

**FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI

YUNUSALIYEV NURITDIN YUNUSALI O‘G‘LI

**ZnO_{1-x}S_x PLYONKALARINING TUZILMAVIY, MORFOLOGIK VA
OPTIK XUSUSIYATLARIGA γ -NURLANISH TA‘SIRI**

01.04.07 - Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona – 2025

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

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

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

Yunusaliyev Nuritdin Yunusali o'g'li

ZnO_{1-x}S_x plyonkalarining tuzilmaviy, morfologik va optik xususiyatlariga γ -
nurlanish ta'siri3

Юнусалиев Нуритдин Юнусали угли

Влияние γ -излучения на структурные, морфологические и оптические
свойства плёнок ZnO_{1-x}S_x21

Yunusaliyev Nuritdin Yunusali ugli

Influence of γ -radiation on the structural, morphological, and optical properties of
ZnO_{1-x}S_x films41

E'lon qilingan ilmiy ishlar ro'yxati

Список опубликованных научных работ
List of published research works49

**FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY
DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI

YUNUSALIYEV NURITDIN YUNUSALI O‘G‘LI

**ZnO_{1-x}S_x PLYONKALARINING TUZILMAVIY, MORFOLOGIK VA
OPTIK XUSUSIYATLARIGA γ -NURLANISH TA‘SIRI**

01.04.07 - Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (Doctor of Philosophy) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.1.PhD/FM1250 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Andijon davlat universitetida bajarilgan.

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

Ilmiy rahbar:

Zaynabidinov Sirajidin
fizika-matematika fanlari doktori, akademik

Rasmiy opponentlar:

Turg'unov Nozimjon Abdumannopovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Otajonov Salim Madrahimovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

O'zbekiston milliy universiteti

Dissertatsiyaning himoyasi Farg'ona davlat texnika universiteti huzuridagi falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 raqamli ilmiy kengashning 2025-yil "13" 08 soat "10⁰⁹" dagi majlisida bo'lib o'tadi. Manzil: 150107, Farg'ona sh. Farg'ona k. 86-uy. Tel: (+99873) 241-12-06, faks (+99873) 241-12-06, ye-mail: uzferfizika@mail.ru, kichik majlislar zali.

Dissertatsiya bilan institutning axborot-resurs markazi ilmiy-uslubiy bo'limida tanishish mumkin. (№ 531 raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 150107, Farg'ona sh. Farg'ona k. 86-uy. Tel: (+99873) 241-12-06.

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "8" 08 kuni tarqatildi.
(2025-yil "8" 08 dagi "4" raqamli reyestr bayonnomasi).



N.X. Yuldashev
Falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi ilmiy kengash raisi, f-m.f.d., professor

B.J. Axmadaliyev
Falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi, f-m.f.b.f.d (PhD)

N.A. Sultonov
Falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, f-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda nanoelektronika, optoelektronika va sensor texnologiyalarining jadal rivojlanishi natijasida yuqori sezuvchanlikka ega, ko‘p funksiyali va tezkor ishlovchi zamonaviy elektron qurilmalarni yaratish, shuningdek, mavjud tizimlarni takomillashtirish masalalariga alohida e‘tibor qaratilmoqda. Dunyo miqyosida ana shunday ilg‘or elektron qurilmalarni ishlab chiqarish jarayoni metalloksid plyonkalarni o‘stirishni, ularni kirishma atomlari bilan legirlashni, bu jarayonlarni aniq termodinamik sharoitlarda amalga oshirishni, shuningdek, hosil bo‘lgan materiallarni amaliyotga joriy etishni taqozo etadi. Shu jihatdan, an‘anaviy legirlash usullarida turli kamchiliklar kuzatilayotgani bois, so‘nggi yillarda plyonka sirtida metalloksid kristallitlarini tashqi ta’sirlar ostida shakllantirish orqali ularning xususiyatlarini yaxshilashga yo‘naltirilgan yangi yondashuvlardan foydalanish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

Jahonda ko‘plab yetakchi olim va mutaxassislar tomonidan metalloksid plyonkalarni o‘stirish, ularning sirtida noyob xususiyatlarga ega kristallitlarni tashqi ta’sirlar ostida shakllantirish hamda kirishma atomlari bilan legirlash bo‘yicha keng qamrovli tadqiqotlar olib borilmoqda. Xususan, rux, kislorod hamda nometall elementlarni oyna va yarimo‘tkazgichli tagliklarga qoplash orqali hosil bo‘ladigan plyonkalarda tashqi ta’sirlar natijasida yuzaga keladigan nuqsonlar shakllanish jarayonini samarali boshqarish imkoniyatlarini aniqlashga qaratilgan izlanishlar ustuvor ilmiy yo‘nalish sifatida e‘tirof etilmoqda. Shu bilan birga, metalloksid qatlamlarni turli elementlar bilan legirlash va ularni γ -nurlanish yordamida qayta ishlash orqali kristallit o‘lchamlarini sezilarli darajada kichraytirish mumkin bo‘lib, bu jarayon nanotuzilmali va ko‘p funksiyali optoelektron mahsulotlar yaratishga qaratilgan tadqiqotlarning dolzarb ilmiy vazifalaridan biri hisoblanmoqda.

Respublikamizda so‘nggi yillarda amalga oshirilayotgan islohotlar doirasida yuqori sifatli elektron materiallar va tuzilmalarni olish texnologiyalarini takomillashtirish, shu asosda ilmiy-tadqiqot ishlarining sifati va samaradorligini jahon standartlari darajasiga olib chiqishga qaratilgan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022–2026-yillarga mo‘ljallangan “Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi”da ham elektrotexnika sohasida ilmiy tadqiqotlar va tajriba-konstruktorlik ishlarini rivojlantirishga doir vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, ZnO:S va ZnO:N kabi yupqa plyonkalardan foydalanish orqali optik o‘tkazuvchanlik va yutilish spektrini kengaytirish, shuningdek, ushbu materiallar asosida ilg‘or optoelektron va sensor qurilmalarni yaratish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 9-sentabrdagi PF-220-son “Energiya tejoyvchi texnologiyalarni joriy qilish va kichik quvvatli qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi Farmoni¹, 2020-yil 10-iyuldagi PQ-4779-son “Iqtisodiyotning

¹O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 9-sentabrdagi PF-220-son “Energiya tejoyvchi texnologiyalarni joriy qilish va kichik quvvatli qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi Farmoni / <https://lex.uz/uz/docs/-6189000>

energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg'i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"², 2021-yil, 19-martdagi PQ-5032-son "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"³ Qarorlarida hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Ushbu dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo'nalishlari bo'lgan III va IV yo'nalishlarga to'la mos keladi. Jumladan, III ustuvor yo'nalish – "Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozlikni rivojlantirish" hamda IV ustuvor yo'nalish – "Qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish usullarini ishlab chiqish, nanotexnologiya, fotonika va boshqa zamonaviy texnologiyalar asosida yangi texnologiyalar va qurilmalar yaratish" kabi ustuvor yo'nalishlariga mos keladi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Bugungi kunda dunyoning yetakchi ilmiy va oliy ta'lim muassasalarida ZnO asosidagi, oltingugurt (S) kirishma atomlari bilan legirlangan metalloksid plyonkalarini o'stirishning optimal texnologik sharoitlarini aniqlash, ularning noyob fizik xossalarni o'rganish va turli elektron hamda optoelektron qurilmalarda qo'llash imkoniyatlarini baholash bo'yicha keng qamrovli ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Jumladan, C.Kim, S.J.Doh va S.G.Leye rahbarligidagi ilmiy guruh tomonidan S atomlari bilan legirlangan ZnO metalloksid plyonkalarining turli fizik xossalari o'rganilgan. Xususan, X.Y.Xiye, P.Zhan va L.Y.Li kabi tadqiqotchilarning ishlarida ZnO tarkibiga S atomlarining kiritilishi panjara doimiylari hamda subkristallit o'lchamlarining ortishiga, shuningdek, diffraksiya cho'qqilarining kichik burchaklar tomon siljishiga olib kelishi aniqlangan. V.Kumari boshchiligidagi ilmiy guruh esa o'z tadqiqotlarida ZnO plyonkalariga kam miqdorda S atomlari kiritilganida geksagonal vyursit tuzilishi saqlanishi, yuqori konsentratsiyalarda esa ZnS, S, Zn₂(OH)₂SO₄, ZnSO₃ va ZnSO₄ kabi yangi fazalarning hosil bo'lishiga e'tibor qaratgan. H.Sato, H.Nanto, S.Tanaka, shuningdek, S.B.Zhang, S.H.Wei va A.Zunger tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda S atomlari bilan legirlash orqali ZnO materialining taqiqlangan soha kengligini kamaytirish, tuzilmaning barqarorligini oshirish va ko'zga ko'rinuvchi nurlanish diapazonidagi fotosezgirlikni kuchaytirish mumkinligi aniqlangan. X.H.Wang, S.Liu va P.Chang tadqiqotlarida esa elektrokimyoviy usulda sintez qilingan S atomlari bilan legirlangan ZnO nanoo'ralarida ultrabinafsha nurlanishning kamayishi va yashil diapazonda nurlanishning kuchayishi qayd

²O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 10-iyuldagi PQ-4779-son "Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg'i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarori / <https://www.lex.uz/uz/docs/-4890081>

³O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil, 19-martdagi PQ-5032-son "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Qarori / <https://lex.uz/docs/-5338558>

etilgan. Ushbu o'zgarishlar asosan kislorod vakansiyalarining ortishi bilan izohlangan. C.L.Hsu boshchiligidagi ilmiy guruh tomonidan ZnO:S asosida moslashuvchan nanogeneratorlar uchun nanotuzilmalar ishlab chiqilgan bo'lib, ular yuqori mexanik sezgirlikka ega ekani hamda S legirlovchi element sifatida tuzilmaning moslashuvchanligini oshirishi amalda isbotlangan.

Respublikamizda ham yetakchi olimlardan akademik S.Z.Zaynabidinov rahbarligidagi ilmiy guruhlar tomonidan yarimo'tkazgichli oksidli materiallar, xususan, ZnO asosidagi tuzilmalarning xossalari o'rganish bo'yicha fundamental va amaliy tadqiqotlar amalga oshirilmoqda. Bu tadqiqotlar, asosan, ZnO materialini turli metall va nometall elementlar bilan legirlash orqali uning tuzilmaviy, elektrofizik va fotoelektrik xossalarini boshqarishga qaratilgan. Shuningdek, professor Sh.U.Yuldashev rahbarligida ultratovushli purkash usuli orqali ZnO asosidagi *p-i-n* tuzilmalarni sintez qilish imkoniyatlari o'rganilgan va ushbu tuzilmalarda elektrolyuminessensiya hodisasi aniqlangan. Bu hodisa ZnO kristallarida legirlash natijasida vujudga kelgan nuqsonli holatlar bilan bog'liq bo'lib, yangi avlod elektron qurilmalari uchun istiqbolli yechim sifatida baholangan.

Shu bilan birga, ZnO asosidagi yupqa qatlamlarga turli S kirishma atomlarini kiritish orqali ularning noyob fizik xossalarini boshqarish, shuningdek, ular asosida geterotuzilmalar hosil qilish imkoniyatlari ma'lum darajada tadqiq etilgan bo'lsa-da, bu qatlamlarning xossalariga ta'sir etuvchi tashqi omillar (harorat, nurlanish, bosim va boshqalar) yetarli darajada o'rganilmagan.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Ushbu dissertatsiya tadqiqoti 2017–2020-yillar davomida amalga oshirilgan va Andijon davlat universitetining OTM-2-68-raqamli “Kristallarda kirishma-nuqson turidagi mikro- va nanobirikmalarning hosil bo'lish mexanizmlari va ularning keng funksional imkoniyatli ko'p qatlamli tuzilmalar yaratishdagi o'rni” mavzusidagi ilmiy loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi: ZnO_{1-x}S_x plyonkalarini ultratovushli spreypiroliz usuli yordamida o'stirish, ularning tuzilmaviy, morfologik va optik xususiyatlarini o'rganish hamda ularga γ -nurlanish ta'sirini tadqiq qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

ultratovushli spreypiroliz usuli yordamida monokristall kremniy tagliklarida ZnO_{1-x}S_x plyonkalarini o'stirishning optimal texnologik sharoitlarini aniqlash;

o'stirilgan plyonkalar sirtida shakllangan nanokristallarning morfologiyasi, geometrik o'lchamlari va fazaviy tuzilishini (panjara turi va fazo guruhi) tadqiq qilish;

γ -nurlanishning ($5 \cdot 10^6$ rad) ZnO_{1-x}S_x plyonkalari va nanostrukturalariga ta'sirini o'rganish va uning tuzilmaviy hamda morfologik o'zgarishlarga ta'sirini tahlil qilish;

ZnO_{1-x}S_x plyonkalarida γ -nurlanish ta'sirida yuzaga keladigan elektrofizik (elektr o'tkazuvchanlik, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligini) o'zgarishlarni aniqlash;

γ -nurlanish ta'sirida ZnO_{1-x}S_x plyonkalarining taqiqlangan soha kengligidagi o'zgarishlarni optik o'tkazuvchanlik ma'lumotlari asosida baholash va tahlil qilish.

Tadqiqotning obyekti sifatida ultratovushli sprej-piroliz usuli yordamida monokristall kremniy tagliklariga o‘stirilgan $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari olingan.

Tadqiqotning predmeti ultratovushli sprej-piroliz usulida $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarini o‘stirishning optimal texnologik sharoitlarini aniqlash, γ -nurlanishning ($5 \cdot 10^6$ rad) $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalariga va ularda shakllangan turli kristallitlariga ta‘sirini o‘rganish, shuningdek, $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining taqiqlangan soha kengligidagi o‘zgarishlarni tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqotning usullari. Belgilangan vazifalarni amalga oshirish maqsadida $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining tuzilmaviy tahlili uchun XRD-7000 rentgen difraktometridan, morfologik tadqiqotlarni amalga oshirish uchun IT200 (JEOL) skanerlovchi elektron mikroskopi va Solver Next atom-kuch mikroskopidan, optik xossalarni aniqlash uchun Cary Eclipse spektrometridan hamda namunalarning elektrofizik xususiyatlarini tadqiq etishda HMS-7000 foydalanilgan. Olingan eksperimental natijalar OriginPro 2022 dasturi yordamida tahlil qilindi va vizual shaklda taqdim etilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

Ilk marotaba ultratovushli sprej-piroliz usulida (tebranish chastotasi 2,4 MHz, piroliz vaqti 30 daqiqa, taglik va purkagich boshi orasidagi optimal masofa 30 sm, isitgich harorati doimiy 500 °C) (100) kristallografik yo‘nalishga mansub, panjara doimiylari $a = b = 0,3265$ nm va $c = 0,5212$ nm bo‘lgan geksagonal elementar katakchadan tashkil topgan $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari o‘stirilgan;

rentgenotuzilmaviy tadqiqotlar natijasida $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari sirtida panjara doimiysi $a = 0,7598$ nm bo‘lgan kub elementar katakchaga ega, o‘lchami 57 nm dan 200 nm gacha bo‘lgan nanokristallarning shakllanishi aniqlangan;

γ -nurlanishlar ta‘sirida $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkasining kristall panjara doimiysi 0,031 nm ga ortishi, ularning sirtiy sohalarida shakllangan nanokristallarning geometrik o‘lchamlari 12 nm ga kamayishi aniqlangan;

$5 \cdot 10^6$ rad dozali γ -nurlanishdan so‘ng $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining solishtirma qarshiligi 3,5 $\Omega \cdot \text{sm}$ ga, tok tashuvchilar harakatchanligi 0,13 $\text{sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ga kamayishi va ularning konsentratsiyasi esa $8,1 \cdot 10^{17} \text{sm}^{-3}$ ga ortishi aniqlangan;

γ -nurlanishlar ta‘sirida $ZnO_{1-x}S_x$ qatlamlarida vakansiyalar, dislokatsiyalar hamda chuqur sathli nuqsonlar miqdorining ortishi tufayli ularning taqiqlangan soha kengligi 3,26 eV dan 3,19 eV gacha kamayishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining optik xossalari tahlili asosida, ularni fotovoltaik tizimlarda yupqa qatlam, hamda optoelektron qurilmalarda fotoaktiv qoplama va sensorli element sifatida qo‘llash imkoniyatlari aniqlangan;

$ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining γ -nurlanishga sezgirligi o‘rganilib, ularni radiatsiya sensori (monitor) sifatida qo‘llash istiqbolli ekani tavsiya etilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi jahon amaliyotida qo‘llanilayotgan yuqori aniqlikka ega zamonaviy rentgen difraktometri, atom-kuch mikroskopi, shuningdek, elektr va optik xossalarni tahlil qiluvchi ilg‘or uskunalardan foydalanishga asoslanadi. Tadqiqotda olingan natijalar mavjud ilmiy adabiyotlar ma‘lumotlari bilan taqqoslandi, yaxshi sinovdan o‘tgan hamda o‘zaro bog‘lanmagan

kompleks eksperimental usullar qoʻllanildi. Shuningdek, natijalarning takrorlanish imkoniyati, fizik hodisalarga oid umumiy nazariy tasavvurlar bilan xulosalarning izchilligi hamda ularning umumiy fizik qonunlar va zamonaviy axborot texnologiyalari asosida tahlil etilishi taʼminlandi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati $ZnO_{1-x}S_x$ asosidagi shaffof plyonkalarda γ -nurlanish taʼsirida yuzaga keladigan tuzilmaviy, morfologik va optik oʻzgarishlarning qonuniyatlari ilmiy asoslangan holda aniqlangani, shuningdek, olingan parametrlar va tahlil natijalarining boshqa shunga oʻxshash nurlanishga sezgir materiallarning fizik xossalarini oʻrganishda va tadqiqotlar olib borishda qoʻllash imkoniyati bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati $ZnO_{1-x}S_x$ asosidagi materiallarni yuqori samaradorlikka ega koʻp funksiyali fotosezgir elektron asboblari, shaffof elektronika va quyosh elementlari ishlab chiqarishda, fotovoltaik tizimlarda yupqa qatlamli aktiv modda, optoelektron qurilmalarda esa fotoaktiv qoplama yoki sezgir element, shuningdek, radiatsiya monitorlari sifatida qoʻllash imkoniyati bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Monokristall kremniy tagliklarida $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarini takomillashtirilgan ultratovushli sprej-piroliz usuli yordamida oʻstirish, shuningdek, ularning tuzilmaviy, morfologik va optik xususiyatlariga γ -nurlanish taʼsirini tadqiq qilish boʻyicha olingan ilmiy-amaliy natijalar asosida:

$5 \cdot 10^6$ rad γ -nurlanish taʼsirida p - $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarida shakllangan nanokristallitlar oʻlchamlarining kichrayishi tufayli solishtirma qarshiligi $\rho = 16,2$ Om·sm dan $12,7$ Om·sm gacha hamda asosiy zaryad tashuvchilarning harakatchanligi $\mu = 0,31$ sm²/V·s dan $0,18$ sm²/V·s gacha kamayishi, ularning konsentratsiyasi esa $n = 1,83 \cdot 10^{18}$ dan $2,64 \cdot 10^{18}$ sm⁻³ gacha ortishi kabi ilmiy natijalar va ularni aniqlash usullaridan “FOTON” AJda ishlab chiqariladigan yarimoʻtkazgichli elektron qurilmalar tayyorlashda foydalanilgan (“FOTON” AJ, 2025-yil 17-mart, №45-sonli maʼlumotnoma). Olingan ilmiy natijalardan foydalanish elektron texnika asboblari tajriba namunalarini tayyorlash hamda ularning elektrofizik xossalarini yaxshilash imkonini bergan.

Kremniy tagliklari (100) kristallografik yoʻnalishga mansub, panjara doimiylari $a = b = 0,3265$ nm va $c = 0,5212$ nm boʻlgan geksagonal elementar katakchalardan tashkil topgan $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarini ultratovushli sprej-piroliz usulida oʻstirish, shuningdek, mazkur plyonkalarda γ -nurlanish taʼsirida vakansiyalar, dislokatsiyalar va chuqur sathli nuqsonlar miqdorining ortishi tufayli taqiqlangan soha kengligining $3,26$ eV dan $3,19$ eV gacha kamayishini aniqlash usullari Andijon davlat pedagogika instituti professori Sh.X.Yoʻlchiyev muallifligidagi “Yarimoʻtkazgichlarda atomlar diffuziyasi” nomli oʻquv qoʻllanmada foydalanilgan (Andijon davlat pedagogika instituti, 2025-yil 5-may, №04-394-sonli maʼlumotnoma). Olingan ilmiy natijalar talabalarning zamonaviy yarimoʻtkazgichlar fizikasiga tegishli terminologik tushunchalarini kengaytirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 18 ta, jumladan, 8 ta xalqaro va 10 ta respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Natijalar asosida jami 30 ta ilmiy ish chop etilgan, jumladan, O'zOAKning doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarida 11 ta maqola, shuningdek, 4 tasi Scopus ma'lumotlar bazasiga kiritilgan xorijiy jurnallarda nashr qilingan hamda tadqiqot mavzusi bo'yicha 1 ta EHM uchun dasturiy guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, umumiy xulosalar, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 124 betni tashkil etgan.

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 mosligi ko'rsatilgan. Dissertatsiya ishining maqsadi va vazifalari qisqacha ifoda etilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati aniqlangan, tadqiqot vazifalarining bajarilishi va dissertatsiya tuzilishi to'g'risida ma'lumotlar berilgan.

Dissertatsiya ishining "**ZnO metalloksid plyonkalarining o'tkazuvchanlik turiga ta'sir etuvchi kirishmalar klassifikatsiyasi**" nomli birinchi bobida ZnO asosidagi metalloksid yupqa qatlamlarining noyob fizik xususiyatlari (yuqori shaffoflik, keng taqiqlangan soha, kuchli lyuminessensiya va radiatsiyaga barqarorlik) hamda ularni zamonaviy optoelektronika, quyosh elementlari, fotoelektrik qurilmalar va sensorlar kabi ko'plab texnologik sohalarda muvaffaqiyatli qo'llash imkoniyatlari haqidagi adabiyotlar tahlili keltirilgan. Shuningdek, ZnO qatlamida kirishma atomlarini boshqarish hamda bunday plyonkalarining morfologik va elektrofizik xususiyatlarini turli texnologik usullar orqali shakllantirish imkoniyatlari tahlil qilinib, ular asosida yangi avlod energiya konvertorlari, fotoelektrik va sensor qurilmalarini yaratish istiqbollari muhokama qilingan. Bundan tashqari, metalloksid yupqa qatlamlarning yarimo'tkazgichli yorug'lik diodlari (elektr energiyasini yorug'lik nurlanishiga aylantiruvchi), quyosh elementlari (yorug'lik energiyasini elektr energiyasiga aylantiruvchi), gaz sensorlari va fotokatalitik qurilmalar kabi zamonaviy texnologiyalarda keng qo'llanilayotgani ta'kidlangan. Shu bilan birga, ZnO tarkibiga kirishma atomlarini kiritish orqali uning elektr, fotoelektrik va optik o'tkazuvchanligi hamda energetik soha parametrlarini boshqarish imkoniyati mavjudligi qayd etilgan. Mazkur adabiyotlar tahliliga tayangan holda, dissertatsiya ishi doirasida tegishli ilmiy vazifalar belgilangan.

Dissertatsiya ishining "**ZnO_{1-x}S_x metalloksidlarining yupqa plyonkalarini o'stirish va tuzilmasini tadqiq qilish usullari**" nomli ikkinchi bobida S kirishma atomlari bilan legirlangan ZnO_{1-x}S_x metalloksid plyonkalarini kremniy tagliklariga o'stirish, texnologik jarayonning optimal shart-sharoitlarini aniqlash hamda hosil

boʻlgan qatlamlarning tuzilmaviy, morfologik va optik xususiyatlariga γ -nurlanish taʼsirini oʻrganishda qoʻllanilgan usullar haqida maʼlumotlar keltirilgan.

ZnO_{1-x}S_x plyonkalarini sintez qilish uchun ultratovushli sprej-piroliz usulidan foydalanildi. Plyonkalarni hosil qilishda prekursor sifatida rux atsetatining suvli eritmaları ishlatildi. Legirlashni amalga oshirish uchun rux atsetat eritmasiga belgilangan konsentratsiyada legirlovchi moddalar (tiokarbamid) qoʻshildi. Bu moddalar ZnO plyonkalarida *p*-tipdagi oʻtkazuvchanlikni taʼminlash uchun xizmat qiladi. Ultratovush taʼsiri ostida eritma qizimasdan bugʻ holatiga oʻtadi. Hosil boʻlgan bugʻ kremniy tagliklarining sirtiga choʻkadi. Tagliklar prekursorlarning termik parchalanishi uchun yetarli darajada qizdiriladi va ularning yuzasida ZnO_{1-x}S_x plyonkalari hosil boʻladi. Bu jarayonda sodir boʻladigan asosiy kimyoviy reaksiya quyidagicha ifodalanadi:



Natijada kremniy tagliklariga yotqizilgan, qalinligi taxminan 400 nm boʻlgan ZnO_{1-x}S_x metalloksid qatlamlaridan iborat namunalar olindi.

Hosil qilingan ZnO_{1-x}S_x plyonkalari va kremniy tagliklarining tuzilmaviy xususiyatlari Empyrean Malvern turidagi uchinchi avlod rentgen difraktometrida tahlil qilindi. Rentgenodifraksiyon oʻlchovlar Bregg–Brentano geometriyasida, $2\theta = 15^\circ$ dan 120° gacha boʻlgan diapazonda, 1 gradus/daqiqa skanerlash tezligida amalga oshirildi. Shuningdek, ZnO_{1-x}S_x plyonkalarining morfologiyasi va sirt relyefi JSM-IT200 (JEOL) skanerlovchi elektron mikroskop hamda Solver Next atom-kuch mikroskopi yordamida oʻrganildi. Plyonkalarining optik oʻtkazuvchanligi Cary Eclipse spektrofotometri orqali aniqlandi. Elektrofizik xususiyatlar HMS-7000 tizimida oʻlchandi. Barcha olingan spektrlar va tadqiqot natijalari OriginPro2022 dasturi yordamida tahlil qilindi.

Dissertatsiya ishining **“Ultratovushli sprej-piroliz usulida olingan ZnO_{1-x}S_x yupqa plyonkalarining tuzilmaviy hamda morfologik xossalari”** nomli uchinchi bobida kremniy asosidagi ZnO_{1-x}S_x yupqa plyonkalarining tuzilmaviy xossalari hamda ularga γ -nurlanishning taʼsiri, shuningdek, ZnO_{1-x}S_x yupqa plyonkalari sirtining morfologik topologiyasi va uni γ -nurlanish taʼsirida boshqarish imkoniyatlari haqidagi maʼlumotlar bayon qilingan.

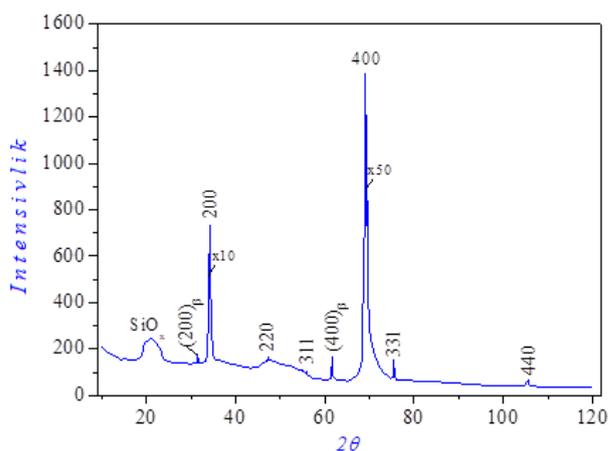
1-rasmda kremniy tagligining rentgenogramma tasviri keltirilgan. Ushbu difraksiyon chizmada turli intensivlikka ega, selektiv tabiatga ega boʻlgan bir qator tuzilmaviy akslanishlar kuzatilgan boʻlib, ularning tuzilmaviy maʼlumotlari 1-jadvalda keltirilgan. Keltirilgan maʼlumotlar asosida taglikning yuza qismi kristallografik (100) yoʻnalishga mos kelishi aniqlangan. (400) akslanishning yuqori intensivligi ($\approx 0,7 \cdot 10^5$ imp/sek) va uning tor yarimkengligi ($\text{FWHM} \approx 9 \cdot 10^{-3}$ rad) taglik kristall panjarasining yuqori darajadagi mukammalligidan dalolat beradi. Bu esa taglikning kristall tuzilmasi yaxshi shakllangan va defektlar miqdori juda kamligini koʻrsatadi. Shu bilan birga, (220), (311), (331) va (440) kabi boshqa kristallografik yoʻnalishlarga mos akslanishlar ham past intensivlikda namoyon boʻlgan. Ushbu akslanishlarning (400) akslanishga nisbatan zaifligi taglik hajmida

ma'lum miqdordagi mikroskopik buzilishlar, ya'ni kristall panjaradagi mahalliy nuqsonlar mavjudligidan dalolat beradi. Rentgenogrammada $2\theta = 18^\circ\text{--}59^\circ$ oralig'idagi burchakli sochilishlarda noelastik fonning oshgani esa kristall panjarada qoldiq elastik zo'riqishlar mavjudligini ko'rsatadi. Odatda, bunday zo'riqishlar, taglikka mexanik yoki kimyoviy ishlov berish natijasida paydo bo'lishi mumkin. Bundan tashqari, kichik burchakli ($2\theta \approx 20,4^\circ$) sochilishlarda keng diffuzion akslanish ($\text{FWHM} = 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$) kuzatilgan bo'lib, bu kremniy va kislorod atomlari o'rtasidagi to'yinmagan kimyoviy bog'lar tufayli taglik yuzasida SiO_x fragmentlari shakllanganidan dalolat beradi.

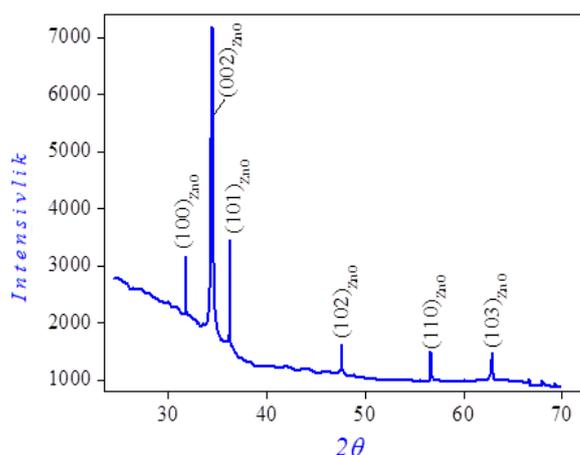
1-jadval.
Kremniy tagligining rentgenogrammasida kuzatilgan akslanishlarning tuzilmaviy qiymatlari

№	Refleks	I, nis. birlik	2θ , grad	d, nm	FWHM, rad
1	Dif. sochilish (SiO_x)	239	20,4	0,4406	0,098
2	$(200)_{\text{Si}}$	7330	33,1	0,2717	0,0064
3	$(220)_{\text{Si}}$	168	47,1	0,1922	0,043
4	Dif. sochilish	151	47,32	0,1901	0,23
3	$(311)_{\text{Si}}$	100	55,75	0,1649	0,018
4	$(400)_{\text{Si}}$	69700	68,91	0,1366	0,0091
5	$(331)_{\text{Si}}$	134	75,6	0,1255	0,01
6	$(440)_{\text{Si}}$	60	105,46	0,0967	0,016

1-jadvaldagi (400) akslanish parametrlari asosida kremniy tagligining panjara doimiysi $a_{\text{Si}} = 0,5429 \text{ nm}$ ekanligi aniqlandi. 2-rasmda o'stirilgan ZnO yupqa plyonkasining rentgenogramma tasviri keltirilgan bo'lib, u taglik rentgenogrammasiga nisbatan sezilarli farq qiladi. Unda kichik burchakli sochilishlarda diffuzion akslanish namoyon bo'lgan. Ushbu diffuzion akslanish fonida $d/n = 0,2774 \text{ nm}$ tekisliklar oralig'ida $2\theta = 31,7^\circ$ da (111) kristallografik yo'nalishga, $d/n = 0,2723 \text{ nm}$ oralig'ida $2\theta = 32,97^\circ$ da (002) yo'nalishga hamda $d/n = 0,249 \text{ nm}$ oralig'ida $2\theta = 36,34^\circ$ da (101) kristallografik yo'nalishga mos keluvchi, yuqori intensivlikka ega selektiv tabiatli tuzilmaviy akslanishlar kuzatildi. Aynan (002) kristallografik yo'nalishga mos keluvchi akslanish chizig'ining yuqori intensivligi ($\sim 10^5 \text{ imp} \cdot \text{s}^{-1}$) va uning yarim kengligining ($\text{FWHM} = 2,62 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$) torligi plyonkaning kristall panjarasi yuqori darajada mukammal ekanligidan dalolat beradi. Mazkur akslanishning eksperimental natijalar asosida o'stirilgan ZnO qatlamlari panjara parametrlari $a = b = 0,3221 \text{ nm}$ va $c = 0,5203 \text{ nm}$ bo'lgan $C6/mmc$ fazoviy guruhiga mansub va vyursit tuzilishini namoyon etuvchi geksagonal elementar katakchalardan tashkil topgani aniqlandi. Shuningdek, ushbu yuqori intensivlikka ega akslanish cho'qqisining yarim kengligi orqali subkristallit (blok) o'lchami $L \approx 67 \text{ nm}$ deb baholandi.



1-rasm. Kremniy tagligining rentgenogrammasi



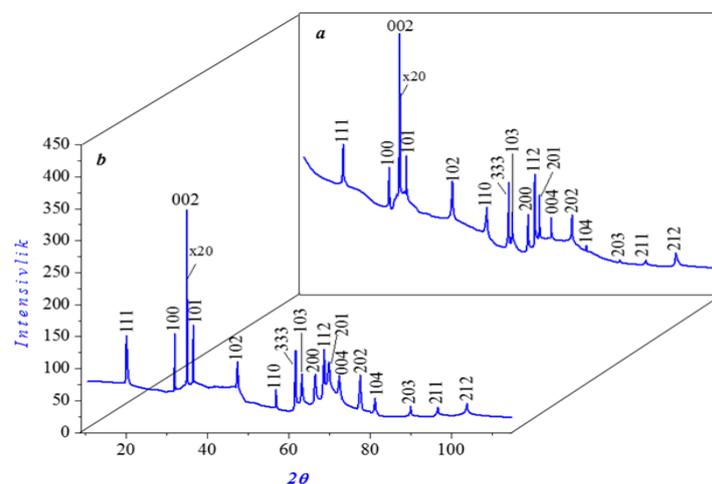
2-rasm. ZnO yupqa plyonkasining rentgenogrammasi

Bundan tashqari plyonka rentgenogrammasida (102), (103) va (110) kristallografik yoʻnalish mansub boʻlgan kichik intensivlikdagi akslanishlar ham namoyon boʻlib, ular $L \approx 84$ nm oʻlchamdagi rux oksidi nanokristallitlariga tegishli ekanligidan dalolat beradi. Bunday nanotuzilmalar, odatda, taglik ($a_{Si} = 0,5429$ nm) va plyonka ($a = b = 0,3221$ nm va $c = 0,5203$ nm) kristall panjaralari oʻrtasidagi farq natijasida yuzaga keladi. Bu farqning miqdoriy bahosi quyidagi formula:

$$\xi = 2|a_s - a_f| / (a_s + a_f), \quad (2)$$

asosida 2% ni tashkil etishi aniqlandi.

3-a rasmda $ZnO_{1-x}S_x$ metalloksid qatlamining rentgenogrammasi keltirilgan boʻlib, u ZnO plenkasi rentgenogrammasidan sezilarli farq qiladi. (001) kristallografik yoʻnalish $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkasi tuzilmaviy xususiyatlarini shakllantiradi. (002) akslanish boʻyicha kristall panjara parametrlari $a = b = 0,3265$ nm va $c = 0,5212$ nm aniqlanib, matritsa qatlamining kristall panjarasida oʻzgarishlar kuzatilishi aniqlandi. Bu akslanishni tahlil qilish natijasida plyonkaning $P6_3mc$ fazoviy guruhiga mansubligi hamda geksagonal singoniyani namoyon etishi tasdiqlandi. Bundan tashqari, rentgenogrammada turli kristallografik yoʻnalishlarga mansub boʻlgan boshqa tuzilmaviy akslanishlar ham kuzatilgan boʻlib, ularning parametrlari 2-jadvalda keltirilgan turli yoʻnalishlar va akslanishlar $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkasining koʻp fazali yoki tarkibiy jihatdan murakkab tuzilmaga egaligini koʻrsatadi. Shuningdek, rentgenogrammada kichik va oʻrta burchaklarda kuzatilgan noelastik fon (noelastik fon) plyonka kristall panjarasidagi mikrobuzilishlar yoki mikrodeformatsiyalarning mavjudligidan dalolat beradi. 2-jadvalda keltirilgan maʼlumotlarni qayta hisoblashlar asosida $ZnO_{1-x}S_x$ nanokristallitlarining oʻlchami 50 nm dan 200 nm gacha ekanligi hamda panjara parametri $a_{ZnO:S} = 0,7598$ nm tengligi aniqlandi. 3-b rasmda $5 \cdot 10^6$ rad dozali γ -nurlanish bilan nurlantirilgan $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkasining rentgenogrammasi keltilgan. Rentgenogrammaning kichik va oʻrta burchakli sochilishlarida kuzatilgan “noelastik fon” sathi taxminan 72% ga kamaygan, (002) akslanish intensivligi 13,8% ga pasaygan, (002) difraksion chizigʻi yuqori burchaklar tomon siljigan.



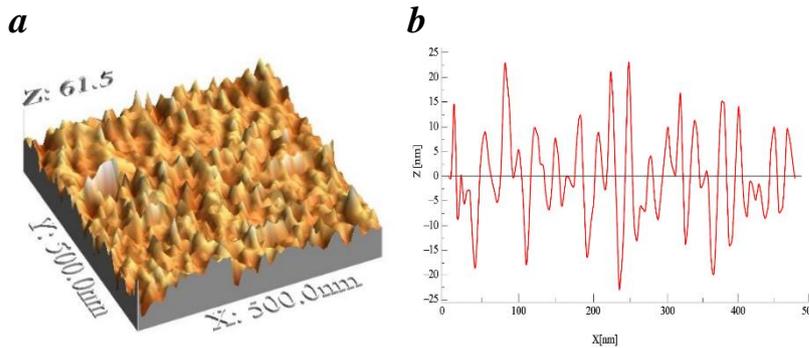
3-rasm. ZnO_{1-x}S_x yupqa plyonkalarining rentgenogrammalari: (a) nurlanishdan oldin va (b) keyin

Bu esa o‘z navbatida γ -nurlanish ta‘sirida plyonkada mikrotuzilmaviy o‘zgarishlar ro‘y berganligini ko‘rsatadi. 2-jadvaldagi kattaliklar yordamida nurlanishdan keyingi ZnO_{1-x}S_x plyonkasining kristall panjara $a = b = 0,3246$ nm va $c = 0,5187$ nm tengligi aniqlandi. Bu qiymatlar nurlanishdan avvalgi parametrlardan ($a = b = 0,3265$ nm; $c = 0,5256$ nm) biroz kichikroq bo‘lib, γ -nurlanish tasirida panjara qisqarishi sodir bo‘lganini anglatadi.

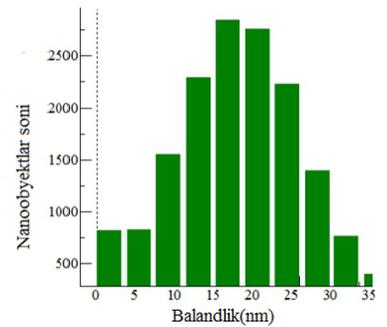
2-jadval.

ZnO-S/Si va γ -ZnO-S/Si namunalariining rentgenogrammalarida kuzatilgan akslanishlarning tuzilmaviy qiymatlari

№	Refleks	ZnO-S/Si		γ -ZnO-S/Si		$\Delta\theta$
		I, nis. birlik	2 θ , grad	I, nis. birlik	2 θ , grad	
1	111	239	20,081	150,9	20,1	0,019
2	100	203	31,86	72	31,79	0,07
3	002	416,63	34,19	264	34,29	0,1
4	101	214,15	35,93	168,3	36	0,07
5	102	181,45	47,45	103,6	47,47	0,02
6	110	124,8	56,79	66,6	56,87	0,08
7	333	179	61,61	128,9	61,68	0,07
8	103	131	62,53	91,6	62,64	0,11
9	200	117,6	66,42	90,6	66,49	0,07
10	112	192	68,59	109,5	68,68	0,09
11	201	159	69,31	110	69,37	0,06
12	004	123	72,28	88,5	72,31	0,03
13	202	127,7	77,5	89,4	77,6	0,1
14	104	79	81,2	54	81,23	0,03
15	203	55,8	89,49	41	89,59	0,1
16	211	55,3	96,35	39,7	96,4	0,05
17	212	66	103,56	45,2	103,66	0,1

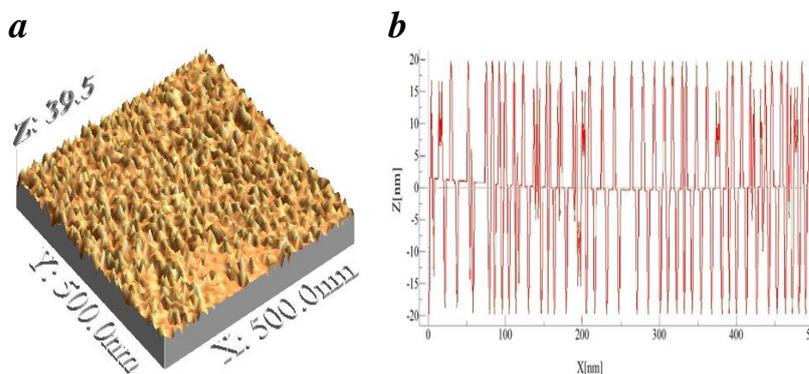


4-rasm. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari sirtining uch o‘lchovli (a) va bir o‘lchovli (b) AKM tasvirlari

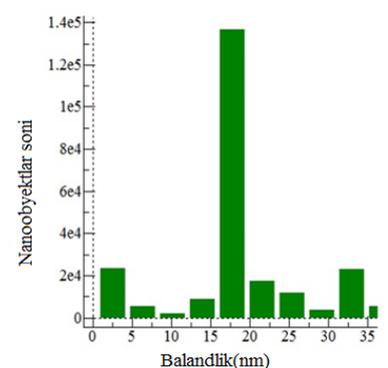


5-rasm. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari sirtida hosil bo‘lgan nanoobyektlarning balandligi bo‘yicha taqsimot gistogrammasi

Shunday qilib, γ -nurlanish ta‘sirida $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkasida fazaviy va tuzilmaviy o‘zgarishlar (difraksiyon chiziqlar intensivligi pasaygan, yarim kenglik torlashgan va yuqori burchaklar tomon siljishi) kuzatilgan. Bu o‘zgarishlar panjara parametrlari ($a \approx 0,7533$ nm) va nanokristallit o‘lchamlarining kamayishini anglatadi. 4-rasmda $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari sirtining uch o‘lchovli (a) va bir o‘lchovli (b) AKM tasvirlari keltirilgan bo‘lib, ularda nanoobyektlarning shakllangani namoyon bo‘lgan. Ularning o‘rtacha balandligi 30÷35 nm bo‘lib, plyonka yuzasi turli o‘lchamdagi orolsimon tuzilmalardan iborat ekani ko‘rinadi. 5-rasmdagi gistogramma ma‘lumotlaridan ma‘lum bo‘lishicha, nanoobyektlarning yarmiga yaqini 15÷25 nm oralig‘idagi balandlikka ega bo‘lib, bu nisbatan bir xillikni anglatadi. Olib borilgan AKM tadqiqotlariga ko‘ra, nanoobyektlar zichligi $2,9 \cdot 10^{11}$ sm^{-2} ni tashkil etgan.

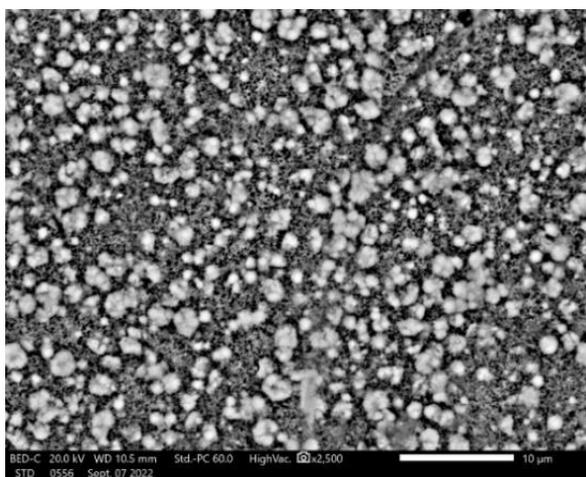


6-rasm. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari sirtining γ -nurlanishdan keyingi uch o‘lchovli (a) va bir o‘lchovli (b) AKM tasvirlari

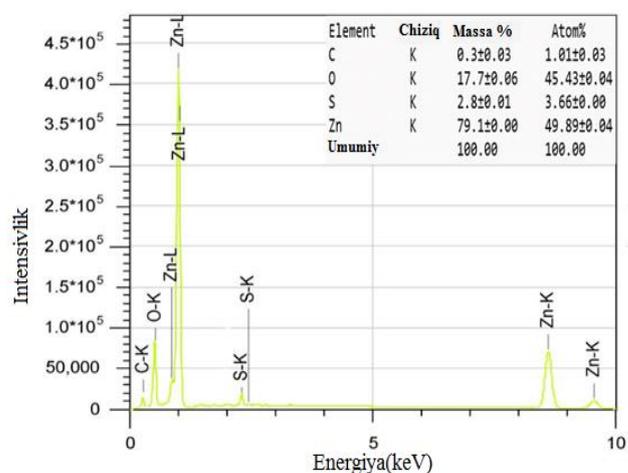


7-rasm. γ -nurlanishdan keyingi namunalarning sirtida hosil bo‘lgan nanoobyektlarning balandligi bo‘yicha taqsimot gistogrammasi

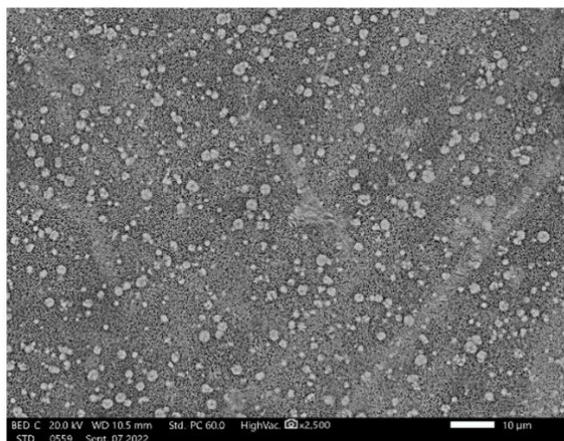
6-rasmda γ -nurlanish ($5 \cdot 10^6$ rad) ta'siridagi $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari yuzasining AKM tasviri keltirilgan. Bu, yuqori darajada tartiblangan va mukammal strukturaga ega plyonkalar hosil bo'lishini ta'minlaydi (8-rasm). 9-rasmda berilgan EDS spektr tahlili natijalariga ko'ra, plyonka yuza qismida Zn, O, S va C elementlari mos ravishda 0,4989; 0,4543; 0,0366; 0,0101 nisbiy ulushda taqsimlangan. Bu natijalardan ko'rinib turibdiki, plyonka tarkibida asosiy elementlar sifatida rux va kislorod saqlanib qolgan, shu bilan birga 3,66 at.% atrofidagi oltingugurt (S) miqdori materialning S bilan muvaffaqiyatli legirlanganini tasdiqlaydi. Kam miqdordagi uglerodning mavjudligi esa organik moddalar qoldig'i yoki atmosferadan yuzaga adsorbsiyalangan moddalar bilan izohlanishi mumkin. Ushbu tarkibiy ma'lumotlar plyonkaning kimyoviy bir xilligini va birlamchi maqsadga erishilganligini ko'rsatadi.



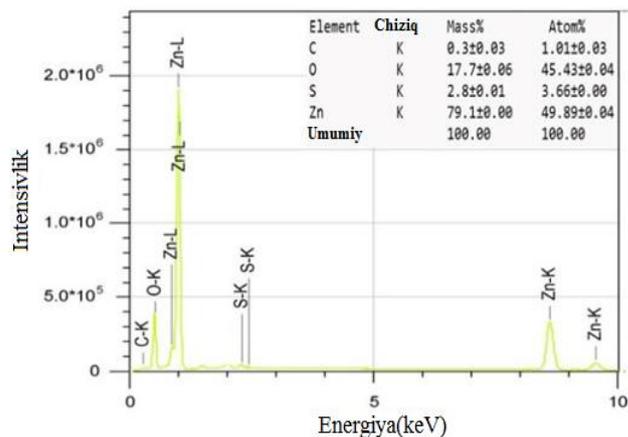
8-rasm. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari sirtining SEM tasviri.



9-rasm. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining EDS spektri



10-rasm. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari sirtining SEM tasviri.



11-rasm. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining EDS spektri

10-rasmda γ -nurlanishning $5 \cdot 10^6$ rad dozasi bilan ishlov berilgan $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkasi SEM tasviri keltirilgan. Tasvirdan ma'lum bo'lishicha, nurlanish nanokristallitlar o'lchamlarining kamayishiga olib kelgan. Bu esa γ -kvantlari

ta'sirida yangi nanotuzilmalar shakllanishiga hamda kristallik darajasi va morfologik xossalarning o'zgarishiga sabab bo'lgan. 11-rasmda nurlangandan keyingi EDS spektri tasvirlangan. Tahlil natijalariga ko'ra, Zn, S, O va C elementlarining intensiv cho'qqilari taxminan to'rt baravar oshgan, ammo ularning atom tarkibi o'zgarmagan. Bu holat plyonka sirt maydonining kengaygani va rentgen nurlarining sochilish yuzalarining ko'paygani bilan izohlanadi.

Dissertatsiya ishining "**Oltinugurt bilan legirlangan ZnO plyonkalarining optik va elektrofizik xususiyatlariga γ -nurlanishlar ta'siri**" nomli to'rtinchi bobida p-ZnO:S/n-Si geterotuzilmalarning elektrofizik hamda fotoelektrik xossalari γ -nurlanishlarning ta'siri bo'yicha o'tkazilgan eksperimental tadqiqot natijalarining muhokamalari keltirilgan.

Olingan natijalarning tahlillariga ko'ra $5 \cdot 10^6$ rad dozali γ -nurlanishidan so'ng p-ZnO:S plyonkalarining elektrofizik xususiyatlari yaxshilangan. γ -nurlanishidan oldin mazkur plyonkalarining solishtirma qarshiligi $\rho = 16,2 \text{ Om}\cdot\text{sm}$, zaryad tashuvchilar konsentratsiya $n = 1,83 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ va harakatchanligi $\mu = 0,31 \text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ larni tashkil qilgan. $5 \cdot 10^6$ rad γ -nurlari bilan nurlantirilgan p-ZnO:S plyonkalarida solishtirma qarshilik $\rho = 12,7 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ gacha tushgan, zaryad tashuvchilar harakatchanligi $\mu = 0,18 \text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ gacha kamaygan, ularning konsentratsiyasi esa $n = 2,64 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ gacha oshgan. Ushbu o'zgarishlar γ -kvantlar bilan nurlantirilganda plyonkada elektron va kovaklarning rekombinatsiya jarayoniga ta'sir qiluvchi nuqsonlar hosil bo'lishi bilan izohlanadi. Yuqorida keltirganimizdek, rentgen difraksiyasi va elektron mikroskop tahlillari asosida γ -nurlanishidan so'ng $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ plyonkalarida nanokristallitlar hajmining kichrayishi aniqlangan. Nanokristallitlar hajmining kichrayishi kristallitlar chegaralari sonining ortishiga olib keladi, natijada elektronlarning o'rtacha erkin yugurish yo'li qisqaradi. Bu hodisa esa, o'z navbatida, zaryad tashuvchilar harakatchanligining pasayishiga sabab bo'ladi.

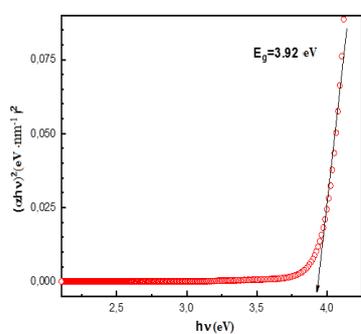
Tadqiqotlar mobaynida $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ plyonkalari optik xususiyatlarini o'rganish uchun ultratovushli sprej-piroliz usuli yordamida yupqa plyonkalar shisha tagliklarga ham o'stirildi. Shishaning 300÷350 nm diapazondagi yutilishi nisbatan yuqori bo'lishi, 400 nm dan ortiq to'lqin uzunliklarda 85÷90% gacha shaffoflikni namoyon etadi. Shu sababli, $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ plyonkalari shisha tagliklarga o'stirilganda (o'zi 300–350 nm atrofida kuchli yutilish ko'rsatadi) uning xususiyatlarida nisbatan o'zgarishlar yuzaga keladi.

12-rasmda shisha taglikning Taus grafigi tasvirlangan bo'lib, unda $(ahv)^n$ ga (fotonning energiyasiga) bog'liq ravishda o'lchangan nuqtalari aks ettirilgan. Grafikdan yutilish koeffitsiyenti (α) va foton energiyasiga (hv) tayanadigan holda shishaning taqiqlangan soha kengligi (E_g) ni hisoblab chiqish mumkin. Grafikda past energiya (hv kichik) diapazonida $(ahv)^n$ qiymatlari nolga juda yaqinligicha qolib, energiya oshib borganda juda keskin o'sib borishi ko'rinadi. Taus usulida yutilish spektrining keskin o'suvchi qismi grafikda to'g'ri chiziq shaklida ifodalanadi. Ushbu chiziqni x-o'q tomon pastga qarab cho'zsak (x-o'qiga urinma o'tkazsak), u x-o'qni kesgan nuqtada optik taqiqlangan soha kengligi (E_g) hosil bo'ladi. Bu qiymat grafikda ko'rinmasa-da, chiziq davomiga asoslanib aniqlanadi. Shisha materiallarida odatda $E_g \approx 3,8\div 3,9 \text{ eV}$ atrofida bo'lishi kutiladi. Mazkur holatda ham

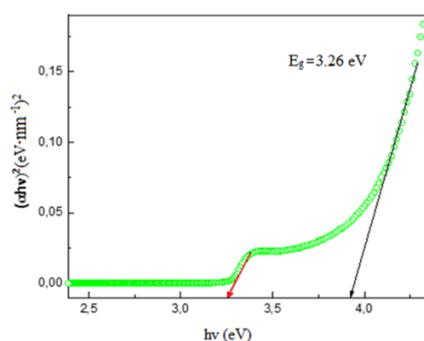
taglik shisha uchun $E_g \sim 3,92$ eV qiymati aniqlandi. Bu qiymat shisha uchun mos, chunki shisha ultrabinafsha nurlarni kuchli yutadi va ko‘rinuvchi diapazonda shaffof bo‘ladi.

13-rasmda “taglik” va “plyonka”larga tegishli ikki xil egri chiziqli yutilish kuzatilgan. Yuqorida ta’kidlaganimizdek, keskin ko‘tarilgan to‘g‘ri chiziqlarga x-o‘qi tomon urinma o‘tkazish orqali shisha taglik uchun optik taqiqlangan soha kengligi taxminan 3,92 eV atrofida ekanligi aniqlandi, (qora chiziq), $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkasining optik taqiqlangan soha kengligi esa $E_g \approx 3,26$ eV ekani (qizil chiziq bo‘yicha) kuzatildi. ZnO metalloksid plyonkalari uchun $E_g \sim 3,3$ eV atrofida bo‘lishi kutilsa-da, S kiritilishi orqali E_g quyidagi omillarga ko‘ra o‘zgarishi mumkin. Birinchi navbatda, S^{2-} ionining ion radiusi O^{2-} ning ion radiusidan kattaroq bo‘lganligi sababli, kristall panjarada ichki kuchlanish va panjara deformatsiyasi yuzaga keladi. Bu deformatsiya ta’sirida kristall panjaraning elektron zonalari yaqinlashishi yoki qayta shakllanishi oqibatida E_g qiymati ma’lum darajada torayadi. Ikkinchidan, S legirlovchi atomlarining ZnO kristall panjarasiga kiritilishi nuqsonlar sonining ortishiga olib keladi. Ushbu nuqsonlar taqiqlangan soha ichida qo‘shimcha energetik sathlar hosil bo‘lishiga sabab bo‘ladi, natijada zonalar orasidagi energetik farq (E_g) qiymati yanada pasayadi. 13-rasmda sof ZnO ga nisbatan S atomlari kiritilgan ZnO:S plyonkalarining taqiqlangan soha kengligi $E_g \approx 3,26$ eV gacha tushishi kuzatildi. Bu materialning asosiy yutish chegarasi yaqin ultrabinafsha spektral sohaga ko‘chirilganini bildiradi.

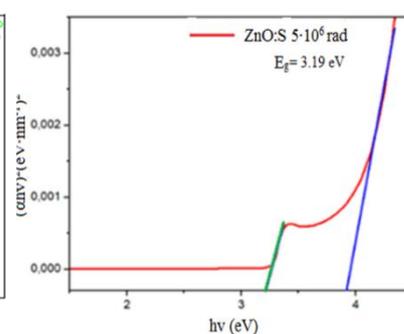
14-rasmdan $5 \cdot 10^6$ rad dozali γ -kvantlar bilan nurlantirilgan $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkasining E_g qiymati Taus usulidan foydalangan holda 3,19 eV ekanligi aniqlandi.



12-rasm. Shisha taglikning optik taqiqlangan soha kengligini Taus usuli orqali aniqlangan tasviri.



13-rasm. Shisha tagliklariga o‘stirilgan $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining optik taqiqlangan soha kengligini Taus usuli orqali aniqlangan tasviri.



14-rasm. $5 \cdot 10^6$ rad dozali nurlanishdan keyingi namunalarning optik taqiqlangan soha kengligini Taus usulida aniqlangan tasviri.

Bu qiymat plyonkaning nurlanishdan avval olingan $E_g \approx 3,26$ eV qiymatidan sezilarli darajada pasayganligini ko‘rsatadi. Optik taqiqlangan soha kengligining kamayishi γ -nurlanish ta’sirida plyonka kristall panjarasida qo‘shimcha nuqsonlarning shakllanishi bilan bog‘liq. Ushbu nuqsonlar taqiqlangan soha ichida

yangi energetik sathlarni hosil qiladi va natijada pastroq energiyali fotonlar orqali optik o'tishlar yuzaga keladi. Bu esa taqiqlangan soha kengligining torayishiga olib keldi.

Tadqiqot natijalari asosida S atomlari bilan legirlash hamda radiatsion ishlov berish orqali ZnO plyonkasining yorug'likka sezgirlik diapazoni ultrabinafsha soha bilan bir qatorda ko'rinuvchi spektr hududini ham qamrab olishi mumkinligi aniqlandi. Bunday natijalar plyonkalarining fotonik va optoelektron qurilmalarda qo'llanilishi uchun yangi imkoniyatlar yaratadi.

XULOSA

Monokristall kremniy tagliklariga o‘stirilgan $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining tuzilmaviy, morfologik va optik xususiyatlariga γ -nurlanish ta‘siri bo‘yicha olingan natijalarning muhokamalari yuzasidan quydagilar xulosa qilindi:

1. Ilk marotaba ultratovushli sprej-piroliz (tebranish chastotasi 2.4MHz, prioliz vaqti 30 daqiqa, taglik va purkagich boshi orasidagi optimal masofa 30 sm, Isitgich harorati doimiy 500 °C) usulida, kremniy tagliklari (100) kristallografik yo‘nalishga mansub, panjara doimiylari $a = b = 0,3265$ nm va $c = 0,5212$ nm bo‘lgan geksagonal elementar katakchlardan tashkil topgan $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari o‘stirilgan.

2. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari sirtida panjara doimiysi $a = 0,7598$ nm bo‘lgan kub elementar katakchalarga ega, o‘lchami 57 nm dan 200 nm gacha bo‘lgan nanokristallar shakllangani aniqlangan.

3. γ -nurlanish ta‘sirida $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkasi panjara doimiylari ($a = b = 0,3265$ nm va $c = 0,5256$ nm dan $a = b = 0,3246$ nm va $c = 0,5187$ nm gacha) hamda uning sirtiy sohalarda shakllangan nanokristallarning geometrik o‘lchamlarining (30-50 nm dan 18 nm gacha) kamayishi aniqlangan.

4. γ -nurlanishning $5 \cdot 10^6$ rad dozasiidagi ta‘siridan so‘ng, $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining solishtirma qarshiligi 12,7 Om-sm gacha hamda asosiy zaryad tashuvchilar harakatchanligi 0,18 $sm^2/V \cdot s$ gacha kamayishi, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi esa $2,64 \cdot 10^{18} sm^{-3}$ gacha ortishi aniqlangan.

5. γ -nurlanish ta‘sirida $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining taqiqlangan soha kengligining 3,26 eV dan 3,19 eV gacha kamayishi aniqlangan bo‘lib, bu o‘zgarishlar vakansiyalar, dislokatsiyalar va chuqur sathli nuqsonlar miqdorining ortishi bilan izohlangan.

6. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalarining optik xossalari tahlili asosida, ularni fotovoltaik tizimlarda yupqa qatlam hamda optoelektron qurilmalarda fotoaktiv qoplama va sensorli element sifatida qo‘llash imkoniyatlari aniqlangan.

7. $ZnO_{1-x}S_x$ plyonkalari ionlashtiruvchi nurlanishga sezgir materiallar sifatida ham istiqbolli hisoblanib, ularni yadro energetikasi, tibbiy diagnostika, xavfsizlik tizimlari kabi sohalarda samarali qo‘llash imkoniyatlari aniqlangan.

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

АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЮНУСАЛИЕВ НУРИТДИН ЮНУСАЛИ УГЛИ

**ВЛИЯНИЕ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ, МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ
И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЁНОК $ZnO_{1-x}S_x$**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Фергана-2025

Тема диссертации на соискание ученой степени доктора философии по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером B2025.1.PhD/FM1250.

Диссертация выполнена в Андижанском государственном университете имени З.М.Бабура. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме) размещен на веб-странице Научного совета (www.ferpi.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Зайнабидинов Сиражидин
доктор физико-математических наук,
академик

Официальные оппоненты:

Тургунов Нозимжон Абдуманнопович
доктор физико-математических наук,
профессор

Отажонов Салим Мадрахимович
доктор физико-математических наук,
профессор

Ведущая организация:

Узбекский национальный университет

Защита диссертации состоится «28» 08 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 при Ферганском государственном техническом университете (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06, факс (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, малый зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке (ЦИР) института. (зарегистрирована за № 531) Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06.

Автореферат диссертации разослан «8» 08 2025 года.
(реестр протокола рассылки № 4 от «8» 08 2025 г.).



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

Б.Ж. Ахмадалиев
Заместитель секретаря научного совета
присуждению ученой степени
доктора философии, PhD ф.-м.н.,
профессор

Н.А. Султонов
Председатель научного семинара
при научном совете по
присуждению ученой степени
доктора философии, д.ф.-м.н.,
профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В связи с бурным развитием нанoeлектроники, оптоэлектроники и сенсорных технологий в мире, особое внимание уделяется созданию современных электронных устройств с высокой чувствительностью, многофункциональностью и высокой скоростью обработки, а также совершенствованию существующих систем. В глобальном масштабе процесс производства таких передовых электронных устройств требует выращивания металлооксидных плёнок, их легирования примесными атомами, реализации этих процессов в строго определённых термодинамических условиях, а также внедрения полученных материалов в практику. С этой точки зрения, учитывая наличие различных недостатков в традиционных методах легирования, в последние годы особое значение приобретают новые подходы, основанные на формировании металлооксидных кристаллитов на поверхности плёнок под воздействием внешних факторов с целью улучшения их свойств.

Во многих ведущих научных центрах мира под руководством видных учёных и специалистов проводятся обширные исследования по выращиванию металлооксидных плёнок, формированию на их поверхности кристаллитов с уникальными свойствами под воздействием внешних факторов, а также легированию такими неметаллическими элементами, как цинк, кислород и сера, с нанесением на стеклянные и полупроводниковые подложки. Эти исследования направлены на эффективное управление процессом образования дефектов, возникающих при воздействии внешней среды, и признаются приоритетным научным направлением. Кроме того, легирование металлооксидных слоёв различными элементами и последующая обработка γ -излучением позволяют значительно уменьшить размеры кристаллитов, что делает возможным создание наноструктурированных и многофункциональных оптоэлектронных изделий, являющихся одной из актуальных научных задач современности.

В последние годы в нашей республике в рамках осуществляемых реформ особое внимание уделяется совершенствованию технологий получения высококачественных электронных материалов и структур, что, в свою очередь, направлено на выведение уровня научно-исследовательских работ на мировые стандарты по качеству и эффективности. В «Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы» в числе прочих задач предусмотрено развитие научных исследований и опытно-конструкторских работ в области электротехники. В реализации данных задач важную роль играет применение структур на основе ZnO. Особенно перспективным направлением считается расширение диапазона оптического излучения на основе сплавов типа ZnO:S и ZnO:N, а также внедрение на их основе различных оптоэлектронных продуктов и сенсоров.

Диссертационная работа в определённой степени способствует реализации задач, изложенных в Постановлении Президента Республики Узбекистан от 10 июля 2020 года №ПП-4779 «О дополнительных мерах по

повышению энергоэффективности экономики и снижению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетических ресурсов за счёт привлечения имеющихся ресурсов»⁴, Постановлении от 19 марта 2021 года №ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики»⁵, Указе Президента от 9 сентября 2022 года №УП-220 «О дополнительных мерах по внедрению энергосберегающих технологий и развитию маломощных возобновляемых источников энергии»⁶, а также в других нормативно-правовых документах, касающихся данной деятельности.

Соответствие исследований приоритетам развития науки и техники республики. Данная диссертационная работа полностью соответствует приоритетным направлениям развития науки и техники в Республике Узбекистан, направлениям III и IV. В частности, это соответствует таким приоритетным направлениям, как Приоритетное направление III - «Развитие энергетики, энергоэффективности, транспорта, машино- и приборостроения, современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения» и Приоритетное направление IV - «Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание новых технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других современных технологий».

Степень изученности проблемы. В настоящее время в ведущих научных и высших учебных заведениях мира ведутся масштабные научные исследования по определению оптимальных технологических условий роста металлооксидных плёнок на основе ZnO, легированных примесными атомами серы (S-центры), изучению их уникальных физических свойств и оценке возможностей применения в различных электронных и оптоэлектронных устройствах.

В частности, научная группа под руководством С. Кима, С.Ж. До и С.Г. Ли исследовала различные физические свойства металлооксидных плёнок ZnO, легированных атомами серы. В работах таких исследователей, как Х.Й. Хие, П. Зхан и Л.Й. Ли, было установлено, что внедрение атомов серы в структуру ZnO приводит к увеличению параметров решётки и размеров субкристаллитов, а также к смещению дифракционных пиков в сторону меньших углов. Научная группа под руководством В. Кумара отметила, что при низкой концентрации атомов серы в плёнках ZnO сохраняется гексагональная вюрцитная структура, а при высоких концентрациях формируются новые фазы, такие как ZnS, S, Zn₂(OH)₂SO₄, ZnSO₃ и ZnSO₄. В

⁴Постановление Президента Республики Узбекистан от 10 июля 2020 года №ПП-4779 «О дополнительных мерах по повышению энергоэффективности экономики и снижению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетических ресурсов за счёт привлечения имеющихся ресурсов» / <https://lex.uz/docs/4890075>

⁵Постановление Президента Республики Узбекистан от 19 марта 2021 года №ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики» / <https://lex.uz/docs/5338560>

⁶Указ Президента Республики Узбекистан от от 9 сентября 2022 года №УП-220 «О дополнительных мерах по внедрению энергосберегающих технологий и развитию маломощных возобновляемых источников энергии» / <https://www.lex.uz/uz/docs/6189043>

исследованиях Х. Сато, Х. Нанто, С. Танаки, а также С.Б. Чжана, С.Х. Вэя и А. Зунгера было выявлено, что легирование атомами серы позволяет уменьшить ширину запрещённой зоны материала ZnO, повысить стабильность структуры и усилить фоточувствительность в видимом спектре излучения. В исследованиях Х.Х. Ванга, С. Лю и П. Чанга на нанопроволоках ZnO, легированных атомами серы и синтезированных электрохимическим методом, было зафиксировано уменьшение ультрафиолетового излучения и усиление люминесценции в зелёной области спектра, что объясняется увеличением количества кислородных вакансий. Научная группа под руководством С.Л. Хсу разработала наноструктуры на основе ZnO:S для гибких наногенераторов, продемонстрировавших высокую механическую чувствительность, а также показано что добавление серы как легирующего элемента улучшает гибкость структуры.

В нашей республике также проводятся фундаментальные и прикладные исследования полупроводниковых оксидных материалов, в частности структур на основе ZnO, под руководством академика С. Зайнабидинова. Эти исследования направлены на управление структурными, электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами ZnO путём легирования различными металлическими и неметаллическими элементами. Кроме того, под руководством профессора Ш.У. Юлдашева изучены возможности синтеза р-і-п структур на основе ZnO методом ультразвукового распыления, и в этих структурах была выявлена электролюминесценция. Это явление связано с дефектными состояниями, возникающими в кристаллах ZnO в результате легирования, и рассматривается как перспективное решение для электронных устройств нового поколения.

В результате данных исследований была в определённой степени изучена возможность управления уникальными физическими свойствами тонких плёнок на основе ZnO путём введения примесных атомов серы, а также формирования на их основе гетероструктур. Однако внешние факторы, влияющие на свойства этих плёнок (такие как температура, излучение, давление и другие), до сих пор не были всесторонне исследованы. В связи с этим одной из актуальных задач остаётся расширение числа научных исследований в данном направлении и поиск решений существующих проблем.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Настоящее диссертационное исследование проводилось в течение 2017–2020 годов в рамках научного проекта Андиганского государственного университета под номером ОТМ-2-68 на тему: «Механизмы формирования микро- и нанообразований типа примесей и дефектов в кристаллах и их роль в создании многослойных структур с широким функциональным потенциалом».

Цель исследования: выращивание плёнок $ZnO_{1-x}S_x$ на монокристаллических кремниевых подложках с помощью

усовершенствованного метода ультразвукового спрей-пиролиза, а также изучение их структурных, морфологических и оптических свойств и исследование воздействия γ -излучения на эти плёнки.

Задачи исследования:

определить оптимальные технологические условия выращивания плёнок $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ на монокристаллических кремниевых подложках методом ультразвукового спрей-пиролиза;

исследовать морфологию, геометрические размеры и фазовую структуру (тип решётки и пространственная группа) нанокристаллов, сформированных на поверхности выращенных плёнок;

изучить влияние γ -излучения ($5 \cdot 10^6$ рад) на плёнки и наноструктуры $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$, а также проанализировать его воздействие на структурные и морфологические изменения;

определить электрофизические изменения (электропроводность, концентрация и подвижность носителей заряда) в плёнках $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ под действием γ -излучения;

оценить и проанализировать изменения в ширине запрещённой зоны плёнок $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ под воздействием γ -излучения на основе данных об оптической пропускной способности.

Объектом исследования выбраны плёнки $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$, выращенные на монокристаллических кремниевых подложках методом ультразвукового спрей-пиролиза.

Предметом исследования является определение оптимальных технологических условий выращивания плёнок $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ методом ультразвукового спрей-пиролиза, изучение воздействия γ -излучения ($5 \cdot 10^6$ рад) на плёнки $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ и сформированные в них различные кристаллиты, а также анализ изменений ширины запрещённой зоны этих плёнок.

Методы исследования. Для выполнения поставленных задач в исследовании использовались следующие методы: для структурного анализа плёнок $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ применялся рентгеновский дифрактометр XRD-7000; морфологические исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа IT200 (JEOL) и атомно-силового микроскопа Solver Next; для определения оптических свойств использовался спектрометр Cary Eclipse, а при исследовании электрофизических характеристик образцов применялась установка HMS-7000. Полученные экспериментальные результаты были проанализированы и визуализированы с помощью программного обеспечения OriginPro 2022.

Научная новизна исследования:

впервые методом ультразвукового спрей-пиролиза (частота колебаний 2,4 МГц, время пиролиза 30 минут, оптимальное расстояние между подложкой и распылительной головкой — 30 см, температура нагревателя стабильна при 500 °С) были выращены плёнки $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ на кремниевых подложках с кристаллографической ориентацией (100), состоящие из гексагональных элементарных ячеек с параметрами решётки $a = b = 0,3265$ нм и $c = 0,5212$ нм;

в результате рентгеноструктурных исследований было установлено, что на поверхности плёнок $ZnO_{1-x}S_x$ формируются нанокристаллы с кубической элементарной ячейкой ($a = 0,7598$ нм) и размерами от 57 нм до 200 нм;

в результате воздействия γ -излучения было установлено, что постоянная кристаллической решётки плёнки $ZnO_{1-x}S_x$ увеличивается на 0,031 нм, а геометрические размеры нанокристаллов, сформированных в приповерхностных областях, уменьшаются на 12 нм;

после воздействия γ -излучения с дозой $5 \cdot 10^6$ рад установлено снижение удельного сопротивления плёнок $ZnO_{1-x}S_x$ до 3,5 Ом·см, подвижности носителей заряда до 0,13 см²/В·с и увеличение их концентрации до $8,1 \cdot 10^{17}$ см⁻³;

также установлено, что под действием γ -излучения в слоях $ZnO_{1-x}S_x$ увеличивается количество вакансий, дислокаций и глубоких уровней, что приводит к уменьшению ширины запрещённой зоны с 3,26 эВ до 3,19 эВ.

Практические результаты исследования, следующие:

на основе анализа оптических свойств плёнок $ZnO_{1-x}S_x$ выявлены перспективы их применения в качестве тонкоплёночного слоя в фотовольтаических системах, а также в качестве фотоактивного покрытия и сенсорного элемента в оптоэлектронных устройствах.

изучена чувствительность плёнок $ZnO_{1-x}S_x$ к γ -излучению, что позволяет рекомендовать их в качестве перспективных материалов для радиационных сенсоров (мониторов).

Достоверность результатов исследования. Полученные результаты основаны на использовании современных высокоточных приборов, применяемых в мировой научной практике, включая рентгеновский дифрактометр, атомно-силовой микроскоп, а также установки для анализа электрических и оптических свойств.

Результаты сопоставлены с данными, приведёнными в научной литературе, и получены с использованием апробированных и независимых комплексных экспериментальных методов. Их воспроизводимость, согласованность с общими теоретическими представлениями о физических явлениях, а также анализ с позиций общих физических законов и ИТ-технологий обеспечивают научную обоснованность и надёжность выводов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в научно обоснованном выявлении закономерностей структурных, морфологических и оптических изменений, возникающих в прозрачных плёнках на основе $ZnO_{1-x}S_x$ под воздействием γ -излучения, а также в возможности использования полученных параметров и результатов анализа при изучении физических свойств других аналогичных радиочувствительных материалов и проведении соответствующих научных исследований.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности применения материалов на основе $ZnO_{1-x}S_x$ для создания высокоэффективных многофункциональных фоточувствительных

электронных устройств, прозрачной электроники и солнечных элементов, в качестве активного тонкоплёночного слоя в фотогальванических системах, фотоактивного покрытия или чувствительного элемента в оптоэлектронных приборах, а также в составе радиационных мониторов.

Внедрение результатов исследования.

На основе полученных научно-практических результатов по выращиванию плёнок $ZnO_{1-x}S_x$ на монокристаллических кремниевых подложках с помощью усовершенствованного ультразвукового спрей-пиролиза, а также изучению влияния γ -излучения на их структурные, морфологические и оптические свойства:

Было установлено, что под воздействием γ -излучения дозой $5 \cdot 10^6$ рад в *p*-типа плёнках $ZnO_{1-x}S_x$ наблюдается уменьшение размеров сформированных нанокристаллитов, в результате чего удельное сопротивление уменьшается с $\rho = 16,2$ Ом·см до $12,7$ Ом·см, подвижность основных носителей заряда — с $\mu = 0,31$ см²/В·с до $0,18$ см²/В·с, а их концентрация увеличивается с $n = 1,83 \cdot 10^{18}$ до $2,64 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Указанные научные результаты и методики их определения были использованы при разработке полупроводниковых электронных приборов на предприятии АО «ФОТОН» (АО «ФОТОН», справка №45 от 17 марта 2025 года). Применение полученных данных способствовало изготовлению экспериментальных образцов электронной техники и улучшению их электрофизических характеристик;

Кремниевые подложки относятся к кристаллографическому направлению (100), а плёнки $ZnO_{1-x}S_x$ состоят из гексагональных элементарных ячеек с постоянными решётки $a = b = 0,3265$ нм и $c = 0,5212$ нм. Эти плёнки выращивались методом ультразвукового спрей-пиролиза. Кроме того, в результате воздействия γ -излучения в этих плёнках было выявлено уменьшение ширины запрещённой зоны от $3,26$ эВ до $3,19$ эВ за счёт увеличения количества вакансий, дислокаций и глубоких поверхностных дефектов. Данные методы описаны в учебном пособии профессора Андижанского государственного педагогического института Ш.Х. Юлчиева под названием «Диффузия атомов в полупроводниках» (Андижанский государственный педагогический институт, 5 мая 2025 года, справка № 04-394). Полученные научные результаты позволили студентам расширить терминологическое представление о современной физике полупроводников

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы были обсуждены на 18 научно-практических конференциях, из них 8 - на международном уровне и 10 - на конференциях республиканского масштаба.

Публикации результатов исследования. По результатам исследования опубликовано всего 30 научных работ, из них 11 статей — в научных изданиях, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 4 статьи опубликованы в зарубежных журналах, входящих в базу данных Scopus, а

также получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ по тематике исследования.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и списка использованной литературы. Общий объём диссертации составляет 124 страницы.

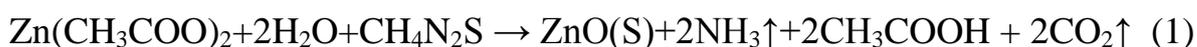
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертационной работы кратко обоснована актуальность и необходимость выбранной темы, указано её соответствие основным приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан. Также изложены цель и задачи исследования, представлена научная новизна и практические результаты, обоснована достоверность полученных данных, определена их теоретическая и прикладная значимость, дана информация о выполнении исследовательских задач и структуре диссертации.

В первой главе диссертации, озаглавленной «**Классификация примесей, влияющих на тип проводимости металлооксидных плёнок ZnO**», представлен обзор литературы, посвящённый уникальным физическим свойствам тонкоплёночных металлооксидных структур на основе ZnO (высокая прозрачность, широкая запрещённая зона, интенсивная люминесценция и радиационная стойкость), а также их успешному применению в современных областях оптоэлектроники, солнечной энергетики, фотоэлектрических устройств и сенсорных технологий. Рассмотрены возможности управления примесными атомами в структуре ZnO, а также влияние различных технологических методов на морфологические и электрофизические характеристики данных плёнок. На основе этого проведён анализ перспектив создания новых поколений устройств для преобразования энергии, фотоэлектрических и сенсорных применений. Кроме того, подчеркнута широкая область применения металлооксидных тонкоплёночных материалов в современных технологиях: в полупроводниковых светодиодах (преобразующих электрическую энергию в свет), солнечных элементах (преобразующих свет в электричество), газовых сенсорах и фотокаталитических устройствах. Также отмечена возможность регулирования электропроводности, фотоэлектрических и оптических свойств, а также параметров энергетической зоны ZnO путём введения примесных атомов. Анализ представленных литературных источников стал основой для постановки соответствующих научных задач в рамках данной диссертационной работы.

Во второй главе диссертации, озаглавленной «**Методы выращивания и исследования структуры тонкоплёночных металлооксидов ZnO_{1-x}S_x**», изложены используемые методики выращивания металлооксидных плёнок ZnO_{1-x}S_x, легированных атомами серы, на кремниевых подложках, определения оптимальных условий технологического процесса, а также исследования воздействия γ -излучения на структурные, морфологические и

оптические свойства полученных слоёв. Для синтеза плёнок $ZnO_{1-x}S_x$ использовался метод ультразвукового спрей-пиролиза. В качестве прекурсора применялись водные растворы ацетата цинка. Для легирования в раствор ацетата цинка добавлялись легирующие вещества (тиомочевина) в заданной концентрации. Эти вещества способствуют обеспечению проводимости р-типа в плёнках ZnO . Под воздействием ультразвука раствор переходит в парообразное состояние без нагрева. Образовавшийся пар осаждается на поверхность кремниевых подложек. Подложки нагреваются до температуры, достаточной для термического разложения прекурсоров, и на их поверхности формируются плёнки $ZnO_{1-x}S_x$. Основная химическая реакция, происходящая в этом процессе, выражается следующим образом:



В результате были получены образцы, состоящие из металлооксидных слоёв $ZnO_{1-x}S_x$ толщиной примерно 400 нм, осаждённых на кремниевые подложки.

Структурные характеристики полученных плёнок $ZnO_{1-x}S_x$ и кремниевых подложек были проанализированы с использованием рентгеновского дифрактометра третьего поколения типа Empyrean Malvern. Рентгенодифракционные измерения проводились в геометрии Брэгга–Брентано в диапазоне 2θ от 15° до 120° со скоростью сканирования 1 градус/минута.

Морфология и поверхностный рельеф плёнок $ZnO_{1-x}S_x$ были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-IT200 (JEOL) и атомно-силового микроскопа Solver Next. Оптическая пропускная способность плёнок была определена с использованием спектрофотометра Cary Eclipse. Электрофизические характеристики измерялись на установке HMS-7000. Все полученные спектры и результаты исследований были проанализированы с помощью программного обеспечения OriginPro2022.

В третьей главе диссертационной работы под названием «**Структурные и морфологические свойства тонкоплёночных слоёв $ZnO_{1-x}S_x$, полученных методом ультразвукового спрей-пиролиза**» изложены сведения о структурных характеристиках тонкоплёночных слоёв $ZnO_{1-x}S_x$ на кремниевой основе, а также об их изменениях под воздействием γ -излучения, и представлены данные о морфологической топологии поверхности плёнок $ZnO_{1-x}S_x$ и возможностях её управления при γ -облучении.

На рис. 1 приведена рентгенограмма кремниевой подложки. На данной дифракционной схеме наблюдаются ряд структурных отражений с различной интенсивностью и селективной природой, структурные параметры которых приведены в табл. 1. На основе представленных данных установлено, что поверхность подложки соответствует кристаллографическому направлению (100).

Интенсивность отражения (400), равная $\approx 0,7 \cdot 10^5$ имп/сек, и его малая полуширина ($FWHM \approx 9 \cdot 10^{-3}$ рад) свидетельствуют о высоком уровне совершенства кристаллической решетки подложки. Это указывает на хорошо

сформированную кристаллическую структуру подложки и крайне низкое количество дефектов. Наряду с этим, отражения, соответствующие другим кристаллографическим направлениям, таким как (220), (311), (331) и (440), также проявились, но с низкой интенсивностью. Слабая выраженность этих отражений по сравнению с отражением (400) указывает на наличие определённого количества микроскопических нарушений, то есть локальных дефектов в кристаллической решетке в объёме подложки.

Таблица 1.
Структурные параметры отражений, наблюдаемых на рентгенограмме кремниевой подложки

№	Рефлекс	I, отн. ед.	2θ , град	d, нм	FWHM, рад
1	Диф. рассеяние (SiO_x)	239	20,4	0,4406	0,098
2	$(200)_{\text{Si}}$	7330	33,1	0,2717	0,0064
3	$(220)_{\text{Si}}$	168	47,1	0,1922	0,043
4	Диф. рассеяние	151	47,32	0,1901	0,23
3	$(311)_{\text{Si}}$	100	55,75	0,1649	0,018
4	$(400)_{\text{Si}}$	69700	68,91	0,1366	0,0091
5	$(331)_{\text{Si}}$	134	75,6	0,1255	0,01
6	$(440)_{\text{Si}}$	60	105,46	0,0967	0,016

Повышение неупругого фона в угловых рассеяниях в диапазоне $2\theta = 18^\circ - 59^\circ$ на рентгенограмме свидетельствует о наличии остаточных упругих напряжений в кристаллической решетке. Обычно такие напряжения могут возникнуть в результате механической или химической обработки подложки. Кроме того, в рассеяниях на малых углах ($2\theta \approx 20,4^\circ$) наблюдалось широкое диффузное отражение ($\text{FWHM} = 9,8 \cdot 10^{-2}$ рад), что указывает на формирование фрагментов SiO_x на поверхности подложки вследствие ненасыщенных химических связей между атомами кремния и кислорода. На основе параметров отражения (400), представленных в табл. 1, было определено, что параметр решетки кремниевой подложки составляет $a_{\text{П}} = 0,5429$ нм. На рис. 2 представлено рентгеновское изображение выращенной тонкой плёнки ZnO, которое значительно отличается от рентгенограммы подложки. В ней в рассеяниях на малых углах проявляется диффузное отражение. На фоне этого диффузного отражения наблюдаются структурные отражения селективного характера с высокой интенсивностью, соответствующие кристаллографическим направлениям: (111) при $2\theta = 31,7^\circ$ и межплоскостном расстоянии $d/n = 0,2774$ нм, (002) при $2\theta = 32,97^\circ$ и $d/n = 0,2723$ нм, а также (101) при $2\theta = 36,34^\circ$ и $d/n = 0,249$ нм.

Особенно высокая интенсивность отражения, соответствующего кристаллографическому направлению (002) ($\sim 10^5$ имп·с⁻¹), и его малая полуширина ($\text{FWHM} = 2,62 \cdot 10^{-3}$ рад) свидетельствуют о высоком уровне совершенства кристаллической решётки плёнки. На основе экспериментальных данных установлено, что выращенные слои ZnO состоят из гексагональных элементарных ячеек с параметрами решётки $a = b = 0,3265$

нм и $c = 0,5212$ нм, принадлежащих к фазовой группе $C6/mmc$ и характеризующихся вюрцитной структурой. Кроме того, по полуширине этого интенсивного пика было оценено, что размер субкристаллитов (блоков) составляет приблизительно $L \approx 67$ нм.

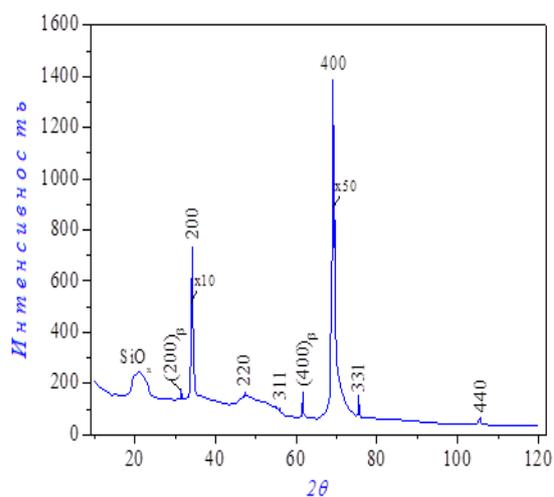


Рис. 1. Рентгенограмма кремниевой подложки

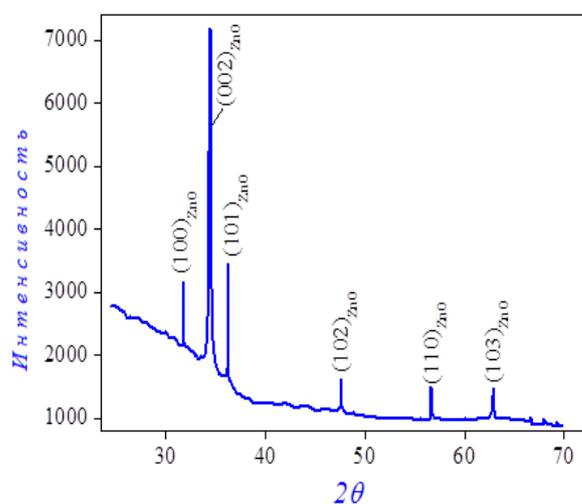


Рис. 2. Рентгенограмма тонкой плёнки ZnO

Также на рентгенограмме плёнки проявились отражения с малой интенсивностью, соответствующие кристаллографическим направлениям (102), (103) и (110), что указывает на наличие нанокристаллитов оксида цинка размером около $L \approx 84$ нм. Такие наноструктуры, как правило, возникают в результате расхождения между параметрами кристаллической решётки подложки ($a_s = 0,5429$ нм) и плёнки ($a = b = 0,3221$ нм и $c = 0,5203$ нм). Количественная оценка этого расхождения определяется по следующей формуле:

$$\xi = 2|a_s - a_f| / (a_s + a_f), \quad (2)$$

установлено, что данное расхождение составляет 2%.

На рис. 3-а представлена рентгенограмма металлоксидного слоя $ZnO_{1-x}S_x$, которая значительно отличается от рентгенограммы плёнки ZnO. Кристаллографическое направление (001) формирует структурные особенности плёнки $ZnO_{1-x}S_x$. По отражению (002) были определены параметры кристаллической решётки: $a = b = 0,3265$ нм и $c = 0,5212$ нм, при этом зафиксированы изменения в кристаллической решётке матричного слоя. В результате анализа данного отражения подтверждена принадлежность плёнки к фазовой группе $R\bar{6}_3mc$ и её гексагональная сингония. Кроме того, на рентгенограмме наблюдались и другие структурные отражения, соответствующие различным кристаллографическим направлениям, параметры которых приведены в табл. 2.

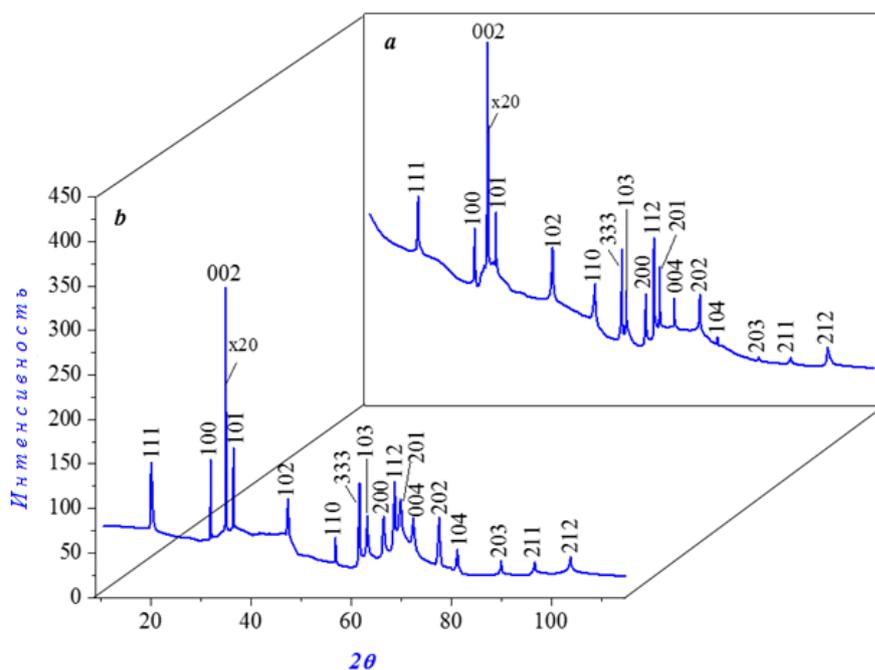


Рис. 3. Рентгенограммы тонких плёнок $ZnO_{1-x}S_x$: (a) до облучения и (b) после облучения

Разнообразие направлений и отражений указывает на многофазную или структурно сложную природу плёнки $ZnO_{1-x}S_x$. Также неупругий фон (неинертный фон), наблюдаемый на рентгенограмме при малых и средних углах, свидетельствует о наличии микродефектов или микродеформаций в кристаллической решётке плёнки. На основе пересчёта данных, приведённых в табл. 2, установлено, что размеры нанокристаллитов $ZnO_{1-x}S_x$ составляют от 50 нм до 200 нм, а параметр решётки равен $a_{ZnO:S} = 0,7598$ нм.

На рис. 3-*b* представлена рентгенограмма плёнки $ZnO_{1-x}S_x$, облучённой γ -излучением с дозой $5 \cdot 10^6$ рад. Уровень «неупругого фона», наблюдаемого в рассеяниях на малых и средних углах, снизился примерно на 72%, интенсивность отражения (002) уменьшилась на 13,8%, а дифракционная линия (002) сместилась в сторону больших углов. Это, в свою очередь, свидетельствует о микроструктурных изменениях в плёнке под воздействием γ -излучения.

С использованием данных из табл. 2 установлены новые параметры кристаллической решётки плёнки $ZnO_{1-x}S_x$ после облучения: $a = b = 0,3246$ нм и $c = 0,5187$ нм. Эти значения немного меньше параметров до облучения ($a = b = 0,3265$ нм; $c = 0,5256$ нм), указывает на то, что γ -облучения происходит сжатие решётки.

Таким образом, под воздействием γ -излучения в плёнке $ZnO_{1-x}S_x$ наблюдались фазовые и структурные изменения, выражающиеся в снижении интенсивности дифракционных линий, уменьшении их полуширины и смещении в сторону больших углов.

Таблица 2.

Структурные параметры отражений, наблюдаемых на рентгенограммах образцов ZnO-S/Si и γ -ZnO-S/Si

№	Рефлекс	ZnO-S/Si		γ -ZnO-S/Si		$\Delta\theta$
		I, отн. ед.	2 θ , град	I, отн. ед.	2 θ , град	
1	111	239	20,081	150,9	20,1	0,019
2	100	203	31,86	72	31,79	0,07
3	002	416,63	34,19	264	34,29	0,1
4	101	214,15	35,93	168,3	36	0,07
5	102	181,45	47,45	103,6	47,47	0,02
6	110	124,8	56,79	66,6	56,87	0,08
7	333	179	61,61	128,9	61,68	0,07
8	103	131	62,53	91,6	62,64	0,11
9	200	117,6	66,42	90,6	66,49	0,07
10	112	192	68,59	109,5	68,68	0,09
11	201	159	69,31	110	69,37	0,06
12	004	123	72,28	88,5	72,31	0,03
13	202	127,7	77,5	89,4	77,6	0,1
14	104	79	81,2	54	81,23	0,03
15	203	55,8	89,49	41	89,59	0,1
16	211	55,3	96,35	39,7	96,4	0,05
17	212	66	103,56	45,2	103,66	0,1

Эти изменения свидетельствуют о снижении параметров решётки ($a \approx 0,7533$ нм) и уменьшении размеров нанокристаллитов в диапазоне 10–150 нм.

На рис. 4 приведены трёхмерное (*a*) и одномерное (*b*) изображения поверхности плёнки ZnO_{1-x}S_x, полученные с помощью АКМ, на которых видно формирование нанобъектов. Их средняя высота составляет 30÷50 нм, а поверхность плёнки состоит из равномерно распределённых островковидных структур.

Как показано на распределении, приведённом на рис. 5, почти половина нанобъектов имеет высоту в диапазоне 15÷25 нм, что свидетельствует о сравнительно высокой однородности. Согласно проведённым исследованиям с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ), определена, что плотность нанобъектов составляет $2,9 \cdot 10^{11}$ см⁻².

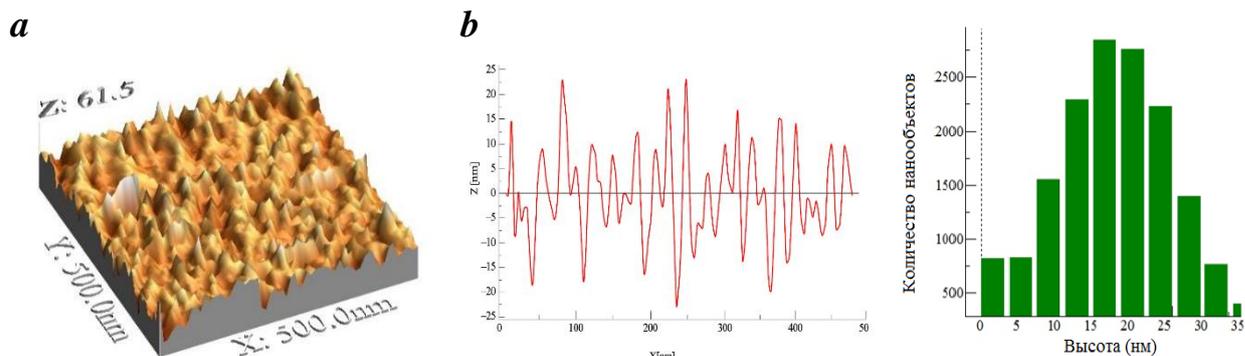


Рисунок 4. Трёхмерные (а) и одномерные (б) изображения поверхности плёнок ZnO_{1-x}S_x, полученные с помощью АКМ

Рисунок 5. Гистограмма распределения nanoобъектов по высоте на поверхности плёнок ZnO_{1-x}S_x

На рис. 6 приведено изображение поверхности пленок ZnO_{1-x}S_x подвергшихся воздействию γ -излучения ($5 \cdot 10^6$ рад), полученное с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Из изображения видно, что под действием излучения происходит уменьшение средней высоты и основного диаметра nanoобъектов. В качестве дополнительного подтверждения результатов на рис. 7 представлен профиль распределения nanoобъектов по высоте, сформировавшихся на поверхности тонких пленок ZnO_{1-x}S_x после γ -облучения.

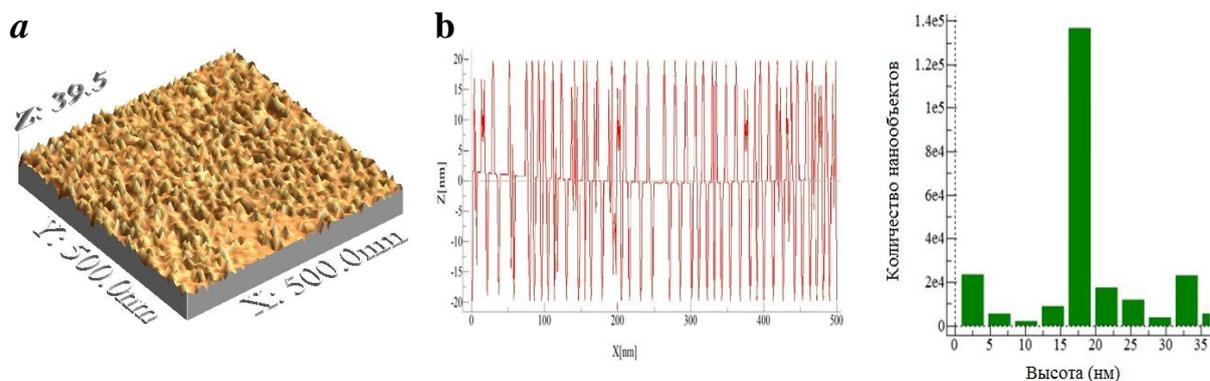


Рис. 6. Трёхмерные (а) и одномерные (б) АСМ-изображения поверхности плёнок ZnO_{1-x}S_x после облучения γ -излучением

Рис. 7. Гистограмма распределения nanoобъектов по высоте на поверхности плёнок ZnO_{1-x}S_x после облучения γ -излучением

Из гистограммы видно, что приблизительно 90% нанообъектов имеют высоту около 18 нм. Это, в свою очередь, свидетельствует о снижении размеров субкристаллитов и улучшении функциональных свойств пленки под воздействием γ -излучения ($5 \cdot 10^6$ рад). Толщина выращенного слоя $ZnO_{1-x}S_x$ составляет 400 нм, а диаметр нанокристаллитов — от 50 до 200 нм. Они выросли перпендикулярно поверхности подложки, вдоль оси z. Это обеспечивает формирование высокоупорядоченных и структурно совершенных пленок (рисунок 8). Согласно результатам ЭДС-анализа, представленного на рис. 9, на поверхности плёнки элементы Zn, O, S и C распределены в относительных долях 0,4989; 0,4543; 0,0366; 0,0101 соответственно. Из этих данных видно, что основными элементами в составе плёнки остаются цинк и кислород, а содержание серы около 3,66 ат.% подтверждает успешное легирование материала серой.

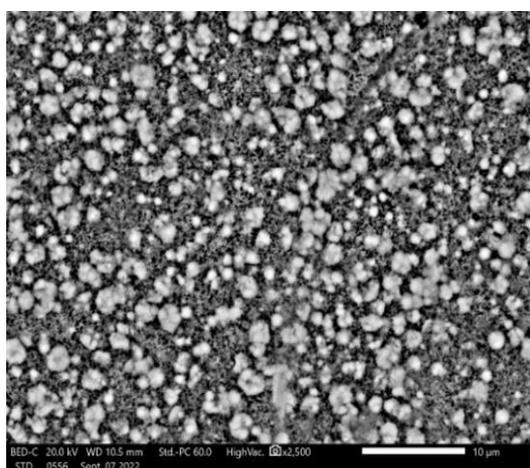


Рис. 8. СЭМ-изображение поверхности плёнок $ZnO_{1-x}S_x$

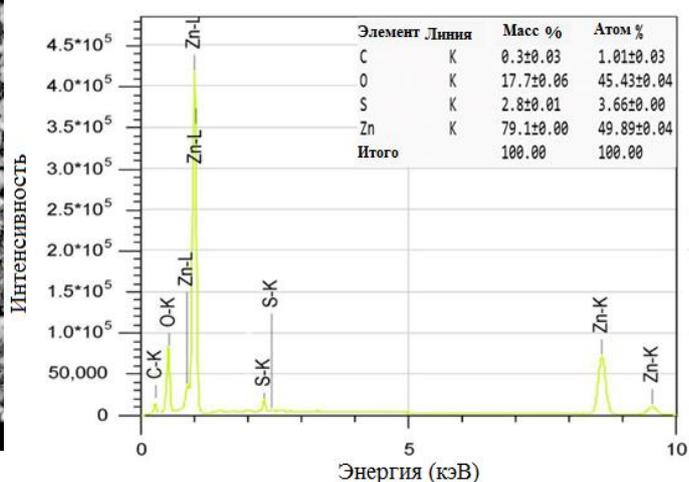


Рис. 9. ЭДС-спектр плёнок $ZnO_{1-x}S_x$

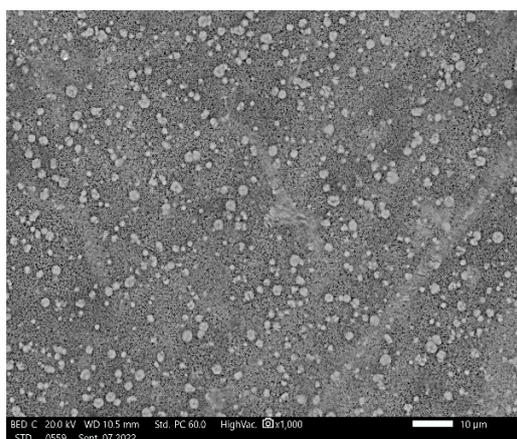


Рис. 10. СЭМ-изображение поверхности плёнок $ZnO_{1-x}S_x$

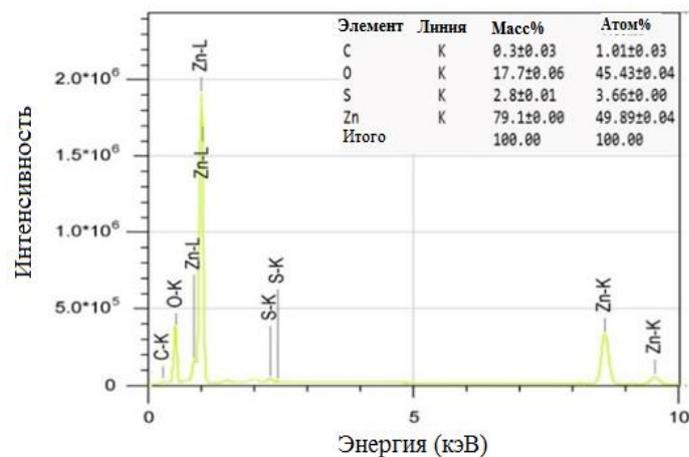


Рис. 11. ЭДС-спектр плёнок $ZnO_{1-x}S_x$

Небольшое количество углерода может быть связано с остатками органических соединений или с адсорбированными с атмосферы веществами. Эти данные указывают на химическую однородность плёнки и достижение поставленной цели синтеза.

Четвёртая глава диссертационной работы под названием «Влияние γ -излучения на оптические и электрофизические свойства серой-легированных плёнок ZnO» посвящена обсуждению результатов экспериментальных исследований, проведённых для оценки влияния γ -облучения на электрофизические и фотоэлектрические свойства p -ZnO:S/n-Si гетероструктур.

Согласно анализу полученных результатов, после воздействия γ -излучения дозой $5 \cdot 10^6$ рад электрофизические свойства плёнок p -ZnO:S улучшились. До облучения удельное сопротивление плёнок составляло $\rho = 16,2$ Ом·см, концентрация носителей заряда - $n = 1,83 \cdot 10^{18}$ см⁻³, а их подвижность - $\mu = 0,31$ см²/В·с. После облучения плёнок дозой $5 \cdot 10^6$ рад удельное сопротивление снизилось до $\rho = 12,7$ Ом·см, подвижность носителей уменьшилась до $\mu = 0,18$ см²/В·с, а их концентрация возросла до $n = 2,64 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Эти изменения объясняются влиянием γ -излучения на образование дефектов в плёнке, а также на рекомбинационные процессы электронов и дырок. Как отмечалось ранее, согласно результатам рентгенодифракционного и электронно-микроскопического анализа, в плёнках ZnO_{1-x}S_x после облучения происходит уменьшение размеров нанокристаллитов. Сокращение размеров нанокристаллитов приводит к увеличению числа границ кристаллитов, в результате чего средняя длина свободного пробега электронов сокращается, что, в свою очередь, приводит к снижению подвижности носителей заряда.

В ходе исследования по изучению оптических свойств плёнок ZnO_{1-x}S_x были выращены тонкие плёнки на стеклянных подложках методом ультразвукового спрей-пиролиза. Поглощение стекла в диапазоне 300–350 нм относительно велико, при длинах волн свыше 400 нм оно проявляет прозрачность на уровне 85–90%. Поэтому при выращивании плёнок ZnO_{1-x}S_x на стеклянных подложках (которые сами сильно поглощают в районе 300–350 нм), в их свойствах наблюдаются определённые изменения.

На рис. 12 изображён график Тауца для стеклянной подложки, на котором нанесены экспериментальные точки, измеренные в зависимости от $(ahv)^n$ и энергии фотонов. По графику, основываясь на зависимости коэффициента поглощения (α) от энергии фотонов (hv), можно определить ширину запрещённой зоны стекла (E_g). В области низких энергий значения $(ahv)^n$ близки к нулю, а при увеличении энергии наблюдается резкий рост. В методе Тауца резко возрастающая часть спектра поглощения представляется в виде прямой линии. Если продлить эту прямую вниз в сторону оси x (провести касательную к оси x), то в точке пересечения с осью x получится значение ширины запрещённой оптической зоны (E_g). Хотя это значение не указано явно на графике, оно определяется по продолжению прямой.

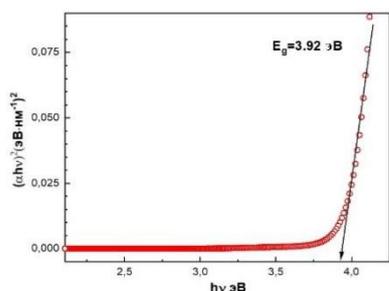


Рис. 12. График определения оптической запрещённой зоны стеклянной подложки методом Тауца

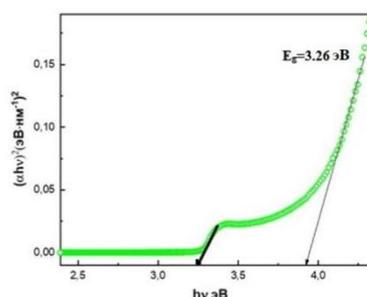


Рис. 13. График определения ширины оптической запрещённой зоны пленок $ZnO_{1-x}S_x$, выращенных на стеклянных подложках, методом Тауца

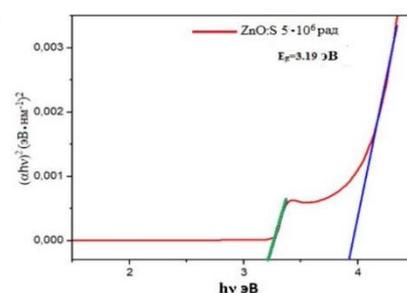


Рис. 14. График определения ширины оптической запрещённой зоны образцов после облучения дозой $5 \cdot 10^6$ рад методом Тауца.

Обычно у стекла значение E_g находится в пределах 3,8–3,9 эВ. В данном случае для подложки из стекла было определено значение ширины запрещённой зоны $E_g \approx 3,92$ эВ. Это значение характерно для стекла, так как стекло сильно поглощает ультрафиолетовое излучение и остаётся прозрачным в видимом диапазоне. На рис. 13 наблюдаются две различные кривые поглощения, соответствующие “подложке” и “плёнке”. Как уже было отмечено выше, определение оптической ширины запрещённой зоны было выполнено методом проведения касательной к линейно возрастающим участкам, приближённых к оси абсцисс. Для стеклянной подложки (чёрная линия) ширина запрещённой зоны составила приблизительно 3,92 эВ. Для плёнки $ZnO_{1-x}S_x$ (жирная линия) оптическая ширина запрещённой зоны оказалась равной $E_g \approx 3,26$ эВ. Несмотря на то, что для ZnO-металлооксидных плёнок обычно ожидается значение E_g около 3,3 эВ, легирование серой приводит к изменению этой величины по следующим причинам. Во-первых, ионный радиус S^{2-} больше, чем у O^{2-} , что вызывает внутренние механические напряжения и деформации в кристаллической решётке. Под воздействием этих деформаций энергетические зоны в решётке сближаются или перераспределяются, что приводит к уменьшению значения E_g во-вторых, внедрение атомов серы в кристаллическую решётку ZnO увеличивает концентрацию дефектов, что способствует формированию дополнительных энергетических состояний внутри запрещённой зоны. В результате уменьшается энергетический разрыв между валентной и проводящей зонами. Таким образом, на рис. 13 зафиксировано снижение ширины запрещённой зоны до $E_g \approx 3,26$ эВ в плёнках ZnO:S по сравнению с чистым ZnO. Это указывает на то, что основная граница поглощения материала смещается в сторону ближнего ультрафиолетового диапазона спектра. На основании анализа рис. 14 установлено, что ширина оптической запрещённой зоны (E_g)

для плёнки $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$, облучённой γ -квантами с дозой $5 \cdot 10^6$ рад, по методу Таусса составляет 3,19 эВ. Это значение существенно ниже, чем $E_g \approx 3,26$ эВ, полученное до облучения, что указывает на заметное сужение запрещённой зоны под воздействием γ -излучения. Снижение ширины запрещённой зоны объясняется образованием дополнительных дефектов в кристаллической решётке плёнки вследствие радиационного воздействия. Указанные дефекты формируют новые энергетические уровни внутри запрещённой зоны, благодаря чему становятся возможными оптические переходы с участием фотонов более низкой энергии. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению энергетического разрыва между валентной и проводящей зонами. На основе полученных результатов установлено, что комбинированное применение легирования плёнки атомами серы и радиационной обработки позволяет расширить её спектральную чувствительность — не только в область ближнего ультрафиолета, но и в видимую часть спектра. Такие изменения создают новые перспективы для использования модифицированных плёнок в фотонных и оптоэлектронных устройствах.

ВЫВОДЫ

На основании обсуждения результатов, полученных в ходе изучения структурных, морфологических и оптических свойств плёнок $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$, выращенных на монокристаллических кремниевых подложках и подвергнутых γ -облучению, были сделаны следующие выводы:

1. Впервые методом ультразвукового спрей-пиролиза (частота 2,4 МГц, продолжительность пиролиза — 30 минут, оптимальное расстояние между подложкой и распылителем — 30 см, температура нагревателя — 500 °С) были выращены плёнки $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ на кремниевых подложках, принадлежащих к кристаллографическому направлению (100), с параметрами решётки $a = b = 0,3265$ нм и $c = 0,5212$ нм, соответствующими гексагональной элементарной ячейке.

2. Определено, что на поверхности плёнок $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ формируются нанокристаллы с кубической элементарной ячейкой ($a = 0,7598$ нм) и размерами от 57 до 200 нм.

3. Под действием γ -облучения были зафиксированы изменения параметров решётки плёнки $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ (с $a = b = 0,3265$ нм и $c = 0,5256$ нм до $a = b = 0,3246$ нм и $c = 0,5187$ нм), а также уменьшение геометрических размеров нанокристаллов на поверхности (с 30–50 нм до примерно 18 нм).

4. После воздействия γ -излучения дозой $5 \cdot 10^6$ рад удельное сопротивление плёнок $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ снизилось до 12,7 Ом·см, подвижность основных носителей заряда — до 0,18 см²/В·с, а концентрация носителей увеличилась до $2,64 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

5. Под влиянием γ -облучения ширина запрещённой зоны E_g плёнок $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ уменьшилась с 3,26 эВ до 3,19 эВ, что объясняется увеличением количества вакансий, дислокаций и глубоких дефектных уровней.

6. Анализ оптических свойств плёнок $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ показал возможность их применения в фотогальванических системах как тонких слоёв, а также в оптоэлектронных устройствах в качестве фотоактивных покрытий и сенсорных элементов.

7. Плёнки $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ рассматриваются как перспективные материалы, чувствительные к ионизирующему излучению, что открывает возможности для их эффективного применения в таких областях, как ядерная энергетика, медицинская диагностика и системы безопасности.

**SCIENTIFIC COUNCIL OF PhD.03/27.02.2020.FM.106.01
ON AWARD OF PHYLOSOFY DOCTOR DEGREE
AT THE FERGHANA STATE TECHNICAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

ANDIJAN STATE UNIVERSITY

YUNUSALIYEN NURITDIN YUNUSALI UGLI

**INFLUENCE OF γ -RADIATION ON THE STRUCTURAL,
MORPHOLOGICAL, AND OPTICAL PROPERTIES OF $ZnO_{1-x}S_x$ FILMS.**

01.04.07- Condenced matter physics

ABSTRACT

of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on Physical and Mathematical sciences

Ferghana – 2025

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number № B2025.1.PhD/FM1250.

Dissertation has been prepared at the Andijan State University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific council (www.ferpi.uz) and on Information and educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: Zainabidinov Sirajiddin
Doctor of physical-mathematical sciences, professor

Official opponents: Turg'unov Nozimjon Abdumannopovich
Doctor of physical-mathematical sciences, professor

Otajonov Salim Madrahimovich
Doctor of physical-mathematical sciences, professor

Leading organization: National University of Uzbekistan

Dissertation defense will take place "18" 08 2025 at 10⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council PhD.03 / 27.02.2020.FM.106.01 at the Fergana state technical university (Address: 150107, Fergana, Fergana str., 86. Phone: (+99873) 241-12-06, fax (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, small meeting room).

The thesis can be found in the library (CIR) of the Institute. (registered under No. 531)
Address: 150107, Ferghana, st. Ferghana, 86. Tel: (+99873) 241-12-06.

The abstract of the dissertation sent out on "8" 08 2025.
(Mailing report No. 4 on "8" 08 2025)



N.X. Yuldashev
Chairman of scientific council on
award of doctor philosophy, DSc in
physics and mathematics, professor

B.J. Axmadaliyev
scientific secretary of scientific
council on award of doctor philosophy,
PhD in physics and mathematics

N.A. Sultonov
Chairman of scientific Seminar under
Scientific Council on award of doctor
philosophy, DSc in physics and
mathematics, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

Topicality and relevance of the thesis topic. As a result of the rapid development of nanoelectronics, optoelectronics, and sensor technologies worldwide, special attention is being paid to the creation of modern electronic devices that are highly sensitive, multifunctional, and capable of fast processing, as well as to the improvement of existing systems. On a global scale, the production process of such advanced electronic devices necessitates the growth of metal oxide thin films, their doping with impurity atoms, the implementation of these processes under well-defined thermodynamic conditions, and the practical application of the resulting materials. In this regard, due to various shortcomings observed in traditional doping methods, in recent years, new approaches aimed at improving material properties by forming metal oxide crystallites on the surface of thin films under the influence of external factors have gained significant importance.

Across the world, numerous leading scientists and specialists are conducting comprehensive research on the growth of metal oxide films, the formation of surface crystallites with unique properties under external influences, and the doping of these films with impurity atoms. In particular, research focused on the effective control of defect formation processes arising from external factors in films formed by coating zinc, oxygen, and nonmetallic elements onto glass and semiconductor substrates is recognized as a priority scientific direction. Additionally, it has been established that by doping metal oxide layers with various elements and subjecting them to γ -irradiation, it is possible to significantly reduce crystallite sizes, which is one of the most relevant scientific tasks in the development of nanostructured and multifunctional optoelectronic products.

In recent years, as part of the ongoing reforms in our republic, special attention has been paid to improving technologies for obtaining high-quality electronic materials and structures, which, in turn, is aimed at bringing the level of research and development work up to world standards in terms of quality and efficiency. The “Strategy for the Development of New Uzbekistan for 2022-202”, among other tasks, provides for the development of research and development in the field of electrical engineering. Application of ZnO-based structures plays an important role in realisation of these tasks. Expansion of the range of optical radiation on the basis of alloys such as ZnO:S and ZnO:N, as well as the introduction of various optoelectronic products and sensors on their basis is considered a particularly promising direction.

This dissertation contributes, to a certain extent, to the implementation of the tasks outlined in the Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated July 10, 2020, No. PQ-4779 “On additional measures to improve the energy efficiency of the economy and reduce the dependence of economic sectors on fuel

and energy products through the mobilization of existing resources”⁷, the Resolution dated March 19, 2021, No. PQ-5032 “On measures to improve the quality of education and to develop scientific research in the field of physics”⁸, the Decree dated September 9, 2022, No. PF-220 “On additional measures for the implementation of energy-saving technologies and the development of low-power renewable energy sources”⁹, as well as other regulatory and legal documents related to this area of activity.

Correspondence of the research to the priorities of development of science and technology in the Republic of Uzbekistan. This dissertation work fully corresponds to the priority directions of development of science and technology in the Republic of Uzbekistan, directions III and IV. In particular, it corresponds to such priority directions as Priority direction III – “Development of energy, energy efficiency, transport, machinery and instrumentation, modern electronics, microelectronics, photonics and electronic instrumentation” and Priority direction IV – “Development of methods of using renewable energy sources, creation of new technologies and devices based on nanotechnology, photonics and other modern technologies”.

Degree of study of the problem. At present, the leading scientific and higher educational institutions of the world are conducting large-scale scientific research to determine the optimal technological conditions for the growth of metal-oxide films based on ZnO doped with impurity sulfur atoms (S-centres), to study their unique physical properties and to assess the possibilities of application in various electronic and optoelectronic devices.

In particular, the research group led by S. Kim, S.J. Do and S.G. Lee investigated various physical properties of metal-oxide films of ZnO doped with sulphur atoms. In the works of researchers such as H.Y. Hieh, P. Zhan and L.Y. Lee, it was found that the introduction of sulfur ions into the structure of ZnO leads to an increase in lattice parameters and subcrystallite sizes, as well as to the shift of diffraction peaks towards smaller angles. The research group led by Vijay Kumar noted that at low concentrations of sulphur atoms in ZnO films, the hexagonal wurtzite structure is preserved, and at high concentrations, new phases such as ZnS, S, $Zn_2(OH)_2 SO_4$, $ZnSO_3$ and $ZnSO_4$ are formed. In the studies of H. Sato, H. Nanto, S. Tanaka, as well as S.B. Zhang, S.H. Wei, and A. Zunger, it was found that doping with sulfur atoms can reduce the bandgap width of ZnO material, increase

⁷ The Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated July 10, 2020, No. PQ-4779 “On additional measures to improve the energy efficiency of the economy and reduce the dependence of economic sectors on fuel and energy products through the mobilization of existing resources” / <https://lex.uz/docs/7604835>

⁸ The Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated March 19, 2021, No. PQ-5032 “On measures to improve the quality of education and to develop scientific research in the field of physics” / <https://lex.uz/docs/7575236>

⁹ The Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated September 9, 2022, No. PF-220 “On additional measures for the implementation of energy-saving technologies and the development of low-power renewable energy sources” / <https://www.lex.uz/uz/docs/7000477>

the stability of the structure, and enhance photosensitivity in the visible light spectrum. In the studies of H.H. Wang, S. Liu and P. Chang on ZnO nanowires doped with sulfur atoms and synthesised by electrochemical method, a decrease in ultraviolet radiation and an increase in luminescence in the green region of the spectrum were recorded, which is explained by an increase in the number of oxygen vacancies. The research group led by S.L. Hsu developed ZnO:S-based nanostructures for flexible nanogenerators, which demonstrated high mechanical sensitivity and also confirmed that the addition of sulfur as an alloying element improves the flexibility of the structure.

Fundamental and applied studies of semiconductor oxide materials, in particular ZnO-based structures, are also carried out in our republic under the leadership of Academician S.Z. Zainabidinov. These studies are aimed at controlling the structural, electrophysical and photovoltaic properties of ZnO by doping with various metallic and non-metallic elements. In addition, under the guidance of Professor Sh.U. Yuldashev the possibilities of synthesis of p-i-n structures based on ZnO by ultrasonic sputtering method were studied, and electroluminescence was detected in these structures. This phenomenon is related to defect states arising in ZnO crystals as a result of doping and is considered as a promising solution for new generation electronic devices.

As a result of these studies, the possibility of controlling the unique physical properties of ZnO-based thin films by introducing various impurity sulfur atoms and forming heterostructures on their basis has been explored to a certain extent. However, the external factors affecting the properties of these films (such as temperature, radiation, pressure and others) have not been comprehensively investigated so far. In this regard, one of the urgent tasks remains the expansion of scientific research in this direction and the search for profound solutions to existing problems.

Relation of the thesis research with the plans of research works of the higher educational institution where the thesis was carried out. The present dissertation research was carried out during 2017-2020 within the framework of the scientific project of Andijan State University under the number OTM-2-68 on the topic: “Mechanisms of formation of micro- and nano-formations of the type of impurities and defects in crystals and their role in the creation of multilayer structures with a wide functional potential”.

The aim of the research: growth of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films on single-crystalline silicon substrates using an improved method of ultrasonic spray-pyrolysis, as well as study of their structural, morphological and optical properties and investigation of the effect of γ -radiation on these films.

Research objectives:

To determine the optimal technological conditions for growing $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films on single-crystalline silicon substrates by ultrasonic spray pyrolysis;

to investigate the morphology, geometrical dimensions and phase structure (lattice type and space group) of nanocrystals formed on the surface of the grown films;

study the effect of γ -radiation ($5 \cdot 10^6$ rad) on $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films and nanostructures, and analyse its effect on structural and morphological changes;

determine electrophysical changes (electrical conductivity, concentration and mobility of charge carriers) in $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films under the action of γ -radiation;

evaluate and analyse changes in the forbidden band width of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films under the influence of γ -radiation on the basis of optical bandwidth data.

The object of the study is $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films grown on single-crystal silicon substrates by ultrasonic spray pyrolysis.

The subject of the study is to determine the optimal technological conditions for growing $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films by ultrasonic spray-pyrolysis, to study the effect of γ -radiation ($5 \cdot 10^6$ rad) on $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films and various crystallites formed in them, as well as to analyse the changes in the forbidden band width of these films.

Research Methods. The following methods were used in the study to fulfil the set objectives: XRD-7000 X-ray diffractometer was used for structural analysis of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films; morphological studies were carried out using IT200 scanning electron microscope (JEOL) and Solver Next atomic force microscope; Cary Eclipse spectrometer was used to determine the optical properties, and HMS-7000 was used to study the electrophysical characteristics of the samples. The experimental results obtained were analysed and visualised using OriginPro 2022 software.

Scientific novelty of the study:

For the first time by ultrasonic spray pyrolysis method (vibration frequency 2,4 MHz, pyrolysis time 30 min, optimal distance between substrate and spray head - 30 cm, heater temperature is stable at 500 °C), $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films were grown on silicon substrates with crystallographic orientation (100), consisting of hexagonal unit cells with lattice parameters $a = b = 0,3265$ nm and $c = 0,5212$ nm;

as a result of X-ray diffraction studies, it was found that nanocrystals with cubic unit cell ($a = 0,7598$ nm) and sizes ranging from 57 nm to 200 nm were formed on the surface of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films;

it has been established that under the influence of γ -irradiation, the crystal lattice constant of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ thin films increases by 0,031 nm, while the geometric size of nanocrystals formed in their near-surface regions decreases by 12 nm;

after γ -irradiation at a dose of $5 \cdot 10^6$ rad, the specific resistivity of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films decreases to 3,5 Ohm·cm, the mobility of charge carriers decreases to 0,13 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, and their concentration increases to $8,1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$;

it has also been revealed that due to the increase in vacancies, dislocations, and deep-level defects in $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ layers under γ -irradiation, the band gap narrows from 3,26 eV to 3,19 eV.

Practical results of the research are as follows:

on the basis of the analysis of optical properties of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films the prospects of their application as a thin-film layer in photovoltaic systems, and also as a photoactive coating and a sensor element in optoelectronic devices have been revealed.

The sensitivity of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films to γ -radiation has been studied, which allows us to recommend them as promising materials for radiation sensors (monitors).

Reliability of the research results. The obtained results are based on the use of modern high-precision instruments used in the world scientific practice, including X-ray diffractometer, atomic force microscope, as well as installations for the analysis of electrical and optical properties.

The results are compared with the data given in the scientific literature and obtained using approved and independent complex experimental methods. Their reproducibility, consistency with general theoretical concepts of physical phenomena, as well as analyses from the standpoint of general physical laws and IT-technologies ensure scientific validity and reliability of conclusions.

Scientific and practical significance of the results of the study.

The scientific significance of the research results lies in the scientifically grounded identification of the structural, morphological, and optical transformation patterns occurring in $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ -based transparent thin films under γ -irradiation, as well as in the applicability of the obtained parameters and analytical findings for studying the physical properties of other radiation-sensitive materials and conducting related research.

The practical significance of the research results is explained by the potential application of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ -based materials in the production of highly efficient multifunctional photodetector electronic devices, transparent electronics, and solar cells, as active thin-film layers in photovoltaic systems, photoactive coatings or sensing elements in optoelectronic devices, and as components of radiation monitoring systems.

Implementation of the research results.

Based on the obtained scientific and practical results on the growth of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films on single-crystalline silicon substrates using advanced ultrasonic spray pyrolysis, as well as the study of the effect of γ -radiation on their structural, morphological and optical properties:

It was found that a decrease in the size of the formed nanocrystallites was observed in p -type $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films under γ -irradiation with a dose of $5 \cdot 10^6$ rad in p -type $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films, as a result of which the resistivity decreases from $\rho = 16,2$ Ohm·cm to 12,7 Ohm·cm, the mobility of the main charge carriers - from $\mu = 0,31$ cm²/V·s to 0,18 cm²/V·s, and their concentration increases from $n = 1,83 \cdot 10^{18}$ to $2,64 \cdot 10^{18}$ cm⁻³. The specified scientific results and methods of their determination were used in the development of semiconductor electronic devices at the enterprise JSC “PHOTON” (JSC “FOTON”, Certificate No. 45 dated March 17, 2025).

Application of the obtained data contributed to the manufacture of experimental samples of electronic devices and improvement of their electrophysical characteristics;

The methods of growing $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ films, consisting of hexagonal elementary cells with lattice constants $a = b = 0,3265$ nm and $c = 0,5212$ nm, with silicon substrates belonging to the (100) crystallographic direction, by ultrasonic spray pyrolysis, as well as determining the decrease in the band gap from 3,26. eV to 3,19 eV due to an increase in the number of vacancies, dislocations, and deep-level defects in these films under the influence of γ -irradiation, were used in the textbook "Diffusion of atoms in semiconductors" authored by Professor Sh.Kh. Yolchiev of the Andijan State Pedagogical Institute (Andijan State Pedagogical Institute, May 5, 2025, reference No. 04-394). The scientific results obtained allowed students to expand their terminological understanding of modern semiconductor physics.

Approbation of the research results. The main results of the dissertation work were discussed at 18 scientific-practical conferences, 8 of them - at the international level and 10 - at the conferences of the republican scale.

Publications of the research results. According to the results of the research 30 scientific works have been published, 11 of them - in scientific editions recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations, 4 articles have been published in foreign journals included in the Scopus database, and also 1 certificate of registration of the computer programme on the subject of the research has been received.

Structure and scope of the thesis. The dissertation consists of an introduction, four chapters, general conclusions, and a list of references. The total length of the dissertation is 124 pages.

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

I bo'lim (1 часть; part 1)

1. Зайнабидинов С.З., Юлдашев Ш.У., Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю. Рентгенодифракционные и электронномикроскопические исследования металлооксидных пленок, полученных методом ультразвукового спрей-пиролиза // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2024, №1 (112). – С. 78-92. (Scopus:IF: 0.70).
2. Zainabidinov S., Boboev A.Y., Yunusaliyev N.Y. Effect of γ -irradiation on structure and electrophysical properties of S-doped ZnO films // East European Journal of Physics. – 2024, №2. – P. 321–326. (Scopus:IF: 1).
3. Zainabidinov S.Z., Boboev A.Y., Usmonov J.N., Yunusaliyev N.Y., An optimized ultrasonic spray pyrolysis device for the production of metal oxide films and their morphology // East European Journal of Physics. – 2024, №3. – P. 293-297. (Scopus:IF: 1).
4. Yunusaliyev N.Y. The gas-sensitive properties of tin dioxide films // East European Journal of Physics. – 2024, №4. – P.432-439. (Scopus:IF: 1).
5. Зайнабидинов С.З. (академик АН РУз), Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю. Структурные особенности пленок ZnO на кремниевых подложках // Журнал. Доклады Академии наук Республики Узбекистан (ДАН). – 2023, №3. – С. 64-71 (01.00.00 № 7)
6. Зайнабидинов С., Юлчиев Ш.Х., Бобоев А.Й., Халлоков Ф.К., Юнусалиев Н.Ю. Топология поверхности тонких плёнок $ZnO_{1-x}S_x$, полученных методом ультразвукового спрей-пиролиза // Uzbek Journal of Physics. 2023 – том. 25, №2. – С.54-59. (01.00.00 № 5).
7. Mansurov X.J., Yunusaliyev N.Y., Mamirov M., Ismatullaeva M., Mahmudov X.A., Jumaeva M.U., Mamadaliev S. n-ZnO/p-Si geterotuzilmasining optoelektronik xususiyatlari // Scientific Bulletin of NamSU-Научный вестник НамГУ-NamDU ilmiy axborotnomasi. – 2023, №5. – B. 3-9. (01.00.00 № 16)
8. Zainabidinov S.Z., Mansurov H.J., Yunusaliyev N.Y. Photoelectric Properties of n-ZnO/p-Si Heterostructures // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research // Maxsus son. – 2023. – P. 34-39. (01.00.00 № 13)
9. Юлдашев Ш., Зайнабидинов С., Юнусалиев Н. Ультрозвуковая технология получения и свойства плёнок ZnO <S> // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research. 2022. Vol. 4, Iss. 2,– P. 60-64. (01.00.00 № 13).
10. Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю., Абдурахимов Д.П. Рентгеноструктурные исследования металлооксидных пленок SnO_2 , ZnO и Zn_2SnO_4 // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research. 2022. Vol. 4, Iss. 1. – P. 53-55. (01.00.00 № 13).
11. Mansurov X.J., Mahmudov X.A., Yunusaliyev N.Y. Световые характеристики гетероструктуры n-ZnO/p-Si // Semiconductor Physics and Microelectronics. 2022. Vol. 4, Iss. 6. – P. 33-37.

II бўлим (2 часть; part 2)

12. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю. Электрофизические свойства металлооксидных пленок ZnO, легированных S // Yarimo‘tkazgichlar fizikasining fundamental va amaliy muammolari: yechimlari va istiqbollari mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. – Namangan, 4–5-oktabr, 2024. – В.127-129.
13. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю. Морфологические исследования металлооксидных пленок ZnO, легированных S // Yarimo‘tkazgichlar fizikasining fundamental va amaliy muammolari: yechimlari va istiqbollari mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. – Namangan, 4–5-oktabr, 2024. – В.147-149.
14. Yunusaliyev N.Y. γ -nurlanishining ZnO<S> yurqa metalloksid plyonkalarining strukturaviy xususiyatlariga ta’siri // “Fizikaning zamonaviy muammolari va rivojlanish istiqbollari” I xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. – Namangan, 22–23-oktabr, 2024-yil. – В.119-121.
15. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю. The morphological topology of the surface of ZnO_{1-x}S_x thin films // “Fizikaning zamonaviy muammolari va rivojlanish istiqbollari” I xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. – Namangan, 22–23-oktabr, 2024. – В.121-123.
16. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю. Совершенствованное устройство ультразвукового спрей-приолиза // Mikro va nanotexnologiya, yangi materiallar olishning zamonaviy holati va istiqbollari. Xalqaro konferensiya. – Qarshi, 30–31-oktabr, 2023. – В.32-35.
17. Зайнабидинов С.З., Гуломов Б.Д., Юнусалиев Н.Ю. Исследование фотоэлектрических свойств гетероструктур металлооксид-кремний // II-Международная Конференция «Фундаментальные и Прикладные Проблемы Физики Полупроводников, Микро- и Нанoeлектроники». – Ташкент, 27-28 октября, 2023. – С.11-13.
18. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю., Уринбоев Ж. Рентгенодифракционные исследования металлооксидных пленок ZnO<S> после гамма облучения // II-Международная Конференция «Фундаментальные и Прикладные Проблемы Физики Полупроводников, Микро- и Нанoeлектроники». – Ташкент, 27-28 октября, 2023. – С.243-245.
19. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю. Рентгеноструктурные исследования металлооксидных пленок ZnO<S> // Материалы международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах». – Фергана, 2023. – С.13.
20. Зайнабидинов С.З., Бобоев А.Й., Юнусалиев Н.Ю. Структурные особенности металлооксидных пленок SnO₂, ZnO и Zn₂SnO₄ // “Физика ва электрониканинг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани. – Тошкент, 3–4 ноябрь, 2023. – С.175-177.
21. Yunusaliev N.Y., Mansurov X.J., Mamirov M., Ismatullaeva M., Jumaeva M.U., Mamadaliev S. n-ZnO/p-Si Geterotuzilmasining optoelektronik xususiyatlari

- // Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni (RIAK-XVI-2023), 28–29-aprel, 2023. – B.216-219.
22. Yunusaliyev N.Y., Mansurov X.J., Mamirov M., Ismatullaeva M., Jumaeva M.U., Mamadaliev S. *n-ZnO/p-Si* geterotuzilmasining volt-amper xarakteristikasi // Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni (RIAK-XVI-2023), 28–29-aprel, 2023. – B.224-230.
23. Мансуров Х.Ж., Махмудов Х.А., Юнусалиев Н.Ю. Фотоэлектрические свойства гетероструктур *n-ZnO/p-Si*. // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг II республика илмий анжумани. (ЁОФТРИА- II) материаллари. 20-21 май, 2022. – Б.185-187.
24. Йулчиев Ш.Х., Махмудов Х.А., Юнусалиев Н.Ю. Вольтамперная характеристика гетероструктуры *n-ZnO/p-Si* в фотогальваническом режиме. Ёш олимлар ва физик талабаларнинг II республика илмий анжумани. (ЁОФТРИА- II) материаллари. 20-21 май, 2022. – Б.82-85.
25. Йулчиев Ш.Х., Бобоев А.Й., Махмудов Х.А., Юнусалиев Н.Ю. Морфологические и фотоэлектрические свойства *n-ZnO/p-Si* гетероструктуры “Тенденции развития физики конденсированных сред” // Международной научной конференции. – Фергана, 25 май, 2021. – С.79-82.
26. Йулчиев Ш.Х., Махмудов Х.А., Юнусалиев Н.Ю. Яримўтказгичлар сиртига металлооксидли юпка пардалар ўтказиш усули // “Замонавий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим ва инновация интеграцияси” Республика илмий-амалий конференцияси материаллари. – Андижон, 24–25 декабрь, 2020. – Б.252-255.
27. Yunusaliyev N.Y. I–V characteristics of *n-ZnO/p-Si* heterostructures // Форум посвящается обсуждения статуса и перспектив развития физика. Международный форум. – Наманган, 2020. – С.124-126.
28. Rembeza1 E.S., Yunusaliyev N.Y. Photoelectric properties of *n-ZnO/p-Si* heterostructures // Форум посвящается обсуждения статуса и перспектив развития физика. Международный форум. – Наманган, 2020. – Б.48-50.
29. Mansurov H.J., Boboyev A.Y., O'rinboyev M.I., Yunusaliyev N., Tojimuhammadov A.K. Zol-gel metodi asosida metaloksid qatlamlar olish va uning kimyoviy asoslari // «Innovative ideas, developments in practice: problems and solutions» International scientific and practical online conference. – Andijan, 27-28 may, 2020. – P.25-27.
30. Boboyev A.Y., Yunusaliyev N.Y. Ultratovushli sprej prioliz qurilmasini avtomatlashtirish // O'zbekiston respublikasi adliya vazirligi № DGU 22925. O'zbekiston respublikasining Dasturiy mahsulot davlat reysterida 14.02.2023-y. ro'yxatdan o'tgan.

Avtoreferatning o'zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari Farg'ona davlat texnika universiteti muassisligidagi "Sceintific technical journal" jurnali tahririyatida tahrirdan o'tkazildi. (1.07.2025-y.)

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