

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI  
ANDIJON MASHINASOZLIK INSTITUTI**

**RASULOVA MARXABOXON BOTIRJON QIZI**

**ZnO YUPQA QATLAMLARINING FIZIKAVIY XUSUSIYATLARIGA Al,  
Mg VA Ni KIRISHMA ATOMLARINING TA'SIRLARI**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

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

**NAMANGAN-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**

**Rasulova Marxabohon Botirjon qizi**

ZnO yurqa qatlamlarining fizikaviy xususiyatlariga Al, Mg va Ni kirishma atomlarining ta'sirlari .....3

**Расулова Мархабохон Ботиржон кизи**

Влияния примесных атомов Al, Mg и Ni на физические свойства тонких пленок ZnO .....21

**Rasulova Markhabokhon Botirjon qizi**

Influence of dopant atoms Al, Mg, and Ni on the physical properties of ZnO thin films.....39

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

Список опубликованных работ

List of published works.....43

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI  
ANDIJON MASHINASOZLIK INSTITUTI**

**RASULOVA MARXABOXON BOTIRJON QIZI**

**ZnO YUPQA QATLAMLARINING FIZIKAVIY XUSUSIYATLARIGA Al,  
Mg VA Ni KIRISHMA ATOMLARINING TA'SIRLARI**

**01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi**

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

**NAMANGAN-2025**

**Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalari vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.1.PhD/FM 1264 raqam bilan ro‘yxatga olingan.**

Dissertatsiya Andijon davlat universiteti va Andijon mashinasozlik institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uchta tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume) Ilmiy kengashning veb-sahifasiga ([www.nammti.uz](http://www.nammti.uz)) va «ZiyoNet» axborot-ta’lim portaliga ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Boboyev Akramjon Yo‘ldashboyevich**  
fizika-matematika fanlari doktori

**Rasmiy opponentlar:**

**Ikramov Rustam G‘ulomjonovich**  
fizika-matematikafanlari doktori, professor  
**Otajonov Salim Madraximovich**  
fizika-matematikafanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot**

**Qarshi davlat universiteti**

Dissertatsiyaning Namangan davlat texnika universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli ilmiy kengashning 2025 yil "\_\_\_" \_\_\_\_\_ soat "\_\_\_" dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil:160115, Namangan shahri Kosonsoy ko‘chasi 7-uy. Tel: (+99869) 225-10-07, faks (+99869) 225-76-75, e-mail: [nieiinfo@edu.uz](mailto:nieiinfo@edu.uz), Namangan davlat texnika universiteti 3-bino 2-qavat, ilmiy kengash xonasi)

Dissertatsiya bilan Namangan davlat texnika universitetining axborot–resurs markazi ilmiy-uslubiy bo‘limida tanishish mumkin. (№ \_\_\_\_\_ raqami bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil:160115, Namangan shahri Kosonsoy ko‘chasi 7-uy. Tel: (+99869) 225-10-07

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil "\_\_\_" \_\_\_\_\_ kuni tarqatildi.  
(2025 yil "\_\_\_" \_\_\_\_\_dagi \_\_\_\_\_ raqamli reestr bayonnomasi).

**U.I. Erkaboyev**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy Kengash raisi,  
f-m.f.d., professor

**A.A. Abdukarimov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy Kengash ilmiy  
kotibi, PhD, dotsent

**N.Y. Shariboyev**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy Kengash  
qoshidagi ilmiy seminar raisi, f-m.f.d.,  
professor

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

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati.** Jahonda nanoelektronika, optoelektronika va sensor texnologiyalarining jadal rivojlanishi natijasida yangi ko'p funksiyali, yuqori sezgirlikka ega hamda tezkor ishlovchi elektron qurilmalarni yaratish, shuningdek, mavjud tizimlarni takomillashtirish masalalari yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida, zamonaviy elektronika sanoati yangi yarimo'tkazgichli materiallarni sintez qilish, mavjud materiallarning fizik-kimyoviy xususiyatlarini boshqarish imkonini beruvchi ilg'or texnologiyalarni ishlab chiqish va ularni amaliyotga tatbiq etishni taqozo etadi. Shu jihatdan, ZnO asosidagi yupqa plyonkalar o'zining yuqori fizikaviy xossalari tufayli quyosh elementlari, shaffof o'tkazgichlar va gaz sensorlarida keng qo'llanilib, ularning samaradorligini oshirish maqsadida ZnO strukturasi turli kirishma elementlar bilan legirlash orqali uning elektr o'tkazuvchanligi, optik xususiyatlari, kristall tuzilishi va sirt morfologiyasini boshqarish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda ZnO asosidagi yupqa qatlamlarni olish texnologiyalarini takomillashtirish va ular asosida yuqori samaradorlikka ega, ko'p funksiyali optoelektron qurilmalarni yaratish maqsadida ushbu materiallarning tuzilmaviy, elektrofizik va optik xossalari chuqur o'rganishga yo'naltirilgan ilmiy tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, ZnO tarkibiga alyuminiy (Al), magniy (Mg) va nikel (Ni) kabi elementlarni kiritish orqali hosil bo'ladigan strukturalarda yuzaga keluvchi panjara deformatsiyalari, dislokatsiyalar va boshqa mikrostrukturaviy o'zgarishlarning materialning fizikaviy xossalari ta'siri aniqlanmoqda. Mazkur jarayonda kirishma elementlarning miqdori va taqsimotini boshqarish orqali shaffof, barqaror va yuqori samaradorlikka ega optoelektron qurilmalarni yaratish imkoniyatlari kengaymoqda. Ushbu yondashuv esa zamonaviy nano- va optoelektronika uchun yangi avlod materiallarini ishlab chiqishda dolzarb ilmiy vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda so'nggi yillarda turli metalloksid qatlamlar asosida p-n geteroo'tishli shaffof fotovoltaik qurilmalar yaratish va ularning natijalarini amaliyotning istiqbolli sohalariga tatbiq etish bo'yicha keng ko'lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. Bu jarayon 2022-2026-yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasida "... iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash, hayotning barcha sohalariga "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini faol tatbiq etish, energiya samaradorligini oshirish..."<sup>1</sup> bo'yicha muhim vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda rux oksid yupqa qatlamlarining noyob xususiyatlariga kirishma atomlarining ta'sirini o'rganish, shaffof optoelektron materiallar yaratish va ularni tegishli asbobsozlik sohalarida ishlab chiqarishga joriy etish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

---

<sup>1</sup>O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son "2022-2026 yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi" to'g'risidagi Farmoni

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 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 doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi, 2021-yil, 19-martdagi PQ-5032 raqamli “Fizika sohasidagi ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi, 2022 yil 9 sentyabrdagi PF-220-son “Energiya tejavchi texnologiyalarni joriy qilish va kichik quvvatli qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi Farmon va Qarorlarida hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Mazkur dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarni rivojlantirishning III va IV ustuvor yo‘nalishlariga mos keladi. Ular “Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligining rivojlanishi” va “Qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish usullarini ishlab chiqish, nanotexnologiya, fotonika va boshqa zamonaviy texnologiyalar asosida yangi texnologiyalar va qurilmalar ishlab chiqish” yo‘nalishlarini o‘z ichiga oladi.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Bugungi kunda dunyoning yetakchi ilmiy markazlari va oliy ta’lim muassasalarida yupqa qatlamli metalloksid plyonkalarini sintez qilish, ularning olinish texnologiyalarini takomillashtirish hamda texnologik jarayonlarni optimal sharoitlarini aniqlash bo‘yicha ilmiy tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Shuningdek, olingan plyonkalarining tuzilish xususiyatlari va noyob fizikaviy xossalarini o‘rganish, xususan, ularni quyosh elementi sifatida foydalanish imkoniyatlarini baholash, yuqori darajadagi gaz, harorat, bosimlarga sezgir elektron qurilmalar yaratish ustida izlanishlar olib borilmoqda.

Jumladan, jahonning yetakchi tadqiqotchilardan, yaponiyalik Shinji Miyazaki, Hiroshi Koinuma, T. Ohta ularning ilmiy maktabi, xitoylik R.F.Wang,, Zhiqiang Chen, Janubiy Koreyalik Sang-Young Lee va ularning ilmiy maktabi tomonidan ZnO yupqa qatlamlari sintez qilinib, ularning tuzilmaviy va noyob fizik xususiyatlari o‘rganilgan. Bundan tashqari, Janubiy Koreyalik J.Kim, M.Patel va ularning ilmiy guruhi tomonidan bino oynalari sifatida n-ZnO/p-NiO geterotuzilmalaridan foydalanib shaffof fotovoltaiyani qo‘llash imkoniyatlari o‘rganilib, ularni amaliyotga joriy qilish tavsiya qilinmoqda. Shuningdek, Rossiyalik S.I. Rembeza va uning ilmiy guruhi tomonidan ZnO va SnO<sub>2</sub> yupqa plyonkalarini olinish usullarini takomillashtirilib, ular asosida yuqori samaradorlikka ega quyosh elementlarini yaratish ustida tadqiqotlar olib borilmoqda. Shu bilan birga, metalloksid qatlamlarga turli kirishma atomlarini qo‘shish orqali ularning muayyan gazlarga sezgirligini oshirish imkoniyatlari ham aniqlangan.

Respublikamizning yetakchi olimlari S.Z.Zaynobidinov va Sh.U.Yuldashev

boshchiligidagi ilmiy guruhlar tomonidan metall oksid yupqa qatlamlarini olish usullari ishlab chiqildi. Ushbu usullar asosida nanoo'lchamdagi plyonkalarni sintez qilish, ularning ishlab chiqarish texnologiyalarini takomillashtirish hamda elektron qurilmalar yaratish imkoniyatlari o'rganildi. Shuningdek, yarimo'tkazgichli va shaffof tagliklarga turli tarkibdagi metall oksid qatlamlari yotqizilib, ularning fizik xossalari tekshirildi. Olingan natijalar asosida tashqi ta'sirlarga sezgir gaz sensorlari hamda xotira elementlarini yaratish imkoniyatlari ilgari surildi.

Mazkur tadqiqotlar natijasida ishlab chiqilgan optoelektron qurilmalar amaliyotda qo'llanilayotgan bo'lsa-da, ularning barqaror ishlashini cheklovchi omillar hali to'liq o'rganilmagan. Shuningdek, ZnO yupqa qatlamlariga turli metall kirishma atomlarini kiritish orqali ularning tuzilmaviy, morfologik, elektrofizik va optik xossalarini boshqarish hamda yangi turdagi geterostrukturalar hosil qilish masalalari yetarlicha tadqiq etilmagan.

**Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejaları bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqotlari Andijon davlat universitetining OTM-2-68 "Kristallarda kirishma-nuqson turidagi mikro-va nanobirikmalarni hosil bo'lish mexanizmlari va ularning keng funksional imkoniyatli ko'pqatlamli tuzilmalar yaratishdagi o'rni" (2017-2020 yillar) mavzusidagi loyihadairasida amalga oshirilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** ZnO yupqa qatlamlariga Al, Mg va Ni atomlari bilan legirlashning optimal shart-sharoitlarini aniqlash hamda olingan plyonkalarining tuzilmaviy xususiyatlari, elektrofizik va fotoelektrik xossalarini tadqiq qilishdan iborat.

#### **Tadqiqot vazifalari:**

ZnO yupqa qatlamlariga Al, Mg va Ni atomlari bilan legirlashning optimal shart-sharoitlarini aniqlash;

Olingan plyonkalarining rentgen diffraksiyasi va atom-kuch mikroskopiyasi usullari yordamida tuzilmaviy o'zgarishlarni o'rganish;

ZnO yupqa plyonkalariga Al, Mg va Ni kirishma atomlari bilan legirlashning plyonkalar elektr o'tkazuvchanligi, harakatchanligi va barqarorligiga ta'sirini baholash;

ZnO asosidagi plyonkalarining optik shaffofligi va fotosezgirliги xususiyatlarini tahlil qilish;

n-ZnO-p-NiO geterotuzilmalarini tayyorlash, ularning shaffof elektronika va optoelektronika sohalarida qo'llanish imkoniyatlarini aniqlash.

**Tadqiqotning obyekti** sifatida Al, Mg va Ni kirishma atomlari bo'lgan ZnO yupqa qatlamlari va ular asosidagi n-ZnO/p-NiO geterotuzilmalari tanlangan.

**Tadqiqotning predmeti** Al, Mg va Ni kirishma atomlari bo'lgan ZnO yupqa qatlamlari va ular asosidagi n-ZnO/p-NiO geterotuzilmalar olishning eng maqbul texnologik shart-sharoitlarini aniqlash, tuzilmaviy xususiyatlarni tadqiq qilish hamda olingan yupqa qatlamlarning elektrofizik va optik xususiyatlarini o'rganish hisoblanadi.

**Tadqiqotning usullari.** Belgilangan vazifalar asosida, turli kirishma atomlari kiritilgan rux oksidining tuzilmaviy tadqiqotlar uchun XRD-7000 rentgenodifraktometrdan, morfologik tadqiqotlar uchun Solver Next atom-kuch

mikroskopidan, optik o'tkazuvchanlikni aniqlash uchun Cary Eclipse spektrometridan va elektrofizik kattaliklarni aniqlash uchun HMS-7000 Xoll qurilmasidan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

ilk bor Al, Mg va Ni kirishma atomlari qo'shilgan ZnO yupqa qatlamlari hamda ular asosidagi n-ZnO/p-NiO geterotuzilma yupqa plyonkalari spreypiroliz usuli bilan o'stirildi va sintez qilish texnologiyasining eng maqbul shart-sharoitlari (purkash tezligi 8 ml/min, bosim 2 atm, taglik va purkovchi soplo orasidagi masofa 80÷85 sm, zolni purkash va tanaffus davomiyligi mos ravishda 1 daqiqqa va 30 soniya) aniqlangan;

Mg, Al va Ni kirishma atomlari bilan legirlangan ZnO asosidagi yupqa qatlamlar vyursit tuzilishli geksagonal kristall panjaraga ega bo'lib, ularning C6/mmc fazoviy guruhga mansubligi rengentuzilmaviy tadqiqotlar natijalari asosida aniqlangan;

o'stirilgan plyokalarining elektrofizik tadqiqot natijalariga asosida Al, Mg va Ni atomlari bilan legirlangan ZnO plyonkalarda solishtirma qarshiligi  $\rho=0.43\div 2.58 \Omega \text{ cm}$ , tok tashuvchilar konsentratsiyasi  $n=1.9\times 10^{18}\div 5.4\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  hamda zaryad tashuvchilar harakatchanligi  $\mu=7.02\div 1.85 \text{ cm}^2/\text{V}\times\text{s}$  qiymatlarga ega ekanligi aniqlangan;

kirishma atomlari kiritilgan ZnO optik o'tkazuvchanligi va taqiqlangan soha kengligi quyidagicha: AZO uchun  $T=81\text{-}90\%$ ,  $E_g=3.2\text{-}3.31\text{eV}$ ; MZO uchun  $T=70\text{-}85\%$ ,  $E_g=3.2\text{-}3.47\text{eV}$ ; ZnO: Ni uchun  $T=80\text{-}74\%$ ,  $E_g=3.2\text{-}3.1\text{eV}$  o'zgarishi mumkinligi aniqlangan;

ZnO, NiO plyonkalari va ZnO/NiO geterotuzilmalarining man etilgan soha energiyalarini mos ravishda 3,27 eV, 3,81 eV va 3,26 eV bo'lgan qiymatlari aniqlandi hamda ularni xossalari o'rganilib, quyosh energetikasi va optoelektronikada foydalanish mumkinligi aniqlangan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari.** ZnO hamda kirishma atomlari sifatida Mg, Al, Ni va NiO dan iborat yupqa qatlamlarini spreypiroliz usulida o'stirishning optimal parametrlari aniqlangan;

o'stirilgan yupqa qatlamlarning tuzilmaviy, fotoelektrik va optik xossalari aniqlanib, ularni optoelektronika va shaffof elektronikada qo'llashga tavsiya etilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Olingan natijalarni jahon amaliyotida qo'llanilishi bilan yuqori aniqlikka ega bo'lgan zamonaviy rentgen difraktometrlari, atom kuch mikroskopi, elektrik hamda optik xossalarni tekshiruvchi qurilmalardan foydalanishga, shuningdek, olingan natijalar adabiyotlarda mavjud bo'lgan ma'lumotlar bilan qiyoslashga; yaxshi sinovdan o'tgan eksperimental va o'zaro bog'lanmagan kompleks usullardan foydalanish; natijalarning takroriyiligiga; hodisalarda umumiy fizikaviy tasavvurlar bilan xulosalarning izchilligiga; ularni umumiy fizikaviy qonuniyatlar va IT texnologiyalardan foydalanish bilan taqqoslashga asoslangan.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati kirishma atomlari (Mg, Al, Ni) ni ZnO ning

elektrofizik va fotoelektrik jarayonlariga, tok o'tish mexanizmlariga, ularni tanlanma sezgirligi asosidagi xususiyatlariga, optik o'tkazuvchanlik, yorug'likning yutilishini hamda taqiqlangan soha kengligini o'zgarishiga ta'siri va fizik mohiyatini o'rganish mazkur sohaga tegishli bo'lgan nazariy bilimlar va tushunchalarni kengaytirishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati kirishma atomlari (Mg, Al, Ni) bilan legirlangan ZnO hamda n-ZnO/p-NiO asosida tayyorlangan plyonkalar fotosezgir, samaradorligi yuqori bo'lgan ko'p funksiyali elektron asboblari, shaffof elektronika hamda quyosh elementlarini ishlab chiqarishda qo'llanilishi mumkinligi bilan izohlanadi.

#### **Tadqiqot natijalarini joriy qilinishi.**

Sprey piroliz usuli yordamida o'stirilgan Al, Mg va Ni kirishma atomlari bilan legirlangan ZnO yupqa qatlamlarining hamda n-ZnO/p-NiO geterotuzilmalarini tuzilmaviy asoslari, elektrofizik va fotoelektrik xossalarini tadqiq qilish bo'yicha olingan ilmiy-amaliy natijalar asosida:

ZnO va NiO plyonkalari hamda ZnO/NiO geterotuzilmalari uchun optimal issiqlik bilan ishlov berish sharoitlari, ZnO, NiO plyonkalari va ZnO/NiO geterotuzilmalari uchun man etilgan soha energiyalarini yuqori aniqlikda tekshirish usullari hamda n-ZnO/p-NiO geterotuzilmalari orqali tok o'tish jarayonining tunnel-rekombinatsiya mexanizmiga bo'ysunishi kabi ilmiy-amaliy natijalardan "FOTON" aksiyadorlik jamiyatida ishlab chiqariladigan yarimo'tkazgichli elektron qurilmalar yaratishda foydalanilgan (2024-yil, 157-sonli ma'lumotnoma). Olingan ilmiy natijalardan tajriba qurilmalarida optoelektronik asboblarni tayyorlash va ularning fotoelektrik xossalarini yaxshilash imkonini bergan.

ZnO plyonkalarining elektrofizik va optik xususiyatlariga Al, Mg hamda Ni kirishma atomlarining ta'siri, shuningdek, n-ZnO/p-NiO geterotuzilmalarining volt-ampere xarakteristikalariga yorug'lik nurlanishining ta'sirini aniqlash usullari OT-F2-71 raqamli "O'ta yuqori chastotali elektromagnit maydondagi deformatsiyalangan p-n o'tish volt-ampere xarakteristikasiga yorug'likning ta'sirini tadqiq etish" mavzusidagi fundamental loyiha grantini bajarishda qo'llanilgan (Namangan muhandislik-qurilish instituti, 2025-yil 11-yanvar, № 06/10-09/48-sonli ma'lumotnoma). Ilmiy natijalardan foydalanish *p-no'tishning yorug'likka sezgirligi va fotodetektor xususiyatlarini optimallashtirish hamda yuqori samarali optoelektronik qurilmalarni yaratish imkonini bergan.*

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 9 ta jumladan, 5 ta xalqaro va 4 ta respublika miqyosidagi ilmiy amaliy anjumanlarda muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Natijalar asosida jami 24 ta ilmiy ish chop etilgan, jumladan O'z OAK sining doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 6 ta maqola, shuningdek, 2 ta maqola Scopus ma'lumotlar bazasida qayd etilgan xorijiy ilmiy jurnallarda nashr qilingan hamda tadqiqot mavzusi bo'yicha 1 ta EHM uchun dasturiy guvohnoma olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardantashkil topgan. U 114

sahifada ifodalaniib, 29 ta rasm, 8 ta jadval va 98 ta foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatini o'z ichiga oladi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida mavzusining dolzarbligi va zarurligi qisqacha asoslab berilgan, uning O'zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalar taraqqiyotining asosiy ustuvor yo'nalishlari bilan mosligi ko'rsatilgan. Dissertatsiya ishining maqsadi va vazifalari qisqacha ifodalangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati aniqlangan, tadqiqot natijalarining bajarilishi va dissertatsiya tuzilishi to'g'risida ma'lumotlar berilgan.

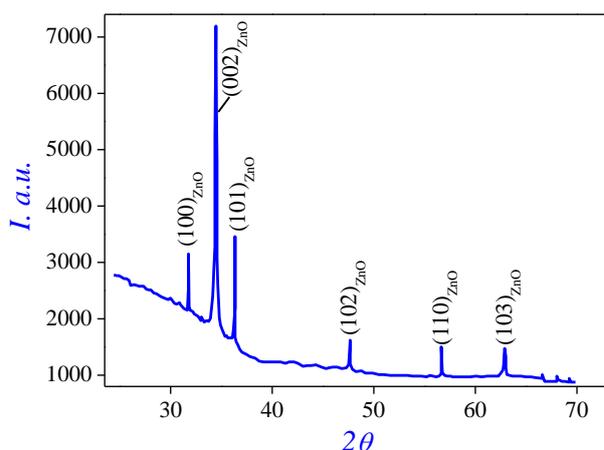
Dissertatsiya ishining **“ZnO metalloksidining tuzilishi, fizik xususiyatlari va uning amaliyotda qo'llanilishi”** nomli birinchi bobida ZnO metalloksidining umumiy fizik, elektr va optik xossalari, shuningdek, tadqiqot holati va qo'llanilish sohalari bo'yicha qisqacha adabiyotlar sharhi keltirilgan. Adabiyotlar tahlili natijasida metalloksid yupqa qatlamlarining yarimo'tkazgichli yorug'lik diodlari (elektr energiyasini yorug'lik nurlanishiga aylantiruvchi), quyosh elementlari (yorug'lik energiyasini elektr energiyasiga aylantiruvchi), gaz sensorlari va fotokatalitik qurilmalar kabi texnologiyalarda muvaffaqiyatli qo'llanilayotgani aniqlangan. Bundan tashqari, ZnO ga kirishma atomlarining kiritilishi uning elektrik, fotoelektrik va optik o'tkazuvchanligi hamda energiya sohasining o'zgarishini ta'minlashi qayd etilgan. Ushbu xususiyatlarni chuqur o'rganish va ular asosida turli xil energiya konvertorlarini ishlab chiqish yuqori ilmiy va amaliy ahamiyatga ega ekanligi aniqlangan.

Dissertatsiyaning **“Materiallar va eksperimental tadqiqot usullari”** nomli ikkinchi bobida ZnO metalloksidining ko'p komponentli yupqa qatlamlarini spreypiroliz usuli yordamida o'stirish imkoniyatlari, asosiy texnologik usullar, shuningdek, elektrofizik va tuzilmaviy xarakteristikalarini o'rganilgan. Ushbu bob metalloksid materiallarini olishning asosiy texnologik usullari, ularning elektrik va optik xarakteristikalarini tadqiq qilishda qo'llanilgan eksperimental usullar, shuningdek, shisha tagliklarga Mg, Al, Ni va p-NiO kirishma atomlari asosida o'stirilgan n-ZnO metalloksid qatlamlarining sintez usullari va texnologiyasi tavsifiga bag'ishlangan.

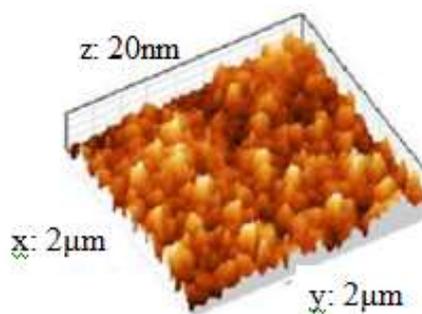
Bobda, shuningdek, shisha tagliklarga ZnO hamda Mg, Al va Ni kirishma atomlari asosida yupqa qatlamlarni spreypiroliz usuli yordamida o'stirish va sintez qilishning optimal shart-sharoitlari aniqlangan, jumladan: havo bosimi–2 bar, purkash tezligi–8 ml/min, zolni purkash davomiyligi–1 daqiqa, taglik haroratini tiklab olish uchun tanaffus–30 soniya, changlatuvchi soplo va taglik orasidagi masofa 80–85 sm. Bundan tashqari, bobda yupqa plyonkalarining tuzilmaviy xossalari o'rganish uchun Empyrean Malvern difraktometri, elektrik xossalari tekshirish uchun HMS-7000 Xoll qurilmasi hamda optik xossalarni tahlil qilish uchun SPEKS SSP-715 M spektrofotometri kabi standart qurilmalar va ularning texnik tavsiflari bayon qilingan.

Dissertatsiya ishining “Al, Mg va Ni kirishma atomlari kiritilgan rux oksidining tuzilmaviy, elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlari” nomli uchinchi bobida Mg, Al, Ni bilan legirlangan ZnO metalloksid plyonkalarini tuzilmaviy, morfologik, elektrofizik hamda fotoelektrik xossalari o‘rganilgan.

1-rasmda o‘stirilgan ZnO yupqa qatlamlarining rentgenogrammasi keltirilgan bo‘lib, uchta kristallografik yo‘nalishida yuqori intensivlikdagi tuzilmaviy aks ettirishlar kuzatilgan. Ya‘ni, (100) kristallografik yo‘nalishiga mos holda,  $2\theta = 31,42^\circ$  burchak sochilishlarida  $d/n = 0,2774$  nmli tekisliklar oralig‘iga tegishli, (002) kristallografik yo‘nalishiga mos holda,  $2\theta = 34,48^\circ$  burchak sochilishlarida  $d/n = 0,2581$  nmli tekisliklar oralig‘iga tegishli, (101) kristallografik yo‘nalishiga mos holda,  $2\theta = 36,34^\circ$  burchak sochilishlarida  $d/n = 0,249$  nmli tekisliklar oralig‘iga tegishli bo‘lgan selektiv tabiatga ega bo‘lgan, yuqori intensivlikdagi tuzilmaviy akslanishlar kuzatilgan. (002) kristallografik yo‘nalishiga tegishli tuzilmaviy chiziqning yuqori intensivlikdaligi ( $\sim 10^5 \text{ imp}\cdot\text{c}^{-1}$ ) hamda ushbu cho‘qqining yarim kengligining ( $\text{FWHM} = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$ ) ingichkaligi o‘stirilgan plyonkaning kristall panjarasining mukammalligi darajasining yetarlicha yuqori ekanligidan dalolat beradi. Eksperimental natijalarini tahlil qilish mobaynida ZnO qatlamlarining C6/mmc fazoviy guruhga tegishli geksogonal kristall panjara ega bo‘lib, vyurtsit tuzilishiga ega ekanligini aniqlandi.



**1-rasm. O‘stirilgan ZnO yupqa qatlamining rentgenogrammasi**



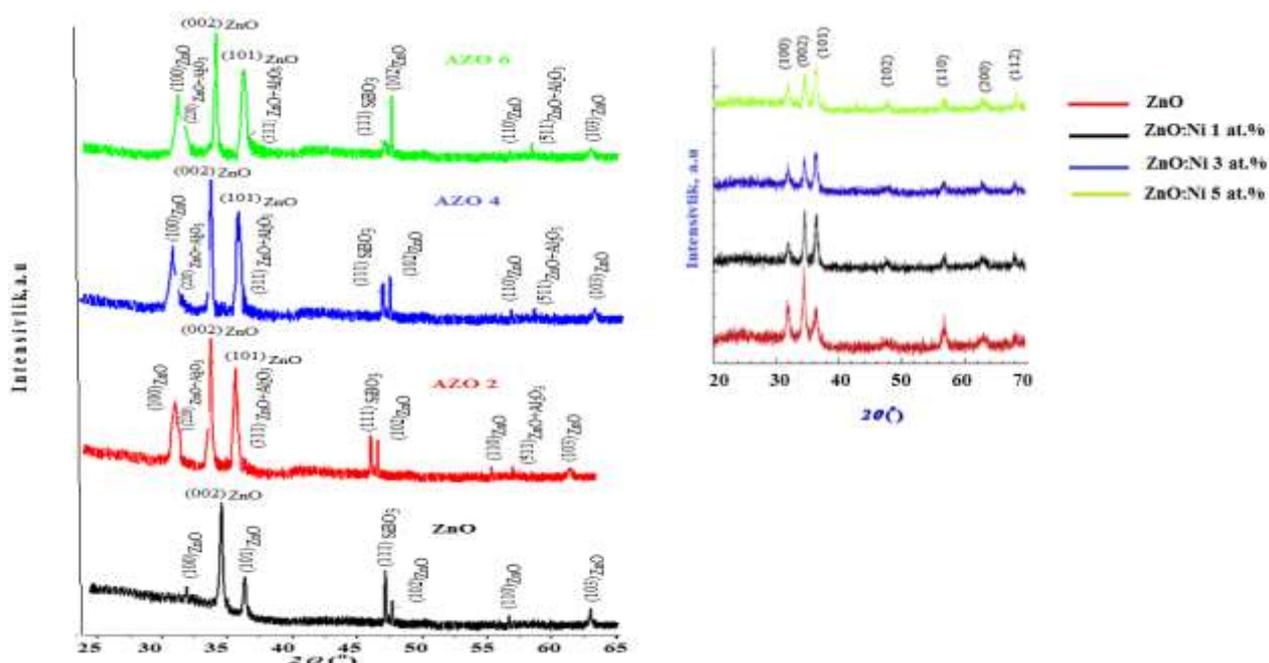
**2-rasm. ZnO yupqa qatlamining AKM tasviri**

2-rasmda ZnO yupqa qatlamlarining uch o‘lchamli AKM tasviri keltirilgan. Uch o‘lchovli tasvirdan, plyonka sirtida o‘stirish jarayonida turli xil o‘lchamdagi nanoobyektlar shakllanganini ko‘rish mumkin. Ushbu nanoobyektlar asosan gumbazsimon geometrik shaklga ega bo‘lib, ularning yonbosh o‘lchamlari – diametrlari  $50 \div 100 \text{ nm}$ , balandliklari esa  $12 \div 16 \text{ nm}$  oralig‘ida joylashgan. Shuningdek, nanokristallitlarning balandlik bo‘yicha taqsimlanish profilidan ular  $10 \div 18 \text{ nm}$  oraliqda yotishi hamda ikki o‘lchovda bo‘lishi aniqlangan. Bu esa ularning kvant o‘ralar ekanligidan dalolat beradi.

3-rasmda Al konsentratsiyasi 2 at.%, 4 at.% va 6 at.% ga teng bo‘lgan sof hamda alyuminiy bilan legirlangan ZnO yupqa plyonkalarining rentgenogrammalari tasvirlangan bo‘lib, ular legirlanmagan ZnO yupqa

qatlaminikiga nisbatan farq qiladi. Kichik burchakli sochilishda kuzatilgan diffuzion akslanishlarning elastik fon sathi legirlangan atomlar miqdori oshishi bilan kamayadi. Ya'ni, Al atomlari miqdorining oshishi natijasida o'stirilgan yupqa qatlamlarda kislorod atomlarining tarqalishidagi asosiy fon aralashmalari bo'yicha kristall panjaralardagi notekislik kamayishi kuzatiladi. Shuningdek, 2% Al atomlari bilan legirlangan qatlamlarning rentgenogrammasida (100) tuzilmaviy chizig'i uchun akslanish intensivligi 16,1%, (101) struktural chizig'i uchun esa 26,8% ga oshishi kuzatiladi. Bu esa,  $Zn^{2+}$  ionlarining  $Al^{3+}$  ionlariga almashtirilganligini ko'rsatadi (Al ionining radiusi 0,51 Å, Zn ionining radiusi esa 0,74 Å). Biroq, Al atomlarining miqdori 2% dan yuqori bo'lsa, ushbu akslanishlarning intensivligi mos ravishda 4,34% va 2,4% ga kamayadi. Bu holat (100) va (101) struktural chiziqlari o'rniga yangi akslanishlar paydo bo'lishidan dalolat beradi. Ushbu akslanishlar ZnO va  $Al_3O_2$  birikmalarining kristallografik yo'nalishlariga tegishli bo'lib, (220) va (311) chiziqlari bilan bog'liq. Bunday o'zgarishlar ZnO kristall tuzilmasida nuqsonlar hosil bo'lishiga, plyonka kristalligining pasayishiga, nomukammalliklarning oshishiga hamda kislorod vakansiyalarining ko'payishiga olib keladi.

4-rasmda nikel atomlari konsentratsiyasi 1 at.%, 3 at.% va 5 at.% bo'lgan ZnO:Ni yupqa qatlamlarining rentgenogrammalari keltirilgan.



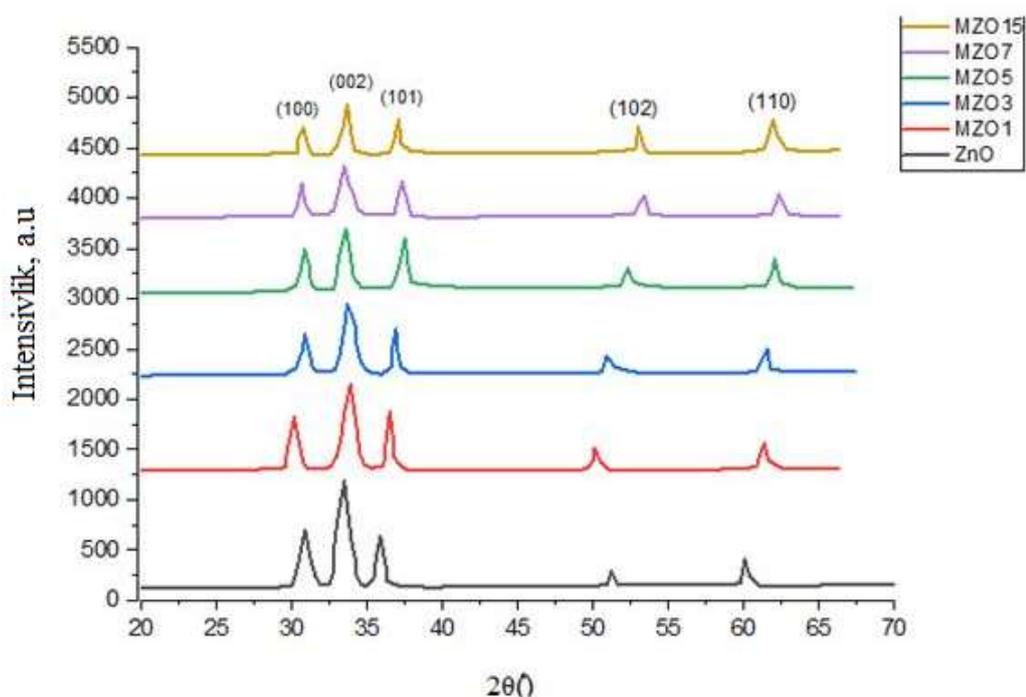
**3-rasm. Sof ZnO va turli xil konsentratsiyali AZO yupqa plyonkalarining rentgen nurlanishi difraksiya tasvirlari.**

**4-rasm. Sof ZnO va turli xil konsentratsiyali ZnO:Ni yupqa plyonkalarining rentgen nurlanishi difraksiya tasvirlari.**

Rentgenogrammalardan (002) kristallografik yo'nalishining intensivligi ZnO va ZnO:Ni 1 at.% plyonkalarida eng yuqori ekanligini ko'rish mumkin. Bu esa, ZnO va ZnO:Ni 1 at.% plyonkalarining (002) tekisligida ustun yo'nalishga ega ekanligini ko'rsatadi. ZnO:Ni 3 at.% va 5 at.% yupqa qatlamlarining ustun

yoʻnalishi (101) tekisligiga oʻzgarishi va Ni yoki NiO ning boshqa ikkilamchi fazalari skanerlash oraliqida koʻrinmasligi, ZnO:Ni tuzilmasidagi Zn<sup>2+</sup> atomlarining Ni<sup>2+</sup> atomlari bilan almashinishi mumkinligini koʻrsatadi. Nikel atomi kiritilgan ZnO plyonkalarining panjara parametrlarida biroz oʻzgarishlar kuzatildi. Bu esa, Zn<sup>2+</sup> va Ni<sup>2+</sup> ionlari oʻrtasidagi ion radiusining kichik farq mavjudligi bilan bogʻliq boʻlishi mumkin. Panjara doimiysi "a" deyarli oʻzgarmay qolishi, ammo "c" ning qiymati Ni atomining konsentratsiyasi oshishi bilan biroz kamayishi aniqlandi. Shuningdek, Ni atomining konsentratsiyasiga qarab (101) kristallografik yoʻnalishida intensivlik oshishi kuzatiladi.

5-rasmda Mg konsentratsiyasi 1 at.%, 3 at.%, 5 at.%, 7 at.% va 15 at.% boʻlgan ZnO:Mg (MZO) yupqa qatlamlarining rentgenogrammalari keltirilgan. MZO plyonkalarining rentgenogrammalarida Mg va uning birikmalari bilan bogʻliq yuqori intensivlikdagi aks ettirishlar aniqlanmagan. Bu esa Mg atomlari ZnO kristall panjaralariga nuqsonlar shaklida joylashganligini va Mg bilan legirlangan ZnO ning vyurtsit strukturasi oʻzgarmasligini koʻrsatadi. Shuningdek, Mg atomlarining ZnO tuzilmaviy xususiyatlariga taʼsirini oʻrganish maqsadida uchta asosiy (100), (002) va (101) kristallografik yoʻnalishlari uchun tuzilmaviy akslanishlarning holati oʻrganildi. MZO plyonkalarida Mg konsentratsiyasi 1 at.% dan 7 at.% gacha oshishi natijasida diffuzion akslanishlar kichik burchaklar tomonga  $\Delta\theta = 0.07^\circ$  ga siljigan. Mg miqdori ortishi bilan (100) va (101) rentgenogrammalarining intensivliklari oʻxshash boʻlib boradi. (002) kristallografik yoʻnalishi uchun tuzilmaviy aks ettirishlarning intensivligi asta-sekin kamayadi. Bu esa "c" parametrining 5.212 Å dan 5.136 Å gacha kamayishi bilan bogʻliq.



**5-rasm. ZnO:Mg ning 1 at.%, 3 at.%; 5at. %;7 at. % va 15 at. % yupqa plyonkalarining rentgen nurlanish diffraksiya tasvirlari**

Shuning uchun ZnO kristall tuzilishida  $Zn^{2+}$  ionlarining  $Mg^{2+}$  ionlariga almashtirilishi c tarmoq parametrining kamayishiga olib keladi. Bu holat  $Mg^{2+}$  ionining radiusi (0.66 Å)  $Zn^{2+}$  ionining radiusiga (0.74 Å) nisbatan kichikroq ekanligi bilan izohlanadi.

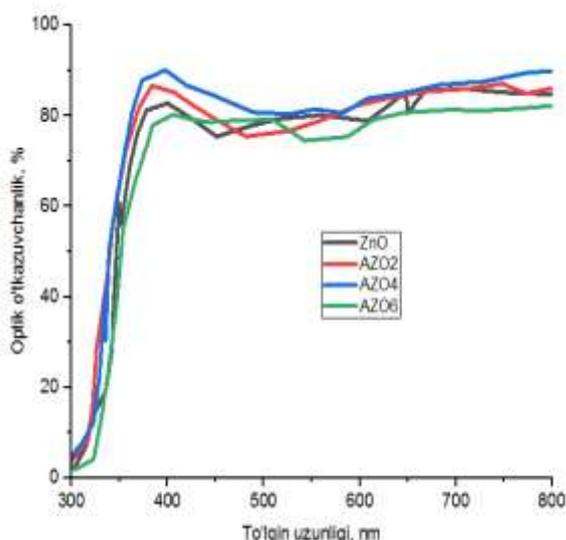
Tadqiqot natijalari yordamida ZnO plyonkalarining barcha difraksiyaviy akslanishlari vyurtsit tuzilishiga ega ekanligi aniqlandi. (002) tuzilmaviy akslanishning intensivligi boshqa difraksion chiziq'larga qaraganda ancha yuqori bo'lib, bu ZnO plyonkalari polikristall tuzilishga ega ekanligini va ularning kristallari asosan "c" o'qi bo'ylab yo'nalganligini ko'rsatadi. Kirishma atomlar konsentratsiyasining oshishi ZnO plyonkasidagi kristallografik yo'nalishlarning o'zaro nisbatini o'zgartiradi. Ayniqsa, (002) kristallografik akslanishning intensivligi pasayadi. Xuddi shunday jarayon Al va Ni bilan legirlangan yupqa qatlamlarda ham kuzatiladi. Ya'ni, ushbu elementlarning konsentratsiyasi ortishi ZnO plyonkasining tuzilmaviy xususiyatlariga ta'sir ko'rsatib, uni boshqa fazaviy guruhga o'tishiga sabab bo'ladi.

O'stirilgan plyonkalarining elektrofizik tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, Al bilan legirlangan ZnO plyonkalarda solishtirma qarshilik  $\rho=0.53\div 2.58 \Omega\cdot\text{cm}$ , tok tashuvchilar konsentratsiyasi  $n=1.73\times 10^{18} \div 5.4\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , zaryad tashuvchilar harakatchanligi esa  $\mu=6.82\div 4.47 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  bo'ldi. Mg kiritilgan ZnO plyonkalarda esa solishtirma qarshilik  $\rho=0.43\div 4.26 \Omega\cdot\text{cm}$ , tok tashuvchilar konsentratsiyasi  $n=(2.05\times 10^{18} \div 7.9\times 10^{17} \text{ cm}^{-3})$ , zaryad tashuvchilar harakatchanligi  $\mu=7.02\div 1.85 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ekanligi aniqlandi. Ni kiritilgan ZnO plyonkalarda esa solishtirma qarshilik  $\rho=0.58\div 2.38 \Omega\cdot\text{cm}$ , tok tashuvchilar konsentratsiyasi  $n=1.9\times 10^{18} \div 6.3\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , zaryad tashuvchilar harakatchanligi esa  $\mu = 5.72\div 4.14 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  bo'ldi.

Alyuminiy bilan legirlangan ZnO plyonkalarining optik o'tkazuvchanligi asosan ko'rinadigan va infraqizil sohalarda yuqori bo'lib, 81% dan 90% gacha o'zgaradi (6-rasm)<sup>2</sup>.

---

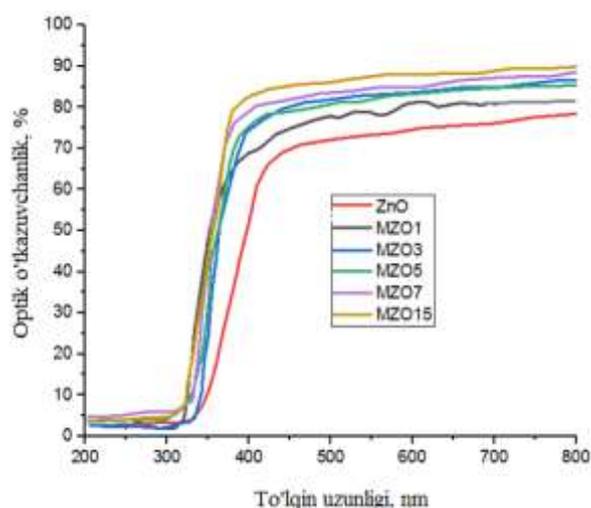
<sup>2</sup> Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Расулова М.Б., Гуломов Б.Д., Юнусалиев Н.Ю. Структура и оптические свойства прозрачных проводящих тонких пленок ZnO, легированных алюминием// Доклады Академии Наук. Тошкент, 2023. Стр.31-36.



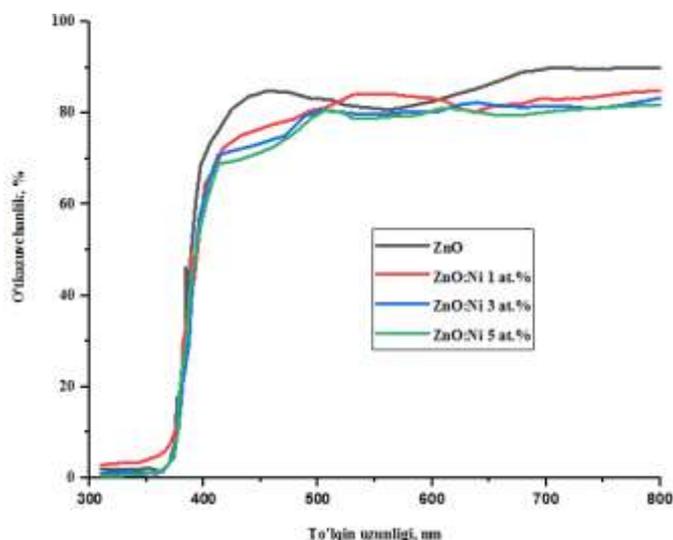
**6-rasm. AZO yupqa qatlamlarining optik o'tkazuvchanligini to'lqin uzunligiga bog'liqligi.**

Mg kiritilgan ZnO (MZO) plyonkasining shaffofligi ZnO plyonkasiga nisbatan 15% ga oshdi va 15 at.% Mg qo'shilishi bilan eng yuqori qiymatga erishdi, ya'ni spektrning ko'rinadigan va infraqizil sohalarida shaffoflik 85% ga teng bo'lib, yuqori shaffoflik chegarasi ultrabinafsha sohasiga to'g'ri keladi (7-rasm).

Nikel kiritilgan ZnO plyonkalarining optik o'tkazuvchanligi esa maksimal ~74% qiymatga ega bo'lib, Ni konsentratsiyasining ortishi plyonkalarining shaffofligini pasaytiradi (8-rasm).



**7-rasm. MZO yupqa qatlamlarining a) optik o'tkazuvchanligini to'lqin uzunligiga bog'liqligi**



**8-rasm. ZnO:Ni yupqa qatlamlarining optik o'tkazuvchanligini to'lqin uzunligiga bog'liqligi.**

ZnO:Ni yupqa qatlamlarda shaffoflikning pasayishi esa bir qancha omillar bilan bog'liq: nikel ZnO tuzilmasiga nuqtaviy nuqson sifatida kirib, yorug'likning tarqalish markazlarini hosil qiladi, natijada shaffoflik pasayadi; dislokatsiya zichligi ortib, yorug'likning sochilishiga sabab bo'ladi; nikel nuqsonlari

qo'shimcha energiya sathlarini hosil qilib, ma'lum to'lqin uzunliklarida yorug'lik yutiladi va umumiy shaffoflik kamayadi.

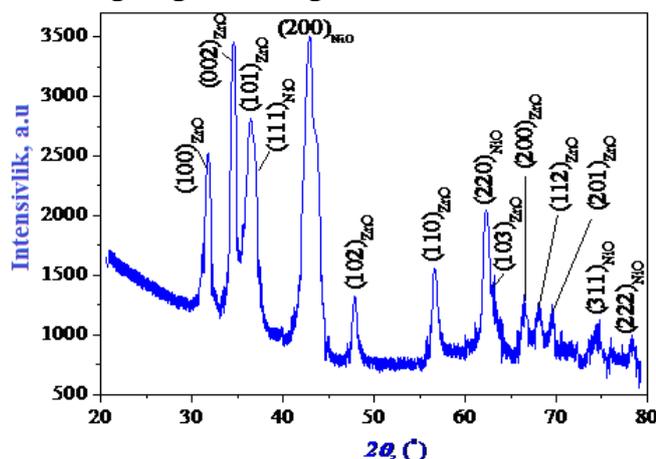
Barcha o'rganilayotgan AZO plyonkalar uchun yutilish chegarasi 365–390 nm oralig'ida kuzatildi (6-rasm). MZO yupqa qatlamlarining optik yutilish spektrlari esa ultrabinafsha (UB) sohasida, 350–400 nm to'lqin uzunligi oralig'ida joylashgan bo'lib, barcha namunalar uchun yutilish qiymatlarining keskin pasayishi kuzatildi. Magniy konsentratsiyasining oshishi yutilish chegarasini kichikroq to'lqin uzunligi tomon siljitdi (7-rasm). Optik yutilish sohasi odatda Mg konsentratsiyasining ortishi bilan spektrning ko'k rang tomon siljishini ko'rsatadi. Bu esa, UB sohasida yutilishning yaxshilanishi va ko'rinadigan diapazonda yutilishning kamayishi bilan izohlanadi. ZnO:Ni yupqa qatlamlarining optik yutilish chegarasi 350–380 nm to'lqin uzunligi oralig'ida bo'lib, ushbu diapazonda optik yutilish nisbatan katta ekanligi aniqlandi. 380–400 nm oralig'ida esa barcha namunalar uchun optik yutilish qiymatlarining keskin kamayishi kuzatildi (8-rasm).

ZnO plyonkalari va Mg qo'shilgan ZnO plyonkalari uchun taqiqlangan soha kengligi ( $E_g$ ) Taus usuli yordamida aniqlangan. Mg kiritilgandan so'ng, ZnO ning taqiqlangan soha kengligi 3,20 eV dan 3,42 eV gacha oshgani kuzatildi. Bu holat MZO plyonkasining kristall panjarasida  $Mg^{2+}$  ionlarining  $Zn^{2+}$  ionlari bilan almashtirilishi bilan izohlanadi. Bundan tashqari, Zn va Mg atomlarining elektromanfiyligi o'rtasidagi farq tufayli  $Mg^{2+}$  va  $O^{2-}$  ionlarining o'zaro ta'siri  $E_g$  ning oshishiga olib keladi. MgO birikmasi ( $E_g = 7,7$  eV) ZnO ( $E_g = 3,20$  eV) ga nisbatan kattaroq taqiqlangan soha kengligiga ega bo'lib, bu ham  $E_g$  ning oshishiga sabab bo'lishi mumkin. Shuningdek, Burstein-Moss hodisasi ham bu jarayonga ta'sir qilishi mumkin. Nikel konsentratsiyasining 1 at.%, 3 at.% va 5 at.% gacha ortishi esa taqiqlangan soha kengligini 3,20 eV dan 3,07 eV gacha kamayishiga olib keldi. Nikel ZnO kristall panjarasida rux (Zn) o'rnini egallab, electron strukturaning o'zgarishiga sabab bo'ladi. Bu esa, taqiqlangan soha kengligida qo'shimcha energetik sathlarning hosil bo'lishi yoki mavjud o'tkazuvchanlik va valentlik sohalarining o'zgarishiga olib keladi.

Dissertatsiya ishining **“n-ZnO/p-NiO geterotuzilmasining rentgenotuzilmaviy, optik va elektrofizik xossalari”** nomli to'rtinchi bobida n-ZnO-p-NiO geterotuzilmalarining rentgenotuzilmaviy xossalari, energetik diagrammalari, volt-amper va sig'im-kuchlanish xususiyatlari shuningdek, optik xossalarini o'rganish natijalari keltirilgan. 9-rasmda n-ZnO-p-NiO geterotuzilmasining rentgenogrammasi ko'rsatilgan bo'lib, u n-ZnO va p-NiO plyonkalarining rentgenogrammalaridan farqli ravishda, unda har ikkala birikmaga tegishli tuzilmaviy akslanishlarning o'zgarishini namoyon qiladi. Intensivlik pasayishi va kichik burchaklar tomon siljishi ko'rinishining o'zgarishini ko'rsatadi (intensivlik pasayadi va kichik burchakli sochilish tomon siljiydi). Bu esa, o'z navbatida, n-ZnO va p-NiO metalloksidi plyonkalarining strukturaviy parametrlari o'rtasida nomuvofiqlik mavjudligini ko'rsatadi. (311) va (222) kristallografik yo'nalishlar bo'yicha  $2\theta=74,6^\circ$ ,  $d/n=0,1271$  nm va  $\theta=78,6^\circ$ ,  $d/n=0,1217$  nm sochilish burchaklarida o'lchamlarga ega diagramma shaklidagi

tuzilmaviy chiziqlar hosil bo'lishi kuzatildi. Ushbu tuzilmaviy chiziqning yarim kengligi va past intensivligi o'stirilgan plyonkaning asosiy qismida mos ravishda 5 va 7 nm o'lchamdagi klasterlar hosil bo'lishini ko'rsatadi. Bu esa, plyonkaning asosiy qismida uzoq masofali tartibga ega bo'lmagan amorf sohalar mavjudligini ko'rsatadi. Bunday tuzilmaviy nomuvofiqliklar o'tish qatlamining kristall panjarasida ko'plab mikro notekisliklar paydo bo'lib, geterotuzilmalarining fizik va elektrofizik xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin.

Bundan tashqari, n-ZnO-p-NiO strukturasi rentgen nurlari difraksiyasi elastik foni sathining o'zgarishi  $60 \div 80^\circ$  tarqalish burchaklari oralig'ida kuzatildi, ya'ni, diffuziya shakliga yaqinlashish tendensiyasi qayd etildi. Bu holat n-ZnO va p-NiO metall oksidi plyonkalari orasidagi o'tish qatlamiga yaqin joylarda atomik kontaktlarning yaqin tartibiga ega ekanligini ko'rsatadi.



**9-rasm. n-ZnO/p-NiO geterotuzilmasining rentgen nurlari difraksiyasi.**

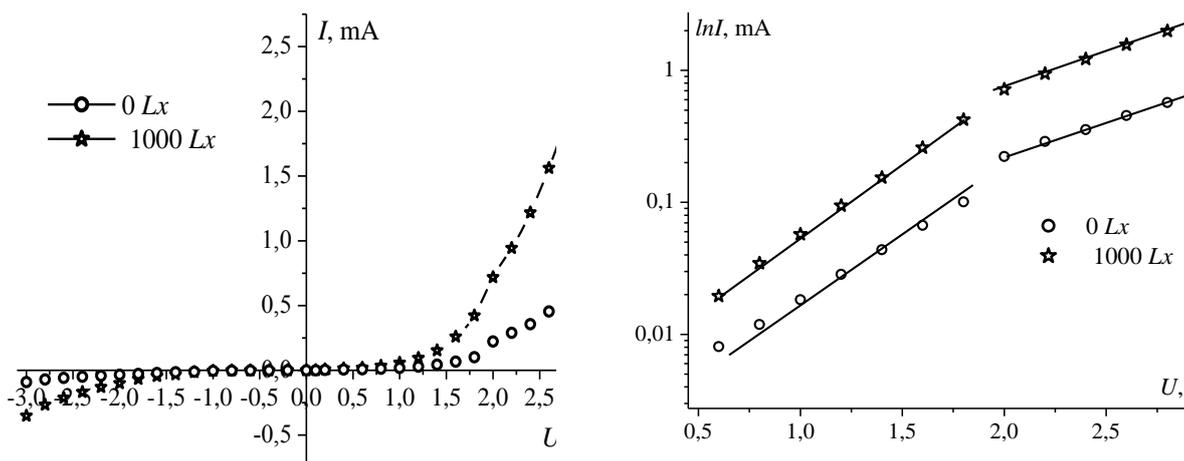
Bunday yaqin tartibdagi bog'lanishlar plyonkalarining asosiy qismida kichik o'lchamli klasterlar va bo'shliqlarning shakllanishini ifodalaydi. Natijada, geterotuzilmadagi o'tish qatlamining tuzilishi rentgen nurlari difraksiyasida o'ziga xos xususiyatlarni namoyon qiladi, bu esa, uning mikrostrukturaviy xususiyatlarini yaxshiroq tushunishga imkon beradi.

Tayyorlangan namunalarda tok oqish mexanizmini o'rganish uchun namunani  $E=0$  Lk hamda  $E=1000$  Lk yoritilganlikdagi VAXsi tekshirildi (10.a.b-rasm).

Volt-amper xarakteristikasining bog'liqligini quyidagi formula bilan ifodalash mumkin:

$$I = I_{01} \exp(\alpha_1 U) + I_{02} \exp(\alpha_2 U) \quad (5)$$

bu yerda, mos ravishda  $\alpha_1=2,5$  va  $\alpha_2=1,5$ .



a)

b)

**10–rasm. a) n-ZnO-p-NiO geterotuzilmalarining volt-amper xarakteristikasi; b)  $E=0$  Lyuks va  $E=1000$  Lyuks logarifmik shkalada yoritilganligi.**

Bu strukturaning to‘g‘rilash koeffitsienti texnologik sharoitga qarab  $10 \div 300$  oralig‘ida o‘zgarib turadi. Ushbu geterotuzilmalarning volt-amper xarakteristikasining quyidagi ifoda bilan tavsiflash mumkin:

$$I_{o\acute{o}p} = AV_{o\acute{o}p}^m \quad (6)$$

bu yerda,  $m$  - 1V gacha bo‘lgan kuchlanish uchun 8, yuqori kuchlanish uchun 10 ga teng qiymatlar olingan. Bunday nazariyaga ko‘ra, namunaga berilayotgan kuchlanishning to‘g‘ri yo‘nalishda tok kuchining kuchlanishga bog‘liqligi analitik ifoda bilan topiladi:

$$U \approx U_0 e^{Jad} \quad (7)$$

bu yerda,  $J$  - tok zichligi,  $U_0$  – namunaga berilayotgan, ya’ni shu soha boshlanishidagi dastlabki kuchlanish,  $d$  - baza qalinligi va  $a$  –doimiy kattalik bo‘lib uning qiymati quyidagi ifoda yordamida aniqlanadi.

$$a = \frac{1}{2qD_p N_t} \quad (8)$$

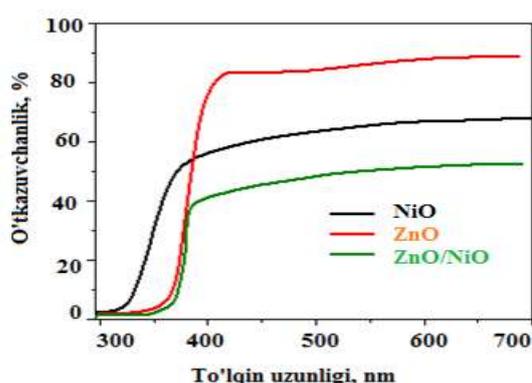
Ushbu ifodadan  $a$  o‘zgarimas kattaligi asosiy zaryad tashuvchilar diffuziyasi ( $D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$ ) va chuqur kirishmalar konsentratsiyasi  $N_t$  ga bog‘liqligini ko‘rish mumkin

Yuqori qarshilikli qatlamning hosil bo‘lishi, ehtimol, nisbatan yuqori haroratda bo‘lgan nikelning bug‘lanishi va uning diffuziya yo‘li bilan n-ZnO yuzasiga kirib borishi bilan bog‘liq. Bu esa, nikel atomlarining cho‘kish jarayonidan oldin cho‘kmaga yaqin joyda joylashishi natijasida yuzaga keladi. Bunday holatda qatlamlardagi donor aralashmalarni nikel atomlari tomonidan kompensatsiya qilinishi mumkin. Ushbu taxmin qatlamning ta’sir qilish vaqtining oshishi yuqori qarshilikli qatlam qalinligining oshishiga olib kelgan eksperimental natijalari bilan tasdiqlanadi. Shu sababli ishlab chiqarilgan namunalar aslida n-ZnO-p-NiO geterotuzilmalari hisoblanadi.

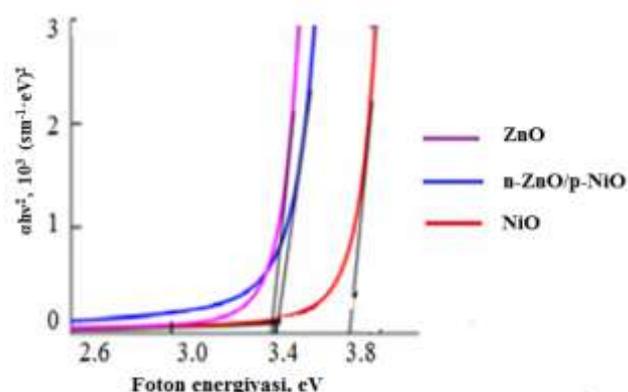
*n*-ZnO-*p*-NiO tuzilmalari sig‘im-kuchlanish xarakteristikasini (CVC) o‘rganish uchun tajribalar o‘tkazildi. Tadqiqot natijalari *n*-ZnO-*p*-NiO tuzilmasining sig‘im kuchlanish xarakteristikalari turli sohalarni o‘z ichiga oladi va geteroo‘tish orqali oqim o‘tish jarayonida tunnel-rekombinatsiya mexanizmi ustunlik qiladi (10-a-rasm). Bu jarayonda tokning kuchlanishga bog‘liqligi ikkita ketma-ket eksponensial soha orqali namoyon bo‘lib, bu xususiyat yorug‘likdan mustaqil shaklda kuzatiladi (10-b-rasm). *n*-ZnO/*p*-NiO geterotuzilmalarining sig‘im-kuchlanish xususiyatlari 300 K haroratda va 1 MHz chastotada o‘lchandi. Tajribalar  $E=0$  lyuks va  $E=1000$  lyuks yoritish sharoitida olib borildi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, *n*-ZnO/*p*-NiO tuzilmalari uchun tok o‘tkazish jarayoni asosan tunnel-rekombinatsiya mexanizmi orqali amalga oshadi.

11-rasmda *n*-ZnO-*p*-NiO geterotuzilmalarining optik o‘tkazuvchanligi spektrlari ko‘rsatilgan. ZnO plyonkasi 378 nm dan boshlab yuqori o‘tkazuvchanlikni ko‘rsatishini kuzatish mumkin.

ZnO metalloksidi plyonkalari ~360 nm dan boshlab 80% optik o‘tkazuvchanlikka ega. NiO plyonkalarining optik o‘tkazuvchanlik spektrlari esa 325 nm dan boshlab yuqori o‘tkazuvchanlik koeffitsientiga ega bo‘lib, ko‘rinadigan va infraqizil sohalarda 56% dan 68% gacha o‘zgaradi. ZnO/NiO plyonkalarining optik o‘tkazuvchanlik spektrlari ham (yashil egri chiziq). ZnO/NiO plyonkalarining optik o‘tkazuvchanlik spektrlari (yashil egri chiziq) ham o‘lchandi va natijalar shuni ko‘rsatdiki, ZnO/NiO plyonkalarining optik o‘tkazuvchanligi 37% gacha keskin pasayadi. Umuman olganda, o‘stirilgan ZnO va NiO plyonkalarining ko‘rinadigan va yaqin infraqizil spektrlaridagi o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentlari mos ravishda 74% dan 92% gacha va 56% dan 68% gacha ekanligi aniqlandi.<sup>3</sup>



**11-rasm. *n*-ZnO-*p*-NiO geterotuzilmalarining a) optik o‘tkazuvchanligini to‘lqin uzunligiga bog‘liqligi.**



**12-rasm. ZnO, NiO hamda *n*-ZnO/*p*-NiO ning taqiqlangan soha kengligini  $(\alpha h\nu)^2$  ga bog‘liqligi.**

<sup>3</sup> Zainabidinov, S.Z., Boboev, A.Y., Rasulova, M.B. & Yunusaliyev, N.Y. (2024). X-ray diffraction analysis, optical characteristics and electro-physical properties of the *n*-ZnO/*p*-NiO structure grown by the spray pyrolysis method // New Materials, Compounds and Applications. Vol.8, No.3, 2024, pp.411-421. №3, Scopus. IF: 0.6, Q3

12-rasmda ZnO/NiO plyonkalarining optik yutilish spektrlari ham keltirilgan (ko'k egri chiziq). Rasmda keltirilgan natijalarda ZnO/NiO plyonkalarining taqiqlangan soha kengligi 3,26 eV ni tashkil etishi anqlandi.

## XULOSA

ZnO yupqa qatlamlarining fizikaviy xususiyatlariga Al, Mg va Ni kirishma atomlarining ta'sirlari hamda ular asosida n-ZnO/p-NiO geterotuzilmalarini olish natijalariga ko'ra quyidagi asosiy xulosalar olindi:

1. Ilk bor shisha tagliklarga o'stirilgan ZnO, AZO, MZO hamda n-ZnO/p-NiO yupqa plyonkalari sprej-piroliz usuli yordamida sintez qilindi va ularning optimal texnologik sharoitlari (purkash tezligi 8 ml/min, bosim 2 atm, taglik va purkovchi soplo orasidagi masofa 80÷85 sm, zolni purkash va tanaffus davomiyligi mos ravishda 1 daqiqa va 30 soniya) aniqlandi.
2. O'stirilgan ZnO plyonkalari C6/mmc fazoviy guruhiga tegishli bo'lib, geksagonal kristall panjaraga va vyurtsit tuzilishiga ega ekanini aniqlandi. Plyonkaning kristall panjarasi parametrlari mos ravishda  $a = b = 0.3265$  nm va  $c = 0.5212$  nm ekanligi qayd etildi.
3. n-ZnO/p-NiO geterotuzilmalarining rentgenogrammlarida noelastik fon sathi n-ZnO va p-NiO plyonkalarining rentgenogrammlarida kuzatilgan noelastik fon sathidan 40-45% gacha ortishi, geterotuzilmalar shakllanish jarayonida kichik klasterlar va vakansiyalarning hosil bo'lishi natijasida sodir bo'lishi aniqlandi.
4. O'stirilgan plyonkalarining elektrofizik tadqiqot natijalariga asosida Al, Mg va Ni atomlari bilan legirlangan ZnO plyonkalarda solishtirma qarshiligi  $\rho = 0.43 \div 2.58 \text{ } \Omega\text{cm}$ , tok tashuvchilar konsentratsiyasi  $n = 1.9 \times 10^{18} \div 5.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  hamda zaryad tashuvchilar harakatchanligi  $\mu = 7.02 \div 1.85 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  qiymatlarni qabul qilishi aniqlandi.
5. Kirishma atomlari kiritilgan ZnO ning optik o'tkazuvchanligi va taqiqlangan soha kengligi turli qiymatlarga (AZO uchun:  $T = 81-90\%$ ,  $E_g = 3.2-3.31$  eV, MZO uchun:  $T = 70-85\%$ ,  $E_g = 3.2-3.47$  eV va ZnO:Ni uchun:  $T = 74-80\%$ ,  $E_g = 3.2-3.1$  eV) ega ekanligi aniqlandi.
6. O'stirilgan ZnO va NiO plyonkalarining ko'rinadigan va yaqin infraqizil spektrlaridagi o'tkazuvchanlik koeffitsientlari mos ravishda 74–92% va 56–68% oralig'ida ekanligi aniqlandi. Shuningdek, ZnO, NiO va ZnO/NiO plyonkalarining taqiqlangan soha kengliklari mos ravishda 3.27 eV, 3.81 eV va 3.26 eV ekanligi qayd etildi.
7. ZnO va NiO plyonkalari asosidagi geterotuzilmalarda kirishma atomlar kristallografik tuzilishga ta'sir qilib, energetik sath, optik o'tkazuvchanlik va yorug'lik yutilish xususiyatlarini o'zgartirishi aniqlandi. Ushbu xususiyatlar p-n o'tishning yorug'likka sezgirligini oshirish va yuqori samarali optoelektron qurilmalarda qo'llash imkonini beradi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

---

**АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АНДИЖАНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

**РАСУЛОВА МАРХАБОХОН БОТИРЖОН КИЗИ**

**ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ Al, Mg и Ni НА ФИЗИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnO**

01.04.10 – физика полупроводников

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

**Наманган – 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 № В2025.1.PhD/FM1264.**

Диссертация выполнена в Андижанском машиностроительном институте и Андижанском государственном университете

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

**Научный руководитель:** **Бобоев Акром Йулдашбоевич**  
доктор физико – математических наук,

**Официальные оппоненты:** **Икрамов Рустам Гуломжонович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Отажонов Салим Мадрахимович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:** Каршинский государственный университет

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 года в \_\_\_ часов на заседании Научного совета PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 при Наманганский государственный технический университет по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7, Административное здание Наманганский государственный технический университета, 2-этаж, малый зал совещаний, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: [niei\\_info@edu.uz](mailto:niei_info@edu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Наманганский государственный технический университет (зарегистрирована за № \_\_\_) по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7, Тел. (99869) 225-10-07.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.  
(протокол рассылки № \_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.)

**У.И.Эркабаев**  
Председатель Научного совета  
по присуждению ученых  
степеней, д.ф-м.н., профессор

**А.А. Абдукаримов**  
Ученый секретарь Научного  
совета по присуждению ученых  
степеней, PhD., доцент

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

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире стремительное развитие нанoeлектроники, оптоэлектроники и сенсорных технологий обусловило повышенное внимание к созданию новых многофункциональных, высокочувствительных и высокоскоростных электронных устройств, а также к совершенствованию существующих систем. Наряду с этим, современная электронная промышленность требует разработки и внедрения передовых технологий, позволяющих синтезировать новые полупроводниковые материалы и управлять физико-химическими свойствами существующих материалов. В этом контексте тонкие плёнки на основе ZnO благодаря своим высоким физическим свойствам широко применяются в солнечных элементах, прозрачных проводниках и газовых сенсорах, а для повышения их эффективности важное значение имеет легирование структуры ZnO различными примесными элементами, что позволяет управлять её электрической проводимостью, оптическими свойствами, кристаллической структурой и морфологией поверхности.

В мировом масштабе ведутся обширные научные исследования, направленные на углублённое изучение структурных, электрофизических и оптических свойств тонких слоёв на основе ZnO с целью совершенствования технологий их получения и создания на их основе высокоэффективных многофункциональных оптоэлектронных устройств. В частности, устанавливается влияние деформаций решётки, дислокаций и других микроструктурных изменений, возникающих в структурах, образованных при введении в состав ZnO таких элементов, как алюминий (Al), магний (Mg) и никель (Ni), на физические свойства материала. В этом процессе управление количеством и распределением примесных элементов расширяет возможности создания прозрачных, стабильных и высокоэффективных оптоэлектронных устройств. Данный подход является одной из актуальных научных направлений в разработке материалов нового поколения для современной нано- и оптоэлектроники.

В последние годы в нашей республике проводятся масштабные мероприятия по созданию прозрачных фотовольтаических устройств с p-n гетеропереходами на основе различных металлоксидных слоёв и внедрению их результатов в перспективные отрасли промышленности. Этот процесс соответствует важным задачам, обозначенным в Стратегии развития «Нового Узбекистана» на 2022–2026 годы, таким как «... бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией, активное внедрение технологий “зелёной экономики” во все сферы жизни, повышение энергоэффективности...»<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы».<sup>4</sup> В реализации этих задач важную роль играет изучение влияния примесных атомов на уникальные свойства тонких слоёв оксида цинка, создание прозрачных оптоэлектронных материалов и их внедрение в соответствующие отрасли приборостроения.

---

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

Данная диссертационная работа в определённой степени способствует реализации задач, обозначенных в Указах и Постановлениях Президента Республики Узбекистан, в том числе: Постановлении № PQ-4779 от 10 июля 2020 года «О дополнительных мерах по повышению энергоэффективности экономики и снижению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетических продуктов за счёт привлечения имеющихся ресурсов», Постановлении № PQ-5032 от 19 марта 2021 года «О мерах по повышению качества образования в области физики и развитию научных исследований», а также Указе № PF-220 от 9 сентября 2022 года «О дополнительных мерах по внедрению энергосберегающих технологий и развитию маломощных возобновляемых источников энергии», а также других нормативно-правовых актах, относящихся к данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данная диссертационная работа соответствует III и IV приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан. Эти направления включают «Развитие энергетики, энергоэффективности, транспорта, машино- и приборостроения, современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронную приборостроения», а также «Разработку методов использования возобновляемых источников энергии, создание новых технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других современных технологий».

**Степень изученности проблемы.** В настоящее время в ведущих научных центрах и высших учебных заведениях мира проводятся научные исследования по синтезу тонкоплёночных металлоксидных покрытий, совершенствованию технологий их получения, а также определению оптимальных условий технологических процессов. Кроме того, ведётся изучение структурных характеристик и уникальных физических свойств полученных плёнок, в частности, оцениваются их возможности применения в качестве солнечных элементов, а также разрабатываются высоко чувствительные электронные устройства, реагирующие на изменения типа газа, температуры и давления.

В частности, ведущие мировые исследователи, такие как японские учёные Синдзи Миядзаки, Хироси Коинума и Т.Охта, а также их научная школа, китайские учёные Р.Ф.Ван и Чжицян Чэнь, а также южнокорейский учёный Сан-Ён Ли и его научная школа, синтезировали тонкие плёнки ZnO и детально изучили их структуру и уникальные физические свойства. Кроме того, южнокорейские исследователи Дж.Ким и М.Патель вместе со своей научной группой изучили возможность использования прозрачных фотовольтаических систем на основе гетероструктур n-ZnO/p-NiO в качестве оконных покрытий зданий и рекомендовали их внедрение в практику. Российский учёный С.И.Рембеза и его научная группа усовершенствовали методы получения тонких плёнок ZnO и SnO<sub>2</sub>, проводя исследования по созданию на их основе высокоэффективных солнечных элементов. Кроме того, выявлена возможность повышения чувствительности металлоксидных

слоёв к определённым газам путём легирования их различными примесными атомами.

В нашей республике ведущие учёные, такие как С.З. Зайнабидинов и Ш.У.Юлдашев, совместно со своими научными группами разработали методы получения тонких плёнок металлоксидов. На основе этих методов были синтезированы наномасштабные плёнки, усовершенствованы технологии их производства, а также изучены возможности создания электронных устройств. Кроме того, были нанесены слои металлоксидов различного состава на полупроводниковые и прозрачные подложки, после чего проведено исследование их физических свойств. На основе полученных результатов выдвинуты предложения по разработке чувствительных к внешним воздействиям газовых сенсоров и элементов памяти.

Несмотря на то, что разработанные в ходе этих исследований оптоэлектронные устройства уже находят применение на практике, факторы, ограничивающие их стабильную работу, ещё не изучены в полной мере. Кроме того, вопросы управления структурными, морфологическими, электрофизическими и оптическими свойствами тонких плёнок ZnO путём внедрения различных металлических примесных атомов, а также создание новых типов гетероструктур остаются недостаточно исследованными.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационные исследования были проведены в рамках проекта № ОТМ-2-68 «Механизмы образования примесно-дефектных микро- и нанообразований в кристаллах и их роль в создании многослойных структур с широкими функциональными возможностями» (2017–2020 гг.), реализуемого в Андижанском государственном университете.

**Целью исследования** является определение оптимальных условий легирования тонких плёнок ZnO атомами Al, Mg и Ni, а также изучение их структурных характеристик, электрофизических и фотоэлектрических свойств.

**Задачи исследования:**

определение оптимальных условий легирования тонких плёнок ZnO атомами Al, Mg и Ni;

исследование структурных изменений полученных плёнок с использованием рентгеновской дифракции и атомно-силовой микроскопии;

оценка влияния легирования атомами Al, Mg и Ni на электропроводность, подвижность и стабильность тонких плёнок ZnO;

анализ оптической прозрачности, фоточувствительности и фотолюминесцентных свойств плёнок на основе ZnO;

создание гетероструктур n-ZnO/p-NiO и определение их возможностей применения в прозрачной электронике и оптоэлектронике.

В качестве **объекта исследования** выбраны тонкие плёнки ZnO, легированные атомами Al, Mg и Ni, а также основанные на них гетероструктуры n-ZnO/p-NiO.

**Предметом исследования** является определение наиболее оптимальных технологических условий получения тонких плёнок ZnO, легированных атомами Al, Mg и Ni, а также основанных на них гетероструктур n-ZnO/p-NiO, исследование их структурных характеристик, а также изучение электрофизических и оптических свойств полученных тонких плёнок.

**Методы исследования.** В соответствии с поставленными задачами, для структурных исследований оксида цинка с различными примесными атомами использовался рентгенодифрактометр XRD-7000, для морфологических исследований — атомно-силовой микроскоп Solver Next, для определения оптической пропускной способности — спектрометр Cary Eclipse, а для измерения электрофизических параметров — установка Холла HMS-7000.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

впервые с использованием метода спрей-пиролиза были выращены тонкие плёнки ZnO, легированные атомами Al, Mg и Ni, а также созданные на их основе гетероструктуры n-ZnO/p-NiO и определены оптимальные условия синтеза (скорость распыления 8 мл/мин, давление 2 атм, расстояние между подложкой и распылительным соплом 80÷85 см, длительность распыления и паузы: 1 минута и 30 секунд, соответственно;

рентгеноструктурный анализ показал, что тонкие плёнки ZnO, легированные Al, Mg и Ni, имеют гексагональную кристаллическую решётку и принадлежат к пространственной группе  $C6/mmc$  (вюртцитовая структура);

электрофизические исследования показали, что для тонких плёнок ZnO, легированных Al, Mg и Ni, получены следующие значения параметров: Удельное сопротивление  $\rho = 0.43 \div 2.58 \text{ } \Omega \cdot \text{см}$ , концентрация носителей тока:  $n = 1.9 \times 10^{18} \div 5.4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , подвижность носителей заряда:  $\mu = 7.02 \div 1.85 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ;

оптические исследования показали, что оптическая прозрачность (Т) и ширина запрещённой зоны ( $E_g$ ) изменяются следующим образом: AZO (ZnO:Al) - Т = 81-90%,  $E_g = 3.2-3.31 \text{ эВ}$ , MZO (ZnO:Mg) - Т = 70-85%,  $E_g = 3.2-3.47 \text{ эВ}$ , ZnO:Ni - Т = 80-74%,  $E_g = 3.2-3.1 \text{ эВ}$ ;

определены энергии запрещённой зоны для плёнок ZnO, NiO и гетероструктур ZnO/NiO, которые составляют 3,27 эВ, 3,81 эВ и 3,26 эВ соответственно. Изучены их свойства, и установлена возможность их применения в солнечной энергетике и оптоэлектронике.

**Практические результаты исследования.** Определены оптимальные параметры выращивания тонких плёнок ZnO, а также легированных Mg, Al, Ni и NiO методом спрей-пиролиза;

исследованы структурные, фотоэлектрические и оптические свойства полученных тонких плёнок, и рекомендовано их использование в оптоэлектронике и прозрачной электронике.

**Достоверность результатов исследований.** Полученные результаты основаны на использовании современных высокоточных рентгеновских дифрактометров, атомно-силовой микроскопии, а также приборов для

исследования электрических и оптических свойств, что соответствует мировому уровню научных исследований. Достоверность и актуальность данных подтверждаются их сравнением с существующими литературными источниками, а надёжность обеспечивается применением проверенных экспериментальных методов и независимых комплексных подходов. Объективность и воспроизводимость результатов подтверждаются их повторяемостью, а логическая согласованность выводов с общими физическими представлениями свидетельствует об их научной обоснованности. Кроме того, полученные данные сопоставляются с фундаментальными физическими законами и анализируются с использованием IT-технологий.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования объясняется тем, что изучение влияния примесных атомов (Mg, Al, Ni) на электрофизические и фотоэлектрические процессы в ZnO, механизмы прохождения тока, характеристики, основанные на избирательной чувствительности, оптическую прозрачность, поглощение света и изменения ширины запрещённой зоны, способствует расширению теоретических знаний и представлений, относящихся к данной области.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что плёнки, полученные на основе легированного примесными атомами (Mg, Al, Ni) ZnO, а также структуры n-ZnO/p-NiO, могут быть использованы при создании фоточувствительных, высокоэффективных многофункциональных электронных устройств, прозрачной электроники и солнечных элементов.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных научно-практических результатов по исследованию структурных основ, электрофизических и фотоэлектрических свойств тонких плёнок ZnO, легированных атомами Al, Mg и Ni, а также гетероструктур n-ZnO/p-NiO, выращенных методом спрей-пиролиза, были сделаны следующие выводы:

оптимальные условия термообработки для плёнок ZnO и NiO, а также гетероструктур ZnO/NiO, методы высокоточного исследования запрещённой зоны для плёнок ZnO, NiO и ZnO/NiO, а также установление того, что процесс прохождения тока через n-ZnO/p-NiO гетероструктуры подчиняется туннельно-рекомбинационному механизму, были использованы при производстве полупроводниковых электронных устройств в акционерном обществе "ФОТОН" (справка № 157 за 2024 год). Полученные научные результаты были применены в экспериментальных установках для разработки оптоэлектронных приборов, что позволило улучшить их фотоэлектрические характеристики.

Влияние примесных атомов Al, Mg и Ni на электрофизические и оптические свойства плёнок ZnO, а также методы исследования воздействия светового излучения на вольт-амперные характеристики гетероструктур n-ZnO/p-NiO были использованы в выполнении фундаментального грантового проекта ОТ-F2-71 на тему «Исследование влияния света на вольт-амперные характеристики p-n перехода, деформированного в сверхвысококачастотном

электромагнитном поле» Наманганский инженерно-строительный институт, 11 января 2025 года, справка № 06/10-09/48). Использование полученных научных результатов позволило оптимизировать чувствительность р-п перехода к свету, усовершенствовать фотодетекторные свойства и разработать высокоэффективные оптоэлектронные устройства.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы были обсуждены на 9 научно-практических конференциях, включая 5 международных и 4 республиканских научных мероприятий.

**Опубликованность результатов исследования.** На основе полученных результатов опубликовано 24 научные работы, включая 6 статей в научных изданиях, рекомендованных ВАК Узбекистана для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 2 статьи в зарубежных журналах, индексируемых в базе данных Scopus, а также 1 сертификата на ПО для ЭВМ по теме исследования.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 114 страницах и включает 29 рисунка, 8 таблиц и список из 98 использованных источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко обоснована актуальность и необходимость исследования, а также показано его соответствие основным приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан. Определены цель и задачи диссертационной работы, изложены научная новизна, практические результаты, обоснована достоверность полученных данных, а также определены их теоретическая и практическая значимость. Введение также содержит сведения о реализации результатов исследования и структуре диссертации.

В первой главе диссертационной работы, названной «**Структура, физические свойства ZnO металлоксида и его применение**», приведён краткий обзор литературы по общим физическим, электрическим и оптическим свойствам ZnO, а также рассмотрены текущее состояние исследований и области его применения. Анализ литературы показал, что тонкие плёнки металлоксида успешно применяются в полупроводниковых светодиодах (преобразующих электрическую энергию в световое излучение), солнечных элементах (преобразующих световую энергию в электричество), газовых сенсорах и фотокаталитических устройствах. Кроме того, установлено, что легирование ZnO примесными атомами способствует изменению его электрической, фотоэлектрической и оптической проводимости, а также ширины энергетической зоны. Углублённое изучение этих свойств и разработка на их основе различных энергетических преобразователей имеет высокую научную и практическую значимость.

Во второй главе диссертации, «**Материалы и экспериментальные методы исследования**», изучены возможности выращивания

многокомпонентных тонких плёнок ZnO методом спрей-пиролиза, рассмотрены основные технологические методы, а также исследованы их электрофизические и структурные характеристики. Данная глава посвящена основным технологическим методам получения металлоксидных материалов, экспериментальным методам исследования их электрических и оптических характеристик, а также описанию синтеза и технологии выращивания тонких плёнок n-ZnO с примесными атомами Mg, Al, Ni и p-NiO на стеклянных подложках. В рамках главы также определены оптимальные условия синтеза тонких плёнок методом спрей-пиролиза, включая: давление воздуха – 2 бар, скорость распыления – 8 мл/мин, длительность распыления золя – 1 минута, время паузы для восстановления температуры подложки – 30 секунд, расстояние между распыляющим соплом и подложкой 80–85 см. Кроме того, в главе представлены стандартные приборы и их технические характеристики, использованные для исследования свойств тонких плёнок: рентгеновский дифрактометр Empyrean Malvern–для анализа структурных характеристик, HMS-7000 Hall–для измерения электрофизических параметров и спектрофотометр SPEKS SSP-715 M – для изучения оптических свойств.

В третьей главе диссертационной работы, **«Структурные, электрофизические и фотоэлектрические свойства оксида цинка, легированного атомами Al, Mg и Ni»**, изучены структурные, морфологические, электрофизические и фотоэлектрические свойства тонких плёнок оксид цинка (ZnO), легированных Mg, Al и Ni.

На рис.1 представлена рентгенограмма выращенных тонких слоев ZnO, на которой наблюдаются интенсивные структурные отражения в трех кристаллографических направлениях. На рентгенограмме: в кристаллографическом направлении (100) зарегистрировано рассеяние на угле  $2\theta=31,42^\circ$ , соответствующее межплоскостному расстоянию  $d/n = 0,2774$  нм. в кристаллографическом направлении (002) рассеяние произошло при  $2\theta=34,48^\circ$ , с межплоскостным расстоянием  $d/n=0,2581$  нм. в кристаллографическом направлении (101) зарегистрировано рассеяние при  $2\theta = 36,34^\circ$ , соответствующее межплоскостному расстоянию  $d/n = 0,249$  нм. Эти интенсивные структурные линии обладают селективной природой, при этом интенсивность линии в направлении (002) достигает  $\sim 10^5 \text{ imp}\cdot\text{s}^{-1}$ . Узкая ширина пика на половине его высоты ( $\text{FWHM} = 3,6\cdot 10^{-3}$  рад) свидетельствует о высокой степени совершенства кристаллической решетки выращенной пленки. Анализ экспериментальных данных показал, что слои ZnO принадлежат гексагональной кристаллической решетке с пространственной группой  $C6/mmc$  и обладают вюрцитной структурой. Эти нанобъекты преимущественно имеют куполообразную геометрическую форму, их

поперечные размеры (диаметры) составляют 50–100 нм, а высота находится в пределах 12–16 нм.

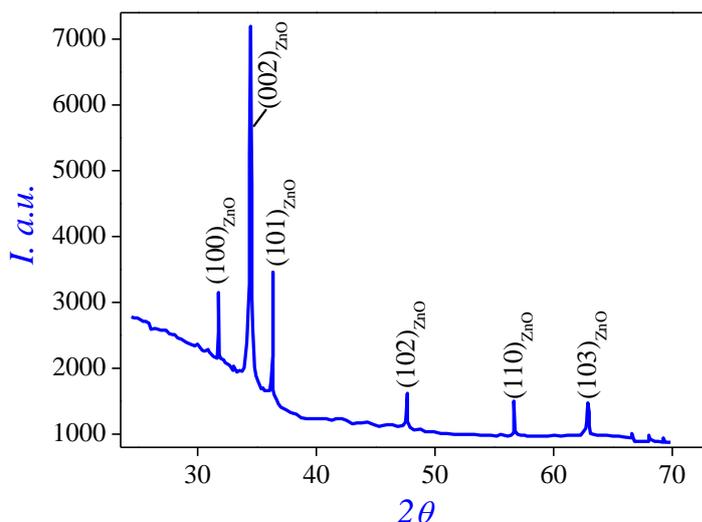


Рис. 1. Рентгенограмма пленок ZnO

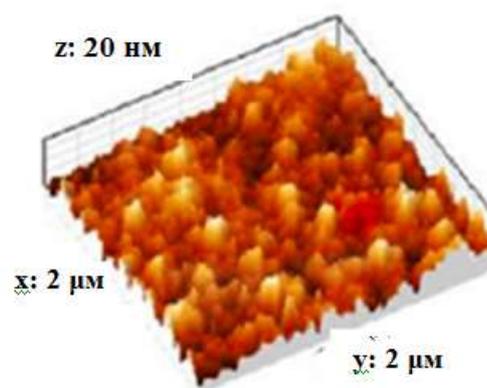
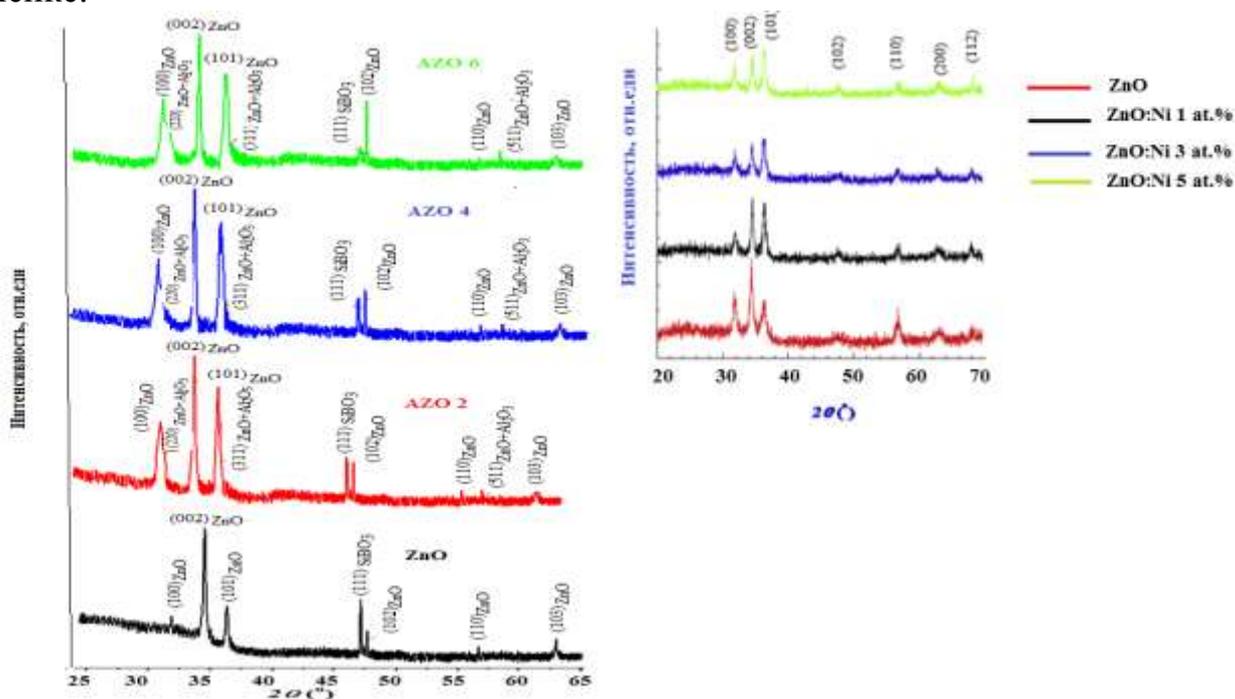


Рис. 2. АСМ изображение тонких слоев ZnO

Кроме того, анализ профиля распределения нанокристаллитов по высоте показал, что их размеры варьируются в диапазоне 10–18 нм, а также присутствует двумерное распределение, что свидетельствует о квантоворазмерных эффектах.

На рис. 3 представлены рентгенограммы чистых и легированных алюминием (Al) тонких пленок ZnO с концентрацией Al 2 ат.%, 4 ат.% и 6 ат.%, которые отличаются от рентгенограмм нелегированных тонких слоев ZnO. В области малых углов рассеяния наблюдается уменьшение уровня эластического фона диффузного рассеяния с увеличением концентрации легирующих атомов. Это означает, что увеличение количества атомов Al приводит к снижению неоднородности кристаллической решетки, что связано с уменьшением основных фоновых примесей, вызванных распределением атомов кислорода в тонких пленках. Кроме того, на рентгенограмме слоев, легированных 2 ат.% Al, наблюдается увеличение интенсивности отражения (100) структурной линии на 16,1% и (101) структурной линии на 26,8%. Это свидетельствует о замещении ионов  $Zn^{2+}$  ионами  $Al^{3+}$  (радиус иона Al – 0,51 Å, радиус иона Zn – 0,74 Å). Однако при увеличении концентрации атомов Al выше 2%, интенсивность указанных отражений уменьшается на 4,34% и 2,4% соответственно. Этот процесс сопровождается появлением новых отражений, которые связаны с формированием новых фаз ZnO и  $Al_2O_3$ . Новые кристаллографические направления (220) и (311) указывают на структурные изменения в пленке. Подобные изменения приводят к образованию дефектов в кристаллической структуре ZnO, снижению кристалличности пленки, увеличению структурной несовершенности, а также к росту концентрации вакансий кислорода.

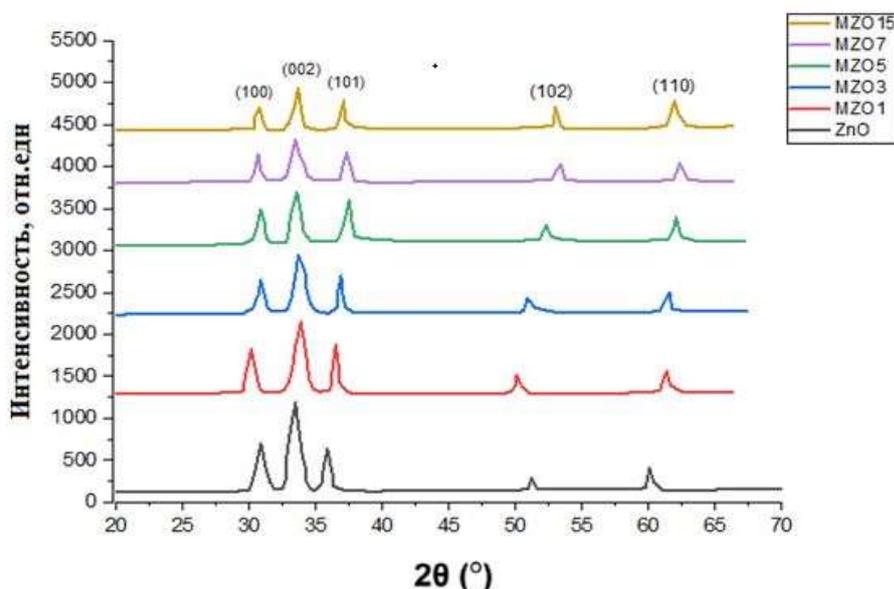
На рис. 4 представлены рентгенограммы тонких пленок ZnO:Ni с концентрацией атомов никеля 1 ат.%, 3 ат.% и 5 ат.%. Анализ рентгенограмм показывает, что интенсивность кристаллографического направления (002) является наибольшей для пленок ZnO и ZnO:Ni 1 ат.%. Это свидетельствует о том, что структура этих пленок преимущественно ориентирована вдоль плоскости (002). Однако для пленок ZnO:Ni с концентрацией 3 ат.% и 5 ат.% наблюдается смена предпочтительной ориентации на плоскости (101), при этом вторичные фазы Ni или NiO в исследуемом диапазоне сканирования не обнаружены. Такое поведение указывает на то, что в структуре ZnO:Ni происходит замещение атомов  $Zn^{2+}$  на  $Ni^{2+}$ , что также подтверждается небольшими изменениями параметров кристаллической решетки пленок ZnO:Ni. Это может быть связано с незначительной разницей в ионных радиусах  $Zn^{2+}$  и  $Ni^{2+}$ . При этом параметр решетки "a" остается практически неизменным, тогда как значение "c" незначительно уменьшается с ростом концентрации атомов Ni. Кроме того, по мере увеличения содержания Ni наблюдается повышение интенсивности (101) кристаллографического направления, что дополнительно подтверждает структурные изменения в пленке.



**Рис. 3. Рентгенограммы чистых и легированных алюминием (Al) тонких пленок ZnO с концентрацией Al 2 ат.%, 4 ат.% и 6 ат.%. Рис. 4. Рентгенограммы тонких пленок ZnO:Ni с концентрацией атомов никеля 1 ат.%, 3 ат.% и 5 ат.%.**

На рис. 5 представлены рентгенограммы тонких пленок ZnO:Mg (MZO) с концентрацией магния 1 ат.%, 3 ат.%, 5 ат.%, 7 ат.% и 15 ат.%. Анализ рентгенограмм показал, что отражения высокой интенсивности, связанные с

Mg и его соединениями, не обнаружены, что свидетельствует о том, что атомы Mg интегрируются в кристаллическую решетку ZnO в виде точечных дефектов. Это также подтверждает, что вюрцитная структура ZnO сохраняется при легировании магнием. Для изучения влияния атомов Mg на структурные свойства ZnO были исследованы три основных кристаллографических направления (100), (002) и (101). Установлено, что при увеличении концентрации Mg от 1 ат.% до 7 ат.% происходит смещение диффузных отражений в область меньших углов на  $\Delta\theta = 0.07^\circ$ . Кроме того, по мере роста содержания Mg: интенсивности отражений в направлениях (100) и (101) становятся схожими; интенсивность отражений в направлении (002) постепенно уменьшается, что связано с сокращением параметра "с" от 5.212 Å до 5.136 Å. Таким образом, замещение ионов  $Zn^{2+}$  на  $Mg^{2+}$  в кристаллической решетке ZnO приводит к уменьшению параметра "с", что объясняется тем, что ионный радиус  $Mg^{2+}$  (0.66Å) меньше, чем у  $Zn^{2+}$  (0.74 Å).

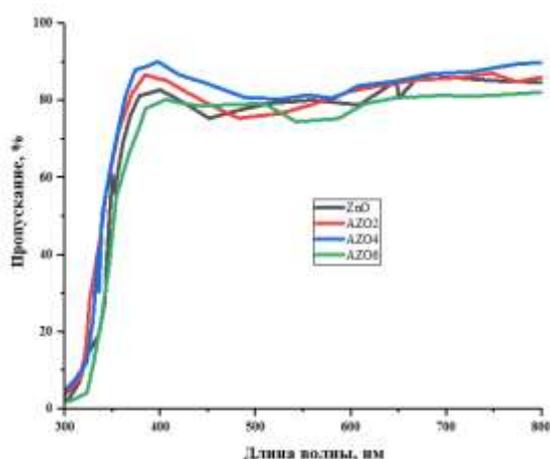


**Рис. 5 Рентгенограммы тонких пленок ZnO и ZnO:Mg с содержанием Mg в количестве 1 ат.%; 3 ат.%; 5ат. %;7ат. % и 15ат. %**

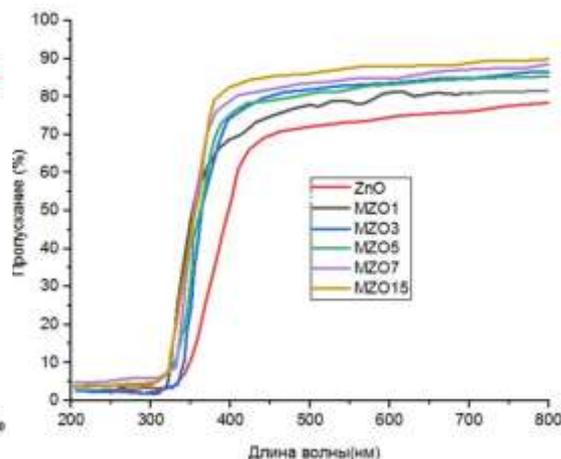
В результате исследования было установлено, что все дифракционные отражения пленок ZnO принадлежат вюрцитной структуре. Интенсивность структурного отражения (002) значительно выше, чем у других дифракционных линий, что свидетельствует о поликристаллической структуре пленок ZnO и преимущественной ориентации их кристаллов вдоль оси "с". Повышение концентрации примесных атомов изменяет соотношение кристаллографических направлений в пленке ZnO, в частности, приводит к снижению интенсивности дифракционного отражения (002). Аналогичный процесс наблюдается и в тонких пленках, легированных Al и Ni. Увеличение концентрации этих элементов влияет на структурные свойства пленки ZnO, что может привести к переходу её структуру в другую фазовую группу.

В результате электрофизических исследований выращенных пленок было установлено, что в пленках ZnO, легированных Al, удельное сопротивление составляет  $\rho=0.53\div 2.58 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ , концентрация носителей заряда  $n=1.73 \times 10^{18} \div 5.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , а подвижность носителей  $\mu=6.82\div 4.47 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ; в пленках ZnO, содержащих Mg, удельное сопротивление  $\rho = 0.43\div 4.26 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ , концентрация носителей заряда  $n=(2.05 \times 10^{18} \div 7.9 \times 10^{17}) \text{ cm}^{-3}$ , подвижность носителей  $\mu=7.02\div 1.85 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ; в пленках ZnO, легированных Ni, удельное сопротивление  $\rho = 0.58\div 2.38 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ , концентрация носителей заряда  $n=(1.9 \times 10^{18} \div 6.3 \times 10^{17}) \text{ cm}^{-3}$ , подвижность носителей  $\mu = 5.72\div 4.14 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ .

Алюминием легированные тонкие пленки ZnO обладают высокой оптической прозрачностью в видимом и инфракрасном диапазонах, изменяясь в пределах 81–90%(см.рис.6)<sup>5</sup>. Прозрачность пленок ZnO, содержащих магний (MZO), по сравнению с чистым ZnO увеличивается на 15%, достигая максимального значения при 15 ат.% Mg, что соответствует 85% прозрачности в видимом и инфракрасном диапазонах (см.рис.7). При этом верхний предел прозрачности приходится на ультрафиолетовую область.



**Рис. 6. Зависимость оптического пропускания тонких пленок AZO от длины волны.**



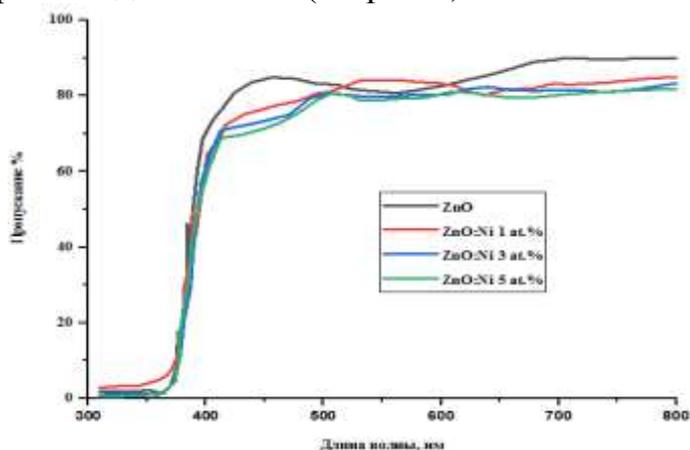
**Рис. 7. Спектры оптического пропускания чистых пленок ZnO и пленок ZnO с различным содержанием легирующей примеси Mg**

Оптическая прозрачность пленок ZnO, легированных никелем, достигает максимального значения  $\sim 74\%$ , но с увеличением концентрации Ni прозрачность снижается(см.рис.8). Снижение прозрачности тонких пленок ZnO:Ni связано с несколькими факторами: никель внедряется в структуру ZnO в виде точечных дефектов, формируя центры рассеяния света, что

<sup>2</sup> Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Расулова М.Б., Гуломов Б.Д., Юнусалиев Н.Ю. Структура и оптические свойства прозрачных проводящих тонких пленок ZnO, легированных алюминием// Доклады Академии Наук. Тошкент, 2023. Стр.31-36.

приводит к снижению прозрачности; повышается плотность дислокаций, что усиливает рассеяние света; дефекты, вызванные атомами никеля, формируют дополнительные энергетические уровни, которые поглощают свет на определенных длинах волн, что приводит к общему снижению прозрачности.

Для всех исследуемых тонких пленок AZO предел поглощения наблюдается в диапазоне 365–390 нм. Оптические спектры поглощения тонких пленок MZO расположены в ультрафиолетовой (УФ) области, в диапазоне 350–400 нм, при этом во всех образцах наблюдается резкое снижение коэффициента поглощения (см.рис.6). Установлено, что увеличение концентрации магния приводит к смещению края поглощения в сторону более коротких длина волн (см.рис.7).



**Рис. 8. Зависимость оптического пропускания тонких пленок ZnO:Ni от длины волны.**

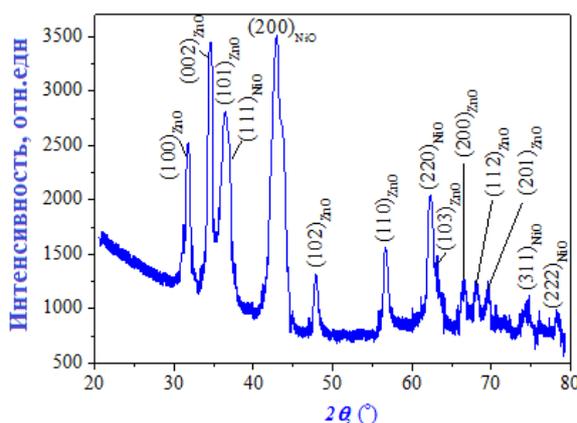
Оптическая зона поглощения обычно сдвигается в синюю область спектра при увеличении содержания Mg, что объясняется улучшением поглощения в УФ-области и снижением поглощения в видимом диапазоне. Предел оптического поглощения тонких пленок ZnO:Ni находится в диапазоне 350–380 нм, где значение оптического поглощения остается относительно высоким. Однако в интервале 380–400 нм для всех образцов наблюдается резкое снижение коэффициента поглощения (см.рис.8.)

Запрещенная зона ( $E_g$ ) тонких пленок ZnO и ZnO, содержащих Mg, была определена методом Тауса. После добавления Mg было зафиксировано увеличение ширины запрещенной зоны ZnO с 3,20 eV до 3,42 eV. Этот процесс объясняется замещением ионов  $Zn^{2+}$  на  $Mg^{2+}$  в кристаллической решетке MZO-пленки. Кроме того, различие в электроотрицательности атомов Zn и Mg приводит к взаимодействию ионов  $Mg^{2+}$  и  $O^{2-}$ , что дополнительно способствует увеличению  $E_g$ . Поскольку ширина запрещенной зоны MgO ( $E_g = 7,7$  eV) значительно превышает  $E_g$  ZnO (3,20 eV), это также может быть одной из причин расширения запрещенной зоны. Кроме того, на этот процесс может оказывать влияние эффект Бурштейна-Мосса. Напротив, увеличение концентрации никеля (1 ат.%, 3 ат.% и 5 ат.%) приводит к снижению  $E_g$  с 3,20 eV до 3,07 eV. Это связано с тем, что ионы  $Ni^{2+}$  замещают ионы  $Zn^{2+}$  в кристаллической решетке, изменяя

электронную структуру материала. В результате в запрещенной зоне появляются дополнительные энергетические уровни, а также происходит изменение границ зон проводимости и валентной зоны, что ведет к уменьшению  $E_g$ .

В четвертой главе диссертационной работы, «Рентгеноструктурные, оптические и электрофизические свойства гетероструктуры  $n\text{-ZnO}/p\text{-NiO}$ », представлены результаты исследований рентгеноструктурных характеристик, энергетических диаграмм, вольт-амперных и емкостно-напряженческих характеристик, а также оптических свойств гетероструктур  $n\text{-ZnO}/p\text{-NiO}$

На рис. 9 представлена рентгенограмма гетероструктуры  $n\text{-ZnO}/p\text{-NiO}$ , которая, в отличие от рентгенограмм отдельных пленок  $n\text{-ZnO}$  и  $p\text{-NiO}$ , демонстрирует изменение структурных отражений, характерных для обеих составляющих. Снижение интенсивности и смещение в сторону малых углов указывают на наличие структурного несоответствия между кристаллическими параметрами  $n\text{-ZnO}$  и  $p\text{-NiO}$  пленок. В кристаллографических направлениях (311) и (222) были зафиксированы дифракционные линии с параметрами:  $2\theta = 74,6^\circ$ ,  $d/n = 0,1271$  нм,  $2\theta = 78,6^\circ$ ,  $d/n = 0,1217$  нм. Эти структурные линии обладают увеличенной полушириной и пониженной интенсивностью, что свидетельствует о формировании в основной части пленки кластеров размером 5–7 нм. Наличие таких кластеров указывает на существование аморфных областей без дальнего порядка, что может привести к возникновению множества микронеоднородностей в кристаллической решетке переходного слоя. Эти структурные несоответствия могут существенно повлиять на физические и электрофизические свойства гетероструктуры.



**Рис. 9. Рентгенограмма структуры  $n\text{-ZnO}/p\text{-NiO}$**

Кроме того, рентгенограмма структуры  $n\text{-ZnO}/p\text{-NiO}$  показала изменение уровня эластического фона в диапазоне углов рассеяния  $60\text{--}80^\circ$ , что свидетельствует о тенденции к диффузионному характеру рассеяния. Этот эффект указывает на наличие упорядоченных атомных контактов вблизи переходного слоя между пленками  $n\text{-ZnO}$  и  $p\text{-NiO}$ . Такие близкоупорядоченные связи приводят к формированию в основной части

пленки мелкодисперсных кластеров и пустот. В результате структура переходного слоя гетероструктуры проявляет характерные особенности в рентгенодифракции, что позволяет глубже понять ее микроструктурные свойства. Для изучения механизма токопереноса в подготовленных образцах были исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) при освещенности  $E=0$  Лк и  $E=1000$  Лк (Рис. 5.a.b). Зависимость вольт-амперной характеристики можно выразить следующим уравнением:

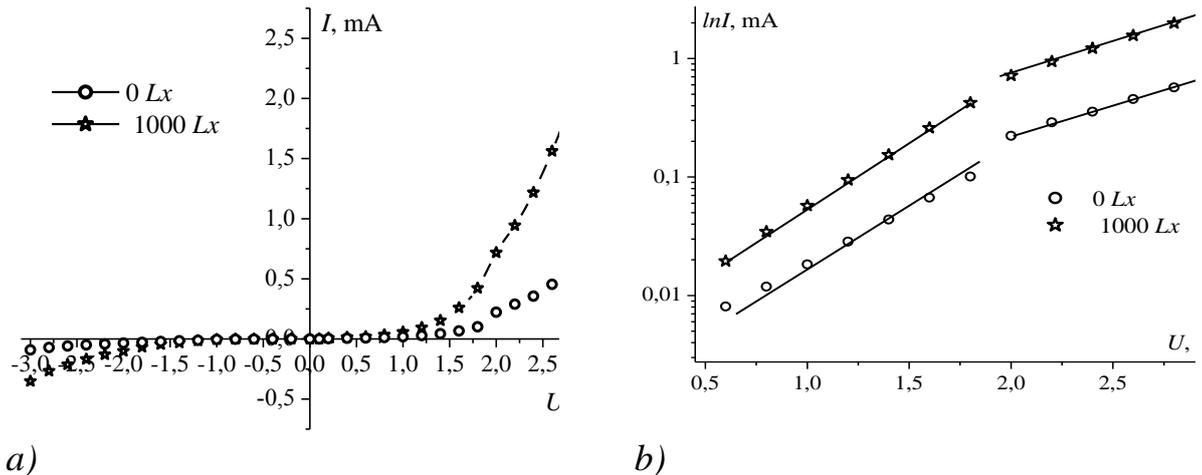
$$I = I_{01} \exp(\alpha_1 U) + I_{02} \exp(\alpha_2 U) \quad (5)$$

Здесь, соответственно,  $\alpha_1 = 2,5$  и  $\alpha_2 = 1,5$ . Коэффициент выпрямления данной структуры изменяется в диапазоне 10–300 в зависимости от технологических условий. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) данных гетероструктур может быть описана следующим выражением:

$$I_{обр} = AV_{обр}^m \quad (6)$$

Здесь  $m = 8$  для напряжения до 1 В и  $m=10$  для высоких напряжений. Согласно данной теории, зависимость тока от приложенного напряжения в прямом направлении может быть выражена следующим аналитическим уравнением:

$$U \approx U_0 e^{Jad} \quad (7)$$



**Рис. 10. Вольт-амперная характеристика структуры  $n$ -ZnO- $p$ -NiO (a) и её преобразование в логарифмическом масштабе (b) при освещенности  $E=0$  Лк и  $E=1000$  Лк .**

здесь  $J$  – плотность тока,  $U_0$  – начальное напряжение, приложенное к образцу, то есть начальное напряжение в данной области,  $d$  – толщина базы, а  $a$  – постоянная величина, значение которой определяется с помощью следующего выражения:

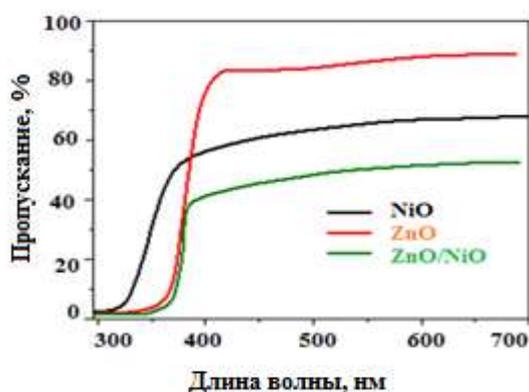
$$a = \frac{1}{2qD_p N_t} \quad (8)$$

Из данного выражения видно, что постоянная величина  $a$  зависит от диффузии основных носителей заряда ( $D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$ ) и концентрации глубоких примесей  $N_t$ . Формирование высокоомного слоя, вероятно, связано с испарением никеля при относительно высокой температуре и его диффузией

к поверхности  $n$ -ZnO. Это приводит к локализации атомов никеля вблизи зоны осаждения до завершения процесса конденсации. В таких условиях донорные примеси в слоях могут компенсироваться атомами никеля. Данное предположение также подтверждается экспериментальными результатами, показывающими, что увеличение времени воздействия приводит к увеличению толщины высокоомного слоя. Поэтому полученные образцы фактически представляют собой гетероструктуры  $n$ -ZnO/ $p$ -NiO.

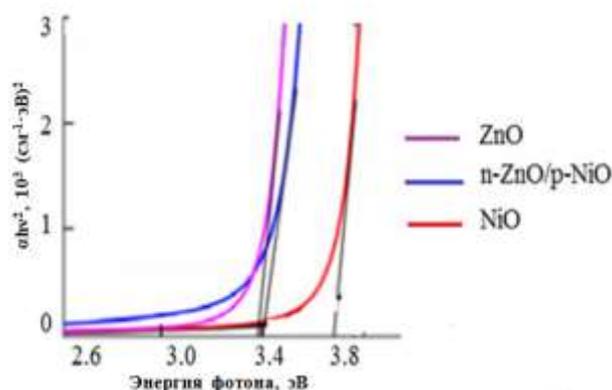
Для изучения емкостно-напряженных характеристик гетероструктур  $n$ -ZnO/ $p$ -NiO были проведены эксперименты. Результаты исследования показали, что вольт-емкостные характеристики структуры  $n$ -ZnO/ $p$ -NiO включают различные области, а в процессе прохождения тока через гетеропереход доминирует туннельно-рекомбинационный механизм переноса заряда (Рис. 10-а). При этом зависимость тока от напряжения проявляется в виде двух последовательных экспоненциальных областей, что наблюдается независимо от освещения (Рис. 10-б). Вольт-емкостные характеристики  $n$ -ZnO/ $p$ -NiO были измерены при температуре 300 К и частоте 1 МГц. Эксперименты проводились при освещенности  $E=0$  люкс и  $E=1000$  люкс. Полученные результаты подтвердили, что в гетероструктурах  $n$ -ZnO/ $p$ -NiO процесс проваждения тока в основном определяется туннельно-рекомбинационным механизмом.

На рис. 11 представлены спектры оптической прозрачности гетероструктур  $n$ -ZnO/ $p$ -NiO. Анализ данных показывает, что пленка ZnO начинают демонстрировать высокую прозрачность начиная с длины волны 378.



**Рис.11. Зависимость оптического пропускания гетероструктур  $n$ -ZnO- $p$ -NiO от длины волны.**

Металлооксидные пленки ZnO демонстрируют оптическую прозрачность около 80% начиная с 360 нм.<sup>6</sup>



**Рис. 12. Зависимость ширина запрещенной зоны ZnO, NiO и  $n$ -ZnO/ $p$ -NiO от  $(\alpha h\nu)^2$**

<sup>3</sup>Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Расулова М.Б., Гуломов Б.Д., Юнусалиев Н.Ю. Структура и оптические свойства прозрачных проводящих тонких пленок ZnO, легированных алюминием// Доклады Академии Наук. Тошкент, 2023. Стр.31-36.

Оптические спектры прозрачности пленок NiO показывают высокий коэффициент пропускания с 325 нм, при этом в видимой и инфракрасной областях он изменяется в диапазоне 56–68%

Были также измерены спектры оптической прозрачности пленок ZnO/NiO (зеленая кривая). Результаты показали, что оптическая прозрачность пленок ZnO/NiO резко снижается до 37%, что связано с изменением структуры материала и влиянием гетероперехода. В целом, измеренные коэффициенты прозрачности для выращенных пленок ZnO и NiO в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне составляют: ZnO: от 74% до 92%, NiO: от 56% до 68%. На рисунке 12 представлены спектры оптического поглощения пленок ZnO/NiO (синяя кривая). Анализ результатов показал, что ширина запрещенной зоны пленок ZnO/NiO составляет 3,26 эВ.

## ВЫВОДЫ

На основе изучения влияния примесных атомов Al, Mg и Ni на физические свойства тонких плёнок ZnO, а также результатов создания гетероструктур n-ZnO/p-NiO, были сформулированы следующие основные выводы:

1. Впервые методом спрей-пиролиза были синтезированы тонкие плёнки ZnO, AZO, MZO и n-ZnO/p-NiO на стеклянных подложках, а также определены их оптимальные технологические условия (скорость распыления 8 мл/мин, давление 2 атм, расстояние между подложкой и распылительным соплом 80–85 см, длительность распыления золя 1 минута, пауза для восстановления температуры подложки 30 секунд).
2. Установлено, что выращенные плёнки ZnO относятся к пространственной группе C6/mmc, обладают гексагональной кристаллической решёткой и вюртцитной структурой. Параметры кристаллической решётки составляют:  $a = b = 0.3265$  нм,  $c = 0.5212$  нм.
3. Установлено, что уровень неупругого фона в рентгенограммах гетероструктур n-ZnO/p-NiO на 40–45% выше по сравнению с рентгенограммами отдельных плёнок n-ZnO и p-NiO, что связано с образованием мелких кластеров и вакансий в процессе формирования гетероструктур.
4. Установлено, что в результате электрофизических исследований выращенных плёнок ZnO, легированных атомами Al, Mg и Ni, их удельное сопротивление составляет  $\rho = 0.43 \div 2.58 \text{ } \Omega \cdot \text{см}$ , концентрация носителей тока  $n = (1.9 \times 10^{18} - 5.4 \times 10^{17}) \text{ см}^{-3}$ , а подвижность носителей заряда  $\mu = 7.02 \div 1.85 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .
5. Установлено, что оптическая прозрачность и ширина запрещённой зоны ZnO, легированного различными примесными атомами, варьируются в различных пределах (AZO:  $T = 81-90\%$ ,  $E_g = 3.2-3.31$  эВ, MZO:  $T = 70-85\%$ ,  $E_g = 3.2-3.47$  эВ и ZnO:Ni:  $T = 74-80\%$ ,  $E_g = 3.2-3.1$  эВ).
6. Установлено, что коэффициенты пропускания выращенных плёнок ZnO и NiO в видимом и ближнем инфракрасном спектральных

диапазонах составляют 74–92% и 56–68% соответственно. Кроме того, ширина запрещённой зоны для ZnO, NiO и ZnO/NiO плёнок составляет 3.27 эВ, 3.81 эВ и 3.26 эВ соответственно.

7. Установлено, что в гетероструктурах на основе плёнок ZnO и NiO примесные атомы влияют на кристаллографическую структуру, изменяя энергетические уровни, оптическую прозрачность и способность поглощать свет. Эти свойства способствуют повышению чувствительности р-п перехода к свету и позволяют использовать такие структуры в высокоэффективных оптоэлектронных устройствах.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 FOR THE  
AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE  
NAMANGAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

---

**ANDIJAN STATE UNIVERSITY  
ANDIJAN MACHINE-BUILDING INSTITUTE**

**RASULOVA MARKHABOKHON BOTIRJON QIZI**

**INFLUENCE OF DOPANT ATOMS Al, Mg AND Ni ON THE PHYSICAL  
PROPERTIES OF ZnO THIN FILMS**

**01.04.10 - Physics of semiconductors**

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

**Namangan-2025**

**The theme of dissertation Doctor of Philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2025.1.PhD/FM1264.**

The dissertation were implemented at the Andijan Machine-Building Institute and at the Andijan State University

The abstract of the dissertation is available in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) on the website Of the scientific Council of the Namangan state technical university ([www.nammti.uz](http://www.nammti.uz)) and on the Information and educational portal "ZiyoNet" ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Scientific supervisor:** **Boboyev Akramjon Yo'ldashboyevich**  
doctor of physics and mathematics

**Official opponents::** **Ikramov Rustam G'ulomjonovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor  
**Otajonov Salim Madrakhimovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor

**Leading organization:** **Qarshi State University**

The defence of the doctoral dissertation will be held at «\_\_» on\_\_\_\_ 2025 at the meeting of the Scientific Council No. for the awarding of scientific degrees at the Namangan state technical university PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 (Address: 160115, 7, Kasansoy Str., 100057, Namangan city, Uzbekistan. Tel.: (+99869) 225-10-07; fax: (+99869) 225-76-75, e-mail: [niei\\_nfo@edu.uz](mailto:niei_nfo@edu.uz), Conference Hall of the Namangan state technical university )

The doctoral dissertation can be found at the Information and Resource Center of the Namangan State Technical University (registered under № \_\_\_\_). Address: 160115, 7, Kasansoy str., 100057, Namangan city, Uzbekistan. Tel.: (+99869) 225-10-07; fax: (+99869) 225-76-75, e-mail: [niei\\_nfo@edu.uz](mailto:niei_nfo@edu.uz)

The abstract of the dissertation was distributed on «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025  
(Registry record No. \_\_\_\_\_ dated «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025).

**U.I.Erkaboev**  
Vise-Chairman of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees,  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Dotsent

**A.A. Abdukarimov**  
Scientific secretary of scientific Council awarding  
Scientific Degrees, candidate of Physical-Mathematical Sciences

**N. Y.Sharibaev**  
Chairman of the academic seminar under  
the Scientific Council awarding Scientific Degrees,  
Doctor of Physical-Mathematical Science, Professor

## INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

**The aim of the research** is to determine the optimal conditions for doping ZnO thin films with Al, Mg, and Ni atoms, as well as to investigate the structural, electrophysical, and photoelectric properties of the obtained films.

**The subject of the research** to determine the most favorable technological conditions for obtaining ZnO thin films doped with Al, Mg, and Ni impurity atoms and the n-ZnO/p-NiO heterostructures based on them, to study their structural properties, and to investigate the electrophysical and optical properties of the obtained thin films.

The scientific novelty of the research consists of the following:

- For the first time, ZnO thin films doped with Al, Mg, and Ni impurity atoms and the n-ZnO/p-NiO heterostructure thin films based on them were grown using the spray pyrolysis method, and the optimal conditions for the synthesis technology were determined (spraying rate of 8 ml/min, pressure of 2 atm, distance between the substrate and the spray nozzle of 80–85 cm, spraying duration and pause duration of 1 minute and 30 seconds, respectively).

- Using X-ray structural analysis, it was determined that ZnO thin films doped with Mg, Al, and Ni impurity atoms have a hexagonal crystal lattice and belong to the wurtzite structure of the  $C6/mmc$  space group.

- Based on the results of electrophysical studies of the grown films, it was found that ZnO films doped with Al, Mg, and Ni atoms have a specific resistivity of  $\rho=0.43\text{--}2.58 \Omega \text{ cm}$ , carrier concentration of  $n=1.9\times 10^{18}\text{--}5.4\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , and carrier mobility of  $\mu=7.02\text{--}1.85 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ .

- The optical transmittance and bandgap of the doped ZnO films were determined as follows: for AZO,  $T=81\text{--}90\%$ ,  $E_g=3.2\text{--}3.31 \text{ eV}$ ; for MZO,  $T=70\text{--}85\%$ ,  $E_g=3.2\text{--}3.47 \text{ eV}$ ; and for ZnO:Ni,  $T=80\text{--}74\%$ ,  $E_g=3.2\text{--}3.1 \text{ eV}$ .

- The bandgap energies of ZnO, NiO films, and ZnO/NiO heterostructures were determined to be 3.27 eV, 3.81 eV, and 3.26 eV, respectively, and their properties were studied, confirming their potential use in solar energy and optoelectronics.

### **Implementation of Research Results:**

Based on the scientific and practical results obtained from studying the structural, electrophysical, and photoelectric properties of ZnO thin films doped with Al, Mg, and Ni impurity atoms and n-ZnO/p-NiO heterostructures grown using the spray pyrolysis method:

- Optimal thermal treatment conditions for ZnO and NiO films and ZnO/NiO heterostructures, methods for high-precision determination of bandgap energies for ZnO, NiO films, and ZnO/NiO heterostructures, and the tunneling-recombination mechanism of current flow through n-ZnO/p-NiO heterostructures were applied in the development of semiconductor electronic devices produced by the "PHOTON" joint-stock company (2024, reference No. 157). The obtained scientific results enabled the preparation of optoelectronic devices in experimental setups and improved their photoelectric properties.

- Methods for determining the influence of Al, Mg, and Ni impurity atoms on the electrophysical and optical properties of ZnO films, as well as the effect of light irradiation on the current-voltage characteristics of n-ZnO/p-NiO heterostructures, were used in the implementation of a fundamental research project grant titled "Investigation of the Effect of Light on the Current-Voltage Characteristics of Deformed p-n Junctions in Ultra-High Frequency Electromagnetic Fields" (OT-F2-71) (Namangan Institute of Engineering and Construction, January 11, 2025, reference No. 06/10-09/48). The use of scientific results allowed for the optimization of the light sensitivity and photodetector properties of p-n junctions and the creation of highly efficient optoelectronic devices.

**The research results were presented** as follows: The main findings of the dissertation work have been discussed at 9 conferences, including 5 international and 4 national-level scientific practical conferences.

**Publication of research results.** Based on the results, a total of 24 scientific works have been published, including 6 scientific articles in scientific journals recommended for publication of major scientific results of doctoral dissertations by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, as well as 2 articles published in foreign journals indexed in Scopus, and one software certificate for a computer program related to the research topic has been obtained.

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. It is presented over 114 pages and includes 29 figures, 8 tables, and a list of 98 references.

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

**I bo'lim (1 часть; part1)**

1. Zainabidinov, S.Z., Boboev, A.Y., **Rasulova, M.B.** & Yunusaliyev, N.Y. (2024). X-ray diffraction analysis, optical characteristics and electro-physical properties of the n-ZnO/p-NiO structure grown by the spray pyrolysis method // *New Materials, Compounds and Applications*. Vol.8, No.3, 2024, pp.411-421. №3, Scopus. IF: 0.6, Q3; <https://doi.org/10.62476/nmca83411>
2. Рембеза Е.ОС., Зайнобиддинов С.З., **Расулова М.Б.** Структурные и оптические свойства пленок ZnO, легированного Mg, полученных методом спрей-пиролиза // *Конденсированные среды и межфазные границы*. Vol 27 No 2 (2025) 302–307 №3, Scopus. IF: 0.18, Q4; <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12807>.
3. Зайнабидинов С. З., Мансуров Х.Ж., Бобоев А.Й., Махмудов Х. А., **Расулова М. Б.** Фотоэлектрические свойства тонких пленок ZnO на основе кремния // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*, 10(427) 2024, стр. 90-99 (01.00.00. №9). [doi.org/10.15518/isjaee.2024.10.090-099](https://doi.org/10.15518/isjaee.2024.10.090-099)
4. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., **Расулова М.Б.**, Гуломов Б.Д., Юнусалиев Н.Ю. Структура и оптические свойства прозрачных проводящих тонких пленок ZnO, легированных алюминием// *Доклады Академии Наук*. Тошкент, 2023. Стр.31-36. (01.00.00. №7).
5. Рембеза Е.С., Йулчиев Ш.Х., **Расулова М.Б.** Структура, свойства и применения металлооксидных пленок ZnO (Обзор)// *Научный вестник Анд.ГУ*. Vol4. Iss.2 2022. P.5-11. (01.00.00. №13).
6. Мансуров Х.Ж, Махмудов Х.А, **Расулова М.Б.** Зулунова М.А. ZnO пленкасининг оптик хоссалари // *Научный вестник Анд.ГУ*. с. 19-22.Vol. 5 Iss. 2 2023. стр.24-28. (01.00.00. №13).
7. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., **Расулова М.Б.**, Махмудов Х.А. “Исследование определенных электрофизических характеристик гетероструктуры n-ZnO-p-NiO“. *Научный вестник НамГУ*. 2024. №11. С.30-33 (01.00.00. №14).
8. Zaynabidinov S.Z., Boboyev A.Y., **Rasulova M.B.** Sprey piroliz usulida o'stirilgan NiO plyonkalarining tuzilmaviy xususiyatlarini o'rganish// *Ilm sarchashmalari*. UrDU.10-son.2024. 10- 3-betlar.(01.00.00. №12).

**II bo'lim (2 часть; part 2)**

9. **Rasulova M.**, Zaynobidinov S., Ermatov Sh., Abdulfayizov L. Effects of thermal annealing and plasma treatment on the properties of ZnO //

- International scientific journal «Modern science and research» Vol.3. Iss. 6. UIF:8.2. ISSN:2181-3906. 2024. pp. 996-1004
10. **Rasulova M.**, Zaynobidinov S., Ermatov Sh., Shaxobiddinova Sh. Study of the properties of thin films obtained by the sol–gel method//Eurasian journal of medical and natural sciences” Innovative Academy Research Support Center Volume 4 Issue 5, May 2024 ISSN 2181-287X
  11. Zaynobiddinov S.Z., **Rasulova M.B.** Cu/Cu<sub>2</sub>O tuzilmalarini elektrokimyoviy cho`ktirish usuli yordamida sintez qilish va o`rganish // Mashinasozlik ilmiy-texnika jurnali maxsus son. Sentabr 2022. №4. 106-112-betlar.
  12. Zaynobiddinov S.Z., **Rasulova M.B.** Magniy kiritilgan rux oksid yupqa qatlamining optik xossalari // Mashinasozlik ilmiy-texnika jurnali. № 1. 2024. 111-115 betlar.
  13. **Rasulova M.B.** Optical properties of zinc oxide doped with different dopant atoms // Экономика и социум. №12(115) 2023
  14. **Rasulova M.B.** Electrophysical properties of ZnO doped Mg // ISSN 2311-2158. The Way of Science. 2024. № 9 (127). Volgograd. P.6-8.
  15. Zaynobiddinov S.Z., **Rasulova M.B.** Металлооксид моддаларини олишда кимевий-плазма ва импульс лазер чўктириш усулларида фойдаланиш // Proceedings of International Conference on Scientific Research in Natural and Social Sciences Hosted online from Toronto, Canada. Date: 5th May, 2023 ISSN: 2835-5326 pp182-186
  16. Zaynobiddinov S.Z., Boboev A.Y., **Rasulova M.B.**, G`ofurjonova M.O. “Rux oksidining ayrim fizik xususiyatlariga Ni kirishma atomining ta’siri” Yarimo`tkazgichlar fizikasining fundamental va amaliy muammolari: yechimlari va istiqbollari” mavzusidagi xalqaro konferensiya. NamMMTI 4-5 oktabr, 2024-yil, 19-20-b.
  17. **Rasulova M.B.**, Madaminova Z.Sh. n-ZnO-p-NiO geterotuzilmalarining optik xususiyatlar // “Yarimo`tkazgichlar fizikasi, zamonaviy elektronika va energetikani fundamental va amaliy muammolari” mavzusidagi xalqaro konferensiya. Namangan 18-19 sentabr, 2024-yil, 267-270- betlar.
  18. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., **Расулова М.Б.** Рентгено дифракционные исследования металлооксидных пленок ZnO, NiO и структуры n-ZnO-p-NiO // “Yarimo`tkazgichlar fizikasi, zamonaviy elektronika va energetikani fundamental va amaliy muammolari” mavzusidagi xalqaro konferensiya. Namangan 18-19 sentabr, 2024-yi, 36-40 betlar.
  19. Zaynobidinov S.Z., Ermatov Sh., **Rasulova M.B.**, G`ofurjonova M.O., Madaminova Z.Sh. n-ZnO va p-NiO geterotuzilmalarining energetik sohalar diagrammasi // prof. A.Teshaboyev tavalludining 100 yilligiga bag`ishlangan “Yarimo`tkazgichlar fizikasining rivojlanishi va istiqbollari” mavzusidagi ilmiy-amaliy seminar. 23 noyabr 2024 yil, Andijon 75-77- betlar.
  20. Zaynobiddinov S.Z. **Rasulova M.B.** Яримўтказгичлар сиртига металлооксидли юпка пардалар ўтказиш усуллари // ”O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasining 80 yilligiga bag`ishlangan «Farg‘ona

vodiysida fan va texnologiya» ilmiy konferensiyasi Namangan sh., 11 - 12 - may 2023 yil 28-30 betlar

21. Zaynobiddinov S.Z., Mahmudov X.A., **Rasulova M.B.** *n*-ZnO qatlamlarining quyosh elementlari sifatida qoʻllanilishi // "Андижон машинасозлик институти “Янги турдаги муқобил энергияманбаларидан фойдаланишнинг инновацион ечимлари ва улардан фойдаланишда энерготежамкор қурилмаларни қўллаш” республика миқийсдаги илмий ва илмий-техник анжуман 29-апрель 2022 йил, Андижон 265-267 б
22. Zaynobiddinov S.Z., **Rasulova M.B.** Legirlangan rux oksidining optik xossalari // Oʻzbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasining 80 yilligiga bagʻishlangan «Fargʻona vodiysida fan va texnologiya» ilmiy konferensiyasi Namangan sh., 11 - 12 - may 2023 yil 58-61 betlar
23. Mahmudov X.A., **Rasulova M.B.**, Gʻulomov B.D. Metalloksidlar sintezining zol-gel usuli // Andijon mashinaszlik instituti “Raqamli hayot va ijtimoiy fanlarning voyaga yetkazishdagi oʻrni va ahamiyati: dolzarb muammolar va istiqbol “ Xalqaro ilmiy-amaliy anjuman. 2022 yil 12 aprelda 573-576 betlar
24. Zaynobiddinov S.Z., **Rasulova M.B.**, Nosirov M.Z. Magniy atomlari bilan legirlangan rux oksid plyonkalarining fizik hususiyatlari // Oʻzbekiston respublikasi adliya vazirligi huzuridagi intellektual mulk agentligi, EHM uchun yaratilgan dasturiy guvojnoma. 2024. № DGU 40963



