

**FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI XUZURIDAGI  
FIZIKA -MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI  
ILMIYDARAJASINI BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI  
ILMIY KENGASH**

---

**FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

**YUSUPOV FAXRIDDIN TOJIMAMAT O‘G‘LI**

**ZnO, ZnO:B VA n-ZnO/p-Si ASOSIDAGI YUPQA PLENKALI  
STRUKTURALARNING ELEKTROFIZIK VA OPTIK XOSSALARI**

**01.04.07 - Kondensirlangan holat fizikasi**

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

Farg‘ona-2025

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

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

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

**Yusupov Faxriddin Tojimamat o‘g‘li**

ZnO, ZnO:B va n-ZnO/p-Si asosidagi yupqa plenkali strukturalarning elektrofizik va optik xossalari.....3

**Юсупов Фахриддин Тожимамаат угли**

Электрофизические и оптические свойства тонкопленочных структур на основе ZnO, ZnO:B и n-ZnO/p-Si.....23

**Yusupov Fakhriddin Tojimamat ugli**

Electrophysical and Optical Properties of Thin-Film Structures Based on ZnO, ZnO:B and n-ZnO/p-Si .....45

**E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati**

Список опубликованных работ

List of published works .....49

**FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI XUZURIDAGI  
FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI  
ILMIYDARAJASINI BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI  
ILMIY KENGASH**

---

**FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

**YUSUPOV FAXRIDDIN TOJIMAMAT O‘G‘LI**

**ZnO, ZnO:B VA n-ZnO/p-Si ASOSIDAGI YUPQA PLENKALI  
STRUKTURALARNING ELEKTROFIZIK VA OPTIK XOSSALARI**

**01.04.07 - Kondensirlangan holat fizikasi**

**Fizika-matematika fanlari buyicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

Farg‘ona-2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.4.PhD/FM1201 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Farg'ona davlat texnika universitetida bajarilgan.

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

**Ilmiy rahbar:**

**Sultanov Nomanjon Akramovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentalar:**

**Iliyev Xalmurat Midjitovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Sabirov Salim Sattiyevich,**  
fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

**Yetakchi tashkilot:**

Qoraqalpoq davlat universiteti

Dissertatsiyaning himoyasi Farg'ona davlat texnika universiteti huzuridagi falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil «28» 08 soat 14<sup>00</sup> daqiqa majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 150107, Farg'ona sh. Farg'ona k. 86 uy. Tel: (+998 73) 241-12-06, faks (+998 73) 241-12-06, e-mail: [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru), kichik majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Farg'ona davlat texnika universitetining axborot-resurs markazi ilmiy-uslubiy bo'limida tanishish mumkin. ( raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 150107, Farg'ona sh. Farg'ona k. 86 uy. Tel: (+998 91) 328-32-69).

Dissertatsiya avtoreferati 20 \_\_\_ yil « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ kuni tarqatildi.

(20 \_\_\_ yil « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ daqiqa \_\_\_\_\_ raqamli reestr bayonnomasi).



*[Handwritten signatures of N.X. Yuldashev, B.J. Axmadaliyev, and S.M. Otajonov]*

**N.X. Yuldashev**

Falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi  
Ilmiy Kengash raisi, f-m.f.d., professor

**B.J. Axmadaliyev**

Falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi  
Ilmiy Kengash ilmiy kotibi, f-m.f PhD,  
dotsent

**S.M. Otajonov**

Falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi  
Ilmiy Kengash qoshidagi ilmiy seminar  
raising o'rinbosari, f-m.f.d., professor.

## KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati.** Jahonda nanostukturali mikroelektron qurilmalarga kondensirlangan holat fizikasiga oid ishlab chiqarish va ilmiy tadqiqot jarayonlarida alohida ahamiyat berilmoqda. Dunyo miqyosida zamonaviy optoelektronika talablariga mos, yuqori fotoelektrik sezgirlik va aniqlikka ega ko'p funksiyali yarim o'tkazgich yupqa plenkali yangi strukturalar yaratish yoki mavjudlarini yanada takomillashtirish bugungi kunning asosiy vazifalaridan biridir. Hozirgi kunda quyosh elementlari, yorug'lik diodlari, fotodatchiklar va boshqa fotoelektron asboblar ishlab chiqarishda kremniy, germaniy va galliy arsenidi kabi klassik materiallar o'z funksional imkoniyatlarini deyarli to'liq namoyon etib bo'lgan. Shu jihatdan mazkur masalani hal etishda metalloksidlar asosidagi materiallarning yangi modifikatsiyalarini yaratish va ulardan foydalanish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda rux oksidi (ZnO) asosidagi yarimo'tkazgich materiallariga Bor (B) elementini kiritish orqali materialning fizik xossalarini o'zgartirish, uning xususiyatlarini boshqarish va ushbu material asosida optoelektron qurilmalar, jumladan, quyosh elementlari, fotodiodlar hamda ultrabinafsha(UB) diapazonida ishlaydigan datchiklarni yaratishga yo'naltirilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Mazkur yo'nalishda, kirishma sifatida B elementidan foydalanib ZnO yupqa qatlamlarini termik bug'latish usuli bilan legirlash, ZnO:B yupqa qatlamlarini hosil qilishning maqbul texnologik sharoitlarini aniqlash, tarkibida B kirishmasi mavjud bo'lgan ZnO materialining elektr, optik va fotoelektrik xossalarini optimallashtirish, ZnO asosida yangi modifikatsiyalar hosil qilish hamda ularning kristall panjara parametrlarini aniqlash bo'yicha olib borilayotgan tadqiqotlar ustuvor hisoblanadi. Shu bilan birga, B kirishmasi kiritilgan ZnO yupqa qatlamlarining elektr o'tkazuvchanligi va optik taqiqlangan zona kengligini boshqarish, ZnO:B/p-Si asosidagi geterostrukturalarning fizik xossalarini, fotoelektrik samaradorligini oshirish dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda yuqori samaradorlikka ega optoelektron qurilmalarni yaratish, jumladan, fotodiodlar, yorug'lik datchiklari va quyosh elementlari sifatini oshirish bo'yicha keng ko'lamlil ilmiy-texnik tadqiqotlar olib borilmoqda. "Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi"<sup>1</sup>da (2022–2026 yillar) fan va innovatsiyalarni ilgari surish, zamonaviy texnologiyalar asosida yangi mahsulotlar ishlab chiqarishni kengaytirish orqali iqtisodiyotning texnologik qayta qurollanishini ta'minlash ustuvor yo'nalish sifatida belgilangan. Ushbu vazifalarni samarali amalga oshirishda, xususan, rux oksidi (ZnO) asosidagi yarimo'tkazgich qatlamlarini B elementi bilan legirlash, yuqori sezuvchanlikka ega ZnO:B asosidagi geterostrukturalarni yaratish va ularning asosida fotosezgir hamda energiya tejoychi qurilmalar ishlab chiqish muhim ahamiyatga ega.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023 yil 11 sentyabrdagi PF-158-son «"O'zbekiston – 2030" strategiyasi to'g'risida»<sup>2</sup>gi Farmoni, 2022 yil 28 yanvardagi

<sup>1</sup> Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi (2022–2026)

<sup>2</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023 yil 11-sentyabrdagi PF-158-son "O'zbekiston — 2030" strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni

PF-60-son «2022–2026-yillarga mo‘ljallangan yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida»gi Farmoni, 2019 yil 22 avgustdagi PQ-4422-son «Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etish hamda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish bo‘yicha tezkor chora-tadbirlar to‘g‘risida»gi Qarori, 2020 yil 10 iyuldagi PQ-4779-son «Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg‘i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga oid qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida»gi Qarori, shuningdek ushbu faoliyatga taalluqli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda mazkur dissertatsiya tadqiqoti ma‘lum darajada o‘z hissasini qo‘shadi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Ushbu dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarni rivojlanishining IV. “Qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish usullarini ishlab chiqish, nanotexnologiya, fotonika va boshqa zamonaviy texnologiyalar asosida yangi texnologiyalar va qurilmalar ishlab chiqish” ustuvor yo‘nalishiga mos keladi.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Hozirgi kunda yarimo‘tkazgichli yupqa qatlamlar, xususan ZnO yupqa qatlamlarini olish va ularning fizik xossalarini tadqiq qilish dunyo ilmiy markazlarida faol o‘rganilmoqda. Jumladan, AQShda J. Brinker guruhi ZnO nanoqatlamlarining tuzilmaviy va optik va elektrofizik xossalarini batafsil o‘rgandi. Yaponiyada Y.Shichi va S.Tanimato Si tagliklarda TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> va ZnO qatlamlari asosida sensorlar, Rossiyada S.I.Rembeza guruhi ZnO va SnO<sub>2</sub> qatlamlari asosida quyosh elementlari va gaz sensorlari yaratdilar.

Shuningdek, mamlakatimizda akademik Zaynabidinov S.Z. boshchiligidagi ilmiy jamoa tomonidan metalloksid plenklarini olishning bir qator usullari ishlab chiqilib, bunday usullar asosida nanoo‘lchamdagi plenklar olish hamda ularni tashkil etuvchi elementlarning tarkibini o‘zgartirish, olinish texnologiyalarini takomillashtirish orqali turli maqsadlar uchun sezgir elektron qurilmalar yaratish imkoniyatlari ko‘rsatib berishda salmoqli natijalarga erishildi.

Shu bilan birga, ZnO, ZnO:B va n-ZnO/p-Si asosidagi yarimo‘tkazgichli strukturalarning amaliy qurilmalardagi funksional barqarorligi, xususan, ularning harorat, yorug‘lik va tashqi elektr maydon ta‘siridagi elektr-optik xossalari, shuningdek, interfeys holatlari va kontakt qarshiligining vaqt o‘tishi bilan o‘zgarishi kabi muammolar yetarli darajada o‘rganilmagan.

**Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘likligi.** Dissertatsiya ishi Farg‘ona davlat texnika universitetida, xususan, universitetning 2022–2027-yillardagi istiqbolli ilmiy rejasiga muvofiq “Kremniy asosida ZnO va AlB<sub>10</sub> geterostrukturalarni texnologik olish usullarini yaratish va ulardan yorug‘lik diodlari tayyorlash” loyihasi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** barqaror elektrofizik, optik hususiyatli ZnO va ZnO:B va n-ZnO/p-Si yupqa plenkali strukturalarni termik bug‘latish orqali olish texnologiyasini takomillashtirish va ularning elektrofizik va optik xossalaridagi

yangi qonuniyatlarni o'rnatishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

havoda va yuqori vakuumli muxitda bug'latish usullari bilan ZnO va ZnO:B yupqa qatlamlarini olish texnologiyasining optimal parametrlarini ishlab chiqish;

ZnO va ZnO:B yupqa qatlamlarning mikrostrukturasi va sirt xossalarini tadqiq etish, ularning elektrofizik va optik xususiyatlaridagi yangi qonuniyatlarni aniqlash;

yupqa plenkali n-ZnO/p-Si geterostrukturani texnologik olish metodikasini ishlab chiqish va uning strukturaviy, elektr hamda optik xossalarining kompleks tadqiqoti asosida optoelektron asboblari uchun optimal parametrlarni ishlab chiqish;

n-ZnO/p-Si geteroo'tishli diod strukturaning elektrofizik, fotoelektron va optik ishchi xarakteristikalarini chuqur tadqiq qilish hamda optoelektron qurilmalarda samarali qo'llash uchun optimal ish rejimi parametrlarini ishlab chiqish.

**Tadqiqotning obyekti** sifatida ZnO va ZnO:B va n-ZnO/p-Si yupqa plenkali strukturalar tanlangan.

**Tadqiqotning predmeti** ZnO, ZnO:B va n-ZnO/p-Si asosidagi yarimo'tkazgichli yupqa qatlamlarning elektrofizik va optik xossalarini o'rganish, bu qatlamlarning struktura, elektr, va optik xususiyatlarini B elementi bilan legirlash orqali yaxshilash, shuningdek, olingan geterostrukturalarning yuqori samaradorlikka ega optoelektron qurilmalarda qo'llanilish imkoniyatlarini aniqlash.

**Tadqiqotning usullari.** Tadqiqotda yupqa qatlamlar termik bug'latish texnologiyasi yordamida hosil qilinib, ularning tuzilmasi rentgenodifraktometr usuli bilan tahlil qilindi. Sirt morfologiyasini chuqur o'rganish uchun skanerlovchi elektron mikroskop va atom kuch mikroskopiyasi ishlatildi. Spektral xususiyatlar optik spektroskopiya usullari orqali baholandi va geterostrukturalarning VAX yuqori aniqlikda o'lchovchi maxsus qurilmalardan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:**

barqaror elektrofizik, optik hususiyatli ZnO va ZnO:B yupqa polikristal qatlamlarni olishning optimal parametrlari: 1) havoda Zn kukunlarini 575°C da 1 min termik bug'latish: taglik harorati 300°C, qalinlik 1.2-1.5 mkm; 2) 1-5 % B qo'shilgan ZnO kukunlarini 10<sup>-4</sup> mm.sim.ust vakuumda 30 s termik bug'latish: tigel harorati 1600°C, qalinlik 0.7-0.9 mkm texnologik sharoitlarda takomillashtirilgan;

ilk bor ZnO:B qatlamlarida B kirishmasining 3 % gacha ortishi kristal don o'lchamlarini 130-150 nm dan 80-100 nm gacha kamayishiga, solishtirma qarshilikni 80 Ω·cm dan 1.2 Ω·cm gacha pasayishiga va harakatchanligini deyarli 5 barobarga (ZnO uchun 2-3 sm<sup>2</sup>/V·s, ZnO:B uchun esa 10-12 sm<sup>2</sup>/V·s) orttirishiga olib kelishi asoslangan;

n-ZnO:B yupqa qatlam fotoluminestsensiya spektrida 350-400 nm va 570-620 nm optik diapazonlarida dublet spektral chiziqlar kuzatildi va B konsentratsiyasi ortishi bilan spektral chiziqlarning intensivligi pasayishi, yarim kengligining ortishi, katta to'lqinlar sohasiga siljishi aniqlandi hamda ular mos holda zona-zona va B kirishmasining donor sathi - valent zona rekombinatsion nurlanishi bilan asoslangan;

Ni-ZnO:B/pSi-Al geterostrukturaning VAX ni turli temperaturalarda tok tashuvchi kirishmali fazoviy zaryadlar ionlashish energiyasi  $E_i=0.45$  eV,

konsentratsiyasi  $N_e=3.82 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$  hamda Shottki to'siq balandligi  $\phi_B = 0,75 \pm 0,085 \text{ eV}$  qiymatda aniqlangan va ushbu parametrlar o'rtasidagi bog'liqlik asosida monopolyar injeksiya mexanizmini tavsiflovchi fizik model ishlab chiqilgan;

Birinchi marta Ni-ZnO:B/p-Si-Al geterostrukturasida yorug'lik intensivligi oshishi bilan 1000 Lx da maksimal fototok (0,53 mA), 1500 Lx da esa maksimal foto-kuchlanish (92 mV) kuzatilishi va bu holat injeksion kambag'allanish effekti (asosiy tok tashuvchilarining kamayishi) asosida strukturaning fototok hosil qilish mexanizmi asoslangan

#### **Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:**

Bug'latish usulida ZnO va B bilan legirlangan ZnO yupqa qatlamlarini olish texnologiyasi bug'lanish harorati, taglik temperaturasi, bug'lanish vaqti hamda vakuum darajasini tanlash orqali optimallashtirilgan;

ZnO tarkibiga 3% gacha Bor kirishmasi kiritish orqali solishtirma qarshiligi  $5 \Omega \cdot \text{sm}$  gacha pasaygan, harakatchanligi  $12 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  gacha oshgan va fotosezgirliги yuqori bo'lgan yupqa qatlamlar olindi hamda ularni ultrabinafsha detektorlar, yorug'lik sezgichlar va past quvvatli diodli qurilmalarda amaliy qo'llash mumkinligi asoslangan;

n-ZnO/p-Si geterostrukturalarining VAX lari asosida diodga xos xususiyat, yuqori to'g'rilash koeffitsienti ( $\approx 250$ ), past teskari oqim va yorug'lik sezuvchanlik aniqlanib, ushbu strukturalar asosida yarimo'tkazgichli diodlar va fotodetektorlar yaratish uchun amaliy jihatdan qo'llash mumkinligi asoslangan;

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi:** olingan natijalar xalqaro standartlarga mos keladigan zamonaviy asbob-uskunalar, jahon amaliyotida keng qo'llanilishi bilan tadqiqotchilar ishonchiga sazovor bo'lgan elektr va fotosezgir asboblari, IQ va XRD-6100, Park Systems NX10 Atom kuch mikroskopi, Solver Next skanerlovchi zond mikroskopi, Shimadzu-6100 spektrometri, Shimadzu RF-6000 spektrofluorofotometr va sinalgan texnologiyalar asosida olingan natijalardan foydalanilganligi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** ZnO yupqa qatlamlarning eksperimental natijalarining **ilmiy** ahamiyati n-ZnO/p-Si geterostrukturalarda elektrofizik va fotoelektrik jarayonlar, tok o'tish mexanizmlari hamda yuqorida keltirilgan effektlarning fizik mohiyati haqidagi ilmiy asoslangan umumiy tasavvurlar hosil qilish uchun yangi ilmiy-nazariyasi va amaliyoti rivojiga qo'shgan xissasi bilan izohlanadi .

Tadqiqot natijalarining **amaliy** ahamiyati n-ZnO:B/p-Si geterostrukturalaridagi elektrofizik va fotoelektrik jarayonlar asosida temperatura va yorug'likka sezgir yarimo'tkazgichli diodlari, fotodetektorlar kabi ko'p funksiyali elektron asboblari ishlab chiqarish imkonini beruvchi texnologik asoslarning yaratilganligi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarini joriy qilinishi.** ZnO va ZnO:B yupqa plenkalarini olish usullarini takomillashtirish, olingan geterostrukturalarning fizik xossalarini o'rganish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

A.V. Rjanov nomidagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi instituti (Rossiya FA Sibir bo'limi)da 2019–2023 yillarda amalga oshirilgan №19-52-12001-sonli "Birinchi

turdagi to'g'ri bo'lmagan o'tishli yarimo'tkazgich nanostrukturalarda eksitonlar va zaryad tashuvchilar dinamikasi" nomli fundamental loyiha doirasida ZnO:B qatlamlarida bor kontsentratsiyasining elektrofizik va optik ko'rsatkichlarga ta'siri, jumladan fotolyuminesensiya spektridagi UB nurlanishi va volt-ampere xarakteristikalarini bo'yicha olingan natijalar eksiton holatlari va zaryad tashuvchilar harakatchanligini nazariy tahlil qilish imkoniyatini bergan;

Andijon mashinasozlik instituti va Xitoy Xalq Respublikasining Shimoliy Xitoy Texnologiyalar Universiteti bilan hamkorlikda 2022–2023 yillarda amalga oshirilgan "Katta ma'lumotlarga asoslangan intellektual qayta tiklanuvchi energiya tarmog'i tizimini tadqiq qilish va qo'llash" (loyiha № MUK-2021-40) fundamental loyihasi doirasida n-ZnO/p-Si geterostrukturalarning yorug'lik ta'siridagi elektr va optik xossalari, jumladan turli yorug'lik intensivliklarida fototok o'zgarishini modellashtirish va tahlil qilish orqali yorug'lik ta'sirida elektr tok hosil qilish jarayoni samaradorligini baholash usulini takomillashtirish imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 6 ta xalqaro va 2 ta respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 15 ta ilmiy ish chop etilgan, jumladan, O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Maxkamasi xuzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 7 ta maqolalar, jumladan 3 ta respublika va 4 ta Scopus va Web of Science bazalarida indekslanuvchi chet el ilmiy jurnallarida nashr etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, uch bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 131 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

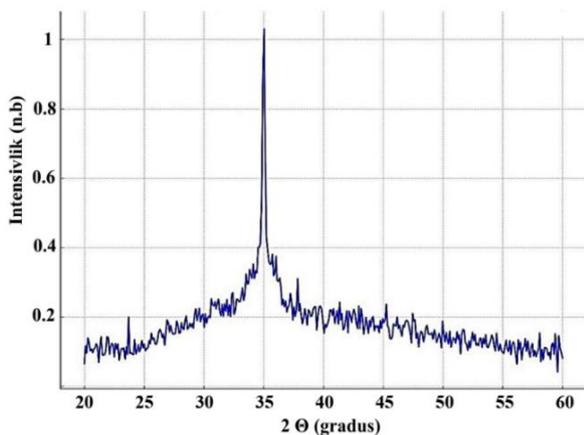
**Dissertatsiyaning kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi qisqacha asoslab berilgan, uning O'zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalar taraqqiyotining asosiy ustuvor yo'nalishlari bilan bog'lanishi ko'rsatilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari, obykti, predmeti, metodlari, ishning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, ishning aprobatsiyasi, nashr etilgan ilmiy ishlar, shuningdek dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi haqida qisqacha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiya ishining "**ZnO, ZnO:B asosidagi yupqa qatlamlar va geterostrukturalar: tadqiqot holati va istiqbollari**" nomli birinchi bobida ZnO, ZnO:B asosidagi yupqa qatlamlarni o'stirish usullari, elektrofizik, optik va tuzilmaviy xarakteristikalarini hamda ZnO/Si geterostrukturalarining fizik xususiyatlari va optoelektronikada qo'llanilishi bo'yicha qisqacha adabiyotlar sharhi keltirilgan. Ular asosida yupqa qatlamlar va geterostrukturalardan yarimo'tkazgichli diodlar, quyosh elementlari moslamalarida muvaffaqiyatli qo'llanilishi asosida yangi turdagi rux oksidli yarimo'tkazgich materiallarini olish va amaliy qo'llanilishi bo'yicha mavjud ma'lumotlar tahlil qilingan hamda dissertatsiya ishining maqsadi

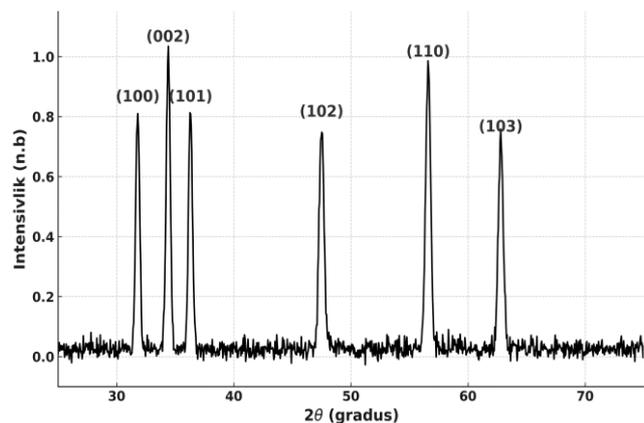
va vazifalari shakillantirilgan.

Dissertatsiyaning “**ZnO asosidagi yupqa qatlamlar olish texnologiyasi va ularning elektrofizik hamda optik xususiyatlari**” nomli ikkinchi bobida ZnO asosidagi yupqa qatlamlar olinish texnologiyasi, konstruksiyalarning tuzilishi, elektrofizik va optik xarakteristikalarining eksperimental tadqiqotiga bag‘ishlangan. ZnO va ZnO:B yupqa plenkalarini olish texnologiyasi ekologik toza, arzon va iqtisodiy jihatdan kamharj hamda bunday texnologiyalar yordamida zamonaviy mikro va optoelektronikada qo‘llaniladigan istiqbolli materiallar olish mumkinligi aniqlangan. Shuningdek, ushbu bobda ZnO:B va ZnO yupqa qatlamlarini termik usulda olish texnologiyasining optimal shart-sharoitlari: 1-usulda Zn kukunlari havo bosimida, 9 nm/s tezlikda, 30 daqiqa davomida sekin qizdirish va 1 daqiqa davomida 575°C temperaturada bug‘latish hamda taglik xaroratini 300°C qilish, shuningdek, bug‘latuvchi tigel va tagliklargacha bo‘lgan masofa 12 sm qilib belgilash; 2-usulda esa ZnO:B kukunlari  $10^{-4}$  mm.sim.ust bosimida, 1 soat davomida sekin qizdirish va 30 sekund davomida 1600°C temperaturada bug‘latish hamda taglik xaroratini 300°C qilish, shuningdek, bug‘latuvchi tigel va tagliklargacha bo‘lgan masofa 14 sm qilib belgilash aniqlangan.

ZnO asosidagi yupqa qatlamlarni B kirishmasi bilan modifikatsiya qilish va ularning fizik-kimyoviy hamda optik xossalarini maqsadli o‘zgartirish bo‘yicha olib borilgan eksperimental tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, kirishma kiritish ZnO ning kristall tuzilishi va yuzasining morfologiyasiga sezilarli ta’sir qiladi. Rentgen nurlarining difraksiyasi (RND) va skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida o‘tkazilgan tahlillar ZnO ning kristall tuzilishi va morfologiyasidagi o‘zgarishlarni aniqlashga imkon beradi. Termik ishlov berish orqali ZnO qatlamlarining kristall tuzilishidagi nuqsonlar kamaydi, 300°C temperaturada esa (002) tekislik bo‘yicha ko‘proq yo‘nalgan kristall donlar kuzatildi. B kirishmasi



**1-rasm. Shisha taglikka Zn metalini havoda termik bug‘latib olingan ZnO yupqa qatlamining RND spektri.**



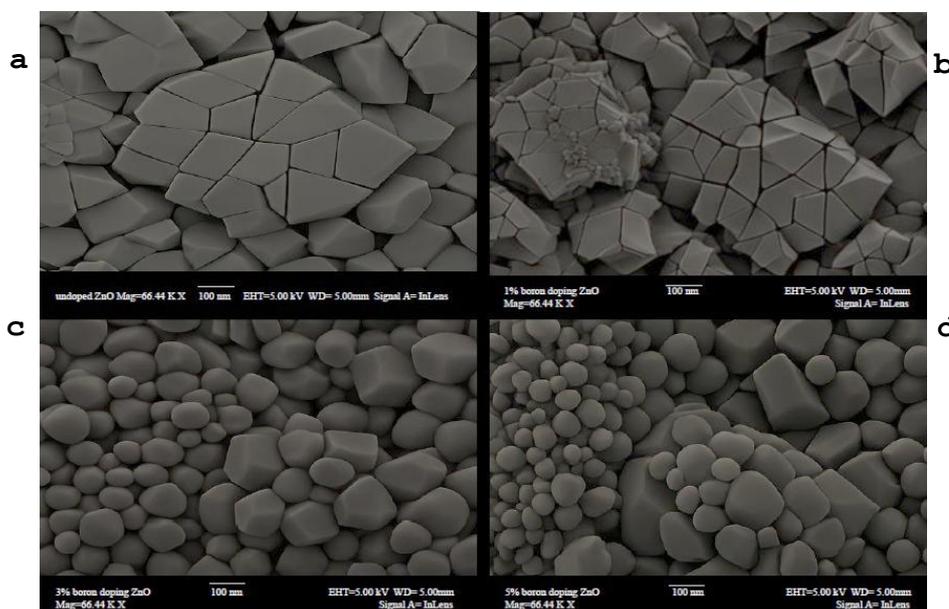
**2-rasm. Vakumda termik bug‘latish usuli bilan shisha taglikka olingan ZnO:B plenka uchun RND spektri.**

kiritilgan ZnO qatlamlarida difraksion cho‘qqilarning kengayishi va siljishi B atomlarining ZnO panjarasiga kirganligini ko‘rsatadi. B kirishmasi konsentratsiyasining ortishi bilan kristallitlar o‘lchami kamayishi aniqlandi. Bu esa

panjara ichki deformatsiyalarini ortshiga olib keladi, natijada materialning elektr va optik xususiyatlarini maqsadli o'zgartirishga yordam beradi. Rentgen nurlarining diffraksiyasi (RND) olingan natijalar quyidagicha bo'ldi:

1-rasmda 300°C temperaturada termik ishlov berilgan ZnO yupqa qatlamining RND spektri ko'rsatilgan. Asosiy diffraksion cho'qqi  $2\theta = 34.4^\circ$  (002) tekisligida joylashgan bo'lib, bu ZnO ning yuqori kristall tuzilishini bildiradi. Ikkilamchi cho'qqilar  $2\theta = 24^\circ$  va  $37^\circ$  atrofida joylashgan va geksagonal tuzilmani tasdiqlaydi. Termik ishlov berish natijasida cho'qqilarning keskinligi va intensivligi ortdi, bu esa kristall tuzilmaning takomillashganini ko'rsatadi.

2-rasmda ZnO:B qatlamida (100), (002), (102), (110) va (101) tekisliklarida diffraksion cho'qqilar kuzatildi. B kirishmasi kiritilishi bilan cho'qqilar siljishi va kengayishi, B atomlarining ZnO panjarasiga kirganligidan va shu tufayli kristal panjarada ichki deformatsiyalar yuzaga kelganligidan dalolat beradi.

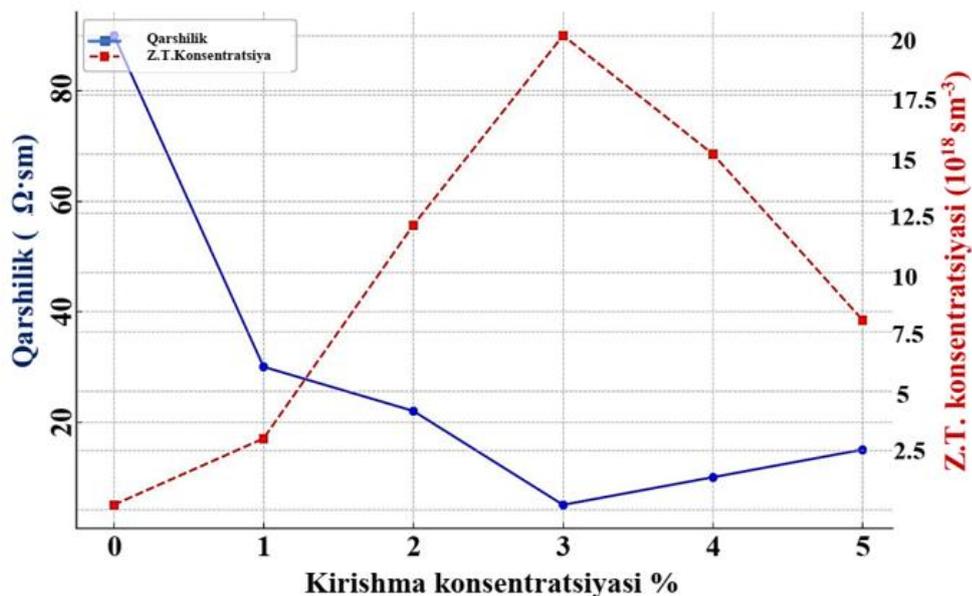


**3-rasm. Sof va B bilan legirlangan ZnO yupqa qatlamlarining SEM tasviri: a-sof ZnO, b-1%, c-3%, d-5% B kirishmasi kiritilgan.**

3-rasmda shisha tagligiga yuqori vakumda termik bug'latish orqali olingan ZnO (a) va ZnO:B (b, c, d) yupqa qatlamlarining SEM tasvirlari berilgan. Undan ko'rinadiki, ZnO kristal donlarning o'lchamlari 60-150 nm oralig'ida o'zgaradi. Odatda plenka sirtining yuqori energetik holati kristal donlarning o'lchamini minimallashtirishga olib keladi, bu esa kristallitlarning o'sish yo'nalishi va panjaradagi ichki deformatsiyalarga ta'sir ko'rsatadi. Sof ZnO kristall donlari orasidagi o'rtacha masofa 100 nm ni tashkil etib, elektron harakati va solishtirma qarshiligini oshiradi. Yuqori teksturalik UB yorug'likni ko'proq tarqatadi, bu esa optoelektron qurilmalar samaradorligini oshiradi. ZnO:B plenkalarining SEM tasvirlari B kirishmasining 1%, 3%, va 5% miqdorlariga mos keladi. 1% B kiritilgan ZnO da kristal donlar o'lchami 120-130 nm gacha kamayib, elektr o'tkazuvchanlik oshadi. 3% B kiritilganda donlarning o'lchami 100-120 nm ga kamayib, solishtirma qarshilik  $1.2 \Omega \cdot \text{cm}$  ga tushadi. 5% B kiritilishi kristal donlarni 60-100 nm ga kamaytirib, sirtning notekisligini oshiradi va solishtirma qarshilikni  $5 \Omega \cdot \text{cm}$  ga

orttiradi.

4-rasmda ZnO:B yupqa qatlamining B kirishmasi miqdoriga qarab elektr xususiyatlarining o'zgarishini tahlil qilish natijalari shuni ko'rsatadiki, kirishma konsentratsiyasining ortishi materialning elektr o'tkazuvchanligi va zaryad

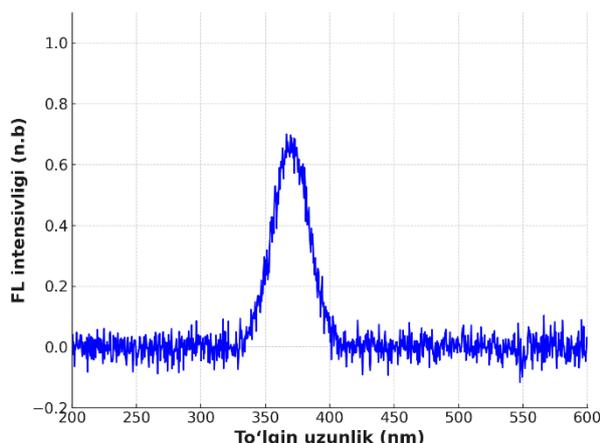


**4-rasm. ZnO:B yupqa plenkalarida kirishma kiritish darajasiga bog'liq holda qarshilik va zaryad tashuvchi zarralar konsentratsiyasining o'zgarishi.**

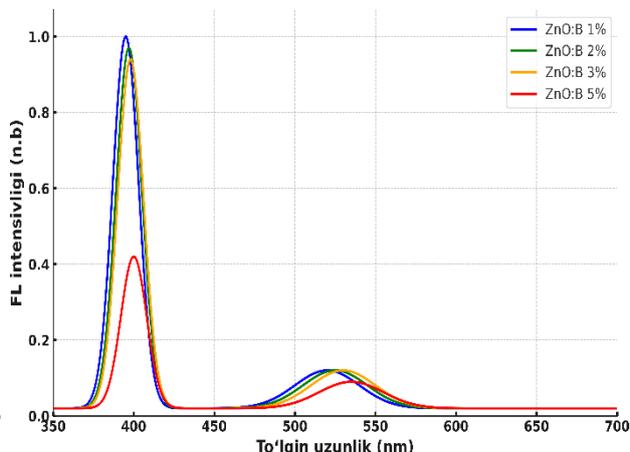
tashuvchilar konsentratsiyasiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Rasmdan ko'rinadiki, sof ZnO ning elektr o'tkazuvchanligi past bo'lib, solishtirma qarshilik  $\sigma=90 \Omega \cdot \text{sm}$  atrofida. 1% B kirishmasi  $\sigma$  ni  $30 \Omega \cdot \text{sm}$  ga tushiradi, elektronlar konsentratsiyasini esa  $n=3 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$  gacha oshiradi. 2% kirishmada  $\sigma$   $22 \Omega \cdot \text{sm}$  gacha pasayib, konsentratsiya  $12 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$  ga yetadi. Eng optimal kirishma miqdori 3% bo'lib, solishtirma qarshilik  $5 \Omega \cdot \text{sm}$  gacha kamayadi va zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi  $20 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$  ga yetadi. Biroq, 5% kirishmada solishtirma qarshilik  $15 \Omega \cdot \text{sm}$  ga oshib, tashuvchilar konsentratsiyasi  $7.5 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$  ga pasayadi, bu yuqori kirishma konsentratsiyasining salbiy ta'sirini ko'rsatadi. Shunday qilib, 3% B kirishmasi ZnO yupqa qatlamlarining elektr xususiyatlarini yaxshilashda eng samarali hisoblanadi, ammo yuqori kirishma konsentratsiyasi materialning sifatini pasaytirishi mumkin.

Fotoluminessensiya (FL) tahlillari (5,6-rasmlar) ZnO yupqa qatlamlarining optik xususiyatlarini baholashda muhim ahamiyatga ega. 5-rasmda havoda Zn kukunlari bug'latib oksidlab olingan ZnO yupqa qatlamining FL spektri tasvirlangan. Asosiy spektral chiziq 330–400 nm (3.76-3.10 eV) oralig'ida joylashgan bo'lib, bu yuqori sifatli ZnO monokristal tuzilmasiga xosdir. O'tkazilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, ZnO yupqa qatlamlarida asosiy FL chizig'i Lorens konturiga yaqin bo'lib, maksimumi 373,4 nm to'lqin uzunligida (3,32 eV) kuzatiladi, bu esa ZnO ning taqiqlangan zonasi kengligiga mos keladi. Bu cho'qqining mavjudligi materialning yuqori kristall fazaga ega ekanligini va defektlar sonining minimal darajada ekanligini bildiradi. Spekrda asosiy cho'qqidan tashqari kichik fluktuatsiyalar ham kuzatiladi. Ushbu fluktuatsiyalar

qatlamda ayrim defektlar, xususan kislorod bo'shliqlari va panjara nuqsonlari mavjudligini ko'rsatadi. Bunday defektlar nurlanishli rekombinatsiya jarayonlarida ishtirok etib, asosiy spektral chiziqdan tashqari fon nurlanish paydo bo'lishiga sabab



**5-rasm. Shisha taglikka rux metalini havoda termik bug'latib olingan sof ZnO yupqa qatlamining fotoluminesensiya spektri.**

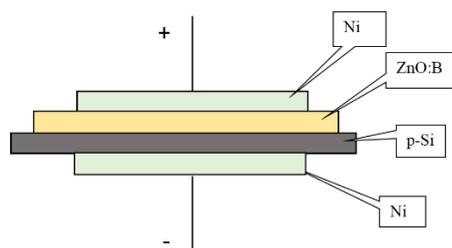


**6-rasm. Shisha taglikka vakumda termik bug'latib olingan ZnO:B yupqa qatlamlarining fotoluminesensiya spektrlari.**

bo'ladi.

6-rasmda vakumda termik bug'latish usuli bilan shisha taglikka olingan B bilan legirlangan ZnO:B yupqa qatlamlarining FL spektrlari B atomining 1, 2, 3 va 5 % miqdorlari uchun keltirilgan. Rasmdan ko'rinadiki, B kirishmasi kiritilgan ZnO yupqa qatlamlarining FL spektrlarida 370–420 nm (3.35–2.96 eV) oraliqdagi asosiy spektral chiziqdan tashqari 475–580 nm (2.61–2.14 eV) oraliqda joylashgan maksimumi  $\lambda=525$  nm ( $h\nu=2.36$  eV) bo'lgan qo'shimcha spektral chiziq paydo bo'ldi. Tabiiyki, bu spektral chiziq borning ZnO taqiqlangan zonasida hosil qilgan donor kirishmaviy sathi ( $E_c-2.36$  eV) orqali ro'y berayotgan qo'shimcha rekombinatsion (donor-valent zona) nurlanish bilan bog'liq. Bu nurlanishning maksimal intensivligi xususiy (zona-zona) nurlanish spektral maksimumidan qariyb 6 marta kichik, spektral yarim kengligi esa 2 barobar katta. Shuni takidlash joizki, toza ZnO da asosiy FL cho'qqisi 3,27 eV energiyada joylashgan bo'lsa, 1% B kirishmasi kiritilganda bu cho'qqi 3,18 eV ga siljiydi, 5% B kirishmasida esa 3,10 eV ga ( $\sim 80$  meV) siljiydi. Bu siljishlar ZnO kristall panjarasidagi deformatsiyalar va defekt holatlarining ortishini ko'rsatadi. Optimal kirishma miqdori 3% B bo'lib (3,16 eV), bu holatda FL cho'qqisi eng yuqori nurlanish rekombinatsiya samaradorligiga ega. Xuddi shuningdek, B kirishmaviy nurlanish bilan bog'liq spektral chiziq ham B miqdoriga qarab spektrning katta to'lqinlar sohasiga siljishi hamda har ikkala spektral maksimumni pasayishi kuzatiladi. Bu natijalar B kirishmasining ZnO ning optik xossalriga ta'sirini chuqurroq tushunishga yordam beradi. Natijalar ZnO yupqa qatlamlarining optik xossalari va sifatini baholashda FL spektrining muhim ahamiyatga ega ekanini ko'rsatadi.

**Dissertatsiyaning “n-ZnO/p-Si, “n-ZnO:B/p-Si geterostrukturalarni olish texnologiyasi va ularning elektrofizik, optik va fotoelektrik hususiyatlarini tadqiq etish” nomli III bobida n-ZnO, n-ZnO:B va p-Si asosida geterostrukturalar olish texnologiyasi ishlab chiqilgan hamda ularning elektrofizik, fotoelektrik va**



**7-rasm. Ni-ZnO/p-Si-Ni geterostrukturaning sxematik tuzilishi.**

optik xossalari tizimli ravishda o‘rganilgan. Ushbu geterostrukturalarni vakuum muhitida hosil qilish texnologiyasi yuqori sifatli, defektsiz va bir jinsli yupqa qatlamlarni yaratishga qaratilgan bo‘lib, bu jarayon murakkab texnologik bosqichlar ketma-ketligidan iborat. Har bir bosqichda strukturaning morfologik yaxlitligi, kristall tuzilish, interfeys holati va o‘tkazuvchanlik xossalarini nazorat qilish orqali geterostrukturaning yakuniy parametrlarini optimallashtirish maqsad qilib olingan. 7-rasmda

tasvirlangan Ni-ZnO/p-Si-Ni geterostruktura tuzilmasi yarimo‘tkazgichli qatlamlar(sandvich struktura) asosida tashkil etilgan bo‘lib, unda: yuqori va pastki kontaktlar sifatida nikel (Ni) qatlamlari, oraliq qatlamlar sifatida ZnO yoki ZnO:B hamda p-Si qatlamlar ishlatilgan. Ushbu struktura vertikal yo‘nalishda tok o‘tkazuvchi bo‘lib, uning elektrofizik xossalari va barqaror kontakt hosil qilish holati optoelektron qurilmalarda qo‘llanish uchun ahamiyatlidir.

n-ZnO/p-Si geterostrukturasini shakllantirishda asosiy yarim o‘tkazgich qatlam bo‘lib xizmat qiluvchi ZnO plenka termik bug‘latish usuli yordamida p-tip kremniy taglikda o‘stirilgan. Bu jarayonda 2-bobda bayon etilgan texnologik yondashuv asos qilib olingan bo‘lib, unda rux metali havoda oksidlanish orqali ZnO hosil qilinadi. O‘zgaruvchan harorat va vaqt parametrlarini optimallashtirish orqali yuqori sifatli ZnO yupqa qatlam hosil qilindi. Bunda kremniy taglik 300 °C gacha qizdirilgan holda, 575 °C da bug‘lanayotgan rux bilan qisqa muddat (60 soniya) ta’sirlashtirildi. Rux bug‘lari taglik sirtiga cho‘kib, havodagi kislorod bilan reaksiyaga kirishib, ZnO plenkasi shakllanadi. Olingan ZnO qatlam n-tipli o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lib, u p-tip Si bilan bevosita kontaktga kirganida p–n o‘tishli geterostruktura hosil bo‘ladi. Ushbu strukturada interfeys sohasi va potensial to‘siq shakllanib, zaryad tashuvchilarning selektiv transporti uchun qulay elektron sharoitlar yaratiladi. Shuningdek, hosil bo‘lgan ZnO yupqa qatlam yuqori kristallik darajasi va barqaror fazaviy tuzilishga ega bo‘lib, geterostruktura elektrofizik va fotoelektrik xossalarining yaxlit holatda namoyon bo‘lishiga asos yaratadi.

Ni-ZnO:B/p-Si-Ni geterostruktura olish jarayonida ZnO:B qatlamning qalinligi doimiy nazorat ostida bo‘lishi kerak. Odatda, kvarts kristalli monitorlar yordamida qalinlik o‘lchanadi va o‘stirish jarayoni davomida qatlamning bir tekis o‘sishi ta’minlanadi. ZnO:B qatlamning optimal qalinligi 700-900 nm oralig‘ida bo‘lib, bu struktura sifatini oshirishga xizmat qiladi. Qalinlikni nazorat qilishda absolyut xatolik  $\pm 10$  nm dan oshmasligi maqsadga muvofiq.

Ni-ZnO/p-Si-Ni va Ni-ZnO:B/p-Si-Ni geterostrukturalarda ZnO va ZnO:B yupqa qatlamlarning elektrofizik xossalari alohida o‘rganiladi. Xususan, Holl o‘lchashlari yordamida elektronlar konsentratsiyasi, harakatchanligi va turi (n- yoki

p-tip) aniqlandi. O'lchovlar xona haroratida (300 K) doimiy magnit maydoni sharoitida klassik to'rt kontaktli sxema asosida amalga oshirildi.

Birinchi bosqichda, geterostrukturalardagi ZnO va ZnO:B yupqa qatlamlarning burchaklarida elektr kontaktlar olindi. Kontaktlar orqali barqaror tok uzatildi va unga perpendikulyar yo'nalishda magnit maydon berildi. Natijada hosil bo'lgan Holl kuchlanishi  $U_H$  raqamli voltmetr yordamida o'lchandi.

O'lchangan qiymatlar asosida Holl koeffitsienti quyidagi formula orqali hisoblandi:

$$R_H = \frac{U_H \cdot d}{I \cdot B}, \quad (1)$$

bu yerda  $d$  – qatlam qalinligi,  $I$  – namunadan o'tayotgan tok kuchi,  $B$  – magnit maydon induksiyasi. Holl koeffitsienti yordamida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi aniqlandi:

$$n = \frac{1}{qR_H}, \quad (2)$$

$q$  – namunadagi elementar tok tashuvchi zarrachaning elektr zaryadi. Bundan tashqari, solishtirma elektr o'tkazuvchanlik  $\sigma$  qiymatlarini Om qonuni asosidagi

$$\sigma = \frac{Il}{daU}$$

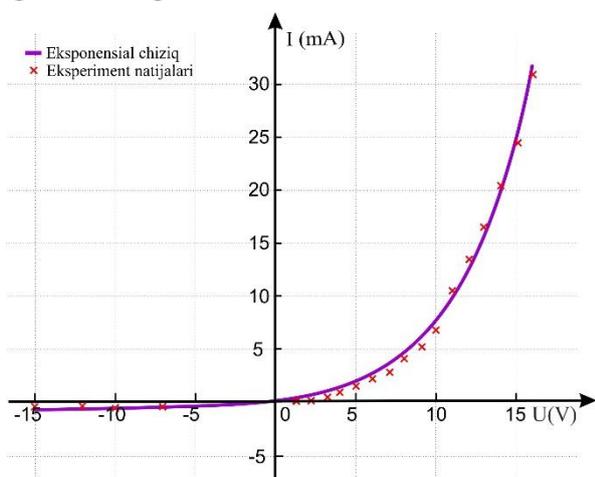
ifodadan aniqlangach, harakatchanlik quyidagi formula bilan hisoblab chiqildi:

$$\mu = R_H \cdot \sigma. \quad (3)$$

O'lchov natijalariga ko'ra, B bilan legirlangan ZnO yupqa qatlamlarda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi 5–7  $\text{sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  dan 32–35  $\text{sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  gacha ortganligi aniqlandi. Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi esa  $10^{18} \text{ sm}^{-3}$  atrofida qayd etildi. Holl koeffitsientining manfiy qiymati esa qatlamlarning n-tipli o'tkazuvchanlikka ega ekanligini ko'rsatadi. Bu esa ZnO strukturasi B atomlarining kristal panjara

tugunlariaro holatda joylashib, donor sathlarini hosil qilganini tasdiqlaydi.

8-rasmda kremniy taglikka Zn metalini havoda termik bug'latib olingan Ni-ZnO/p-Si-Ni geterostrukturaning VAX keltirilgan. Rasmdan ko'rinadiki, ushbu VAX ideal p-n diod harakteristikasiga (eksponensial qonuniyatga mos tutash chiziq) juda yaqin. Geterodiodning to'g'rilash koeffitsienti 250 ga yaqin. Geterostruktura musbat kuchlanish berilganda, tok oqimi elektronlarning monopolyar injeksiyasi natijasida yuzaga keladi deyish mumkin (9-rasmga qarang. Geterocheharada



**8-rasm. Zn ni havoda termik bug'latib olingan Ni-ZnO/p-Si-Ni geterostrukturaning VAX. T=300 K.**

valent zonalarning uzilishi tufayli teshiklar uchun  $\Delta E=2.1$  eV potensial barrier mavjud). Grafikda kuchlanishning to‘g‘ri yo‘nalishda ortishi tok kuchining eksponensial o‘shishiga olib kelishi, teskari yo‘nalishda esa oqimning juda kichik qiymatlarda qolishi yaqqol ko‘rinib turibdi. Tahlillar geterostruktura orqali tok o‘tish mexanizmidagi tok oqimini cheklovchi tuzoq sathlarning dielektrik ichida va dielektrik-yarimo‘tkazgich chegarasida mavjudligi bilan bog‘liqligini ko‘rsatadi. Olingan natijalardan ZnO/p-Si geterostrukturalarining VAX chiziqlari GaAs va GaP tagliklariga nisbatan yuqoriroq to‘g‘rilash koeffitsienti, kamroq teskari oqim zichligi va barqarorroq diod xarakteristikalarini bilan ajralib turishi kelib chiqadi. Bu esa kremniy asosidagi geterostrukturalarning interfeys sifatining yuqoriligi, kontakt potensialining optimal darajada bo‘lishi, va barrier xususiyatlarining samaradorligi bilan izohlanadi.

Ni-ZnO/p-Si-Ni geterostrukturasining VAX larini tahlil qilishda yarimo‘tkazgich o‘tish zonasidagi zaryad tashuvchilarning xatti-harakatini boshqaruvchi nazariy modellarga e‘tibor berish muhimdir. Diodning to‘g‘ri va teskari yo‘nalishdagi kuchlanish ostidagi VAX larini tasvirlaydigan asosiy tenglama bu Shokley ideal diod tenglamasi hisoblanadi:

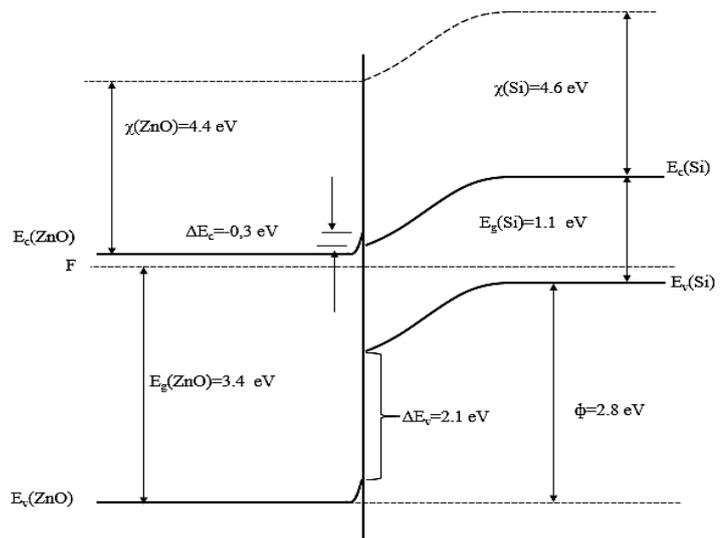
$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU}{nkT}} - 1 \right). \quad (4)$$

Amaliy holatlardagi noidealliklarni hisobga olish uchun tenglama zanjir qarshiligi  $R_S$  va shunt qarshilik  $R_{SH}$  roli e‘tiborga olinadi. Bular diodning ichki qarshiligi tufayli kuchlanish pasayishi va tok oqimi yo‘nalishini hisobga oladi:

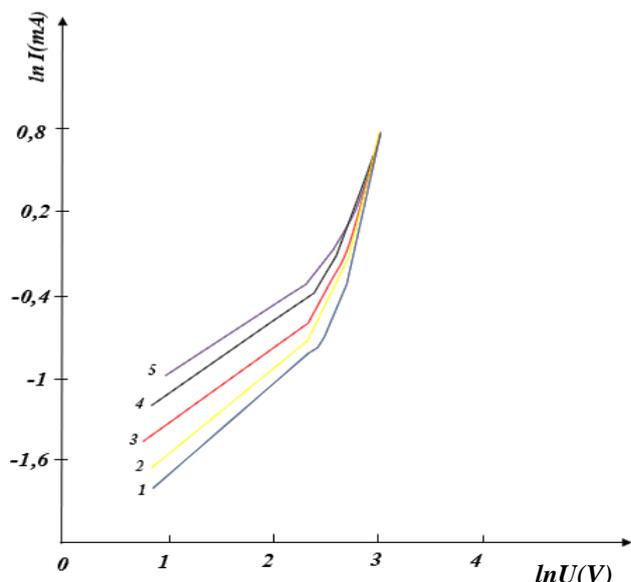
$$I = \frac{U - IR_S}{R_{SH}} + I_0 \left( e^{\frac{q(U - IR_S)}{nkT}} - 1 \right). \quad (5)$$

Ushbu tenglamalar Ni-ZnO/p-Si-Ni geterostrukturaning elektr xususiyatlarini tushunish uchun asos yaratadi va VAX larini aniqroq hisoblash imkonini beradi. Bu esa tajriba ma‘lumotlari bilan taqqoslashni amalga oshiradi. Nazariy hisob-kitoblar va tajribaviy natijalar o‘rtasidagi moslik yoki farqlar geterostrukturaning sifatini, interfeys holatlarining mavjudligini va asosiy zaryad tashuvchanlik mexanizmlarini aniqlashga yordam beradi.

Ni-ZnO:B/Si-Al geterostrukturalarda to‘g‘ri tok oqimi alyuminiy elektrodi musbat qutbga ulanganida yuzaga keladi. Logarifmik koordinatalarda ifodalangan VAX ning to‘g‘ri qismlarining umumiy ko‘rinishi (10-rasm) shuni ko‘rsatadiki, bu holda tok tashuvchilarning monopolyar injeksiyasi sodir bo‘ladi va tok dielektrikdagi hamda dielektrik-yarimo‘tkazgich chegarasidagi elektronlar tufayli



**9-rasm. n-ZnO/p-Si geterostrukturaning sxematik zonaviy diagrammasi.**



**10-rasm. Ni-ZnO:B-Si-Al getero-strukturasiining haroratga bog‘liq VAX quyidagi haroratlarda: 1- 299 K; 2- 321 K; 3- 333 K; 4- 360 K; 5- 380 K.**

fazoviy zaryadlar bilan chegaralanadi. Bunday ulanish sharoitida Ni-ZnO:B/pSi-Al getero-strukturalari orqali tok oqimi ZnO dan injeksiyalangan elektronlar tomonidan tashilishi mumkinligini taxmin qilish mumkin. 10-rasmdan ko‘rinib turibdiki, VAX uchta harakterli qismga bo‘linadi: omik ( $I(U)$ ), kvadratik ( $I(U^2)$ ) va tokning keskin o‘shishi ( $I(U^{m+1})$ ), bu yerda  $m > 2$ ). Ma‘lumki, monopolyar injeksiya holatida VAX ning kvadratik qismidagi bog‘lanish quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$J = \frac{9\varepsilon\mu\theta U^2}{8d^3} \quad (6)$$

Bu yerda:  $\varepsilon$  – dielektrik doimiysi;  $\mu$  – dreyf harakatchanlik;  $U$  – qo‘yilgan kuchlanish;  $d$  – qatlamning qalinligi;  $\theta$  – injeksion faktor.

Agar  $\varepsilon = 8,3$ ,  $\mu \approx 12,0 \text{ sm}^2/\text{Vs}$  va qatlam qalinligi uchun tajribaviy qiymatlar  $d = 1 \cdot 10^{-4} \text{ sm}$ ,  $J = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ A/sm}^2$  va kuchlanish  $U = 30 \text{ V}$  bo‘lsa, quyidagi formula bo‘yicha injeksion faktor  $\theta$  baholangan:

$$\theta = \frac{8Jd^3}{9\varepsilon\mu U^2} = 3,3 \cdot 10^{-7} \quad (7)$$

Injeksion faktorning bunday kichik qiymati ZnO:B hamda p-Si chegarasida yuqori konsentratsiyadagi elektronlar mavjudligini ko‘rsatadi. Elektronlar konsentratsiyasini quyidagi formula bo‘yicha hisoblash mumkin:

$$N_e = \frac{2\varepsilon U}{ed^2} \quad (8)$$

Yuqoridagilarni e‘tiborga olsak, bu qiymat  $N_e = 3.82 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$  ga teng bo‘ladi.

Elektronlar donor sathining kengligi quyidagi formula yordamida hisoblanadi:

$$E_d = kT \ln \frac{N_0}{g\theta N_e}, \quad (9)$$

$\theta$  va  $N_e$  kattaliklarning qiymatlari hisobga olinsa, donor sath energiya kengligi  $E_d = 0.45 \text{ eV}$  ga teng bo‘lib chiqadi.

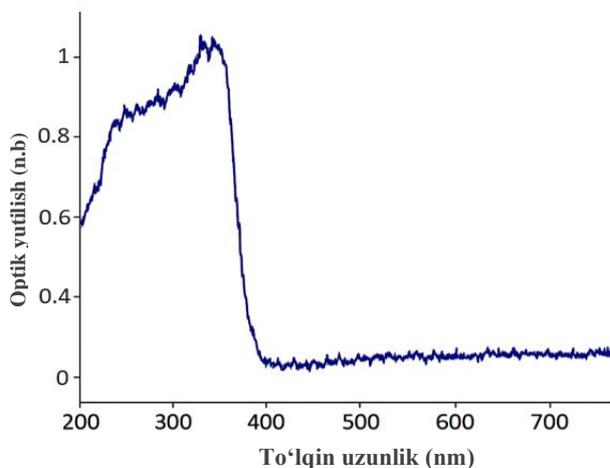
Demak, tok tashishda qatnashayotgan elektronlar  $N_e = 3.82 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$  konsentratsiyaga ega bo‘lib, o‘tkazuvchanlik zonasining pastki qismidan 0,45 eV donor sath hosil qilgan.

Aluminiy elektrodi manfiy qutbga ulanganida, yuqori qarshilikka ega ZnO:B qatlamiga teshikalar Si tomonidan injeksiyalanadi. VAX,  $\ln I$  va  $\sqrt{U}$  koordinatalarida chizilganda chiziqli xarakterga ega bo‘ladi va haroratning ortishi bilan kuchayadi. ZnO:B va Si o‘rtasidagi potensial to‘siq balandligini aniqlash uchun VAX ning haroratga bog‘liqligi o‘rganildi.  $\ln[I/SAT^2]$  va  $U^{1/2}$  bog‘liqligi yordamida potensial to‘siq balandligi quyidagi formula orqali hisoblandi:

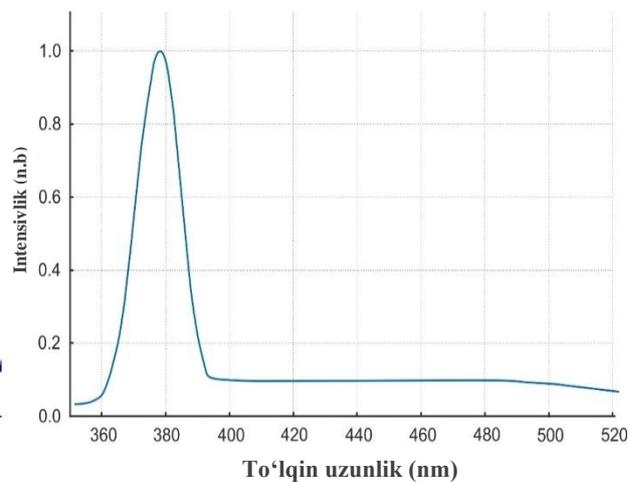
$$\phi_B = -kT \ln \frac{I_0}{SAT^2} \quad (10)$$

Bu qiymat  $\phi_B=0.75\pm 0.85$  eV ga teng bo‘ldi. Ta’kidlash joizki, 10 V kuchlanishgacha bo‘lgan VAX Shottki xarakterga ega, lekin kuchlanish oshishi bilan xarakter o‘zgaradi. Ushbu strukturalarda tok o‘shishining sekinlashishi kuzatiladi, bu tunellash yoki aralashma o‘tkazuvchanlik bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin.

Shunday qilib, Ni-ZnO:B-Si-Al geteroo‘tishda aluminiy musbat qutbli bo‘lganida (diodning to‘g‘ri ulanishi), donor elektronlar ( $E_d = 0.45$  eV,  $N_e = 3.82 \cdot 10^{18}$  sm<sup>-3</sup>) tomonidan aniqlanadigan injeksion toklar oqadi. Aluminiy elektrodi manfiy qutbli bo‘lganida (teskari ulanish), asosiy rol ni Si va ZnO:B o‘rtasidagi o‘tish o‘ynaydi va VAX Shottki mexanizmi bilan tushuntiriladi. Bu ZnO va p-Si qatlamlari orasidagi p-n o‘tishning mavjudligi bilan bog‘liq bo‘lib, to‘g‘ri yo‘nalishda zaryad tashuvchilar harakati kuchayadi, teskari yo‘nalishda esa oqim sezilarli cheklanadi. Ushbu xususiyatlar geterostrukturaning to‘g‘rilagich sifatida elektron zanjirlarda, optoelektron qurilmalarda va fotovoltaik tizimlarda samarali qo‘llanilishini ta’minlaydi.



**11-rasm. Kremniy taglikka olingan ZnO yupqa plenkaning yutilish spektri. T=300 K.**



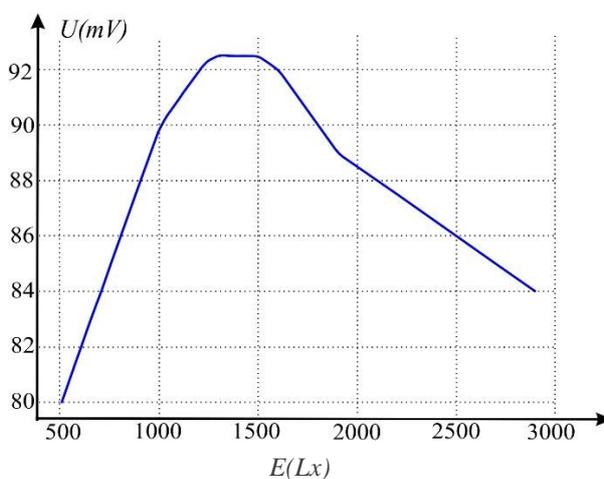
**12-rasm. n-ZnO/p-Si geterostrukturadagi n-ZnOning fotolyuminessensiya spektri. T=300 K.**

11-rasmda kremniy taglikka olingan ZnO yupqa qatlamining yutilish spektri keltirilgan. Ushbu spektrning tahlil ZnO qatnashgan geterostrukturalarning optik xossalarini aniqlashda muhim o‘rin tutadi, chunki yutilish spektri materialning elektron holatlari va optik o‘tish mexanizmlarini tushunish imkonini beradi. ZnO yupqa qatlami uchun yutilish spektri 200–800 nm diapazonda o‘rganildi. Rasmdan ko‘rinadiki, 375 nm to‘lqin uzunligida yutilish maksimumi kuzatildi. Bu ZnO ning taqiqlangan zona energiyasi ( $E_g \sim 3.27$  eV) bilan mos kelib, materialning UB spektral

sohada kuchli yutilish va ko‘rinadigan diapazonda shaffoflik xususiyatini tasdiqlaydi. Ushbu optik xususiyatlar ZnO ni fotodetektorlar, quyosh batareyalari va shaffof elektrodalarda qo‘llash uchun samarali material sifatida belgilaydi.

12-rasmda n-ZnO/p-Si geterostrukturadagi n-ZnOning xona temperaturasidagi FL spektri keltirilgan. Ushbu spektrda 360-390 nm to‘lqin uzunligi sohasida intensivlik cho‘qqisi ~378 nm (3.28 eV) da joylashgan ZnO ning zona-zona rekombinatsiyasiga mos keladigan yagona spektral chiziq kuzatiladi. 5-rasmdagi spektrdan farqi shundaki, geterostrukturada spektral chiziq toraygan va maksimum uzun to‘lqin sohaga 5 nmga siljigan. Spektrda asosiy cho‘qqidan keyin 400–520 nm oralig‘ida keng, lekin past intensivlikli fon signal mavjud bo‘lib, bu strukturadagi chuqur defekt sathlarida sodir bo‘ladigan rekombinatsiyalar (masalan, kislorod bo‘shliqlari, Zn interstitsiallar) bilan bog‘liqdir. Ushbu signal ZnO qatlami bilan Si sirtidagi interfeysda yuzaga kelgan bo‘lishi mumkin bo‘lgan sirt defektlarini ham ko‘rsatadi.

n-ZnO:B/p-Si geterostrukturaning xona temperaturasida tabiiy yorug‘likda olingan lyuks-volt karakteristikasi 13-rasmda aks ettirilgan. Grafikda yoritilish intensivligi ( $E$ ) oshishi bilan kuchlanish ( $U$ ) 1500 Lx atrofida maksimal qiymatga (92 mV) yetgani va keyin pasayishi kuzatiladi. Maksimal kuchlanish ZnO ning yorug‘likni yutish va fozozaryad hosil qilish qobiliyati bilan bog‘liq bo‘lib, yuqori intensivliklarda pasayishi esa interfeysdagi rekombinatsiya jarayonining kuchayishi va defektlarning ta’siri bilan izohlanadi. Maksimumdan keyingi

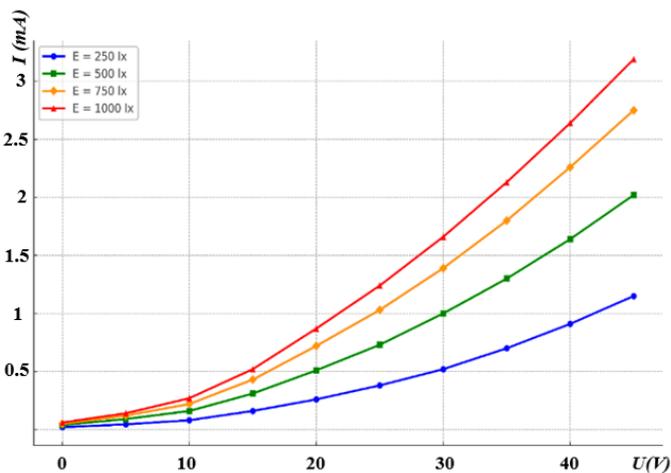


**13-rasm. n-ZnO:B/p-Si geterostrukturaning xona temperaturasidagi lyuks-volt karakteristikasi.**

intensivliklarda kuchlanishning pasayishi ikkita asosiy fizik sabablarga tayanadi: 1. Rekombinatsiya jarayonining faollashuvi – yuqori yoritilish darajasida hosil bo‘lgan erkin zaryad tashuvchilar sonining ko‘pligi ularning o‘zaro rekombinatsiyasini kuchaytiradi, natijada hosil bo‘layotgan fotoelektr yurutuvchi kuch kamayadi. 2. Interfeys defektlari va ichki tuzoqlar – ZnO:B va p-Si o‘rtasidagi interfeysda mavjud bo‘lgan defekt holatlar va chuqur sathlar kuchlanish samaradorligini pasaytiruvchi tuzoq sath rolini o‘ynaydi. Ushbu yorug‘likka yuqori sezgirlik xususiyati n-ZnO:B/p-Si geterostrukturasi ultrabinafsha detektorlar, fotodetektorlar va optoelektron qurilmalarda samarali qo‘llash imkonini yaratadi.

Shuni alohida qayd etish lozimki, ZnO:B yupqa qatlamining yuqori sezuvchanligi B elementining ZnO panjarasidagi donor sathlarini hosil qilishi bilan bog‘liq bo‘lib, bu sathlar elektronlarni foton ta’sirida osonlik bilan hosil qilish imkonini beradi. Bu esa nurlanishni yaxshi yutuvchi va sezuvchi strukturani shakllantiradi. Olingan namunada yuqori va pastki qismlarga Omik kontaktlar qo‘yilib,  $E=0$  lx va  $E=1000$  lx sharoitida VAX tekshirildi. 14-rasmda keltirilgan

grafik n-ZnO:B/p-Si asosidagi geterostrukturaning turli yorug'lik intensivliklarida (250, 500, 750, 1000 Lx) kuchlanish  $U$  (V) va tok kuchi  $I$  (mA) orasidagi bog'liqlikni ifodalaydi. Grafikdan ko'rinadiki, yoritilish darajasi oshgani sayin, bir xil kuchlanish ostida tok kuchi sezilarli darajada ortadi. Bu holat strukturaning yuqori yorug'lik sezuvchanligi va



**14-rasm. Ni-ZnO:B/p-Si-Al geterostrukturaning turli yorug'lik intensivliklaridagi VAX grafiklari.**

fotoelektron generatsiya samaradorligi bilan izohlanadi. Geterostrukura VAX uchun quyidagi ifoda o'rinli:

$$I = I_0 e^{\frac{qU}{c k T}}, \quad (11)$$

bu yerda  $q$  – elektron zaryadi,  $U$  – kontaktlar orasidagi kuchlanish,  $k$  – Bolsman doimiysi,  $T$  – absolyut temperatura,  $c$  – geteroo'tishning noideallik faktori,  $J_0$  – tok zichligining boshlang'ich qiymati.

14-rasmdagi grafik yordamida olinadigan tajriba qiymatlaridan foydalanib, formula

orqali kiritilgan «c» doimiy kattalikni aniqlash mumkin. Shu bilan birga, injeksion kambag'allanish effekti orqali kuchlanish va tok kuchining bog'liqligi tushuntirildi. Formulada keltirilgan "c" doimiy kattalik, namunadan olingan VAX bo'yicha eksperimental qiymatlar yordamida quyidagi tenglama orqali hisoblandi:

$$c = \frac{q(U_2 - U_1)}{kT \cdot \ln(I_2/I_1)}, \quad (12)$$

bu yerda  $c = 7,84$  ni, boshlang'ich eksponensial kattalik esa  $I_0 = 0,038 \cdot 10^{-3}$  A ni tashkil etishi aniqlandi.

Grafik va ushbu effektdan olingan ma'lumotlar asosida ZnO/p-Si geterostrukturaning yoritilish ostida qanday xususiyatlarga ega bo'lishini o'rganish imkoniyati yaratildi, bu esa uni fotovoltaik va boshqa fotoelektrik qurilmalarda foydalanish imkonini beradi.

Nazariyaga ko'ra, namunaga berilayotgan kuchlanishning to'g'ri tok bilan bog'liqligi quyidagi ifoda yordamida izohlanadi:

$$U \approx U_0 e^{Jad}, \quad (13)$$

bu yerda  $J$  – tok zichligi,  $U_0$  – dastlabki kuchlanish,  $d$  – qalinlik,  $a$  – doimiy kattalik va u quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$a = \frac{1}{2qD_p n_t}, \quad (14)$$

bu yerda  $D$  – zaryad tashuvchilar diffuziya koeffitsienti,  $n_t$  – kirishma konsentratsiyasi. Ma'lumki,  $D$  ning qiymati quyidagi Eynshteyn munosabatidan topiladi:

$$D = \frac{kT}{q\mu_p} \quad (15)$$

Ushbu ifodalar orqali hisoblangan  $a$  doimiy kattalik kristall panjarada yuzaga kelayotgan chuqur sathli panjara nuqsonlari bilan bog‘liq bo‘lgan ambipolyar diffuziya va dreyf jarayonlarini o‘rganishga imkon beradi. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, injeksion kambag‘allanish effekti kuzatilishi uchun quyidagi shart bajarilishi kerak:  $Jad > 2$ . Xona temperaturasida  $Jad \approx 11,32$  ga teng bo‘lib, bu shartni qanoatlantiradi va injeksion kambag‘allanish effekti (asosiy tok tashuvchilar kamayishi) yuzaga kelishi tasdiqlanadi.

Ni–ZnO:B/p-Si–Ni geterostrukturasining turli yorug‘lik intensivligida qayd etilgan VAX, strukturada yorug‘likning kuchli yutilishi, donor sathlar orqali fotogeneratsiya jarayonlari, va zaryad tashuvchilarning samarali harakati mavjudligini ko‘rsatmoqda. Bu holat geterostrukturaning fotodetektor, quyosh elementlari va ultrabinafsha nurlanishga sezgir optoelektron qurilmalarda qo‘llash uchun yuqori salohiyatga ega ekanligini tasdiqlaydi.

## X U L O S A

“ZnO, ZnO:B, va n-ZnO/p-Si asosidagi yupqa plenkali strukturalarning elektrofizik va optik xossalari” mavzusi bo‘yicha olingan ilmiy natijalar asosida quyidagi **asosiy xulosalarga** kelindi:

1. Barqaror elektrofizik, optik hususiyatli ZnO va ZnO:B yupqa polikristal qatlamlarni olishning optimal parametrlari: 1) havoda Zn kukunlarini 575°C da 1 min termik bug‘latish: taglik harorati 300°C, qalinlik 1.2-1.5 mkm; 2) 1-5 % B qo‘shilgan ZnO kukunlarini  $10^{-4}$  mm.sim.ust vakuumda 30 s termik bug‘latish: tigel harorati 1600°C, qalinlik 0.7-0.9 mkm texnologik sharoitlarda takomillashtirildi.

2. Ilk bor ZnO:B qatlamlarida B kirishmasining 3 % gacha ortishi kristal don o‘lchamlarini 130-150 nm dan 80-100 nm gacha kamayishiga, solishtirma qarshilikni  $80 \Omega \cdot \text{cm}$  dan  $1.2 \Omega \cdot \text{cm}$  gacha pasayishiga va elektronlar harakatchanligini deyarli 5 barobarga (ZnO uchun  $2-3 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ , ZnO:B uchun esa  $10-12 \text{ sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ) orttirishiga olib kelishi aniqlandi.

3. ZnO:B yupqa qatlamlarining fotoluminestsensiya spektrida ikki alohida spektral soha aniqlandi: asosiy ultrabinafsha nurlanish (350-400 nm) ZnO ning zona-zona rekombinatsiyasiga mos kelsa, ikkinchi soha (570-620 nm) kirishma donor sathlarida sodir bo‘ladigan rekombinatsiyalar bilan tushuntirildi.

4. Volt-amper xarakteristikalari tahlili asosida n-ZnO:B/p-Si geterostrukturalarida elektronlarning monopolyar injeksiya mexanizmi aniqlanib, donor sath energiya kengligi  $E_d = 0.45 \text{ eV}$  qiymatda eksperimental ravishda aniqlash modeli ishlab chiqildi.

5. Yutilish spektri tahlillari ZnO qatlamining 372 nm da yutilish cho‘qqisini ko‘rsatdi ( $E_g \sim 3,27 \text{ eV}$ ), bu uni optik shaffoflik va kuchli UB nurlanishga sezuvchanlik uchun mos materialga aylantiradi. n-ZnO:B/p-Si tuzilmasida yoritilishga sezuvchan kuchlanish 92 mV gacha yetib, optoelektron qurilmalar uchun istiqbolli ekanligini aniqlandi

6. Ni-ZnO/p-Si va Ni-ZnO:B/p-Si geterostrukturalarida yuqori vakuumda amalga oshirilgan metall kontaktlar yotqizish texnologiyasi natijasida kontakt qarshiligi  $5 \Omega \cdot \text{sm}$  gacha kamaygani aniqlandi. Bu esa strukturalarda elektr tokining o‘tish samaradorligini oshirib, diodli qurilmalarda barqaror ishlash, past teskari oqim va yuqori to‘g‘rilash koeffitsienti ( $\approx 250$ ) kabi funksional parametrlarning yaxshilanishiga olib keldi.

7. Ni-ZnO:B/p-Si-Ni geterostrukturasining volt-amper xarakteristikasi haroratga bog‘liq tarzda tahlil qilinib, 299 K dan 380 K gacha bo‘lgan oraliqda tok kuchining keskin ortishi va bu holat strukturaning harorat o‘zgarishlariga sezgirligini tasdiqlab, uni past quvvatli harorat sensorlari va issiqlik sezuvchi qurilmalarida qo‘llash mumkinligini ko‘rsatdi.

8. n-ZnO:B/p-Si geterostrukturaning yorug‘lik ostidagi VAX va lyuks-volt xarakteristikalari birinchi bor o‘rganilib, 1000 Lx yoritishda tok kuchi 0,53 mA gacha yetishi eksperimental ravishda aniqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ПО  
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК ПРИ ФЕРГАНСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ФЕРГАНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ЮСУПОВ ФАХРИДДИН ТОЖИМАМАТ УГЛИ**

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ZnO, ZnO:V  
и n-ZnO/p-Si**

**01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

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

**Фергана-2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2024.4.PhD/FM1201.

Диссертация выполнена в Ферганском государственном техническом университете. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.fegri.uz](http://www.fegri.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

Научный руководитель:

Султанов Номанжан Акрамович  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Ильяев Халмурат Миджитович  
доктор физико-математических наук

Сабилов Салим Саттиевич  
кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация:

Каракалпакский государственный университет

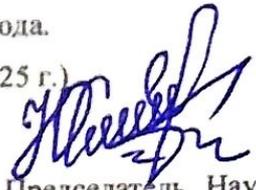
Защита диссертации состоится «28» 08 2025 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 при Ферганском политехническом институте (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+998 73) 241-12-06, факс (+998 73) 241-12-06, e-mail: [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru), малый зал заседания).

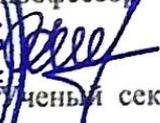
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке (ЦИР) института. (зарегистрирована за № \_\_\_\_\_) (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06).

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 года.

(реестр протокола рассылки № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.)



  
Н. Х. Юлдашев  
Председатель Научного совета по  
присуждению ученой степени  
доктора философии, д.ф.-м.н.,  
профессор

  
Б. Ж. Ахмадалиев  
Член секретарь Научного совета  
по присуждению ученой степени  
доктора философии, PhD ф.-м.н.,  
доцент

  
С. М. Отажонов  
Заместитель председателя научного  
семинара при Учёном совете по  
присуждению ученой степени  
доктора философии (PhD), д.ф.-м.н.,  
профессор

## ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии)

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире при производстве и научных исследованиях наноструктурированных микроэлектронных устройств особое внимание уделяется физике конденсированного состояния. В глобальном масштабе одной из приоритетных задач современности является создание новых многофункциональных тонкоплёночных полупроводниковых структур, отвечающих требованиям современной оптоэлектроники и обладающих высокой фотоэлектрической чувствительностью и точностью, а также дальнейшее совершенствование уже существующих решений. В настоящий момент в изготовлении солнечных элементов, светодиодов, фотодатчиков и других фотоэлектронных приборов классические материалы – кремний, германий и арсенид галлия – практически полностью раскрыли свои функциональные возможности. В этом контексте приобретает особую значимость разработка новых модификаций материалов на основе оксидов металлов и их применение при решении указанных задач.

Во всём мире проводятся научные исследования, направленные на изменение физических свойств полупроводниковых материалов на основе оксида цинка (ZnO) путём борного легирования, управление их характеристиками и создание на их основе оптоэлектронных устройств, в том числе солнечных элементов, фотодиодов и датчиков, работающих в ультрафиолетовом диапазоне. В рамках этого направления приоритет отводится работам по легированию тонких плёнок ZnO парами бора методом термического испарения, определению оптимальных технологических условий формирования плёнок ZnO:B, оптимизации электрических, оптических и фотоэлектрических свойств борсодержащего ZnO, созданию новых модификаций на его основе и определению параметров их кристаллической решётки. Одновременно актуальными задачами являются управление электрической проводимостью и шириной оптической запрещённой зоны легированных ZnO-плёнок, а также повышение фотоэлектрической эффективности гетероструктур ZnO:B/p-Si.

В Республике Узбекистан ведутся масштабные научно-технические исследования по созданию высокоэффективных оптоэлектронных устройств, включая фотодиоды, светочувствительные датчики и солнечные элементы, с целью повышения их качества. В «Стратегии развития нового Узбекистана» на 2022–2026 годы приоритетным направлением определено продвижение науки и инноваций, а также обеспечение технологического переоснащения экономики путём расширения производства новой продукции на основе современных технологий. Для эффективного выполнения этих задач особую важность имеют легирование полупроводниковых слоёв на основе оксида цинка бором, создание высокочувствительных гетероструктур ZnO:B и разработка на их основе фотоэлектронных и энергосберегающих устройств.

Данная диссертационная работа вносит вклад в реализацию задач, определённых Указом Президента Республики Узбекистан от 11 сентября

2023 г. № УП-158 «О Стратегии „Узбекистан – 2030“», Указом от 28 января 2022 г. № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы», Постановлением Президента от 22 августа 2019 г. № ПП-4422 «О мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», Постановлением от 10 июля 2020 г. № ПП-4779 «О дополнительных мерах по повышению энергоэффективности экономики и снижению зависимости отраслей от топливно-энергетических ресурсов», а также рядом других нормативно-правовых актов, регламентирующих данную деятельность.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики.** Данная диссертационная работа соответствует IV приоритетному направлению развития науки и технологий Республики Узбекистан: «Разработка методов использования возобновляемых источников энергии, создание новых технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других современных технологий».

**Степень изученности проблемы.** В настоящее время тонкоплёночные полупроводниковые материалы, в частности тонкие плёнки ZnO, активно изучаются в ведущих научных центрах мира с точки зрения получения и исследования их физических свойств. В частности, в США группа Дж. Бринкера провела подробное исследование структурных и оптико-электронных характеристик наноплёнок ZnO. В Японии учёные Я. Сити и С. Танимато разработали сенсоры на основе слоёв TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> и ZnO, выращенных на кремниевых подложках. В России группа С. И. Рембезы создала солнечные элементы и газовые сенсоры на основе слоёв ZnO и SnO<sub>2</sub>.

Кроме того, в Республике Узбекистан под руководством академика С. З. Зайнобидинова научный коллектив разработал ряд методов получения металлоксидных плёнок. На основе этих методов достигнуты значительные результаты в получении наноструктурированных плёнок с возможностью варьирования их элементного состава и совершенствования технологий осаждения с целью создания чувствительных электронных устройств для различных приложений.

Вместе с тем такие важные аспекты, как функциональная стабильность полупроводниковых структур на основе ZnO, ZnO:В и n-ZnO/p-Si в практических устройствах, их электрооптические свойства при воздействии температуры, света и внешнего электрического поля, а также изменение интерфейсных состояний и контактного сопротивления со временем, изучены недостаточно полно.

**Связь исследования с планами научно-исследовательских работ научного учреждения, в котором выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в Ферганском государственном техническом университете в соответствии с перспективным научным планом института на 2022–2027 годы в рамках проекта «Разработка технологических методов получения гетероструктур на основе кремния, ZnO и AlB<sub>10</sub> и создание

на их основе светодиодов».

**Цель исследования.** Совершенствование технологии получения стабильных по электрофизическим и оптическим свойствам тонкоплёночных структур ZnO, ZnO:B и n-ZnO/p-Si методом термического испарения, а также установление новых закономерностей в их электрофизических и оптических характеристиках.

**Задачи исследования:**

- разработка оптимальных параметров технологии получения тонких плёнок ZnO и ZnO:B методами испарения в атмосфере и в условиях высокого вакуума;

- исследование микроструктуры и поверхностных свойств тонких плёнок ZnO и ZnO:B, а также выявление новых закономерностей в их электрофизических и оптических характеристиках;

- разработка методики технологического получения тонкоплёночной гетероструктуры n-ZnO/p-Si и определение оптимальных параметров для оптоэлектронных устройств на основе комплексного изучения её структурных, электрических и оптических свойств;

- глубокое исследование электрофизических, фотоэлектрических и оптических рабочих характеристик диодной структуры с переходом n-ZnO/p-Si, а также разработка оптимальных режимных параметров для её эффективного применения в оптоэлектронных устройствах.

**Объект исследования.** Тонкие пленки ZnO и ZnO:B, полученные на кремниевых подложках.

**Предмет исследования.** Предметом исследования является изучение электро-физических и оптических свойств полупроводниковых тонкоплёночных структур на основе ZnO, ZnO:B и n-ZnO/p-Si, улучшение их структурных, электрических и оптических характеристик путём легирования бором, а также определение возможностей применения полученных гетероструктур в высокоэффективных оптоэлектронных устройствах.

**Методы исследования.** В ходе исследования тонкие плёнки были получены с использованием технологии термического испарения, а их структура проанализирована методом рентгеновской дифрактометрии. Для детального изучения морфологии поверхности использовались сканирующая электронная микроскопия и атомно-силовая микроскопия. Спектральные характеристики оценивались с применением методов оптической спектроскопии, а вольт-амперные характеристики гетероструктур измерялись с высокой точностью с помощью специализированных приборов.

**Научная новизна исследования**

Научная новизна проведённого исследования заключается в следующем:

– оптимизированы технологические параметры получения стабильных по электрофизическим и оптическим свойствам поликристаллических тонких плёнок ZnO и ZnO:B: 1) термическое испарение порошка Zn на воздухе при 575 °С в течение 1 минуты (температура подложки – 300 °С, толщина – 1.2–1.5 мкм); 2) термическое испарение порошка ZnO с добавлением 1–5 % В в

условиях вакуума  $10^{-4}$  мм рт. ст. в течение 30 секунд (температура тигля – 1600 °С, толщина – 0.7–0.9 мкм);

– впервые установлено, что увеличение содержания примеси В до 3 % в плёнках ZnO:В приводит к уменьшению размера кристаллитов с 130–150 нм до 80–100 нм, снижению удельного сопротивления с  $80 \Omega \cdot \text{см}$  до  $1.2 \Omega \cdot \text{см}$  и увеличению подвижности носителей заряда почти в 5 раз (для ZnO - 2–3  $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , для ZnO:В - 10–12  $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ );

– в фотолюминесцентном спектре тонкой пленки n-ZnO:В были наблюдаемы дублетные спектральные линии в оптических диапазонах 350–400 нм и 570–620 нм, и при увеличении концентрации В было установлено снижение интенсивности спектральных линий, увеличение их полуширины и смещение в область больших длин волн, что обосновано, соответственно, зонно-зонным и рекомбинационным излучением между донорным уровнем примеси В и валентной зоной.;

– вольт-амперный анализ показал, что энергия активации носителей тока ( $E_r$ ) составляет 0,45 эВ, концентрацию носителей  $N_e = 3.82 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а высота барьера Шоттки  $\phi_B = 0,75 \pm 0,085$  эВ. На основании взаимосвязи этих параметров разработана физическая модель, описывающая механизм монополярной инжекции носителей тока.

– впервые в Ni-ZnO:В/p-Si-Al гетероструктуре при увеличении интенсивности освещения наблюдались: при 1000 лк – максимальный фототок 0,53 мА, при 1500 лк – максимальное фотонапряжение 92 мВ. Данн Ni-ZnO:В/p-Si-Al гетероструктуры была исследована в различных температурных режимах, при этом энергию ионизации примесных зон основной эффект объясняется инжекционным обеднением основных носителей и легирования, что положено в основу механизма формирования фототока в этой структуре.

### **Практические результаты исследования**

Технология получения тонких плёнок ZnO и легированного бором ZnO методом термического испарения была оптимизирована путём выбора параметров испарения: температуры испарения, температуры подложки, времени испарения и уровня вакуума;

В результате введения до 3 % примеси бора в состав ZnO было достигнуто снижение удельного сопротивления до  $5 \Omega \cdot \text{см}$ , увеличение подвижности носителей заряда до  $16 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , а также получены плёнки с высокой фоточувствительностью. Обоснована возможность их применения в ультрафиолетовых детекторах, светочувствительных элементах и низкоомных диодных устройствах;

На основе анализа вольт-амперных характеристик гетероструктур n-ZnO/p-Si установлено диодное поведение, высокий коэффициент выпрямления ( $\approx 250$ ), низкий обратный ток и выраженная чувствительность к освещению, что подтверждает возможность практического применения таких структур в полупроводниковых диодах и фотодетекторах.

**Достоверность результатов исследования** обоснована использованием

современных приборов и оборудования, соответствующих международным стандартам, а также проверенных технологий, широко применяемых в мировой практике и заслуживших доверие исследователей. В ходе работы использованы электрические и фоточувствительные приборы, инфракрасный спектрометр и рентгеновский дифрактометр XRD-6100, атомно-силовой микроскоп Park Systems NX10, сканирующий зондовый микроскоп Solver Next, спектрометр Shimadzu-6100, Спектрофлуорометр Shimadzu RF-6000.

#### **Научное и практическое значение результатов исследования.**

Научная значимость экспериментальных результатов по тонким плёнкам ZnO объясняется вкладом в развитие новых научно-теоретических представлений и практики, направленных на понимание электрофизических и фотоэлектрических процессов, механизмов прохождения тока, а также физической природы выявленных эффектов в гетероструктурах n-ZnO/p-Si.

Практическая значимость результатов исследования заключается в создании технологических основ, обеспечивающих возможность производства multifunctional электронных устройств – таких как полупроводниковые диоды и фотодетекторы, чувствительные к температуре и освещённости, на основе гетероструктур n-ZnO:B/p-Si.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных научных результатов по совершенствованию методов получения тонкоплёночных структур ZnO и ZnO:B, а также изучению физических свойств образованных гетероструктур:

В Институте физики полупроводников имени А. В. Ржанова (Сибирское отделение Российской академии наук) в рамках фундаментального проекта № 19-52-12001 «Динамика экситонов и носителей заряда в наноструктурах полупроводников первого рода с неправильным переходом» (2019–2023 гг.) были изучены влияние концентрации бора в слоях ZnO:B на их электрофизические и оптические характеристики, включая ультрафиолетовую компоненту фотолюминесцентного спектра и вольт–амперные характеристики. Полученные результаты позволили теоретически проанализировать состояния экситонов и подвижность носителей заряда.

В совместной работе с Андиганским машиностроительным институтом и Северо-Китайским университетом технологий (КНР) в рамках фундаментального проекта № MUK-2021-40 «Исследование и применение интеллектуальной сети возобновляемой энергетики на основе больших данных» (2022–2023 гг.) были усовершенствованы методы оценки эффективности генерации электрического тока под воздействием света в n-ZnO/p-Si гетероструктурах. За счёт моделирования и анализа изменения фототока при различных уровнях освещённости разработан улучшенный подход к оценке электрических и оптических свойств этих структур под световым воздействием.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на 6 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 7 статей – в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Кабинете Министров Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. Из них 3 статьи опубликованы в республиканских научных журналах и 4 статьи – в зарубежных научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объём диссертации составляет 131 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во введении диссертации кратко обоснованы актуальность и необходимость выбранной темы исследования, показана её связь с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан. Изложены цель и задачи исследования, объект, предмет и методы работы, научная новизна и практические результаты, сведения о внедрении результатов в практику, апробации работы, опубликованных научных трудах, а также приведены краткие сведения о структуре и объеме диссертации.

В **первой главе**, озаглавленной «**Тонкие пленки и гетероструктуры на основе ZnO и ZnO:V: состояние исследований и перспективы**», приведён литературный обзор, охватывающий методы выращивания тонких пленок ZnO и ZnO:V, их электрофизические, оптические и структурные характеристики, а также физические свойства гетероструктур ZnO/Si и их применение в оптоэлектронике. Обоснована практическая значимость разработки новых материалов на основе оксида цинка для использования в полупроводниковых светодиодах (преобразующих электрическую энергию в световое излучение) и солнечных элементах (преобразующих световую энергию в электрическую).

Во второй главе диссертации под названием «**Технология получения тонкоплёночных структур на основе ZnO и их электрофизические и оптические свойства**» изложены методы получения тонких плёнок на основе ZnO, особенности конструкции исследуемых образцов, а также экспериментальное изучение их электрофизических и оптических характеристик. Установлено, что технологии получения плёнок ZnO и ZnO:V являются экологически чистыми, экономичными и позволяют получать перспективные материалы для применения в современной микро- и оптоэлектронике.

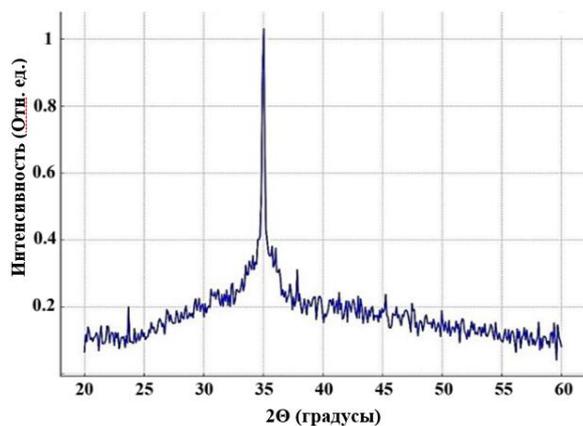
В данной главе определены оптимальные технологические параметры термического испарения для получения плёнок ZnO и ZnO:V:

Первый метод: испарение порошка цинка в воздушной среде со скоростью 9 нм/с, медленный нагрев в течение 30 минут, испарение при температуре 575 °С в течение 1 минуты, температура подложки – 300 °С, расстояние между тиглем и подложкой – 12 см.

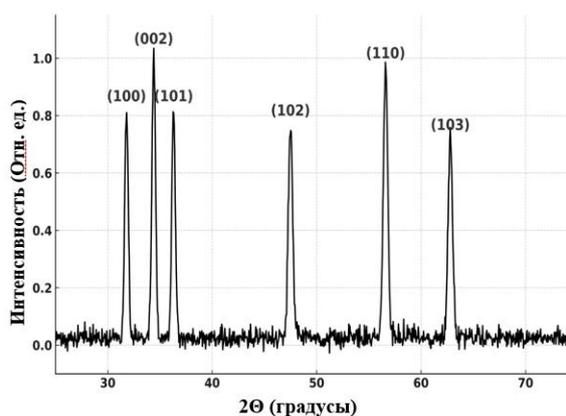
Второй метод: испарение порошка ZnO:В при остаточном давлении  $10^{-4}$  мм рт.ст., медленный нагрев в течение 1 часа, испарение при температуре  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 30 секунд, температура подложки –  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , расстояние между тиглем и подложкой – 14 см.

Введение бора в пленки ZnO вызвало расширение и смещение дифракционных пиков, что указывает на включение атомов бора в кристаллическую решётку ZnO. Увеличение концентрации бора сопровождалось уменьшением размера кристаллитов и увеличением деформации решётки, что способствует улучшению электрических и оптических характеристик материала. Эти результаты важны для использования материалов на основе ZnO в оптоэлектронных и фотоэлектрических устройствах.

Результаты рентгеновской дифракции (РД): на рисунке 1 показан РД-спектр тонких пленок ZnO после термической обработки при температуре  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Основной дифракционный пик на  $2\theta = 34.4^{\circ}$  соответствует плоскости (002) и указывает на высокую степень кристаллизации материала. Вторичные пики,



**Рисунок 1.** Рентгенодифракционный (РД) спектр тонкой пленки ZnO, полученной термическим испарением цинка (Zn) в воздухе на стеклянную подложку.

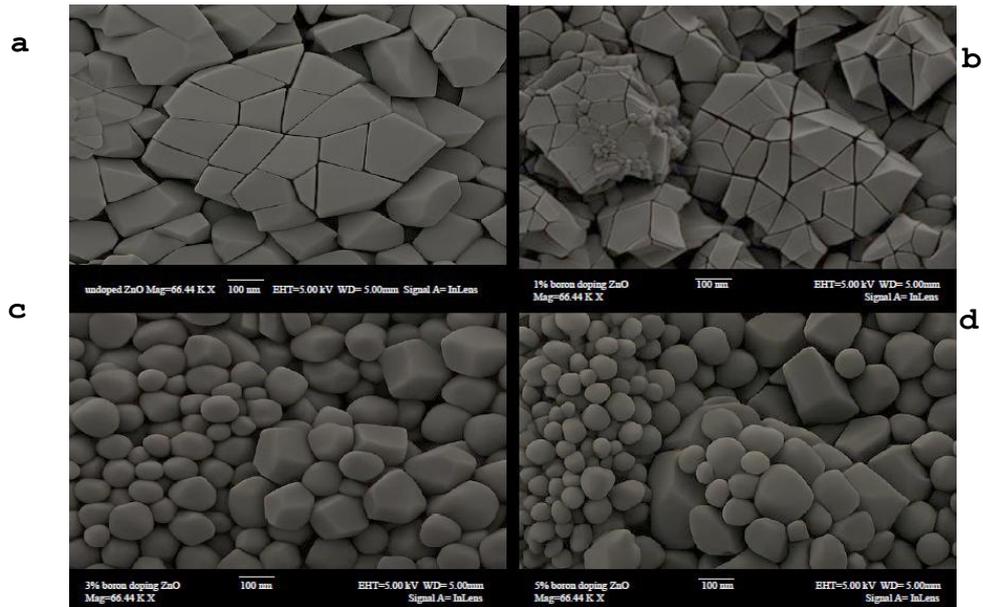


**Рисунок 2.** Рентгенодифракционный (РД) спектр пленки ZnO:В, легированной бором, полученной на стеклянной подложке методом термического испарения в вакууме.

расположенные около  $2\theta = 34^{\circ}$  и  $36^{\circ}$ , подтверждают наличие гексагональной структуры. Термическая обработка увеличила резкость и интенсивность пиков, что свидетельствует об улучшении кристаллической структуры.

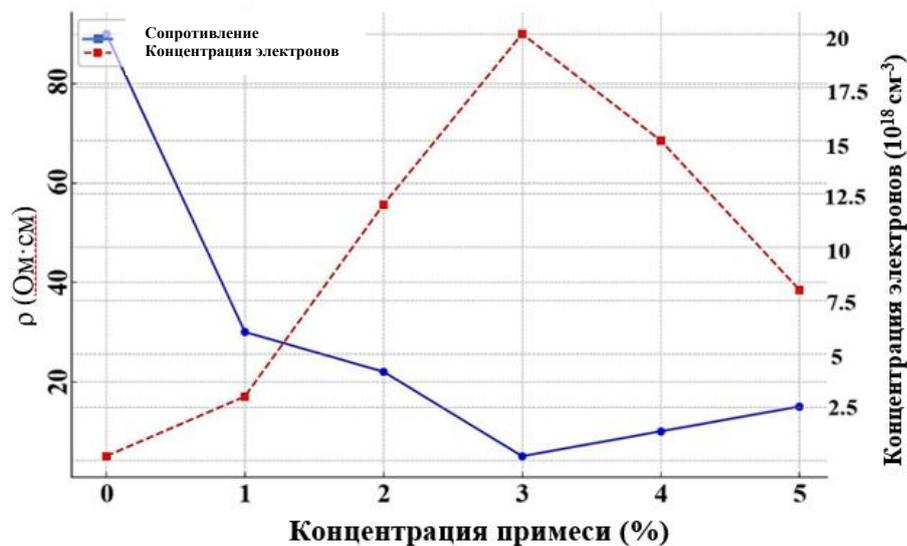
На рисунке 2 представлены РД-спектры пленок ZnO:В с добавлением бора. Пики, соответствующие плоскостям (100), (002) и (101), показывают смещение и расширение, что указывает на включение атомов бора в решётку ZnO и связанные с этим деформации.

На изображении SEM тонких пленок ZnO, полученных термическим окислением на стеклянной подложке (Рис.3), размер зерен показан в диапазоне 100-300 нм. Из-за высокого энергетического состояния поверхности размер зерен минимизирован, что влияет на рост кристаллитов и деформации в



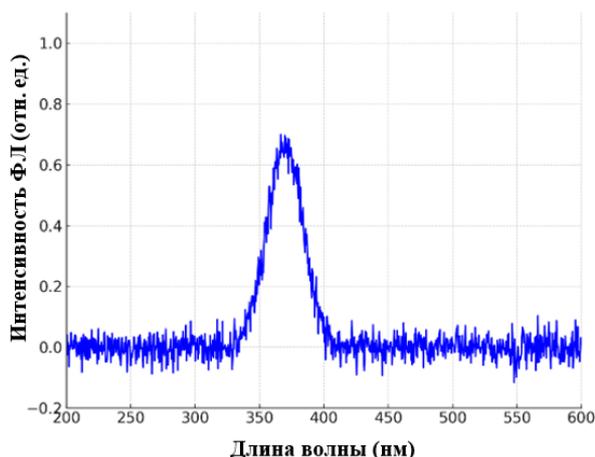
**Рисунок 3. SEM-изображения тонких пленок чистого и бором легированного ZnO: а) чистый ZnO, б) с добавлением 1% В, с) с добавлением 3% В, д) с добавлением 5% В.**

решетке. Среднее расстояние между зернами составляет 200 нм, что увеличивает подвижность электронов и электрическое сопротивление. Высокая текстурированность улучшает рассеяние ультрафиолетового света, что повышает эффективность оптоэлектронных устройств. SEM-изображения ZnO с добавлением борной примеси были получены при концентрации бора 1%(b), 3%(c) и 5%(d). При добавлении 1% бора размер зерен ZnO уменьшается до 130-150 нм, что приводит к увеличению электрической проводимости. При добавлении 3% бора размер зерен сокращается до 100-130 нм, а сопротивление снижается до 1.2  $\Omega \cdot \text{см}$ . При добавлении 5% бора размер зерен уменьшается до 80-100 нм, что увеличивает неровности поверхности, а сопротивление возрастает до 5  $\Omega \cdot \text{см}$ .

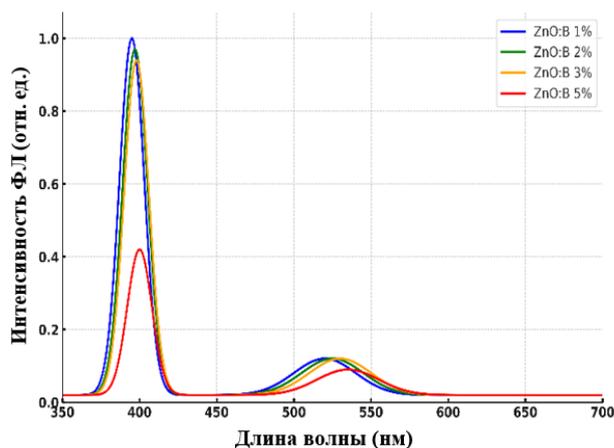


**Рисунок 4. Зависимость сопротивления и концентрации носителей заряда от степени легирования в тонких пленках ZnO:B.**

Результаты анализа изменения электрических свойств материала ZnO с добавлением бора (В) показали (Рис.4), что увеличение концентрации примеси оказывает значительное влияние на электрическую проводимость и концентрацию носителей заряда. В чистом ZnO (0% примеси) проводимость низкая, сопротивление составляет около 90  $\Omega \cdot \text{см}$ . При добавлении 1% бора сопротивление снижается до 30  $\Omega \cdot \text{см}$ , а концентрация носителей заряда увеличивается до  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При 2% примеси сопротивление уменьшается до 22  $\Omega \cdot \text{см}$ , а концентрация носителей достигает  $12 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Оптимальная концентрация примеси составляет 3%, при которой сопротивление снижается до 5  $\Omega \cdot \text{см}$ , а концентрация носителей заряда достигает  $20 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Однако при 5% примеси сопротивление увеличивается до 15  $\Omega \cdot \text{см}$ , а концентрация носителей заряда снижается до  $7.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что свидетельствует о негативном влиянии высокой концентрации примеси. Таким образом, 3% концентрация бора является наиболее эффективной для улучшения электрических свойств материала ZnO, однако высокая концентрация примеси может ухудшить его качество.



**Рисунок 5. Спектр фотолюминесценции тонкой пленки чистого ZnO, полученной термическим испарением металлического цинка в воздухе на стеклянную подложку.**

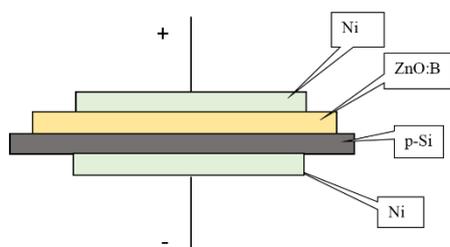


**Рисунок 6. Спектры фотолюминесценции тонких пленок ZnO:B, полученных термическим испарением в вакууме на стеклянную подложку.**

Анализ фотолуминесценции (ФЛ) (рисунки 5 и 6) имеет важное значение для оценки оптических свойств тонких пленок ZnO. На рисунке 5 представлен спектр фотолуминесценции тонкой пленки ZnO, полученной путем испарения и окисления металлического цинка в воздухе. Основная спектральная полоса располагается в диапазоне 330–400 нм (3,76–3,10 эВ), что характерно для монокристаллической структуры высококачественного ZnO. Проведённые исследования показывают, что основная полоса фотолуминесценции тонких пленок ZnO близка по форме к контуру Лоренца, с максимумом при длине волны 373,4 нм (3,32 эВ), что соответствует ширине запрещённой зоны ZnO.

Наличие этого пика свидетельствует о высокой степени кристалличности материала и минимальном количестве дефектов. Кроме основного пика, в спектре также наблюдаются небольшие флуктуации. Эти флуктуации указывают на наличие в пленке некоторых дефектов, в частности, кислородных вакансий и дефектов решетки. Такие дефекты участвуют в радиационных рекомбинационных процессах, вызывая фоновое излучение вне основной спектральной полосы.

На рисунке 6 приведены спектры ФЛ тонких пленок ZnO:B, легированных бором и полученных методом термического испарения в вакууме на стеклянную подложку, приведены для содержаний бора 1, 2, 3 и 5 %. Из рисунка видно, что в спектрах ФЛ тонких пленок ZnO с добавлением бора, помимо основной спектральной линии в диапазоне 370–420 нм (3,35–2,96 эВ), появляется дополнительная спектральная линия с максимумом  $\lambda = 525$  нм ( $h\nu = 2,36$  эВ), расположенная в диапазоне 475–580 нм (2,61–2,14 эВ). Очевидно, что эта спектральная линия связана с дополнительным рекомбинационным (донор – валентная зона) излучением, происходящим через донорный примесный уровень ( $E_c - 2,36$  эВ), сформированный бором в запрещенной зоне ZnO. Максимальная интенсивность этого излучения примерно в 6 раз ниже спектрального максимума собственного (зона-зона) излучения, а спектральная полуширина в 2 раза шире. Следует отметить, что в чистом ZnO основной пик ФЛ расположен на энергии 3,27 эВ, при добавлении 1 % бора этот пик сдвигается до 3,18 эВ, а при 5 % – до 3,10 эВ (~80 мэВ). Эти сдвиги указывают на увеличение деформаций в кристаллической решетке ZnO и рост количества дефектных состояний. Оптимальное содержание примеси составляет 3 % бора (3,16 эВ), при котором пик ФЛ обладает наибольшей эффективностью излучательной рекомбинации. Также наблюдается, что спектральная линия, связанная с примесным излучением бора, с увеличением содержания бора смещается в область больших длин волн, и интенсивности обоих спектральных максимумов уменьшаются. Эти результаты помогают глубже понять влияние борной примеси на оптические свойства ZnO. Результаты показывают, что спектр фотолюминесценции играет важную роль в оценке оптических свойств и качества тонких пленок ZnO:B



**Рисунок 7. Схематическая структура гетероструктуры Ni-ZnO/p-Si-Ni.**

В третьей главе диссертации под названием «Технология получения гетероструктур n-ZnO/p-Si и n-ZnO:B/p-Si и исследование их электрофизических, оптических и фотоэлектрических свойств» разработана технология формирования гетероструктур на основе n-ZnO, n-ZnO:B и p-Si, а также систематически изучены их электрофизические, фотоэлектрические и оптические характеристики.

Технология формирования указанных

гетероструктур в вакуумной среде направлена на создание высококачественных, бездефектных и однородных тонких пленок и включает последовательность сложных технологических этапов. На каждом этапе осуществляется контроль морфологической целостности структуры, кристаллической решётки, состояния межфазной границы и проводящих свойств с целью оптимизации конечных параметров гетероструктуры.

На рисунке 7 представлена схема гетероструктуры Ni–ZnO/p-Si–Ni, которая построена по принципу сэндвич-структуры на основе полупроводниковых слоёв. В данной структуре верхний и нижний контакты выполнены из никеля (Ni), а промежуточными слоями служат плёнки ZnO или ZnO:B и слой p-типа кремния (p-Si). Структура проводит ток в вертикальном направлении, а её электрофизические характеристики и стабильность формирования контакта имеют важное значение для применения в оптоэлектронных устройствах.

При формировании гетероструктуры n-ZnO/p-Si в качестве основного полупроводникового слоя используется плёнка ZnO, осаждённая на подложку из p-типа кремния методом термического испарения. При этом была применена технологическая схема, изложенная во второй главе, согласно которой металлический цинк испаряется и окисляется в воздушной среде, формируя ZnO. Путём оптимизации температуры и времени испарения была получена высококачественная плёнка ZnO. Подложка из кремния нагревалась до 300 °C, после чего в течение короткого времени (60 секунд) воздействовала на испаряющийся цинк при температуре 575 °C. Пары цинка оседали на поверхность подложки, где вступали в реакцию с кислородом воздуха и образовывали плёнку ZnO.

Полученный слой ZnO обладает проводимостью n-типа, и при непосредственном контакте с кремнием p-типа формируется гетероструктура с p–n-переходом. В данной структуре формируется межфазная область и потенциальный барьер, создающий благоприятные условия для селективного переноса носителей заряда. Кроме того, полученная плёнка ZnO характеризуется высокой кристаллическостью и стабильной фазовой структурой, что способствует проявлению целостных электрофизических и фотоэлектрических свойств гетероструктуры.

При формировании гетероструктуры Ni–ZnO:B/p-Si–Ni толщина слоя ZnO:B должна находиться под постоянным контролем. Обычно толщина измеряется с помощью кварцевого кристаллического монитора, что обеспечивает равномерный рост плёнки в процессе осаждения. Оптимальная толщина слоя ZnO:B составляет 700–900 нм, что способствует улучшению качества структуры. Абсолютная погрешность измерения толщины не должна превышать  $\pm 10$  нм.

В гетероструктурах типа Ni–ZnO/p-Si–Ni и Ni–ZnO:B/p-Si–Ni электрофизические свойства тонких плёнок ZnO и ZnO:B изучаются отдельно. В частности, с помощью измерений эффекта Холла определены концентрация электронов, их подвижность и тип проводимости (n- или p-типа). Измерения

проводились при комнатной температуре (300 К) в условиях постоянного магнитного поля с использованием классической четырёхконтактной схемы.

На первом этапе на углах тонких плёнок ZnO и ZnO:B, входящих в состав гетероструктур, были нанесены электрические контакты. Через контакты пропускаться стабильный ток, а в перпендикулярном направлении прикладывалось магнитное поле. Возникшее в результате напряжение Холла  $U_H$  измерялось с помощью цифрового вольтметра.

На основе измеренных значений коэффициент Холла рассчитывался по следующей формуле:

$$R_H = \frac{U_H \cdot d}{I \cdot B}, \quad (1)$$

где:  $d$  – толщина слоя,  $I$  – сила тока, проходящего через образец,  $B$  – индукция магнитного поля.

С помощью коэффициента Холла определялась концентрация носителей заряда:

$$n = \frac{1}{qR_H}, \quad (2)$$

где  $q$  – заряд элементарной носящей частицы.

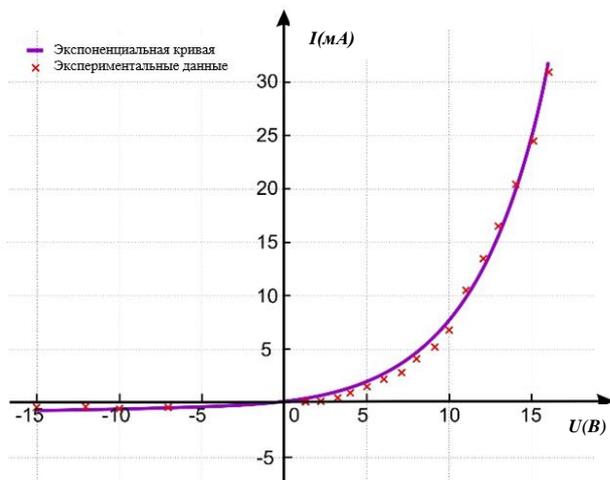
Кроме того, после определения удельной электропроводности  $\sigma$  на основе закона Ома:

$$\sigma = \frac{Il}{daU}$$

подвижность носителей заряда рассчитывалась по формуле:

$$\mu = R_H \cdot \sigma. \quad (3)$$

По результатам измерений установлено, что подвижность носителей



**Рисунок 8.** Вольт-амперная характеристика (ВАХ) гетероструктуры Ni-ZnO/p-Si-Ni, полученной термическим испарением Zn в воздухе.  $T = 300$  К.

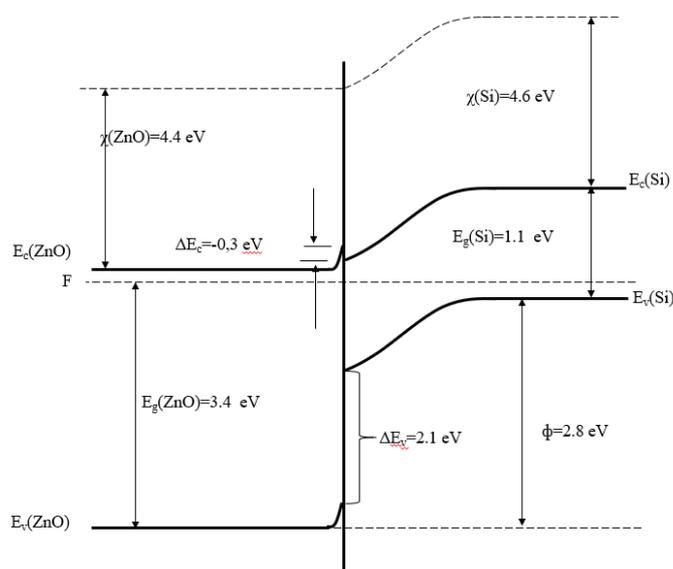
заряда в слоях ZnO, легированных бором, увеличивается от 5–7  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  до 32–35  $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Концентрация носителей заряда зафиксирована на уровне порядка  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Отрицательное значение коэффициента Холла указывает на n-тип проводимости плёнок, что подтверждает размещение атомов бора в межузельных положениях кристаллической решётки ZnO и формирование ими донорных уровней.

На рисунке 8 приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ) гетероструктуры Ni–

ZnO/p-Si-Ni, полученной термическим испарением цинка в воздухе на кремниевую подложку. Из рисунка видно, что данная ВАХ близка к характеристике идеального р-п диода (сопрягаемая кривая, соответствующая экспоненциальной зависимости). Коэффициент выпрямления гетеродиода составляет около 250. При подаче прямого напряжения на гетероструктуру можно утверждать, что ток возникает в результате монополярной инжекции электронов (см. рисунок 9: на гетерогранице из-за разрыва валентных зон существует потенциальный барьер для дырок  $\Delta E = 2,1$  эВ).

На графике отчётливо видно, что увеличение прямого напряжения приводит к экспоненциальному росту тока, тогда как при обратном напряжении ток остаётся на очень низком уровне. Анализ показывает, что механизм протекания тока через гетероструктуру связан с наличием ограничивающих ток ловушечных уровней внутри диэлектрика и на границе диэлектрик-полупроводник.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ВАХ гетероструктур ZnO/p-Si отличаются более высоким коэффициентом выпрямления, меньшей плотностью обратного тока и более стабильной диодной характеристикой по сравнению со структурами на подложках GaAs и GaP. Это объясняется высоким качеством интерфейса в кремниевых гетероструктурах, оптимальным уровнем контактного потенциала и эффективностью барьерных свойств.



**Рисунок 9. Схематическая зонная диаграмма гетероструктуры n-ZnO/p-Si.**

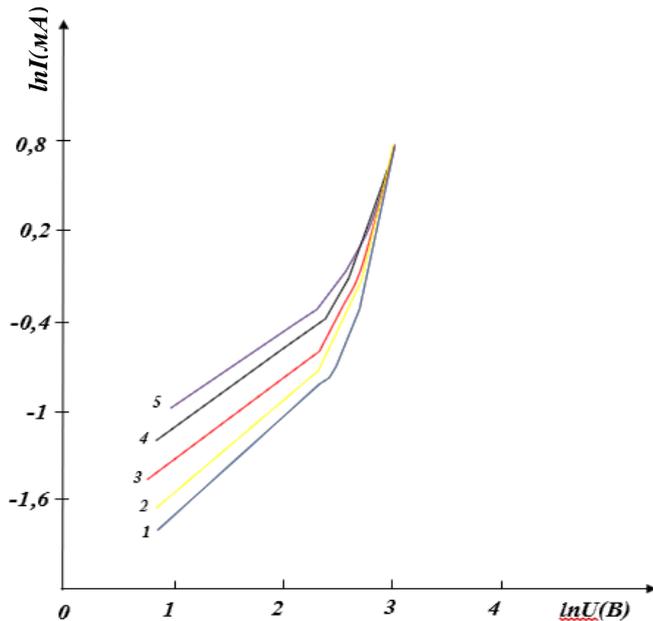
При анализе ВАХ структуры Ni-ZnO/p-Si-Ni важно учитывать теоретические модели, описывающие поведение носителей заряда в зоне перехода полупроводника. Основным уравнением, описывающим ВАХ диода в прямом и обратном смещении, является уравнение идеального диода Шокли:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU}{nkT}} - 1 \right). \quad (4)$$

Для учета неоднозначностей в практических случаях в уравнение включаются сопротивление последовательно RS и шунтирующее сопротивление RSH, что отражает падение напряжения из-за внутреннего сопротивления диода и направление тока:

$$I = \frac{U - IR_S}{R_{SH}} + I_0 \left( e^{\frac{q(U - IR_S)}{nkT}} - 1 \right). \quad (5)$$

Эти уравнения создают основу для понимания электрических свойств гетероструктуры Ni-ZnO/p-Si-Ni и позволяют более точно рассчитывать её ВАХ, что в свою очередь дает возможность сравнивать с экспериментальными данными. Соответствие или различия между теоретическими расчетами и экспериментальными результатами помогают определить качество гетероструктуры, наличие состояний на границе раздела и основные механизмы проводимости.



**Рисунок 10.** Температурные зависимости ВАХ структуры Al-ZnO:B/nSi-Ni при температурах: 1-299 К; 2-321 К; 3-333 К; 4-360 К.

Из рисунка 10 видно, что ВАХ делится на три характерных участка: омический ( $I(U)$ ), квадратичный ( $I(U^2)$ ) и участок резкого роста тока ( $I(U^{m+1})$ , где  $m > 2$ ). Известно, что при монополярной инжекции квадратичная часть ВАХ описывается уравнением:

$$J = \frac{9\varepsilon\mu\theta U^2}{8d^3}. \quad (6)$$

где:  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $\mu$  – дрейфовая подвижность,  $U$  – приложенное напряжение,  $d$  – толщина слоя,  $\theta$  – инжекционный фактор.

Если  $\varepsilon = 8.3$ ,  $\mu \approx 12.0 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $d = 1 \times 10^{-4} \text{ см}$ ,  $J = 1.9 \times 10^{-2} \text{ А}/\text{см}^2$  и  $U = 10 \text{ В}$ , тогда инжекционный фактор  $\theta$  оценивается по формуле:

$$\theta = \frac{8Jd^3}{9\varepsilon\mu U^2} = 3.3 \times 10^{-7}. \quad (7)$$

Небольшое значение коэффициента инжекции указывает на высокую концентрацию электронов на границе раздела ZnO:В и p-Si. Концентрацию электронов можно рассчитать по следующей формуле:

$$N_e = \frac{2\varepsilon U}{ed^2}. \quad (8)$$

С учетом вышеизложенного, значение  $N_e$  составляет  $3.82 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Глубина энергетического уровня электронов рассчитывается по формуле:

$$E_d = kT \ln \left( \frac{N_0}{g\theta N_r} \right), \quad (9)$$

с учетом значений  $\theta$  и  $N_e$  глубина составляет  $E_d = 0.45 \text{ эВ}$ . Таким образом, ловушки, ограничивающие ток, имеют концентрацию  $N_e = 3.82 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и располагаются на глубине  $0.45 \text{ эВ}$  от нижней границы зоны проводимости.

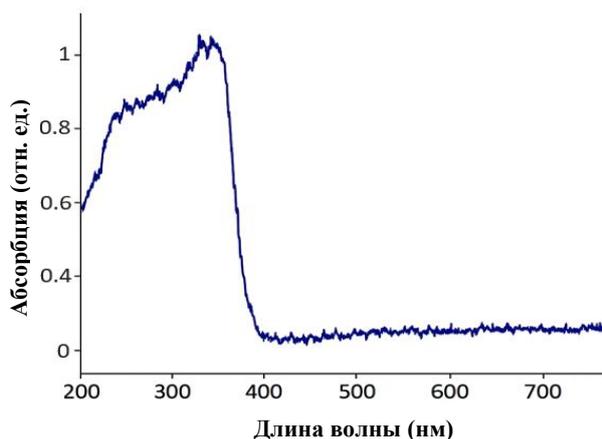
Если отрицательный полюс подключен к алюминиевому электроду, дырки инжектируются в ZnO:В, обладающий высоким сопротивлением. ВАХ в координатах  $\ln I - \sqrt{U}$  имеет линейный характер и увеличивается с ростом температуры. Такая характеристика объясняется механизмом барьера Шоттки. Чтобы определить высоту потенциального барьера между ZnO:В и Si, изучалась температурная зависимость ВАХ. С помощью зависимости  $\ln[I/SAT^2] - \sqrt{U}$  высота барьера рассчитывается по формуле:

$$\varphi_B = -kT \ln \left( \frac{I_0}{SAT^2} \right). \quad (10)$$

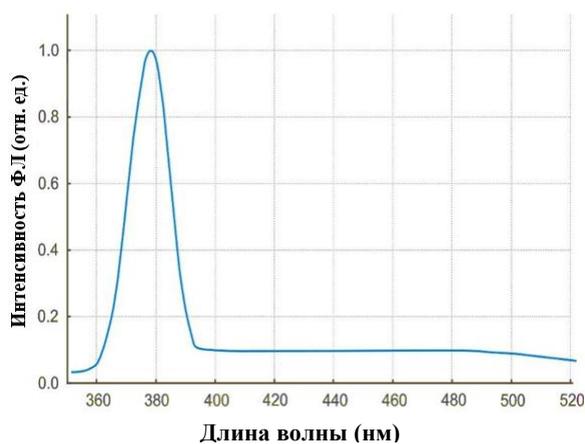
Это значение составило  $\varphi_B = 2.15 \pm 0.085 \text{ эВ}$ . Следует отметить, что до  $10 \text{ В}$  ВАХ имеет характер Шоттки, но при дальнейшем увеличении напряжения наблюдается изменение характера. При этом наблюдается замедление роста тока, что может быть связано с туннелированием или смешанной проводимостью.

Таким образом, в гетеропереходе Ni-ZnO:В/Si-Al при положительном подключении алюминиевого электрода (прямое включение диода) протекают инжекционные токи, определяемые донорными моноэнергетическими ловушками с параметрами  $E_d = 0.45 \text{ эВ}$  и  $N_e = 3.82 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При отрицательном подключении алюминиевого электрода (обратное включение) основную роль играет переход между Si и ZnO:В, который объясняется механизмом Шоттки.

Такое поведение связано с наличием p-n-перехода между слоями ZnO и p-Si: при прямом смещении движение носителей заряда усиливается, а при обратном – ток существенно ограничивается. Эти особенности обеспечивают эффективное применение гетероструктуры в качестве выпрямителя в электронных схемах, а также в оптоэлектронных устройствах и фотоэлектрических системах.



**Рисунок 11. Спектр поглощения тонкой плёнки ZnO, полученной на кремниевой подложке. T = 300 К.**



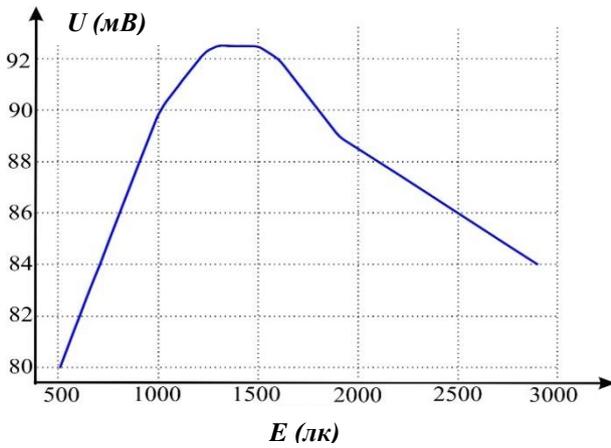
**Рисунок 12. Спектр фотолюминесценции слоя n-ZnO в гетероструктуре n-ZnO/p-Si при T = 300 К.**

На рисунке 11 представлен спектр поглощения тонкой плёнки ZnO, осаждённой на кремниевую подложку. Анализ этого спектра играет важную роль в определении оптических свойств гетероструктур, содержащих ZnO, поскольку спектр поглощения позволяет понять электронные состояния материала и механизмы оптических переходов. Спектр поглощения тонкой плёнки ZnO изучен в диапазоне 200–800 нм. Как видно из рисунка, максимум поглощения наблюдается при длине волны 375 нм. Это соответствует запрещённой зоне ZnO ( $E_g \sim 3,27$  эВ) и подтверждает сильное поглощение в УФ-области и прозрачность в видимом диапазоне. Эти оптические свойства делают ZnO эффективным материалом для применения в фотодетекторах, солнечных батареях и прозрачных электродах.

На рисунке 12 приведён ФЛ спектр n-ZnO в гетероструктуре n-ZnO/p-Si при комнатной температуре. В этом спектре наблюдается одиночная спектральная линия с максимумом интенсивности при  $\sim 378$  нм (3,28 эВ) в области длин волн 360–390 нм, соответствующая зонно-зонной рекомбинации в ZnO. По сравнению со спектром на рисунке 5, в гетероструктуре спектральная линия сужена и максимум смещён в сторону более длинных волн на 5 нм. После основного пика в спектре имеется широкий, но слабоинтенсивный фоновый сигнал в диапазоне 400–520 нм, связанный с рекомбинацией на глубоких дефектных уровнях в структуре (например, вакансии кислорода, интерстициальные атомы цинка). Этот сигнал также может указывать на наличие поверхностных дефектов, возникающих на интерфейсе между слоем ZnO и поверхностью кремния.

На рисунке 13 представлена люкс-вольтная характеристика гетероструктуры n-ZnO:B/p-Si, полученная при комнатной температуре под воздействием естественного освещения. Из графика видно, что с увеличением интенсивности освещения ( $E$ ) напряжение ( $U$  (мВ)) достигает максимального значения около 1500 лк (92 мВ), а затем начинает снижаться. Максимальное напряжение связано со способностью ZnO поглощать свет и генерировать фотозаряды, а снижение напряжения при высоких интенсивностях

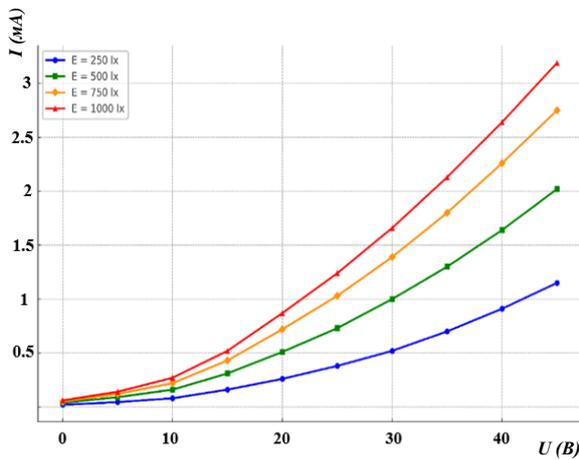
объясняется усилением процессов рекомбинации на интерфейсе и влиянием дефектов. Снижение напряжения после максимума обусловлено двумя основными физическими причинами:



**Рисунок 13.** Люкс–вольтная характеристика гетероструктуры  $p\text{-ZnO:B/p-Si}$  при комнатной температуре.

напряжения. Эта высокая чувствительность к свету делает гетероструктуру  $p\text{-ZnO:B/p-Si}$  эффективной для использования в УФ-детекторах, фотодетекторах и оптоэлектронных устройствах.

Следует особо отметить, что высокая чувствительность слоя  $\text{ZnO:B}$  связана с образованием донорных уровней атомами бора в кристаллической решётке  $\text{ZnO}$ , которые легко ионизируются под воздействием фотонов, что формирует



**Рисунок 14.** ВАХ гетероструктуры  $\text{Ni-ZnO:B/p-Si-Al}$  при различных интенсивностях освещения.

Это объясняется высокой чувствительностью структуры к свету и эффективностью фотоэлектронной генерации. Для ВАХ гетероструктуры справедливо следующее выражение:

$$I = I_0 e^{\frac{qU}{ckT}} \quad (11)$$

1. Активизация процессов рекомбинации – при высокой степени освещённости большое количество сгенерированных свободных носителей заряда усиливает их взаимную рекомбинацию, в результате чего уменьшается возникающая фотоэлектродвижущая сила.

2. Интерфейсные дефекты и внутренние ловушки – дефектные состояния и глубокие уровни, существующие на интерфейсе между  $\text{ZnO:B}$  и  $p\text{-Si}$ , играют роль ловушек, снижающих эффективность

структуры с хорошими поглотательными и сенсорными свойствами. В полученной структуре были установлены омические контакты сверху и снизу, и ВАХ была измерена при освещённости  $E=0$  лк и  $E=1000$  лк. На рисунке 14 приведён график зависимости между напряжением  $U$  (В) и током  $I$  (мА) в гетероструктуре на основе  $p\text{-ZnO:B/p-Si}$  при различных интенсивностях освещения (250, 500, 750, 1000 лк). Из графика видно, что с увеличением уровня освещения сила тока при одинаковом напряжении значительно возрастает.

где:  $q$  – заряд электрона,  $U$  – напряжение между контактами,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $c$  – фактор неидеальности перехода,  $I_0$  – начальное значение плотности тока.

Используя экспериментальные данные с графика на рисунке 14 и приведённую формулу, можно определить постоянную величину  $c$ . Также с помощью эффекта инжекционного обеднения была объяснена взаимосвязь между напряжением и током. Постоянная  $c$ , указанная в формуле, была вычислена по экспериментальным данным ВАХ следующим выражением:

$$c = \frac{q(U_2 - U_1)}{kT \cdot \ln(I_2/I_1)} \quad (12)$$

Было определено, что  $c = 7,84$ , а начальное экспоненциальное значение тока составляет  $I_0 = 0,038 \cdot 10^{-3}$  А. На основе графика и полученных данных был исследован характер поведения гетероструктуры ZnO/p-Si под освещением, что позволяет использовать её в фотоэлектрических и других фоточувствительных устройствах.

С теоретической точки зрения, связь приложенного напряжения с прямым током объясняется следующим выражением:

$$U \approx U_0 e^{Jad} \quad (13)$$

где:  $J$  – плотность тока,  $U_0$  – начальное напряжение,  $d$  – толщина,  $a$  – постоянная величина, которая определяется по формуле:

$$a = \frac{1}{2qD_p n_t} \quad (14)$$

где:  $D$  – коэффициент диффузии носителей заряда,  $n_t$  – концентрация примесей.

Известно, что значение  $D$  определяется по уравнению Эйнштейна:

$$D = \frac{kT}{q\mu_p} \quad (15)$$

С помощью этих выражений вычисленная постоянная величина  $a$  позволяет исследовать процессы амбиполярной диффузии и дрейфа, связанные с глубокими уровнями дефектов в кристаллической решётке. Согласно результатам исследования, для проявления эффекта инжекционного обеднения должно выполняться условие:  $Jad > 2$ . При комнатной температуре  $Jad \approx 11,32$ , что удовлетворяет условию и подтверждает наличие эффекта инжекционного обеднения (снижение числа основных носителей тока).

ВАХ гетероструктуры Ni-ZnO:B/p-Si-Al при различных уровнях освещения показывает наличие сильного поглощения света, процессов фотогенерации через донорные уровни и эффективного перемещения носителей заряда в структуре. Это подтверждает высокий потенциал использования данной гетероструктуры в фотодетекторах, солнечных элементах и оптоэлектронных устройствах, чувствительных к ультрафиолетовому излучению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведённых исследований по теме “Электрофизические и оптические свойства тонкоплёночных структур на основе ZnO, ZnO:B и n-ZnO/p-Si” сделаны следующие заключение:

1. Определены оптимальные параметры получения стабильных по электрофизическим и оптическим свойствам поликристаллических тонких пленок ZnO и ZnO:B: 1) термическое испарение порошка Zn на воздухе при 575 °С в течение 1 минуты, температура подложки – 300 °С, толщина пленки – 1.2–1.5 мкм; 2) термическое испарение порошка ZnO с добавлением 1–5% B при давлении  $10^{-4}$  мм.рт.ст. в течение 30 секунд, температура тигля – 1600 °С, толщина пленки – 0.7–0.9 мкм.

2. Впервые установлено, что увеличение концентрации примеси бора в пленках ZnO:B до 3% приводит к уменьшению размеров кристаллитов с 130–150 нм до 80–100 нм, снижению удельного сопротивления с  $80 \Omega \cdot \text{см}$  до  $1.2 \Omega \cdot \text{см}$  и увеличению подвижности зарядов почти в 5 раз (для ZnO –  $2\text{--}3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , для ZnO:B –  $10\text{--}12 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ).

3. В фотолюминесцентном спектре тонкой пленки n-ZnO:B были наблюдаемы дублетные спектральные линии в оптических диапазонах 350–400 нм и 570–620 нм, и при увеличении концентрации B было установлено снижение интенсивности спектральных линий, увеличение их полуширины и смещение в область больших длин волн, что обосновано, соответственно, зонно-зонным и рекомбинационным излучением между донорным уровнем примеси B и валентной зоной.

4. На основе анализа вольт-амперных характеристик в гетероструктурах n-ZnO:B/p-Si был выявлен механизм монополярной инжекции электронов, и экспериментально разработана модель определения ширины донорного энергетического уровня, которая составила  $E_d = 0.45 \text{ эВ}$ .

5. Анализ спектра поглощения показал максимум на 372 нм ( $E_g \approx 3.27 \text{ эВ}$ ), что свидетельствует о высокой чувствительности ZnO к УФ-излучению и прозрачности в видимом диапазоне. В структуре n-ZnO:B/p-Si зафиксировано фотонапряжение до 92 мВ, что подтверждает её перспективность для оптоэлектронных приложений.

6. В структурах Ni-ZnO/p-Si и Ni-ZnO:B/p-Si применение технологии нанесения металлических контактов в условиях высокого вакуума позволило снизить контактное сопротивление до  $5 \Omega \cdot \text{см}$ . Это повысило эффективность прохождения тока, обеспечило стабильную работу диодов, низкий обратный ток и высокий коэффициент выпрямления ( $\approx 250$ ).

7. Вольт-амперные характеристики структуры Ni-ZnO:B/p-Si–Ni исследованы в диапазоне температур от 299 К до 380 К. Было зафиксировано резкое увеличение тока при повышении температуры, что указывает на высокую чувствительность структуры к температурным изменениям и возможность её применения в маломощных температурных датчиках и термочувствительных устройствах.

8. Впервые изучены вольт-амперные и люкс-вольт характеристики структуры n-ZnO:B/p-Si при освещении. Экспериментально установлено, что при освещённости 1000 лк ток достигает 0.53 мА, что подтверждает высокую фоточувствительность структуры.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ON THE  
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE FERGANA STATE  
TECHNICAL UNIVERCITY OF UZBEKISTAN**

---

**FERGANA STATE TECHNICAL UNIVERCITY**

**YUSUPOV FAKHRIDDIN TOJIMAMAT UGLI**

**ELECTROPHYSICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF THIN-FILM  
STRUCTURES BASED ON ZnO, Z ZnO:B AND n-ZNO/p-Si**

**04.01.07 – Condensed matter physics**

**ABSTRACT**

**of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences**

**Fergana-2025**

The subject of doctoral dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2024.4.PhD/FM1201.

The Dissertation was completed at the Fergana state technical university.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.ispm.uz](http://www.ispm.uz) and on the website of "ZiyoNet" Information and Educational Portal at [www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

Scientific supervisor:

**Sultanov Nomanjon Akramovich**  
doctor of Physical and Mathematical, professor

Official opponents:

**Iliyev Khalmurat Midjitovich**  
doctor of Physical and Mathematical, professor

**Sabirov Salim Sattiyevich**  
Candidate of Physical and Mathematical, dotsent

Leading organization

**Karakalpak State University**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "28" "08" 2025 at 14<sup>00</sup> hours at a meeting of the Scientific Council PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 at the Fergana state technical university (Address: 150107, Ferghana, Ferghana St., house 86. Tel: (+998 73 ) 241-12-06, fax (+998 73) 241-12-06, e-mail: [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru), small meeting room).

The dissertation can be found in the library of the institute. (registered under No. \_\_\_\_\_) (Address: 150107, Fergana, st. Fergana, house 86. Tel: (+998 73) 241-12-06).

The abstract of the dissertation was distributed on " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025.

(Registry record No. \_\_\_\_\_ dated " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025)



**N.KX. Yuldashev**  
Chairman of the Scientific Council  
on award of PhD scientific degree,  
Doctor of Physical and  
Mathematical Sciences, Professor

**B.J. Axmadaloyev**  
Scientific Secretary of Scientific  
Council on award of PhD scientific  
degree, PhD in physics and  
mathematics, Associate Professor

**S.M Otajonov**  
Deputy Chair of the Academic  
Seminar under the Scientific Council  
for the Award of the Doctor of  
Philosophy (PhD) Degree, Doctor of  
Physical and Mathematical  
Sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The purpose of the study.** The aim of the research is to improve the thermal evaporation technology for obtaining ZnO, ZnO:B, and n-ZnO/p-Si thin film structures with stable electrophysical and optical properties, and to establish new regularities in their electrophysical and optical characteristics.

**The objects of the research work** includes thin films of ZnO and boron-doped ZnO obtained on the surface of standard glass and silicon by the method of thermal vacuum evaporation were selected.

### **Scientific Novelty of the Research:**

the optimal parameters for obtaining ZnO and ZnO:B thin polycrystalline films with stable electrophysical and optical properties have been improved under the following technological conditions: 1) thermal evaporation of Zn powder in air at 575°C for 1 minute, with a substrate temperature of 300°C, resulting in film thickness of 1.2–1.5 μm; 2) thermal evaporation of ZnO powder with 1–5% boron in a vacuum of 10<sup>-4</sup> mm Hg for 30 seconds at a crucible temperature of 1600°C, producing films with a thickness of 0.7–0.9 μm;

for the first time, it was experimentally established that increasing the boron content up to 3% in ZnO:B films leads to a reduction in crystal grain size from 130–150 nm to 80–100 nm, a decrease in specific resistivity from 80 Ω·cm to 1.2 Ω·cm, and nearly a fivefold increase in carrier mobility (from 2–3 sm<sup>2</sup>/V·s in ZnO to 10–12 sm<sup>2</sup>/V·s in ZnO:B);

in the photoluminescence spectrum of the n-ZnO:B thin film, doublet spectral lines were observed in the 350–400 nm and 570–620 nm optical ranges. With increasing boron concentration, these lines exhibited a decrease in intensity, an increase in full-width at half-maximum, and a red-shift toward longer wavelengths. The emissions have been attributed, respectively, to band-to-band recombination and to donor–valence-band recombination associated with the B dopant level;

the current–voltage characteristics of the Ni–ZnO:B/p-Si–Al heterostructure were measured over a range of temperatures, from which the ionization energy of the trapping centers was determined to be  $E_r = 0.45$  eV, the carrier concentration  $N_e = 3.82 \cdot 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>, and the Schottky barrier height  $\phi_B = 0.75 \pm 0.085$  eV. On the basis of the interdependence of these parameters, a physical model describing the monopolar injection mechanism was developed;

for the first time in the Ni–ZnO:B/p-Si–Al heterostructure, increasing the illumination intensity produced a maximum photocurrent of 0.53 mA at 1000 lx and a maximum photovoltage of 92 mV at 1500 lx. This behavior is explained by the injection-depletion effect—i.e., a reduction in the majority-carrier density—which underpins the photogeneration mechanism in the structure.

**Implementation of research results.** Based on the scientific findings related to refining the fabrication methods for ZnO and ZnO:B thin films and investigating the physical properties of the resulting heterostructures:

At the A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics (Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), within the framework of the 2019–2023 fundamental project No. 19-52-12001 “Dynamics of Excitons and Charge Carriers in First-Type Non-Ideal-Junction Semiconductor Nanostructures,” the effect of boron concentration in ZnO:B layers on their electrophysical and optical characteristics—including the ultraviolet component of the photoluminescence spectrum and the current–voltage behavior—was systematically studied. The results obtained have enabled a theoretical analysis of exciton states and charge-carrier mobility in these doped ZnO films.

In collaboration with the Andijan Mechanical Engineering Institute and North China University of Technology (People’s Republic of China), the 2022–2023 fundamental project No. MUK-2021-40 “Research and Application of a Big-Data-Based Intelligent Renewable Energy Grid System” advanced the evaluation methodology for photogenerated current in n-ZnO/p-Si heterostructures under illumination. By modeling and analyzing the photogenerated current’s dependence on varying light intensities, this work improved the assessment of the efficiency of photo-induced charge-generation processes in these heterostructures.

**Approval of Research Results.** The main findings of the dissertation were presented and discussed at six international and two national scientific-practical conferences.

**Publication of Research Results.** A total of 15 scientific papers have been published on the topic of the dissertation. Among them, 7 articles were published in academic journals recommended by the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan for disseminating the main scientific results of doctoral dissertations, including 3 articles in national and 4 in international scientific journals.

**Structure and Volume of the Dissertation.** The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, and a list of references. The total length of the dissertation is 131 pages.

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

**I bo'lim (1 часть; part 1)**

1. Sultanov N.A., Mirzajonov Z.X., Yusupov F.T., & Rakhmonov T.I. Nano-crystalline ZnO films on various substrates: a study on their structural, optical, and electrical characteristics. East European Journal of Physics, 2024. (2), 309-314. (№1 Web of Science Q3, CiteScore:0,8). <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-35>

2. Yusupov F.T., Rakhmonov T. I., Akhmadjonov M.F., Madrahimov M.M., & Abdullayev S.S. Enhancing ZnO/Si Geterojunction Solar Cells: A Combined Experimental And Simulation Approach. East European Journal of Physics, 2024. (3), 425-434. (№1 Web of Science Q3, CiteScore:0,8). <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-3-51>.

3. Yusupov, F. T., Mirzaev, V. T., Rakhmonov, T. I., Nurmatov, O. R., & Khidirov, D. Sh. (2025). Enhanced optoelectronic properties of ZnO thin films through boron and fluorine co-doping. Journal of Ovonic Research, 21(3), 285–296. (№3 Scopus Q3, CiteScore:2.2). <https://doi.org/10.15251/JOR.2025.213.285>.

4. Mirzajonov Z.X., Sulaymonov K.A., Rakhmonov T.I., Yusupov F.T., Khidirov D.SH., & Rakhimjonov. J.S. Advancements in Zinc Oxide (ZnO) thin films for photonic and optoelektronic applications: a focus on doping and annealing processes. E3S Web of Conferences, 2024. 549, 03013. (№3 Scopus). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454903013>.

5. Н.А. Султанов, З. Мирзажонов, Т.И. Рахмонов, Ф.Т. Юсупов. Характеристика термически окисленных пленок ZnO: Значение для оптоэлектронных применений // Научный вестник АГУ, 2024. – № 1(6). С. 40-47. (01.00.00 № 13).

6. Н.А. Султанов, Ф.Т. Юсупов. Микроструктура и электрические свойства тонких плёнок оксида цинка, легированных бором (ZnO:B) // Научный вестник НамГУ, 2024. – № 10. С. 25-28. (01.00.00 № 14).

7. F.T.Yusupov. Bor bilan legirlanishining ZnO yurqa qatlamlarining elektr xususiyatlariga ta'siri NamDU ilmiy axborotnomasi 2025. – № 1. С. 25-28. (01.00.00 № 14).

**II bo'lim (2 часть; part 2)**

8. Юсупов Ф.Т. “Некоторые физические свойства гетероструктур цинк и алюминия на основе кремни”, Международная конференция по “Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро и наноструктурах” ФерПИИ 28-30 сентября 2023 года.

9. Н.А. Султанов, З. Мирзажонов, Юсупов Ф.Т. “Технология получения и исследование характеристик тонких пленок оксид цинк и гетероструктур на их основе кремни”, Международная конференция по “Тенденции развития физики конденсированных сред” ФерГУ 30-31 октября 2023 года.

10. Юсупов Ф.Т. “Технология получения и электрические характеристики гетеропереходов ZnO на основе кремния.”, Международная конференция по “Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро и наноструктурах” ФерПИИ 28-30 сентября 2023 года.

11. N.A. Sultonov, Z. Mirzajonov, F.T. Yusupov “Rux oksidlar asosida olingan yupqa qatlamlarning elektrofizik va optik xususiyatlari: ilmiy va amaliy ahamiyati” “Kondensatlangan moddalar fizikasining rivojlanish tendentsiyalari” mavzusidagi xalqaro konferensiya, FarDU 2023 yil 30-31 oktyabr.

12. Юсупов Ф.Т. “Влияние бoro-фторного легирования на свойства тонких пленок оксида цинка” Международная научно-практическая конференция “Физика полупроводников, фундаментальные и практические проблемы современной электроники и энергетики” Наманганский инженерно-строительный институт 18-19 сентября 2024 г.

13. Yusupov F.T. “Exploring the excitonic and stimulated emission in ZnO thin films and nanorods” Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference «Society and Science: Interconnection» (February 16-18, 2025). Porto, Portugal.

14. Yusupov, F. T. (2025). ZnO:B yupqa qatlamlarida zaryad tashuvchilarning harakatchanligi va konsentratsiyasini Holl usuli orqali tahlil qilish. Zamonaviy fizika va energetikani fundamental va amaliy muammolari mavzusida xalqaro ilmiy-amaliy anjuman. Namangan davlat texnika universiteti (5-6 iyun 2025 y).

15. Yusupov F. T. “Legirlangan ZnO yupqa qatlamlarining strukturaviy va morfologik xarakteristikasi”. “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi, mikro – va nanoelektronikaning fundamental va amaliy muammolari” mavzusida o‘tkazilgan III Xalqaro ilmiy konferensiya. Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent (20-21 iyun 2025 y).

Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari Farg‘ona davlat texnika universiteti muassisligidagi “**Scientific technical journal**” jurnal tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi (10.07.2025 y.).

FarDU Nusxa ko‘paytirish bo‘limi chop etildi.  
Bosishga ruxsat etildi: 2025-yil.  
Nashriyot bosma tabog‘i – 3,25.  
Shartli tabog‘i – 1,625. Bichimi 60x84 1/16  
“Times New Roman”. Adadi: 50.  
Manzil: 150100, Farg‘ona viloyati,  
Farg‘ona shahar, Murabbiylar ko‘chasi 19-uy.