

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

ILG‘OR TEXNOLOGIYALAR MARKAZI

DAVRONOV MA‘MURJON HAMROYEVICH

**IMPULS-DAVRIYLI LAZER NURI TA‘SIRIDA RUX VA TITAN
OKSIDLARINING MIKRO- VA NANOSTRUKTURALARIDA
IKKILAMCHI NURLANISH**

01.04.05 – Optika

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

Samarqand – 2025

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

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

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

Davronov Ma‘murjon Hamroyevich

Impuls-davriyli lazer nuri ta‘sirida rux va titan oksidlarining mikro- va nanostrukturalarida ikkilamchi nurlanish..... 3

Давронов Маъмуржон Хамроевич

Вторичное излучение в микро- и наноструктурах оксидов цинка и титана при импульсно-периодическом лазерном возбуждении 21

Davronov Mamurjon Khamroevich

Secondary radiation in micro- and nanostructures of zinc and titanium oxides under pulse-periodic laser excitation..... 41

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ

List of published works 45

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

ILG‘OR TEXNOLOGIYALAR MARKAZI

DAVRONOV MA‘MURJON HAMROYEVICH

**IMPULS-DAVRIYLI LAZER NURI TA‘SIRIDA RUX VA TITAN
OKSIDLARINING MIKRO- VA NANOSTRUKTURALARIDA
IKKILAMCHI NURLANISH**

01.04.05 – Optika

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

Samarqand – 2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.4.PHD/FM1193 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Ilg'or texnologiyalar markazi va Rossiya Fanlar akademiyasining P.N.Lebedev nomidagi Fizika institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.samdu.uz) va «Ziyonet» Axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Raxmatullayev Ilyos Arzimurodovich
fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

Rasmiy opponentlar:

Xushvaqtoev Hakim Abdulhaqovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Kasimova Guzal Karimovna
fizika-matematika fanlaridan falsafa doktori (PhD), dotsent

Yetakchi tashkilot:

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti (O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi)

Dissertatsiya himoyasi Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti huzuridagi PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil «26» XII soat 10⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 140104, Samarqand shahri, Universitet xiyoboni, 15-uy. Tel.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; faks: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti Muhandislik fizikasi instituti, 1-qavat, 114-xona).

Dissertatsiya bilan Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (104 -raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 140104, Samarqand shahri, Universitet xiyoboni, 15-uy. Tel.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; faks: (99866) 239-11-40).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil «11» XII kuni tarqatildi.
(2025-yil «11» XII dagi 104 raqamli restr bayonnomasi).



M.X.Ashurov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi,
f.-m.f.d., akademik

R.M.Rajabov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash ilmiy kotibi,
f.-m.f.n., dotsent

D.I.Semenov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash huzuridagi
Ilmiy seminar raisi,
f.-m.f.d., dotsent

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Bugungi kunda dunyoda titan dioksidi (TiO_2) va rux oksidi (ZnO) asosidagi mikro- va nanostrukturalarning fizik xususiyatlarini o'rganishga qiziqish tobora ortib bormoqda. Masalan, TiO_2 quyosh elementlari, yorituvchi va o'z-o'zini tozalovchi qoplamalarni ishlab chiqarishda, fotokatalizda keng qo'llaniladi, shuningdek, gaz sensorlarida faol komponent hisoblanadi. ZnO katta eksiton energiyasi (60 meV) va yuqori mexanik va termik chidamliligi tufayli nanolazerlar, pyezoelektrik nanogeneratorlar, quyosh elementlari, gaz sensorlari va boshqa nanoelektronika elementlari hamda qurilmalarini yaratish uchun o'ta muhim material hisoblanadi.

Hozirgi vaqtda mikro- va ayniqsa, nanostrukturalar (xususan, mikro- va nanokukunlar) ularni sintez qilishning yangi usullari ishlab chiqilishi hamda keng amaliy qo'llanilishi tufayli katta qiziqish uyg'otmoqda. Bunday namunalarni batafsil o'rganish uchun ushbu tizimlarning tarkibiy xossa va xususiyatlari to'g'risida aniq ma'lumotlarga ega bo'lish kerak. Tarkibiy element o'lchami nanometr diapazonigacha kamayganda materiallarning monokristallardan farq qiladigan yangi fizik-mexanik xossa va xususiyatlari namoyon bo'ladi. Bunda ularni o'rganishning klassik usullari ko'plab cheklovlarga ega bo'lganligi sababli, tadqiqotlarning yangi, universal va arzon usullarini ishlab chiqishga bo'lgan ehtiyojni oshiradi.

Mamlakatimizda mikro- va nanotexnologiyalarni tadqiq etish, qo'llash va rivojlantirishga ham katta e'tibor qaratilmoqda. Xususan, O'zbekiston Respublikasi olimlari tomonidan mikro- va nanostrukturaviy materiallarni tadqiq etish bo'yicha eng muhim natijalarga erishildi. Bunday tuzilmalarning o'lchov xususiyatlari, shuningdek, ularning optik va nochiqli optik xususiyatlari aniqlandi. O'zbekiston Respublikasining 2030 yilgacha ilm-fanni rivojlantirish konsepsiyasida nazarda tutilgan talablarga muvofiq, respublikada ilm-fan va texnologiyalarni muvaffaqiyatli rivojlantirish uchun katta ahamiyatga ega bo'lgan fundamental vazifalarni hal etishga bag'ishlangan tadqiqotlar muhim ahamiyatga ega. Zamonaviy uskunalar yordamida titan va rux oksidlari asosidagi mikro- va nanostrukturalarning morfologiyasi, tuzilishi va optik xossalarni o'rganish bo'yicha muhim natijalar olingan.

Mazkur dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Prezidentining qator farmon va qarorlarida, shu jumladan, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 8-oktabrdagi "O'zbekiston Respublikasi oliy ta'lim tizimini 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi PF-5847-son Farmonida, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-dekabrdagi fizikani rivojlantirish oldiga qo'yilgan asosiy vazifalar bo'yicha Oliy Majlisga Murojaatnomasida, 2020-yil 19-martdagi "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-5032-son va 2022-yil 13-yanvardagi "Samarqand davlat universiteti faoliyatini yanada takomillashtirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi PQ-82-son qarorlarida hamda ushbu faoliyatga taalluqli boshqa normativ-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalar ijrosini ta'minlash uchun muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Ushbu tadqiqot ishi Respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining II. “Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Titan va rux oksidlari asosidagi mikro- va nanostrukturalarning morfologik, strukturaviy, optik xossalari dunyoning ko‘plab olimlari tomonidan o‘rganilgan, masalan, Rossiya olimlari (Gorelik V.S., Mixaylov M.M., Neshchimenko V.V., Averin I.A., Tarasov A.P.), AQSh (Clark D.E., Fonoberov V.A., Folz D.C.), Yaponiya (Ohsaka T., Izumi F.), Polsha (Šćepanović M.J., Grujić-Brojčín M.), Belarus (Burakov V.S., Tarasenko N.V.), Ukraina (Lisenko O.G., Maxniy V.P.), Xitoy (Dong H., Zhou B.), Italiya (Bassi A., Cattaneo D.), Hindiston (Sridevi D., Rajendran K.V.), O‘zbekiston (Kurbanov S.S., Ibragimova E.M., Tashmetov M.Y.) olimlari va boshqa mutaxassislar tomonidan.

Xususan, mikroto‘lqinli sintez yordamida nazorat qilinadigan mikrostruktura bilan tartibga solingan ZnO tuzilmalari olingan va ushbu tuzilmalarning fizik xossalari o‘rganilgan. Tadqiqotlar natijasida ZnO va TiO₂ mikro- va nanokristallarida bir qator qonuniyatlar aniqlandi hamda bunday nanostrukturalarning ko‘plab fizik xususiyatlari (strukturaviy, magnit, optik, issiqlik) yuza va kvanto‘lchamli ta’sirlar tufayli monokristall xususiyatlaridan keskin farq qilishi aniqlandi. Yupqa ZnO plyonkalarining elektr va optik xossalari kompleks tekshirildi. ZnO va TiO₂ nanoo‘lchamli strukturalarining sintez qilingan namunalarning tarkibiy va fazaviy xususiyatlari o‘rganildi. Xususan, ZnO nanokristallaridagi 390 va 520 nm fotolyuminesentsiyasi (FL)ning xarakterli maksimumlari eksiton nurlanishi va nuqsonlar bilan bog‘liqligi aniqlandi.

Sintez va fizik xossalarni o‘rganish bo‘yicha nashr etilgan ko‘plab adabiyotlar bo‘lishiga qaramasdan, ZnO va TiO₂ mikro- va nanostrukturalarining ko‘plab xossalari O‘zbekistonda ham, xorijda ham hali kam o‘rganilgan. Masalan, zarrachalar o‘lchamining kukunning optik xususiyatlariga ta’siri bo‘yicha masalalar yetarli darajada o‘rganilmagan. Bugungi kunda foton tuzoqlarida mikro- va nanostrukturalarda ikkilamchi nurlanish (IN) spektrlarini shakllantirishning qonuniyatlari va xususiyatlari to‘g‘risida ma’lumotlar nihoyatda kam.

Shunday qilib, ushbu muammolarning dolzarbligi va yetarli darajada o‘rganilmaganligi muallifning titan va rux oksidlari asosidagi mikro- va nanostrukturalarning morfologik, tarkibiy, optik xosalarini o‘rganish bo‘yicha tadqiqotlar o‘tkazishiga asos bo‘ldi.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy–tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Ilg‘or texnologiyalar markazining ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga asosan va davlat ilmiy-texnik dasturlari bo‘yicha «O‘tish davri metallar va ularning oksidlari asosida nanostrukturalangan katalizatorlar olish texnologiyasini ishlab chiqish» PZ-2017092438-son loyihasiga muvofiq bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi. Tadqiqotning maqsadi impuls-davriyli lazer nuri ta'sirida rux va titan oksidlarining mikro- va nanostrukturalarida ikkilamchi nurlanish spektrlarining shakllanish qonuniyatlarini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

impuls-davriyli lazer nuri ta'sirida yarimo'tkazgichlar va dielektriklarning mikro- va nanokukunlarida ikkilamchi nurlanish spektrlarini o'rganish uchun rezonatorli kyuvetalar (fotonli tuzoqlar) va optik-tolali texnikaning yangi turlari asosida zaif optik signallarni qayd etishning eksperimental metodikasini ishlab chiqish va takomillashtirish;

mikroto'lqinli sintez usulida olingan rux oksidining yuza va tarkibi morfologiyasini o'rganish hamda ushbu strukturalarda fotoluminessentsiya va yorug'likning kombinatsion sochilish spektrlarini shakllanish mexanizmlarini aniqlash;

foton tuzoqlarda rux va titan oksidlarining mikro- va nanostrukturalarida «kombinatsion opalessentsiya» effektining vujudga kelish shart-sharoitlarini aniqlash hamda kombinatsion sochilishning samaradorligini oshirish;

rux va titan oksidlarining mikro- va nanostrukturalarida bir va ikki fotonli uyg'otilgan lyuminessentsiya spektrlarini qiyosiy tahlil qilish hamda ularning xususiyatlarini aniqlash;

kukunlar dispersligining ikkilamchi nurlanish signallarini oshirish samaradorligiga ta'siri sharoitlarini o'rganish;

xona haroratida lazer nurining turli intensivliklarida rux oksidining mikro- va nanostrukturalari lyuminessentsiyasi ultrabinafsha polosasi spektrlarining shakllanish tabiatini tadqiq etish.

Tadqiqotning ob'yekti sifatida rux va titan oksidlarining mikro- va nanostrukturalari tanlab olingan.

Tadqiqotning predmeti impuls-davriyli lazer lazer nuri ta'sirida titan va rux oksidlari mikro- va nanostrukturalarining morfologik va strukturaviy xossalari hamda ikkilamchi nurlanish spektrlarining shakllanish qonuniyatlarini hamda fizik mexanizmlarini o'rganishdan iborat.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqotda zamonaviy fizik-kimyoviy tahlil usullari qo'llanildi: element tarkibini aniqlash uchun rentgen-flyuorestsent diagnostika, zarrachalar morfologiyasini o'rganish uchun elektron mikroskopiya, shuningdek mikro va nanostrukturalarning optik xususiyatlarini aniqlash maqsadida fotolyuminessent va Raman spektroskopiyasidan foydalanildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

yangi modifikatsiyadagi rezonatorli kyuvetalar – fotonli tuzoqlar va optik-tolali texnika elementlarini qo'llashga asoslangan holda kuchsiz optik signallarni qayd etish bo'yicha eksperimental metodika ishlab chiqilgan va takomillashtirilgan;

mikroto'lqinli parchalash usuli bilan sintez qilingan ZnO mikrostrukturalarining morfologik parametrlari va strukturaviy tuzilishini kompleks tahlili o'tkazilgan hamda ushbu namunalarda fotoluminesentsiya va kombinatsion sochilish spektrlarining shakllantirish mexanizmlari aniqlangan;

ZnO zarrachalarining xarakterli o‘lchamlarining kamayishi ultrabinafsha fotolyuminesensiya maksimumining qisqaroq to‘lqinlar sohasiga siljishi – kvant-o‘lchamli effektlarning namoyon bo‘lishi aniqlangan;

ilk bor foton tuzoqlarida rux va titan oksidlarining mikro- va nanostrukturalarida “kombinatsion opalesensiya” effektining vujudga kelish va kombinatsion sochilishning samaradorligini oshirish shartlari aniqlangan;

Rezonatorli kyuvetalarni qo‘llash TiO₂ va ZnO kukunlari uchun chiqish signalining kontrastligini oddiy kyuvetalarga nisbatan 10⁴÷10⁵ tartibga oshishi (kuchsiz optik jarayonlarning ko‘p cochilishi va rezonans kuchayishi) ta’minlangan;

ilk bor foton tuzoqlarida rux oksidi mikrostrukturalarida ultrabinafsha lyuminessensiya spektri uyg‘otuvchi nurlanishning intensivligiga bog‘liqligi aniqlandi: nurlanish intensivligi 10³ Vt/cm² bo‘lganda namunalarda spontan lyuminesensiyadan majburiy holatga o‘tish, ya’ni superlyuminesensiya holati kuzatilgan;

bir va ikki fotonli uyg‘otilgan lyuminessensiya spektrlari bir-biridan intensivligi, shakli va holati bilan farq qilishlari aniqlangan;

strukturalarning dispersligi ikkilamchi nurlanish spektrlarining shakllanishiga ta’sir qilishi kuzatilgan: namunalar o‘lchamining kichiklashi bilan ZnO lyuminesensiya polosasining maksimumi qisqa to‘lqin uzunligi tomon siljishi va TiO₂ mikrokukunlarida esa kombinatsion sochilish signalining intensivligi oshishi kuzatilgan.

Tadqiqotning amaliy natijasi quyidagilardan iborat:

Impuls-davriyli rejimda ishlaydigan lazer manbalari va rezonatorli kyuvetalar (fotonli tuzoqlar) asosida ishlab chiqilgan metodika fotoluminessensiya, yorug‘likning kombinatsion sochilishi hamda ularning nochiziqli analoglarining zaif signallarini ularning signallari intensivligini kuchaytirish orqali qayd etish imkonini beradi;

Taqdim etilgan metodika TiO₂ va ZnO ning iz miqdorlarini murakkab aralashmalar va geterogen materiallar tarkibida ularning ikkilamchi nurlanish spektrlari orqali samarali aniqlash imkonini beradi. Olingan natijalar fundamental va amaliy tadqiqotlarda qo‘llanilishi, shuningdek molekulyar spektroskopiya, kimyo, farmatsevtika va bo‘yoq-lak sanoatining texnologik jarayonlariga joriy etilishi mumkin.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi lazer spektroskopiyasining zamonaviy yuqori aniqlikda ishlaydigan usullardan, qurilmalar va asbob-uskunalardan, eksperimental ma’lumotlarni o‘rganish va qayta ishlash usullaridan va ularning yaxshi takrorlanuvchanligi, yuqori sezgir rentgen tahlili va elektron mikroskopiyadan foydalanilganligi, shuningdek boshqa tadqiqotchilarning ishlari bilan mos kelishligi tasdiqlanganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

O‘tkazilgan tadqiqotning ilmiy ahamiyati shundaki, olingan natijalar TiO₂ va ZnO ning mikro- va nanostrukturalarida impuls-davriyli lazer uyg‘otish sharoitida fotolyuminessent va Raman spektrlari shakllanishiga asos bo‘luvchi fizik jarayonlar haqidagi tasavvurlarni sezilarli darajada chuqurlashtiradi. Ish davomida

aniqlangan qonuniyatlar zarracha o'lchamiga xos effektlar, morfologik xususiyatlar va ularning tarkibiy nomutanosibligi ikkilamchi nurlanish spektrlari xarakteri hamda evolyutsiyasiga qanday ta'sir ko'rsatishini yaqqol namoyon etadi.

Ish davomida olingan eksperimental natijalar moddaning kondenslangan holatida kechadigan jarayonlar haqidagi zamonaviy tasavvurlarni kengaytiradi. Ular mikro- va nanostrukturalarning ikkilamchi nurlanish spektrlari shakllanishi, evolyutsiyasi va modifikatsiyasi mexanizmlarini aniqlashtirib beradi hamda optik javobning o'lcham omillari, disperslik darajasi va geterogen muhit xususiyatlari ta'sirida qanday o'zgarishini ko'rsatadi. Shu tariqa, ushbu ish turli morfologiya va zarracha o'lchamlariga asoslangan murakkab tizimlarning qonuniyatlarini tushunishga qo'shimcha hissa qo'shadi. Tadqiqot natijalari yangi funksional nanomateriallar va foton strukturalarini yaratishga oid keyingi nazariy va amaliy ishlar uchun asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundaki, ushbu dissertatsiya doirasida olingan ilmiy natijalar turli disperslik darajasiga ega moddalarning tuzilmasi va xossalarini maqsadli ravishda boshqarish imkonini beradi. Bu esa amaliyotda oldindan belgilangan fizik xususiyatlar majmuiga ega bo'lgan turli xil strukturalarni olish imkoniyatini yaratadi va bunday materiallar sanoat uchun katta ahamiyatga ega bo'ladi.

Tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy qilinishi. TiO₂ va ZnO asosidagi mikro- va nanostrukturalarning morfologik, strukturaviy va optik xossalarini o'rganish asosida:

titan oksidi asosidagi mikro- va nanostrukturalarning fotolyuminessensiya spektrlaridan hamda hosil bo'lgan spektrlarning ob'yekt o'lchamlariga bog'liqligi hamda rux oksidi mikrostrukturalarini turli intensivlikli nurlanishlar bilan uyg'otilganda hosil bo'lgan majburiy lyuminessensiya xususiyatlari bo'yicha natijalari №MUK-2021-47 raqamli "Moslashuvchan organik fotovoltaiik energiya: yangi portativ qayta tiklanadigan energiya manbai" (2012-2022-yy.) mavzusidagi davlat ilmiy-texnika dasturidagi xalqaro fundamental loyihada titan va rux oksidlarini organik fotovoltaiik elementlarda yarim shaffof elektrod sifatida qo'llash uchun ularning fotolyuminessent xossalari orqali strukturaviy defektlarini tushuntirish imkonini bergan (O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining 2024-yil 12-dekabrda 2/1255-2758-son Ma'lumotnomasi);

ilmiy natijalar Qozog'iston Respublikasi Fan akademiyasi Yadro fizikasi institutining "Sirdan kuchaytirilgan Raman spektroskopiyasi uchun innovatsion platformalarni ishlab chiqish" fundamental loyihasini bajarishda qo'llanilgan. Titan va rux oksidlari asosida ishlab chiqilgan mikro- va nanostrukturalar turli organik moddalar deteksiyasida kombinatsion sochilishning kuchaytirilgan spektroskopiyasi (SERS) uchun substratlar sifatida sinovdan o'tkazildi. Tajribalar ularning signalni kuchaytirishda yuqori samaradorligini tasdiqlab, organik molekulalarning past konsentratsiyasini sezgir aniqlashni ta'minladi va ilmiy natijalardan foydalanish bo'yoqlar va pestitsidlarni aniqlash chegarasini oshirish imkonini bergan (Qozog'iston Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutining 2024-yil 5-dekabrda Ma'lumotnomasi-Joriy etish dalolatnomasi);

tadqiqot natijalari “Ko‘p kanalli spektrometr yordamida zaif optik signallarni ro‘yxatdan o‘tkazish usuli” elektron dasturi ishlab chiqishga (O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligining 2024-yil 16-oktabrdagi DGU 42928-son sertifikat) va kuchsiz optik signallarni qayd etish imkonini beruvchi impuls-davriyli rejimda ishlaydigan lazer manbalari hamda rezonatorlar (fotonli tuzoqlar) bo‘yicha ma‘lumotlarni “60610400 - Dasturiy muhandislik” yo‘nalishi bo‘yicha “Fizika” o‘quv dasturiga kiritishga xizmat qilgan (O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta‘lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2024-yil 12-dekabrda 02/01-01-141-son Ma‘lumotnomasi).

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsion tadqiqotning asosiy natijalari 8 ta xalqaro va 2 ta respublika ilmiy-amaliy konferensiyalarida taqdim etilib, muhokama qilindi. Bu esa bajarilgan ishning yuqori dolzarbligidan dalolat beradi hamda olingan xulosalarning ilmiy asoslanganligi va ishonchliligini tasdiqlaydi.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi. Tadqiqot natijalari bo‘yicha 22 ta ilmiy ish chop etilgan, shundan 10 tasi recenzentli ilmiy jurnallarda. To‘rtta maqola xorijiy nashrlarda chop etilgan: ikkitasi Scopus bazasida indekslanadigan jurnallarda, yana ikkitasi esa RINC bazasiga kiruvchi nashrlarda. O‘zbekiston OAK tavsiya etgan respublika jurnallarida 6 ta maqola e‘lon qilingan. Tadqiqot materiallari asosida Adliya vazirligi tomonidan bitta sertifikat ro‘yxatdan o‘tkazilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to‘rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 129 betni tashkil qilgan bo‘lib, 48 ta rasm, 1 jadvalni o‘z ichiga oladi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari bayon etilgan, tadqiqot ob‘yekti, predmeti va tajriba usullari, shuningdek, tadqiqot mavzusining O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlari bilan bog‘liqligi hamda tadqiqotlarning ilmiy yangiligi, dissertatsiya ishi natijalarining ishonchliligi va ularning ilmiy-amaliy ahamiyati asoslangan, amaliyotga joriy qilinishi, respublika va xorijda tadqiqot ishining aprobatsiyasi, e‘lon qilinganligi haqida ma‘lumotlar hamda dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Titan va rux oksidlari asosidagi mikro- va nanostrukturalarning sirt morfologiyasi, tarkibiy xususiyatlari va optik xossalari”** nomli birinchi bobida rux va titan oksidlari nanostrukturalarini olish usullariga bag‘ishlangan adabiyotlar sharhini o‘z ichiga oladi, lazer nuri ta‘sirida rux va titan oksidlarining mikro- va nanostrukturalarida INni tadqiq etish sohasidagi eksperimental ishlar tahlil qilingan.

Mavjud nazariy va eksperimental ma‘lumotlarni tahlil qilish asosida o‘rganilgan obyektlarning mikro- va nanostrukturalarining INni tadqiq etishdagi asosiy muammolari aniqlandi. Yechimi topilmagan muammolar aniqlanib, ular asosida mazkur dissertatsiya ishining maqsad va vazifalari shakllantirildi.

Dissertatsiyaning «**Tadqiqot obyektlari va eksperimental usullar**» deb nomlangan ikkinchi bobida impuls-davriyli lazer nuri ta'sirida kukunsimon ob'yektlarda namunalar tayyorlash va ikkilamchi nurlanishni eksperimental tadqiqot metodikalari, shuningdek, moddalarda INning zaif signallari kuchaytirish haqida va impuls-davriyli rejimda ishlaydigan lazerli manbalar hamda rezonator kyuvetlari va stroboskopik tizimlar negizida qayd etish xususiyatlari borasida ma'lumotlar keltirilgan.

Tadqiqot ob'yektlari sifatida yuqori tozalikka ega bo'lgan TiO₂, ZnO mikro-va nanostrukturalari tanlab olingan. TiO₂ mikrokukunlari (markasi 7-3 OSCh) Sankt-Peterburgdagi «Krasniy ximik» zavodidan sotib olingan. Kukun asosan 29 dan 63 mkm gacha ko'ndalang o'lchamdagi sharsimon shakldagi zarralardan iborat. O'rganilgan namunalarning o'rtacha o'lchami 46 mkmni tashkil etadi.

ZnO nanokukunlari Aldrich katalogi bo'yicha (tozaligi 98%) sotib olingan. ZnO mikrostrukturalarini sintez qilish mikroto'lqinli parchalanish usuli bilan amalga oshirildi: 2 g ZnO kukuni (Aldrich, 98% tozalik) va 1 ml etilen glikol eritmasi 20 daqiqa davomida agat stupkasida aralashtirildi va maydalandi. So'ng 2 g miqdordagi aralash kukun alyuminiy oksiddan tayyorlangan tigelga normal atmosfera sharoitida xona haroratida mikroto'lqinli pechning markaziga joylashtirildi. Mikroto'lqinli pechda 15 daqiqa davomida 180° C da ishlov berildi. Natijada kukun uchquni boshladi va cho'zilgan tayoq shaklidagi (hajmli) qattiq struktura vujudga keladi. Olingan material asosan mikrometr o'lchamdagi geksagonal sterjen (tayoqcha) shaklidagi zarralardan iborat: zarralarning uzunligi 15÷18 mkm va kengliklari esa 1÷8 mkm ni tashkil etadi.

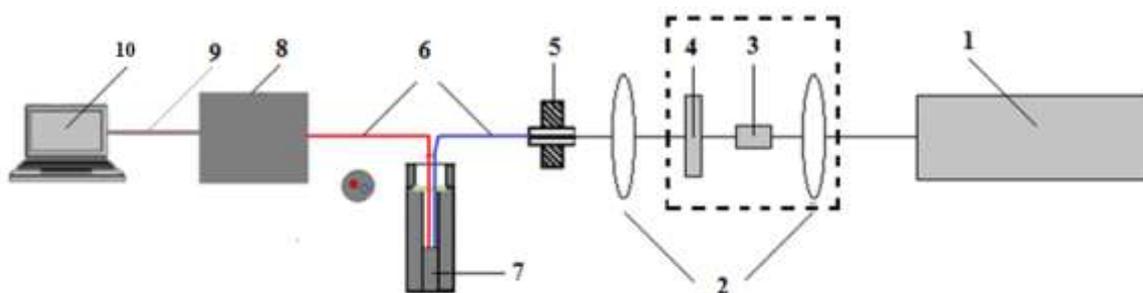
Namunalar yuza morfologiyasi skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) usuli bilan SEM-EVO MA 10 (Carl Zeiss, Germaniya) elektron mikroskopida o'rganildi. Elementlar tarkibi AZtec (Oxford Instruments, Buyuk Britaniya) markali energodispersion elementlar analizatori yordamida aniqlandi. Strukturasi va fazaviy tarkibi esa «PANalytical Empyrean» (Niderlandiya) rentgen difraktometri bilan tekshirildi.

Yorug'likning kombinatsion sochilish (YKS) va fotoluminessentsiya (FL) spektrlari uyg'otish va qayd qilish uchun tolali-optik metodikadan foydalanildi (1-rasm). Uyg'otuvchi manba sifatida spektrning ko'rinadigan sohasida 510,6 va 578,2 nm to'lqin uzunlikdagi generatsiya chiziqlariga ega bo'lgan mis bug'laridagi lazer (1) qo'llanildi. Generatsiya monoxromatik rejimda ($\lambda=510,6$ nm) amalga oshirilib, bunda lazerning sariq chiziqi ($\lambda=578,2$ nm) filtr bilan bostirildi. Lazerning uyg'otuvchi nuri (1) svetovod (6) yordamida namunali kyuveta (7) ichiga yo'naltirildi. IN diametri 100 mkm bo'lgan ikkinchi svetovod (6) yordamida tolali-optik minispektrometrning kirish tiriqishi (8)ga yo'naltirildi. Minispektrometrdan ikkilamchi nurlanish spektri haqidagi raqamli ma'lumotlar USB-kabel (9) orqali kompyuterga (10) uzatildi. Lazerning o'rtacha nurlanish quvvati 10 Vt. Nurlanish yuqori quvvat 10⁵ Vtga ega bo'lgan qisqa (20 ns) va katta chastotali (10⁴ Hz) impulslari orqali impuls-davriyli rejimida ishlaydi. FL spektrlarini o'rganish uchun eng samarali generatsiya chizig'i - lazer yashil chizig'i (510,6 nm)ning ikkinchi optik garmonikasi ($\lambda=255,3$ nm) ekanligi tajribada aniqlandi. Lazer nurlanishi yuqori quvvatli bo'lganligi uchun nohiziqli-

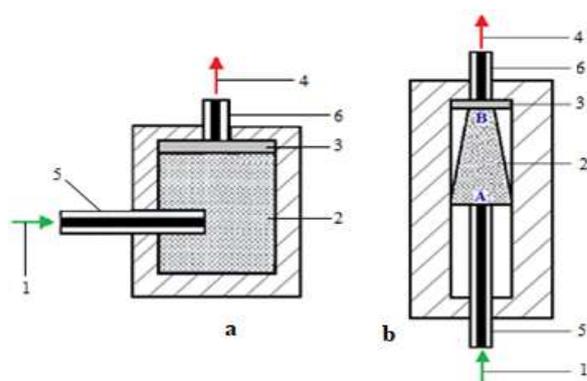
optik kristallar (BaB_2O_4)dan foydalanish orqali lazerning generatsiya liniyalarining chastotalarini samarali ikki baravar oshirish va qo‘shish imkonini beradi. Beqaror rezonator rejimida ishlaydigan mis bug‘laridagi lazerning nurini uzun fokusli linza bilan nohiziqli optik kristal BaB_2O_4 ga fokuslash mumkin. Kristal shunday kesilganki, sinxronizm sharti boshlang‘ich lazer nurlanish chastotalarini ikki baravar oshirish uchun bajariladi. Natijada kristalning chiqishida 255,3 nm to‘lqin uzunlikdagi ultrabinafsha (UB) nur paydo bo‘ladi. Lazerning ko‘rinadigan diapazondagi nurlanish chizig‘lari BaB_2O_4 kristalidan keyin joylashtirilgan absorbsion filter yordamida bartaraf etiladi.

Mikro- va nanostrukturalarda (ayniqsa, kukunlarda) IN signalini kuchaytirish uchun biz metall kyuvetalarning maxsus konstruksiyalarini ishlab chiqdik: rezonator kyuvetalar - fotonli tuzoqlar turli xil bo‘lib, ularning ichida nurl ko‘p marta qaytadi va sochiladi (2-rasm).

Foton tuzoqlaridan foydalanish g‘oyasi shundaki, tuzoqqa tushgan birlamchi (lazer) nurining katta qismi ikkilamchi nurlanishga o‘tadi. Kyuvetalarni metallardan yasash mumkin - ular da ikkilamchi nurlanish jarayonlarini uyg‘otish ehtimolligi o‘ta yuqoridir.



1-rasm. Eksperimental qurilmaning sxemasi. 1 – mis bug‘laridagi lazer; 2 – yig‘uvchi linza; 3 – nohiziqli BaB_2O_4 kristali; 4 – svetovod; 5 – svetovod tutqichi; 6 - svetovod; 7 – namunali rezonatorli kyuveta (foton tuzoq); 8 – FSD-8 minispektrometri; 9 – USB-kabel; 10 – kompyuter.



2-rasm. Silindrsimon (a) va konussimon (b) rezonatorli kyuveta (fotonli tuzog‘i) qurilmasi: 1 – uyg‘otuvchi nurlanish; 2 – tekshirilayotgan modda (kukun); 3 – absorbsion yorug‘lik filtri; 4 – ikkilamchi nurlanish; 5 – kiruvchi svetovod; 6 – chiquvchi svetovod.

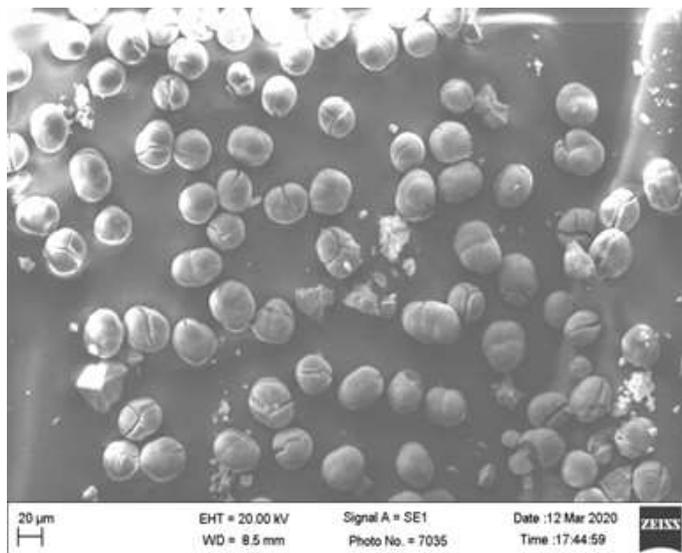
Tajriba jarayonida duraluminiydan tayyorlangan foton tuzog‘idan foydalanildi. Foton tuzog‘ining korpusida silindrsimon yoki konus shaklidagi bo‘shliq kesilgan bo‘lib u ishchi hajm bo‘lib, tekshirilayotgan modda bilan to‘ldiriladi. Lazerning uyg‘otuvchi nurlanishi (1) svetovod (5) yordamida kukun (2) joylashgan kyuveta ichiga yo‘naltiriladi.

Kyuvetaning ustiga chiquvchi svetovod (6) qo‘yilgan bo‘lib, uning yordamida ikkilamchi nurlanish (4) minispektrometrga yo‘naltiriladi. (5) va (6) svetovodlar diametri 100 mkm bo‘lgan kvardsdan tayyorlangan optik tolalardan iborat.

Tajribada konus shaklidagi kyuveta IN signallarini kuchaytirish uchun eng maqbul variant ekanligi aniqlandi. IN intensivligini qo‘shimcha ravishda oshirish zarur bo‘lganda, kyuva korpusining ustiga 2 mm qalinlikdagi OG-1 (3) absorbsion yorug‘lik filtri kiritildi. Yorug‘lik filtrlaridan foydalanish IN spektrida YKS signalini 800 sm^{-1} masofaga to‘liq o‘tkazgan holda lazer nurining intensivligini deyarli 100 baravar kamaytirish imkonini berdi. Yorug‘lik filtrlari «o‘tish» sxemasidan foydalanilgan, chunki, lazer nurlanishi kukunda ko‘p marta sochilishi tufayli uning intensivligi kyuvetadan chiqishda juda zaiflashgan.

Dissertatsiyaning **“Titan dioksidi mikrostrukturalarining morfologik, tarkibiy va optik xususiyatlari”** nomli uchinchi bobi xona haroratida titan dioksidi mikrokukunlarida IN spektrlarining shakllanish qonuniyatlarini o‘rganishga bag‘ishlangan hamda ushbu ob‘ektlarning morfologiyasi va strukturasi bo‘yicha eksperimental ma’lumotlar keltirilgan.

TiO₂ mikrokukunlarining SEM-tasviri 3-rasmda ko‘rsatilgan. O‘rganilayotgan material asosan o‘lchamlari 29 dan 63 mkmgacha bo‘lgan sferik shakldagi zarralardan iborat. O‘rganilgan namunalarning o‘rtacha o‘lchami 46 mkmga teng.



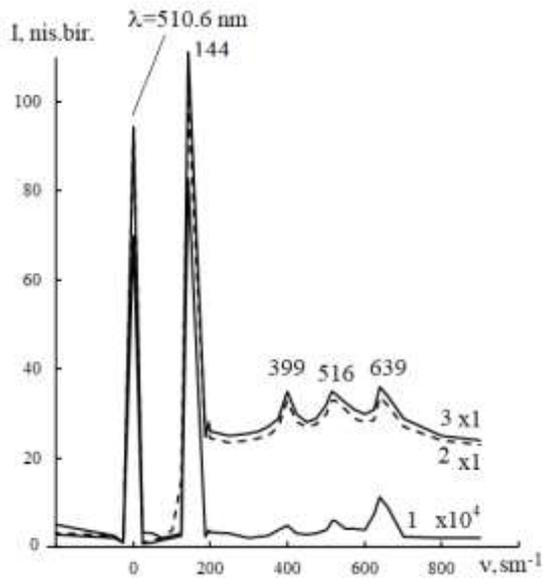
Energodispersion spektrometr yordamida o‘tkazilgan elementlar tahlili shuni ko‘rsatdiki, o‘rganilayotgan namunada kremniy va alyuminiy aralashmalari mavjud. Tekshirilayotgan TiO₂ kukunidagi aralashmalar tarkibi kiruvchi komponentlarning qiymatlari massa ulushlarida quyidagi qiymatlarga teng (%): Si – 1,6; Al – 0,8.

3-rasm. TiO₂ mikrokukunlarining SEM-tasviri.

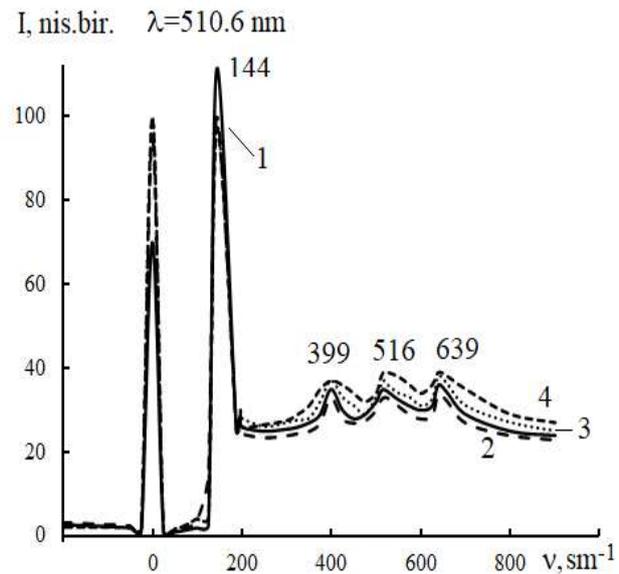
4-rasmda turli konstruksiyali kyuvetalarda bir xil rejimida olingan TiO₂ mikrokukunlarning YKS spektrlari keltirilgan. 1 - chiziq oddiy (an’anaviy) silindrsimon kyuveta (kyuvet diametri - 18 mm)da, 2 - chiziq silindrsimon bo‘shliqli rezonator kyuveta (2a-rasm)da va 3 - chiziq konus shaklidagi bo‘shliqli rezonator kyuveta (2b-rasm)da olingan (rezonator kyuvetlardagi kapillyar diametri 3 mm). Ushbu rasmdan ko‘rinib turibdiki, rezonator kuvetlardagi YKS signali katta diametrli oddiy silindrli kyuvetaga qaraganda 1000 barobar katta.

5-rasmda foton tuzoqlariga (2-rasm) joylashtirilgan TiO₂ mikrokukunlarining YKS spektrlari keltirilgan. Spektrlardan ko‘rinib turibdiki, foton tuzoqlari va svetovodlardan foydalanish IN spektrida uyg‘otuvchi nur intensivligiga nisbatan YKSning nisbiy intensivligini sezilarli darajada oshirish imkonini berdi. Bu foton yo‘lining uzayishi, ya’ni, uyg‘otuvchi nur fotonining tuzoqning devorlaridan ko‘p marta qaytishi va moddaning bir jinsli bo‘lmagan qismlaridan sochilish hisobiga

ro'yi beradi. Biroq, YKSning eng intensiv signallari TiO₂ mikrokkunlarining o'rtacha o'lchami 29 mkm bo'lgan hol uchun kuzatiladi (5-rasm, 1 - chiziq). Buning sababi shundaki, bunday strukturalarga mikrozzarrachalar o'lchamlariga nisbatan kichik bo'lgan to'lqin uzunlikdagi uyg'otuvchi nur tushganda, rezonatorlar (foton tuzoqlari)ning chegaralarida yorig'lik ko'p marta qaytishi natijasida nurlarning to'planishi bilan bog'liqdir. Bu bizning oldingi tajribalarimizda kuzatilgandek, TiO₂ mikrokkristallaridagi YKS intensivligining keskin oshishiga olib keladi (kombinatsion opalessensiya effekti). Adabiyotlar tahlillariga ko'ra, anataz YKS spektrida 3 ta E_g-maksimum - 144, 197 va 639 sm⁻¹ (ular mos ravishda E_g(1), E_g(2) va E_g(3) deb belgilangan), 2 ta B_{1g}-maksimum (399 va 519 sm⁻¹) va A_{1g}-maksimum (513 sm⁻¹) kuzatiladi. 513 va 519 sm⁻¹ yaqinida joylashgan maksimumlar faqat past haroratda namoyon bo'ladi, 197 sm⁻¹ maksimumi esa nisbatan kichik intensivlikka ega. Eng informativ va intensiv maksimum 144 sm⁻¹ (E_{g1}) dir. Bizning holatimizda, xona haroratida anatazning YKS spektriga xos bo'lgan barcha maksimumlarni kuzatdik.



4-rasm. TiO₂ mikrokkunlarining (d_{o,rt}=29 mkm) YKS spektrlari: (1) - oddiy silindrsimon kyuvetada, silindrsimon bo'shliqli rezonator kyuvetada (2) va konus shaklidagi bo'shliqli rezonator kyuvetda (3) (I_{uyg'}~10⁵ Vt/sm²).



5-rasm. Turli o'lchamdagi TiO₂ mikrokkunlarining mis bug'laridagi lazerning yashil chizig'i (λ_{uyg'}=510,6 nm) bilan uyg'otilgandagi YKS spektrlari: (1) - d_{o,rt}=29 mkm; (2) - d_{o,rt}=40 mkm; (3) - d_{o,rt}=51 mkm; (4) - d_{o,rt}=63 mkm (I_{uyg'}~10⁵ Vt/sm²).

Bir jinsli muhitda ikkilamchi nurlanish spektrida YKS intensivligining I_{YKS} tushayotgan nurga I_{uyg'} nisbatini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin

$$\frac{I_{YKS}}{I_{uyg'}} = \sigma N L \delta \Omega, \quad (1)$$

bu yerda σ – YKS samarali kesimi (σ≈10⁻²⁸ sm⁻²), N – zarrachalar konsentratsiyasi, L – namunada uyg'otuvchi nur fotoning o'tgan yo'li, Ω – o'rganilayotgan nurlanish burchagi. Uzunligi ~1 smga ega bo'lgan oddiy

kyuvetalarda kukunlarni tadqiqot etishda $\delta\Omega=1$ sr burchakda ikkilamchi nurlanish spektrida YKS intensivligining I_{YKS} tushayotgan nurga $I_{uyg'}$ nisbati quyidagiga teng:

$$\frac{I_{YKS}}{I_{uyg'}} \approx 10^{-6} \quad (2)$$

Shunday qilib, bir jinsli muhitli joylashgan kyuvetaning chiqishida YKS intensivligi uyg'otuvchi nurlanish intensivligidan million baravar sust.

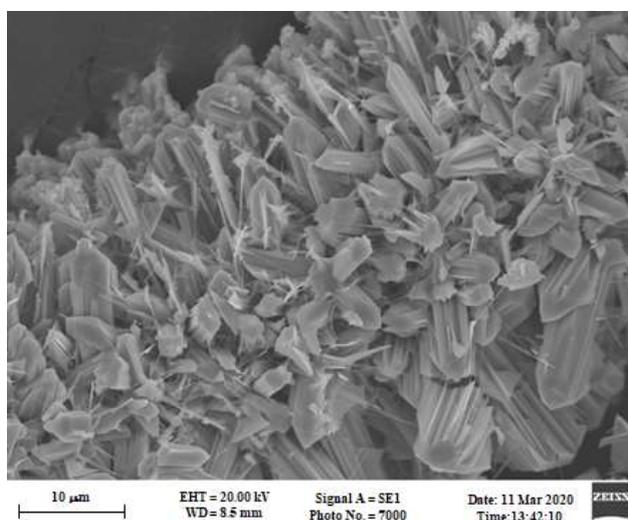
Bizning tadqiqotlarda $\sim 1 \text{ sm}^3$ ishchi hajmga ega bo'lgan fotonli tuzoq qollanilganda ultradispersli shaklda bo'lgan moddalarning IN spektridagi YKSning intensivligi oddiy (an'anaviy) kyuvetalar bilan taqqoslaganda $10^4 \div 10^5$ marotabaga oshishi aniqlandi:

$$\frac{I_{YKS}}{I_{uyg'}} \approx 10^{-1} \div 10^{-2} \quad (3)$$

Bu hol metall resonator kyuveta (fotonli tuzoq) ichida uyg'otuvchi nurlanish fotoninig bosib o'tgan to'liq yo'li $L \sim 10^4$ smga tengligi bilan tushuntiriladi. Shunday qilib, yaratilgan fotonli tuzoqlar qo'llanilganda ultradispersli shakldagi moddalarning YKS intensivligi kyuvetaning chiqish qismida oddiy kyuvetalar bilan taqqoslaganda $10^4 \div 10^5$ tartibga oshadi. Misol uchun, ikkilamchi nurlanish spektrida TiO_2 mikrokukunlarining YKS chiziqlari intensivligi (4-rasm va 5-rasm), haqiqatdan ham mis bug'laridagi lazerning uyg'otuvchi nuri intensivligi bilan qariyb tenglashib qoladi.

Dissertatsiyaning to'rtinchi bobida **“Rux oksidining mikro- va nanostrukturalarining morfologik, tarkibiy va optik xususiyatlari”** deb ataladi, unda foton tuzoqlariga joylashtirilgan rux oksidining mikro- va nanostrukturalarining yorug'likning kombinatsion sochilishi va fotoluminessentsiya spektrlarining shakllanish qonuniyatlarini o'rganishga alohida ahamiyat beriladi. Mikroto'lqinli sintez usulida olingan rux oksid mikrostrukturalarining morfologiyasi va tuzilishi o'rganildi.

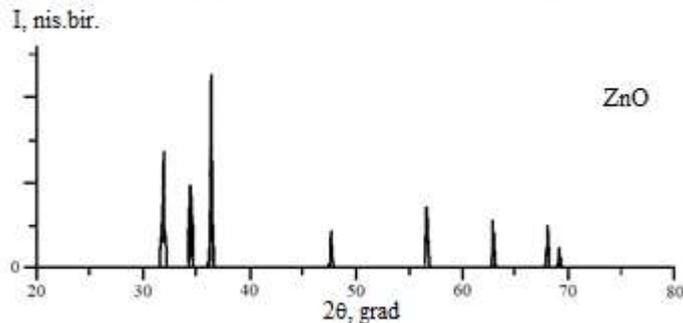
SEM ma'lumotlariga ko'ra (6-rasm), o'rganilayotgan material asosan millimetrli o'lchamdagi geksagonal sterjen (tayoqcha)lar shaklidagi zarralardan iborat.



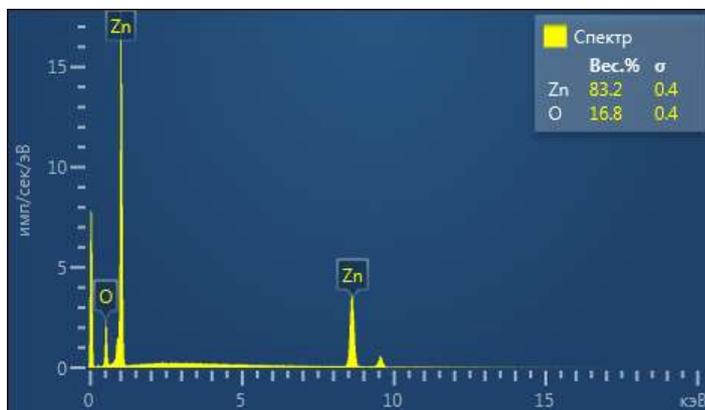
6-rasm. ZnO mikrostrukturalarning SEM-tasviri.

Bizning hisob-kitoblarimizga ko'ra, ayrim zarralarning uzunligi $15 \div 18 \text{ mkm}$ bo'lib, ularning eni esa $1 \div 8 \text{ mkm}$ ni tashkil etadi. Olingan namunalar solishtirma sirtning kichik qiymatlariga ega bo'lishlariga qaramasdan, sezilarli fotokatalitik faollikka ega. Bu holat, ehtimol, ZnO namunalarining o'ta kristallligi (7-rasm) va past nuqsonliligi va tozaligi bilan izohlanadi (8-rasm).

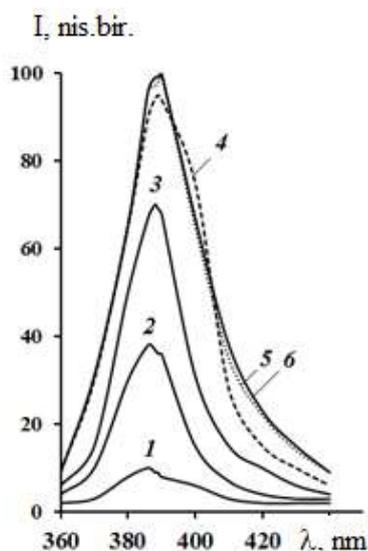
Rentgen struktura tahlili (7-rasmga qarang) sintez qilingan ZnO namunalarning tuzilishida bitta faza - rux oksidi strukturasi P6₃mc vyurtsit turiga mos kelishini ko'rsatdi. Rentgenogrammalar tahlili asosida tekshirilayotgan materialda qo'shimcha maksimumlar kuzatilmagani aniqlandi. 9-rasmda turli intensivlikda ($\lambda_{uyg} = 255,3$ nm) olingan ZnO mikrostrukturalarning FL spektrlari keltirilgan. Uyg'otuvchi nurlanishning kichik intensivliklariga FL spektri



7-rasm. ZnO mikrostrukturalarning rentgenogrammasi.



8-rasm. ZnO mikrostrukturalarning elemen tarkibi.



9-rasm. ZnO mikrostrukturalari ($d_{0,rt} = 2$ mkm)ning uyg'otuvchi nurlanishning turli intensivliklarida olingan FL spektrlari: (1) chiziq $I_{uyg} = 5$ mos keladi; (2) - $I_{uyg} = 1$; (3) - $I_{uyg} = 15$; (4) - $I_{uyg} = 18$; (5) - $I_{uyg} = 21$; (6) - $I_{uyg} = 24$ ($I_{uyg} - 10^3$ Vt/sm²).

386 nm maksimumga ega bo'ladi (1 va 2-chi chiziqlar). Bu maksimum A-eksitonlarning ko'p fononli annigilatsiya seriyasidagi 3LO polosasiga mos keladi. Aralashmalar va nuqsonlar konsentratsiyasi kam bo'lgan yarim o'tkazgichli materiallarda uyg'otuvchi nurlanishning yuqori

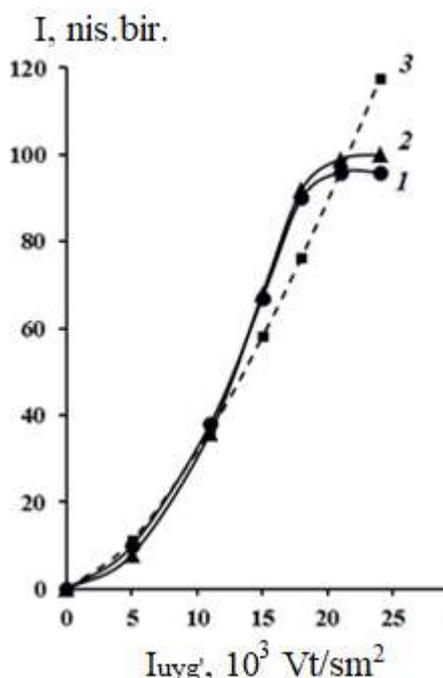
intensivliklarida aralashma sathiga nurlanish o'tish intensivligining to'yinishi ro'y beradi va erkin eksitonlarning ko'p fononli annigilatsiyasining quyidagi jihati alohida qiziqish uyg'otadi: majburiy nurlanishga o'tish imkoniyati bujudga keladi. Ma'lumki, erkin eksitonda invers taqsimot amalga oshmaydi, eksiton foton va fononga bo'linganda esa inversiya avtomatik ravishda paydo bo'ladi. Uyg'otish intensivligi $15 \cdot 10^3$ Vt/sm² dan ortiq bo'lganda (3-5 chiziqlar) eksiton lyuminesent-siya chizig'ining torayishi kuzatiladi, uning intensivligi birlamchi nur intensivligi yanada oshganda nochizikli ravishda o'sadi. Bundan tashqari, FL chizig'ining torayishi va FL spektrining maksimumining 4 nm gacha uzun to'lqinli sohaga siljishi kuzatiladi. Intensivlik $24 \cdot 10^3$ Vt/sm² (6-chiziq) bo'lganda bog'liqlik grafida to'yinish sodir bo'ladi.

ZnO mikrostrukturalarida majburiy nurlanishni kuzatish maqsadida biz UB luminessentsiyaning ikki fotonli uyg‘otish intensivligiga bog‘liq tadqiqotini o‘tkazdik (10-rasm). Ko‘rinib turibdiki, ko‘rsatib o‘tilgan bog‘liqlik nochiziqli va chegaraviy xususiyatiga ega bo‘lib, majburiy nurlanish belgilaridan birini anglatadi. Biroq spektrda yetarlicha darajada torayish kuzatilmayotgani, tajribada majburiy FL uchun faqat chegaraviy effektlar vujudga kelayotganlikdan dalolat beradi.

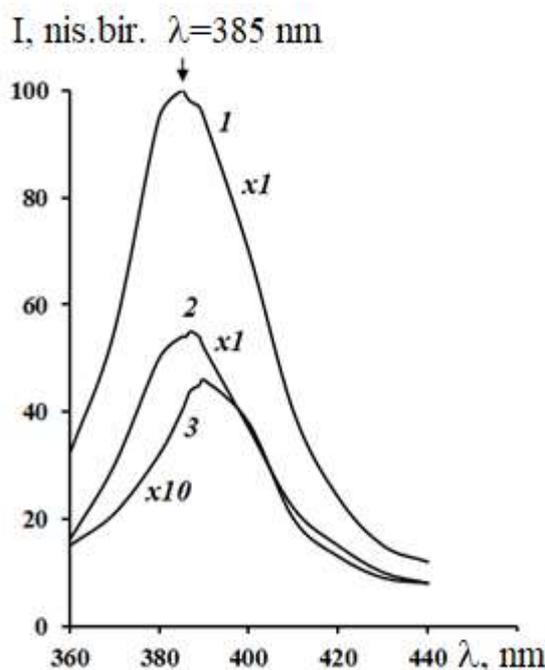
FL intensivligi (I) tahlili uchun quyidagi ifodadan foydalanildi

$$I = \eta \cdot I_{uyg'}^\alpha, \quad (4)$$

bu yerda $I_{uyg'}$ – uyg‘otuvchi nurlanish intensivligi, η – kvant chiqishi, α – nurlanish rekomenbinatsiya mexanizmini xarakterlaydi. Eksiton rekomenbinatsiya uchun $1 < \alpha < 2$, fundamental nurlanish uchun $\alpha \approx 2$ va aralashmali sathlardan o‘tish uchun esa $\alpha < 1$.



10-rasm. ZnO mikrostrukturalari ($d_{o'rt}=2$ mkm) FL intensivligining uyg‘otuvchi nurlanish intensivligiga bog‘liqligi. (1) chiziq $\lambda=386$ nm to‘lqin uzunligiga mos keladi; (2) - $\lambda=390$ nm; (3) - $I \approx I_{uyg'}^{1,5}$ qonunga mos nazariy bog‘liqlik.

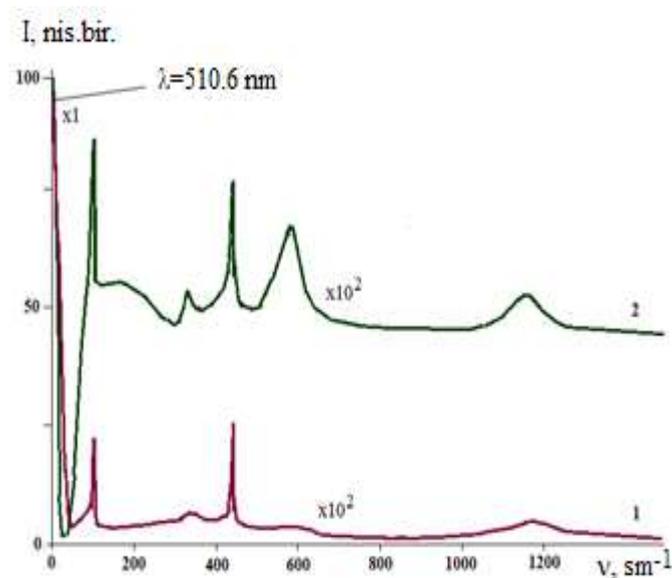


11-rasm. Bir xil uyg‘otish sharoitida olingan turli o‘lchamdagi ZnO mikrostrukturalarining FL spektrlari: (1) – $d_{o'rt}=1$ mkm; (2) - $d_{o'rt}=2$ mkm; (3) - $d_{o'rt}=8$ mkm. ($\lambda_{uyg'}=255,3$ nm) ($I_{uyg'} \sim 10^3$ Vt/sm²).

Darhaqiqat, bizning tajriba sharoitimizda ($I_{uyg'} \sim 10^3$ Vt/sm²) ZnO mikrostrukturalari uchun (9-rasm) $\alpha \approx 1,5$ darajali bog‘liqlik kuzatiladi (10-rasm, 3-chiziq), bu ZnO monokristalida $\alpha=1,5 \pm 0,2$ qiymatiga mos keladi. Katta intensivliklarda FL intensivligining o‘sishi sekinlashadi, bu ham issiqlik ta’siri yoki ham fotoliz va termodestruksiya orqali nuqsonlar paydo bo‘lishi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. Shunga o‘xshash qonuniyat monokristallar va ZnO kvant nuqtalari uchun ham kuzatilgan. Bizning namunalarimizda spektrning ko‘rinish sohasida FL yo‘qligi elementlar tahliliga ko‘ra kislorodning kichik konsentratsiyali

yoki nuqsonlari yoʻqligini hamda oʻrganilgan ZnO namunalarining yuqori tozaligidan dalolat beradi (8-rasmga qarang).

11-rasmda bir xil uygʻotilgan sharoitda olingan turli oʻlchamdagi ZnO mikrostrukturalarining FL spektrlari ($\lambda_{uygʻ}=255,3$ nm) keltirilgan. Rasmdan koʻrinib turibdiki, namunalar oʻlchamining kichrayishi bilan ultrabinafsha chizigʻining maximumi qisqa toʻlqinli sohaga siljiydi. Oʻrtacha oʻlchamlari $d_{oʻrt}=8$ mkm ($\lambda_{mak}=390$ nm) va $d_{oʻrt}=2$ mkm ($\lambda_{mak}=387$ nm) boʻlgan ZnO mikrostrukturalarining FL spektrining spectral intensivliklari oʻlchami $d_{oʻrt}=1$ mkm ($\lambda_{mak}=385$ nm)ga teng zarrachalar intensivligidan mos ravishda 22 va 2 baravar kichikdir. Mazkur FL spektrlarning intensivligi va joylashuvlari boʻyicha farqi, zarralar chegaralari oʻrtasida boʻshliqlar boʻganligi uchun, ular uygʻotuvchi nurni samarali yutish oʻrniga koʻproq qoʻzgʻatuvchi kvantlarni sochishga hissa qoʻshadi. Bundan tashqari, agar mikro- va nanozarralar (kukunlar) optik rezonator (foton tuzoq)ga joylashtirilsa, FL signallarining intensivligini koʻp marta oshirish mumkin. Shu bois, soʻnggi yillarda tadqiqotchilarning keng doirasini ZnO asosidagi optik mikrorezonatorli UV-lazerlar jalb etmoqda. Bunday rezonatorlarning sifati juda katta boʻlib, optik mikrorezonatorlarda nano-mikrostrukturaning oʻzi va qurilmaning materiali (kyuveta) kuchaytiruvchi muhit boʻlib xizmat qilishi mumkin. Natijada, kyuvetaning chiqish qismida spektrning ultrabinafsha sohasida yetarlicha kuchli signallarini olish mumkin va xona haroratida ishlaydigan minilazerlarni yaratish mumkin.



12-rasm. ZnO mikro- va nanostrukturalining mis bugʻlaridagi lazerning yashil nuri ($\lambda_{uygʻ}=510,6$ nm) bilan uygʻotilgan YKS spektrlari: 1 - $d_{oʻrt}=7$ mkm; 2 - $d_{oʻrt}=90$ nm ($I_{uygʻ} \sim 10^3$ Vt/sm²).

ZnO mikro- va nanostrukturalarining mis bugʻlaridagi lazerning yashil chizigʻi ($\lambda_{uygʻ}=510,6$ nm) bilan uygʻotilgan YKS spektrlari 12-rasmda keltirilgan. Rasmdan koʻrinib turibdiki, ZnO nanostrukturalarining YKS signallari (12-rasm, 2-chiziq) ushbu moddaning mikrostrukturalarining YKS signalining intensivligidan deyarli 4 baravar katta. Adabiyot maʼlumotlariga asosan ZnO kukunlarining YKS spektrlaridagi quyidagi modalarni ajratib koʻrsatish mumkin:

1) 100 sm⁻¹ chastotali; 2) 340 sm⁻¹ chastotali - $E_2^{yuo} - E_1^{quyi}$ fononlar farqiga teng; 3) 435 sm⁻¹ chastotali; 4) $E_1(LO)$ ga mos ~ 580 sm⁻¹; 5) 1060 va 1190 sm⁻¹ oraligʻidagi keng polosa - A_1 va E_2 modalar kombinatsiyasiga tegishli. Tadqiqot namunalarida YKS spektrlarida $E_1(LO)$ modaning intensivligining monoton koʻpayishi va $100 \div 200$ sm⁻¹ sohada yelka chizigʻining paydo boʻlishi kuzatiladi.

Ilgari bizning tajribalarimizda, foton tuzoqlariga joylashtirilgan turli moddalarning mikrokukunlari intensivligi sezilarli darajada oshib borayotgani kuzatilgan: uygʻotuvchi nurning intensivligiga nisbatan YKS intensivligi sezilarli darajada oshganligi aniqlangan (kombinatsion opalessentsiya rejimi). Bu oʻrganilayotgan moddada uygʻotuvchi nur fotonining toʻliq yoʻlining sezilarli darajada koʻpayishi bilan bogʻliq boʻlib, bunda foton tuzoq devorlaridan va muhitning bir jinsli boʻlmagan qismlaridan koʻp marta qaytadi. Eksperimental tadqiqotlar shuni koʻrsatdiki, foton tuzoqlarini qoʻllashda, ultratispers shakldagi moddalar uchun kyuvetadan chiqishda, oddiy kyuvetalarga nisbatan YKS intensivligi 10^5 martagacha oshadi. Bunda kombinatsion opalessentsiya effekti kuzatiladi, yaʼni IN spektridagi YKS signali uygʻotuvchi nurlanish intensivligiga deyarli tenglashib qoladi.

XULOSALAR

“Impuls-davriyli lazer nuri taʼsirida rux va titan oksidlarining mikro- va nanostrukturalarida ikkilamchi nurlanish” dissertatsiyasi mavzusida oʻtkazilgan tadqiqot natijalari boʻyicha quyidagi xulosalar shakllantirildi.

1. Impuls-davriy lazer nuri taʼsirida yarimoʻtkazgichlar va dielektriklarning mikro- va nanostrukturalarida ikkilamchi nurlanish spektrlarini oʻrganish uchun rezonatorli kyuvetalar (foton tuzoqlar) va tolali-optik texnikaning yangi turlari asosida zaif optik signallarni qayd etishning eksperimental metodikasi ishlab chiqildi va takomillashtirildi.

2. Mikrotoʻlqinli sintez usulida olingan rux oksidining yuza morfologiyasi va mikrostrukturasi tuzilishi oʻrganilib, ushbu usul rux oksidining kristallangan mikrostrukturalarini choʻzilgan tayoqcha shaklida shakllantirishi koʻrsatilgan. Rentgen struktura tahlili sintez qilingan rux oksidi namunalarining tuzilishi geksagonal kristall struktura koʻrinishga ega ekanligini koʻrsatdi.

3. Tadqiqot obʼyektlarida fotoluminessentsiya va yorugʻlikning kombinatsion sochilish spektrlarini shakllanish mexanizmlari aniqlandi; rux oksidi zarralari oʻlchamining kamayishi bilan ultrabinafsha maksimumi qisqa toʻlqin sohasiga siljishi kuzatildi.

4. Ilk bor foton tuzoqlarida rux va titan oksidlarining mikro- va nanostrukturalarida «kombinatsion opalessentsiya» effektining vujudga kelishi va kombinatsion sochilish samaradorligini oshirish shartlari aniqlandi.

5. Foton tuzoqlaridagi titan va rux oksidlarining mikrostrukturalarida kyuvadan chiqishda yorugʻlik intensivligi anʼanaviy kyuvetlarga nisbatan tekshirilayotgan moddalarning zarralari oʻlchamlariga qarab 10^4 ÷ 10^5 tartibga oshishi tajribada qayd etildi.

6. Ilk bor foton tuzoqlaridagi rux oksidi namunalarida ultrabinafsha lyuminessentsiya spektrining uygʻotuvchi nurlanishning intensivligiga bogʻliqligi aniqlandi: nurlanish intensivligi 10^3 Vt/cm² boʻlganda namunalarda spontan lyuminessentsiyadan majburiy holatga oʻtish, yaʼni superlyuminessentsiya holati kuzatildi.

7. Bir va ikki fotonli uygʻotilgan lyuminessentsiya spektrlari bir-biridan intensivligi, shakli va holati bilan farq qilishlari aniqlandi.

8. Strukturalarning dispersligi ikkilamchi nurlanish spektrlarining shakllanishiga taʼsir qilishi kuzatildi: namunalar oʻlchamining kichiklashi bilan rux oksid lyuminessentsiya polosasining maksimumi qisqa toʻlqin uzunligi tomon siljiydi, titan dioksidi mikrokukunlarida esa kombinatsion sochilish signalining intensivligi oshishi kuzatiladi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИМЕНИ ШАРОФА РАШИДОВА**

ЦЕНТР ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ДАВРОНОВ МАЪМУРЖОН ХАМРОЕВИЧ

**ВТОРИЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В МИКРО- И НАНОСТРУКТУРАХ
ОКСИДОВ ЦИНКА И ТИТАНА ПРИ ИМПУЛЬСНО-
ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ**

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Самарканд – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2024.4.PhD/FM1193.

Диссертация выполнена в Центре Передовых технологий при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан и Физическом институте им.П.Н. Лебедева Российской Академии наук.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.samdu.uz) и на информационно-образовательном портале «Ziyounet» (www.ziyounet.uz).

Научный руководитель: Рахматуллаев Илѳ Аримуродович
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: Хушвактов Хаким Абдулхакович
доктор физико-математических наук, профессор

Касимова Гузал Каримовна
доктор философии (PhD) по физико-математическим наукам, доцент

Ведущая организация: Институт ионно-плазменных и лазерных технологий
(Академия наук Республики Узбекистан)

Защита диссертации состоится «26» XII 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научном совете PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 при Самаркандском государственном университете имени Шарофа Рашидова. (Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова, Институт инженерной физики, 1 этаж, 114 аудитория).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета имени Шарофа Рашидова (зарегистрирована под № 104). Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; факс: (99866) 239-11-40.

Автореферат диссертации разослан «11» XII 2025 г.
(Реестр протокола рассылки № 104 от «11» XII 2025 г.)



М.Х.Ашуров

Председатель научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., академик

Р.М.Ражабов

Ученый секретарь научного совета
по присуждению ученых степеней,
к.ф.-м.н., доцент

Д.И.Семенов

Председатель научного семинара при научном
совете по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В последние годы в мире наблюдается устойчивый рост научного интереса к изучению физических свойств микро- и наноструктур, полученных на основе оксида цинка (ZnO) и диоксида титана (TiO₂). Современный интерес к таким материалам обусловлен тем, что переход к малым размерам частиц приводит к заметному изменению их поведения: в нанодиапазоне возникают оптические и электронные особенности, которые отсутствуют у массивных образцов. Появление этих новых характеристик открывает дополнительные направления для применения материалов данной группы.

TiO₂ является одним из наиболее универсальных соединений, так как может выполнять сразу несколько функциональных задач. Он применяется при создании высокоэффективных солнечных элементов, входит в состав самоочищающихся и антибликовых оптических покрытий, проявляет выраженные фотокаталитические свойства и широко используется в сенсорах для регистрации газов. Уникальные характеристики, возникающие при переходе к наномасштабу, делают его перспективным материалом для современных технологий и прикладной физики.

ZnO также занимает значимое место среди функциональных наноматериалов. Его востребованность обусловлена большой энергией связи экситона (порядка 60 мэВ), а также высокой механической прочностью и термостойкостью. Эти свойства делают ZnO перспективным материалом для разработки нанолазеров, пьезоэлектрических наногенераторов, солнечных элементов, высокочувствительных газовых сенсоров и других компонентов современной наноэлектроники.

В настоящее время микро- и, особенно, наноструктуры (в частности, микро- и нанопорошки) приобрели большой интерес в связи с разработкой новых методов их синтеза, а также с широким практическим применением. Для полноценного анализа таких материалов требуется располагать достоверной и детально охарактеризованной информацией об их структурных параметрах. Переход материалов к масштабам, сравнимым с нанометрами, приводит к появлению физических и механических характеристик, которые существенно отличаются от свойств тех же веществ в объемном состоянии. В таких условиях поведение структурных элементов определяется поверхностными эффектами, квантово-размерными явлениями и изменением энергетической структуры. Однако традиционные методики анализа зачастую оказываются недостаточно информативными или требуют сложной и дорогостоящей аппаратуры. Это усиливает интерес к созданию современных, универсальных и экономически доступных подходов, позволяющих эффективно исследовать свойства наномодифицированных материалов.

В нашей республике также уделяется большое внимание исследованию, применению и развитию микро- и нанотехнологий. В Узбекистане в последние годы получены значимые результаты по исследованию микро- и

наноструктурированных материалов. Определены их размерные параметры, а также основные оптические и нелинейно-оптические характеристики. Эти работы имеют фундаментальное и прикладное значение и соответствуют приоритетам, обозначенным в концепции развития науки Республики Узбекистан до 2030 года. Полученные данные по морфологии, структуре и оптическим свойствам наноструктур оксидов титана и цинка основаны на использовании современного исследовательского оборудования.

Проведённое диссертационное исследование в определённой мере направлено на реализацию задач, обозначенных в действующих нормативных документах и стратегических направлениях развития Республики Узбекистан. Методологическая основа проведённого исследования согласуется с рядом нормативных документов Республики Узбекистан. В частности, работа ориентирована на положения Указа Президента от 8 октября 2019 года № УП-5847 «О утверждении Концепции развития системы высшего образования Республики Узбекистан до 2030 года», определяющего приоритеты модернизации высшего образования. Исследование также соотносится с задачами, изложенными в Послании Президента Олий Мажлису¹ от 29 декабря 2020 года, а также с Постановлениями № ПП-5032 от 19 марта 2020 года «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» и № ПП-82 от 13 января 2022 года, направленным на дальнейшее развитие Самаркандского государственного университета. Указанные документы формируют нормативную базу, в рамках которой выполнена данная работа.

Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Проведённая диссертационная работа ориентирована на реализацию приоритетных задач научно-технического развития страны и полностью согласуется с направлением II – «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение», определённым в национальных приоритетах развития науки и технологий.

Степень изученности проблемы. Морфологические, структурные, оптические свойства микро- и наноструктур на основе оксидов титана и цинка изучаются многими учеными мира, например, российскими (Горелик В.С., Михайлов М.М., Нещименко В.В., Аверин И.А., Тарасов А.П.), американскими (Clark D.E., Fonoberov V.A., Folz D.C.), японскими (Ohsaka T., Izumi F.), польскими (Šćerpanović M.J., Grujić-Brojčin M.), белорусскими (Бураков В.С., Тарасенко Н.В.), украинскими (Лысенко О.Г., Махний В.П.), китайскими (Dong H., Zhou B.), итальянскими (Bassi A., Cattaneo D.), индийскими (Sridevi D., Rajendran K.V.), узбекскими (Курбонов С.С., Ибрагимова Э.М., Ташметов М.Ю.) и другими специалистами.

Метод микроволнового синтеза позволил получить упорядоченные кристаллические структуры ZnO с контролируемой морфологией и изучить

¹ Послание Президента Республики Узбекистан Шавката Мирзиёева Олий Мажлису // Народное слово 2020 г., 30 декабря, №275-276 стр.(7746-7747) С.1

их физические характеристики. Проведённые исследования выявили ряд закономерностей в поведении микро- и наноструктур ZnO и TiO₂. Установлено, что их структурные, оптические, магнитные и тепловые свойства существенно отличаются от свойств объёмных кристаллов, что обусловлено поверхностными явлениями и квантово-размерными эффектами. Комплексный анализ тонких плёнок ZnO позволил охарактеризовать их электрические и оптические свойства. Также изучены фазовые и структурные особенности синтезированных наноразмерных образцов ZnO и TiO₂. Показано, что характерные максимумы фотолюминесценции в области 390 и 520 нм в нанокристаллах ZnO связаны соответственно с излучением экситонов и дефектными состояниями.

Несмотря на большое количество работ, посвящённых синтезу и исследованию свойств оксидов ZnO и TiO₂, многие характеристики микро- и наноструктур остаются недостаточно изученными как в Узбекистане, так и за рубежом. Несмотря на то что в литературе представлены многочисленные исследования, посвящённые синтезу и анализу свойств микро- и наноструктур, влияние размерных факторов на оптические характеристики порошковых материалов до настоящего времени изучено лишь фрагментарно. Аналогично, механизмы формирования спектров вторичного излучения в фотонных ловушках освещены неполно и встречаются только в виде отдельных разрозненных результатов.

Именно неполнота существующих данных и научная значимость обозначенных вопросов обусловили необходимость проведения комплексного исследования, направленного на детальное изучение морфологии, структуры и оптического поведения микро- и наноструктур ZnO и TiO₂.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в рамках плана научно-исследовательских проектов Центра передовых технологий Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан. Работа соответствует государственным научно-техническим программам и связана с реализацией проекта № ПЗ-2017092438 «Разработка технологий получения наноструктурированных катализаторов на основе переходных металлов и их оксидов», предусматривающего создание современных методов синтеза и исследования таких материалов.

Цель исследования состоит в установлении особенностей и закономерностей формирования спектров вторичного излучения в микро- и наноструктурах оксидов цинка и титана при их возбуждении импульсно-периодическим лазерным излучением.

Задачи исследования:

– усовершенствовать метода регистрации слабых оптических сигналов, основанного на использовании резонаторных кювет-ловушек, волоконно-оптической техники и лазерных источников, работающих в импульсно-периодическом режиме;

– изучить морфологию поверхности и структуры микропорошков ZnO, полученных методом микроволнового синтеза и установить механизмов формирования спектров фотолюминесценции и комбинационного рассеяния в данных структурах;

– устанавливать режимов и параметров проявления эффекта «комбинационной опалесценции», и определить ключевые характеристики, влияющие на усиление комбинационного рассеяния в порошках TiO₂ и ZnO при их исследовании внутри резонаторных фотонных ловушек;

– выполнить сопоставительный анализ однофотонно- и двухфотонно-возбуждаемой люминесценции микро- и наноструктур TiO₂ и ZnO, а также установить основные различия в их спектральных характеристиках;

– изучить, как степень дисперсности порошков влияет на усиление сигналов вторичного излучения и на изменение их оптических характеристик;

– определить природу формирования ультрафиолетовой полосы люминесценции в микро- и наноструктурах ZnO при различных уровнях интенсивности лазерной накачки.

Объектом исследования – микро- и наноструктурированные материалы на основе TiO₂ и ZnO.

Предметом исследования – морфологические и структурные характеристики исследуемых микро- и наносистем, а также закономерности и физические механизмы формирования спектров фотолюминесценции и комбинационного рассеяния при импульсно-периодическом лазерном возбуждении.

Методы исследования. В исследовании использовались современные методы физико-химического анализа: рентгенофлуоресцентная диагностика для определения элементного состава, электронная микроскопия для изучения морфологии частиц, а также фотолюминесцентная и рамановская спектроскопия для выявления оптических характеристик микро- и наноструктур.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны и усовершенствованы экспериментальные подходы к регистрации слабых оптических сигналов, основанные на применении новых модификаций резонаторных кювет – фотонных ловушек – в сочетании с элементами волоконно-оптической техники;

проведён комплексный анализ морфологических параметров и структурной организации микропорошков ZnO, синтезированных методом микроволнового разложения, что позволило более глубоко понять природу формирования их фотолюминесцентных и рамановских спектров;

установлено, что уменьшение характерных размеров частиц ZnO вызывает смещение максимума ультрафиолетовой фотолюминесценции в область более коротких волн – проявление типичных квантово-размерных эффектов;

впервые обнаружены условия возникновения эффекта «комбинационной опалесценции» и повышения эффективности комбинационного рассеяния в

микropорошках микро- и наноструктурах оксидов цинка и титана в фотонных ловушках;

установлено, что применение резонаторных кювет обеспечивает рост контрастности выходного сигнала для порошков TiO_2 и ZnO на $10^4 \div 10^5$ порядков по сравнению с обычными кюветами, что связано с многократным переизлучением и резонансным усилением слабых оптических процессов;

впервые выявлено, что ультрафиолетовая люминесценция микроструктур ZnO , помещённых в фотонные ловушки, демонстрирует выраженную зависимость от интенсивности возбуждающего излучения: при достижении интенсивности накачки $\sim 10^3$ Вт/см² фиксируется переход от обычной спонтанной экситонной люминесценции наблюдается переход от спонтанной люминесценции к стимулированной, т.е. к суперлюминесценции;

установлено, что люминесцентные спектры, полученные при однофотонном и двухфотонном возбуждении, обладают существенными различиями: они отличаются как уровнем интенсивности, так и формой спектральных кривых и положениями их максимумов;

показано, что дисперсность исследуемых структур непосредственно влияет на характеристики вторичного излучения: для микropорошков ZnO уменьшение размера частиц приводит к смещению максимума люминесценции в коротковолновую область, тогда как для порошков TiO_2 уменьшение размера частиц сопровождается существенным увеличением интенсивности комбинационного рассеяния.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Разработанная методика на основе резонаторных кювет (фотонных ловушек) и лазерных источников импульсно-периодического режима обеспечивает надёжную регистрацию слабых сигналов фотолюминесценции, комбинационного рассеяния и их нелинейных аналогов за счёт значительного усиления их интенсивности.

Предложенная методика позволяет эффективно идентифицировать следовые количества TiO_2 и ZnO в сложных смесях и гетерогенных материалах по их спектрам вторичного излучения. Полученные результаты могут быть использованы в фундаментальных и прикладных исследованиях, а также внедрены в технологические процессы молекулярной спектроскопии, химической, фармацевтической и лакокрасочной промышленности.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием современных прецизионных методов лазерной спектроскопии, приборов и оборудования, методов исследования и обработки экспериментальных данных и их хорошей воспроизводимостью, высокочувствительной рентгеновского анализа и электронной микроскопии, также подтверждением последующими работами других исследователей.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость выполненного исследования определяется тем, что полученные результаты существенно углубляют представления о физических процессах, лежащих в основе формирования фотолюминесцентных и рамановских спектров микро- и наноструктур TiO_2 и ZnO при импульсно-

периодическом лазерном возбуждении. Установленные в работе закономерности демонстрируют, какое влияние оказывают размерные эффекты, особенности морфологии и структурная неоднородность частиц на характер и эволюцию спектров вторичного излучения.

Полученные в ходе работы экспериментальные результаты расширяют современное представление о процессах, происходящих в конденсированном состоянии вещества. Они уточняют механизмы формирования, эволюции и модификации спектров вторичного излучения микро- и наноструктур, демонстрируя, как оптический отклик изменяется под воздействием размерных факторов, степени дисперсности и особенностей гетерогенной среды. Таким образом, работа вносит дополнительный вклад в понимание закономерностей поведения сложных систем, основанных на разнообразных морфологиях и масштабах частиц. Результаты исследования могут служить основой для последующих теоретических и прикладных работ, связанных с разработкой новых функциональных наноматериалов и фотонных структур.

Практическая значимость результатов исследований диссертации состоит в том, что результаты исследования позволят целенаправленно управлять структурой и свойствами исследованных веществ различной дисперсности. Это дает возможность на практике получать разнообразные структуры с заданным комплексом физических свойств, которые будут очень важны для промышленности.

Внедрение результатов исследования. На основе выполненных исследований морфологических, структурных и оптических свойств микро- и наноструктур на основе TiO_2 и ZnO :

установленные закономерности формирования фотолюминесцентных спектров TiO_2 в зависимости от размеров частиц нашли практическое применение. Полученные научные результаты были использованы в международном фундаментальном проекте № MUK-2021-47 «Адаптивная органическая фотовольтаика: новый портативный возобновляемый источник энергии» (2021–2022 гг.), что подтверждает их значимость для развития современных методов преобразования энергии. Использование научных результатов позволило объяснить структурные дефекты в органических фотовольтаических элементах при применении в этих системах оксидов титана и цинка в качестве полупрозрачных электродов с помощью фотолюминесцентных свойств (Справка №2/1255-2758 Академии Наук Республики Узбекистан от 12 декабря 2024 года);

результаты были использованы при выполнении фундаментального проекта «Разработка инновационных платформ для поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии» Института ядерной физики Академии науки Республики Казахстан. Разработанные микро- и наноструктуры на основе оксидов титана и цинка были протестированы в качестве подложек для усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния (SERS) в детекции различных органических веществ. Эксперименты подтвердили их высокую эффективность в усилении сигнала, обеспечивая чувствительное определение низких концентраций органических молекул. Также были проведены

успешные испытания данных структур в области фотокатализа, где они продемонстрировали высокую фотокаталитическую активность при разложении органических загрязнителей, что подтверждает их пригодность для практического применения в экологической и аналитической химии. В частности, использование научных результатов позволило увеличить предел детектирования красителей и пестицидов (Справка-Акт внедрения Института ядерной физики АН РК от 5 декабря 2024 года);

в соответствии с сертификатом №DGU 42928 Министерства Юстиции Республики Узбекистан от 16 октября 2024 года разработана электронная программа «Способ регистрации слабых оптических сигналов с помощью многоканального спектрометра». Результаты, полученные с применением резонаторных кювет (фотонных ловушек) и лазерных источников импульсно-периодического режима, обеспечившие надежную регистрацию слабых оптических сигналов, были внедрены в учебную дисциплину «Физика» по направлению подготовки «60610400 – Программная инженерия» (Справка №02/01-01-141 Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан от 12 декабря 2024 года).

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на 8 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях. Это свидетельствует о высокой актуальности выполненной работы, а также подтверждает научную обоснованность и надёжность полученных выводов.

Публикации результатов исследования. По результатам исследования опубликовано 22 научные работы, включая 10 статей в рецензируемых журналах. Четыре работы вышли в зарубежных изданиях: две – в журналах, индексируемых Scopus, и две – в изданиях РИНЦ. Шесть статей опубликованы в республиканских журналах, рекомендованных ВАК Узбекистана. По материалам исследования зарегистрирован один сертификат Министерства юстиции.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из вводной части, четырёх основных разделов, заключения и библиографический список. Полный объём исследования составляет 129 страниц и включает 48 рисунка и одну сводную таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, определены объект, предмет и основные методы исследования, а также связь темы исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан; сформулирована научная новизна исследований, обоснованы достоверность результатов диссертационной работы и их научно-практическая значимость, представлены данные о внедрении полученных результатов, апробации работы, объеме и структуре диссертации.

Первая глава диссертации под названием «**Морфология поверхности, структурные особенности и оптические свойства микро- и наноструктур на основе оксидов титана и цинка**» содержит обзор литературы, посвящённой методам получения наноструктур оксидов цинка и титана, проанализированы экспериментальные работы в области исследования вторичного излучения в микро- и наноструктурах оксидов цинка и титана при лазерном возбуждении.

На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных выявлены основные проблемы исследования вторичного излучения микро- и наноструктур исследованных объектов. Определены нерешенные проблемы, на основе которых сформулированы цель и задачи данной диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием «**Объекты исследований и экспериментальные методы**» описаны объекты исследования, представлены методика приготовления образцов и методика экспериментальных исследований вторичного излучения в порошкообразных объектах при импульсно-периодическом лазерном возбуждении, а также приводится информация об усилении слабых сигналов вторичного излучения в веществах, и особенности регистрации на базе резонаторных кювет, и стробоскопической системы с использованием линий генерации лазеров, работающих в импульсно-периодическом режиме.

Объектами исследований были микро- и наноструктуры TiO_2 , ZnO высокой чистоты. Микророшки TiO_2 были приобретены в Санкт-Петербургском заводе «Красный химик» (марка ОСЧ 7-3). Порошок состоял в основном из частиц сферической формы с поперечными размерами от 29 до 63 мкм. Средний размер исследованных образцов составлял 46 мкм.

Нанопорошки ZnO были закуплены по каталогу фирмы Aldrich с чистотой 98%.

Синтез микроструктур ZnO проводили методом микроволнового разложения: 2 г порошка ZnO (Aldrich, 98% чистоты) и 1 мл раствора этиленгликоля смешивали и растирали в агатовой ступке в течение 20 мин. Затем смешанный порошок в количестве 2 г загружали в тигель из оксида алюминия и ставили в центр микроволновой печи при комнатной температуре в условиях нормальной атмосферы. В микроволновке обрабатывали в течение 15 мин при 180°C . В результате порошок начал искриться и становится объемной твердой структурой в форме протяженных стержней. Полученный материал состоял в основном из частиц в форме гексагональных стержней (палочек) микрометрового диапазона размеров: длина отдельных частиц достигает $15\div 18$ мкм при ширине $1\div 8$ мкм.

Морфология поверхности образцов исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе SEM – EVO MA 10 (Carl Zeiss, Германия). Элементный состав определялся с помощью энергодисперсионного элементного анализатора марки AZtec (Oxford Instruments, Великобритания). Структура и фазовый состав

исследовался на рентгеновском дифрактометре «PANalytical Empyrean» (Нидерланды).

Для возбуждения и регистрации спектров комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции (ФЛ) использовалась волоконно-оптическая методика (рис. 1). В качестве источника возбуждения использовался лазер на парах меди (1), генерирующий излучение в видимой области спектра с длинами волн 510,6 и 578,2 нм. Генерация осуществлялась в монохроматическом режиме ($\lambda=510,6$ нм), при этом желтая линия ($\lambda=578,2$ нм) была подавлена фильтром. Возбуждающее излучение лазера (1) с помощью световода (6) направлялось внутрь кюветы с образцом (7). ВИ входило в другой световод (6) диаметром 100 мкм и направлялось к входной щели волоконно-оптического миниспектрометра (8). С миниспектрометра цифровая информация о спектре ВИ посредством USB-кабеля (9) передавалась на компьютер (10). Средняя мощность излучения лазера 10 Вт. Излучение генерируется в импульсно-периодическом режиме с большой частотой следования (10^4 Гц) коротких (20 нс) импульсов генерации с пиковой мощностью 10^5 Вт. Наиболее эффективной для изучения спектров ФЛ оказалась вторая оптическая гармоника зелёной линии (510,6 нм) генерации лазера, соответствующая длине волны излучения $\lambda=255,3$ нм. Высокая пиковая мощность лазерного излучения позволяет осуществить эффективное удвоение и сложение частот линий генерации лазера путем использования нелинейно-оптических кристаллов (BaV_2O_4). Излучение от активного элемента лазера на парах меди, работающего в режиме неустойчивого резонатора, фокусировалось длиннофокусной линзой в нелинейно-оптическом кристалле BaV_2O_4 . Кристалл был вырезан таким образом, что условие синхронизма выполнялось для удвоения частот исходного лазерного излучения. Таким образом, на выходе кристалла возникало УФ излучение с длинами волн 255,3 нм. Излучение лазера видимого диапазона устранялось с помощью абсорбционного фильтра, помещаемого сразу после BaV_2O_4 .

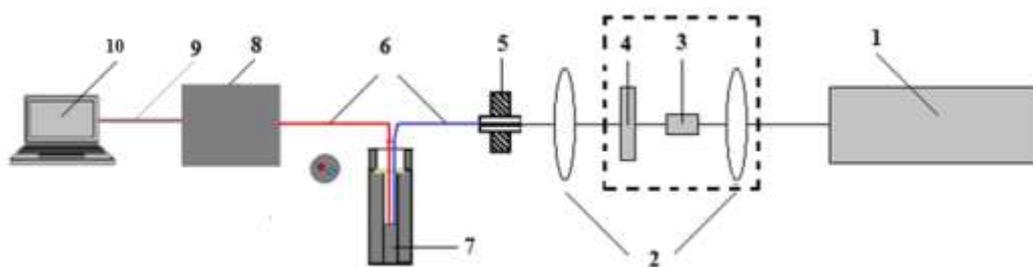


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – лазер на парах меди; 2 – собирающая линза; 3 – нелинейный кристалл BaV_2O_4 ; 4 – светофильтр; 5 – держатель световода; 6 – световод; 7 – резонаторная кювета (фотонная ловушка) с образцом; 8 – миниспектрометр FSD-8; 9 – USB-кабель; 10 – компьютер.

Для усиления сигнала ВИ в микро- и наноструктурах (особенно, в порошках) нами были разработаны специальные конструкции металлических кювет: резонаторные кюветы различных видов – фотонные ловушки, т.е. кюветы, в которых излучение претерпевает многократные отражения и

рассеяния (рис.2). Идея использования фотонных ловушек состоит в том, что значительная часть доля первичного (лазерного) излучения, попадая в ловушку, переходит во вторичное излучение. Кюветы можно изготовить из металлов, для которых реализуется эффект гигантского усиления вероятности возбуждения процессов ВИ.

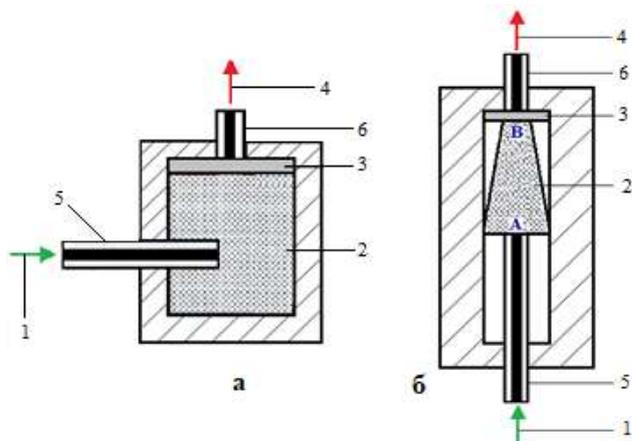


Рис. 2. Устройство кюветы (фотонной ловушки) с цилиндрическим (а) и конусным (б) резонаторами: 1 – возбуждающее излучение; 2 – исследуемое вещество (порошок); 3 – абсорбционный светофильтр; 4 – вторичное излучение; 5 – входной световод; б – выходной световод

В процессе эксперимента использовалась фотонная ловушка, изготовленная из дюралюминия. В корпусе фотонной ловушки была вырезана цилиндрическая или конусообразная полость, являющаяся рабочим объемом и заполняемая исследуемым веществом. Возбуждающее излучение лазера (1) с помощью световода (5) направлялось внутри кюветы с порошком (2).

Сверху кювету вставлялся выходной световод (б), при помощи которого вторичное излучение (4) снималось и направлялось в миниспектрометр. Световоды (5) и (б) представляли собой оптическое волокно из кварца диаметром 100 мкм. Было установлено, что конусообразная полость оказалась самым оптимальным вариантом для усиления сигналов ВИ. Сверху в корпус кюветы при необходимости дополнительного повышения контраста вторичного излучения вставлялся абсорбционный светофильтр ОГ-1 (3) толщиной 2 мм. Использование светофильтров позволило уменьшить интенсивность возбуждающей линии лазера в спектре ВИ почти в 100 раз при полном пропускании сигнала КРС на расстояние 800 см^{-1} . Светофильтры использовались при использовании метода «на просвет», так как при этом лазерное излучение сильно ослаблялось на выходе из кюветы из-за процессов многократного рассеяния в порошке.

В третьей главе диссертации под названием «**Морфологические, структурные и оптические свойства микроструктур диоксида титана**» посвящена изучению закономерностей формирования спектров ВИ в микропорошках диоксида титана при комнатной температуре, а также представлены экспериментальные данные о морфологии и структуры этих объектов.

СЭМ-изображение микропорошков TiO_2 показаны на рис. 3. Исследуемый материал состоит в основном из частиц сферической формы с поперечными размерами от 29 до 63 мкм.

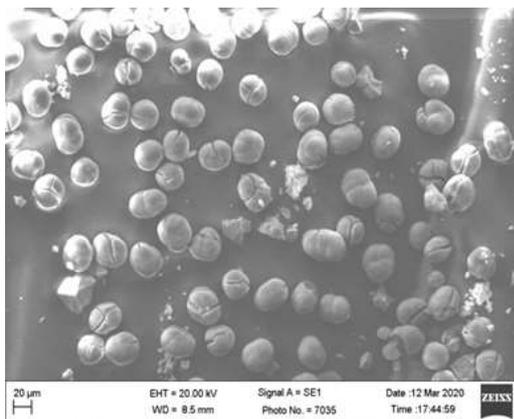


Рис.3. СЭМ-изображение микропорошков TiO_2 .

Средний размер исследованных образцов составлял 46 мкм. Элементный анализ с помощью энергодисперсионного спектрометра показал, что в исследуемом образце имеются примеси кремния и алюминия. Содержание примесей в исследуемом порошке TiO_2 характеризовалось следующими значениями входящих компонентов в массовых долях (%): Si – 1.6; Al – 0.8.

На рис. 4 приведены спектры КРС микропорошков TiO_2 , полученные в кюветах различных конструкций, при одинаковых режиме регистрации. Кривая 1 соответствует обычной цилиндрической кювете со сравнительным большим объемом (диаметр кюветы - 18 мм), кривая 2 – резонаторной кювете с цилиндрической полостью (рис.2,а) и 3 – резонаторной кювете с конусообразной полостью (рис.2,б) (диаметр капилляра в резонаторных кюветах составляла 3 мм). Как видно из этого рисунка, сигнал КРС в резонаторных кюветах почти в 1000 раз больше, чем в обычной цилиндрической кювете с большим диаметром.

На рис.5 представлены спектры КРС микропорошков TiO_2 , помещенных в фотонные ловушки, типа показанных на рис.2. Как видно из спектров, использование фотонных ловушек и световодов позволило существенно увеличить относительную интенсивность КРС в сравнении с интенсивностью возбуждающей линии в спектре ВИ. Это объясняется значительным увеличением полного пути, который фотон возбуждающего излучения проходит в исследуемом веществе, за счет многократного отражения от стенок фотонной ловушки и рассеяния на неоднородностях вещества. Однако, самые интенсивные сигналы КРС наблюдается для микропорошков TiO_2 , со средним размером 29 мкм (рис.5, кривая 1). Это связано с тем, что при попадании в такие структуры возбуждающего излучения с длиной волны, меньшей размера микрочастиц, возможно пленение излучения в результате многократного отражения от границ соответствующих резонаторов (фотонных ловушек). Это приводит к возрастанию интенсивности КРС (эффект комбинационной опалесценции) в микрокристаллах TiO_2 , наблюдаемому в приведенных ранее в наших экспериментах. Согласно литературным данным, в спектре КРС анатаза можно наблюдать 3 E_g -пики, которые располагаются при 144, 197 и 639 cm^{-1} (они обозначены как $E_g(1)$, $E_g(2)$ и $E_g(3)$ соответственно), 2 B_{1g} -пики (399 и 519 cm^{-1}) и A_{1g} -пик (513 cm^{-1}). Пики, расположенные вблизи 513 и 519 cm^{-1} , разрешаются только при низкой температуре, а пик 197 cm^{-1} имеет относительно малую интенсивность. Наиболее информативным и самым интенсивным является пик 144 cm^{-1} (E_{g1}) пик. В нашем случае мы наблюдаем все пики, характерные для спектра КРС анатаза при комнатной температуре.

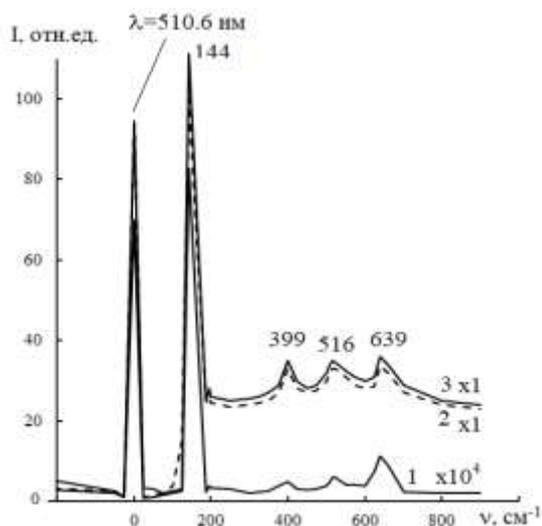


Рис.4. Спектры КРС микропорошков TiO_2 ($d_{\text{ср}}=29$ мкм) в обычной цилиндрической кювете (1), в резонаторной кювете с цилиндрической полостью (2) и в резонаторной кювете с конусообразной полостью (3) ($I_{\text{возб}} \sim 10^5$ Вт/см 2).

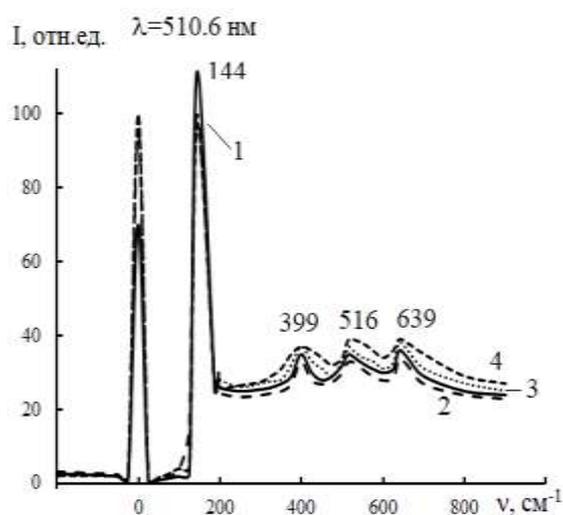


Рис. 5. Спектры КРС микропорошков TiO_2 различных размеров при их возбуждении зеленой линией лазера на парах меди ($\lambda_{\text{возб}}=510,6$ нм): (1) – $d_{\text{ср}}=29$ мкм; (2) – $d_{\text{ср}}=40$ мкм; (3) – $d_{\text{ср}}=51$ мкм; (4) – $d_{\text{ср}}=63$ мкм (интенсивность возбуждающего излучения: $I_{\text{возб}} \sim 10^5$ Вт/см 2).

Как известно, отношение интенсивности КРС $I_{\text{КРС}}$ в спектре вторичного излучения к интенсивности возбуждающего излучения $I_{\text{возб}}$ в однородной среде записывается в виде:

$$\frac{I_{\text{КРС}}}{I_{\text{возб}}} = \sigma N L \delta\Omega, \quad (1)$$

где σ – эффективное сечение КРС ($\sigma \sim 10^{-28}$ см 2), N – концентрация частиц, L – путь, пройденный фотоном возбуждающего излучения в веществе, $\delta\Omega$ – телесный угол, в котором анализируется исследуемое излучение (угол сбора). При исследовании вещества в обычных кюветах длиной ~ 1 см отношение интенсивности КРС $I_{\text{КРС}}$ в спектре ВИ к интенсивности возбуждающего излучения $I_{\text{возб}}$ при концентрации частиц $N \approx 10^{22}$ см $^{-3}$ и угле сбора рассеянного излучения $\delta\Omega \approx 1$ ср составляет:

$$\frac{I_{\text{КРС}}}{I_{\text{возб}}} \approx 10^{-6}. \quad (2)$$

Таким образом, на выходе из кюветы с однородной средой интенсивность КРС в миллион раз слабее интенсивности возбуждающего излучения.

В наших исследованиях показано, что при применении фотонной ловушки с рабочим объемом ~ 1 см 3 контрастность КРС в спектре в ВИ порошков в ультрадисперсной форме, по сравнению с обычными кюветами возрастает на $10^4 \div 10^5$ порядков и составляет:

$$\frac{I_{\text{КРС}}}{I_{\text{возб}}} = 10^{-1} \div 10^{-2}. \quad (3)$$

Это объясняется тем, что полный путь, пройденный фотоном возбуждающего излучения в металлической резонаторной кювете (фотонной ловушке), составляет $L \approx 10^4$ см. Таким образом, в результате применения фотонных ловушек контрастность на выходе из кюветы, по сравнению с обычными типовыми кюветами возрастает на $10^4 \div 10^5$ порядков в зависимости от размера частиц исследуемых веществ. Так, например, интенсивность линий КРС микропорошков TiO_2 в спектре ВИ (рис.4 и рис.5), действительно сравнима с интенсивностью возбуждающей линии лазера на парах меди.

Четвертая глава диссертации называется «**Морфологические, структурные и оптические свойства микро- и наноструктур оксида цинка**», в которой особое значение придается анализу изучению закономерностей формирования спектров комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции микро- и наноструктур оксида цинка, помещенных в фотонные ловушки. Изучена морфология и структура микроструктур оксида цинка, полученных методом микроволнового синтеза.

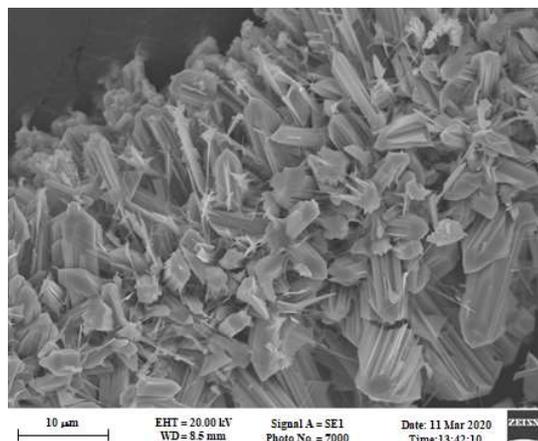


Рис.6. СЭМ-изображение микроструктур ZnO.

По данным СЭМ (рис. 6) видно, исследуемый материал состоит в основном из частиц в форме гексагональных стержней (палочек) миллиметрового диапазона размеров. По нашим оценкам, длина отдельных частиц достигает $15 \div 18$ мкм при ширине $1 \div 8$ мкм. Обнаружено, что полученные образцы обладают значимой фотокаталитической активностью несмотря на относительно низкую величину удельной поверхности.

Этот факт, возможно, объясняется с крайне кристалличности (рис. 7) и низкой дефектности чистотой образцов ZnO (рис. 8). Рентгеноструктурным анализом (см.рис.7) установлено, что структура синтезированных образцов ZnO содержит одну фазу – оксид цинка структурного типа вюрцит $\text{P6}_3\text{mc}$. Анализ рентгенограмм показал, что в исследуемом материале дополнительные пики не наблюдается.

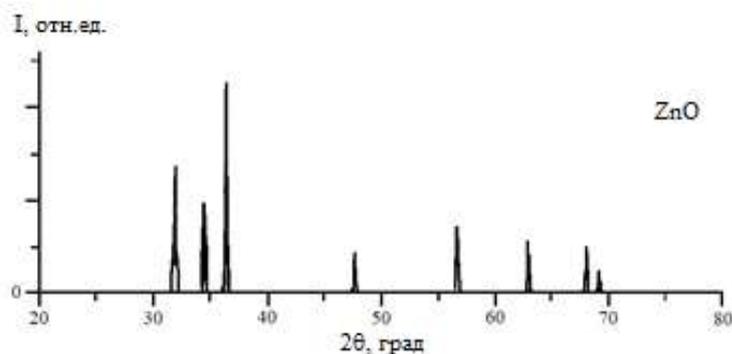


Рис.7. Рентгенограмма микроструктур ZnO.

На рис. 9 представлены спектры ФЛ микро-структур ZnO, полученных при разных плотностях мощности накачки ($\lambda_{\text{возб}} = 255,3$ нм). При малой интенсивности возбуждающего излучения спектр ФЛ, имеет максимум в области 386 нм (кривые 1 и 2). Этот

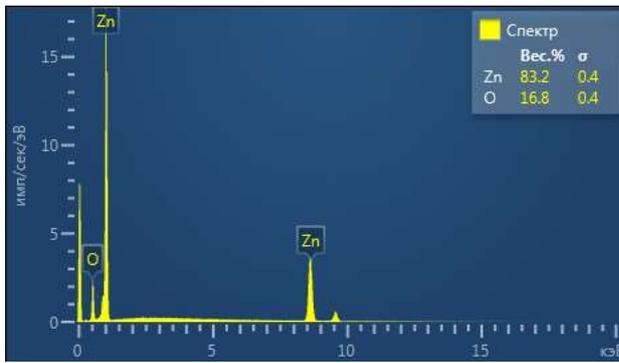


Рис.8. Элементный состав микроструктур ZnO.

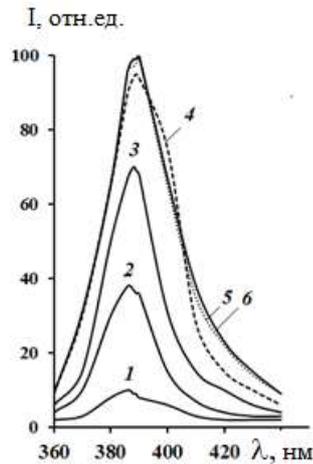


Рис. 9. Спектры ФЛ микроструктур ZnO ($d_{ср}=2$ мкм) при различных плотностях мощности возбуждающего излучения: кривая (1) соответствует $I_{возб}=5$; (2) - $I_{возб}=11$; (3) - $I_{возб}=15$; (4) - $I_{возб}=18$; (5) - $I_{возб}=21$; (6) - $I_{возб}=24$ ($I_{возб}$ - приведены в единицах 10^3 Вт/см²).

При интенсивности возбуждения более $15 \cdot 10^3$ Вт/см² (кривые 3-5) наблюдается сужение линии экситонной люминесценции, интенсивность которой растет нелинейно при дальнейшем повышении интенсивности накачки. Кроме того, наблюдается сужение полосы ФЛ и максимум интенсивности спектра ФЛ сдвигается в длинноволновую область до 4 нм. При интенсивности возбуждения $24 \cdot 10^3$ Вт/см² (кривая 6) зависимость переходит на насыщение.

С целью наблюдения стимулированного излучения в микроструктурах ZnO мы провели излучение УФ люминесценции от интенсивности двухфотонного возбуждения (рис. 10). Видно, что указанная зависимость является нелинейной и носит пороговый характер, а это является одним из признаков стимулированного излучения. Однако отсутствие существенного сужения спектра свидетельствует о том, что в наших экспериментах реализуются лишь пороговые эффекты для вынужденной ФЛ.

Для анализа интенсивности ФЛ (I) использовалось выражение

$$I = \eta \cdot I_{возб}^\alpha, \quad (4)$$

где $I_{возб}$ – плотность мощности возбуждающего излучения, η – квантовый выход, α характеризует механизм излучательной рекомбинации. Для

пик соответствует положению 3L0 полосы из серий многофононной аннигиляции А-экситонов. При высокой интенсивности возбуждающего излучения в полупроводниковых материалах с небольшими концентрациями примесей и дефектов происходит насыщение интенсивности излучательных переходов на примесные уровни и особый интерес следующий аспект многофононной аннигиляции свободных экситонов: возможность получения вынужденного излучения. Известно, что инверсное распределение на свободном экситоне неосуществимо, в то время как при распаде экситона с испусканием фотона и фонона инверсия возникает автоматически.

экситонной рекомбинации $1 < \alpha < 2$, для фундаментального излучения $\alpha \approx 2$ и для переходов с примесных уровней $\alpha < 1$.

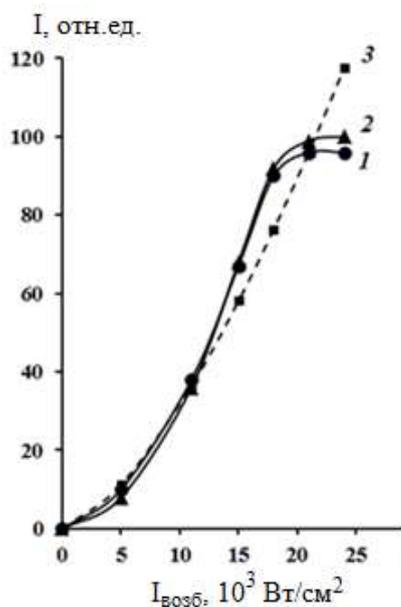


Рис. 10. Зависимости интенсивности ФЛ микроструктур ZnO ($d_{cp}=2$ мкм) (I) от плотности мощности возбуждающего излучения ($I_{возб}$). Кривая (1) соответствует длине волны $\lambda=386$ нм. (2) - $\lambda=390$ нм. (3) - теоретическая зависимость, соответствующая закону $I \approx I_{возб}^{1.5}$.

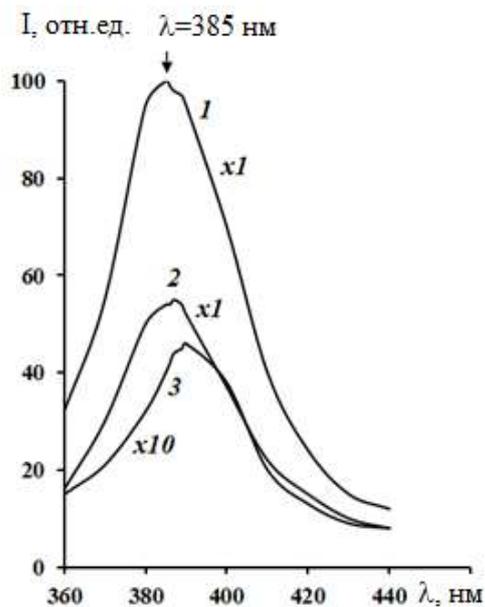


Рис. 11. Спектры ФЛ микроструктур ZnO различных размеров: (1) - $d_{cp}=1$ мкм; (2) - $d_{cp}=2$ мкм; (3) - $d_{cp}=8$ мкм при одних и тех же условиях возбуждения ($\lambda_{возб}=255,3$ нм). Плотность мощности возбуждающего излучения $I_{возб} \sim 10^3$ Вт/см².

Действительно, при наших условиях эксперимента ($I_{возб} \sim 10^3$ Вт/см²) для микроструктур ZnO (см. рис. 9) наблюдается степенная зависимость с $\alpha \approx 1,5$ (рис. 10, кривая 3), что соответствует значению $\alpha = 1,5 \pm 0,2$ в случае объемного кристалла ZnO. При больших плотностях мощности наступает замедление роста интенсивности ФЛ, которое может быть вызвано так и тепловым воздействием, так и генерацией дефектов посредством фотолиза и термодеструкции. Аналогичная закономерность была наблюдаена для монокристаллов и квантовых точек ZnO. Отсутствие видимой ФЛ в наших образцах указывает на низкой концентрации или отсутствии дефектов кислорода и высокой чистоты исследованных порошков ZnO по данным элементного анализа (см. рис. 8).

На рис. 11 представлены спектры ФЛ микроструктур ZnO различных размеров, полученных при одних и тех же условиях возбуждения ($\lambda_{возб}=255,3$ нм). Как видно из рисунка, с уменьшением размера образцов максимум УФ полосы слегка перемещается в коротковолновую область. Спектральная интенсивность спектра ФЛ $d_{cp}=8$ мкм ($\lambda_{мак}=390$ нм) и $d_{cp}=2$ мкм ($\lambda_{мак}=387$ нм) меньше соответствующей интенсивности микрочастиц ZnO с $d_{cp}=1$ мкм ($\lambda_{мак}=385$ нм) примерно в 22 и 2 раза, соответственно. Различие интенсивности и положение ФЛ этих спектров, связано с тем, что между гранями частиц образуются поры, которые дают больше вклад рассеянному свету, чем эффективному поглощению квантов возбуждающего излучения.

Кроме того, если микро- и наночастиц (порошков) поместить в оптический резонатор (фотонную ловушку), тогда интенсивность сигналов ФЛ можно увеличить во много раз. В связи с этим, в последние годы широкий круг исследователей привлекают УФ-лазеры с оптическим микрорезонатором на основе ZnO. Добротность таких резонаторов может быть очень велика и в оптическом микрорезонаторе сама nano-/микроструктура и материал устройства (кюветы) может служить усиливающей средой. В результате на выходе можно получить довольно интенсивные сигналы УФ области и создание милазеров, работающие при комнатной температуре.

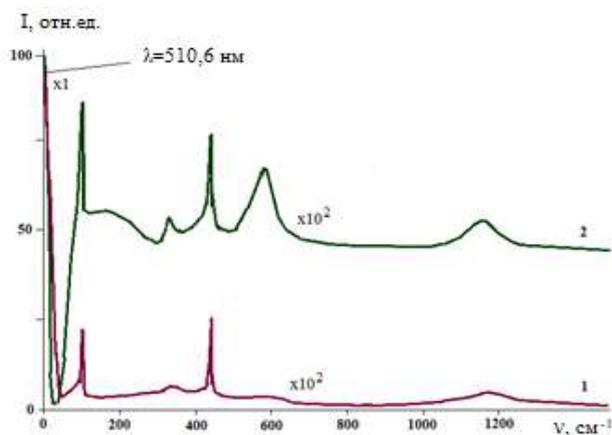


Рис. 12. Спектры КРС микро- и наноструктур ZnO при их возбуждении зеленой линией лазера на парах меди ($\lambda_{\text{возб}}=510,6$ нм): 1 - $d_{\text{cp}}=7$ мкм; 2 - $d_{\text{cp}}=90$ нм ($I_{\text{возб}} \sim 10^5$ Вт/см²).

моды: 1) с частотой ~ 100 см⁻¹; 2) моду при ~ 340 см⁻¹, которую относят к разностному фону $E_2^{\text{выс}} - E_1^{\text{низ}}$; 3) при ~ 435 см⁻¹; 4) $E_1(\text{LO})$ при ~ 580 см⁻¹; 5) широкую полосу между 1060 и 1190 см⁻¹, которую можно отнести к комбинации мод A_1 и E_2 . Основное спектральное изменение, наблюдаемое в спектрах КРС исследуемых образцов, заключается в монотонном увеличении интенсивности $E_1(\text{LO})$ моды (580 см⁻¹) и появлении плеча в области 100÷200 см⁻¹. Ранее в наших экспериментах было показано, что в фотонных ловушках интенсивность КРС микропорошков различных веществ на выходе из кюветы существенно возрастает: наблюдается существенное возрастание относительной интенсивности КРС в сравнении с интенсивностью возбуждающей линии (режим комбинационной опалесценции). Это объясняется значительным увеличением полного пути, который фотон возбуждающего излучения проходит в исследуемом веществе, за счет многократного отражения от стенок ловушки и рассеяния на неоднородностях среды. В ходе экспериментальных исследований было показано, что при применении фотонных ловушек контрастность КРС на выходе из кюветы для веществ, находящихся в ультрадисперсной форме, по сравнению с обычными типовыми кюветами возрастает на пять порядков. При этом наблюдается эффект комбинационной опалесценции, т.е. сигнал КРС в спектре ВИ оказывается сравнимым по интенсивностью возбуждающего излучения.

Спектры КРС микро- и наноструктур ZnO при их возбуждении зеленой линией лазера на парах меди ($\lambda_{\text{возб}}=510,6$ нм) представлены на рис. 12. Как видно из этого рисунка, сигнал КРС наноструктур ZnO (рис. 12, кривая 2) почти в 4 раза больше интенсивности сигнала КРС микроструктур данного вещества. Исходя из литературных данных на спектрах КРС порошков ZnO можно выделить следующие

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования, проведенного по теме диссертации «Вторичного излучение в микро- и наноструктурах оксидов цинка и титана при импульсно-периодическом лазерном возбуждении», могут быть сформулированы основные выводы, состоящие в следующем.

1. Была создана и усовершенствована экспериментальная система регистрации слабых оптических сигналов, использующая резонаторные кюветы-фотонные ловушки и элементы волоконно-оптической техники. Внедрение такой схемы обеспечило устойчивое и высокочувствительное получение спектров вторичного излучения для микро- и нанопорошков диэлектрических и полупроводниковых материалов.

2. Изучены морфология и структура микропорошков оксида цинка, синтезированных микроволновым методом. Показано, что данный подход формирует закристаллизованные стержнеобразные микроструктуры. Рентгеноструктурный анализ подтвердил наличие гексагональной решётки ZnO.

3. Выявлены основные процессы, определяющие формирование спектров фотolumинесценции и комбинационного рассеяния. Установлено, что уменьшение характерного размера частиц ZnO приводит к смещению максимума ультрафиолетовой люминесценции в коротковолновую область, что обусловлено проявлением квантово-размерного эффекта.

4. Впервые выявлены условия проявления эффекта «комбинационной опалесценции». Установлено, что размещение порошков TiO₂ и ZnO в фотонных ловушках приводит к значительному усилению комбинационного рассеяния и повышению контрастности сигналов.

5. Показано, что использование фотонных ловушек приводит к резкому росту контрастности оптических сигналов в микроструктурах оксидов титана и цинка – усиление достигает порядка $10^4 \div 10^5$ по сравнению с традиционными кюветами. Величина этого эффекта определяется размерами частиц и степенью их дисперсности.

6. Впервые получены экспериментальные данные, позволяющие проследить, как ультрафиолетовая люминесценция ZnO изменяется при варьировании интенсивности накачки в фотонной ловушке. Показано, что при росте интенсивности возбуждающего излучения до величин порядка 10^3 Вт/см² экситонная эмиссия микроструктур ZnO переходит от спонтанного режима к стимулированному, проявляя особенности суперлюминесценции.

7. Экспериментально подтверждено, что спектры люминесценции, возбуждаемой одним и двумя фотонами, существенно различаются по интенсивности, спектральному профилю и положению максимумов. Эти отличия обусловлены различными механизмами селективного возбуждения в материале.

8. Показано, что дисперсность исследуемых структур оказывает существенное влияние на формирование спектров вторичного излучения. В

образцах ZnO уменьшение размеров частиц вызывает лёгкий коротковолновый сдвиг максимума люминесценции, тогда как в микропорошках TiO₂ уменьшение размера приводит к росту интенсивности комбинационного рассеяния.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF THE SCIENTIFIC DEGREES
OF DOCTOR OF PHILOSOPHY PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 AT THE
SAMARKAND STATE UNIVERSITY NAMED AFTER
SHAROF RASHIDOV**

CENTER FOR ADVANCED TECHNOLOGIES

DAVRONOV MAMURJON KHAMROEVICH

**SECONDARY RADIATION IN MICRO- AND NANOSTRUCTURES OF
ZINC AND TITANIUM OXIDES UNDER PULSE-PERIODIC LASER
EXCITATION**

01.04.05 – Optics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences**

Samarkand – 2025

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number № B2024.4.PhD/FM1193.

Dissertation has been prepared at the Center for Advanced Technologies under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan and P.N.Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website (www.samdu.uz) and the "Ziyonet" information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Rakhmatullaev Ilyos Arzimurodovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

Official opponents: **Khushvakhtov Hakim Abdulhaqovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Kasimova Guzal Karimovna
Doctor of Philosophy (PhD) in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

Leading organization: **Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies**
(Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan)

Dissertation defense will be held on «26» XII 2025 at 10⁰⁰ at the meeting of Scientific Council number PhD.03/30.12.2019.FM.02.04 at Samarkand State University named after Sh.Rashidov. (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40; e-mail: rektor@samdu.uz cabinet 63, ground floor, the Engineering Physics Institute, Samarkand State University named after Sh.Rashidov).

Dissertation is possible to review in Information Resource Centre at Samarkand State University named after Sh.Rashidov (is registered № 104) (Address: University Boulevard 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, Ph.: (99866) 239-13-87, 239-11-40; fax: (99866) 239-11-40).

Abstract of dissertation sent out on «11» XII 2025 year.
(Registry record № 104 on «11» XII 2025 year)



M.Kh.Ashurov
Chairman of scientific council
on award of scientific degrees,
DSc in physics and mathematics, academician

R.M.Radjabov
Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degrees,
CSc in physics and mathematics, Associate Professor

D.I.Semenov
Chairman of scientific seminar under scientific
council on award of scientific degrees,
DSc in physics and mathematics, Associate Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research. The aim of the study is to determine the regularities of formation of secondary radiation spectra in micro- and nanostructures of zinc and titanium oxides under pulse-periodic laser excitation.

The object of the research were selected micro- and nanostructures of zinc and titanium oxides.

The subject of research is the study of morphological and structural properties and regularities and physical mechanisms of formation of photoluminescence and Raman spectra of micro- and nanostructures based on titanium and zinc oxides under pulse-periodic laser excitation.

The scientific novelty of the research is as follows:

an experimental technique for registration of weak optical signals based on new types of resonator cuvettes (photon traps) and fibre-optic technique for studying the spectra of secondary radiation in micro- and nanopowders of semiconductors and dielectrics under pulse-periodic laser excitation has been developed and improved;

the surface morphology and structure of zinc oxide micropowders obtained by microwave synthesis have been studied and the mechanisms of formation of photoluminescence and Raman spectra in these structures have been established;

it was found that with a decrease in the size of zinc oxide particles, the maximum of the ultraviolet band slightly moves to the short-wave region;

for the first time revealed the conditions of the 'Raman opalescence' effect and the increase of Raman scattering efficiency in zinc and titanium oxide micro- and nanostructures in photon traps;

it has been found that the contrast at the exit from the cuvette of titanium and zinc oxides microstructures in photon traps increases by 10^4 - 10^5 orders of magnitude in comparison with conventional typical cuvettes, depending on the particle size of the substances under study;

the dependence of the ultraviolet luminescence spectrum on the pumping level for zinc oxide samples in photon traps has been demonstrated and investigated for the first time: it has been found that the transition from spontaneous luminescence to stimulated luminescence, i.e., to superluminescence, is observed for exciton luminescence in ZnO microstructures when the excitation radiation power density increases to the order of 10^3 W/cm²;

it was found that the spectra of one- and two-photon-excited luminescence differ from each other in intensity, shape, and position;

it is shown that the dispersion of the structures affects the formation of the secondary emission spectra: with decreasing sample size, the maximum of the luminescence band of zinc oxide slightly moves to the short-wave region. In the case of titanium dioxide micropowders, with decreasing sample size, an increase in the intensity of the Raman signal is observed.

Implementation of research results. Based on the results on the study of morphological, structural, optical properties of micro- and nanostructures based on titanium and zinc oxides:

scientific results obtained by studying the mechanisms of formation of photoluminescence spectra of titanium oxide micro- and nanostructures depending on the size of the studied structures were used in the international fundamental project №MUK-2021-47 “Adaptive organic photovoltaics: a new portable renewable energy source” (2021-2022). The use of scientific results made it possible to explain structural defects in organic photovoltaic cells when titanium and zinc oxides are used in these systems as translucent electrodes by means of photoluminescent properties (Reference No.2//1255-2758of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan of December 12, 2024);

the results were used in the fundamental project “Development of innovative platforms for surface-enhanced Raman spectroscopy” of the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Science of the Republic of Kazakhstan. The developed micro- and nanostructures based on titanium and zinc oxides were tested as substrates for enhanced Raman spectroscopy (SERS) in the detection of various organic substances. Experiments confirmed their high efficiency in signal amplification, providing sensitive detection of low concentrations of organic molecules. These structures were also successfully tested in the field of photocatalysis, where they demonstrated high photocatalytic activity in the decomposition of organic pollutants, which confirms their suitability for practical applications in environmental and analytical chemistry. In particular, the use of scientific results allowed to increase the detection limit of dyes and pesticides (Reference - Act of Implementation of the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan of December 5, 2024);

in accordance with the certificate No. DGU 42928 of the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan dated 16 October 2024, an electronic program “Method of registration of weak optical signals using a multichannel spectrometer” has been developed. The results obtained with the help of resonator cuvettes (photon traps) and laser sources working in pulse-periodic mode, which allowed to reliably register weak optical signals, are implemented in the curriculum ‘Physics’ in the direction of “60610400 - Software Engineering” (Reference No.02/01-01-141 of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan of December 12, 2024).

Approbation of the research results. Results of the research work have been discussed at 8 international and 2 republican scientific-practical conferences.

Publication of research results. A total of 22 scientific works on the topic of research, including 10 articles in scientific publications recommended to publish the main scientific results of the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation of the Higher attestation commission of the Republic of Uzbekistan (including 6 of the republic scale, 2 in the Scopus database and 2 in the Russian Science Citation Index (RSCI) journals) were published and 1 certificate from the Ministry of Justice was obtained.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of used references. The volume of the dissertation includes 129 pages, 48 figures, 1 table.

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

I bo'lim (I часть; I part)

1. Rakhmatullaev I.A., Bunkin N.F., Davronov M.Kh. Effect of Raman opalescence in titanium dioxide micropowders under pulse-periodic laser excitation // Journal of Applied Spectroscopy. – 2025 – Vol.91, No.6. – pp.1256–1260. <https://doi.org/10.1007/s10812-025-01846-9> (01.00.00; №3) (Scopus)

2. Ilyos Rakhmatullaev, Nikolay Bunkin, Mamurjon Davronov, Musakul Tuychiev and Tulkin Nurmurodov. Microwave Synthesis and Study of Morphology, Structure and Luminescent Properties of Zinc Oxide Microstructures // Journal of Physical Science. – 2025. – Vol.36, No. 1. – pp. 27–36. <https://doi.org/10.21315/jps2025.36.1.3> (Scopus)

3. Рахматуллаев И.А., Турсункулов О.М., Гусев А.Л., Тукфатуллин О.Ф., Курбонов А.К., Рахматуллаев М.Р., Кодиров М.К., Давронов М.Х., Эшкулов А.А. Морфологические, структурные и оптические свойства микропорошков диоксида титана // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2021. – №04-06. – С.126-138. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2021.04-06.126-138>. (РИНЦ)

4. Давронов М.Х., Макаров Н.В., Рахматуллаев И.А. Изучение морфологических, структурных и оптических свойств микроструктур оксида цинка, полученных методом микроволнового разложения // Журнал «Успехи в химии и химической технологии». – 2022. – Т.36, №10. – С.60-63. (РИНЦ)

5. Рахматуллаев И.А., Чернега Н.В., Давронов М.Х., Турсункулов О.М. Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция в микроструктурах оксида цинка, помещенных в фотонные ловушки // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2022. – Т. 24, № 4. – С.283-289 (01.00.00; №5). <https://doi.org/10.52304/.v24i4.383>

6. Рахматуллаев И.А., Чернега Н.В., Давронов М.Х., Турсункулов О.М. Морфологические, структурные и люминесцентные свойства микроструктур оксида цинка // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2022. – № 6. – С.40-46 (01.00.00; №7).

7. Рахматуллаев И.А., Чернега Н.В., Давронов М.Х., Турсункулов О.М. Оригинальный метод диагностики слабых сигналов вторичного излучения в микро- и наноструктурах оксида цинка с помощью фотонных ловушек // Журнал «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». – Ташкент, 2022, Специальный выпуск. – № 41. – С.329-341 (05.00.00; №21).

8. Рахматуллаев И.А., Чернега Н.В., Давронов М.Х., Хайдаров Х.С. Одно- и двухфотонно-возбуждаемая люминесценция микропорошков диоксида титана при лазерном возбуждении // Научный вестник СамГУ. – Самарканд, 2022. – № 3. – С.157-163 (01.00.00; №2).

9. Давронов М.Х., Рахматуллаев И.А. Анализ спектров комбинационного рассеяния света микро- и наноструктур оксида цинка,

помещенных в фотонные ловушки // Новости КарГУ. – Карши, 2022. – № 4(1). – С.52-57 (01.00.00; №2).

10. И.А. Рахматуллаев, Н.Ф. Бункин, М.Х. Давронов, Х.З. Ботиров, М.Туйчиев, Т.И. Нурмуродов. Метод регистрации слабых сигналов комбинационного рассеяния в неорганических и органических порошках с использованием фотонных ловушек // Вестник ТФ НИЯУ МИФИ. – №1, 2024, С.6-17 (01.00.00; №8).

II bo‘lim (II часть; II part)

11. Рахматуллаев И.А., Турсункулов О.М., Назаров Х.Т., Давронов М.Х., Курбонов А.К., Тукфатуллин О.Ф., Рахматуллаев М.Р. Исследование морфологии поверхности и структурных свойств микропорошков диоксида титана // Журнал «Наука и инновационное развитие». – 2021. – №4. – С.72-83.

12. Рахматуллаев И.А., Давронов М.Х., Турсункулов О.М., Тукфатуллин О.Ф., Рахматуллаев М.Р., Курбонов А.К. Исследование морфологии и люминесцентных свойств микропорошка диоксида титана // Тезисы Восьмой Международной конференции по физической электронике IPES-8. – 23-24 сентября 2021. – Ташкент. – С.136-137.

13. Рахматуллаев И.А., Давронов М.Х., Гусев А.Л., Турсункулов О.М. Инновационный метод анализа оптических свойств микро- и наноструктурированных полупроводников и диэлектриков с помощью фотонных ловушек // Шестой Всемирный Конгресс «Альтернативная энергетика и экология» – WCAEE – 2022, 20-22 июня 2022 года. – Монтенегро, Будва.

14. Rakhmatullaev I.A., Tcherniega N.V., Davronov M.Kh., Tursunkulov O.M. Raman scattering spectra in zinc oxide microstructures placed in photon traps // Сборник тезисов 29-й Международной конференции по перспективным лазерным технологиям (ALT'22), 11-16 сентября 2022 года. – Москва. – С.188.

15. Давронов М.Х., Рахматуллаев И.А. Морфологические и структурные свойства микро- и наноструктур оксида цинка // Материалы Международной научной и научно-технической конференции «Перспективы развития физики конденсированных сред», 14-15 октября 2022 года. – Карши. – С.11-13.

16. Рахматуллаев И.А., Турсункулов О.М., Давронов М.Х. Изучение свойств микроструктур оксида цинка, полученных методом микроволнового разложения // Сборник научных трудов Международной научной конференции молодых ученых «Наука и инновации», 20 октября 2022 года. – Ташкент. – С.353-355.

17. Давронов М.Х., Рахматуллаев И.А. Исследование оптических свойств микропорошков диоксида титана при комнатной температуре // Сборник тезисов Научно-практической конференции для молодых ученых «Современные проблемы физики, энергетике и теплотехники», 18 ноября 2022 года. – Ташкент. – С.129-131.

18. Илѐс Рахматуллаев, Маъмуржон Давронов. Морфология и фотолюминесцентные свойства микроструктур оксида цинка, синтезированных методом микроволнового разложения // Материалы Международной научной конференции "Наука, техника и инновационные технологии в период Возрождения новой эпохи могущественного государства", посвященной Дню науки Туркменистана, 12-13 июня 2023 года. – Ашхабад, Туркменистан. – С. 55-58.

19. Рахматуллаев И.А., Давронов М.Х., Илхомжонов М.О. Морфология и оптические свойства микроструктур оксида цинка, синтезированных методом микроволнового разложения // Материалы 6-Международной научной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах (OPPSMN-2023), 28-30 сентября 2023 года. – Фергана– С. 40-41.

20. Илхомжонов М.О., Давронов М.Х., Рахматуллаев И.А. Исследование морфологии поверхности и люминесцентных свойств микроструктур диоксида титана. Сборник тезисов Научно-практической конференции для молодых ученых «Современные проблемы физики, энергетики и теплотехники», 23 ноября 2023 года. – Ташкент. – С.133-135.

21. Рахматуллаев И., Давронов М., Илхомжонов М. Одно- и двухфотонно-возбуждаемая люминесценция микропорошков диоксида титана // Сборник тезисов докладов IX Международного симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (КОИПСС2023), 29 ноября – 1 декабря 2023 года. – Москва, – С.40.

22. Raxmatullayev I.A., Davronov M.H., Hoshimov Q.H., Tuychiyev M. Ko‘p kanalli spektrometr yordamida zaif optik signallarni qayd etish usuli // Guvohnoma №DGU 42928. O‘zbekiston Respublikasi Dasturiy mahsulotlar davlat reyestrída 16.10.2024 y. ro‘yxatdan o‘tkazildi.

Avtoreferat Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining
“Ilmiy axborotnoma” jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek,
rus va ingliz tillaridagi matnlari o‘zaro muvofiqlashtirildi (06.12.2025-yil).

Bosmaxona tasdiqnomasi:



4268

2025-yil 9-dekabrda bosishga ruxsat etildi:
Ofset bosma qog‘ozi. Qog‘oz bichimi 60x84_{1/16}.
“Times new roman” garniturasini. Ofset bosma usuli.
Hisob-nashriyot t.: 3,0. Shartli b.t. 2,6.
Adadi 100 nusxa. Buyurtma № 09/12.

SamDCHTI tahrir-nashriyot bo‘limida chop etildi.
Manzil: Samarqand sh., Gagarin ko‘chasi, 43.