

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ  
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ ՎԱՐԴԱՆ ԳԱԳԻԿԻ

InAsSbP ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ԿԵՏԵՐԻ ԱՃԵՑՈՒՄԸ, ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑ  
ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ՊԱՏՐԱՍՏՎԱԾ ՄԻՋԻՆ ԻՆՖՐԱԿԱՐՄԻՐ ՏԻՐՈՒՅԹԻ  
ՖՈՏՈՆԸՆԴՈՒՆԻԲՉՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ

Ա.04.10 – “Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա” մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի  
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2012

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА  
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

АРУТЮНЯН ВАРДАН ГАГИКОВИЧ

ВЫРАЩИВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ InAsSbP КВАНТОВЫХ ТОЧЕК И  
СОЗДАННЫХ НА ИХ ОСНОВЕ ФОТОДЕТЕКТОРОВ СРЕДНЕГО  
ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

АВТОРЕФЕРАТ

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


ЕРЕВАН – 2012

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում (ԵՊՀ)

Գիտական ղեկավար՝ **Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ  
Վ. Մ. Ղամբարյան**  
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ **Ֆիզ.-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր  
Ա. Գ. Սարգսյան**  
**տեխ. գիտ. դոկտոր, դոցենտ  
Գ. Շ. Շմավոնյան**  
Առաջատար կազմակերպություն՝ **Ռուս-Հայկական (Սլավոնական)  
համալսարան**

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2012թ. մայիսի 12-ին, ժամը 12<sup>00</sup> Երևանի պետական համալսարանի 049 ֆիզիկայի մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0025, ք. Երևան, Ա. Մանուկյան փ., 1):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքված է 2012թ. ապրիլի 11-ին:

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար՝  **Ֆիզ.-մաթ. գիտ. թեկնածու, դոցենտ  
Վ. Պ. Քալանթարյան**

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете (ЕГУ)

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук, доцент  
**К. М. Гамбарян**  
Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор  
**А. Г. Саркисян**  
доктор тех. наук, доцент  
**Г. Ш. Шмавонян**  
Ведущая организация: Российско-Армянский  
(Славянский) университет

Защита диссертации состоится 12 мая 2012 г. в 12<sup>00</sup> часов  
на заседании специализированного совета 049 по физике при Ереванском  
государственном университете (адрес: 0025, г. Ереван, ул. А. Манукяна, 1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.  
Автореферат разослан 11 апреля 2012 г.

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

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՆԿԱՐԱԳԻՐԸ

### **Թեմայի արդիականությունը**

Քվանտային կետերի աճեցումը և հետազոտումը ներկայումս մեծ ուշադրության են արժանանում, քանի որ դրանց օգտագործմամբ հնարավոր է դառնում անցում կատարել կիսահաղորդչային նոր տիպի կատարելագործված հատկություններով սարքերի: Քվանտային կետերով պատրաստված ֆոտոընդունիչները իրենց հնարավորություններով առաջ են անցնում վերջին ժամանակներս պրակտիկ նշանակություն ստացած քվանտային փոսերով ֆոտոընդունիչներից՝ ցուցաբերելով ավելի փոքր մթնային հոսանքներ, ավելի մեծ ֆոտոզգայնություն ու արագագործություն և այլն: Այդ պատճառով քվանտային կետերով ֆոտոընդունիչները բավականին արդիական են և մեծ նշանակություն ունեն բժշկությունում որոշ հիվանդությունների բացահայտման և ախտորոշման, պայթուցավտանգ գազերի արագ գրանցման, հատուկ նպատակների և շատ այլ կարևոր խնդիրների լուծման համար:

### **Աշխատանքի հիմնական նպատակները**

1. Հեղուկային էպիտաքսիայի ձևավորված տեխնոլոգիայով *InAs*(100) տակդիրի վրա *InAsSbP* բաղադրությամբ քվանտային կետերի աճեցումը:
2. Քվանտային կետերի ուսումնասիրումը և դրանց հիման վրա միջին ինֆրակարմիր տիրույթի ֆոտոընդունիչների պատրաստումը:
3. Քվանտային կետերի բյուրեղաֆիզիկական, օպտիկական, ունակային և մագնիսական հատկությունների ուսումնասիրումը:

### **Աշխատանքում առաջադրվել և լուծվել են հետևյալ խնդիրները**

1. Ընտրելով քառաբաղադրիչ լուծույթ-հալույթի բաղադրությունը և սաղմնառաջացման տեխնոլոգիական ռեժիմները՝ *InAs* տակդիրի վրա հեղուկային էպիտաքսիայի տեխնոլոգիայով աճեցնել *InAsSbP* բաղադրությամբ քվանտային կետեր (ՔԿ):
2. Օհմական հպակների ձևավորմամբ պատրաստել ֆոտոդիմադրությունների ձևով միջին ինֆրակարմիր տիրույթի ֆոտոընդունիչներ:
3. Չափել ֆոտոընդունիչների վոլտ-ամպերային, վոլտ-ունակային բնութագրերը, ինչպես նաև մագնիսադիմադրության կախվածությունը մագնիսական դաշտի մեծությունից:
4. Ինֆրակարմիր լազերային ճառագայթման ազդեցությամբ չափել ֆոտոընդունիչների դիմադրությունների փոփոխությունները, լարման ու հոսանքի զգայունությունները:

**Ստացված արդյունքների գիտական նորություն**

1. *InAs*(100) տակդիրի վրա առաջին անգամ աճեցվել են *InAsSbP* բաղադրությամբ գնդաձև, էլիպտիդաձև և օղակաձև քվանտային կետեր:
2. Վոլտ-ամպերային և վոլտ-ունակային ուսումնասիրությունների միջոցով հայտնաբերվել են *InAsSbP* քվանտային կետերի որոշ առանձնահատկությունները:
3. Քվանտային կետերով պայմանավորված յուրահատկություններ են նկատվել մագնիսական դաշտից ունեցած մագնիսադիմադրության կախվածության հետազոտման միջոցով:
4. *InAsSbP* քվանտային կետերի ազդեցության շնորհիվ դիտվել են ֆոտոընդունիչների կլանման և ֆոտոարձագանքի սպեկտրների երկարալիքային շեղում: Ցույց է տրվել նաև ֆոտոարձագանքի սպեկտրի ցածր լարմամբ ղեկավարման հնարավորությունը:

**Ներկայացված հետազոտությունների կիրառական նշանակություն**

1. Օպտիկական չափումների արդյունքներից հետևում է, որ *InAsSbP* քվանտային կետերով ֆոտոընդունիչները կարող են օգտագործվել 3-ից 4 մկմ տիրույթում ինֆրակարմիր ճառագայթում ունեցող մարմինների գրանցման համար:
2. Կարևոր կիրառական նշանակություն ունի քվանտային կետերով ֆոտոընդունիչի ֆոտոարձագանքի սպեկտրի արտաքին կիրառված ցածր լարմամբ ղեկավարման հնարավորությունը:
3. Ֆոտոընդունիչների 3.39 մկմ ալիքի երկարության ճառագայթման գրանցման հնարավորությունը թույլ է տալիս գրանցել մարդկության համար մեծ նշանակություն ունեցող նյութերը, օրինակ, արդյունաբերական մեթան գազը, արյան մեջ գլյուկոզայի պարունակությունը և այլն:
4. Քվանտային կետերի կիրառումը բերել է ֆոտոընդունիչների հատկությունների ջերմաստիճանային կայունությանը, որը մասնավորապես նկատվել է մագնիսադիմադրության չափումների արդյունքում:

**Պաշտպանությանը ներկայացված հիմնական դրույթները**

1. Հատուկ պատրաստված բյուրեղացման համակարգի միջոցով հեղուկային էպիտաքսիայի ձևափոխված տեխնոլոգիայով *InAs*(100) տակդիրի վրա աճեցվել են  $10^8$ - $10^{10}$  սմ<sup>-2</sup> մակերևույթային խտությամբ *InAsSbP* գնդաձև, էլիպտիդաձև և օղակաձև քվանտային կետեր:
2. Սենյակային ջերմաստիճանում վոլտ-ունակային կախվածության կորի վրա 0.28 Վ և 0.54 Վ լարումների դեպքերում նկատվել են ՔԿ-երով

capacitance change versus applied voltage was not detected, but for PD-2 two obvious dips at 0.28 V and 0.54 V were detected. At 77 K temperature a capacitance hysteresis and opposite-directed “oscillations” were observed on capacitance-voltage curve of QDs based photodetector at increasing and further decreasing of the applied voltage. Measurements of the capacitance-frequency characteristics have shown that the capacitance of the QDs based photodetector remains constant up to  $10^5$  Hz frequency.

7. For PD-2 specific “fractures” on the curve of magnetoresistance’s dependence on magnetic field were observed. It is assumed that the reason of appearance of those “fractures” is the Aharonov-Bohm effect.
8. Due to maximums of derivative of the magnetoresistance curve several energetic levels created by QDs were defined. The values of those energies are equal to  $h_0=2.32$  meV,  $h_1=1.55$  meV,  $h_2=0.91$  meV,  $h_3=0.53$  meV.
9. For the structure with *InAsSbP* quantum dots a “red shift” of absorption spectrum up to 3.87  $\mu$ m was found.
10. During photoresponse measurements compared to PD-1 long wavelength shift of the spectrum and additional maximums were observed for PD-2. Also, obvious dependence of the photoresponse spectrum of quantum dot photodetector on low applied voltages (up to  $\pm 2$  mV) was found. This peculiarity is important for fabrication of two-color infrared photodetector. Also, the presence of photoresponse signal at zero applied voltage was observed. That effect was called “anomalous” photovoltaic effect.
11. The voltage and current maximal sensitivities of the *InAsSbP* QDs based photodetector at laser radiation with 3.39  $\mu$ m are equal to 2 V/W and 82 mA/W, respectively. It was shown that the mid-infrared photodetector can be also used for detecting the thermal radiation of an object heated up to 1200-1300  $^{\circ}$ C temperatures.
12. At room temperature the maximal drop of surface resistance of the quantum dot based photodetector at laser radiation down to 14 % for 1.15  $\mu$ m wavelength and 17 % for 3.39  $\mu$ m wavelength were detected. The fabricated QDs based photodetectors can successfully work at room temperature, which allows to overcome the usage of expensive cryogenic system.

## SUMMARY

Nowadays, due to their attractive properties quantum dots have been intensively investigated both for scientific point of view and for improving the properties of align of semiconductor devices. Infrared photodetectors are of special interest for solving many applied problems of optoelectronics. In particular, mid-infrared photodetectors are used for astronomical investigations, detection of black-body radiation, for special applications, as well as for optical detection of some industrial gases such as methane, glucose in blood and other biomaterials.

The main purpose of the thesis is the growth and investigation of *InAsSbP* quantum dots (QDs), as well as the preparation of mid-infrared photodetectors based on them.

The thesis's key results are given below:

1. Quaternary *InAsSbP* QDs have been grown on *InAs(100)* substrate by modified liquid phase epitaxy. To grow QDs the lattice mismatch of wetting layer and substrate were chosen to provide the Stranski-Krastanow growth mode of nucleation mechanism.
2. Lens-shape, ellipsoidal and ring-like grown nanostructures were investigated by scanning electron (SEM) and atomic force (AFM) microscopes. Statistical AFM studies have shown that the QDs have  $(6-8) \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  surface density with heights from 0.5 nm to 30 nm and widths from 10 nm to 50 nm.
3. During nanostructures growth the Ostwald ripening process was observed. The increment of growth time led to transformation of QDs' distribution function versus their diameter from Gram-Charlier to Gaussian and then followed by Lifshitz-Slezov like distribution.
4. The increment of antimony and phosphorous in liquid phase led to the formation of quantum rings. A novel type of quantum molecule consisted of a quantum dot surrounded by nano-pits were grown at 4% lattice mismatch of wetting layer and substrate. The Fourier-transform infrared spectrometry (FTIR) was applied to investigate the absorption spectra of that nanostructure. On the FTIR spectra the "red shift" of the absorption edge was also observed.
5. A deflection from linear current-voltage characteristic for QD structure was observed at liquid nitrogen temperature.
6. Two type mid-infrared photodetectors without (PD-1) and with QDs (PD-2) in the form of photoconductive cells were made. Capacitance-voltage characteristics of the photodetectors were investigated as well. At 300 K temperature for PD-1

պայմանավորված «փոսեր»: Իսկ հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում նկատվել են ունակության հակաուղղված «տասանումներ»:

3. ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչի մագնիսական դաշտից ունեցած մագնիսադինադրության կախվածության կորի վրա նկատվել են «կոտրվածքներ», որոնք 300 Կ և 77 Կ ջերմաստիճաններում դիտվել են գրեթե նույն մագնիսական դաշտերի արժեքների դեպքերում: «Կոտրվածքների» միջոցով որոշվել են *InAs(100)* տակդիրի արգելված գոտում քվանտային կետերի ստեղծած մի քանի էներգետիկ մակարդակների արժեքները:
4. *InAsSbP* բաղադրությամբ ՔԿ-երի օգտագործումը բերել է ֆոտոընդունիչի կլանման և ֆոտոարձագանքի սպեկտրների երկարալիքային շեղմանը: Նկատվել է արտաքին կիրառված լարումից ֆոտոարձագանքի սպեկտրի կախվածություն, ինչպես նաև առանց արտաքին լարման կիրառմամբ գրանցվել է ֆոտոարձագանքի ազդանշան (կոչվել է «անոմալ» ֆոտովոլտային երևույթ):
5. Ինֆրակարմիր լազերային ճառագայթման ազդեցության պայմաններում ՔԿ-ով ֆոտոընդունիչի դինադրության առավելագույն անկումը կազմել է միջև 17%, իսկ լարման ու հոսանքի զգայունությունները համապատասխանաբար 2 Վ/Վտ և 82 մԱ/Վտ են: Քվանտային կետերով ֆոտոընդունիչը կարող է օգտագործվել նաև 1200 °C-1300 °C տաքացված մարմինների գրանցման համար:

### Աշխատանքի ներկայացումները

1. Villa Conference on Energy, Materials and Nanotechnology (VCEMN-2011), Las Vegas, Nevada, USA, April 21-25, 2011:
2. International Conference on Nanoscience and Technology, Beijing, China, September 7-9, 2011:
3. 8<sup>th</sup> International Conference on Semiconductor Micro- and Nanoelectronics, Yerevan, Armenia, July 1-3, 2011:
4. Second International School of Nanophotonics and Photovoltaics, Tsakhkadzor, Armenia, September 15-22, 2010:

### Տպագրությունները

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները տպագրվել են 5 գիտական հոդվածներում և 2 թեզիսներում:

### Աշխատանքի կառուցվածքը և ծավալը

Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, չորս գլուխներից, եզրակացություններից և հղումների 105 անուն պարունակող գրականության

ցանկից: Աշխատանքում առկա են 71 նկար և 1 աղյուսակ, իսկ աշխատանքի ընդհանուր ծավալը 136 էջ է:

### **Աշխատանքի բովանդակությունը**

Ներածական մասում ներկայացված է թեմայի արդիականությունը, ձևակերպված են աշխատանքի նպատակը և առաջադրված ու լուծված խնդիրները, ցույց է տրված ստացված արդյունքների գիտական նորույթը և գործնական արժեքը, ինչպես նաև բերված են պաշտպանությանը ներկայացված հիմնական դրույթները:

Առաջին գլխում ներկայացված են  $A^3B^5$  դասի կիսահաղորդիչների ու դրանց պինդ լուծույթների հատկությունները, ինչպես նաև դրանց օգտագործմամբ նանոկառուցվածքների աճեցման համար կիրառվող տեխնոլոգիաները: Նշված են ինֆրակարմիր տիրույթում աշխատող ֆոտոդետեկտորների զարգացման ընթացքները, կիրառական նշանակությունները և այլն:

Երկրորդ գլխում նկարագրված է  $InAs(100)$  տակդիրի վրա  $InAsSbP$  բաղադրությամբ նանոկառուցվածքների աճեցման համար օգտագործված հեղուկային էպիտաքսիայի ձևավորված սարքավորումը: Նշված սարքավորումը թույլ է տալիս օգտագործել բարակ հեղուկ փուլեր (200-1000 մկմ): Որպես բյուրեղացման սկզբնական ջերմաստիճան ընտրվել է 550 °C-ը:  $InAsSbP$  պինդ լուծույթի բաղադրությունները ընտրվել են այնպես, որ թրջող շերտի կազմավորման ընթացքում լարվածության մեծացման արդյունքում Ստրանսկի-Կրաստանով մեթոդով ձևավորվեն լարվածությամբ ինքնակազմավորված նանոկառուցվածքներ: Ձևավորված նանոչափային կառուցվածքները ուսումնասիրվել են բարձր լուծողունակությամբ սկանավորող էլեկտրոնային (ՄԷՄ) (SEM-EDXA-FEI Nova 600-Dual Beam) և ատոմաուժային (ԱՌՄ) (Asylum Research MFP-3D-AFM) մանրադիտակների միջոցով: Նկ. 1-ում ներկայացված են աճեցված  $InAsSbP$  բաղադրությամբ ՔԿ-երի նշված մանրադիտակներով կատարված ուսումնասիրությունների արդյունքները: Նկ. 1 ա-ում շրջանագծով նշված տիրույթների խոշորացված պատկերները ներկայացված են նկ. 1 բ, գ, դ նկարներում: Նկ. 1 ա-ից կարելի է նկատել նանոկառուցվածքների ձևավորման ընթացքում ՔԿ-երի Օսֆալոյան միավորման երևույթը, քանի որ նկատվում են մեծ ՔԿ-եր, որոնց շրջակայքում մյուսները գրեթե բացակայում են: Լրացուցիչ հետազոտությունները ցույց են տվել, որ ՔԿ-երի խտությունը  $(6-8) \cdot 10^9$  սմ<sup>-2</sup> է, բարձրությունները 0.5-ից 30 նմ տիրույթում են և միջին տրամագծերը՝ 10-ից 50 նմ:

5. Смещение от линейности вольт-амперной характеристики для структуры с КТ было обнаружено при температуре жидкого азота.
6. Созданы два типа фотоприемников среднего ИК диапазона в форме фоторезисторов – без (ФП-1) и с КТ (ФП-2) и исследованы их вольт-емкостные характеристики (В-Е). При температуре 300 К для ФП-1 изменение емкости от напряжения не было обнаружено, а для ФП-2 две характерные “углубления” при напряжениях 0.28 В и 0.54 В были выявлены. При температуре 77 К на кривой В-Е характеристики фотодетектора с КТ при увеличении напряжения с последующим его понижением были обнаружены “противонаправленные” колебания и гистерезис емкости.
7. Для ФП-2 на кривой зависимости магнетосопротивления от магнитного поля были обнаружены специфические “переломы”. Предполагается, что причиной этих “переломов” является эффект Ааронова-Бома.
8. С помощью максимумов на производной магнетосопротивления были определены значения нескольких энергетических уровней созданных квантовыми точками. Величины этих уровней равны  $h_0=2.32$  мэВ,  $h_1=1.55$  мэВ,  $h_2=0.91$  мэВ,  $h_3=0.53$  мэВ.
9. Для структуры с  $InAsSbP$  КТ был обнаружен длинноволновой сдвиг спектра поглощения до 3.87 мкм.
10. Для ФП-2, в отличие от ФП-1, во время измерений фотоотклика длинноволновой сдвиг спектра и дополнительные максимумы были обнаружены. Зависимость спектра ФП-2 от низких приложенных напряжений (до  $\pm 2$  мВ) также была обнаружена, что особенно важно для создания двухцветных фотоприемников. Было также обнаружено наличие сигнала фотоотклика при нулевом приложенном напряжении. Это явление было названо “аномальным” фотовольтаическим эффектом.
11. При лазерном излучении с длиной волны 3.39 мкм максимальная чувствительность по напряжению и току фотоприемника на основе  $InAsSbP$  КТ составляла 2 В/Вт и 82 мА/Вт, соответственно. Также было показано, что данный фотоприемник может быть использован для детектирования теплового излучения тела, нагретого до температуры 1200-1300 °С.
12. При комнатной температуре под действием лазерного излучения максимальное уменьшение поверхностного сопротивления ФП-2 при длине волны 1.15 мкм составляло 14 %, а при 3.39 мкм – 17 %.

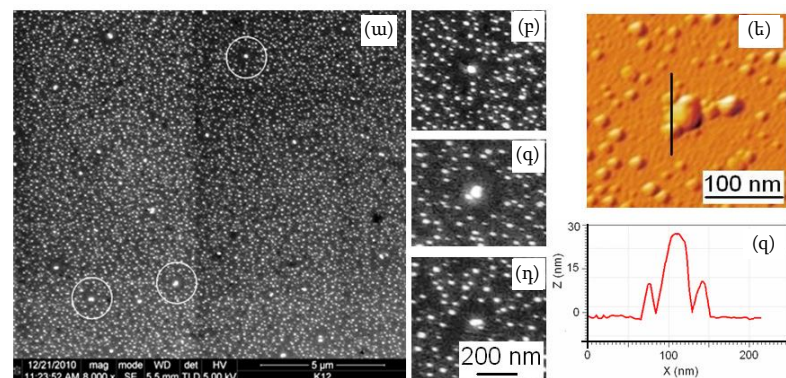
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время квантовые точки в связи с их уникальными свойствами активно исследуются как с научной точки зрения, так и для усовершенствования свойств ряда полупроводниковых приборов. Для решения ряда прикладных задач оптоэлектроники особый интерес представляют фотоприемники инфракрасного излучения. В частности, фотоприемники среднего инфракрасного диапазона используются для астрономических исследований, детектирования теплового излучения, а также для оптического детектирования некоторых промышленных газов и биоматериалов.

Основной целью диссертационной работы является выращивание и исследование *InAsSbP* квантовых точек, а также изготовление фотодетекторов среднего инфракрасного диапазона на их основе.

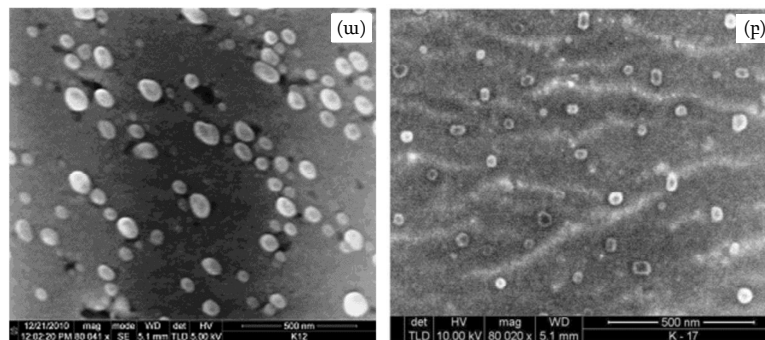
Ниже приведены полученные в диссертационной работе основные результаты.

1. Методом модифицированной жидкофазной эпитаксии на подложке *InAs(100)* были выращены четырехкомпонентные *InAsSbP* квантовые точки (КТ). Для выращивания КТ разница постоянных решеток смачивающего слоя и подложки выбраны так, чтобы обеспечивался механизм зародышеобразования по методу Странски–Крастанова.
2. Структурные характеристики выращенных линзообразных, эллипсоидальных и колцеобразных наноструктур были исследованы сканирующим электронным (СЭМ) и атомно-силовым (АСМ) микроскопами. АСМ исследования статистических данных показали, что средняя поверхностная плотность КТ составляла  $(6-8) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Высота и средний диаметр КТ изменялись в пределах от 0.5 до 30 нм и от 10 нм до 50 нм, соответственно.
3. При выращивании наноструктур был замечен процесс Оствальдовского созревания. При увеличении времени роста КТ была обнаружена трансформация вида функции распределения КТ от их среднего диаметра от функции Грама-Чарлиера к Гауссовскому, с последующим переходом к распределению типа Лифшица-Слезова.
4. Увеличение концентрации сурьмы и фосфора в жидкой фазе приводит к формированию квантовых колец. При 4 %-ой разницы решеток смачиваемого слоя и подложки был выращен новый тип квантовой молекулы, состоящей из КТ, окруженной нанопорами.



Նկ. 1 *InAs(100)* տակդիրի վրա աճեցված *InAsSbP* ՔԿ-երի ա-ՄԷՄ-ով ստացված միկրոպատկեր ( $S = 17 \times 17 \text{ մկմ}^2$ ), բ, գ, դ-խոշորացված պատկերներ, ե-ԱՌՄ-ով ստացված պատկերը և զ-դրա համապատասխան սկանավորման գծերը:

Բյուրեղացման տարբեր ժամանակների համար դիտվել են  $10^8-10^{10} \text{ սմ}^{-2}$  մակերևութային խտությամբ *InAsSbP* բաղադրությամբ ՔԿ-երի տարբեր օրենքներով բաշխվածություններ.  $t_1=10 \text{ ր}$ ,  $t_2=20 \text{ ր}$  և  $t_3=30 \text{ ր}$  բյուրեղացման ժամանակների համար դիտվել են համապատասխան Գրամ-Չարլիերի, Գաուսյան և Լիֆշից-Սլեզովի նման բաշխվածություններ: Բյուրեղացման ժամանակի հետագա մեծացումը բերել է նանոկառուցվածքների էլիպտիկաձև տեսքի փոփոխության՝ դառնալով բուրգ, ձգված բուրգ և հատած բուրգ: Նկ. 2 ա-ում ներկայացված է ՄԷՄ-ով ստացված էլիպտիկաձև ՔԿ-երի պատկերը, իսկ նկ. 2 բ-ում՝ քվանտային օղակների պատկերները (ՔՕ), որոնք

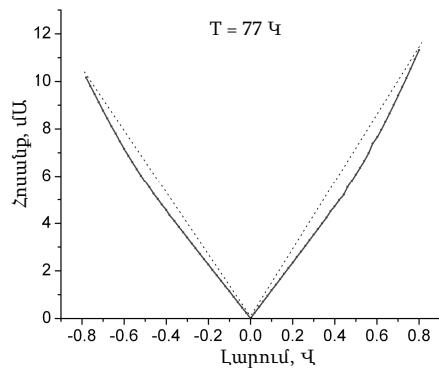


Նկ. 2 *InAsSbP* բաղադրությամբ ա- էլիպտիկաձև քվանտային կետերի, բ-քվանտային օղակների ՄԷՄ-ով ստացված պատկերները:

ստացվել են հեղուկ փուլում ծարիրի և ֆոսֆորի ավելի մեծ կոնցենտրացիաների օգտագործմամբ: Այդ նանոկառուցվածքների համար դիտվել է դրանց քանակի արտաքին տրամագծից ունեցած Գաուսյան բաշխում:

Հետաքրքիր նանոկառուցվածքներ են ստացվել երբ աճեցվող շերտի բաղադրությունը ընտրվել է այնպես, որ թրջող շերտի և տակդիրի միջև ցանցերի տարբերությունը լինի մոտավորապես 4 %: Այդպիսի պայմաններում ձևավորվել են բավականին համասեռ բաշխվածությամբ նանո-խոռոչներով պատված քվանտային կետերի համալրային համակարգեր: ՔԿ-խոռոչներ համակարգը իր տեսքով հիշեցնում է երիցուկ բույսի տեսքը, այդ իսկ պատճառով այդպիսի քվանտային մոլեկուլը կոչվել է «նանո-երիցուկ» («nano-camomile»):

**Երրորդ գլխում** ներկայացված են *InAs(100)* տակդիրի օգտագործմամբ միջին ինֆրակարմիր տիրույթի ֆոտոընդունիչների պատրաստման տեխնոլոգիաները: Այդպիսի ֆոտոընդունիչների պատրաստման համար ջերմային վակուումային փոշեցրման տեխնոլոգիայով առանց (ՖԸ-1) և *InAsSbP* ՔԿ-երով (ՖԸ-2) *InAs* տակդիրի վրա փոշեցրելով *Cr/Au* մետաղական շերտեր ստեղծվել են օհմական հպակներ: Այս գլխում ներկայացվել են այդ կառուցվածքների վոլտ-ամպերային (Վ-Ա) բնութագրերը: ՖԸ-2-ի համար ՔԿ-երին բնորոշ առավել ակնհայտ ոչգծային Վ-Ա բնութագիր է դիտվել 77 Կ ջերմաստիճանում կատարված չափումների ժամանակ (նկ. 3):



Նկ. 3 Հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում *InAsSbP* ՔԿ-երով պատրաստված ֆոտոընդունիչի վոլտ-ամպերային բնութագիրը:

Սենյակային ջերմաստիճանում վոլտ-ունակային չափումների ժամանակ ՖԸ-1-ի ունակությունը լարման մեծացման ժամանակ մնացել է հաստատուն, իսկ ՖԸ-2-ի համար՝ 0.28 Վ և 0.54 Վ լարումների դեպքում նկատվել են «փոսեր»

**Ատենախոսության հիմնական արդյունքները սպագրված են հետևյալ աշխատանքներում**

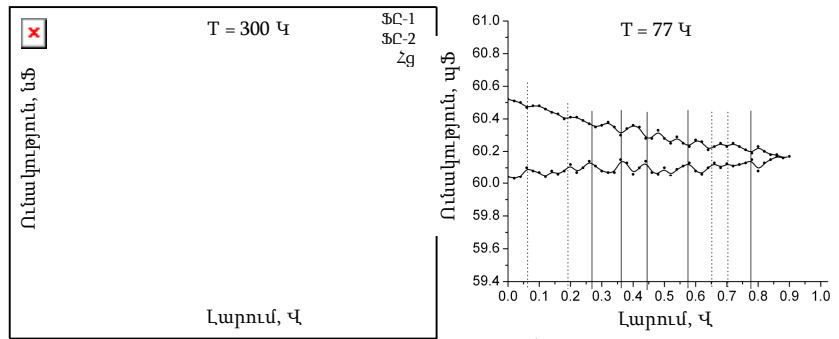
1. **K. Gambaryan, V. Aroutiounian, V. Harutyunyan, O. Marquardt and P. Soukiassian**, Room temperature magnetoelectric properties of type-II InAsSbP quantum dots and nanorings, Applied Physics Letters **100**, 033104-1-033104-4 (2012):
2. **K. M. Gambaryan, V. M. Aroutiounian and V. G. Harutyunyan**, Photovoltaic and optoelectronic properties of InAs (100)-based photoconductive cells with quantum dots and nanopits, Infrared Physics and Technology **54**, 114-120 (2011):
3. **K. M. Gambaryan, V. M. Aroutiounian and 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 **7**, 35-39 (2011):
4. **V. G. Harutyunyan**, Optoelectronic and magnetic properties of InAsSbP quantum dot mid-infrared photodetectors, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Semiconductor Micro- and Nanoelectronics, Yerevan, Armenia, July 1-3, 82-85 (2011):
5. **В. М. Арутюнян, К. М. Гамбарян, В. Г. Арутюнян, И. Г. Арутюнян и М. С. Казарян**, Фотодетекторы среднего инфракрасного диапазона на основе четырехкомпонентных InAsSbP наноструктур, Известия НАН Армении, Физика **47**, 193-200, (2012):
6. **K. Gambaryan, V. Aroutiounian, V. Harutyunyan and O. Marquardt and E. P. O'Reilly**, InAsSbP-based quantum dots/nanopits mid-infrared photodetectors: room temperature optical, capacitance-voltage and magnetic properties, Villa Conference on Energy, Materials and Nanotechnology (VCEMN-2011), Las Vegas, Nevada, USA, April 21-25, Book of Abstracts, 260-261 (2011):
7. **V. G. Harutyunyan, K. M. Gambaryan and V. M. Aroutiounian**, Novel Narrow band-gap InAsSbP-based quantum dot mid-Infrared photodetectors: fabrication, optoelectronic and electrophysical properties, International Conference on Nanoscience and Technology, Beijing, China, September 7-9, Abstract Book, 116-117 (2011):



մակարդակների արժեքները.  $h_0=2.32$  մԷՎ,  $h_1=1.55$  մԷՎ,  $h_2=0.91$  մԷՎ,  $h_3=0.53$  մԷՎ: Մխեմատիկորեն պատկերվել է ՔԿ-ով համակարգի էներգետիկ գոտիական կառուցվածքը:

11. 2-րդ սեռի *InAsSbP* բաղադրությամբ ՔԿ-երի օգտագործումը բերել է սենյակային ջերմաստիճանում ՖԸ-2-ի կլանման սպեկտրի «կարմիր» շեղմանը միջև 3.87 մկմ ալիքի երկարությունը: Այդպիսի երկարալիքային շեղմանը, որը նաև համաձայնեցված է նախապես հայտնի տեսական հաշվարկների հետ, համապատասխանում են 0.320 էՎ էներգիայով անցումներ:
12. Արգելված գոտում ՔԿ-երի կողմից առաջացված ենթագոտում տեղի ունեցող լիցքակիրների անցումների հետևանքով առաջանում են ինչպես ինֆրակարմիր տիրույթի ֆոտոարձագանքի սպեկտրի երկարալիքային շեղում, այնպես էլ այդ սպեկտրի կորի վրա լրացուցիչ մաքսիմումներ:
13. Չափումների ժամանակ նկատվել է ինֆրակարմիր ֆոտոընդունիչների համար շատ կարևոր հատկություն. ՖԸ-2-ի ֆոտոարձագանքի սպեկտրը կախված է արտաքին կիրառված լարումից: Կարևոր է նաև նշել, որ սպեկտրային փոփոխությունները նկատվում են ցածր լարումների կիրառման ժամանակ (միջև  $\pm 2$  մՎ): Այս յուրահատկությունները ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչին տալիս են հետագա կիրառական մեծ նշանակություն, մասնավորապես երկգույն ֆոտոընդունիչների ստեղծման համար: Նշենք նաև, որ ֆոտոարձագանքի ազդանշան է գրանցվել նաև առանց արտաքին լարման կիրառման պայմաններում: Այս բավականին հետաքրքիր դիտված երևույթը կոչվել է «անոմալ» ֆոտովոլտային երևույթ և տրվել է դրա որակական բացատրությունը:
14. *InAsSbP* ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչում 3.39 մկմ ալիքի երկարությամբ լազերային ճառագայթման դեպքում գրանցված լարման և հոսանքի առավելագույն զգայնությունները համապատասխանաբար 2 Վ/Վտ և 82 մԱ/Վտ են: Ցույց է տրվել նաև, որ այդ ֆոտոընդունիչը կարող է օգտագործվել 1200-1300 °C ջերմաստիճան ունեցող մարմնի ջերմային ճառագայթման գրանցման համար:
15. Սենյակային ջերմաստիճանում ՖԸ-2-ի համար 1.15 մկմ ալիքի երկարությամբ ինֆրակարմիր լազերային ճառագայթման դեպքում դիտվել են մակերևութային դիմադրության միջև 14 %, իսկ 3.39 մկմ ալիքի երկարության դեպքում՝ միջև 17 % առավելագույն անկում:

(նկ. 4): Այդ «փոսերը» մոտարկվել են Գրամ-Չարլիերի ֆունկցիայով: Նաև նշենք, որ ՔԿ-երի առկայությունը բերել է ունակության փոքրացմանը: Իսկ հաճախությունից ունեցած ունակություն կախվածության ուսումնասիրությունը ցույց է տվել, որ ֆոտոընդունիչների ունակային բնութագրերը առավել կայուն են միջև  $10^5$  Հց հաճախությունը (ունակության արժեքները գրեթե չեն փոխվում), իսկ ավելի մեծ հաճախությունների դեպքում, նկատվում է ունակության անկում: ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչի ունակությունը հաճախությունից կախված ավելի քիչ է նվազում.  $10^6$  Հց հաճախության դեպքում ՖԸ-1-ի ունակությունը մոտ 10 անգամ ավելի շատ է նվազում, քան ՖԸ-2-ինը: Չափման ազդանշանի մեծության էական ազդեցություն ունակություն-հաճախություն կախվածության վրա չի նկատվել:

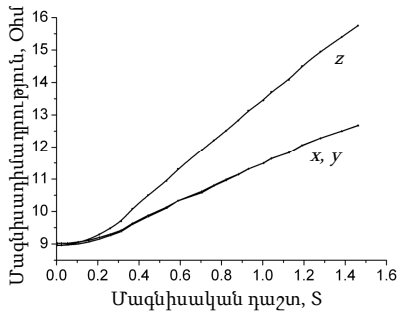


Նկ. 4 Սենյակային ջերմաստիճանում ֆոտոընդունիչների վոլտ-ունակային բնութագրերը: Նկ. 5 Շեղուկ ազդուի ջերմաստիճանում ՖԸ-2-ի վոլտ-ունակային բնութագրերը:

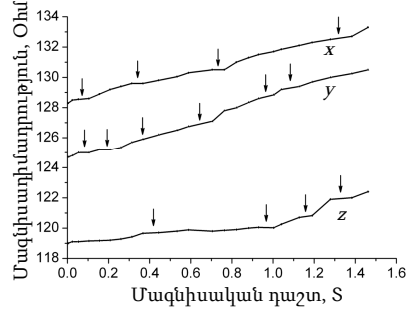
ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչի համար 77 K ջերմաստիճանում վոլտ-ունակային չափումների ժամանակ նկատվել է ունակության արժեքի փոքրացում (նկ. 5): Նաև, ինչպես երևում է նկարից նկատվել է ունակության հիսթերեզիս, այսինքն լարման մեծացնելուց հետո կրկին միջև 0 Վ փոքրացնելու դեպքում ունակության արժեքը չի համընկնում ունակության սկզբնական արժեքի հետ (0 Վ-ի դեպքում): Այսպիսով, ՔԿ-երով համակարգում լարման կիրառումից և անջատումից հետո համակարգում մնում են ունակության սկզբնական և վերջնական արժեքների տարբերությանը (0.48 պՖ) համապատասխան մնացորդային լիցքեր: Այս արդյունքից կարելի է ենթադրել, որ ՔԿ-երով հնարավոր են այնպիսի սարքեր պատրաստել, ինչպիսին են հիշողության սարքերը: Ուշադրություն դարձնենք ևս մեկ կարևոր հանգամանքի վրա. նկ. 5-ում պատկերված կորի վրա դիտվում են «տատանումներ»: Կարելի է նկատել, որ լարման մեծացման ժամանակ

դիտված «տատանումների» մեծ մասը հակաուղղված են լարման իջեցման ժամանակ դիտվածներին (բարձրացման դեպքում «տատանումների» նվազագույն արժեքները համընկնում են փոքրացման դեպքի «տատանումների» առավելագույն արժեքներին): Այդպիսի «տատանումների» էքստրեմումների արժեքները կարող են օգտագործվել ՔԿ-երի տարբեր ֆիզիկական բնութագրերը տեսականորեն հաշվարկելու համար:

Առանց և ՔԿ-ով ֆոտոընդունիչների հատկությունները տարբերվել են նաև մագնիսադիմադրության չափումների ժամանակ: Մագնիսական չափումները կատարվել են մագնիսական դաշտի ֆոտոընդունիչի մակերևութին զուգահեռ  $x$ ,  $y$  և ուղղահայաց  $z$  ուղղությունների դեպքերում: ՖԸ-1-ի համար դիտվել է մագնիսական դաշտից մագնիսադիմադրության կիսահաղորդիչներին բնորոշ կախվածություն (նկ. 6): Իսկ ՖԸ-2-ի համար մագնիսադիմադրության կորի վրա նկատվել են «կոտրվածքներով» տիրույթներ (նկ. 7), որոնց առաջացման պատճառը ենթադրվում է Ահարոնով-Բոհմի երևույթն է:



Նկ. 6 Սենյակային ջերմաստիճանում ՖԸ-1 ֆոտոընդունիչի մագնիսադիմադրության կախվածությունը մագնիսական դաշտից:



Նկ. 7 Սենյակային ջերմաստիճանում ՖԸ-2 ֆոտոընդունիչի մագնիսադիմադրության կախվածությունը մագնիսական դաշտից:

300 Կ և 77 Կ ջերմաստիճաններում մագնիսական դաշտի  $z$  ուղղության համար ուսումնասիրվել է նաև քվանտային կետերով ֆոտոընդունիչի մագնիսադիմադրության կախվածությունը մագնիսական դաշտից: Չափումների արդյունքում պարզվել է, որ տարբեր ջերմաստիճանների համար դիտված «կոտրվածքների» դիրքերը գրեթե չեն փոխվում, այսինքն մագնիսադիմադրության վարքը բավականին կայուն է ջերմաստիճանի նկատմամբ: Նկ. 8-ում ներկայացված է 77 Կ ջերմաստիճանի դեպքում ՖԸ-2-ի մագնիսադիմադրության կորի ածանցյալը, որի դեպքում դիտված երևույթները

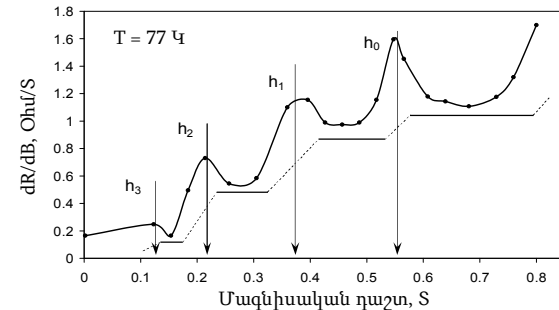
բաղկացած է ՔԿ-ից, որը շրջապատված է նանո-խոռոչներով և անվանվել է «նանո-երիցուկ» («nano-camomile»):

6.  $InAs(100)$  տակդիրի վրա  $Cr/Au$  մետաղական շերտերի փոշեցրմամբ օհմական հպակներ ստեղծելու համար օգտագործվել է ջերմային վակուումային փոշեցրման տեխնոլոգիան: 300 Կ ջերմաստիճանում ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչի վոլտ-ամպերային բնութագրի վրա 0.52-0.58 Վ լարումների տիրույթում նկատվել է գծային օրենքից շեղում: Իսկ 77 Կ ջերմաստիճանում ՔԿ-երին բնորոշ ոչգծայնություն դիտվել է լարումների ամբողջ տիրույթում:
7. Սենյակային ջերմաստիճանում վոլտ-ունակային չափումների ժամանակ լարումը մեծացնելիս ՖԸ-1-ի (առանց ՔԿ-երի ֆոտոընդունիչ՝ տեստային նմուշ) ունակությունը մնում է հաստատուն, իսկ ՖԸ-2-ի (ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչ) համար՝ 0.28 Վ և 0.54 Վ լարումների դեպքում նկատվել են «փոսեր»: Այդ «փոսերը» բավականին ճշգրտորեն մոտարկվել են Գրամ-Չարլիերի ֆունկցիայով: Նաև նկատվել է, որ ՔԿ-երի առկայությունը նպաստում է ունակության փոքրացմանը:
8. Ֆոտոընդունիչների ունակային բնութագրերը առավել կայուն են միջև  $10^5$  Հց հաճախությունը, իսկ ավելի մեծ հաճախությունների դեպքում, նկատվում է ունակության նվազում: Նշենք, որ ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչի ունակությունը հաճախությունից կախված ավելի քիչ է նվազում:  $10^6$  Հց հաճախության դեպքում ՖԸ-1-ի ունակությունը մոտ 10 անգամ ավելի շատ է նվազում, քան ՖԸ-2-ինը: Այսինքն, կարելի է եզրակացնել, որ ՔԿ-երը նպաստում են հաճախային բնութագրերի կայունացմանը:
9. ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչի համար 77 Կ ջերմաստիճանում վոլտ-ունակային չափումների ժամանակ դիտվել են հակաուղղված «տատանումներ»: Այդպիսի «տատանումների» էքստրեմումների արժեքները թույլ կտան տեսականորեն որոշել ՔԿ-երի տարբեր ֆիզիկական բնութագրերը:
10. ՖԸ-2-ի մագնիսադիմադրության կորի վրա նկատվել են «կոտրվածքներով» տիրույթներ, որոնց պատճառը ենթադրվում է, որ Ահարոնով-Բոհմի երևույթն է: Քանի որ այդպիսի տիրույթները նկատվել են ինչպես սենյակային, այնպես էլ հեղուկ ազոտի ջերմաստիճաններում՝ գրեթե միևնույն մագնիսական դաշտերի արժեքների տիրույթներում, ապա կարելի է եզրակացնել, որ ՖԸ-2-ի մագնիսադիմադրության վարքը բավականին կայուն է ջերմաստիճանի նկատմամբ: Նշված տիրույթներով պայմանավորված մագնիսադիմադրության ածանցյալի մաքսիմումների արժեքների միջոցով փորձնականորեն որոշվել են ՔԿ-երի ստեղծած մի քանի էներգետիկ

դեպքում՝ միջև 17%: Մեր կողմից պատրաստված սենյակային ջերմաստիճանում աշխատող ֆոտոընդունիչները կարող են օգտագործվել՝ շրջանցելով նեղ գոտիական կառուցվածք ունեցող միջին ինֆրակարմիր տիրույթի սարքերում պահանջվող թանկարժեք կրիոգենային տեխնիկայի անհրաժեշտությունը:

Եզրակացությունների մասում ամփոփված են ատենախոսության գլխավոր եզրահանգումները և արդյունքները:

1. Հատուկ պատրաստված բյուրեղացման համակարգի միջոցով հեղուկային էպիտաքսիայի ձևավորված տարբերակով *InAs*(100) տակդիրի վրա աճեցվել են  $10^8$ - $10^{10}$  սմ<sup>-2</sup> մակերևույթային խտությամբ *InAsSbP* բաղադրությամբ նանոկառուցվածքներ:
2. Բարձրորակ բյուրեղական կառուցվածքների ստացման համար *InAs*(100) տակդիրի մակերևույթը ենթարկվել է մի շարք քիմիական մշակման պրոցեսների: Բարակ (200-1000 մկմ բարձրության) հեղուկ փուլերից էպիտաքսիալ կառուցվածքների աճեցման համար ընտրվել են օպտիմալ տեխնոլոգիական պայմաններ, մասնավորապես բյուրեղացման սկզբնական ջերմաստիճան ընտրվել է 550 °C-ը:
3. *InAsSbP* քառաբաղադրիչ նյութի բաղադրությունները ընտրելով այնպես, որ թրջող շերտի և տակդիրի ցանցերի հաստատունների միջև առաջանա մինչև 4% ցանցերի հարաբերական տարբերություն՝ Ստրանսկի-Գրաստանով մեթոդով ձևավորվել են ինքնակազմավորված գնդաձև, էլիպտիդաձև քվանտային կետեր և քվանտային օղակներ:
4. Ձևավորված ՔԿ-երի ուսումնասիրությունների արդյունքում նկատվել է Օսֆալդյան միավորման արդյունքում դիտված աճի երկմոդալ մեխանիզմը: Տեխնոլոգիական տարբեր ռեժիմների դեպքերում դիտվել են ՔԿ-երի Գրամ-Չարլիերի, Գաուսյան և Լիֆշից-Սլեզովի տեսքերով բաշխվածություններ: Բյուրեղացման ժամանակի հետագա մեծացումը բերել է նանոկառուցվածքների էլիպտիդաձև տեսքի փոփոխության՝ դառնալով բուրգ, ձգված բուրգ և հատած բուրգ:
5. *InAsSbP* թրջող շերտում ծարիրի և ֆոսֆորի բաղադրության ավելացումը բերել է քվանտային օղակների ձևավորմանը: Ցանցերի մոտ 4% տարբերություն ունեցող նմուշում դիտվել են բավականին հետաքրքիր՝ երիցուկ բույսի տեսքով նանոկառուցվածքների համակարգեր, որոնք կարող են համարվել քվանտային մոլեկուլների նոր տեսակ: Այդպիսի համակարգը

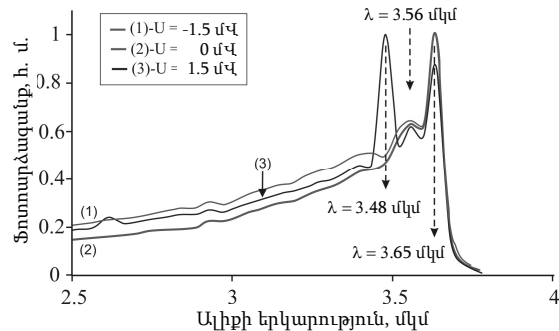


Նկ. 8 Հեղուկ ազոտի ջերմաստիճանում ՖԸ-2-ի մագնիսադիմադրության ածանցյալի կախվածությունը մագնիսական դաշտից:

ավելի հստակ են նկատվում: Կորի վրա առկա մաքսիմումները ( $h_0, h_1$  և այլն), ենթադրվում է, որ պայմանավորված են ՔԿ-երի ստեղծած էներգետիկ մակարդակների միջև լիցքակիրների մագնիսական դաշտից ձեռք բերած էներգիաներով պայմանավորված անցումներով: Այդ դեպքում  $h_0$ -ն կհամապատասխանի գրանցված ամենախորը մակարդակին: Սակայն չի կարելի պնդել, որ այդ մակարդակը առկա ամենախորը մակարդակն է, քանի որ 0.8 S-ից մեծ դաշտերի կիրառման դեպքում ևս հնարավոր է մաքսիմումների գրանցում: Նկատենք նաև, որ մագնիսական դաշտի մեծացման հետ զուգընթաց մեծանում են մաքսիմումների միջև հեռավորությունները: Նշենք, որ այդ օրինակափությունը հիշեցնում է Հոլի քվանտային երևույթը: Հեղուկ ազոտում միջև 0.8 S մագնիսական դաշտում կատարված չափումների արդյունքում օգտվելով մագնիսական դաշտում լիցքակիրների ձեռք բերած էներգիայի բանաձևից ՔԿ-երում տեղայնացված խոռոչների էներգետիկ մակարդակների համար ստացել ենք հետևյալ արժեքները՝  $h_0=2.32$  մԷՎ,  $h_1=1.55$  մԷՎ,  $h_2=0.91$  մԷՎ,  $h_3=0.53$  մԷՎ: Ավելի մեծ մագնիսական դաշտերի կիրառման հնարավորության դեպքում, հաշվելով ավելի խորը էներգետիկ մակարդակների էներգիաները, նշված եղանակով հնարավոր կլինի ավելի ամփոփիչ կառուցել ՔԿ-ում տեղայնացված խոռոչների էներգետիկ սպեկտրը:

Չորրորդ գլխում ներկայացված են պատրաստված միջին ինֆրակարմիր տիրույթի ֆոտոընդունիչների օպտիկական հատկությունները: Սենյակային ջերմաստիճանում միջին ինֆրակարմիր տիրույթի ֆոտոընդունիչների կլանման սպեկտրների ուսումնասիրությունների արդյունքում 2-րդ սեռի *InAsSbP* բաղադրությամբ ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչի համար դիտվել է սպեկտրի «կարմիր» շեղում (երկարալիքային շեղում)՝ 3.48 մկմ-ից (որը դիտվել է առանց

ՔԿ-երի չլեզերացված *InAs*-ի համար) միջև 3.87 մկմ: Այդպիսի շեղումը պայմանավորված է լիցքակիրների 0.320 էՎ էներգիաներով անցումներով: Երկարալիքային շեղումը նաև համաձայնեցվում է նախօրոք կատարված տեսական հաշվարկների հետ: Իսկ սենյակային ջերմաստիճանի պայմաններում ինֆրակարմիր տիրույթում կատարված ֆոտոարձագանքի սպեկտրների ուսումնասիրությունների ժամանակ ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչի համար դիտվել են ինչպես երկարալիքային շեղում, այնպես էլ լրացուցիչ մաքսիմումներ: Այդ ֆոտոընդունիչի ֆոտոարձագանքի սպեկտրի չափումների ժամանակ նկատվել է դրա լարումից ունեցած կախվածություն (նկ. 9): Կարևոր է նաև նշել, որ սպեկտրային փոփոխությունները նկատվել են ցածր արտաքին լարմաների կիրառման ժամանակ (միջև  $\pm 2$  մՎ): Այս յուրահատկությունները ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչին տալիս են հետագա կիրառական մեծ նշանակություն, մասնավորապես երկգույն ֆոտոընդունիչների ստեղծման համար: Հաջորդ, բավականին կարևոր դիտված երևույթը առանց արտաքին լարման կիրառման պայմաններում ֆոտոարձագանքի գրանցումն է: Այդ երևույթը կոչվել է «անոմալ» Ֆոտովոլտային (ՖՎ) երևույթ:

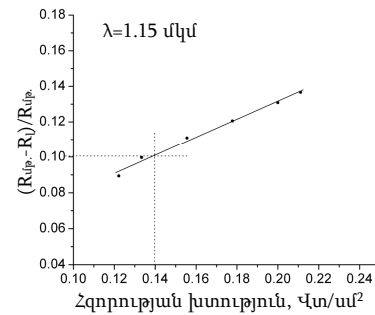


Նկ. 9 Տարբեր լարմաների դեպքում ՖՎ-2-ի ինֆրակարմիր տիրույթի ֆոտոարձագանքի սպեկտրները:

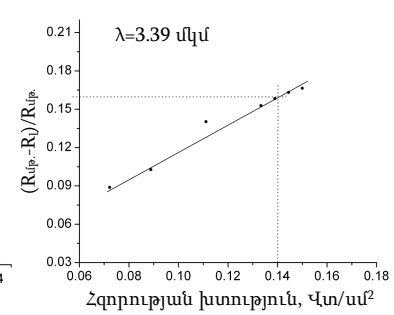
Ֆոտովոլտային երևույթի առկայությունը ևս մեկ անգամ հաստատելու համար կատարվել են լազերային հետազոտություններ: Սկզբում, սենյակային ջերմաստիճանում He-Ne լազերով տարբեր ալիքների երկարությունների ճառագայթմամբ չափվել են ՔԿ-երի հիման վրա պատրաստված ֆոտոընդունիչի պարապ ընթացքի լարման և կարճ միացման հոսանքի կախվածությունները ճառագայթման հզորության խտությունից: Այդ կախվածությունների ուսումնասիրությունների ժամանակ համեմատաբար մեծ

ազդանշաններ գրանցվել են ճառագայթի 3.39 մկմ ալիքի երկարության դեպքում: Սակայն, քանի որ ավելի երկար ալիքների երկարությունների դեպքում (միջև մոտավորապես 3.8 մկմ) ֆոտոարձագանքի ազդանշանը ընդունում է ավելի մեծ արժեքներ, ապա սպասվում է, որ այդպիսի ալիքների համար նաև ՖՎ-ային բնութագրերը կընդունեն ավելի մեծ արժեքներ: Չափումների արդյունքում սենյակային ջերմաստիճանում 3.39 մկմ ճառագայթման դեպքում լարման և հոսանքի առավելագույն զգայունությունների համար համապատասխանաբար գրանցվել են 2 Վ/Վտ և 82 մԱ/Վտ արժեքները: Այս արդյունքները չեն զիջում ներկայումս պատրաստվող քվանտային կետերով ֆոտոընդունիչների զգայունություններին:

Որպես ինֆրակարմիր ճառագայթման աղբյուր օգտագործվել է նաև 1200 °C ու 1300 °C ջերմաստիճան ունեցող «սև-մարմինը» և ուսումնասիրվել են ՔԿ-երով ֆոտոընդունիչի վերևում նշված ՖՎ-ային բնութագրերի կախվածությունները այդպիսի ճառագայթման աղբյուրից ֆոտոընդունիչի ունեցած հեռավորությունից: Նկ. 10 և նկ. 11 նկարներում ներկայացված են ինֆրակարմիր ճառագայթման ժամանակ ՖՎ-2-ի մակերևույթային դիմադրության հարաբերական փոփոխության  $(R_{\text{մթ.}} - R_i) / R_{\text{մթ.}}$  կախվածությունները ճառագայթման հզորության խտությունից, որտեղ  $R_{\text{մթ.}}$ -ը ֆոտոընդունիչի մթնային դիմադրությունն է (դիմադրությունը ճառագայթման բացակայության դեպքում), իսկ  $R_i$ ՝ լուսայինը: Սենյակային ջերմաստիճանում 1.15 մկմ ալիքի երկարությամբ ինֆրակարմիր ճառագայթման դեպքում դիտվել է դիմադրության 14 % առավելագույն անկում, իսկ 3.39 մկմ ալիքի երկարության



Նկ. 10 Դիմադրության փոփոխության կախվածությունը 1.15 մկմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթման հզորության խտությունից:



Նկ. 11 Դիմադրության փոփոխության կախվածությունը 3.39 մկմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթման հզորության խտությունից: