

**QARSHI DAVLAT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT
TEXNIKA UNIVERSITETI**

SHIRINOV GANJIMUROD MAMIR O'G'LI

**ION IMPLANTATSIYA USULI YORDAMIDA GaP YUZA VA YUZA OSTI
QATLAMLARIDA HOSIL QILINGAN UCH KOMPLEMENTLI
NANOTUZILMALARNING TARKIBI, TUZILISHI VA FIZIK
XUSUSIYATLARINI O'RGANISH**

01.04.04 – Fizik elektronika

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

Qarshi – 2025

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferatining mundarijasi**

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

**Contents of dissertation abstract of doctoral philosophy (PhD) on
physical-mathematical sciences**

Shirinov Ganjimurod Mamir o'g'li

Ion implantatsiya usuli yordamida GaP yuza va yuza osti qatlamlarida hosil qilingan uch komponentli nanotuzilmalarning tarkibi, tuzilishi va fizik xususiyatlarini o'rganish..... 5

Ширинов Ганжимурод Мамир угли

Исследование состава, структуры и физические свойства трех компонентных наноразмерных систем, созданных на поверхности и приповерхностной области GaP методом ионной имплантации..... 25

Shirinov Ganjimurod Mamir ugli

Study of the composition, structure, and physical properties of three-component nanoscale systems created on the surface and near-surface region of GaP by ion implantation..... 47

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works 51

**QARSHI DAVLAT UNIVERSITETI HUZURIDAGI
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT
TEXNIKA UNIVERSITETI**

SHIRINOV GANJIMUROD MAMIR O'G'LI

**ION IMPLANTATSIYA USULI YORDAMIDA GaP YUZA VA YUZA OSTI
QATLAMLARIDA HOSIL QILINGAN UCH KOMPLEMENTLI
NANOTUZILMALARNING TARKIBI, TUZILISHI VA FIZIK
XUSUSIYATLARINI O'RGANISH**

01.04.04 – Fizik elektronika

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

Qarshi – 2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar Vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.3.PhD/FM766 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (резюме)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.qarshidu.uz) hamda “ZiyoNet” Axborot-ta’lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	Donayev Sardor Burxonovich fizika-matematika fanlari doktori, professor
Rasmiy opponentlar:	Egamberdiyev Baxrom Egamberdiyevich fizika-matematika fanlari doktori, professor Raxmonov G‘aniboy Tadjiyevich fizika-matematika fanlari doktori, professor
Yetakchi tashkilot:	Urganch davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Qarshi davlat universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 raqamli Ilmiy kengashning 2025 “_____” _____ soat ____ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi (Manzil: 180119, Qarshi shahri, Ko‘chabog‘ ko‘chasi, 17-uy. Tel.: (+998 75) 221-21-04, faks: (+998 75) 220-02-10, e-mail: kasu_info@edu.uz). Qarshi davlat universiteti majlislar zali.

Dissertatsiya bilan Qarshi davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (____ raqami bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 180119, Qarshi shahri, Ko‘chabog‘ ko‘chasi, 17-uy. Tel.: (+998 75) 221-21-04).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil “_____” _____ kuni tarqatildi
(2025-yil “_____” _____ dagi № _____ raqamli reestr bayonnomasi).

M.T. Normuradov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi,
fizika-matematika fanlari
doktori, professor

G.X. Allayarova
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash kotibi
fizika-matematika fanlari
bo‘yicha falsafa doktori,
PhD

A.K. Tashatov
Ilmiy kengash xuzuridagi
ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy seminar raisi,
fizika-matematika fanlari
doktori, professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda $A^{III}B^V$ va $A^{II}B^{VI}$ birikmali binar yarimo'tkazgichli materiallar asosidagi ko'p qatlamli tizimlar va nanoo'lchamli sturukturalar olish, ular asosida nano- va optoelektron qurilmalarni ishlab chiqarish yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida GaP, GaInP, AlGaInP strukturalarga ega bo'lgan ko'p qatlamli tizimlar olish ularning fizik xossalarini o'rganish bo'yicha olib borilayotgan ilmiy tadqiqotlar natijalarini amaliyotga joriy etishni taqazo qiladi. Bu esa lazer diodlari, quyosh elementlari, fotoelektron va optoelektron qurilmalarini ishlab chiqarish imkonini beradi. Shu sababli taqiqlangan zona kengligi boshqariladigan $Ga_{1-x}Al_xAs$, $Ga_xIn_{1-x}P$ birikmali uch komponentli qattiq materiallarni olishga alohida e'tibor qaratilmoqda. GaP va GaAs asosidagi nanoklasterli fazalar, nanoo'lchamli ko'p qatlamli sturukturalar, yupqa plyonkalar va getorostrukturalarni olish va uning tarkibini, strukturasini, emission va optik xossalarini o'rganish, hozirgi kunda fizikaviy elektronika sohasida muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda nanoo'lchamli materiallar, ko'p komponentli va ko'p qatlamli strukturali tizimlar bilan bog'liq bo'lgan ilmiy-tadqiqot ishlarini o'rganishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu tadqiqotlar asosan fundamental va amaliy yo'nalishlarda olib borilib, nanoelektronika, optoelektronika, fotoelektrika va boshqa zamonaviy yo'nalishlar uchun yangi texnologiyalarni yaratishga xizmat qilmoqda. Ayniqsa, kelajakda zamonaviy qurilmalarni ishlab chiqarish uchun bunday murakkab strukturalarning shakllanish mexanizmlari, ularning fizik-kimyoviy, elektr, optik va emissiya xossalarini o'rganish orqali orqali amalga oshiriladi. Shu sababli zamonaviy elektron texnologiyalarning yangi yo'nalishlarini yaratish, ishlab chiqish, ularning amaliy imkoniyatlarini baholash, hamda sanoatga joriy qilish uchun olib borilayotgan ilmiy izlanishlar bugungi kunda ilmiy hamjamiyat oldida turgan dolzarb va ustuvor vazifalardan biri hisoblanadi. Xususan, quyosh energetikasi sohasi bugungi kunda jahon energetika bozorida ekologik toza va qayta tiklanadigan manba sifatida keng qaralmoqda. Yuqori samaradorlikka ega fotoelektrik elementlar, quyosh batareyalari va boshqa energiya manbalarni ishlab chiqish va amaliyotga tadbiq qilish sohalarida innovatsion yechimlarni rivojlantirishga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda innovatsion texnologiyalarni iqtisodiyotga joriy etish, energiya samaradorligini oshirish va resurs sarfini kamaytirish muhim strategik yo'nalish sifatida belgilangan va bu vazifalarni amalga oshirishda keng qamrovli chora-tadbirlar olib borilgan va muayyan natijalarga erishilmoqda. 2022–2026-yillarga mo'ljallangan O'zbekiston Respublikasini innovatsion rivojlantirish strategiyasida, jumladan "...yangi turdagi mahsulotlar va innovatsion texnologiyalar yaratishning g'oyadan yakuniy iste'molchigacha bo'lgan kompleks tizimini ta'minlash orqali innovatsiyalarga bo'lgan talabni rag'batlantirish"¹ vazifalari belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, fizik elektronika sohasida binar yarim o'tkazgichli materiallarining yuza va yuza osti sohalarida nanoo'lchamli

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 06.07.2022-yildagi PF-165-son.

strukturalarni olish, ularning shakllanish mexanizmlarini, qonuniyatlarini chuqur o'rganish, ayniqsa, bunday strukturalar asosida ko'p qatlamli nanoo'lchamli tizimlarni olishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Bunday murakkab fizik xossalarga ega nanoo'lchamli ko'p qatlamli strukturalarni olish va tadqiq qilish ilmiy jihatdan dolzarb bo'lishi bilan birga, zamonaviy nanoelektron qurilmalarni ishlab chiqarishda muhim amaliy ahamiyatga ega. Shunga qaramay, hozirgi vaqtda ion implantatsiya va qattiq fazali epitaksiya usullari yordamida galliy fosfid (GaP) asosidagi nanoo'lchamli fazalar va ko'p qatlamli strukturalar olish, ularning fizik-kimyoviy xossalarni o'rganish orqali muhim ilmiy natijalarga erishish va yangi usullarni rivojlantirish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28- fevraldagi PF-60-son farmoni, 2021-yil 2-martdagi PQ-5011-sonli qarori va 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-sonli qarori kabi me'yoriy-huquqiy hujjatlar, elektrotexnika sanoatini rivojlantirish, mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirish, fizika sohasidagi ta'lim sifatini yaxshilash va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish kabi vazifalarni belgilaydi. Bundan tashqari, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktabrdagi PF-6097-sonli "Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"², O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"³ farmonlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Ushbu tadqiqot O'zbekiston Respublikasining ilm-fan va texnologiyalarni rivojlantirishga oid II ustuvor yo'nalishi – "Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik" hamda III ustuvor yo'nalishi – "Zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asboblarni rivojlantirish" sohalari bo'yicha amalga oshirilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Dunyoning yetakchi mamlakatlari ilmiy markazlari, institutlari va universitetlarida binar yarimo'tkazgich asosidagi ko'p komponentli materiallarning fizik-kimyoviy xususiyatlari intensiv o'rganilmoqda.

Xususan, MNE (molekulyar nurli epitaksiya) usuli bilan olingan GaP plyonkasining strukturasi va xususiyatlari hamda uning uch komponentli birikmalari GaP/Si: geteroo'tishlari asosidagi quyosh elementlarini olish imkoniyatlari, $A^{III}B^V$ plyonkasi asosidagi ko'p komponentli va ko'p qatlamli nonosistemalarning struktura xususiyatlari yaxshi o'rganilgan. Ispanyalik olim S. Pablo GaAsP asosidagi tandem quyosh elementlarini olgan va xususiyatlarini o'rgangan. GaAsP/Si tipidagi tandem quyosh elementlarining FIK nazariy jihatdan 41,9% gacha yetishi asoslab berilgan.

Rus olimlari A.A. Lazarenko, M.C. Sobolov va boshqalar MNE (molekulyar nurli epitaksiya) usuli orqali Si taglik ustida GaPN va GaPAsN qatlamlarini o'z

² O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 29.10.2020-yildagi PF-6097-son.

³ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 28.01.2022-yildagi PF-60-son.

ichiga olgan geterostrukturalarni bosqichma-bosqich yaratishni taklif qilishgan. Yapon olimlari Moon S.Y., Yonezu H., Furukawa Y., Wakahara A. lar to'g'ri zonali (прямозонных) GaP(As)N va InGaPN materiallaridan foydalanib, Si ning panjara doimiysiga yaqin bo'lgan elektron qurilmalar panjara doimiyligi turli xil geterostrukturalarni olish imkoniyati mavjudligini ko'rsatishgan. Nemis olimlari R. Saive va boshqalar GaP/Si chegarasida kuchli fotokuchlanish tushuvini aniqladilar. Umuman olganda, bu ma'lumotlar Si va GaP o'rtasidagi chegarada zaryad tashish to'sig'i mavjudligini ko'rsatadi, chunki chiziqlarning noqulay joylashishi GaP/Si geteroo'tishli quyosh elementlarining past bo'lishiga sabab bo'ladi. Rus olimlari Malik A.I va Grushkova G.G. lar GaP va Si dan epitaksial aynimagan p-n o'tishlarda ortiqcha tunnel tokini o'rganishdi. Ular quyidagi muhim eksperimental VAX qiyaqligining (In ning I-V kordinatalarida) fazoviy zaryad sohasiga bog'liq emasligini, ya'ni keltirilgan maqolalar bilan n- va p- sohali legirlanish darajasini tushuntirib bo'lmasligini aniqladilar. X.B. Cheng va akademik J.I. Alferovlar lazerlarda va turli xil optoelektron qurilmalarda qo'llaniladigan GaAs va GaP asosidagi ko'p qatlamli davriy geterostrukturalarni olishdi. Ular kvant nuqtali va plyonkali geterostrukturalar yarimo'tkazgich kristallar parametrlarini, yani taqiqlangan zona kengligini, effektiv massasini va zaryad tashuvchilar harakatchanligini boshqarish mumkinligini ko'rsatib berishgan.

M.T. Normurodov, B.E. Umirzakov va ularning shogirtlari birinchi marta yuqorida keltirilgan fizik xususiyatlarga ega va nanostrukturalarni olishgan va ularning shakllanish mexanizmlarini aniqlashgan.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilayotgan oliy ta'lim muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalarini bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishida keltirilgan tadqiqotlar davlat ilmiy-texnik dasturlar doirasida AL-592102410 "Fazalararo mikro – nano pufakli guruhlar asosida minerallarni flotatsiyalashda konditsiyalashning samarali texnologiyasi va uskunalari tadqiq etish" (2022-2024) nomli amaliy loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi. GaP monokristalining yuza va yuza osti sohalarida nanoo'lchamli strukturalar va qatlamlarni olish, ularning tarkibini, elektron va kristall strukturasi, emission, optik va elektrofizik xususiyatlarini kompleks o'rganish mexanizmlarini yoritishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

kichik energiyali In^+ ionlari implantatsiyasining GaP(111) monokristalli tartibi, elektron strukturasi va fizik xususiyatlariga ta'sirini va GaInP nanoplyonkalar asosiy shakllanish mexanizmlarini aniqlash;

kichik energiyali ionlar implantatsiyasi va ketma-ket toblash natijasida GaP yuzasida shakllangan uch komponentli nanoplyonkaning emission xususiyatlarini, elektron strukturasi, foto va haqiqiy ikkilamchi elektronlar xususiyatlarini chiqish chuqurliklarini aniqlash;

CaF₂ yuzasida A^{III}B^V tipidagi nanoplyonkalarni hosil qilish uchun yuqori muvofiqlashtiruvchi qatlamini, ion bombardirovka usulidan foydalangan holda GaP(111) yuzasida nanokontaktlarni olish imkoniyatlarini o'rganish hamda

elektron bombardirovkaning GaP(111) tarkibiga va yuzaviy strukturasi ta'sirini kuzatish natijasida yuz tarkibining asosiy o'zgarish mexanizmlarini aniqlash;

turli xil ta'sirlarning (ion va elektron bombardirovka, lazerli nurlatish) GaP hajmiy (ρ_v) va sirtiy (ρ_c) solishtirma qarshiliklariga ta'sirini va arsenid asosida $A^{III}B^V$ tipidagi ko'p qatlamli nanoo'lchamli geteroepitaksial sistemalarni olish imkoniyatlarini o'rganish.

Tadqiqotning obyekti GaP plyonkasi va monokristall namunalari.

Tadqiqotning predmeti ion implantatsiya natijasida GaP yuzasida monokristall va nanoplyonkalar shakllanish qonunlari va fizik mexanizmlari hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Oje – elektron spektroskopiyasi (OES), elastik qaytgan elektronlar spektroskopiyasi (EQES), xarakterli energiyasini yo'qotgan elektronlar spektroskopiyasi (EXYES), ultrabinafsha fotoelektron spektroskopiyasi (UBES), tez elektronlar difraksiyasi (TED) va rastorli elektron mikroskopiyasi (REM) usullaridan foydalanilgan holda tadqiq qilingan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk marotaba GaP(111) yuzasiga In^+ ionlarini implantatsiya qilish va keyingi qizdirish orqali yuzada 30-35 Å qalinlikdagi $Ga_{0,6}In_{0,4}P$ nano-kristall fazalar va plyonkalar tahlil qilinib, GaInP nanofazalarini qalinligi $h \approx 30-35$ Å va yuz diametri $d \leq 20-35$ nm bo'lgan holatlarda taqiqlangan zona kengligining ortishi, hamda kvant-o'lchamli effektlar hosil bo'lishi aniqlangan;

ilk marotaba $Ga_{0,6}Al_{0,4}P$ va $Ga_{0,6}In_{0,4}P$ nanoplyonkalarining valent elektronlar holatlari zichligi va energetik zonalari parametrlari hamda bu plyonkalarining epitaksial o'sishi aniqlangan;

ilk marotaba GaAs/CaF₂ tizimi uchun CaF₂ yuzasida $Ca_{1-x}Sr_xF_2$ nanoo'lchamli muvofiqlashtiruvchi qatlamlar olingan;

ilk marotaba GaP namunasini Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilib, qalinligi 40-45 Å bo'lgan Ga qatlami hosil qilinib, uning yuzasiga Ni atomlari o'tqazilib o'ta yupqa omik kontaktlar hosil qilish mumkinligi aniqlangan;

ilk marotaba In^+ ionlari implantatsiyasi yordamida GaInP/GaP/GaInP/GaP tipidagi ikki qatlamli tizim hosil qilingan, uning tuzilishi, taqiqlangan zonalarning kengligi aniqlanib tizimining energetik zonalari diagrammasi yaratilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

GaP(111) sirtini Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilish yo'li bilan qalinligi qilish orqali 300 Å dan kichik bo'lgan o'tayupqa omik kontaktlar olingan;

GaP uchun ion va elektronlar bilan bombardimon qilish, lazerli nurlatish orqali, uning sirtiy ρ_c va hajmiy ρ_v solishtirma elektr qarshiliklariga ta'siri o'rganilgan. Yuqoridagi ta'sirlar GaP ning ρ_c qiymatlari 100-150 martagacha kamayishiga olib keldi, lekin ρ_v ning qiymati sezilarli o'zgarmaganligi aniqlangan;

GaInP/GaP/GaInP/GaP tipidagi tandem ko'p qatlamli tizimlar yordamida, energiya o'zgartirgich qurilmalar olish imkoniyatlari keltirib o'tilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Yuqori vakuum sharoitida zamonaviy elektron spektroskopiyasi va yuzani yuqori aniqlikda tahlil usullaridan foydalanib olingan tadqiqot natijalari boshqa mualliflarning ma'lumotlari bilan yaxshi muvofiqligi bilan ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati GaP yuzasiga In^+ ionlari implantatsiyasi natijasida GaInP tipidagi nanoo'lchamli strukturalarning shakllanish mexanizmlari va uchkomponentli qatlamlar hosil bo'lishida Ar^+ ionlari bilan ishlov berishning ular tarkibi, elektron strukturasi, emission va optik xususiyatlariga ta'siri o'rganilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati GaInP yuzasida qalinligi $h \approx 30-35 \text{ \AA}$ va sirt diametri $d \leq 20-25 \text{ nm}$ bo'lgan kvant-o'lchamli effektlar paydo bo'lishi aniqlandi. GaP yuzasini turli energiya va dozadagi Ga va P atomlarining elektronlar bilan bombardimon qilganda chuqurlik bo'yicha taqsimlanish konsentratsiyasi aniqlandi. $E_e \leq 5-6 \text{ keV}$ da GaP ning yuza sohasi atomlariga, $E_e \geq 5-6 \text{ keV}$ da esa Ga atomlariga boyishi kuzatildi. Ushbu natijalar nano- va optoelektron asboblarni yaratish uchun yangi yarimo'tkazgich – dieliktrik – yarimo'tkazgich va metall – dieliktrik – yarimo'tkazgich strukturalarni olishda juda muhimligi aniqlandi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Ion implantatsiya usuli yordamida GaP yuza va yuza osti qatlamlarida hosil qilingan uch komponentli nanotuzilmalarning tarkibi, tuzilishi va fizik xususiyatlarini o'rganishda olingan natijalar asosida:

CaF_2 yuzasida GaAs/ CaF_2 sistemasi uchun $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$ nanoo'lchamli muvofiqlashtiruvchi qatlam olish natijalari Toshkent davlat texnika universitetida 2022–2024-yillarda bajarilayotgan AL-202102215 “Ferromagnit nanoklasterli Si bilan aylanma saraton hujayralarni tutib qoluvchi mikro suyuqlik kanalli integrallashgan tizim” mavzusidagi O'zbekiston-Turikiya qo'shma amaliy loyahasini bajarishda foydalanilgan (Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2024-yil 24-sentyabrdagi 4/17-4/4-18162-son ma'lumotnomasi). Natijada kremniy hajmi bo'yicha olingan Mn atomlari magnit nanoklasterlarning konsentratsiyasini, Mn, Eu va Gd elementlari atomlarinig magnit nanoklasterlarni kremniy yuzasida shakllantirish hisobiga oshirib, mavjudlariga nisbatan 4 barobar yuqori magnit xususiyatli kemniyni olishga erishilgan;

In^+ ionlari implantatsiyasi usulidan foydalanilgan holda toblanish (lazerda qizdirish) bilan birgalikda GaP(111) yuzasida 30-35 \AA qalinlikdagi $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ nanokristall fazosi va plyonkasi olinganligidan “Foton” AJ da shu material asosida yarim o'tkazgichli elementlarni yaratishda foydalanilgan (“Uzeltexsanoat” AJ dan 2024-yil 23-sentabrdagi 04-3/1598-sonli ma'lumotnoma). Tadqiqot natijalaridan foydalanish, yarim o'tkazgichli elementlarni yaratishda ishlatilayotgan materiallarni 2 barobarga tejash imkoniyatini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 7 ta xalqaro va 8 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokama qilindi.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 18 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 6 ta maqola (Respublika miqyosidagi, xorijiy jurnalda va Scopus ma'lumotlar bazasidagi jurnallarda) chop etilgan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya kirish, to'rt bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya matni 106 bet matndan, shu jumladan, 61 ta rasm va 7 ta jadvaldan iborat.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

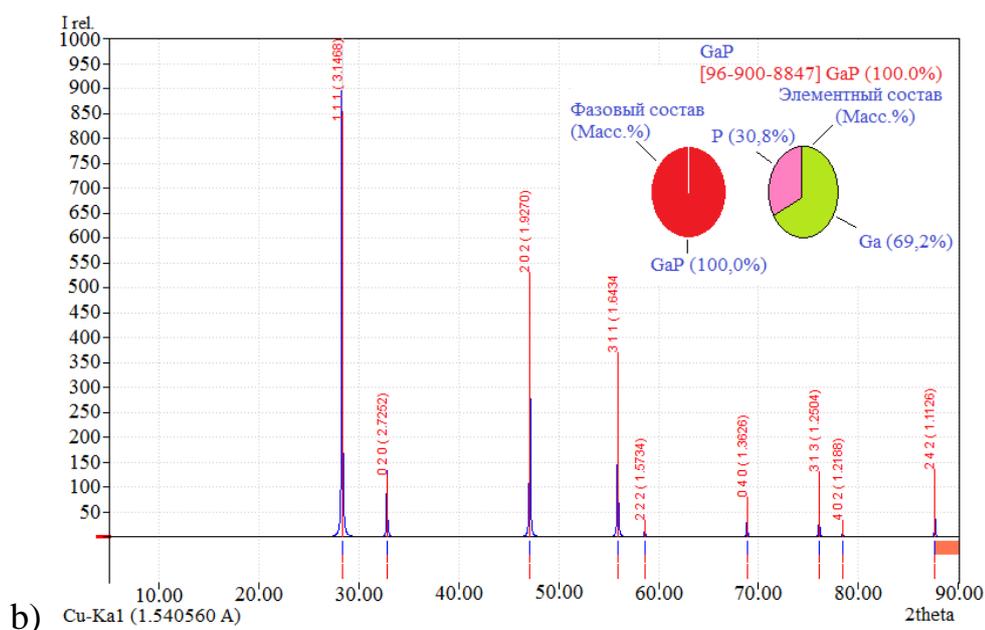
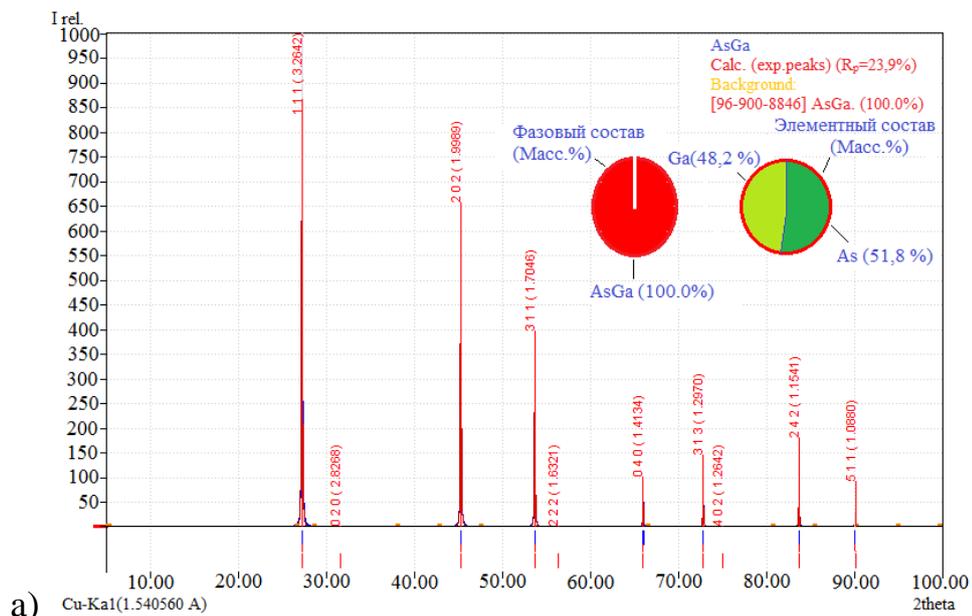
Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi asoslab berilgan, muommoning o'rganilganlik darajasi keltirilgan, tadqiqot ishining Respublikada fan va texnologiyalar rivojlanishining asosiy ustuvor yo'nalishlari bilan o'zaro bog'liqligi keltirilgan dissertatsiya ishining maqsad va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati, natijalarning amaliyotga joriy qilinishi va ishning aprotatsiyasi haqida ma'lumot keltirilgan, shuningdek, dissertatsiya hajmi va tuzilishi to'g'risida yoritib o'tilgan.

Dissertatsiyaning **“Molekulyar nurli epitaksiyali GaP plyonkalari va ular asosidagi uchkomponentli plyonkalarining tarkibi, strukturasi va xususiyatlari”** deb nomlangan I bobida, kichik energiyali In^+ ionlari implantatsiyasining GaP(111) monokristalining tarkibi va elektron strukturasi ta'sirini o'rganishga, GaInP/GaP ning emission, optik va elektrofizik xususiyatlarini o'rganishga, kichik energiyali ionlar implantatsiya va keyingi qizdirish natijasida GaP yuzasida shakllangan uch komponentli nanoplyonkalarining emission xususiyatlari va elektron tuzilishiga, GaF₂ yuzasida $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ tipidagi plyonkalarini olish uchun yuqqa muvofiqshiruvchi qatlam olishga bag'ishlangan. Bob oxirida dissertatsiya ishining maqsadi va vazifalaridan kelib chiqib adabiyotlar sharhiga xulosasi, maqsadi va vazifalari keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Eksperimental tadqiqotlar metodikasi”** nomlangan II bobida kichik energiyali ion bombardirovkasi va o'ta yuqori vakuum sharoitida atomlarni changlatish orqali o'tqazib keyingi qizdirish (qizdirish, lazerli qizdirish, qizdirishning lazerli qizdirish) usullaridan foydalanib GaP plyonkasi va monokristalining yuza va yuza osti sohalarida nanoo'lchamli strukturalarni olishga bag'ishlangan. Tadqiqotlar OES, IIMS, XEYO'ES, UBES, TED, REM, AKM, yorug'likning yutilish spektroskopiyasi va IEE koeffitsiyentlarining energiyaga bog'liqligini qayd qilish usullari yordamida amalga oshirilgan. Asosiy tadqiqotlar, ya'ni barcha texnologik ishlov berishlar (ion implantatsiya, atomlarni o'tqazish, qizdirish) va materiallarning tarkibi, tuzilishi, optik va emission xususiyatlari universal o'ta yuqori vakuumli qurilmada ($P \approx 10^{-7}$ Pa) olib borildi.

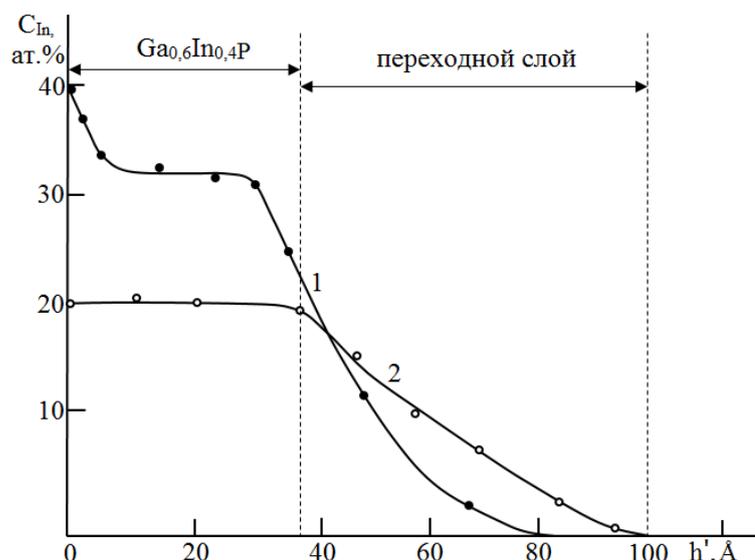
Dissertatsiyaning **“Monokristall GaP asosida uch komponentli nanostrukturalar olish va ularning fizik xususiyatlarini o'rganish”** deb nomlangan III bobida Al^+ va In^+ ionlari implantatsiyasi va keying qizdirish usullari yordamida GaP yuzasida yuqqa monokristall GaAlP va GaInP plyonkalarini olishga bag'ishlangan. Oje – elektron spektroskopiya, yorug'lik yutilishi va ikkilamchi elektronlar koeffitsiyentlarining energiya va burchak bog'liqliklarini olish usullari orqali birinchi marta ≤ 50 Å qalinlikdagi Ga_{0.6}Al_{0.4}P/GaP(111) va Ga_{0.6}In_{0.4}P/GaP(111) nanoplyonkalarining asosiy energetik soha parametrlari va emission parametrlari aniqlandi. 1(a,b)-rasmda Mo(111) yuzasida olingan 1000 Å qalinlikdagi yaxshi tozalangan GaAs va GaP plyonkalarining rentgen fazali spektrlari keltirilgan. Rasmlarning yuqori qismida o'rganilayotgan plyonkaning Match! Phose analysis Report dasturida hisoblangan fazaviy va elementar tarkibi (macc. %) keltirilgan. Rasmdan GaAs(111) va GaP(111) plyonkalari tarkibining

(mass. %) bir xilligi va stexiometrigini ko‘rish mumkin. Ushbu plyonkalarining panjara doimiylari mos ravishda 5,5 Å va 5,6 Å ni tashkil qildi hamda monokristall GaAs va GaP ning ma’lumotlari to‘liq mos keldi.



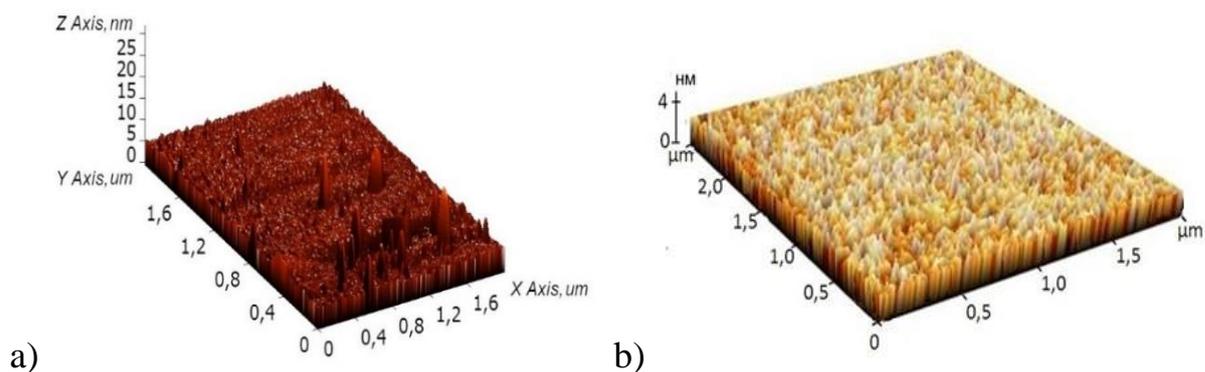
1-rasm. Yaxshi tozalangan plyonkalarining rentgenogrammalari: a – GaAs(111), b – GaP(111). Diagrammaning yuqori qismida plyonkalarining fazoviy va elementar tarkiblari keltirilgan.

Ion implantatsiyadan oldin GaP(111) o‘tayuqori vakuum sharoitida ($P=10^{-7}$ Pa), $T=900$ K haroratda ~ 4 soat davomida tozalangan. 2-rasmda $E_0=1$ keV energiyali $D=6 \cdot 10^{16}$ sm^{-2} dozadagi In^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan GaP(111) uchun qizdirishgacha va undan keyingi olingan In atomlarining chuqurlik h' bo‘yicha tarqalish konsentratsion profillari keltirilgan.



2-rasm. $E_0=1$ keV energiyali $D=6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozadagi In^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan GaP(111) uchun qizdirishgacha (1-egri chiziq) va undan keyingi (2-egri chiziq) olingan In atomlarining chuqurlik h' bo'yicha tarqalish konsentratsion profillari.

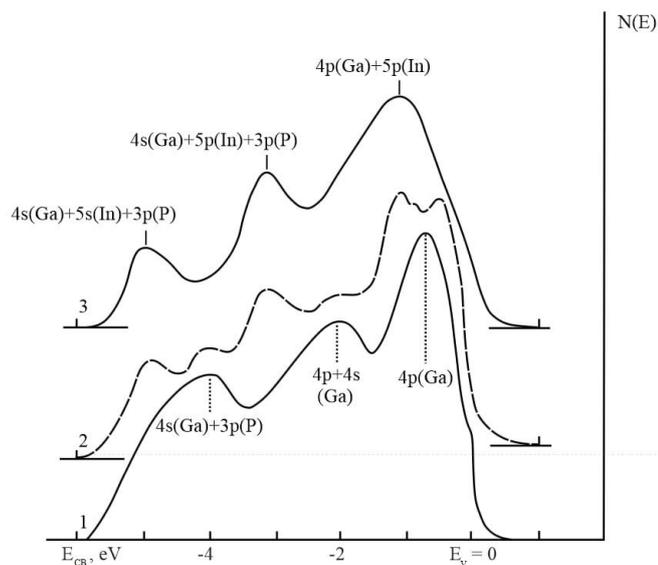
$T=950$ K ga qizdirilgandan keyin yuzaga C_{In} qiymati 20–22 at.% gacha kamayadi va 0–35 Å qalinligigacha o'zgarmaydi va $h'=40 \div 100$ Å oraliqda C_{In} 0 gacha monoton kamayadi. 3-rasmda GaP(111) yuzasida molekulyar nurli epitaksiya ($h=50$ nm) va ion implantatsiya ($h=0,35-4$ nm) usullari bilan olingan $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ plyonkasining ASM – tasviri keltirilgan. Molekulyar nurli epitaksiya plyonkasi yuzasining notekisligi $\sim 4 \div 5$ nm ni tashkil qildi 3 a-rasm, ion implantatsiya usuli bilan olingan namunani bir necha marta qizdirib yuqori silliqlikka ega va yuzaning notekisligi ~ 2 nm ni tashkil qiladigan $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ plyonkasi olindi 3 b-rasm.



3-rasm. GaP(111) yuzasida $d \approx 50$ nm qalinlikda MNE usuli bilan olingan (a) va $d \approx 3,5-4$ nm qalinlikda qizdirib turib ion-implantatsiya qilish orqali olingan (b) $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ sirtiy plyonkalarining AKM – tasviri.

4-rasmda $E_0=1$ keV energiyali 10^{15} va $6 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ dozadagi In^+ ionlari bilan implantatsiya qilib, har bir ion-implantatsiyadan keyin 40 min davomida $T=950\text{K}$ qizdirilgan GaP ning fotoelektron spektrlari keltirilgan. Birinchi holatda yuzada $d=15-20$ nm diametrli nanofazalar ikkinchi holatda esa $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ plyonkasi

shakllandi. Bu spektrlar valent zonadagi elektronlar joylashish holati bo'yicha zichlik taqsimoti haqida to'liq ma'lumot beradi.

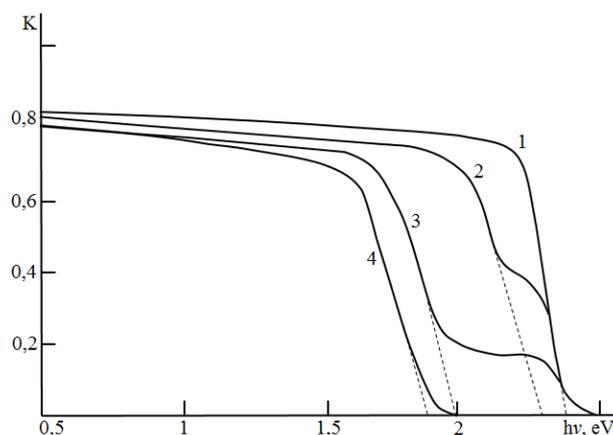


4-rasm. $E_0 = 1$ keV energiyali turli dozalarda In^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan GaP ning fotoelektron spektrlari: D, sm^{-2} : 1–0; 2– 10^{15} ; 3– $6 \cdot 10^{16}$. Har bir ion-implantatsiyadan keyin $T=950$ K ga qizdirilgan.

Toza GaP spektrining $E_{cb} \approx -8$ eV; $-2,2$ eV va 4 eV bog'lanish energiyalarida Ga ning $4p$ va $4p+4s$ holatdagi elektronlariga tegishli hamda Ga ning $4s$ holatdagi va P ning $3s$ holatdagi elektronlari qo'shib (gibridlashib) hosil qilgan maksimumlarini ko'rish mumkin (4-rasm, 1-egri chiziq). GaInP plyonkasining spektrlarida (4-rasm, 3-egri chiziq) bog'langan $4s(\text{Ga})+5p(\text{In})$, $4s(\text{Ga})+5p(\text{In})+3d(\text{P})$ va $4s(\text{Ga})+5s(\text{In})+3d(\text{P})$ holatdan elektronlarning gibridlanishi hisobiga yuzaga kelgan $E_{cb} = -1,2$ eV; $-3,3$ eV va $-5,6$ eV energiyalardagi maksimumlarni ko'rish mumkin. GaP yuzasida olingan $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ plyonkasining spektrlarida GaP va $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ ga tegishli bir qancha o'ziga xos o'zgarishlar kuzatiladi (4-rasm, 2-egri chiziq).

Ushbu namunalarning taqiqlangan soha kengligini aniqlash uchun yorug'lik o'tkazuvchanlik spektrlari olindi (5-rasm). Ma'lumki, o'rtacha dozada ($5 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15} \text{sm}^{-2}$) ion-implantatsiya qilinayotgan yuza 2 xil fazadan iborat bo'ladi: yarimo'tkazgichlarning ion-legirlangan fazalari va legirlanmagan sohalari. Bizda $D = 10^{15} \text{sm}^{-2}$ dozada nanofazalarning o'rtacha yuzaviy diametri $\sim 15-20$ nm ni, fazalar orasidagi masofa esa $\sim 50-60$ nm ni tashkil qildi. 5-rasmda $K(h\nu)$ grafigidan ko'rish mumkinki, avval $h\nu$ ortishi bilan K ning qiymati o'zgarmadi, keyin keskin 0 gacha kamayib ketdi.

Egri chiziqning keskin kamaygan qismidan o'tkazilgan ekstropolyatsiyaning $h\nu$ o'qidagi qiymati ushbu materialning E_g ga teng bo'ladi. GaP(111)ning taqiqlangan soha kengligi taxminan $2,36$ eV, $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ plyonkasi uchun $\sim 1,85$ eV, $d=20$ nm va $d=25-30$ nm $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ nanokristall fazalari uchun mos ravishda $\sim 2,3$ eV va $\sim 2,0$ eV bo'lishini ko'rishimiz mumkin.



5-rasm. GaP(111) (1-egri chiziq), yuzaviy diametri $d \approx 15-20$ nm (2-egri chiziq) va $d \approx 25-30$ nm nanofazali GaP(111) (3-egri chiziq) hamda $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ nanoplyonkasining yorug'lik o'tkazuvchanlik spektrlari.

1-jadvalda o'rganilayotgan namunalarning E_g va Θ qiymatlari keltirilgan.

1-jadval.

GaInP nanofaza va plyonkasi uchun nanostruktura o'lchamlari (qalinligi h va yuzaviy diametri d), E_g va Θ ning qiymatlari

O'rganilayotgan namunalar	$h, \text{Å}$	d, nm	E_g, eV	$\Theta, \%$
GaP(111)	Monokristall namuna		2,36	0
$\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}/ \text{GaP}(111)$	30-35	15-20	2,3	30
	30-35	25-30	2,0	70
	30-35	Plyonka (yuza to'liq qoplangan)	1,85	100

5-rasm va yuqoridagi jadvaldan ko'rishimiz mumkinki, E_g ning qiymati bir xil qalinlikdagi nanokristall fazalarda plyonkalarga nisbatan kattaroq bo'ladi. Ushbu natijalar shuni ko'rsatadiki, nanokristall fazalarda diametri $\approx 25-30$ nm dan boshlab d ning qiymati kamayishi bilan E_g qiymati oshadi, ya'ni ularda kvant o'lchamli effektlar namoyon bo'ladi.

2-jadvalda o'rganilayotgan namunaning soha energetik, parametrlari va emission xarakteristikallari keltirilgan.

2-jadval.

GaP(111) va $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ ning asosiy soha energetik parametrlari va emission xarakteristikallari

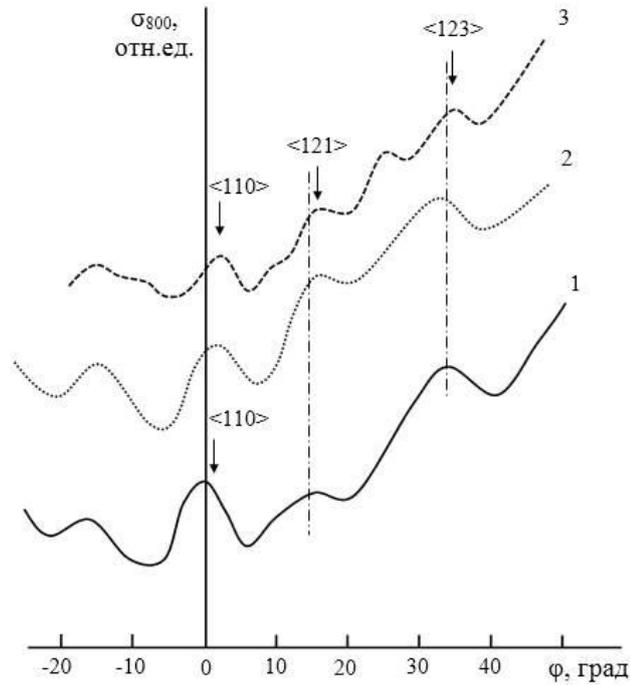
O'rganilayotgan namunalar	Φ, eV	E_g, eV	κ, eV	σ_m	$Y, (h\nu = 10,8 \text{ eV}) \text{ da}$
GaP(111)	5,3	2,36	2,94	1,95	$6 \cdot 10^{-3}$
$\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$	5,5	1,85	3,65	1,7	$4 \cdot 10^{-3}$

bu yerda, Φ – fotoelektron chiqish ishi, quyidagi formula orqali topiladi.

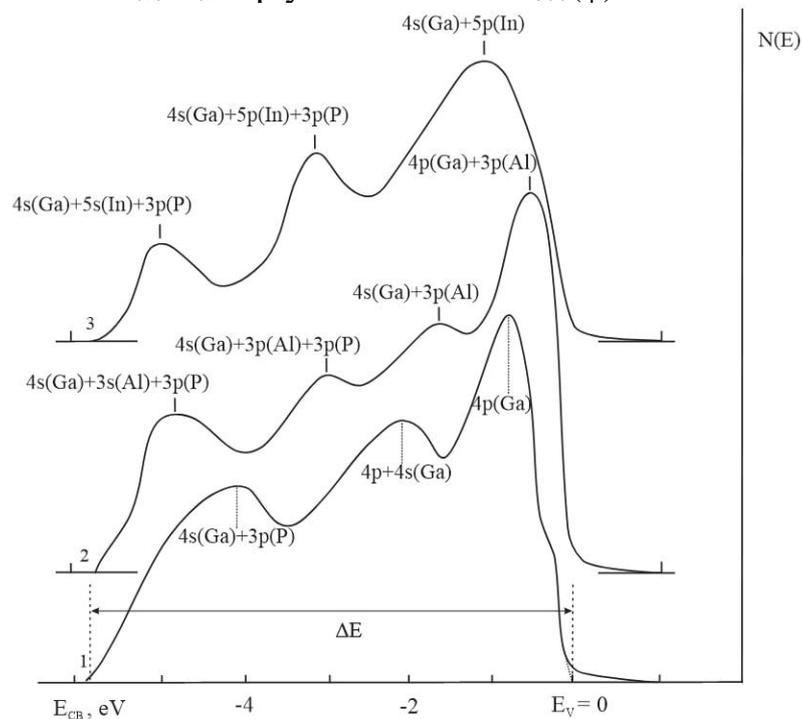
$\Phi = h\nu - \Delta E$. ΔE – fotoelektronlar spektr kengligi. κ – elektronga moyillik:

$\kappa = \Phi - E_g$. σ_m – σ ning maksimal qiymati. Y – fotoelektronlarning kvant chiqishi.

6-rasmda toza GaP(111) va qizdirish orqali ion-implantatsiya hamda $E_p=800$ eV dagi σ ning σ_{800} qiymatida MNE usullari bilan olingan GaP(111) yuzasida $d \approx 50$ Å qalinlikdagi GaInP plyonkasi uchun $\sigma_{800}(\varphi)$ grafigi keltirilgan. Burchak φ namuna normaliga nisbatan aniqlanadi.



6-rasm. Toza GaP(111) (1-egri chiziq) va ion-implantatsiya (2-egri chiziq) hamda MNE (3-egri chiziq) usullari orqali olingan GaP yuzasida 50 Å qalinlikdagi $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ plyonkasi uchun $\sigma_{800}(\varphi)$



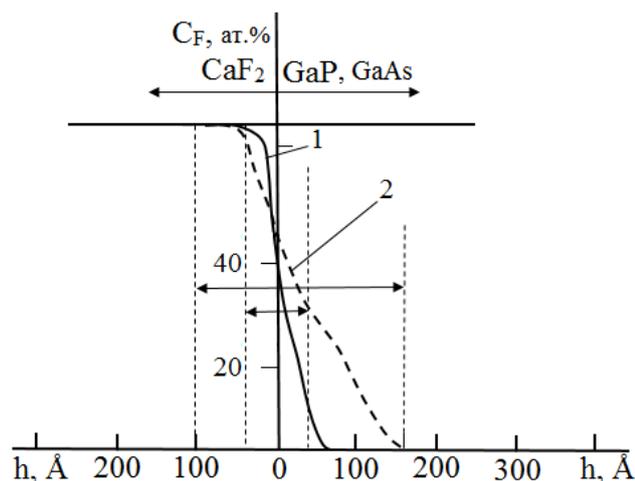
grafigi.

7-rasm. $h\nu=10,8$ eV da olingan fotoelektron spektrlar: 1-GaP(111); 2- $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{P}/\text{GaP}(111)$; 3- $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}/\text{GaP}(111)$.

**GaP va GaAlP hamda GaInP plonkalari bilan qoplangan GaP uchun
 σ_m va Y qiymatlari va energetik soha parametrlari**

Namuna	Plyonka qalinligi, Å	E_{CB} , eV	Interpretatsiya	Φ , eV	κ , eV	E_g , eV	σ_m	Y ($h\nu=10,8$ eV)
GaP(111)	Monokristall	- 0,8 - 2,2 - 4,1	4p(Ga) 4p+4s(Ga) 4s(Ga)+3p(P)	6,1	3,74	2,36	2,36	$6 \cdot 10^{-3}$
GaAlP/ GaP(111)	35-40	- 0,6 - 1,7 - 3,1 - 4,8	4p(Ga)+3p(Al) 4s(Ga)+3p(Al) 4s(Ga)+3p(Al)+3p(P) 4s(Ga)+3s(Al)+3p(P)	6,1	3,72	2,38	2,38	$4,8 \cdot 10^{-3}$
GaInP/GaP	40-50	-1,2 -3,3 -5,6	4s(Ga)+5p(In) 4s(Ga)+5p(In)+3p(P) 4s(Ga)+5s(In)+3p(P)	5,5	3,65	1,85	1,85	$4 \cdot 10^{-3}$

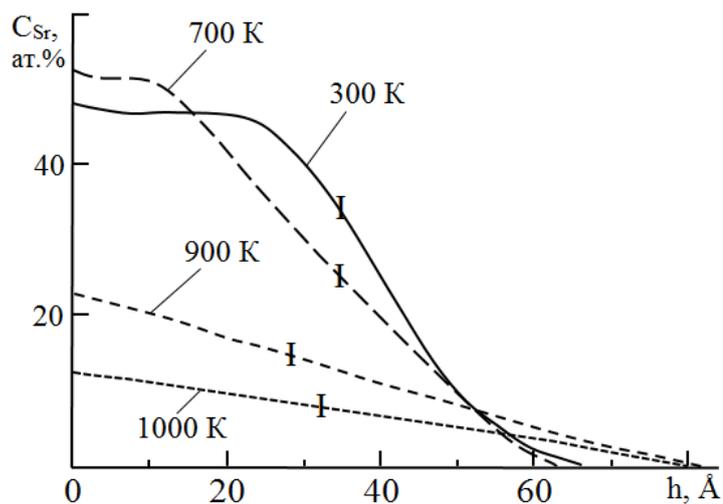
GaP va ion bombardimon qilish usuli orqali olingan GaInP plyonkalari maksimumlarining burchak holati bir-biri bilan mos keladi. Bundan ushbu holatdagi $Ga_{0.6}In_{0.4}P$ plyonkaning qat'iy epitaksial o'sishi sodir bo'ladi degan xulosa qilishimiz mumkin. 7-rasmda GaP(111) va GaP(111) yuzasida olingan $Ga_{0.6}Al_{0.4}P$ va $Ga_{0.6}In_{0.4}P$ plyonkalarining $h\nu=10,8$ eV da olingan fotoelektron spektrlari keltirilgan. Bunda plyonkalarining qalinligi mos ravishda $\sim 35-40$ Å va $\sim 40-50$ Å ni tashkil qiladi. Ko'rinib turibdiki, yupqa uch komponentli plyonkalarining elektronlar holat zichligi va energetik parametrlari GaP nikidan sezilarli farq qiladi. O'rganilayotgan namunalarning spektrlaridagi piklarning hosil bo'lish sabablari (interpretatsiyasi), shuningdek, emission va optik xususiyatlari 3-jadvalda keltirilgan. Φ –fotoelektron chiqish ishi, quyidagi formula orqali topiladi. $\Phi=h\nu-\Delta E$, ΔE – fotoelektronlar spektr kengligi. κ – elektronga moyillik: $\kappa=\Phi-E_g$. σ_m –IEE ning maksimal qiymati. Y – $h\nu=10,8$ eV da o'lchangan fotoelektronlarning kvant chiqishi. 7-rasm va 3-jadvaldan ko'rishimiz mumkinki, uch komponentli plyonkalar fotoelektronlar spektridagi asosiy maksimumlar GaP ning valent sohasidagi elektronlari hamda Al va In atomlarining gibridlashishi bilan bog'liq. Olingan ushbu “yarimo'tkazgich – dielektrik” plyonkalarining chegara qatlamlari o'ziga xos noyob fizik-kimyoviy xususiyatlarga ega, ulardan maqsadli foydalanish yangi avlod qurilmalarini yaratishga imkon beradi. Bunday holda, kristall strukturalarning o'ziga xosligi va panjara parametrlarining yaqinligi, shuningdek, o'stirilgan plyonkalarining harorat ta'sirida kengayish koeffitsiyentlarining yaqinligi kabi alohida talablar qo'yiladi. Agar plyonkalar panjara parametrlari o'rtasida sezilarli farq bo'lsa, muvofiqlashtiruvchi qatlamlarni yaratish kerak bo'ladi. 8-rasmdan ko'rish mumkinki, hattoki, xona haroratida ham plyonka-taglik o'tish chegarasida GaP(GaAs) va CaF_2 birikmalarining parchalanishi va ularning atomlari orasida o'zaro diffuziya sodir bo'ladi.



8-rasm. 1-GaP/CaF₂(111) va 2-GaAs/CaF₂ sistemalari uchun F atomlarining chuqurlik bo'yicha tarqalish profillari.

Qizdirishdan oldin GaP/CaF₂ uchun o'tish qatlamining qalinligi ~ 100 Å ni, GaAs/CaF₂ uchun esa ~ 250 Å ni tashkil qildi. T = 850 – 950 K ga qizdirilgandan keyin o'tish qatlami GaP/CaF₂ uchun ~ 150 Å gacha, GaAs/CaF₂ uchun esa ~ 400 Å gacha ortdi. GaAs/CaF₂ sistemasi uchun muvofiq lashtiruvchi o'tish qatlamini hosil qilish kerak bo'ladi. Buning uchun, CaF₂ ning "a" (panjara doimiysi)ni ~ 5,46 Å dan ~ 5,65 Å gacha deyarli monoton orttirish talab etiladi. Bunga ion-implantatsiya usuli yordamida erishish mumkin. Implantatsiya E₀=0,5–3 keV energiyali D=D_n to'yinish dozasi dagi Mg⁺, Ba⁺ va Sr⁺ ionlari bilan olib boriladi. Sr⁺ ionlari implantatsiya qilganda eng ishonchli o'tish qatlami hosil bo'ladi.

9-rasmda E₀=1 keV energiyali D=6·10¹⁶ sm⁻² dozadagi Sr⁺ ionlari bilan implantatsiya qilib, turli harotarlarda qizdirishdan keyin olingan CaF₂ uchun C_{Sr} ning chuqurlik h ga bog'liqlik grafigi keltirilgan.



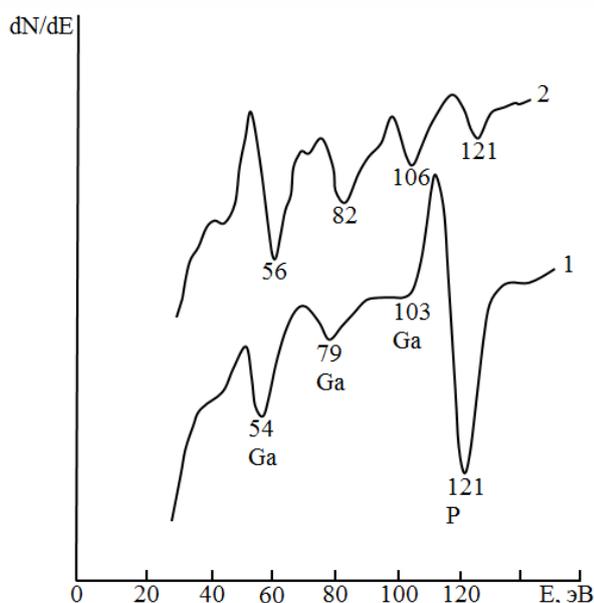
9-rasm. E₀ = 1 keV energiyali D = 6 · 10¹⁶ sm⁻² dozadagi Sr⁺ ionlari bilan implantatsiya qilingan CaF₂ da Sr atomlari konsentratsiyasining chuqurlik bo'yicha tarqalishiga qizdirishning ta'siri.

Har bir haroratda 30 daqiqa davomida qizdirildi. Qizdirishdan oldin implantatsiya qilingan atomlarning ko'p qismi yuzada va 40–45 Å chuqurlikgacha yuzaga yaqin sohada joylashishini ko'rishimiz mumkin. Shuning uchun barcha Sr atomlari matritsa atomlari bilan kimyoviy bog'ga kirishmaydi. T=300 K haroratgacha Sr atomlarining tarqalish profillari sezilarli o'zgar olmaydi. T=700 K da qizdirish sirtidagi Sr atomlari konsentratsiyasining biroz oshishiga olib keldi, bu esa bog'lanmagan Sr atomlarining sirtiga diffuziyasi bilan bog'liq.

T=900 K da barcha Sr atomlari matritsa atomlari bilan kimyoviy bog'ga kirishadi va epitaksial manokristall plyonka hosil bo'ladi. Yuzaning taxminiy tarkibi $\text{Ca}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{F}_2$ ko'rinishda bo'ladi. Chuqurlik ortib borishi bilan Sr konsentratsiyasi monoton kamayadi, Ga esa ortadi. $d \approx 75\text{--}80$ Å da tarkibda Sr miqdori 0 ga yaqinlashadi. $\text{Ca}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{F}_2$ strukturaning "a" qiymati GaAs plyonkasining "a" qiymatiga yaqinlashib, $\sim 5,71$ Å ni tashkil qiladi.

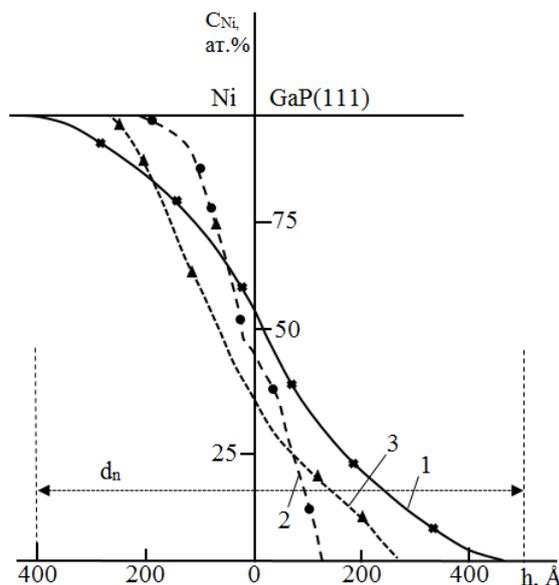
“Nanokontaktlar, tarkibi va fizik xususiyatlari o'zgaruvchan yuzalar, ko'p qatlamli geteroepitaksial sistemalar olish uchun ion va elektron bombardirovkani qo'llashning istiqbollari” deb nomlangan to'rtinchi bobda quyidagi tadqiqot natijalari keltirilgan: GaP(111) yuzasida nanokontaktlar olishda ion bombardirovka usulidan foydalanish; kichik energiyali elektronlar bombardirovkasining GaP(111) yuza tarkibi va tuzilishiga ta'siri; turli xil ta'sirlar GaP ning hajmiy (ρ_v) va sirtiy solishtirma qarshiliklariga (ρ_c) ta'siri; arsenid asosida $A^{III}B^V$ tipidagi ko'p qatlamli nanoo'lchamli geteroepitaksial sistemalar olish va ularning qo'llanilish istiqbollari.

Tadqiqot obyekti sifatida monokristall GaP(111) namunasini tanlab oldik. Ushbu namuna barcha texnologik jarayonlar (qizdirish, Ni atomlarini o'tqazish, ion bombardimon qilish) olib boriladigan o'ta yuqori vakuumli ($P=10^{-7}$ Pa) universal qurilmaga o'rnatildi. GaP(111) yuzasida o'ta yupqa kontaktlar olish uchun Ar^+ ionlari bilan oldindan bombardimon qilindi.



10-rasm. GaP(111) ning $D=2 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-2}$ dozada $E_0=2 \text{ keV}$ energiyali Ar^+ ionlari bilan bombardirovkadan oldingi (1) va keyingi (2) oje-spektrlari.

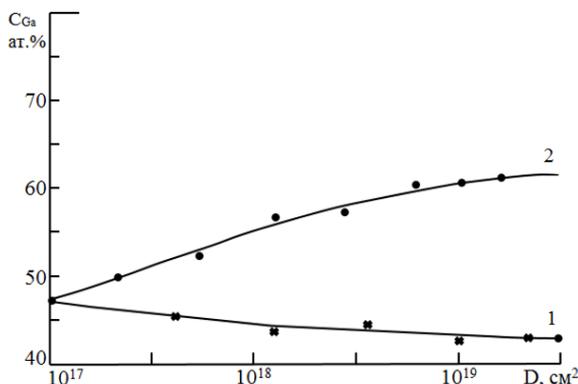
Tadqiqot oje-elektron spektroskopiya (OES) va ion bombardimon qilish usullaridan foydalanib olib borildi. GaP(111) namunasini ion bombardimon qilishdan oldin $P \approx 10^{-7}$ Pa vakuumda $T=900$ K haroratda ~ 4 soat davomida termik tozalandi. 10-rasmda toza GaP(111) va $D=D_n=2 \cdot 10^{17}$ sm^{-2} dozada $E_0=2$ keV energiyali Ar^+ ionlari bilan yuzasiga perpendikulyar bombardimon qilingan GaP ning oje-spektrlari keltirilgan.



11-rasm. Ni–GaP(111) sistemasi uchun Ni atomlarining chuqurlik bo‘yicha tarqalish profillari: 1–toza GaP(111); 2– $D=2 \cdot 10^{17}$ sm^{-2} dozada $E_0=2$ keV energiyali Ar^+ ionlari bilan bombardimon qilingan GaP(111); 3–ion–bombardimon qilingan namuna $T=850$ K qizdirilgandan keyin.

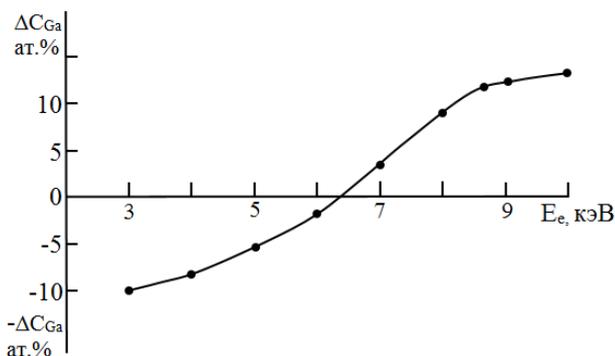
Ion bombardirovkadan keyin P ning oje-piklari keskin kamayib, Ga ning piklari intensivligi esa 2 va undan ko‘p martagacha ortib ketishini ko‘rishimiz mumkin. Bunda GaP(111) yuzasida asosan Ga bilan qoplanadi, yani GaP ning yuzasi metallashadi. 11-rasmda toza (1) va ion bombardimon qilingan GaP ning $T=850$ K ga 30 minut davomida qizdirishdan oldin (2) va keyin Ni atomlarining chuqurlik bo‘yicha tarqalish profillari keltirilgan. Toza GaP da Ni $\sim 400\text{--}450$ Å, ion-bombardimon qilingan namunada esa $\sim 100\text{--}120$ Å chuqurlikgacha kirib borishini ko‘rishimiz mumkin. Sistemani $T=850$ K qizdirgandan keyin Ni ning kirish chuqurligi $200\text{--}250$ Å gacha ortdi, kontaktlash qatlamining d_n to‘liq qalinligi $\sim 350\text{--}370$ Å ni tashkil qildi (Ni – toza GaP sistemasi uchun $d_n \approx 750\text{--}800$ Å). Barcha hollarda, d_n qalinligidan qa‘tiy nazar, kontakt soha solishtirma elektr qarshilikning qiymati $\sim (5\text{--}8) \cdot 10^{-4}$ $\text{Om} \cdot \text{sm}$ ni tashkil qiladi. Shunday qilib, ushbu ishda GaP(111) namunasini Ar^+ ionlari bilan oldindan bombardimon qilish ≤ 300 Å qalinlikdagi o‘ta yupqa omik kontaktlarni olish imkonini berishi aniqlandi. Hozirda elektron, optik, emission, elektrofizik xususiyatlar va turli ta’sirlarning namuna yuzasining tarkibi va strukturasi ta’siri intensiv o‘rganilmoqda. Elektron bombardirovka energiyasi 3 dan 10 keV gacha bo‘lgan elektronlarning dozasi $\sim 10^{17}\text{--}10^{20}$ sm^{-2} oraliqda o‘zgartirgan holda olib borildi. Tok zichligi $j \sim 5 \cdot 10^{16}$ el/sm^{-2} ni tashkil qildi. $D=10^{18}$ sm^{-2} gacha GaP ning sirt

tarkibi va tuzilishida sezilarli o'zgarish kuzatilmadi. 12-rasmda 3 va 10 keV energiyali elektronlar bilan bombardimon qilingan GaP uchun galliy atomlari sirt konsentratsiyasining C_{Ga} nurlanish dozasiga D bog'liqlik grafigi keltirilgn. Elektronlar energiyasi $E_e=3$ keV va dozasi $D=10^{17}-10^{19}$ sm^{-2} oraliqda bo'lganida galliyning yuzidagi konsentratsiyasi 8–10 at.% ga monoton kamayadi, ya'ni yuza P atomlari bilan boyiydi. $E_e=10$ keV da dozaning 10^{17} dan $5 \cdot 10^{19}$ sm^{-2} gacha orttirilsa C_{Ga} 12–15 at.% ga ortadi.



12-rasm. Turli energiyali elektronlar bilan bombardimon qilingan GaP uchun yuzadagi Ga atomlari konsentratsiyasining elektronlar nurlanish dozasi bog'liqlik grafigi; elektronlar energiyasi, keV: 1 – 3; 2 – 10.

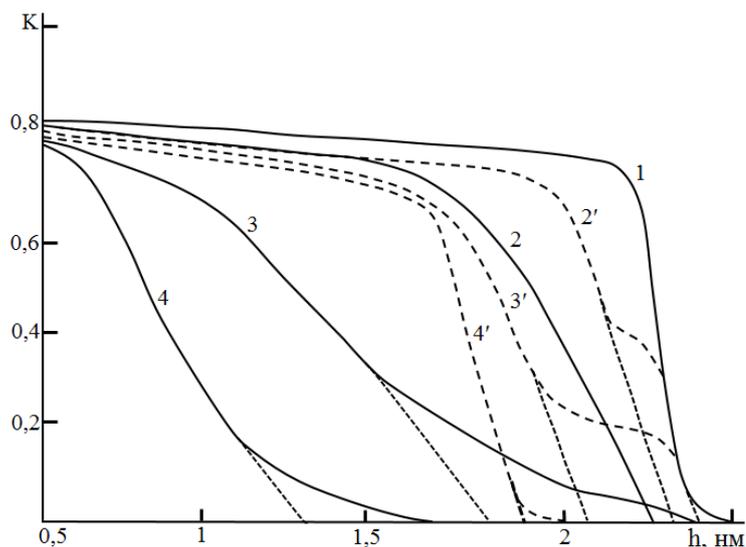
13-rasmda galliyning nisbiy yuzaviy konsentratsiyasining ΔC_{Ga} $D=D_n$ dagi $E_e=3-10$ keV oraliqdagi elektronlar energiyasiga bog'liqlik grafigi keltirilgan. $E_e=6-7$ keV oraliqda ΔC_{Ga} egri chizig'i 0 dan o'tadi. $E_e=9$ keV dan boshlab ΔC_{Ga} ning o'zgarish tezligi sekinlashadi. Elektron bombardirovka jarayonida GaP tarkibiy qismlarga ajraladi, GaP ning yuza va yuza osti sohalarida tartibsizlanish kuzatiladi. Biz tartibsizlanishni baholash uchun $E_p=800$ eV energiyali noelastik qaytgan elektronlar koeffitsiyentining η tushish burchagiga bog'liqlik grafigidan foydalandik. Bunda noelastik qaytgan elektronlarning chiqish chuqurligi $\sim 100-120$ Å ni tashkil qildi.



13-rasm. GaP uchun ΔC_{Ga} ning $D = D_n$ dagi $E_e = 3-10$ keV oraliqdagi elektronlar energiyasiga bog'liqlik grafigi.

Natijalardan ko'rinadiki, bombardirovka qilinmagan GaP(111)ning $\eta(\varphi)$ grafigi turli kristallografik tekisliklardan noelastik qaytgan elektronlarning maksimumlarini aniq ko'rishimiz mumkin. $E_0=3$ keV energiyali elektronlar bilan

nurlatilgandan keyin asosiy maksimumlarning intensivligi kamaydi va yutilish o'zgaradi. Bundan ushbu qatlamlarning to'liq tartibsizlanmaganligini ko'rishimiz mumkin. $E_e=10$ keV $\eta(\varphi)$ egri chizig'idagi maksimumlar to'liq yo'qoladi, bu amorflashgan plyonkalarga xosdir. $0, 10^{15}, 5 \cdot 10^5, 6 \cdot 10^{16}$ sm^{-2} dozadagi $E_0=1$ keV energiyali In^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan GaP(111) ning taqiqlangan zona kengligining qizdirishdan oldin va undan keyin o'zgarishi fotonlar energiyasining $h\nu$ yutilish koeffitsiyentiga K bog'liqlik grafigidan aniqlandi (14-rasm).



14-rasm. Turli dozalarda $E_0 = 1$ keV energiyali In^+ ionlari bilan implantatsiya qilingan (1–4 egri chiziqlar) va $T=850$ K haroratda 40 min davomida qizdirilgan ($2' - 4'$ egri chiziqlar) GaP(111) uchun K ning $h\nu$ ga bog'liqlik grafigi: 1– $D=0$ (toza GaP); 2, $2' - P=10^{15}$ sm^{-2} ; 3, $3' - D=8 \cdot 10^{15}$ sm^{-2} ; 4, $4' - D=16 \cdot 10^{16}$ sm^{-2} .

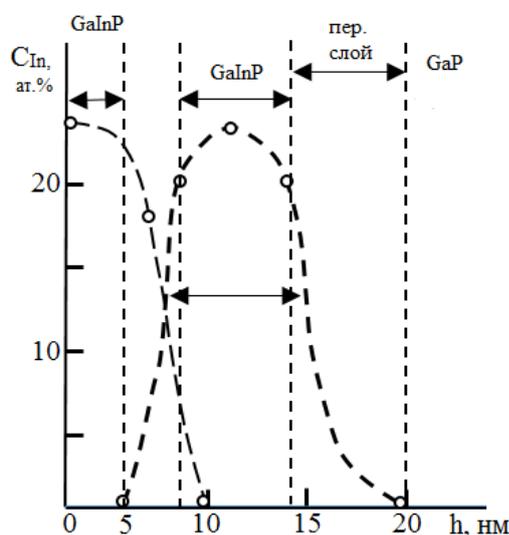
Dozaning 0 dan $6 \cdot 10^{16}$ sm^{-2} gacha orttirsak, E_g 2,36 eV dan $\sim 1,2$ eV gacha kamaydi. Ushbu natijalar ion-legirlangan qatlamlarning nostexiometrik tarkibga ega bo'lib qolishi va yarimo'tkazgich xususiyatlarga ega bo'lishini ko'rsatadi. Qizdirishdan keyin ushbu sistemalarda nanokristall fazolar va $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ tipidagi plyonkalar ($2' - 4'$ egri chiziqlar) hosil bo'ldi. Nanokristall fazolarda K ning kamayishi h ning 2 ta qiymatida kuzatildi. Birinchi kamayish GaP ning GaInP nanokristalli bilan qoplangan, ikkinchisi esa qoplanmagan qismlarida yorug'likning yutilishi natijasida yuzaga keldi. Egri chiziqlarning keskin kamaygan qismlaridan $h\nu$ o'qiga o'tkazilgan ekstrapolyatsiya orqali o'rganilayotgan namunaning E_g qiymatini aniqlash mumkin. GaP(111) uchun E_g ning qiymati taxminan 2,36 eV ni (1–egri chiziq), $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ plyonkasi uchun $\sim 1,85$ eV ni ($4'$ –egri chiziq), $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ nanokristall fazolari uchun esa $\sim 2,3$ va $\sim 2,1$ eV ga teng ekanligini ko'rishimiz mumkin. Biz ushbu qurilmada $P \sim 10^{-7}$ Pa bosim ostida GaP ning ρ_v va ρ_c ga ion-implantatsiya, elektron bombardirovka va lazerli ishlov berishning ta'sirini ham o'rgandik. Ion-implantatsiya $D=D_n=8 \cdot 10^{16}$ sm^{-2} dozadagi $E_0=2$ keV energiyali Ar^+ va In^+ ionlari bilan elektron bombardirovka $D_e=D_n=5 \cdot 10^{19}$ sm^{-2} dozadagi $E_e=5$ keV elektronlar bilan, lazerli qizdirish to'lqin uzunligi 1,06 mkm, energiya zichligi $W=1,8$ Dj/ sm^{-2} bo'lgan LTI–403 tipidagi qattiq jisimli implusli lazeri bilan olib borildi. Ushbu natijalar 4-jadvalda keltirilgan.

Turli ta'sirlar GaP/Mo ning ρ_v va ρ_c qiymatlariga ta'siri

Ta'sir qilish turlari ρ , Om·sm	GaP	Ar ⁺ →GaP $E_0 = 2 \text{ keV}$ $D_H = 8 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$	In ⁺ →GaP $E_0 = 2 \text{ keV}$ $D_H = 8 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$	$E_e = 5 \text{ keV}$ $D_H = 5 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-2}$	Lazer nurlanishi $W = 1,8 \text{ Dj/sm}^2$
ρ_c	2,6	$5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
ρ_v	2,8	2,4	2,5	2,1	$5 \cdot 10^{-1}$

4-jadvalda keltirilgan natijalarni qisqacha tahlil qilib o'tamiz.

$D=D_n$ dozadagi $E_0=2 \text{ keV}$ energiyali Ar⁺ ionlari bilan bombardirovka qilganda tarkib va tuzilishdagi asosiy o'zgarishlar 70–80 Å qalinlikgacha kuzatiladi. Bunda yuza qatlamlarida Ga konsentratsiyasi 60–65 at.% gacha ortadi va bu qatlamlar kuchli tartibsizlashadi. Bu yuza qatlamlari ρ qiymatining sezilarli kamayishiga olib keladi. $h \geq 100 - 150 \text{ Å}$ chuqurlikda GaP ning tarkibi va tuzilishi deyarli o'zgarmaydi, shuning uchun uning hajmiy solishtirma elektr qarshiligi sezilarli o'zgarmaydi. $D=D_n$ dozadagi $E_e=10 \text{ keV}$ energiyali elektron bombardirovkaga Ga ning yuzaviy konsentratsiyasi 12–15 at.% ga ortadi (13-rasm). E_e ning o'zgarishi 20–25 Å chuqurlikgacha tarkib va tuzilishning o'zgarishiga olib keladi. Bunda ρ_c $3 \cdot 10^{-2} \text{ Om}\cdot\text{sm}$ ga kamayadi. Lazerli ishlov berish natijasida ρ_c va ρ_v ning qiymati 10 martadan kamayadi. GaP plyonkasi hajmining asosiy qismi o'zgaradi, ya'ni lazer nurlarining kirib borish chuqurligi $\leq 5-10 \text{ keV}$ energiyali ionlar va elektronlarning kirish chuqurligidan katta bo'lishini ko'rish mumkin.

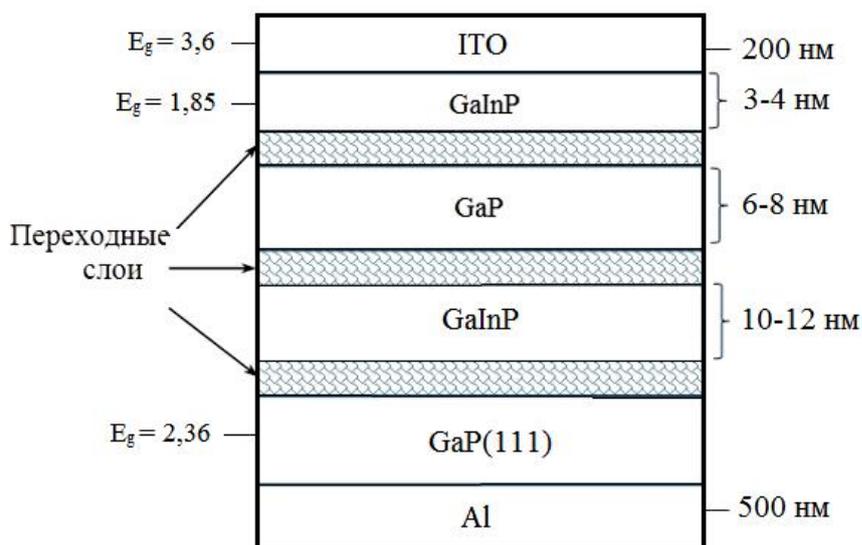


15-rasm. $D=10^{17} \text{ sm}^{-2}$ dozadagi $E_0=10 \text{ keV}$ va $E_0=1 \text{ keV}$ energiyali In⁺ ionlari bilan implantatsiya qilingan GaP uchun In ning tarqalish konsentratsion profillarining chuqurlikka bog'liqlik grafi. Har bir implantatsiyadan keyin 30–40 daqiqa davomida $T \approx 950 \text{ K}$ qizdirilgan va $T=1100 \text{ K}$ ga implusli qizdirilgan.

Ikki qatlamli $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}/\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}(111)$ nanoplyonkali sistemalarni olish uchun GaP(111)ni to'yinish dozasidagi In⁺ ionlari bilan implantatsiya qilinadi: avval yuqori energiyali keyin esa kichik energiyali ionlar bilan. Har bir

implantatsiya qilgandan keyin optimal haroratga ($T = 950 \text{ K}$) 30-40 min davomida qizdirildi. Qizdirib 10 va 1 keV energiyali In^+ ionlari bilan implantatsiya qilib olingan GaP uchun In konsentratsiyasining chuqurlikka bog'liqlik grafigini tadqiq qilib, yuzada va $\sim 8-16 \text{ nm}$ chuqurlikda In konsentratsiyasi $\sim 20-22 \text{ at.}\%$ ni tashkil qilishi aniqlandi, ya'ni ushbu qatlamlarda $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ tipidagi bog'lar hosil bo'ladi (15-rasm). $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}$ va GaP qatlamlari orasida 5-7 nm qalinlikda, $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4} - \text{GaP}$ va GaP/ $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}$ chegaralarida esa 6-8 nm qalinlikda o'tish qatlamlari hosil bo'ldi. $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}/\text{GaP}$ yuzasi morfologiyasini PEM tasviri va DBE (TED) rasmlarini tahlil qilib hosil bo'lgan yuzalar silliq va shaffof ekanligi aniqlandi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, ikki qatlamli sistemalar olish uchun ionlar energiyasi yuqori va kichik energiyalar orasida, 20 keV dan kam bo'lmasligi kerak.

Ushbu ma'lumotlar asosida tandem ko'p qatlamli energiya o'zgartirgichlarini yasash mumkin. 16-rasmda tandem quyosh elementi sxematik joylashishi keltirilgan. Yuqori qatlamlarda ITO ($\text{In}_2\text{O}_3-\text{SnO}_2$) qatlami ko'proq yorug'lik yutilishini ta'minlash uchun ushbu geterosistemalarda joylashadi, pastda esa yorug'lik oqimini qaytarish uchun Al qatlami joylashgan.



16-rasm. $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}/\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}$ ikki qatlamli nanoplyonka sistemasining sxematik ko'rinishi.

Olingan sturukturalarni nanoo'lchamli IS, tranzistor, opto- va fotoelektron qurilmalarni ishlab chiqarishda foydalanish mumkin.

XULOSA

1. Qizdirish bilan birga In^+ ionlari implantatsiya usulidan foydalanib GaP(111) yuzasida olingan GaInP nanofaz va nanoplyonkasining energetik soha parametrlari va valent sohadagi zichlik holati aniqlandi. GaInP da qalinligi $h \approx 30 - 35 \text{ \AA}$, yuzaviy diametri $d \leq 30 - 35 \text{ \AA}$ bo'lgan kvant o'lchamli effektlar hosil bo'lishi aniqlandi. GaP(111) ga In^+ ionlari implantatsiyasidan keyin In atomlari GaP ga kirib borib GaP ning tashkil qiluvchilarining parchalanishiga va yuza osti qatlamlarida tartibsizliklarga olib keldi.

2. $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ yupqa plyonkalari epitaksial ravishda o'sib borishi hamda GaP va GaInP chegarasidagi kristallografik orentatsiyasiga (yo'nalishga) to'liq mos kelishi aniqlandi. Birinchi marta qizib turgan GaP ni Al^+ va In^+ ionlari bilan implantatsiya qilish usuli bilan olingan $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ va $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ nanoplyonkalari va nanofazalari uchun valent elektronlarning holat zichligi va energetik zona parametrlari haqidagi ma'lumotlar aniqlandi.

3. CaF_2 ni Sr^+ ionlari bilan implantatsiya qilish va keyingi qizdirish natijasida CaF_2 yuzasida GaAs/ CaF_2 sistemasi uchun ~ 80 Å qalinlikdagi panjara parametrlari monoton o'zgaruvchi $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$ muvofiqlashtiruvchi qatlami olindi.

4. GaP ning $D=D_n$ dozada $E_0=2$ keV energiyali Ar^+ ionlari bilan bombardirovka qilish natijasida 40 – 45 Å qalinlikdagi yuza qatlamining Ga atomlari bilan boyishi aniqlandi. GaP yuzasida olingan ushbu qatlamlarning kontakt hosil qiluvchi metall atomlarining diffuziya chuqurligi keskin (5–6 martagacha) kamayib ketadi va o'tayupqa (≤ 300 Å) omik kontaktlar olish imkonini beradi.

5. Yuzadagi Ga va P atomlarining konsentratsiyasi o'zgarishining va ularning chuqurlik bo'yicha tarqalish profillarining $E_e=3-10$ keV oraliqdagi elektronlar energiyasi va dozasiga bog'liqligi aniqlandi. $E_e=5-6$ keV da GaP ning yuza sohasi P atomlariga boyishini ko'rishimiz mumkin. E_0 ortishi bilan yuzada atomlar tarkibi o'zgarishining asosiy mexanizmlari aniqlandi.

6. Ion va elektron bombardirovka hamda lazerli nurlatish ta'sirida yuza va yuza osti qatlamlarining elektrofizik xususiyatlari o'rganildi. Xususan, ushbu barcha ta'sirlar ρ_c ni 100–150 martaga kamayishiga olib keldi. Bunda ρ_v ning qiymati sezilarli o'zgarmadi. Faqat lazerli qizdirish natijasida ρ_v 5-6 martagacha kamayadi. Tashqi ta'sirlar natijasida ρ_c va ρ_v ning asosiy o'zgarish mexanizmlari aniqlandi.

7. In^+ ionlarining energiyasini 1–10 keV oraliqda o'zgartirib va qizdirishni birgalikda qo'llab GaInP/GaP/GaInP/GaP tipidagi ko'p qatlamli sistemalar olindi. Ushbu qatlamlarning qalinligi, tuzilishi va taqiqlangan zona kengligi aniqlandi. Ko'p qatlamli energiya o'zgartirgichlarini olish imkoniyatlari ko'rsatildi. GaInP/GaP/GaInP/GaP sistemasining shartli energetik soha diagrammasi tuzildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/31.03.2021.FM.70.06
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ
КАРШИНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

ШИРИНОВ ГАНЖИМУРОД МАМИР УГЛИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ТРЕХ КОМПОНЕНТНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ,
СОЗДАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ И ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ
ОБЛАСТИ GaP МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

01.04.04 – Физическая электроника

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

Карши – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрировано в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за B2022.3.PhD/FM766.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.qarshidu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:	Донаев Сардор Бурханович доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич доктор физико-математических наук, профессор Рахмонов Ганибой Таджиевич доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	Ургенчский государственный университет

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2025 г. в _____ часов на заседании Научного совета PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 по присуждению ученых степеней при Каршинском государственном университете (Адрес: 180119, г. Карши, ул. Кучабаг, 17. Тел.: (+998 75) 221-21-04, факс: (+998 75) 220-02-10; e-mail: kasu_info@edu.uz). Актовый зал Каршинского государственного университета.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Каршинском государственном университете (зарегистрирована за № ____). (Адрес: 180119, г. Карши, ул. Кучабаг, 17. Тел.: (+998 75) 221-21-04).

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 2025 года
(реестр протокола рассылки № ____ от «_____» _____ 2025 года).

М.Т. Нормурадов
председатель Научного совета
по присуждению ученых степеней,
доктор физика-математический
наук, профессор

Г.Х. Аллаярова
Научный секретарь Научного
совета присуждающего научные
степени, доктор философии по
физике и математике, доцент

А.К. Ташатов
Председатель научного семинара,
при Научном совете
присуждающего научные степени
доктор физика-математический
наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире всё большее значение приобретает получение многослойных систем и наноразмерных структур на основе бинарных полупроводниковых материалов с соединениями $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$, а также разработка на их основе нано- и оптоэлектронных устройств. Во всём мире ведутся научные исследования по созданию многослойных систем с такими структурами, как GaP, GaInP, AlGaInP, и изучению их физических свойств, что требует внедрения полученных результатов в практику. Это, в свою очередь, позволяет разрабатывать лазерные диоды, солнечные элементы, фотоэлектронные и оптоэлектронные устройства. В связи с этим особое внимание уделяется получению трёхкомпонентных твёрдых растворов соединений $Ga_{1-x}Al_xAs$ и $Ga_xIn_{1-x}P$, ширина запрещённой зоны которых может быть управляемой. Получение нанокластерных фаз, наноразмерных многослойных структур, тонких плёнок и гетероструктур на основе GaP и GaAs, а также исследование их состава, структуры, эмиссионных и оптических свойств, на сегодняшний день имеет важное значение в области физической электроники.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на изучение наноразмерных материалов, многокомпонентных и многослойных структурных систем. Эти исследования проводятся как в фундаментальном, так и в прикладном направлениях и служат созданию новых технологий для нанoeлектроники, оптоэлектроники, фотоэлектрики и других современных отраслей. Особенно важно, что в будущем производство современных устройств будет осуществляться через изучение механизмов формирования таких сложных структур, а также их физико-химических, электрических, оптических и эмиссионных свойств. В связи с этим создание новых направлений современной электронной технологии, их разработка, оценка практических возможностей и внедрение в промышленность являются одними из актуальных и приоритетных задач, стоящих сегодня перед научным сообществом. В частности, в настоящее время солнечная энергетика рассматривается на мировом энергетическом рынке как экологически чистый и возобновляемый источник. Особое внимание уделяется разработке и внедрению в практику инновационных решений в области высокоэффективных фотоэлектрических элементов, солнечных батарей и других источников энергии.

В нашей Республике внедрение инновационных технологий в экономику, повышение энергоэффективности и снижение потребления ресурсов определены как важные стратегические направления, и в этом направлении реализуются широкомасштабные мероприятия, достигнуты определённые результаты. В Стратегии инновационного развития Республики Узбекистан на 2022-2026 годы, в частности, обозначены задачи «...стимулировать спрос на инновации путём обеспечения комплексной системы от идеи до конечного потребителя в создании новых видов продукции и инновационных технологий»¹. В реализации этих задач, в том числе в области физической электроники,

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 6 июля 2021 года № PF-165.

особое внимание уделяется получению наноразмерных структур в поверхностных и приповерхностных слоях бинарных полупроводниковых материалов, глубокому изучению механизмов и закономерностей их формирования, а также созданию на их основе многослойных наноразмерных систем. Получение и исследование таких наноразмерных многослойных структур, обладающих сложными физическими свойствами, представляет не только научный интерес, но и имеет важное практическое значение для производства современных нанoeлектронных устройств. Тем не менее, в настоящее время особое значение приобретает получение наноразмерных фаз и многослойных структур на основе фосфида галлия (GaP) методами ионной имплантации и твёрдофазной эпитаксии, а также исследование их физико-химических свойств с целью достижения значимых научных результатов и разработки новых методов.

Данное диссертационное исследование в определённой степени способствует реализации задач, определённых в Указе Президента Республики Узбекистан от 29 октября 2020 года № PF-6097 «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года»², Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № PF-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»³, а также в других нормативно-правовых актах, касающихся данной научной деятельности.

Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике. Данное исследование было выполнено по II приоритетному направлению развития науки и технологий Республики Узбекистан – в областях «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» и III приоритетному направлению «Развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Физико-химические свойства многокомпонентных материалов на основе бинарных полупроводников интенсивно изучаются, в научных центрах, институтах и университетах ведущих стран мира.

В частности, хорошо изучены: состав, структура и свойства плёнок GaP и её трехкомпонентные соединения, полученные методом МЛЭ; возможности создания солнечных элементов на основе гетеропереходов GaP/Si; структура свойства многокомпонентных и многослойных наносистем на основе плёнок A^{III}B^V. Испанским ученым С. Пабло получены и изучены тандемные солнечные элементы на основе GaAsP. Показано что КПД тандемного солнечного элемента GaAsP/Si теоретически может достичь 41,9%.

Русские ученые А.А. Лазаренко, М.С. Соболев и др. В предложили методом МЛЭ поэтапное создание гетероструктур, содержащих слои GaPN и GaPAsN, на подложках Si.

Японские ученые Moon S.Y., Yonezu H., Furukawa Y., Wakahara A. показали, что использование прямозонных материалов GaP(As)N и InGaPN позволяет реализовать различные гетероструктуры с постоянной решетки, близкой к постоянной решетки кремния.

² Указ Президента Республики Узбекистан от 29 октября 2020 года № PF-6097.

³ Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № PF-60.

Немецкие ученые R. Saive и др. выявили сильное падение фотонапряжения на границе раздела GaP/Si. В целом эти данные показывают наличие барьера переноса заряда на границе между Si и GaP, вызванный неблагоприятным выравниванием полос является виновником плохой работы солнечного элемента с гетеропереходом GaP/Si. Русские ученые Малик А.И. и Грушка Г.Г. исследовали избыточно-туннельный ток в эпитаксиальных невырожденных p-n-переходах из GaP и Si. Обнаружили существенный экспериментальный факт – независимость наклона экспоненциальной вольтамперной характеристики (в координатах $\ln I-V$) от ширины области пространственного заряда, т.е. от уровня легирования *n*- и *p*-областей, что не объясняется существующими моделями. Х.В. Ченг и академиком Ж.И. Альферовом получены многослойные периодические гетероструктуры на основе GaAs и GaP, которые применяются в лазерах и в различных оптоэлектронных приборах. Им показано, что гетероструктуры с квантовыми точками и пленками позволяет управлять параметрами полупроводниковых кристаллов как ширина запрещенной зоны, эффективные массы и подвижности носителей заряда.

М.Т. Нормуродовым, Б.Е. Умирзаковым и их учениками методом ионной имплантации впервые получены наноструктуры с заданными физическими свойствами.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертационная работа. Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнены в рамках государственной научно-технической программы по прикладному проекту № AL-592102410 на тему «Исследование эффективной технологии и оборудования для кондиционирования при флотации минералов на основе межфазных микро- и нанопузырьковых агрегатов» (2022-2024 гг.).

Цель исследования заключается в получении наноразмерных структур и слоев на поверхности и в приповерхностной области монокристаллов GaP, комплексное исследование их состава, электронной и кристаллической структуры, эмиссионных, оптических и электрофизических свойств.

Задачи исследования:

определение влияния низкоэнергетической имплантации ионов In^+ на порядок, электронную структуру и физические свойства монокристалла GaP(111) и основные механизмы формирования нанопленок GaInP;

определение эмиссионных свойств трехкомпонентной нанопленки, сформированной на поверхности GaP в результате имплантации ионов низких энергий и последовательной закалки, электронной структуры, фото-и истинных вторичных электронных свойств, глубины выхода;

изучение возможности получения тонкого координационного слоя для формирования нанопленок типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ на поверхности CaF_2 , наноконтактов на поверхности GaP(111) методом ионной бомбардировки, а также выявление основных механизмов изменения состава поверхности в результате наблюдения

за влиянием электронной бомбардировки на состав и структуру поверхности GaP(111);

изучение влияния различных воздействий (ионной и электронной бомбардировки, лазерного излучения) на объемное (ρ_v) и поверхностное (ρ_c) удельное сопротивление GaP и возможность получения многослойных наноразмерных гетероэпитаксиальных систем типа A^{III}B^V на основе арсенида.

Объект исследования – монокристаллические образцы и пленки GaP.

Предметом исследования являлись закономерности и физические механизмы формирования нанокристаллов и нанопленок на поверхности GaP при ионной имплантации.

Методы исследований. Использовались методы электронная оже-спектроскопия (ЭОС), спектроскопия упруго-отраженных электронов (СУОЭ), спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС), дифракция быстрых электронов (ДБЭ) и растровая электронная микроскопия (РЭМ).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые на поверхность GaP(111) была выполнена имплантация ионов In⁺ с последующим отжигом, в результате чего образовались нанокристаллические фазы и плёнки Ga_{0,6}In_{0,4}P толщиной 30–35 Å. Установлено, что для нанофаз GaInP при толщине $h \approx 30-35$ Å и диаметре на поверхности $d \leq 20-35$ нм происходит расширение запрещённой зоны и проявляются квантово-размерные эффекты;

впервые были определены параметры плотности состояний валентных электронов и энергетических зон наноплёнок Ga_{0,6}Al_{0,4}P и Ga_{0,6}In_{0,4}P, а также установлено их эпитаксиальное выращивание;

впервые для системы GaAs/CaF₂ на поверхности CaF₂ были получены наноразмерные буферные слои Ca_{1-x}Sr_xF₂;

впервые было установлено, что при бомбардировке поверхности GaP ионами Ag⁺ образуется слой галлия толщиной 40-45 Å, на поверхность которого осаждаются атомы никеля, что позволяет формировать ультратонкие омические контакты;

впервые с помощью имплантации ионов In⁺ была создана двухслойная структура типа GaInP/GaP/GaInP/GaP, исследована её структура, определена ширина запрещённой зоны, а также построена энергетическая зонная диаграмма данной системы.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

предварительной бомбардировкой ионами Ag⁺ на поверхности GaP(111) получены ультратонкие омические контакты с толщиной ≤ 300 Å;

изучены влияние ионной и электронной бомбардировки, лазерного облучения на удельной сопротивленья поверхности ρ_c и объемы ρ_v GaP. Показано, что все эти воздействия приводит к уменьшению ρ_c до 100–150 раз. При этом значение ρ_v изменялась незначительно.

показана возможность получения тандемные многослойных преобразователей энергии типа GaInP/GaP/GaInP/GaP.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных методов электронной спектроскопии и диагностики поверхности высокого разрешения, проведением экспериментов в условиях сверхвысокого вакуума, хорошим соответствием результатов для чистых образцов с данными других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость: установлены закономерности формирования наноразмерных структур типа GaInP на поверхности GaP при имплантации ионов In^+ и Ag^+ в сочетании с отжигом выявлены основные механизмы изменения состава, электронной структуры, эмиссионных и оптических свойств при образовании трехкомпонентных слоев. Эти данные имеют важное значение для развития теории по формированию новых материалов с заданными физическими свойствами.

Практическая значимость: Установлено, что в GaInP толщиной $h \approx 30-35 \text{ \AA}$ с поверхностным диаметром $d \leq 0-25 \text{ нм}$ проявляется квантово-размерные эффекты. Определены зависимости изменения концентрации атомов Ga и P на поверхности и их профили распределения по глубине GaP от энергии и дозы электронов. Показано, что при $E_e \leq 5-6 \text{ кэВ}$ поверхностная область GaP обогащается атомами P, а при $E_e \geq 5-6 \text{ кэВ}$ – атомами Ga. Эти результаты очень важны при разработке новых ПДП и МДП – структур для приборов нано- и оптоэлектроника.

Внедрение результатов исследования в практику. На основании научных результатов, Исследование состава, структуры и физические свойства трех компонентных наноразмерных систем, созданных на поверхности и приповерхностной области GaP методом ионной имплантации:

Результаты получения буферного слоя $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$ наносистемы для системы GaAs/CaF₂ на поверхности CaF₂ были использованы при выполнении совместного практического проекта Узбекистана и Турции на тему «Интегрированная система с ферромагнитным нанокластерным кремнием для улавливания циркулирующих раковых клеток в микрожидкостных каналах», AL-202102215, выполненного в Ташкентском государственном техническом университете в 2022-2024 годах (справка Министерства высшего образования, науки и инноваций от 24 сентября 2024 года № 4/17-4/4-18162). В результате концентрация атомов Mn в объёме кремния увеличила концентрацию магнитных нанокластеров, достигнув кремния с магнитными свойствами, в четыре раза превышающими существующие, благодаря формированию магнитных нанокластеров из элементов Mn, Eu и Gd на поверхности кремния.

Использование метода имплантации ионов In^+ совместно с отжигом (лазерным нагревом) позволило получить нанокристаллическую фазу и плёнку $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ толщиной 30-35 \AA на поверхности GaP(111), которые были использованы АО «Фотон» для создания полупроводниковых элементов на основе данного материала (справка АО «Узэлтехсаноат» от 23 сентября 2024 года № 04-3/1598). Применение данных результатов исследования позволило сократить расход материалов, используемых при создании полупроводниковых элементов, в два раза.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований были обсуждены на 7 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации Опубликовано 18 научных работ, из них 6 статьи в научных изданиях, рекомендованных (PhD) ВАК Республики Узбекистан (в Республиканском масштабе, в научных журналах и Scopus по журналам в базе данных).

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 106 страницах текста, включая 61 рисунок и 7 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, описана степень изученности проблемы, приводится связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, приводится научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Состав, структура и свойства МЛЭ пленок GaP и трехкомпонентных пленок на их основе»** приведены краткий литературный обзор работ, посвященных: исследованию влияние низко-энергетической имплантации ионов In^+ на состав и электронной структуры монокристаллического GaP(111); изучению эмиссионных, опти-ческих и электрофизических свойств GaInP/GaP; эмиссионные свойства и электронная структура трехкомпонентных нанопленок формированных на поверхности GaP при низкоэнергетической ионной имплантации и последующего отжига; получению тонких согласующихся слоев на поверхности CaF_2 для формирования пленок $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$.

В конце главы приводятся выводы из обзора, цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава **«Методика экспериментальных исследований»** посвящена получению наноразмерных структур на поверхности и приповерхностной области монокристаллов и пленок GaP с использованием методов низкоэнергетической ионной бомбардировки и сверхвысоковакуумного напыления атомов с последующим отжигом (прогрев, лазерный отжиг, прогрев + лазерный отжиг). Исследования проводились с использованием методов ОЭС, ВИМС, СХПЭЭ, УФЭС, ДБЭ, РЭМ, АСМ, спектроскопии поглощения света и регистрации энергетических зависимостей коэффициентов ВЭЭ. Основные эксперименты проводились в универсальной СВВ установке ($P \approx 10^{-7}$ Па), где осуществлялись все технологические обработки (ионная имплантация, напыление атомов, отжиг) и исследования состава, структуры, оптических и эмиссионных свойств материалов.

В третьей главе **«Получение и изучения физических свойств трехкомпонентных наноструктур на основе монокристаллов GaP»** методом имплантации ионов Al^+ и In^+ и последующего отжига на поверхности GaP получены тонкие монокристаллические пленки GaAlP и GaInP. С использованием

методов оже-электронной спектроскопии, ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии, поглощения света и снятием энергетических и угловых зависимостей коэффициентов вторичной электронной эмиссии впервые определены основные параметры энергетических зон и эмиссионные параметры нанопленок $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}(111)$ и $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}(111)$ с толщиной $\leq 50 \text{ \AA}$.

На рис.1. а, и б приведены рентгенофазовые спектры хорошо очищенных монокристаллических пленок GaAs и GaP с толщиной $\sim 1000 \text{ \AA}$, выращенных на поверхности Mo(111). На вставке рисунков приведены фазовый и элементный состав (масс %) исследуемых пленок, рассчитанных по программе Match! Phase analysis Report.

Видно, что однородность и стехиометрический состав (масс.%) GaAs(111) и GaP(111) очень высокая. Постоянные решетки этих пленок составляют $5,5 \text{ \AA}$ и $5,6 \text{ \AA}$, соответственно и хорошо согласуются с литературными данным монокристаллов GaAs и GaP.

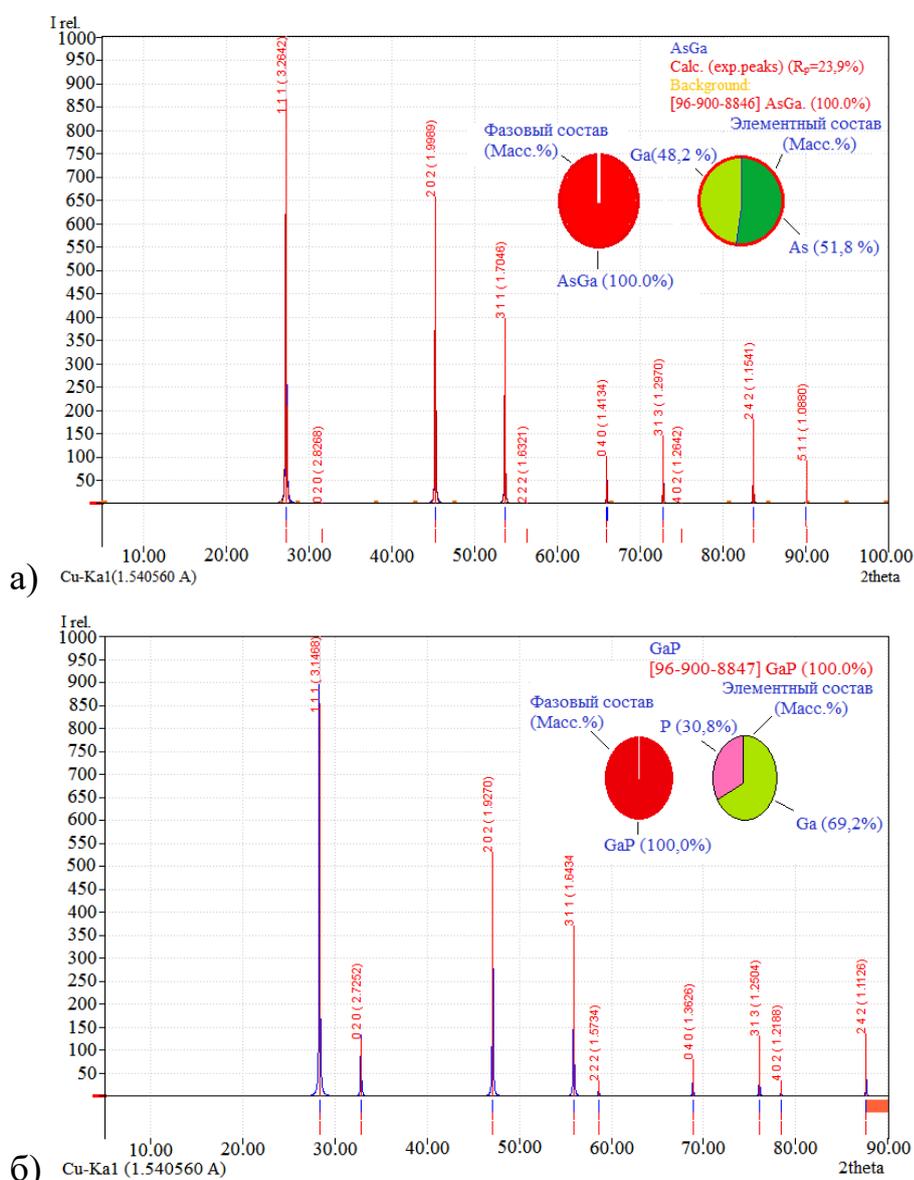


Рис.1. Рентгенограммы хорошо очищенных пленок: а-GaAs(111), б-GaP(111). На вставках диаграммы показывающий фазовый и элементный состав пленок.

Перед ионной имплантацией GaP(111) обезгаживался в условиях сверхвысокого вакуума ($P=10^{-7}$ Па) при $T=900$ К в течение ~ 4 ч.

На рис.2. приведены концентрационные профили распределения атомов In по глубине h' для GaP(111), имплантированного ионами In^+ с $E_0=1$ кэВ при $D=6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$, полученные до и после прогрева.

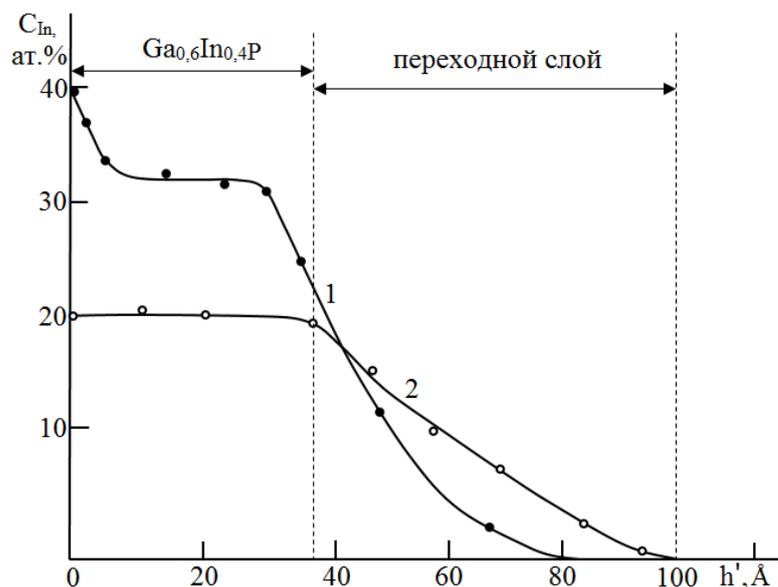


Рис.2. Профили распределения атомов In по глубине h' для GaP(111) имплантированного ионами In^+ с $E_0=1$ кэВ при $D=6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ до (кривая 1) и после прогрева при $T=950$ К (кривая 2).

Видно, что после прогрева при $T=950$ К значение C_{In} в на поверхности уменьшается до 20–22 ат.%, и она практически не меняется до глубина 0–40 Å. В интервале $h' \approx 40 - 100$ Å C_{In} монотонно уменьшается до 0. На рис.3. приведены АСМ – изображения поверхности GaP(111) с поверхностными пленками $Ga_{0.6}In_{0.4}P$, полученные методами МЛЭ ($h=50$ нм) и ионной имплантации ($h=0,35-0,4$ нм). Видно, что шероховатости поверхности, МЛЭ пленки составляет $\sim 4-5$ нм, а поверхность $Ga_{0.6}In_{0.4}P$, полученной ионной имплантацией в сочетании с прогревом имеет высокую гладкость и шероховатость составляет ~ 2 нм, (рис.3, б).

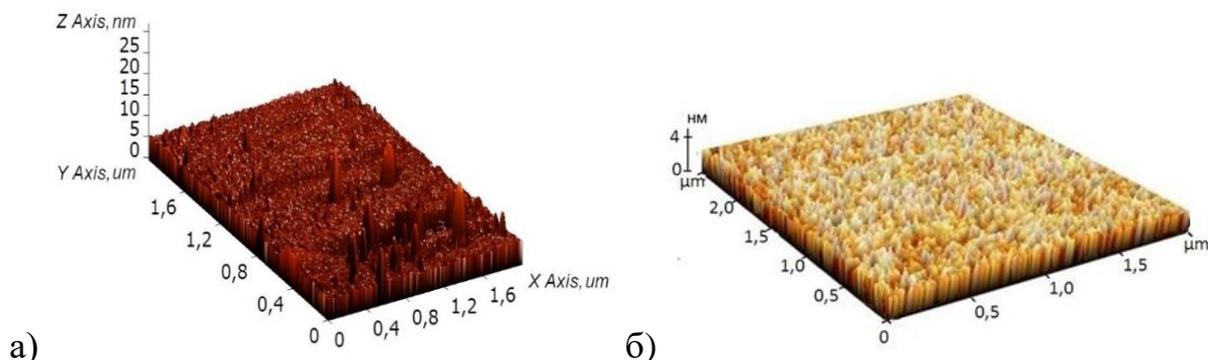


Рис.3. АСМ (а, б) – изображения поверхности GaP с поверхностными пленками $Ga_{0.6}In_{0.4}P$, полученные методами МЛЭ с $d \approx 50$ нм (а) и ионной имплантации в сочетании с прогревом с $d \approx 3,5-4$ нм (б).

На рис.4. приведены фотоэлектронные спектры GaP, имплантированного ионами In^+ с $E_0=1$ кэВ с дозами 10^{15} и $6 \cdot 10^{16}$ см^{-2} после каждого цикла ионной имплантации проводился прогрев при $T=950$ К в течение 40 мин. В первом случае образовались нанокристаллические фазы, с поверхностными диаметрами $d=15-20$ нм а во втором-пленка $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$. Эти спектры хорошо отражают распределения плотности состояния электронов валентной зоны. Видно, что на спектре чистого GaP обнаруживаются максимумы при энергиях связи $E_{\text{св}} \approx -0,8$ эВ; $-2,2$ эВ и 4 эВ, вероятно обусловленные возбуждением электронов из $4p$ и $4p+4s$ состояний Ga, а также гибридизацией $4s$ состояний Ga с $3s$ состояний P (рис.4, кривая 1). В случае пленки GaInP на спектре (рис.4, кривая 3) содержится интенсивные пики с $E_{\text{св}} = -1,2$; $-3,3$ и $-5,6$ эВ, по-видимому, связанных с возбуждением электронов из гибридизированных состояние электронов $4s(\text{Ga})+5p(\text{In})$, $4s(\text{Ga})+5p(\text{In})+3d(\text{P})$, и $4s(\text{Ga})+5s(\text{In})+3d(\text{P})$. На спектре GaP с нано-кристаллами $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ обнаруживаются некоторые особенности, характерные как для GaP, так и для $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ (рис.4, кривая 2).

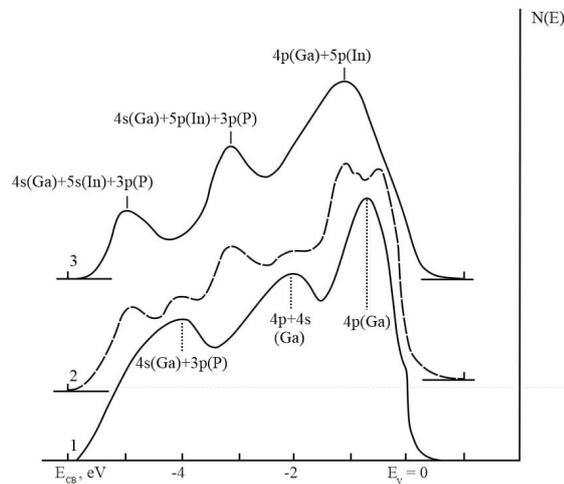


Рис.4. Фотоэлектронные спектры GaP, имплантированного ионами In^+ с $E_0=1$ кэВ при $D, \text{см}^{-2}$: 1 – 0; 2 – 10^{15} ; 3 – $6 \cdot 10^{16}$. После каждого цикла ионной имплантации проводился прогрев при $T=950$ К.

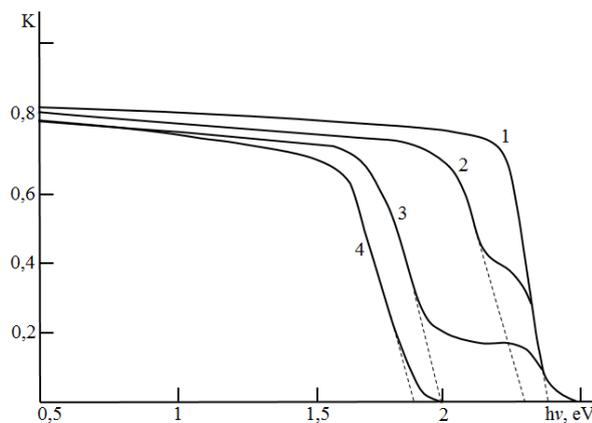


Рис.5. Спектры прохождения света через GaP(111) (кривая 1), GaP(111) с нанофазами с поверхностными диаметрами $d \approx 15-20$ нм (2) $d=25-30$ нм (3) и нанопленкой $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ (4).

Для оценки ширины запрещенной зоны этих образцов записывались спектры прохождения света (рис.5). Известно, что при средних дозах ($5 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) ионно-имплантированная поверхность состоит из двух фаз: ионно-легированной фазы и нелегированной участка полупроводника. В нашем случае при $D=10^{15} \text{ см}^{-2}$ средние поверхностные диаметры наночастиц составляло $\sim 15-20 \text{ нм}$, а расстояние между центрами фаз $\sim 50-60 \text{ нм}$. Из рис. 5 видно, что на всех зависимостях $K(h\nu)$ сначала с ростом $h\nu$ значение K практически не меняется, а затем резко уменьшается, до нуля. Экстраполяция, резко уменьшающая часть кривых к оси $h\nu$ дает значение E_g данного материала. Видно, что E_g для GaP(111) приблизительно равна 2,36 эВ, для пленки $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ – $\sim 1,85 \text{ эВ}$, а для нанокристаллической фазы $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ с $d=20 \text{ нм}$ – $\sim 2,3 \text{ эВ}$ и для $d=25-30 \text{ нм}$ – $\sim 2,0 \text{ эВ}$.

В таблице 1 приведены значения E_g и Θ для исследуемых образцов.

Таблица 1

Размеры (толщина h и поверхностный диаметр d) наноструктур, значения E_g и Θ наночастиц и пленок GaInP

Исследуемые образцы	$h, \text{ \AA}$	$d, \text{ нм}$	$E_g, \text{ эВ}$	$\Theta, \%$
GaP(111)	Монокристаллический образец		2,36	0
$\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}(111)$	30-35	15-20	2,3	30
	30-35	25-30	2,0	70
	30-35	Сплошная пленка	1,85	100

Из рис.5. и таблицы видно, что при одинаковых толщинах значения E_g для нанокристаллических фаз больше, чем для пленки. Эти результаты показывают, что в нанокристаллических фазах начиная с диаметра $\approx 25-30 \text{ нм}$ с уменьшением d значение E_g увеличивается, т.е. в них проявляется квантово-размерные эффекты.

В таблице 2 приведены зонно-энергетические, эмиссионные и оптические параметры исследуемых образцов.

Таблица 2

Основные параметры энергетических зон и эмиссионные характеристики GaP(111) и $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$

Исследуемые образцы	$\Phi, \text{ эВ}$	$E_g, \text{ эВ}$	$\chi, \text{ эВ}$	σ_m	$Y, (\text{при } h\nu = 10,8 \text{ эВ})$
GaP(111)	5,3	2,36	2,94	1,95	$6 \cdot 10^{-3}$
$\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$	5,5	1,85	3,65	1,7	$4 \cdot 10^{-3}$

где Φ – фотоэлектронная работа выхода, которая определяется по формуле: $\Phi = h\nu - \Delta E$, ΔE – ширины спектры фотоэлектронов. χ – сродство к электрону: $\chi = \Phi - E_g$. σ_m – максимальное значение σ , Y – квантовый выход фотоэлектронов.

На рисунке 6. приведены зависимости $\sigma_{800}(\varphi)$ для чистого GaP(111) и для GaP с пленкой GaInP с $d \approx 50 \text{ \AA}$, полученные методами ионной имплантации в сочетании с отжигом и МЛЭ, где σ_{800} – значение σ при $E_p = 800 \text{ эВ}$. Угол φ определялся относительно нормали образца.

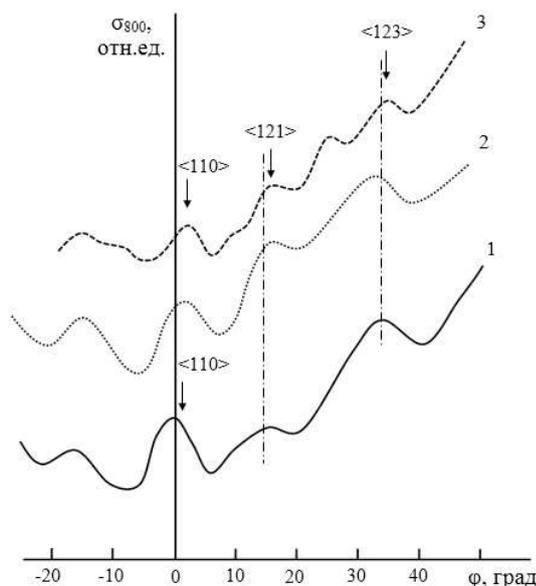


Рис.6. Зависимости $\sigma_{800}(\phi)$ для чистого GaP (кривая 1) и GaP с пленкой $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ с толщиной 50 Å, полученный методом ионной имплантации (кривая 2) и МЛЭ (кривая 3).

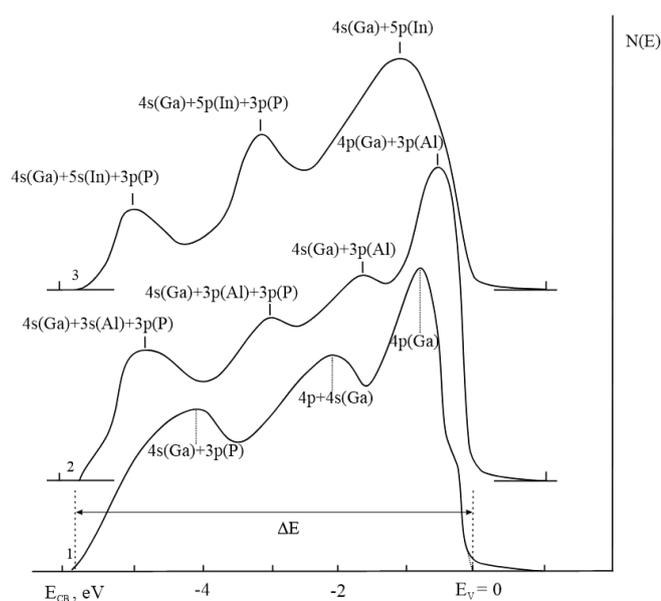


Рис.7. Спектры фотоэлектронов для: 1-GaP(111); 2-Ga_{0,6}Al_{0,4}P/GaP(111); 3-Ga_{0,6}In_{0,4}P/GaP(111), снятые при $h\nu \approx 10,8$ эВ.

Видно, что угловое положение максимумов GaP и пленки GaInP, полученная методом ионной бомбардировки хорошо совпадает друг с другом. Из этого можно сделать вывод, что при этом происходит строгий эпитаксиальный рост пленки $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$.

На рис.7. приведены спектры фотоэлектронов GaP(111) и GaP(111) с пленками $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ и $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$, снятых при $h\nu = 10,8$ эВ. Толщины пленок составляли $\sim 35\text{--}40$ Å и $\sim 40\text{--}50$ Å соответственно.

Видно, что плотности состояния электронов и энергетические параметры тонких трехкомпонентных пленок существенно отличается от таковых для

GaP. Возможные причины образования (интерпретация) пиков в спектрах исследуемых образцов и их параметры зон, а также эмиссионные и оптические характеристики приведены в таблице 3.

Таблица 3

Положение пиков на кэВ электронов и их интерпретация, зонно – энергетически и эмиссионные параметры

Объект	Толщина пленок, Å	Е _{св} , эВ	Интерпретация	Φ, эВ	κ, эВ	Е _г , эВ	σ _m	Y (hν = 10,8 эВ)
GaP(111)	Монокристалл	- 0,8 - 2,2 - 4,1	4p(Ga) 4p+4s(Ga) 4s(Ga)+3p(P)	6,1	3,74	2,36	2,36	6·10 ⁻³
GaAlP/ GaP(111)	35-40	- 0,6 - 1,7 - 3,1 - 4,8	4p(Ga)+3p(Al) 4s(Ga)+3p(Al) 4s(Ga)+3p(Al)+3p(P) 4s(Ga)+3s(Al)+3p(P)	6,1	3,72	2,38	2,38	4,8·10 ⁻³
GaInP/ GaP	40-50	-1,2 -3,3 -5,6	4s(Ga)+5p(In) 4s(Ga)+5p(In)+3p(P) 4s(Ga)+5s(In)+3p(P)	5,5	3,65	1,85	1,85	4·10 ⁻³

Из рис.7. и таблицы видно, что основные максимумы в спектре фотоэлектронов трехкомпонентных пленок обусловлены гибридизацией уровней валентных электронов GaP и внедренных атомов Al и In.

Границы раздела этих пленок, например, «полупроводник – диэлектрик», обладают уникальными, присущими только им физикохимическими свойствами, целенаправленное использование их позволяет создать приборы нового поколения.

При этом особые требования предъявляются идентичности кристаллической структуры и близости параметры решетки, а также близости температурного коэффициента расширения выращиваемых пленок. В случае заметного отличия параметров решетки пленок возникает необходимость создания согласующихся слоев.

Из рис.8. видно, что даже при комнатной температуре на границе раздела пленка – подложка происходят разложение соединений GaP(GaAs) и CaF₂ и взаимо диффузия атомов между ними.

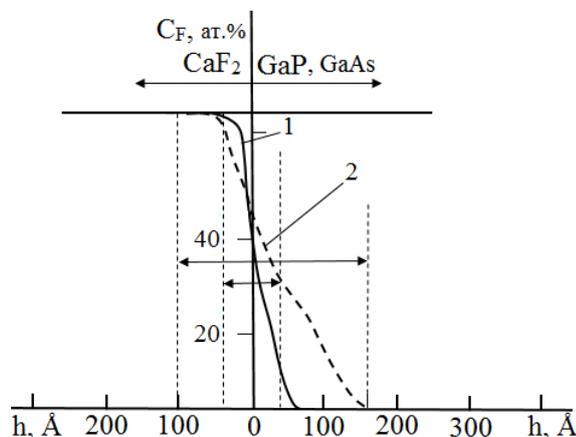


Рис.8. Профили распределения атомов F по глубине системы: 1-GaP/CaF₂(111), 2-GaAs/CaF₂

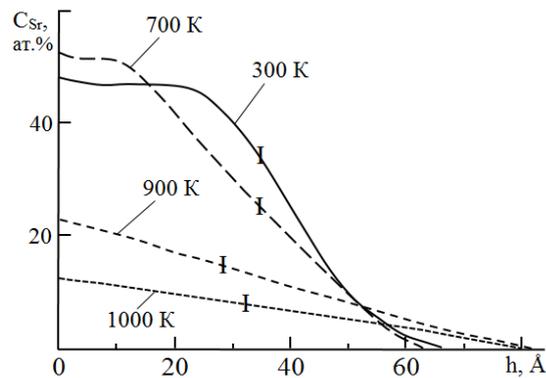


Рис.9. Влияние прогрева на зависимости концентрации атомов Sr по глубине CaF₂, имплантированного ионами Sr⁺ с E₀=1 кэВ при D=6·10¹⁶ см⁻².

До отжига толщина переходного слоя в случае GaP/CaF₂ составляет ~100 Å, а в случае GaAs/CaF₂ – ~250 Å. После прогрева при T=850–950 К ширина переходного слоя в случае GaP/CaF₂ увеличивается до ~150 Å, а в случае GaAs/CaF₂ – ~400 Å. В случае системы GaAs/CaF₂ возникает необходимость создания переходного согласующегося слоя. Для этого требуется почти монотонное увеличение «а» CaF₂ от ~5,46 Å до ~5,65 Å. Последнего можно добиться, используя метод ионной имплантации. Имплантация проводилась ионами Mg⁺, Ba⁺ и Sr⁺ с энергиями E₀=0,5–3 кэВ при дозе насыщения D=D_н.

Наиболее надежный переходной слой образовались в случае имплантации ионов Sr⁺. На рис.9. приведены зависимости C_{Sr} от глубины h, полученные после прогрева при различных температурах CaF₂, имплантированного ионами Sr⁺ с E₀=1 кэВ при D=6·10¹⁶ см⁻². Прогрев при каждой T составлял 30 мин. Видно, что до отжига большая часть имплантированных атомов располагается на поверхности и вблизи нее до глубины 40–45 Å. При этом не все атомы Sr входят в химическую связь с атомами матрицы. До температуры T=300 К профиль распределения атомов Sr заметно не меняется. Прогрев при T=700 К приводил к небольшому возрастанию концентрации атомов Sr на поверхности, что связано с диффузией несвязанных атомов Sr к поверхности.

При T=900 К все атомы Sr образуют связь с атомами матрицы и формируется эпитаксиальная монокристаллическая пленка. Примерный состав на поверхности имеет вид Ga_{0,6}Sr_{0,4}F₂. С ростом глубины концентрация Sr монотонно убывает, а Ca – увеличивается. При d≈75-80 Å содержание Sr приближается к нулю. Значение «а» для структура Ca_{0,6}Sr_{0,4}F₂ на поверхности составили ~ 5,71 Å, что близко к «а» пленки GaAs.

В четвертой главе «Перспектива применения ионной и электронной бомбардировки для получения: наноконтактов; поверхности с изменяющимся составом и физическими свойствами; многослойных гетероэпитаксиальных систем» приводятся результаты исследования применения ионной бомбардировки для получения наноконтактов на поверхности GaP(111); влияние низкоэнергетической электронной бомбардировки на состав и структуру поверхности GaP(111); влияние различных воздействий на объемное (ρ_v) и поверхностное (ρ_c) сопротивления GaP; получение многослойных наноразмерных

гетероэпитаксиальных систем на основе арсенида $A^{III}B^V$ и перспективы их применения.

Объектами исследования являлись монокристаллические образцы GaP(111). Эти образцы установлены на универсальный сверхвысоко-вакуумный ($P \approx 10^{-7}$ Па) прибор, где проводились все технологические операции (прогрев, напыление атомов Ni, ионная бомбардировка) и исследования состава и структуры исследуемых образцов. Для получения сверхтонких контактов поверхность образцов GaP(111) предварительно бомбардировалась ионами Ar^+ . Исследования проводились с использованием методов оже – электронной спектроскопии (ОЭС).

Перед ионной бомбардировкой образцы GaP(111) обезгаживались при температуре 900 К в течение ~ 4 часа в вакууме $P \approx 10^{-7}$ Па. На рис.10 приведены оже – спектры чистого GaP(111) и GaP, бомбардированного ионами Ar^+ с $E_0=2$ кэВ при дозе $D=D_n=2 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$ перпендикулярно к поверхности.

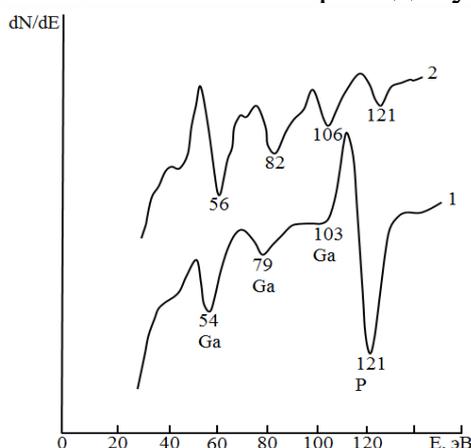


Рис.10. Оже – спектры GaP(111) до (1) и после бомбардировки ионами Ar^+ с $E_0 = 2$ кэВ при $D = 2 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$ (2)

Видно, что после ионной бомбардировки оже – пики P резко уменьшается, а интенсивности пиков Ga увеличиваются 2 и более раза. При этом поверхность GaP(111) преимущественно покрывается атомами Ga, т.е. происходит металлизация поверхности GaP.

На рис.11 приведены профили распределения Ni по глубине чистого (краевая 1), ионно-бомбардированного GaP до (2) и после прогрев при $T=800$ К в течение 30 мин (3). Видно, что глубина проникновения Ni в случае чистого GaP составляет $\sim 400-450$ Å, а в случае ионно-бомбардированного образца $\sim 100-120$ Å.

После прогрева при $T=850$ К этой системы глубина проникновения Ni увеличивается до $220-250$ Å, а толщина полного контактирующего слоя d_n составляет $\sim 350-370$ Å: (В случае Ni – чистый GaP значение $d_n \approx 750-800$ Å). Во всех случаях, независимо от толщины d_n , значение удельного сопротивления при контактной области составляю $\sim (5-8) \cdot 10^{-4}$ ом·см. Таким образом в данной работе установлено, что предварительная бомбардировки образца GaP(111) ионами Ar^+ позволяет получить ультратонкие омические контакты с толщиной ≤ 300 Å.

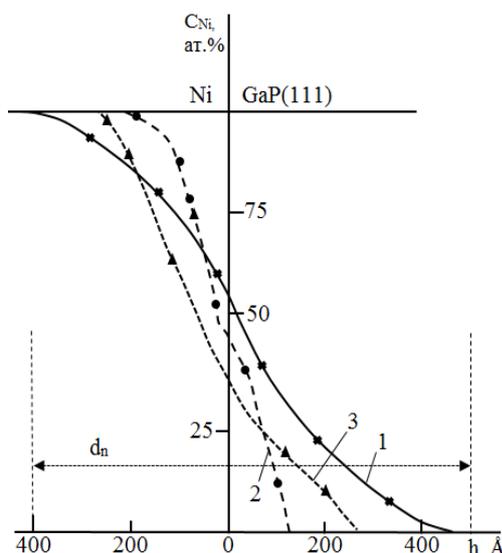


Рис.11. Профили распределения атомов Ni по глубине системы Ni – GaP(111): 1-чистый GaP(111), 2-GaP(111), после бомбардировки ионами Ar⁺ с E₀=2 кэВ при D=2·10¹⁷ см⁻²; 3-после прогрева при T=850 К ионно-бомбардированного образца.

Поэтому электронные, оптические, эмиссионные, электрофизические свойства и влияние различных воздействии на эти свойства в настоящее время интенсивно изучаются.

Электронная бомбардировка проводилась с энергиями от 3 и до 10 кэВ с вариацией дозы D в интервале ~ 10¹⁷–10²⁰ см⁻². Плотность тока j составляла ~ 5·10¹⁶ эл/см². До D≈10¹⁸ см⁻² не наблюдалась заметное изменение состава и структуры поверхности GaP. На рис.12 приведены зависимость поверхностной концентрации атомов галлия C_{Ga} от дозы облучения D для GaP бомбардированного электронами с энергиями 3 и 10 кэВ. Видно, что в случае E_e=3 кэВ поверхностная концентрация галлия C_{Ga} в интервале D=10¹⁷–10¹⁹ см⁻² монотонно уменьшается на 8–10 ат.%. т.е. поверхность обогащается атомами P. В случае E_e=10 кэВ с ростом дозы от 10¹⁷ до 5·10¹⁹ см⁻² C_{Ga} увеличивается на 12–15 ат.%.

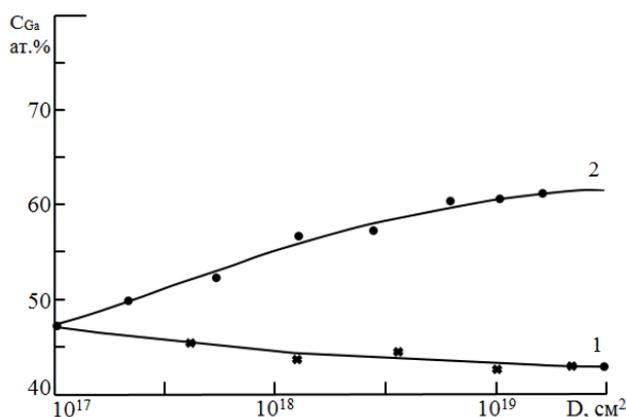


Рис.12. Зависимость поверхностной концентрации атомов Ga от дозы облучения электронов для GaP, бомбардированного электронами с энергией, кэВ 1-3; 2-10.

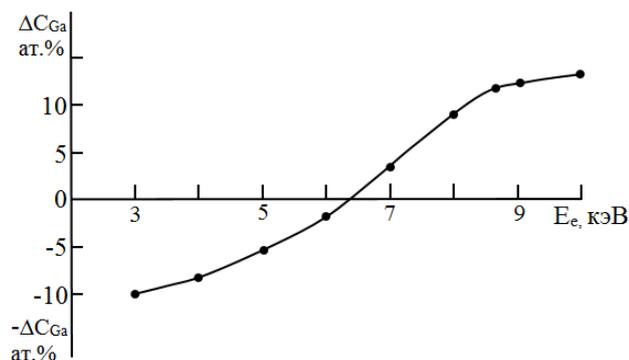


Рис.13. Зависимость ΔC_{Ga} от энергии электронов в интервал $E_e = 3 - 10$ кэВ для GaP при $D = D_n$

На рис.13 приведена зависимость относительной поверхностной концентрации ΔC_{Ga} от энергии E_e в интервале $E_e=3-10$ кэВ при $D=D_n$: Видно, что в области $E_e=6-7$ кэВ ΔC_{Ga} проходит через 0. Начиная с $E_e \approx 9$ кэВ скорость изменения ΔC_{Ga} замедляется. В процесса электронной бомбардировки происходит разложение GaP на составляющие, разупорядочение поверхности и приповерхностной области GaP. Нами для оценки степени разупорядочения записывались угловые зависимости коэффициента НУОЭ η при $E_p = 800$ эВ.

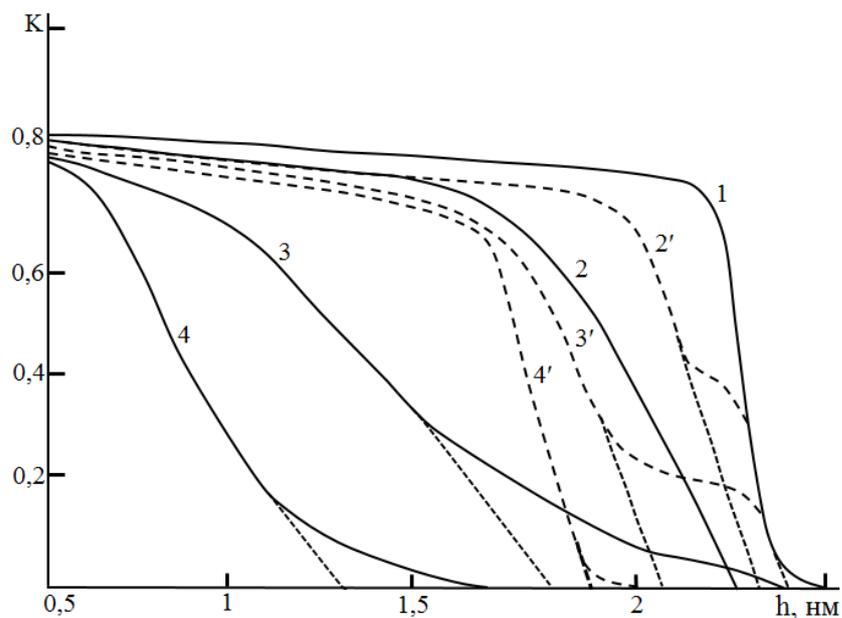


Рис.14. Зависимости K от $h\nu$ для GaP(111) имплантированных ионами In^+ при $E_0 = 1$ кэВ с разными дозами до (кривые 1 - 4) и после прогрева при $T = 850$ К в течение 40 мин (кривые 2' - 4') 1 - $D = 0$ (чистый GaP); 2; 2' - $D = 10^{15}$ $см^{-2}$; 3; 3' - $D = 8 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$; 4; 4' - $D = 16 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$.

При этом глубина выхода НУО электронов составляет $\sim 100-120$ Å. Результаты показаны что на зависимости $\eta(\varphi)$ необлученного GaP(111) обнаруживаются явно выраженные максимумы обусловленные неупругим отражением электронов из различных кристаллографических плоскостей. После облучение электронами с $E_0=3$ кэВ происходит существенное

уменьшение интенсивности и изменение поглощения основных максимумов. По видимому при этом не происходит полное разупорядочение слоев. В случае $E_e=10$ кэВ на кривых $\eta(\varphi)$ полностью сглаживаются максимумы что характерна для аморфизированных пленок.

Для оценки изменение значения ширины запрещенной зоны GaP(111), имплантированного ионами In^+ с $E_0 = 1$ кэВ разными дозами $0, 10^{15}, 5 \cdot 10^{15}, 6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ до и после прогрева снимались зависимости коэффициента поглощения K от энергии фотонов $h\nu$ (рис.14). С ростом дозы ионов от 0 до $6 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$, E_g уменьшается от $2,36$ эВ до $\sim 1,2$ эВ. Эти результаты показывают, что ионно – легированные слои имеют нестехиометрический состав, и обладают полупроводниковыми свойствами.

После прогрева этой системы формируется нанокристаллические фазы и пленки типа $Ga_{0,6}In_{0,4}P$ (кривые 2'-4'). В случае нанокристаллических фаз уменьшение K наблюдается в двух значениях $h\nu$. Первое уменьшение связано с поглощением света на участках покрытых с нанокристаллами $GaInP$, а второе – на участках GaP непокрытых нанокристаллами. Экстраполяция, резко уменьшающая часть кривых к оси $h\nu$ дает значение E_g данного материала. Видно, что E_g для GaP(111) приблизительно равна $2,36$ эВ (кривая 1), для пленки $Ga_{0,6}In_{0,4}P \sim 1,85$ эВ (кривая 4'), а для нанокристаллических фаз $Ga_{0,6}In_{0,4}P \sim 2,3$ эВ и $2,1$ (3' и 4'). Мы исследовали также влияние ионной имплантации, электронной бомбардировки и лазерной обработки на ρ_v и ρ_c GaP в одном и том же приборе при $P \approx 10^{-7}$ Па. Имплантации проводились ионами Ar^+ и In^+ $E_0=2$ кэВ дозой $D=D_H=8 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$, электронная бомбардировка – при $E_e=5$ кэВ с $D_e=D_H=5 \cdot 10^{19}$ $см^{-2}$, лазерный отжиг проводился с помощью твердотельного (Nd^{3+}) импульсного лазера типа ЛТИ – 403 с длиной волны $1,06$ мкм при плотности энергии $W \approx 1,8$ Дж/ $см^2$. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние различных воздействия на значения ρ_v и ρ_c GaP/Мо

Типы воздействия $\rho, ом \cdot см$	GaP	$Ar^+ \rightarrow GaP$ $E_0 = 2$ кэВ $D_H=8 \cdot 10^{16} см^{-2}$	$In^+ \rightarrow GaP$ $E_0 = 2$ кэВ $D_H=8 \cdot 10^{16} см^{-2}$	$E_e = 5$ кэВ $D_H=5 \cdot 10^{19} см^{-2}$	Лазерное облучение $W=1,8$ Дж/ $см^2$
ρ_c	2,6	$5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
ρ_v	2,8	2,4	2,5	2,1	$5 \cdot 10^{-1}$

Приводим краткий анализ результатов, приведенный в таблице 4. В случае Ar^+ при бомбардировке с $E_0=2$ кэВ при $D=D_H$ основное изменение состава и структуры происходит до толщины $70-80$ Å. При этом концентрация Ga на поверхностных слоях увеличивается до $60-65$ ат.% и эти слои сильно разупорядочены. Это приводит к существенному уменьшению ρ поверхностных слоев. При $h \geq 100 - 150$ Å состав, и структура GaP практически не меняется, следовательно, его объемное удельное сопротивление существенно не меняется. В случае имплантации ионов In при $D = D_H$ поверхностные слои аморфизуются и обогащаются атомами Ga + In, общая концентрация

которых составляет ~60–70 ат.%, а приповерх-ностные слои при $h \geq 100\text{--}120 \text{ \AA}$ также не меняется. Это приводит к резкому уменьшению ρ_c а ρ_v практически не меняется. В случае электронной бомбардировки с $E_e=10 \text{ кэВ}$ при $D=D_H$ поверхностная концентрация Ga увеличивается на 12–15 ат.%. При этой E_e изменение состава и структуры происходит до глубины 20–25 \AA . При этом ρ_c уменьшив до $3 \cdot 10^{-2} \text{ ом}\cdot\text{см}$, а ρ_v –уменьшается всего на 0,6–0,7 $\text{ Ом}\cdot\text{см}$.

В случае лазерной обработки значения ρ_c и ρ_v уменьшаются на 10 и более раз. По – видимому при этом происходит изменение состава и структуры основной части объема пленки GaP, т.е. можно полагать, что глубины проникновения лазерного луча значительно больше чем глубины проникновения ионов и электронов при энергии $\leq 5\text{--}10 \text{ кэВ}$.

Для получения двухслойной нанопленочной системы $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}/\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}(111)$, имплантация In^+ в $\text{GaP}(111)$ проводилась при дозе насыщения: сначала с высокой энергией, а затем с низкой энергией. После каждого цикла ионной имплантации проводился, прогрев при оптимальной температуре ($T \approx 950 \text{ К}$) в течении 30–40 мин.

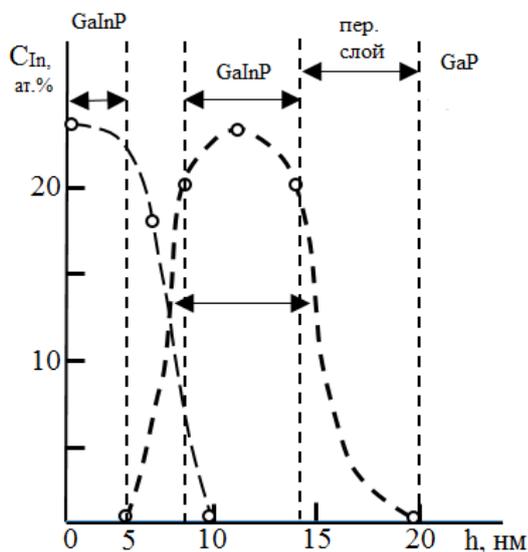


Рис.15. Концентрационные профили распределения In по глубине для GaP, имплантированного ионами In^+ с $E_0 = 10 \text{ кэВ}$ и $E_0 = 1 \text{ кэВ}$ при $D = 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

После каждого цикла имплантации проводился прогрев при $T \approx 950 \text{ К}$ в течении 30–40 мин. и импульсный прогрев до $T = 1100 \text{ К}$.

Исследование зависимости концентрации In по глубине GaP, полученные имплантацией ионов In^+ энергиями 10 и 1 кэВ в сочетании с отжигом показали, что на поверхности и на глубине ~ 8-16 нм концентрация In составляет ~ 20-22 ат.%, т.е. в этих слоях образуются соединения типа $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ (рис.15). Между слоями $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}$ имеется слой GaP с толщиной 5÷7 нм а на границах раздела $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{-GaP}$ и $\text{GaP}/\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}$ имеются переходные слои с толщиной 6÷8 нм.

Анализ морфологии поверхности $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}/\text{GaP}$ на основе РЭМ изображения и ДБЭ картин показали, что сформированные структуры имеют гладкую, зеркальную поверхность. Результаты экспериментов показали, что для

получения двухслойной системы разности между высокой и низкой энергией ионов должны быть не менее 20 кэВ.

На основе этих данных можно создавать тандемные многослойные преобразователи энергии. На рис.16 представлен схематическое расположение слоев тандемного солнечного элемента. На верхнем слое этой гетеросистемы расположен слой ИТО ($\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$) для обеспечения большего поглощения света, а нижний слой Al для отражения светового потока.

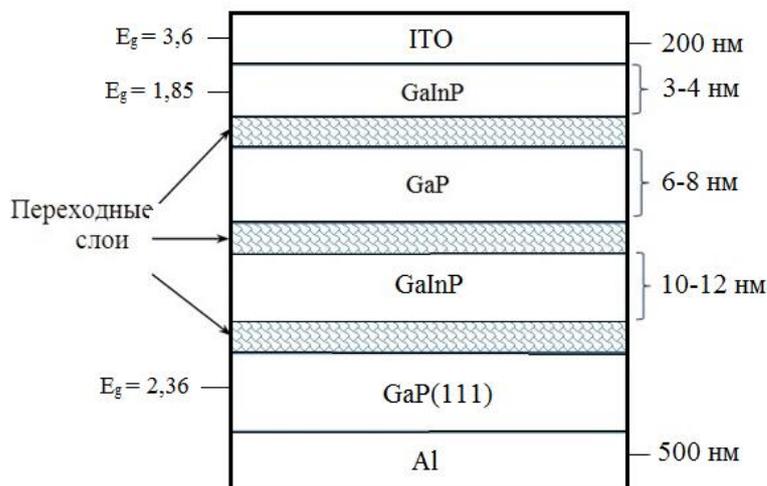


Рис.16. Схематический разрез двухслойной нанопленочной системы $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}/\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}/\text{GaP}$.

Полученные структуры могут быть использованы при разработке нано-размерных ИС, транзисторов, опто- и фотоэлектронных устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены параметры энергетических зон и плотности состояние электронов валентной зоны, нанопаз и нанопленок GaInP, полученных методом имплантации ионов In^+ в сочетании с отжигом на поверхности GaP(111). Установлено, что в GaInP толщиной $h \approx 30\text{-}35 \text{ \AA}$ с поверхностным диаметром $d \leq 30\text{-}35 \text{ \AA}$ проявляется квантово-размерные эффекты. После имплантации ионов In^+ в GaP(111) происходит разложения GaP на составление и разупорядочения приповерхностных слоев, внедрения атомов In в GaP.

2. Установлено, что тонкие пленки $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ растёт эпитаксиально, и кристаллографическая ориентация на границе раздела GaP и GaInP полностью совпадает. Получены данные о плотности состояния валентных электронов и определены параметры энергетических зон нанопаз и нанопленок ($d \approx 30\text{-}50 \text{ \AA}$) $\text{Ga}_{0,6}\text{Al}_{0,4}\text{P}$ и $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$, полученных методом имплантации Al^+ и In^+ в GaP с последующим отжигом.

3. Имплантацией ионов Sr^+ в CaF_2 и последующего отжига на поверхности CaF_2 получены согласуешься слоя с монотонно изменяющемся

параметрами решетки пленки $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$ с толщиной $\sim 80 \text{ \AA}$ для системы GaAs/CaF₂.

4. Установлено, что при бомбардировке GaP ионами Ar⁺ с $E_0 = 2$ при $D=D_n$ поверхностные слои с толщиной 40–45 \AA обогащаются атомами Ga. Наличие этих слоев резко (до 5-6 раз) уменьшает глубину диффузии атомов контактирующего металла (Ni) в GaP и позволяет получить ультратонкие ($\leq 300 \text{ \AA}$) омические контакты.

5. Определены зависимости изменение концентрации атомов Ga и P на поверхности и их профили распределения по глубине от, энергии и дозы электронов в интервале $E_e=3-10$ кэВ. Показано, что при $E_e \leq 5-6$ кэВ поверхностная область GaP обогащается атомами P, а при $E_e \geq 5-6$ кэВ – атомами Ga. Выявлены основные механизмы инверсия состава атомов на поверхности при увеличении E_e .

6. Изучены влияния ионной и электронной бомбардировки и лазерного облучения на электрофизические свойства поверхности и приповерхностных слоев. В частности, показано, что все эти воздействия приводят к уменьшению ρ_c до 100–150 раз. При этом значение ρ_v изменялась незначительно. Только в случае лазерного отжига ρ_v уменьшалась на 5–6 раз. Выявлены основные механизмы изменения ρ_c и ρ_v при внешних воздействиях.

7. С вариацией энергии ионов In в интервале 1-50 кэВ в сочетании с отжигом получены многослойная система типа GaInP/GaP/GaInP/GaP. Определены толщины, структуры и ширины запрещенных зон этих слоев. Показана возможность получения тандемные многослойных преобразователей энергии. Построена условная зонно – энергетическая диаграмма системы GaInP/GaP/GaInP/GaP.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING
OF SCIENTIFIC DEGREES PhD.03/31.03.2021.FM.70.06
OF KARSHI STATE UNIVERSITY**

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY NAMED
AFTER ISLAM KARIMOV**

SHIRINOV GANJIMUROD MAMIR UGLI

**STUDY OF THE COMPOSITION, STRUCTURE, AND PHYSICAL
PROPERTIES OF THREE-COMPONENT NANOSCALE SYSTEMS
CREATED ON THE SURFACE AND NEAR-SURFACE REGION OF
GaP BY ION IMPLANTATION**

01.04.04 – Physical electronics

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

Qarshi – 2025

The subject of doctor of philosophy dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2022.3.PhD/FM766.

The dissertation was completed at the Tashkent State Technical University named after Islom Karimov. The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (rasume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.qarshidu.uz) and on Information-education portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific consultant:	Donaev Sardor Burkhanovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor
Official opponents:	Egamberdiev Bakhrom Egamberdievich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor Rakhmonov Ganiboy Tadjievich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor
Leading organization:	Urgench State University

The defense will take place on "____" _____ 2025 at _____ at the meeting of scientific council number PhD.03/31.03.2021.FM.70.06 for the award of academic degrees at Karshi State University (Address: Karshi city, 180119, Kuchabag street, 17. Ph.: (+99875) 221-21-04, fax: (+99875) 220-02-10, e-mail: kasu_info@edu.uz). Karshi State University meeting hall.

The doctoral dissertation is possible to review in Information-resource centre at Karshi State University (is registered № _____) (Address: Karshi city, 180119, Kuchabag street, 17. Ph.: (+998 75) 221-21-04).

The Abstract of the dissertation sent out on "____" _____ 2025.
(Mailing report № _____ on "____" _____ 2025).

M.T. Normuradov
Chairman of Scientific council that awards scientific degrees, doctor of physical and mathematical sciences, professor

G.Kh. Allayarova
Scientific secretary of the Scientific council on awarding scientific degrees, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor

A.K. Tashatov
Chairman of the Scientific seminar, doctor of physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (Abstract for the dissertation of PhD thesis)

The purpose of the dissertation is to study: obtaining nanoscale structures and layers on the surface and near-surface region of GaP single crystals, a comprehensive study of their composition, electronic and crystalline structure, as well as their emission, optical, and electrophysical properties.

In accordance with this goal, it was necessary to solve the following tasks: ultrathin ohmic contacts with a thickness of $\leq 300 \text{ \AA}$ were obtained on the GaP(111) surface through preliminary bombardment with Ar^+ ions; the effects of ion and electron bombardment, as well as laser irradiation, on the specific surface resistance ρ_c and bulk resistance ρ_v of GaP were studied. It was shown that all these treatments lead to a reduction in ρ_c by 100–150 times, while ρ_v changed insignificantly; the feasibility of creating tandem multilayer energy converters of the GaInP/GaP/GaInP/GaP type was demonstrated;

The objects of work Monocrystalline GaP samples and films were used.

The scientific novelty of the research is as follows:

for the first time, using ion implantation of In^+ combined with annealing, nanocrystalline phases and $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ films with a thickness of 30-35 Å have been obtained on the GaP(111) surface. It has been established that quantum-size effects are observed in GaInP with a thickness of $h \approx 30\text{-}35 \text{ \AA}$ and a surface diameter of $d \leq 20\text{-}35 \text{ nm}$;

for the first time, data on the valence electron density of states have been obtained, and the energy band parameters of $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{P}$ and $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ nanofilms ($d \approx 30\text{-}50 \text{ \AA}$) have been determined. It was established that strict epitaxial growth of the film occurs, with the crystallographic orientations of GaAlP, GaInP, and GaP fully matching at the interface;

nanoscale buffer layers of $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$ have been obtained on the CaF_2 surface for the GaAs/ CaF_2 system;

it was established that preliminary bombardment of the GaP(111) sample with Ar^+ ions allows for the formation of ultrathin ohmic contacts with a thickness of $\leq 300 \text{ \AA}$;

it was shown that, during electron bombardment of the GaInP/GaP(111) system at $E_e \leq 5\text{-}6 \text{ keV}$, the surface region of GaP becomes enriched with P atoms, whereas at $E_e \geq 5\text{-}6 \text{ keV}$, it becomes enriched with Ga atoms. The primary mechanisms of atomic composition inversion on the surface with increasing E_e were identified;

it was shown that, during ion implantation, electron bombardment, and laser irradiation, the specific surface resistance ρ_c sharply decreases (by more than 100 times), while the bulk specific resistance ρ_v remains largely unchanged. The main mechanisms of changes in ρ_c and ρ_v under external influences were identified;

for the first time, a two-layer GaInP/GaP/GaInP/GaP system was created using ion implantation of In^+ ions. The thicknesses, structures, and bandgap widths of these layers were determined, and a conditional band-energy diagram of the GaInP/GaP/GaInP/GaP system was constructed;

Implementation of the research results.

Based on scientific results, the study of the composition, structure, and physical properties of three-component nanoscale systems created on the surface and near-surface region of GaP by ion implantation:

The results of obtaining a buffer layer of $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$ nanosystem for the GaAs/CaF₂ system on the CaF₂ surface were used in the implementation of the Uzbekistan-Turkey joint practical project titled Integrated System with Ferromagnetic Nanoclustered Silicon for Capturing Circulating Cancer Cells in Microfluidic Channels, AL-202102215, conducted at Tashkent State Technical University from 2022 to 2024 (reference No. 4/17-4/4-18162, issued by the Ministry of Higher Education, Science, and Innovation on September 24, 2024). As a result, the concentration of Mn atoms in the silicon bulk increased the concentration of magnetic nanoclusters, achieving silicon with magnetic properties four times higher than those currently available due to the formation of magnetic nanoclusters from Mn, Eu, and Gd elements on the silicon surface.

The use of In⁺ ion implantation combined with annealing (laser heating) allowed for the production of a $\text{Ga}_{0.6}\text{In}_{0.4}\text{P}$ nanocrystalline phase and film with a thickness of 30-35 Å on the GaP(111) surface, which were utilized by “Foton” JSC to develop semiconductor elements based on this material (reference No. 04-3/1598, issued by “Uzeltexsanoat” JSC on September 23, 2024). The application of these research findings enabled a twofold reduction in material consumption in the production of semiconductor elements.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The text of the dissertation is presented on 106 pages of text, including 61 figures and 7 tables.

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

I bo'lim (I часть, part I)

1. Ширинов Г., Донаев С., Эргашов Ё., Туракулов Б. Получение тонких согласующихся слоев на поверхности CaF_2 для формирования пленок $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ // O'zbekiston milliy universiteti xabarлари, 2023, [3/1/1]. ISSN 2181-7324. – С. 574-576. (01.00.00 №8)
2. Умирзаков Б.Е., Донаев С.Б., Ширинов Г.М. Влияние низкоэнергетической электронной бомбардировки на состав и структуру поверхности GaP(111) // КарДУ хабарлари. Илмий-назарий, услубий журнал. 6/1(62) 2023. – С. 34-39. (01.00.00 ОАК Раёсатининг 2021 йил 31 мартдаги 295/6-сон қарори)
3. Донаев С.Б., Ширинов Г.М., Умирзаков Б.Е. Эмиссионные свойства и электронная структура трехкомпонентных нанопленок сформированных на поверхности GaP при низкоэнергетической ионной имплантации и последующего отжига // O'zbekiston fizika jurnali. Vol.25, (№2) 2023. – Р. 49-53. (01.00.00 №5)
4. Shirinov G.M., Donaev S.B., Umirzakov B.Y., Loboda V.V. Emission, optical and electrical properties of GaInP/GaP nanofilms // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. Vol.16, No 2, 16208. – Р. 89-96. 2023. (Scopus, IF: N/A)
5. S.B. Donaev, G.M. Shirinov, B.Y. Umirzakov, V.V. Loboda. Influence of low-energy electron bombardment on the composition and structure of the gallium phosphide surface. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2024. Vol.17. No.3. (Scopus, IF: N/A)
6. S. Donaev, G. Shirinov, B. Umirzakov, B. Donayev, Sh. Wang. Effect of Low-Energy Implantation of In^+ Ions on the Composition and Electronic Structure of Single-Crystal GaP(111). Coatings 2024, 14, 1231. (Scopus, IF: N/A)

II bo'lim (II часть, part II)

7. Умирзаков Б.Е., Донаев С.Б., Ширинов Г.М. Электронная структура монокристаллического GaP(111) имплантированного ионами In^+ . / Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo'tkazgich materiallar III xalqaro ilmiy anjuman. – Toshkent, 2022-yil, 24–25-noyabr. – С. 397-398.
8. Ширинов Г.М., Донаев С.Б., Умирзаков Б.Е., Донаев Б.Д. Применение метода ионной имплантации для получения согласующихся слоев на границе $\text{A}^3\text{B}^5/\text{CaF}_2$ / Ёш олимлар ва физик талабаларнинг III республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-III). – Тошкент, 2023 йил, 15 июнь. – С. 105-106.
9. Ширинов Г.М., Донаев С.Б., Умирзаков Б.Е., Донаев Б.Д. Изучение параметров энергетических зон тонких пленок GaInP/GaP / Ёш олимлар ва физик талабаларнинг III республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-III). – Тошкент, 2023 йил, 15 июнь. – С. 108-110.

10. Донаев С.Б., Широнов Г.М., Умирзаков Б.Е. Изучение состава и электронной структуры поверхности GaP, имплантированной ионами In^+ / VI Международная конференция по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах. 28–30 сентября 2023 года Фергана. – С. 35-36.

11. Широнов Г.М., Донаев С.Б., Умирзаков Б.Е. Модификация свойств электронной бомбардировкой поверхности GaP(111) // Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию Академии наук Узбекистана. Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы. – Андижан, 2023. – С. 187-188.

12. Умирзаков Б.Е., Донаев С.Б., Широнов Г.М. Изменение состава и структуры поверхности GaP(111), при электронной бомбардировке / Микро ва нанотехнология, янги материаллар олишининг замонавий ҳолати ва истиқболлари мавзусидаги халқаро конференция. – Қарши: Ўзбекистон, 2023 йил, 30–31 октябрь. – С. 16–18.

13. Донаев С.Б., Умирзаков Б.Е., Широнов Г.М. Применение ионной бомбардировки для получение наноконтактов на поверхности GaP / Международная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики» 19–21 октября, Ташкент 2023. – С. 177-178.

14. Нормуродов М.Т., Умирзаков Б.Е., Донаев Б.Д., Широнов Г.М. Получение тонких согласующихся слоев на поверхности CaF_2 для формирования пленок $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ / “Физика ва электрониканинг долзарб муаммолари” мавзусидаги республика илмий-амалий анжумани. – Тошкент, 2023 йил, 3–4 ноябрь. – С. 76-77.

15. Донаев С.Б., Широнов Г.М. Влияние низкоэнергетической электронной бомбардировки на состав и структуру поверхности GaP(111) // Физика ва электрониканинг долзарб муаммолари / мавзусидаги республика илмий-амалий анжумани. – Тошкент, 2023 йил, 3-4 ноябрь. – С. 129-130.

16. Широнов Г.М., Умирзаков Б.Е., Донаев С.Б. Влияние бомбардировки ионами Ar^+ на состав и структуру поверхности GaP // “Оптика ва лазер физикасининг муаммо ва истиқболлари” мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги республика илмий-амалий конференцияси. – Тошкент, 2023 йил 26 октябрь. – С. 27-28.

17. Умирзаков Б.Е., Донаев С.Б., Широнов Г.М. Влияние различных воздействий на объемное и поверхностное удельное сопротивление GaP. Тезисы докладов 53-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 28–30 мая 2024. – С. 78.

18. Донаев С.Б., Умирзаков Б.Е., Широнов Г.М. Получение многослойных наноразмерных гетероэпитаксиальных систем на основе арсенида $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и перспективы их применения. Тезисы докладов 53-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 28–30 мая 2024. – С. 79.

Avtoreferat Qarshi davlat universitetining “QarDU xabarlar” ilmiy-nazariy, uslubiy jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi (16.06.2025-yil).

Guvohnoma № 14-061
16.06.2025. Bosishga ruxsat etildi.
Ofset bosma qog‘ozi. Qog‘oz bichimi 60x84 1/16.
“Times” garnituras. Ofset bosma usuli.
Hisob-nashriyot t. 3.2. shartli b.t. 4,6.
Adadi 60 nusxa. Buyurtma № 37.

Qarshi davlat universiteti
Kichik bosmaxonasida chop etildi.