

**NAMANGAN MUHANDISLIK – TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI

ABDURAXIMOV DILXAYOTJON PO‘LATJON O‘G‘LI

**KIRISHMA NANOBIRIKMALARI BO‘LGAN YARIMO‘TKAZGICHLI
GaAs-Ge QATTIQ QORISHMALARINING OLINISHI, TUZILISHI VA
FIZIK XOSSALARI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

NAMANGAN-2023

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
физико-математическим наукам**

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on
physical and mathematical sciences**

Abduraximov Dilxayotjon Po‘latjon o‘g‘li

Kirishma nanobirikmalari bo‘lgan yarimo‘tkazgichli GaAs-Ge qattiq
qorishmalarining olinishi, tuzilishi va fizik
xossalari..... 3

Абдурахимов Дилхаётжон Пулатжон угли

Получение, структура и физические свойства полупроводниковых
GaAs-Ge твердых растворов с примесными
нанообъединениями..... 19

Abdurahimov Dilhayotjon

Preparation, structure and physical properties of semiconductor GaAs-Ge
solid solutions with impurity nanocombinations..... 35

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ

List of published works..... 39

**NAMANGAN MUHANDISLIK – TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI

ABDURAXIMOV DILXAYOTJON PO‘LATJON O‘G‘LI

**KIRISHMA NANOBIRIKMALARI BO‘LGAN YARIMO‘TKAZGICHLI
GaAs-Ge QATTIQ QORISHMALARINING OLINISHI, TUZILISHI VA
FIZIK XOSSALARI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

NAMANGAN-2023

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalari vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.2.PhD/FM894 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Andijon davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.nammti.uz) va «Ziyonet» axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

| | |
|----------------------------|--|
| Ilmiy rahbar: | Zaynabidinov Sirojiddin Zaynabidinovich fizika-matematika fanlari doktori, akademik |
| Rasmiy opponentlar: | Onarqulov Karimberdi Egamberdiyevich fizika-matematika fanlari doktori, professor Turg'unov Nozimjon Abdumannopovich fizika-matematika fanlari doktori, professor |
| Yetakchi tashkilot: | Urganch davlat universiteti |

Dissertatsiya himoyasi Namangan muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli Ilmiy kengashning 2023 yil "7" 12 soat 12 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel./faks: (99869) 225-10-07; Faks: (99869) 225-76-75. e-mail: niei_info@edu.uz, Namangan muxandislik-texnologiya instituti 3-bino, 2-qavat, ilmiy kengash xonasi).

Dissertatsiya bilan Namangan muxandislik-texnologiya institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (___ raqam bilan ro'yxatga olingan.) Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel./faks: (99869) 225-10-07.

Dissertatsiya avtoreferati 2023 yil "24" 11 da tarqatildi.
(2023 yil "24" 11 dagi 5 raqamli reyestr bayonnomasi.)



U.I. Erkaboyev
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash raisi f.-m.f.d., dotsent

B.H. Quchqarov
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash kotibi PhD, dotsent

N.Yu. Sharibayev
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Bugungi kunda zamonaviy yarimo'tkazgichli mikroelektronika va nanotexnologiyalarning rivojlanishi natijasida kvant o'lchovli geterotuzilmalar olishda hamda ular asosida elektron qurilmalarni ishlab chiqarishda ajoyib natijalarga erishildi. Uzluksiz texnologik taraqqiyot nano o'lchovli tuzilmalarni (kvant nuqtalar va o'ralar) yaratish uchun yetarli zamonaviy usullarni ishlab chiqishni, shuningdek, elektron asbobsozlikning mavjud usullarini takomillashtirishni talab qilmoqda.

Jahonda bu borada keng ko'lamli ilmiy tadqiqot ishlari olib borilib, xususan, GaAs asosida ko'ptarkibli uchlamchi (InGaAs va InGaAs) hamda to'rtlamchi (InSbGaAs va AlSbGaAs) epitaksial plyonkalari olinishi natijasida lazerlar, yorug'lik diodlari, xona haroratida $2\div 5$ mkm oralig'ida ishlovchi fotodiodlar kabi noyob optoelektrok qurilmalar tayyorlandi. Bu esa o'z navbatida jaxonning yetakchi ilmiy markazlarida: Maks Plank nomidagi Mikrotuzilmalar fizikasi instituti, Fizika instituti (Germaniya), Eko-Topiya ilmiy tadqiqot instituti, Nagoya universiteti, Kristalli materialshunoslik kafedrasini (Yaponiya), Rutgersk universiteti elektrotexnika va kompyuter muhandisligi kafedrasini (AQSh), A.F. Ioffe nomidagi Fizika-texnika instituti olimlari hamda mutaxassislari InGaAs/GaAs/InGaP va InGaAs/GaAs/AlGaAs turdagi qattiq qorishmalari va ular asosida cheklangan turli xil geterotuzilmalarni olish, tadqiq qilish bo'yicha misli ko'rilmagan yutuqlarga erishildi. E'tiborlisi, bunday tuzilmalarning barchasida to'lqin qabulqilgich sifatida GaAs asosidagi epitaksial qatlamlardan foydalanilgan.

O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirishning "Harakatlar strategiyasi"ga muvofiq, fan yutuqlari va innovatsiyalarni amaliyotga joriy etishning samarali mexanizmlarini yaratishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Xususan, hozirgi vaqtda mamlakatimiz olimlari yarimo'tkazgichli optoelektronika va nanotexnologiyalarni rivojlantirishga, shuningdek, kvant o'lchovli ob'yektlarga ega bo'lgan ko'ptarkibli o'zgaruvchan sohali epitaksial qatlamlarini shakllantrishga katta e'tibor qaratilmoqda.

2023 - "Insonga e'tibor va sifatli ta'lim" yilida ilmiy natijalarni zamonaviy darajaga ko'tarish alohida e'tiborga loyiqdir. Xususan, zamonaviy yarimo'tkazgichli materialshunoslik va mikroelektronikaning asosiy vazifalaridan biri sifatida galliy arsenidi asosidagi epitaksial tuzilmalarning yangi turlarini olish hamda bunday tuzilmalarning noyob xossalari o'rganish, shuningdek, ular asosida elektron qurilmalar ishlab chiqarish bugungi kun yario'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronikaning **dolzarb vazifasi** hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021 yil, 19 martdagi PQ-5032 raqamli "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi, 2019 yil, 30 maydagi PQ-4348 raqamli "Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish uchun qulay shart-sharoitlar yaratish va tarmoqning investitsiyaviy hamda eksport salohiyatini oshirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi, 2018 yil, 14 iyuldagi PQ-3855 raqamli "Ilmiy va ilmiy-texnikaviy faoliyat natijalarini tijoratlashtirish samaradorligini oshirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi va

2017 yil 26 maydagi PQ-3012 raqamli “2017- 2021 yillarda qayta tiklanuvchi energetikani yanada rivojlantirish, iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohada energiya samaradorligini oshirish chora-tadbirlari dasturi to‘g‘risida”gi Qaror va Farmonlarida hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiyada olib borilgan tadqiqotlar muayyan darajada mos keladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III. «Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligini rivojlanishi» ustuvor yo‘nalishiga doir bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Jahonning yetakchi ilmiy markazlarida olimlar, mutaxassislar, mikro va optoelektron qurilmalarni ishlab chiqaruvchilari turli yarimo‘tkazgichli qattiq qorishmalarni o‘stirish texnologiyasiga va ularning noyob fizik xususiyatlarini o‘rganishga alohida e‘tibor berilmoqda. Shu munosabat bilan yarimo‘tkazgichlarning suyuq fazadan epitaksiyalanishi asosida GaAs ni turli nanokirishmali qattiq qorishmalarini olish va ularning noyob fizik xossalarini tadqiq qilish bo‘yicha amerikalik L.G. Vang va Aleks Zunger, rossiyalik J.I. Alferov va V.M. Andreev, yaponiyalik M. Funato va Bing Li Gu hamda ispaniyalik R. Laviolet va X. Farrel boshchiligidagi olimlar tomonidan ko‘plab ishlar amalga oshirilgan.

Shu bilan birga yurtimiz olimlari akademik M.S. Saidov va professor A.V. Karimov rahbarligidagi ilmiy guruh tomonidan galliy arsenidi asosida turli klasterli va nanodefektliliksiz qattiq qorishmalar olindi, ularning tuzilmaviy, elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlarini o‘rganildi, shuningdek, ular asosida mikro va optoelektron qurilmalar yaratildi. Akademik S.Z. Zaynabidinov va professor A.S. Saidovlar rahbarligidagi ilmiy guruh tomonidan nanoob‘yektlarni va asosiy qatlam materiali atomlarining kovalent bog‘lanish energiyalari kattaligi asosida nanoob‘yektlarni “kvant nuqtalari” va “kvant quduqlari” ga ajratish taklif qilingan, ya‘ni asosiy qatlamning man etilgan soha kengligi nanoob‘yektlarnikiga nisbatan kichikroq bo‘lsa - kvant o‘ra, aksi bo‘lsa - kvant nuqtalari shakllanishi eksperimental asoslangan.

Bunday nanokirishmalarining shakllanish tabiatlari, ularning o‘zaro ta‘sir energiyalari, shuningdek, ularning tashkillovchilari, bunday tashkillovchilarning tuzilma fotoelektrik xususiyatlariga ta‘siri hamda nanonuqsonlar turiga qarab yarimo‘tkazgich materiallarni tasniflash kabi muammolarga e‘tibor qaratilmagan.

Tadqiqotning dissertatsiya ishi bajarilgan muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejaları bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Andijon davlat universiteti OT-F2-68 «Kristallarda kirishma-nuqson mikro va nanobirikmalarining shakllanishi mexanizmlari va keng funksional imkoniyatli, ko‘p tarkibli tuzilmalar hosil qilishda ularning ahamiyati» (2017-2020 yy.) fundamental loyihalari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi. Kirishma nanobirikmalari bo‘lgan yangi yarimo‘tkazgichli $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalarini olish texnologiyalari va

ularning tuzilmaviy xossalarini hamda bunday tuzilmalarda tok tashuvchilarning o'tish mexanizmlarini tadqiq qilish.

Tadqiqotning vazifalari:

suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida turli nanoob'yektli $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalarni o'stirish;

texnologik me'yorlarni kvant nanoobektlarini shakllantirishda va ularning zichligi, shakllari va o'lchamlarini boshqarishdagi ahamiyatini aniqlash;

o'stirilgan $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamlarning tuzilmaviy mukammalliklarini o'rganish;

olingan plyonkalar va nanoob'yektlarning panjara doimiylari, kristallik tuzilish turlari va fazoviy guruhlarini aniqlash;

$n\text{-GaAs-}p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ tuzilmalarning voltamper va volt-farad xarakteristikalarini tadqiq qilish;

$n\text{-GaAs-}p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ tuzilmalarning fotoelektrik xossalarini ham fotodiod, ham fotovoltaik me'yorlarda tadqiq qilish.

Tadqiqotning ob'yekti sifatida turli nanoob'yektli varizon $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmlari, shuningdek, ular asosidagi $p\text{-}n\text{-}$ izovalent geterotuzilmalari olingan.

Tadqiqotning predmeti sifatida kirishma nanobirikmali $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalarni olish texnologiyalari, ularning fundamental kattaliklarini, ular asosidagi $n\text{-GaAs-}p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ tuzilmalarning elektrofizik va fotoelektrik xossalari olingan.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot ishida tasdiqdan o'tkazilgan usullardan: nanoob'yektli $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalarni suyuq fazali epitaksiyaviy o'stirish, kristallografik tadqiqotlarni o'tkazish uchun rentgenodifraktometr qurilmasidan, qattiq qorishma tashkillovchilarining kimyoviy tarkibini aniqlash uchun rentgen mikro tahlillovchi qurilmadan, $n\text{-GaAs-}p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ optoelektron xossalarini tekshirish uchun standart va yuqori aniqlikdagi o'lchov qurilmalaridan foydalanildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk marotaba suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida majburiy sovutilgan qalayli aralashma eritmadan $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalari GaAs tagliklarga o'stirildi;

nanoob'yektli $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalar (100) kristallografik orientatsiyaga hamda $a_{q,q.} = 0,5646$ nm panjara doimiysiga ega bo'lgan monokristall bo'lib, u $F\bar{4}3m$ fazoviy guruhga mos keluvchi ZnS turidagi sfalerit tuzilishiga ega ekanligi aniqlandi;

plyonka sirtida kogerent joylashgan, $a_{Ge} = 0,567$ nm panjara doimiysiga ega bo'lgan, (100) kristallografik orientatsiya bo'ylab joylashgan 44 nm li Ge nanokonularining shakllanishi aniqlandi;

Ge kvant o'ralariga ega bo'lgan $n\text{-GaAs-}p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ tuzilmalarda tok o'tishi tunnel-rekombinasiya mexanizmgiga, ZnSe kvant nuqtalariga ega bo'lgan $n\text{-GaAs-}p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ tuzilmalarda esa tok o'tish hajmiy chegaralangan zaryadning omik hamda dielektrik relaksasiyasiga mos bo'lishi ko'rsatildi;

geterochegarlarda o'sish sharoitlariga qarab qalinligi 0,09-0,15 mkm oralig'ida o'zgarib turadigan, nisbatan yuqori qarshilikka ega bo'lgan sohalar shakllanishi aniqlandi;

n -GaAs – p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ tuzilmalarning fotosezgirlik spektri 1,1 eV foton energiyali uzun to'liq diapozoniga hamda As-Ge, Ge-Ge va Ga-Ge birikmalariga mos keladigan uchta tashkillovchilarining spektral fotocho'qqilariga mos keluvchi soxalar kuzatildi.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

plyonkalarining o'sish harorati oralig'i, ularni sovutish tezligi va boshqa texnologik me'yorlar kvant nanoob'yektlarini shakllanishiga va ular taqsimotining zichligiga, geometrik shakllariga va o'lchamlariga ta'sir etishi aniqlandi;

epitaksial plyonkalarini o'stirish jarayonida kvant o'lchovli ob'yektlarning yetarlicha zich va bir hil ko'rinishli shakllantirish shartlari aniqlanadi;

n -GaAs– p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ tuzilmalarning fotolyuminessensiya spektri $\lambda_{max} = 852$ nm maksimumli infraqizil sohani qamrab olishi hamda bunday tuzilmalar quyosh energetikasi va optoelektronikada fotoqabullagichlar sifatida foydalanish imkoniyatiga ega ekanligi ko'rsatildi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy ilmiy va sinalgan usullardan: rentgen difraksiyasi, atomiy kuch mikroskop; elektr va fotoo'tkazuvchanlikning tekshiruvchi qurilmalar; natijalarning o'zaro mos holda takrorlanuvchanligi; umumiy fizik tasavvurlar va qonuniyatlar bilan xulosalarning izchilligi; kompyuter texnologiyalaridan foydalanishga asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida olingan ko'ptarkibli yupqa plyonkalarini sirtida hamda hajmida sodir bo'ladigan turli hodisalar mexanizmlari haqidagi tushunchalarni aniqlashtirish, kengaytirish tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati hisoblanadi

Elektron qurilmalar va mahsulotlar ishlab chiqarishda foydalanish uchun ko'ptarkibli yupqa plyonkalar olishning eng maqbul texnologik me'yorlarini yaratilganligi tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati hisoblanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.

O'stirilgan (GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ epitaksial qatlamlarning texnologik me'yorlarini, olingan tuzilmalar mukammallik darajasini hamda panjara doimiysini, kristallografik sinfini, shuningdek, plyonkalar va nanoobektlarning fazoviy guruhlarini aniqlash kabi bir qator ilmiy tadqiqot usullari O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutining F2-FA-F120 raqamli "Kichik o'lchamli yuqori haroratli o'tao'tkazgichlar, yarimo'tkazgichli geterostrukturalar, metall va ularning oksidlarining elektron xossalari va radiyasiyaviy takomillashtirilishi" (2012-2016) mavzusidagi loyihada foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasining 2023 yil 10 iyuldagi 2/1255-1463 raqamli ma'lumotnomasi). Ilmiy tadqiqotlar natijalaridan foydalanish o'stirilayotgan epitaksial qatlamlar asosidagi geterotuzilmalarning tuzilmaviy barqarorligini hamda tashqi ta'sirlarga chidamliligini oshirishga imkon bergan.

n -GaAs– p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ tuzilmalarning fotodiod va fotovoltaik me'yorlarida volt-amper, volt-farad xususiyatlarini va fotoelektrik xossalari

tekshirish usullari «FOTON» AJda yarimo'tkazgichli elektron qurilmalar ishlab chiqarishda foydalanilgan ("Uzeltexsanoat" aksiyadorlik kompaniyasining 2023 yil 17 martdagi 04-3/333 raqamli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish tajriba qurilmalarida elektron texnik asboblarni tayyorlash va ularning optoelektron xususiyatlarini yaxshilash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobasiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 6 ta halqaro va 4 ta respublika miqyosidagi ilmiy amaliy anjumanlarda muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi doirasida jami 19 ta ilmiy ish, jumladan 7 ta maqola Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan tashkil topgan. Dissertatsiyaning hajmi 101 sahifani tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mos ravishda mazkur tadqiqot ishining dolzarbligi va zaruriyati asoslanib, uning maqsadi va vazifalari, ob'yekt va predmetlari belgilangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari, dissertatsiya mavzusi bo'yicha xalqaro ilmiy tadqiqotlar natijalarining qisqacha tahlillari va muammoning o'rganilganlik darajasi hamda tadqiqot natijalaridan foydalanilganligi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan, shuningdek, e'lon qilingan ilmiy tadqiqot ishlari va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar bayon qilingan.

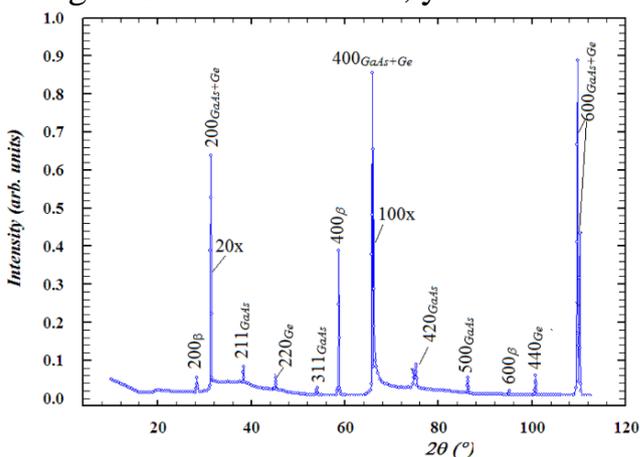
Dissertatsiya ishining "**A³B⁵ asosidagi ko'ptarkibli qattiq qorishmalari shakllanishining fizik asoslari va olinish texnologiyalari**" nomli birinchi bobida A³B⁵ va A²B⁶ birikmalarining IV guruh elementlari bilan o'zaro o'rin almashinuvchi uzluksiz qattiq qorishmalari shakllanishining nazariy asoslari, bunday yupqa qatlamlar sirtida va hajmida kvant o'lchovli ob'yektlarning shakllanish mexanizmlari va ular zichligi, geometrik shakli hamda o'lchami, shuningdek, ulardan tok o'tishi qonuniyatlari bo'yicha adabiyotlar tahlili o'z aksini topgan va ular asosida tadqiqotning ilmiy va amaliy vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiya ishining "**Tadqiqotning eksperimental usullari**" nomli ikkinchi bobida tadqiqot ob'yekti sifatida tanlab olingan turli nanoob'yektli (GaAs)_{1-x}(Ge₂)_x qattiq qorishmalar kristallanishining termodinamik sharoitlari aniqlanib, ular GaAs tagliklariga majburiy sovutish tizimida, qalayli aralashma-eritmadan suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida o'stirishning to'liq tavsiflari bayon etilgan. O'stirish texnologiyasining eng maqbul sharoitlari (gorizontal joylashtirilgan tagliklar orasidagi bo'shliq (1 mm); aralashma-eritma tarkibi GaAs–Ge–Sn; majburiy sovutish tezligi (1,5 grad/min.); kristallanishning boshlanish harorati – 730 va 630 °C) aniqlangan. Bundan tashqari tadqiqot ishini amalga oshirish mobaynida olingan namunalarning ba'zi fizik xususiyatlarini o'rganish

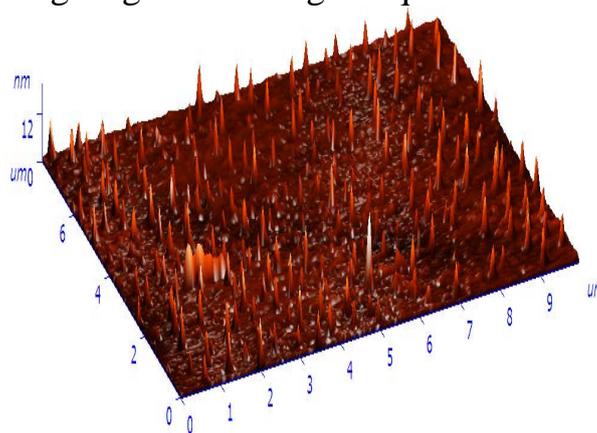
uchun foydalanilgan yuqori aniqlikdagi texnologik qurilmalar va standart o'lov asboblarning ishlash tamoyillari keltirilgan.

Dissertatsiya ishining **“Kvant o'rali $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamlarining tuzilishi, morfologiyasi hamda foto va elektrofizik xossalari”** nomli uchinchi bobida o'stirilgan $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial yupqa qatlamlarining rentgenotuzilmaviy, elektron mikroskopik va foto-hamda elektrofizik xossalari bayon qilingan. 1-rasmda ustirilgan $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamlarining rentgenogrammasi keltirilgan bo'lib, unda (400) tartibli asosiy akslanish chizig'ining ingichkaligi ($FWHM = 5.36 \cdot 10^{-3}$ rad) va yuqori intensivlikdaligi ($2 \cdot 10^5 \text{imp} \cdot \text{s}^{-1}$)ni ko'rish mumkin, bu esa o'z navbatida o'stirilgan qattiq qorishma kristall panjarasining mukammallik darajasi yuqori ekanligini ko'rsatadi va epitaksial qatlam (100) kristallografik orientatsiyali monokristall ekanligini tasdiqlaydi. Shuningdek, ushbu akslanishning eksperimental natijalari yordamida subkristallitlarining (bloklarining) o'lchamlari taxminan 49 nmga va qatlam kristall panjara doimiysi $a_{q,q} = 0,5646$ nmga tengligi aniqlangan.

Bundan tashqari, olingan kvant o'rali $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamlarning rentgenotuzilmaviy tahlillari asosida qatlarning galliy arsenidi kristall panjarasida juftlashgan germaniy atomlari ma'lum chuqurliklarda notekis taqsimlangan holda joylashishi aniqlangan. Bu esa o'z navbatida kristallit o'sishining yangi, energetik jihatdan yanada samaraliroq bo'lgan kirishma atomlari yoki molekulari bilan panjara nuksonlari orasida elastik energiya to'planishining asosiy omili hisoblanishi ko'rsatilgan. Bunday sohalarini hosil bo'lishi natijasida plyonka rentgenogrammasida asosiy akslanish chiziqlaridan boshqa yo'nalishlarda ham mos ravishda (220) va (440) tartibidagi diffraksiyon akslanishlar kuzatilishi bilan tasdiqlanadi. Ushbu diffraksiyon akslanishlarning eksperimental natijalari yordamida panjara doimiysi $a_{\text{Ge}} = 0.5662$ nm va geometrik o'lchamlari 44 nm bo'lgan Ge nanokristallari, ya'ni kvant o'ralariga tegishli ekanligi aniqlandi.



1-rasm. $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial plyonkaning rentgenogrammasi



2-rasm. $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamining AKM tasviri

2-rasmda epitaksial plyonkaning uch o'lchovli AKM tasviri ko'rsatilgan. Rasmdan o'stirilgan epitaksial plyonkalar sirtiy sohalarida asosining diametri 30 dan 60 nm gacha va balandligi 3 dan 12 nm gacha bo'lgan nanobektlar (nanokonuslar) hosil bo'lganini ko'rish mumkin. Ma'lumki, turli yarimo'tkazgichlardan iborat yupqa pardalarning epitaksial o'sishida ishtirok etuvchi materiallarning kristall

panjaralari parametrlari o'rtasidagi nomuvofiqlikdan kelib chiqadigan deformatsiya energiyasi o'z-o'zini tashkil qiluvchi uch o'lchovli nanokonuslarni shakllanishning asosiy omillaridan biri hisoblanadi. O'tkazilgan tajribalar natijalari hamda ularning tahlili asosida epitaksial qatlamlarning sirtiy sohalarida shakllanayotgan nanokonuslar Ge atomlari nanokristallitlardan iborat degan xulosaga olib keladi.

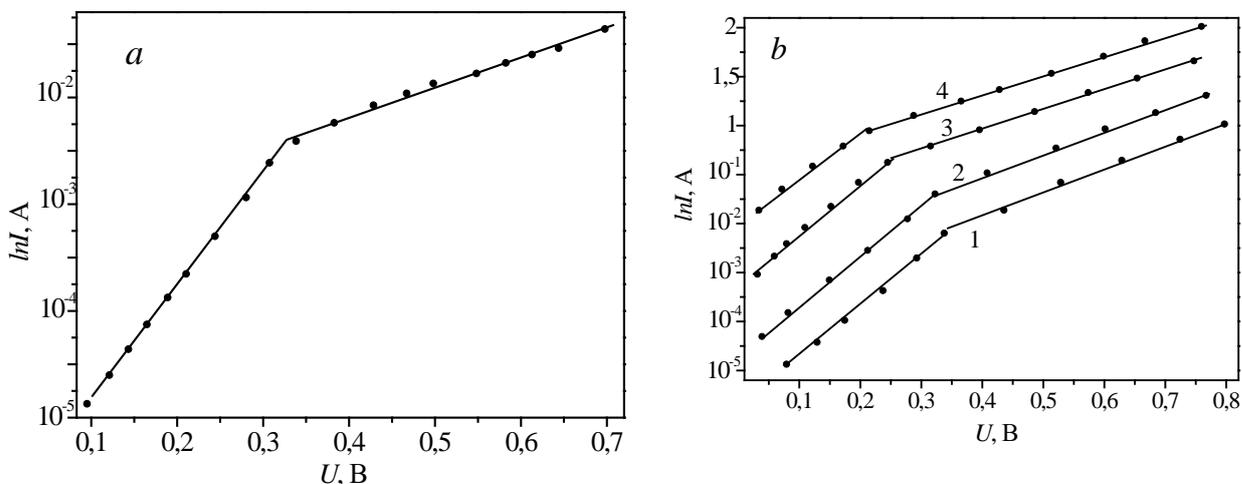
n -GaAs – p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ geterotuzilmasining VAX larini tekshirishdan oldin tayyorlangan namunalar ikki guruhga ajratildi. Namunalar birinchi guruhi uchun tekshirilgan VAXida o'ziga xos sohalar mavjud bo'lib, ular geteroo'tish orqali oqib o'tuvchi tok tunnel-rekombinasiyaviy mexanizmiga bo'ysunishi (3-a rasm), ya'ni ularda haroratga bog'liq bo'lmagan holda tokning kuchlanishga bog'liqlik egri chizig'ida ketma-ket ravishda ikki marta eksponensial sohalar hosil bo'lishi kuzatildi (3-b rasm). VAXsining bunday ko'rinishini quyidagi bog'lanish orqali ifodalash mumkin:

$$I = I_{01} \exp(\alpha_1 V) + I_{02} \exp(\alpha_2 V) \quad \text{bu yerda} \quad \alpha_1 = 6; \quad \alpha_2 = 3,5.$$

Bunday geterotuzilmalarda tokning to'g'rilovchi koeffitsienti, ya'ni to'g'ri hamda teskari yo'nalishdagi toklarning o'zaro nisbati texnologik sharoitlarga qarab 10÷300 oralig'ida o'zgaradi. Shunday geteroo'tishlarning teskari yo'nalishdagi toklarining kuchlanishga bog'liqligini esa quyidagi ifoda bilan tavsiflash mumkin:

$$I_{obr} = A \cdot V_{obr}^m$$

bu yerda $m - 1$ V gacha bo'lgan kuchlanishlar uchun ≈ 1 ni, 1 V dan yuqori kuchlanishlar uchun esa ≈ 8 ni tashkil etadi.

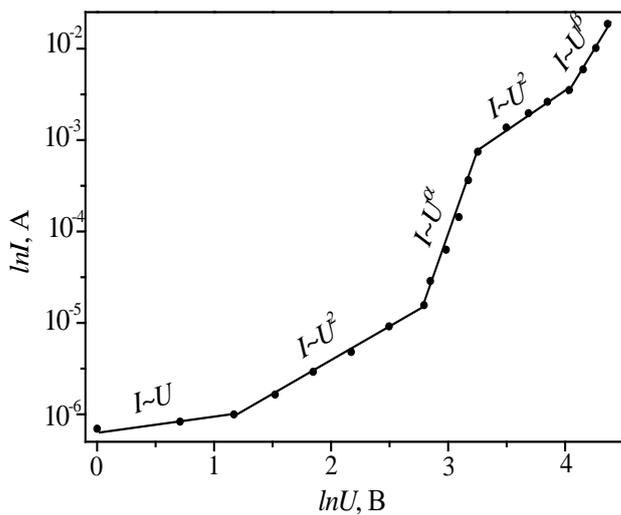


3-rasm. n -GaAs – p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ geterotuzilmasining voltamper xarakteristikasi, xona haroratida (a) va turli haroratlarda (b): 1 – 325 K, 2 – 350 K, 3 – 375 K, 4 – 400 K. ($T_{d.k.} = 650$ °C)

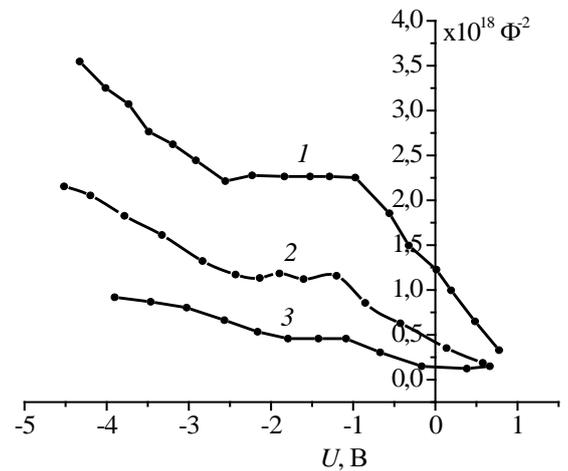
Ikkinchi tanlab olingan guruh namunalari uchun VAX quyidagi ketma-ket sohalariga ega bo'lib, u odatiy hisoblashlarga tayanadi (4-rasm)

$$I \sim V, I \sim V^2, I \sim V^\alpha, I \sim V^2, I \sim V^\beta$$

Bu yerda mos ravishda o'sish me'yorlarini belgilovchi “ α ” va “ β ” lar 7-12 soxalar oralig'ida o'zgaruvchi kattaliklar. Bu esa o'z navbatida geterotuzilmalar orqali fazoviy zaryad bilan cheklangan toklar (FZChT) o'tayotganligidan dalolat beradi.



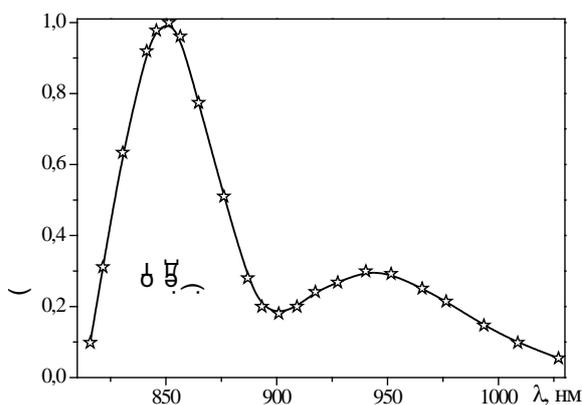
4-rasm. n -GaAs – p - $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ geterotuzilmasining voltamper xarakteristikasi $T_{b.k.} = 730^\circ\text{C}$.



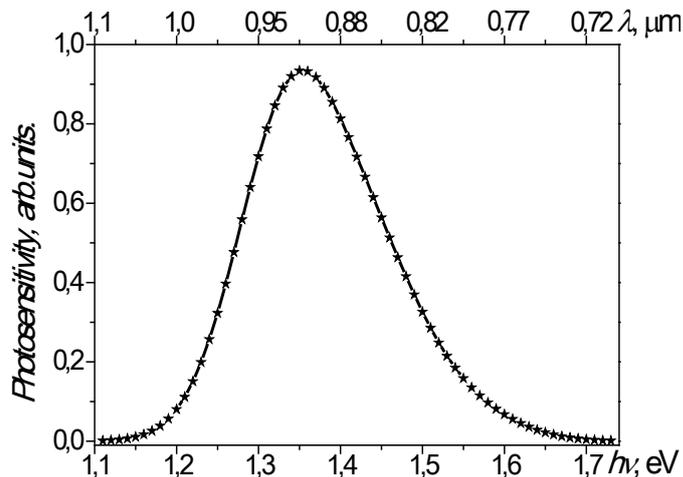
5-rasm. n -GaAs – p - $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ geterotuzilmasining volt-sig'im xarakteristika-si: 1 – $T_{b.k.} = 730^\circ\text{C}$, $t = 150$ min; 2 – $T_{b.k.} = 730^\circ\text{C}$, $t = 100$ min. 3 – $T_{b.k.} = 630^\circ\text{C}$, $t = 100$ min.

n -GaAs- p - $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ geterotuzilmalarning volt-sig'im xarakteristikalarida sig'im namunaga berilayotgan kuchlanishga deyarli bog'liq bo'lmagan holda, bir qator xarakterli (5-rasm. 1, 2, 3-egri chiziqlar) sohalar mavjudligi aniqlandi. Bunday sohalarining paydo bo'lishi geterochegarada yuqori solishtirma qarshilikka ega bo'lgan qatlam mavjudligi bilan izohlanib, uning qalinligi geteroo'tishda teskari almashinish amalga oshayotgan vaqtda hajmiy zaryad sohasining qalinligi bilan taqqoslanarli darajada bo'ladi. Unga ko'ra qatlam mos keladigan sig'im qiymatlari yordamida aniqlanadigan yuqori qarshilikli qatlam qalinligi turli namunalar uchun 0,09, 0,135 va 0,148 mkmni tashkil etadi. Yuqori solishtirma qarshilikli qatlamning qalinligi kirishmali suyuq eritmaga botirilgan GaAs tagligiga (5-rasm, 1-egri chiziq), uni aralashma eritmasi ushlab turish haroratiga (5-rasm, 2-egri chiziq) va ta'sir qilish muddatiga (5-rasm, 2-egri chiziq) bog'liq ekanligi aniqlandi.

Kuzatilgan jarayonlarda qattiq qorishmalar tashkillovchilarining xissasini o'rganish uchun suyuq geliy (4.2 K) haroratida o'stirilgan epitaksial plyonkalar fotolyuminessensiya (FL) spektrlarini va ular asosida tayyorlangan geterotuzilmalarning fotosezgirlikining spektral bog'lanishlari o'rganildi. 6-rasmda $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamning sirtidan fotolyuminessensiyalanish taqdim etilgan. Rasmdan qattiq qorishmaning nurlanish spektrining maksimal qiymati $\lambda_{max} = 852$ nm ega ekanligini hamda u deyarli butun infraqizil sohasini qamrab oluvchi keng diapazonga ega ekanligini ko'rish mumkin. Kuzatilgan maksimal cho'qqi esa 1.45 eV, ya'ni kovak o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan GaAs energetik sohasiga to'g'ri keladi. Qattiq qorishmalarning FL spektrida yana bir fotocho'qqi kuzatilgan bo'lib, u taxminan 946 nm to'liq uzunligiga to'g'ri keladi. Bu esa o'z navbatida epitaksial qatlam man etilgan sohasidagi germaniy atomlarining nurlanish markazi bilan bog'liq bo'lishi mumkin.



6-rasm. Suyuq geliy (4.2 K) haroratida $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ geterotuzilmasining fotolyuminessensiya spektri.



7-rasm. $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ geterotuzilmalarining spektral fotosezgirli [69; 58-63.]

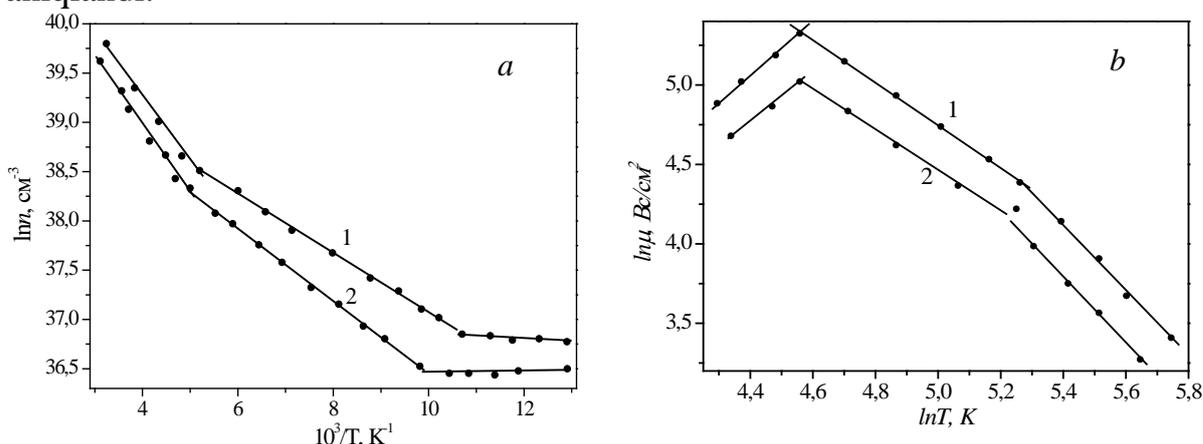
7-rasmda $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ geterotuzilmalar fotosezgirligining spektral bog‘liqligi keltirilgan. Rasmdan tadqiq qilinayotgan geterotuzilmalarning fotosezgirli 1.13 dan 1.73 eV gacha bo‘lgan foton energiyalari oralig‘ini qamrab olishini ko‘rish mumkin. Tadqiq qilinayotgan geterotuzilmalarning fotosezgirli 1.13 eV foton energiyasidan boshlanadi hamda uning maksimal qiymati mos ravishda 1.34 eV (~ 924 nm) da namoyon bo‘ladi. Bu esa GaAs energetik soha kengligi 1.42 eV (872 nm) dan ma‘lum miqdorga kam. Bundan tashqari o‘stirilgan epitaksial qatlamning energetik sohasini yetarli darajada kengligi undan kichik energiyali kvantlarni samarali yutilishiga olib keladi va buning natijasida tadqiq qilinayotgan geterotuzilma fotosezgirlik spektrining maksimal cho‘qqisiga qadar keskin spektral sezgirlik kuzatilmaydi.

Dissertatsiya ishining “ZnSe kvant nuqtali yarimo‘tkazgichli $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamlarining elektrofizik va fotoelektrik xossalari” nomli to‘rtinchi bobida epitaksial qatlamlarga omik kontakt hosil qilish va ularni baxolash, geterotuzilmalardan tok o‘tish mexanizmlari hamda ularning optoelektronik xossalari bayon qilingan. ZnSe kvant nuqtali yarimo‘tkazgichli $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalari uchun omik kontaktlarni olish uchun quyidagi materiallardan: Au, Ag, Ge-Ag(1/10), In, In-Ga(1/1), Sn, In-Ga(1/2) foydalanilgan.

8 - a rasmdan tok tashuvchilarning konsentrasiyasining haroratni teskari qiymatiga bog‘liqligi grafigida bir qator eksponensial sohalar hosil bo‘lganini ko‘rish mumkin. Kuzatilgan eksponensial sohalarga mos keladigan to‘g‘ri chiziqlar qiyaliklari orqali aniqlangan tok tashuvchilarning faollanish energiyalari 0,19 eV, 0,07 eV, 0,029 eV qiymatlariga ega. Yarimo‘tkazgichlarda tok o‘tish mexanizmlari ko‘ptarkibli qattiq qorishmalarda alohida xususiyatga ega ekanligini hisobga olgan holda, epitaksial plyonkalarda tok tashuvchilar harakatchanligining haroratga bog‘liqligini o‘rganildi.

8 - b rasmda o‘rganilayotgan namunalarning Xoll harakatchanligining haroratga bog‘liqligining r-turdagi ko‘rinishi keltirilgan. Bunda, haroratning

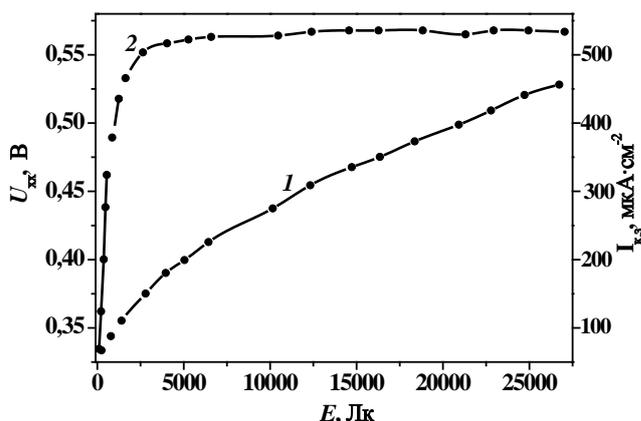
o'shishi bilan zaryad tashuvchilarning harakatchanligi ularni ionlashgan kirishmalarda sochilishiga mos ravishda $\mu \sim T^{3/2}$ darajali qonuniyatga muvofiq ortib borishi kuzatilgan. Shuningdek, $\ln \mu = f(1/T)$ bog'liqlik egri chizig'i maksimumdan o'tadi, so'ngra $\mu \sim T^{-2}$ harorat kvadratiga mutanosib holda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi kamayadi. Binobarin, tadqiq qilinayotgan ZnSe kvant nuqtali yarimo'tkazgichli $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalardagi zaryad tashuvchilarning harakatchanligining qiymati harorat oshishi bilan tashuvchining yuqori haroratli panjara tebranishlariga mos holda sochilishi kutilganidan ko'ra kuchliroq kamayadi $\mu \sim T^{3/2}$. Bu esa qattiq qorishmaning kristallik tuzilishining o'ziga xos xususiyatlari bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Kovaklarning harakatchanligini ortishi qattiq qorishmadagi germaniy atomlari tarkibining ko'payishi bilan ham bog'liqligi aniqlandi. Shunday qilib, ZnSe kvant nuqtali yarimo'tkazgichli $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalardagi kovaklarning Xoll harakatchanligi quyi haroratlarda ularning ionlashgan kirishmalardan sochilishi bilan, yuqori haroratlarda esa panjara tebranishlaridan sochilishi bilan bog'liqligi ekanligi aniqlandi. Kovaklarning harakatchanligi boshqa turli sharoitlarda epitaksial qatlamlarning tarkibi va tuzilmaviy mukammalligiga bog'liqligi ham aniqlandi.



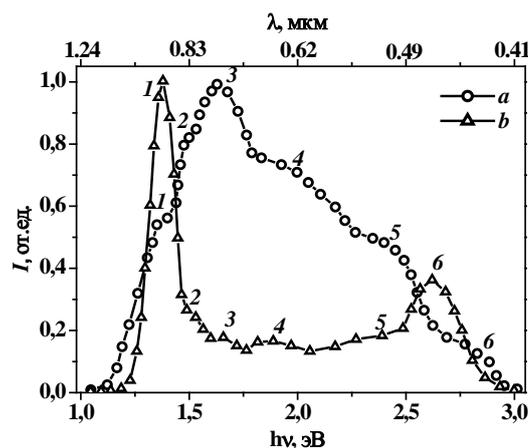
8-rasm. Turli o'stirish sharoitlarida ZnSe kvant nuqtali yarimo'tkazgichli $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamlari tok tashuvchilar konsentrasiyasi (a) va harakatchanliklarning (b) haroratga bog'liqligi: 1 – $T_{d.k.} = 730^\circ\text{C}$, 2 – $T_{d.k.} = 650^\circ\text{C}$

Olingan tuzilmalarning fotovoltaik xususiyatlari 300 K haroratda fotovoltaik va fotodiod usullari bilan o'rganildi. Namunalar qattiq qorishma shakllangan tomonidan yoritildi. Kuchaytirilgan yorug'lik nurlari bilan yoritish orqali olingan tuzilmalarning lyuks-amper xususiyatlari qisqa tutashuv tokining ($I_{q.t.t.}$) yoritilganlikka bog'liqligi dastlabki sohalarda chiziqli bo'lmagan xususiyatga ega ekanligini, ya'ni, yorug'lik nurlanishining qiymatining ortishi bilan ($I_{q.t.t.}$) ning to'liqsimon o'sishiga olib keladi va bu yorug'lik oqimi ta'sirida o'zaro bog'langan yarimo'tkazgich qiymatlarining (noasosiy zaryad tashuvchilarning yashash vaqti, diffuzion yugurish yo'li, 9 - rasm) o'zgarishi bilan ham bog'liq bo'lishi mumkin. Yorug'lik nurlanishi intensivligi ortishi bilan salt elctr yurituvchi kuch (EYuK) to'yinishga moyil bo'lib, 0,6 V qiymatgacha yetib boradi, bu epitaksial plyonka va taglik orasidagi o'tish qatlamining qalinligini tushirilayotgan

yorug'lik nurlari ta'sirida kamaytirishning imkoni mavjud emasligi bilan bog'liq bo'lishini ko'rsatadi.



9 - rasm. Qisqa tutashuv toki (1-egri chiziq) va salt EYuK (2-egri chiziq) larning yoritilganlikka bog'liqligi



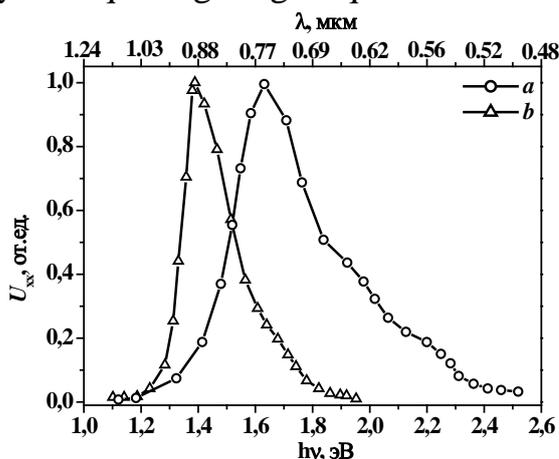
10-rasm. Turli boshlang'ich haroratlarda o'stirilgan foto-diod me'yorida olingan ZnSe kvant nuqtali yarimo'tkazgichli $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qat-lam asosidagi tuzilmalarning spektral fotosezgirli: $a - T_{n.k.} = 730^\circ\text{C}$, $b - T_{n.k.} = 650^\circ\text{C}$.

Turli sharoitlarda o'stirilgan tuzilmalarning fototashuvchilarining yashash vaqtlari foto EYuK relaksasiyani kamayishi bilan aniqlanadi. Qattiq qorishmalarning dastlabki kristallanish haroratining ortishi bilan foto tashuvchilarning yashash vaqtlari ortadi, masalan: dastlabki kristallanish harorati $T_{d.k.}=650^\circ\text{C}$ dan 10^{-7} ni, $T_{d.k.}=730^\circ\text{C}$ da esa $5 \cdot 10^{-5}$ ni tashkil qiladi. $I_{q.t.t.}$ va $U_{f.s.yu}$ spektral xossalari, shuningdek, fotodiod me'yorida fototokning spektral xususiyatlari. O'stirilgan epitaksial pleknkalarga monoxromatik yorug'lik nurlanishi bilan yoritildi. Fotodiod me'yorida fototokning spektral bog'lanishini tekshirish, 1,07 eV dan 3 eV gacha bo'lgan oraliqda kvant energiyasining qamrab olganligini ko'rsatadi (10 - rasm).

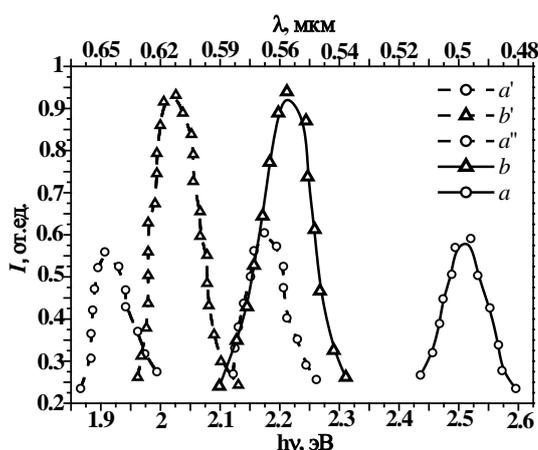
Rasmdan fotosezgirlik spektri 1,37 eV cho'qqili 1-egri chiziq, 1,47 eV cho'qqili 2-egri chiziq, 1,65 eV cho'qqili 3-egri chiziq, 1,88 eV cho'qqili 4-egri chiziq, 2,3 eV cho'qqili 5-egri chiziq, hamda 2,62 eV cho'qqili 6-egri chiziqlar ya'ni, oltita maksimumlar bilan tavsiflanganini ko'rish mumkin. Shuningdek, spektr 1,07 eV foton energiyasidan boshlanganini ham ko'rish mumkin va bu esa juftlashgan Ge_2 atomlari qattiq qorishma kristall panjarasida galliy arsenid molekularini qisman o'rin almashinishi va tuzilma man etilgan sohasida energetik sathlar hosil qilishi natijasi bo'lishi mumkin. 1,48 eV foton energiyasida fotocho'qqi kuzatilishi esa kovakli o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan r-GaAs da tok tashuvchilarni o'tkazuvchanlik sohasidan kovakli holatlarda rekombinatsiyalanishiga mos keladi. Fotosezgirlik spektral bog'lanishining maksimumi 1,64 eV da kuzatilishi, bu epitaksial qatlamning izovalent tashkillovchilari bo'lgan Ge-Se atomlarining o'zaro bog' hosil qilib, GaAs birikmasining valentlik sohasida energetik sathni shakllantirishi natijasi bo'lishi

mumkin. Spekrning 1.89, 2.18 va 2.67 eV foton energiyalarida kuzatilayotgan fotocho‘qqilar mos ravishda valentlik sohasida energetik sathni shakllantiradigan GaSe ($h\nu_{\max} = 1.88$ eV), ZnAs ($h\nu_{\max} = 2.15$ eV) va ZnSe ($h\nu_{\max} = 2.69$ eV) birikmalar tufayli bo‘lishi mumkin.

11 – rasmda Kvant nuqtali mavjud bo‘lgan n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ turdagi geterotuzilmalarni fotoEYuK spektral bog‘liqliklari keltirilgan. Rasmdan ko‘rinadiki geterotuzilmaning boshlang‘ich kristallanish harorati ortishi bilan spektral bog‘lanishning maksimumi uzun to‘lqinlar sohasidan qisqa to‘lqin sohasiga tomon siljiydi. Boshlang‘ich kristallanish harorati ortishi bilan geteroo‘tish chegarasida qattiq qorishmada ZnSe ga nisbatan germaniyning xissasi kamayishi tufayli ZnSe kvant nuqtali yarimo‘tkazgichli (GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ epitaksial qatlam asosidagi p - n o‘tishda generasiyalanadigan tok tashuvchilarning ikkiga ajralish hodisasi yuz berishi mumkin. Qattiq qorishmadan, bir tomoni to‘la yoritilgan bo‘lsa-da, tushuvchi fotonlarning yuqori energiyalarida tok tashuvchilarning asosiy qismi generasiyalanadi. Lekin ularning bir qismi ajralish sodir bo‘ladigan p - n o‘tish chegaralariga yetib boraolmasdan rekombinasiyalanadi. Shuning uchun deyarli barcha holatlarda foto EYuK spektral bog‘liqligining qisqa to‘lqinli sohasida fotosezgirlikning pasayishi kuzatiladi. Turli xil namunalar uchun qisqa to‘lqinli sohada kuzatilgan fotosezgirlik qiymatlarining ba’zi farqlarini plyonka qalinligining farqi bilan ham izohlash mumkin.



11-rasm. Turli boshlang‘ich kristallanish haroratlarida o‘stirilgan ZnSe kvant nuqtali yarimo‘tkazgichli (GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ epitaksial qatlam asosidagi n -GaAs- p -(GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ tizimlari-ning fotoEYuK spektral bog‘lanish-lari. a – $T_{b.k.} = 730$ °C, b – $T_{b.k.} = 650$ °C.



12-rasm. Epitaksial qatlamlari sirti va uni ketma-ket kamaytirish davomida olingan fotolyuminessensiya spektrlarini xususiy sohasi (a' , a'' , b'): a – $T_{n.k.} = 730$ °C, b – $T_{n.k.} = 650$ °C. (a' , a'' , b'): a – $T_{n.k.} = 730$ °C, b – $T_{n.k.} = 650$ °C.

Shuningdek, ZnSe kvant nuqtali yarimo‘tkazgichli (GaAs) $_{1-x}$ (Ge $_2$) $_x$ epitaksial qatlamining fotolyuminessensiya tadqiqotlari o‘tkazildi. Tajribalar turli boshlang‘ich kristallanish haroratlarida o‘stirilgan epitaksial qatlamlar uchun o‘tkazildi. Epitaksial qatlam sirti 300 K haroratda simobli yoritgich yordamida damlash orqali amalga oshirildi. Shu bilan birga, vizual kuzatish paytida epitaksial

qatlamlar yuzasida namuna turiga qarab yashildan ko'k ranggacha bo'lgan lyuminessent nurlanish hosil bo'lishi aniqlandi. Plyonkalarining sirtini turli yo'nalishlarda skanerlash orqali, namunalar yuzasining holatini lyuminessensiyaning rangi bo'yicha vizual ravishda baholash imkoni vujudga keldi. Fotolyuminessensiya spektrlarini uzluksiz qayd qilish natijasida, boshlang'ich kristallni harorati ortishi bilan xususiy fotolyuminessensiya maksimumlarini qisqa to'liqlar tomon siljishi aniqlandi (12 - rasm).

XULOSA

1. Ilk marotaba suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida Ge kvant o'ralari hamda ZnSe kvant nuqtalariga ega bo'lgan $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalari o'stirildi va epitaksial qatlamlar kristallanishining eng maqbul shartlari (tagliklar orasidagi bo'shliq 1 mm; aralashma-eritma tarkibi GaAs–Ge–ZnSe–Sn; majburiy sovutish tezligi 1,5 grad/min va kristallanishning boshlanish harorati $730 \div 600$ °C) aniqlandi.

2. Ge kvant o'ralari hamda ZnSe kvant nuqtalariga ega bo'lgan $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalar (100) kristallografik orientatsiyaga hamda $a_{\text{q.q.}} = 0,5646$ nm panjara doimiysiga ega bo'lgan monokristall bo'lib, $F\bar{4}3m$ fazoviy guruhga mos keluvchi ZnS turidagi sfalerit tuzilishiga ega ekanligi aniqlandi.

3. O'stirilgan $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamlar o'lchamlari taxminan 49 nm bo'lgan subkristallitlar (bloklari) dan tashkil topganligi, GaAs tetraedral kristall panjarasida juftlashgan Ge_2 atomlari Ga-As molekulari bilan qisman o'rin almashinib joylashishi, shuningdek, Ge va ZnSe plyonka kristall panjarasining nuqsonga moyil sohalarida mos ravishda 44 va 60 nm o'lchamli nanokristallarini shakllantirishi aniqlandi.

4. O'stirilgan $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamlarning morfologik tahlillari yordamida plyonkaning sirtiy sohalarida asosining diametri $30 \div 60$ nm va balandligi $3 \div 12$ nm bo'lgan Ge nanokonuslari shakllangani aniqlandi. Bunday Ge nanokonuslari o'zlarining geometrik shakli, o'lchami va ustki o'zaro burchagi asosida 2D tizimiga mansub bo'lgan kvant o'ralari ekanligi ko'rsatildi.

5. Turli texnologik sharoitlarda ($T_{\text{b.k.}} = 730$ °C va $T_{\text{b.k.}} = 650$ °C) o'stirilgan $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ epitaksial qatlamlar asosida tayyorlangan n -GaAs – p - $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ geterotuzilmalarining VAXsi o'rganildi. Dastlabki kristallanish harorati $T_{\text{b.k.}} = 650$ °C bo'lgan sharoitida o'stirilgan qatlamlar asosida tayyorlangan n -GaAs – p - $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ geterotuzilmalardan tok o'tish tunnel-rekombinasiyaviy mexanizmiga bo'ysunishi, kristallanish harorati $T_{\text{n.k.}} = 730$ °C da olingan qatlamlar asosida tayyorlangan n -GaAs – p - $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ geterotuzilmalarda esa fazoviy zaryad bilan cheklangan toklar o'tishi orqali izohlandi.

6. n -GaAs– p - $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ geterotuzilmalarda epitaksial qatlamlar o'sishining turli texnologik sharoitlarida ($T_{\text{d.k.}} = 730$ °C, $t = 150$ min; $T_{\text{d.k.}} = 730$ °C, $t = 100$ min; $T_{\text{d.k.}} = 650$ °C, $t = 100$ min) yuqori solishtarma qarshilikka ega bo'lgan 0,09, 0,135 va 0,148 mkm qalinlikdagi yupqa qatlamlar shakllanishi aniqlandi.

7. Ge kvant o'ralari hamda ZnSe kvant nuqtalariga ega bo'lgan $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qattiq qorishmalarining dastlabki kristallanish haroratining ortishi bilan

fototok tashuvchilarning yashash vaqtlari $T_{d.k.}=650$ °C da 10^{-7} , va $T_{d.k.}=730$ °C da $5 \cdot 10^{-5}$ tartibida ortishi aniqlandi.

8. Keltirilgan ikki namuna uchun fotolyuminessensiya spektrlari bo'yicha man etilgan sohalarning qiymati 2.51 va 2.21 eV ni tashkil etishi baxolandi. Geterotuzilmalar energetik sohasining kengligi epitaksial qatlam hajmi va sirtiy sohlaridagi Ge va ZnSe kirishmalari tarkibiga bog'liq holda nomonotonik xarakterga ega ekanligi va shu asosda varizon sohali yarimo'tkazgichli tuzilmalar olish tavsiya etildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКОМ
ИНЖЕНЕРНО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

АБДУРАХИМОВ ДИЛХАЁТЖОН ПУЛАТЖОН УГЛИ

**ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ GaAs-Ge ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ С
ПРИМЕСЬНЫМИ НАНООБЪЕДЕНЕНИЯМИ**

01.04.10-Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

НАМАНГАН - 2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2023.2.PhD/FM894.

Диссертация выполнена в Андижанском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.nammti.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель: Зайнабидинов Сирожиддин
доктор физико-математических наук, академик

Официальные оппоненты: Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич
доктор физико-математических наук, профессор

Тургунов Нозимжон Абдуманнопович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Ургенчский государственный университет.

Защита диссертации состоится «7» 12 2023 года в 12 часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 при Наманганском инженерно – технологическом институте. (Адрес: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7, Административное здание Наманганского инженерно – технологического института, 1-этаж, малый зал совещаний, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Наманганского инженерно – технологического института (зарегистрирована за №) по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7, Тел. (99869) 228-76-70.

Автореферат диссертации разослан «24» 11 2023 года.
(реестр протокола рассылки № 5 от «24» 11 2023 г.).



У.Б. Эркабаев
председатель Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Б.Х. Кучкаров
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней, PhD, доцент

Н. Шарibaев
Председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых
степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время современное развитие полупроводниковой микроэлектроники и нанотехнологии получили впечатляющие результаты в разработке и создании квантово-размерных гетероструктур и приборов на их основе. Непрерывный технологический прогресс требует разработки адекватных современных методов создания наноразмерных структур (квантовых точек и ям), а также совершенствование существующих методов электронного приборостроения.

На мировом уровне многокомпонентные твердые растворы тройных (InGaAs, InGaAs) и четверных (InSbGaAs и AlSbGaAs) соединенных на основе GaAs в настоящее время широко используются для создания оптоэлектронных приборов, как лазеров, светодиодов, фотодиодов в спектральном диапазоне 2÷5 мкм при комнатной температуре. Учеными и специалистами Института физики микроструктур имени Макса Планка, Института физики (Германия), Научного исследовательского института Эко-Топия, Университета Нагоя, Департамент кристаллического материаловедения (Япония), Департамента электротехники и вычислительной техники, Рутгерского университета (США), Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе получены и исследованы различные гетероструктуры с отдельным ограничением в системах твердых растворов InGaAs/GaAs/InGaP и InGaAs/GaAs/AlGaAs, также беспрецедентный прогресс был достигнут в их реализации. В качестве волновода в этих структурах использовались эпитаксиальные слои GaAs.

В соответствии со стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан обращается особое внимание вопросам создания эффективных механизмов внедрения в практику достижений науки и инновации. В частности, в настоящее время учёными нашей страны уделяется большое внимание развитию полупроводниковой оптоэлектроники и нанотехнологии, а также созданию многокомпонентных варизонных твердых растворов с квантово-размерными эффектами.

В 2023 году «Года заботы о человеке и качественного образования» поднятие на современный уровень качества получаемых научных результатов достойно особого внимания. В частности, получение новых типов гетероструктур на арсениде галлия, также исследование их структурных особенностей, электрофизических и фотоэлектрических характеристик являются **актуальной задачей** современного полупроводникового материаловедения и микроэлектроники.

Данное диссертационное исследование в определенной степени соответствует задачам, обозначенным в указах и постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года, ПП-4348 «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала

отрасли» от 30 мая 2019 года, ПП-3855 «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности» от 14 июля 2018 года, № ПП-3012 «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017-2021 годы» от 26 мая 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: III. «Энергия, энергосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. В ведущих научных центрах мира ученые, специалисты и производители микро- и оптоэлектроники обращали особое внимание на технологию выращивания различных полупроводниковых твердых растворов и исследованию их уникальных физических свойств. В связи с этим проведены широкомасштабные исследования по технологии жидкофазной эпитаксии полупроводников и их твердых растворов с различными нановключениями, а также взаимодействий примесей с дефектами Америкскими учёными под руководством Л.Г. Ванг и Алекс Зунгер, российскими учёными (Ж.И. Алферов и В.М. Андреев), японскими учеными (М. Фунато и Бинг Ли Гу) и испанскими учеными (Р. Лавиолет и Х. Фаррел).

В частности, узбекскими учеными под руководством академиков М.С. Саидова, и профессора А.В. Каримова получены твёрдые растворы с кластерами и нанодефектами на основе арсенида галлия, исследованы их структурные, элетрофизические и фотоэлектрические характеристики а также созданы микро- и оптоэлектронные приборы на их основе. Ученые под руководство академика С.З. Зайнабидинова и профессора А.С. Саидова предложены разделить эти нанобъекты на «квантовые точки» и «квантовые ямы» исходя из энергии ковалентных связей атомов материалов нановключений и матрицы, т.е. экспериментально обоснованы, когда ширина запрещенной зоны нановключений больше, чем ширины запрещенной зоны базового полупроводника, то образуется квантовая точка, и когда наоборот, то - квантовая яма.

Однако природа таких нанообразований, их энергии взаимодействия а также влияния их составляющих на структурные и фотоэлектрические свойства матрицы в зависимости от состава и типа примесных атомов в них уделено мало внимания.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проекта научных исследований Андижанского государственного университета ОТ-Ф2-68 «Механизмы образования примесно-дефектных микро-и нанобъединений в

кристаллах и их роль в создания многослойных структур с широкими функциональными возможностями» (2017-2020 гг.);

Целью исследования является получение новых полупроводниковых $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ твердых растворов с нанобъектами и исследования их морфологических и структурных свойств, также механизмов тока-прохождения носителей заряда в таких структурах.

Задачи исследования:

выращивание твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с различными нанобъектами методом жидкофазной эпитаксии;

определение технологических режимов получения $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с заданными формирования квантовых нанобъектов и их плотностей, форм и размеров;

исследование структурных особенностей выращенных эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$;

определение типа кристаллографической структуры и пространственной группы полученных пленок и нанобъектов в них;

исследование вольтамперных и вольт-фарадных характеристик $n\text{-GaAs-}p(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ структур;

исследование фотоэлектрических свойств $n\text{-GaAs-}p(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ структур, как в фотодиодном, так и в фотовольтаическом режимах.

Объектом исследования являются варизонные твердые растворы $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с различными нанобъектами, а также $p\text{-}n$ - гетероструктуры, изготовленные на их основе.

Предмет исследования. Технологии получения $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ твердых растворов с нанобъектами, выявление типа кристаллографической структуры и пространственной группы, определение фундаментальных параметров твердых растворов и выявление закономерностей и механизмов переноса тока, а также фотоэлектрические свойства $n\text{-GaAs-}p(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктур.

Методы исследований. В работе использованы апробированные методы выращивания твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с нанобъектами методом жидкофазной эпитаксии, кристаллографические исследование методами рентгенодифрактометрии, определение химического состава компонентов твердых растворов на рентгеновском микроанализаторе, выявление оптоэлектронных свойств $n\text{-GaAs-}p(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктур, которые проводились на стандартных и высокоточных измерительных приборах.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые выращены твердые растворы $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ на подложках GaAs методом жидкостной эпитаксии из оловянного раствора-расплава с принудительным охлаждением;

определены, что твердые растворы $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с нанобъектами являются монокристаллическими с ориентацией (100) и параметрами решеток $a_{\text{т.р.}} = 0,5646$ нм и имеют сфалеритную структуру типа ZnS, соответствующей пространственной группе $F\bar{4}3m$;

установлены, что на поверхности пленки формируются когерентно расположенные наноконусы Ge с параметрами решеток $a_{\text{Ge}} = 5.67 \text{ \AA}$ и размерами 44 нм по направлениям (100);

показано, что в структурах $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$ с квантовыми ямами Ge токопрохождение определяется туннельно-рекомбинационным механизмом, а в структурах $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$ с квантами точками токи являются омическими и диэлектрическая релакция ограничена объемными зарядами;

обнаружено, что на гетерогранице образуются области с более высокими удельными сопротивлениями, толщина которых изменяются в зависимости от условий роста в интервале 0,09-0,15 мкм;

определены, что спектры фоточувствительности $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$ гетероструктур имеют крайнюю длинноволновую область с энергией фотонов 1,1 эВ и три компоненты, которые соответствуют соединениям As-Ge, Ge-Ge и Ga-Ge.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

определены, интервал температуры и скорость выращивания гетероструктур $n\text{-GaAs-}p\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$ их охлаждения и другие технологические режимы играют важную роль в формировании квантовых нанобъектов, их плотностей, форм и размеров;

определены условия создания достаточно плотной и однородной по свойствам ансамбля квантово-размерных объектов в процессе выращивания эпитаксиальных пленок;

обнаружено что спектры фотолюминесценции $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$ структур охватывают практически весь инфракрасный диапазон спектра излучения с максимумом пика при $\lambda_{\text{max}} = 852 \text{ нм}$, который может быть использован в качестве фотоприемников в солнечной энергетике и оптоэлектронике.

Достоверность результатов исследований обосновывается на использовании современных научных и апробированных методов: рентгенографической дифракметрия, атомно-силовой микроскопии; исследованиями электрических и оптических свойств на стандартных приборах; хорошей воспроизводимостью результатов; непротиворечивостью выводов от общих физических представлениях подобных явлений; применением компьютерной техники.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований заключается в том, что они расширяют представления о механизмах явлений, происходящих на поверхности и в объеме многокомпонентных пленок.

Практическая значимость результатов исследования заключается в определении оптимальных технологических условий получения многокомпонентных тонких пленок для использования их в производстве электронных приборов и изделий.

Внедрение результатов исследования.

Полученные результаты исследований: технологические режимы выращивания совершенных эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$, также определения параметр решеток, тип кристаллографической структуры и пространственной группы пленок с нанобъектами применен в проекте Института ядерной физики № Ф2-ФА-Ф120 (2012-2016 г.г.) на тему «Электронные свойства и радиационная модификация низкоразмерных высокотемпературных сверхпроводников, полупроводниковых гетероструктур, металлов и их оксидов». (Справка Академии Наук Республики Узбекистан за № 2/1255-1463 от 10 июля 2023 г.). Использование результатов научных исследований позволило повысить структурную стабильность и устойчивость к внешним воздействиям гетероструктур на основе выращенных эпитаксиальных слоев.

Способ исследования вольтамперных, вольт-фарадных характеристик и фотоэлектрические свойства $n\text{-GaAs-p}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктур как в фотодиодном, так и в фотовольтаическом режимах использованы на АО «ФОТОН» при производстве полупроводниковых электронных устройств (Справка № 04-3/333 Акционерной компании «Узэлтехсаноат» от 4 марта 2023 года). Использование научных результатов позволило изготовить электронные-технические изделия экспериментальных устройства и улучшить их оптоэлектронные свойства.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 6 международном и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов. По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 7 статей опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Объём диссертации составляет 101 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и необходимость данного исследования, исходя из приоритетов развития науки и техники Республики Узбекистан, определены его цели и задачи, объекты и предметы, научная новизна и практические результаты исследования, сформулированы краткий анализ результатов международных научных исследований по теме диссертации и уровня изученности проблемы, дана информация об использовании результатов исследований, а также об опубликованности результатов научно-исследовательских работах и структуре диссертация.

В первой главе диссертации, названной «**Физические основы образования и технология синтеза многокомпонентных твердых растворов на основе A^3B^5** » изложены теоретические основы образования

непрерывных твердых растворов замещения соединений A^3B^5 и A^2B^6 с элементами IV группы, механизмы образования квантоворазмерных объектов на поверхности и в объеме таких тонких слоев, их плотности, геометрических форм и размеров, а также анализ литературы о механизмах тока переноса в них, и сформулированы задачи исследований.

Во второй главе диссертации, названной «**Экспериментальные методы исследований**» даны подробное описание структуры $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x$, свойств эпитаксиальных слоев выращенных на подложках GaAs с помощью жидкостной эпитаксии из оловянного раствора-расплава принудительным охлаждением. Определены оптимальные условия технологии выращивания (зазор между горизонтально расположенными подложками 1 мм; - состав раствора-расплава GaAs–Ge–Sn);

- скорость принудительного охлаждения 1,5 град/мин.; - температура начала кристаллизации – 700 и 650 °C). Кроме того, представлены принципы работы высокоточных технологических устройств и стандартных измерительных приборов, используемых для изучения некоторых физических свойств образцов, отобранных при выполнении диссертационной работы.

В третий главе диссертации, названной «**Структура, морфология и фото-и электрические свойства n -GaAs- p - $(GaAs)_{1-x}(Ge_2)_x$ гетероструктуры**» описаны рентгеноструктурные, электронно-микроскопические, фото- и электрофизические свойства выращенных эпитаксиальных слоев $(GaAs)_{1-x}(Ge_2)_x$. На рис. 1 представлена рентгенограмма выращенной эпитаксиальной пленки $(GaAs)_{1-x}(Ge_2)_x$ узкая ширина ($FWHM = 5.36 \cdot 10^{-3}$ рад) и большая интенсивность ($2 \cdot 10^5$ имп·с⁻¹) основного рефлекса $(400)_{GaAs+Ge}$, свидетельствует о высокой степени совершенства кристаллической решетки твердого раствора, то есть выращенная нами пленка является монокристаллической, с ориентацией (100). Также определены размеры субкристаллитов (блоков) и параметры решетки пленки, оцененные по ширине данного пика которые составили около 49 нм и $a_{T,p} = 0,5646$ нм, соответственно.

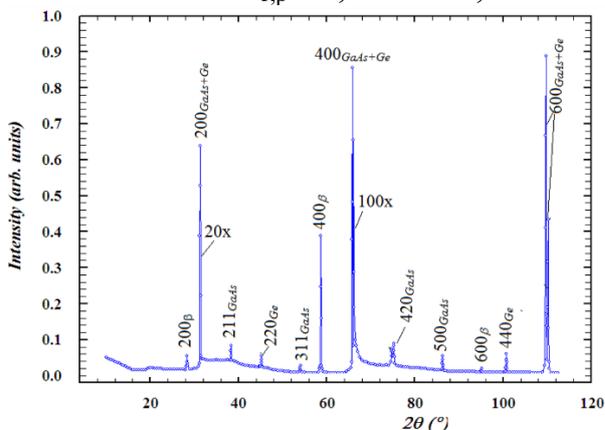


Рис.1. Рентгенограмма эпитаксиальной пленки – $(GaAs)_{1-x}(Ge_2)_x$

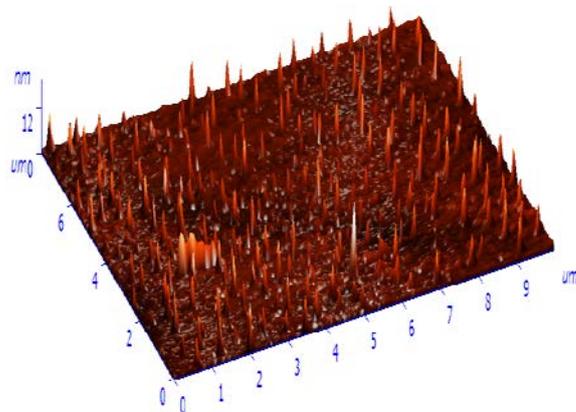


Рис. 2. АСМ изображение эпитаксиального слоя твердого раствора $(GaAs)_{1-x}(Ge_2)_x$

Кроме того, на основе рентгеноструктурного анализа полученных эпитаксиальных слоев $(GaAs)_{1-x}(Ge_2)_x$ с квантовыми ямами установлено, что

парные атомы германия в кристаллической решетке слоя арсенида галлия распределены неравномерно на определенной глубине. Это, в свою очередь, считалось основным фактором накопления упругой энергии в локальных областях решетки, возмущенных наличием новых, энергетически более выгодных дефектных атомов или молекул роста кристаллитов. В результате накопления дефектов в таких областях решетки, подтверждается присутствием на рентгенограмме дифракционного отражения от плоскости (220) и (440) нанокристаллов Ge с другой ориентацией. Также определены параметры решетки и размеры нанокристаллов Ge, т.е. квантовые ямы оцененные по экспериментальным данным таких дифракционных отражений, которые составили $a_{Ge} = 0.5662$ нм и 44 нм, соответственно.

На рис. 2 показано трехмерное АСМ изображение эпитаксиальной пленки. Определено, что диаметр основания этих нанообъектов (наноконусов) варьируется в интервале от 30 до 60 нм, а высота от 3 до 12 нм. Установлено что, при эпитаксиальном выращивании различных полупроводниковых материалов, энергия деформации, вызванная несоответствием параметров кристаллической решетки контактирующих материалов, является основным фактором, для формирования самоорганизующихся трехмерных наноконусов. На основе этих данных, а также результатов структурных анализов исследованных структур сделан вывод о том, что наблюдаемые наноконусы на поверхности эпитаксиальных слоев обусловлены нанокристаллитами атомов Ge.

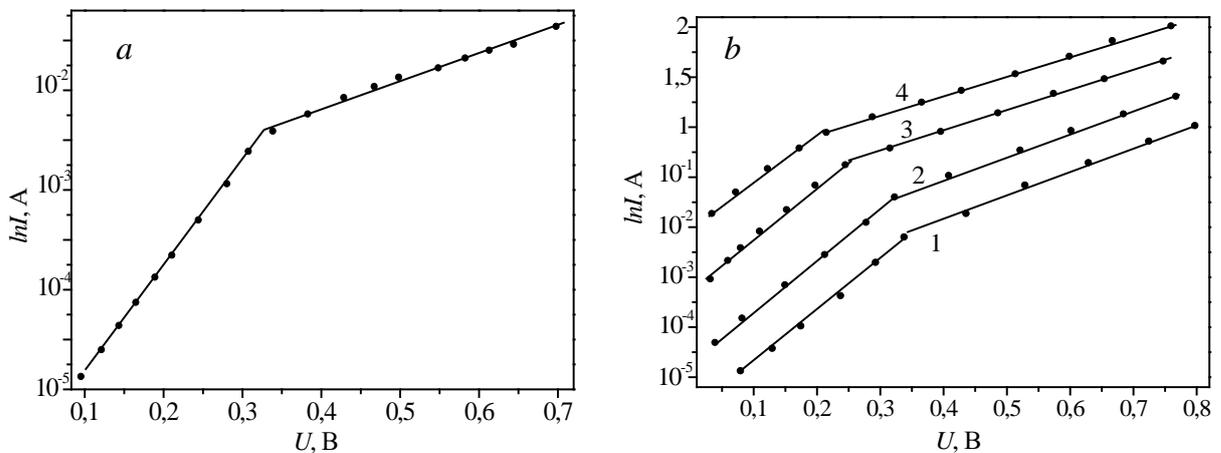


Рис.3. Вольтамперные характеристики гетероструктур $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$ при комнатной (a) и различных температурах (b): 1 – 325 К, 2 – 350 К, 3 – 375 К, 4 – 400 К. ($T_{н.к.} = 630$ °С)

Образцы, подготовленные для измерения ВАХ гетероструктур $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2\text{)}_x$, были разделены на две группы. ВАХ одной группы образцов содержали участки, в которых преобладают туннельно-рекомбинационный механизм прохождения тока через гетеропереход (рис. 3-а), то есть в зависимости тока от напряжения наблюдаются два последовательных экспоненциальных участка, наклон которых не зависят от температуры (рис. 3-б). Такую зависимость ВАХ можно аппроксимировать следующей формулой:

$$I = I_{01} \exp(\alpha_1 V) + I_{02} \exp(\alpha_2 V) \quad \text{где} \quad \alpha_1 = 6; \quad \alpha_2 = 3,5.$$

Выпрямляющий коэффициент данной гетероструктуры в зависимости от технологических условий изменялись в интервале $10 \div 300$. Обратную ветвь ВАХ данных гетеропереходов можно описать следующим выражением:

$$I_{\text{обр}} = A \cdot V_{\text{обр}}^m$$

где m – показатель для напряжений до 1 В составляющий ≈ 1 , а для больших напряжений ≈ 8 .

Для другой группы образцов типичен ВАХ со следующими последовательными участками (рис. 4)

$$I \sim V, I \sim V^2, I \sim V^\alpha, I \sim V^2, I \sim V^\beta$$

где значения « α » и « β » в зависимости от режима роста изменяются в интервале 7-12. Это свидетельствует о том, что через такие гетероструктуры протекают токи ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ).

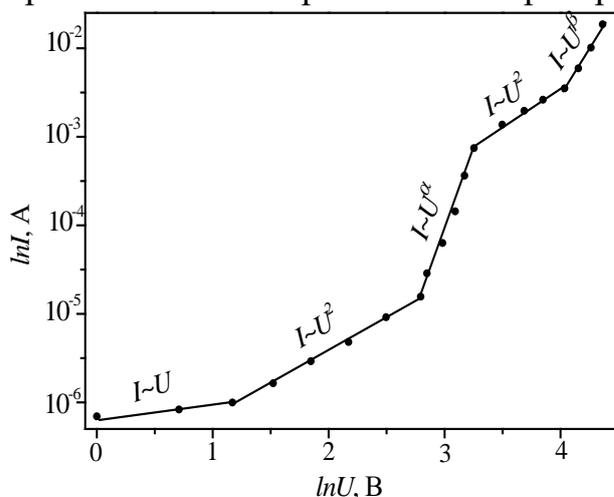


Рис.4. ВАХ гетероструктур $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2)_x$ $T_{\text{н.к.}} = 730^\circ\text{C}$.

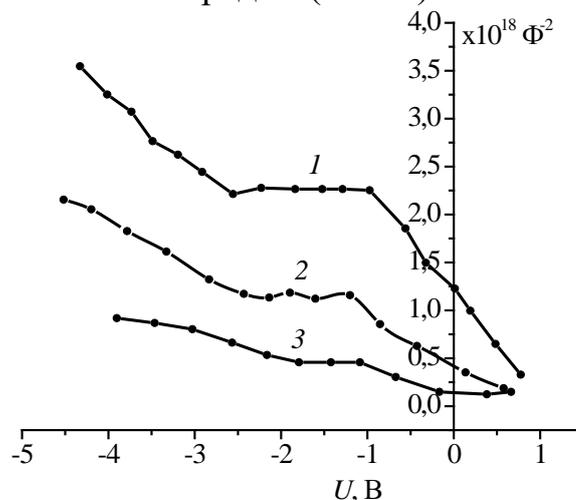


Рис.5. Вольт-емкостные характеристики структур $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2)_x$ 1 – $T_{\text{н.к.}} = 730^\circ\text{C}$, $t = 150$ мин; 2 – $T_{\text{н.к.}} = 730^\circ\text{C}$, $t = 100$ мин. 3 – $T_{\text{н.к.}} = 630^\circ\text{C}$, $t = 100$ мин.

При исследованиях вольтфарадных характеристиках гетероструктур $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs)}_{1-x}\text{(Ge}_2)_x$ обнаружен (рис. 5 - 1, 2, 3 - кривые) участок, где емкость структуры почти не зависит от приложенного напряжения. Появление плато на вольтфарадных характеристиках объясняется наличием на гетерогранице слоя с более высоким удельным сопротивлением, толщина которого сравнима с толщиной области объемного заряда при подаче обратного смещения на гетеропереход. Толщины высокоомных прослоек, определенные с использованием значений емкостей, соответствующих плато, составляли для разных образцов 0,09, 0,135 и 0,148 мкм. Обнаружено, (рис. 5-1 кривая) что толщина высокоомных прослоек зависят как от температуры выдержки подложек GaAs над раствором-расплавом непосредственно перед процессом его погружения (рис. 5-2 кривая), так и от продолжительности выдержки (рис. 5-3 кривая).

Для определения роли компонентов твердых растворов в наблюдаемых процессах нами исследованы спектр фотолюминесценции (ФЛ) этих

образцов при гелиевой температуре (4,2 К) и их спектральные зависимости фоточувствительности. На рис. 6. приведен ФЛ поверхности эпитаксиального слоя $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$. Видно, что спектр ФЛ твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ имеет широкую полосу, охватывающую практически весь инфракрасный диапазон спектра излучения с максимумом пика при $\lambda_{max} = 852$ нм. Этот пик соответствует ширине запрещенной зоны GaAs, равной 1,45 эВ. На спектрах твердых растворов наблюдается ещё более слабый пик с максимумом при 946 нм, возможно, связанный с излучательным центром атомов германия в запрещенной зоне GaAs.

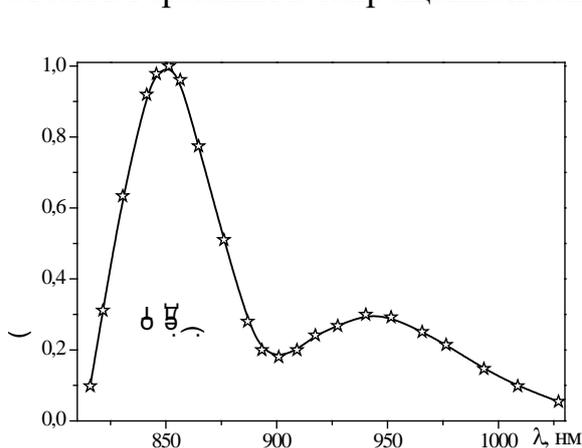


Рис. 6. Фотолюминесценция n -GaAs- p - $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктур при гелиевой температуре

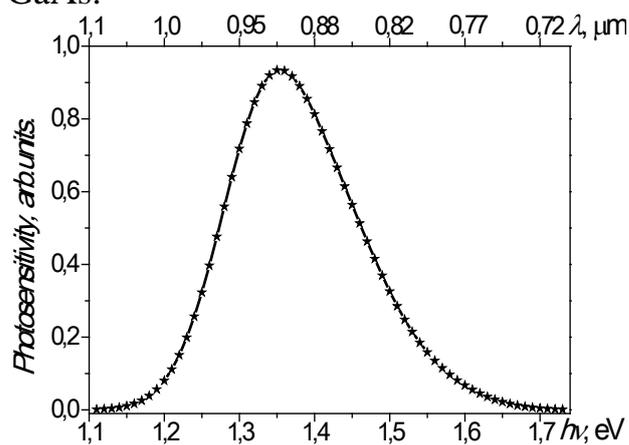


Рис.7. Спектральная фоточувствительность n -GaAs- p - $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктур

На рис. 7 представлена спектральная зависимость фоточувствительности $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктур, откуда видно, что фоточувствительность исследованных гетероструктур охватывает диапазон энергий фотонов от 1,13 до 1,73 эВ. Фоточувствительность исследованной структуры начинается при энергиях фотонов 1,13 эВ и максимум спектральной фоточувствительности твёрдого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ наблюдается при 1,34 эВ (~ 924 нм), что меньше чем 1,42 эВ (872 нм) запрещенной зоны GaAs. Наблюдаемая плавное изменение здесь спектральной чувствительности гетероструктур возможно, обусловлено толщиной слоя твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$, эффективно поглощающего низкоэнергетические кванты.

В четвёртый главе диссертации, названной «Структура, электрофизические и фотоэлектрические свойства полупроводникового эпитаксиального слоя $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с квантовыми точками ZnSe» описаны оценка качества омического контакта механизмы токопрохождения в гетероструктурах и их оптоэлектронные свойства. Для получения омических контактов к полупроводниковым твердым растворам $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с квантовыми точками ZnSe мы использовали следующие материалы: Au, Ag, Ge-Ag(1/10), In, In-Ga(1/1), Sn, In-Ga(1/2).

Как видно, из рис.8-а. зависимость концентрации носителей заряда от обратной температуры имеет несколько явно выраженных экспоненциальных

участков. Энергии активации носителей, определенные по наклонам прямых соответствующих вышеуказанным участкам, имеют значения 0.19 эВ, 0.07 эВ, 0.029 эВ. Учитывая то, что механизмы, токопрохождения в полупроводниках, имеют особую важность в многокомпонентных полупроводниковых твердых растворах, нами так же исследованы зависимости подвижности носителей от температуры.

Температурная зависимость Холловской подвижности исследованных образцов имеет типичный вид, представленный на рис.8-*b*. При низких температурах с увеличением температуры подвижность носителей заряда увеличивается по степенному закону $\mu \sim T^{3/2}$, что соответствует рассеянию дырок на ионизованных примесях. Далее кривая зависимости $\ln \mu = f(1/T)$ проходит через максимум, после которого следует спад подвижности носителей заряда пропорционально квадрату обратной температуры $\mu \sim T^{-2}$. Следовательно, величина подвижности носителей заряда в исследуемых нами твердых растворах $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с квантовыми точками ZnSe с увеличением температуры уменьшается сильнее, чем следовало ожидать в случае рассеяния носителей на высокотемпературных колебаниях решетки $\mu \sim T^{3/2}$. Вероятно, это связано с особенностями кристаллической структуры твердого раствора. Так же обнаружено увеличение подвижности дырок с увеличением содержания германия в твердом растворе.

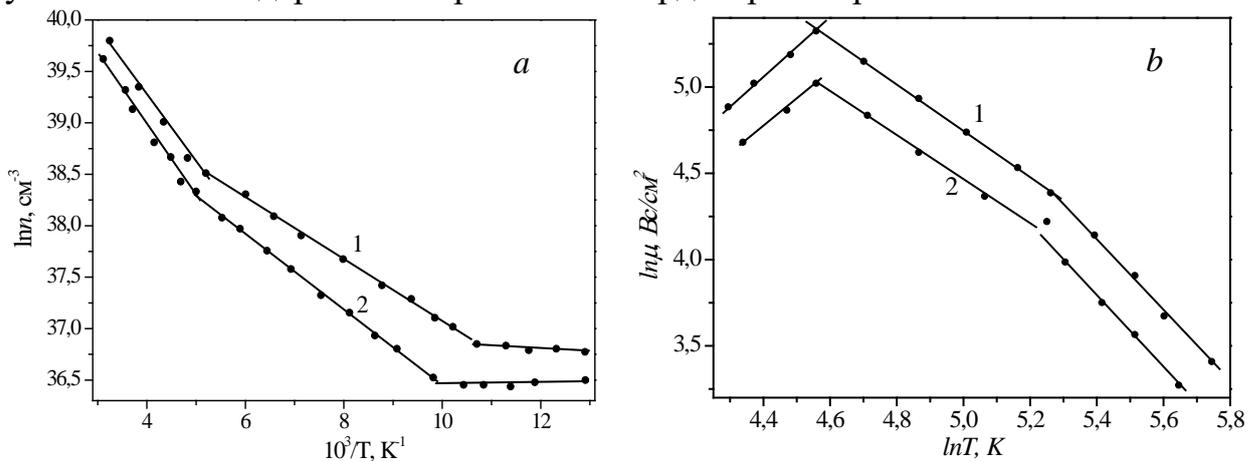


Рис. 8. Температурные зависимости концентрации (*a*) и подвижности (*b*) носителей заряда для слоев $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с квантовыми точками ZnSe выращенных при различных условиях. 1 – $T_{\text{н.к.}} = 730 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $T_{\text{н.к.}} = 630 \text{ }^\circ\text{C}$.

Фотоэлектрические свойства полученных структур изучались как с фотовольтаическими, так и с фотодиодными способами при температуре 300К. Освещение поверхности осуществлялось со стороны твердого раствора. Люкс-амперные характеристики структур, полученные при освещении интегральным светом показали, что зависимость тока короткого замыкания ($I_{\text{к.з.}}$) от освещенности имеет нелинейный характер: в начальном участке с увеличением значения падающего света происходит волнообразное возрастание $I_{\text{к.з.}}$, что может быть связано и с изменениями параметров контактирующих полупроводников под влиянием потока светового

излучения (время жизни неосновных носителей заряда, диффузионная длина. (Рис.9). С ростом интенсивности падающего света, ЭДС холостого хода стремился к насыщению, достигая при этом значения 0.6 В, что может быть связано с невозможностью уменьшения толщины переходного между слоями эпитаксиальной пленки и подложки под воздействием падающего света.

По спаду релаксации фотоЭДС определено, что время жизни фотоносителей в структур, их выращенных при различных условиях, что с увеличением температуры начинается кристаллизация ($T_{н.к.}$) слоя твердого раствора $(GaAs)_{1-x}(Ge_2)_x$ с квантовыми точками ZnSe, время жизни фотоносителей растет от значения 10^{-7} с при $T_{н.к.}=630$ °С до $5 \cdot 10^{-5}$ с при $T_{н.к.}=730$ °С. Были сняты спектральные характеристики $I_{к.з.}$ и $U_{ф.х.х.}$, а также фототока в фотодиодном режиме. Монохроматическое излучение подавалось со стороны твердого раствора $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$. Измерение спектральной зависимости фототока в фотодиодном режиме (рис. 10-а, б), показало, что оно охватывает широкий интервал энергии падающих квантов от 1,07 эВ до 3 эВ.

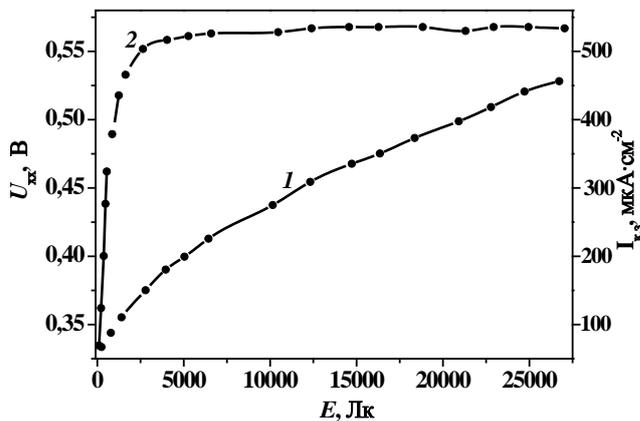


Рис.9. Зависимости тока короткого замыкания (*1-кривая*) и ЭДС холостого хода (*2-кривая*) от освещенности интегральным светом.

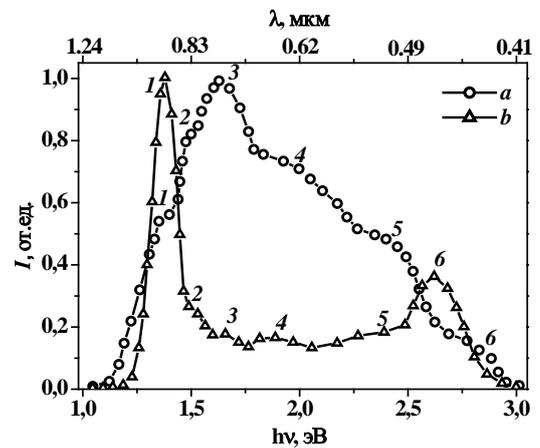


Рис.10. Спектральная зависимость фототока структуры $n-GaAs-p-(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ полученной в фотодиодном режиме при различных температурах начала кристаллизации: *a* – $T_{н.к.} = 730$ °С, *b* – $T_{н.к.} = 630$ °С.

Видно, что спектр фоточувствительности образцов характеризуется шестью пиками с максимумами при энергиях фотонов 1.37 для *1-кривай*, 1.47 для *2-*, 1.65 для *3-*, 1.88 для *4-*, 2.3 для *5-* и 2.62 эВ для *6-* (рис. 10-а). Спектр начинается с энергии фотонов 1,07 эВ, который возможно, обусловлен парными атомами Ge, которые частично замещают некоторые молекулы арсенида галлия и создают соответствующий энергетический уровень. При энергии фотонов 1,48 эВ наблюдается фотопик, соответствующий рекомбинации из зоны проводимости на акцепторные состояния в *p-GaAs*. Максимум спектральной зависимости фоточувствительности наблюдается при 1,64 эВ, что возможно обусловлено со структурой валентной зоны и

изовалентными примесями соединений Ge-Se в слое GaAs. Следующие фотопики, соответствующие энергиям фотонов 1.89, 2.18 и 2.67 эВ, которые обусловлены соединениями GaSe ($h\nu_{\max} = 1.88$ эВ), ZnAs ($h\nu_{\max} = 2.15$ эВ) и ZnSe ($h\nu_{\max} = 2.69$ эВ) с глубокими уровнями в валентной зоне арсенида галлия.

Спектральные зависимости фото ЭДС приведены на рис. 11. Видно, что максимумы спектральной зависимости, характеризующие начало кристаллизации с увеличением температуры смещаются в коротковолновую область длин волн. Поскольку разделения генерирующихся носителей в твердом растворе $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с квантовыми точками ZnSe происходит, на p - n переходе, то такое смещение вероятно связано с уменьшением содержания германия по отношению к ZnSe в твердом растворе $((\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с квантовыми точками ZnSe y на границе гетероперехода, с увеличением температуры начала эпитаксии. Хотя излучение подается со стороны твердого раствора, часть носителей, генерированных на поверхности твердого раствора при больших энергиях падающих фотонов, вероятно, рекомбинируют не достигая границы p - n перехода, где происходит их разделение. Поэтому, почти во всех случаях наблюдается спад фоточувствительности в коротковолновой области спектральной зависимости фотоЭДС. Некоторое различие в значениях фоточувствительности наблюдаемых в коротковолновой области для различных образцов можно объяснить различием толщин пленок.

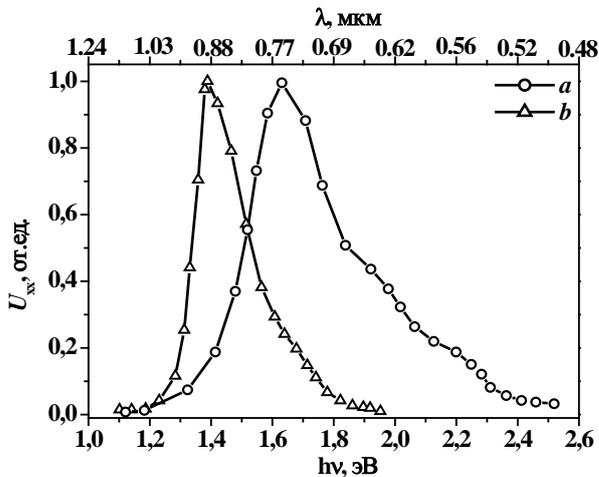


Рис.11. Спектральная зависимость фотоЭДС холостого хода структур n -GaAs- p - $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, полученных при различных температурах начала кристаллизации: $a - T_{\text{н.к.}} = 730$ °C, $b - T_{\text{н.к.}} = 630$ °C.

Также, были проведены исследования фотолюминесценции, полученных нами твердых растворах $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, в собственной области спектра. Измерению подверглись образцы, полученные при различных температурах начала кристаллизации. Оптическая накачка

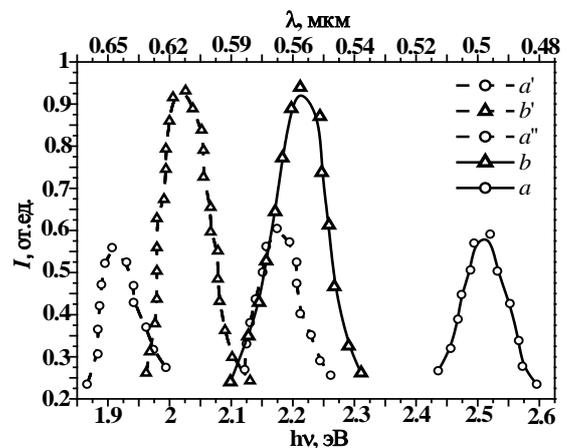


Рис.12. Собственная область спектров фотолюминесценции снятых на поверхности и при последовательном удалении поверхности эпитаксиальных слоев (a' , a'' , b'): $a - T_{\text{н.к.}} = 730$ °C, $b - T_{\text{н.к.}} = 630$ °C.

поверхности слоев, при температуре 300 К, осуществлялась ртутной лампой. При этом, на поверхности эпитаксиальных слоев при визуальном наблюдении обнаружено люминесцентное свечение с цветом от зеленого до синего в зависимости от типа образца. Сканированием поверхности пленок в различных направлениях, также можно было приближенно оценить визуальное состояние поверхности образцов по цвету и однородности свечения. На спектрах фотолюминесценции полученных непрерывной записью (рис. 12), обнаружено, что максимумы собственной полосы фотолюминесценции смещаются в коротковолновую область с увеличением температуры начала кристаллизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые выращены твердые растворы $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с квантовыми ямами Ge и точками ZnSe с помощью жидкостной эпитаксии и определены оптимальные условия технологии выращивания твердых растворов с заданными параметрами (зазор между горизонтально расположенными подложками 1 мм; - состав раствора-расплава GaAs–Ge–Sn; скорость принудительного охлаждения 1,5 град/мин.; температура начала кристаллизации – 730 и 630 °C).

2. Определены, что твердые растворы $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с квантовыми ямами Ge и точками ZnSe являются монокристаллическими с ориентацией (100) и параметрами решеток $a_{\text{т.р.}} = 0,5646$ нм и имеют сфалеритную структуру типа ZnS, соответствующей пр.гр. $F\bar{4}3m$.

3. Определены размеры субкристаллитов (блоков) выращенных эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ которые составили 49 нм. Парные атомы Ge_2 частично заменяют молекулы GaAs, также в дефектоспособных областях матричной решетки молекулы Ge_2 и ZnSe сформируют нанокристаллиты с размерами 44 и 60 нм, соответственно.

4. Установлено, что на поверхности пленки формируются наноконусы Ge с диаметром основания $30 \div 60$ нм и высотой $3 \div 12$ нм с помощью морфологического анализа выращенных эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$. Эти наноконусы Ge своими размерами, геометрической формой и плотностью (телесного угла) принадлежат к 2D-системе, т.е. являются квантовыми ямами.

5. Исследованы ВАХ $n\text{-GaAs} - p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктур на основе эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ полученных в различных технологических условиях ($T_{\text{н.к.}} = 730$ °C и $T_{\text{н.к.}} = 630$ °C). Показано, что в $n\text{-GaAs} - p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ структурах ($T_{\text{н.к.}} = 730$ °C) токопрохождение определяется туннельно-рекомбинационным механизмом, а в $n\text{-GaAs} - p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ структурах ($T_{\text{н.к.}} = 630$ °C) протекают токи ограниченные объемным зарядом;

6. Исследованы вольт-фарадных характеристик $n\text{-GaAs} - p\text{-}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктур. Обнаружено, что эпитаксиальные слои $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ полученные в различных технологических условиях ($T_{\text{н.к.}} = 730$ °C, $t = 150$

мин; $T_{н.к.} = 730$ °С, $t = 100$ мин; и $T_{н.к.} = 630$ °С, $t = 100$ мин) и $T_{н.к.} = 650$ °С) на гетерогранице имеют области толщиной 0,09, 0,135 и 0,148 мкм с более высокими удельными сопротивлениями.

7. Обнаружено что с увеличением температуры начала кристаллизации начинается кристаллизация ($T_{н.к.}$) твердых растворов $(GaAs)_{1-x}(Ge_2)_x$ с квантовыми ямами Ge и точками ZnSe, время жизни фотоносителей в которых растет от значения 10^{-7} с при $T_{н.к.}=630$ °С до $5 \cdot 10^{-5}$ с при $T_{н.к.}=730$ °С.

8. Оценены ширины запрещенной зоны по спектрам фотолюминесценции для двух указанных групп образцов, которые составили 2.51 и 2.21 эВ. Зависимость ширины запрещенной зоны от состава германия и селенида цинка на поверхности и в объеме эпитаксиального слоя имеет немонотонный характер. На основе полученных экспериментальных результатов рекомендовано возможности получения варизонных структур.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 FOR THE
AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE NAMANGAN INSTITUTE
OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

ANDIJAN STATE UNIVERSITY

ABDURAHIMOV DILHAYOTJON

**PREPARATION, STRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES OF
SEMICONDUCTOR GaAs-Ge SOLID SOLUTIONS WITH IMPURITY
NANOCOMBINATIONS**

01.04.10 - Physics of semiconductors

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Namangan – 2023

The theme of the doctoral dissertation (PhD) in physical and mathematical sciences is registered by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2023.1.PhD/FM894.

The dissertation was completed at the Andijan state university.

The abstract of the dissertation is available in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) on the website Of the scientific Council of the Namangan Institute of engineering and technology (www.nammti.uz) and on the Information and educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor:

Zainabidinov Sirojiddin Zainabidinovich
Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

Official opponents:

Onarqulov Karimberdi Egamberdiyevich
Doctor of physical and mathematical sciences, professor

Turgunov Nozimjon Abdumannopovich
doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences, professor

Leading organization:

Urgench state university

The defense of the dissertation will be held at 12 on "7" 12 2023 at the meeting of the Scientific Council No. PhD. 03/30.11.2022.FM/T.66.04 at the Namangan institute of Engineering and Technology (Address: 160100, Namangan city, Kasansay Str. 7, administrative building, small conference hall, tel. (+99869) 228-76-68, 225-10-07, a fax: (+99869) 228-76-75. e-mail: niei_info@edu.uz).

You can get acquainted with the dissertation work at the Information Resource Centre of Namangan institute of Engineering and Technology (registration number No. ____). Address: 160100, Namangan city, Kasansay Str 7, tel. (+99869) 228-76-68; Fax: (+99869) 228-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz

The abstract of the dissertation was sent on "24" 11 2023.
(Registry record No. 5 on "24" 11 2023).



U. Erkaboyev
Vice-chairman of Scientific Council
on awarding Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

B. Kuchkarov
Scientific Secretary of Scientific Council
on awarding of Scientific Degrees,
Doctor of Philosophy(PhD), Associate Professor

N.Sharibayev
Chairman of the Scientific Seminar at the
Scientific Council on award of Scientific Degrees,
Doctor of physical-mathematical science, professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The purpose of research work is to obtain new semiconductor $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ solid solutions with nanoobjects and study their morphological and structural properties, as well as the mechanisms of current-passage of charge carriers in such structures.

Research tasks:

growing $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ solid solutions with various nanoobjects using liquid-phase epitaxy;

determination of technological modes for obtaining $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ with specified formation of quantum nanoobjects and their densities, shapes and sizes;

study of the structural features of grown epitaxial layers $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$;

determination of the type of crystallographic structure and spatial group of the resulting films and nanoobjects in them;

study of current-voltage and capacitance-voltage characteristics of n-GaAs-p $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ structures;

study of the photoelectric properties of n-GaAs-p $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ structures, both in photodiode and photovoltaic modes.

The object of the research work is graded-gap solid solutions $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ with various nano-objects, as well as p–n heterostructures made on their basis.

The subject of the research work. Technologies for producing $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ solid solutions with nanoobjects, identifying the type of crystallographic structure and space group, determining the fundamental parameters of solid solutions and identifying patterns and mechanisms of current transfer, as well as photoelectric properties of n-GaAs-p $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ heterostructures.

The scientific novelty of the research work is below:

For the first time, $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ solid solutions were grown on GaAs substrates by liquid epitaxy from a tin solution-melt with forced cooling;

It was determined that solid solutions $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ with nanoobjects are single-crystalline with orientation (100) and lattice parameters $a_{s,s} = 0.5646$ nm and have a sphalerite structure of the ZnS type, corresponding to the space group;

It was established that coherently located Ge nanocones with lattice parameters $a_{\text{Ge}} = 5.67$ Å and dimensions of 44 nm in the (100) directions are formed on the film surface;

It has been shown that in n-GaAs-p $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ structures with Ge quantum wells, current flow is determined by the tunnel-recombination mechanism, and in n-GaAs-p $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ structures with quantum dots, the currents are ohmic and the dielectric reaction is limited by space charges;

It was found that regions with higher resistivities are formed at the heterointerface, the thickness of which varies depending on the growth conditions in the range of 0.09-0.15 μm;

It has been determined that the photosensitivity spectra of n-GaAs – p $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ heterostructures have an extreme long-wave region with a

photon energy of 1.1 eV and three components that correspond to As-Ge, Ge-Ge and Ga- compounds Ge.

Implementation of the research results.

The obtained results of the research: technological modes of growing the perfection of epitaxial layers $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$, also determining the lattice parameter, type of crystallographic structure and space group of films with nano-objects were used in the project of the Institute of Nuclear Physics No. F2-FA-F120 (2012- 2016) on the topic "Electronic properties and radiation modification of low-dimensional high-temperature superconductors, semiconductor hetero-structures, metals and their oxides". (Certificate of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2/1255-1463 dated July 10, 2023). The use of the results of scientific results has made it possible to increase the structural stability and resistance to external influences of heterostructures based on grown epitaxial layers.

The method for studying the current-voltage, capacitance-voltage characteristics and photoelectric properties of n-GaAs-p $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ heterostructures in both photodiode and photovoltaic modes were used at FOTON JSC in the production of semiconductor electronic devices (Reference No. 04-3/333 of the Joint Stock Company "Uzeltekhsanoat" dated March 4, 2023). The use of scientific results made it possible to manufacture electronic technical elements in experimental devices and improve their optoelectronic properties.

Approbation of research results. The main results of the dissertation were presented and discussed at 6 international and 4 republican scientific conferences.

Publication of research results. 19 scientific works have been published on the topic of the dissertation, including 7 articles published in scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertation works.

The structure and scope of the disertation. The dissertation consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion and a list of sources used. The volume of the dissertation is 101 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (1 часть; part 1)

1. Зайнабидинов С.З., Саидов А.С., Бобоев А.Й., **Абдурахимов Д.П.** Структура, морфология и фотоэлектрические свойства $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктуры. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана Сер. Естественные науки. - Москва, 2022. - № 1. - С. 72-87 (01.00.00 №12. Scopus: CiteScore: 1.4. Q3).

2. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., **Абдурахимов Д.П.** Механизм переноса тока в гетероструктурах $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$. // Узбекский физический журнал. - Тошкент, 2023. - №1. - С.40-45 (01.00.00 № 5).

3. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н., **Абдурахимов Д.П.** Формирование твердых растворов с нанобъектами методом жидкофазной эпитаксии. // Доклады Академии Наук. - Тошкент, 2018. - № 6. - С. 31-35 (01.00.00 № 7).

4. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., **Абдурахимов Д.П.** Высокора разрешающие рентгенодифракционные исследования пленок твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. Volume 3, Issue 5. 2021. P. 8-12. (01.00.00 № 16).

5. Мансуров Х.Ж., Усмонов Ж.Н., **Абдурахимов Д.П.**, Тураев А. Особенности технологии жидкофазной эпитаксии твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ из ограниченного объема раствора-расплава // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research. Vol. 4 Iss. 2 2022. P. 45-48. (01.00.00 № 13).

6. Бобоев А.Й., **Абдурахимов Д.П.** Оптоэлектрические свойства эпитаксиальных пленок $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // NamDU ilmiy axborotnomasi. 2022. № 11, 3-10-betlar

7. Бобоев А.Й., **Абдурахимов Д.П.** Особенности электрофизических свойств $p\text{-}n$ структур на основе непрерывного твердого раствора $n\text{Ge-p}(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$. // QarDU xabarлари. 2023. 1/1(57), 15-18-betlar

II bo'lim (2 часть; part 2)

8. С.З. Зайнабидинов, М.У. Каланов, А.Й. Бобоев, **Д.П. Абдурахимов.** Синтез и электрофизические свойства твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // АДУ илимий хабарнома. Андижон, 2015, №5, Стр. 14-18.

9. А.Й. Бобоев, **Д.П. Абдурахимов**, А. Тураев, А.М. Саматов. Поверхностные состояния эпитаксиальных слоев $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы» II международная конференция. Ташкент, 27-28 декабрь 2022. С. 62-64.

10. A.Y. Boboev, **D.P. Abduraximov**, M. Mamirov, M. Ismatullayeva, C. Mamadaliyev. Current transfer mechanism in heterostructures $n\text{Ge-p}(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$. // International scientific-practical conference on “Modern education: problems and solutions”. France, 2023. № 2 (5). P 18-20.
11. А.Й. Бобоев, **Д.П. Абдурахимов**. Морфологии и фотоэлектрические свойства твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$. // Международной научной конференции «Тенденции развития физики конденсированных сред». Фергана, 25-май 2021. С. 76-79.
12. A.Y. Boboev, **D.P. Abduraximov**, M. Mamirov, M. Ismatullayeva, C. Mamadaliyev. Структурные особенности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ с квантовыми точками ($0 \leq x \leq 0,17$; $0 \leq y \leq 0,14$). // «Principal issues of scientific research and modern education» USA. 2023, № 2 (6). P 169-172.
13. **Д.П. Абдурахимов**. Квант нуқтали $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ каттик коришмасини олиш. // “Яримўтказгичли микроэлектроника, нанотехнологиялар ва ноанъанавий энергия манбалари физикасининг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани материаллари тўплами. Андижон. 2021 г. Ст. 34-35.
14. Leiderman A.Yu. Boboev A.Y. **D.P. Abduraximov**. Temperature dependence of current-voltage characteristics $n\text{GaAs-p}(\text{GaAs})_{0,69}(\text{Ge}_2)_{0,17}(\text{ZnSe})_{0,14}$ heterostructures. // Микроэлектроника нанозарралар физикаси ва электроникаси. Республика илмий анжумани материаллари. Андижон. 4-5 декабрь 2015 й. 14-16 бб.
15. A.Y. Boboev, **D.P. Abduraximov**, M. Mamirov, M. Ismatullayeva, C. Mamadaliyev. Current-voltage characteristics features of heterostructures $n\text{Ge-p}(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$. // Turkey International scientific-online conference: “Theory and analytical aspects of recent research”. Istanbul, 9th april 2023, pp. 69-71.
16. А.Й. Бобоев, **D.P. Abduraximov**, С.Д. Тухтасинова, М. Мамиров, М. Исматуллаева, С. Мамадалиев. Структурные особенности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$. // “Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari” mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjumani. Namangan, 12-aprel 2023. 171-173 bb.
17. А.Й. Бобоев, **D.P. Abduraximov**, С.Д. Тухтасинова, М. Мамиров, М. Исматуллаева, С. Мамадалиев. Морфологические исследования эпитаксиальных пленок $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$. // “Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari” mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjumani. Namangan, 12-aprel 2023. 174-176 bb.
18. С.Зайнабидинов, Б.Аскарлов, **Д.П. Абдурахимов**. Синергетическое моделирование атомных перестроек твердого тела. // Иқтисодий тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини оширишга қаратилган автоматлаштириш ва энергетика муаммоларни ечишда илғор инновациялар ва таълимни ўрни. Халқаро илмий-амалий анжумани материаллар тўплами. Наманган, 2021, 7-10- бб.
19. **D.P. Abduraximov**, В. Ergashev, M. Mamirov, M. Ismatullayeva, C. Mamadaliyev. Suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida GaAs tagliklariga Ge kvant

o‘ralarini shakllantirish virtual lo‘baratoriyasi. // O‘zbekiston respublikasi adliya vazirligi № DGU 24570. O‘zbekiston Respublikasining Dasturiy mahsulotlar davlat reyestrda 02.05.2023 y. ro‘yxatdan o‘tkazilgan.

Avtoreferat Namangan shahar U.Nosir nashriyotida
tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi
tekshirildi (23.11.2023).

Bosishga ruxsat etildi 23.11.2023 y.
Bichimi 60X84 1/16, “Times New Roman”
Garniturada raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tobog‘i 3. Adadi: 100. Buyurtma: № 126

“FAZILAT ORGTEX SERVIS”
hususiy korxonasi bosmaxonasida chop etildi
Manzil: Namangan sh., Amir Temur ko‘chasi 97 uy.
Tel: (+998) 91-346-44-43, (+998) 99-608-69-44

