

**O'ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO'TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**O'ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO'TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI
ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI**

BOBOYEV AKRAMJON YO'LDASHBOYEVICH

**GaAs/Ge/ZnSe VA GaAs/Si/ZnSe KO'PTARKIBLI TUZILMALARIDA
NANOO'LCHAMLI OBYEKTЛАRNING SHAKLLANISH
JARAYONLARI**

01.04.10 - Yarimo'tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2024

Doktorlik (DSc) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Boboyev Akramjon Yo'ldashboyevich GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko'ptarkibli tuzilmalarida nanoo'lchamli obyektlarning shakllanish jarayonlari.....	3
Бобоев Акрамжон Йулдашбоевич Процессы формирования наноразмерных объектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe	25
Boboev Akramjon Yuldashboevich Formation Processes of Nanosized Objects in GaAs/Ge/ZnSe and GaAs/Si/ZnSe multicomponent structures.....	49
E'lon qilingan ilmiy ishlar ro'uxati Список опубликованных научных работ List of published research works	53

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI
ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI**

BOBOYEV AKRAMJON YO‘LDASHBOYEVICH

**GaAs/Ge/ZnSe VA GaAs/Si/ZnSe KO‘PTARKIBLI TUZILMALARIDA
NANOO‘LCHAMLI OBYEKT LARNING SHAKLLANISH
JARAYONLARI**

01.04.10 - Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2024

Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2024.2. DSc/FM190 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Doktorlik dissertatsiyasi O'zbekiston Milliy universiteti qoshidagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot institutida va Andijon davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezюме)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.ispm.uz) va «ZiyoNet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi	Zaynabidinov Sirojiddin Zaynabidinovich fizika-matematika fanlari doktori, akademik
Rasmiy opponenlar	Ruzikov Taxirdjon Mutalovich fizika-matematika fanlari doktori, professor
	Arzikulov Eshkuvat Ulashevich fizika-matematika fanlari doktori, professor
	Sharibayev Nosir Yusupjanovich fizika-matematika fanlari doktori, professor
Yetakchi tashkilot	O'zR FA Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc 03/30.12.2019.FM/T 01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2024-yil «11» 10 soat 10⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel. (99871) 248-79-94, faks: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, O'zMU huzuridagi YaFM ITI majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (64 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel. (99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.)

Dissertatsiya avtoreferati 2024-yil «21» 09 kuni tarqatildi.
(2024-yil «21» 09 dagi 64 raqamli reestr bayonnomasi)



Sh.B. Utamurodova
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi, f.-m.f. d., professor

J.J. Hamdamov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy kotibi, PhD, k.i.x.

N.A. Turgunov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, f.-m.f. d., dotsent

Kirish. Fan doktori (DSc) dissertatsiyasining annotatsiyasi

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda mikro va nanoelektronika mahsulotlariga bo‘lgan ehtiyoj va bu sohaning jadal sur‘atlarda rivojlanishi bugungi kun yetakchi olimlari va tadqiqotchilaridan ko‘p funksiyali, yuqori sezgir hamda tezkor elektron qurilmalar yaratishni talab qilmoqda. Bunday yuqori talablarni amalga oshirish uchun yangi yarimo‘tkazgichli materiallarni yaratish yoki amalda ishlab chiqarishda qo‘llanilayotgan elektron mahsulotlar xususiyatlarini boshqarish texnologiyalarini takomillashtirish zaruratini keltirib chiqarmoqda. Bugungi kunga qadar ushbu maqsadda foydalanilayotgan yarimo‘tkazgichlarning energiyaviy va tuzilmaviy xossalarini o‘zgartiruvchi legirlash usullari hamda zarur kirishma atomlarining tabiatda yetishmasligi turli xil cheklovlarga sabab bo‘lmoqda. Shu munosabat bilan, so‘nggi yillarda yarimo‘tkazgichli materiallar negizida nanoo‘lchamli nobirjinsliklar (kristallitlar) shakllanishiga hamda elektron mahsulotlarning noyob xususiyatlarini boshqarishga asoslangan yangi yondashuv rivojlanib bormoqda. Mazkur nanoo‘lchamli obyektlar, texnologik va tashqi ta’sirlar (harorat, bosim, radiatsiya va boshqa) ostida yarimo‘tkazgich tuzilmalarining belgilangan xususiyatlarini ta’minlaydigan, kristall sohalarida shakllanishi natijasida ularning holatini o‘zgartiruvchi kvant o‘lchamli ta’sirni namoyon etgani uchun ularni tadqiq etishga alohida e’tibor qaratilmoqda.

Jahonda ko‘plab ilmiy tadqiqot markazlarida turli nanoo‘lchamli obyektlarga ega bo‘lgan yarimo‘tkazgichli epitaksial plyonkalar o‘stirish hamda bunday noyob nanokristallar olish uchun mavjud texnologik shart-sharoitlarni optimallashtirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu yo‘nalishda, jumladan, yarimo‘tkazgichlar sirtining to‘lqinsimon shakli, kvant nuqtalari va o‘ralari ko‘ptarkibli tuzilmalarning sirtiy sohalarini hamda subkristallarining bo‘linish chegaralarida shakllanishi jarayonlarini, shuningdek, mazkur nanoobyektlarni yarimo‘tkazgichli materiallarning xususiyatlariga ta’sirlarini o‘rganish bo‘yicha olib borilayotgan tadqiqotlar ustuvor hisoblanmoqda. Shu bilan birga, bunday nanoobyektlarda tok tashuvchilarning harakati elektronlarning tebranma to‘lqin uzunligi bilan taqqoslanarli darajada bo‘lishi yuqori samarali va ko‘p funksiyali optoelektron mahsulotlar yaratish imkonini berib, bu kabi kvant o‘lchov effektlarini namoyon qiluvchi nanokristallitlar olish bo‘yicha o‘tkazilayotgan tadqiqotlar dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda so‘ngi yillarda xalq xo‘jaligining barcha sohalarida amalga oshirilayotgan jadal islohotlar doirasida, yuqori sifatli elektron materiallar va tuzilmalar olish texnologiyasini takomillashtirish yuzasidan ilmiy-tadqiqot ishlari sifatini jahon miqyosiga ko‘tarishga alohida e’tibor qaratilmoqda. 2022–2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan, «Elektrotexnika sohasida ilmiy tadqiqotlar va tajriba-konstruktorlik ishlarini rivojlantirish»¹ bo‘yicha vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, ko‘ptarkibli epitaksial plyonklar asosidagi tuzilmalarda nanoo‘lchamli

¹O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son “2022–2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni.

obyektlarning shakllanish jarayonlari va ularni yarimo'tkazgich materiallarining noyob xususiyatlariga ta'sirini o'rganish hamda bunday tuzilmalarni mikro va optoelektron mahsulotlar ishlab chiqarishga joriy etish muhim 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", 2019-yil 30-maydagi PQ-4348-sonli "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", 2018-yil 14-iyuldagi PQ-2772 raqamli "Ilmiy va ilmiy-texnikaviy faoliyat natijalarini tijoratlashtirish samaradorligini oshirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida" 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 qarorlarida hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Ushbu dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalar rivojlanishining III va IV: "Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligining rivojlanishi" va "Qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish usullarini ishlab chiqish, nanotexnologiya, fotonika va boshqa zamonaviy texnologiyalar asosida yangi texnologiyalar va qurilmalar ishlab chiqish" ustuvor yo'nalishlariga mos keladi.

Dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy-tadqiqotlar sharhi.

Ko'ptarkibli tuzilmalarda kvant-o'lchamli nanobyektlarni shakllantirish mexanizmlari va ularning yarimo'tkazgich materiallari hamda qurilma tuzilmalarining fizik-kimyoviy xususiyatlariga ta'siri jahonning ko'plab yetakchi ilmiy markazlari va oliy o'quv yurtlarida, jumladan, Elektron texnologiyalar instituti (Moskva, RF FA), Yarimo'tkazgichli texnologiyalar instituti (Germaniya), Kaliforniya universiteti (AQSh)da o'rganilmoqda. Bundan tashari, A.F. Ioffe nomidagi Fizika-texnika instituti (Sankt-Peterburg, RF FA), Texnologiya instituti (Massachusetts, AQSh), Qattiq jismlar fizikasi instituti (RF FA), Tokio texnologiya instituti (Yaponiya), Yarimo'tkazgichlar fizikasi instituti (Kiev, Ukraina) kabi bir qator oliy ta'lim muassasalari mazkur sohada yetakchi rol o'ynamoqda.

Bugungi kunda jahonning ko'plab ilmiy markazlarida yarimo'tkazgichli mikro va nanoelektronikaning jadal rivojlanishi tufayli kvant-o'lchamli geterotuzilmalar va ularga asoslangan qurilmalarni ishlab chiqish va yaratishda salmoqli natijalarga erishildi. Uzlüksiz texnologik taraqqiyot nanoo'lchamli tuzilmalarni (kvant nuqtalar va o'ralar) yaratish uchun yetarli zamonaviy usullarni ishlab chiqishni, shuningdek, elektron asbobsozlik usullarini takomillashtirishni talab qiladi. Bunday tuzilmalarni yaratishda esa katta o'lchamdagi materialning xususiyatlarini yupqa qatlamlarga o'tkazish muammosi paydo bo'lmoqda.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. V.G. Dubrovskiy² (Rossiya) va K.A. Dik³ (Shvetsiya) boshchiligidagi ilmiy guruhlar A^3V^5 birikmalarining yarimo‘tkazgichli kvant o‘lchamli nanokristallarini tadqiq etdilar va nanoobyektlarning morfologik xususiyatlari, tarkibi va kristall tuzilishini belgilovchi termodinamik va kinetik omillarni ko‘rib chiqdilar. Nanokristallarning “bug‘-suyuqlik-kristall” mexanizmi bilan o‘shining fizik asoslari, nanoobyektlarni sintez qilishning asosiy epitaksial texnologiyalari va ularning o‘shisi va tuzilishining nazariy modellarini ham ishlab chiqdilar. Ukrainalik olim I.E. Maronchuk⁴ va uning ilmiy guruhi tomonidan GaAs va GaP asosida Ge, InAs, GaInAs, GeSi, Yb kvant nuqtalariga ega bo‘lgan nanogeterotuzilmalari olindi va ko‘p qatlamli geterotuzilmalarni o‘stirish bo‘yicha eksperimental ma’lumotlar taqdim etildi.

J.I. Alferov⁵ va P.V. Bulayevlar⁶ (Rossiya) boshchiligidagi ilmiy guruh InGaAs/GaAs/InGaP va InGaAs/GaAs/AlGaAs qattiq qorishma tizimlarida o‘ziga xos lazer tuzilmalarini yaratdilar. Ushbu tuzilmalarda to‘lqin qabulqilgichlar sifatida GaAs asosidagi yupqa pardalardan foydalanilgan. Bunday materialdan yasalgan lazer tuzilmasi samaradorlikni tushirmasdan nurlatgichlardagi ichki optik yo‘qotishlarni kamaytirishga imkon bergan. Natijada olingan tuzilmalar asosida lazer diodlari uzluksiz generatsiyalanish sharoitida rekord nurlanish quvvatiga erishgan. Bing Li Gu⁷ va M. Funato⁸ (Yaponiya), shuningdek, H. Farrel va R. Laviolettelar⁹ (Ispaniya) A^2B^6 va A^3B^5 yarimo‘tkazgich materiallaridan foydalanishni o‘rganib, elementar yarimo‘tkazgichlar asosida $(C_2^4)_{1-x}(A^2B^6)_x$ va $(C_2^4)_{1-x}(A^3B^5)_x$ turdagi qattiq qorishmalarni o‘stirib, ularning imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytirish mumkinligini ko‘rsatdi. Yang Bing Yi¹⁰ (Xitoy) bunday qattiq qorishmalarni o‘stirishning asosiy imkoniyatlarini taklif qildi.

O‘zbek olimlari M.S. Saidov¹¹, R.A. Mo‘minov¹² va ularning ilmiy guruhlari tomonidan GaAs asosida foydali ish koeffitsiyenti 17% bo‘lgan quyosh elementlari yaratildi. Mazkur quyosh elementlari suyuq fazali epitaksiya usuli bilan olingan n^+ -GaAs- n -GaAs- p -GaAs- p -Al_xGa_{1-x}As turdagi geterotuzilmalar bo‘lib, ular asosida injeksion lazerlar va fotoo‘zgartirgichlarni yaratishda ham samarali natijalarga erishildi. Shuningdek, S.Z. Zaynabidinov¹³ va A.S. Saidov¹⁴ boshchiligidagi ilmiy guruhlar tomonidan kremniy, germaniy, galliy arsenidi va galliy fosfidi asosidagi

²Дубровский В.Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур. СПб: Университет ИТМО, 2019. 225 с.

³Kimberly A Dick, et al. 2010. *Semicond. Sci. Technol.* no 25. P. 024009.

⁴Марончук И.Е., и др. 2012. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies.* Том. 10(1). С. 77-88.

⁵Алфёров Ж.И. и др. 2004. *Физика и техника полупроводников.* Том 38(8). С. 937-948.

⁶Булаев П.В., и др. 2002. *Физика и техника полупроводников.* Том 36(9). С. 1144-1148.

⁷Bing-Lin Gu et al. *Phys. Rev. B.* 1992. Vol. 45(8). P. 4071.

⁸Funato M. “Title control of interface properties in ZnSe-GaAs heterovalent heterostructures grown by metalorganic vapor phase epitaxy” Dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2000. 157 p.

⁹Farrell H.H. and LaViolette R.A. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures.* 2004. Vol. 22(4). P. 2250–2256.

¹⁰Jiang Bing-Yi, et al. *Acta Phys. Sin.* 2012. Vol. 61(13). P. 1-6.

¹¹Сайдов М.С. *Избранные статьи.* Ташкент, 2010. 117 с.

¹²Заверюхина Е.Б., и др. 2005. *Писма в ЖТФ.* Том 31(1). С. 54-66.

¹³Зайнабидинов С.З., и др. 2016. *Физика и техника полупроводников.* Том 50(1). С. 60-66.

¹⁴Saidov A.S., et. al. 2015. *Semiconductors.* Vol 49(4). P. 547–550.

turli nanoo'lchamli obyektlarga ega bo'lgan qattiq qorishmalar o'stirildi hamda ularning bir qator elektrofizik xususiyatlari o'rganilib, turli ko'rsatkichli diod tuzilmalari tayyorlandi.

Shu bilan birga, bugungi kunga qadar GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko'ptarkibli tuzilmalarda nanoo'lchamli obyektlarning shakllanish jarayonlarini tavsiflash hamda ulardan olingan tuzilmalarning elektrofizik va optik xususiyatlariga ta'sirlarini tadqiq qilish muammolari yetarli darajada o'rganilmagan.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalarini bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqotlari Andijon davlat universitetining OTM-F2-002 "Tashqi (termik, optik va radiatsion) ta'sirlar tufayli rag'batlantirilgan polikristall, amorf va nanokristalli kremniy tuzilmalaridagi nomuvozanatli zaryad tashish jarayonlari" (2008–2012-yillar) va OTM-2-68 "Kristallarda kirishma-nuqson turidagi mikro va nanobirikmalar hosil bo'lish mexanizmlari va ularning keng funksional imkoniyatli ko'pqatlamli tuzilmalar yaratishdagi o'rni" (2017–2020-yillar) mavzusidagi loyihalar doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi. GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko'ptarkibli tuzilmalar o'stirishning maqbul texnologik sharoitlarini aniqlash, bunday tuzilmalarda nanoo'lchamli obyektlarning shakllanish jarayonlarini, shuningdek, ularning olingan tuzilmalar elektrofizik va optik xususiyatlariga ta'sirini tadqiq qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

tarkibida qalay yoki vismut bo'lgan aralashma-eritmadan $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ va $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ epitaksial plyonkalarini o'stirish texnologiyasining maqbul shart-sharoitlarini aniqlash;

suyuq fazali epitaksiya usulida o'stirilgan GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko'ptarkibli tuzilmalarda nanoo'lchamli obyektlarni shakllanish jarayonlarini tadqiq qilish;

o'stirilgan qattiq qorishmalarning tuzilmaviy mukammalligi hamda monokristallik darajasi, shuningdek, panjara doimiysi va fazoviy guruhini aniqlash;

GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko'ptarkibli tuzilmalarda shakllangan nobirjinsliklarining tarkibi, sirtiy zichligi, o'lchami va geometrik shakllarini aniqlash;

GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko'ptarkibli tuzilmalaridan tok o'tish mexanizmlarini tadqiq qilish;

ko'ptarkibli tuzilmalarning fotoelektrik xossalariga turli kirishma atomlari va nanoo'lchamli obyektlarning ta'sirini aniqlash.

Tadqiqotning obyekti sifatida suyuq fazali epitaksiya jarayonlari, GaAs va Si asosida ko'ptarkibli GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe tuzilmalar, shuningdek, $n\text{-Si-p}-(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ va $n\text{-GaAs-p}-(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ geterotuzilmalarning xarakteristiklari olingan.

Tadqiqotning predmetini tuzilmaviy xususiyatlarni, ko'ptarkibli GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe tuzilmalarda kvant-o'lchamli nanobyektlarni shakllantirish mexanizmlarini va ular asosidagi yupqa pardalarning elektrofizik va optik xususiyatlariga bunday nanokirishmalarning ta'sirini aniqlash.

Tadqiqotning usullari. Belgilangan vazifalar asosida turli nanokirishmali ko‘ptarkibli qattiq qorishmalar o‘stirish uchun suyuq fazali epitaksiya usulidan, tuzilmaviy tahlil uchun XRD-6100 rentgen difraktometri (Shimadzu)dan, sirt relyefini o‘rganish uchun atomiy kuchi mikroskopi (Solver Next)dan, yupqa pardalarning tarkibiy qismlarini aniqlash uchun rentgen mikroanalizator (“Jeol” JSM 5910 LV)dan, fotosezgirlikni o‘lchash uchun optik monoxromator (CARL ZEIS JENA)dan, shuningdek, namunalarning elektrofizik xususiyatlarini tekshirish uchun standart vositalar to‘plamidan foydalanildi. Olingan natijalarning grafikallari OriginPro2019 va Wolfram Mathematics 7 dasturlari yordamida tahlil qilindi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk marotaba tarkibida qalay yoki vismut bo‘lgan aralashma eritmadan turli nanokirishmali ko‘ptarkibli $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ va $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})$ qattiq qorishmalari o‘stirilgan;

ilk marotaba suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida o‘stirilgan nanoo‘lchamli tuzilmalar shakllanish jarayonlari va ularning o‘ziga xos jihatlari eksperimental tadqiqotlar asosida aniqlangan;

olingan $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ qattiq qorishmalar sfalerit tuzilishga ega bo‘lib, kristallografik orientatsiyasi (100) va panjara doimiysi $\sim 0,5663$ nm bo‘lgan monokristall ekani rentgenotuzilmaviy tadqiqot natijalari asosida aniqlangan;

$(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ qattiq qorishmalar subkristallitlarining bo‘linish chegaralari hamda sirtiy sohalarida Ge atomlari va ZnSe molekullari o‘z-o‘zidan mos ravishda 44 nm va 59 nm o‘lchamdagi nanoobyektlar (kvant o‘ralar hamda kvant nuqtalar)ni shakllantirishi tuzilmaviy hamda morfologik tadqiqot natijalari asosida aniqlangan;

tarkibida vismut bo‘lgan aralashma-eritmadan o‘stirilgan qattiq qorishmalarning tuzilmaviy barqarorligi $\sim 17\%$ ga ortishi va ularning sirtiy sohalarida $30\div 40$ nm o‘lchamdagi $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ konussimon nanoobyektlar (kvant o‘ralari)ning shakllanishi rentgenotuzilmaviy tadqiqot natijalarining qiyosiy tahlillari asosida aniqlangan;

$n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ tuzilmalarda Ge atomlari va $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ birikmalariga tegishli nanoobyektlarning mavjudligi tufayli ulardan tok o‘tishining to‘g‘ri yo‘nalishida zaryad tashuvchilarning dreyf mexanizmi namoyon bo‘lishi aniqlangan;

GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko‘ptarkibli tuzilmalarida Ge, Si, GaAs va ZnSe atomlari ishtirokida shakllangan turli xil nanoobyektlar selektiv fotosezgirlikni namoyon etishi tadqiqot namunalaridan o‘tayotgan fototokning nisbiy qiymatlari asosida aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida o‘stirilgan ko‘ptarkibli qattiq qorishmalarda yuqori sirtiy zichlikka ega bo‘lgan bir xil turdagi nanoobyektlarning shakllanishi aniqlangan;

GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe tuzilmalardan elektron va termoelektron qurilmalar tayyorlashda, shuningdek, nurlanish spektrining infraqizil hamda ko‘zga

ko‘rinuvchi nurlar sohasida ishlaydigan fotofaol materiallar sifatida foydalanish mumkinligi aniqlangan;

Si asosida olingan GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe tuzilmalaridan faol element sifatida foydalanish, tayyor yarimo‘tkazgichli asboblarni tannarxini tushirish imkonini berishi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy rentgen difraktometrlari, energodispersiyaviy rentgen va infraqizil spektrometrlari, tasdiqlangan texnologiyalar asosida olingan materiallar, yuqori aniqlikda va jahon amaliyotida qo‘llanilishi bilan tadqiqotchilar ishonchini qozongan elektr, yorug‘lik sezuvchi qurilmalardan foydalanishga, shuningdek, olingan natijalar adabiyotlarda mavjud bo‘lgan ma‘lumotlar bilan qiyoslashga; yaxshi sinovdan o‘tgan eksperimental va o‘zaro bog‘lanmagan kompleks usullardan foydalanish; natijalarning yaxshi takroriylikligiga; hodisalarda umumiy fizikaviy tasavvurlar bilan xulosalarning izchilligiga; ularni umumiy fizikaviy qonuniyatlar va vizual kuzatish bilan taqqoslashga asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko‘ptarkibli tuzilmalarida kvant-o‘lchamli nanoobyektlar shakllanish jarayonlarini, shuningdek, suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida o‘stirilgan epitaksial plyonkalarining elektrofizik hamda optik xususiyatlariga ushbu nanokristallarning ta’sirlarini o‘rganish mazkur sohaga tegishli bo‘lgan nazariy bilimlar va tushunchalarni kengaytirishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe tizimlari asosida tayyorlangan ko‘ptarkibli geterotuzilmalardan yorug‘likka sezgir, yuqori samarali va ko‘p funksiyali mahsulotlar sifatida optoelektron qurilmalarda foydalanish mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko‘ptarkibli tuzilmalar o‘stirishning maqbul texnologik sharoitlarini aniqlash, bunday tuzilmalarda nano-o‘lchamli obyektlarning shakllanish jarayonlarini, shuningdek, ulardan olingan tuzilmalar elektrofizik va optik xususiyatlariga ta’sirini tadqiq qilish asosida:

juftlashgan Ge₂ atomlari yuqori pardaning asosiy panjarasining nuqsonga moyil sohalarida ZnSe molekullari bilan qisman almashinishi va qolgan atomlar esa subkristallitlarning bo‘linish chegaralarida panjara doimiysi $a_{Ge} = 0.5659$ nm hamda o‘lchamlari 47 nm bo‘lgan germaniy nanokristallarni shakllantirishi, shuningdek, GaAs_{1-δ}Bi_δ birikmasi esa plyonkaning sirtiy sohalarida nanokirishmalarni, ya’ni 43 nm o‘lchamli kvant o‘ralarni shakllantirishi kabi tadqiqot mobaynida olingan ilmiy natijalardan 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 radiatsiyaviy takomillashtirish” (2012–2016) mavzusidagi loyihada foydalanilgan (O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasining 2024-yil 29-maydagi 2/1255-1177 raqamli ma‘lumotnomasi). Ilmiy tadqiqotlar natijalaridan foydalanish tayyorlanayotgan geterotuzilmalarning

yorug'lik va haroratga sezgir bo'lgan noyob xususiyatlarini yaxshilashga imkon bergan;

n -GaAs- p -(GaAs $_{1-\delta}$ Bi $_{\delta}$) $_{1-x-u}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_u$ geterotuzilma fotosezgirlik spektrida 1.61, 1.97 va 2.63 eV foton energiyalarida yuqori fotocho'qqilarni aniqlash usulidan, shuningdek, (Ge) $_{1-x-y}$ (GaAs) $_x$ (ZnSe) $_y$ qattiq qorishmalar mos molekulalarining ionlanish energiyasi turli qiymatlarga ega bo'lgan GaAs, Ge, ZnSe tashkilovchilari tufayli tanlanma fotosezgirlikka egaligidan «FOTON» AJda yarimo'tkazgichli elektron qurilmalar ishlab chiqarishda foydalanilgan ("Uzeltexsanoat" aksiyadorlik kompaniyasining 2024-yil 16-iyuldagi 04-3/1168 raqamli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish "Foton" AJda ishlab chiqarilayotgan elektron asboblarning funksional imkoniyatlarini kengaytirish imkonini bergan;

turli nanokirishmali ko'ptarkibli (ZnSe) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (GaAs $_{1-\delta}$ Bi $_{\delta}$) $_y$ va (Ge) $_{1-x-y}$ (GaAs) $_x$ (ZnSe) $_u$ qattiq qorishmalari vismut hosil qiluvchi aralashma eritmadan o'stirishning maqbul texnologik sharoitlari bo'yicha ilmiy-texnik tavsiyalaridan va nanoobyektlarning geometrik shakllari va o'lchamlari hamda ularning shakllanish mexanizmlarini aniqlash usullaridan Germaniya Milliy Fanlar Akademiyasi Fizika institutida "A&A Ausbildung und Arbeit Plus GmbH" ilmiy-texnika loyihasida foydalanilgan (Germaniya Milliy Fanlar Akademiyasi Fizika institutining 2022-yil 9-sentabrdagi 229-28207 raqamli ma'lumotnomasi). Tadqiqot natijalarining qo'llanilishi p - n tuzilmalarda kirishmaviy fotoelektrik effektning samaradorligini oshirishga imkon bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatyasi. Tadqiqot ishning asosiy natijalari 13 ta xalqaro va 4 ta respublika ilmiy-amaliy konferensiyalarida muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya materiallari asosida 42 ta ilmiy ish, shu jumladan 2 ta monografiya, dissertatsiyalarning asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun O'zbekiston Respublikasi Oliy Attestatsiya komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan nashrlarda 20 ta maqola e'lon qilingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, besh bob, xulosa, chop etilgan ilmiy ishlar ro'yxatidan iborat bo'lib, u 65 ta rasm, 9 ta jadval, 183 nomdagi foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatini o'z ichiga olgan holda 203 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya ishining maqsadi va vazifalari qisqacha shakllantirilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va eksperimental natijalari bayon etilgan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, tadqiqotning fan va texnikaning istiqbolli yo'nalishlari bilan bog'liqligi aniqlangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarining bajarilishi, ish natijalari hamda dissertatsiyaning tuzilishi to'g'risida ma'lumotlar berilgan.

Dissertatsiyaning "**GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe asosidagi ko'ptarkibli qattiq qorishmalar tadqiqotining zamonaviy holati**" nomli birinchi bobida yarimo'tkazgichli asboblarning fizikasi nazariyasining rivojlanishiga katta hissa

qo‘shuvchi GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko‘ptarkibli tuzilmalarda kvant-o‘lchamli nanoobyektlar shakllanishi bo‘yicha tadqiqotlarning nazariy va eksperimental natijalariga oid adabiyotlar tahlili keltirilgan. Turli nanokirishmalari bo‘lgan GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko‘ptarkibli tuzilmalaridagi elektrofizik va optik jarayonlari hamda ularning batafsil tahlillari asosida belgilangan xususiyatlarga ega ko‘p funksiyali optoelektron mahsulotlarni ishlab chiqarish texnologik me‘yorlarini optimallashtirish uchun katta ilmiy va amaliy qiziqish uyg‘otishi aniqlangan.

Dissertatsiyaning **“Yarimo‘tkazgichli qattiq qorishmalar o‘stirishning texnologik xususiyatlari”** nomli ikkinchi bobida GaAs/Ge/ZnSe tizimi asosidagi epitaksial qatlamini o‘stirish texnologiyalari va kinetikasi ko‘rib chiqilgan. Ge-Ge va Zn-Se molekullari kristall panjaradagi galliy arsenidi tugunlarini (Ga-As) intensiv almashinishi, bu holda esa qatlamdagi GaAs miqdori 60-70 at.%. dan oshmasligi aniqlangan. Epitaksial qatlam qalinligi ortishi bilan Ge va ZnSe ning molyar miqdori oshib, yupqa parda yuzasida 10-20 mol% gacha, germaniy esa 15-25 mol% gacha yetgan. Natijada qattiq qorishmaning (GaAs)_{1-x}(Ge₂)_x subqatlami hosil bo‘lgan. Qattiq qorishmaning sirtiy qatlami asosan GaAs ga xos kristall panjaraning qiymatlari bilan aniqlangan. Texnologik me‘yorlarning muayyan termodinamik sharoitida (GaAs)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y qattiq qorishmaning o‘tish bufer qatlami yordamida galliy arseniddan rux selenga bir tekis o‘tishga erishilgan. GaAs, Ge va ZnSe larning panjara doimiylarini hamda issiqlikdan kengayish koeffitsiyentlarini yaqin qiymatdaligi bunday o‘tish qatlami taglik-epitaksial yupqa pardaning o‘tish sohasida yuzaga keluvchi elastik kuchlanishlar paydo bo‘lishini oldini oladi.

GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe tuzilmalar majburiy sovitish yo‘li bilan qalayli hamda vismut hosil qiluvchi aralashma eritmadan suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida o‘stirildi. Vismut hosil qiluvchi aralashma eritmadan o‘stirilgan tuzilmalarning tuzilmaviy barqarorligi hamda noyob fizik xossalari yaxshilandi. Shuningdek, GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe tuzilmalar asosida namunalar ishlab chiqarish va olingan namunalarning ba‘zi fizik xususiyatlarini o‘rganish uchun zarur bo‘lgan yuqori aniqlikdagi texnologik hamda standart o‘lchov vositalaridan foydalanilgan.

Dissertatsiyaning **“Ko‘ptarkibli qattiq qorishmalarda kvant-o‘lchamli nanoobyektlarning shakllanish mexanizmlari”** nomli uchinchi bobida suyuq fazali epitaksiya jarayonida nanotuzilmaning shakllanish xususiyatlari va ularning nazariy hamda eksperimental natijalarning tahlili keltirilgan.

Kristall panjara doimiylari va suyuqlik (μ_s) hamda qattiq (μ_q) fazalarda kristallangan modda atomlarining kimyoviy potentsiallari orasidagi farq kristallanish jarayonini harakatlantiruvchi omil hisoblanadi. Binobarin, bloklarni ajralish chegaralarida hamda epitaksial qatlamlarning sirtlarida kichik elastik mexanik mikrobuzilishlar paydo bo‘lib, nanoobyektlarning shakllanishiga olib kelishi mumkin. Nanoobyektning bitta atomi uchun x koordinata bilan muvofiqlashgan $E(x)$ energiya orqali aniqlanadi. Bu yerda $0 \leq x \leq d/2$, d – nanoobyekt asosining diametri. Bunday holatda kimyoviy potentsiallar farqini:

$$\Delta\mu' = \mu_j - \mu_t - E(x) = \Delta\mu - E(x) \quad (1)$$

ifoda bilan aniqlash mumkin. $E > \Delta\mu$ bo'lganida, $\Delta\mu'$ manfiy qiymatga ega bo'lgani tufayli kristallanish jarayoni erish jarayoni bilan almashinadi. Bunday sharoitda nanoobyektda mexanik mikrobuzilishning maksimal qiymati kuzatiladi. Asosiy yarimo'tkazgichning $a_1 = a_{\text{GaAsGe}}$ va nanoobyekt materialining $a_2 = a_{\text{ZnSe}}$ panjara doimiylari haroratga bog'lanmagan holda, ushbu o'sish sharoitida kurtaklanayotgan nanoobyekt asos diametrining maksimal qiymati (d)¹⁵:

$$d = 2 \sqrt{\frac{\Delta\mu(a_1 + a_2)a_1a_2N_s}{G(a_1 - a_2)^2}} \quad (2)$$

ifodadan $E(d/2) = \Delta\mu$ ko'rinishidagi hol uchun aniqlash mumkin. Bu yerda N_s – kurtakning birlik sirtidagi atomlar soni, G – siljish moduli. Epitaksial qatlamlarning subkristallitlari (bloklari)ning geterochegarasida hosil bo'lgan kurtaklar sferik segmentlar hisoblanib, ularning egrilik radiusi kristallanishning bunday sharoitida suyuq fazada hosil bo'lgan gomogen kritik kurtak radiusiga to'g'ri keladi, kurtakning egrilik radiusi:

$$r = \frac{2\sigma M}{\rho RT \ln \frac{C}{C_0}} \quad (3)$$

formula bo'yicha hisoblanadi. Bu yerda σ – suyuq fazadagi fazalararo sirtiy energiya, ρ va M – mos ravishda kurtak moddasining zichligi va molyar massasi; R – universal gaz doimiysi; C, C_0 – mos ravishda o'ta to'yingan va muvozanat holatlari eritmalaridagi asosiy yarimo'tkazgich (GaAsGe) hamda nanoobyekt (ZnSe) atomlarining konsentratsiyalari. Bu holda nanoobyekt geterogen kurtagining balandligi h :

$$h = r \left[1 - \left(1 - \frac{d^2}{(2r)^2} \right) \right] \quad (4)$$

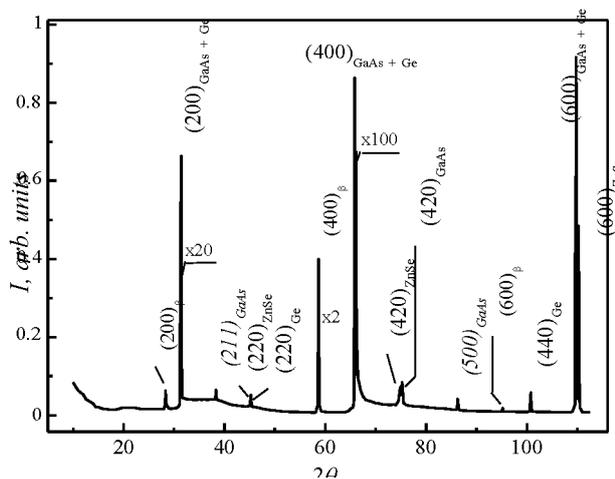
ifoda bilan aniqlanadi. Nanoobyekt kurtagining o'sishi jarayoida GaAsGe hajmiy qatlamining doimiy elastikligiga mos keladigan qiymatlarigacha, geterochegaraga tutashgan (ZnSe) nanoobyekti qatlamida mexanik kuchlanishlar ortadi. Nanoobyektdagi kuchlanishlar normal bo'ylab asosiy yarimo'tkazgich tekisligiga yo'nalgan gradiyentga ega bo'lgani tufayli $\Delta\mu' < 0$ bo'lganida nanoobyekt asosida uning yonbosh yuzasining egri chiziqli ustki qismi shakllanadi. Shunday qilib, mexanik kuchlanishli bufer qatlam hosil bo'lganda, asosiy yarimo'tkazgich sirti bo'ylab joylashgan sohalarda ko'p miqdordagi nanoobyektlar hosil bo'ladi.

1-rasmda turli intensivlikka ega bo'lgan tanlanma tuzilmaviy akslanishlar nomoyon bo'lgan $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial qatlamlarning rentgenogrammasi keltirilgan. Tahlillar yupqa parda sirti (100) kristallografik yo'nalishga ega bo'lgan monokristall ekanini ko'rsatdi. Kristallitlarining o'lchami asosiy (400) cho'qqining yarimkengligi bo'yicha baholanganda 52 nm ni tashkil etdi. Nelson-Reyli ekstrapolyatsion funksiyasi¹⁶

$$\xi = (1/2) \cdot [(\text{Cos}^2\theta/\theta + (\text{Cos}^2\theta/\text{Sin}\theta))] \quad (5)$$

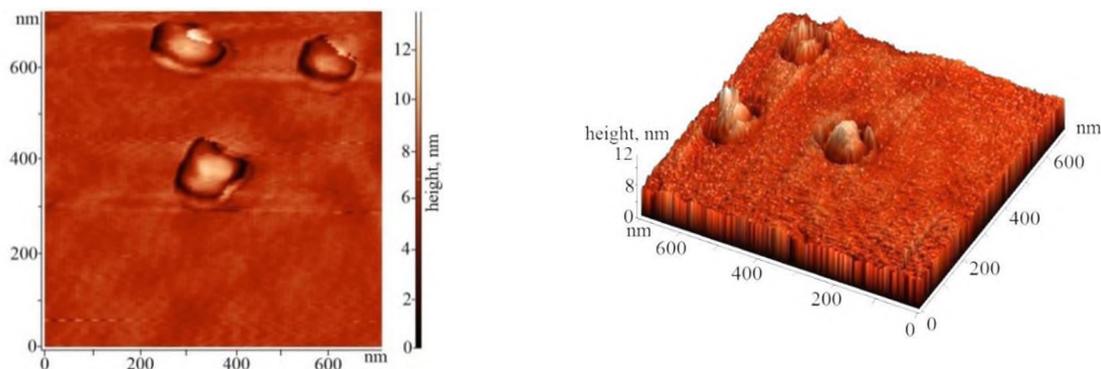
¹⁵Марончук И.Е., и др. 2005. Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 12. С. 97.

¹⁶Сетюков О.А., Самойлов А.И. 2011. Научные публикации сотрудников ВИАМ. Том 77(8). С. 4-12.



1-rasm. $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial plyonka rentgenogrammasi

Tahlillar ularga ($2\theta = 45.1^\circ$) $d/n = 0.2010$ nm boʻlgan (220) va ($2\theta = 74.95^\circ$) $d/n = 0.1230$ nm boʻlgan (420) da kuzatilgan rux selen nanokristallitlar tegishlilikini koʻrsatdi. Oʻsish yoʻnalishlari turli boʻlishiga qaramay, bizning baholashlarimiz bu nanokristallitlar deyarli bir xil oʻlchamda, yaʼni 59 nm tartibida ekanini koʻrsatdi. Bu fakt rux selen nanokristallitlar $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge})_x$ qattiq qorishma sirtida nanoorolchalar – kvant nuqtalar koʻrinishida oʻsganini anglatadi. Shunday qilib, qattiq qorishmalarning kristallanish jarayonida tashkillovchilarning turli kristall panjaraning doimiylariga ega boʻlishi yupqa parda sirtida deyarli bir xil oʻlchamdagi nanoorolchalar (kvant nuqtalari) olish imkonini berishi aniqlandi.

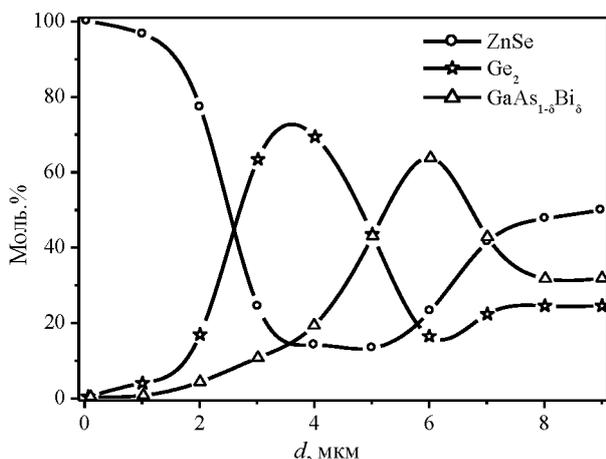


2-rasm. $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial plyonka sirtining ikki va uch oʻlchamli tasviri.

2-rasmda $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial yupqa parda sirtining ikki va uch oʻlchamli tasviri koʻrsatilgan. Yupqa pardalar sirtida turli oʻlchamdagi alohida nanotuzilmalar hosil boʻlganini koʻrish mumkin. Tahlillar nanotuzilmalar asosining diametri 60 nm dan 70 nm gacha, balandligi esa 10 nm dan 12 nm gacha oraliqda oʻzgarib turishini koʻrsatdi. Atomiy kuchi mikroskopi bilan aniqlangan yupqa parda sirtidagi ZnSe nanokonulari (kvant nuqtalari) oʻlchamlari rentgenodifraksiya usul bilan tekshirilgan epitaksial yupqa pardada nanokristallitlar oʻlchami yaqin qiymatlarga egaligi aniqlandi. Ushbu maʼlumotlarga, shuningdek, oʻrganilayotgan tuzilmalarning tarkibini tahlillari natijalariga asoslanib, asosining radiusi $R = 25 \div 35$ nm, balandligi $h = 3 \div 12$ nm hamda zichligi $3.7 \cdot 10^9 \text{ sm}^{-2}$ boʻlgan ZnSe kvant nuqtalari

tufayli epitaksial qatlamlar sirtida nanoorolchalar kuzatilishi mumkinligi haqida xulosalar qilindi.

Rentgen mikrozonodi yordamidagi tahlillar natijalari asosida epitaksial qatlam chuqurligi bo'yicha ZnSe Ge₂ va GaAs_{1-δ}Bi_δ larning taqsimlanishi aniqlandi (3-rasm). 3-rasmdan (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y qattiq qorishma qalinligi bo'ylab GaAs va ZnSe ning molyar ulushi dastlab mos ravishda 72,5% va 63,8% maksimal qiymatiga yetguncha tekis ortganini ko'rish mumkin, bu Ge₂ va GaAs_{1-δ}Bi_δ kristallanish frontida aralashma eritma yuqori to'yinishga egaligidan dalolat beradi. Bundan tashqari, Ge₂ va GaAs_{1-δ}Bi_δ ning molyar miqdori tekis kamayib, yupqa pardaning sirtga yaqin sohalarda 23% va 30% qiymatlarga erishadi.



3-rasm. (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y epitaksial qatlamida ZnSe, Ge₂ va GaAs_{1-δ}Bi_δ molekularining taqsimlanish profili. d=0 taglik va plyonka chegarasi.

Epitaksial qatlamning o'sishi chegaralangan hajmli aralashma eritmadan amalga oshirilgani va vismutda ZnSe qorishmasidan GaAs_{1-δ}Bi_δ qorishmasi 3 marta, Ge esa 2 marta kamligi uchun aralashma eritma qattiq fazasidagi Ge va GaAs_{1-δ}Bi_δ kiruvchanlik intensivligi kamayadi va bu o'sish yo'nalishida Ge va GaAs_{1-δ}Bi_δ molyar tarkibining yanada kamayib borishiga sabab bo'ladi. Yupqa parda sirtidan 1 mkm chuqurlikda Ge va GaAs_{1-δ}Bi_δ ning molyar miqdori o'z navbatida 23% hamda 30% dan oshmaydi. Shunday qilib, o'stirilgan plyonkalar

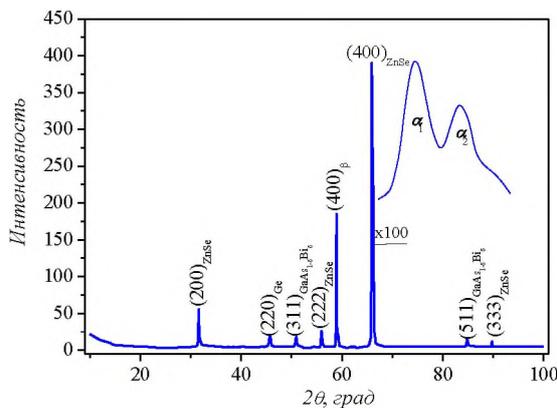
tashkillovchilarining tarkibi asta-sekin o'zgarib boradigan o'zaro o'rin almashinuvchi (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y (0 ≤ x ≤ 0,725 va 0 ≤ y ≤ 0,638) qattiq qorishmalarni hosil qildi. Taglik va yupqa pardaning sirtiy sohalari orasida Ge va GaAs_{1-δ}Bi_δ bilan boyitilgan tor sohali qatlam shakllanishi aniqlandi.

4-rasmda olingan (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y epitaksial qatlamining rentgenogrammasi keltirilgan. O'stirilgan yupqa parda yuzasi kristallografik yo'nalishga (100) mos kelishini ko'rish mumkin. Yupqa pardaning rentgenogrammasi (400)dan tuzilmaviy chiziqning intensivligi 11% ga kamaygan hamda kichikroq sohilish burchaklari tomon siljiganini (5-rasm), (200) tuzilmaviy akslanish intensivligi esa GaAs monokristallining xuddi shunday tuzilma chiziqlari intensivligiga nisbatan 2,8 marta kamayganini ko'rish mumkin. Kuzatilayotgan akslanishlar (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y qattiq qorishma kristall panjarasining o'zgarishini ko'rsatadi. Shu munosabat bilan epitaksial yupqa pardaning panjara doimiylari qiymatlarini ikki: (200) hamda (400) akslanishlardan (5) formula yordamida 0.5663 nm ga tengligi aniqlandi. Bu qiymat sink selenning a_{ZnSe}=0,5661 panjara doimiysining jadvaldagi qiymatiga juda ham yaqin, GaAs monokristallining tagligi panjara doimiysidan (a_s=0,5653) biroz katta. Bu esa asosiy materialning panjarasining qiymati (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y qattiq qorishma

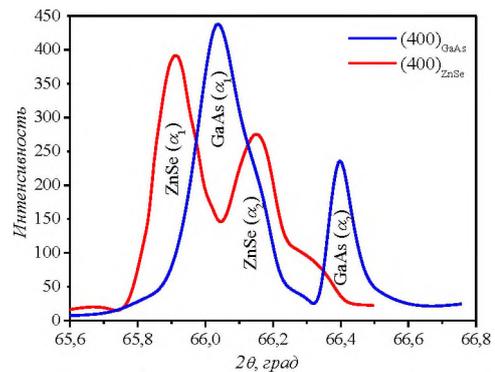
tashkillovchilarining boshqa kristall panjara qiymatiga yaqinlashayotganini ko'rsatadi, ya'ni asosiy qatlam ZnSe yarimo'tkazgichli birikmadan iboratligini tasdiqlaydi. Buning qo'shimcha tasdig'i sifatida $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ qattiq qorishma rentgenogrammasining noelastik fon sathi kichik va o'rta burchak (10° dan 60° gacha) sochilishlarida taglikning rentgenogrammasi fon sathidan 9% yuqoriligi xizmat qiladi. Bu yupqa parda panjarasida elastik energiya to'planishi ta'sirida mikrobuzilishlarning yuzaga kelishini ko'rsatadi. Kristall panjarada bunday mikrobuzilishning mavjudligi turli nanokirishmalar shakllanishi uchun sabab bo'lishi mumkin. (400) va (220) tuzilmaviy chiziqning yarimkengligi bo'yicha yupqa parda bloklar (kristallitlar) va Ge nanokristallitlarining o'lchamlarini quyidagi ifodadan¹⁷:

$$D = K\lambda/(\beta\cos\Theta), \quad (6)$$

aniqlandi. Bu yerda D – kristallitlarning o'lchami, nm larda, λ – nurlanish to'lqin uzunligi, bizning holda 0.154 nm ga teng, θ – sochilish burchagi ($2\theta_B$ difraksiya yarimburchagi), β – difraktogrammada chiziqning fizik kengligi (yarim maksimal intensivlikdagi refleks kengligi) radianlarda, $K \approx 0,94$ koeffitsiyent. Yuqoridagi formula bo'yicha D ning qiymatlari hisoblanganda, qattiq qorishma kristallitlarining o'lchami 60 nm ga, Ge_2 nanokristallitlarining o'lchami esa 47 nm ga tengligi aniqlandi. Ge nanokristallarining panjara doimiysi tajriba yo'li bilan (5) formula yordamida $a_{\text{Ge}} = 0.5659$ nm ga tengligi va bu uning jadval qiymatiga $a_{\text{Ge}} = 0,5657$ nm yaqin ekani aniqlandi.



4-rasm. $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial yupqa pardasining rentgenogrammasi



5-rasm. Taglik GaAs va $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial yupqa pardalarining (400) dif-raksion akslanish shakli.

Yupqa parda rentgenogrammasida $2\theta = 50,9^\circ$ va $2\theta = 84,8^\circ$ sochilish burchaklarida mos ravishda $d/n = 0,1791$ nm bo'lgan (311) va $d/n = 0.1143$ nm bo'lgan (511) tekisliklardan ikkita kuchsiz tuzilmaviy chiziqlar kuzatilgan. Tahlillar bu tuzilmaviy chiziqlarni $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ ko'rinishidagi birikmaga tegishlilikini ko'rsatdi. (311) va (511) reflekslar bo'yicha (5) formula yordamida $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ birikmasining panjara doimiysi eksperimental ravishda aniqlandi. Asosiy qatlam va $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ birikmasining panjara doimiylarining nomuvofiqligi quyidagi¹⁸:

¹⁷Иванов А.Н., и др. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. Москва: Металлургия, 1982. 632 с.

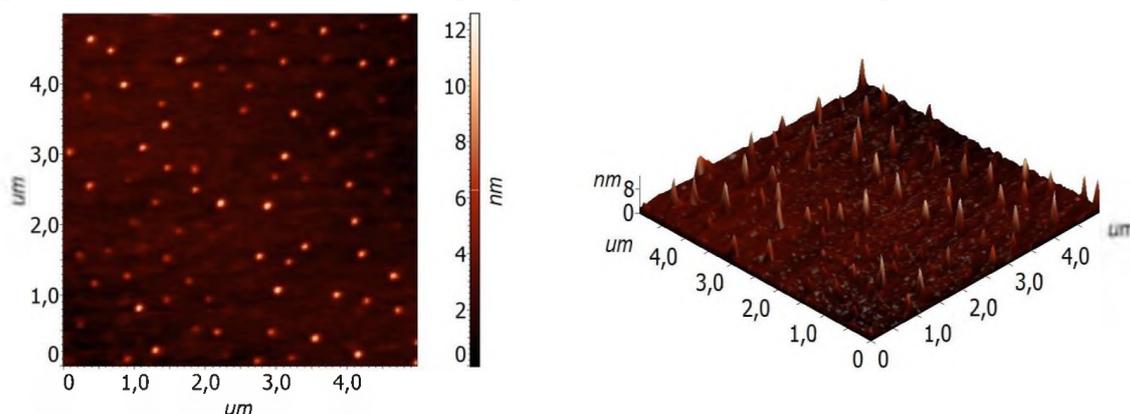
¹⁸Губа С.К., Юзевич В.Н. Физика и техника полупроводников. 2014. Том 48(7). С.932-937.

$$\xi = 2|a_{m.s} - a_{GaAsBi}| / (a_{m.s} + a_{GaAsBi}), \quad (7)$$

ifodadan aniqlandi va bizning hol uchun 0,048, ya'ni GaAsBi/ZnSe (100) tizimlari panjara nomuvofiqligi 4,8% ni tashkil etdi. Bu farq yupqa pardaning sirtga yaqin sohalarda nanoobyektlarning shakllanishiga olib kelishi ma'lum bo'ldi. Bundan tashqari, nanokirishma materiallari va asosiy qatlam atomlarining kovalent bog'lanish energiyasiga asoslanib, ularni "kvant nuqtalar" hamda "kvant o'ralar"ga quyidagicha bo'lish mumkin: nanokirishmalarning man etilgan soha ($E_{g,A}$) kengligi asosiy yarimo'tkazgich man etilgan soha ($E_{g,B}$) si kengligidan katta ($E_{g,A} > E_{g,B}$) bo'lsa, kvant nuqta va aksincha ($E_{g,A} < E_{g,B}$) bo'lsa, kvant o'ra shakllanadi¹⁹. Shuningdek, tashkillovchilarning kimyoviy tarkibiga qarab $GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta}$ birikmasining man etilgan sohasi kengligini quyidagi ifoda²⁰:

$$E_{GaAsBi} = (1-\delta)E_{g,GaAs} + (\delta)E_{g,GaBi} - \xi(\delta)(1-\delta) \quad (8)$$

yordamida aniqlandi. Bu yerda δ – $GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta}$ birikmasidagi rentgen mikrozonddli tahlil natijalari asosida aniqlangan $\delta = 0,125$ qiymatga ega bo'lgan Bi atomining ulushi. ξ ni (7) ifodadan aniqlangan, bizning hol uchun 0.18 ga teng bo'lgan GaAs va GaBi panjara doimiylarining nomuvofiqligi. Bizning hol uchun $GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta}$ birikmaning man etilgan soha kengligining qiymati 1.21 eV ga teng. Ushbu qiymat asosiy qatlam man etilgan sohasi kengligining eksperimental qiymatidan ($E_{q,q.} = 1,53$ eV) kichik va $GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta}$ birikma yupqa pardaning sirtiy sohalarida nanokirishmalarni, ya'ni kvantli o'ralarni shakllantiradi. Bu kvant o'ralarning o'lchamlarini (6) formula yordamida (311) va (511) tuzilmaviy akslanishlarning eksperimental kattaliklaridan aniqlanganda, 43 nm ni tashkil qildi.



6-rasm. $(ZnSe)_{1-x-y}(Ge_2)_x(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_y$ epitaksial pardasi sirtining ikki va uch o'lchamli tasviri

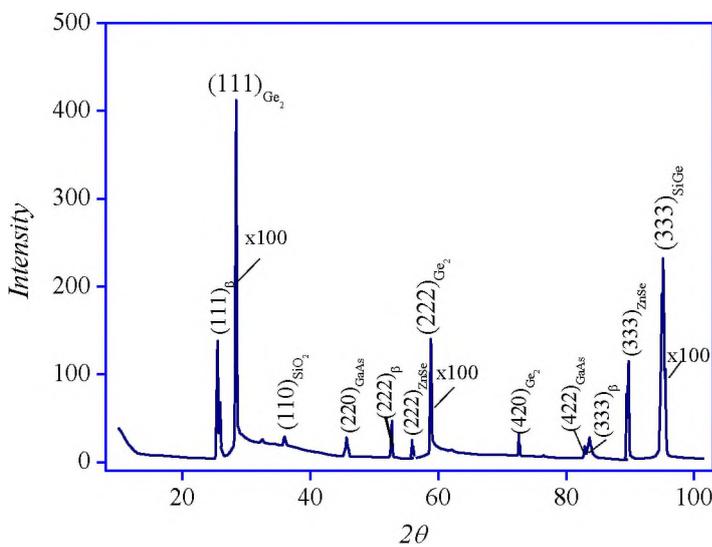
6-rasmda $(ZnSe)_{1-x-y}(Ge_2)_x(GaAs_{1-\delta}Bi_{\delta})_y$ epitaksial yupqa pardaning ikki va uch o'lchovli atomiy kuchi mikroskopi tasviri ko'rsatilgan. Undan yupqa pardalar sirtida turli o'lcham hamda shakldagi alohida nanoobyektlar hosil bo'lganini ko'rish mumkin.

Epitaksial qatlamlarning fizik xususiyatlari nanokonusning shakllari va zichligiga (tana burchagiga) uzviy bog'liq bo'lib, agar burchak 60° ga yaqin bo'lsa, u holda nanokonus kvant nuqta tizimidir - 0D; agar burchak 180° ga intilsa,

¹⁹Saidov A.S., et. al. 2017. Appl. Sol. Energy. Vol. 53. P. 287–290.

²⁰Комков О.С. Расчёт полупроводниковых гетеропереходов. Учеб. метод. пособие Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 52 с.

nanokonus kvant o'ra tizimiga aylanadi - 2D; va agar burchak 0° ga intilsa, unda nanokonus sim tizimiga aylanadi - 1D²¹. Bizning holatda, nanokonusning tana burchagi 180 ga intiladi, ya'ni ular kvant o'ralar ekanini tasdiqlaydi. Tahlillar nanokonuslar asosining diametri 40 dan 50 nm gacha va balandligi 3 dan 12 nm gacha o'zgarishini ko'rsatdi. Bunday ma'lumotlar, shuningdek, tadqiq etilayotgan namunalarning tuzilmaviy tahlil natijalari asosida, $(\text{ZnSe})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ qatlam sirtida nanokonuslar, ya'ni $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ nanokristallitlari shakllanadi degan xulosaga kelish mumkin.



7-rasm. $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial parda rentgenogrammasi

qattiq qorishma subkristallitlarining o'lchami 53 nm tengligi aniqlandi. Shunday qilib, olingan $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial qatlamlar (111) orientatsiyali va panjara doimiysi $a_{\text{q.q.}}=0,5658$ nm hamda Fd3m fazoviy guruhiga kiruvchi olmossimon tuzilishga ega bo'lgan monokristall ekani ko'rsatildi.

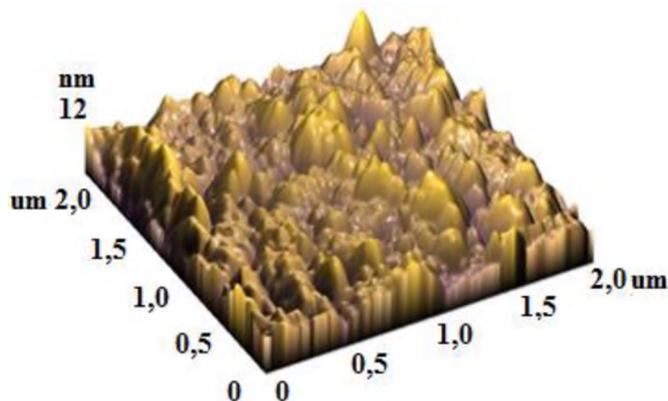
Bundan tashqari, yupqa pardaning rentgenogrammasida sezilarli intensivlikka ega bo'lgan yangi tuzilmaviy akslanishlar paydo bo'lgan. Tajriba natijalarining tahlili ($2\theta = 45,5^\circ$) $d/n = 0,1995$ nm va ($2\theta = 83,9^\circ$) $d/n = 0,1154$ nm bo'lgan (220) va (422) tekisliklaridan bunday tuzilmaviy chiziqlar GaAs nanokristalliga tegishlilikini ko'rsatadi. (6) formula yordamida (220) va (422) tuzilmaviy chiziqlarning eksperimental kattaliklaridan GaAs nanokristallarining o'lchamlari mos ravishda 51 nm hamda 47 nm ni tashkil etishi aniqlandi. $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ qattiq qorishmaning rentgenogrammasida yupqa pardaning asosiy qatlami (111) tekislik bilan izchil bog'langan ZnSe fazasiga tegishli nanokristallitlarning (222) va (333) turidagi kristallografik tekisliklarda yana ikkita tuzilmaviy akslanishi ham paydo bo'lgan.

8-rasmdan Si tagliklariga $T=750^\circ\text{C}$ boshlang'ich kristallanish haroratida o'stirilgan orolchalar va o'ralar bilan tekis qatlama ega bo'lgan yupqa parda sirtining tasvirini ko'rish mumkin. Lekin bunday qatlamlar noaniq sirtga va ko'plab nanoo'lchamdagi obyektlarga, ya'ni nanoorolchalarga ega. Kristall panjara doimiylarining ($a_{\text{Si}}=5,43 \text{ \AA}$) ($a_{\text{GaAs}} \approx a_{\text{Ge}} \approx a_{\text{ZnSe}}=5,65 \text{ \AA}$) nomuvofiqligi, ya'ni 4% ni

7-rasmda kremniy tagliklariga o'stirilgan $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ qattiq qorishmaning rentgenogrammasi ko'rsatilgan. Rentgenogrammaning (111) tuzilmaviy chizig'ining yuqori intensivlikdaligi ($2 \cdot 10^5 \text{ imp} \cdot \text{s}^{-1}$) va yarim kengligi ($\text{FWHM} = 2,620 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$), $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial qatlam kristall panjarasining yetarlicha yuqori darajada mukammalligidan dalolat beradi. (6) formuladan D ning qiymati hisoblanganda

²¹ Artur Medvid, et al. Nanoscale Research Letters. 2013, 8, pp. 264.

tashkil qilishi, shuningdek, issiqlikdan chiziqli kengayish koeffitsiyentlari, xona haroratida ($\alpha_{Si}=5.1 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$, $\alpha_{Ge}=6,1 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$, $\alpha_{GaAs}=5,9 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$ i $\alpha_{ZnSe}=7 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$) farqlari tufayli $(Ge_2)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y$ epitaksial qatlam sirtiy sohalarida nanoshakllanishlar yuzaga kelish mumkin.



8-rasm. $(Ge_2)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y$ qattiq qorishma sirtining atomiy kuchi mikroskopi tasviri.

Dissertatsiyaning
“GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko‘ptarkibli geterotuzilmalarda tok o‘tish mexanizmlari” nomli to‘rtinchi

bobi ko‘ptarkibli GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe geterotuzilmalarning elektrofizik xossalari bo‘yicha eksperimental natijalariga bag‘ishlangan. 9-rasmda n -GaAs- p - $(ZnSe)_{1-x-y}(Ge_2)_x(GaAs_{1-\delta}Bi_\delta)_y$ geterotuzilmalarning turli haroratlarda logarifmik masshtabda to‘g‘ri yo‘nalishdagi voltamper xarakteristikalari keltirilgan. Voltamper xarakteristikaning boshlang‘ich 0,1 dan 0,3 V gacha bo‘lgan qismida sakrash sohasi kuzatiladi: $J \sim V^\alpha$ ($\alpha \approx 2$) (9-rasm). O‘tkazilgan tahlillar ko‘rsatishicha, bunday bog‘lanish quyidagi²²:

$$V = M(J)B_0 \sqrt{\frac{J}{2}} \quad (9)$$

qonuniyatga bo‘ysunadi. Bu holda $M(J)$ quyidagi:

$$M(J) \approx 1 + 3m \left[2 + C(\alpha \tau_i / c_p) \sqrt{J} \right]^2, \quad (10)$$

formula orqali hisoblanadi. Bunda $m = 2\tau_i N_d V_p^* / 8b(b+1)n_p d$ va $C = [bn_p / qV_p^*(b+1)]$. Bu munosabatlarda V_p^* – injeksiyalanuvchi kontaktning nomukammallik tavsifiga bog‘liq bo‘lgan kattalik.

9-rasmda ko‘rsatilganidek, $V = 0,4$ V boshlab kuchlanishning navbatdagi ortishi bilan, daraja ko‘rsatgichi $\alpha \approx 8$ bo‘lgan $J = A \cdot V^\alpha$ tokning keskin ortishi kuzatildi. Bunday soha oldbuzilish deb nomlanadi va rekombinatsiya tezligi Shokli-Rid statistikasiga bo‘ysunmaydi hamda voltamper xarakteristika mos ravishda

$$J = \frac{q^2(b+1)^2 N_r d^3}{\varepsilon \tau_i^2 c_p (V_0 - V)} \quad (11)$$

bilan ifodalanadi. Bu yerda ε – dielektrik singdiruvchanlik va

$$V_0 = \sqrt{\frac{q(b+1)N_r d^4}{2\varepsilon \tau_i \mu_p}} = const. \quad (11) \text{ dan ko‘rinadiki, bu ifodaning maxraji kuchlanish}$$

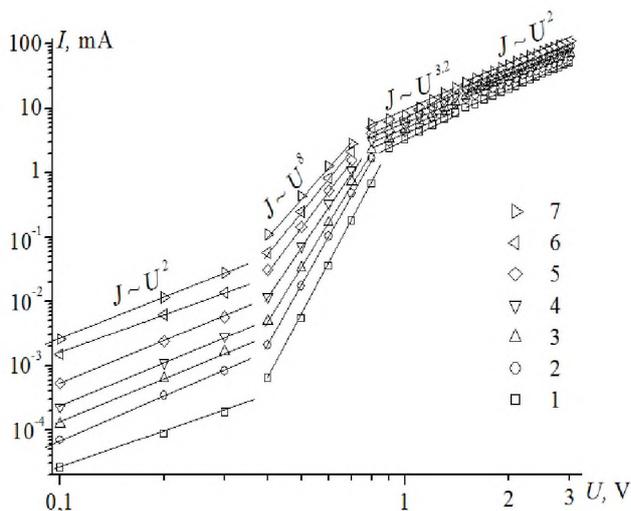
ortishi bilan kamayadi, ya’ni tok tez ortadi.

²²Саидов А.С. и др. 2020. Письма в ЖТФ. Том 46(22). С. 23-26.

Kuchlanishni 0.9 dan 1.5 V gacha davomli orttirilganda, voltamper xarakteristikaning $J = A \cdot V^{3.2}$ ifoda bilan tavsiflanuvchi soha kuzatildi (9-rasm) va nomuvozanat tok tashuvchilar rekombinatsiyasi asosan kechikish bilan, ya'ni komplekslar ishtirokidagi ichki elektron almashinuvi sodir bo'lganda amalga oshirilishi va voltamper xarakteristika quyidagi²³:

$$V = \frac{(d+1)d^2 N_r}{N_d \mu_p \tau_i} + \frac{d}{q \mu_p (b+1) C} \sqrt{J} - \frac{2(b+1) N_r d^2 c_p}{N_d \mu_p \alpha \tau_i C \sqrt{J}} = A + B \sqrt{J} - \frac{D}{\sqrt{J}} \quad (12)$$

analitik ifodaga ega bo'lishi kuzatildi. Bu yerda A , V va D chuqur kirishmalarning ionlashgan atomlarining konsentratsiyasiga bog'liq bo'lgan kattaliklar,



9-rasm. Turli haroratlarda n -GaAs- p -(GaAs $_{1-\delta}$ Bi $_{\delta}$) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ geterotuzilmasi voltamper xarakteristikasining logarifmik masshtabdagi to'g'ri yo'nalishi 1 – 30 °C, 2 – 50 °C, 3 – 70 °C, 4 – 90 °C, 5 – 110 °C, 6 – 130 °C, 7 – 150 °C.

N_r – rekombinatsiyaviy markazlar konsentratsiyasi, α – nuqson turiga bog'liq bo'lgan koeffitsiyent, τ_i – komplekslar ichidagi almashinuvi vaqti, N_d – sayoz donor kirishma markazlar konsentratsiyasi, μ_p – asosiy zaryad tashuvchilar harakatchanligi,

c_p – kovaklar tutgich koeffitsiyent, $b = \mu_n / \mu_p$ – elektron va teshiklarning harakatchanligining nisbati, d – qatlamlararo o'tish asosining qalinligi. A kattalikni aniqlash uchun $J \sim V^{3.2}$ bog'lanish to'g'ri yo'nalishidan ikkita V_1, J_1 va V_2, J_2 eksperimental nuqtalar tanlab olinadi. Hisoblash natijalari harorat ortishi bilan A kattalikning qiymati

deyarli o'zgarmasligini ko'rsatdi (1-jadval). Bu esa o'z navbatida (12) ifodaning birinchi hadi N_r / τ_i o'zgarmayotganligidan dalolat beradi. Bundan tashqari, tokning keskin ortishi sohasidan B va D kattaliklarini aniqlash uchun uchta: (V_1, J_1) , (V_2, J_2) , (V_3, J_3) eksperimental nuqtalar tanlab olindi. Hisoblash natijalari 1-jadvalda keltirilgan bo'lib, undan harorat ortishi bilan D kattalik ortishini, B kattalik esa kamayishini ko'rish mumkin. Bu n -(GaAs) taglik va p -(GaAs $_{1-\delta}$ Bi $_{\delta}$) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ yupqa parda bo'linish chegarasida kovaklar konsentratsiyasiga hamda kovaklarni tutgich koeffitsiyentiga c_p bog'liq holda "C" kattalik ortishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. (12) ifodaning tahlillari $J \sim V^\alpha$ turidagi voltamper xarakteristika qiyalik qiymatini, shu jumladan tokning keskin ortish sohasini tavsiflashga imkon berishini ko'rsatdi.

²³Адиринович Э.И., и др. Токи двойной инжекции в полупроводниках. М.: Сов. Радио, 1978. 320 с.

(12) ifodadagi A , B va D kattalikning turli haroratlarda eksperimental kattaliklaridan hisoblangan qiymatlari.

$t, ^\circ\text{S}$	30	50	70	90	110	130	150
$A \cdot \text{V}$	0,69	0,7	0,705	0,711	0,717	0,723	0,73
$D \cdot \text{V} \cdot \text{mA}^{-1/2}$	1,38	2,12	2,44	2,94	4,16	5,58	7
$B \cdot \text{V} \cdot \text{A}^{1/2}$	0,0174	0,0156	0,0146	0,0134	0,0131	0,013	0,0128

Tokning keskin ortish sohasidan keyin, ya'ni $J \sim V^\alpha$, bu yerda $\alpha = 2$ (9-rasm), u_r rekombinatsiya tezligi nisbatan yotiq bo'lgan ikkinchi kvadratik soha paydo bo'lib, bu holda voltamper xarakteristika²⁴:

$$V = \frac{(b+1)d^2 N_r}{2N_d \mu_p \tau_i} + \frac{d}{q \mu_p (b+1) C} \sqrt{J} \quad (13)$$

ifoda bilan tavsiflanadi. Ushbu soha uchun N_r/τ_i qiymatini baholash tokning keskin ortish sohasi bilan bir xil tarzda amalga oshiriladi. Berilgan ikkita tajriba nuqtasi uchun to'g'ri chiziq tenglamasi tuzilib, undan (13) ifodaning birinchi hadi qiymatiga mos keluvchi o'zgarmas:

$$\frac{A}{2} = \frac{(b+1)d^2 N_r}{2N_d \mu_p \tau_i} \quad (14)$$

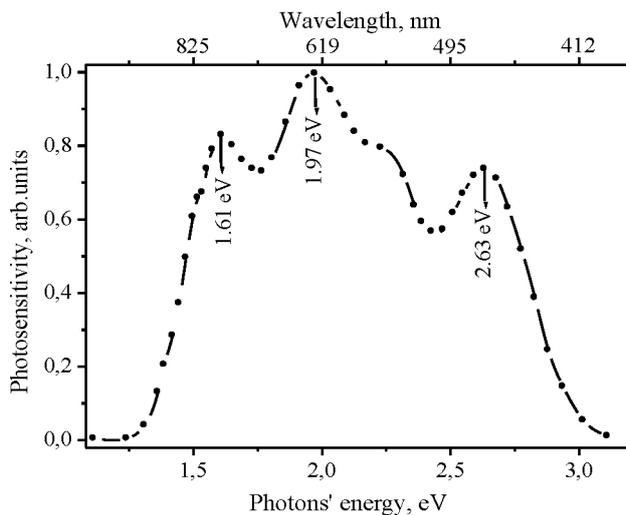
ekanligi aniqlanadi. (14) ifodadagi d , b va N_d larning ma'lum qiymatlarini o'rniga qo'yib, yarimo'tkazgichlar uchun muhim bo'lgan $N_r/\tau_i = 5,2 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ qiymatini aniqlandi.

Dissertatsiyaning **“Ko'ptarkibli geterotuzilmalarning fotoelektrik xossalariga nanokirishmlarning ta'siri”** nomli beshinchi bobida GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe asosidagi ko'ptarkibli geterotuzilmalarning fotoelektrik xossalarini tadqiq qilish bo'yicha eksperimental natijalar keltirilgan.

10-rasmida $n\text{-GaAs-}p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta\text{)}_y$ geterotuzilma fotosezgirlikligining spektral bog'lanishi keltirilgan. $n\text{-GaAs-}p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta\text{)}_y$ geterotuzilma fotosezgirlikligining spektral sohasi 1,2 dan 3,1 eV gacha katta oraliqni qamrab olganini ko'rish mumkin. Shuningdek, tadqiq etilayotgan $n\text{-GaAs-}p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta\text{)}$ geterotuzilmaning fotosezgirlik spektrida 1.61, 1.97 va 2.63 eV foton energiyali uchta maksimumli cho'qqi hamda 2.1÷2.3 eV da yelka aniqlangan. Bu esa o'z navbatida GaAs va Ge₂, GaAs va ZnSe, Ge₂ va ZnSe molekullari o'zaro o'rin almashinishlari hisobiga turli ko'rinishdagi holatlarda GaAs, Ge₂ va ZnSe lar qattiq qorishmani shakllantirayotganini ta'kidlaydi. GaAs ning man etilgan soha kengligi ($E_{g,\text{GaAs}}=1,42 \text{ eV}$) bo'lgani uchun hamda $(\text{ZnSe})_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta\text{)}_y$ qattiq qorishmasining tor sohali Ge₂ va GaAs_{1- δ} Bi _{δ} tashkillovchilari mavjudligi tufayli $n\text{-GaAs-}p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2\text{)}_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta\text{)}_y$ tuzilma sezgirlik uzun to'lqinlar tomon siljigan. Qatlamning yupqaligi, shuningdek, germaniy atomlari qattiq qorishmaning tetraedral kristall panjarasida GaAs va ZnSe molekullari tomonidan qurshab olinishi natijasida GaAs va ZnSe atomlari ta'sirida Ge-Ge kovalent bog'lanish mustahkamligi ortishi tufayli germaniy qatlamida

²⁴Мирсагатов Ш.А., и др. 2013. Физика твердого тела. Том. 55(8). С. 1524.

yutilish kuzatilmaydi. Bu holda Ge_2 li $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ yupqa qatlami 1,61 eV kvant energiyalarini sezuvchan choʻqqini beradi. Olingan geterotuzilmaning sezgirlikining maksimal choʻqqisi 1,97 eV foton energiyalarida kuzatildi. Maʼlumki, binar yarimoʻtkazgichli birikmalarning man etilgan sohalari ZnSe - $E_{g,\text{ZnSe}} > E_{g,\text{GaAs}}$ va $E_{g,\text{ZnSe}} > E_{g,\text{Ge}}$ koʻrinishga ega. Lekin ZnSe , GaAs birikma molekullari va juftlashgan Ge_2 atomlarining geometrik oʻlchamlari va zaryad holatlari yaqin boʻlgani uchun katta miqdordagi ZnSe molekullari boʻlgan $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ qattiq qorishmalarni shakllantirish imkonini beradi. Bu esa oʻz navbatida olingan koʻp tarkibli qattiq qorishmlarning man etilgan soha kengligining ortishiga olib keladi. $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ geterotuzilmalarning fotosezgirlik spektrida $E_{\text{ph}} = 2.63$ eV foton energiyasida sezgir choʻqqi yaqqol namoyon boʻldi. Bu esa $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ qattiq qorishmaning asosiy tashkillovchisi ZnSe molekullari taʼsiri ostida kuzatilayotganidan dalolat beradi.



10-rasm $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ geterotuzilmaning fotosezgirlik spektri

oʻrin almashinib joylashishi tufayli boʻladi, natijada sayoz donor sathli energetik soha hosil boʻladi²⁵. Ikkinchi gauss tashkillovchisining maksimumi (11-rasm, 2-chiziq) 1,53 eV da kuzatildi va bu choʻqqi $p\text{-GaAs}$ akseptor holatidan oʻtkazuvchanlik sohasiga rekombinatsiyalanishga mos keladi²⁶. Uchinchi gauss tashkillovchisining maksimumi (11-rasm, 3-chiziq) 1,64 eV da kuzatilgan va bu GaAs qatlamdagi Ge-Se birikmaning valent sohali izovalent kirishmasi tufayli boʻlishi mumkin²⁷.

Keyingi uchta tashkillovchilar (11-rasm, 4-, 5-, 6-chiziq) 1,48÷3 eV foton energiyalari oraligʻida kuzatildi va ularning maksimumlari mos ravishda 1.92, 2.28 va 2.69 eV foton energiyalariga mos keldi²⁸. Bizning tajribalarimizda 1.92, 2.3 va 2.63 eV foton energiyalarida uchta fotochoʻqqilar aniqlangan, GaSe va ZnAs birikmalari atomlari mavjudligi tufayli ikkinchi foton energiyasi oz miqdorda ogʻgan. Uchinchi foton energiyasining farqi esa Zn-Se anionli panjara ostida Bi

Energiya yutilish mexanizmlarini chuqurroq oʻrganish maqsadida Wolfram Mathematics 7 dasturi boʻyicha $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ geterotuzilma fotosezgirlik spektri gauss yaqinlashishi va gauss chiziqlarida joylashish natijalari bilan baholandi. 11-rasmda 1,2 eV foton energiyasi bilan boshlanuvchi birinchi gauss tashkillovchisining (11-rasm, 1-chiziq) spektri keltirilgan. Bu spektr gallyiy arsenida kovalent bogʻida arsenid tugunlariga vismut oʻzaro

²⁵Alfimova D.L., et. al. 2014. Inorganic Materials. Vol 50(2). P. 113-119.

²⁶Полушина И.К., и др. 1999. Физика и техника полупроводников. Том. 33(6). С. 697-700.

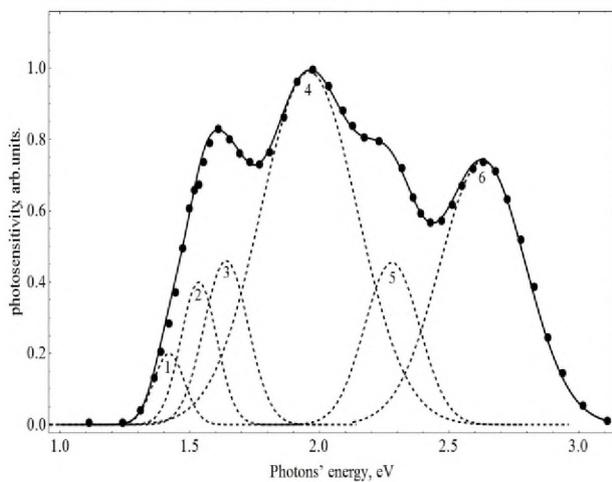
²⁷Блецкан Д.И., и др. 2006. Физика и техника полупроводников. Том 40(2). С. 142-147.

²⁸Супрун С.П., Шерстякова Н. 2009. Физика и техника полупроводников. Том. 43(11). С. 1570-1575.

atomlarini joylashishi va u 56 meV li ionlanish energiyasiga egaligi tufayli yuzaga kelishi mumkin. Bu $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ qattiq qorishmasining o'sish jarayoni vismut hosil qiluvchi aralashma eritmada majburiy sovutish orqali amalga oshirilishi, yupqa parda sirtida kam miqdordagi Bi atomlarini joylashib qolishi mumkinligidan dalolat beradi.

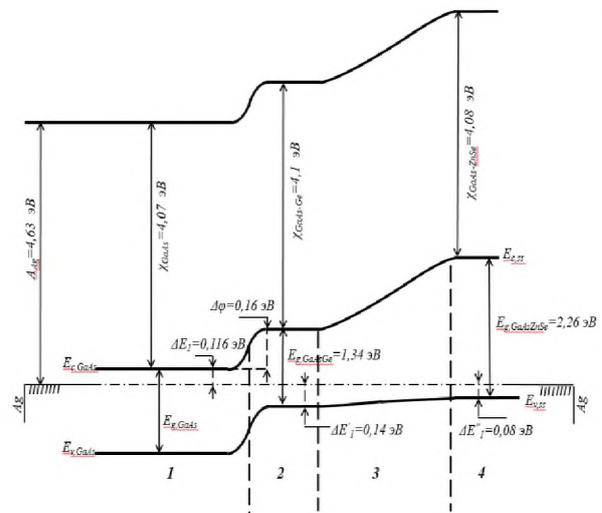
12-rasmda potensial to'siqlari notekis o'tuvchi qatlamli $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ geteroo'tishlarda o'rnatilgan geterotuzilmalar uchun sohalar modeli keltirilgan. Bunday geterotuzilmalarni yaratishda quyosh nurlanishining samarali konversiyasini ta'minlash uchun keng spektral sezgirlik va past ichki qarshilikka ega bo'lishi alohida asosiy vazifa hisoblanadi. Bunday vazifani yechish uchun asosiy material sifatida suyuq fazali epitaksiya usuli bilan olingan $(1\div 5)\cdot 10^{17}\text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyali $n\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ geterotuzilmalardan foydalanilgan.

Frontal p -sohaning past kichik qarshiligi asosan pastki qatlami bilan ta'minlanadi (12-rasm (3-soha)) va bu holda $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ geterotuzilmaning spektral fotosezgirliги ortadi. Agar bunday qatlamlar yetarlicha qalin bo'lsa, unda bunday tuzilmalar $(\text{ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ qattiq



11-rasm. Gauss yaqinlashuvidagi $n\text{-GaAs} - p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ geterotuzilma fotosezgirlik spektri. Nuqtalar – eksperimental natijalar; uzluksiz to'g'ri chiziq – gauss hisoblangan yig'indi spektri; punktir chiziq – gauss tashkillovchilarining hisoblangan spektri.

qorishmaning qalin qatlamida yutilishi tufayli, yorug'lik spektrining qisqa to'liqlariga sezgirliги past quyosh elementlari hisoblanadi. O'zgaruvchan tarkibli $(\text{ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ qattiq qorishmaning frontal qatlami nurlanuvchi sirt man etilgan sohasini ortib borishini ko'rish mumkin. E_g gradiyentining ta'sirlashish maydoni elektronlarning diffuzion ko'chishining effektiv yugurish yo'lini sezilarli darajada oshirishini va qisqa to'liqli yorug'lik bilan sirt yaqinida hosil bo'lgan elektron kovak juftlari uchun sirt rekombinatsiyasi rolini kamaytirishni ta'minlaydi.



12-rasm. Ag – $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ – Ag geterotuzilma energetik sohaviy diagrammasi (1 – taglik, 2 – o'tish qatlami, 3 – qattiq qorishma, 4 – sirt).

XULOSA

GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko'ptarkibli tuzilmalarida nanoo'lchamli obyektlarning shakllanish jarayonlarini o'rganish, shuningdek, ularning olingan tuzilmalar elektrofizik va optik xususiyatlariga ta'sirini aniqlash bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalar qilindi:

1. Ilk marotaba suyuq fazadan eptaksiyalanish usuli yordamida tarkibida qalay yoki vismut bo'lgan aralashma – eritmadan GaAs va Si tagliklariga ko'ptarkibli epitaksial plyonkalar o'stirishning eng maqbul shart-sharoitlari aniqlandi.

2. Ilk marotaba aralashma – eritma tabiati, kristallanish harorati va sovutish tezligi, shuningdek, muayyan texnologik sharoitlar hamda aniq tanlangan termodinamik va kinetik omillar asosida GaAs va Si tagliklarida turli xil nanoobyektlarga ega bo'lgan GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe geteroqatlamlari o'stirildi.

3. Suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida o'stirilgan qattiq qorishmalarda yuqori ($10^8 \div 10^{11} \text{ sm}^{-2}$) zichlikka ega bo'lgan va o'ziga xos o'tkazuvchanlikni namoyon qiluvchi bir xil turdagi nanoo'lchamli obyektlarining shakllanishi eksperimental tadqiqotlar asosida aniqlandi.

4. GaAs va Si tagliklariga o'stirilgan $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ va $(\text{Ge}_2)_{1-x-u}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ qattiq qorishmalari tagliklarning kristallografik oriyentatsiyasiga (100_{GaAs} va 111_{Si}) mos monokristallikni namoyon etuvchi, panjara doimiylari $a_{\text{q.q.}(\text{GaAs})} = 0,5663 \text{ nm}$ va $a_{\text{q.q.}(\text{Si})} = 0,566$ bo'lgan kub sfalerit tuzilishga ega ekanligi aniqlandi.

5. Tarkibida qalay bo'lgan aralashma-eritmadan GaAs tagliklarga o'stirilgan $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ qattiq qorishma subkristallitlarining bo'linish chegaralari hamda sirtiy sohalarida Ge atomlari va ZnSe molekularlari mos ravishda o'lchamlari 44 nm va 59 nm bo'lgan nanoobyektlar (kvant o'ralar hamda kvant nuqtalar)ni o'z-o'zidan shakllantirishi aniqlandi.

6. Tarkibida vismut bo'lgan aralashma-eritmadan GaAs va Si tagliklariga epitaksial qatlamlar o'stirish jarayonida kristall panjara buzilishlarini uzluksiz boshqarish asosida sirtiy sohalarida 30÷40 nm o'lchadagi $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ konussimon nanoobyektlari (kvant o'rlari)ning shakllanishi qattiq qorishmalar tuzilmaviy barqarorligining ~17% gacha ortishiga olib kelishi aniqlandi.

7. GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko'ptarkibli tuzilmalaridan tok o'tishi o'zida elektron uzatilishining dreyf mexanizmini namoyon qilishi zaryad tashuvchilarning nafaqat murakkab komplekslar, balki nanoo'lchamli obyektlar bilan o'zaro ta'sirlashuvi natijasida ekani aniqlandi.

8. GaAs/Ge/ZnSe va GaAs/Si/ZnSe ko'ptarkibli tuzilmalaridagi Ge, Si, GaAs, ZnSe tashkil etuvchilar ionlanish energiyalarining 0.48 eV dan 0.92 eV gacha qiymatlari bilan farq qiluvchi selektiv fotosezgirlikni namoyon etishi aniqlandi.

9. Olingan geterotuzilmalardan elektron va termoelektron qurilmalar tayyorlashda, shuningdek, yorug'lik spektrining infraqizil hamda ko'zga ko'rinuvchi nurlar sohasida ishlaydigan fotofaol materiallar sifatida foydalanish mumkinligi aniqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
УЗБЕКИСТАНА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ
НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА,
АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

БОБОЕВ АКРАМЖОН ЙУЛДАШБОЕВИЧ

**ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ
ОБЪЕКТОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТРУКТУРАХ
GaAs/Ge/ZnSe И GaAs/Si/ZnSe**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ (DSc)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент–2024

Тема диссертации доктора наук (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2024.2. DSc/FM190.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана и Алшижанском государственном университете.

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

Научный консультант: Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабидинович,
доктор физико-математических наук, академик

Официальные оппоненты: Разинов Тахирджон Муталович,
доктор физико-математических наук, профессор

Арикулов Елсуват Улашевич,
доктор физико-математических наук, профессор

Шарибаев Носир Юсулжанович,
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз

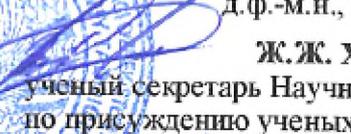
Защита диссертации состоится «11» 10 2024 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-76-94; Факс: (998 71) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz).

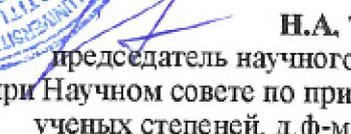
С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре института (зарегистрирована за № 64) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.

Автореферат диссертации размещен 24 09 2024 года.
(реестр протокола рассылки № 66 от 24 09 2024 г.).




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


Ж.Ж. Хамдамов,
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
PhD, с.н.с.


Н.А. Тургунов,
председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской диссертации (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Современные потребности в микро- и нанoeлектронных изделиях, а также стремительное развитие этой отрасли требуют от ведущих ученых и исследователей создания многофункциональных, высокочувствительных и быстрых электронных устройств. Для реализации таких высоких требований необходимо создать новые полупроводниковые материалы или усовершенствовать технологии управления характеристиками применяемых в производстве электронных продуктов. Используемые до настоящего времени методы легирования, изменяющие энергетические и структурные свойства применяемых в этих целях полупроводников, а также нехватка необходимых примесных атомов в природе обуславливают различные ограничения. В связи с этим в последние годы развивается новый подход, основанный на формировании наноразмерных неоднородностей (кристаллитов) в полупроводниковых материалах и управлении уникальными свойствами электронных устройств. Этим наноразмерным объектам уделяется особое внимание, поскольку они проявляют квантово-размерный эффект, изменяющий их состояние в результате формирования в кристаллических областях под воздействием технологических и внешних факторов (температура, давление, радиация и другие), обеспечивая заданные свойства полупроводниковых структур.

Во многих научно-исследовательских центрах мира ведутся научные исследования, направленные на выращивание полупроводниковых эпитаксиальных пленок с различными наноразмерными объектами и оптимизацию существующих технологических условий для получения таких уникальных нанокристаллов. В данном направлении приоритетными считаются исследования по изучению процессов формирования волнообразной поверхности полупроводников, квантовых точек и ям на поверхностных областях многокомпонентных структур, а также на границах раздела субкристаллов и их влияние на свойства полупроводниковых материалов. При этом движение носителей тока в таких нанобъектах, сопоставимое с длиной волны колебаний электронов, позволяет создавать высокоэффективные и многофункциональные оптоэлектронные устройства, что делает исследования по получению нанокристаллитов, проявляющих такие квантово-размерные эффекты, актуальной задачей.

В рамках стремительных реформ, проводимых в последние годы во всех сферах национальной экономики нашей республики, поднятие на мировой уровень качества научных исследовательских работ по совершенствованию технологии получения высококачественных электронных материалов и структур заслуживают особого внимания. В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы, в частности, определены задачи по «Развитию научных исследований и опытно-конструкторских работ в области электротехники»¹. Выполнение этих задач, в частности изучение процессов

¹ Указ Президента Республики Узбекистан «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы».

формирования наноразмерных объектов в структурах на основе многокомпонентных эпитаксиальных пленок и их влияния на уникальные свойства полупроводниковых материалов, а также внедрение таких структур в производство микро- и оптоэлектронной продукции, имеет большое значение.

Данная диссертационная работа в определенной степени служит решению задач, предусмотренных в Постановлениях Президента Республики Узбекистана № ПП-5032 от 19 марта 2021 года «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики», № ПП-4348 от 30 мая 2019 года «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала отрасли», № ПП-3855 от 14 июля 2018 года «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности», № ПП-3012 от 26 мая 2017 года «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энерго-эффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017–2021 годы», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данная диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан – III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения» и IV. «Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации. Исследование механизмов образования квантово-размерных нанообъектов в многокомпонентных структурах и их влияния на физико-химические свойства полупроводникового материала и приборных структур ведутся во многих ведущих научных центрах и вузах мира, в том числе в Институте электронных технологий (Московская область, АН РФ), Институте полупроводниковых технологий (Германия), Калифорнийском университете (США), Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург, АН РФ), Технологическом институте (Массачусетс, США), Институте физики твердого тела (АН РФ), Токийском технологическом институте (Япония), Институте физики полупроводников (Киев, Украина), и играют ведущую роль в этой области.

В настоящее время благодаря интенсивному развитию полупроводниковой микро- и наноэлектроники в научных центрах мира получены важные результаты по разработке и созданию квантово-размерных гетероструктур и приборов на их основе. Непрерывный технологический

прогресс требует разработки креативных современных методов создания наноразмерных структур, а также совершенствования существующих методов электронного приборостроения. При создании таких структур возникает проблема правомерности переноса свойств массивного материала на тонкие слои.

Степень изученности проблемы. Научными группами под руководством В.Г. Дубровского² (Россия) и К.А. Дик³ (Швеция) исследованы полупроводниковые квантово-размерные нанокристаллы соединений A^3B^5 и рассмотрены термодинамические и кинетические факторы, определяющие морфологические свойства, состав и кристаллическую структуру нанобъектов. Также были изложены физические основы выращивания нанокристаллов по механизму «пар–жидкость–кристалл», основные эпитаксиальные технологии синтеза нанобъектов и теоретические модели их роста и структуры. Украинским учёным И.Е. Марончук⁴ и его научной группой получены наногетероструктуры на основе GaAs и GaP с квантовыми точками Ge, InAs, GaInAs, GeSi, Yb и приведены экспериментальные данные по выращиванию многослойных гетероструктур.

Научной группой под руководством Ж.И. Алфёрова⁵ и П.В. Булаева⁶ (Россия) исследованы лазерные структуры со специфическими ограничениями в системах твердых растворов InGaAs/GaAs/InGaP и InGaAs/GaAs/AlGaAs. В качестве волновых сигналов в этих структурах использовались тонкие пленки на основе GaAs. Конструкция материала «сильного» лазера позволяет уменьшить внутренние оптические потери в излучателях, не уменьшая их эффективности. В результате лазерные диоды на основе полученных структур достигали рекордной мощности излучения в непрерывном режиме генерации. Бинг Ли Гу⁷ и М. Фунато⁸ (Япония), а также Х. Фаррел и Р. Лавиолет⁹ (Испания) изучили применение полупроводниковых материалов A^2B^6 и A^3B^5 и показали, что можно значительно расширить их возможности используя твердые растворы замещения с элементарными полупроводниками типа $(C_2^4)_{1-x}(A^2B^6)_x$ и $(C_2^4)_{1-x}(A^3B^5)_x$. Янг Бинг Йи¹⁰ (Китай) предложил принципиальные возможности выращивания таких твердых растворов.

Узбекскими учёными М.С. Саидовым¹¹, Р.А. Муминовым¹² и их научными группами созданы солнечные элементы на основе GaAs со значениями коэффициента полезного действия $\eta = 17\%$. Такими солнечными

²Дубровский В.Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур. СПб: Университет ИТМО, 2019. 225 с.

³Kimberly A Dick, et al. // *Semicond. Sci. Technol.*, 2010, No 25. P. 024009.

⁴Марончук И.Е. и др. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, том 10 (1), 2012. С. 77–88.

⁵Алфёров Ж.И. и др. // *Физика и техника полупроводников*, том 38 (8), 2004. С. 937–948.

⁶Булаев П.В. и др. // *Физика и техника полупроводников*, том 36 (9), 2002. С. 1144–1148.

⁷Bing-Lin Gu, et al. // *Phys. Rev. B*. 1992. Vol. 45(8). P. 4071.

⁸Funato M. Title Control of Interface Properties in ZnSe-GaAs HETEROVALENT Heterostructures Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy. Dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2000. 157 p.

⁹Farrell H.H. and LaViolette R.A. // *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2004, Vol. 22(4). P. 2250–2256.

¹⁰Jiang Bing-Yi, et al. // *Acta Phys. Sin.*, 2012, Vol. 61 (13). P. 1–6.

¹¹Саидов М.С. Избранные статьи. Ташкент, 2010. 117 с.

¹²Заверюхина Е.Б. и др. // *Письма в ЖТФ*, 2005, том 31 (1). С. 54–66.

элементами являются гетероструктуры типа n^+ -GaAs- n -GaAs- p -GaAs- p - $Al_xGa_{1-x}As$, изготавливаемые методом жидкофазной эпитаксии и эффективные и для создания инжекционных лазеров и фотопреобразователей. Также научной группой под руководством С.З. Зайнабидинова¹³ и А.С. Саидова¹⁴ были выращены различные многокомпонентные твёрдые растворы с различными нановключениями на основе кремния, германия, арсенида галлия и фосфида галлия, исследованы некоторые их электрофизические свойства и изготовлены диодные структуры на их основе.

В то же время до настоящего времени недостаточно изучены проблемы, связанные с описанием процессов формирования наноразмерных объектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, а также их влияние на электрофизические и оптические свойства полученных структур.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проектов научных исследований Андиганского государственного университета ОТМ-Ф2-002 «Неравновесные процессы переноса носителей заряда, стимулированные внешними (термическими, оптическими и радиационными) воздействиями в поликристаллических, аморфных и нанокристаллических кремниевых структурах» (2008–2012 гг.); ОТМ-Ф2-68 «Механизмы образования примесно-дефектных микро- и нанообъединений в кристаллах и их роль в создании многослойных структур с широкими функциональными возможностями» (2017–2020 гг.)

Целью исследования является определение оптимальных технологических условий выращивания многокомпонентных структур GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, исследование процессов формирования наноразмерных объектов в таких структурах, а также их влияние на электрофизические и оптические свойства полученных структур.

Задачи исследования:

определить оптимальные условия технологии выращивания эпитаксиальных пленок $(Ge_2)_{1-x-y}(GaAs)_x(ZnSe)_y$ и $(ZnSe)_{1-x-y}(Ge_2)_x(GaAs_{1-\delta}Bi_\delta)_y$ из олово- или висмутсодержащего раствора-расплава;

исследовать процессы образования наноразмерных объектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, выращенных методом жидкофазной эпитаксии;

выявить структурные совершенства и степень монокристалличности выращенных твердых растворов, а также постоянную их решеток и тип пространственной группы;

установить состав, поверхностную плотность, размеры и геометрические формы неоднородностей, сформированных в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe;

¹³Зайнабидинов С.З. и др. // Физика и техника полупроводников, 2016, том 50 (1). С. 60–66.

¹⁴Saidov A.S., et. al. // Semiconductors, 2015, Vol. 49(4). P. 547–550.

изучить механизм переноса тока в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe;

определить влияние различных примесных атомов и наноразмерных объектов на фотоэлектрические свойства многокомпонентных структур.

Объектом исследования являются процессы жидкофазной эпитаксии, многокомпонентные структуры GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe на основе GaAs и Si, а также характеристики гетероструктур типа $n\text{-Si-p}-(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и $n\text{-GaAs-p}-(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$.

Предметы исследования. Структурные особенности, механизмы формирования квантово-размерных нанобъектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe и влияние таких нановключений на электрофизические и оптические свойства тонких пленок на их основе.

Методы исследования. Исходя из поставленных задач, были использованы методы жидкофазной эпитаксии для выращивания многокомпонентных твёрдых растворов с различными нановключениями, рентгеновский дифрактометр XRD-6100 (Shimadzu) для структурного анализа, атомно-силовой микроскоп (Solver Next) для исследования рельефа поверхности, рентгеновский микроанализатор (“Jeol” JSM 5910 LV) для определения составляющих компонентов тонких пленок, оптический монохроматор (CARL ZEIS JENA) для измерения фоточувствительности, а также комплекты стандартных средств для измерения электрофизических свойств образцов. Для анализа графиков полученных результатов использовались программы OriginPro2019 и Wolfram Mathematics 7.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые выращены многокомпонентные твердые растворы $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ и $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ с различными нановключениями из олово- или висмутсодержащего раствора-расплава;

впервые на основе экспериментальных исследований определены процессы формирования и особенности наноразмерных структур, выращенных методом жидкофазной эпитаксии;

на основе результатов рентгеноструктурного исследования было установлено, что полученные твёрдые растворы $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ являются монокристаллами, имеющими структуру сфалерита с кристаллографической ориентацией (100) и параметрами решетки $\sim 0,5663$ нм;

на основе результатов структурных и морфологических исследований было установлено, что атомы Ge и ZnSe самопроизвольно образуют нанобъекты (квантовые ямы и квантовые точки) размерами соответственно 44 нм и 59 нм на границах раздела и в приповерхностных областях субкристаллитов твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$;

на основе сравнительного анализа результатов рентгеноструктурных исследований определено, что структурная стабильность твердых растворов, выращенных из висмутсодержащего раствора-расплава, увеличивается на $\sim 17\%$ и что на их приповерхностных областях формируются нанобъекты $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ в виде наноконусов (квантовые ямы) размером $30\div 40$ нм;

установлено, что в структурах $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ из-за наличия нанобъектов, относящихся к атомам Ge и соединениям $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$, при прямом прохождении тока проявляется механизм дрейфа носителей заряда;

селективная фоточувствительность различных наноструктур, образованных атомами Ge, Si, GaAs и ZnSe в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, была выявлена на основе относительных значений фототока, проходящего через исследуемые образцы.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

определено формирование однородных нанобъектов, обладающих высокой поверхностной плотностью в многокомпонентных твердых растворах, выращенных методом жидкофазной эпитаксии;

установлена возможность использования GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe структур при разработке электронных и термоэлектронных устройств, а также в качестве фотоактивных материалов, работающих в инфракрасном и видимом спектре излучения;

установлено, что использование структур GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe на основе Si в качестве активного элемента позволяет снизить себестоимость готовых полупроводниковых приборов.

Достоверность результатов исследования основана на использовании современных рентгеновских дифрактометров, энерго-дисперсионных рентгеновских и инфракрасных спектрометров, материалов, полученных на основе апробированных технологий, электрических, светочувствительных приборов, завоевавших доверие исследователей своей высокой точностью и применением в мировой практике, соответствием полученных данных с имеющимися в литературе сведениями, а также использованием хорошо апробированных экспериментальных и комплексных независимых методов; хорошей воспроизводимостью результатов; непротиворечивостью выводов с общими физическими представлениями подобных явлений; сопоставлением их с общезначимыми закономерностями и визуальным наблюдением.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования объясняется расширением теоретических знаний и представлений в данной области за счет изучения процессов формирования квантово-размерных наноструктур в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, а также воздействия этих нанокристаллов на электрофизические и оптические свойства эпитаксиальных пленок, выращенных методом жидкофазной эпитаксии.

Практическая значимость результатов исследования объясняется возможностью использования многокомпонентных гетероструктур, созданных на основе систем GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, в оптоэлектронных устройствах в качестве чувствительных к свету, высокоэффективных и многофункциональных продуктов.

Внедрение результатов исследования. На основе определения оптимальных технологических условий выращивания многокомпонентных структур GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, изучения процессов формирования наноразмерных объектов в таких структурах, а также их влияния на электрофизические и оптические свойства полученных структур:

полученные при исследовании выводы о том, что парные атомы Ge₂ частично заменяют молекулы ZnSe в дефектных областях матричной решетки пленки, а остальные атомы формируют нанокристаллы германия с параметрами решетки $a_{\text{Ge}} = 0.5659$ нм и размерами 47 нм на границах раздела субкристаллитов пленки, а также что соединение GaAs_{1- δ} Bi _{δ} самообразует нановключения, т.е. квантовые ямы размером 43 нм в приповерхностных областях тонких пленок, использованы при выполнении проекта № Ф2-ФА-Ф120 (2012-2016 гг.) по теме «Электронные свойства и радиационная модификация низкоразмерных высокотемпературных сверхпроводников, полупроводниковых гетероструктур, металлов и их оксидов» Института ядерной физики АН РУз (Справка Академии наук Республики Узбекистан за № 2/1255-1177 от 29 мая 2024 г.). Применение результатов этих исследований позволило улучшить уникальные свойства изготовленных гетероструктур, чувствительных к свету и температуре;

способ определения фотопиков с максимумами при энергиях фотонов 1.61, 1.97 и 2.63 эВ в спектре fotocувствительности гетероструктур $n\text{-GaAs} - p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, а также твердые растворы $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$, которые обладают избирательной fotocувствительностью, обусловленной компонентами GaAs, Ge₂, ZnSe с отличающимися значениями энергий ионизации соответствующих молекул, были использованы на АО «Фотон» при производстве полупроводниковых электронных устройств (Справка Акционерной компании «Узэлтехсаноат» № 04-3/1168 от 16 июля 2024 года). Использование научных результатов позволило увеличить функциональные возможности электронных изделий, выпускаемых АО «Фотон»;

предложенные научно-технические рекомендации по оптимальным технологическим режимам выращивания многокомпонентных твердых растворов $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_y$ и $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ с различными нановключениями из висмутсодержащего раствора-расплава и способ определения геометрических форм и размеров нанобъектов и выявление их механизмов формирования были использованы при выполнении научно-технического проекта «A&A Ausbildung und Arbeit Plus GmbH» в Институте физики Национальной академии наук Германии (Справка Института физики Национальной академии наук Германии № 29-28207 от 9 сентября 2022 г.). Применение результатов исследований позволило повысить эффективность примесного фотоэлектрического эффекта в $p\text{-}n$ -структурах.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 13 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. По материалам диссертации опубликовано 40 научных трудов, из них 2 монографии, 20 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка опубликованных работ, содержит 65 рисунков, 9 таблиц, список использованной литературы из 183 наименований и изложена на 203 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко сформулированы цель и задачи диссертационной работы, изложены научная новизна и экспериментальные результаты исследований, обоснована достоверность полученных результатов, определена связь актуальности исследований с перспективными направлениями науки и технологий, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов исследований, апробации результатов работы и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Современное состояние исследований многокомпонентных твердых растворов на основе GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe**» представлен анализ литературных данных, полученных теоретических и экспериментальных результатов исследования по формированию квантово-размерных нанобъектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, которые являются существенным вкладом в развитие теории физики многокомпонентных полупроводниковых приборов. Определено, что электрофизические и оптические процессы в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe с различными нановключениями и их подробный анализ представляет собой огромный научный и практический интерес для оптимизации технологических режимов получения многокомпонентных тонких слоев с заданными свойствами и определения особенностей их свойств, необходимых для изготовления многофункциональных оптоэлектронных изделий.

Во второй главе диссертации «**Технологические особенности выращивания полупроводниковых твердых растворов**» рассмотрены технологии и кинетики роста тонких слоев многокомпонентной системы GaAs/Ge/ZnSe методом жидкофазной эпитаксии. Установлено, что замещение арсенид-галлиевых узлов кристаллической решетки GaAs молекулами Ge₂ и ZnSe, а доля GaAs в этих пленках составляет меньше 60–70 ат.%. С ростом толщины эпитаксиального слоя молярное содержание ZnSe увеличивается, достигая на поверхности пленки 10–20 моль %, а германия 15–25 моль %. В результате образуется подслой твердого раствора (GaAs)_{1-x}(Ge₂)_x. Свойства поверхностного слоя твердого раствора в большей степени определяются параметрами кристаллической решетки GaAs. При определенных термодинамических условиях технологического режима можно добиться

плавного перехода от арсенид-галлиевого подслоя к селениду цинка с помощью переходного буферного слоя твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. Такой переходный слой, сглаживая параметры решетки и коэффициенты термического расширения GaAs, Ge₂ и ZnSe, предотвращает появление нежелательного упругого напряжения в переходной области подложка–эпитаксиальная пленка.

GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe структуры выращены с помощью жидкостной эпитаксии из олово- и висмутсодержащего раствора-расплава способом принудительного охлаждения. Улучшены структурная стабильность и уникальные физические свойства структур, выращенных из висмутсодержащего раствора-расплава. Также были использованы необходимые современные технологии и стандартные измерительные приборы для изготовления образцов структур GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe и исследованы их основные физические свойства.

В третьей главе диссертации «Механизмы формирования квантово-размерных нанобъектов в многокомпонентных твёрдых растворах» приведен анализ особенностей формирования наноструктур в многокомпонентных твердых растворах в процессе жидкофазной эпитаксии, теоретические и экспериментальные результаты анализов.

Разница постоянных кристаллических решеток и химических потенциалов атомов кристаллизующего вещества в жидких ($\mu_{\text{ж}}$) и твердых ($\mu_{\text{т}}$) фазах является движущей силой процесса кристаллизации. Следовательно, в приграничной области раздела блоков и на поверхностях эпитаксиальных слоев появляются незначительные упругие механические микроискажения, которые могут привести к формированию нанобъектов. Определена энергия $E(x)$, приходящаяся на один атом такого нанобъекта с координатой x , где $0 \leq x \leq d/2$, d – диаметр основания. Тогда разность химических потенциалов можно определить из выражения

$$\Delta\mu' = \mu_{\text{ж}} - \mu_{\text{т}} - E(x) = \Delta\mu - E(x). \quad (1)$$

При $E > \Delta\mu$ процесс кристаллизации сменяется на процесс растворения, так как $\Delta\mu'$ становится отрицательной величиной. При таком условии наблюдается максимальное значение механического микроискажения в нанобъекте. Параметры решетки базового полупроводника $a_1 = a_{\text{GaAsGe}}$ и материала нанобъекта $a_2 = a_{\text{ZnSe}}$ не зависят от температуры. Максимальное значение диаметра основания (d) зарождающегося нанобъекта при данных условиях выращивания может быть определено из выражения $E(d/2) = \Delta\mu$ в виде:¹⁵

$$d = 2 \sqrt{\frac{\Delta\mu(a_1 + a_2)a_1a_2N_s}{G(a_1 - a_2)^2}}, \quad (2)$$

где N_s – число атомов на единицу площади поверхности зародыша, G – модуль сдвига. Так как зародыши, образующиеся на гетерогранице субкристаллитов (блоков) эпитаксиальных слоев, представляют собой сферические сегменты, радиус кривизны которых соответствует радиусу гомогенного критического

¹⁵Марончук И.Е. и др. // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2005, № 12. С. 97.

зародыша, образованного в жидкой фазе при тех же условиях кристаллизации, то радиус кривизны зародыша вычисляется по формуле:

$$r = \frac{2\sigma M}{\rho R T \ln \frac{C}{C_0}}, \quad (3)$$

где σ – межфазная поверхностная энергия в жидкой фазе, ρ и M – соответственно плотность и молярная масса вещества зародыша; R – универсальная газовая постоянная; C , C_0 – концентрации атомов базового полупроводника (GaAsGe) и нанобъекта (ZnSe) соответственно в пересыщенном и равновесном растворах. Тогда высота h гетерогенного зародыша нанобъектов будет определяться выражением

$$h = r \left[1 - \left(1 - \frac{d^2}{(2r)^2} \right) \right]. \quad (4)$$

В процессе роста зародыша нанобъекта происходит увеличение механических напряжений в слое материала нанобъекта (ZnSe), прилегающего к гетерогранице, до значений, соответствующих упругим

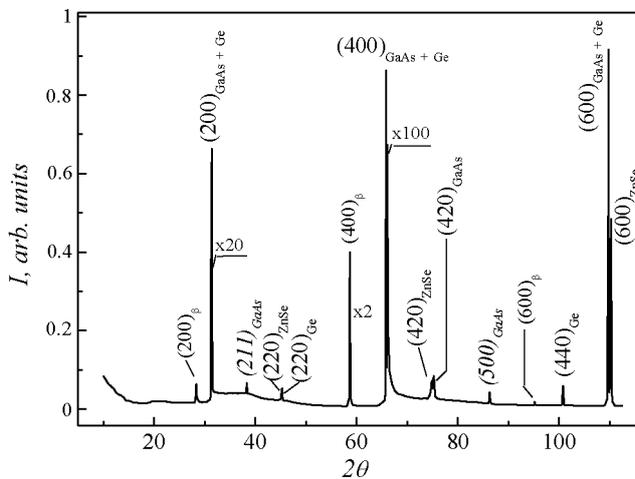


Рис. 1. Рентгенограмма эпитаксиальной пленки $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$

постоянным объемом слоя GaAsGe. Из-за того, что напряжения в нанобъекте имеют градиент, направленный по нормали к плоскости базового полупроводника, у основания нанобъекта при $\Delta\mu' < 0$ образуется криволинейный фронт травления боковой поверхности нанобъекта. Таким образом, при образовании напряженного буферного слоя происходит формирование идентичных нанобъектов

В приповерхностной области базового полупроводника.

На рис. 1 приведена рентгенограмма эпитаксиального слоя $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, где наблюдается несколько селективных структурных отражений с различной интенсивностью. Анализ показал, что поверхность пленки является монокристаллической с кристаллографической ориентацией (100). Размер нанокристаллитов в пленке, оцененный из полуширины основного пика (400), составляет около 52 нм. Параметр решетки пленки, определенный по трем отражениям – (200), (400) и (600) с помощью экстраполяционной функции Нельсона–Рейли¹⁶

$$\xi = (1/2) \cdot [(\cos^2\theta/\theta + (\cos^2\theta/\sin\theta))] \quad (5)$$

составляет $a = 0,5656$ нм. Структурный максимум (440) с $d/n = 0.1001$ нм принадлежит кристаллической решетке нанокристаллитов Ge_2 с размером ~44

¹⁶Сетюков О.А., Самойлов А.И. Научные публикации сотрудников ВИАМ, 2011, том 77 (8). С. 4–12.

нм. Значение параметра решетки нанокристаллитов Ge_2 , определенное из рентгенограммы, составило $a_{\text{Ge}} = 0.5662$ нм. Также на рентгенограмме пленки наблюдаются еще два структурных отражения с существенной интенсивностью. Анализ показал, что они вызваны нанокристаллитами селенида цинка (ZnSe); (220) с $d/n = 0.2010$ нм ($2\theta = 45.1^\circ$) и (420) с $d/n = 0.1230$ нм ($2\theta = 74.95^\circ$). Несмотря на различие в направлениях роста, наши оценки показали, что этим нанокристаллитам характерны почти одинаковые размеры, равные ~ 59 нм. Этот факт позволяет предположить, что нанокристаллиты селенида цинка растут на поверхности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge})_x$ в форме nanoостровков – квантовых точек. Таким образом, определено, что в процессе кристаллизации твердых растворов, состоящих из компонентов с различными параметрами кристаллической решетки, на поверхности пленки могут образовываться почти одинаковые по размеру nanoостровки (квантовые точки).

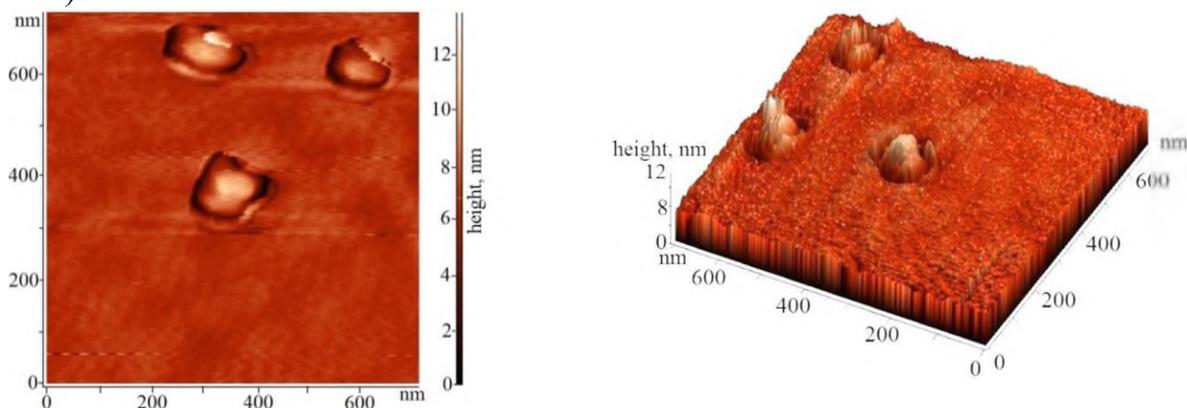


Рис. 2. Двух- и трехмерное изображение поверхности эпитаксиальной пленки $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$

На рис. 2 показаны двух- и трехмерные изображения поверхностей эпитаксиальной пленки $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. Видно, что на поверхности пленок образуются отдельные nanoостровки различного размера. Анализ показал, что диаметр основания nanoостровков варьирует в интервале 50–70 нм, а высота от 10 до 12 нм. Установлено, что размеры наноконусов ZnSe (квантовых точек) на поверхности пленок, определенные с помощью атомно-силового микроскопа, и размеры нанокристаллитов в эпитаксиальной пленке, исследованных рентгеновской дифракцией, имели близкие значения. На основе этих данных, а также результатов структурных анализов исследованных структур можно сделать вывод о том, что наблюдаемые nanoостровки на поверхности эпитаксиальных слоев обусловлены квантовыми точками ZnSe с радиусами основания $R = 25 \div 35$ нм, высотой $h = 3 \div 12$ нм и плотностью $3.7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$.

На основании результатов рентгеновского микрозондового анализа был определен профиль распределения молекул ZnSe , Ge_2 и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ в зависимости от глубины эпитаксиального слоя (рис. 3). Как видно из рис. 3, по толщине твердого раствора $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ молярное содержание Ge_2 и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ сначала плавно увеличивается, достигая максимального значения соответственно 72,5% и 63,8%, что свидетельствует

о высоком перенасыщении раствора-расплава на фронте кристаллизации Ge_2 и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$. Далее молярное содержание Ge_2 и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ медленно уменьшается, достигая значения 23% и 30% в приповерхностной области пленки. Поскольку рост эпитаксиального слоя осуществляется из ограниченного объема раствора-расплава и растворимость $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ в 3 раза, а Ge_2 в 2 раза меньше растворимости ZnSe в висмуте, то после интенсивного введения Ge и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ в твердую фазу раствор-расплава обедняется, что в дальнейшем вызывает постепенное уменьшение молярного содержания Ge_2 и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ в направлении роста.

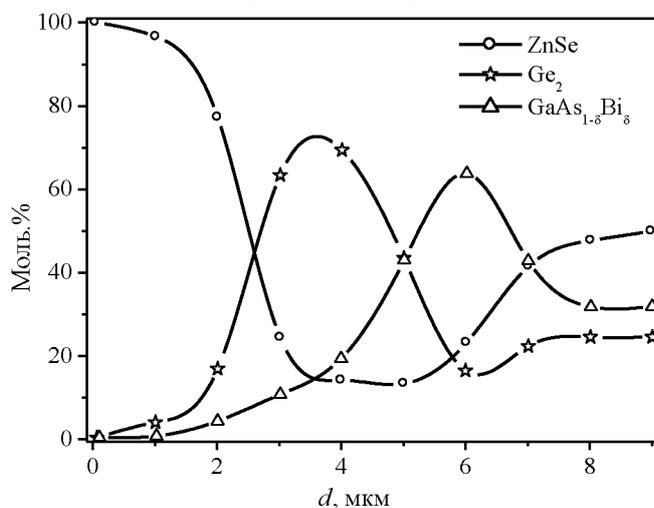


Рис. 3. Профиль распределения молекул ZnSe , Ge_2 и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ в эпитаксиальных пленках $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$, $d=0$ соответствует границе подложки и пленки

На глубине 1 мкм от поверхности пленки молярное содержание Ge_2 и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ не превышает соответственно 23% и 30%. Таким образом, выращенная пленка представляет собой твердый раствор замещения $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ ($0 \leq x \leq 0,725$ и $0 \leq y \leq 0,638$) с постепенно изменяющимся составом. Определено, что между подложкой и приповерхностной областью пленки образуется узкозонный слой, обогащенный Ge_2 и $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$.

На рис. 4 приведена рентгенограмма полученного нами эпитаксиального слоя $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$. Как видно, поверхность выращенной пленки соответствует кристаллографической ориентации (100). На рентгенограмме пленки видно, что интенсивность структурной линии (400) уменьшилась на 11 % и наблюдался ее сдвиг в сторону меньших углов рассеяния (рис. 5), а интенсивность отражения (200) при этом уменьшилась в 2.8 раза по сравнению с интенсивностью таких же структурных линий монокристалла GaAs . Наблюдаемые эффекты свидетельствуют об изменении кристаллической решетки твердого раствора $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$. В связи с этим нами были определены значения параметров решетки эпитаксиальной пленки по двум отражениям — (200) и (400) с помощью формулы (5), которые оказались равными 0,5663 нм. Это значение несколько больше, чем параметр решетки ($a_s=0,5653$ нм) монокристалла GaAs , и очень близко к табличному значению параметра решетки $a_{\text{ZnSe}}=0,5661$ селенида цинка. Это указывает на то, что решетка базового материала приближается к виду кристаллической решетки другой компоненты твердого раствора $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ т.е. подтверждается тот факт, что матричный слой состоит из полупроводникового соединения ZnSe .

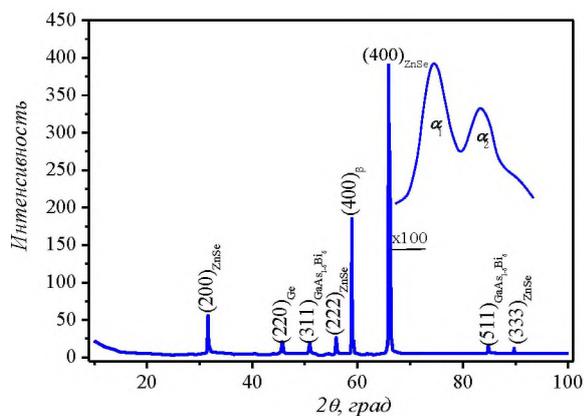


Рис. 4. Рентгенограмма эпитаксиальной пленки $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$

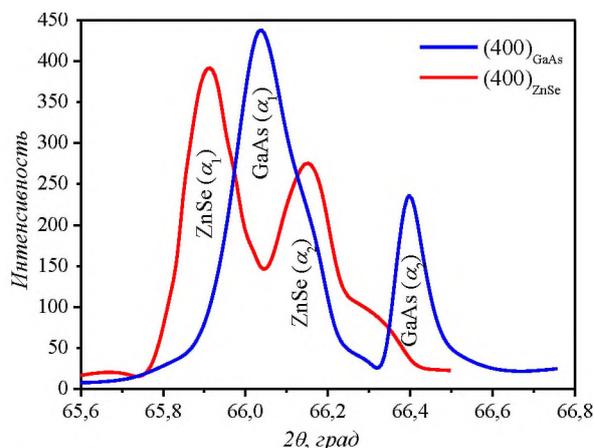


Рис. 5. Формы дифракционных отражений (400) подложки GaAs и эпитаксиальной пленки $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$

Дополнительным подтверждением этого служит уровень неупругого фона рентгенограммы твердого раствора $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$, который на 9% выше, чем уровень фона рентгенограммы подложки при малых и средних углах рассеяния (в пределах углов рассеяния от 10° до 60°). Это свидетельствует о возникновении микроискажений под влиянием накопления упругой энергии в решетке пленки. Существование таких микроискажений кристаллической решетки, возможно, является причиной образования различных нановключений. Из следующего выражения нами были определены размеры блоков (субкристаллитов) пленки и нанокристаллитов Ge_2 по полуширине структурных линии (400) и (220):¹⁷

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}, \quad (6)$$

где D – размер кристаллитов, нм, λ – длина волны излучения, в нашем случае 0.154 нм, θ – угол рассеяния (половина угла дифракции $2\theta_B$), β – физическое уширение линии на дифрактограмме (ширина рефлекса на половине максимума интенсивности) в радианах, коэффициент $K \approx 0,94$. Расчеты значений D по приведенной формуле показали, что размер субкристаллитов твердого раствора равен 60 нм, а размер нанокристаллитов Ge_2 47 нм. Экспериментально определен параметр решетки нанокристаллитов Ge_2 с помощью формулы (5), который составлял $a_{\text{Ge}} = 0.5659$ нм, что также близко к его табличному значению $a_{\text{Ge}} = 0,5657$ нм.

На рентгенограмме пленки ещё наблюдаются две слабые структурные линии от плоскости (311) с $d/n = 0,1791$ нм и (511) с $d/n = 0.1143$ нм при углах рассеяния соответственно $2\theta = 50,9^\circ$ и $2\theta = 84,8^\circ$. Анализ показал, что эти структурные линии принадлежат соединению типа $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$. Экспериментально определен параметр решетки соединения $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ по этим двум рефлексам (311) и (511) с помощью формулы (5), который составил

¹⁷Иванов А.Н. и др. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. 632 с.

0,5941 нм. Рассогласование постоянных решеток матричного слоя и соединений $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ определено из следующего выражения¹⁸:

$$\xi = 2|a_{m.c} - a_{\text{GaAsBi}}| / (a_{m.c} + a_{\text{GaAsBi}}). \quad (7)$$

В нашем случае оно равно 0.048, т.е. для системы $\text{GaAsBi}/\text{ZnSe}$ (100) с рассогласованием решеток 4,8 %, и эта разница приводит к формированию нанобъектов в приповерхностных областях пленки. Кроме того, исходя из энергии ковалентной связи атомов материалов нановключений и матричных слоев, можно разделить их на «квантовые точки» и «квантовые ямы» следующим образом: когда ширина запрещенной зоны нановключений ($E_{g,A}$) больше ширины запрещенной зоны базового полупроводника ($E_{g,B}$) - $E_{g,A} > E_{g,B}$, образуется квантовая точка, и наоборот когда $E_{g,A} < E_{g,B}$ - квантовая яма¹⁹. Также было определено значение ширины запрещенной зоны соединения $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ в зависимости от химического состава компоненты с помощью следующего выражения²⁰:

$$E_{\text{GaAsBi}} = (1-\delta)E_{g,\text{GaAs}} + (\delta)E_{g,\text{GaBi}} - \xi(\delta)(1-\delta). \quad (8)$$

Здесь δ - атомное содержание Bi в соединении $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$, которое определено на основе результатов рентгеновского микрозондового анализа, имеющего значение $\delta=0,125$; ξ - рассогласование постоянных решеток соединения GaAs и GaBi, определенное по выражению (7), которое в нашем случае равно 0.18. Значение ширины запрещенной зоны соединения $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ равно 1.21 эВ, что значительно меньше экспериментального значения ширины запрещенной зоны матричного слоя ($E_{m.c}=1,53$ эВ), и это способствует соединениям $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ самообразовывать нановключения, т.е. квантовые ямы в приповерхностных областях пленок. Размер этих квантовых ям, которые определены нами из экспериментальных данных структурных рефлексов (311) и (511) с помощью формулы (6), составлял 43 нм.

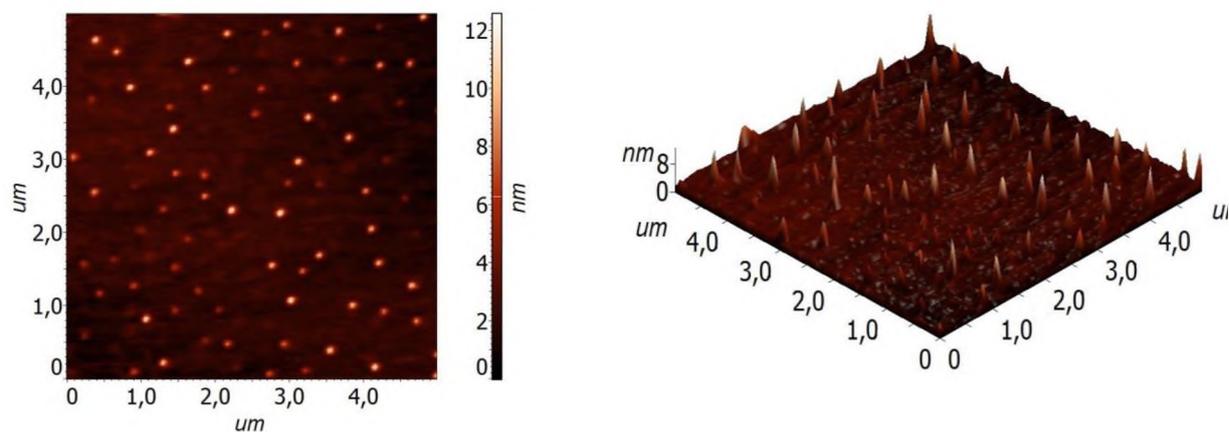


Рис. 6. Двух- и трехмерное изображение поверхности эпитаксиальной пленки $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$

На рис. 6 показано двух- и трехмерное атомно-силовое микроскопическое изображение эпитаксиальной пленки $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$. Видно, что

¹⁸Губа С.К., Юзевич В.Н. // Физика и техника полупроводников, 2014, том 48 (7). С. 932–937.

¹⁹Saidov A.S., et al. // Appl. Sol. Energy, 2017, Vol. 53, P. 287–290.

²⁰Комков О.С. Расчёт полупроводниковых гетеропереходов. Учеб.-метод. пособие. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 52 с.

на поверхности пленок образуются отдельные нанобъекты различных размеров и форм.

Физические свойства эпитаксиальных слоев сильно зависят от форм и плотностей (телесного угла) нанобъекты в виде наноконуса: если угол составляет около 60° , то наноконус – система квантовых точек 0D; если угол стремится к 180° , тогда наноконус вырождается в квантовую яму – 2D система; а если угол стремится к 0° , наноконус вырождается в систему проволок – 1D²¹. В нашем случае телесный угол наноконуса стремится к 180° , т.е. они представляют собой квантовыми ямами. Анализ показал, что диаметр основания наноконусов варьирует в интервале 40–50 нм, а высота 3–12 нм. На основе этих данных, а также результатов структурных анализов исследованных структур можно сделать вывод о том, что наблюдаемые наноконусы на поверхности слоев $(\text{ZnSe})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ обусловлены нанокристаллитами $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$.

На рис. 7 показана рентгенограмма полученного нами твердого раствора $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$, выращенного на кремниевых подложках. Высокая

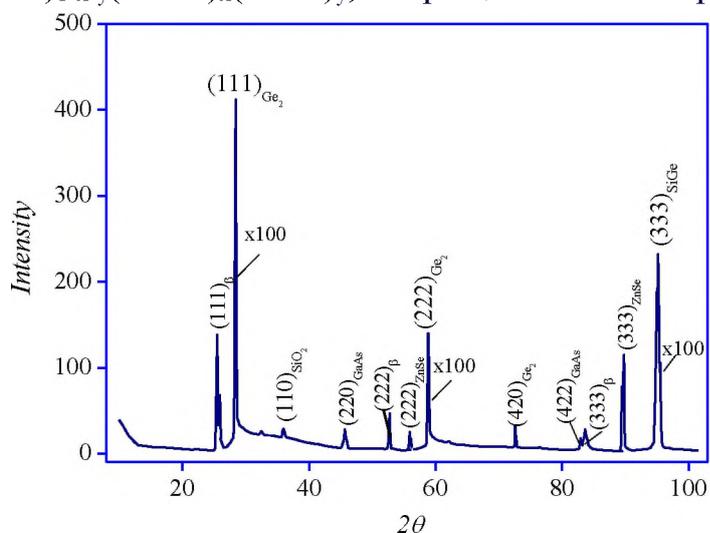


Рис. 7. Рентгенограмма эпитаксиальной пленки $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$

интенсивность ($2 \cdot 10^5$ имп·с⁻¹) и полуширина (FWHM = $2,620 \times 10^{-3}$ рад) структурной линии (111) рентгенограммы свидетельствуют о достаточно высокой степени совершенства кристаллической решетки эпитаксиального слоя $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$. Расчеты значений D из формулы (6) показали, что размер субкристаллитов твердого раствора равен 53 нм. Таким образом, полученные

эпитаксиальные слои $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ являются монокристаллическими с ориентацией (111) и параметрами решеток $a_{т.р} = 0,5658$ нм и имеют алмазоподобную структуру, соответствующую пространственной группе Fd3m.

Кроме того, в рентгенограмме пленки появились новые структурные отражения со значительной интенсивностью. Анализ экспериментальных результатов показал, что эти структурные линии с $d/n = 1,995 \text{ \AA}$ ($2\theta = 45,5^\circ$) и с $d/n = 1,154 \text{ \AA}$ ($2\theta = 83,9^\circ$) соответствует плоскостям (220) и (422) кристаллической решетки нанокристаллитов GaAs. Определено, что размеры нанокристаллитов GaAs из экспериментальных данных структурных линий (220) и (422) с помощью формулы (6) составили соответственно 51 и 47 нм. На

²¹ Artur Medvid, et al. // Nanoscale Research Letters. 2013. 8, ст. 264.

рентгенограмме твердого раствора $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ появились еще два структурных отражения от кристаллографических плоскостей типа (222) и (333) нанокристаллитов, выделившиеся фазы ZnSe соприкасаются идентично с плоскостями (111) матричного слоя пленки.

На рис. 8 показано, что изображение поверхности тонкой пленки, выращенной при

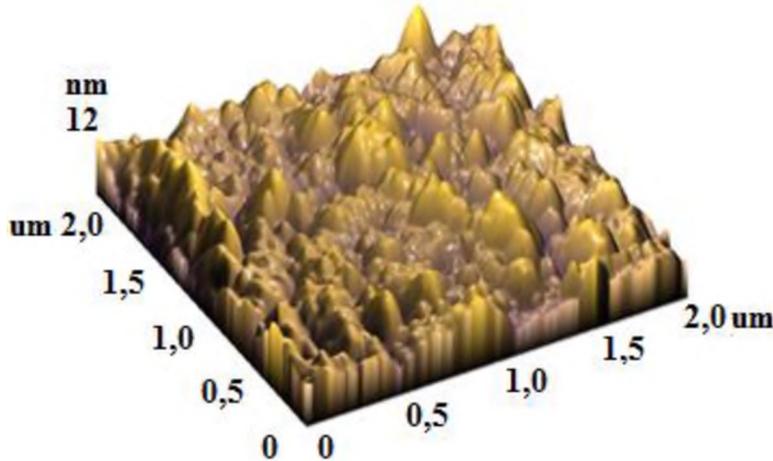


Рис. 8. Атомно-силовое микроскопическое изображение поверхности твердого раствора $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$

выращенной при температуре начала эпитаксии $T=750\text{ }^\circ\text{C}$ на Si подложках, имеет сплошные слои с островками и ямами. Однако такие слои имели матовую поверхность и множество наноразмерных объектов, т.е. наноструктуры. Такого результата следовало ожидать, поскольку несоответствие решеток ($a_{\text{Si}}=5.43\text{ \AA}$) ($a_{\text{GaAs}}\approx a_{\text{Ge}}\approx a_{\text{ZnSe}}=5.65\text{ \AA}$) в данном случае составляет 4%, а линейные коэффициенты термического расширения при комнатной температуре сильно различаются между собой ($\alpha_{\text{Si}}=5.1\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, $\alpha_{\text{Ge}}=6,1\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$, $\alpha_{\text{GaAs}}=5,9\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$ и $\alpha_{\text{ZnSe}}=7\cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$), что привело к нанообразованиям в приповерхностных областях эпитаксиальных слоев $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$.

Четвертая глава диссертации «Механизм переноса тока в многокомпонентных гетероструктурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe» посвящена экспериментальным результатам по исследованию электрофизических свойств многокомпонентных гетероструктур GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe. На рис. 9 приведены вольт-амперные характеристики $n\text{-GaAs} - p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ гетероструктур в прямом направлении в логарифмическом масштабе при различных температурах. На начальном участке вольтамперной характеристики от 0,1 до 0,3 В наблюдается участок всплеска: $J \sim V^\alpha$ ($\alpha \approx 2$) (рис. 9). Проведенный анализ показывает, что такая зависимость подчиняется следующей закономерности²²:

$$V = M(J)B_0\sqrt{\frac{J}{2}}. \quad (9)$$

Здесь $M(J)$ вычисляется по формуле

$$M(J) \approx 1 + 3m \left[2 + C(\alpha\tau_i/c_p)\sqrt{J} \right]^2, \quad (10)$$

²² Саидов А.С. и др. // Письма в ЖТФ, 2020, том 46 (22), С. 23–26.

где $m = 2\tau_i N_d V_p^* / 8b(b+1)n_p d$ и $C = [bn_p / qV_p^*(b+1)]$. В данных соотношениях V_p^* – параметр, обусловленный неидеальностью характера инжектирующего контакта.

С дальнейшим ростом напряжения, как видно из рис. 9, начиная с $V = 0,4$ В наблюдается резкий рост тока $J = A \cdot V^\alpha$ с показателем степени $\alpha \approx 8$. Такой участок называют предпробойным, и в этом случае скорость рекомбинации не

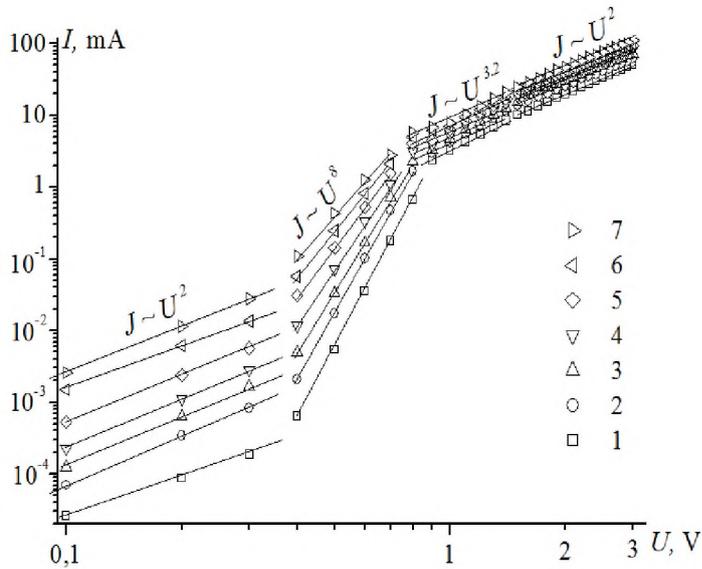


Рис. 9. Вольтамперные характеристики $n\text{-GaAs-p-(GaAs}_{1-d}\text{Vid)}_{1-x}\text{-(Ge}_2\text{)}_x\text{(ZnSe)}_y$ гетероструктур в прямом направлении в логарифмическом масштабе при различных температурах:

1 – 30 °С, 2 – 50 °С, 3 – 70 °С, 4 – 90 °С, 5 – 110 °С, 6 – 130 °С, 7 – 150 °С.

Возможно, данное обстоятельство связано с рекомбинацией неравновесных носителей тока, что преимущественно происходит с задержкой, т.е. с участием комплексов, внутри которых происходит электронный обмен, и вольтамперная характеристика имеет следующее аналитическое выражение²³:

$$V = \frac{(d+1)d^2 N_r}{N_d \mu_p \tau_i} + \frac{d}{q \mu_p (b+1) C} \sqrt{J} - \frac{2(b+1) N_r d^2 c_p}{N_d \mu_p \alpha \tau_i C \sqrt{J}} = A + B \sqrt{J} - \frac{D}{\sqrt{J}}. \quad (12)$$

Здесь A , B и D – параметры, зависящие от концентрации ионизованных атомов глубоких примесей, N_r – концентрация рекомбинационных центров, α – коэффициент, зависящий от типа дефектов, τ_i – время внутрикомплексного обмена, N_d – концентрация мелких донорных примесных центров, μ_p – подвижность основных носителей, c_p – сечение захвата дырок, $b = \mu_n / \mu_p$ – отношение подвижностей электронов и дырок, d – толщина базы межслойного перехода. Для определения параметра A выбираются две экспериментальные точки V_1, J_1 и V_2, J_2 на прямой линии зависимости $J \sim V^{3,2}$. Результаты расчетов показывают, что с ростом температуры параметр A почти не меняется (табл.

подчиняется статистике Шокли-Рида и вольтамперной характеристике, описываемой по формуле

$$J = \frac{q^2 (b+1)^2 N_r d^3}{\epsilon \tau_i^2 c_p (V_0 - V)}, \quad (11)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость и

$$V_0 = \sqrt{\frac{q(b+1)N_r d^4}{2\epsilon \tau_i \mu_p}} = const. \quad \text{Из}$$

(11) видно, что знаменатель этого выражения убывает с ростом напряжения, т.е. ток быстро растёт.

С дальнейшим ростом напряжения от 0,9 до 1,5 В наблюдается участок вольтамперной характеристики, который описывается выражением $J = A \cdot V^{3,2}$ (рис. 9).

²³Адирович Э.И. и др. Токи двойной инжекции в полупроводниках. М.: Сов. радио, 1978. 320 с.

1). Это свидетельствует о том, что в первом слагаемом выражения (12) отношения N_r/τ_i не меняются. Далее для определения параметров B и D из участка резкого роста тока выбирались три экспериментальные точки: (V_1, J_1) , (V_2, J_2) , (V_3, J_3) . Результаты расчетов приведены в табл. 1, откуда видно, что с ростом температуры параметр D увеличивается, а значение B уменьшается. Это может быть следствием увеличения параметра « C », связанного с концентрацией дырок на границе раздела пленки $p\text{-(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ и подложки $n\text{-(GaAs)}$ и коэффициентом захвата дырок c_p . Анализ показал, что выражение (12) позволяет описать значение наклона вольт-амперных характеристик типа $J \sim V^\alpha$, в том числе и участка резкого роста тока.

Таблица 1
Значения параметров A , B и D в выражении (12),
вычисленные из экспериментальных данных при различных температурах

t, °C	30	50	70	90	110	130	150
$A \cdot B$	0,69	0,7	0,705	0,711	0,717	0,723	0,73
$D \cdot B \cdot \text{mA}^{-1/2}$	1,38	2,12	2,44	2,94	4,16	5,58	7
$B \cdot B \cdot A^{1/2}$	0,0174	0,0156	0,0146	0,0134	0,0131	0,013	0,0128

После участка резкого роста тока $J \sim V^\alpha$, где $\alpha = 2$ (рис. 9), скорость рекомбинации u_r выходит на более пологий второй квадратичный участок, при этом вольт-амперная характеристика описывается выражением²⁴

$$V = \frac{(b+1)d^2 N_r}{2N_a \mu_p \tau_i} + \frac{d}{q \mu_p (b+1) C} \sqrt{J} \quad (13)$$

Оценка значения N_r/τ_i для данного участка проводится так же, как и для участка резкого роста тока. Для двух заданных экспериментальных точек составляется уравнение прямой линии, откуда определяется значение постоянной, соответствующей значению первого члена выражения (13):

$$\frac{A}{2} = \frac{(b+1)d^2 N_r}{2N_a \mu_p \tau_i} \quad (14)$$

Подставив известные значения d , b и N_d в (14), определили важные для полупроводников величины $N_r/\tau_i = 5,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

В пятой главе диссертации «Влияние нановключений на фотоэлектрические свойства многокомпонентных гетероструктур» приведены экспериментальные результаты по исследованию фотоэлектрических свойств многокомпонентных гетероструктур на основе GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe.

На рис. 10 показана спектральная зависимость фоточувствительности $n\text{-GaAs-}p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_y$ гетероструктур. Видно, что спектральная область фоточувствительности $n\text{-GaAs-}p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_y$ гетероструктур охватывает большой диапазон энергий излучений – от 1,2 до 3,1 эВ. А также видно, что на спектре фоточувствительности исследованных $n\text{-GaAs-}p\text{-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_{\delta})_y$ гетероструктур обнаружены три пика с

²⁴Мирсагатов Ш.А. и др. // Физика твердого тела, 2013, том. 55 (8). С. 1524.

максимумами при энергиях фотонов 1.61, 1.97 и 2.63 эВ и участок в виде полку при 2.1÷2.3 эВ. Следует отметить, что GaAs, Ge и ZnSe могут образовывать твердый раствор в различных вариантах за счет взаимного замещения молекул GaAs и Ge₂, GaAs и ZnSe, Ge₂ и ZnSe. Поскольку ширина запрещенной зоны $E_{g,GaAs}=1,42$ эВ, то сдвиг чувствительности n -GaAs- p -(ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y гетероструктуры с длинноволновой стороны зависит от узкополосных частей твердого раствора (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y, т.е. Ge₂ и GaAs_{1-δ}Bi_δ. Из-за недостаточной полноты поглощения слоя германия этот слой, по-видимому, является тонким. При этом ковалентная связь Ge-Ge в тетраэдрической решетке твердого раствора, под влиянием атомов GaAs и ZnSe усиливается. В этом случае тонкий слой GaAs_{1-δ}Bi_δ с Ge₂ обуславливает пик чувствительности при энергии квантов 1,61 эВ. Максимальные пики чувствительности полученных гетероструктур наблюдаются при энергии фотонов 1,97 эВ. Известно, что соотношения ширин запрещенных зон

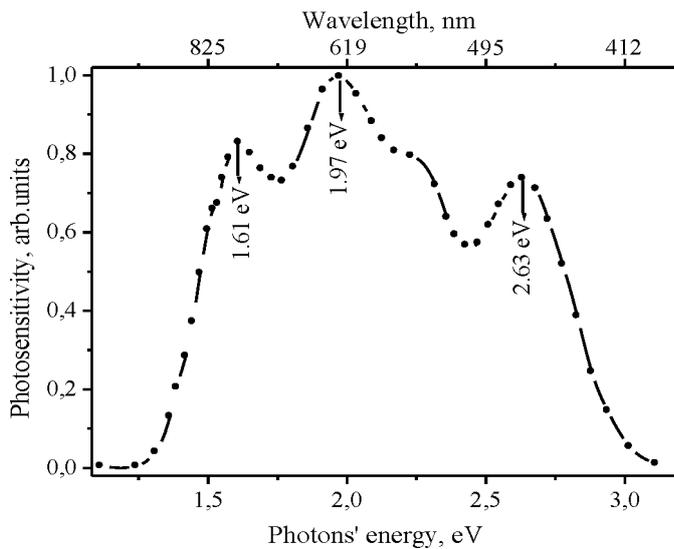


Рис. 10. Фоточувствительный спектр гетероструктуры n -GaAs- p -(ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y.

фотоувствительности n -GaAs – p -(ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y гетероструктуры явно появляется пик чувствительности при энергии фотонов $E_{ph}=2.63$ эВ. Это говорит о том, что наблюдаемые пики чувствительности в коротковолновой области обусловлены основными компонентами молекул ZnSe твердого раствора (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y.

Для более глубокого изучения механизмов поглощения энергии спектр фоточувствительности n -GaAs – p -(ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y гетероструктуры оценивался по программе Wolfram Mathematica 7 в гауссовском приближении и результаты разложены на Гауссовы линии. На рис. 11 приведен спектр первого гауссовского компонента (рис. 11, кривая 1), который начинается с энергии фотонов 1,2 эВ. Этот спектр обусловлен атомами висмута, размещенных вместе атомов арсенида, которые создают ковалентную связь с атомами галлия и образует энергетический уровень

бинарных полупроводниковых соединений ZnSe- $E_{g,ZnSe}>E_{g,GaAs}$ и $E_{g,ZnSe}>E_{g,Ge}$. Однако близкие значения их геометрических размеров и зарядовых состояний молекул ZnSe, GaAs и парных атомов Ge₂ создают возможность для образования твердых растворов (ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y с большим содержанием молекул ZnSe, что в свою очередь увеличивает ширину запрещенной зоны полученных многокомпонентных твердых растворов.

В спектре

мелких доноров²⁵. Максимум второй гауссовской компоненты (рис. 11, кривая 2) наблюдается при 1,53 эВ, и этот пик также соответствует рекомбинации из зоны проводимости на акцепторные состояния в *p*-GaAs²⁶. Максимум третьей гауссовской компоненты (рис. 11, кривая 3) наблюдается при 1,64 эВ, что, возможно, обусловлено валентно-зонными изовалентными примесями соединений Ge-Se в слое GaAs²⁷.

Следующие три компонента (рис. 11, кривые 4, 5 и 6) наблюдаются в интервале энергии фотонов 1,48÷3 эВ, и их максимумы соответствуют энергиям фотонов 1.92, 2.28 и 2.69 эВ²⁸. В наших экспериментах наблюдаются также фотоотклики при трех энергиях фотонов 1.92, 2.3 и 2.63 эВ. Незначительное отклонение энергии второго фотона (2.3 эВ), возможно, обусловлено присутствием соединений GaSe и ZnAs. А разница энергии третьего фотона (2.63 эВ) обусловлена атомами замещения Bi в анионной подрешетке Zn-Se и имеет энергию ионизации ≈ 56 мэВ. Это может быть следствием того, что процесс выращивания твердого раствора (ZnSe)_{1-x}_y(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y осуществлялся принудительным охлаждением из висмутсодержащего раствора-расплава и, возможно, небольшое количество

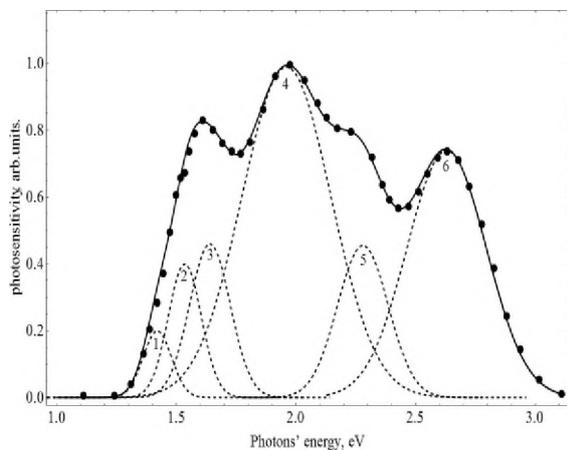


Рис. 11. Спектр фоточувствительности *n*-GaAs – *p*-(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y в Гауссовом приближении: сплошная кривая – экспериментальные точки суммы расчетного гауссовского спектра; пунктирные кривые – гауссовские компоненты расчетного спектра

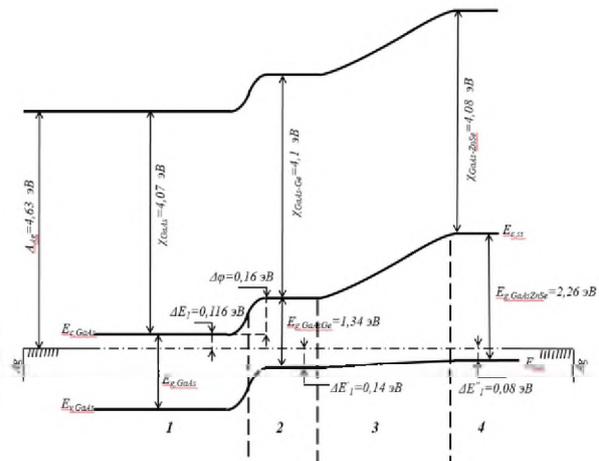


Рис. 12. Энергетическая зонная диаграмма гетероструктуры Ag – *n*-GaAs – *p*-(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y – Ag: 1 – подложка, 2 – переходный слой, 3 – твёрдый раствор, 4 – поверхность

атомов Bi находится на поверхности пленки.

На рис. 12 показаны зонные модели гетероструктур со встроенными в *n*-GaAs–*p*-(ZnSe)_{1-x-y}(Ge₂)_x(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_y переходными слоями, не сглаживающимися потенциальными барьерами. Основной задачей при

²⁵Alfimova D.L., et. al. // [Inorganic Materials](#). 2014, том 50 (2). P. 113–119.

²⁶ Полушина И.К. и др. // Физика и техника полупроводников, 1999, том 33 (6). С. 697–700.

²⁷Блецкан Д.И. и др. // Физика и техника полупроводников, 2006, том 40 (2). С. 142–147.

²⁸Супрун С.П. Шерстякова Н. // Физика и техника полупроводников, 2009, том 43 (11). С. 1570–1575.

создании этих гетероструктур является обеспечение широкого спектрального диапазона чувствительности и низкого внутреннего сопротивления для обеспечения эффективного преобразования солнечного излучения. Для решения данной задачи синтезирована гетероструктура $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ с концентрацией основных носителей тока $(1\div 5)\cdot 10^{17}\text{ см}^3$ методом жидкофазной эпитаксии. Увеличение спектральной фоточувствительности $n\text{-n-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ гетероструктуры было получено из-за низкого сопротивления растекания фронтальной p -области, которое обеспечивается в основном нижним слоем твердого раствора. Если эти слои достаточно толстые, тогда у таких структур появляется низкая чувствительность солнечных элементов в коротковолновой области солнечного спектра из-за поглощения светового излучения толстым слоем твердого раствора $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$. Фронтальный слой из твердого раствора $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ с переменным составом определяет характер изменения ширины запрещенной зоны. Градиент изменения E_g от состава твердого раствора приводит к значительному увеличению эффективной длины диффузионного перемещения электронов и уменьшению роли поверхностной рекомбинации для электронно-дырочных пар, образующихся вблизи поверхности с коротковолновым светом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по изучению процессов формирования наноразмерных объектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, а также определению их влияния на электрофизические и оптические свойства полученных структур сделаны следующие выводы.

1. Впервые определены оптимальные условия выращивания многокомпонентных эпитаксиальных пленок на GaAs и Si подложках методом жидкофазной эпитаксии из олово- и висмутсодержащего раствора-расплава.

2. Впервые, основываясь на особенностях раствора-расплава, температуры кристаллизации и скорости охлаждения, а также необходимых технологических условиях и точно подобранных термодинамических и кинетических факторах, на GaAs и Si подложках выращены гетерослой GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, содержащие различные нанобъекты.

3. На основе экспериментальных исследований определено формирование однородных наноразмерных объектов с высокой плотностью ($10^8\div 10^{11}\text{ см}^{-2}$), проявляющих особую проводимость в многокомпонентных твердых растворах, выращенных методом жидкофазной эпитаксии.

4. Установлено, что твердые растворы $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ и $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$, сформированные на GaAs и Si подложках, проявляющие монокристалличность, соответствующую кристаллографической ориентации $(100_{\text{GaAs}}$ и 111_{Si}) подложек, имеют кубическую структуру сфалерита с параметрами решетки $a_{\text{т.р.}(\text{GaAs})} = 0,5663\text{ нм}$ и $a_{\text{т.р.}(\text{Si})} = 0,566$.

5. Определено, что на границах раздела и в приповерхностных областях субкристаллитов твердых растворов $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$, выращенных на подложках GaAs из оловосодержащего раствора-расплава, атомы Ge и молекулы ZnSe самопроизвольно образуют нанобъекты (квантовые ямы и квантовые точки) размерами 44 нм и 59 нм, соответственно.

6. Установлено, что образование нанобъектов $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ в виде конусов (квантовые ямы) размером 30÷40 нм в приповерхностных областях в процессе выращивания эпитаксиальных слоев на GaAs и Si подложках из висмутсодержащего раствора-расплава на основе непрерывного управления искажениями кристаллической решетки повышает структурную стабильность твердых растворов до ~17%.

7. Установлено, что ток, протекающий через многокомпонентные структуры GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, проявляет дрейфовый механизм переноса электронов, являющийся результатом взаимодействия носителей заряда не только со сложными комплексами, но и с наноразмерными объектами.

8. Установлено, что Ge, Si, GaAs и ZnSe составляющие многокомпонентных структур GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe, обладают селективной фоточувствительностью, которые отличаются значениями энергий ионизации в диапазоне 0,48÷0,92 эВ.

9. Установлено, что полученные гетероструктуры могут быть использованы в электронных и термоэлектронных устройствах, а также в качестве фотоактивных материалов, работающих в инфракрасном и видимом спектре излучения.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELEC-
TRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

**INSTITUTE OF SEMICONDUCTORS PHYSICS AND
MICROELECTRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN, ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

BOBOEV AKRAMJON YULDASHBOEVICH

**FORMATION PROCESSES OF NANOSIZED OBJECTS IN GaAs/Ge/ZnSe
AND GaAs/Si/ZnSe MULTICOMPONENT STRUCTURES**

01.04.10 - Physics of semiconductors

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF OF SCIENCE (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2024

INTRODUCTION (abstract of a doctoral (DSc) dissertation)

The purpose of the study is to determine the optimal technological conditions for growing multicomponent structures GaAs/Ge/ZnSe and GaAs/Si/ZnSe, to study the processes of forming nanoscale objects in such structures, and to investigate their influence on the electrophysical and optical properties of the resulting structures.

The object of the research is the processes of liquid-phase epitaxy, multi-component structures GaAs/Ge/ZnSe and GaAs/Si/ZnSe based on GaAs and Si, as well as the characteristics of the $n\text{-Si-p-(Ge)}_{1-x-y}\text{(GaAs)}_x\text{(ZnSe)}_y$ and $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2)_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ heterostructures.

The scientific novelty of the research consists of the following:

for the first time, multicomponent solid solutions $(\text{Ge})_{1-x-y}\text{(GaAs)}_x\text{(ZnSe)}_y$ and $(\text{ZnSe})_{1-x-y}\text{(Ge}_2)_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ with various nano-inclusions from a tin- or bismuth-containing solution-melt have been grown;

for the first time, based on experimental research, the processes of formation and characteristics of nanoscale structures grown by the method of liquid-phase epitaxy have been determined;

based on the results of X-ray structural research, it was established that the obtained solid solutions $(\text{ZnSe})_{1-x-y}\text{(Ge}_2)_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ are monocrystals, having a sphalerite structure with a crystallographic orientation of (100) and lattice parameters of approximately 0.5663 nm;

based on the results of structural and morphological research, it was established that Ge and ZnSe atoms spontaneously form nano-objects (quantum wells and quantum dots) with sizes of 44 nm and 59 nm, respectively, at the interfaces and in the subsurface areas of subcrystallites of the solid solutions $(\text{GaAs})_{1-x-y}\text{(Ge}_2)_x\text{(ZnSe)}_y$;

based on a comparative analysis of the results of X-ray structural studies, it was determined that the structural stability of solid solutions grown from a bismuth-containing solution-melt increases by approximately 17%, and that nano-objects of $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ in the form of nanocones (quantum wells) sized 30 to 40 nm are formed on their surface areas;

it has been established that in the structures of $n\text{-GaAs-p-(ZnSe)}_{1-x-y}\text{(Ge}_2)_x\text{(GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$, due to the presence of nano-objects related to Ge atoms and $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ compounds, a charge carrier drift mechanism is exhibited in the forward current direction;

the selective photosensitivity of various nanostructures formed by Ge, Si, GaAs, and ZnSe atoms in the multicomponent structures GaAs/Ge/ZnSe and GaAs/Si/ZnSe was identified based on the relative values of the photocurrent passing through the samples under investigation.

Implementation of the research results.

Based on the determination of optimal technological conditions for growing multi-component structures GaAs/Ge/ZnSe and GaAs/Si/ZnSe, the study of the formation processes of nanoscale objects in such structures, as well as their impact on the electrophysical and optical properties of the obtained structures:

the conclusions obtained during the research, which state that Ge_2 atomic pairs partially replace ZnSe molecules in defective regions of the matrix lattice of the film, while the remaining atoms form germanium nanocrystals with lattice parameters $a_{\text{Ge}} = 0.5659$ nm and sizes of 47 nm at the boundaries of subcrystallite interfaces of the film, as well as the fact that the $\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta$ compound self-forms nano-inclusions, i.e., quantum wells with a size of 43 nm in the near-surface regions of thin films, were used in the execution of project No. F2-FA-F120 (2012-2016) on the topic “Electronic properties and radiation modification of low-dimensional high-temperature superconductors, semiconductor heterostructures, metals, and their oxides” of the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Certificate of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2/1255-1177 dated May 29, 2024). The application of the results of these studies has made it possible to improve the unique properties of the fabricated heterostructures, which are sensitive to light and temperature.

the method for determining photo-peaks with maxima at photon energies of 1.61, 1.97, and 2.63 eV in the photosensitivity spectrum of $n\text{-GaAs} - p\text{-}(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ heterostructures, as well as solid solutions of $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$, which possess selective photosensitivity due to the components GaAs , Ge_2 , and ZnSe with differing ionization energy values of the corresponding molecules, was used at "Photon" JSC in the production of semiconductor electronic devices (Certificate of the joint-stock Company "Uzeltechsanoat" No. 04-3/1168 dated July 16, 2024). The use of scientific results has made it possible to enhance the functional capabilities of electronic devices produced by "Photon" JSC.

The proposed scientific and technical recommendations on the optimal technological regimes for growing multi-component solid solutions $\text{ZnSe}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$ and $(\text{Ge})_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$ with various nano-inclusions from a bismuth-containing melt solution, as well as the method for determining the geometric shapes and sizes of nano-objects and identifying their formation mechanisms, were utilized in the implementation of the scientific and technical project "A&A Ausbildung und Arbeit Plus GmbH" at the Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Germany (Certificate of the Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Germany No. 29-28207 dated September 9, 2022). The application of the research results has made it possible to increase the efficiency of the impurity photoelectric effect in p-n structures.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of published works, includes 65 figures, 9 tables, and a bibliography of 183 references, and is presented on 203 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (1 часть; part 1)

1. С.З.Зайнабидинов, А.Й.Бобоев. Физика и технология многокомпонентных тонкослойных гетероструктур на основе полупроводников A^3B^5 // Монография, Тошкент, «Фан», ISBN 978-9943-19-656-3. 2022. 120 с.
2. S.Zainabidinov, A.Y.Boboev. n -GaAs – p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ Heterostructures // Synthesis, Structure and Electro-Physical Properties. Monograph, GlobeEdit. ISBN-13: 978-6200630001. 2021. 73 p.
3. Zainabidinov S.Z., Mansurov Kh.J., Boboev A.Y., Usmonov J.N. The mechanism of current transfer in n -GaAs– p (ZnSe) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (GaAs $_{1-\delta}$ Bi $_{\delta}$) $_y$ heterostructures // East European Journal of Physics. 2024, No. 3, pp. 440–445. (Scopus:IF: 0.570).
4. Boboev A.Y. Photoelectric characteristics of the heterojunction n -GaAs– p -(GaAs) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (ZnSe) $_y$ // East European Journal of Physics. 2024, No. 3, pp. 216–221. (Scopus:IF: 0.570).
5. Mansurov Kh.J., Boboev A.Y. Urinboyev J.A. X-ray structural and photoelectric properties of SnO $_2$, ZnO, and Zn $_2$ SnO $_4$ metal oxide films // East European Journal of Physics. 2024, No. 2, pp. 336–340. (Scopus:IF: 0.570).
6. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Тўхтасинова Д.Б. Твердые растворы многокомпонентных соединений с нанодфектами // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2023, Vol. 5, Iss. 1, pp. 46-53. (01.00.00 № 16).
7. Zainabidinov S.Z., Boboev A.Y., Ergashev B.M. Growth of (Ge $_2$) $_{1-x-y}$ (GaAs) $_x$ (ZnSe) $_y$ Epitaxial Films on Si Substrates by Liquid-Phase Epitaxy // Физика-математика тадқиқотлари (Physical and mathematical research). 2023, Vol. 5, Iss.1, pp. 41-45. (01.00.00 № 13).
8. Бобоев А.Й., Абдурахимов Д.П., Тураев А. Поверхностные состояния эпитаксиальных слоев (GaAs) $_{1-x-y}$ (ZnSe) $_x$ (Ge $_2$) $_y$ // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2023, Vol. 5, Iss. 1, pp. 14-17. (01.00.00 № 16).
9. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Эргашев Б.М. Механизмы формирования квантово-размерных нанобъектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe // Физика-математика тадқиқотлари (Physical and mathematical research). 2023, Special Issue. pp. 7-9. (01.00.00 № 13).
10. Зайнабидинов С.З., Саидов А.С., Бобоев А.Й., Эргашев Б.М. Получения, морфология и фотоэлектрические свойства гетероструктуры n -Si– p -(Ge $_2$) $_{1-x-y}$ (GaAs) $_x$ (ZnSe) $_y$ // Физика-математика тадқиқотлари (Physical and mathematical research). 2023, Vol. 5 Iss.1 pp. 7-15. (01.00.00 № 13).
11. Zainabidinov S.Z., Utamuradova Sh.B., Boboev A.Y. Structural Peculiarities of the (ZnSe) $_{1-x-y}$ (Ge $_2$) $_x$ (GaAs $_{1-\delta}$ Bi $_{\delta}$) $_y$ Solid Solution with Various Nanoinclusions // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022, Vol. 16, No. 6, pp. 1130–1134. (Scopus:IF: 0.359).

12. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й. Структурные особенности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2022, Vol. 4, Iss. 6, pp. 25-28. (01.00.00 № 16).
13. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Абдурахимов Д.П. Особенности электрофизические свойства гетеропереходов $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ // Computational nanotechnology. 2022, Том 9, № 2, С. 73-79. (01.00.00; №60. IF=0.397).
14. Akramjon Boboev. Photoelectrical Studies of Solid Solutions $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ // Физика-математика тадқиқотлари (Physical and mathematical research). 2022, Vol. 4 Iss.1, С. 35-43. (01.00.00 № 13).
15. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Акбаров А.Ж. Исследование механизма переноса тока в $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктур // Узбекский физический журнал. 2022, №3, С.186-187. (01.00.00 № 5).
16. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Абдурахимов Д.П. Структурные особенности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ с квантовыми нанобразованиями // Доклады Академии Наук. 2022, № 1. С. 22-25. (01.00.00 № 7).
17. Zainabidinov S.Z., Saidov A.S., Boboev A.Y., Usmonov J.N. Features of the Properties of the Surface of $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ Semiconductor Solid Solution with ZnSe Quantum Dots // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2021, Vol. 15, No. 1, pp. 94–99. (Scopus:IF: 0.359).
18. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Каримов И.Н., Мансуров Х.Ж., Абдурахимов Д.П. Структура и электрофизические свойства твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research. 2021, Vol. 3, Iss. 1, pp. 15-21. (01.00.00 № 13).
19. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Абдурахимов Д.П. Получение, морфология и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных пленок $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ на основе GaAs // Узбекский физический журнал. 2021, № 4, С. 45-50. (01.00.00 № 5).
20. Зайнабидинов С.З., Йулчиев Ш.Х., Бобоев А.Й. Структурные и фотоэлектрические свойства тонкопленочного гетероперехода $n\text{-ZnO/p-Si}$, полученного золь-гель методом // Альтернативная энергетика и экология. 2020, № 25-27, С. 131-137. (01.00.00 №9. IF: 0.1).
21. Zainabidinov S.Z., Saidov A.S., Boboev A.Y., Abdurahimov D.P. Structural and morphological studies of $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ solid solutions with quantum dots // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020, Vol. 2, Iss. 1, pp. 46-53. (01.00.00 № 16).
22. Zainabidinov S.Z., Saidov A.S., M.U. Kalanov M.U., and A.Y. Boboev A.Y. Synthesis, Structure and Electro-Physical Properties $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ Heterostructures // Applied Solar Energy. 2019, Vol. 55, No. 5, pp. 291-308. (Scopus:IF: 0.258).

II бўлим (2 часть; part 2)

23. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й. Структурные особенности пленок $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ // Mikro va nanotexnologiya, yangi materiallar olishning zamonaviy holati va istiqbollari mavzusidagi xalqaro konferensiya. Qarshi sh. 2023, 30-31 oktyabr, b. 23-26.
24. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й. Фотоэлектрические исследования твердых растворов $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ // II-международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и нанoeлектроники». Ташкент. 2023, 27-28 октября, с. 179-181.
25. Бобоев А.Й., Усмонов Ж.Н. Электронно-микроскопические исследования твердого раствора $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$. // II-международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и нанoeлектроники». Ташкент. 2023, 27-28 октября, с. 95-97.
26. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Эргашев Б.М. Механизмы формирования квантово-размерных нанобъектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe // Международная научно-практическая конференция, посвященная 80 - летию Академии наук Узбекистана. Полупроводниковая опто- и нанoeлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы. Андижан. 2023, 12-13 октября, с. 192-194.
27. Zaynabidinov S.Z., Boboev A.Y. Current transfer mechanism in heterostructures $n\text{Ge-p}(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$. // Перспективы развития физики конденсированных сред. Международная научная и научно-техническая конференция материалы. Карши. 2022, 14-15 октябрь, с. 51-53.
28. Boboev A.Y. Current-voltage characteristics features of heterostructures $n\text{Ge-p}(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_y$. // Перспективы развития физики конденсированных сред. Международная научная и научно-техническая конференция материалы. Карши. 2022, 14-15 октябрь, с. 56-58.
29. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й. Морфологические и фотоэлектрические исследования твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$. // Материалы международного форума "ФИЗИКА-2022". Наманган. 2022, 4-5 октября, с. 54-57.
30. Бобоев А.Й. Структурные особенности твердого раствора $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ с квантовыми точками. // Материалы международного форума "ФИЗИКА-2022". Наманган. 2022, 4-5 октября, с. 115-117.
31. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й. Морфологические и фотоэлектрические исследования твердого раствора $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_y$. 29th International Conference on Advanced Laser Technologies. MOSCOW, RUSSIA. 2022, September 11-16, pp. 218-219.
32. Бобоев А.Й. «Фотоэлектрические свойства $n\text{-GaAs-p}(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ гетероструктур» // ЁОФТРИА- II. Тошкент. 2022, 20-21 май, б. 34-37.

33. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й. «Структурные особенности твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ » // ЁОФТРИА- II. Тошкент. 2022, 20-21 май. б. 228-230.
34. Бобоев А.Й., Одилов Ш.И., Уринбоев Ж.А., Турсунов Ш.У., Марифжонов К.Х., Солиев А.А. Структурные особенности твердого раствора $(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}_\delta)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ // Экономика и социум. 2021. №6 (85). с. 7-11.
35. Бобоев А.Й., Одилов Ш.И., Уринбоев Ж.А., Турсунов Ш.У., Солиев А.А., Марифжонов К.Х. Морфологии и фотоэлектрические свойства твердого раствора $(\text{GaAs})_{1-x}(\text{Ge}_2)_x$ // Молодой учёный. 2021. № 25 (367). с. 6-7.
36. Бобоев А.Й., Уринбоев М.И., Юнусалиев Н.Ю., Тожимухаммадов А.К., Уринбоев Ж.А. Особенности фоточувствительности $n\text{-(GaAs)-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{Ge}_2)_y$ структур с квантовыми точками // Austria-science. 2020, № 36, с. 20-23.
37. Бобоев А.Й., Собирова Д.Н., Бобоева Ш.С «Фоточувствительность $n(\text{GaAs})\text{-p}(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{Ge}_2)_y$ гетероструктур» // Замонавий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим ва инновация интеграцияси. Респ.илм.-усл.анж. Андижон. 2020, 24-25 декабрь, б. 153-155.
38. Эрматов Ш., Абдуазимов В.А., Бобоев А.Й., Гуломов Б. Электрические свойства $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ гетероструктур // “Возобновляемые источники энергии и устойчивая окружающая среда” Труды Российско-узбекского международного научно-методического семинара. Воронеж, 2019. с. 96-99.
39. Leiderman A.Yu., Zainabidinov S.Z., Boboev A.Y. Current-voltage (I - V) characteristics of $n\text{-GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{Ge}_2)_y$ heterostructures // The International Symposium “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, Prospectives” Tashkent. 2016, November 10-11, pp. 176-178.
40. Saidov A.S., Boboev A.Y. Growth of solid solutions of replacement $(\text{GaAs})_{0.69}(\text{Ge}_2)_{0.17}(\text{ZnSe})_{0.14}$ and $(\text{GaAs})_{0.76}(\text{ZnSe})_{0.15}(\text{Ge}_2)_{0.09}$. // The International Symposium “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, Prospectives” Tashkent. 2016, November 10-11, pp. 178-180.
41. Бобоев А.Й. «Температурные зависимости электрических свойств $n\text{GaAs-p-(GaAs)}_{1-x-y}(\text{ZnSe})_x(\text{Ge}_2)_y$ гетероструктур» // Ёш олимлар илмий-амалий конференция - 2015 // Маъруза тезислари тўплами. Тошкент. 2015, 22 декабрь, б. 49-52.
42. Бобоев А.Й., Хамраева Р.Н., Рустамова В.М. «Формирование нанокристаллов Ge и ZnSe в эпитаксиальной пленки $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ » // «Физические методы в естественных науках». Новосибирск. 2014, 11–18 апреля, с. 10.

Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari “Til va adabiyot ta’limi” jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi (19.09.2024-yil)



Bichim 60x841/16.Raqamli bosma usuli. Times garniturası.

Shartli bosma tabog‘i: 3,75. Adadi 70. Buyurtma № 58.

Guvohnoma reestr № 10-4434

Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti
bosmaxonasida chop etilgan.

Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh., Yangioldazor ko‘chasi 20-uy.

