

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

**Կարեն Մարտինի Ղամբարյան**

**ԿԻՍԱՀԱՂՈՂՉԱՅԻՆ ԷՊԻՏԱՔՍԻԱԼ ՆԱՆՈԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ԵՎ ԴՐԱՆՑ  
ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ՄԻՋԻՆ ԵՆԹԱԿԱՐՄԻՐ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ՖՈՏՈՆՆԴՈՒՆԻՉՆԵՐԻ  
ՍՏԵՂԾՈՒՄ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ**

Ա.04.10 – «Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների դոկտորի գիտական  
աստիճանի հայցման ատենախոսության

**Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր**

ԵՐԵՎԱՆ – 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА  
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Карен Мартинович Гамбарян**

**ВЫРАЩИВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР И ФОТОПРИЕМНИКОВ СРЕДНЕГО  
ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ИХ ОСНОВЕ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических  
наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников»

ЕРЕВАН – 2013

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում

Գիտական խորհրդատու՝ ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր,  
պրոֆեսոր **Վ.Ս. Հարությունյան**

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, ֆիզ. մաթ. գիտությունների  
դոկտոր, պրոֆեսոր **Է.Մ. Ղազարյան** (ՀՌ(Ս)Հ)  
ֆիզ. մաթ. գիտությունների դոկտոր  
**Ս.Լ. Հարությունյան** (ՀՊՃՀ, Գյումրու մասնաճյուղ)  
ֆիզ. մաթ. գիտությունների դոկտոր **Հ.Ն. Երիցյան**  
(Ա.Բ. Ալիխանյանի անվան ազգային գիտական  
լաբորատորիա (ԵՖԻ) հիմնադրամ)

Առաջատար կազմակերպություն՝ Հայաստանի պետական ճարտարագիտական  
համալսարան

Պաշտպանությունը տեղի կունենա 2013թ. դեկտեմբերի 14-ին, ժամը 12<sup>00</sup>-ին Երևանի պետական  
համալսարանի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում:  
Հասցեն՝ 0025, ք. Երևան, Ա. Մանուկյան 1

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքվել է 2013թ. նոյեմբերի 13-ին

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝  ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ  
Վ.Պ. Քալանթարյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете

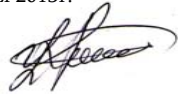
Научный консультант: Академик НАН РА, доктор физ. мат. наук, профессор  
**В.М. Арутюнян**

Официальные оппоненты: Академик НАН РА, доктор физ.-мат. наук, профессор  
**Э.М. Казарян** (РА(С)У)  
доктор физ.-мат. наук **С.Л. Арутюнян** (ГИУА,  
Гюмрийский филиал)  
доктор физ.-мат. наук **Г.Н. Ерицян** (Национальная  
научная лаборатория имени А.И. Алиханяна  
(Ереванский Институт Физики) фонд)

Ведущая организация: Государственный инженерный университет Армении

Защита состоится 14-го декабря 2013г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании специализированного совета 049  
по физике Ереванского государственного университета по адресу: 0025,г.Ереван,ул. А.Манукяна 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ  
Автореферат разослан 13-го ноября 2013г.

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

## ՆԵՐԱՇՈՒԹՅՈՒՆ

Վերջին տարիներին կիսահաղորդիչների ֆիզիկայի, տեխնոլոգիայի և ընդհանուր նյութագիտության զարգացումը բերել է նոր գիտական ուղղությունների՝ նանոէլեկտրոնիկայի, նանոտեխնոլոգիայի և սպինտրոնիկայի զարգացմանը [1-4]: Այդ ուղղությունների զարգացմանը նպաստել են նաև էպիտաքսային թաղանթների և նանոկառուցվածքների աճեցման ինչպես գերժամանակակից տեխնոլոգիաների ստեղծումը, այնպես էլ ավանդական մեթոդների կատարելագործումը: Այդ ժամանակակից տեխնոլոգիաները հնարավորություն են տվել ստեղծելու նանոչափային կառուցվածքներ, որոնք դրսևավորում են բավական հետաքրքիր հատկություններ: Չափային քվանտացման արդյունքում տեղի է ունենում լիցքակիրների տեղայնացում [3-8], որի հետևանքով փոխվում են դրանց տեղափոխման, գեներացման ու վերամիավորման պրոցեսները, ցրման մեխանիզմները: Օգտագործելով ինչպես ավանդական համարվող սիլիցիումը և գերմանիումը, այնպես էլ կիրառական մեծ նշանակություն ունեցող  $A^3B^5$  և  $A^2B^6$  դասի կիսահաղորդչային միացությունները ու դրանց պինդ լուծույթները՝ աճեցվել են տարբեր նանոկառուցվածքներ՝ քվանտային փոսեր, լարեր, կետեր (ՔԿ) և քվանտային օղակներ: Ստեղծվել են նաև նորագույն տիպի և յուրօրինակ ֆիզիկական ու կիրառական հատկություններով օժտված նանոկառուցվածքներ՝ ՔԿ-երի «մոլեկուլներ», շղթաներ և այլն: Այդպիսի համակարգերում առաջացած քվանտամեխանիկական երևույթների շնորհիվ հնարավոր է դառնում նոր տիպի և կատարելագործված հատկություններով օժտված կիսահաղորդչային սարքերի՝ մասնավորապես լազերների, ֆոտոընդունիչների, արևային և ջերմային էներգիայի փոխակերպիչների, «քվանտային» համակարգիչների ստեղծումը: Նանոկառուցվածքների հիման վրա պատրաստված ֆոտոընդունիչներն ունեն ֆոտոարձագանքի ավելի լայն տիրույթ, ֆոտոզգայնության ու արագագործության բարձր արժեքներ [2,5-7]: ՔԿ-երի կիրառումը կիսահաղորդչային լուսադիոդներում և լազերներում բերում է դրանց շեմային հոսանքի փոքրացման, աշխատանքային պարամետրերի ջերմաստիճանային կայունության մեծացման, ինչպես նաև արեգակնային և ջերմաֆոտովոլտային փոխակերպիչների օգտակար գործողության գործակցի արժեքի մեծացման:

Ներկայումս մեծ ուշադրություն է դարձվում նանոչափային կառուցվածքների հիման վրա պատրաստված հատկապես այն կիսահաղորդչային ֆոտոընդունիչներին, որոնք կիրառվում են միջին ենթակարմիր տիրույթում: Նշված սարքերը կարող են օգտագործվել ինչպես գիտական, ճարտարագիտական և հատուկ նպատակներով, այնպես էլ բժշկության և կենսաբանության մեջ: Օպտիկական համակարգերում միջին ենթակարմիր տիրույթի ֆոտոընդունիչները կարող են կիրառվել նաև այնպիսի արդյունաբերական զագերի գրանցման համար, ինչպիսին են մեթանը, պրոպանը, ածխածնի երկօքսիդը, ինչպես նաև արյան մեջ գլյուկոզայի պարունակության որոշման, ջերմային ճառագայթման գրանցման և այլ նպատակներով: Սակայն ՔԿ-երի կիրառելիության բնագավառներում հաջողության

հասնելու համար անհրաժեշտ է ճշգրիտ կառավարել կոդակների դիրքը և խտությունը, ինչպես նաև դրանց ձևի միանմանությունը և չափերի համասեռությունը: Ներկայումս բազմաբնույթ աշխատանքներ են կատարվում նշված խնդիրները լուծելու նպատակով: Ինչպես փորձնականորեն, այնպես էլ տեսականորեն ուսումնասիրվում են ՔԿ-երի սաղմնաառաջացման պրոցեսները, որոնք շատ նյութերի համար՝ առավելապես  $A^3B^5$  դասի կիսահաղորդիչների բազմաբաղադրիչ պինդ լուծույթների օգտագործման դեպքում առայժմ քիչ ուսումնասիրված և բավական բարդ խնդիրներ են:

Ժամանակակից տեխնոլոգիական մեթոդների թվին են պատկանում մոլեկուլային փնջային էպիտաքսիան (MBE), մետաղօրգանական միացությունների գոլորշիների քիմիական մստեցման մեթոդը (MOCVD), կիզակետված իոնային փնջերի եղանակը (FIB), «կաթիլային» էպիտաքսիան և այլն: Այս տեխնոլոգիական եղանակների կատարելությունը և հնարավորությունները հասցված են այն մակարդակի, որ աճեցվող էպիտաքսային թաղանթի հաստությունը կառավարվում է մեկ միատոմային շերտի ճշտությամբ: Վերը նշված տեխնոլոգիաների շնորհիվ արդեն ստեղծվում են, օրինակ, դաշտային տրանզիստորներ, որոնցում աղբյուրի և հոսարանի հեռավորությունը 20 նմ է, տերահերցային տիրույթում աշխատող կիսահաղորդչային սարքեր, ածխածնի միատոմային շերտեր (գրաֆեն) և այլն: Մակայն պետք է նշել, որ այդ գերտեխնոլոգիաները գերծ չեն նաև թերություններից: Մասնավորապես, ինչպես ֆիզիկական, ճարտարագիտական, այնպես էլ կառուցվածքային տեսանկյուններից շատ բարդ են. անհրաժեշտ է ապահովել գերբարձր վակուում ( $10^{-11}$  մմ. ս.ս.), օրեկան մոտ 80 լիտր հեղուկ ազոտի օգտագործման հնարավորություն, էլեկտրական հոսանքի մատակարարման և որակի հատուկ պայմաններ, պահանջվում է հատուկ համակարգչային ծրագրային փաթեթ, իսկ դրանցում օգտագործվող զագերը պայթավտանգ են, թունավոր և թանկարժեք: Նշված պահանջները խիստ սահմանափակում են այդ տեխնոլոգիաների կիրառումը հատկապես զանգվածային արտադրությունում, իսկ ստեղծված կիսահաղորդչային սարքերի ինքնարժեքը բարձր է:

Այդ տեսանկյունից կարևորագույն գիտական և կիրառական խնդիրներից է արդեն ավանդական համարվող հեղուկային էպիտաքսիայի (ՀԷ) և դրա տարատեսակների հետագա զարգացումը և կատարելագործումը: Ի տարբերություն MBE և MOCVD տեխնոլոգիաների, հեղուկային էպիտաքսիայի եղանակում թաղանթի աճը կամ նանոկառուցվածքի սաղմնաառաջացումը տեղի է ունենում հավասարակշիռ պայմաններում, որը մասնավորապես հանգեցնում է դրանց բյուրեղական ցանցի ավելի բարձր կատարելության և արատների առաջացման հավանականության փոքրացման:

Ժամանակակից կիսահաղորդչային միկրոէլեկտրոնիկայում և հատկապես զանգվածային արտադրությունում առավել կարևոր նշանակություն ունի սիլիցիումը (*Si*), որի միաբյուրեղների աճեցման տեխնոլոգիական մեթոդները հասցված են գերկատարելության: Աճեցվում են արատներից զուրկ սիլիցիումի գերմաքուր միաբյուրեղներ, որոնցում մնացորդային (ֆոնային) խառնուրդների կոնցենտրացիան կազմում է  $\sim 10^{11}$  սմ<sup>-3</sup>: Սակայն ներկայումս կարևորագույն

նշանակություն ունեն նաև  $A^3B^5$  և  $A^2B^6$  դասի կիսահաղորդիչները և դրանց հիման վրա ստեղծված պինդ լուծույթները՝ *Si*-ի և *Ge*-ի նկատմամբ ունեցած մի շարք ֆիզիկական առավելությունների պատճառով:  $A^3B^5$  դասի *InAs* և *InSb* նեղ գոտիական կառուցվածքով և *InP* կիսահաղորդչային միացությունները ու դրանց բազմաբաղադրիչ պինդ լուծույթները շատ հեռանկարային են և ունեն առանձնահատուկ նշանակություն, քանի որ դրանցով հնարավոր է ստեղծել կիսահաղորդչային սարքեր՝ 2–5 մկմ ալիքի երկարության միջին ենթակարմիր տիրույթում բազմաթիվ կարևոր կիրառական խնդիրների լուծման համար:  $InAs_{1-x-y}Sb_xP_y$  բազմաբաղադրիչ պինդ լուծույթի առավելությունը կայանում է նրանում, որ ատոմների փոխատեղումը տեղի է ունենում միայն հինգերորդ խմբի տարրի ենթացանցում: Փոխատեղվող ատոմների տրամագծերի մեծ տարբերությունը (0.98 Å (P), 1.19 Å (As) և 1.38 Å (Sb)), և, բնականաբար, համապատասխան երկբաղադրիչ միացությունների ցանցի հաստատունների տարբերությունները հնարավորություն են տալիս կառավարելու էպիտաքսային թրջող շերտում առաջացող էլաստիկ դեֆորմացիան (ինչպես ուռուցիկ, այնպես էլ գոգավոր), որը, ինչպես հայտնի է, նանոկառուցվածքների սաղմնաառաջացման հիմնական դրդապատճառն է Ստրանսկի-Կրաստանովի եղանակում:  $A^3B^5$  դասի կիսահաղորդիչների թվում կա ընդհամենը երկու միացություն՝ *InAs* -ը և *GaSb* -ը, որոնք կարող են ցանցերով համաձայնեցվել  $InAs_{1-x-y}Sb_xP_y$  բազմաբաղադրիչ պինդ լուծույթների հետ: Մենք որպես տակդիր օգտագործվել ենք *InAs* -ի արդյունաբերական միաբյուրեղները, քանի որ դրանք *GaSb* -ի միաբյուրեղների համեմատությամբ ունեն ավելի բարձր կատարելություն և ավելի եժան են:

**ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ՆՊԱՏԱԿՆԵՐԸ ԵՎ ԱՐԴԻՄԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Ատենախոսության հիմնական նպատակներն են.

1. *In – As – Sb – P* նյութական համակարգում քառաբաղադրիչ հեղուկ ֆազից ենթամիկրոմետրական և նանոմետրական կառուցվածքների աճեցումը *InAs* (100) տակդիրի վրա հեղուկային էպիտաքսիայի ձևափոխված տեխնոլոգիայով և դրանց բյուրեղաֆիզիկական հատկությունների փորձարարական ու քանակական հետազոտումը:
2. Քվանտաչափային կառուցվածքների ստեղծման համար եռաբաղադրիչ և քվադրաբաղադրիչ համակարգերի օգտագործման նոր գաղափարի կիրառումը և փորձարկումը:
3. Քվանտային կետ – նանոխոռոչ կառուցվածքների մրցակցային սաղմնաառաջացման պրոցեսի փորձարարական և քանակական հետազոտումը:
4. *InAs* (100) տակդիրի վրա *InAsSbP* բաղադրության ոսպնյակաձև և էլիպսարդային քվանտային կետերի ու քվանտային օղակների աճեցումը, դրանց ձևավորման օպտիմալ տեխնոլոգիական պայմանների ընտրությունը:
5. Սաղմնաառաջացման ընթացքում նանոկառուցվածքների միավորման և օստվալոյան հասունացման երևույթների, ինչպես նաև դրանց

- բյուրեղաֆիզիկական, էլեկտրաֆիզիկական, օպտոէլեկտրոնային և մագնիսական հատկությունների փորձարարական հետազոտումը:
6. *InAs* (100) տակդիրի վրա *InAsSbP* բաղադրության նոր տիպի քվանտային մոլեկուլների և քվանտային կետերի շղթաների աճեցումը ու դրանց բյուրեղաֆիզիկական և օպտոէլեկտրոնային հատկությունների փորձարարական հետազոտումը:
  7. Նանոկառուցվածքների վրա հիմնված միջին ենթակարմիր տիրույթի երկու տիպի ֆոտոընդունիչների ստեղծումը և դրանց ֆիզիկական հատկությունների, առավելությունների և կիրառական բնութագրերի հետազոտումը:  
Վերը նշված նպատակներից հետևում է աշխատանքի արդիականությունը:

**ՄՏԱՅՎԱԾ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՐՈՒՅԹԸ**

1. Նանոկառուցվածքների աճեցման համար առաջարկվել և փորձարկվել է եռաբաղադրիչ և քվադրաբաղադրիչ պինդ լուծույթների օգտագործման գաղափարը:
2. Ենթամիկրոմետրական կոդակների բյուրեղաֆիզիկական հատկությունների հետազոտման համար առաջարկվել և կիրառվել են “կիզակետված իոնային փնջեր” սարքավորման հնարավորությունները:
3. Քառաբաղադրիչ հեղուկ ֆազից Ստրանսկի-Կրաստանովի եղանակով *InAs* (100) տակդիրի վրա առաջին անգամ աճեցվել են երկրորդ սեռի *InAsSbP* բաղադրությամբ և  $10^8 - 10^{10}$  սմ<sup>2</sup> մակերևութային խտությամբ ոսպնյակաձև, էլիպսարդաձև և օղակաձև ՔԿ-եր:
4. *InAs* (100) տակդիրի վրա աճեցվել են *InAsSb / InAsP* նոր կառուցվածքի քվանտային մոլեկուլներ, իսկ քիմիական խաձատման միջոցով ստեղծելով տակդիրի մակերևութի արհեստական ապաուղղորդվածություն՝ ստեղծվել են ՔԿ-երի համալրային շղթաներ:
5. Մագնիսադիմադրության և օպտոէլեկտրոնային հատկությունների հետազոտման միջոցով փորձնականորեն որոշվել է *InAsSbP* բաղադրության երկրորդ սեռի ՔԿ-երի էներգիական սպեկտրը: Հաշվարկվել են հեղուկ ֆազից աճեցված ՔԿ-երի սաղմնաառաջացման միջին արագությունը և տեղայնացված թեթև խոռոչների արդյունաբար զանգվածը:
6. Առաջին անգամ կատարվել է ՔԿ-երի և նանոխոռոչների մրցակցային սաղմնաառաջացման պրոցեսի քանակական հետազոտում *GaAs - GaSb - GaP* և *Si - Ge - C* նյութական համակարգերի համար, ուսումնասիրվել են դրանց պինդ լուծույթների անհամատեղելիության տիրույթները:

**ՆԵՐԿԱՅԱՑՎԱԾ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԿԻՐԱՈՍԿԱՆ ՆՇԱՆԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Աշխատանքում *InAs* (100) տակդիրի, քառաբաղադրիչ *InAsSbP* երկրորդ սեռի ՔԿ-երի և էպիտաքսային թաղանթների հիման վրա ստեղծվել են նոր սերնդի ֆոտոընդունիչներ՝ նանոկառուցվածքներով ֆոտոդիմադրությունների և դիոդային հետերոկառուցվածքների տեսքով, որոնք կարող են օգտագործվել միջին

ենթակարմիր տիրույթում մի շարք կարևոր կիրառական խնդիրների լուծման համար: Նշված ֆոտոընդունիչների օպտոէլեկտրոնային հատկությունների և աշխատանքային բնութագրերի հետազոտումները ցույց են տվել, որ դրանք կարող են օգտագործվել, մասնավորապես, 3-ից 4 մկմ տիրույթում ճառագայթող մարմինների գրանցման համար, օպտիկական սկզբունքով աշխատող գազային տվիչներում, օրինակ՝ արդյունաբերական մեթանի, ածխաթթու և այլ գազերի գրանցման համար: Ստեղծված ֆոտոընդունիչների կարևոր կիրառական նշանակությունը կայանում է նաև նրանում, որ դրանք կարող են օգտագործվել նաև կենսաբանության և բժշկության մեջ, մասնավորապես, արյան մեջ գլյուկոզայի կոնցենտրացիայի որոշման (առանց արյան քսուկ վերցնելու) և մի շարք հիվանդությունների ախտորոշման համար: Ստեղծված ՔԿ-երով ֆոտոդիմադրություններում նույնիսկ փոքր՝ միջև  $\pm 2$  մՎ լարումների կիրառման դեպքում ստացվող ֆոտոարձագանքի սպեկտրի վրա դիտված լրացուցիչ մաքսիմումների թվային արժեքների էական մեծացումն ունի կարևոր կիրառական նշանակություն մի քանի տեսանկյունից: Մասնավորապես, այդ յուրահատկությունը ընդլայնում է ֆոտոարձագանքի սպեկտրը, հնարավորություն է տալիս ստեղծելու այսպես կոչված “բազմագույն” ֆոտոընդունիչներ, ինչպես նաև որպես սնուցման աղբյուր օգտագործելու նույնիսկ կենցաղում օգտագործվող փոքր չափերի և հզորության մարտկոցներ: *InAs* տակդիրի և *InAsSbP* բաղադրության ՔԿ-երի հիման վրա պատրաստված և, որ շատ կարևոր է, սենյակային ջերմաստիճանում աշխատող ֆոտոընդունիչները հնարավորություն են տալիս նաև շրջանցելու միջին ենթակարմիր տիրույթի սարքերում պահանջվող թանկարժեք կրիոգենային տեխնիկայի կիրառման անհրաժեշտությունը: *InAsSbP* բաղադրության երկրորդ սեռի ՔԿ-երով սարքային կառուցվածքում դիտված “անոմալ” ֆոտովոլտային երևույթը կարող է օգտագործվել արեգակնային և ջերմային էներգիայի փոխակերպիչներում՝ դրանց օգտակար գործողության գործակիցը մեծացնելու նպատակով:

**ՊԱՇՏՊԱՆՈՒԹՅԱՆ ԼԵԿՄԱՅԱՑՎԱԾ ՉԻՄՆԱԿԱՆ ԴՐՈՒՅԹՆԵՐԸ**

1. Հեղուկային էպիտաքսիան, նրա բյուրեղացման համակարգի և սաղմնառաջացման տեխնոլոգիական պայմանների կատարելագործման և համապատասխան ընտրության դեպքում, կարող է հաջողությամբ օգտագործվել նանոկառուցվածքների աճեցման նպատակով: *InAs* (100) տակդիրների վրա *In-As-Sb-P* քառաբաղադրիչ հեղուկ ֆազից Ստրանսկի-Կրաստանովի եղանակով աճեցվել են  $10^8 - 10^{10}$  սմ<sup>-3</sup> մակերևութային խտությամբ ռապիդակաձև և էլիպսարդային ՔԿ-եր, քվանտային օղակներ, ՔԿ - նանոխոռոչ համակարգեր և ՔԿ-երի շղթաներ:
2. *InAs* (100) տակդիրի վրա աճեցված *InAsSbP* քառաբաղադրիչ ենթամիկրոմետրական կոզյակների ծավալների փոքրացմանը զուգընթաց տեղի է ունենում դրանց երկրաչափական տեսքի փոփոխության հետևյալ հաջորդականությունը. հատած բուրգ, բուրգ, բարդ մակերևութային բուրգ և կիսագունդ: Կոզյակների բրգաձև տեսքից կիսագնդի անցման փորձնականորեն

- որոշված չափը կազմում է  $\approx 500$  նմ, որը համընկնում է տեսականորեն հաշվարկված արժեքի հետ:
3. Նանոկառուցվածքների ձևավորման ընթացքում դիտվում է երկմոդային սաղմնառաջացում: Բյուրեղացման ժամանակի մեծացմանը զուգընթաց ՔԿ-երի զույգավորման և օստվալդյան հասունացման երևույթների շնորհիվ փոխվում են ինչպես դրանց չափերը, այնպես էլ տեսքը և բաշխման ֆունկցիան: Օստվալդյան հասունացման ընթացքում տեղի է ունենում ռապիդակաձև ՔԿ-երի տեսքի փոփոխություն՝ անցում էլիպսարդային տեսքի: Ընդլայնման գործակիցները տարածական երեք ուղղություններով հավասար են՝  $L_x/L_y=1.23\pm 0.12$ ,  $L_x/L_z=9.2\pm 3.6$  և  $L_y/L_z=7.9\pm 3.5$ : Նանոկառուցվածքների աճի միջին շառավղային արագությունը  $\sim 0.05$  նմ/վ է:
  4. Աճի փոքր՝ մինչև 10 բուրգ ժամանակներում *InAsSbP* ՔԿ-երի աճի պրոցեսը դեկավարվում է մակերևութի վրա ռեակցիայի արագությամբ (Վագների բաշխում), որի գնահատված թվային արժեքը՝  $B \approx 2.65 \cdot 10^{-7}$  սմ/վ: Մեծ ժամանակների դեպքում (30 բուրգ և ավելի) պրոցեսը դեկավարվում է ծավալային դիֆուզիայով (Լիֆշից-Սլեգովի բաշխում), որի գործակցի թվային արժեքը՝  $D \approx 3.17 \cdot 10^{-12}$  սմ<sup>2</sup>/վ: Իսկ օստվալդյան հասունացման միջանկյալ ժամանակներում զանգվածի տեղափոխման այդ երկու մեխանիզմները գործում են միաժամանակ:
  5. *InAs* տակդիրի վրա աճեցվել են *InAsSb / InAsP* ՔԿ-երի մոլեկուլներ (ՔԿՄ), որոնք բաղկացած են կենտրոնական *InAsSb* ՔԿ-երից և դրանց շրջապատող հիմնականում վեց *InAsP* նանոխոռոչներից: Սենյակային ջերմաստիճանում դիտվում է ՔԿՄ-ի կլանման եզրի երկարալիքային շեղում  $\lambda=3.44$  մկմ-ից մինչև  $\lambda=3.85$  մկմ, ինչպես նաև կլանման սպեկտրի լայնացում մինչև  $\lambda=2.75$  մկմ կարճալիքային տիրույթ: Քիմիական խաձատման միջոցով ստեղծելով *InAs* (100) տակդիրի մակերևութի արհեստական ապատղղվածություն, աճեցվել են *InAsSb / InAsP* ՔԿՄ-ի 2-ից 5 մկմ երկարության համալրային շղթաներ: Սենյակային ջերմաստիճանում դիտվում է այդ համակարգի կլանման եզրի երկարալիքային շեղում մինչև  $\lambda=3.87$   $\mu\text{m}$ :
  6. *InAs\_{1-x-y}Sb\_xP\_y* և *GaAs\_{1-x-y}Sb\_xP\_y* քվազիեռաբաղադրիչ ու *Si\_{1-x-y}Ge\_xC\_y* եռաբաղադրիչ նյութական համակարգերում թրջող շերտի և տակդիրի ցանցի հաստատունների հարաբերական տարբերության ( $\varepsilon=\Delta a/a$ ) ինչպես բացարձակ արժեքը, այնպես էլ նշանը էապես ազդում են դրանց չափերի և սաղմնառաջացման մեխանիզմի վրա:  $\varepsilon$ -ի որոշակի կրիտիկական արժեքի դեպքում աճի մեխանիզմը փոխվում է ՔԿ-երի սաղմնառաջացումից նանոխոռոչի ձևավորում: Նշված երեք պինդ լուծույթներն ունեն բաղադրությունների կայուն, մետակայուն և ոչ կայուն (անհամատեղելիության) միջակայքեր, որոնք կախված են ջերմաստիճանից: Անհամատեղելիության տիրույթները փոքրանում են ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց:
  7. *InAsSbP* բաղադրության երկրորդ սեռի ՔԿ-երի առկայությունը *InAs* տակդիրի մակերևութի վրա բերում է մակերևութային դիմադրության մեծացման մեկ

կարգով՝ 15-20 Օմ-ց (ՖԸ-1) մինչև 180-200 Օմ (ՖԸ-2) և ունակության (լիցքի) մոտ 5 անգամ փոքրացման, ինչպես նաև վոլտ-ունակային բնութագրի վրա երկու «փոստերի» առաջացման՝ 0.28 Վ և 0.54 Վ լարումների դեպքում սենյակային ջերմաստիճանում:

8. *InAsSbP* երկրորդ սեռի ՔԿ-երով համակարգի 77 Կ ջերմաստիճանում վոլտ-ունակային բնութագրի վրա լարման մեծացման և փոքրացման ընթացքում դիտվում են ունակության հակադրված տատանումներ և  $\Delta C=0.483$  պՖ հիստերեզիս՝ լարման 1 ՄՀց հաճախության դեպքում: Հակադրված տատանումները պայմանավորված են ՔԿ-երի «լիցքավորման» և «լիցքաթափման» երևույթով, իսկ հիստերեզիսը՝ երկրորդ սեռի ՔԿ-երին բնորոշ և դրանցում առաջացող մնացորդային բևեռացմամբ:
9. Երկրորդ սեռի *InAsSbP* ՔԿ-երով համակարգի մագնիսադիմադրության կորի վրա դիտվում են բնութագրական «կոտրվածքների» տիրույթներ ինչպես սենյակային, այնպես էլ հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում: *X* ուղղությամբ թույլ ձգված և *Z* ուղղությամբ խիստ սեղմված էլիպսարդային ՔԿ-երի դեպքում առկա է մագնիսադիմադրության խիստ անիզոտրոպություն երեք ուղղություններով: Հեղուկ ազոտում մագնիսադիմադրության՝ ըստ մագնիսական դաշտի ածանցյալի կառուցման և հետազոտման միջոցով հաշվարկված ՔԿ-երում տեղայնացված խոռոչների՝ *InAs* տակդիրի վալենտական գոտու առաստաղին մոտակա չորս էներգիական մակարդակներն են՝  $h_1 = 0.53$  մԷՎ,  $h_2 = 0.91$  մԷՎ,  $h_3 = 1.55$  մԷՎ,  $h_4 = 2.32$  մԷՎ:
10. *InAs* տակդիրի վրա աճեցված *InAsSbP* բաղադրության չընկղված ոսպնյակաձև ՔԿ-երի՝ հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում չափված Ֆոտոլյումինեսցենցի (ՖԼ) սպեկտրի վրա դիտվում է մեկ մաքսիմում՝  $E=0.404$  էՎ էներգիայով, իսկ համանման էլիպսարդային ՔԿ-երի համար դիտվում է լրացուցիչ մաքսիմում ավելի փոքր՝  $E=0.397$  էՎ էներգիայով: 4 մկմ հաստություն և  $\approx 0.48$  էՎ արգելված գոտու լայնությամբ ( $T=78$  Կ ջերմաստիճանում) p-*InAsSbP* էպիտաքսային շերտի աճեցման միջոցով ընկղված ՔԿ-երի՝ հեղուկ ազոտում ՖԼ-ի սպեկտրի վրա դիտվում է խիստ արտահայտված մաքսիմում  $E=0.371$  էՎ էներգիայով (հիմնական մաքսիմումից «կարմիր» շեղումը կազմում է  $\approx 33.2$  մԷՎ), ինչպես նաև լրացուցիչ կոտրվածքներ՝  $E = 0.382$  էՎ,  $E = 0.39$  էՎ և  $E = 0.398$  էՎ էներգիաներով, որոնք բացակայում են չընկղված ՔԿ-երի ՖԼ-ի սպեկտրներում:
11.  $T=77$  Կ ջերմաստիճանում կատարված ֆոտոլյումինեսցենցի և մագնիսադիմադրության չափումների և հետազոտությունների համադրության արդյունքում *InAsSbP* ՔԿ-երում տեղայնացված խոռոչների փորձնականորեն որոշված էներգիական սպեկտրն է՝  $h_1=33.2$  մԷՎ,  $h_2=21.4$  մԷՎ,  $h_3=14.3$  մԷՎ,  $h_4=6.2$  մԷՎ,  $h_5=2.32$  մԷՎ,  $h_6=1.55$  մԷՎ,  $h_7=0.91$  մԷՎ և  $h_8=0.53$  մԷՎ (հաշվարկված *InAs* տակդիրի վալենտական գոտու առաստաղից), իսկ տեղայնացված թեթև խոռոչների արդյունաբար զանգվածը՝  $m^* = 0.029m_0$ :
12. *InAs* (100) տակդիրի և *InAsSbP* ՔԿ-երի հիման վրա ստեղծված են միջին ենթակարմիր տիրույթի նոր սերնդի ֆոտոդիմադրությաններ: Սենյակային

ջերմաստիճանում դրանց ֆոտոարձագանքի սպեկտրի վրա դիտվում են սպեկտրի ինչպես երկարալիքային շեղում՝ մինչև  $\lambda=3.7$  մկմ, այնպես էլ լրացուցիչ մաքսիմումներ  $\lambda=3.56$  մկմ և  $\lambda=3.65$  մկմ ալիքի երկարություններով: Արտաքին լարման նույնիսկ փոքր միջև  $\pm 2$  մՎ արժեքների դեպքում տեղի է ունենում լրացուցիչ մաքսիմումների թվային արժեքների էական մեծացում:  $U=\pm 1.5$  մՎ լարման դեպքում  $\lambda=3.65$  մկմ ալիքի երկարության վրա դիտված ֆոտոարձագանքի արժեքը գործնականորեն հավասարվում է հիմնական  $\lambda=3.48$  մկմ ալիքի երկարությանը համապատասխանող մաքսիմումի արժեքին: Ստեղծված ֆոտոդիմադրությունները կարող են աշխատել սենյակային ջերմաստիճանում որպես «բազմագույն» ֆոտոընդունիչներ, և որպես սնուցման աղբյուր կարելի է օգտագործել փոքր չափերի և հզորության մարտկոցներ:

13. Երկրորդ սեռի ՔԿ-երով ստեղծված սարքային կառուցվածքներում դիտվել է ֆոտովոլտային երևույթ: He-Ne լազերի ենթակարմիր ճառագայթման  $\lambda=3.39$  մկմ ալիքի երկարության դեպքում սենյակային ջերմաստիճանում գրանցված լարման և հոսանքի զգայունությունների առավելագույն արժեքները կազմել են համապատասխանաբար 2 Վ/Վտ և 82 մԱ/Վտ: Սենյակային ջերմաստիճանում  $\lambda=1.15$  մկմ ալիքի երկարությամբ լազերային ճառագայթման դեպքում ՔԿ-երով ֆոտոդիմադրության մակերևութային դիմադրությունը փոքրացել է 14 %-ով, իսկ  $\lambda=3.39$  մկմ-ի դեպքում՝ միջև 17 %:
14. Ստեղծվել են միջին ենթակարմիր տիրույթի ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչներ՝ n-*InAs* /p-*InAsSbP* դիոդային հետերոկառուցվածքների տեսքով, որոնց p-n անցման սահմանում ընկղված են 10-ից 30 նմ տրամագծով և 3-ից 20 նմ բարձրությամբ ՔԿ-եր: Սենյակային ջերմաստիճանում ՔԿ-երով դիոդային հետերոկառուցվածքի կլանման և հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում ֆոտոլյումինեսցենցի սպեկտրների վրա դիտվել է երկարալիքային շեղում:

### ՄԵՂՄՆԱԳՐՈՒՄ ԿՍՏԱՐՎԱԾ ՀՂՈՒՄՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

1. D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. Quantum Dot Heterostructures, Wiley, New York, 1998.
2. A. Krier (Ed.). Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics (Springer Series in Optical Sciences), Springer-Verlag London Limited ©, 2006.
3. Է.Մ. Ղազարյան, Ս.Գ. Պետրոսյան. Կիսահաղորդչային նանոէլեկտրոնիկայի ֆիզիկական հիմունքները, Երևան, ՌՀՀ հրատարակչություն, 424 էջ, 2005.
4. A. Rogalski. *Acta Physica Polonica A* **116**, 389 (2009).
5. P. Bhattacharya, X.H. Su, S. Chakrabarti, G. Ariyawansa, A.G.U. Perera. *Appl. Phys. Lett.* **86**, 191106 (2005).
6. A. Krier, Z. Labadi, A. Hammiche. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32**, 2587 (1999).
7. J. Wu, D. Shao, V.G. Dorogan, A.Z. Li, S. Li, E.A. DeCuir, Jr., M.O. Manasreh, Z.M. Wang, Y.I. Mazur, G.J. Salamo. *Nano Letters* **10**, 1512-1516 (2010).
8. K.G. Dvovyan, D.B. Hayrapetyan, E.M. Kazaryan, A.A. Tshantshapanyan. *Nanoscale Res. Lett.* **2**, 601 (2007); *Nanoscale Res. Lett.* **4**, 106 (2008).

**ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԳԻՏԱԿԱՆ ՆԵՐԿԱՑԱՑՈՒՄՆԵՐԸ**

Ատենախոսությունում ներկայացված գիտական հետազոտությունների արդյունքները զեկուցվել են ԵՊՀ կիսահաղորդիչների ֆիզիկայի և միկրոէլեկտրոնիկայի ամբիոնի և ռադիոֆիզիկայի ֆակուլտետի գիտական սեմինարներում, ՀՀ ԳԱԱ տարեկան գիտական նստաշրջանում, Ռուս-Հայկական (Սլավոնական) համալսարանում, ՀՀ-ում կայացած ազգային և միջազգային գիտաժողովներում: Աշխատանքները երեք անգամ (2001, 2005 և 2011 թ.թ.) զեկուցվել են Տրիեստի (Իտալիա) Ա. Սալամի անվան տեսական ֆիզիկայի միջազգային կենտրոնի սեմինարներում և գիտաժողովներում: Հրավիրված զեկուցման կարգավիճակով աշխատանքները ներկայացվել են Բեռլինի Հումբոլդի համալսարանի ֆիզիկայի ինստիտուտում (2002), Էռլանգեն-Լյուդնբերգի համալսարանում (Գերմանիա, 2002), Լայբնիցի անվան բյուրեղների աճեցման ինստիտուտում (Բեռլին, Գերմանիա, 2002, 2004, 2007, 2011 և 2012 թ.թ.) և Կորկի համալսարան-քոլեջում (Իռլանդիա, 2011): Ատենախոսությունում ներկայացված գիտական աշխատանքները զեկուցվել են նաև հետևյալ միջազգային գիտաժողովներում և համաժողովներում. The World Renewable Energy Network International Seminar in Britain, 4-11 September, 1999, Brighton, UK; The World Renewable Energy Congress, 1-7 July, 2000, Brighton, UK; The 35<sup>th</sup> International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS-2008), 21-24 September, 2008, Freiburg, Germany; Collaborative Conference on Interacting Nanostructures (CCIN-2009), November 9-13, 2009, San Diego, CA, USA; The 12<sup>th</sup> International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-12), 5-10 July, 2009, Weimar, Germany; Villa Conference on Interaction among Nanostructures (VCIAN-2010), June 21-26, 2010, Santorini, Greece; World Renewable Energy Congress, 25-30 September 2010, Abu Dhabi, UAE; Villa Conference on Interaction among Nanostructures (VCIAN-2011), April 21-25, 2011, Las Vegas, Nevada, USA; International Conference on Nanoscience and Technology (ChinaNANO-2011), 7-9 September, 2011, Beijing, China; Joint ICTP-FANAS Conference: Trends on Nanotribology, 12-16 September, 2011, Trieste, Italy.

Ներկայացված աշխատանքների հիման վրա իրականացվել է “Armenian National Science and Education Fund” (ANSEF, Condmatex-2425), New York, USA (2011 թ.) միջազգային դրամաշնորհը: Իրականացվում է նաև հայ-գերմանական միջպետական (MES-BMBF\_STC Project, 2013 թ.) գիտական ծրագիրը:

**ՏՊԱԳՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ**

Ատենախոսությունում ներկայացված արդյունքները տպագրվել են 39 գիտական աշխատանքներում, որոնցից 31-ը հոդվածներ են գրախոսվող միջազգային և ազգային գիտական ամսագրերում, 7-ը թեզիսներ և 1-ը՝ ուսումնագիտական ձեռնարկ: Տպագրված աշխատանքների ցանկը ներկայացված է սեղմնագրի վերջում:

**ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԸ ԵՎ ՕՍԿՎԱԼԸ**

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, վեց գլխից, եզրակացությունից և հղումների 138 անուն պարունակող գրականության ցանկից: Աշխատանքում առկա են 106 նկար և 6 աղյուսակ, իսկ աշխատանքի ընդհանուր ծավալը 262 էջ է:

**ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ**

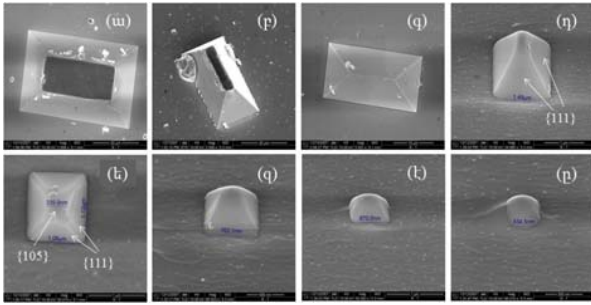
**Առաջին գլխում** կատարված է ատենախոսությունում ներկայացված և քննարկված գիտական և կիրառական խնդիրներին վերաբերվող գրականության վերլուծություն: Համակարգվել են էպիտաքսային թաղանթների և նանոկառուցվածքների աճեցման գործնականորեն բոլոր տեխնոլոգիական եղանակները և մեթոդները: Հակիրճ ներկայացված են դրանց աշխատանքի ֆիզիկական և տեխնոլոգիական սկզբունքները, ինչպես նաև յուրաքանչյուր մեթոդի առավելությունները և թերությունները: Նկարագրված են հետերոէպիտաքսիայի և նանոկառուցվածքների սաղմնառաջացման հիմնական Ֆրանկ-Վան-դեր-Մերվեի, Վոլմեր-Վեբերի և Ստրանսկի-Գրաստանովի մեթոդները: Ներկայացված են նանոկառուցվածքների հիմնական ֆիզիկական հատկությունները և դրանց կիրառական նշանակությունը: Նկարագրված են նաև ենթակարմիր տիրույթում աշխատող կիսահաղորդչային սարքերի՝ ֆոտոդիմադրությունների, ֆոտոդիոդների և ջերմաֆոտովոլտային փոխակերպիչների հատկությունները, ինչպես նաև այդ սարքերում նանոկառուցվածքների կիրառման առանձնահատկությունները, կարևորությունը և առավելությունները: Ներկայացված են տեսաձևով էլեկտրոնային մանրադիտակի (ՏԷՄ) և ատոմաուժային մանրադիտակի (ԱՌԻՄ) և ենթակարմիր սպեկտրոմետրի (ՖՁԵՄ) աշխատանքային բնութագրերը և հնարավորությունները:

**Երկրորդ գլխում**

նկարագրվում է քվանտաչափային կառուցվածքների նանոձարտարագիտության նպատակով եռաբաղադրիչ պինդ լուծույթների օգտագործման նոր նյութաբանական և տեխնոլոգիական գաղափարը: Փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ հեղուկ ֆազի բաղադրության համապատասխան ընտրությամբ, որը համարժեք է թրջող շերտի ցանցի հաստատունի ընտրությանը, կարելի է Ստրանսկի-Գրաստանովի (Մ-Գ) մեթոդով աճեցնել տարբեր նանոկառուցվածքներ:  $A^3B^5_{1-x-y}C^5_xD^5_y$  քառաբաղադրիչ թրջող շերտի երրորդ ( $C^5$ )

և չորրորդ ( $D^5$ ) տարրերի կոնցենտրացիաների համապատասխան ընտրությամբ կարելի է ապահովել տակդիրի նկատմամբ ցանցերի հաստատունների հարաբերական տարբերության ինչպես դրական (թրջող շերտի ուռուցիկ էլաստիկ դեֆորմացիա), այնպես էլ բացասական (թրջող շերտի գոգավոր էլաստիկ դեֆորմացիա) արժեքներ: Լարվածության ռելաքսացիայի հետևանքով առաջին դեպքում առաջանում են ՔԿ-եր, իսկ երկրորդ դեպքում ձևավորվում են նանոխոռոչներ: Հնարավոր է աճեցնել նաև ՔԿ-նանոխոռոչներ համալրային նանոկառուցվածքներ:

Հետազոտվել են *InAs*(100) տակդիրի վրա աճեցված *InAsSbP* բաղադրության ենթամիկրոմետրական կոզյակներ: Ցույց է տրվել, որ կոզյակների ծավալի փոքրացմանը զուգընթաց տեղի է ունենում դրանց երկրաչափական տեսքի փոփոխություն հետևյալ հաջորդականությամբ՝ հատած բուրգ, բուրգ, բարդ մակերևույթով բուրգ և կիսագունդ (նկ.1):



**Նկ.1.** InAs(100) տակդիրի վրա հեղուկ ֆազից աճեցված InAsSbP կղզակների երկրաչափական տեսքի ձևափոխության ժամանակագրությունը

Փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ InAsSbP բաղադրության կղզակների՝ բրգաձևից կիսագունդ

տեսքի անցման կրիտիկական չափը կազմում է  $\approx 500$  նմ: Քանակապես հաշվարկվել են InAsSbP և SiGe բաղադրության կղզակների կրիտիկական չափերը, երբ բրգաձև կղզակը ձևափոխվում է կիսագնդի: Հաշվարկված արժեքները համընկնում են փորձարարական տվյալների հետ:

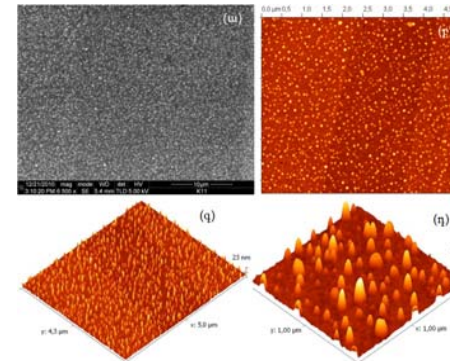
Ենթամիկրոմետրական կղզակների բյուրեղաֆիզիկական հատկությունների հետազոտման համար առաջարկվել է օգտագործել «կիզակետված իոնային փնջեր» (FIB) սարքավորման և SEU-ի հնարավորությունները: Մասնավորապես, օգտագործելով «SEM-EDXA–FEI Nova 600-Dual Beam» սարքավորումը, բարձր ( $10^{-8}$  մմ ս.ս.) վակուումում բրգաձև կղզակները սկզբից «կտրվել» են գալիումի ատոմների կիզակետված փնջի միջոցով: Այնուհետև չափվել է կղզակների բաղադրությունը բուրգի հիմքի երկու եզրային կետերում, վերին հիմքի երկու եզրային կետերում և կենտրոնում: SEU չափումների և հաշվարկների արդյունքում ցույց է տրվել, որ բրգաձև կղզակները ունեն InAsSbP քառասարք բաղադրություն և որ առավելագույն լարվածությունը դիտվում է հասած բուրգի հիմքի գագաթներում և տակդիրի հետ բաժանման սահմանում, իսկ փոքրագույն լարվածությունը՝ բուրգի վերին նիստի կենտրոնում: Առաջարկված մեթոդը կիրառվել է նաև ածխածնային նանոխողովակների հետազոտման համար. Մասնավորապես, չափվել են դրանց մակերևութային խտությունը, երկարությունը, ներքին և արտաքին տրամագծերը:

Քառաբաղադրիչ հեղուկ ֆազում ֆոսֆորի մեծ կոնցենտրացիայի դեպքում տակդիրի մակերևութի վրա դիտվում են նաև ենթամիկրոմետրական «հակադարձ» բրգաձև խոռոչներ: Տակդիրի հետ բրգաձև խոռոչների բաժանման սահմանի, հիմքի գագաթների և կողմնային նիստերի վրա կատարած SEU չափումների արդյունքում ցույց է տրվել, որ խոռոչների նիստերը հարստացած են ֆոսֆորով, իսկ լարվածության բաշխումը ֆիզիկորեն նույնն է ինչ որ բրգաձև կղզակների մոտ: Քանի որ լարվածությունն ընդունում է իր առավելագույն արժեքը խոռոչի և տակդիրի բաժանման սահմանում, ապա այդ ուղղությունները դառնում են ՔԿ-երի ձևավորման առավելագույն շահավետ տիրույթներ: Նկարագրվել են նոր տիպի կառուցվածքներ, որոնք բաղկացած են նանոմետրական և ուղղանկյունաձև դասավորված ՔԿ-երի շղթայով շրջապատված ենթամիկրոմետրական խոռոչներից: Այդ կառուցվածքների բյուրեղաֆիզիկական հատկությունները մանրամասն ուսումնասիրվել են նաև ԱՌԻՄ-ի միջոցով: Ծարիրով հարստացված InAsSbP բաղադրության կղզակների և ֆոսֆորով հարստացված խոռոչների (դրանց կողմնային մակերևութների)

ձևավորման ֆիզիկական պատճառները բացատրվել են Sb-ի և P-ի հակուղղված մակերևութային դիֆուզիայով և As-ի ենթացանցում դրանց տեղակայմամբ:

**Երրորդ գլուխը** նվիրված է In–As–Sb–P համակարգում նանոմետրական կառուցվածքների աճեցմանը և հետազոտմանը: Ցույց է տրվել, որ հեղուկային էպիտաքսիան, նրա բյուրեղացման համակարգի և սաղմնառաջացման տեխնոլոգիական պայմանների կատարելագործման և համապատասխան ընտրության դեպքում, կարող է հաջողությամբ օգտագործվել նանոկառուցվածքների աճեցման նպատակով, կիրառելով սաղմնառաջացման ավանդական Մ–Կ մեթոդը: Այս եզրահանգումն սկզբունքորեն հերքում է այն կարծիքը, որ բարձր սկզբնական արագության պատճառով ՀԷ-ն չի կարող օգտագործվել ենթամիկրոմետրական և նանոմետրական կառուցվածքներ աճեցնելու համար:

Ցույց է տրվել, որ In–As–Sb–P նյութական համակարգում նանոկառուցվածքների ձևավորման ընթացքում ինչպես ցանցի հաստատունների հարաբերական տարբերության արժեքը, այնպես էլ տակդիրի բյուրեղագրական բնութագրերն ունեն կարևորագույն նշանակություն նանոկառուցվածքների ձևավորման ընթացքում: Մասնավորապես, երբ InAs տակդիրի հետ բյուրեղական ցանցով համաձայնեցված InAs<sub>0.87</sub>Sb<sub>0.04</sub>P<sub>0.09</sub> բաղադրության թրջող շերտում մեծացվում է ծարիրի բաղադրությունը, ձևավորվում են ոսպնյակաձև ՔԿ-եր, իսկ թրջող շերտի InAs<sub>0.75</sub>Sb<sub>0.08</sub>P<sub>0.17</sub> բաղադրության դեպքում՝ քվանտային օղակներ: Քվանտային օղակների ձևավորումը բացատրվում է այն բանով, որ հեղուկ ֆազում և թրջող շերտում ծարիրի և ֆոսֆորի մեծ քանակությունը բերում է լարվածության լրացուցիչ ռելաքսացիայի արդեն առաջացած ՔԿ-երում, ֆոսֆորի ատոմների՝ դեպի ՔԿ-երի կենտրոն (գագաթ) շարժման շնորհիվ: Երբ նանոկառուցվածքները ձևավորվում են հիմնական բյուրեղագրական ուղղությունից շեղված, կամ քիմիական խաճատման միջոցով արհեստականորեն շեղված InAs (100) տակդիրի մակերևութի վրա, ապա աճում են համապատասխանաբար էլիպսարդային ՔԿ-եր և ՔԿ-երի շղթաներ:



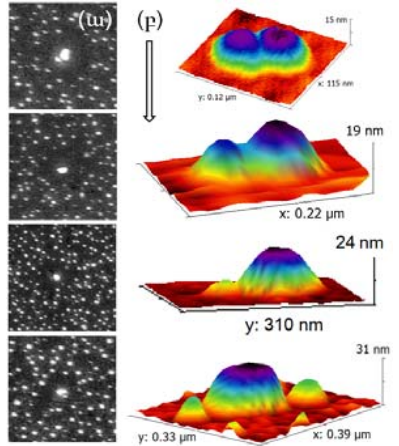
**Նկ.2.** InAs(100) տակդիրի վրա ՀԷ-ի եղանակով աճեցված ( $t=10$  ր) ոսպնյակաձև InAsSbP ՔԿ-երի SEU (ա) ( $S=40 \times 40$  մկմ<sup>2</sup>) և ԱՌՄ (բ-դ) ( $S=5 \times 5$  մկմ<sup>2</sup> և  $S=1 \times 1$  մկմ<sup>2</sup>) պատկերները

Օգտագործելով  $X_{InAs} = 0.0213$ ,  $X_{Sb} = 0.126$  և  $X_{InP} = 1.656 \times 10^{-4}$  մոլային մասերով քառաբաղադրիչ հեղուկ ֆազ, որի դեպքում ապահովվում է InAs<sub>1-x-y</sub>Sb<sub>x</sub>P<sub>y</sub> ( $x=0.0416$ ;  $y=0.0892$ ) թրջող շերտի և InAs (100) տակդիրի ցանցի

հաստատունների 3% հարաբերական տարբերություն, աճեցվել են InAsSbP երկրորդ սեռի ոսպնյակաձև ՔԿ-եր (նկ.2): Մաղմնառաջացման պրոցեսն իրականացվել է իզոթերմ՝  $T=550^\circ\text{C}$  ջերմաստիճանում: ՔԿ-երն աճեցվել են երեք



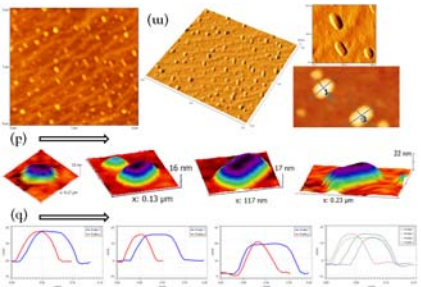
ժամանակահատվածներում՝  $t_1=10$  րոպե,  $t_2=20$  րոպե և  $t_3=30$  րոպե. ՏԷՄ և ԱՌԻՄ (AFM Asylum Research MFP-3D) սարքերով հետազոտվել են այդ ՔԿ-երի կառուցվածքային հատկությունները բավական մեծ՝  $S \approx 1500$  մկմ<sup>2</sup> մակերևույթի վրա: Ցույց է տրվել, որ նանոհամակարգը բաղկացած է բավական համասեռ բաշխված,  $(6-8) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup> մակերևութային խտությամբ, 10-ից 40 նմ միջին տրամագծով և 0.5-ից 15 նմ բարձրությամբ ՔԿ-րից, որոնց հետ համատեղ առկա են նաև մոտ երեք կարգով փոքր խտությամբ և համապատասխանաբար 70 նմ-ի և 25 նմ-ի կարգի տրամագծով և բարձրությամբ ՔԿ-եր (նկ.3ա): Նանոկառուցվածքների ձևավորման ընթացքում դիտված երկմոդային սաղմնաառաջացումը բացատրվում է համակարգում ՔԿ-երի գոյգավորման և օստվալոյան հասունացման պրոցեսներով:



**Նկ.3.** (ա) InAs(100) տակդիրի վրա հեղուկ ֆազից աճեցված ( $t=20$  ր) ՔԿ-երի ՏԷՄ պատկերները, (բ) օստվալոյան հասունացման ԱՌԻՄ ժամանակագրությունը

Նկար 3բ-ում պատկերված է ԱՌԻՄ-ով ուսումնասիրված ՔԿ-երի գոյգավորման և օստվալոյան հասունացման ժամանակագրությունը: Ցույց է տրվել, որ բյուրեղացման ժամանակի մեծացման արդյունքում տեղի է ունենում ոսպնյակաձև ՔԿ-երի փոխակերպում էլիպսարդային տեսքի, ընդ որում ընդլայնումը տեղի է ունենում հիմնականում InAs(100) տակդիրի մակերևույթի [010] ուղղությամբ: Էլիպսարդային ՔԿ-երի (նկ.4ա,բ)

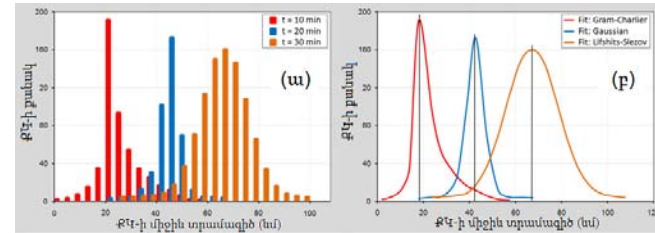
մակերևութային խտությունը կազմել է  $(5-8) \times 10^8$  սմ<sup>-2</sup>: Օգտագործելով ԱՌԻՄ-ի գծային տեսածրման հնարավորությունը՝ (նկ.4գ), չափվել են էլիպսարդային ՔԿ-երի չափերը երեք ուղղություններով ( $X$  առանցքը ուղղվել է տակդիրի [010] ուղղությամբ) և հաշվարկվել են էլիպսարդային ՔԿ-երի ընդլայնման գործակիցները ( $L_x/L_y$ )  $X$ ,  $Y$  և  $Z$  ուղղություններով  $L_x/L_y=1.23 \pm 0.12$ ,  $L_x/L_z=9.2 \pm 3.6$  և  $L_y/L_z=7.9 \pm 3.5$ : Ստացված արդյունքից երևում է, որ աճեցված էլիպսարդային ՔԿ-երը թույլ ձգված են  $X$  ուղղությամբ և խիստ սեղմված՝  $Z$  ուղղությամբ:



**Նկ.4.** (ա, բ) էլիպսարդային ՔԿ-երի ԱՌԻՄ պատկերները, (գ) ԱՌԻՄ տեսածրման պատկերները  $X$ - և  $Y$  ուղղություններով

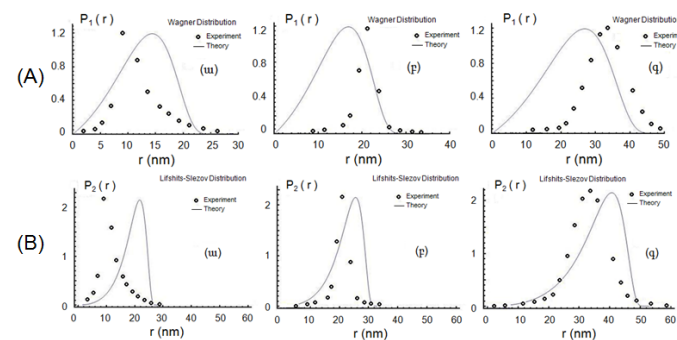
Հետազոտվել է ոսպնյակաձև և էլիպսարդային ՔԿ-երի թվի կախումը դրանց միջին տրամագծից: ԱՌԻՄ չափումների

վիճակագրությունը կատարվել է  $S=300$  մկմ<sup>2</sup> մակերևույթից: Հայտնաբերվել է, որ բյուրեղացման ժամանակի մեծացման ընթացքում տեղի է ունենում ՔԿ-երի բաշխման ֆունկցիայի տեսքի ձևափոխություն (նկ.5): Մասնավորապես, ցույց է տրվել, որ փորձնականորեն ստացված բաշխումը ոսպնյակաձև ՔԿ-երի համար մեծ ճշտությամբ մոտարկվում է Գրամ-Շարլիերի ֆունկցիայով (մոտարկման ճշտությունը  $\sim 97\%$ ), իսկ էլիպսարդային ՔԿ-ր համար՝ գաուսիանով (մոտարկման ճշտությունը  $\sim 99\%$ ), որն այնուհետև ձևափոխվում է Լիֆշից-Սլեզով-Վագների տեսքի բաշխման: Նանոկառուցվածքների չափերի բյուրեղացման ժամանակային կախումից որոշվել է դրանց աճի միջին շառավղային արագությունը, որը կազմել է  $\sim 0.05$  նմ/վ:



**Նկ.5.** (ա)  $t_1=10$  ր,  $t_2=20$  ր և  $t_3=30$  ր-ում աճեցված ՔԿ-երի քանակի՝ դրանց միջին տրամագծից կախման հիստոգրամները և (բ) մոտարկման կորերը

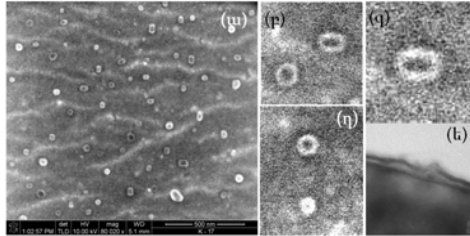
Կիրառելով Լիֆշից-Սլեզով-Վագների տեսությունը՝ բացատրվել է ՔԿ-երի փորձնականորեն ստացված բաշխման ֆունկցիայի տեսքի ձևափոխումը: Մասնավորապես, ցույց է տրվել, որ աճի փոքր ժամանակներում  $InAsSbP$  համակարգում, ՔԿ-երի բաշխումն ավելի լավ համապատասխանում է Վագների բաշխմանը (նկ.6A-ա), այսինքն՝ աճի պրոցեսը ղեկավարվում է մակերևույթի վրա ռեակցիայի արագությամբ, որի գնահատված թվային արժեքը՝  $B \approx 2.65 \cdot 10^{-7}$  սմ/վ: Մեծ ժամանակների դեպքում ՔԿ-երի բաշխումը համապատասխանում է Լիֆշից-Սլեզով բաշխմանը (նկ.6B-գ), այսինքն՝ պրոցեսը ղեկավարվում է ծավալային դիֆուզիայով, որի գործակցի թվային արժեքը՝  $D \approx 3.17 \cdot 10^{-12}$  սմ<sup>2</sup>/վ: Ենթադրվել է, որ ՔԿ-երի հասունացման միջանկյալ ժամանակներում զանգվածի տեղափոխման այդ երկու մեխանիզմները գործում են միաժամանակ:



**Նկ.6.** Տարբեր ժամանակներում  $InAsSbP$  ՔԿ-րի (ա) 10ր, (բ) 20ր, (գ) 30ր նորմավորված բաշխումներն ըստ շառավղի: Կետերը փորձի տվյալներն են, կորերը՝ Վագների (A) և Լիֆշից-Սլեզովի (B) բաշխումները



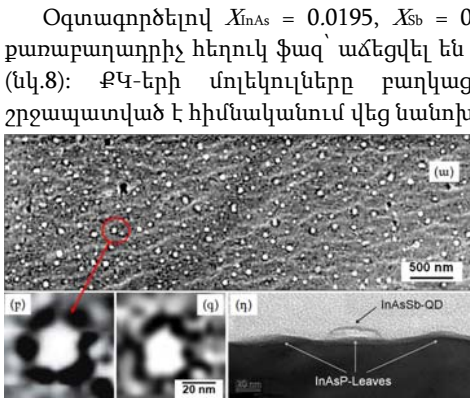
Օգտագործելով  $X_{InAs} = 0.0147$ ,  $X_{Sb} = 0.205$  և  $X_{InP} = 2,663 \times 10^{-4}$  մոլային մասերով քառաբաղադրիչ հեղուկ ֆազ, որի դեպքում ապահովվել է  $InAs_{1-x-y}Sb_xP_y$  ( $x=0.073$ ;  $y=0.156$ ) թրջող շերտի և  $InAs(100)$  տակդիրի ցանցի հաստատունների 4% հարաբերական տարբերություն, աճեցվել են քվանտային օղակներ (նկ.7), որոնց խտությունը կազմել է  $(1-3) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup>:



**Նկ.7.** (ա-դ) Օղակաձև ՔԿ-երի ՏԷՄ պատկերները: (ե) ՔՕ-ի լայնական կտրվածքի ԹԷՄ պատկերը

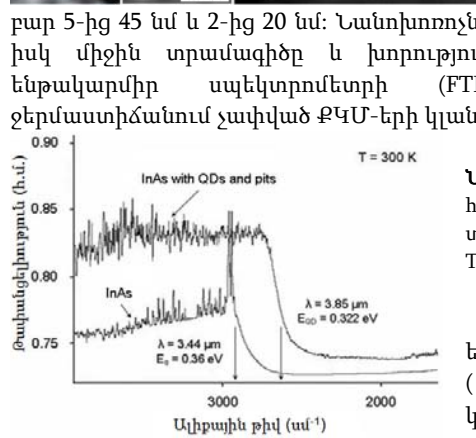
Ցույց է տրվել, որ դրանց քանակի կախումն արտաքին տրամագծից լավ մոտարկվում է գաուսիանով, արտաքին տրամագծի օպտիմալ արժեքը հավասար է 35 նմ-ի, ներքին տրամագիծը փոփոխվել է 1-ից 10 նմ, իսկ դրանց միջին բարձրությունը 10 նմ կարգի է:

Օգտագործելով  $X_{InAs} = 0.0195$ ,  $X_{Sb} = 0.1228$  և  $X_{InP} = 1.7 \times 10^{-4}$  մոլային մասերով քառաբաղադրիչ հեղուկ ֆազ՝ աճեցվել են  $InAsSb/InAsP$  ՔԿ-երի մոլեկուլներ (ՔԿՄ) (նկ.8): ՔԿ-երի մոլեկուլները բաղկացած են կենտրոնական ՔԿ-րից, որը շրջապատված է հիմնականում վեց նանոխոռոչներով և ունի երիցուկ բույսի տեսք:



**Նկ.8.** (ա-գ)  $InAsSb$ -ՔԿ/ $InAsP$ -նանոխոռոչներ ՔԿՄ-ի ՏԷՄ պատկերները: (դ) ՔԿՄ-ի լայնական կտրվածքի ԹԷՄ պատկերը

ՔԿ-երի (ՔԿՄ-երի) մակերևութային խտությունը կազմել է  $(0.8-2) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup>, իսկ դրանց միջին տրամագիծը և բարձրությունը՝ համապատասխանաբար 5-ից 45 նմ և 2-ից 20 նմ: Նանոխոռոչների խտությունը կազմել է  $(6-10) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup>, իսկ միջին տրամագիծը և խորությունը՝ 5-ից 40 նմ: Ֆուրյե-ձևափոխման ենթակարմիր սպեկտրոմետրի (FTIR-Nicolet/NEXUS) միջոցով  $T=300$ Կ ջերմաստիճանում չափված ՔԿՄ-երի կլանման սպեկտրը բերված է նկ.9-ում:

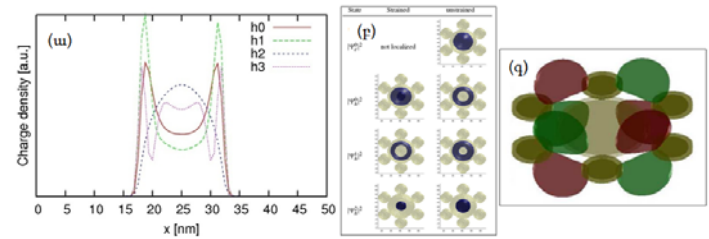


**Նկ.9.**  $InAsSb/InAsP$  ՔԿ-նանոխոռոչներ համակարգի և թեստային նմուշի՝  $InAs(100)$  տակդիրի թափանցելիության սպեկտրները  $T=300$ Կ ջերմաստիճանում:

Դիտվել է ՔԿՄ-ի կլանման եզրի երկարալիքային շեղում  $\lambda=3.44$  մկմ-ից ( $InAs$  արդյունաբերական տակդիրի կլանման եզրը) մինչև  $\lambda=3.85$  մկմ, ինչպես

նաև կլանման սպեկտրի լայնացում մինչև  $\lambda=2.75$  մկմ կարճալիքային տիրույթ:

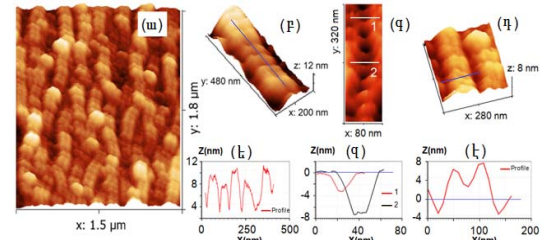
Օգտագործելով ութ-գոտիական **կ-ք** մոդելը՝ տեսականորեն հետազոտվել են  $InAsSb/InAsP$  ՔԿՄ-ի օպտոէլեկտրոնային հատկությունները (նկ.10):



**Նկ.10.** (ա, բ) Ոսպնյակաձև ՔԿ-ում խոռոչների լիցքի խտության բաշխումը և տոպոլոգիան: (գ) բևեռացման պոտենցիալի 3D պատկերը

Ցույց է տրվել, որ տեղի է ունենում խոռոչների խիստ տեղայնացում ՔԿՄ-ի կենտրոնական ՔԿ-ում, ինչպես նաև հնարավոր է էլեկտրոնների թույլ տեղայնացում (նկ.10բ), որոնք սակայն կարող են հեշտությամբ դուրս մղվել ՔԿ-ից, մասնավորապես արտաքին էլեկտրական դաշտի կամ ՔԿ-ում առկա էլաստիկ դեֆորմացիայի ազդեցության շնորհիվ: Հաշվարկվել է ՔԿՄ-ի էներգիական սպեկտրը (տեղայնացած խոռոչների առաջին չորս մակարդակները) և բևեռացման պոտենցիալի մեծագույն արժեքը (նկ.10գ), որը կազմել է  $\pm 1.33$  մՎ:

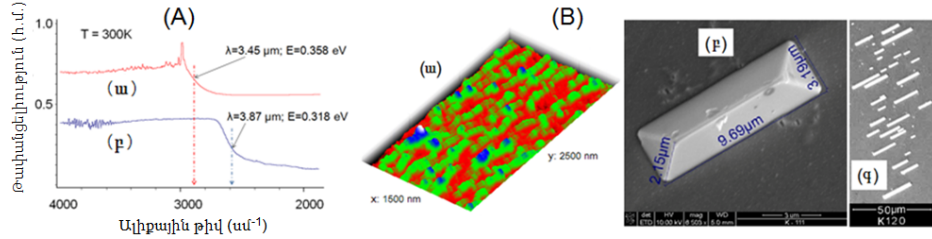
Նախապես խաձառված ( $CH_3OH : Br_2 = 4 : 1$ )  $InAs(100)$  տակդիրի վրա քառաբաղադրիչ հեղուկ ֆազից աճեցվել են ՔԿ-երի շղթաներ, որոնք հիմնականում ուղղորդված են եղել [010] ուղղությամբ և ունեցել են 2-ից 5 մկմ երկարություն (նկ.11):



**Նկ.11.** (ա-դ) ՔԿ-երի շղթաների ԱՌԻՄ պատկերները: (ե-է) – (բ,գ,դ)-ում նշված ուղղություններով տեսածրման հետազոտերը

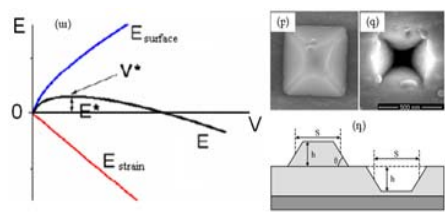
Ցույց է տրվել, որ խաձատիչի ճիշտ ընտրության դեպքում քիմիական խաձատումը կարող է հաջողությամբ օգտագործվել տակդիրի մակերևութային վրա երեք ազիմուտալ ուղղություններով համապատասխան ապառաղորդվածություն ստեղծելու նպատակով, սաղմնաառաջացման հետագա ավելի շահավետ ուղղություններ ապահովելու համար: ԱՌԻՄ հետազոտությունները ցույց են տվել, որ ՔԿՄ-ի շղթաները բաղկացած են հիմնականում գույգավորված կենտրոնական ՔԿ-երի շղթայից, որոնք գույգորդված են նանոխոռոչների եզրային շղթաներով: ՔԿՄ-ի շղթաների պարբերությունը կազմել է  $\approx 120$  նմ, ՔԿ-երի և նանոխոռոչների միջին տրամագիծը եղել է համապատասխանաբար  $40 \pm 7$  նմ և  $20 \pm 5$  նմ, իսկ դրանց մակերևութային խտությունը՝  $(2-5) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup> և  $(1-3) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup>: ՔԿՄ-ի շղթայի ՔԿ-երի կենտրոնական ենթաշղթաների միջև հեռավորությունը եղել է 5-ից 20 նմ, ՔԿ-երի բարձրությունը՝ 10 նմ-ի կարգի, իսկ նանոխոռոչների խորությունը՝ մինչև 5 նմ:

Մենյակային ջերմաստիճանում դիտվել է ՔԿ շղթաների կլանման եզրի երկարալիքային շեղում՝ մինչև  $\lambda=3.87 \mu\text{m}$  (նկ.12-A): Ցույց է տրվել, որ բյուրեղացման ժամանակահատվածի մեծացմանը զուգընթաց դիտվում է ՔԿ-երի շղթաների միավորում, դրանց չափերի մեծացում, որի հետևանքով ՔԿՄ-ի շղթաները վերածվում են մի քանի տասնյակ միկրոմետր երկարությամբ և մի քանի միկրոմետր լայնությամբ և բարձրությամբ ձգված բուրգերի (նկ.12-B):



**Նկ.12.** (A) Խճճատված տակդիրի (ա) և ՔԿ շղթաների (բ) կլանման սպեկտրները սենյակային ջերմաստիճանում: B մեկ ժամում (ա) աճեցված ՔԿ լարերի ԱՌԻՄ պատկերը և 2 ժամվա ընթացքում (բ, գ) աճեցված միկրոմետրական ձգված բրգաձև կղզակների ՏԷՄ պատկերները

**Չորրորդ գլուխը** նվիրված է եռաբաղադրիչ համակարգերում նանոկառուցվածքների մրցակցային սաղմնառաջացման հետազոտմանը: Օգտագործելով հոծ միջավայրի առաձգականության մոդելը՝ կատարվել է ՔԿ-երի և նանոխոռոչների մրցակցային սաղմնառաջացման պրոցեսի քանակական ուսումնասիրություն երեք  $InAs_{1-x-y}Sb_xP_y$ ,  $GaAs_{1-x-y}Sb_xP_y$  և  $Si_{1-x-y}Ge_xC_y$  նյութական համակարգերում: Հաշվարկված են նանոկղզակների (նկ.13) լրիվ էներգիաները (1), ինչպես նաև դրանց կրիտիկական էներգիայի (2) և ծավալի (3) կախումները թրջող շերտի և տակդիրի ցանցի հաստատունների հարաբերական տարբերությունից ( $\varepsilon=\Delta a/a$ ): Հաշվի է առնված թրջող շերտի հաստության կախումը  $\varepsilon$ -ից: Փորձարարական տվյալների մոտարկման մեթոդով արտածվել է համապատասխան փորձառական բանաձև (4):



**Նկ.13.** (ա) ՔԿ-երի (նանոխոռոչի) լրիվ ազատ էներգիայի կախումը կղզակի ծավալից:  $InAsSbP$  բաղադրության բրգաձև կղզակի (բ) և նանոխոռոչի (գ) ՏԷՄ պատկերները և (դ) դրանց սխեմատիկ ներկայացումը

$$E = 4 \left( \gamma_e \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 (C_{11} + C_{44}) a e^{-35.84 \varepsilon} \text{ctg} \theta \right) V^{2/3} l_g^{1/3} - 3 \varepsilon^2 (C_{11} + C_{44})^2 \frac{(1-\nu)}{\pi \mu} V l_g \theta \quad (1)$$

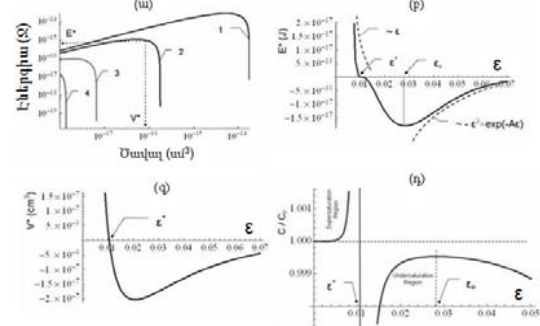
$$E^*(\varepsilon) = \frac{1}{3} \left( 4 \gamma_e \cos \theta - 2 \varepsilon^2 (C_{11} + C_{44}) d_{wet} \text{ctg} \theta \right)^3 \frac{4 \pi^2 \mu^2}{(9 \varepsilon^2 (C_{11} + C_{44})^2 (1-\nu))^2} \text{ctg} \theta \quad (2)$$

$$V^*(\varepsilon) = \left( \frac{8}{9} \frac{\gamma_e \pi \mu}{\varepsilon^2 (C_{11} + C_{44})^2 (1-\nu) \sin \theta} - \frac{4}{9} \frac{\pi \mu d_{wet} \text{ctg} \theta}{(C_{11} + C_{44}) (1-\nu)} \right)^3 \text{ctg}^2 \theta \quad (3)$$

$$d_{wet} = a e^{-35.84 \varepsilon} \text{ cm}, \quad a = 152.65 \times 10^{-8} \text{ cm} \quad (4)$$

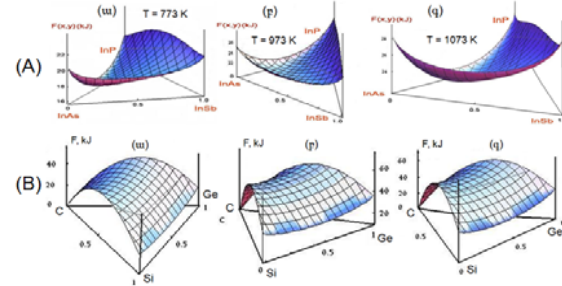
(1) – (4) բանաձևերում  $\gamma_e$ -ն տակդիրի միավոր մակերեսի ազատ էներգիան է,  $d_{wet}$ -ը՝ թրջող շերտի հաստությունը,  $\nu = \lambda/[2(\lambda + \mu)]$ ՝ Պուասոնի գործակիցը,  $\lambda$ -ն,  $\mu$ -ն և  $C_{ij}$ -ն՝ Լամեի և առաձգականության գործակիցները:

Հաշվարկվել և գրաֆիկորեն պատկերվել են  $InAsSb$ ,  $InAsP$ ,  $GaAsSb$ ,  $GaAsP$ ,  $SiGe$  և  $SiC$  երկբաղադրիչ և  $InAsSbP$  (նկ.14),  $GaAsSbP$  ու  $SiGeC$  եռաբաղադրիչ համակարգերի ինչպես լրիվ էներգիայի կախումները ծավալից (նկ.14ա), այնպես էլ կրիտիկական էներգիայի (նկ.14բ) և ծավալի (նկ.14գ) կախումները  $\varepsilon$ -ից և պինդ լուծույթի բաղադրությունից:



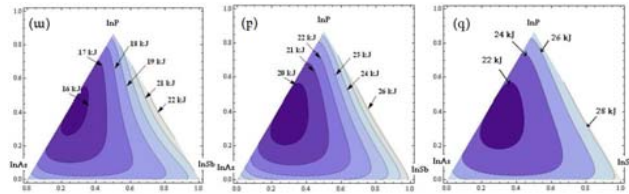
**Նկ.14.** (ա)  $InAsSbP$  կղզակների էներգիայի կախումը ծավալից ( $1-\varepsilon = 0.002$ ,  $2-\varepsilon = 0.004$ ,  $3-\varepsilon = 0.006$ ,  $4-\varepsilon = 0.007$ ), (բ) կրիտիկական էներգիայի, (գ) կրիտիկական ծավալի, (դ) հեղուկ ֆազի հագեցման աստիճանի կախումը  $\varepsilon$ -ից

Ցույց է տրվել, որ որոշակի  $\varepsilon = \varepsilon^*$  արժեքի դեպքում աճման մեխանիզմը փոխվում է ՔԿ-երի սաղմնառաջացումից դեպի նանոխոռոչի ձևավորում, իսկ երրորդ բաղադրիչի ներմուծումը պինդ լուծույթ հնարավորություն է տալիս կառավարելու ինչպես թրջող շերտի հաստությունը, այնպես էլ ՔԿ-երի և նանոխոռոչների չափերը: Վերը նշված երեք նյութական համակարգերի համար հաշվարկվել են խառնման ազատ էներգիաներն ինչպես համապատասխան զույգերի, այնպես էլ ամբողջ եռաբաղադրիչ պինդ լուծույթների համար: Կառուցվել են դրանց 2D և 3D (նկ.15) սխեմատիկ պատկերները:

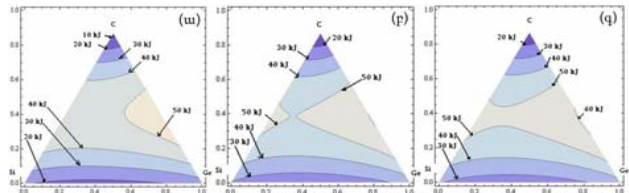


**Նկ.15.** Մեկ մոլ  $InAsSbP$  (A) և  $SiGeC$  (B) համակարգերի ազատ էներգիաների 3D պատկերները տարբեր ջերմաստիճաններում: (A)-ում (ա) T=773Կ, (բ) T=973Կ, (գ) T=1073Կ, (B)-ում (ա) T=1100Կ, (բ) T=1500Կ, (գ) T=1600Կ

Որոշվել են պինդ լուծույթների բաղադրությունների կայուն, մետակայուն և ոչ կայուն (անհամատեղելիության) միջակայքերը տարբեր ջերմաստիճաններում: Այդ նյութական համակարգերի խառնման ազատ էներգիայի իզոէներգիական կտրվածքները ներկայացված են նկ.16-ում և նկ.17-ում:



**Նկ.16.** Մեկ մոլ *InAsSbP* միացության ազատ էներգիայի իզոէներգիական կտրվածքները (ա)  $T=773\text{K}$ , (բ)  $T=973\text{K}$  և (գ)  $T=1073\text{K}$  ջերմաստիճաններում



**Նկ.17.** *SiGeC* համակարգի մեկ մոլ ազատ էներգիայի իզոէներգիական կտրվածքները. (ա)  $T=1100\text{K}$ , (բ)  $T=1500\text{K}$ , (գ)  $T=1600\text{K}$  ջերմաստիճաններում

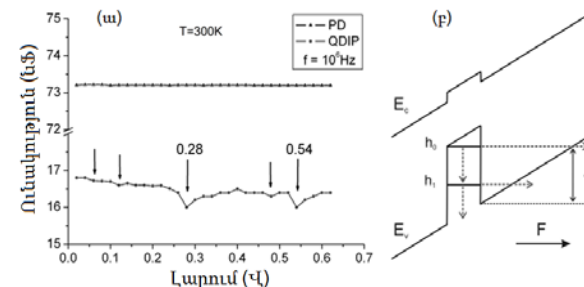
Ցույց է տրվել, որ դիտարկված բոլոր պինդ լուծույթներում դրանց բաղադրությունների անհամատեղելիության տիրույթները փոքրանում են ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց:

**Հինգերորդ գլուխը** նվիրված է *InAsSbP* բաղադրության ոսպնյակաձև և էլիպսարդային ՔԿ-երի էլեկտրաֆիզիկական, օպտոէլեկտրոնային և մագնիսական հատկությունների հետազոտմանը: Ջերմային վակուումային փոշեցրման տեխնոլոգիայով առանց (ՖԸ-1, որպես թեստային նմուշ) և *InAsSbP* ՔԿ-երով (ՖԸ-2) *InAs* (100) տակդիրի մակերևույթի վրա ձևավորվել են *Cr/Au* մետաղական օհմական հպակներ, որոնց երկրաչափական տեսքը ընտրվել է ֆոտոդիմադրություններին ներկայացվող անհրաժեշտ պահանջներին համապատասխան: Նմուշների աշխատանքային մակերեսը կազմել է 1 մմ<sup>2</sup>:

Ներկայացված են ՖԸ-1 և ՖԸ-2 ֆոտոընդունիչների վոլտ-ամպերային բնութագրերի (ՎԱԲ) չափման արդյունքները, կատարված ինչպես սենյակային, այնպես էլ հեղուկ ազոտի ջերմաստիճաններում: Հոսանքի չափման համար օգտագործվել է «Keithley 6514» էլեկտրոմետրը, իսկ լարման համար՝ «B7-38» վոլտմետրը: Ցույց է տրվել, որ *InAsSbP* բաղադրության ՔԿ-կ առկայությունն *InAs* տակդիրի մակերևույթի վրա բերում է համակարգի մակերևութային դիմադրության մեծացման՝ 6 Օմ-ից (ՖԸ-1) մինչև 38 Օմ (ՖԸ-2) սենյակային ջերմաստիճանում: ՔԿ-ով ՖԸ-2-ի մակերևութային դիմադրության մեծացումը բացատրվել է *InAsSbP* ՔԿ-ում լիցքակիրների (խոռոչների) տեղայնացմամբ: Ի տարբերություն ՖԸ-1-ի, որի համար 300 Կ ջերմաստիճանում դիտվել է գծային ՎԱԲ արտաքին կիրառված լարման -1-ից +1 Վ տիրույթում, ՖԸ-2-ի համար 0.52-0.58 Վ լարումների տիրույթում նկատվել է շեղում գծայնությունից (կտրվածք):  $T=77\text{K}$  ջերմաստիճանում կիրառված

լարումների ամբողջ տիրույթում ՖԸ-2-ի համար դիտվել է ՔԿ-ով համակարգերին բնորոշ ՎԱԲ-ի ոչ գծայնություն:

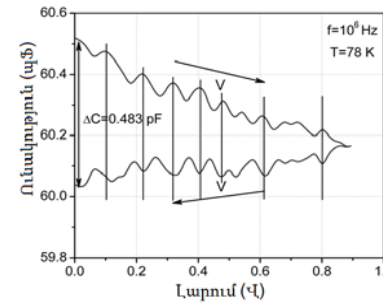
Ինդուկտիվության, ունակության և դիմադրության ճշգրիտ չափման համար նախատեսված «QuadTech 1920 Precision LCR Meter» մոդելի սարքի միջոցով ուսումնասիրվել են նմուշների վոլտ-ունակային բնութագրերը:



**Նկ.18.** (ա)  $T=300\text{K}$ -ում ՖԸ-1-ի և ՖԸ-2-ի վոլտ-ունակային բնութագրերը: (բ) արտաքին դաշտի կիրառման դեպքում լիցքակիրների անցումները 2-րդ սեռի ՔԿ-երով համակարգում

Ցույց է տրվել, որ սենյակային ջերմաստիճանում ՖԸ-1-ի ունակությունն ունի հաստատուն մեծություն ( $\sim 73$  նՖ) և կախված չէ լարումից, իսկ ՖԸ-2-ի համար՝ 0.28 Վ և 0.54 Վ լարումների դեպքում նկատված են «փոսեր» լարման ինչպես 1 կձց, այնպես էլ 1 Մձց (նկ.18ա) հաճախության դեպքում: Տրվել է այդ «փոսերի» առաջացման ֆիզիկական պատճառի որակական բացատրությունը՝ պայմանավորված տեղայնացված թեթև խոռոչների թունելային անցումներով եռանկյունաձև արգելքի միջով ՔԿ-երից դեպի *InAs* տակդիրի վալենտական գոտի և հակառակը (նկ.18բ): ՔԿ-երի առկայությունը նպաստել է նաև ունակության փոքրացմանը մոտ 5 անգամ:

Ցույց է տրվել, որ *InAsSbP* ՔԿ-երով ՖԸ-2 ֆոտոընդունիչի համար  $T=77\text{K}$  ջերմաստիճանում վոլտ-ունակային բնութագրի չափման ժամանակ լարման մեծացման և փոքրացման ընթացքում դիտվել են ունակության (լիցքի) հակուղղված տատանումներ և  $\Delta C=0.483$  պՖ հիստերեզիս՝ լարման 1 Մձց հաճախության դեպքում (նկ.19):

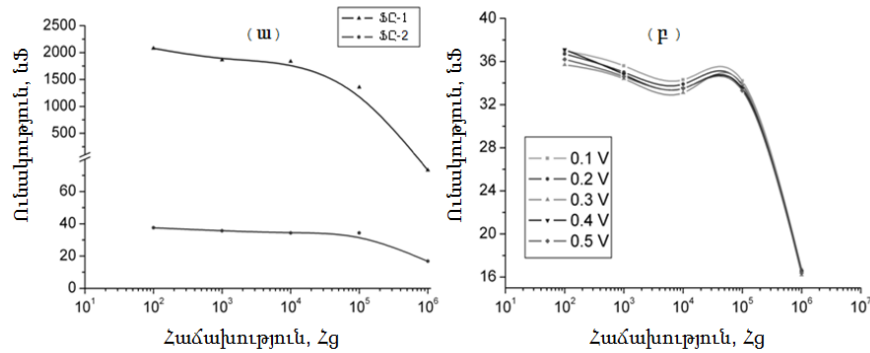


**Նկ.19.** Հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում ՔԿ-ով ՖԸ-2-ի վոլտ-ունակային բնութագրի լարման մեծացման և այնուհետև փոքրացման դեպքում

Հակուղղված տատանումները բացատրվել են ՔԿ-երի «լիցքավորման» և «լիցքաթափման» երևույթով, իսկ հիստերեզիսը՝ երկրորդ սեռի ՔԿ-րին բնորոշ մնացորդային բևեռացմամբ:

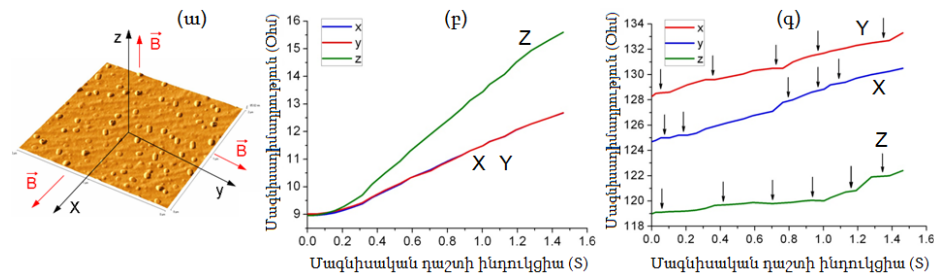
Ցույց է տրվել նաև (նկ.20), որ ֆոտոընդունիչների ունակությունը մնում է գործնականորեն հաստատուն մինչև  $10^5$  ձց հաճախությունը, իսկ ավելի մեծ հաճախությունների դեպքում նկատվել է ունակության նվազում: Չափումները նաև ցույց են տվել, որ ՔԿ-երով ՖԸ-2 ֆոտոընդունիչի ունակությունը հաճախությունից կախված ավելի դանդաղ է նվազում:





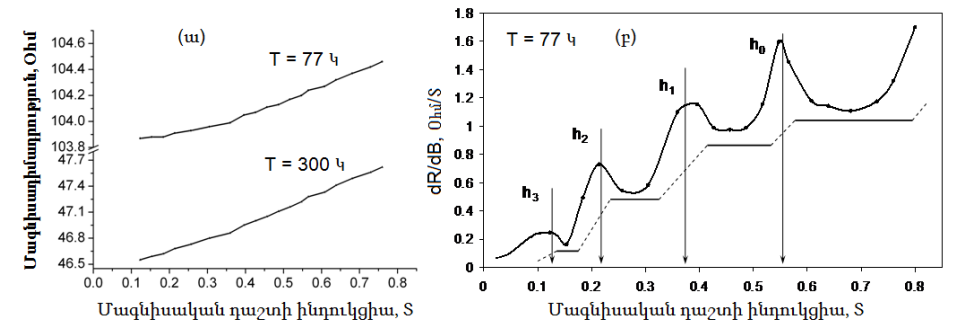
**Նկ.20.** (ա)  $T=300$ Կ-ում ՖՇ-1-ի և ՖՇ-2-ի ունակության կախումները հաճախությունից: (բ) ազդանշանի տարբեր արժեքների դեպքում ՖՇ-2-ի  $C-f$  բնութագրերը

Հետազոտվել են ՖՇ-1 և ՖՇ-2 կառուցվածքների մագնիսական հատկությունները, մասնավորապես, դրանց դիմադրության կախումը մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից: Չափումները կատարվել են սենյակային և հեղուկ ազոտի ջերմաստիճաններում: Կիրառվել է մինչև 1.6 S մագնիսական դաշտ, իսկ մագնիսադիմադրության չափման համար օգտագործվել է «MX 554» տիպի մուլտիմետրը: Չափումները կատարվել են Ֆոյխտի երկրաչափության և Ֆարադեյի երկրաչափության դեպքում (նկ.21ա): ՖՇ-1-ի համար դիտվել է մագնիսական դաշտից ծավալային կիսահաղորդիչներին բնորոշ մագնիսադիմադրության դասական կախում (նկ.21բ): ՖՇ-2-ի մագնիսադիմադրության կորի վրա նկատվել են «կոտրվածքների» տիրույթներ, ինչպես նաև մագնիսադիմադրության խիստ անիզոտրոպություն (նկ.21գ): Ստացված արդյունքը լավ համաձայնության մեջ է նմուշի մակերևույթի ՏԷՄ և ԱՌԻՄ չափումների հետ, որոնք ցույց են տվել, որ համակարգը հիմնականում բաղկացած է  $X$  ուղղությամբ թույլ ձգված և  $Z$  ուղղությամբ խիստ սեղմված էլիպսարդային ՔԿ-երից:



**Նկ.21.** Սենյակային ջերմաստիճանում մագնիսական դաշտի տարբեր ուղղությունների դեպքում ֆոտոընդունիչների մագնիսադիմադրության կախումները մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից: (բ) ՖՇ-1, (գ) ՖՇ-2

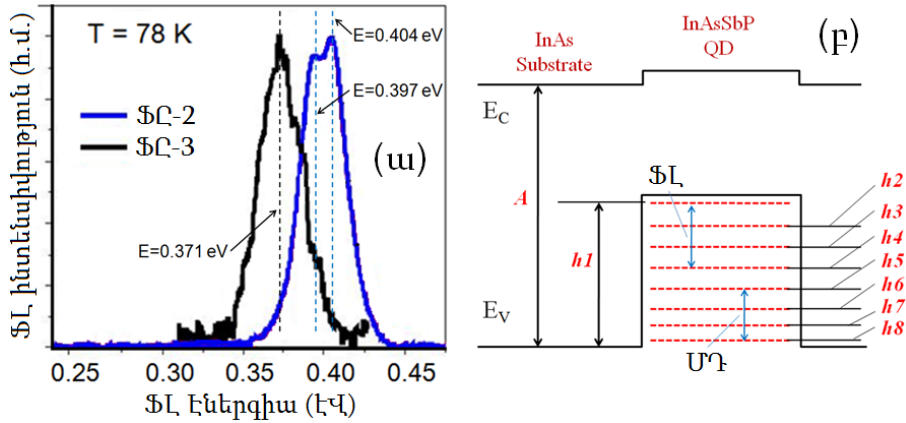
ՖՇ-2 նմուշի մագնիսադիմադրության կորի վրա «կոտրվածքները» դիտվել են մագնիսական դաշտի ինդուկցիայի գրեթե միևնույն արժեքների տիրույթներում (նկ.22ա):



**Նկ.22.** (ա)  $T=300$ Կ և  $77$ Կ ջերմաստիճաններում ՖՇ-2-ի մագնիսադիմադրության և (բ)  $T=77$ Կ մագնիսադիմադրության ածանցյալի կախումները մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից

Հեղուկ ազոտում մինչև 0.8 S ինդուկցիայով դաշտում կատարված մանրակրկիտ չափումների արդյունքների հիման վրա կառուցվել է մագնիսադիմադրության ածանցյալի կախումը մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից (նկ.22բ), որից հաշվարկվել են տեղայնացված խոռոչների  $InAs$  տակդիրի վալենտական գոտու առաստաղին մոտ և արգելված գոտում չորս էներգիական մակարդակները՝  $h_1 = 0.53$  մԷՎ,  $h_2 = 0.91$  մԷՎ,  $h_3 = 1.55$  մԷՎ,  $h_4 = 2.32$  մԷՎ:

Հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում հետազոտվել են  $InAs$  տակդիրի վրա աճեցված ՔԿ-երի ֆոտոլյումինեսցենցի (ՖԼ) սպեկտրները: Երկրորդ սեռի  $InAsSbP$  բաղադրության չընկղված ՔԿ-ով ՖՇ-2-ի ՖԼ սպեկտրի վրա դիտվել է երկու մաքսիմում (նկ.23ա): Առաջինը՝  $E=0.404$  էՎ էներգիայի դեպքում, որը համապատասխանում է չլեզիրված  $InAs$  տակդիրի արգելված գոտու լայնությանը հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում: Դա նշանակում է, որ տեղի է ունենում էլեկտրոն – խոռոչ զույգերի շատ արագ տարածական բաժանում, և ճառագայթային վերամիավորումը տեղի է ունենում ՔԿ-րից դուրս՝  $InAs$  տակդիրի ծավալում: Երկրորդ՝ ավելի փոքր  $E=0.397$  էՎ էներգիայի մաքսիմումի համար պատասխանատու է ՔԿ-ում տեղի ունեցող ճառագայթային վերամիավորումը՝ հաղորդականության գոտի – ՔԿ-երի ենթագոտի անցման շնորհիվ: Այս փորձարարական արդյունքը հիմնավորում է նաև  $k-p$  մոդելով կատարված տեսական հաշվարկի արդյունքը, ըստ որի  $InAsSbP$  բաղադրության երկրորդ սեռի ՔԿ-ում կարող է դիտվել նաև էլեկտրոնների թույլ տեղայնացում:



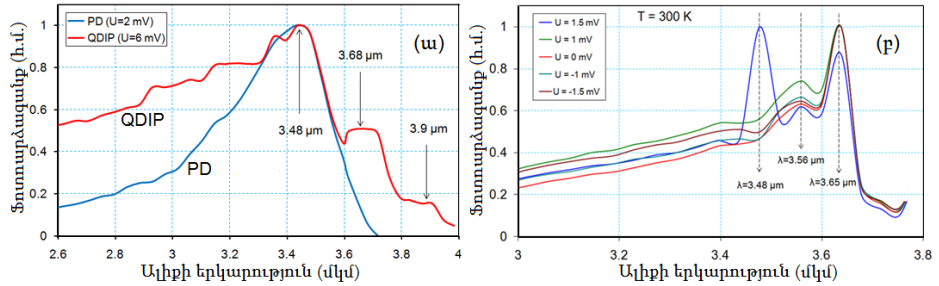
**Նկ.23.** (ա) ՖԸ-2 և ՖԸ-3 նմուշների ֆոտոսյուսմինեսցենցի սպեկտրները  $T=77$  Կ ջերմաստիճանում, (բ) *InAs* (100) տակդիրի վրա աճեցված երկրորդ սեռի *InAsSbP* ՔԿ-երի գոտիական կառուցվածքը և էներգիական մակարդակների սխեմատիկ պատկերումը

ՔԿ-երի էներգիական սպեկտրի ավելի մանրամասն և ճշգրիտ հետազոտման համար աճեցվել է *n-InAs/p-InAsSbP* դիոդային հետերոկառուցվածք (ՖԸ-3), որի *p-n* անցման աղքատացած շերտում ընկղված են ՔԿ-եր: ՔԿ-ը և 4 մկմ հաստությամբ *p-InAsSbP* էպիտաքսային շերտը աճեցվել են բառաբաղադրիչ *In-As-Sb-P* հեղուկ փուլից: ՖԸ-3-ի ՔԿ-երի աճեցման տեխնոլոգիական պայմաններն ընտրված են նույնը, ինչ ՖԸ-2-ի ստեղծման ընթացքում: *p-InAsSbP* էպիտաքսային շերտի բաղադրությունը ընտրվել է այնպես, որ ունենա  $\approx 0.48$  էՎ արգելված գոտու լայնություն  $T=78$  Կ ջերմաստիճանում: Ավելի մեծ արգելված գոտու լայնությամբ էպիտաքսային շերտը նախ ապահովում է “օպտիկական պատուհան”, իսկ պոտենցիալային արգելքի ստեղծման շնորհիվ ապահովում է նաև էլեկտրոնների տեղայնացում երկրորդ սեռի ՔԿ-ում և ճառագայթային վերամիավորման հավանականության մեծացում: Շեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում հետազոտվել է այս կառուցվածքի ՖԸ-ի սպեկտրը (նկ.23ա), որի վրա դիտվել է խիստ արտահայտված մաքսիմում՝  $E=0.371$  էՎ էներգիայի դեպքում: Շեղումը ՖԸ-2-ի հիմնական  $E=0.404$  էՎ մաքսիմումից կազմել է 33.2 մէՎ: Այս արժեքը՝ հաշվարկված *InAs* տակդիրի վալենտական գոտու առաստաղից, ընդունվել է որպես ՔԿ-ում տեղայնացված խոռոչների առաջին էներգիական մակարդակ: ՖԸ-3-ի ՖԸ-ի սպեկտրի վրա դիտվել են նաև “կոտրվածքներ”  $E=0.382$  էՎ,  $E=0.39$  էՎ և  $E=0.398$  էՎ էներգիաների դեպքում, որոնք բացակայում են չընկղված ՔԿ-ով ՖԸ-2-ի ՖԸ-ի սպեկտրներում: Այդ կոտրվածքները, հավանաբար, արդեն բնութագրում են տեղայնացված խոռոչների երկրորդ, երրորդ և չորրորդ էներգիական մակարդակները: Համադրելով հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում կատարված ֆոտոսյուսմինեսցենցի սպեկտրի ու մագնիսադիմադրության չափումների և հետազոտությունների արդյունքները, փորձնականորեն որոշվել է *InAsSbP* երկրորդ սեռի ՔԿ-ում տեղայնացված խոռոչների էներգիական սպեկտրը՝  $h_1=33.2$  մէՎ,  $h_2=21.4$  մէՎ,  $h_3=14.3$  մէՎ,  $h_4=6.2$  մէՎ,

$h_5=2.32$  մէՎ,  $h_6=1.55$  մէՎ,  $h_7=0.91$  մէՎ և  $h_8=0.53$  մէՎ՝ հաշվարկված *InAs* տակդիրի վալենտական գոտու առաստաղից: *InAs* տակդիրի վրա աճեցված *InAsSbP* երկրորդ սեռի ՔԿ-երի գոտիական կառուցվածքի և էներգիական մակարդակների սխեմատիկ պատկերը տրված է նկ.23բ-ում:

Ընդունելով  $E=33$  մէՎ արժեքը որպես առաջին էներգիական մակարդակ ( $n=1$ ) 
$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^*} \cdot \frac{n^2}{L^2}$$
 բանաձևով, հաշվարկվել է *InAsSbP* բաղադրության և  $L=20$  նմ (ՖԸ-2) օպտիմալ տրամագիծ ունեցող երկրորդ սեռի ՔԿ-ում տեղայնացված խոռոչների արդյունաբար զանգվածի արժեքը՝  $m^* = 0.029m_0$ :

**Վեցերորդ գլուխը** նվիրված է նանոկառուցվածքների վրա հիմնված միջին ենթակարմիր տիրույթի ֆոտոընդունիչների ստեղծմանը և հետազոտմանը: *IKC-21* սարքավորման միջոցով ենթակարմիր տիրույթում ֆոտոարձագանքի սպեկտրի՝ սենյակային ջերմաստիճանում կատարված ուսումնասիրությունների ժամանակ ՖԸ-2-ի համար դիտվել են սպեկտրի երկարալիքային շեղում՝ մինչև  $\lambda \sim 4$  մկմ և լրացուցիչ մաքսիմումներ՝  $\lambda=3.68$  մկմ և  $\lambda=3.9$  մկմ ալիքի երկարությունների դեպքում (նկ.24ա): Ինչպես երկարալիքային շեղումը, այնպես էլ լրացուցիչ մաքսիմումները բացատրվել են ՔԿ-երի ներդրմամբ:



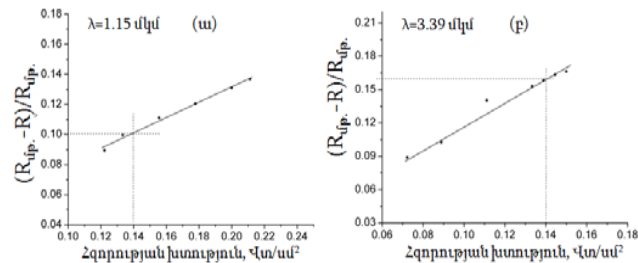
**Նկ.24.** (ա) Ֆոտոընդունիչների ենթակարմիր տիրույթի ֆոտոարձագանքի սպեկտրները  $U=2$  մՎ և  $U=8$  մՎ լարումների դեպքում (PD-ՖԸ-1, QDIP-ՖԸ-2); (բ) տարբեր լարումների դեպքում ՖԸ-2-ի ֆոտոարձագանքի սպեկտրները սենյակային ջերմաստիճանում

Նմուշների ֆոտոարձագանքի սպեկտրները չափվել են նաև արտաքին լարման կիրառման պայմաններում (նկ.24բ): Ցույց է տրվել, որ ՔԿ-ով ՖԸ-2-ի դեպքում նույնիսկ փոքր՝ միջև  $\pm 2$  մՎ լարումներ կիրառելիս տեղի է ունենում ֆոտոարձագանքի սպեկտրի վրա նկատված լրացուցիչ մաքսիմումների թվային արժեքների էական մեծացում: Մասնավորապես,  $\pm 1.5$  մՎ լարումների կիրառման դեպքում  $\lambda=3.65$  մկմ ալիքի երկարության համար դիտված ֆոտոարձագանքի արժեքը գործնականորեն հավասար է հիմնական  $\lambda=3.48$  մկմ ալիքի երկարության մաքսիմումի արժեքին, որն ունի կարևոր կիրառական նշանակություն “բազմագույն” ֆոտոընդունիչներ ստեղծելու համար:

ՔԿ-ով համակարգերի օպտոէլեկտրոնային հատկությունների հետազոտման ընթացում դիտվել է նաև հաջորդ կարևոր կիրառական նշանակություն ունեցող երևույթը՝ գրանցվել է ֆոտոաբաժանանքի ազդանշան առանց արտաքին լարման կիրառման: Այդ երևույթի որակական բացատրությունը տրվել է, հիմնվելով երկրորդ սեռի ՔԿ-րին բնորոշ ու դրանցում տեղի ունեցող լիցքակիրների տարածական բաժանման և բևեռացման պոտենցիալի առաջացման վրա:

Նմուշների օպտոէլեկտրոնային հատկությունները հետազոտվել են նաև He-Ne լազերի տարբեր ալիքի երկարության ճառագայթման ազդեցության տակ: Մասնավորապես,  $\lambda=0.63$  մկմ, 1.15 մկմ և 3.39 մկմ ալիքի երկարություններով լազերային ճառագայթմամբ գրանցվել են *InAsSbP* ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչներում գեներացված պարապ ընթացքի լարում և կարճ միացման հոսանք սենյակային ջերմաստիճանում: Ճառագայթման  $\lambda=3.39$  մկմ ալիքի երկարության դեպքում գրանցված լարման և հոսանքի զգայունությունների առավելագույն արժեքները կազմել են համապատասխանաբար 2 Վ/Վտ և 82 մԱ/Վտ ( $T=300$ Կ): Ցույց է տրվել, որ այս ֆոտոընդունիչները կարող է նաև օգտագործվել 1200-1300°C ջերմաստիճանով մարմինների ջերմային ճառագայթման գրանցման համար:

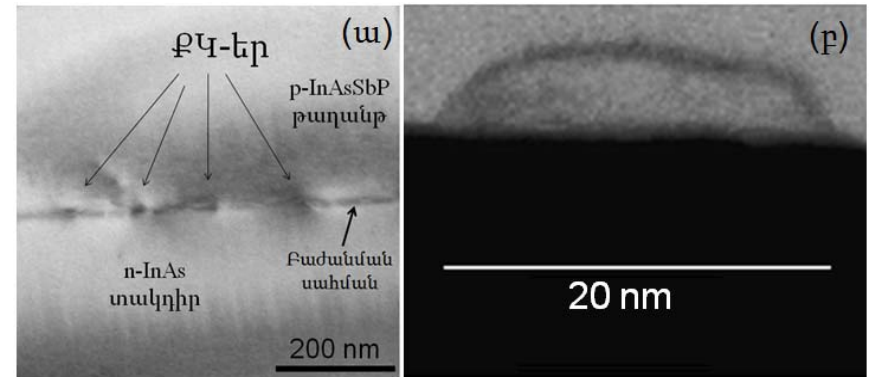
Սենյակային ջերմաստիճանում  $\lambda=1.15$  մկմ ալիքի երկարությամբ ենթակարմիր լազերային ճառագայթման դեպքում դիտվել է ՔԿ-ով նմուշների մակերևութային դիմադրության 14 % առավելագույն փոքրացում, իսկ  $\lambda=3.39$  մկմ-ի դեպքում՝ միջև 17 % (նկ.25), որը բավական լավ արդյունք է նեղ գոտիական կառուցվածքով և ցածրահոս կիսահաղորդիչների հիման վրա պատրաստված ֆոտոդիմադրությունների համար:



**Նկ.25.** Դիմադրության հարաբերական փոփոխության կախումը He-Ne լազերի ճառագայթման հզորության խտությունից՝ (ա)  $\lambda=1.15$  մկմ և (բ)  $\lambda=3.39$  մկմ ալիքների երկարությունների դեպքում

Միջին ենթակարմիր տիրույթում աշխատող նոր սերնդի ՔԿ-ով ֆոտոդիմադրությունների հետ մեկտեղ ստեղծվել են նաև երկրորդ տեսակի ֆոտոընդունիչներ՝ *n-InAs/p-InAsSbP* դիոդային հետերոկառուցվածքներ, որոնց *p-n* անցման աղքատացման շերտում ընկղված են ՔԿ-եր: Որպես տակդիր օգտագործվել են չլեգիրված և 400 մկմ հաստությամբ *n-InAs* (100) արդյունաբերական բյուրեղները ( $n=2 \times 10^{16}$  սմ<sup>-3</sup>): ՔԿ-ով դիոդային հետերոկառուցվածքն աճեցվել է մեկ տեխնոլոգիական պրոցեսի երկու փուլերի ընթացքում: Առաջին փուլում *InAs* տակդիրի վրա ձևավորվել են ՔԿ-եր (համաձայն ՖԸ-2-ի ստեղծման տեխնոլոգիական պայմանների), այնուհետև, փոխելով հեղուկ ֆազը՝ աճեցվել է *InAs* տակդիրի, բյուրեղական ցանցի հետ համաձայնեցված *p-InAsSbP* էպիտաքսային շերտ

ավանդական ՇԷ մեթոդի քայլային սառեցման եղանակով: 4 մկմ հաստությամբ էպիտաքսային շերտը լեգիրվել է ցինկով ( $p=2 \times 10^{18}$  սմ<sup>-3</sup>): Աճեցման սկզբնական ջերմաստիճանը ընտրվել է  $T=550$  °C, իսկ քայլային սառեցման աստիճանը՝  $\Delta T=8$  °C: Քառաբաղադրիչ աշխատանքային հեղուկ ֆազի և համապատասխանաբար պինդ լուծույթի բաղադրություններն ընտրվել են այնպես, որ վերջինս ունենա  $\sim 0.48$  էՎ արգելված գոտու լայնություն հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում՝ “օպտիկական պատուհան” ապահովելու համար: ՏԷՄ և ԹԷՄ մանրադիտակներով հետազոտվել է տակդիր-էպիտաքսային թաղանթ բաժանման սահմանը (նկ.26): Չափումները հաստատել են 10-ից 30 նմ տրամագծով և 3-ից 20 նմ բարձրությամբ ՔԿ-երի առկայությունը տակդիր-թաղանթ բաժանման սահմանում:



**Նկ.26.** (ա) ՔԿ-ով *n-InAs/p-InAsSbP* դիոդային հետերոկառուցվածքի և (բ) ՔԿ-ի լայնական կտրվածքի ԹԷՄ պատկերները

Ի տարբերություն առանց ՔԿ-երի համանման կառուցվածքի՝ ՔԿ-երով դիոդային հետերոկառուցվածքի՝ սենյակային ջերմաստիճանում կատարված կլանման և հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում ֆոտոլյումինեսցենցի սպեկտրների չափման արդյունքում դիտվել է դրանց երկարալիքային շեղում: Ստացված արդյունքները բացատրվել են այդ ֆոտոդիոդի օպտոէլեկտրոնային հատկությունների վրա ՔԿ-երի ազդեցությամբ և դրանցում տեղի ունեցող գեներացման-վերամիավորման երևույթներով:

**ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆ**

Ամփոփենք ատենախոսությունում ներկայացված հիմնական գիտական և կիրառական արդյունքները և եզրահանգումները:

1. Ցույց է տրվել, որ հեղուկային էպիտաքսիան կարող է հաջողությամբ օգտագործվել նանոկառուցվածքների աճեցման նպատակով, կիրառելով



սաղմնառաջացման ավանդական Ստրանսկի-Կրաստանովի եղանակը: Այս եզրահանգումը սկզբունքորեն հերքում է այն կարծիքը, որ բարձր սկզբնական արագության պատճառով ՀԷ-ն չի կարող օգտագործվել ենթամիկրոմետրական և նանոմետրական կառուցվածքներ աճեցնելու համար:

2. Առաջարկվել և կիրառվել է նոր նյութաբանական և տեխնոլոգիական գաղափար՝ եռաբաղադրիչ և քվազիքառաբաղադրիչ պինդ լուծույթների օգտագործումը քվանտաչափային կառուցվածքների նանոճարտարագիտության նպատակով:
3. *InAs* (100) տակդիրների վրա ջերմային հավասարակշռության պայմաններում *In-As-Sb-P* քառաբաղադրիչ հեղուկ ֆազից աճեցվել են ոսպնյակաձև և էլիպսարդային ՔԿ-եր, քվանտային օղակներ, ՔԿ-երի մոլեկուլի նոր տարատեսակ և ՔԿ-երի շղթաներ:
4. Ցույց է տրվել, որ ենթամիկրոմետրական կղզյակների ծավալի փոքրացմանը զուգընթաց տեղի է ունենում դրանց երկրաչափական տեսքի փոփոխության հետևյալ հաջորդականությունը. հատած բուրգ, բուրգ, բարդ մակերևութով բուրգ և կիսագունդ: Փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ *InAsSbP* բաղադրության կղզյակների՝ բրգաձևից դեպի կիսագունդ տեսքի անցման կրիտիկական չափը կազմել է  $\approx 500$  նմ, որը համընկնում է տեսական հաշվարկի արդյունքի հետ: Ցույց է տրվել, որ առավելագույն լարվածություն դիտվել է հատած բուրգի հիմքի զագաթներում և տակտիրի հետ բաժանման սահմանում, իսկ փոքրագույն լարվածություն՝ բուրգի վերին նիստի կենտրոնում:
5. Աճեցվել են *InAsSbP* երկրորդ սերի ոսպնյակաձև ՔԿ-եր: ՔԿ-ը աճեցվել են երեք ժամանակահատվածներում՝  $t_1=10$  րոպե,  $t_2=20$  րոպե և  $t_3=30$  րոպե. Նանոկառուցվածքների համակարգը բաղկացած է եղել բավական համասեռ բաշխված և մեծ խտությամբ փոքր ՔԿ-րից, որոնց հետ համատեղ առկա են նաև մոտ երեք կարգով ավելի փոքր խտությամբ, բայց ավելի մեծ չափերի ՔԿ-եր: Փոքր ՔԿ-երի մակերևութային խտությունը կազմել է  $(6-8) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup>, իսկ դրանց միջին տրամագիծը և բարձրությունը փոփոխվել են համապատասխանաբար 10-ից 40 նմ և 0.5-ից 15 նմ: Համեմատաբար մեծ ՔԿ-երի միջին տրամագիծը և բարձրությունը 70 նմ-ի և 25 նմ-ի կարգի են: Դիտված երկմոդային սաղմնառաջացումը բացատրվել է համակարգում տեղի ունեցող ՔԿ-երի զույգավորման և օստվալոյան հասունացման պրոցեսներով: ԱՌԻՄ - չափումների միջոցով ցույց է տրվել, որ օստվալոյան հասունացման և բյուրեղացման ժամանակի մեծացման ընթացքում տեղի է ունենում ոսպնյակաձև ՔԿ-երի տեսքի փոփոխություն էլիպսարդային տեսքի, ընդ որում ընդլայնումը տեղի է ունենում հիմնականում *InAs* (100) տակդիրի մակերևութի [010] ուղղությամբ: Էլիպսարդային ՔԿ-երի մակերևութային խտությունը կազմել է  $(5-8) \times 10^8$  սմ<sup>-2</sup>: Հաշվարկվել են էլիպսարդային ՔԿ-երի ընդլայնման գործակիցները  $(L/L_0)$   $X$ ,  $Y$  և  $Z$  ուղղություններով՝  $L_x/L_y=1.23 \pm 0.12$ ,  $L_x/L_z=9.2 \pm 3.6$  և  $L_y/L_z=7.9 \pm 3.5$ :
6. Հետազոտվել է ոսպնյակաձև և էլիպսարդային ՔԿ-երի թվի կախումը դրանց միջին տրամագծից: Ցույց է տրվել, որ փորձնականորեն ստացված բաշխումը ոսպնյակաձև ՔԿ-երի համար մեծ ճշտությամբ մոտարկվում է Գրամ-Շարլիերի ֆունկցիայով (մոտարկման ճշտությունը  $\sim 97\%$ ), իսկ էլիպսարդային ՔԿ-երի

համար՝ գաուսիանով (մոտարկման ճշտությունը  $\sim 99\%$ ), որն այնուհետև ձևափոխվում է Լիֆշից-Սլեզովի տեսքի բաշխման: Բյուրեղացման ժամանակային կախումից որոշվել է ՔԿ-երի աճի միջին շառավղային արագությունը, որը կազմել է  $\sim 0.05$  նմ/վ:

7. Կիրառելով Լիֆշից-Սլեզով-Վագների տեսությունը՝ ցույց է տրվել, որ աճի փոքր ժամանակներում *InAsSbP* համակարգում ՔԿ-երի սաղմնառաջացումը դեկավարվում է տակդիրի մակերևութի վրա ռեակցիայի արագությամբ (Վագների բաշխում), որի գնահատված թվային արժեքը՝  $B \approx 2.65 \cdot 10^{-7}$  սմ/վ, իսկ մեծ ժամանակների դեպքում՝ ծավալային դիֆուզիայով (Լիֆշից-Սլեզովի բաշխում) որի գործակցի թվային արժեքը՝  $D \approx 3.17 \cdot 10^{-12}$  սմ<sup>2</sup>/վ: Օստվալոյան հասունացման միջանկյալ ժամանակներում զանգվածի տեղափոխման այդ երկու մեխանիզմները գործում են միաժամանակ:
8. *InAs* (100) տակդիրի վրա աճեցվել են  $(1-3) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup> մակերևութային խտությամբ *InAsSbP* քվանտային օղակներ: ՔՕ-ի արտաքին տրամագծի օպտիմալ արժեքը եղել է 35 նմ, ներքին տրամագիծը փոփոխվել է 1-ից 10 նմ, իսկ դրանց միջին բարձրությունը եղել է 10 նմ կարգի:
9. Աճեցվել են *InAsSb / InAsP* ՔԿ-երի մոլեկուլներ (ՔԿՄ): ՔԿ-երի մոլեկուլը բաղկացած է կենտրոնական ՔԿ-ից, որը շրջապատված է հիմնականում վեց նանոխոռոչներով: ՔԿ-երի (ՔԿՄ-երի) մակերևութային խտությունը կազմել է  $(0.8-2) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup>, իսկ դրանց միջին տրամագիծը և բարձրությունը եղել են համապատասխանաբար 5-ից 45 նմ և 2-ից 20 նմ: Նանոխոռոչների մակերևութային խտությունը կազմել է  $(6-10) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup>, իսկ միջին տրամագիծը և խորությունը՝ 5-ից 40 նմ: Դիտվել է ՔԿՄ-երի կլանման եզրի երկարալիքային շեղում  $\lambda=3.44$  մկմ-ից մինչև  $\lambda=3.85$  մկմ, ինչպես նաև կլանման սպեկտրի լայնացում մինչև  $\lambda=2.75$  մկմ կարճալիքային տիրույթ:
10. Օգտագործելով ութ-գոտիական **k-p** մոդելը՝ տեսականորեն հետազոտվել է *InAsSb / InAsP* ՔԿՄ-ի օպտոէլեկտրոնային հատկությունները: Ցույց է տրվել, որ տեղի է ունենում խոռոչների խիստ տեղայնացում ՔԿՄ-ի կենտրոնական ՔԿ-ում: Հաշվարկվել է նաև բնեռացման պոտենցիալի արժեքը, որի մեծագույն արժեքը կազմել է  $\pm 1.33$  մԿ:
11. *InAs* (100) տակդիրի վրա քառաբաղադրիչ հեղուկ ֆազից աճեցվել են *InAsSb / InAsP* ՔԿ-երի շղթաներ, որոնք հիմնականում ուղղորդված են եղել [010] բյուրեղագրական ուղղությամբ և ունեցել են 2-ից 5 մկմ երկարություն: ՔԿՄ-երի շղթաների պարբերությունը կազմել է  $\approx 120$  նմ, ՔԿ-երի և նանոխոռոչների միջին տրամագիծը՝ համապատասխանաբար  $40 \pm 7$  նմ և  $20 \pm 5$  նմ, իսկ դրանց մակերևութային խտությունը՝  $(2-5) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup> և  $(1-3) \times 10^9$  սմ<sup>-2</sup>: Դիտվել է ՔԿՄ-երի շղթաների կլանման եզրի երկարալիքային շեղում՝ մինչև  $\lambda=3.87$   $\mu\text{m}$ .
12. Կատարվել է ՔԿ-երի և նանոխոռոչների մրցակցային սաղմնառաջացման պրոցեսի քանակական ուսումնասիրություն երեք՝ *InAs<sub>1-x-y</sub>Sb<sub>x</sub>P<sub>y</sub>*, *GaAs<sub>1-x-y</sub>Sb<sub>x</sub>P<sub>y</sub>* և *Si<sub>1-x-y</sub>Ge<sub>x</sub>C<sub>y</sub>* եռաբաղադրիչ նյութական համակարգերում: Հաշվարկվել են նանոկղզյակների լրիվ էներգիաների և չափերի կախումները

լարվածությունից: Ուսումնասիրվել և հաշվի է առնվել թրջող շերտի հաստության կախումը ցանցի հաստատունների տարբերության պատճառով առաջացած դեֆորմացիայից և արտածվել են համապատասխան փորձառական բանաձևեր: Ցույց է տրվել, որ որոշակի կրիտիկական լարվածության դեպքում աճման մեխանիզմը փոխվում է ՔԿ-երի սաղմնառաջացումից նանոխոռոչի ձևավորման: Ցույց է տրվել, որ երրորդ բաղադրիչի ներմուծումը պինդ լուծույթ հնարավորություն է տալիս կառավարելու ինչպես թրջող շերտի հաստությունը, այնպես էլ ՔԿ-երի և նանոխոռոչների չափերը: Հաշվարկվել է խառնման ազատ էներգիան ինչպես համապատասխան գույգերի, այնպես էլ ամբողջ եռաբաղադրիչ պինդ լուծույթների համար: Որոշվել են պինդ լուծույթների բաղադրությունների կայուն, մետակայուն և ոչ կայուն (անհամատեղելիության) միջակայքերը տարբեր ջերմաստիճաններում և կառուցվել են կոնցենտրացիոն եռանկյունները: Մասնավորապես, ցույց է տրվել, որ դիտարկված բոլոր պինդ լուծույթներում դրանց բաղադրությունների անհամատեղելիության տիրույթները ջերմաստիճանի մեծացմանը զուգընթաց փոքրանում են:

13. Ցույց է տրվել, որ սենյակային ջերմաստիճանում *InAsSbP* ՔԿ-երի առկայությունը *InAs* տակդիրի մակերևույթի վրա բերում է մակերևույթային դիմադրության մեծացման 6 Օմ-ից (ՖԸ-1) մինչև 38 Օմ, ունակության փոքրացման մոտ 5 անգամ, ինչպես նաև 0.28 Վ և 0.54 Վ լարումների դեպքում ունակության բնութագրական «փոսերի» առաջացման լարման 1 կՀց և 1 ՄՀց հաճախության դեպքում:  $T=77$  Կ ջերմաստիճանում ՔԿ-երով համակարգի վոլտ-ունակային բնութագրի վրա լարման մեծացման և փոքրացման ընթացքում դիտվել են ունակության (լիցքի) հակուղղված տատանումներ և  $\Delta C=0.483$  պՖ հիստերեզիս: Հակուղղված տատանումները բացատրվել են ՔԿ-երի «լիցքավորման» և «լիցքաթափման» երևույթով, իսկ հիստերեզիսը՝ երկրորդ սեռի ՔԿ-ում առաջացող մնացորդային բևեռացմամբ:
14. ՔԿ-երով նմուշների մագնիսադիմադրության կորի վրա նկատվել են «կոտրվածքների» տիրույթներ և մագնիսադիմադրության խիստ անիզոտրոպություն  $X$ ,  $Y$  և  $Z$  ուղղություններով: Այդ «կոտրվածքները» դիտվել են սենյակային և հեղուկ ազոտի ջերմաստիճաններում՝ գրեթե միևնույն մագնիսական ինդուկցիայի արժեքների տիրույթներում: Հեղուկ ազոտում կատարված չափումների արդյունքների հիման վրա կառուցվել է մագնիսադիմադրության ածանցյալի կախումը մագնիսական դաշտի ինդուկցիայից, որից հաշվարկվել է տեղայնացված խոռոչների *InAs* տակդիրի վալենտական գոտու առաստաղի նկատմամբ մոտակա չորս էներգիական մակարդակների արժեքները:
15.  $T=77$  Կ ջերմաստիճանում հետազոտվել են *InAs* տակդիրի վրա աճեցված ՔԿ-երի ֆոտոլումինեսցենցի սպեկտրները: Երկրորդ սեռի *InAsSbP* բաղադրության չընկղված ՔԿ-ով նմուշի ՖԸ սպեկտրի վրա դիտվել է երկու մաքսիմում՝  $E=0.404$  էՎ էներգիայի դեպքում, որը հստակ համապատասխանում է չլեգիրված *InAs* տակդիրի արգելված գոտու լայնությանը և  $E=0.397$  էՎ էներգիայի դեպքում, որի համար պատասխանատու են ՔԿ-ում տեղի ունեցող զենեքացման-

վերամիավորման երևույթները: ՔԿ-երը *p-InAsSbP* էպիտաքսային շերտով ծածկված նմուշի ՖԸ սպեկտրի վրա դիտվել է նաև խիստ արտահայտված մաքսիմում  $E=0.371$  էՎ էներգիայի դեպքում, ինչպես նաև «կոտրվածքներ»  $E=0.382$  էՎ,  $E=0.39$  էՎ և  $E=0.398$  էՎ էներգիաների դեպքում, որոնք բացակայել են չընկղված ՔԿ-երի ՖԸ-ի սպեկտրների վրա: Համադրելով հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում կատարված ՖԸ-ի սպեկտրի և մագնիսադիմադրության չափումները՝ փորձնականորեն որոշվել են *InAsSbP* երկրորդ սեռի ՔԿ-ում տեղայնացված խոռոչների էներգիական սպեկտրը և դրանց արդյունաբար զանգվածի արժեքը՝  $m^* = 0.029m_0$ :

16. Դիտվել են ՔԿ-երով նմուշների ֆոտոարձագանքի սպեկտրի երկարալիքային շեղում՝ մինչև  $\lambda \sim 4$  մկմ և լրացուցիչ մաքսիմումներ՝  $\lambda=3.56$  մկմ և  $\lambda=3.65$  մկմ ալիքի երկարության դեպքում սենյակային ջերմաստիճանում: Ցույց է տրվել, որ նույնիսկ փոքր՝ միջև  $\pm 2$  մՎ լարումների կիրառման ժամանակ տեղի է ունենում ֆոտոարձագանքի նշված լրացուցիչ մաքսիմումների թվային արժեքների էական մեծացում, որը հնարավորություն է տալիս ստեղծել «բազմագույն» ֆոտոընդունիչներ:
17. ՔԿ-երով կառուցվածքներում դիտվել է նաև ֆոտովոլտային երևույթ, որի որակական բացատրությունը տրվել է երկրորդ սեռի ՔԿ-ում տեղի ունեցող լիցքակիրների տարածական բաժանման և բևեռացման պոտենցիալի առաջացման հիման վրա:
18. Ստեղծվել են նոր սերնդի միջին ենթակարմիր տիրույթի ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչներ՝ ֆոտոդիմադրությունների տեսքով: He-Ne լազերի  $\lambda=3.39$  մկմ ալիքի երկարության ճառագայթման դեպքում այդ ֆոտոդիմադրություններում գրանցված լարման և հոսանքի զգայունությունների առավելագույն արժեքները կազմել են համապատասխանաբար 2 Վ/Վտ և 82 մԱ/Վտ ( $T=300$ Կ): Ցույց է տրվել, որ ստեղծված ֆոտոընդունիչները կարող են նաև օգտագործվել 1200-1300°C ջերմաստիճանով մարմինների ջերմային ճառագայթման գրանցման համար: Սենյակային ջերմաստիճանում  $\lambda=1.15$  մկմ ալիքի երկարությամբ լազերային ճառագայթման դեպքում դիտվել է ֆոտոընդունիչների մակերևույթային դիմադրության 14 % առավելագույն փոքրացում, իսկ  $\lambda=3.39$  մկմ-ի դեպքում՝ միջև 17 %, որը լավ արդյունք է նեղ գոտիական կառուցվածքով և ցածրաօհմ կիսահաղորդիչների հիման վրա ստեղծված ֆոտոդիմադրությունների համար:
19. Ստեղծվել են նաև միջին ենթակարմիր տիրույթի ֆոտոընդունիչներ՝ *n-InAs/p-InAsSbP* դիոդային հետերոկառուցվածքներ, որոնց *p-n* անցման աղքատացված շերտում ընկղված են 10-ից 30 նմ տրամագծով և 3-ից 20 նմ բարձրությամբ ՔԿ-եր: Ի տարբերություն առանց ՔԿ-երի համանման կառուցվածքների, ՔԿ-երով դիոդային հետերոկառուցվածքների սենյակային ջերմաստիճանում կատարված կլանման և հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում ֆոտոլումինեսցենցի սպեկտրների չափման արդյունքում դիտվել է դրանց երկարալիքային շեղում:

1. **K.M. Gambaryan** and V.M. Aroutiounian. Growth and Characterization of Cooperative Quantum Dot Chains in Quaternary *InAsSbP* Material System. – *AIP Advances*, vol. 3, issue 5, p.052108 (5 pages), May 8, 2013. (AIP) DOI: 10.1063/1.4804547
2. V.G. Harutyunyan, **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian. Novel narrow band-gap *InAsSbP* -based quantum dot mid-infrared photodetectors: fabrication, optoelectronic and electrophysical properties. – *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 13, issue 2, p.p. 799-803, 2013. (ASP) (Impact Factor: 1.56)
3. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan. Nucleation features and energy levels of type-II *InAsSbP* quantum dots grown on *InAs*(100) substrate. – *Applied Physics Letters*, vol. 101, issue 9, p. 093103 (5 pages), 27 August 2012. (AIP) [http://dx.doi.org/10.1063/1.4748574] (Impact Factor: 3.844)
4. **K.M. Gambaryan**, V.G. Harutyunyan, T. Boeck, and F. Schütte. Cooperative Quantum Dot Chains Grown From Quaternary *In-As-Sb-P* Liquid Phase on *InAs*(100) Substrate. – “*Semiconductor Micro- and Nanoelectronics*”, In Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference, Yerevan, Armenia, May 24-26, 2013, p.p. 117-119.
5. A.K. Simonyan and **K.M. Gambaryan**. Quantitative Analysing of *InAsSbP* Quantum Dots Size Distribution at Ostwald Ripening on *InAs*(100) Substrate. – “*Semiconductor Micro- and Nanoelectronics*”, In Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference, Yerevan, Armenia, May 24-26, 2013, p.p. 120-122.
6. **K.M. Gambaryan**, A.K. Simonyan, V.M. Aroutiounian. *GaAsSbP* Quasiternary Material System: Nanostructures Growth Features and Immiscibility Analysis. – *Armenian Journal of Physics*, vol. 5, issue 3, p.p. 156-163, 2012.
7. V.M. Aroutiounian, **K.M. Gambaryan**, V.G. Harutyunyan, P.G. Soukiassian, T. Boeck, J. Schmidtbauer, R. Bansen. The Ostwald Ripening at Nanoengineering of *InAsSbP* Spherical and Ellipsoidal Quantum Dots on *InAs*(100) Surface. – *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, vol. 48, issue 1, p.p. 37-42, 2013. (Springer) (Impact Factor: 0.28) (*Известия НАН Армении: Серия Физика*, том 48, вып. 1, с.с. 55-62, 2013 г.).
8. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan. Magnetoelectric and Optoelectronic Properties of Type-II *InAsSbP* Lens-shape and Ellipsoidal Quantum Dots and Nanorings. – In Book: Actual Problems of Physics of Low-Dimensional Systems (The 70<sup>th</sup> Anniversary of Academician E.M. Kazaryan), p.p. 27-34, 2012. (Editor: Prof. Dr. A.A. Sarkisyan; Edit Print Publishing House, 204 pages, Yerevan, 2012).
9. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, A.K. Simonyan, L.G. Movsesyan. Growth Features at Competing Nucleation of Quantum Dots and Nanopits in *Si-Ge-C* Ternary System. – *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, vol. 47, issue 4, p.p. 173-180, 2012. (Springer) (Impact Factor: 0.28) (*Известия НАН Армении: Серия Физика*, том 47, вып. 4, с.с. 265-276, 2012 г.).
10. V.M. Aroutiounian, **K.M. Gambaryan**, V.G. Harutyunyan, I.G. Harutyunyan, M.S. Kazaryan. Quantum Dot Mid-Infrared Photodetectors Based on Quaternary *InAsSbP* Nanostructures. – *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, vol. 47, issue 3, p.p. 128-132, 2012. (Springer) (Impact Factor: 0.28) (*Известия НАН Армении: Серия Физика*, том 47, вып. 3, с.с. 193-200, 2012 г.).
11. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan, O. Marquardt, P.G. Soukiassian. Room temperature magnetoelectric properties of type-II *InAsSbP* quantum dots and nanorings. – *Applied Physics Letters*, vol. 100, issue 3, 033104 (4 pages), 16 January 2012. DOI: 10.1063/1.3676437. (AIP) (Impact Factor: 3.844)
12. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan, T. Boeck, J. Schmidtbauer, R. Bansen. Application of quasi-ternary *InAsSbP* compound semiconductors for the growth of quantum size objects on *InAs* (100) substrate. – *World Journal of Engineering*, vol. 7, issue supplement 3, 2011, p.p. 345-346. (MSP, UK) (Proceedings Excellent: 19<sup>th</sup> Annual International Conference on Composites or Nano-Engineering (ICCE-19), Shanghai, China, 24-30-July, 2011.).
13. V.G. Harutyunyan, **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian. Novel narrow band-gap *InAsSbP* -based quantum dot mid-infrared photodetectors: fabrication, optoelectronic and electrophysical properties. – In Proc.: *International Conference on Nanoscience and Technology (ChinaNANO-2011)*, Beijing, China, 7-9 September, 2011, p.p. 116-117.
14. O. Marquardt, T. Hickel, J. Neugebauer, **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian. Growth process, characterization and modeling of electronic properties of coupled *InAsSbP* nanostructures. – *Journal of Applied Physics*, vol. 110, issue 4, 043708 (6 pages), 2011. DOI: 10.1063/1.3624621. (AIP) (Impact Factor: 2.168)
15. L.G. Movsesyan, **K.M. Gambaryan**. Formation of *SiGe* quantum dots and quantum dot – nanopits cooperative structures on *Si*(100) substrate. – *Defense Institute after V. Sargsyan, 9th Scientific Conference*, May 30 – June 1, 2011, Yerevan, Armenia. Book of Abstracts, p.p. 30-31.
16. **K.M. Gambaryan**. Growth of *InAsSbP* Lens-shape and Ellipsoidal Quantum Dots and Rings on *InAs* (100) Substrate. – “*Semiconductor Micro- and Nanoelectronics*”, In Proc. of the 8<sup>th</sup> International Conference, Yerevan, Armenia, July 1-3, 2011, p.p. 184-187.
17. A.K. Simonyan, L.G. Movsesyan, **K.M. Gambaryan**. Growth Features and Competing Nucleation of Quantum Dots–Nanopits Cooperative Structures in *SiGeC* Ternary System. – “*Semiconductor Micro- and Nanoelectronics*”, In Proc. of the 8<sup>th</sup> International Conference, Yerevan, Armenia, July 1-3, 2011, p.p. 201-204.
18. O. Marquardt, **K.M. Gambaryan**, C. Heyn, V.M. Aroutiounian, E.P. O’Reilly. Modeling and investigation of optoelectronic properties of isolated and coupled ternary III-As nanostructures. – In Proc.: *Villa Conference on Interaction among Nanostructures (VCIAN-2011)*, April 21-25, 2011, Las Vegas, Nevada, USA, p. 100. (Springer)
19. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan, O. Marquardt, E.P. O’Reilly. *InAsSbP* -based quantum dots/nanopits mid-infrared photodetectors: room temperature optical, capacitance-voltage and magnetic properties. – In Proc.: *Villa Conference on Energy, Materials and Nanotechnology (VCEMN-2011)*, April 21-25, 2011, Las Vegas, Nevada, USA, p.p. 260-261. (Springer)

20. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan. Photovoltaic and Optoelectronic Properties of *InAs* (100)-based Photoconductive Cells with Quantum Dots and Nanopits. – *Infrared Physics and Technology*, vol. 54, issue 2, p.p. 114-120, March 2011. DOI: 10.1016/j.infrared.2011.01.005. (Elsevier) (Impact Factor: 1.296)
21. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, V.G. Harutyunyan. *InAsSbP*-based diode heterostructures and photoconductive cells with quantum dots for thermophotovoltaic and other mid-infrared applications. – *ISESCO Journal of Science and Technology*, vol. 7, issue 12, p.p. 35-39, November 2011. (UNESCO) (Impact Factor: 1.197) (*World Renewable Energy Congress – WREC-XI*, Special Technical Session (S2): Radiation and Solar Materials, p. 32, Abu Dhabi, UAE, 25-30 September 2010).
22. **K.M. Gambaryan**. Epitaxial growth and investigation of the *InAsSbP*-based pyramidal, lens-shape and ellipsoidal islands and quantum dots on *InAs* (100) substrate. – *35<sup>th</sup> Anniversary of the Department of Radiophysics of the Yerevan State University*, Book of Invited Papers, 2010, p.p. 77-81.
23. O. Marquardt, **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, T. Hickel and J. Neugebauer. Growth process, characterization and optoelectronic properties of *InAsSbP* dot-pit cooperative nanostructures. – In Proc.: *Villa Conference on Interactions among Nanostructures (VCIAN-2010)*, June 21–25, 2010, Santorini, Greece, p. 36. (Springer)
24. V.M. Aroutiounian, **K.M. Gambaryan** and P. Soukiassian. Competing Nucleation Mechanisms and Growth of *InAsSbP* Quantum Dots and Nano-Pits on the *InAs* (100) Surface. – *Surface Science*, vol. 604, issue 13-14, p.p. 1127-1134, 2010. DOI: 10.1016/j.susc.2010.03.027. (Elsevier) (Impact Factor: 1.661)
25. **K.M. Gambaryan**. Interaction and cooperative nucleation of *InAsSbP* quantum dots and pits on *InAs* (100) substrate. – *Nanoscale Research Letters*, vol. 5, issue 3, p.p. 587-591, 2010. DOI: 10.1007/s11671-009-9510-8. (Springer) (Impact Factor: 2.726)
26. V.M. Aroutiounian, **K.M. Gambaryan**, N.G. Alaverdyan, A.K. Simonyan. Nucleation mechanism of strain-induced *InAsSbP* quantum dots and pits at liquid phase epitaxy on *InAs* (100) substrate. – *Armenian Journal of Physics*, vol. 2, issue 4, 2009, p.p. 268-273.
27. **K.M. Gambaryan**. Cooperative nucleation of strain-induced *InAsSbP* quantum dots and pits on *InAs* (100) substrate by liquid phase epitaxy. – *Armenian Journal of Physics*, vol. 2, issue 4, 2009, p.p. 286-290.
28. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian. Interaction and cooperative nucleation of *InAsSbP* quantum dots and pits on *InAs* (100) substrate. – In Proc.: *“Collaborative Conference on Interacting Nanostructures (CCIN-09)”*, November 9-13, 2009, San Diego, CA, USA, “Springer”, p. 22. (Springer)
29. P.G. Soukiassian, **K.M. Gambaryan**, M. Silly, H. Enriquez, F. Charra, T. Boeck, M. Schulze, V.M. Aroutiounian. Strain-Induced Quantum Wires and Quantum Dots Formation at Compound Semiconductors Surfaces – *The 12<sup>th</sup> International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-12)*. Weimar, Germany, 5–10 July, 2009, Book of Abstracts, p. 112.
30. **K.M. Gambaryan**. Cooperative nucleation of strain-induced *InAsSbP* quantum dots and pits on *InAs* (100) substrate by liquid phase epitaxy. – *“Semiconductor micro- and nanoelectronics”*, In Proc. of the *7<sup>th</sup> International Conference*, Tsakhcadzor, Armenia, July 3-5, 2009, p.p. 176-179.
31. V.M. Aroutiounian, **K.M. Gambaryan**, N.G. Alaverdyan, A.K. Simonyan. Nucleation mechanism of strain-induced *InAsSbP* quantum dots and pits at liquid phase epitaxy on *InAs* (100) substrate. – *“Semiconductor micro- and nanoelectronics”*, In Proc. of the *7<sup>th</sup> International Conference*, Tsakhcadzor, Armenia, July 3-5, 2009, p.p. 164-167.
32. V.M. Aroutiounian, A.Z. Adamyan, E.A. Khachatryan, **K.M. Gambaryan**, Z.N. Adamyan, V.M. Arakelyan. Development of program-controlled titania nanotube array formation technique. – *“Semiconductor micro- and nanoelectronics”*, In Proc. of the *7<sup>th</sup> International Conference*, Tsakhcadzor, Armenia, July 3-5, 2009, p.p. 168-171.
33. **K.M. Gambaryan**. Overview of *InAs*-based III-V Compound and Si/Ge Semiconductor Epitaxial Strain-Induced Islands and Quantum Dots Grown by Liquid Phase Epitaxy. – *Armenian Journal of Physics*, volume 1, issue 4, 2008, p.p. 247-267.
34. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, T. Boeck, M. Schulze. The growth of *InAs*-based diode heterostructures with quantum dots as a new material for thermophotovoltaic application. – *Physica Status Solidi C*, vol. 6, issue 6, p.p. 1456-1459, 2009. (Springer) (Impact Factor: 1.02) (*The 35<sup>th</sup> International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS-2008)*, “Europa-Park”, Rust, Freiburg, Germany, 21–24 September, 2008).
35. **K.M. Gambaryan**, V.G. Harutyunyan, V.M. Aroutiounian, T. Boeck, O. Marquardt, F. Schuette. *InAsSbP*-based Quantum Dot Mid-Infrared Photodetectors: Fabrication, Properties and Applications. – In Proceedings: *3<sup>rd</sup> International Conference “Nanomaterials: Application and Properties” (NAP-2013)*, Alushta, the Crimea, Ukraine, 16-21 September, 2013, vol. 2, No. 4, p.p. 04NAESP02 (4pp).
36. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, A.K. Simonyan, T. Boeck. Shape Transition of Strain-Induced *InAsSbP* Islands at Liquid-Phase Epitaxy on *InAs* (100) Substrate: From Pyramid to Semiglobe. – *Armenian Journal of Physics*, vol. 1, issue 3, 2008, p.p. 208-218.
37. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, T. Boeck, M. Schulze, P.G. Soukiassian. Strain-Induced *InAsSbP* Islands and Quantum Dots Grown by Liquid Phase Epitaxy on *InAs* (100) Substrate. – *Journal of Physics D: Applied Physics (“Fast Track Communication”)*, vol. 41, issue 16, 162004 (5 pp), 2008. (IOP) (Impact Factor: 2.544)
38. **K.M. Gambaryan**, V.M. Aroutiounian, T. Boeck, M. Schulze. The Growth of *InAs*-Based Diode Heterostructures with Quantum Dots as a New Material for Thermophotovoltaic Application. – *World Renewable Energy Congress (WREC-X)*, Glasgow, UK, 2008, p.p. 1223-1228. (Editor A. Sayigh © 2008 WREC).
39. **Կ.Մ. Դամբարյան**. Կիսահաղորդչային էպիտաքսիալ թաղանթների աճեցման տեխնոլոգիական մեթոդները: 2008 թ., Երևան, ԵՊՀ հրատարակչություն ©, 45 էջ:

## РЕЗЮМЕ

Диссертационная работа посвящена выращиванию и исследованию полупроводниковых эпитаксиальных наноструктур и фотоприемников среднего инфракрасного диапазона на их основе. В частности, в работе представлены результаты выращивания и исследования физических характеристик линзообразных и эллипсоидальных квантовых точек (КТ), квантовых колец (КК), нового типа квантовой молекулы (КМ), а также наноструктур в виде цепей КТ.

Предложен и использован технологический подход по применению трехкомпонентных твердых растворов при нанотехнологии квантоворазмерных структур. Соответствующий подбор компонент твердого раствора позволяет управлять не только значением относительной разницы постоянных решеток смачиваемого слоя и подложки в режиме Странский–Крастанова, но и ее знаком, определяющем форму кривизны смачиваемого слоя и геометрический вид наноструктуры.

Показано, что при уменьшении объема выращенных на подложке InAs(100) субмикрометрических островков InAsSbP состава, происходит изменение их геометрической формы в следующей последовательности: усеченная пирамида, пирамида, пирамида со сложной поверхностью, полусфера. Критический размер последнего перехода составляет  $\approx 500$  нм.

Выявлено, что при увеличении времени кристаллизации происходит изменение размеров и формы КТ, а также их функции распределения. Поверхностная плотность сравнительно маленьких КТ составляла  $(6-8) \times 10^9$  см<sup>-2</sup>, а средний диаметр и высота изменялись в пределах от 10-и до 40 нм и от 0.5 до 15 нм, соответственно. Поверхностная плотность сравнительно больших – в основном эллипсоидальных КТ (ЭКТ) составляла  $(5-8) \times 10^8$  см<sup>-2</sup>, а средний диаметр и высота изменялись в пределах от 50-и до 100 нм и от 5 до 25 нм, соответственно. С использованием атомно-силовой микроскопии, посчитаны коэффициенты растягивания ЭКТ по всем азимутальным направлениям:  $L_x/L_y=1.23 \pm 0.12$ ,  $L_x/L_z=9.2 \pm 3.6$  и  $L_y/L_z=7.9 \pm 3.5$ . Определена средняя радиальная скорость роста КТ, которая составляет  $\sim 0.05$  нм/с.

Показано, что при малых временах роста (до десяти минут) процесс освальдовского созревания КТ обусловлен скоростью реакции адатомов на поверхности матрицы со значением  $V \approx 2.65 \cdot 10^{-7}$  см/с (распределением Вагнера), а при больших временах роста (от получаса и более) – преобладает механизм объемной диффузии, со значением ее коэффициента –  $D \approx 3.17 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с (распределение Лифшица-Слезова).

Из четырехкомпонентной жидкой фазы на подложке InAs(100) выращены КК, цепи КТ и молекулы КТ, состоящие из центральной InAsSb КТ, окруженной в основном шестью InAsP реверсивными КТ-ми. Для всех структур обнаружено красное смещение края поглощения от  $\lambda=3.44$  мкм до  $\lambda=3.85$  мкм.

Континуальная модель эластичности была применена для количественного изучения механизма зародышеобразования КТ и нанопор в трехкомпонентных системах InAsSbP, GaAsSbP и SiGeC. Показано, что для всех указанных трех систем

твердых растворов существует некое критическое напряжение решетки, при котором режим роста меняется от зародышеобразования КТ к формированию нанопор. Вычислена свободная энергия смешения для отмеченных твердых растворов и исследованы стабильные, метастабильные и нестабильные (области несмешивания) области твердых растворов в зависимости от температуры.

Показано, что наличие InAsSbP КТ второго рода на поверхности подложки InAs приводит к увеличению поверхностного сопротивления фоторезисторов при комнатной температуре почти на полпорядка – от 6-8 Ом до 38-40 Ом, к уменьшению емкости почти в пять раз, а на вольт-емкостной характеристике наблюдаются два характерных «завала» при напряжениях 0.28 В и 0.54 В, соответственно. При температуре жидкого азота на вольт-емкостной характеристике структуры с InAsSbP КТ второго рода наблюдаются противоположные осцилляции емкости при увеличении напряжения с последующим его уменьшением, а также наличие гистерезиса –  $\Delta C=0.483$  пФ при частоте 1 МГц. На кривой магнитосопротивления структуры с КТ выявлены характерные осцилляции как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого азота. Посчитаны значения четырех энергетических уровней локализованных дырок от потолка валентной зоны подложки.

На спектре фотолюминесценции (ФЛ) структуры с КТ при  $T=77$ К были выявлены два максимума: при  $E=0.404$  эВ и  $E=0.397$  эВ. Для скапсулированных КТ на спектре ФЛ был замечен сильно выраженный максимум при энергии  $E=0.371$  эВ, с красным смещением от основного максимума в 33.2 мэВ, а также характерные «разломы» при энергиях 0.382 эВ, 0.39 эВ и 0.398 эВ. Путем сочетания и анализа измерений магнитосопротивления и спектра ФЛ экспериментально построен энергетический спектр локализованных дырок и посчитано значение их эффективной массы.

На спектре фотоотклика структур с КТ при  $T=300$ К обнаружено не только красное смещение до  $\lambda \sim 4$  мкм, но и выявлены дополнительные пики при  $\lambda=3.56$  мкм и  $\lambda=3.65$  мкм. Было показано, что даже при малых –  $\pm 2$  мВ значениях напряжения, происходит существенное увеличение значений фотоотклика дополнительных максимумов. На структурах с КТ второго рода был зарегистрирован также фотовольтаический эффект. При  $T=300$ К на длине волны  $\lambda=3.39$  мкм максимальные значения вольтовой и амперной чувствительности фоторезисторов с КТ составляли 2 В/Вт и 82 мА/Вт, соответственно. При лазерном излучении с длиной волны  $\lambda=1.15$  мкм относительное уменьшение поверхностного сопротивления фоторезисторов составляло 14 %, а при длине волны  $\lambda=3.39$  мкм – 17 %, при комнатной температуре.

Создан также другой тип фотоприемников среднего ИК диапазона в виде n-InAs/p-InAsSbP диодных гетероструктур с КТ диаметром в пределах 10–30 нм и высотой от 3-х до 20 нм внутри области пространственного заряда p-n перехода. Выявлено как красное смещение края поглощения при  $T=300$ К, так и наличие на спектре ФЛ при температуре жидкого азота дополнительных длинноволновых пиков, обусловленных генерационно-рекомбинационными процессами в КТ.

## SUMMARY

Present dissertation describes the growth and investigation of semiconductor epitaxial nanostructures and mid-infrared photodetectors based on them. It is shown that the liquid phase epitaxy can be successfully employed for the growth of several types of nanostructures in Stranski-Krastanow growth mode. The results of growth and investigation of physical characteristics of the lens-shape and ellipsoidal quantum dots (QDs), quantum rings (QRs), quantum dot molecules (QMs) and cooperative QD-chains (CQDCs) are presented. A new technological approach at nanoscale engineering by using the ternary semiconductor materials systems are proposed and applied. This approach allows to manage not only the value of lattice-mismatch ratio between the wetting layer and the substrate, but also to regulate its sign, which determines the geometric form of nanostructures.

The morphology, dimensions and strain distribution of *InAsSbP*-based strain-induced sub-micrometric islands grown on *InAs*(100) substrates were investigated by high-resolution scanning electron microscopy and found to be self-organized from pyramids to semiglobe. A critical size of ~500 nm for that shape transformation was experimentally and theoretically determined.

At the increasing of growth time a QDs coalescence and coarsening are revealed, which lead to the changing of QDs forms, sizes and distribution function. Atomic force microscopy analysis shows that small QDs were mainly spherical, but the larger ones – ellipsoidal with the elongation mainly along [010] direction. An elongation ratios of  $L_x/L_y = 1.23 \pm 0.12$ ,  $L_x/L_z = 9.2 \pm 3.6$  and  $L_y/L_z = 7.9 \pm 3.5$  for ellipsoidal QDs have been calculated. An average radial nucleation rate of ~0.05 nm/sec for QDs was evaluated.

By using Lifshiz-Slezow-Wagner theory was shown, that at initial stage of nucleation (up to 10 min) the QDs distribution is better fitted by the Wagner distribution, which testify that QDs nucleation process is limited by the adatoms surface reaction with the calculated coefficient of  $B \cong 2.65 \cdot 10^{-7}$  cm/s. Otherwise, at longer time (half an hour and more) QDs massive is well described by the Lifshiz-Slezow distribution, which testify that nucleation process is occurred already by volume diffusion with the calculated coefficient of  $D \cong 3.17 \cdot 10^{-12}$  cm<sup>2</sup>/c.

The QRs with an average surface density of  $(1-3) \times 10^9$  cm<sup>-2</sup> were grown on *InAs*(100) substrate from quaternary *InAsSbP* liquid phase. An optimal external diameter and average height of QRs were equal to ~35 nm and ~10 nm, respectively, but internal diameter was changed within 1–10 nm. A new type of QMs consist of the central *InAsSb* QD surrounded mainly by six *InAsP* leaves were also grown. Surface density of QDs in the QMs array was equal to  $(0.8-2) \times 10^9$  cm<sup>-2</sup>, with the average diameter and height within 5–45 nm and 2–20 nm, respectively. A red shift of the QMs' absorption edge from  $\lambda = 3.44$   $\mu$ m to  $\lambda = 3.85$   $\mu$ m and enlargement of the absorption spectrum toward the short wavelengths up to  $\lambda = 2.75$   $\mu$ m were revealed at T=300K. The growth and characterization of CQDCs are also presented.

The continuum elasticity model has been applied to quantitatively investigate the growth features and nucleation mechanism of QDs, leaves, and joint QDs-leaves

nanostructures in *InAs*<sub>1-x-y</sub>*Sb*<sub>x</sub>*P*<sub>y</sub>, *GaAs*<sub>1-x-y</sub>*Sb*<sub>x</sub>*P*<sub>y</sub> and *Si*<sub>1-x-y</sub>*Ge*<sub>x</sub>*C*<sub>y</sub> material systems. It was determined, that at some critical strain the growth mode changes from nucleation of QDs to formation of leaves. The free energy of mixing for all corresponding binary and ternary systems were calculated and studied and their 2D and 3D sketches were plotted. A stable, quasi-stable and unstable regions (immiscibility gaps) for the mentioned alloy's compositions were determined at different temperatures.

It is shown that the presence of type-II QDs leads to increasing of surface resistivity up to half order – from 6-8  $\Omega$  to 38–40  $\Omega$  at room temperature, decreasing of capacitance up to five times and appearing of specific dips on the capacitance-voltage (C-V) characteristic at 0.28 V and 0.54 V. T=77K measurements have shown oscillations on C-V curve and that these oscillations were opposite-directed at increasing and further decreasing of the applied voltage. The capacitance hysteresis of  $\Delta C = 0.483$  pF at 1 MHz was also observed. An anisotropy in all azimuthal directions and specific fractures on the magnetoresistivity curve for QD samples at T=300K and T=78K temperatures were revealed. The values of nearest to *InAs* valence band four energy levels for localized holes were calculated.

For the structures with QDs, two peaks on T=78K photoluminescence (PL) spectrum at  $E = 0.404$  eV and  $E = 0.397$  eV were revealed. For the structures with encapsulated QDs a strong peak on PL spectrum at  $E = 0.371$  eV and red-shifted from the main peak up to 33.2 meV are appeared. A specific fractures on the PL spectrum were also detected at  $E = 0.382$  eV,  $E = 0.39$  eV and  $E = 0.398$  eV. By combination of the magnetoresistivity and PL measurements, the eigenenergies of localized holes in *InAsSbP* type-II QDs were experimentally determined. At room temperature on the photoresponse (PR) spectra of the samples with QDs were detected not only enlargement toward the long wavelengths (a red shift) up to  $\lambda \sim 4$   $\mu$ m, but also revealed additional peaks at  $\lambda = 3.56$   $\mu$ m and  $\lambda = 3.65$   $\mu$ m. It was shown that even at very low applied voltages ( $\pm 2$  mV) a sufficient increasing of the PR signal on additional peaks is occurred. A photovoltaic effect for the structure with type-II QDs has also been detected. The maximal voltage and current sensitivities of the *InAsSbP* type-II QDs based photodetectors at cw He-Ne laser radiation with  $\lambda = 3.39$   $\mu$ m were equal to 2 V/W and 82 mA/W, respectively, at room temperature. The maximum drop of surface resistance at laser radiation down to 14 % for  $\lambda = 1.15$   $\mu$ m wavelength and 17 % for  $\lambda = 3.39$   $\mu$ m wavelength was detected.

n-*InAs*/p-*InAsSbP* diode heterostructures with QDs inside the p-n junction spatial charge region are fabricated. Transmission electron microscopy measurements of the diode heterostructure's cross-sectional area revealed a presence of QDs on the substrate-epilayer interface with an average diameter and height within 10–30 nm and 3–20 nm, respectively. Investigations of the optoelectronic characteristics show a red shift of the absorption edge at room temperature, as well as presence of an additional peaks on T=78K PL spectrum at longer wavelengths. These physical features were explained by the generation-recombination processes occurring in QDs.

