքսիտոնային, պլազմոն-ֆոնոնային) և օպտիկական հատկությունների ուսումնասիրությանը:

### ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՆՊԱՏԱԿԸ

1. Դիէլեկտրիկական քվանտային փոսերուած էկրանավորված էքսիտոնային վիճակների, ինչպես նաև պլազմոն-ֆոնոնային կոլեկտիվ տատանումների դիսպերսային հատկությունների ուսումնասիրությունը:
2. Դիէլեկտրիկական քվանտային լարերուած էկրանավորված կուլոնյան փոխագրեցության և էքսիտոնային կապված վիճակների ուսումնասիրությունը:

### ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

1. Երկար Դերայ-Հյուկեյան պոտենցիալի միջոցով “մեկ կողմանի” դիէլեկտրիկական ուժեղացմամբ կիսահաղորդչային ԴՔՓ-ում վերլուծականորեն նկարագրված են էկրանավորված էքսիտոնային կապված վիճակները:
2. Դիէլեկտրիկական միջավայրուած գունվող ՔԼ-ում ստացված է կուլոնյան էկրանավորված փոխագրեցության եռաչափ պոտենցիալի վերլուծական տեսքը: ԴՍ երևույթի հաշվառմամբ վերլուծականորեն նկարագրված են քվազիմիաչափ էկրանավորման փոխագրեցության պոտենցիալը և էկրանավորման երկարությունը:
3. Ներկայացված է էկրանավորված էքսիտոնային կապված վիճակների կապի էներգիայի հաշվման վերլուծական մոդել՝ PbSe/Մեզոնակոտկեն սիլիցիում (SBA-15) ԴՔԼ- համար:
4. Ուսումնասիրվել են EuS/PbS/EuS ԴՔՓ-ում պլազմոն-ֆոնոնային տատանումների դիսպերսային հատկությունները՝ ԴՍ հաշվառմամբ:

## ԳԻՏԱԿԱՆ ԵՎ ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ԱՐԺԵՔԸ

Աստենախոսությունում ստացված արդյունքները՝ ԴՔԿ-ներում էներգիական և օպտիկական բնութագրերի համար նոր տեսական մոդելների մշակման ասաբարեզում ինքնուրույն գիտական հետաքրքրության հետ մեկտեղ, կարևորվում են նաև  $InSb/Al_xIn_{1-x}Sb$ ,  $EuS/PbS/EuS$  ԴՔՓ-ում,  $PbSe/մեզոնդակուտկեն$  սիլիցիում ԴՔԼ-ում և նմանատիպ դիէլեկտրիկական նանոկառուցվածքներում նոր գիտափորձերի խթանման տեսանկյունից:

Դրանք կարող են օգտակար լինել նաև ծծմբի աղերի հենքով կիսահղողության սարքերի՝ միջին հԿ և տերահերցային հաճախային տիրույթներում աշխատող լազերների, ջերմաէլեկտրական փոխակերպիչների, տենգոտվիչների նախագծման և պատրաստման ընթացքում:

## ՊԱՇՏՊԱՆՈՒԹՅԱՆ ՆԵՐԿԱՅԱՑՎՈՂ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԴՐՈՒՅԹՆԵՐԸ

1. “Մեկ կողմանի” դիէլեկտրիկական ուժեղացմամբ ԴՔՓ-ում էկրանավորված էքսիտոնի հիմնական վիճակի կապի էներգիայի մեծությունը 22 կոնցենտրացիա/ ջերմաստիճան հարաբերության աճի հետ և, միաժամանակ, ԴՔՓ-ի լայնության փորձացմանը զուգընթաց, հագենում է՝ մնալով փորձով չափելի էներգիական տիրույթում (> 2 մէՎ):
2. ԴՔԼ-ում Ք12 էկրանավորման փոխազդեցության պոտենցիալ էքսպոնենտային օրենքով նվազելով և, միաժամանակ, բնութագրվելով սահմանակցող միջավայրերի դիէլեկտրիկական հաստատունների հարաբերությամբ որոշվող Ք12 էկրանավորման երկարությամբ՝ աճում է լարի շառավիղի փորձացմանը զուգընթաց:
3.  $PbSe/մեզոնդակուտկեն$  սիլիցիում SBA-15 դիէլեկտրիկական քվանտային կառուցվածքներում գրանցվում է էկրանավորված էքսիտոնի հիմնական վիճակի կապի էներգիայի մեծության կտրուկ աճ մինչև  $10\div20$  մէՎ՝  $PbSe$  ծավալային նմուշներում չէկրանավորված էքսիտոնի դեպքում համապատասխան մեծության արժեքի ( $0.9\div1$  մէՎ) համեմատ:
4.  $EuS/PbS/EuS$  ԴՔՓ-ում ալազմոն-ֆոնոնային տատանումների սպեկտրի ստորին պլազմնանման ճյուղի ուժեղ ճնշման երևույթի բացահայտում, կոլեկտիվ տատանումների սպեկտրային կշռի (օսցիյատորի ուժի)՝ դեպի վերին ֆոնոնանման ճյուղ և միամասնիկային գրգռումների կոնտինուամ փոխանցման միջոցով:

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՓՈՐՁԱՀԱՎԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Աստենախոսության հիմնական արդյունքները քննարկվել են ՀԱՊՀ ֆիզիկայի, ՌՀՀ ընդհանուր ֆիզիկայի և քվանտային նանոկառուցվածքների ամբիոնների սեմինարներում, ինչպես նաև

գեկուցվել են հետևյալ գիտաժողովներում.

- 9-th International Conference “Semiconductor Micro- and Nanoelectronics” (Yerevan, 2013);
- 2-nd International Symposium “Optics and its Applications” (OPTICS-2014) Yerevan - Ashtarak, Armenia September 1-5, 2014.
- 10-th International Conference “Semiconductor Micro- and Nanoelectronics” (Yerevan, 2015);
- 3-rd International Symposium “Optics and its Applications” (OPTICS-2015) Yerevan -Ashtarak, Armenia October 1-5, 2015.
- XI International Symposium on Quantum Theory and Symmetries, Yerevan, Armenia, July 13-18, 2015.
- ՀԱՊՀ տարեկան գիտական կոնֆերանսներ.Երևան, 2012-2015:

### ՀՐԱՊԱՐԱԿՈՒՄՆԵՐԸ

Աստենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրված են 7 գիտական հոդվածներում, որոնց ցուցակը ներկայացված է սեղմագրի վերջում:

### ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԸ

Աստենախոսությունը բարեկացած է ներածությունից, չորս գլխից, եզրակացությունից, հապավումների և գրականության ցանկերից: Աշխատանքի ծավալը 111 էջ է, այն պարունակում է 15 նկար, 2 աղյուսակ և գրականության ցանկ՝ 182 հղումով:

### ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Աստենախոսության ներածությունում հիմնավորվել է հետազոտվող թեմայի արդիականությունը, ձևակերպվել են հետազոտության խնդիրներն ու նպատակը, ներկայացվել են աշխատանքի հիմնական դրույթները, ցուց են տրվել աշխատանքի գիտական նորոյցն ու կիրառական արժեքը:

**Առաջին գլխում** կատարվել է ակնարկային անդրադարձ, նվիրված քվանտային նաև նկառուցվածքներում (կիսահաղորդչային ՔՓ-ում և ՔԼ-ում) կոլեկտիվ վիճակների և օպտիկական երևոյթների հետազոտմանը վերաբերող տեսական աշխատանքներին:

**Երկրորդ գլուխը** նվիրված է կիսահաղորդչային ԴՔՓ-ում կուլոնյան փոխազդեցության քվազիերկաչ էլեկտրոնային գազի կողմից (ՔԶՀ ԷԳ) էլեկտրավոլտման առկայությամբ էրսիտոնային կապված վիճակների և օպտիկական կլանման առանձնահատկությունների տեսական ուսումնասիրությանը:

§ 2.1.-ում ներկայացված է կիսահաղորդչային ԴՔՓ-ում ակտիվ և արգելքային տիրույթների հետերօսահմաններում դիէլեկտրիկական հաստատունների արժեքների ինչպես “երկու կողմանի” ( $\varepsilon_w >> \varepsilon_b = \varepsilon_{b_1} = \varepsilon_{b_2}$ ),

այնպես էլ “մեկ կողմանի” ( $\varepsilon_w \approx \varepsilon_{b1}$ ,  $\varepsilon_w >> \varepsilon_{b2}$ ) հակադրության դեպքերում էկրանավորված կուլոնյան փոխազդեցության պոտենցիալի վերլուծությունը:

§ 2.2.-ում քննարկված են էկրանավորված էքսիտոնային վիճակները “մեկ կողմանի” դիէլեկտրիկական սահմանափակմամբ ԴՔՓ-ում: Ներկայացված են Ք22 էկրանավորված էքսիտոնի հիմնական վիճակի կապի էներգիայի մեծության վերլուծական և թվային արդյունքները՝ մոդելավորված 22 Դեբայ-Հյուկելյան տիպի բանաձևով

$$V_s(\rho) = -\frac{2e^2}{\varepsilon_w} \frac{(\exp(-\rho/\rho_0))}{\rho} \quad (1)$$

տրվող էկրանավորման պոտենցիալով: Այստեղ  $\rho_0$  -ն 22 էկրանավորման շառավիղն է,  $\rho$ -ն ազատ ԼԿ-ի միջն հեռավորությունը: Ինչպես երևում է (1)-ից,  $V_s(\rho)$  -ը զգայի աճ է գրանցել՝ պայմանավորված համակարգի արդյունարար դիէլեկտրական թափանցելիության կրկնակի նվազմամբ:

Դիէլեկտրականապես ուժեղացված էկրանավորված էքսիտոնի հիմնական վիճակի էներգիական մակարդակի դիրքը որոշված է վարիացիոն մեթոդով, որի համար կիրառված է տարածական ուժեղ սահմանափակման  $\alpha_0 > d$  ռեժիմը ( $\alpha_0$ -ն էլեկտրոնի Բորի շառավիղն է,  $d$ -ն՝ ԴՔՓ-ի լայնությունը): Այստեղ վարիացիոն առընչության մինիմալացումից հետո, էկրանավորված էքսիտոնի հիմնական վիճակի  $E_b$  կապի էներգիայի համար ստացված է

$$E_b = \frac{\hbar^2 m_r}{2\mu_\perp a_{scex}^2} \left[ 2 + (2 - q_s a_{scex}) \sqrt{1 + q_s a_{scex}} + \left( \frac{q_s a_{scex}}{2} \right)^2 \right] \left[ \frac{\sqrt{1 + q_s a_{scex}} - 3}{\sqrt{1 + q_s a_{scex}} + 1} \right], \quad (2)$$

արտահայտությունը, որտեղ  $q_s$ -ը 22 էկրանավորման պարամետրն է,  $a_{scex} = a_{ex}/2$ ,  $a_{ex}$ -ը 22 էքսիտոնի Բորի շառավիղն է,  $\mu_\perp$ -ը էքսիտոնի արդյունարար զանգվածն է,  $m_r \sim 1$ :

Ինչպես երևում է, ԴՄ երևույթի հաշվին ուժեղացված Ք22 էկրանավորված էքսիտոնի  $E_b$  -ն գրանցում է էական աճ և սահմանային չէկրանավորված կուլոնյան փոխազդեցության դեպքում ( $q_s \rightarrow 0$ ) ընդունում է  $16R_0$  առավելագույն արժեք, որտեղ  $R_0$  -ն 32 էքսիտոնի Ռիդբերգի էներգիան է:

Սուածարկված տեսական մոդելը թվայնորեն քննարկվել է InSb-ի հենքով մոդուլային լեզիրացմամբ իրական ԴՔՓ-ի դեպքում, որն աճեցվում է դիէլեկտրիկական թափանցելիության բարձր արժեքով (ավելի մեծ քան InSb-ի համանմանը)  $Al_xIn_{1-x}Sb$  կամ  $Al_xGa_{1-x}As$  տակդիր-հարթակների վրա:

Կատարվել է նաև Ք22 էքսիտոնի էկրանավորման  $\rho_0$  շառավիղի և կապի  $E_b$  էներգիայի թվային հաշվարկ՝ 22 խոռություն/ ջերմաստիճան հարաբերության ( $n/T$ ) և ԴՔՓ-ի  $d$  լայնության մեծությունների թույլատրելի համադրումով (Աղյուսակ 1), որի դեպքում 22 Դեբայ-Հյուկելյան տիպի պոտենցիալը տեղի ունի: Ինչպես երևում է,  $n/T$  պարամետրի թույլատրելի

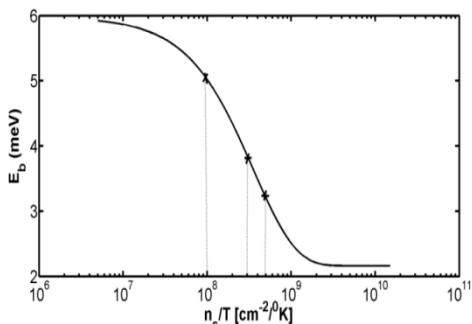
տիրոպահների ընդլայնումը կատարվում է  $d$ -ի նվազմանը զուգընթաց: Մասնավորապես, չափավոր հաստ ԴՔՓ-ի դեպքում, եթե  $d = 10$  նմ և  $n/T = 10^6 \div 10^8$  ամ<sup>-2</sup>/Կ միջակայքում Ք22 ԷԳ-ն լրիվ դրսւորվում է որպես

Աղյուսակ1.1. ՔՓ-ի լայնության  $d = 1.5$  նմ,  $d = 3$  նմ,  $d = 5$  նմ և  $d = 10$  նմ արժեքների հետպերուս  $n_s/T$  պարամետրի թույանական տիրույթները:

d նմ	1.5	3.0	5.0	10.0
n_s / T      μm^-2 / °Կ	10^6-10^12	10^6-4.10^8	10^6-2.10^8	10^6-10^8

չայլասերված գազը: Դրա հետ մեկտեղ,  $d$ -ի, օրինակ, 5 նմ արժեքի դեպքում  $\varphi_{22}$  է-գ-ը շեղվում է չայլասերված բնույթից և արդեն իսկ խիստ նեղ ԴԲՓ-ի (ավելի նեղ, քան  $d = 20$ նմ) և  $n/T > 1.5 \cdot 10^9 \text{ ам}^2/\text{с}$  դեպքում ցուցաբերում է այլասերված գազին լիովին բնորոշ հատկություններ:

Նկ. 1-ում տրված է  $E_b$  կապի էներգիայի գրաֆիկական կախումը  $n_s/T$  պարամետրից՝ աղյուսակ 1-ում  $d$ -ի ամրագրված արժեքների դեպքում: Գրաֆիկական կորի վրա  $n_s/T$  -ի թույլատրված արժեքները նշված են փոքր խաչերով: Ինչպես երևում է, էկրանավորված և դիէլեկտրականապես ուժեղացած էքսիտոնի  $E_b$  կապի էներգիան էականորեն մեծացած է ձավալային նմուշում չէկրանավորված համանման մեծության համեմատ ( $\sim 0.3 \div 0.4$  մէՎ), երբ  $n_s/T$  -ի արժեքները փոքր են  $5 \cdot 10^8 \text{ ам}^2/\text{Կ}$  -ից, իսկ  $d$ -ի արժեքները գերազանցում են 5 նմ-ը: Իր հերթին,  $n_s/T$  -ի  $10^9 \text{ ам}^2/\text{Կ}$ -ից մեծ և  $d = 2$  նմ-ից փոքր արժեքների դեպքում  $E_b$  -ի արժեքները սկսում են հագենալ, բայց դեռևս մնում են փորձով չափելիության տիրույթում ( $> 2$  մէՎ): Դա InSb-ի հենքի վրա պատրաստված ԴՔՓ-ում կարող էնարավորություն ստեղծել



Նվ.1. ԿՐՓ-ում էկրանավորված էքսիլոնի կապի էներգիան  $n/T$  պարամետրից ֆունկցիա՝  $\delta$ -ի ամազգված՝ 10 նմ (ձայն կողմի խաչը), 5 նմ (միջադիր խաչը), 3 նմ (աջ կողմի խաչը) և 1,5 նմ առժենների դեպքում:

ցածր ջերմաստիճաններում դիտարկելու էքսիտոնային երևոյթների հետ կապակցված որոշակի նպատակադրված ֆիզիկական երևոյթներ:

Ինչ վերաբերում է  $n/T$ -ի չափավոր ցածր և բարձր արժեքների միջև անցման տիրույթին՝  $2.10^7 \div 4.10^8 \text{ ам}^{-2}/\text{Կ}$ , ապա այստեղ չայլասերված  $\varphi_{22}$  էֆ-ի դեպքում  $E_b$ -ն աճում է կտրուկ կերպով՝ մեծանալով կրկնակի անգամ՝ ժ-ի 3 նմ-ից փոքր առժեքների դեպքում:

§2.3.-ում ուսումնասիրված է  $\varphi_{22}$  Էկրանավորված էքսիտոնային կլանման սպեկտրը “Երկու կողմանի” դիէլեկտրական սահմանափակմամբ  $\text{EuS/PbS/EuS}$  քվանտային փոսերում: Կիրառված է  $22$  կորոնյան “կտրված” պոտենցիալ մեթոդը [5,7], որի շնորհիվ օպտիկական կլանման գործակցում հաշվարկված է էքսիտոնային ներդրումով պայմանավորված անդամը (էքսիտոնային արտադրիչ): Ցոյց է տրված, որ այստեղ կախված էներգիական պարամետրից տեղի ունեն էքսիտոնային կլանման ինտենսիվության չափավոր տատանումներ: Ստացված է, որ էքսիտոնային կլանման ինտենսիվությունն աճում է  $n/T$  պարամետրի աճին զուգընթաց:

Աշխատանքի երրորդ գիսում քննարկված է կուլոնյան փոխազդեցության էկրանավորման երևոյթն կիսահաղործային  $\varPhi_L$ -ում:

§ 3.1-ում ուսումնասիրված է դիէլեկտրական արգելքային միջավայրում տեղակայված  $R$  շառավիրով  $\varPhi_L$ -ում  $\varPhi_{12}$  էֆ-ի կողմից էկրանավորված կետային լիցքերի փոխազդեցության պոտենցիալի հարցը: Թումաս-Ֆերմիի մեթոդի կիրառմամբ շատանցրով ուղղված  $\varPhi_L$ -ում ստացված է կետային լիցքերի կուլոնյան փոխազդեցության  $32$  պոտենցիալի արտահայտությունը:

Տարածական ուժեղ սահմանափակման ( $\alpha_0 >> R$ ), ինչպես նաև լարի ու արգելքային միջավայրի  $\varepsilon_w$  և  $\varepsilon_b$  դիէլեկտրիկական հաստատունների արժեքների մեծությունների խիստ հակադրության ( $\varepsilon_r = \varepsilon_w / \varepsilon_b >> 1$ ) ռեժիմներում ստացված են  $\Gamma\varPhi_L$ -ում  $\varPhi_{12}$  էկրանավորված փոխազդեցության պոտենցիալի վերլուծական արտահայտություններ: Վերջիններս վերաբերում են լարի առանցքի երկայնքով  $|z| >> R$  ասիմպոտիկ հեռավորություններին համապատասխանող՝ ա) չափավոր փոքր (միջին)՝  $\varepsilon_r(qR)^2 \ln(qR)^{-1} \geq 1$  և բ) բավական փոքր  $\varepsilon_r(qR)^2 \ln(qR)^{-1} << 1$  բնութագրական  $12$  երկարակիքային վեկտորների տիրույթներին:

Այդ դեպքերում  $\Gamma\varPhi_L$ -ում  $\varPhi_{12}$  էկրանավորված փոխազդեցության պոտենցիալը համապատասխանաբար ընդունում է հետևյալ տեսքերը՝

$$\text{ա)} \quad V_s^{QID}(z) = -\frac{e^2}{\varepsilon_w \mathbf{R}} \frac{\mathbf{1}}{\tilde{\mathbf{q}}_s \mathbf{R}} e^{-\tilde{q}_s z}, \quad (3)$$

$$\text{բ)} \quad V_s^{QID}(z) = -\frac{e^2}{\varepsilon_b \sqrt{z^2 + \mathbf{R}^2}}, \quad (4)$$

$$\text{որտեղ } \tilde{q}_S = (1/R) \sqrt{(2/\varepsilon_r \ln \varepsilon_r) + q_S^2}, \quad q_S - \text{ը էկրանավորման պարամետրն է:}$$

Ստացվել է, որ ա) դեպքում  $\varphi 12$  էկրանավորված փոխազդեցության պոտենցիալը շեղվում է ինչպես 32, այնպես էլ ճշգրիտ 12 էկրանավորված դեպքերին համապատասխանող վերլուծական տեսքերից: Նվազելով էքսպոնենտային օրենքով և, միաժամանակ, բնութագրվելով սահմանակցող միջավայրերի դիէլեկտրիկական հաստատունների հարաբերությամբ որոշվող  $z_S = \tilde{q}_S^{-1}$   $\varphi 12$  էկրանավորման երկարությամբ՝ աճում է լարի շառավիղ փոքրացմանը զուգընթաց: Մյուս կողմից,  $z_S$ -ը, բնութագրվելով  $\varepsilon_r = \varepsilon_w / \varepsilon_b$  պարամետրից կախվածությամբ,  $0^\circ$  Կ-ում չափային քվանտային սահմանի մոտավորությամբ ընդունում է հետևյալ տեսքը՝

$$z_S = R \left[ \frac{2}{\varepsilon_r \ln \varepsilon_r} + \frac{16}{\pi^2 a_0 n_L} \right]^{-1/2}: \quad (5)$$

Իր հերթին, թ) դեպքում  $\varphi 12$  էկրանավորված փոխազդեցության պոտենցիալը, որը համապատասխանում է բարակ  $\varphi L$ -ին, հանգում է 12 կոլունյան էկրանավորված պոտենցիալի դեպքին: Այն, ինչպես և չէկրանավորված դեպքում [5,6], նվազում է 12 կոլունյան օրենքի շրջապատճերում և բնութագրվում է շրջապատճեր միջավայրի փոքր արժեքով դիէլեկտրիկական հաստատունով: Այսպիսով, բարակ  $\varphi L$ -ում,  $\varphi 12$  էկրանավորման երկուսում ճնշված է անկախ  $\mathcal{H}$  երկուսում հաշվառումից:

§ 3.2-ում հետազոտված են  $\mathcal{H}$  երկուսում շնորհիվ ուժեղացված և էկրանավորված  $\varphi 12$  էքսիտոնային կապված վիճակները  $PbSe/Si$  հենքով  $\mathcal{H}\varphi L$ -ում մոդելավորված (3) բանաձևով տրվող էկրանավորման  $\varphi 12$  պոտենցիալով: Ներկայացված են  $\varphi 12$  էկրանավորված էքսիտոնի կապի էներգիայի մեծության վերլուծական արդյունքները՝ ենելով ինչպես Բեսսելի հավասարման, այնպես էլ վարիացիոն մեթոդների կիրառությամբ:

Առաջին դեպքում, էկրանավորված էքսիտոնի էներգիական կապված վիճակները բնութագրող Շրեդինգերի հավասարումը բերվել է Բեսսելի հավասարման տեսքի՝

$$\frac{d^2\psi}{dy^2} + \frac{1}{y} \frac{d\psi}{dy} + (1 - \frac{\nu^2}{y^2})\psi = 0, \quad (6)$$

$$\text{որտեղ } y = \xi e^{-\tilde{q}_S|z|}, \quad \xi = \sqrt{8\mu_{//} E_R / \tilde{q}_S^2 \hbar^2}, \quad E_R = e^2 / \varepsilon_w R \tilde{q}_S R,$$

$$\nu = 2\chi / \tilde{q}_S, \quad E = -\hbar^2 \chi^2 / 2\mu_{//}, \quad \mu_{//} - \text{ը էքսիտոնի արդյունարար զանգվածն է:}$$

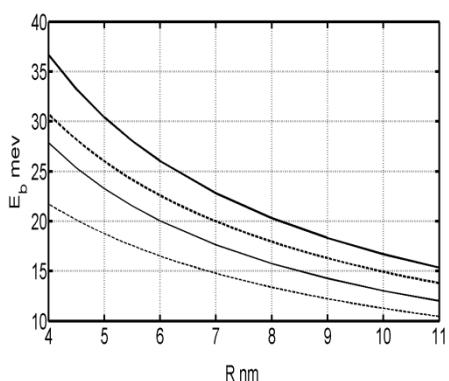
Համաձայն 12 կոլունյան խնդրի ստանդարտ մոտեցման [5], (7) հավասարումը բնութագրվում է կենտ, և զուգ վիճակներին համապատասխանող  $\psi$  լուծումներով, որոնց համապատասխանող սեփական արժեքները, մասնավորապես, զուգ վիճակների համար որոշվում են հետևյալ եզրային պայմաններով

$$\left. \frac{d}{dz} J_\nu(\xi e^{-\tilde{q}_s|z|}) \right|_{z=0} = 0 \quad (7)$$

Ք12 Էլրանավորված էքսիտոնային վիճակների նկարագրման համար կիրառվել է նաև վարիացիոն մեթոդ: Այդ դեպքում հնարավոր է ստանալ վերլուծական տեսքեր՝ Էլրանավորված էքսիտոնի 12 ալիքային ֆունկցիայի տարածական ընդգրկման չափի (որպես վարիացիոն պարամետրի հակադարձ մեծություն), այնպես էլ  $E_b$  կապի էներգիայի համար: Վերջինի համար ստացված է հետևյալ արտահայտություն՝

$$E_b = -\frac{e^2}{\varepsilon_w R} \frac{1}{\tilde{q}_S R} \left[ \left[ 1 + \tilde{q}_S R \left( \frac{a_{ex}}{R} \right) \right]^{-1} - \frac{\tilde{q}_S R}{8} \frac{a_0}{a_{ex}} \frac{R}{a_{ex}} \right]; \quad (8)$$

Առաջարկված է իրական  $PbS/Si$  հենքով ԴՊՀ համակարգում էկրանավորված էքսիտոնի հիմնական վիճակը նկարագրող մեծություների թվային վերլուծություն, ինչը վերաբերում է ք12 էկրանավորման երկարությանը, փոխազդեցության պոտենցիալին և հիմնական վիճակի  $E_b$



რომ  
სკ. 2.ტფL-ის ჰერანავერავად ხესათონებული ჰავაში ჰარეფაზან ჭირის გარე რ გარე აღმართება  $R = 1.5 \cdot 10^6$  ამ<sup>1</sup>,  $\varepsilon_r = 11.5$   
და ერთმანეთში  $T = 264$  ამრავერავად  
არმტებული ქავროვა:

համապատասխանում են (3) բանաձևով տրվող Ք12 Էկրանավորման պոտենցիալի արտահայտութանը:

Ինչպես երևում է գրաֆիկից, Էկրանավորման երևոյթը էականորեն նվազեցնում է դիելեկտրականապես ուժեղացված  $\Phi 12$  էքսիտոնի կապի էներգիան և այն առավել արդյունաբար է ԴՔՀ-ի թույլատրենի շառավղային տիրուպթի փորք առներների դեարում: Վերջինի համար ստացված է, որ  $E_b$

Նկ 2-ում ներկայացված են (8) արտահայտությամբ տրված  $E_b$  կապի էներգիայի գրաֆիկական արժեքները՝ որպես լարի  $R$  շառավիղից ֆունկցիա: Թվային արդյունքները համեմատված են չէկրանավորված դեպքի գրաֆիկների հետ: Այստեղ հոճ հաստ և հաստ կետագծային նշանակումներով գրաֆիկները համապատասխանում են:

կապի էներգիան էականորեն ( $20 \div 30$  մէվ) աճել է ծավալային նմուշներում Բորի  $R_0 \approx 0.91$ մէվ համանման արժեքի համեմատ: Դա նշանակում է, որ քննարկվող ԴՔՓ-ում ՔՍ և ԴՍ համատեղ հանդես եկող երևոյթները հաշվեկշռվում են  $\varphi_{12}$  էլուսնավորման երևոյթի հետ այնպես, որ անգամ չափավոր հաստ ԴՔԼ-ի շառավիլի 10նմ կարգի արժեքների համար էքսիստոնային գույզի կայունությունը պահպանվում է: Նկատենք, որ Բեսանի հավասարման կիրառությամբ ստացված  $E_b$ -ի արժեքները գերազանցում են վարիացիոն մեթոդով ստացված արժեքներին, սակայն  $E_b$  -ի փոփոխման արագությունը երկու դեպքում էլ գրեթե նույնն է:

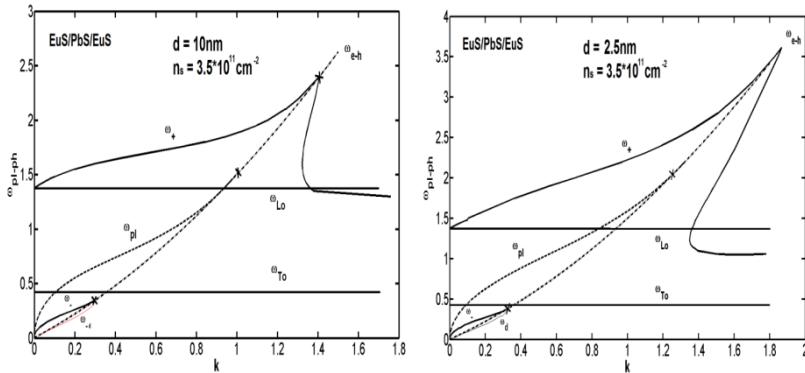
**Աշխատանքի չորրորդ գիյում** քննարկված են նեղ արգելված գոտիով իրական ԴՔՓ-ում ներենթագոտիհական պլազմոն-ֆոնոնային տատանումների դիսպերսային հատկությունները: Այստեղ տեսական հետազոտությունը կատարված է պատահական փուլի մոտավորության մեթոդի շրջանակներում, որտեղ դիտարկվում է թույլ բևեռային կիսահաղործային ակտիվ միջավայրում տեղայնացված  $\varphi_{22}$  էԳ-ի ( $\varphi_{22}$  պոլարոնային գագ) արձագանքի լրիվ դիէլեկտրիկական ֆունկցիան:

§ 4.1-ում հետազոտված է պլազմոն-ֆոնոնային տատանումների էներգիական սպեկտրը  $\text{EuS}/\text{PbS}/\text{EuS}$  ԴՔՓ-ում: Հաշվի է առնված [5], որ ԴՍ և ՔՍ երևոյթների համատեղ կիրառմը կարող օգալիորեն մեծացնել էլեկտրոն-էլեկտրոնային և էլեկտրոն-ֆոնոնային փոխագրեցությունների ինտենսիվությունը և պլազմոնանման, և ֆոնոնանման դիսպերսային ճյուղերի դեպքում: Որպես հետևանք, դա կարող է ապահովել ավելի ընդգրկուն ալիքային վեկտորների թույլատրելի տիրույթ, քան ԴՍ երևոյթի անտեսման դեպքում: Իր հերթին, ցույց է տրված, որ քննարկվող մասնավոր դեպքում տեղի ունեն կապակցված տատանումների տարբերակված ծնուզ և ճնշում, և ուժեղացում: Ընդ որում վերջինը կարող է տեղի ունենալ նաև ԼԿ-ի չափավոր փոքր կոնցենտրացիաների դեպքում:

§ 4.2-ում իրական  $\text{EuS}/\text{PbS}/\text{EuS}$  ԴՔՓ-ում քննարկված են  $\varphi_{22}$  կապակցված պլազմոն-ֆոնոնների դիսպերսային սպեկտրի առանձնահատկությունները՝ կախված ԴՔՓ-ի լայնության և  $\varphi_{22}$  էԳ-ի խտության մեծությունների միջև փոխհարաբերակցությունից: Կատարված է կորուստների ֆունկցիայի, պլազմոնանման և ֆոնոնանման սպեկտրային պիկերի օսիկատորի ուժերի թվային վերլուծություն: Հաշվարկները կատարված են  $22$  և  $10$  մմ արժեքների և ազատ  $22$  ԼԿ-ի չափավոր փոքր խտության ( $3.5 \cdot 10^{11}$  սմ<sup>2</sup>) դեպքում:

Նկ. 3 և 4-ում, մասնավորապես, ներկայացված են ներենթագոտիհային պլազմոն-ֆոնոնների կոլեկտիվ գրգռումների  $\omega_{\pm}(k)$  դիսպերսիոն կորերը միամասնիկային գրգռումների կոնտինուամի (չուշացող տատանումների

մարման կամ “Լանդաուի մարման” տիրույթը հետ մեկտեղ՝ 2Q ալիքային վեկտորի կամայական արժեքների համար: Կոլեկտիվ գրգռումների  $\omega_{\pm}(k)$  դիսպերսային կախվածությունը գրաֆիկորեն ներկայացված  $\omega_{\pm} > \omega_{e-h}$



Նկ. 3, 4. Պլազմոն-ֆոնոնային  $\omega \pm$  մոդերը՝ ալիքային  $k$  վեկտորից ֆոնակիա, համապատասխանաբար  $d=10$  նմ և  $d=2.5$  նմ դեպքերում  $2E_F/\hbar = 3.2 \cdot 10^{13} \text{ eV}$  և  $k_F = -1.5 \cdot 10^6 \text{ nm}^{-1}$  միավորներով արտահայտած:

պայմանի հաշվառմամբ, որտեղ Լանդաուի տիրույթի եզրը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝  $\omega_{e-h} = (2E_F/\hbar) [(k/k_F) + (k^2/2k_F^2)]$ :

Դիելեկտրականաբես ուժեղացված պլազմոնային չգրգռված  $\omega_p(k)$  տատանման մոդը նույնականացնելու համար:

Գրաֆիկներում PbS ակտիվ տիրույթին համապատասխանող 3Q LO-և TO-ֆոնոնների ոչ դիսպերսիվ մոդերը ներկայացված են որպես ուղիղ գծեր  $\omega_{LO}=1.375$  և  $\omega_{TO}=0.425$  կտերում  $2E_F/\hbar = 3.2 \cdot 10^{13} \text{ eV}$  և  $k_F = 1.5 \cdot 10^6 \text{ nm}^{-1}$  միավորներով արտահայտած:

Ինչպես երևամ է, պլազմոն-ֆոնոնային կոլեկտիվ տատանումների գրաֆիկական կորերը խիստ որոշակիորեն առանձնացված են միամանիկային գրգռումների տիրույթի եզրից ալիքային վեկտորների արդեն իսկ շատ փոքր մեծությունների դեպքում: Ստացվում է, որ ԴՍ երևույթի շնորհիվ տատանումների տատանումների կապակցումը տեղի ունի 2Q ԼԿ-ի բնութագրական չափավոր փոքր խտությունների պարագայում:

Դա հաստատվում է համապատասխանաբար նկ. 4 և 5-ում ( $\omega, k$ ) = (1.401, 0.95) և ( $\omega, k$ ) = (2.194, 1.321) եզրային կետերով (գրաֆիկի վրա նշված են փոքր խաչերով) սպեկտրային տիրույթում, չկապակցված պլազմոնային գրաֆիկական կորերի հետ համեմատությունից: Երկու դեպքերում էլ  $\omega(k)$  պլազմոնանման ճյուղերը, որոնք ընկած են ( $\omega, k$ ) =

(0.339, 0.295) և  $(\omega, k) = (0.362, 0.313)$  եզրակետերով հաճախային տիրույթներում, արդյունարար կերպով ճնշված են՝ պայմանավորված  $\omega_{T_0}$ -ի փոքր արժեքով:

Իրենց հերթին, կապակցված ֆոնոնանման ճյուղերը տեղակայված են ավելի բարձր, քան չկապակցված 32 LO – ֆոնոնների գրաֆիկական կորը ( $\omega_L = 1.38$ ): Համապատասխան կապակցված չմարող սպեկտրային  $\omega, k$  կորը  $d=10$  նմ դեպքում ավարտվում է  $(\omega, k) = (2.4, 1.41)$  եզրակետում, իսկ  $d=2.5$  նմ դեպքում՝  $(\omega, k) = (3.61, 1.87)$  եզրակետում: Հետևաբար,  $d$ -ն 10 նմ-ից 2.5 նմ նվազեցնելիս, ֆոնոնանման տատանումների հաճախության թույլատրելի տիրույթը աճում է մոտ 50 % -ով և պայմանավորվում է ավելի խիստ կապակցում ի տարրերություն պլազմոնանման կապակցման դեպքի:

Պլազմոն-ֆոնոնային տատանումների դիսպերսային սպեկտրի հետ մեկտեղ, քննարկված է նաև  $S(\omega, k)$  դինամիկական կառուցվածքային գործոնը: Այն բնույթագրում է կոլեկտիվ տատանումների սպեկտրային կշիռը և համեմատական է դիէլեկտրիկական ֆոնուցիայի հակադարձ մեծության կեղծ մասին (Էներգիական կորուստների ֆունկցիա): Վերջինը տրվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$-\text{Im} [\varepsilon(k, \omega)]^{-1} = \varepsilon_2 / (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1^2), \quad (9)$$

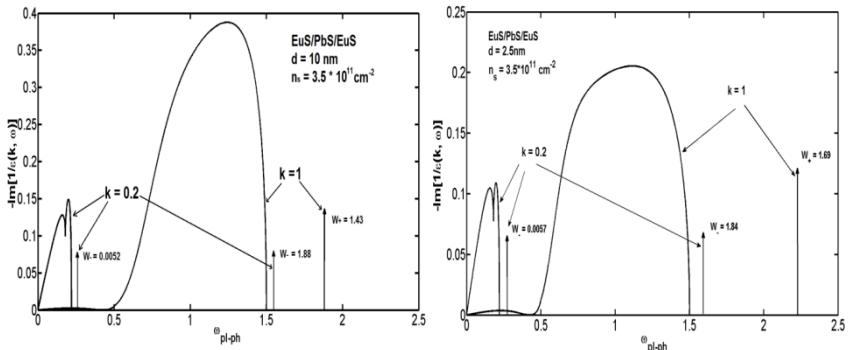
որտեղ  $\varepsilon_1 = \text{Re } \varepsilon(k, \omega)$ ,  $\varepsilon_2 = \text{Im } \varepsilon(k, \omega)$ : Կոլեկտիվ տատանումների ամբողջական մարման պայմանով՝  $\text{Im } \varepsilon(k, \omega)$  և  $\text{Re } \varepsilon(k, \omega)$  մեծությունները զորյանում են, որի դեպքում  $-\text{Im} [\varepsilon(k, \omega)]^{-1}$  - մեծությունը կունենա հետևյալ սպեկտրային կշիռը (օսցիլյատորի ուժը):

$$W(k) = \pi / (\partial \text{Re } \varepsilon(k, \omega) / \partial \omega) |_{\omega_i(k)}, \quad (10)$$

որտեղ  $\omega = \omega_i(k)$  -ն կոլեկտիվ տատանման հաճախությունն է:

Նկ. 5 և 6-ում հաշվված է  $-\text{Im} [\varepsilon(k, \omega)]^{-1}$  ֆոնուցիան՝ չափավոր փոքր  $n_S = 3.5 \cdot 10^{11}$  սմ<sup>2</sup> 22 խտության դեպքում: Ինչպես երևում է,  $k/k_F = 0.2$  դեպքում սպեկտրի և պլազմոնանման, և ֆոնոնանման մասերը առկա են, բայց օսցիլյատորի ուժը համարյա ամբողջովին պայմանավորված է սպեկտրի ֆոնոնանման մասով, քանի որ համապատասխան սպեկտրալ կշիռները հետևյալն են՝  $W_- = 0.0052$  և  $W_+ = 1.88$ ՝  $d = 10$  նմ դեպքի համար, մինչդեռ  $W_- = 0.0057$  և  $W_+ = 1.84$ ՝  $d = 2.5$  նմ դեպքի համար: Այսպիսով, երկարայիքային տիրույթում սպեկտրային կշիռը հիմնականում կապված է ֆոնոնանման տատանումների հետ: Գլխավորապես, դա հետևանք է քննարկվող դեպքում  $\omega_{T_0}$  հաճախության փոքր արժեքի, որի հետևանքով պլազմոնանման կապակցված տատանումները արագորեն միաձուվում են միամասնիկային գրգռումների սպեկտրային տիրույթի հետ:

Իր հերթին, մեծ ալիքային վեկտորների դեպքում ( $k / k_F = 1$ ) պլազմոնանման մասը ամբողջությամբ բացակայում է, և ֆոնոնանման տատանումների սպեկտրային կշիռը համապատասխանաբար հավասար է  $W_+ = 1.43'$   $d = 10$  նմ լայնությամբ ԲՓ-ի դեպքում, և  $W_+ = 1.69'$   $d = 2.5$  նմ



**Նկ. 5, 6.** Էներգիական կորուստների ֆոնկցիան հաճախությունից ֆոնկցիա՝ համապատասխանաբար  $d = 10$  նմ և  $d = 2.5$  նմ դեպքերում  $k = 0.2$  և  $1.1$  արժեքների համար՝  $2E_F/\hbar = 3.2 \cdot 10^{13}$  Հց և  $k_F = 1.5 \cdot 10^6$  սմ<sup>-1</sup> միավորներով արտահայտած: Կոլեկտիվ տատանումները նշող պիկերը տրված են առանձին ուղղաձիգ սլաքների տեսքով և նրանց վրա նշված թվերը ցույց են տալիս կոլեկտիվ տատանումների ուժգնությունը:

Դեպքում: Ուստի, այս դեպքում օսցիլյատորի ուժն ամբողջությամբ կփոխանցվի ֆոնոնանման տատանումներին և միամասնիկային գրգռումների կոնտինուամին: Բացի այդ,  $d$ -ի փոքրացման հետ ֆոնոնանման տատանումների սպեկտրային կշիռը երկար ալիքների համապատասխան հարաբերական ալիքային վեկտորների դեպքում թույլ է աճում (2%), իսկ մեծ ալիքային վեկտորների համար՝ աճում է նկատելիորեն (17.5%):

Այսպիսով, EuS/PbS/EuS ԴՓ-ում պլազմոն-ֆոնոնային կապակցումը նկատելիորեն ուժեղ է ֆոնոնանման կապակցված տատանումների համար:

## ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆ

1. Ներկայացված է 2Q Դեբայ-Հյուկեի բնույթի փոխազդեցության պոտենցիալի կիրառմամբ էկրանավորված էքսիտոնային վիճակների ուսումնասիրություն ԴՓ-ում՝ հետերոսահմանում դիէլեկտրիկական հաստատունի “մեկ կողմանի” կտրուկ թոփչքի հաշվառումով: Հաստատված են 2Q խոռություն/ շերմաստիճան հարաբերության և ԴՓ-ի լայնության փոխկապակցված արժեքների միջակայքերը, որոնց դեպքում

Էկրանավորված էքսիտոնի հիմնական վիճակի՝ վարիացիոն սկզբունքը հաշված կապի էներգիայի արտահայտությունը տեղի ունի: Կատարված է թվային վերլուծություն՝ InSb-ի հենքով ԴՔՓ-ի դեպքու: Ստացված է Էկրանավորված էքսիտոնի կապի էներգիայի մեծության՝ հոծ նմուշներում չէկրանավորված դեպքի էներգիայի արժեքի ( $0.3 \div 0.4$  մէՎ) նկատմամբ էական աճ՝ մինչև  $4 \div 6$  մէՎ:

2. 22 կուլոնյան “կտրված” պոտենցիալի մեթոդի շրջանակներում հաշվարկված և հետազոտված է ք22 Էկրանավորված էքսիտոնային կլանման սպեկտրը՝ հետերոսահմաններում “Երկու կողմանի” դիէլեկտրիկական սահմանափակմամբ՝ EuS/PbS/EuS ԴՔՓ-ում: Ցույց է տրված, որ էքսիտոնային կլանման գործակիցը, կախված էներգիական պարամետրից, դրսւորում է չափավոր օսցիլացիոն վարք: Ստացված է, որ էքսիտոնային կլանման ինտենսիվությունն աճում է  $n/T$  պարամետրի աճին զուգընթաց, իսկ նվազման հետ՝ էներգիայի միաժամանակյա աճի հետ մեկտեղ ծգուում է չէկրանավորված դեպքի արժեքին:

3. Թոմաս-Ֆերմիի մեթոդի կիրառմամբ քննարկված է կուլոնյան փոխազդեցության էկրանավորման երևոյթն արգելային դիէլեկտրիկական միջավայր ներառնված կիսահղողությային ՔԼ-ում: Ստացված է Էկրանավորված կուլոնյան փոխազդեցության 32 պոտենցիալի վերլուծական տեսքը, որտեղից է՝  $\gamma U$  երևոյթի հաշվառմամբ առաջին անգամ արտածված են ք12 էկրանավորման երկարության և ք12 դիէլեկտրականապես ուժեղացած փոխազդեցության պոտենցիալի արտահայտությունները: Ցույց է տրված, որ վերջինս երկարահեքային չափավոր փոքր սահմանում բացահայտորեն կախված է լարի շառավղից, մինչդեռ նույնպիսի շատ փոքր սահմանում քննութագրվում է բացառապես արգելային միջավայրի դիէլեկտրիկական հատկություններով:

4. Բեսսեի հավասարման և վարիացիոն մեթոդների կիրառությամբ, առաջին անգամ PbSe/Մեզոնակուտկեն սիլիցիում SBA-15 քվազիմիաչափ կառուցվածքի համար առաջարկված է էքսիտոնային էկրանավորված վիճակների ուսումնասիրություն: Կատարված են էկրանավորված էքսիտոնի հիմնական վիճակի  $E_b$  կապի էներգիայի և վերլուծական, և թվային հետազոտություններ: Գրանցված է  $E_b$ -ի մեծության կտրուկ աճ մինչև  $10 \div 20$  մէՎ՝ PbSe ծավալային նմուշներում էքսիտոնի չէկրանավորված էներգիայի համապատասխան արժեքի ( $0.9 \div 1$  մէՎ) համեմատ: Ցույց է տրված, որ Բեսսեի հավասարման մեթոդով հաշված կապի էներգիայի արժեքները գերազանցում են վարիացիոն դեպքով ստացվածներին, սակայն կախված լարի շառավղի նվազումից՝ նրանց փոփոխման արագությունը երկու դեպքու էլ գոեթեն նույն է:

5. Պատահական փուլերի մոտավորության մեթոդի շրջանակներում քննարկված են պլազմոն-ֆոնոնային կապակցված տատանումների դիսպերսիոն հատկությունները EuS/PbS/EuS ԴՔՓ-ում: Կատարված է էներգիական կորուստների ֆոնկցիայի, պլազմոնանման և ֆոնոնանման սպեկտրային պիկերի օսցիլյատորի ուժերի թվային վերլուծություն: Ցույց է տրված, որ փոքր ալիքային վեկտորների տիրույթում համապատասխան օսցիլյատորի ուժը բաշխվում է մասամբ պլազմոնանման և հիմնականում ֆոնոնանման սպեկտրային ճյուղերի, ինչպես նաև երկմասնիկային գրգռումների կոնտինուամի միջև: Իր հերթին, վերջավոր ալիքային վեկտորների տիրույթում բացահայտված է պլազմոն-ֆոնոնային տատանումների սպեկտրի ստորին պլազմոնանման ճյուղի ամրողական ճնշման երևոյթ, կոլեկտիվ տատանումների սպեկտրային կշռ (օսցիլյատորի ուժի՝ գրեթե ամբողջությամբ դեպի վերին ֆոնոնանման ճյուղին և միամասնիկային կոնտինուամին փոխանցման միջոցով):

### **ՕԳՏԱԳՈՐԾՎԱԾ ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ**

1. Шик А.Я., Бакурова Л. Г., Мусихин С. Ф., Рыков С., Физика низкоразмерных систем. Под ред. А. Я. Шика. СПб: Наука, 2001.
2. Ղազարյան Է. Մ., Պետրոսյան Ս. Գ., Կիսահաղորդչային նանոէլեկտրոնիկայի ֆիզիկական հիմունքները, Երևան: ՈՀՀ հրատակակչություն, 2005.
3. Kumagai M., Takagahara T., Excitonic and nonlinear-optical properties of dielectric quantum- well structures, Phys. Rev. B , v. 40, pp.12359-12381, 1989.
4. Keldysh L.V., Excitons in Semiconductor-Dielectric Nanostructures, Phys.Stat.Sol. (a), v.164, v. 1, pp.3-12, 1997.
5. Агаронян К.Г., Кулоновские состояния и оптическое поглощение в квантовыхnanoструктурах с диэлектрическим ограничением. Докторская диссертация. Ереван, 2014.
6. Рытова Н.С., Экранированный потенциал точечного заряда в тонкой пленке. Вестник МГУ, Физика Астрономия, т.3, сс.30-32, 1967.
7. Aharonyan K.N., Kazaryan E. M., The Effect of Shielded Coulomb Interaction on Light Absorption in Thin Semiconductor Films. Thin Solid Films, v.105, pp.149-156, 1983.
8. Kowalczyk L., et al., Photoluminescence in EuS-PbS-EuS semiconductor structures with a double ferromagnetic barrier. Material Sci.- Pol., v. 24, pp. 809-814. 2006.
9. Pauc N., et. al., Electronic and optical properties of Si/SiO<sub>2</sub> nanostructures. I. Electron hole collective process in single Si/SiO<sub>2</sub> quantum wells. Phys. Rev. B, v. 72, pp. 205324-1 -13, 2005.
10. Poborchii V.V., Optical properties of the cylindrical quantum wires in the chrysotile asbestos channels, Japan. J. of Appl. Phys., 34, pp. 271-274, 1994.
11. Lisachenko M. G., et al., Dielectric Effect in Silicon Quantum Wires. Phys. Stat. Sol. (a), v. 182, pp. 297-300, 2000.

12. Kigel A., et al., The ground-state exciton lifetime of PbSe nanocrystal quantum dots. Superlattices and Microstructures, v. 46, pp. 272-276, 2009.
13. Чаплик А.В., Энтин М.В., Заряженные примеси в очень тонких слоях. ЖЭТФ, т.61, сс. 2469-2475, 1971.
14. Келдыш Л.В., Кулоновское взаимодействие в тонких пленках полупроводников и полуметаллов, Письма ЖЭТФ, т.29, сс. 716-719, 1979.
15. Aharonyan K. H., Kazaryan E. M., Screened exciton properties of narrow-gap lead salt finite confining potential semiconductor quantum well. Physica E, v. 44, pp. 1924-1930, 2012.
16. Keldysh L.V., Excitons and polaritons in semiconductor/insulator quantum wells and superlattices, Superlatt. and Microstruct. v. 4, pp. 637- 642, 1988.
17. Chang K., Peeters F.M., Asymmetric Stark Shifts in  $In_{0.18} Ga_{0.82}$  As/GaAs near-surface quantum wells: The image charge effect. J. of Appl. Phys., v. 88, pp. 5246 – 5251, 2000.
18. Lead Chalcogenides- Physics and Applications, D.R. Khoklov (Ed), Taylor and Francis, New York, 2003.

**ԱՏԵՆԱՍԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԹԵՄԱՅՈՎ  
ՀՐԱՊԱՐԱԿՎԱԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ ՑԱՆԿ**

1. Aharonyan K. H. , Margaryan N. B., Plasmon-Phonon Coupling In Lead Salt Semiconductor Quantum Well. Journal of Physics : Conf. Series, Vol. 673, pp. 012002-1-6, 2016.
2. Aharonyan K. H. , Margaryan N. B., Dielectric confinement influenced screened Coulomb potential for a semiconductor quantum wire. Journal of Physics : Conf. Series, Vol. 672, pp. 012009-1 -8, 2016.
3. Aharonyan K. H., Margaryan N. B., Binding energy of the one-sided dielectrically enhanced screened exciton in semiconductor quantum well. << ԳԱԱ Զեկույցներ (NASA REPORTS), v.116, pp. 57-63, 2016.
4. Margaryan N. B., Screened Coulomb centers in lead salt / mesoporous silica SBA 15 phase realistic semiconductor quantum wire system. Proc. of the 10-th International Conference “Semiconductor Micro- and Nanoelectronics”, pp. 96-98, 2015.
5. Aharonyan K. H., Margaryan N. B., Screened Coulomb properties of semiconductor nanowire with dielectric confinement effect. Proc. of the 10-th International Conference “Semiconductor Micro- and Nanoelectronics”, pp. 94-96, 2015.
6. Aharonyan K.H.,Margaryan N. B., Plasmon-phonon properties of narrow-gap realistic lead salt semiconductor quantum well. Proceedings of the Ninth International Conference “Semiconductor Micro- and Nanoelectronics”, pp. 147-150, 2013.
7. Aharonyan K. H. , Margaryan N. B., The screened exciton absorption in quantum well. Сборник научных и методических статей ГИУА, т. 1, сс. 81-86, 2012.

# **ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ СОСТОЯНИЙ И ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ОГРАНИЧЕНИЕМ**

## **АННОТАЦИЯ**

Успехи технологического синтеза полупроводниковых наноструктур и накопленный научный потенциал исследований открывают уникальную область для создания необычных классов гетерогенных систем с заданными свойствами, а в перспективе - путь разработки приборов на новых нанометрических эффектах.

В этом плане вызывают все возрастающий интерес полупроводниковые квантовые структуры со строгим контрастом значений диэлектрических проницаемостей на гетерограницах, а именно, квантовые ямы и квантовые нити с диэлектрическим усилением кулоновского взаимодействия (ДКЯ, ДКН). Подбирианием материалов полупроводникового квантового образца и окружающей барьевой среды, а также мезоскопических размеров и формы активной нанообласти, становится возможным в широких пределах менять положение энергий как одиночественных, так и коллективных (экзитонных и плазмон-фононных) состояний – осуществлять наряду с обычной "зонной инженерией" также "инженерию кулоновского взаимодействия".

Предлагаемая диссертационная работа посвящена изучению коллективных состояний, а также оптических свойств в полупроводниковых ДКЯ и ДКН.

Ниже приведены полученные в диссертационной работе основные выводы:

1. Исследованы экранированные экзитонные состояния в ДКЯ с "односторонним" диэлектрическим ограничением на гетерограницах с учетом двумерного потенциала взаимодействия Дебая-Хюккеля. Установлены интервалы корелированных значений отношения двумерной плотности/температуры и ширины ДКЯ, для которых вычисление вариационным методом выражение для энергии основного состояния экранированного экзитона имеет место. Проведены численные вычисления в случае ДКЯ на базе InSb. Получено существенное возрастание значения энергии связи экранированного экзитона до значения  $4 \div 6$  мэВ по отношению к аналогичной величине в объемных образцах ( $0.3 \div 0.4$  мэВ).
2. В рамках метода "обрезанного" кулоновского потенциала изучен квазидвумерный экранированный экзитонный спектр поглощения в ДКЯ EuS/PbS/EuS с "двусторонним" диэлектрическим ограничением на гетерограницах. Показано, что экзитонный коэффициент поглощения в зависимости от энергетического параметра проявляет умеренно осцилляционное поведение. Получено, что интенсивность экзитонного поглощения возрастает с ростом параметра  $n_y T$ , а в случае убывания последней, с одновременным ростом энергетического параметра, стремится аналогичному значению незакранированного случая.
3. В рамках метода Томаса-Ферми исследовано явление экранирования кулоновского взаимодействия в полупроводниковых квантовых нитях вкрапленных в диэлектрическую среду. Получен аналитический вид трехмерного потенциала кулоновского взаимодействия. Откуда впервые выявлены выражения

для квазиодномерной длины экранирования, а также потенциала взаимодействия с учетом явления диэлектрического ограничения. Показано, что последнее в умеренно малом длинноволновом пределе явно зависит от радиуса нити, тогда как при очень малом пределе исключительно характеризуется диэлектрическими свойствами барьерной среды.

4. В рамках методов уравнения Бесселя и вариационного исчисления впервые для ДКН PbSe/мезопористый кремний SBA-15 предложен механизм исследования экранированных экситонных состояний. Проведены как аналитические, так и численные вычисления для энергии связи  $E_b$  основного состояния экранированного экситона. Получен резкий рост величины  $E_b$  вплоть до значений 10-20 мэВ по отношению к аналогичной величине неэкранированного экситона в объемных образцах PbSe (0,9-1 мэВ). Показано, что значения энергии связи вычисленные методом уравнения Бесселя превышают аналогичным значениям, полученные вариационным методом. Однако, в зависимости от убывания радиуса нити, скорость их изменения в обоих случаях примерно одинакова.

5. В рамках метода приближения случайных фаз исследованы дисперсионные свойства плазмон-фононых связанных колебаний в ДКЯ EuS/PbS/EuS. Проведен численный анализ функции энергетических характеристических потерь, а также сил осцилляторов плазмоноподобных и фононоподобных спектральных пиков. Показано, что в области малых волновых векторов сила осциллятора распределяется в основном между фононоподобной ветвью, а также континуумом одночастичных возбуждений, а в плазмоноподобной ветви - частично. В свою очередь, в области конечных волновых векторов выявлено целостное подавление плазмоноподобной ветви с одновременной передачей силы осциллятора коллективных колебаний полностью на фононоподобную ветвь и континууму одночастичных возбуждений.

## **INVESTIGATION OF COULOMB STATES AND OPTICAL PHENOMENA IN SEMICONDUCTOR NANOSTRUCTURES WITH DIELECTRIC CONFINEMENT**

### **SUMMARY**

The success of technological synthesis of semiconductor nanostructures and accumulated scientific potential of research offer a unique area to create an unusual class of heterogeneous systems with predetermined properties, and in the future - the path of development of new devices on the nanometer effects.

In this respect, interest in semiconductor quantum structures with a strong contrast of the values of the dielectric constants at heterojunctions, namely, quantum wells and quantum wires (DQW, DQWr) with dielectric enhancement of the Coulomb interaction is growing. Here, picking up the materials of the semiconductor quantum sample and surrounding barrier medium, as well as mesoscopic size and shape of the active nanoregion, becomes possible to widely change the position of the energies of both single-particle and collective states - to carry out, along with the usual "band engineering" the "engineering of the Coulomb interaction" as well.

The proposed thesis is devoted to the study of collective (excitonic, plasmon-phonon) states, as well as the optical properties in semiconductor DQW and DQWr.

The following are obtained in the thesis as the main results and conclusions:

1. The screened exciton states in DQW with "one-side" dielectric confinement effect on the heteroboundaries with two-dimensional interaction potential of the Debye-Hückel are investigated. The intervals of the correlated values of the two-dimensional density / temperature ratio and DQW width are established for which calculated by the variational method the ground state energy expression of the screened exciton takes place. Numerical calculations in the case of DQW based on InSb are carried out. The significant increase of the screened exciton binding energy value of 4  $\div$  6 meV relative to analogous value of the volume samples (0.3-0.4 MeV) is received.
2. In the framework of the "cut-off" Coulomb potential method quasi-two dimensional screened exciton absorption spectrum in EuS / PbS / EuS DQW with "two-side" dielectric confinement effect on the heteroboundaries is studied. It is shown that the exciton absorption coefficient as a function of the energy parameter demonstrates moderately oscillatory behavior. It was found that the exciton absorption intensity increases with  $n_s/T$  parameter, but in the case of decrease of the latter and with a simultaneous increase in energy, seeks a similar value of unscreened case.
3. In the framework of the Thomas-Fermi method the phenomenon of screening of the Coulomb interaction in semiconductor quantum wire embedded in dielectric medium is studied. The three-dimensional Coulomb interaction potential analytical form is obtained. From where both the expressions of the quasi-one screening length and interaction potential with taking into account dielectric confinement effect it is found in the first time. It is shown that the latter in a moderately small long-wave limit is clearly dependent on the radius of the wire, whereas in a very small long-wave limit exclusively is characterized by dielectric properties of the barrier medium.
4. In the framework of the both Bessel equation and variational methods analytical research mechanism of the screened exciton states for the first time in the PbSe / mesoporous silicon SBA-15 DQWr are offered. Both analytical and numerical calculations of the ground state binding energy  $E_b$  of the screened exciton are carried out. Sharp increase of the  $E_b$  value up to 10-20 meV relative to the unscreened exciton analogous value in volume samples PbSe (0,9-1meV) is obtained. It was shown that the  $E_b$  values calculated by Bessel equation method exceed than the same values obtained by the variational method. However, depending on DQWr radius decreasing, their rate of change in both cases approximately are the same.
5. In the framework of the random phase approximation method the dispersion properties of plasmon-phonon modes in DQW EuS / PbS / EuS are studied. The numerical analysis of the energy loss characteristic function and oscillators strength of plasmon-like and phonon-like spectral peaks. It is shown that in the region of small wave vectors the oscillator strength is distributed mainly both in phonon-branch and in the continuum of single-particle excitations, but in plasmon-like branch- weakly. In turn, in the region of finite wave vectors the complete suppression of plasmon-like branch is revealed with simultaneous transmission of collective modes oscillator strength both in the phonon-branch and the continuum of single-particle excitations.