

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

**ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI
ANDIJON MASHINASOZLIK INSTITUTI**

G‘ULOMOV BAXTIYORJON DILMURODJON O‘G‘LI

**ZOL-GEL CHO‘KTIRISH USULIDA O‘STIRILGAN ZnO:Al
PLYONKALARINING TUZILMAVIY, OPTIK VA ELEKTROFIZIK
XOSSALARINI TADQIQ QILISH**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI
(PHD)**

DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

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

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

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

G'ulomov Baxtiyorjon Dilmurodjon o'g'li

Zol-gel cho'ktirish usulida o'stirilgan ZnO:Al plyonkalarining tuzilmaviy, optik va elektrofizik xossalarini tadqiq qilish 3

Гуломов Бахтиёржон Дилмуроджон угли

Исследование структурных, оптических и электрофизических свойств ZnO:Al плёнок, выращенных методом золь-гель погружения..... 21

Gulomov Bakhtiyorjon Dilmurodjon ugli

Study of structural, optical and electrophysical properties of ZnO:Al films grown by the sol-gel immersion method..... 41

E'lon qilingan ishlar ro'yhati

Список опубликованных работ

List of published works..... 45

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

**ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI
ANDIJON MASHINASOZLIK INSTITUTI**

G‘ULOMOV BAXTIYORJON DILMURODJON O‘G‘LI

**ZOL-GEL CHO‘KTIRISH USULIDA O‘STIRILGAN ZnO:Al
PLYONKALARINING TUZILMAVIY, OPTIK VA ELEKTROFIZIK
XOSSALARINI TADQIQ QILISH**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI
(PHD)**

DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.4.PhD/FM1205 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Andijon davlat universiteti va Andijon mashinasozlik institutida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (WWW.nammti.uz) va “ZiyoNet” axborot-ta’lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar **Zaynabidinov Sirajidin Zaynabidinovich**
fizika-matematika fanlari doktori, akademik

Rasmiy opponentlar **Gulyomov Gafur**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Otajonov Salim Madraximovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot **Samarqand davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Namangan muhandislik-texnologiya institutu huzuridagi ilmiy darajada beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqmlim Ilmiy kengashning 2025-yil “____-_____” soat ____ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko‘chasi, 7-uy. Tel/ faks: (99869) 225-10-07; Faks: (99869) 225-76-75. e-mail: niei_info@edu.uz, Namangan muhandislik-texnologiya instituti 3-bino, 2-qavat, ilmiy kengash xonasi).

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

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil “____”-_____ da tarqatildi.
(2025-yil “____”-_____ dagi ____ raqamli reyestr bayonnomasi).

U.I. Erkaboyev
Ilmiy darajalat beruvchi
Ilmiy kengash raisi f.-m,fd., professor

A.A. Abdukarimov
Ilmiy darajalat beruvchi
Ilmiy kengash kotibi PhD, dotsent

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jaxonda so‘nggi 10 yil mobaynida optoelektronika sohasida amalga oshirilgan ilmiy tadqiqotlar natijasida, yuqori yorug‘lik o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan shaffof qatlamlarni olish imkoniyatlari aniqlanib, bunda ko‘p hollarda yarimo‘tkazgichli ZnO asosida metalloksidli plyonkalardan foydalanilmoqda. Bunday plyonkalar ayniqsa quyosh energiyasini fotoo‘zgartirishda muhim ahamiyatga ega bo‘lgan kvant effektlarini hosil qiluvchi shaffof qatlamlarni yaratishda muhim rol o‘ynamoqda. Shu bilan birga, optoelektronika sohasida yuqori sifatli va barqaror shaffof plyonkalarni ishlab chiqarish hamda ularni samarali qo‘llash imkonini beruvchi ZnO asosidagi plyonkalarni olish texnologiyasini rivojlantirish, turli kirishma atomlarining ta’siri ostida ularning fizik xossalarida yuz beruvchi o‘zgarishlarni chuqur o‘rganish, shuningdek, hosil bo‘layotgan qatlamlarning bir xil qalinlikda o‘sishini nazorat qilish masalalariga ham alohida e’tibor qaratilmoqda.

Jahonning ko‘plab yetakchi ilmiy markazlarida turli kirishma atomlari kiritilgan ZnO asosidagi plyonkalarni olish usullarini takomillashtirish bilan bir qatorda, ushbu plyonkalar asosida olingan metalloksid qatlamlardan samarali va ko‘p funksiyali optoelektron mahsulotlar yaratish imkoniyatlarini aniqlash maqsadida ularning tuzilmaviy, elektrofizik va optik xossalarini o‘rganishga qaratilgan tadqiqotlar olib borilmoqda. Xususan, ZnO asosidagi yupqa plyonkalarga Al atomlarini legirlash natijasida hosil bo‘ladigan ko‘pqatlamli tuzilmalar sirt sohalari hamda subkristallarning bo‘linish chegaralarida turli hajmiy nuqsonlarning shakllanishi va ularning material xossalariga ta’siri ustuvor tadqiqot yo‘nalishlaridan biri sifatida ko‘rilmoqda. Shu bilan birga, ZnO plyonkalarida Al atomlarini legirlash miqdorini boshqarish orqali yuqori samarali va ko‘p funksiyali shaffof elektronika mahsulotlarini yaratish imkoniyatlari kengaymoqda, bu esa zamonaviy optoelektron qurilmalar ishlab chiqish yo‘lida dolzarb ilmiy vazifalardan biri hisoblanmoqda.

Respublikamizda so‘nggi yillarda ko‘plab ijtimoiy-iqtisodiy sohalarda amalga oshirilayotgan islohotlar doirasida samarali va ko‘p funksiyali optoelektron mahsulotlar olish texnologiyasini ishlab chiqish bo‘yicha ilmiy-tadqiqot ishlarining sifatiga alohida e’tibor qaratilmoqda va ularni jahon standartlariga mos darajaga ko‘tarishga intilish kuchaymoqda. 2022–2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan, «Elektrotexnika sohasida ilmiy tadqiqotlar va tajriba-konstruktorlik ishlarini rivojlantirish»⁵ bo‘yicha vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, metalloksid plyonkalar asosida sifatli tuzilmalarni olish, ularning noyob xususiyatlariga kirishma atomlarining ta’sirini o‘rganish va shunday tuzilmalarni optoelektron mahsulotlar ishlab chiqarishda qo‘llash muhim hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-sonli “Fizika sohasidagi ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-

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

tadbirlari to'g'risida", 2019-yil 30-maydagi PQ-4348-sonli "Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish uchun qulay shart-sharoitlar yaratish va tarmoqning investitsiyaviy hamda eksport salohiyatini oshirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida", 2018-yil 14-iyuldagi PQ-2772-sonli "Ilmiy va ilmiy-texnik faoliyat natijalarini tijoratlashtirish samaradorligini oshirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida" va 2017-yil 26-maydagi PQ-3012-sonli "2017–2021-yillarda qayta tiklanuvchi energetikani yanada rivojlantirish, iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohada energiya samaradorligini oshirish chora-tadbirlari dasturi to'g'risida"gi qarorlarida hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Ushbu dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalar rivojlanishining IV, "Qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish usullarini ishlab chiqish, nanotexnologiya, fotonika va boshqa zamonaviy texnologiyalar asosida yangi texnologiyalar va qurilmalar ishlab chiqish" ustuvor yo'nalishlariga mos keladi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Ayni paytda dunyoning turli ilmiy markazlarida yetakchi olimlar tomonidan shaffof va egiluvchan tagliklarga yarimo'tkazgichli yupqa qatlamlarni o'stirish texnologiyalarini takomillashtirish, ularning tuzilmaviy va noyob fizik xususiyatlariga turli kirishma atomlarining ta'sirini o'rganish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Shuningdek, ular asosda samarali va energiyatejamkor gaz, yorug'lik, harorat va bosim sensorlarini yaratish ustida izlanishlar davom etmoqda. Xususan, Xitoylik olimlar Zhou Wang va Dongyun Wan rahbarligidagi ilmiy guruh turli kirishma atomlari kiritilgan ZnO yupqa qatlamlarni sintez qilib, ularning tuzilmaviy xususiyatlari va noyob fizik xossalari ushbu kirishma atomlarining ta'sirini chuqur o'rgandilar. Iroqlik Alaa J. Ghazari va Emad A. Salman, Amerikalik Ü. Özgür hamda Ya. I. Alivov, boshchiligidagi ilmiy maktablar tomonidan ham Al, Mg, Mn, S, va Ni kabi kirishma atomlari kiritilgan ZnO yupqa plyonkalar turli shaffof va egiluvchan tagliklarda shakllantirildi. Bu tajribalar natijasida harorat va yorug'likka yuqori sezgirlikka ega sensorlar hosil qilinib, ularning samaradorligi va energiya tejamkorligi ta'minlandi, bu esa yuqori sezgirlik talab qiladigan zamonaviy elektronika va sensor texnologiyalari uchun muhim ilmiy asos bo'ldi. Rossiyalik S.I. Rembeza boshchiligidagi ilmiy maktab a'zolari yarimo'tkazgichli tagliklarga o'stirilgan ZnO metalloksid qatlamlariga turli kirishma elementlar atomlarini kiritish orqali ularning ma'lum gazlarga nisbatan sezgirlik darajasini oshirish imkoniyatini aniqladilar. Ushbu tadqiqotlar zamonaviy ekologik monitoringi, sensorlar va energiya manbalari sohalarida yuqori sezgirlikka ega yangi avlod qurilmalarini hosil qilish uchun muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qildi.

Mamlakatimizda akademik S.Z. Zaynabidinov va professor Sh.U. Yuldashev rahbarligidagi ilmiy maktablar tomonidan metalloksid plyonkalarini olishning turli usullari ishlab chiqildi. Bu usullar asosida nanoo'lchamdagi plyonkalar olish, ularning element tarkibini o'zgartirish va olish texnologiyasini takomillashtirish

orqali turli maqsadlar uchun sezgir elektron qurilmalarni hosil qilish imkoniyatlari aniqlandi. Shuningdek, mazkur tadqiqotlar natijasida tashqi ta'sirlarga sezgir sensorlar va xotira elementlarini ishlab chiqish imkoniyatlari ham namoyish etildi.

Hozirgi vaqtga qadar yarimo'tkazgichli ZnO yupqa plyonkalarining tuzilmaviy, optik va elektrofizik xususiyatlariga turli konsentratsiyadagi kirishma atomlarining ta'siri bo'yicha ishonchli tadqiqot natijalari kamligi va turli tashqi ta'sirlar sharoitida mazkur materiallar asosida olingan qurilmalarning barqaror ishlashini ta'minlashda muhim muammolar yetarlicha o'rganilmagan.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya Andijon davlat universitetining OTM-2-68 "Kristallarda kirishma-nuqsonli mikro va nanobirikmalarning hosil bo'lish mexanizmlari va ularni keng qamrovli funksional imkoniyatlarga ega bo'lgan ko'pqatlamli tuzilmalar olishdagi roli" (2017-2020 yillar) mavzusidagi loyiha doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi takomillashtirilgan zol-gel cho'ktirish usuli yordamida o'stirilgan yarimo'tkazgichli ZnO yupqa plyonkalarining tuzilmaviy, morfologik, elektrofizik va optik xususiyatlariga Al kirishma atomlarining ta'sirini tadqiq qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

takomillashtirilgan Zol-gel cho'ktirish usulida yarimo'tkazgichli ZnO plyonkalarini o'stirishning eng maqbul texnologik shart-sharoitlarni aniqlash;

o'stirilgan yarimo'tkazgichli ZnO plyonkalarining tuzilmaviy va morfologik xususiyatlarini aniqlash;

yarimo'tkazgichli ZnO plyonkalarida Al atomlari ta'sirida shakllanadigan nanokristallitlarning tuzilmaviy va morfologik xususiyatlarini o'rganish;

yarimo'tkazgichli ZnO qatlamlarining elektrofizik xususiyatlari va energetik soha tuzilishlariga Al kirishma atomlarining ta'sirini o'rganish;

ZnO:Al turdagi yarimo'tkazgichlarning amaliyotda ko'llanilish istiqbollari aniqlash;

Tadqiqot ob'yekti sifatida borsilikat oyna tagliklariga o'stirilgan, 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlangan ZnO qatlamlari tanlangan.

Tadqiqotning predmeti sifatida borsilikat shisha tagliklariga o'stirilgan ZnO metalloksid qatlamlarining turli sohalaridagi nomuvozanat zaryadli holatlar tabiati, ularning hosil bo'lish mexanizmlari va fizik-kimyoviy xususiyatlariga alyuminiy kirishma atomlarining ta'siri o'rganish tanlangan.

Tadqiqotning usullari. Qo'yilgan vazifalardan kelib chiqib, borsilikat shisha tagliklarida 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlangan ZnO qatlamlarini olish uchun zol-gel usulining takomillashtirilgan cho'ktirish qurilmasidan, tuzilmaviy tadqiqotlar uchun XRD-7000 rentgenodifraktometrda, 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. Olingan natijalarning grafikallari OriginPro2022 dasturi yordamida tahlil qilingan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bora Zol-gel usulining takomillashtirilgan cho'ktirish qurilmasi yordamida 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlangan yarimo'tkazgichli ZnO qatlamlari o'stirilgan va eng maqbul texnologik shart-sharoitlar: cho'ktirish tezligi (1 mm/s), issiqlik ishlov harorati (500°C) va vaqti (10 daqiqa) aniqlangan;

o'stirilgan yarimo'tkazgichli ZnO plyonkalarining sirti (002) kristallografik yo'nalishga mansubligi va C6/mmc fazoviy guruhga tegishli panjara doimiylari $a = b = 0.3265$ nm va $c = 0.5212$ nmga teng vyursit tuzilishli geksogonal kristall panjaraga ega ekanligi rentgenodifraksiya usul yoramida aniqlangan;

ZnO plyonkalariga 1% dan 5% gacha Al atomlari kiritilganda, uning elementar katagidagi "c" o'qi 0,0009 nm ga ortgani, shuningdek, sirt sohalarda ZnO va Al atomlarining o'zaro birikishi natijasida panjara doimiysi $a = 0,5791$ nm bo'lgan, Fd3m fazoviy guruhga mansub kub elementar katakchalardan tashkil topgan nanokristallitlar hosil bo'lishi morfologik tadqiqotlar natijalari asosida aniqlangan;

elektrofizik tadqiqot natijalari yordamida ZnO plyonkalariga 1% Al atomlari kiritilganda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi $2,3 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ gacha ortishi, biroq Al atomlari miqdori 5% gacha oshirilganda bu ko'rsatkich $2,9 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ gacha kamayishi aniqlangan;

yarimo'tkazgichli ZnO plyonkalarida Al atomlari miqdori 1% dan 5% gacha oshishi bilan taqiqlangan energetik soha kengligi 3.243 dan 3.318 eV gacha ortishi, mazkur tuzilmalar uchun optik yutilish koeffitsientini qayta hisoblash usuli orqali aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

shaffof va egiluvchan tagliklarga yuqori optik o'tkazuvchanlikka hamda tuzilmaviy barqarorlikka ega bo'lgan metalloksid plyonkalarni sintez qilish uchun Zol-gel usulining cho'ktirish qurilmasi takomillashtirilgan;

o'stirilgan plyonkalarining fotoelektrik tadqiqotlar natijasida, 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlangan ZnO qatlamlari ko'rinuvchi va yaqin infraqizil sohalarda 74% dan 92% gacha yuqori shaffoflikni namoyon etishi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchiligi zamonaviy qurilmalar, tasdiqlangan texnologiyalar asosida olingan materiallar va xalqaro tajribada qo'llaniladigan elektr hamda yorug'lik sezuvchi qurilmalardan foydalanishga, shuningdek, natijalarning adabiyotlardagi ma'lumotlar bilan qiyoslanishi, takroriyliigi va umumiy fizikaviy qonuniyatlarga mos kelishiga asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati:

ZnO plyonkalarda kechadigan elektrofizik va fotoelektrik jarayonlarga, tuzilmaviy va morfologik xossalarga alyuminiy kirishma atomlarini ta'sirlarini o'rganish mazkur sohaga tegishli bo'lgan nazariy bilimlar va tushunchalarni kengaytirishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlangan ZnO qatlamlari asosida tayyorlangan tuzilmalar yuqori samaradorlikka ega bo'lgan ko'p funksiyali optoelektron qurilmalarda qo'llanilishi mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarini joriy qilinishi. Takomillashtirilgan zol-gel cho‘ktirish usuli yordamida o‘stirilgan ZnO yupqa plyonkalarining tuzilmaviy, morfologik, elektrofizik va optik xususiyatlariga Al kirishma atomlarining ta‘sirini tadqiq qilish bo‘yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

tadqiqot natijasida olingan xulosalar, ya‘ni 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlangan ZnO yupqa plyonkalari geksagonal kristall panjarasining "c" o‘qi 0,0009 nm ga ortishi, rentgenogrammada (002) kristallografik oriyentatsiyasidagi tuzilmaviy cho‘qqining kichik burchaklar tomon 0,12° ga siljishi, shuningdek, plyonkalar yuzasida ZnO va Al atomlari birikishi natijasida panjara doimiysi $a = 0,5791$ nm bo‘lgan va Fd3m fazaviy guruhga mansub kub elementar katakchalardan iborat konussimon shakldagi nanokristallitlarning hosil bo‘lishi haqidagi ilmiy natijalar fizika-matematika fanlari doktori, professor Sh.X. Yo‘lchiyevning “Yarimo‘tkazgichlarda atomlar diffuziyasi” nomli o‘quv qo‘llanmada foydalanilgan (Andijon davlat pedagogika institutining 2024 yil 7 dekabrda 04-334-son ma‘lumotnomasi). Ushbu ilmiy natijalardan foydalanish ZnO plyonkalarida turli sohalarda yuzaga kelayotgan hajmiy nuqsonlarni kamaytirish imkonini bergan;

o‘stirilgan plyonkalarining elektrofizik tadqiqot natijalariga asosida 1 % Al atomlari bilan legirlangan ZnO qatlamlarida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi $2,3 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ gacha ortishi va Al miqdori 5% gacha oshirilganda ular $2,9 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ gacha kamayishi, shuningdek, mazkur holatda ularning harakatchanligi avval 2 % gacha Al atomlari bilan legirlanda $1.81 \text{ sm/V}\cdot\text{s}$ gacha kamayishi so‘ngra 5 % gacha kirishma kiritilganda $8.23 \text{ sm/V}\cdot\text{s}$ gacha ortishi kabi ilmiy-amaliy natijalar “FOTON” AJda ishlab chiqariladigan yarimo‘tkazgichli elektron qurilmalarni tayyorlashda qo‘llanilgan (“O‘zeltexsanoat” aksiyadorlik kompaniyasining 2024 yil 16-sentabrdagi 156-son ma‘lumotnomasi). Olingan ilmiy natijalardan foydalanish tajribaviy namunalarda elektron texnika vositalarini tayyorlash va ularning optik xossalarni yaxshilash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 6 ta xalqaro va 3 ta respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha 20 ta ilmiy ish chop etilgan, jumladan, O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta‘lim, fan va innovasiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 7 ta maqola, shundan 2 tasi Scopus ma‘lumotlar bazasida qayd etilgan xorijiy ilmiy jurnallarda nashr etilgan hamda 2 ta dasturiy taminot bo‘yicha guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to‘rt bob, xulosadan tashkil topgan. U 110 sahifada ifodalaniib, 29 ta rasm, 2 ta jadval va 115 ta foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatini o‘z ichiga oladi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida mavzuning dolzarbligi va zarurligi qisqacha asoslab berilgan, uning O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalar taraqqiyotining asosiy ustuvor yo‘nalishlari bilan bog‘lanishi aniqlangan. 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 plyonkalarining xossalari va ularning bugungi kun optoelektronikasida qo‘llanilishi**” nomli birinchi bobida ilmiy tadqiqotlar natijalari va adabiyotlar tahlili asosida turli metalloksid plyonkalarining o‘stirish usullari, shu jumladan, ularning tuzilmaviy, elektrofizik va optik xossalariga ta‘sir etuvchi omillar keng yoritilgan. Xususan, metalloksid plyonkalar tarkibiga kiritilgan turli kirishma atomlari, ayniqsa alyuminiy (Al) atomlarining ta‘siri katta e‘tiborga olingan. Bunda ularni tarkibi va xossalariga ta‘sir ko‘rsatuvchi parametrlar, kirishma kiritishning fizik-kimyoviy jarayonlari, shuningdek, kirishmalarining konsentratsiyasi va ularning plyonkalardagi o‘rni haqidagi ma‘lumotlar tadqiq etilgan. Shuningdek, ushbu bobda ZnO:Al plyonkalarini o‘stirishning turli usullari, masalan, radio chastotali magnetronli purkash, gidrotermal, kimyoviy bug‘larni cho‘ktirish, sentrafugalash (spin – coating) va cho‘ktirish (dip-coating) kabi texnologiyalarning afzalliklari va kamchiliklari tahlil qilingan. Mazkur bobning muhim jihatlaridan biri sifatida alyuminiy atomlari bilan legirlangan ZnO (ZnO:Al) plyonkalarining o‘ziga xos xususiyatlari va ular asosida olingan tuzilmalarning istiqbollari keng muhokama qilingan. ZnO:Al plyonkalarining yuqori elektr o‘tkazuvchanligi va optik shaffofligi, ularni hozirgi zamon elektron qurilmalari, ayniqsa sensorlar, tranzistorlar, pyezoelektrik dasturlar va fotoelektrik tizimlarda qo‘llash imkoniyatlarini ochib berishi ta‘kidlangan.

Dissertatsiya ishining “**Namunalar tayyorlash va tadqiqotning eksperimental usullari**” nomli ikkinchi bobida 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlangan ZnO yupqa qatlamlar olish uchun talab etiladigan reagentlar hamda metalloksidli plyonkalarni zol-gel cho‘ktirish usulining takomillashtirilgan qurilmasi yordamida o‘stirishning eng maqbul shart-sharoitlari haqida ma‘lumotlar keltirilgan.

Mazkur holda zol eritmasi tayyorlash uchun prekursor sifatida sink atsetat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), erituvchi sifatida izopropil spirt ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$), stabilizator sifatida dietilamin ($\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$), legirlovchi qo‘shimcha sifatida esa alyuminiy nitrat ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) qo‘llanildi. Zol eritmasini tayyorlash uchun sink atsetati (1 gramm) va alyuminiy nitrati (0,041–0,204 gramm) izopropil spirtida (100 ml) eritildi, so‘ngra erituvchanlikni barqarorligini ta‘minlash uchun tomchilatib dietilamin (0,33 ml) qo‘shildi va magnitli aralashtirgich yordamida 60 °C haroratda, 1500 ayl/min tezlikda aralashtirildi, toki eritma shaffof bo‘lguncha. Tayyorlangan zol eritmasini gelga aylantirish uchun maxsus shikafda xona haroratida 168–240 soat davomida saqlandi. Plyonkalarni o‘stirish uchun taglik sifatida borosilikat

shishasidan foydalanildi. Shisha avval distillangan suvdagi ultratovushli vannada tozalanib keyin izopropil spirtida yuvilgan.

Tayyorlangan kirishmasiz va alyuminiy atomlari (1–5%) qo‘shilgan geldan ZnO plyonkalarini o‘stirish uchun optimallashtirilgan cho‘ktirish qurilmasidan foydalanildi. Ushbu qurilmaning afzalligi shundaki, u bir xil qalinlikka ega qoplamalar hosil qilish imkonini berdi. Bu maxsus sterjenning (soat milli xamda unga teskari yo‘nalishda) 1 mm/s tezlikda aylanishi hamda gel quyilgan idishning doimiy sovutilishi va jarayonlarning barchasini dasturlashgan tizim orqali avtomatik boshqarilishi hisobiga amalga oshirildi. Jarayonning optimal takrorlanishi kirishmasiz va kirishmali ZnO yupqa qavatlarini o‘stirishda 40 marta takrorlandi. O‘stirilgan plyonkalar yuzasidan erituvchini olib tashlash uchun ular 500 °C haroratda 10 daqiqa davomida quritish pechida termoishlovga tushirildi.

Bundan tashqari, o‘stirilgan ZnO:Al plyonkalarining turli fizik xossalarini o‘rganish uchun XRD-7000 rentgenodifraktometri, Solver Next atom-kuch mikroskopi, Cary Eclipse spektrometri va HMS-7000 Xoll qurilmalardan foydalanilgan.

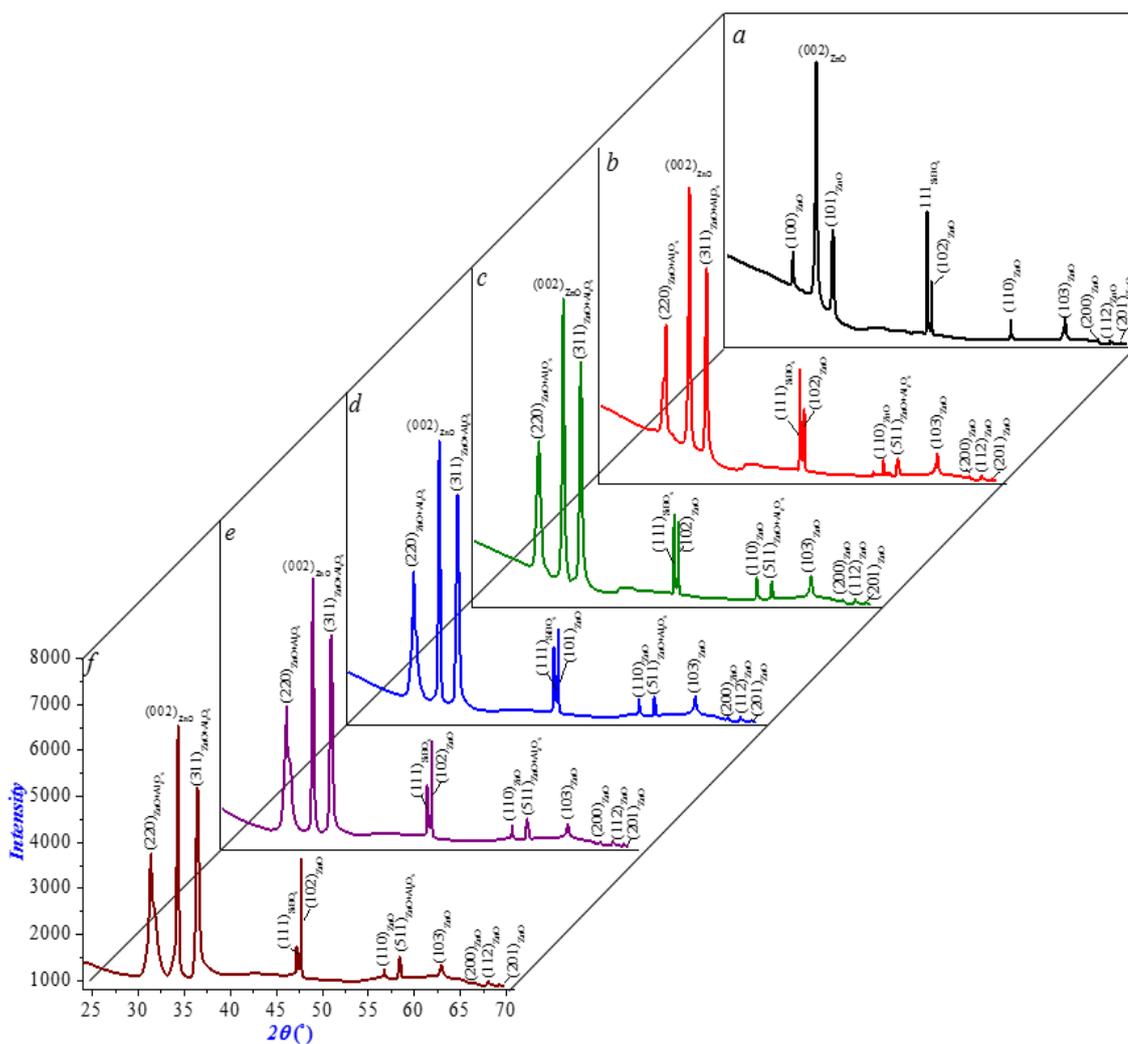
Dissertatsiya ishining **“Borosilikat oyna tagliklariga o‘stirilgan ZnO va ZnO:Al yupqa plyonkalarining rentgenospektral va elektronmikroskopik tadqiqotlari”** nomli uchinchi bobida 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlangan ZnO plyonkalarining tuzilmaviy va morfologik xossalari o‘rganilgan.

1-rasmda cho‘ktirish usuli orqali o‘stirilgan kirishmasiz ZnO va alyuminiy atomlari (1% dan 5% gacha) bilan legirlangan plyonkalarining rentgenogrammasi keltirilgan. 1-a rasmdan ko‘rinib turibdiki, kichik burchakdagi tarqalish holatida kirishmasiz ZnO rentgenogrammasi uchta yuqori intensivlikka ega selektiv tuzilmaviy reflekslarni namoyon etgan. Ular quyidagi kristallografik yo‘nalishlarga taalluqli: (100) burchakda $2\theta = 31.42^\circ$ bo‘lib, $d/n = 0,2774$ nm, (002) burchakda $2\theta = 34.48^\circ$ bo‘lib, $d/n = 0,2581$ nm va (101) burchakda $2\theta = 36.34^\circ$ bo‘lib, $d/n = 0,249$ nm.

Eksperimental ma’lumotlarning tahlili shundan dalolat beradiki, mazkur reflekslar o‘stirilgan plyonkaning kristall panjara doimiylari quyidagicha ekanligini ko‘rsatadi: $a = b = 0,3265$ nm va $c = 0,5212$ nm.

Bundan tashqari, 47.0° – 47.48° burchaklar oralig‘idagi tarqalish soxasida ikkita tuzilmaviy refleks kuzatildi, ulardan biri (111) kristallografik yo‘nalishga (taglik uchun), ikkinchisi esa (102) yo‘nalishga (ZnO plyonkasi uchun) taalluqli.

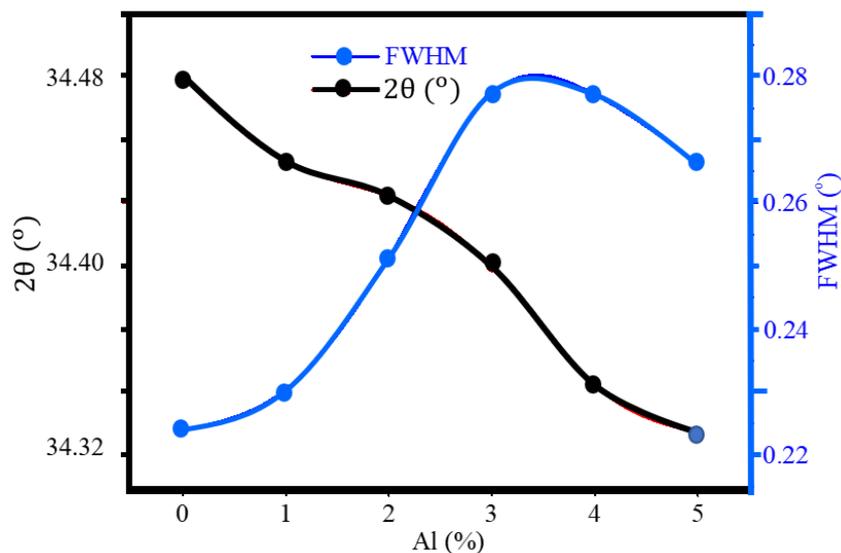
Shuningdek, rentgenogrammada quyidagi kristallografik yo‘nalishlarga mos keladigan qatorlar kuzatilgan: (110) burchakda $2\theta = 56.67^\circ$ bo‘lib, $d/n = 0,1630$ nm va (103) burchakda $2\theta = 62.93^\circ$ bo‘lib, $d/n = 0,1481$ nm. Bu ma’lumotlar subkristall bo‘linish chegaralarida 12.6 nm va 28.3nm o‘lchamli polikristall sohalar, shuningdek, ZnO plyonkalarining sirtiy sohalarida 56.8 nm o‘lchamli nanokristallar hosil bo‘lishini tasdiqlaydi. 1-b, c, d, e va f rasmlarda Al (1% dan 5% gacha) bilan legirlangan ZnO yupqa plyonkalarining rentgenogrammasi keltirilgan bo‘lib, ular kirishmasiz ZnO rentgenogrammasidan ancha farq qiladi. Ko‘rinib turibdiki, kichik burchakli sochilishlarda kuzatilgan diffuzion akslanishning elastik fon satxi legirlovchi atomlar konsentratsiyasi ortib borishi bilan kamaygan.



1-rasm. Legirlanmagan (a) va Al (1% dan 5% gacha) kirishma atomlari bilan legirlangan ZnO plyonkalari rentgenogrammaslari (b – 1%, c – 2%, d – 3%, e – 4%, f – 5%).

2-rasmdan (002) kristallografik yo‘nalishiga tegishli asosiy tuzilmaviy refleks burchakning kichikroq tomoniga ($2\theta = 34.44^\circ$ dan $2\theta = 34.32^\circ$ gacha) siljishi aniqlangan, bu esa $\Delta\theta = 0.12^\circ$ ga teng bo‘lib legirlovchi Al atomlari konsentratsiyasining ortishi bilan sodir bo‘lganini ko‘rish mumkin.

Tajriba ma’lumotlarining tahlili shuni ko‘rsatdiki Al atomlari kiritilgan plyonkalarining xona haroratidagi kristall panjara qiymatlari $a \approx b \approx 0.3265$ nmga va $c \approx 0.5219$ nmga teng ekanligi hamda geksagonal kristall panjaraning c tomoni kichik ($\Delta c \approx 0.0009$ nm) qiymatga ortayotgani aniqlandi. Bu esa o‘z navbatida shakllanyotgan plyonka kristall panjarasida Al atomlari Al^{+3} ga ionlanib, ular Zn^{+2} ionlari bilan o‘zaro o‘rin almashinyotganidan dalolat beradi. Shuningdek, 2-rasmdan (002) reflekslarining yarim kengligi (FWHM) avval ortib (Al atomlari bilan 3% gacha legirlanganda), keyin esa kamayadi (Al miqdori 3% dan oshganda).

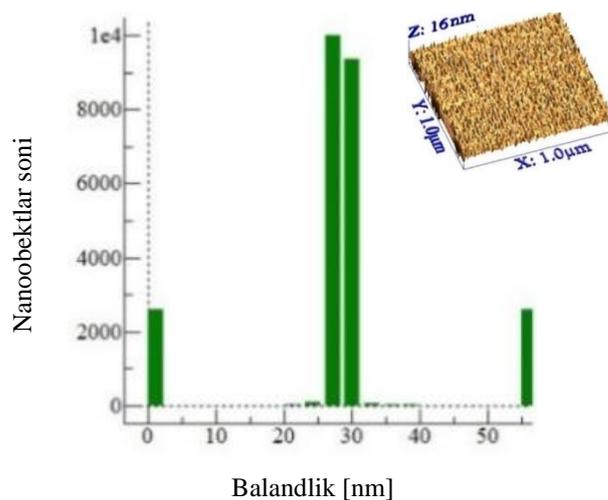
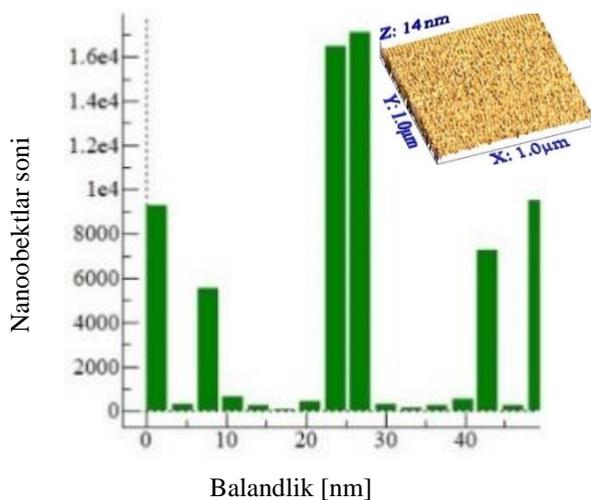
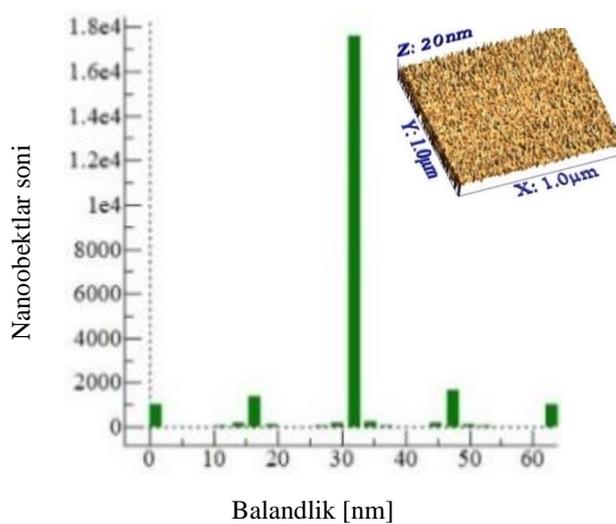
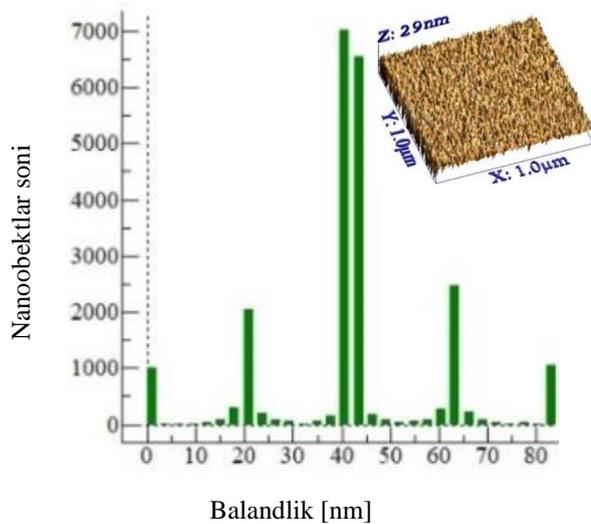
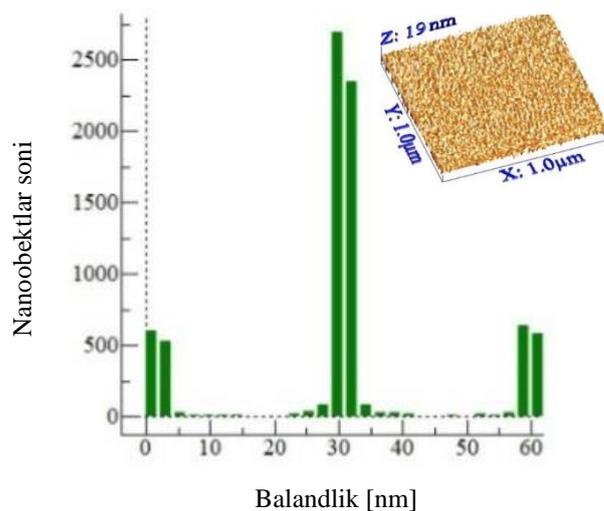
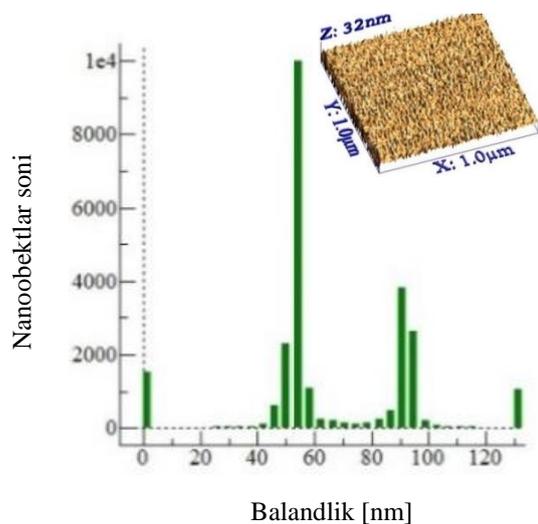


2-rasm. Legirlanmagan va Al (1% dan 5% gacha) bilan legirlangan ZnO plyonkalari rentgenogrammasida (002) refleksining shakli va uning yarim kengligini o'zgarishi.

Bu subkristallitlarning turli kirishma konsentratsiyalaridagi o'lchamini aniqlash imkonini beradi: bunda avval subkristallitlarning o'chami kichrayib borishini ($D_0 = 39.5$ nm, $D_{1\%Al} = 37.9$ nm, $D_{2\%Al} = 34.1$ nm), keyin esa kattalashishini ($D_{3\%Al} = 34.4$ nm, $D_{4\%Al} = 35.2$ nm, $D_{5\%Al} = 35.8$ nm) ko'rish ham mumkin. ZnO va Al₂O₃ birikmalarining o'zaro almashinuvi natijasida Al bilan legirlangan ZnO plyonkalari rentgenogrammasida $2\theta = 58.23^\circ$ burchakda $d/n = 0,1574$ nm qiymatida kristallografik yo'nalish (511) ga tegishli tuzilmaviy chiziqlar kuzatilgan.

Bu reflekslarning fazaviy tahlili ularning boshqa bir fazada, ya'ni Fd3m fazaviy guruhga mansub, kristall panjarasi doimiysi 0,5791 nm bo'lgan kubik elementar kataklar hosil bo'lganligini ko'rsatadi. Bu ZnO plyonkalari sirtga yaqin sohalarida (511) yo'nalishga ega nanokristallitlar hosil bo'lganligini tasdiqlaydi. (511) reflekslarning yarim kengligi (FWHM) asosida nanokristallitlar o'lchamlari aniqlandi. Ushbu o'lchamlar Al konsentratsiyasining ortishi bilan o'zgarib, mos ravishda 31 nm, 42 nm, 31 nm, 26 nm va 25 nm ni tashkil qiladi.

3-a, b, c, d, e va f rasmlarda kirishmasiz va Al (1% dan 5% gacha) bilan legirlangan ZnO plyonkalari uchun AKM tasvirlari va ularning taqsimot profillari keltirilgan. Rasmlardan ko'rinib turibdiki, ZnO plyonkalari o'stirilgan borosilikatli taglik yuzasida turli o'lchamdagi konussimon geometrik shakilga ega nanoobyektlar hosil bo'lgan. ZnO plyonkalarining AKM tasvirlari taqsimot profillarini tahlil qilish natijasida, kirishmasiz va Al (1% dan 5% gacha) bilan legirlangan plyonkalarda hosil bo'lgan konussimon nanoobyektlarning asos diametri (d) va balandligi (h) aniqlandi. Olingan ma'lumotlar 1-jadvalda keltirilgan.



3- rasm. Kirishmasiz va Al atomlari 1% dan 5% gacha kiritilgan ZnO plyonkalarining AKM tasvirilari va taqsimlanish profillari

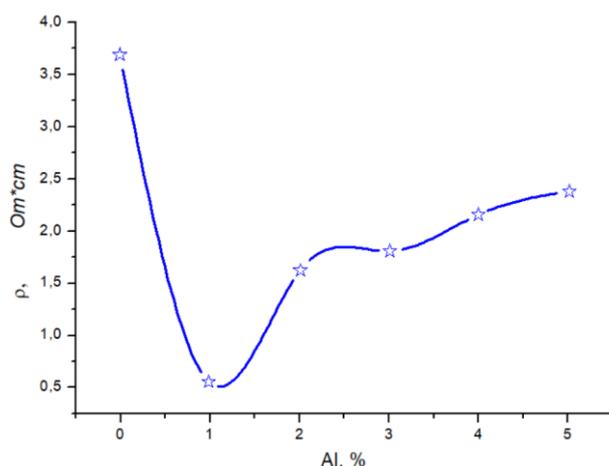
Plyonkalarda hosil bo'lgan konussimon nanoobyektlarning balandliklari (h)

Al %	Legirlanmagan	1	2	3	4	5
$h, (nm)$	55,6	30,3	42,7	32,4	25,8	26,9

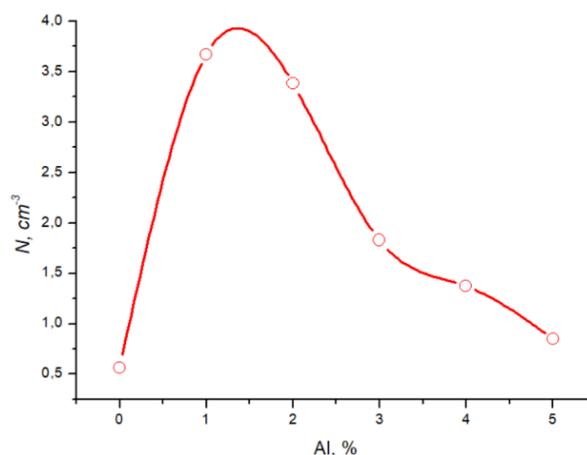
Morfologik tahlil natijalari turli kristall panjaralarga ega moddalarning tuzilmaviy parametrlari bir-biriga mos kelmasligini ko'rsatdi, bu esa o'stirilgan plyonkaning kristall panjarasida ehtimoliy kuchlanishlar paydo bo'lishi va ushbu kuchlanishlar uch o'lchamli nanoobyektlar hosil bo'lishiga olib kelishi hamda ular asta-sekin yuzaga chiqib, o'z-o'zidan nanoobyektlarga birlashishi mumkin.

“Yarimo'tkazgichli ZnO va ZnO:Al yupqa plyonkalarining elektrofizik va optik xossalari” nomli to'rtinchi bobida 1%–5% gacha Al atomlari bilan legirlangan ZnO plyonkalarining elektrofizik va optik xossalari o'rganilgan.

4-rasmda Al (1% dan 5% gacha) bilan legirlangan ZnO plyonkalarining solishtirma qarshiligini kirishma konsentratsiyasiga bog'liqlik grafiklari keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, o'stirilgan plyonkalarining solishtirma qarshiligi Al kirishma atomlarining miqdoriga qarab o'zgarib turadi.



4-rasm. ZnO plyonkalar solishtirma qarshiligi (ρ) ning legirlovchi Al atomlari miqdoriga bog'liq o'zgarishi.



5-rasm. ZnO plyonkalarida legirlovchi Al atomlari miqdoriga bog'liq xolda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi (N_e) o'zgarishi.

Bizning hol uchun ZnO plyonkalarining solishtirma qarshiligi Al miqdori taxminan 1% bo'lganida nisbatan past ($\rho = 0,57 \text{ Om} \cdot \text{sm}$) bo'ldi, ammo Al 5% gacha legirlanganda $\rho = 2,4 \text{ Om} \cdot \text{sm}$ ga yetdi. Bu ma'lumotlar rentgenotuzilmaviy tahlil natijalari bilan tasdiqlanadi².

Al kirishma atomlari miqdori 1% bo'lganida, subkristallitlar chegaralarida adsorbsiyalangan va zaryad tutish markazlari vazifasini bajaradigan kislorodning notekis taqsimlanishi kamayadi. Biroq, Al miqdori 2% dan oshganda, yangi hajmiy

² Зайнабидинов С.З., Гуломов Б.Д., Бобоев А.Й., Расулова М.Б. Оптимизированное устройство dip-coater для получения металлооксидов // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2022. Т. 4. В. 3-4. С. 32-40.

nuqsonlarning tez shakllanishi kuchayadi. Bu nuqsonlar zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini oshirishga yordam bermaydi va kristall panjaraning buzilishiga olib keladi. Bu esa ZnO strukturasi Al₂O₃ kabi elektr tokini o'tkazmaydigan birikmalarning shakllanishi bilan izohlanadi.

5-rasmda Al (1% dan 5% gacha) bilan legirlangan ZnO plyonkalaridagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi (N_e) grafigi keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, kirishma Al atomlari konsentratsiyasi 1% bo'lganida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi $2,3 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ gacha ko'payadi, biroq Al atomlari miqdori 5% ga yetganda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi $2,9 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ gacha kamayadi. Al kirishma miqdori 1% bo'lganida, Al atomlari kristall panjaradagi Zn²⁺ atomlari o'rnini egallaydi, bu esa Al⁺³ va ZnO⁺² ionlarining zaryadlari farqi xisobiga qo'shimcha erkin elektronlar hosil bo'lishiga olib keladi³. Biroq, Al miqdori oshganda erkin zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi kamayadi, bu panjaraning buzilishi va Al³⁺ neytrallanishi bilan izohlanadi. Bu esa plyonkalar solishtirma qarshiligining oshishiga olib keladi.

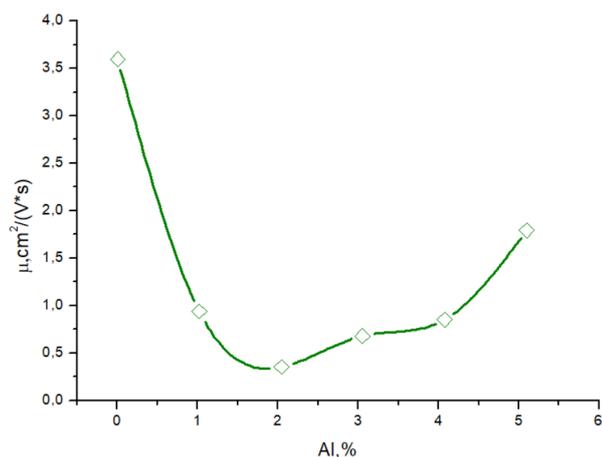
6-rasmda Al kirishma atomlari miqdoriga bog'liq holda ZnO plyonkalaridagi zaryad tashuvchilar harakatchanligi (μ_e) grafigi keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, Al miqdori 2% gacha bo'lganida zaryad tashuvchilar harakatchanligi (μ_e) kamayadi, biroq u 2% dan ortgandan keyin asta-sekin ortib boradi. ⁴Tadqiqot ishi mualliflari o'z ishlarida Al kirishma atomlari miqdori oshganida ZnO plyonkalarida subkristallitlar o'lchami kamayishi, shuningdek, zaryad tashuvchilar harakatchanligining pasayishi kuzatilganini qayd etishgan.

Bizning holda, Al miqdori 2% gacha oshganda ZnO plyonkalarida subkristallitlar o'lchami kamaygan, keyin esa Al konsentratsiyasining ortishiga qarab ularning o'lchami oshgan. Subkristallitlar o'lchamining kamayishi subkristallarning bo'linish chegaralar sonining ko'payishiga va elektronlarning erkin harakatlanish uzunligining qisqarishiga olib keladi. Aksincha, subkristallitlar o'lchamining oshishi va chegaralar sonining kamayishi elektronlarning erkin harakat uzunligining ko'payishiga yordam beradi. Shu sababli, Al bilan legirlangan ZnO plyonkalarida zaryad tashuvchilar harakatchanligi avval kamayadi, keyin esa subkristallitlar o'lchamiga bog'liq holda ortib boradi.

7-a rasmda sof va Al (1% dan 5% gacha) atomlari bilan legirlangan ZnO plyonkalari optik o'tkazuvchanlik spektrlari keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, barcha yupqa plyonkalarda optik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti 74% dan 92% gacha bo'lib, bu ko'rsatkichlar Al atomlari miqdoriga bog'liq holda o'zgaradi. Bunday yuqori o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti odatda yorug'lik nurlanishi (002) kristallografik yo'nalishi, ya'ni olingan namunalar geksagonal kristall panjarasi "c" o'qi bo'ylab yo'naltirilganda kuzatiladi. Avval qayd etilganidek, ZnO plyonkalari Al atomlari bilan legirlanganda geksagonal panjaraning "c" va "a" o'qlari Al kirishma atomlari konsentratsiyasining oshishiga bog'liq ravishda o'zgarishi kuzatiladi.

³ Jijun Ding et al. Influence of Al-doping on the structure and optical properties of ZnO films // *Physica B: Condensed Matter*. 2009. Jijun Ding V. 404. Iss. 16. Pp. 2439-2443. doi.org/10.1016/j.physb.2009.05.006

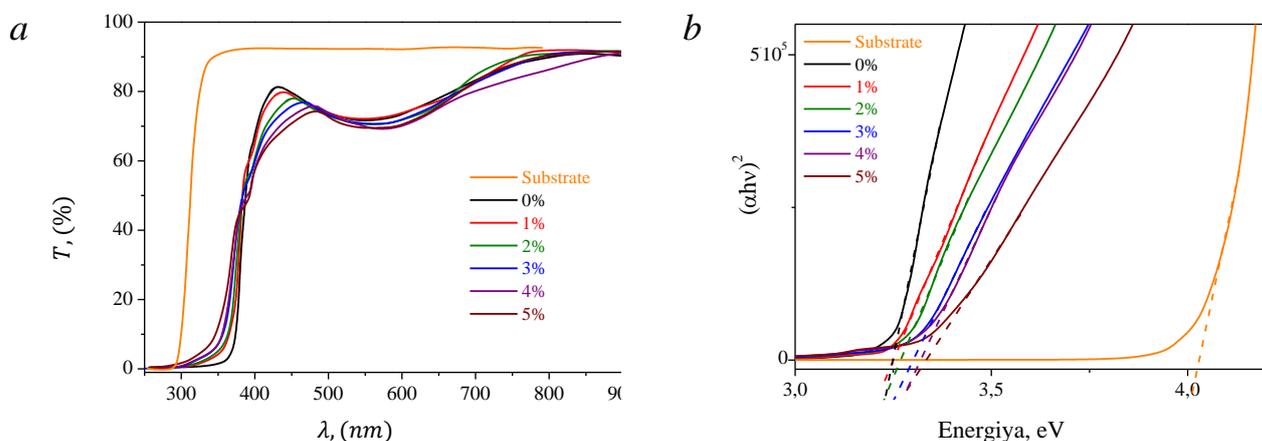
⁴ Panagiota Koralli et al. Comparative Studies of Undoped/Al-Doped/In-Doped ZnO Transparent Conducting Oxide Thin Films in Optoelectronic Applications // *Chemosensors* 2022, 10, p.1-15.



6-rasm. ZnO plyonkalarida legirlovchi Al atomlari miqdoriga bog‘liq harakatchanligi (μ_c) o‘zgarishi.

Shuningdek, Al atomlari bilan har xil konsentratsiyalarda legirlash plyonka tarkibidagi subkristallitlar o‘lchamlarining o‘zgarishiga olib kelgan. Bu, o‘z navbatida, o‘stirilgan plyonkalarining optik o‘tkazuvchanligining 74,33% gacha pasayishiga sabab bo‘lgan.

450–650 nm diapazonidagi ZnO va ZnO:Al plyonkalari o‘tkazuvchanlik spektrlarida subkristallitlar chegaralari va plyonka yuzalarining kristallitlarga ta’siri natijasida o‘tkazuvchanlik darajasining pasaygan joylari kuzatiladi. Shuningdek, 7-*a* rasmdan ko‘rinib turibdiki, legirlanmagan plyonkalar UB sohada taxminan 381 nm da emissiya chegarasini namoyon qiladi. Al (1% dan 5% gacha) bilan legirlangan plyonkalar esa mos ravishda 382 nm, 379 nm, 376 nm, 374 nm va 373 nm da emissiya piklarini namoyon qiladi.



7-rasm. Sof va Al (1% dan 5% gacha) atomlari bilan legirlangan ZnO plyonkalari uchun optik o‘tkazuvchanlik (a) va yutilish (b) spektrlari.

Ushbu eksperimental ma’lumotlar asosida ZnO yupqa plyonkalari uchun taqiqlangan soxa kengligini quyidagi formuladan foydalanib aniqlash mumkin:

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^{1/2} \quad (1)$$

bu yerda hv – foton energiyasi, A – optik yutilish proporsionallik koeffitsienti, E_g – taqiqlangan sohaning kengligi. Shuningdek, yutilish koeffitsiyenti (α)

o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti (T) asosida quyidagi formula orqali hisoblanishi mumkin:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{1}{T} \quad (2)$$

bu yerda d – shisha qalinligi. Hisoblangan qiymatlar 2-jadvalda keltirilgan.

Shuningdek, ZnO va ZnO:Al plyonkalari o'tkazuvchanlik spektrlari asosida $(\alpha hv)^2$ ni hv ga bog'liqlik spektrlarini ko'rish mumkin (7-b rasm).

2-jadval

ZnO plyonkalari taqiqlangan soxa kengligini hisoblangan qiymatlari

Al %	Legirlanmagan	1	2	3	4	5
$\lambda, (nm)$	381	382	379	376	374	373
$E_g (eV)$	3.243	3.239	3.26	3.29	3.307	3.318
E_u, meV	433.4	511.7	500.7	535.3	555.7	600.3

Tahlil natijalari ko'rsatdiki, ZnO plyonkalari uchun taqiqlangan soha kengligi Al miqdori ortishi bilan 3,243 eV dan 3,318 eV gacha oshadi. Taqiqlangan soha kengligining bunday oshishi Burshteyn-Moss effekti, ya'ni legirlangan yarimo'tkazgichlarda Fermi sathining o'tkazuvchanlik zonasiga siljishi bilan izohlanadi⁵. Bu effekt yutilish chegarasining qisqa to'liqinli sohaga siljishi bilan bog'liq bo'lib, zaryad tashuvchilarning zonalardan birini to'ldirishi natijasida yuzaga keladi. Ma'lumki, yutilish koeffitsiyenti (α) yutilish spektrining past energiyali sohalarida ($h\nu < E_g$) foton energiyasi bilan eksponensial bog'liqlikka ega bo'lib, u o'stirilgan plyonkalarining kristall panjarasidagi turli nuqsonlar bilan bog'liq:

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu - E_g}{E_u}\right) \quad (3)$$

bu yerda α_0 – doimiy, E_u – Urbax energiyasi bo'lib, u lokalizatsiya qilingan elektron holatlari (ya'ni, elektronlar ma'lum bir joyda to'planib qolishi) va kristall tuzilishidagi mikrotuzilmaviy o'zgarishlar (masalan, kristall panjara buzilishlari, kirishmaviy atomlar va boshqa defektlar) o'rtasidagi bog'lanishni ifodalaydi. Agar (3) ifoda chiziqli bog'liqlikka keltirilsa, Urbax energiyasini aniqlovchi quyidagi formula hosil bo'ladi:

$$E_u = (h\nu - E_g) \ln \frac{\alpha_0}{\alpha} \quad (4)$$

Bundan tashqari, Urbax energiyasi (E_u) ni (3) ifoda yordamida $h\nu$ funksiyasi sifatida $(\ln \alpha)$ grafigini tuzish orqali aniqlash mumkin. ZnO va ZnO:Al plyonkalari uchun Urbax energiyasining hisoblangan qiymatlari 2-jadvalda keltirilgan. Jadvaldan ko'rinib turibdiki, E_u qiymati Al atomlari bilan 2% gacha legirlanganda kamayadi, keyin esa 2% dan oshganda ortmoqda. Bu holat plyonkalar hajmidagi

⁵ Zhai et al. Effects of Al Doping on the Properties of ZnO Thin Films Deposited by Atomic Layer Deposition // Nanoscale Research Letters. 2016. V. 11. № 407. Pp.1-8. DOI 10.1186/s11671-016-1625-0

subkristallitlarning o'lchami bilan bog'liq. Bizning holda, Al miqdori 2% gacha kiritilganda subkristallitlar o'lchami kamaygan, bu kichik subkristallitlar chegaralarida elektr maydoni ta'siri ostida holatlar zichligining buzilishiga olib kelgan. Al 2% dan oshganda subkristallitlar o'lchami oshishi natijasida holatlar zichligining buzilishi kamaygan. Bundan tashqari, o'stirilgan ZnO va ZnO:Al plyonkalari o'tkazuvchanlik spektrining eksperimental ma'lumotlari asosida so'nish koeffitsiyenti (k) quyidagi formula orqali hisoblangan:

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (5)$$

To'lqin uzunliklari bilan bog'liq barcha hisoblangan qiymatlar 8-a rasmda keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, Al atomlari miqdori oshishi bilan ko'rinuvchan diapazongacha bo'lgan to'lqin uzunliklarida so'nish koeffitsiyenti (k) qiymatlari kamayadi. Ko'rinuvchan diapazonda esa (k) qiymatlari Al kirishma atomlari konsentratsiyasining o'sishi bilan ortadi. ⁶Tadqiqot ishi mualliflarining fikriga ko'ra, yutilish koeffitsiyenti (k) qiymatlarining o'zgarishi yuza notekisliklari bilan bog'liq: yuza notekisligi oshganda (k) qiymati oshadi, kamayganda esa pasayadi. Bizning holda, o'stirilgan plyonka sirtida ZnO va Al₂O₃ birikmalari asosida hosil bo'lgan nanokristallitlar o'lchami avval oshgan, keyin esa Al kirishma atomlari miqdori ortishi bilan kamaygan. Bu, o'z navbatida, yutilish koeffitsiyenti (k) qiymatlarining turli to'lqin uzunliklarida turlicha bo'lishiga olib kelishi mumkin.

Bundan tashqari, ZnO va ZnO:Al plyonkalarining sindirish ko'rsatkichlari (n) optik o'tkazuvchanlik ma'lumotlari asosida quyidagi formulalardan foydalanib hisoblandi:

$$n(\lambda) = (N - (N^2 - n_0^2 \cdot n_1^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

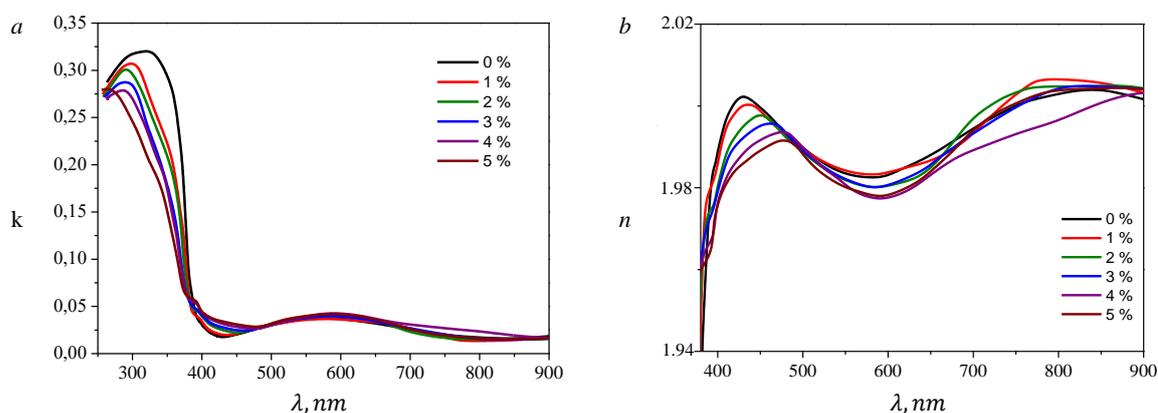
$$N = \frac{2n_0 \cdot n_1 (T_M - T_m)}{T_M \cdot T_m} + \frac{n_0^2 + n_1^2}{2} \quad (7)$$

Bu yerda T_M va T_m – optik o'tkazuvchanlikning maksimal va minimal qiymatlari, (n_0) va (n_1) esa havo va taglikning sindirish ko'rsatkichlari.

8-b rasmda ZnO va ZnO:Al yupqa plyonkalari uchun to'lqin uzunligiga bog'liq holda sindirish ko'rsatkichi (n) ni o'zgarish grafiklari keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, ko'rinuvchan soxada sindirish ko'rsatkichi (n) Al kirishma atomlari miqdori oshishi bilan pasayadi. ⁷Tadqiqot ishida ZnO plyonkalari sindirish ko'rsatkichi (n) turli Al atomlari miqdorida o'rganilgan. Unda, sindirish ko'rsatkichi Al kirishma atomlari miqdori ortishi bilan asta-sekin pasayadi, deb topilgan, Al³⁺ ning ion radiusi Zn²⁺ radiusidan kichikroq, Al ionlari Zn ionlarining o'rniga joylashishi kristall panjara "c" o'qi yo'nalishi bo'yicha panjara kengayishini kamayishiga sabab bo'ladi.

⁶ Ozgur, U., Alivov, Y. I., Liu, C., et al. A comprehensive review of ZnO materials and devices. Journal of Applied Physics 98, 041301 (2005).

⁷ Affa Rozana Abd Rashid. Influence of Annealing Temperature on Optical Properties of Al Doped ZnO Nanoparticles via Sol-gel Methods. AIP Conf. Proc. 1972, 030006 (2018). doi.org/10.1063/1.5041227



8-rasm. Olingan plyonkalarining kirishma miqdoriga bog‘liq ravishda nur yutish koeffitsienti (k) va nur sindirish koeffitsientlarining (n) tushayotgan yorug‘lik to‘lqin uzunligiga bog‘liqlik grafiklari.

XULOSA

“Zol-gel cho‘ktirish usulida o‘stirilgan ZnO:Al plyonkalarining tuzilmaviy, optik va elektrofizik xossalarini tadqiq qilish” mavzusida olib borilgan ushbu tadqiqotlar asosida quyidagicha hulosalar qilindi:

1. Shaffof va egiluvchan tagliklarga yuqori optik o‘tkazuvchanlikka hamda tuzilmaviy barqarorlikka ega bo‘lgan metalloksid plyonkalarini sintez qilish uchun Zol-gel usulining cho‘ktirish qurilmasi takomillashtirildi.
2. Zol-gel usulining takomillashtirilgan cho‘ktirish qurilmasi yordamida krishmasiz va 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlangan ZnO qatlamlari o‘stirilgan va olingan plyonkalar uchun eng maqbul texnologik shart-sharoitlari (cho‘ktirish tezligi (1 mm/s), issiqlik ishlov harorati (500°C) va vaqti (10 daqiqa)) aniqlandi.
3. Xona haroratidagi kristall panjara qiymatlari $a = b = 0.3265$ nmga va $c = 0.5212$ nmga teng ZnO plyonkasi 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlanganda geksagonal elementar katagining “c” o‘qi 0.0009 nm ga ortishi aniqlandi.
4. O‘stirilgan plyonkalar sirtida ZnO va Al atomlari birikib, konussimon geometrik shakldagi nanokristallitlarni hosil qilishi, shuningdek, ushbu nanokristallitlar $Fd3m$ fazoviy guruhiga mansub va panjara doimiysi $a = 0,5791$ nm bo‘lgan kub elementar katakchalardan tashkil topishi aniqlandi.
5. 1 % Al bilan legirlangan ZnO qatlamlarida zaryad tashuvchilar konsentrasiyasi $2,3 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ gacha ortishi va Al miqdori 5% gacha oshirilganda ular $2,9 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ gacha kamayishi, shuningdek, mazkur holatda ularning harakatchanligi avval 2 % gacha Al atomlari bilan legirlanganda $1.81 \text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ gacha kamayishi so‘ngra 5% kirishma kiritilganda $8.23 \text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ gacha ortishi aniqlandi.
6. Al atomlari 1% dan 5% gacha kiritilgan ZnO plyonkalarida emissiyaviy cho‘qqilar mos ravishda 382 nmdan 373 nmgacha kamayishi, energetik soha kengligi esa 3.243 dan 3.318 eV gacha ortishi aniqlanib, bu Fermi sathini o‘tkazuvchanlik sohasi tomon siljishi bilan izohlandi
7. O‘stirilgan plyonkalarining fotoelektrik tadqiqotlar natijasida, 1% dan 5% gacha Al atomlari bilan legirlangan ZnO qatlamlari ko‘rinuvchi va yaqin infraqizil sohalarda ishlaydigan shaffof optoelektron qurilmalarida foydalanish mumkinligi aniqlandi.

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

**АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АНДИЖАНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

ГУЛОМОВ БАХТИЁРЖОН ДИЛМУРОДЖОН УГЛИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ, ОПТИЧЕСКИХ И
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ZnO:Al ПЛЁНОК,
ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПОГРУЖЕНИЯ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Тема диссертации доктора философии (PhD) по Физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2024.4.PhD/FM1205

Диссертация выполнена в Андижанском государственном университете и Андижанском машиностроительном институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.nammti.uz) и на информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:	Зайнабидинов Сиражидин Зайнабидинович доктор физико-математических наук, академик
Официальные оппоненты:	Гулямов Гафур доктор физико-математических наук, профессор Отажонов Салим Мадрахимович доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	Самаркандский государственный университет

Защита диссертации состоится «___» ____ 2025 года в ____ часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней PhD.03/30.11.2022.FM/T/66/04 при Наманганском инженерно-технологическом институте. (Адрес: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская - 7. Административное здание Наманганского инженерно - технологического института, 1-этаж, малый зал совещаний, Тел/факс: (99869) 225-10-07; Факс: (99869) 225-76-75. e-mail: niei_info@edu.uz)

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

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

У.И. Эркабоев
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 за последние 10 лет в результате научных исследований в области оптоэлектроники были выявлены возможности получения прозрачных покрытий с высокой светопрозрачностью, причем в большинстве случаев используются металлооксидные плёнки на основе ZnO. Подобные пленки играют важную роль в создании прозрачных слоев, генерирующих квантовые эффекты, которые особенно важны при фотопреобразовании солнечной энергии. При этом особое внимание уделяется разработке технологии получения пленок на основе ZnO, позволяющей производить качественные и стабильные прозрачные пленки и эффективно применять их в области оптоэлектроники, глубоко изучать изменение их физических свойств под воздействием различных легирующих атомов, а также контролировать рост получаемых слоев до одинаковой толщины.

Во многих ведущих научных центрах мира, помимо совершенствования методов получения пленок на основе ZnO с различными легируемыми атомами, проводятся исследования по изучению их структурных, электрофизических и оптических свойств с целью выявления возможностей создания эффективных и многофункциональных оптоэлектронных изделий из слоев оксидов металлов, полученных на основе этих пленок. В частности, одним из приоритетных направлений исследований считается изучение образования различных объемных дефектов на поверхностных участках и границах скола субкристаллов многослойных структур, сформированных путем легирования атомов Al в тонкие пленки на основе ZnO, и их влияние на свойства материалов. При этом расширяются возможности создания высокоэффективных и многофункциональных прозрачных электронных изделий за счет управления количеством легирования пленок ZnO атомами Al, что рассматривается как одна из актуальных научных задач на пути создания современных оптоэлектронных приборов.

В последние годы в нашей республике в рамках проводимых реформ в различных социально-экономических сферах уделяется особое внимание повышению качества научно-исследовательских работ по разработке технологий создания эффективных и многофункциональных оптоэлектронных продуктов и их приведению в соответствие с мировыми стандартами. В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы, в частности, определены задачи по «Развитию научных исследований и опытно-конструкторских работ в области электротехники»¹. В реализации этих задач важное значение имеет создание качественных структур на основе металлооксидных пленок, изучение влияния примесных атомов на их уникальные свойства, а также использование таких структур в производстве оптоэлектронных продуктов.

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

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

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данная диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан – IV «Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий».

Степень изученности проблемы. В настоящее время в различных научных центрах мира ведущие ученые совершенствуют технологии выращивания тонких металлооксидных слоев на прозрачных и гибких подложках, изучают влияние различных примесных атомов на их структурные электрические, фотопроводные и другие уникальные физические свойства. Также продолжаются исследования по созданию на их основе эффективных и энергоэффективных сенсоров для определения газа, света, температуры и давления. В частности, Китайские учёные под руководством Zhou Wang и Dongyun Wan синтезировали тонкие слои ZnO с различными примесными атомами и подробно исследовали влияние этих примесей на структурные свойства и уникальные физические характеристики материала. Иракские ученые под руководством Alaa J. Ghazari и Emad A. Salman, и Американские ученые под руководством Ü. Özgür и Я. И. Аливов были созданы тонкие пленки ZnO с примесями таких элементов, как Al, Mg, Mn, S и Ni, на различных прозрачных и гибких подложках. Эти эксперименты привели к созданию сенсоров с высокой чувствительностью к температуре и свету, обладающих высокой эффективностью и энергоэкономичностью, что стало важной научной основой для современной электроники и сенсорных технологий, требующих высокой чувствительности. Члены научной школы под руководством российского ученого С.И. Рембеза обнаружили возможность увеличения чувствительности металлооксидных слоев ZnO к определенным газам путем введения различных примесных атомов в слои, выращенные на полупроводниковых подложках. Эти исследования послужили важной научной основой для разработки нового поколения

высококочувствительных устройств в областях экологического мониторинга, сенсоров и источников энергии.

В нашей стране научная школа под руководством академика С.З. Зайнабиддинова и профессора Ш.У. Юлдашева разработала различные методы получения металлооксидных пленок. На основе этих методов была выявлена возможность создания чувствительных электронных устройств для различных целей путем разработки наномасштабных пленок, изменения их элементного состава и совершенствования технологии их получения. Кроме того, результаты этих исследований продемонстрировали возможности создания сенсоров, чувствительных к внешним воздействиям, и элементов памяти.

До настоящего времени недостаточно достоверных результатов исследований влияния различных концентраций примесных атомов на структурные, оптические и электрофизические свойства тонких пленок ZnO, а также важные проблемы обеспечения стабильной работы устройств на основе этого материала в условиях различных внешних воздействий изучены недостаточно.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проекта научных исследований Андижанского государственного университета ОТМ-Ф2-68 «Механизмы образования примесно-дефектных микро – и нанообъединений в кристаллах и их роль в создании многослойных структур с широкими функциональными возможностями» (2017-2020 гг.).

Целью исследования является определение влияния примесных атомов Al на структурные, морфологические, электрофизические и оптические свойства тонких пленок ZnO, выращенных методом усовершенствованного золь-гель погружения.

Задачи исследования:

определение оптимальных технологических условий выращивания пленок ZnO с использованием усовершенствованного метода осаждения золь-гель;

выявление структурных и морфологических характеристик выращенных пленок ZnO;

изучение структурных и морфологических свойств нанокристаллов, формирующихся под воздействием атомов Al в пленках ZnO;

исследование электрофизических характеристик слоев ZnO и влияния вводимых атомов Al на их энергетическую структуру;

определение перспектив практического применения металлооксидов типа ZnO:Al.

Объектом исследования являются слои ZnO, легированные атомами Al в количестве от 1% до 5%, выращенные на подложках из боросиликатного стекла.

Предметы исследования являются изучение природы неравновесных заряженных состояний в оксидных слоях ZnO, выращенных на подложках из боросиликатного стекла, механизмов их формирования и физико-химических свойств под воздействием атомов примеси алюминия.

Методы исследования. Исходя из поставленных задач, для получения слоев ZnO, легированных атомами Al в количестве от 1% до 5% на подложках из боросиликатного стекла, использовалась усовершенствованная установка золь-гель погружения, для структурных исследований применялся рентгенодифрактометр XRD-7000, для морфологических исследований — атомно-силовой микроскоп Solver Next, для измерения оптической пропускной способности - спектрометр Cary Eclipse, а для определения электрофизических параметров — установка Холла HMS-7000. Графики полученных результатов анализировались с помощью программы OriginPro2022.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые были выращены полупроводниковые слои ZnO, легированные атомами Al в концентрации от 1% до 5%, с использованием усовершенствованного метода погружения на основе золь-геля, а также определены оптимальные технологические условия: скорость осаждения (1 мм/с), температура термообработки (500°C) и время обработки (10 минут).

методом рентгеновской дифракции определено, что поверхность выращенных полупроводниковых пленок ZnO принадлежит кристаллографическому направлению (002) и имеет гексагональную кристаллическую решетку со структурой вюрцита с постоянными решетки $a = b = 0,3265$ нм и $c = 0,5212$ нм, относящуюся к пространственной группе $C6/mmc$;

на основании результатов морфологических исследований установлено, что при введении в пленки ZnO от 1% до 5% атомов Al ось «с» в ее элементарной ячейке увеличивается на 0,0009 нм, а объединение атомов ZnO и Al в поверхностных областях приводит к образованию нанокристаллитов, состоящих из кубических элементарных ячеек, относящихся к пространственной группе $Fd3m$ с постоянной решетки $a = 0,5791$ нм;

результаты электрофизических исследований показали, что при введении 1% атомов Al в пленки ZnO концентрация носителей заряда увеличивается до $2,3 \cdot 10^{18}$ см⁻³, но при увеличении количества атомов Al до 5% этот показатель уменьшается до $2,9 \cdot 10^{17}$ см⁻³;

путем пересчета коэффициента оптического поглощения для этих структур было определено, что ширина запрещенной зоны увеличивается от 3,243 до 3,318 эВ при увеличении содержания атомов Al от 1% до 5% в полупроводниковых пленках ZnO.

Практические значения результаты исследования заключаются в следующем:

усовершенствована установка погружения золь-гель методом для синтеза металлоксидных плёнок с высокой оптической прозрачностью и структурной

стабильностью на прозрачных и гибких подложках;

на основе результатов фотоэлектрических исследований выращенных плёнок установлено, что слои ZnO, легированные атомами Al в концентрации от 1% до 5%, проявляют высокую прозрачность от 74% до 92% в видимой и ближней инфракрасной областях.

Достоверность результатов исследования основана на использовании современных приборов, материалов, полученных на основе проверенных технологий, электро- и светочувствительных устройств, применяемых в международной практике, а также на сопоставлении результатов с данными, представленными в литературе, их воспроизводимости и соответствии полученных общим и данных физическими представлениями имеющимися в литературе.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований заключается объясняется тем, что изучение влияния легирующих атомов алюминия на электрофизические и фотоэлектрические процессы, а также на структурные и морфологические свойства ZnO пленок расширяет теоретические знания и представления, относящиеся к данной области.

Практическая значимость результатов исследования объясняется тем, что структуры, изготовленные на основе слоев ZnO, легированных атомами Al в концентрации от 1% до 5%, могут быть использованы в многофункциональных оптоэлектронных устройствах с высокой эффективностью.

Внедрение результатов исследования. На основе научных результатов, полученных в ходе изучения влияния атомов примеси Al на структурные, морфологические, электрофизические и оптические свойства тонких пленок ZnO, выращенных с использованием усовершенствованного метода золь-гель погружения:

Выводы, полученные в ходе исследования, о том, что увеличение оси "с" гексагональной кристаллической решетки тонких пленок ZnO, легированных атомами Al в концентрации от 1 % до 5 %, на 0,0009 нм, смещение структурного рефлекса в рентгенограмме (002) кристаллографической ориентации на $0,12^\circ$ в сторону меньших углов, а также образование нанокристаллитов конусообразной формы, состоящих из кубических элементарных ячеек с параметром решетки $a = 0,5791$ нм и фазовой группой $Fd\bar{3}m$, за счет соединения атомов ZnO и Al на поверхности пленок, были использованы в учебном пособии «Атомная диффузия в полупроводниках» профессора Ш. Х. Йолчиева из Андиганского государственного педагогического института (Справка Андиганского государственного педагогического института № 04-334 от 7 декабря 2024 года). Применение полученных данных позволило снизить объёмные дефекты, возникающие в ZnO-плёнках в различных областях;

Научно-практические результаты, заключающиеся в увеличении концентрации носителей заряда до $2,3 \cdot 10^{18}$ см⁻³ в слоях ZnO, легированных

атомами Al в концентрации 1%–2%, и её уменьшении до $2,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при увеличении содержания Al до 5%, а также в снижении подвижности носителей до 1,81 см/В·с с последующим её увеличением до 8,23 см/В·с при таких условиях, были применены при производстве полупроводниковых электронных устройств на АО «FOTON» (справка АО «Узэлтехсаноат» №156 от 16 сентября 2024 года). Использование полученных научных данных позволило создавать экспериментальные образцы электронных приборов и улучшать их оптические свойства.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 6 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 7 статей в научных изданиях, рекомендованных к публикации Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан в качестве основных научных результатов докторских диссертаций, 2 из которых опубликованы в зарубежных журналах и получено 2 сертификата на программное обеспечение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы. Она занимает 110 страниц, включает 29 рисунка, 2 таблицы и содержит список из 115 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко обоснована актуальность и необходимость темы, определена ее связь с основными приоритетами развития науки и технологий в Республике Узбекистан. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая сущность, приведены сведения о внедрении результатов исследования и данные о структуре диссертации.

В первой главе диссертации **“Свойства пленок ZnO и их применение в современной оптоэлектронике”** подробно рассмотрены методы выращивания различных металлоксидных пленок на основе анализа результатов научных исследований и сведениям литературы. Особое внимание уделено их структурным, электрофизическим и оптическим свойствам, а также факторам, влияющим на эти характеристики. Особенно тщательно изучено влияние различных примесных атомов, на свойства металлоксидных пленок. Рассмотрены параметры, влияющие на структуру и свойства пленок, физико-химические процессы легирования, а также концентрация примесей и их распределение в структуре пленок. В данной главе также анализируются различные методы выращивания ZnO пленок, такие как спрей-пиролиз, магнетронное распыление, лазерное осаждение и химическое осаждение из паровой фазы. Изучены их преимущества и недостатки, а также их влияние на

свойства пленок, включая их структуру, кристаллографическую фазу, проводимость постоянного тока, микроструктуру и оптические параметры. Одной из важных особенностей данной главы является подробное обсуждение уникальных свойств пленок ZnO, легированных атомами алюминия (ZnO), и перспектив структур, созданных на их основе. Подчеркивается, что высокая электрическая проводимость и оптическая прозрачность пленок ZnO открывают возможности их использования в современных электронных устройствах, особенно в сенсорах, транзисторах, пьезоэлектрических приложениях и фотоэлектрических системах.

Во второй главе диссертации «**Подготовка образцов и методы экспериментального исследования**» представлены сведения о необходимых реагентах для получения тонких слоев ZnO, легированных атомами Al в концентрации от 1% до 5%, а также об оптимальных условиях выращивания металлоксидных пленок в усовершенствованной установке метода золь-гель.

В данном случае для приготовления раствора золя использовали ацетат цинка ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$) в качестве прекурсора, изопропиловый спирт ($CH_3CH(OH)CH_3$) в качестве растворителя, диэтиламин ($C_4H_{11}N$) как стабилизатор, а также нитрат алюминия ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) в качестве легирующей примеси. Для получения раствора ацетат цинка (1 грамм) и нитрат алюминия (0,041–0,204 грамм) растворяли в изопропиловом спирте (100 мл), добавляя по каплям диэтиламин (0,33 мл) для повышения растворимости, и перемешивали магнитной мешалкой при температуре 60 °C со скоростью 1500 об/мин до достижения прозрачности раствора. Чтобы приготовленный раствор золя превратился в гель, его выдерживали в специальном шкафу при комнатной температуре в течение 168–240 часов. В качестве подложки для выращивания пленок использовали боросиликатное стекло, которое предварительно промывали в ацетоне и изопропиловом спирте, а затем очищали в ультразвуковой ванне с использованием дистиллированной воды.

Для выращивания чистых и легированных атомами Al (1–5%) пленок ZnO из приготовленного геля использовали оптимизированное устройство погружения. Преимущество данной установки заключалось в возможности получения покрытий одинаковой толщины благодаря вращательному движению специального стержня (по часовой и против часовой стрелки) со скоростью 1 мм/с, а также за счет постоянного охлаждения контейнера с гелем и автоматического контроля всех процессов с помощью компьютерной программы. Оптимальная повторяемость процесса составляла около 20 циклов для выращивания как чистых, так и легированных тонких слоев ZnO. Для удаления нерастворенных остатков геля с поверхности выращенных пленок их подвергали термообработке при 500 °C в течение 10 минут в сушильной печи.

Кроме того, для изучения различных физических свойств выращенных пленок ZnO:Al были использованы следующие приборы: рентгеновский

дифрактометр XRD-7000, атомно-силовой микроскоп Solver Next, спектрометр Cary Eclipse и установка Холла HMS-7000.

В третьей главе диссертации **“Рентгеноспектральные и электронно-микроскопические исследования тонких пленок ZnO и ZnO:Al, выращенных на подложках из боросиликатного стекла”**, изучены структурные и морфологические свойства пленок ZnO, легированных атомами Al в концентрации от 1% до 5%.

На рис. 1 представлены рентгенограммы чистого ZnO и пленок, легированных атомами Al (от 1% до 5%), выращенных с использованием установки погружения. Из рис. 1-а видно, что при малоугловом рассеянии рентгенограмма чистого ZnO демонстрирует диффузное отражение с тремя высокоинтенсивными селективными структурными рефлексами, принадлежащими кристаллографическим ориентациям: (100) при угле рассеяния $2\theta = 31.42^\circ$ с $d/n = 0,2774$ нм, (002) при угле $2\theta = 34.48^\circ$ с $d/n = 0,2581$ нм и (101) при угле рассеяния $2\theta = 36.34^\circ$ с $d/n = 0,249$ нм.

Анализ экспериментальных данных показал, что эти отражения соответствуют следующим параметрам кристаллической решетки выращенной пленки: $a = b = 0,3265$ нм и $c = 0,5212$ нм.

Кроме того, в диапазоне углов рассеяния 47.0° – 47.48° наблюдаются двойные структурные рефлекссы, принадлежащие кристаллографическим ориентациям (111) (для подложки) и (102) (для пленки ZnO).

Также на рентгенограмме присутствуют линии, соответствующие кристаллографическим ориентациям: (110) при $2\theta = 56.67^\circ$ с $d/n = 0,1630$ нм и (103) при $2\theta = 62.93^\circ$ с $d/n = 0,1481$ нм. Эти данные свидетельствуют о том, что на границах раздела субкристаллитов образуются поликристаллические области размером 12.6 нм и 28.3 нм, а также нанокристаллиты размером 56.8 нм в приповерхностных слоях пленок ZnO.

На рис. 1-б, с, d, e и f представлены рентгенограммы тонких пленок ZnO, легированных Al (от 1% до 5%), которые существенно отличаются от рентгенограммы чистого ZnO. Как видно, их упругий фоновый уровень диффузного отражения, наблюдаемый при малоугловом рассеянии, уменьшается с увеличением содержания примесных атомов.

На рис. 2 видно, что основной структурный рефлекс, принадлежащий кристаллографической ориентации (002), сдвигается в сторону меньших углов (с $2\theta = 34.44^\circ$ до $2\theta = 34.32^\circ$), что соответствует $\Delta\theta = 0,12^\circ$, по мере увеличения концентрации легирующих атомов Al.

Анализ экспериментальных данных показал, что параметры кристаллической решетки пленок, легированных атомами Al при комнатной температуре, составляют $a = b = 0,3265$ нм и $c = 0,5219$ нм, при этом ось с гексагональной решетки увеличивается на $\Delta c = 0,0009$ нм. Это указывает на то, что в кристаллической решетке пленок ионы Al^{3+} замещают Zn^{2+} .

Кроме того, из рис. 2 видно, что полуширина (FWHM) рефлекссов (002) сначала увеличивается (при легировании атомами Al до 3%), а затем уменьшается (при содержании Al более 3%).

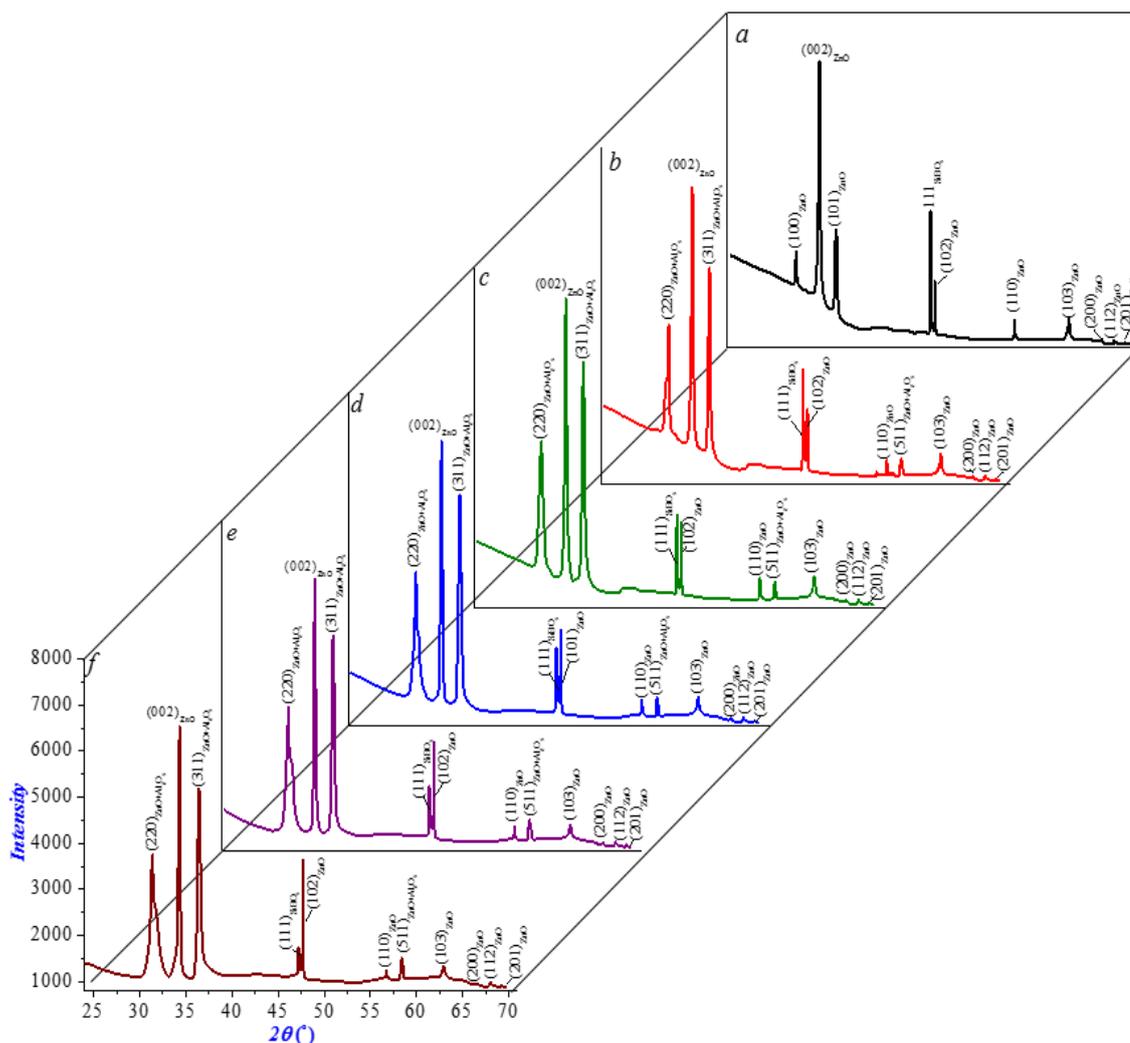


Рис 1. Рентгенограммы нелегированных (a) и легированных (b- 1%, c-2%, d- 3%, e-4% и f-5%) примесными атомами Al (от 1% до 5%) пленок ZnO.

Это позволяет определить размеры субкристаллитов, которые сначала уменьшаются ($D_0 = 39.5$ нм, $D_{1\%Al} = 37.9$ нм, $D_{2\%Al} = 34.1$ нм), а затем увеличиваются ($D_{3\%Al} = 34.4$ нм, $D_{4\%Al} = 35.2$ нм, $D_{5\%Al} = 35.8$ нм). В результате взаимозамещения соединений ZnO и Al_2O_3 на рентгенограмме пленок ZnO, легированных Al, при угле рассеяния $2\theta = 58.23^\circ$ с $d/n = 0,1574$ нм наблюдались структурные линии, принадлежащие к кристаллографической ориентации (511).

Фазовый анализ этих рефлексов показал, что они образовались в другой фазе, а именно в кристаллите кубической элементарной ячейки пространственной группы $Fd\bar{3}m$ с постоянной решетки $0,5791$ нм. Это свидетельствует об образовании нанокристаллитов с ориентацией (511) в приповерхностных областях пленок ZnO. Полуширина (FWHM) рефлексов (511) позволила определить размеры нанокристаллитов, которые увеличиваются с ростом концентрации Al и составляют 31 нм, 42 нм, 31 нм, 26 нм и 25 нм.

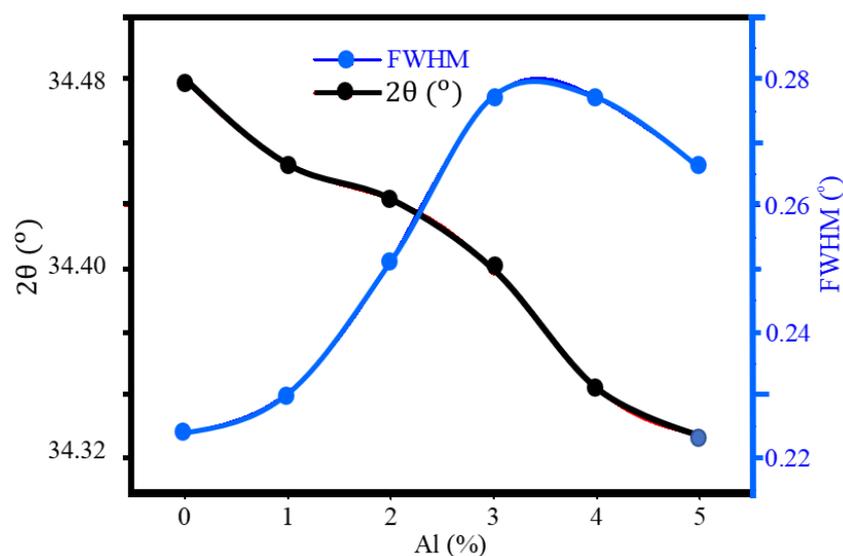


Рис. 2. Изменение формы и полуширины рефлекса (002) на рентгенограммах нелегированных и легированных Al (от 1% до 5%) пленок ZnO.

На рис. 3-*a, b, c, d, e* и *f* представлены АКМ-изображения и профили распределения для чистых и легированных Al (от 1% до 5%) пленок ZnO. Из рисунков видно, что на поверхности боросиликатной подложки выращенных пленок ZnO формируются нанобъекты конусообразной геометрической формы различных размеров. Анализ профилей распределения АКМ-изображений пленок ZnO позволил определить диаметр основания (d) и высоту (h) конусообразных нанобъектов, образовавшихся в чистых и легированных Al (от 1% до 5%) пленках. Полученные данные приведены в табл. 1.

Таблица 2

Высоты (h) конических нанобъектов, сформированных в пленках

Al %	Нелегированных	1	2	3	4	5
$h, (nm)$	55,6	30,3	42,7	32,4	25,8	26,9

Результаты морфологического анализа показали, что структурные параметры веществ с различными кристаллическими решетками не соответствуют друг другу, что приводит к возникновению возможных напряжений в кристаллической решетке выращенной пленки, а эти напряжения приводят к образованию трехмерных нанобъекты, которые постепенно могут медленно всплывать на поверхность и спонтанно собираться в нанобъекты.

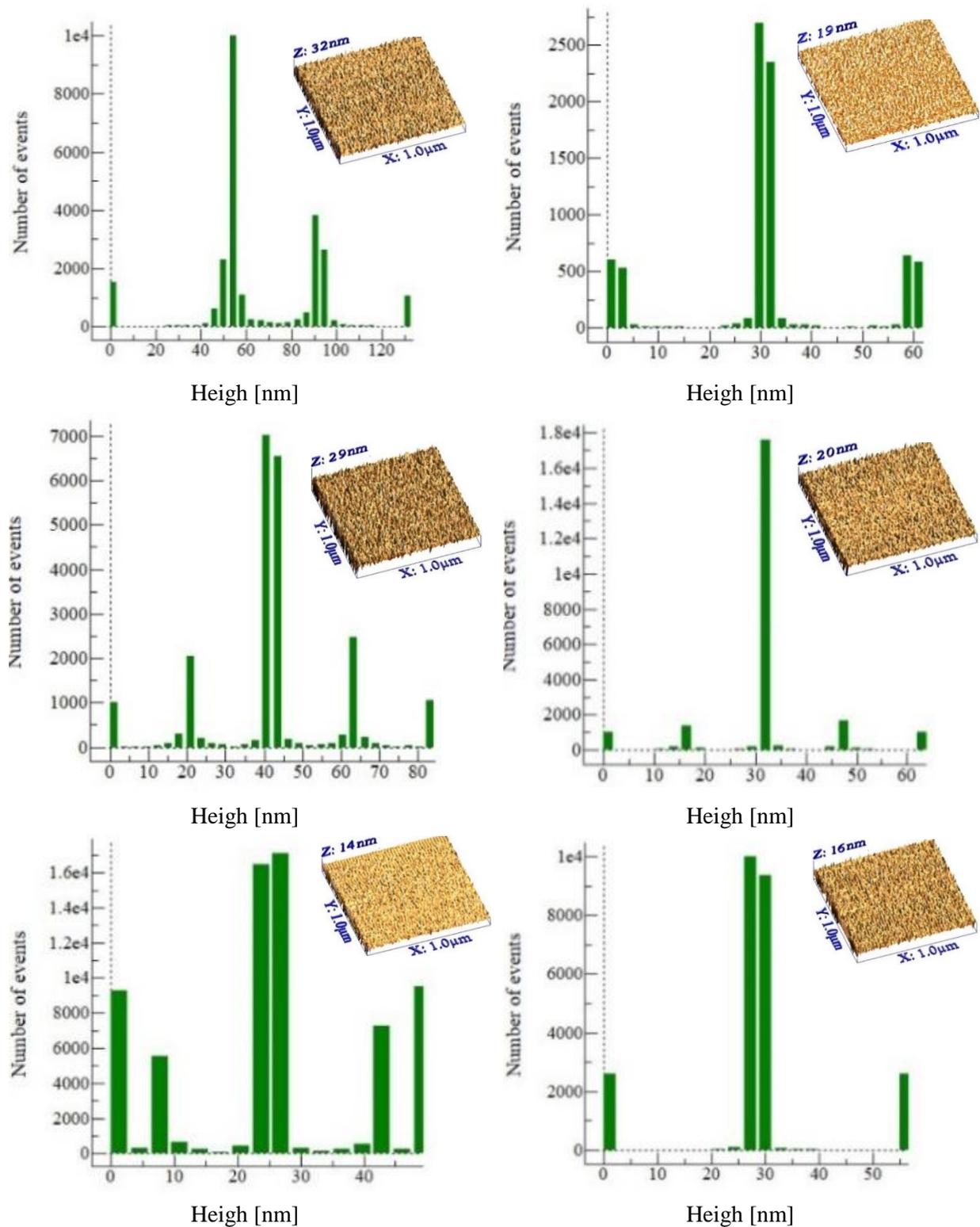


Рис. 3. АКМ-изображения и профили распределения для нелегированных и легированных Al (от 1% до 5%) пленок ZnO.

В четвёртой главе диссертации, озаглавленной “**Электрофизические и оптические свойства тонких плёнок ZnO и ZnO:Al**”, изучены электрофизические и оптические свойства плёнок ZnO, легированных атомами Al в количестве от 1 % до 5 %.

На рисунке 4 приведены графики зависимости сравнительного сопротивления ZnO-плёнок, легированных атомами Al (от 1% до 5%), от концентрации вводимых примесей. Из рисунка видно, что сравнительное сопротивление выращенных плёнок изменяется в зависимости от количества атомов Al. Авторы исследования показали, что изменения в сравнительном сопротивлении ZnO-плёнок, выращенных различными методами, связаны с механизмом обмена атомами в кристаллической решётке.

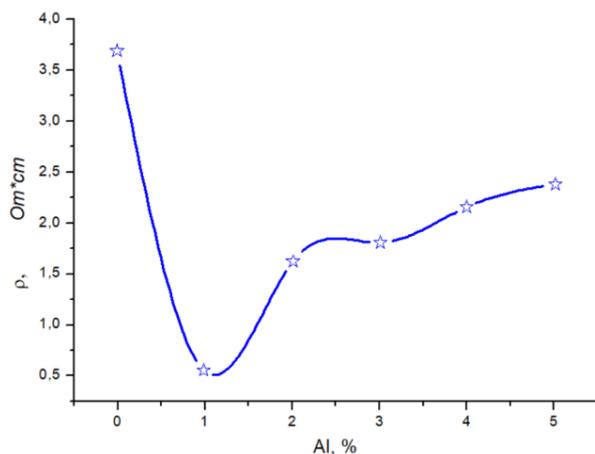


Рис.4. Зависимость сравнительного сопротивления (ρ) ZnO-плёнок от количества легирующих атомов Al.

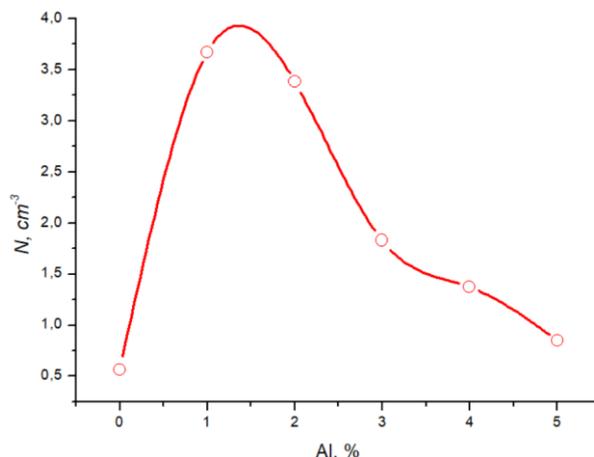


Рис. 5. Зависимость концентрации носителей заряда (N_e) в ZnO-плёнках от количества легирующих атомов Al.

В нашем случае сравнительное сопротивление ZnO-плёнок оказалось относительно низким при содержании легирующих атомов Al примерно 1% ($\rho = 0,57 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), однако при легировании до 5% ρ достигло $2,4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Эти данные подтверждаются результатами рентгеноструктурного анализа⁸².

При содержании легирующих атомов Al на уровне 1% неоднородное распределение кислорода, адсорбированного на границах субкристаллитов и выполняющего функцию центров захвата заряда, уменьшается. Однако при увеличении содержания Al свыше 2% усиливается быстрое образование новых объемных дефектов. Эти дефекты не способствуют увеличению концентрации носителей заряда и приводят к нарушению кристаллической решётки, что объясняется формированием в структуре ZnO соединений, не проводящих электрический ток, подобных Al_2O_3 .

На рисунке 5 приведён график зависимости концентрации носителей заряда (N_e) в ZnO-плёнках, легированных атомами Al (от 1% до 5%). Видно, что при содержании легирующих атомов Al на уровне 1% концентрация носителей заряда увеличивается до $2,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, тогда как при легировании до 5% концентрация носителей заряда снижается до $2,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.³ При легировании с 1% Al атомы Al занимают место атомов Zn^{2+} в кристаллической

² Зайнабидинов С.З., Гуломов Б.Д., Бобоев А.Й., Расулова М.Б. Оптимизированное устройство dip-coater для получения металлооксидов // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2022. Т. 4. В. 3-4. С. 32-40

³ Jijun Ding et al. Influence of Al-doping on the structure and optical properties of ZnO films // *Physica B: Condensed Matter*. 2009. Jijun Ding V. 404. Iss. 16. Pp. 2439-2443. doi.org/10.1016/j.physb.2009.05.006

решётке, что приводит к образованию дополнительных свободных электронов за счёт разницы зарядов между ионами Al^{3+} и ZnO^{2+} . Однако с увеличением содержания Al концентрация свободных носителей заряда уменьшается, что объясняется нарушением кристаллической решётки и нейтрализацией Al^{3+} . Это, в свою очередь, приводит к увеличению сравнительного сопротивления плёнок.

На рисунке 6 приведён график зависимости подвижности носителей заряда (μ_e) в ZnO-плёнках от количества легирующих атомов Al. Видно, что до достижения содержания Al в 2% подвижность носителей заряда (μ_e) уменьшается, а затем, при дальнейшем увеличении содержания Al, она постепенно возрастает. ⁴Авторы исследования отмечают, что с ростом количества легирующих атомов Al в ZnO-плёнках наблюдается уменьшение размера субкристаллитов и снижение подвижности носителей заряда. В нашем случае при увеличении Al до 2% размер субкристаллитов уменьшается, а при дальнейшем повышении концентрации Al их размер возрастает.

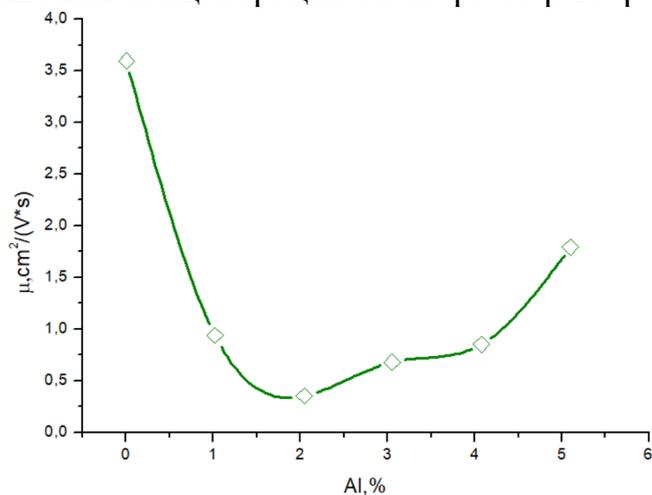


Рис. 6. Зависимость подвижности (μ_e) в ZnO-плёнках от количества легирующих атомов Al.

Снижение размера субкристаллитов приводит к увеличению количества границ деления и сокращению длины свободного пробега электронов. Напротив, увеличение размера субкристаллитов и уменьшение их количества способствует увеличению длины свободного пробега электронов. Именно поэтому в ZnO-плёнках, легированных алюминием, подвижность носителей заряда сначала уменьшается, а затем, в зависимости от размера субкристаллитов, возрастает.

На рисунке 7а приведены спектры оптической прозрачности тонких плёнок ZnO, как не легированных, так и легированных атомами Al в диапазоне от 1% до 5%. Из рисунка видно, что во всех плёнках коэффициент оптической прозрачности составляет от 74% до 92% и изменяется в зависимости от содержания атомов Al. Такая высокая степень прозрачности обычно наблюдается при направлении кристаллографической ориентации (002), то

⁴ Panagiota Koralli et al. Comparative Studies of Undoped/Al-Doped/In-Doped ZnO Transparent Conducting Oxide Thin Films in Optoelectronic Applications // Chemosensors 2022, 10, p.1-15.

есть когда полученные образцы ориентированы вдоль оси “с” гексагональной решётки. Как уже отмечалось, легирование ZnO атомами Al приводит к изменению осей “с” и “а” гексагональной решётки в зависимости от концентрации вводимых примесей. Кроме того, легирование с различными концентрациями Al вызывает изменение размеров субкристаллитов в составе плёнки, что, в свою очередь, приводит к снижению оптической прозрачности до 74,33%.

В спектрах проводимости плёнок ZnO и ZnO:Al в диапазоне 450–650 нм наблюдаются области с пониженной проводимостью, что обусловлено влиянием границ субкристаллитов и поверхности плёнки на кристаллы. Кроме того, как видно из рисунка 7-а, нелегированные плёнки демонстрируют эмиссионный порог в UV области примерно при длине волны 381 нм, в то время как плёнки, легированные Al (от 1% до 5%), проявляют эмиссионные пики при 382 нм, 379 нм, 376 нм, 374 нм и 373 нм соответственно.

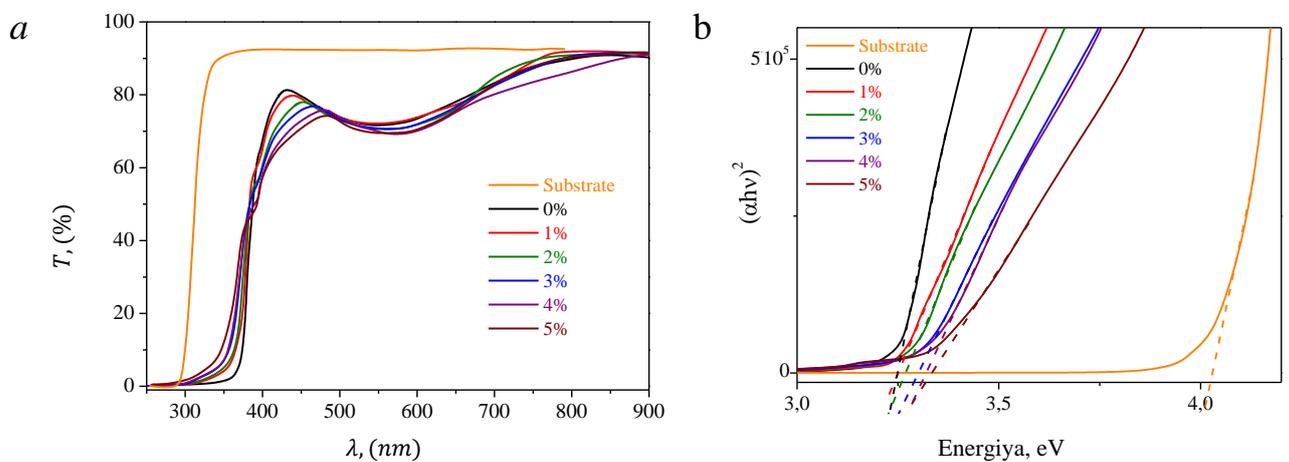


Рис. 7. Спектры оптической прозрачности (а) и поглощения (b) для не легированных и легированных атомами Al (от 1% до 5%) тонких плёнок ZnO.

На основании этих экспериментальных данных для тонких плёнок ZnO ширину запрещённой зоны можно определить по следующей формуле:

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^{1/2} \quad (1)$$

где hv – энергия фотона, A – коэффициент пропорциональности оптического поглощения, E – ширина запрещённой зоны.

Кроме того, коэффициент поглощения (α) можно рассчитать по коэффициенту пропускания (T) по следующему выражению:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{1}{T} \quad (2)$$

где d – толщина стекла. Вычисленные значения приведены в таблице 2.

Кроме того, на основе спектров оптической прозрачности плёнок ZnO и ZnO:Al можно построить графики зависимости $(\alpha hv)^2$ от hv (рис. 7-б). Результаты анализа показали, что ширина запрещённой зоны ZnO-плёнок увеличивается с 3,243 эВ до 3,318 эВ при увеличении содержания Al.

Таблица 2

Расчетные значения ширины запрещенной зоны пленок ZnO

Al %	Нелегированных	1	2	3	4	5
$\lambda, (nm)$	381	382	379	376	374	373
$E_g (eV)$	3.243	3.239	3.26	3.29	3.307	3.318
E_u, meV	433.4	511.7	500.7	535.3	555.7	600.3

Такое увеличение ширины запрещённой зоны объясняется эффектом Бурштейна-Мосса, то есть смещением уровня Ферми в зону проводимости в легированных полупроводниках⁵. Этот эффект связан со смещением границы поглощения в область коротких волн, что возникает вследствие заполнения одной из зон носителями заряда.

Как известно, коэффициент поглощения (α) в областях спектра с низкой энергией ($h\nu < E_g$) имеет экспоненциальную зависимость от энергии фотона, что связано с различными дефектами в кристаллической решётке выращенных плёнок:

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu - E_g}{E_u}\right) \quad (3)$$

где α_0 — постоянная, E_u — энергия Урбаха, которая характеризует связь между локализованными электронными состояниями (то есть, скоплением электронов в определённом месте) и микроструктурными изменениями в кристаллической решётке (например, нарушениями решётки, присутствием легирующих атомов и другими дефектами). Если выражение (3) привести к линейной зависимости, то для определения энергии Урбаха получается следующая формула:

$$E_u = (h\nu - E_g) \ln \frac{\alpha_0}{\alpha} \quad (4)$$

Кроме того, энергию Урбаха (E_u) можно определить посредством построения графика зависимости ($\ln \alpha$) от $h\nu$ по выражению (3). Вычисленные значения энергии Урбаха для плёнок ZnO и ZnO:Al приведены в таблице 3. Из таблицы видно, что значение (E_u) уменьшается при легировании до 2% Al, а затем при легировании свыше 2% начинает увеличиваться. Такая зависимость связана с изменением размеров субкристаллитов в плёнках. В нашем случае при введении Al до 2% наблюдается уменьшение размеров субкристаллитов, что приводит к нарушению плотности состояний на границах субкристаллитов под воздействием электрического поля. При легировании свыше 2% увеличение размеров субкристаллитов приводит к ослаблению нарушения плотности состояний.

⁵Zhai et al. Effects of Al Doping on the Properties of ZnO Thin Films Deposited by Atomic Layer Deposition // Nanoscale Research Letters. 2016. V. 11. № 407. Pp.1-8. DOI 10.1186/s11671-016-1625-0

Кроме того, на основе экспериментальных данных оптического спектра прозрачности ZnO и ZnO:Al плёнок коэффициент затухания (k) был рассчитан по следующей формуле:

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (5)$$

где α - коэффициент поглощения, λ — длина волны.

Все рассчитанные значения, связанные с длинами волн, приведены на рисунке 8-а. Из рисунка видно, что с увеличением содержания атомов Al коэффициент затухания (k) на длинах волн вплоть до видимого диапазона уменьшается, а в самом видимом диапазоне значения k возрастают с ростом концентрации легирующих атомов Al.⁹⁶ По мнению авторов исследования, изменение коэффициента поглощения (k) связано с неровностями поверхности: при увеличении шероховатости поверхности значение k возрастает, а при снижении — уменьшается. В нашем случае размер нанокристаллов, образованных на поверхности плёнки на основе соединений ZnO и Al₂O₃, сначала увеличивается, а затем, с ростом концентрации легирующих атомов Al, уменьшается. Это, в свою очередь, может приводить к изменению коэффициента поглощения (k) на разных длинах волн.

Кроме того, показатели преломления (n) для плёнок ZnO и ZnO:Al рассчитывались на основе данных об оптической прозрачности по следующим формулам:

$$n(\lambda) = (N - (N^2 - n_0^2 \cdot n_1^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$N = \frac{2n_0 \cdot n_1 (T_M - T_m)}{T_M \cdot T_m} + \frac{n_0^2 + n_1^2}{2} \quad (7)$$

Здесь T_M и T_m – максимальные и минимальные значения оптической прозрачности, а (n_0) и (n_1) – показатели преломления воздуха и подложки соответственно.

На рисунке 8-б приведены графики зависимости показателя преломления (n) от длины волны для тонких плёнок ZnO и ZnO:Al. Из графиков видно, что в видимом диапазоне показатель преломления (n) снижается с увеличением содержания легирующих атомов Al.¹⁰⁷ В исследовательской работе изучался показатель преломления (n) плёнок ZnO с различным количеством атомов Al. Было обнаружено, что показатель преломления постепенно уменьшается с увеличением примесных атомов Al, ионный радиус Al³⁺ меньше, чем у Zn²⁺, а ионы Al располагаются вместо ионов Zn вдоль оси “с” кристаллической решетки. причины расширение решетки уменьшится.

⁶ Ozgur, U., Alivov, Y. I., Liu, C., et al. A comprehensive review of ZnO materials and devices. Journal of Applied Physics 98, 041301 (2005).

⁷ Affa Rozana Abd Rashid. Influence of Annealing Temperature on Optical Properties of Al Doped ZnO Nanoparticles via Sol-gel Methods. AIP Conf. Proc. 1972, 030006 (2018). doi.org/10.1063/1.5041227

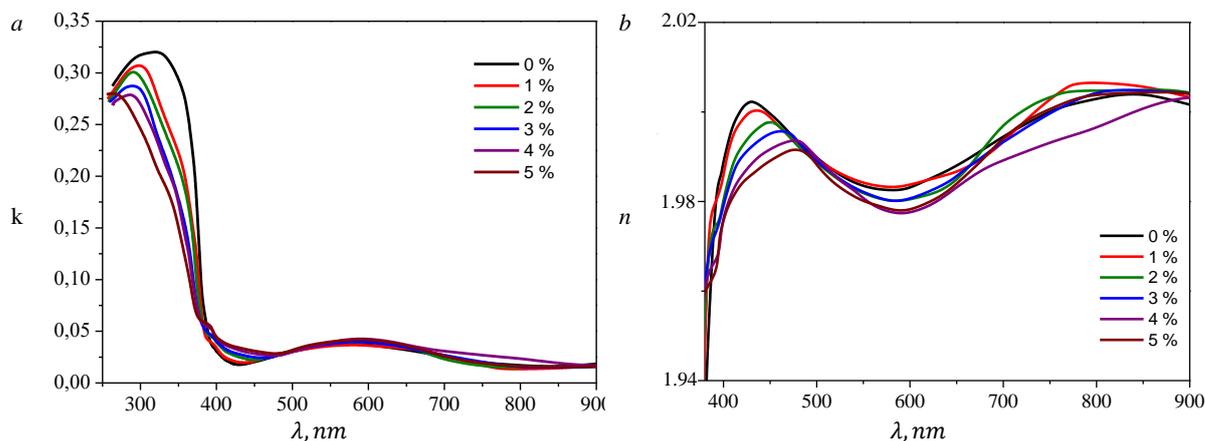


Рис. 8. Зависимость коэффициента поглощения (α) (а) и показателя преломления (n) (б) от длины волны для тонких плёнок ZnO и ZnO:Al.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведённых исследований по теме «Исследование структурных, оптических и электрофизических свойств тонких плёнок ZnO:Al, выращенных методом золь–гель» сделаны следующие выводы:

1. Для синтеза металлоокисных плёнок с высокой оптической прозрачностью и структурной стабильностью на гибких подложках усовершенствовано осадительное устройство метода золь–гель.

2. С помощью усовершенствованного осадительного аппарата метода золь–гель выращены слои ZnO, легированные атомами Al в диапазоне от 1% до 5%, для которых определены оптимальные технологические условия (скорость осаждения 1 мм/с, температура термической обработки 500 °С и время обработки 10 минут).

3. Для ZnO-плёнок с комнатной температурой, кристаллические параметры которых составляют $a = b = 0,3265$ нм и $c = 0,5212$ нм, при легировании атомами Al в количестве от 1% до 5% обнаружено увеличение оси “с” гексагональной элементарной ячейки на 0,0009 нм.

4. На поверхности выращенных плёнок происходит комбинирование атомов ZnO и Al с образованием нанокристаллитов конической формы, при этом данные нанокристаллитики принадлежат фазовой группе Fd3m и состоят из кубических элементарных ячеек с постоянной $a = 0,5791$ нм.

5. В ZnO-слоях, легированных 1%-атомами Al, концентрация носителей заряда увеличивается до $2,3 \cdot 10^{18}$ см⁻³, а при легировании до 5% снижается до $2,9 \cdot 10^{17}$ см⁻³. При этом подвижность носителей заряда сначала уменьшается до 1,81 см²/(V·с) при легировании 2% атомами Al, а затем возрастает до 8,23 см²/(V·с) при легировании до 5%.

6. В ZnO-плёнках, легированных Al в диапазоне от 1% до 5%, эмиссионные пики сдвигаются с 382 нм до 373 нм, а ширина запрещённой зоны увеличивается с 3,243 эВ до 3,318 эВ, что объясняется смещением уровня Ферми в сторону зоны проводимости.

7. Фотоэлектрические исследования показали, что ZnO-слои, легированные Al в диапазоне от 1% до 5%, могут быть использованы в качестве активного материала в прозрачных оптоэлектронных устройствах, работающих в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/30/11/2022.FM/T.66.04 FOR THE
AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE NAMANGAN INSTITUTE
OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

**ANDIJAN STATE UNIVERSITY
ANDIJAN MACHINE BUILDING INSTITUTE**

GULOMOV BAKHTIYORJON DILMURODJON OGLI

**STUDY OF STRUCTURAL, OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL
PROPERTIES OF ZnO:Al FILMS GROWING BY SOL-GEL DEPOSITION
METHOD**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Namangan -2025

The theme of the doctoral dissertation (PhD) in physical and mathematical is registered by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under the number No B2024.4.PhD/FM1205.

The dissertation was completed at Andijan State University and Andijan Machine Building Institute

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

Supervisor: **Zainabidinov Sirajidin Zainabidinovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician

Official opponents: **Gulyamov Gafur**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Otajonov Salim Madrakhimovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Samarkand State University**

The defense of the dissertation will be held at _____ on “_____” _____ 2025 at the meeting of the Scientific Council No PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 at the Namangan institute of Engineering and Technology (Address: 160100, Namangan city, Kasansoy Str. 7, administrative building, small conference hall tel: (+99869) 228-76-68, a fax: (+99869) 228-76-75. E-mail: niei_info@edu.uz).

You can get acquainted with the dissertation work at the Information Resource Centre of Namangan institute of Engineering and Technology (registration number No _____). Address : 160100 Namangan city , Kasansoy Str. 7, tel: (+9998 69) 228-76-68; Fax: (+99869) 228-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz

The abstract of the dissertation was sent on “_____” _____ 2025.
(Registy record No. _____ on “_____” _____ 2025).

U.I. Erkaboev
Vise-chairman of Scientific Council
on awarding Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

A.A. Abdukarimov
Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
candidate of physical-mathematical sciences

N.Yu. Sharibayev
Chairman of the academic seminar under
the Scientific council awarding scientific degrees,
doctor of physical-mathematical science, professor

INTRODUCTION (philosophy doctoral (PhD) dissertation annotation)

The purpose of the research work is to investigate the effect of Al intercalation atoms on the structural, morphological, electrophysical, and optical properties of ZnO thin films grown using an improved sol-gel deposition method.

Research Tasks:

to determine the optimal technological conditions for growing ZnO thin films using the improved sol-gel deposition method;

to identify the structural and morphological properties of the grown ZnO thin films;

to study the structural and morphological characteristics of the nanocrystallites formed in ZnO thin films under the influence of Al atoms;

to investigate the electrophysical properties and energy band structure of ZnO layers and the influence of Al dopant atoms on these parameters;

to assess the prospects for the practical application of ZnO:Al type metal oxide films.

The object of the research. ZnO layers grown on borosilicate glass substrates and doped with Al atoms in the range of 1% to 5% were selected as the research object.

The subject of the research. The subject of the research is the study of the nature of non-equilibrium charged states in ZnO metal oxide layers grown on borosilicate glass substrates across different spectral regions, their formation mechanisms, and the physico-chemical properties, with a particular focus on the influence of aluminum dopant atoms.

Scientific novelty of the research:

for the first time, semiconductor ZnO layers doped with 1% to 5% Al atoms were grown using an improved deposition device of the Zol-gel method, and the optimal technological conditions were determined: deposition rate (1 mm/s), heat treatment temperature (500°C) and time (10 minutes);

it was determined by X-ray diffraction that the surface of the grown semiconductor ZnO films belongs to the (002) crystallographic direction and has a hexagonal crystal lattice with a wurtzite structure with lattice constants $a = b = 0.3265$ nm and $c = 0.5212$ nm belonging to the C6/mmc space group;

It was determined based on the results of morphological studies that when 1% to 5% Al atoms are introduced into ZnO films, the "c" axis in its unit cell increases by 0.0009 nm, and that the combination of ZnO and Al atoms in the surface regions results in the formation of nanocrystallites consisting of cubic unit cells belonging to the Fd3m space group with a lattice constant of $a = 0.5791$ nm;

the results of electrophysical studies showed that when 1% Al atoms are introduced into ZnO films, the concentration of charge carriers increases to $2.3 \cdot 10^{18}$ cm⁻³, but when the amount of Al atoms is increased to 5%, this indicator decreases to $2.9 \cdot 10^{17}$ cm⁻³;

it was determined by recalculating the optical absorption coefficient for these structures that the bandgap width increases from 3.243 to 3.318 eV with an increase in the Al atom content from 1% to 5% in semiconductor ZnO films.

Implementation of the research results.

Based on the scientific findings obtained from studying the influence of Al dopant atoms on the structural, morphological, electrophysical, and optical properties of ZnO thin films grown via the improved sol-gel deposition method:

The conclusions—namely, the increase in the hexagonal crystal lattice “c” axis of ZnO thin films by 0.0009 nm when doped with 1% to 5% Al atoms, a shift of the structural peak in the (002) crystallographic orientation by 0.12° toward smaller angles, and the formation of conical nanocrystallites on the film surface composed of cubic unit cells with a lattice constant of $a = 0.5791$ nm belonging to the Fd3m space group—were included in the educational manual “Atomic Diffusion in Semiconductors” by Prof. Sh. X. Yolchiyev of Andijan State Pedagogical Institute. (Andijan State Pedagogical Institute reference number 04-334 dated December 7, 2024) The utilization of these scientific results has provided the means to reduce volumetric defects arising in ZnO thin films in various fields.

Additionally, based on the electrophysical studies, the scientific-practical outcomes—such as the increase in the charge carrier concentration up to $2.3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ in ZnO layers doped with 1% Al atoms, the decrease to $2.9 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ upon doping with 5% Al, and the corresponding variations in carrier mobility (initially decreasing to $1.81 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ at 2% doping and then increasing to $8.23 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ at 5% doping)—were applied in the production of semiconductor electronic devices manufactured by “FOTON” JSC and “O‘zeltexsanoat” Open Joint-Stock Company (as per information note No. 156 dated September 16, 2024). The application of these findings has enabled the fabrication of electronic devices with enhanced optical properties in experimental samples.

Approbation of research results. The main results of the dissertation were presented and discussed at 6 international and 3 republican scientific conferences.

Publication of research results. 20 scientific works have been published on the topic of the dissertation, including 7 articles in scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of doctoral dissertations, 2 of which were published in foreign journals, and 2 certificates (DG) were obtained for software.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, and a conclusion. It is presented on 110 pages, includes 29 figures, 2 tables, and a list of 115 references.

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

I bo'lim (1 часть; part 1)

1. S.S. Zainabidinov, Sh.Kh. Yulchiev, A.Y. Boboev, B.D. G'ulomov, N.Y. Yunusaliyev. Structural properties of Al-doped ZnO films. East European Journal of Physics. 2024, No. 3, P. 282–286 (Scopus:IF: 0.18).
2. S.Z. Zainabidinov, A.Y. Boboev, N.Y. Yunusaliyev, B.D. G'ulomov, J.A. Urinboyeva. Investigation of volt-ampere characteristics of a gas-sensitive sensor based on tin dioxide. East European Journal of Physics 2024, No. 4, P. 443–446 (Scopus:IF: 0.18)
3. Ш.Х. Йўлчиев, В.Д. Г'уломов, Н.Ю. Юнусалиев. Алюминий атомлари киритилган ZnO плёнкаларининг оптик ва электрофизик хоссалари. Илмий хабарнома Физика математика тадқиқотлари. 2023, №.2, pp.5-8. (01.00.00 № 13).
4. С.З. Зайнабидинов, Б.Д. Гуломов, А.Й. Бобоев, М.Б. Расулова. Оптимизированная устройства dip-coater для получения металлооксидов. Физика полупроводников и микроэлектроника. 2022, том.4, № 2, С.32-40. (01.00.00 № 16).
5. Х. Махмудов, Б.Д. Гуломов, Ш. Эрматов. Получение металлооксидных пленок SnO₂ и SnO₂:Sb методом погружения по золь-гель технологии. Илмий хабарнома Физика математика тадқиқотлари. 2022, №.4, P. 49-52. (01.00.00 № 13).
6. Ш.Х. Йўлчиев, Б.Д. Гуломов, Ж. Ёрунбоев. ZnO ва ZnO:Al Юпқа плёнкаларини синтез қилиш ва уларни физик хоссаларини ўрганиш. Илмий хабарнома Физика математика тадқиқотлари. 2023. Special Issue. P. 86-89. (01.00.00 № 13).
7. С.З. Зайнабидинов, А.Й. Бобоев, Б.Д. Гуломов, Х.А. Махмудов. ZnO ва ZnO:Al юпқа пленкаларининг электрофизик хоссалари. Илмий хабарнома Физика математика тадқиқотлари // 2024, №. 2. Pp. 57-60. (01.00.00 № 13).

II bo'lim (2 часть; part 2)

1. S. Zaynabidinov, B.D. G'ulomov, B. Dj. Yunusov. Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risidagi guvohnoma. Dip-coater (*dastur nomi*). № DGU 38097
2. A.Y. Boboyev, B.D. G'ulomov. Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risidagi guvohnoma. Dip Coater. № DGU 22094
3. С.З. Зайнабидинов, Б.Д. Гуломов, М.Б. Расулова. Al киришма атомларининг юпқа пленкалари хоссаларига таъсири. Qayta tiklanuvchi energiya resurslaridan foydalanishning dolzarb muammolari, energiya tejamkor qurilmalarning samaradorligini oshirishda sun'iy intellekt va raqamli texnologiyalarni tadbiq etish» mavzusidagi xalqaro ilmiy – texnik anjuman. Andijon, 2023-yil, 18-19- sentabr, С.497-498

4. B.D. G'ulomov, B.J. Yunusov. Optimallashtirilgan «dip-coater» qurilmalasini Avtomatlashtirish. Scientific and technical journal Machine building. 2024, №1, P. 116-120
5. X.Ж. Мансуров, Б.Д. Фуломов. Получение металлооксидных пленок SnO₂ и SnO₂:Sb методом погружения по золь-гель технологии. II Международная научная конференция «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы И перспективы». Ташкент, 2022 г., 27-28 декабрь С.249-251
6. S.Z. Zaynabidinov, A. Y. Boboyev, B.D. G'ulomov. Avtomatlashtirilgan «Dip-coater» qurilmalasi. “Aniq fanlarni o'qitishda Innovatsion texnologiyalarni qo'llash” Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyasi. Andijon-2024, 22-may, b. 95-100.
7. B.D. G'ulomov, S.H. Ibroximov. Optical and electrophysical properties of ZnO films introduced with Al atoms heat processed at different temperatures. World Bulletin of Social Sciences (WBSS). 2024, Vol. 36, P.26-28.
8. M.SH. Begijonov. B.D. G'ulomov, B.J. Yunusov. Arduino ide dasturi asosida optimallashtirilgan «dip-coater» qurilmalasini dasturiy taminotini ishlab chiqish. Fan, jamiyat va innovatsiyalar. 2024, vol. 1 Iss 10. ,b.99-102.
9. X.A. Maxmudov, Б.Д. Фуломов, М.В. Rasulova. SnO₂ yuqqa qatlamining olinishi va fizik xossalari. "Роль и значение цифровой жизни и социальных наук в воспитании гармонично развитого поколения: актуальные проблемы и перспективы" Международная научно-практическая конференция. Андижон, 2022 йил, 12-апрель С. 438-440
10. B.D. G'ulomov, S.H. Ibroximov. Optical and electrophysical properties of ZnO films introduced with Al atoms heat processed AT different temperatures // Proceedings of International Conference on Scientific Research in Natural and Social Sciences. Canada, July, 2024. pp.89-93.
11. С.З. Зайнабидинов, Б.Д. Фуломов, Б. Орифжонов. Турли киришма атомлари киритилган ZnO пленкаларининг олиншининг технологик усуллари ва хossalari. Ёш олимлар ва физик талабаларнинг II Республика илмий анжумани (ЁОФТРИА- II) Материаллари. Тошкент-2022, 2022 йил, 20-21 май, С.66-68
12. X.Ж. Мансуров, Б.Д. Фуломов, М.У. Жумаева, М. Мамиров, М. Исматуллаева, С. Мамадалиев. Фотоэлектрические свойства гетероструктур n-ZnO/p-Si. “Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari” mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjumani to'plami. Namangan, 2023-yil, 12-aprel, С. 156-158
13. X.Ж. Мансуров, Б.Д. Фуломов, М.У. Жумаева, М. Мамиров, М. Исматуллаева, С.Мамадалиев. Вольтамперная характеристика гетероструктуры n-ZnO/p-Si в фотогальваническом режиме. “Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari” mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjumani to'plami. Тошкент-2022, 2022 йил, 20-21 май, С.153-155

