

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI

TURDALIYEV TEMUR KAMILOVICH

**G'OVAK KREMNIY VA KREMNIY OKSIDI SIRTIDA ATOM
QATLAMLAB CHO'KTIRISH USULIDA OLINGAN TiO_2 VA ZnO
NANOQATLAMLARINING STRUKTURAVIY VA OPTIK XOSSALARI**

01.04.12 – Nanomateriallar fizikasi va texnologiyasi

fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

AVTOREFERATI

TOSHKENT-2025

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

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

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on physics and mathematics sciences**

Turdaliyev Temur Kamilovich

G'ovak kremniy va kremniy oksidi sirtida atom qatlamlab cho'ktirish usulida olingan TiO₂ va ZnO nanoqatlamlarining strukturaviy va optik xossalari

3

Турдалиев Темур Камилевич

Структурные и оптические свойства нанослоев TiO₂ и ZnO, полученных методом атомно-слоевого осаждения на поверхности пористого кремния и оксида кремния

23

Turdaliev Temur Kamilovich

Structural and optical properties of TiO₂ and ZnO nanolayers obtained by atomic layer deposition on porous silicon and silicon oxide surfaces

45

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works

49

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI

TURDALIYEV TEMUR KAMILOVICH

**G'OVAK KREMNIY VA KREMNIY OKSIDI SIRTIDA ATOM
QATLAMLAB CHO'KTIRISH USULIDA OLINGAN TiO_2 VA ZnO
NANOQATLAMLARINING STRUKTURAVIY VA OPTIK XOSSALARI**

01.04.12 – Nanomateriallar fizikasi va texnologiyasi

fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

AVTOREFERATI

TOSHKENT-2025

Fizika - matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2024.4.PhD/FM1213 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zR FA Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus va ingliz) Ilmiy kengash web - sahifasida (www.iplt.uz) hamda «ZiyoNet» axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Ashurov Xatam Baxronovich
texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Nuritdinov Izzatillo
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Quvondiqov Vahobjon Ortiqovich
fizika-matematika fanlari doktori, kat.i.x

Yetakchi tashkilot:

**Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat
Texnika Universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 raqamli ilmiy kengashning 2025 yil «___» _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100125, Toshkent shahri, Do'rmon yo'li ko'chasi, 33-uy. Tel./faks: (99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz, Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti).

Dissertatsiya bilan Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (____ raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100125, Toshkent shahri, Do'rmon yo'li ko'chasi, 33-uy. Tel: (99871) 262-31-69.)

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «___» _____ kuni tarqatildi.
(2025 yil «___» _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi)

X.B. Ashurov

Ilmiy daraja beruvchi Ilmiy
kengash raisi, t.f.d., professor

I.D.Yadgarov

Ilmiy daraja beruvchi Ilmiy
kengash ilmiy kotibi
f-m.f.d., professor

U.K. Maxmanov

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiya annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati: XX asrning oxirlari va XXI asrning boshlaridan boshlab nanomateriallar fizikasi hamda nanotexnologiyalar sohalari jadal sur'atlarda rivojlanmoqda. Bugungi kunda axborot texnologiyalari, qayta tiklanuvchi energiya manbalari, sensorlar, atrof-muhitni monitoring qilish, biomeditsina va fotonika kabi yo'nalishlarda yuqori faollikka, aniq boshqariladigan tuzilmaga hamda murakkab yuza geometriyasiga ega bo'lgan funksional materiallarga bo'lgan talab tobora ortib bormoqda. Ushbu ehtiyojni qondirish maqsadida sintez texnologiyalari takomillashtirilmogda, va yangi avlod materiallarini yaratish muhim ilmiy vazifalardan biri sifatida qaralmoqda.

Bunday materiallar qatorida keng taqiqlangan sohaga ega bo'lgan yarimo'tkazgich oksidlar - TiO_2 , ZnO hamda yuqori sirt yuzasi tuzilmasiga ega g'ovak kremniy kabi moddalar alohida ahamiyat kasb etadi. TiO_2 va ZnO moddalari o'zlarining yuqori foto-katalitik faolligi, keng optik oraliqdagi nur yutish qobiliyati, dielektrik xossalari hamda nurlanish energiyasini zaryadlangan holatlarga o'zgartirish imkoniyati bilan ajralib turadi. G'ovak kremniy katta sirt yuzasiga ega yarim o'tkazgich sifatida, TiO_2 va ZnO bilan tandemi natijasida hosil qilingan nanokompozit materiallar sensorlar, fotoelektrik qurilmalar, foto-detektorlar va foto-katalizga asoslangan tizimlarda keng qo'llash imkonini beradi.

Yupqa qatlamlar texnologiyasida hosil qilingan materialning fizik, optik va elektron xossalari faqat uning kimyoviy tarkibiga emas, balki qatlamning tuzilishi, faza holati, qalinligi va eng asosiysi - qo'llanilgan sintez usuliga ham bevosita bog'liqdir. ALD texnologiyasi, murakkab mikro geometriyaga ega yuzalarda qoplamalarni atom darajasida yuqori aniqlik bilan hosil qilish imkonini beradigan zamonaviy sintez usuli. ALD usulida aniq morfologik, elektrofizik va optik xossalarga ega bo'lgan TiO_2 hamda ZnO nanoyupqa qatlamlarini sintez qilish jarayonlarini tadqiq qilish bugungi kunda nanomateriallar yo'nalishida ham ilmiy, ham amaliy jihatdan muhim vazifaga aylangan.

ALD usulida sintez qilingan TiO_2 va ZnO nanoqatlamlar, bir tomondan, atomar aniqlikdagi yuza strukturasi, birxil va nazoratlik qalinlik, kam defektli mikrotuzilish kabi xossalarga ega bo'lsa, ikkinchi tomondan — sintez parametrlari orqali fazaviy holati, kristallik darajasi va funksional markazlar miqdorini samarali boshqarish imkonini beradi. Shu sababli, ALD usulida sintez qilingan TiO_2 va ZnO qatlamlarining g'ovak kremniy, kremniy va kremniy oksidi kabi tagliklar bilan tandem tuzilmalari fizik, optik, sensor va foto-katalitik xossalarini tadqiq qilish — hozirgi kunda materialshunoslik, sensorlar va funksional qo'llanmalar sohaslarida ham ilmiy, ham amaliy jihatdan dolzarb yo'nalishlardan biri hisoblanadi.

Ushbu tadqiqot ishi O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "2022 - 2026 larda yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-sonli Farmoni, 2017-yil 17-fevraldagi "Fanlar akademiyasi faoliyatini yanada takomillashtirish, ilmiy-tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PF-2789-sonli Farmoni va 2019-yil 22-avgustdagi "Xo'jalik va maxsus sohalarda energiya samaradorligini oshirish, energiyani tejash texnologiyalarini joriy etish va qayta tiklanadigan energiya

manbalarini rivojlantirish bo'yicha tezkor choralar to'g'risida"gi PF-4422-sonli Farmonlarida belgilangan vazifalarning amalga oshirilishiga hissa qo'shadi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi: Mazkur dissertatsiyaning tadqiqot ishlari O'zbekiston Respublikasida ilm-fan va texnologiyalar rivojlanishining "Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik" yo'nalishlariga muvofiq amalga oshirildi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi: ALD — «Atomic Layer Deposition» texnologiyasi ilk bor 1970-yillarda finlyandiyalik olim Tuomo Suntola tomonidan rivojlantirilgan bo'lib, u qatlam-qatlam reaksiyalar asosida yupqa qatlamlar sintez qilishga asoslanadi. Suntola va uning hamkasblari atom qatlamli epitaksiya (ALE) usulini ishlab chiqib, elektr-lyuminessent displeylar uchun dielektrik plyonkalar olishda muvaffaqiyatli qo'llashdi ("United States Patent," US4058430). Shuningdek, shu davrda SSSRda V.B. Aleskovskiy va S.I. Kolsovlar tomonidan "молекулярное наложение" deb ataluvchi o'xshash yondashuv taklif etilgan.

1990-yillarga kelib, ALD texnologiyasi butun dunyo bo'ylab ilmiy tadqiqot markazlarida faol o'rganila boshlandi. AQShda Stiven Jorj (Kolorado universiteti), Greg Parsons (Shimoliy Karolina universiteti), Markku Leskelya (Xelsinki universiteti) kabi yetakchi olimlar ALD usulini rivojlantirishga salmoqli hissa qo'shdilar. Ular tomonidan ALD orqali turli materiallarni, xususan TiO_2 , Al_2O_3 va ZnO qatlamlar yuqori aniqlikda sintez qilish, ularning tuzilmaviy, optik va elektronika xossalari boshqarishga oid fundamental ishlar amalga oshirildi. Hozirgi kunga kelib, ALD bo'yicha faoliyat yurituvchi xalqaro ilmiy jamoa shakllangan va 2001-yildan boshlab ALD konferensiyalari tashkil etib kelinmoqda.

TiO_2 qatlamlari ALD orqali sintez qilishda ko'p hollarda titan atomlari manbai sifatida $TiCl_4$ yoki organik titan izopropoksidi qo'llaniladi. Xususan, $TiCl_4/H_2O$ jufti $100-200\text{ }^\circ\text{C}$ haroratda amorf yoki anataz fazali TiO_2 qatlamlarini berishini J. V. Klaus va S. M. Jorj o'z ishlarida isbotlashgan. ZnO qatlamlari uchun asosan dietilsink va H_2O yoki O_3 plazmasi qo'llaniladi. Bu jarayonning turli parametrlari va xossalari ilk bor Y. Niinisty, M. Ritala, M. Leskelya tomonidan o'rganilgan. Oxirgi yillarda ZnO va TiO_2 ALD-qatlamlariga Al, Ga, In va boshqa elementlarni kiritish orqali shaffof o'tqazuvchi qatlam materiallarini va ko'rinish sohasida aktiv fotokatalik qatlamlarni olish keng o'rganilmoqda.

ALD texnologiyasining murakkab sirt strukturalarga nisbatan yuqori konform qoplash qobiliyati, uni nanotexnologiyada dolzarb yo'nalishga aylantirdi. Shu nuqtai nazardan, g'ovak kremniy modifikatsiyasida ALD usuli katta ahamiyatga ega. Kremniyda g'ovaklar hosil bo'lishi fenomeni ilk bor Uxlir (1956) tomonidan tasodifan aniqlangan, lekin bu hodisa Kanxem (1990) tomonidan foto-lyuminessensiya xususiyati aniqlangandan so'ng katta e'tibor uyg'otgan. Voos va Delaland (1993), Kenxem (2020) kabi tadqiqotchilar kvant o'lchamdagi effektlar g'ovak kremniyning fotonikadagi imkoniyatlarini asoslab berishgan.

G'ovak kremniy yuzasining yuqori reaksiyon faolligi tufayli ALD orqali uning ichki devorlarini ham yuqori birxillikda, selektiv qoplash mumkin. Bunday konform qoplamalar asosida g'ovak kremniy tuzilmasini TiO_2 va ZnO qatlamlari bilan modifikatsiya qilish orqali noyob optoelektron xossalarga ega kompozit

geteroqatlamlar hosil qilish imkoniyati ilk bor Vang va hammualliflari tomonidan (2015) namoyish etilgan. Pavlenko va hammualliflar (2020) tomonidan ALD usuli orqali ZnO qatlamlari bilan modifikatsiya qilingan g'ovak kremniy asosida biofotonika sohasi uchun mos keluvchi nanokompozitlar yaratilib, ularning lyuminessensiya xossalari va yuza morfologiyasi chuqur tahlil qilingan. Suniga-Islas va hammualliflar (2025) g'ovak kremniy yuzasini metall nanozarralar bilan bezatilgan TiO₂ qatlamlari bilan qoplash orqali fotokatalitik faolligi yuqori bo'lgan gibrid tuzilmalarni hosil qilishga erishganlar.

O'zbekistonda ushbu yo'nalishda dastlabki ishlar A.I. Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida olib borilmoqda. Jumladan, makro- va mikrog'ovak kremniy, quyosh panellari kremniy plastinalari, sapfir va boshqa turdagi tagliklarda TiO₂ va ZnO qatlamlarini termal va plazmali ALD usullarida sintez qilish, fazaviy holatini XRD va RAMAN spektroskopiyaga yordamida o'rganish, hamda ellipsometriya usuli bilan material optik konstantalarni aniqlash bo'yicha Amaliy nanotexnologiyalar laboratoriyasida ishlar olib borilmoqda.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi: Dissertatsiya ishi Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutining ilmiy-tadqiqot ishlar rejasiga muvofiq, IL-5421101842 "Nanokatalizatorlar: shakillanishi, strukturasi, o'lchov effektlari va ularning uglerod nanomateriallari sintezi jarayonlariga ta'siri" nomli fundamental loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi: MakroG'K, kremniy, kvarts tagliklar sirtida ALD usulida TiO₂ va ZnO qatlamlarini sintez qilish, hamda ularning morfologik, strukturaviy, optik xususiyatlarini o'rganish, shuningdek, sintez muhiti va keyingi termik ishlov berishning fazaviy o'zgarishlarga ta'sirini o'rganish.

Tadqiqotning vazifalari:

- makrog'ovakli kremniy olish texnologiyasini amalga oshirish va olingan namunalarni morfologiyasini tadqiq qilish bilan jarayonga ta'sir etuvchi omillarni o'rganish;

- tayyorlangan tagliklarga, TiO₂ va ZnO yupqa qatlamlarini termik ALD usulida sintez qilish;

- olingan namunalarning morfologiyasi, strukturaviy va optik xossalarni raman spektrometriyasi, rentgen tahlili, optik yutilish spektroskopiyasi va atom kuchli mikroskopiyasi yordamida o'rganish;

- qatlamlar qalinligi va optik xossalarni spektral ellipsometriya usulida tadqiq qilish uchun qatlam modelini ishlab chiqish va tahlil qilish;

- TiO₂ fazaviy holatining termik ALD jarayonidagi taglik harorati, qatlamning strukturaviy va optik xossalarga ta'sirini tadqiq qilish;

- sintez qilingan TiO₂ qatlamlarida termik ishlov berish natijasidagi fazaviy o'tish jarayonlarini o'rganish.

Tadqiqotning obyekti: G'ovak kremniy, tekis monokristall kremniy, kvarts shisha tagliklar va ular sirtida ALD usuli orqali sintez qilingan TiO₂ va ZnO nanoqatlamlari.

Tadqiqot predmeti: TiO₂ va ZnO nanoqatlamlarining ALD usulida sintezi, ularning g'ovak kremniy, tekis kremniy va kvars tagliklardagi morfologiyasi, fazaviy holati va strukturaviy o'zgarishlari, hamda spektral ellipsometriya, Raman spektroskopiya, XRD, SEM va AFM usullari orqali tahlil qilingan.

Tadqiqotning usullari: Dissertatsiya ishida quyidagi zamonaviy ilmiy tadqiqot usullari qo'llanildi: nanoqatlamlarni hosil qilish uchun ALD usuli; g'ovak kremniy namunalarini tayyorlash uchun monokristall kremniyni elektrokimyoviy usulda o'yish texnologiyasi; olingan qatlamlarning tarkibi va fazasini o'rganish uchun rentgen difraksion faza tahlili, Raman spektroskopiyasi va energiyaga dispersiya rentgen spektrometriyasi; morfologiyani tahlili maqsadida skanerlovchi elektron mikroskopiya va atom kuchli mikroskopiyasi; fotolyuminessensiya spektroskopiyasi, optik spektrofotometriya va ellipsometriya usullar optik xususiyatlarni tadqiq qilish uchun qo'llandi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi:

- ilk bor dietilsink va suv yordamida termik ALD usulida, taglik harorati 200°C bo'lgan sharoitda, makrog'ovak va tekis kremniy tagligida qalinligi ~50 nm bo'lgan ZnO qatlamlari sintez qilinganda, vyursit fazasiga tegishli geksagonal nanokristall tuzilmaning izotrop polikristal holda shakllanishi aniqlandi;

- ilk bor titan izopropoksidi va suv yordamida termik ALD usulida, makrog'ovak va tekis kremniy tagligida 225°C taglik haroratida qalinligi ~100 nm bo'lgan TiO₂ qatlamlari sintez qilinganda, tarkibida anataz fazasi mavjud bo'lgan izotrop polikristall tuzilma shakllanishi aniqlandi;

- ilk bor 240-1000 nm spektral oraliqda ALD usulida sintez qilingan TiO₂ va ZnO qatlamlarining optik konstantalarini yuqori aniqlikda aniqlash, shuningdek defekt energetik sohalar ulushini hisobga olish imkonini beruvchi Taus-Lourens umumlashgan funksiyasi asosidagi uch ossilyatorli qatlam modeli ishlab chiqildi;

- ilk bor titan izopropoksidi va suv yordamida termik ALD usulida sintez qilingan TiO₂ qatlamlarida fazaviy o'tish jarayonlarining qalinlikka bog'liqligi aniqlandi. Xususan, qalinligi 250 nm gacha bo'lgan qatlamlar 1000°C gacha bo'lgan haroratda yuqori termik barqarorlikka ega ekani tajribada isbotlandi;

- ilk bor termik ALD usulida sintez qilingan amorf TiO₂ qatlamlariga keyingi termik ishlov berish natijasida, strukturada amorf tuzilmadan anataz va rutil fazalariga o'tish jarayonlari, morfologiyada zichlashish va mikroyoriqlar hosil bo'lishi, shu bilan birga, optik yutish sohasida lokal energetik holatlar ulushining kamayishi va qizil tarafga siljishi, hamda optik konstanta qiymati sikllar soniga bog'liq emasligi aniqlandi.

Tadqiqotning amaliy natijalari: ALD usulida sintez qilingan TiO₂ va ZnO qatlamlari uchun spektral ellipsometriya ma'lumotlarini tahlil qilishda optik konstantalar va qalinlikni yuqori aniqlikda aniqlash imkonini beruvchi qatlam modeli ishlab chiqildi. Ushbu model 240-1000 nm spektral oraliqda dielektrik funksiyani hisobga olishda asosiy energetik holatlar bilan birga defekt sathlar ulushini ham to'liq aks ettiruvchi Taus-Lourens umumlashgan funksiyasiga asoslangan. Model qatlamlarning optik konstantalarini yuqori aniqlikda hisoblash imkonini berdi va tahlil natijalarining real struktura bilan mosligini ta'minladi.

Yuqori termik barqaror anataz fazasi olinishi eksperimental tasdiqlandi — 225 °C da ALD orqali 250 nm gacha sintez qilingan TiO₂ qatlamlarda anataz fazasi hosil qilinib, keyinchalik 1000 °C gacha bo‘lgan termik ishlovlarda ham uning ustuvorligi saqlanishi aniqlandi. Bu natija, yuza passivatsiyasi, fotokataliz va nur qaytarishni kamaytirish kabi amaliyotlarda termik barqaror TiO₂ qoplamalarini qo‘llash uchun muhim asos bo‘ladi. ZnO va TiO₂ qatlamlarining g‘ovak remniy strukturalarida yuqori konformlik bilan hosil qilinishi ko‘rsatildi — ALD usuli orqali makrog‘ovakli kremniy tagliklarda sintez qilingan ZnO va TiO₂ qatlamlar g‘ovak devorlari va kanallarini birxil qalinlikda, mukammal konformal qoplashini ta‘minlashi isbotlandi. Bu, sensor, fotokatalizator va "aqli qoplama" texnologiyalari uchun murakkab geometriyali 3D tuzilmalarda samarali qoplama hosil qilish imkonini yaratadi. TiO₂ qatlamlarining strukturaviy amorf, amorf/kristall va toza kristall holati kombinatsiyalari sintez parametrlari aniqlanib, ularning funksional qo‘llanish imkoniyatlari asoslab berildi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi: zamonaviy standartlashtirilgan usullar va qo‘shimcha tadqiqot usullarini qo‘llash, yuqori aniqlikdagi asboblardan foydalanish, shuningdek, aniq statistik natijalar olish uchun yetarli miqdorda eksperimental ma‘lumotlarning borligi bilan asoslanadi. Natijalarning ishonchliligi, shuningdek, zamonaviy eksperimental texnologiyani qo‘llash va olingan natijalar va boshqa mualliflarning ma‘lumotlari bilan muvofiqligiga asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati: G‘ovak kremniy tagliklarda termik ALD usulida sintez qilingan TiO₂ va ZnO qatlamlarining fazaviy holati, morfologiyasi va optik xossalari to‘g‘risida kompleks tahlillar amalga oshirildi. Bu natijalar asosida turli haroratlarda va sikllar sonida sintez qilingan qatlamlarda anataz va vyursit kabi kristall fazalarning hosil bo‘lishi, ularning yuza topografiyasi va spektroskopik xossalari tadqiq qilindi. Spektral ellipsometriya usuli uchun TiO₂ va ZnO qatlamlarining geterogen modellari ishlab chiqildi. Modellar tajriba ma‘lumotlari bilan yuqori darajada mos kelib, qatlam qalinligi, yutilish koeffitsiyenti va taqiqlangan soha kengligini aniqlashda yuqori aniqlikni ta‘minladi. Bu esa spektral modellashning amaliy qurilmalarda qo‘llanilishiga zamin yaratdi. Amaliy jihatdan, ALD texnologiyasining yuqori konformal qoplamalar hosil qilish qobiliyatidan foydalanib, tekis va g‘ovak tagliklarda birxil yupqa qatlamlar sintez qilish imkoniyatlari namoyon etildi. Sintez qilingan TiO₂/G‘K va ZnO/G‘K kompozitlari sensorlarda, fotokataliz, biomeditsina, fotoelektr qurilmalarda, shu jumladan, quyosh elementlarida va muhitni tozalash tizimlarida qo‘llanilishi mumkin bo‘lgan funksional materiallar sinfiga kiradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi: O‘zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligi tomonidan foydali modelga patent olindi (“Gaz sensorlari uchun sezgir materialdan qoplamaning olish usuli” № FAP 2698 18.11.2024). Gaz sensorlari uchun sezgir material sifatida ALD usulida sintez qilingan TiO₂ qatlamlarini qo‘llashni ko‘zda tutuvchi foydali model, sensorlar uchun taglik sifatida dielektrik materiallar yuzasida yupqa, birxil, yuqori tozalikka ega qatlamlarni hosil qilish imkoni beradi.

ALD usuli orqali makrog'ovak kremniy tagliklarda olingan TiO₂ qatlamlarning morfologiyasi va optik xossalarini tadqiq etishga bag'ishlangan maqola: "Morphology and optical characteristics of TiO₂ nanofilms grown by atomic-layer deposition on a macroporous silicon substrate" (Journal of Applied Spectroscopy. 2024. Vol. 91. No. 4. pp. 769–774. DOI: 10.1007/s10812-024-01783-z) natijalariga xalqaro tadqiqotchilar tomonidan, qator maqolalarda (Shengxi Jiao and Zhenqiu Gao, Opt. Mater. Express 15, 541-554 (2025), Nedelin, S.V., Zolotovskii, N.A., Voronin, A.S. et al., Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 88, (2024), A.A. Rakhimov, I.Kh. Khudaykulov, A.A. Ismatov, M.M. Adilov, East European Journal of Physics, N3, 2025) havola qilingan.

TiO₂ qatlamlarini termik ALD usulida titan izopropoksidi va suv yordamida olish hamda keyingi termik ishlov berish natijasida qatlamlardagi strukturaviy o'zgarishlar va fazaviy o'tish jarayonlarini aniq tavsiflash bo'yicha olingan natijalar "SGD Systems" MChJ tomonidan 2024–2025 yillarda olib borilgan "Tibbiyotda qo'llaniladigan maxsus implantlar" amaliy dasturi bajarilishida tatbiq etilgan ("SGD Systems" MChJ shaklidagi korxonasi 2025 yil 20 avgustdagi №20/08 ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish umurtqa implantlarini biobarqaror TiO₂ qoplamalari bilan qoplash, 3D printerda olingan implantlar sirtiga TiO₂ yotqizish orqali ularning inson organizmiga biologik moslashuvchanligini ta'minlash, shuningdek, suyak o'rnini bosish jarayonida mexanik chidamlilik va yuqori harakatchanlikni oshirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatyasi: mazkur tadqiqotning natijalari 15 ta xalqaro ilmiy-texnik va ilmiy amaliy anjumanlarda aprobatyadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi: dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 9 ta ilmiy ish chop etilgan, O'zbekiston Respublikasi Oliy Attestatsiya Komissiyasining dissertatsiyalarning asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 8 ta, jumladan 4 ta xorijiy va 4 ta respublika ilmiy jurnallarda nashr etilgan, hamda 1 ta O'zbekiston Respublikasi patenti olingan.

Dissertatsiya tuzilishi va hajmi: dissertatsiya tarkibiy tuzilishi kirish, beshta bob, xulosa, 186 ta foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 120 betni tashkil etadi, 61 ta rasm va 10 ta jadval qo'shimcha qilinadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

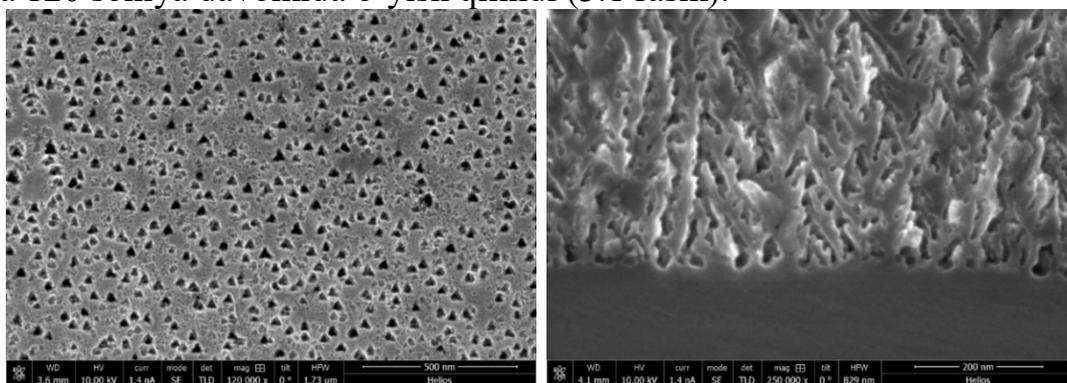
Dissertatsiya kirish qismida dissertatsiya mavzusining ahamiyati va dolzarbligi asoslab berilgan. Tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqot obyekti, predmeti va usullari haqida ma'lumot berilgan, tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnikani rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi aniqlangan. Olingan natijalarning ilmiy yangiligi va ilmiy-amaliy ahamiyati ta'riflangan, natijalarning ishonchligi, ularning amaliyotga tatbiq qilinishi, ishning aprobatiya natijalari va dissertatsiya tuzilishi haqida ma'lumot berilgan.

Dissertatsiyaning birinchi bobida g'ovak kremniy yuzasidagi TiO₂ va ZnO nanoqatlamlar asosidagi kompozit materiallarning xossalari va ularni sintez qilishga oid ilmiy tadqiqotlar holati tahlil qilingan. G'ovak kremniy tagliklarining tuzilishi, yuqori ichki yuza maydoni va boshqa fizik-kimyoviy xususiyatlari yoritilgan.

Oksidlik qatlamlar bilan modifikatsiyalangan g'ovak kremniy asosidagi kompozitlarning fotoaktiv, sensor va biomeditsina sohalaridagi qo'llanish imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. TiO₂ va ZnO qatlamlarini olish usullari, xususan, ALD texnologiyasining afzalliklari va parametrlari tahlil etilgan. Shuningdek, ALD orqali olingan qatlamlarning taglik bilan o'zaro ta'siri, o'sish xususiyatlari va strukturasi ta'sir etuvchi omillar hamda zamonaviy ilmiy tadqiqotlar natijalari asosida umumiy xulosalar keltirilgan.

Ikkinchi bob «Ishlatilgan boshlang'ich materiallarning xossalari, tajriba va tadqiqot usullari» dissertatsiyada qo'llanilgan boshlang'ich materiallarning to'liq tavsifi, tadqiqot obyektlarini tayyorlash jarayonlari, ularga nisbatan amalga oshirilgan texnologik ishlov berish usullari hamda turli fizik tahlil vositalari haqida ma'lumotlar keltirilgan. Kremniy asosidagi tagliklarning yuzasini tayyorlash, g'ovak kremniy tuzilmalarini hosil qilish uchun elektrokimyoviy anodlash usuli, TiO₂ va ZnO nanoqatlamlarini atom qatlamlab cho'ktirish usuli orqali sintez qilish jarayonlari atroflicha tavsiflangan. Tayyorlangan namunalarning tuzilish, fazaviy holat va yuza morfologiyasini baholash uchun skanerlovchi elektron mikroskopiya, XRD, Raman, ultrabinafsha-ko'rinish soha spektroskopiyasi va ellipsometriya kabi tahlil usullarining texnik xususiyatlari va qo'llash tartibi bayon etilgan.

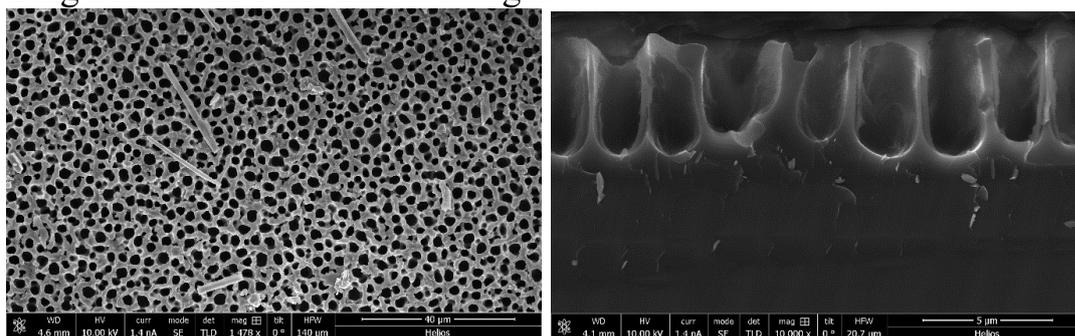
Uchinchi bob «G'ovak kremniy olish va uning morfologiyasiga ta'sir etuvchi omillarni aniqlash» elektrokimyoviy anodlash usulida g'ovak kremniy tuzilmalarini hosil qilish jarayoni va bu jarayonga ta'sir etuvchi asosiy texnologik omillar tadqiq etilgan. Elektrokimyoviy o'yish jarayonida hosil bo'ladigan g'ovak kremniy tuzilmasining shakllanishi va xossalari, bir qator texnologik va fizik parametrlar - elektrolit eritmasi tarkibi, o'yish vaqti, tok zichligi hamda kremniy tagligining elektr-fizik xususiyatlari bilan belgilanadi. Jarayonni aniq va barqaror amalga oshirish maqsadida maxsus elektrokimyoviy o'yish qurilmasi loyihalashtirilib, ishlab chiqildi. Tajriba jarayonida nano va makro tuzilmali g'ovak kremniy namunalari elektrokimyoviy anodlash usuli orqali sintez qilindi. Har ikki holat uchun ham HF, etanol va suvning 1:1:1 hajmdagi aralashmasidan iborat elektrolit tayyorlandi. Nanog'ovak tuzilmalar uchun 15 mA/sm² tok zichligida 15, 30, 60 va 120 soniya davomida o'yish qilindi (3.1 rasm).



3.1 rasm. Nanog'ovak kremniy yuzasi va ko'ndalang kesimi SEM tasvirlari

Makrog'ovak tuzilmalar uchun esa 36 mA/sm² tok zichligida 10 va 20 daqiqa o'yish amalga oshirildi. SEM tahliliga ko'ra, nanog'ovak kremniyda namunalarda g'ovaklar 10-40 nm diametrda, zich va tarmoqlangan holda tarqalgan. Umumiy g'ovaklik darajasi taxminan 75% ni tashkil etdi. Makrog'ovak kremniy

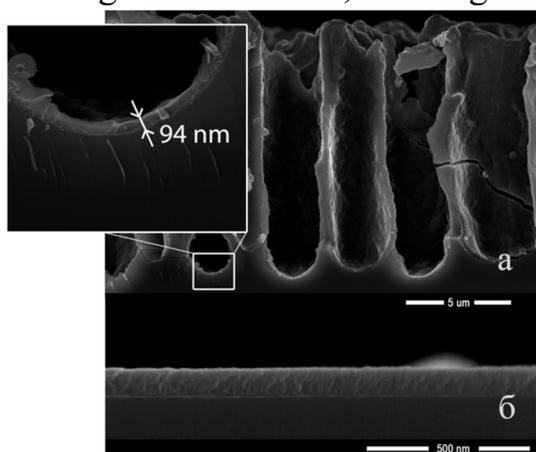
namunalarining morfologiyasi 3.2-rasmda tasvirlangan namuna yuzasi va ko'ndalang kesim SEM tasvirda keltirilgan.



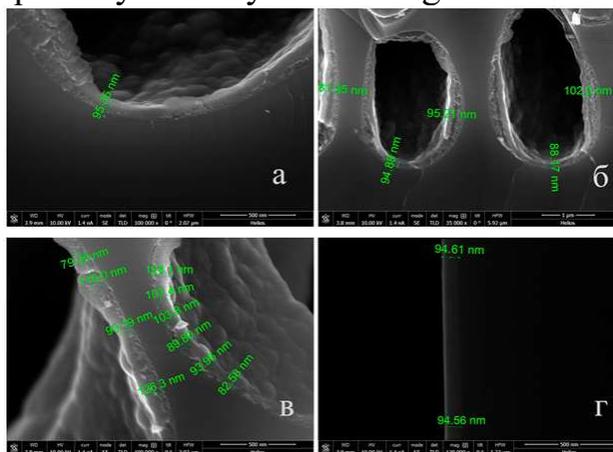
3.2 rasm. Makrog'ovak kremniy sirti va ko'ndalang kesimi SEM tasvirlari

Namunaning yuzasi birxil tarzda zich joylashgan, asosan doirasimon shakldagi g'ovaklar bilan qoplangan. G'ovaklar diametri 1.8–2.8 mkm oralig'ida. Umumiy g'ovaklik darajasi taxminan 55%. Ko'ndalang kesim SEM tasvirlaridan g'ovaklar aniq vertikal yo'nalgan va silindrsimon ekanligi kuzatildi.

To'rtinchi bob «ALD usulida olingan TiO₂ va ZnO qatlamlarining strukturaviy va optik xossalari». 4.1-rasmdagi ko'ndalang kesim SEM tasvirlari, g'ovak kremniy tagliklarda TiO₂ qatlami vertikal kanallarini to'liq va konform qoplagani ko'rinadi va qatlam qalinligi, taxminan 94 nm ni tashkil etgan. 4.1 (b) rasmdagi SEM tasvirda, tekis taglikda qatlam yuza bo'ylab birxilligi ko'rinadi.

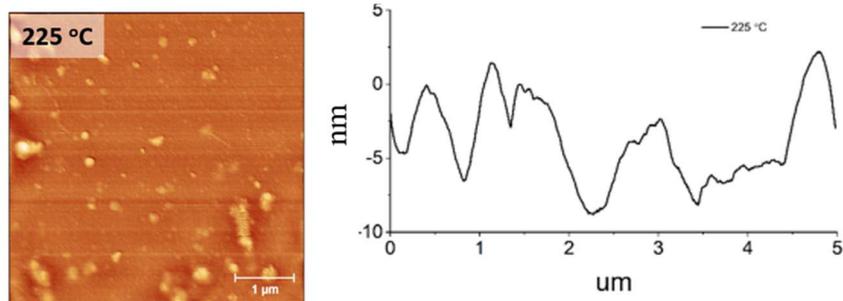


4.1-rasm. G'ovak (a) va tekis (b) kremniy namunalari ko'ndalang kesimi SEM tasvirlari;

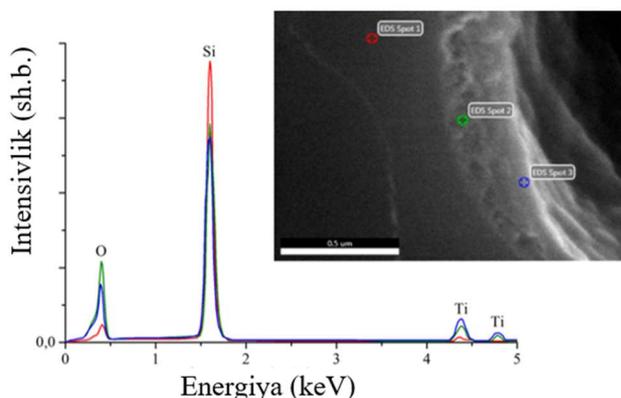


4.2-rasm. G'ovak kremniy taglikda sintez qilingan TiO₂ ko'ndalang kesimi SEM tasvirlari.

Yuqorida keltirilgan 4.2-rasmda g'ovak kremniy va tekis sirtga ega monokristall kremniy tagliklar turli hududlarida o'lgangan qatlam qalinliklari ko'rsatilgan va ular o'rtacha taxminan 95 nm tashkil etadi. Barcha holatlarda TiO₂ qatlami g'ovak kremniy kanallarida, shuningdek, tekis sirt yuzasida bir xil konform qoplama hosil qilgani tasdiqlanadi. Tekis taglikda sintez qilingan qatlamning 5 × 5 mkm o'lchamdagi yuza topografiyasi va profili AKM usuli bilan o'rganildi (4.3-rasm). Yuza relefi parametrlari standart g'adir-budurlik formulalari asosida aniqlandi. Hisoblash natijalari, 5 mkm uzunlikdagi topografiyadan qatlam yuzasining o'rtacha arifmetik og'ishi $R_a=2,4$ nm, maksimum va minimum nuqtalar orasidagi farqi esa $R_z=10,97$ nm ni tashkil etdi.



4.3-rasm. 225 °C haroratda sintez qilingan TiO₂ AKM tasviri va profili.

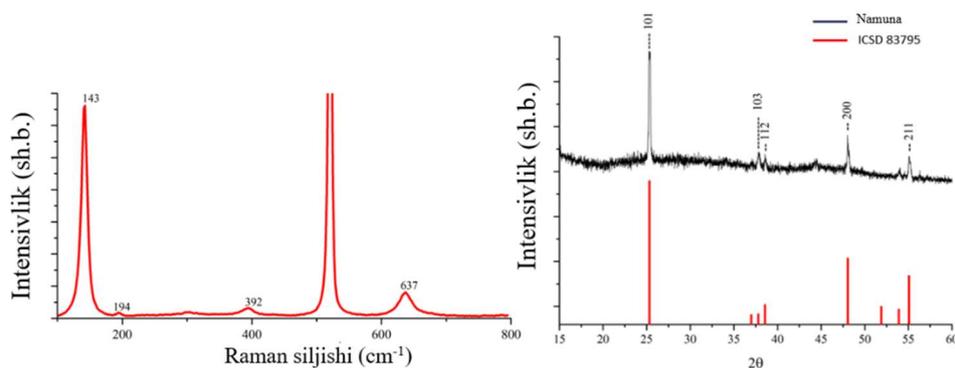


4.4-rasm. TiO₂ qatlamning EDS tahlili.

TiO₂ qatlamining element tarkibi tahlili: SEM va EDS usuli bilan tahlil qilindi. Tahlil uchta nuqtada, kremniy tagligi ichki qismida, taglik qatlam chegarasida va qatlam sirtida amalga oshirildi (4.4-rasm). Sirtida titan va kislorod aniqlanib, qatlam titan oksididan tashkil topgani tasdiqlandi. Qatlamda fluor, uglerod, xlor kabi yot elementlar aniqlanmadi. Bu ALD jarayonidagi prekursor tarkibidagi

organik va noorganik guruhlar qatlamda qoldiqlar qoldirmaganini anglatadi.

TiO₂ qatlamining strukturaviy xususiyatlari: TiO₂ turli fazaviy holatlarda anataz, rutil, brukit yoki amorf shaklda bo‘lishi mumkin. Qatlamning fazaviy tarkibi sintez sharoiti, harorat, qalinlik va taglik xususiyatlariga bog‘liq. 4.5-rasmdagi Raman spektrida 143, 194, 392 va 637 sm⁻¹ da piklar aniqlangan. Anataz fazasiga xos bo‘lib, Eg va B1g modalariga to‘g‘ri keladi. 520 sm⁻¹ dagi yuqori intensiv cho‘qqi esa taglikdagi kremniyga tegishli bo‘lib, anatazning 513 va 517 sm⁻¹ dagi cho‘qqilarini yutib yuborgan. XRD tahlilda ICSD ma‘lumotlar bazasiga tayanilib, 4.5-rasmdagi XRD difraktogramma (qora chiziq) anataz fazasiga tegishli ICSD 83795 ma‘lumotlari (qizil chiziq) bilan taqqoslandi.



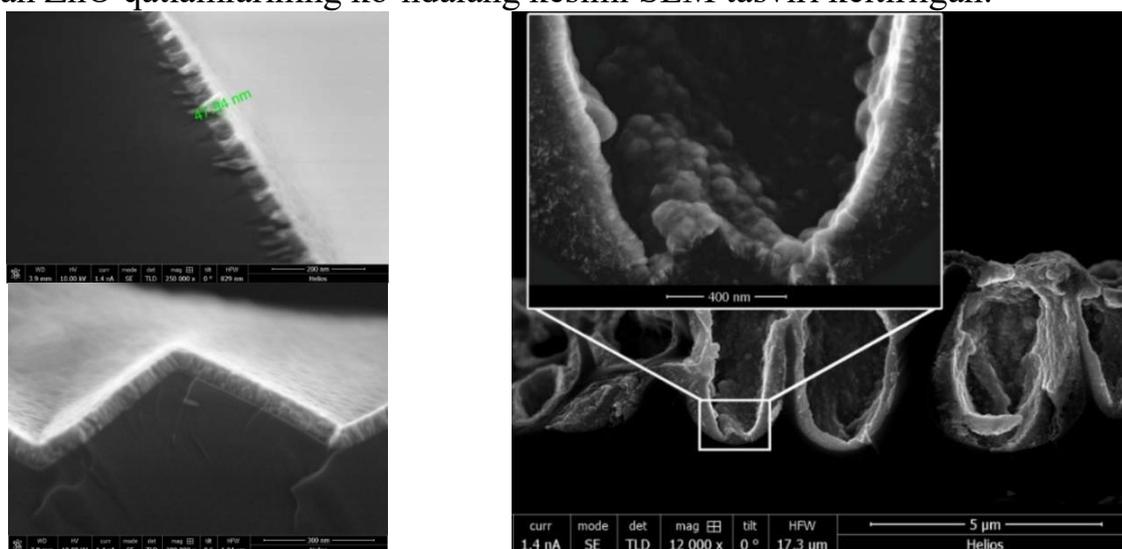
4.5-rasm – TiO₂ qatlamning Raman spektri va XRD difraktogrammasi

Moslik koeffitsiyenti 0.33 bo‘lib, namunada anataz fazasi hosil bo‘lganini ko‘rsatadi. Polikristall materiallarda kristallitlar turli yo‘nalishda joylashadi, shu sababli difraksiya chiziqlari statistik intensivlikka ega bo‘ladi va etalon ma‘lumotlar bilan mos keldi. 4.1-jadvalda keltirilgan hisob-kitoblarga ko‘ra, kristallit o‘lchamlari o‘rtacha 40-70 nm oralig‘ida ekanligi aniqlandi.

Jadval 4.1 TiO₂ namunasi XRD taxlili natijalari

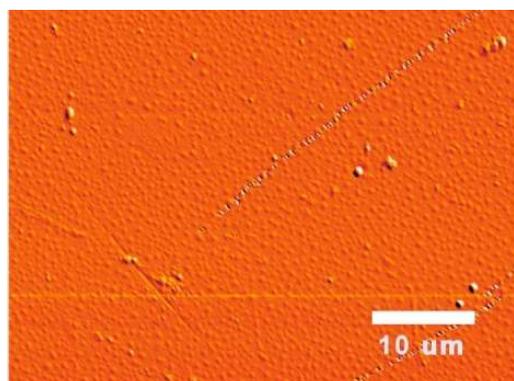
N ₂	2θ, °	d, (Å)	h k l	YaBK °	D, (nm)	Namuna norm. intensivligi %	ICSD 83795 norm. int. %
1	25,32	3,51	1 0 1	0,1972	41,4	100,00	100,00
2	36,98	2,43	1 0 3	0,2599	32,2	6,71	6,30
3	38,60	2,33	1 1 2	0,1601	52,5	7,78	6,90
4	48,07	1,89	2 0 0	0,1219	71,3	29,12	26,50
5	55,10	1,67	2 1 1	0,1956	45,8	18,62	15,80

Quyidagi 4.6-rasmda tekis, peramidal va g'ovak kremniy tagliklarda sintez qilingan ZnO qatlamlarining ko'ndalang kesimi SEM tasviri keltirilgan.

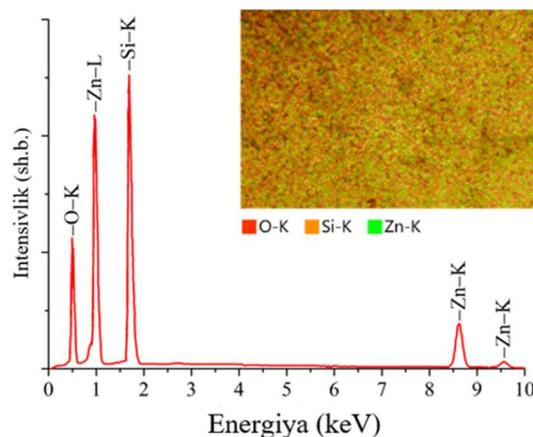


4.6 rasm. Tekis, peramidal va G'ovak tuzilmaga ega bo'lgan kremniy taglik sirtiga sintez qilingan ZnO qatlamlarining ko'ndalang kesimi SEM tasviri.

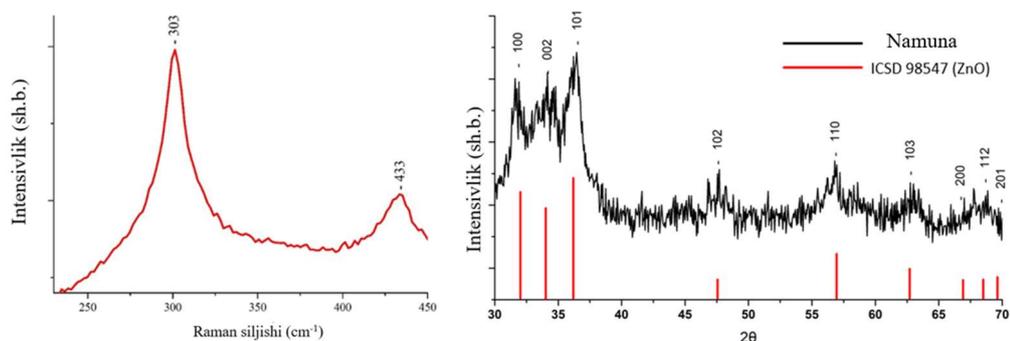
ZnO qatlami taglikda konform qoplangan bo'lib, bo'shliq yoki de-laminatsiya kuzatilmaydi. Qatlam qalinligi taxminan 48 nm. 4.7-rasmda tekis taglikda sintez qilingan ZnO qatlamlarining 50×30 mkm AKM topografiyasi keltirilgan. Yuza profili bo'yicha qatlamlar o'rtacha g'adir-budurligi 2,1 nm, maksimumlar farqi 21,97 nm ekanini ko'rsatdi. EDS tahlili qatlam tarkibida O, Zn va Si mavjudligini ko'rsatib, ZnO hosil bo'lganini tasdiqladi (4.8 rasm).



4.7 rasm. ZnO qatlamlarining AKM topografiyasi



4.8 rasm. sintez qilingan ZnO qatlamlarining element tarkibi



4.9 rasm. ZnO namunasi Raman spektri va XRD difraktogrammasi

4.9 rasmdagi 433 sm^{-1} cho‘qqi ZnO qatlamiga to‘g‘ri kelib, uning vyursit strukturada ekanini ko‘rsatadi. XRD difraktogramma ICSD 98547 raqamli ZnO vyursit fazasi bilan solishtirildi, asosiy cho‘qqilar (100), (002) va (101) tekisliklarga to‘g‘ri keluvchi 31.65° , 34.59° va 36.44° burchaklarda aniqlandi. Qo‘shimcha cho‘qqilar (102), (110), (103) va (112) tekisliklarga mos bo‘lib, ular etalon ma’lumotlar bilan mos keladi. Natijalar qatlamda ZnO ning kristallik vyursit fazasi mavjud ekanini, boshqa kristall fazalar aniqlanmaganini tasdiqlaydi. 4.2-jadvalda cho‘qqilarga mos Miller indeksleri, intensivlik va kristallit o‘lchamlari keltirilgan.

Jadval 4.2 ZnO namuna XRD tahlili natijalari

N ₂	2θ °	d Å	h k l	YaBK °	D nm	Namuna norm. intensivligi %	ICSD 98547 norm. int. %
1	31,65	2,83	1 0 0	0,60	137,62	23,17	51
2	34,59	2,59	0 02	1,6	52,00	91,39	32,6
3	36,44	2,46	1 0 1	1,14	73,37	100,00	100
4	48,09	1,89	1 0 2	2,8	31,05	55,60	18,3
5	56,71	1,62	1 1 0	2,1	42,99	71,08	31,7
6	63,09	1,47	1 0 3	3,1	30,07	20,73	31,5
7	68,45	1,36	1 1 2	3,1	30,99	45,00	21,4

TiO₂ va ZnO qatlamlarining optik xususiyatlarini spektral ellipsometriya usulida modellashtirish: Yupqa qatlamlarning optik xususiyatlarini aniqlashda ellipsometriya to‘g‘ri va perpendikulyar qutblangan yorug‘likning material sirtidan qaytgandagi o‘zgarishini o‘lchaydi. Qutblangan yorug‘lik komponentlari orasidagi bog‘lanish quyidagi nisbat orqali aniqlanadi:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s}$$

Bu nisbatni ellipsometriya burchaklari ko‘rinishida yozish mumkin:

$$\rho = \tan(\psi) e^{i\Delta}$$

Ellipsometriya teskari masalasini yechishda mazkur nisbat qatlamning kompleks dielektrik funksiyasiga bog‘liqligi ko‘rinishida yozish mumkin:

$$\rho = \tan(\psi) e^{i\Delta} = f(\varepsilon_1(E), \varepsilon_2(E))$$

TiO₂ va ZnO materiallari xususiyatlaridan kelib chiqib, dielektrik funksiyasini Taus-Lourens umumlashgan tenglamasidan kelib chiqqan qatlam modeli yordamida aniqlash maqsadga muvofiq. Bunda dielektrik funksiyaning mavhum qismi uchun:

$$\varepsilon_2(E) = \begin{cases} \frac{AE_0\Gamma(E-E_g)^2}{E[(E-E_g)^2+(\Gamma E)^2]}, & E > E_g \\ 0, & E \leq E_g \end{cases}$$

Haqiqiy qismi uchun Kramers-Kronix tenglamasiga asosan aniqlanadi:

$$\varepsilon_1(E) = \varepsilon_\infty + \frac{2}{\pi} P \int_{E_g}^{\infty} \frac{x\varepsilon_2(x)}{x^2-E^2} dx$$

Tahlil natijalariga ko'ra, qatlam kristall, amorf va turli defektli qismlardan tashkil topgan. Bunday geterogen tuzilma turli energiya diapazonlarida yutish hodisalarini yuzaga keltiradi. Kristall qismlar uchun yutilish holatlari yaxshi o'rganilgan bo'lsa-da, defektlar qatlamda alohida energetik holatlarni paydo qiladi. Shu sababli, mavhum dielektrik funksiyani kristall va defekt holatlar uchun alohida ossilyatorlar yig'indisi sifatida ifodalash mantiqan to'g'ri. Bu har bir fazaning umumiy funksiyaga qo'shgan hissasini aniqlab, qaysi holat ustun ekanini va ularning nisbiy ulushini baholash imkonini beradi. Qatlam modeli uchun mavhum dielektrik funksiya quyidagicha yoziladi:

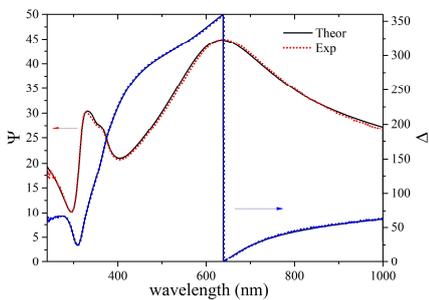
$$\varepsilon_2(E) = \begin{cases} \frac{A_A E_{0A} \Gamma_A (E-E_{gA})^2}{E[(E^2-E_{0A}^2)^2+(\Gamma_A E)^2]} + \frac{A_k E_{0k} \Gamma_k (E-E_{gk})^2}{E[(E^2-E_{0k}^2)^2+(\Gamma_k E)^2]} + \frac{A_d E_{0d} \Gamma_d (E-E_{gd})^2}{E[(E^2-E_{0d}^2)^2+(\Gamma_d E)^2]}, & E > E_{gA}, E > E_{gk} \\ \frac{A_k E_{0k} \Gamma_k (E-E_{gk})^2}{E[(E^2-E_{0k}^2)^2+(\Gamma_k E)^2]} + \frac{A_d E_{0d} \Gamma_d (E-E_{gd})^2}{E[(E^2-E_{0d}^2)^2+(\Gamma_d E)^2]}, & E_{gA} \geq E > E_{gk} \\ \frac{A_A E_{0A} \Gamma_A (E-E_{gA})^2}{E[(E^2-E_{0A}^2)^2+(\Gamma_A E)^2]} + \frac{A_d E_{0d} \Gamma_d (E-E_{gd})^2}{E[(E^2-E_{0d}^2)^2+(\Gamma_d E)^2]}, & E_{gk} \geq E > E_{gA} \\ \frac{A_d E_{0d} \Gamma_d (E-E_{gd})^2}{E[(E^2-E_{0d}^2)^2+(\Gamma_d E)^2]}, & E \leq E_{gA}, E \leq E_{gk} \end{cases}$$

Har bir ossilyatorning umumiy mavhum dielektrik funksiyaga qo'shgan hissasi, ya'ni optik faolligini foizdagi ulushini quyidagicha hisoblanadi:

$$P_i = \frac{A_i \cdot C_i}{\sum_{j=1}^n A_j \cdot C_j}$$

Modellash natijasining ishonchligi o'rtacha kvadratik xatolik baholash quyidagi formula orqali hisoblandi:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^{exp} - y_i^{teor})^2$$



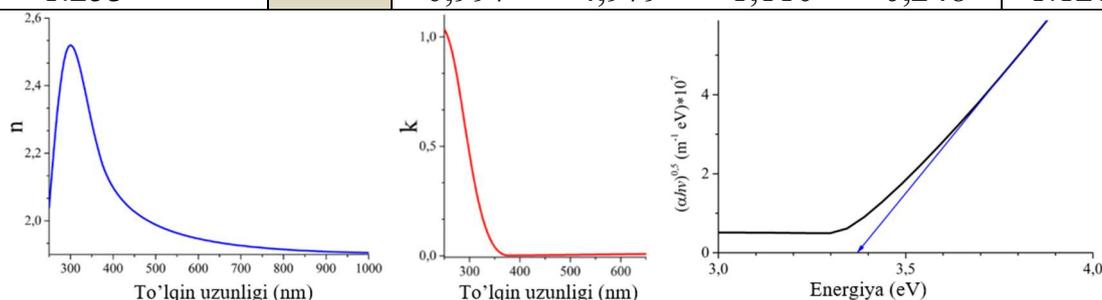
4.10 rasm. TiO_2 qatlamli namunaning tahlili

TiO_2 qatlami spektral ellipsometrik tahlili: 240-1000 nm to'lqin uzunlikda TiO_2 qatlamli namunaning ellipsometrik burchaklari 70° tushish burchagida o'lchandi. Optik parametrlarni aniqlash uchun uch ossilyatorlik model asosida moslash amalga oshirildi. Approksimatsiya natijasi 4.10 rasmda ko'rsatilgan. TiO_2 qatlami uchun approksimatsiya orqali aniqlangan model parametrlari va har bir ossilyatorning hisoblangan qiymatlari 4.3 jadvalda keltirilgan.

Qatlam sindirish ko'rsatkichi maksimumi 300 nm to'lqin uzunligida 2,55 ga yaqin bo'lib, to'lqin uzunligi oshgan sari 1,9 gacha kamayadi va 1000 nm atrofida barqarorlashadi. Yutilish faqat ultrabinafsha sohada sezilarli bo'lib, ko'rinarli sohada deyarli kuzatilmaydi (4.11 rasm).

Jadval 4.3 TiO₂ qatlami uchun approksimatsiyasi ko'rsatkichlari

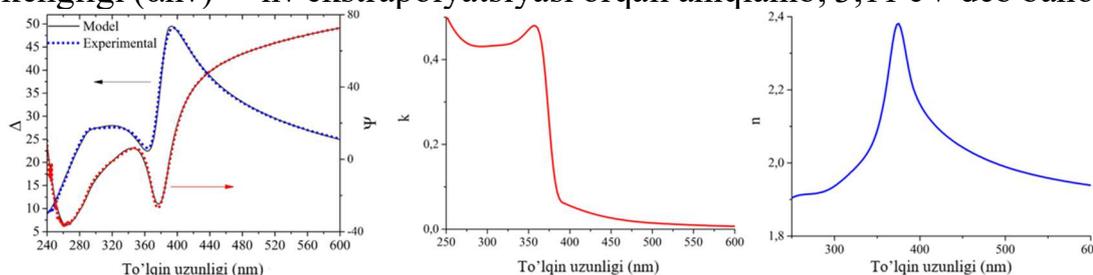
Qalinlik	GPC=0,19nm	E _{ga}	A _a	E _{0a}	C _a	P
94,57 nm		3,299	78,66	4,394	1,332	96.17%
ε ₁ (∞)		E _{gk}	A _k	E _{0k}	C _k	
2.40266		2,757	0,718	4,965	4,095	2.7%
MSE		E _{gd}	A _d	E _{0d}	C _d	
1.253	0,997	4,979	1,110	0,248	1.12%	



4.11-rasm. TiO₂ qatlam uchun $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ va Taus ekstrapolyatsiyasi orqali aniqlangan E_g natijalari.

Taus usuli bo'yicha α - $h\nu$ grafigi tahlili qatlamning taqiqlangan soha kengligi 3,38 eV ekanini ko'rsatdi.

ZnO qatlami spektral ellipsometrik tahlili: ZnO qatlami uchun ham TiO₂ qatlamida qo'llanilgan Taus-Lorens umumlashgan funksiyasi asosidagi uch ossilyatorlik model qo'llanildi (4.13 rasm). Grafik natijalarga ko'ra, ZnO qatlam 250-400 nm oralig'ida kuchli yutishga ega bo'lib, 400 nm dan keyin yo'qoladi. Sindirish ko'rsatkichi 390 nm atrofida yuqori bo'lib, keyin pasayadi. Taqiqlangan soha kengligi $(\alpha h\nu)^2 = h\nu$ ekstrapolyatsiyasi orqali aniqlanib, 3,11 eV deb baholandi.



4.13-rasm. ZnO qatlamli namunaning ellipsometrik burchaklari va aniqlangan k va n ning λ ga bog'liqligi.

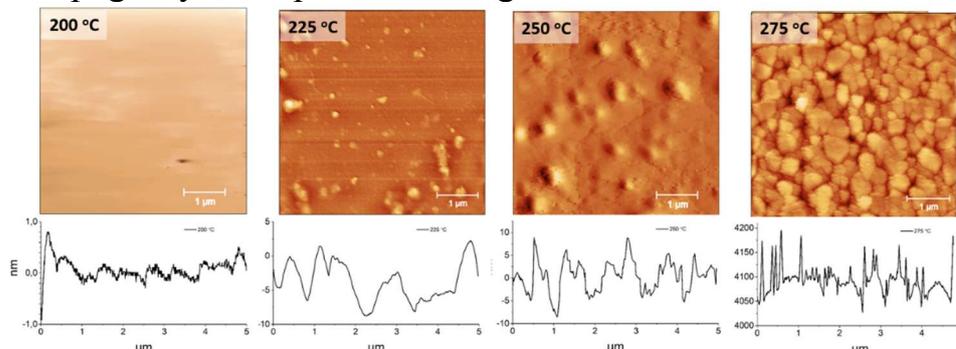
4.4-jadval. ZnO qatlamining approksimatsiya natijalari

Qalinlik	GPC=0,119nm	E _{gw}	A _w	E _{0w}	C _w	P
47,78 nm		3,168	129,524	3,3196	0,2705	36.65%
ε ₁ (∞)		E _{gk}	A _k	E _{0k}	C _k	
2.2094		1,0324	1,28	3,9669	1,4258	1.91%
MSE		E _{gd}	A _d	E _{0d}	C _d	
1.1145	2,4758	18,908	5,7830	3,1056	61.42%	

Beshinchi bob «ALD usulida olingan TiO₂ qatlamlarining sintez harorati va keyingi termik ishlov berish natijasidagi fazaviy o'tish jarayonlarini o'rganish» Termik ALD jarayonida harorat prekursorlarning faolligi, yuzadagi adsorbsiya va mahsulotning fazasiga kuchli ta'sir qilib, TiO₂ qatlamning fazaviy

holati va kristall tuzilishi sintez harorati va keyingi termik ishlovga bog‘liq. TTIP va H₂O prekursorlari yordamida 200-275 °C oralig‘ida, 25 °C qadam bilan sintez qilingan TiO₂ qatlamlar o‘rganildi. Taglik sifatida 0,4 mm qalinlikdagi kremniy va 1 mm JGS1 kvarts shisha plastinalar ishlatildi.

Olingan namunalarning sirt morfologiyasi: 5.1-rasmda qatlamlarning 5×5 mkm AKM topografiyasi va profili keltirilgan.



5.1 rasm. 200–275 °C haroratlarda ALD usulida sintez qilingan TiO₂ qatlamlarning 5 × 5 mkm maydondagi AKM topografiya tasvirlari

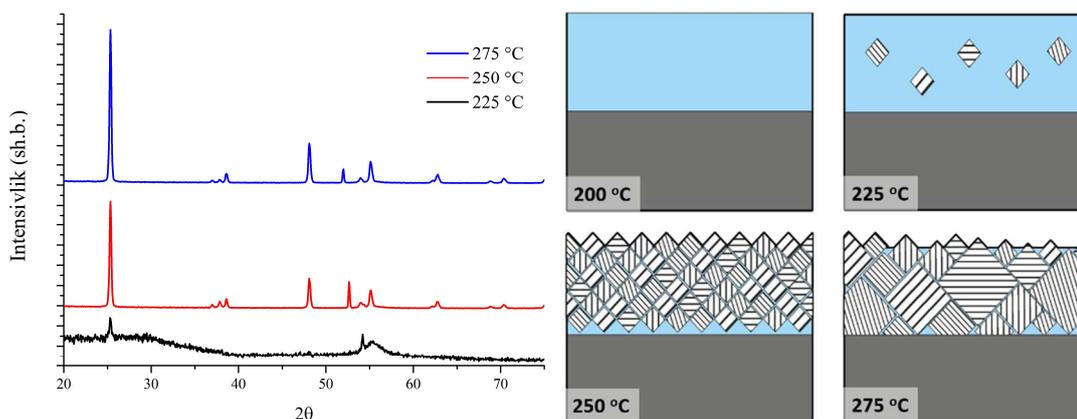
Topografiya tasvirlariga ko‘ra, harorat oshgan sari yuza morfologiyasi izchil o‘zgargani kuzatildi. 200 °C da yuza deyarli tekis bo‘lib, aniq tuzilmalar yo‘q. 225 °C da esa mayda mikrotuzilmalar paydo bo‘ladi.

250 °C da yuza strukturasi oldingi holatga o‘xshash bo‘lsa-da, mikrotuzilmalar aniqroq namoyon bo‘lib, kristallanish shakllanayotganini ko‘rsatadi. 275 °C da esa yuza topografiyasi tubdan o‘zgarib, mikrotuzilmalar-dan tashkil topgan aglomeratsiyalar hosil bo‘lishi kuzatildi. Tasvirda o‘rtacha 0,5 mkm li katta klasterlar va 50–100 nm mayda sferik tuzilmalar ko‘rinadi. Bu haroratning ortiqcha bo‘lganini va yuzadagi molekulalar desorbsiya qilinib, yaqin molekulalar bilan birlashganini anglatadi. AKM tasvirlari asosida yuza morfologiyasidagi o‘zgarishlar miqdoriy baholandi, Ra va Rz qiymatlari 5.1 jadvalda keltirilgan.

Jadval 5.1 Profil bo‘yicha Ra va Rz qiymatlari

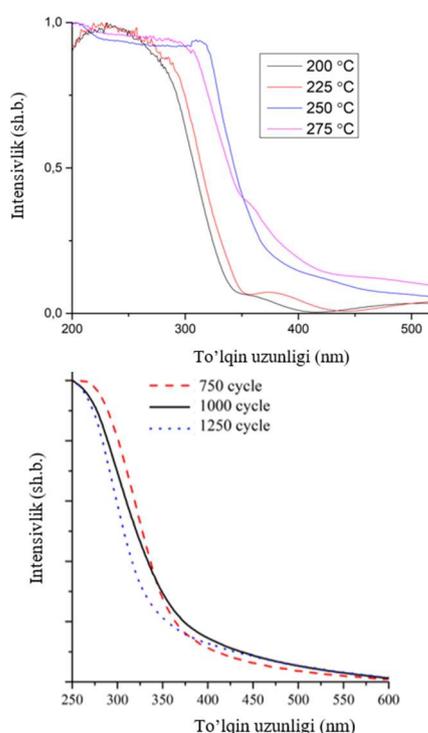
	200 °C	225 °C	250 °C	275 °C
<i>Ra</i>	0,14 nm	2,4 nm	2,69 nm	18,64 nm
<i>Rz</i>	1,73 nm	10,97 nm	17,44 nm	167,92 nm

200 °C, 225 °C, 250 °C va 275 °C da sintez qilingan TiO₂ qatlamlarning fazaviy holati XRD orqali tahlil qilindi. 200 °C da tiklar yo‘qligi qatlamning amorf tuzilmasi ekanini ko‘rsatadi. 225 °C va yuqori haroratlarda difraksion tiklar paydo bo‘lib, kristallik tartib shakllanayotgani kuzatildi. AKM va XRD natijalariga asosan, haroratga bog‘liq o‘sish mexanizmini aks ettiruvchi shartli sxema va XRD difraktogrammalar 5.2 rasmda keltirilgan. Unga ko‘ra, 225 °C da sintez qilingan TiO₂ qatlamda anataz fazasining (101) tekisligiga mos zaif cho‘qqi qayd etildi, bu kristallashuv boshlanganini ko‘rsatadi va keng amorf fon qatlamda amorf va kristall fazalar bir vaqtda mavjudligini anglatadi. Ritveld tahliliga ko‘ra, kristall ulushi taxminan 25-30% ni tashkil etib, qolgani amorf fazada ekanligi aniqlandi.



5.2 rasm. TiO_2 qatlamlarning XRD difraktogrammalari va qatlamlarning o‘shish jarayonini sxematik tasvir.

250 °C va 275 °C da (101), (004), (200), (105), (211) tekisliklarga mos aniq va intensiv cho‘qqilar orqali qatlam to‘liq kristall tuzilmaga ega ekanligi, hamda amorf fon yo‘qligi aniqlandi. Difraktogramma anataz fazasi uchun etalon ma’lumotlar bilan mos kelib, cho‘qqilar nisbati qatlam polikristal va anataz tabiatini ko‘rsatadi.

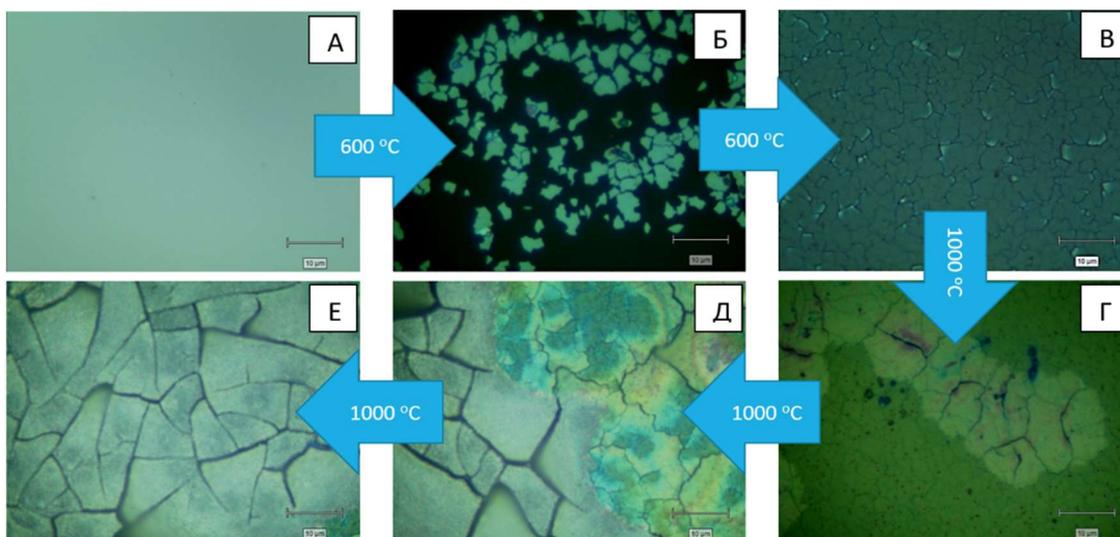


5.3-rasm. Turli harorat va sikllar sonida sintez qilingan TiO_2 yutilish spektrlari.

TiO_2 qatlamlarning optik xossalarini baholash maqsadida 200-500 nm oralig‘idagi yutilish spektrlari tahlil qilindi. Turli haroratda sintez qilingan qatlamlarning yutilish spektrlari quyidagi 5.3 rasmda keltirilgan. Natijalar harorat oshishi bilan fazaviy o‘zgarishlar davomida yutilish spektri ultrabinafshadan qizil sohaga siljishini va bu spektr qalinlikka bog‘liq emasligini ko‘rsatdi.

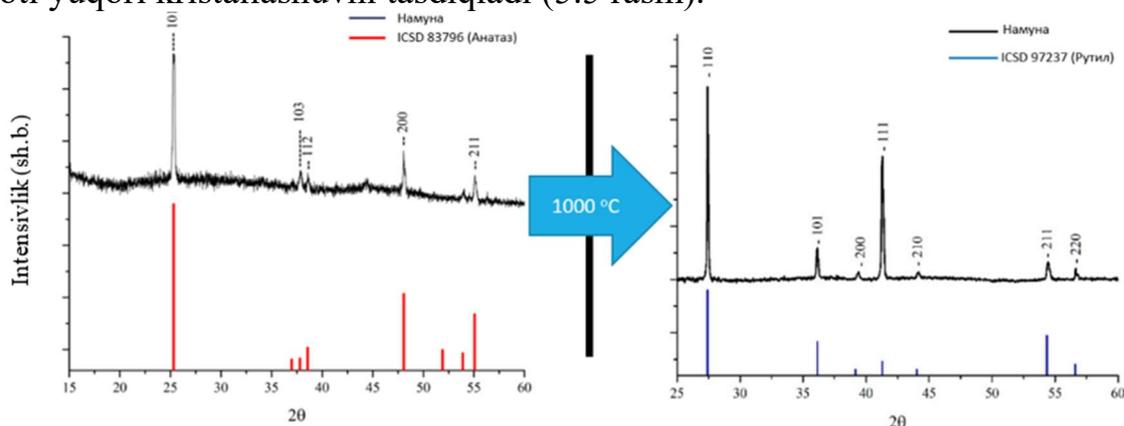
200 °C da ALD usulida sintez qilingan amorf TiO_2 qatlamlar termik ishlov berilganidan so‘ng yuz bergan fazaviy o‘zgarishlar optik mikroskopiya orqali o‘rganildi (5.4 rasm). 600 °C dagi ishlov natijasida kristallashuv jarayoni boshlangani qayd etildi: boshlang‘ich holatda yuza amorf (A), keyinchalik kristall markazlari yorug‘likni intensiv sochayotgan donachalar ko‘rinishida namoyon bo‘lgan (B), qayta kristallashuv tugagach esa yuzada yoriqlar mavjud anataz shakllangan (V). 1000 °C dagi ishlov natijasida to‘liq fazaviy o‘tish yuz berib, rutil fazasi shakllangani aniqlandi. Yuzada katta kristall donachalar va termik stress

ta’sirida yuzaga kelgan mikroyoriqlar (G), rutilga o‘tish jarayoni (D) hamda barqaror, poligonal shakldagi yirik rutil kristallari (E) kuzatildi. Kristall shakllanish jarayoni butun qatlam bo‘ylab emas, balki lokal energetik faol nuqtalarda boshlanib, anataz zarrachalari paydo bo‘ladi va ular atrofidagi amorf sohaga bosim va harorat ta’sirida radial yo‘nalishda kengayadi. Shu tarzda, qayta kristallashuv fronti orqali tuzilma bosqichma-bosqich kristall holatga o‘tadi. Jarayonning tezligi va yo‘nalishi qatlamning morfologiyasi, qalinligi va termik sharoiti bilan belgilanadi.



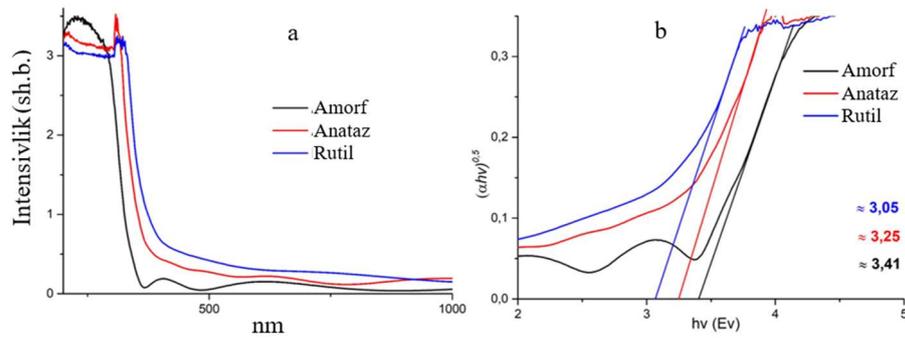
5.4 rasm. 200 °C da ALD usulida sintez qilingan TiO_2 qatlama termik ishlov berish natijasidagi mikrostrukturaviy o'zgarishlarni aks ettiruvchi optik mikroskopiya tasvirlari.

Optik mikroskopiya kuzatilgan fazaviy o'zgarishlar Raman spektroskopiya va XRD tahlillari bilan tasdiqlandi. Anataz fazasini xarakterlovchi Raman tebranish cho'qqilari (144, 195, 394, 514, 639 cm^{-1}) yo'qolib, rutil fazasini xarakterlovchi cho'qqilar (233, 444, 611 cm^{-1}) paydo bo'lishi 1000 °C da to'liq fazaviy o'tishni ko'rsatadi. XRD tahlilida ham rutilga xos asosiy cho'qqilar va ularning izotrop taqsimoti yuqori kristallashuvni tasdiqladi (5.5 rasm).



5.5 rasm. Termik ishlov berishdan oldin va keyingi namunalarning Raman spektrlari va XRD difraktogrammalari

Fazaviy o'tish qatlam qalinligiga bog'liq bo'lib: 1,5 mkm da 3 soatda, 1 mkm da 10 soatda to'liq amalga oshmadi. Re-konstruktiv fazaviy o'tish atomlarning qayta joylashishi va kristall panjarasining tubdan o'zgarishini talab qiladi, bu esa yuqori energiya sarfini taqozo qiladi. 250 nm qalinlikdagi qatlamda, 48 soat davomida bunday o'zgarish kuzatilmadi. Bu holat yupqa qatlamlarga xos bo'lgan yuqori yuza/hajm nisbati va ichki mexanik stresslar tufayli, zarur energiyaning yetishmasligi bilan izohlanadi. Termik ishlov natijasida TiO_2 qatlamlarining fazaviy o'zgarishi optik xossalarda ham o'z aksini topdi. 5.6 (a) rasmda amorf, termik ishlov natijasida olingan anataz va rutil fazalaridagi qatlamlar yutilish spektrlari keltirilgan.



5.6-rasm. Amorf, anataz va rutil fazalaridagi yutilish spektrlari (a); Taus funksiyasi orqali taqiqlangan soha energiyasini aniqlash (b).

Amorf qatlamda yutilish chegarasi 320 nm atrofida. Anataz fazasida chegara 360–380 nm gacha, rutilda esa 410–420 nm gacha surilgan bo‘lib, chegaradagi energiya o‘tishlari defekt vakansiyalar sabab eksponensial bog‘liqlikni namoyon etgan. 5.6 (b) rasmdagi Taus tahlili asosida aniqlangan optik taqiqlangan soha energiyasi quyidagicha baholandi: amorf ~ 3.41 eV, anataz ~ 3.25 eV, rutil ~ 3.05 eV. Bu o‘zgarishlar fazaviy holatdan tashqari, defektlar va kristallik darajasi bilan ham bog‘liq bo‘lib, adabiyot ma’lumotlari bilan mos keladi.

XULOSA

1. 0,1 Om·m solishtirma qarshilikka ega (100) p-tip Si tagliklar-da, HF:C₂H₅OH:H₂O (1:1:1) elektrolitida, 36 mA/sm² tok zichligi va 10-20 minutli anodlash jarayonida, chuqurligi mos ravishda 5-10 mikrometr bo‘lgan g‘ovak tuzilmalar hosil bo‘lishi aniqlandi. G‘ovaklar diametri 2,5 mkm atrofida bo‘lgan silindr shaklida bo‘lishi kuzatildi. G‘ovak kremniy olishda uning morfologiyasiga tok zichligi, monokristall kremniy xossalari va elektrolit konsentratsiyasiga bog‘liqligi aniqlandi.

2. TiO₂ va ZnO qatlamlari termik ALD usulida olindi. ZnO uchun dietilsink, TiO₂ uchun titan izopropoksidi birlamchi reaktiv sifatida, har ikki holda suv ikkilamchi reaktiv sifatida qo‘llanildi. SEM asosidagi ko‘ndalang kesim tahlili, 400 siklda ZnO qatlami qalinligi 47 nm ni, 500 siklda TiO₂ qatlami qalinligi 96 nm ni tashkil etganini va o‘sish tezligi mos ravishda 0.115 nm/sikl va 0.19 nm/sikl ekanligini ko‘rsatdi.

3. SEM-EDS tahlili TiO₂ va ZnO qatlamlari g‘ovak kremniy tuzilmasini tashqi yuza, ichki devorlar va tubigacha bir xil qalinlikda qoplaganini ko‘rsatdi. Qatlam tarkibi mos ravishda faqat Ti-O va Zn-O elementlaridan iborat bo‘lib, bu jarayonda prekursorlar to‘liq parchalanishi, g‘ovak bo‘shliqlarga kirib sirt bilan samarali reaksiya ta’siri hamda ikkilamchi mahsulotlarning to‘liq chiqarib tashlanganini tasdiqlaydi.

4. Raman spektrida vyursit modasiga mos keluvchi 433 sm⁻¹ dagi va ICSD ma’lumotlar bazasidagi 98547 raqamli yozuviga mos keluvchi (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) difraksiya cho‘qqilarining aniqlanishi, 200 °C da dietilsink va suv orqali termik ALD usulida sintez qilingan ZnO qatlamning vyursit turidagi geksagonal nanokristall fazada ekanini ko‘rsatadi. XRD tahlili qatlamning polikristal tuzilmaga ega ekanini va kristallitlar o‘rtacha o‘lchami 60 nm atrofida ekani ko‘rsatdi.

5. Raman spektrida anataz fazasiga xos 143, 194, 392 va 637 cm^{-1} cho‘qqilar qayd etildi. XRD tahlili ham ICSD 83796 etalon ma’lumotlari bilan to‘liq mos kelib, TiO_2 qatlamining anataz politipida kristallanganini tasdiqladi. Difraksiya tahlili natijalari kristallit o‘lchami ~ 40 nm va qatlamning izotrop polikristal, teksturasiz tuzilmaga ega ekanligini ko‘rsatdi.

6. Taus–Lourens umumlashgan funksiyasi asosidagi uchossilyatorli qatlam modeli ZnO va TiO_2 nanoqatlamlarining spektral ellipsometriya natijalariga yuqori darajada mos keldi. Ψ va Δ parametrlari bo‘yicha o‘rtacha kvadratik xatolik ZnO va TiO_2 uchun mos ravishda 1.11 va 1.25 ni tashkil qildi. Model orqali hisoblangan qalinlik va o‘shish tezliklari SEM natijalari bilan to‘liq mos kelib, modelning ishonchli ekanini tasdiqladi.

7. Spektral ellipsometriya natijalari tahliliga asosan ZnO qatlami 390 nm gacha kuchli yutishga va 500 nm dan yuqorida shaffoflikka ega, TiO_2 qatlami 345 nm gacha yutish yuqori bo‘lib, 400 nm dan keyin deyarli shaffof ekani aniqlandi. Maksimal sindirish ko‘rsatkichlari mos ravishda 370 nm da $n = 2.38$ va 310 nm da $n = 2.5$ bo‘lib, to‘lqin uzunligi oshishi bilan eksponensial tarzda pasaydi. Ta’qiqlangan zona kengligi ZnO va TiO_2 uchun mos ravishda 3.1 eV va 3.5 eV ekani aniqlandi.

8. Termik ALD usulida TiO_2 qatlamlarni TTIP va suv asosida sintez qilishda, taglik harorati 200 °C bo‘lganida sirt morfologiyasiga ko‘ra g‘adirbudulgi 0,2 nm dan oshmaydigan to‘liq amorf qatlam, 225 °C da g‘adirbudurligi 2 nm atrofidagi amorf/anataz qatlam, 250 °C da g‘adirbudurligi 2 nm atrofidagi to‘liq polikristal anataz tuzilmaga ega qatlam va 275 °C da to‘liq polikristal anataz tuzilmaga ega lekin g‘adirbudurligi keskin oshish natijasida notekis morfologiyaga ega qatlamning hosil bo‘lishi kuzatildi va natijada TiO_2 amorf qatlam uchun 200 °C va anataz qatlami uchun 250 °C ALD tuynugi ekanligi aniqlandi. Qatlam optik absorbsiya sohasi sintez haroratiga bog‘liq bo‘lib uning qalinligiga bog‘liq emas ekanligi aniqlandi.

9. Sintez qilingan TiO_2 qatlamlarda termik ishlov natijasida amorf-anataz-rutil fazaviy o‘tish jarayonlari kuzatildi. Jarayon kristallanish markazlari hosil bo‘lishi va ularning atrofga kengayishi orqali amalga oshishi hamda qatlam qalinligiga bog‘liqligi ko‘rsatildi. Xususan, 1.5 mkm qatlamda 1000 °C da rutilga o‘tish 2–3 soatda, 1 mkm qatlamda esa taxminan 10 soatda amalga oshdi. Qalinligi 250 nm va undan yupqa qatlamlar esa 1000 °C da 48 soatgacha fazaviy barqarorlikni saqlashi aniqlandi.

10. Strukturaviy tahlillar fazaviy o‘tish jarayonida qatlamning zichlashishi, ichki kuchlanishlar va mikroyoriqlar paydo bo‘lishini, shuningdek, bu o‘zgarishlar optik yutish xususiyatlariga ham ta’sir ko‘rsatishini aniqladi. Qalinligi 250 nm dan yupqa amorf, anataz yoki amorf/anataz aralashma qatlamlarning yuqori termik barqarorligi ularni yuqori haroratga chidamli fotokatalik, sensor va fotoelektrik qurilmalar uchun istiqbolli funksional material sifatida tavsiya qilish imkonini beradi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSC.02/30.12.2019.FM/T.65.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ
И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ТУРДАЛИЕВ ТЕМУР КАМИЛОВИЧ

**СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСЛОЕВ
TiO₂ И ZnO, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО
ОСАЖДЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ И
ОКСИДА КРЕМНИЯ.**

01.04.12- Физика и технология наноматериалов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

ТАШКЕНТ – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером № B2024.4.PhD/FM1213.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А.Арифова АН РУз.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.iplt.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziynet» по адресу (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Ашуров Хатам Бахронович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Нуриддинов Иззатилло
Доктор физико-математических наук, профессор

Кувондинов Вахобжон Ортикович
Доктор физико-математических наук, с.н.с

Ведущая организация:

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

Защита диссертации состоится «__» _____ 2025 г. в ____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 по присуждению учёных степеней при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз (адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (99871) 262–32–54, e-mail: info@iplt.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № ____). Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел.: (99871) 262–31–69).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2025 года.
(Реестр протокола рассылки ____ от «__» _____ 2025 года).

Х.Б. Ашуров
председатель Научного совета по присуждению учёных степеней,
доктор технических наук, профессор

И.Д. Ядгаров
учёный секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней,
доктор физико-математических наук,
профессор

У.К. Махманов
председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации: Начиная с конца XX века, области физики наноматериалов и нанотехнологий стремительно развиваются. Во многих направлениях, таких как информационные технологии, возобновляемые источники энергии, сенсорика, мониторинг окружающей среды, биомедицина и фотоника, наблюдается возрастающий спрос на функциональные материалы с высокой активностью, точно контролируемой структурой и сложной геометрией поверхности. Активно совершенствуются технологии синтеза, а создание новых функциональных материалов рассматривается как одна из важнейших научных задач.

Среди таких материалов особое значение имеют оксиды металлов с широкой запрещённой зоной – TiO_2 , ZnO , а также пористый кремний с развитой поверхностной структурой. TiO_2 и ZnO присущи высокая фотокаталитическая активность, способность поглощать излучение в широком оптическом диапазоне, диэлектрические свойства и возможность преобразования энергии излучения. Пористый кремний, обладая большой площадью поверхности, в тандеме с TiO_2 и ZnO образует композитный материал, который может быть эффективно использован в сенсорике, фотоэлектрических устройствах, фотодетекторах и фотокаталитических системах.

Физические, оптические и электронные свойства материалов, зависят не только от их химического состава, но также от структуры плёнки, фазового состояния, толщины, но и от применённого метода синтеза. Технология атомно-слоевого осаждения (ALD, Atomic Layer Deposition) представляет собой современный метод синтеза, позволяющий с высокой точностью формировать покрытия на поверхностях со сложной микрогеометрией на атомарном уровне. Исследование процессов синтеза нанотонких плёнок TiO_2 и ZnO с заданными морфологическими, электрофизическими и оптическими характеристиками с использованием ALD-метода в настоящее время приобретает важное научное и прикладное значение в области наноматериалов.

Наноплёнки TiO_2 и ZnO , синтезированные методом ALD, с одной стороны, обладают высокой точностью структурирования поверхности на атомарном уровне, равномерной и контролируемой толщиной, низким уровнем дефектности, а с другой — позволяют эффективно управлять фазовым состоянием, степенью кристалличности за счёт регулирования параметров синтеза. Поэтому исследование физических свойств тандемных структур, образованных на подложках из пористого кремния, кремния и диоксида кремния с использованием ALD-плёнок TiO_2 и ZnO , представляет собой актуальное направление как в области материаловедения, так и в разработке функциональных приложений.

Настоящее исследование в определённой степени способствует реализации задач, обозначенных в следующих документах: Указ Президента Республики Узбекистан №ПФ-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы»; Указ №ПФ-2789 от 17

февраля 2017 года «О дальнейшем совершенствовании деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности»; а также Указ №ПФ-4422 от 22 августа 2019 года «О неотложных мерах по повышению энергоэффективности в хозяйственных и специализированных отраслях, внедрению энерго-сберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии».

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики: Настоящее диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан — в рамках направлений «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Степень изученности проблемы: Технология ALD была впервые разработана в 1970-х годах финским учёным Туомо Сунтолой и основана на последовательных самолимитирующих реакциях, позволяющих получать тонкие плёнки с высокой точностью. Сунтола и его коллеги разработали метод атомно-слоевой эпитаксии (ALE), успешно применённый для получения диэлектрических плёнок в электролюминесцентных дисплеях (United States Patent, US4058430). В то же время в СССР В.Б. Алесковский и С.И. Кольцов предложили аналогичный подход под названием «молекулярное наложение».

С 1990-х годов технология ALD активно изучается в научных центрах по всему миру. Значительный вклад в развитие метода внесли ведущие исследователи, такие как Стивен Джордж (Университет Колорадо, США), Грег Парсонс (Университет Северной Каролины, США), Маркку Лескеля (Университет Хельсинки, Финляндия). Ими были проведены фундаментальные исследования по синтезу плёнок TiO_2 , Al_2O_3 и ZnO методом ALD, включая управление их структурными, оптическими и электронными свойствами. На сегодняшний день сформировалось международное сообщество по ALD, и с 2001 года ежегодно проводятся конференции по ALD.

Для синтеза TiO_2 плёнок методом ALD чаще всего используются прекурсоры на основе $TiCl_4$ или органического титан-изопропоксида. В частности, пара $TiCl_4/H_2O$ при температуре 100-200 °C позволяет получать аморфные или кристаллические фазы TiO_2 , что было продемонстрировано в работах Ж. В. Клауса и С. М. Жоржа. Для осаждения ZnO плёнок широко применяются диэтилцинк в комбинации с H_2O или озонной плазмой. Процессы ALD синтеза ZnO с различными параметрами впервые были исследованы учеными Й. Ниинистё, М. Ритала и М. Лескеля. В последние годы активно изучается модификация плёнок TiO_2 и ZnO методом ALD путем легирования Al, Ga, In и другими элементами, с целью получения прозрачных проводящих материалов и фотокаталитически активных покрытий в видимом спектральном диапазоне. Высокая способность технологии ALD формировать конформные покрытия даже на поверхностях со сложной топографией сделала её актуальной в нанотехнологиях. В этом контексте ALD приобретает особую значимость при модификации пористого кремния.

Явление образования пор в кремнии впервые было случайно зафиксировано Ухлиром (1956), однако только после обнаружения фотолюминесценции Кэнхэмом (1990) оно привлекло широкое внимание. Такие исследователи, как Voos и Delalande (1993), а также Canham (2020), обосновали потенциал квантоворазмерных эффектов пористого кремния для фотонных применений. Благодаря высокой реакционной способности поверхности пористого кремния, возможно равномерное покрытие его внутренних стенок с помощью ALD. Впервые возможность создания уникальных оптоэлектронных композитных гетероструктур путём модификации пористого кремния плёнками TiO_2 и ZnO была продемонстрирована Ванг и соавт. (2015). Павленко и соавт. (2020) синтезировали с помощью ALD нанокompозиты на основе пористого кремния с модификацией ZnO , пригодные для биофотоники, и провели глубокий анализ их люминесцентных свойств и морфологии поверхности. Сунига-Ислам и соавт. (2025) добились создания структур с высокой фотокаталитической активностью за счёт нанесения TiO_2 плёнок, декорированных наночастицами, на поверхность пористого кремния.

В Узбекистане первые исследования в этом направлении проводятся в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий имени А.И. Арифова. В частности, в лаборатории Прикладных нанотехнологий осуществляют синтез плёнок TiO_2 и ZnO на пористом кремнии, кремниевых подложках от солнечных элементов, сапфире и других типах подложек с использованием термического и плазменного ALD. Также проводится изучение фазовых состояний, оптических и электрофизических свойств.

Связь диссертационного исследования с научно-исследовательскими работами учреждения, в котором выполнена диссертация: Диссертационная работа выполнена в соответствии с научно-исследовательской программы Института ионно-плазменных и лазерных технологий в рамках проекта П-5421101842 на тему: «Нанокатализаторы: формирование, структура, размерные эффекты и их влияние на процессы синтеза углеродных наноматериалов».

Цель исследования: Синтез плёнок TiO_2 и ZnO методом ALD на поверхности макропористого кремния, кремниевых и кварцевых подложек, а также исследование их морфологических, структурных и оптических свойств, включая изучение влияния условий синтеза и последующей термической обработки на фазовые преобразования.

Задачи исследования:

- Реализация технологии получения макропористого кремния и исследование морфологии полученных образцов, выявление факторов, влияющих на процесс образования пор.

- Синтез тонких плёнок TiO_2 и ZnO на подготовленных подложках методом термического ALD.

- Исследование морфологических, структурных и оптических свойств полученных образцов с использованием рамановской спектроскопии,

рентгеновского фазового анализа (XRD), спектроскопии оптического поглощения и атомно-силовой микроскопии.

- Разработка и анализ слоевой модели для изучения, толщины и оптических характеристик пленок методом спектральной эллипсометрии.

- Изучение влияния температуры подложки при термическом ALD осаждении TiO_2 на кристалличность, структурные и оптические свойства.

- Исследование фазовых переходов в плёнках TiO_2 , возникающих в результате последующей термической обработки.

Объект исследования: пористый кремний, монокристаллическая кремневая пластина, кварцевое стекло, а также наноплёнки TiO_2 и ZnO , синтезированные на их поверхности методом ALD

Предмет исследования: Синтез наноплёнок TiO_2 и ZnO методом ALD, их морфология, фазовое состояние и структурные изменения на пористом кремнии, плоских кремниевых и кварцевых подложках, а также их характеристики, проанализированные с использованием методов спектральной эллипсометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния, рентгеноструктурного анализа, сканирующей и атомно-силовой микроскопии.

Методика исследования: В диссертационной работе использованы следующие современные научно-исследовательские методы: для получения наноплёнок — метод ALD; для подготовки образцов пористого кремния — технология электрохимического травления монокристаллического кремния; для изучения состава и фазового состояния полученных плёнок — рентгеновская дифрактометрия, спектроскопия комбинационного рассеяния и энергодисперсионная рентгеновская спектрометрия; сканирующая электронная микроскопия и атомно-силовая микроскопия для анализа морфологии; спектроскопия фотolumинесценции, спектрофотометрия и спектральная эллипсометрия для оценки оптических свойств.

Научная новизна исследования:

- впервые с использованием диэтилцинка и воды методом термического ALD при температуре подложки $200\text{ }^\circ\text{C}$ на макропористых и плоских кремниевых подложках были синтезированы слои ZnO толщиной ~ 50 нм, при этом было установлено формирование изотропной поликристаллической структуры с гексагональной нанокристаллической решёткой, относящейся к фазе вюрцита;

- впервые с применением титанизопропоксида и воды методом термического ALD при температуре подложки $225\text{ }^\circ\text{C}$ на макропористых и плоских кремниевых подложках были синтезированы слои TiO_2 толщиной ~ 100 нм, в которых установлено формирование изотропной поликристаллической структуры с наличием анатазной фазы;

- впервые для диапазона $240\text{-}1000$ нм была разработана трёхосцилля-торная слоевая модель для спектральной эллипсометрии на основе обобщённой функции Таулца–Лоренца, позволяющая с высокой точностью определять толщину и оптические константы плёнок TiO_2 и ZnO , полученных методом ALD, с учётом вклада основных и дефектных энергетических состояний;

- впервые установлена зависимость фазовых переходов в слоях TiO_2 , синтезированных методом термического ALD с использованием титанизопропоксида и воды, от их толщины. В частности, экспериментально показано, что слои толщиной до 250 нм обладают высокой термической стабильностью при температурах до 1000 °С;

- впервые в слоях аморфного TiO_2 , синтезированных методом термического ALD, при последующей термической обработке выявлены процессы перехода аморфной структуры в анатаз и рутил, уплотнение морфологии и образование микротрещин, а также уменьшение вклада локальных энергетических состояний в области оптического поглощения и его сдвиг в длинноволновую область, при этом значения оптических констант не зависят от числа циклов.

Практические результаты исследования: Разработана слоевая модель, обеспечивающая высокоточное определение оптических констант и толщины плёнок TiO_2 и ZnO , синтезированных методом ALD, на основе спектральной эллипсометрии. Модель основана на формализации Таулца–Лоренца с учётом вкладов как основных, так и дефектных энергетических состояний в диэлектрическую функцию плёнки. Это позволяет точно рассчитывать оптические параметры и обеспечивает соответствие между результатами моделирования и реальной структурой материала. Экспериментально подтверждена высокая термическая стабильность анатазной фазы: в слоях TiO_2 , синтезированных методом ALD до толщины 250 нм, анатаз сохранялся как доминирующая фаза даже после последующей термической обработки до 1000 °С. Этот результат служит важной предпосылкой для применения термостабильных покрытий TiO_2 в таких областях, как пассивация поверхности, фотокатализ и снижение отражения света. Показана высокая конформность формирования плёнок ZnO и TiO_2 в структурах пористого кремния метод ALD обеспечивает однородное покрытие стенок и каналов макропористого кремния. Установлены параметры синтеза, при которых возможно получение TiO_2 плёнок с различной степенью кристалличности, от аморфной до чисто кристаллической, включая промежуточную аморфно-кристаллическую структуру.

Достоверность результатов исследования: Достоверность полученных результатов обоснована применением современных стандартизированных методов исследования, использованием высокоточных измерительных приборов, а также наличием достаточного объёма экспериментальных данных для получения статистически значимых результатов. Надёжность выводов также подтверждается использованием современных экспериментальных технологий и соответствием полученных данных результатам, представленным в работах других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования: В рамках работы проведён комплексный анализ фазового состояния, морфологии и оптических свойств слоёв TiO_2 и ZnO , синтезированных методом термического ALD на подложках из пористого кремния. На основе полученных результатов были исследованы условия формирования

кристаллических фаз, таких как анатаз и вюрцит, а также их поверхностная топография и спектроскопические характеристики. Для плёнок TiO_2 и ZnO были разработаны гетерогенный слоевой модель для спектральной эллипсометрии. Этот модель демонстрировал высокую степень согласованности с экспериментальными данными и обеспечил высокоточную оценку толщины, коэффициента поглощения и ширины запрещённой зоны плёнок. С практической точки зрения, продемонстрированы возможности синтеза равномерных тонкоплёночных покрытий как на плоских, так и на пористых подложках за счёт высокой способности ALD технологии формировать конформные слои. Полученные композиты $\text{TiO}_2/\text{ПК}$ и $\text{ZnO}/\text{ПК}$ относятся к классу функциональных материалов, которые могут применены в сенсорике, фотокатализе, биомедицине, фотоэлектрических устройствах, включая солнечные элементы и системы очистки окружающей среды.

Внедрение результатов исследования: Получен патент на полезную модель от Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан («Способ получения покрытия из чувствительного материала для газовых сенсоров», № FAP 2698 от 18.11.2024). Разработанная полезная модель предусматривает использование плёнок TiO_2 , синтезированных методом ALD, в качестве чувствительного материала для газовых сенсоров.

Статья, посвящённая исследованию морфологии и оптических свойств плёнок TiO_2 , полученных методом ALD на макропористых кремниевых подложках - “Morphology and optical characteristics of TiO_2 nanofilms grown by atomic-layer deposition on a macroporous silicon substrate” (Journal of Applied Spectroscopy, 2024, Vol. 91, No. 4, pp. 769-774, DOI: 10.1007/s10812-024-01783-z) - была процитирована международными исследователями в ряде публикаций (Shengxi Jiao and Zhenqiu Gao, Opt. Mater. Express 15, 541–554 (2025); Nedelin S.V., Zolotovskii N.A., Voronin A.S. et al., Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 88 (2024); A.A. Rakhimov, I.Kh. Khudaykulov, A.A. Ismatov, M.M. Adilov, East European Journal of Physics, № 3, 2025).

Результаты, полученные при синтезе слоёв TiO_2 методом термического ALD с использованием титана изопророксида и воды, а также при последующей термической обработке, позволившие детально охарактеризовать структурные изменения и процессы фазовых переходов в плёнках, были внедрены ООО «SGD Systems» в 2024–2025 годах при выполнении прикладной программы «Специальные имплантаты, применяемые в медицине» (Справка предприятия в форме ООО «SGD Systems» №20/08 от 20 августа 2025 года). Использование полученных научных результатов обеспечило возможность нанесения биостойких покрытий TiO_2 на позвоночные имплантаты, осаждения TiO_2 на поверхность имплантатов, изготовленных на 3D-принтере, для повышения их биологической совместимости с организмом человека, а также позволило повысить механическую прочность, износостойкость и подвижность при замещении костной ткани.

Апробация результатов исследования: Результаты настоящего исследования прошли апробацию на 15 республиканских и международных научно-технических и научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования: По теме диссертационной работы опубликовано в общей сложности 9 научных трудов, из которых 8 в научных изданиях, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций. Из них 4 статьи опубликованы в зарубежных научных журналах и 4 в республиканских. Также получен 1 патент Республики Узбекистан.

Структура и объём диссертации: Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка из 186 использованных источников. Общий объём диссертации составляет 120 страниц, содержит 61 рисунок и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации обоснована актуальность и значимость выбранной темы. Сформулированы цель и задачи исследования, приведены сведения об объекте, предмете и методах исследования. Определена соответствие темы приоритетным направлениям развития науки и техники в Республике Узбекистан. Описаны научная новизна полученных результатов, их научно-практическая значимость, достоверность, возможности внедрения, а также представлены сведения об апробации и структуре диссертации.

В первой главе диссертации проанализировано текущее состояние научных исследований, посвящённых свойствам композитных материалов на основе наноплёнок TiO_2 и ZnO , осаждённых на поверхности пористого кремния. Рассмотрены структура и другие физико-химические свойства пористых кремниевых подложек. Изучены перспективы применения композитов на основе пористого кремния, модифицированного оксидными плёнками, в фотоактивных, сенсорных и биомедицинских направлениях. Проанализированы методы получения плёнок TiO_2 и ZnO , в частности преимущества и параметры технологии ALD. Также рассмотрены взаимодействие плёнок с подложкой, особенности роста, влияющие на структуру, и на основе современных исследований сформулированы выводы.

Во второй главе «Свойства использованных исходных материалов, экспериментальные и исследовательские методы» приведены подробные сведения об исходных материалах, использованных в диссертационной работе, описаны процессы подготовки объектов научного исследования, технологической обработки, а также используемые методы анализа. В частности, подробно описаны подготовка поверхности кремниевых подложек, применение электрохимического анодирования для формирования структур пористого кремния, а также процессы синтеза наноплёнок TiO_2 и ZnO методом ALD. Представлены технические характеристики и порядок применения таких методов анализа, как сканирующая электронная микроскопия, рентгеновский фазовый анализ, спектроскопия комбинационного рассеяния, спектральная

эллипсометрия и спектрофотометрия, использованных для оценки структуры, фазового состояния, оптических свойств и морфологии образцов.

В третьей главе «Получение пористого кремния и определение факторов, влияющих на его морфологию» рассмотрен процесс формирования структур

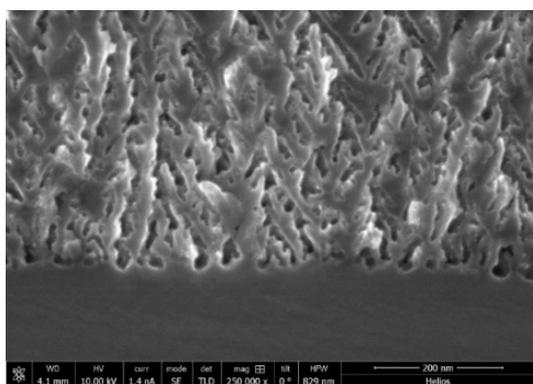
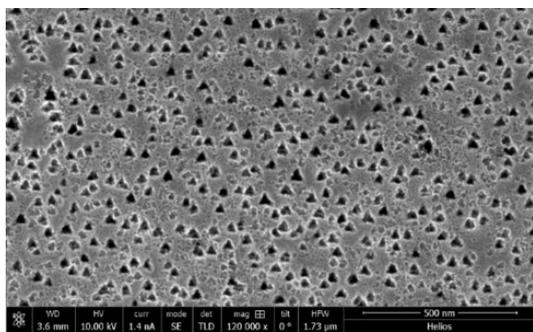


Рисунок 3.1 SEM-изображения нанопористого кремния

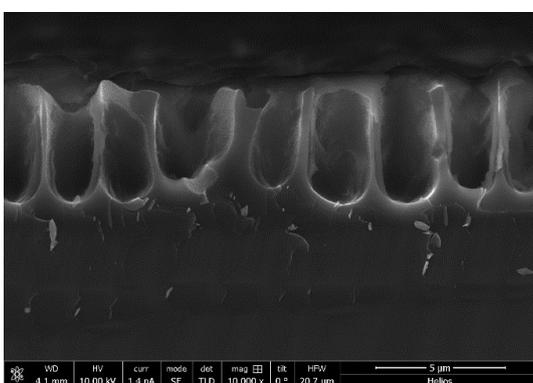
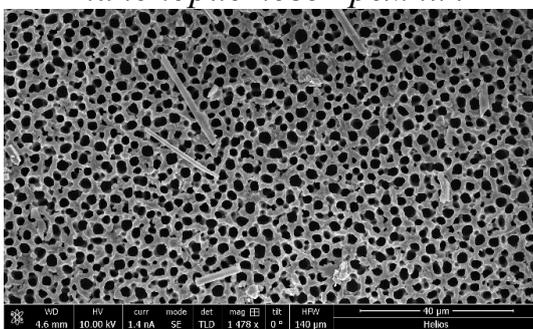


Рисунок 3.2. SEM-изображение макропористого кремния

пористого кремния методом электрохимического анодирования, а также проанализированы основные технологические факторы, влияющие на данный процесс. Формирование и свойства пористой структуры, возникающей при электрохимическом травлении, определяются рядом технологических и физических параметров, такими как, состав электролитного раствора, время травления, плотность тока, а также электрофизические характеристики кремниевой подложки. Для обеспечения стабильности и воспроизводимости процесса была спроектирована и изготовлена установка для электрохимического травления. В ходе экспериментов были синтезированы образцы пористого кремния с нано- и макроструктурами методом анодирования. В обоих случаях в качестве электролита использовалась смесь HF, этанола и воды в объёмном соотношении 1:1:1. Для получения нанопористых структур травление проводилось при плотности тока 15 мА/см² в течение 15, 30, 60 и 120 секунд. Макропористые структуры были получены при плотности тока 36 мА/см² с длительностью травления 10 и 20 минут. Согласно анализу СЭМ изображений, в нанопористом кремнии поры имеют диаметр в диапазоне 10-40 нм и распределены плотно равномерно. Степень пористости приблизительно составила 75 % (рисунок 3.1). Морфология образцов макропористого кремния представлена

на рисунке 3.2, где приведены СЭМ изображения поверхности и поперечного

сечения соответствующего образца. Поверхность образца равномерно покрыта плотно расположенными преимущественно округлой форме порами. Диаметр пор находится в диапазоне 1.8-2.8 мкм, при этом наиболее распространённый размер составляет 2.5 мкм. Пористость около 55 %. СЭМ изображения поперечного сечения показали, что глубина пор соответствует времени травления и составляет 5 и 10 мкм соответственно.

Четвёртая глава «Формирование плёнок TiO₂ и ZnO методом ALD, их структурные и оптические свойства» посвящена процессам осаждения наноплёнок TiO₂ и ZnO методом ALD и изучению их характеристик.

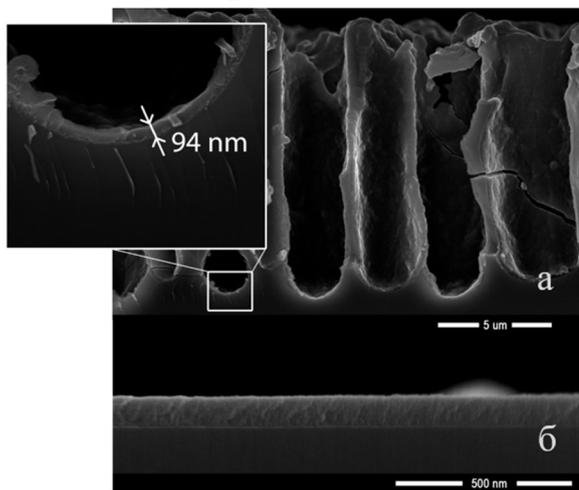


Рисунок 4.1

Для формирования плёнок TiO₂ на пористых и плоских подложках методом термического ALD были выбраны прекурсоры изопропоксид титана и вода. СЭМ изображения поперечного сечения плёнок TiO₂ на пористом и плоском кремнии представлены на рисунке 4.1. На изображении видно, что на подложке из пористого кремния плёнка полностью и равномерно покрывает вертикальные каналы, демонстрируя высокую

конформность. На увеличенном фрагменте измеренная толщина слоя в основании пор составляет приблизительно 94 нм. На изображении 4.1 (b) представлено поперечное сечение образца с пленкой на плоской монокристаллической кремниевой подложке, на котором, также наблюдается равномерное и бездефектное покрытие по всей поверхности. На приведённом рисунке 4.2 показаны измеренные значения толщины плёнок в различных участках пористых и плоских монокристаллических кремниевых подложек.

Средняя толщина плёнки составляет приблизительно 95 нм. Во всех случаях подтверждается, что плёнка формирует равномерное покрытие как на внутренних стенках и каналах пористого кремния, так и на плоской поверхности. Топография поверхности и профиль плёнки, синтезированной на плоской подложке, были исследованы методом атомно-силовой микроскопии (AFM) на участке размером 5 × 5 мкм (см. рисунок 4.2).

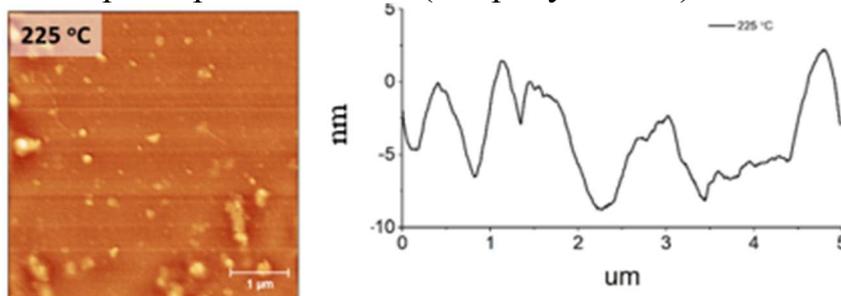


Рисунок 4.2 AFM-изображение и профиль плёнки TiO₂

Параметры рельефа поверхности были определены на основе стандартных формул определения шероховатости. Средняя арифметическая шероховатость поверхности 5 мкм участка, составила $Ra=2,4$ нм, а разница между максимальной и минимальной точками $Rz=10,97$ нм.

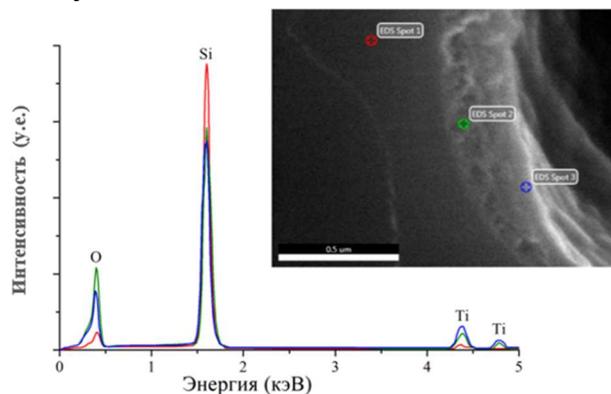


Рисунок 4.3 ЭДС спектры анализа в различных точках (Spot 1–3).

Анализ элементного состава плёнки TiO_2 : Элементный состав плёнки был проанализирован методом СЭМ-ЭДС. Анализ проводился в трёх точках: внутри кремниевой подложки, на границе между подложкой и плёнкой, а также на поверхности плёнки (рисунок 4.3). На поверхности были выявлены элементы титан и кислород, что подтвердило наличие слоя оксида титана. В плёнке не

были обнаружены посторонние элементы. Это свидетельствует о том, что при травлении, а также органические и неорганические группы, содержащиеся в прекурсорах ALD процесса, не оставили остаточных примесей в слое.

Как известно фазовый состав TiO_2 зависит от условий синтеза, температуры, толщины слоя и свойств подложки. На спектре комбинационного рассеяния света, представленном на рисунке 4.4, зафиксированы пики 143, 194, 392 и 637 см^{-1} , характерные для анатазной фазы, соответствующие модам E_g и B_{1g} . Интенсивный пик при 520 см^{-1} обусловлен сигналом от кремниевой подложки и перекрывает характерные пики анатаза в области 513 и 517 см^{-1} . Фазовое состояние и размер кристаллитов также были определены методом XRD.

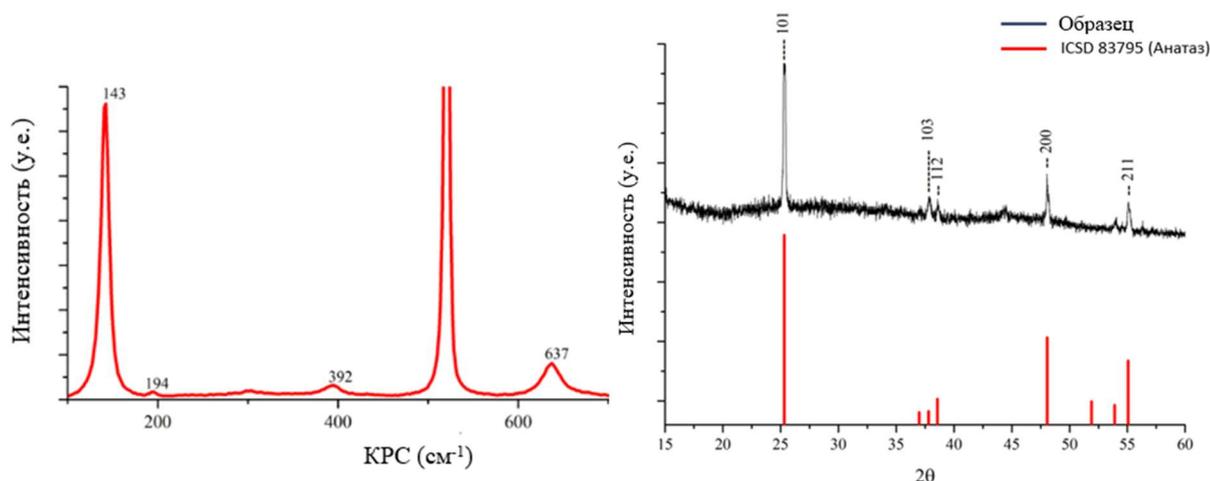


Рисунок 4.4. Раман-спектр и XRD-дифрактограмма плёнки TiO_2

Для интерпретации результатов использовалась база данных ICSD: дифрактограмма образца, представленная на рисунке 4.4, была сопоставлена с эталонными данными анатазной фазы из базы ICSD № 83795. Коэффициент соответствия составил 0,33, что указывает на формирование анатазной фазы в образце. В поликристаллических материалах кристаллиты ориентированы

хаотично, поэтому интенсивность дифракционных линий имеет статистический характер и совпадает с эталонными данными. Согласно расчётам, приведённым в таблице 4.1, средний размер кристаллитов составляет 55 нм.

Таблица 4.1. Результаты XRD-анализа образца TiO_2

№	2θ °	d Å	h k l	ШПВ °	D нм	норм. интенсивность %	ICSD 83795 норм. инт. %
1	25,32	3,51	1 0 1	0,1972	41,4	100,00	100,00
2	36,98	2,43	1 0 3	0,2599	32,2	6,71	6,30
3	38,60	2,33	1 1 2	0,1601	52,5	7,78	6,90
4	48,07	1,89	2 0 0	0,1219	71,3	29,12	26,50
5	55,10	1,67	2 1 1	0,1956	45,8	18,62	15,80

В качестве основных реагентов использовался диэтилцинк (DEZ, $Zn(C_2H_5)_2$) и вода. На рисунке 4.5 представлены СЭМ изображения поперечного сечения образцов с плёнкой, синтезированных на плоских, пирамидальных подложках и на пористом кремнии. Плёнка равномерно покрывает подложку, при этом отсутствуют пустоты и признаки деляминации. Толщина плёнки составляет примерно 48 нм.

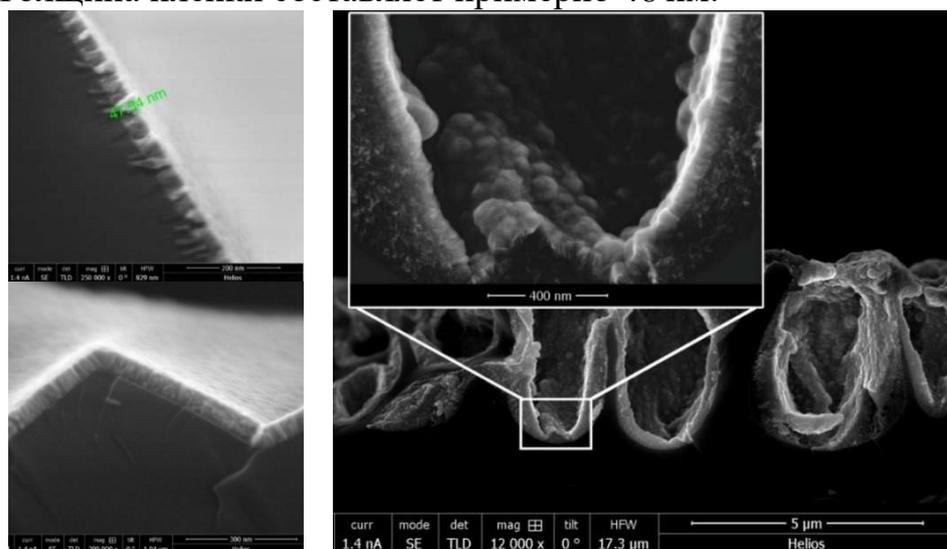


Рисунок 4.5.
СЭМ
изображение
поперечного
сечения
образцов

На СЭМ изображении поперечного сечения образца на подложке из пористого кремния, представленном на рисунке 4.5, видно, что плёнка ZnO равномерно покрывает всю поверхность с толщиной около 50 нм. При большом увеличении выявлен рельеф поверхности, связанный с морфологией подложки, крупные дефекты отсутствуют. Топография поверхности и профиль плёнки синтезированной на плоской подложке, получены методом АФМ и представлены на рисунке 4.6 для участка размером 50×30 мкм. Анализ общей поверхности и морфологии показал, что средняя шероховатость составляет $R_a = 2,1$ нм, а $R_z = 21,97$ нм. Элементный состав проанализирован методом ЭДС (рисунок 4.7). Основные пики спектра соответствуют кислороду, цинку и кремнию, что подтверждает наличие плёнки ZnO .

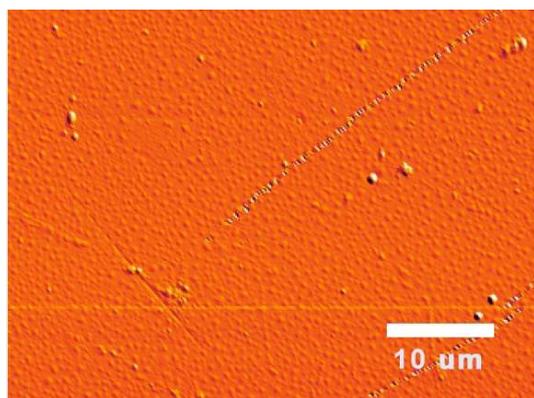


Рисунок 4.6. AFM топография и профиль поверхности плёнки ZnO

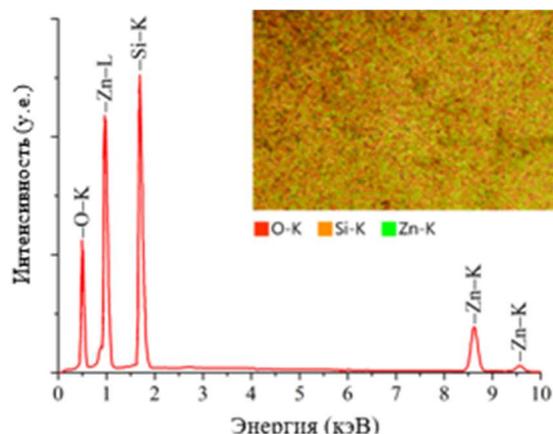


Рисунок 4.7. Элементный состав плёнки ZnO.

Структурные характеристики плёнки ZnO: ZnO обычно существует в гексагональной вюрцитной фазе, которая даёт характерные сигналы в спектре комбинационного рассеяния. На рисунке 4.8 пик при 433 см^{-1} плёнке ZnO, подтверждая её вюрцитную структуру. Дифрактограмма была сопоставлена с эталонным данным ICSD № 98547 для ZnO вюрцитной фазы.

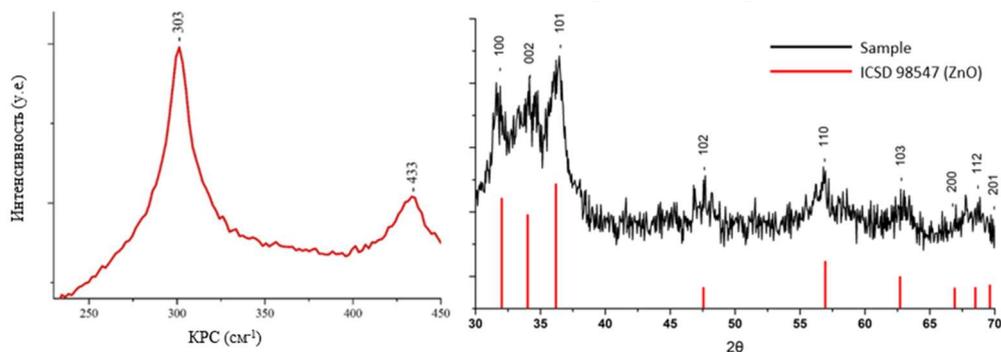


Рисунок 4.8. спектр КРС и дифрактограмма образца ZnO.

Основные пики, соответствующие плоскостям (100), (002) и (101), расположены в углах $31,65^\circ$, $34,59^\circ$ и $36,44^\circ$ соответственно. Дополнительные пики соответствуют плоскостям (102), (110), (103) и (112) и полностью совпадают с эталонным. Результаты подтверждают наличие в плёнке ZnO кристаллической вюрцитной фазы, при этом другие кристаллические фазы не обнаружены. В таблице 4.2 приведены соответствующие пикам параметры.

Таблица 4.2. Результаты XRD-анализа образца ZnO

№	2θ °	d Å	h k l	ШПВ °	D нм	норм. интенсивность %	ICSD 98547 норм. инт. %
1	31,65	2,83	1 0 0	0,60	137,62	23,17	51
2	34,59	2,59	0 0 2	1,6	52,00	91,39	32,6
3	36,44	2,46	1 0 1	1,14	73,37	100,00	100
4	48,09	1,89	1 0 2	2,8	31,05	55,60	18,3
5	56,71	1,62	1 1 0	2,1	42,99	71,08	31,7
6	63,09	1,47	1 0 3	3,1	30,07	20,73	31,5
7	68,45	1,36	1 1 2	3,1	30,99	45,00	21,4

Моделирование оптических свойств слоёв TiO₂ и ZnO методом спектральной эллипсометрии: При определении оптических свойств тонких плёнок эллипсометрия в основном измеряет изменения амплитуды и фазы отражённого света с прямой и перпендикулярной поляризацией от поверхности материала. Взаимосвязь между компонентами поляризованного света определяется посредством отношения:

$$\rho = \frac{r_p}{r_s}$$

Это отношение можно выразить в виде эллипсометрических углов:

$$\rho = \tan(\psi) e^{i\Delta}$$

При решении обратной задачи эллипсометрии данное отношение можно представить в виде зависимости от комплексной диэлектрической функции:

$$\rho = \tan(\psi) e^{i\Delta} = f(\varepsilon_1(E), \varepsilon_2(E))$$

TiO₂ и ZnO — сходные широкозонные полупроводники. Их диэлектрическую функцию целесообразно описывать плёночной моделью на основе обобщённого уравнения Таукса–Лоренца, для мнимой части которой используется выражение:

$$\varepsilon_2(E) = \begin{cases} \frac{AE_0\Gamma(E-E_g)^2}{E[(E-E_g)^2+(\Gamma E)^2]}, & E > E_g \\ 0, & E \leq E_g \end{cases}$$

Для действительной части диэлектрической функции применяется соотношение Крамерса-Кронига:

$$\varepsilon_1(E) = \varepsilon_\infty + \frac{2}{\pi} P \int_{E_g}^{\infty} \frac{x\varepsilon_2(x)}{x^2-E^2} dx$$

Структурный анализ выявил кристаллические, аморфные и дефектные области. Поэтому комплексная диэлектрическая функция представляется суммой осцилляторов, что позволяет оценить вклад каждой фазы и их долю. Для плёночной модели функция имеет вид:

$$\varepsilon_2(E) = \begin{cases} \frac{A_A E_{0A} \Gamma_A (E-E_{gA})^2}{E[(E^2-E_{0A}^2)^2+(\Gamma_A E)^2]} + \frac{A_k E_{0k} \Gamma_k (E-E_{gk})^2}{E[(E^2-E_{0k}^2)^2+(\Gamma_k E)^2]} + \frac{A_d E_{0d} \Gamma_d (E-E_{gd})^2}{E[(E^2-E_{0d}^2)^2+(\Gamma_d E)^2]}, & E > E_{gA}, E > E_{gk} \\ \frac{A_k E_{0k} \Gamma_k (E-E_{gk})^2}{E[(E^2-E_{0k}^2)^2+(\Gamma_k E)^2]} + \frac{A_d E_{0d} \Gamma_d (E-E_{gd})^2}{E[(E^2-E_{0d}^2)^2+(\Gamma_d E)^2]}, & E_{gA} \geq E > E_{gk} \\ \frac{A_A E_{0A} \Gamma_A (E-E_{gA})^2}{E[(E^2-E_{0A}^2)^2+(\Gamma_A E)^2]} + \frac{A_d E_{0d} \Gamma_d (E-E_{gd})^2}{E[(E^2-E_{0d}^2)^2+(\Gamma_d E)^2]}, & E_{gk} \geq E > E_{gA} \\ \frac{A_d E_{0d} \Gamma_d (E-E_{gd})^2}{E[(E^2-E_{0d}^2)^2+(\Gamma_d E)^2]}, & E \leq E_{gA}, E \leq E_{gk} \end{cases}$$

Вклад каждого осциллятора в общую диэлектрическую функцию в процентах, рассчитали следующим образом:

$$P_i = \frac{A_i \cdot C_i}{\sum_{j=1}^n A_j \cdot C_j}$$

Достоверность результатов моделирования оценивалась по среднеквадратической ошибке, рассчитанной по следующей формуле:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^{exp} - y_i^{teor})^2$$

Спектрально эллипсометрический анализ плёнки TiO₂: измерялись диапазоне волн 240-1000 нм при угле падения 70°. Результаты аппроксимации представлены на рисунке 4.9. Параметры слоя и значения осцилляторов приведены в таблице 4.3. На рисунке 4.10 показаны спектры n и k: n ≈ 2,55 при 300 нм и падает до 1,9 к 1000 нм; поглощение наблюдается в УФ, в видимой области практически отсутствует.

Таблица 4.3. Результаты аппроксимации для TiO₂.

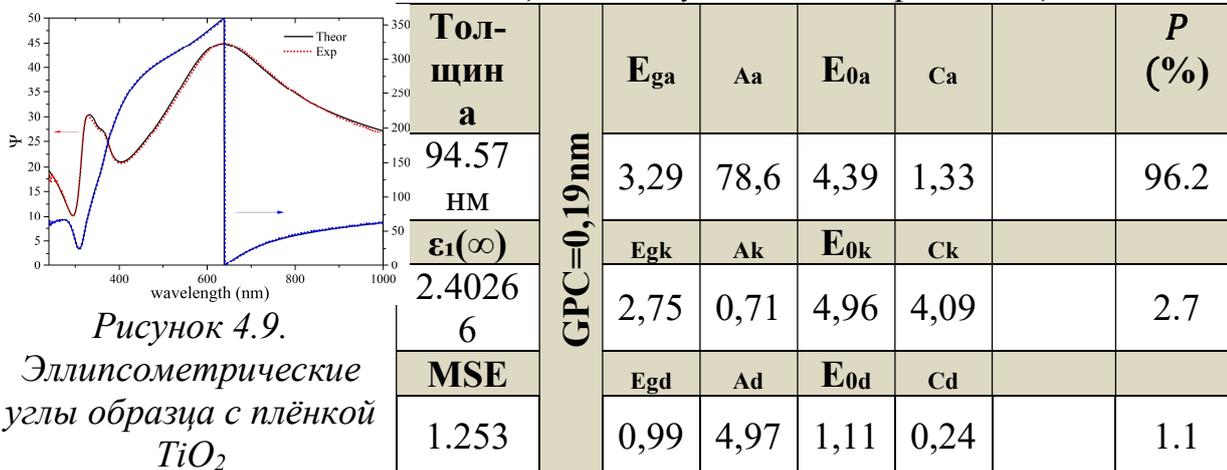


Рисунок 4.9.

Эллипсометрические углы образца с плёнкой TiO₂

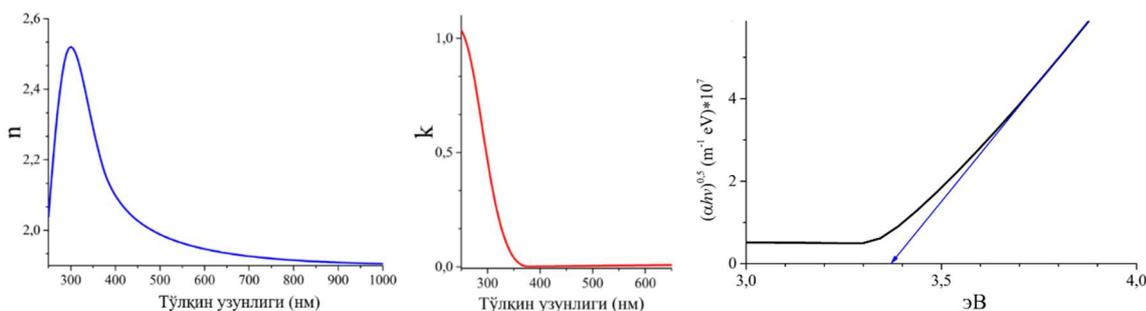


Рисунок 4.10. Зависимость рассчитанных коэффициентов преломления (n) и поглощения (k) синтезированной плёнки TiO₂ от длины волны.

Метод экстраполяции α-hν показал ширину запрещённой зоны 3,38 эВ.

Спектрально эллипсометрический анализ плёнки ZnO: Для плёнки ZnO применялась та же обобщённая модель с тремя осцилляторами Тауц-Лоренца, что и для плёнки TiO₂. Результаты в таблице 4.4. На рисунке 4.11 представлены рассчитанные значения коэффициента поглощения и показателя преломления плёнки ZnO. Зависимость коэффициента поглощения и показателя преломления плёнки от длины волны, определённая на основе данных спектральной эллипсометрии.

Таблица 4.4. Результаты аппроксимации для плёнки ZnO.

Толщина	GPC=0,119nm	E _{gw}	A _w	E _{0w}	C _w	P
47,78 нм		3,168	129,524	3,3196	0,2705	36.65%
ε ₁ (∞)		E _{gk}	A _k	E _{0k}	C _k	
2.2094		1,0324	1,28	3,9669	1,4258	1.91%
MSE		E _{gd}	A _d	E _{0d}	C _d	
1.1145	2,4758	18,908	5,7830	3,1056	61.42%	

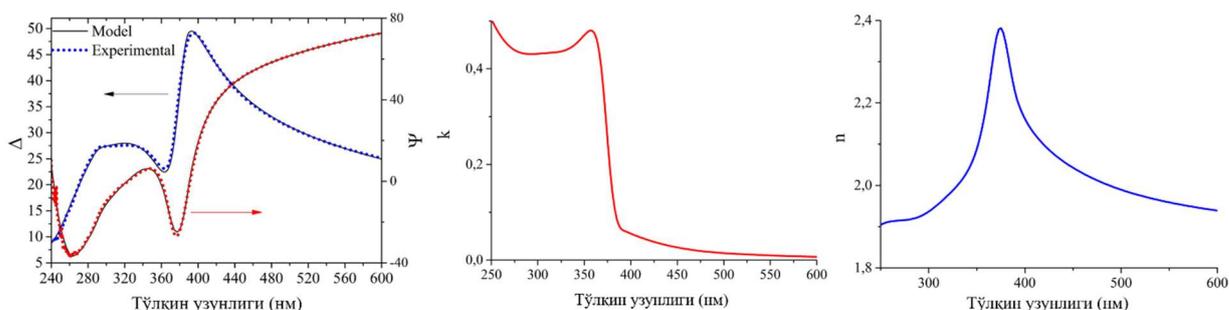


Рисунок 4.11. Эллипсометрические углы образца с плёнкой ZnO.

Анализ графиков показал: ZnO-плёнка активно поглощает в 250–400 нм, выше 400 нм поглощение отсутствует. n достигает максимума при ~ 390 нм и затем убывает. Ширина запрещённой зоны — 3,11 эВ.

Пятая глава «Исследование фазовых состояний и переходы в плёнках TiO_2 , полученных методом ALD, зависимость от температуры синтеза и последующей термической обработки» посвящена влиянию температуры подложки на фазовое состояние в плёнках TiO_2 , при ALD. Исследованы плёнки TiO_2 , синтезированные из TIP и H_2O при 200-275 °C с шагом 25 °C. Остальные параметры процесса соответствуют условиям четвертой главы. В качестве подложек использовались кремниевые пластины и кварцевое стекло. Для оценки морфологии использовали метод AFM, анализируя топографию и профиль поверхности на участках 5×5 мкм.

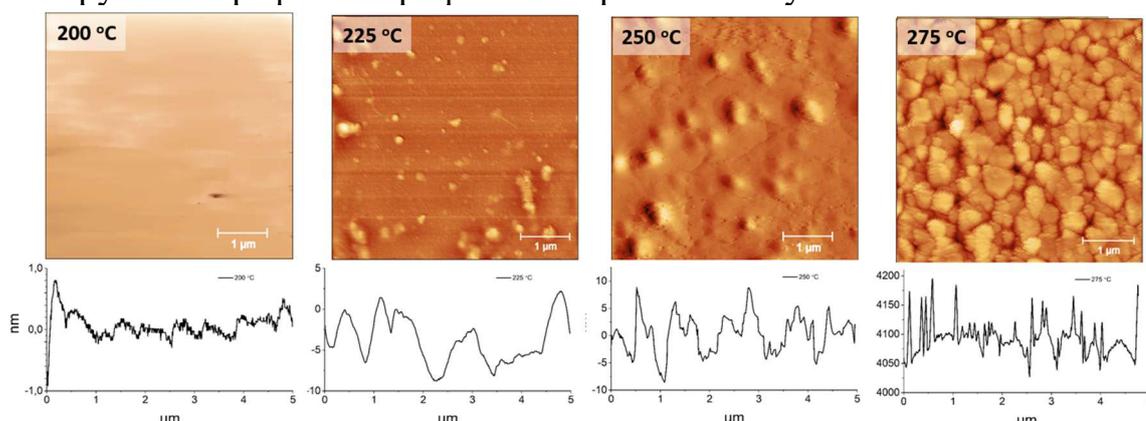


Рисунок 5.1. AFM-топография плёнок TiO_2 , синтезированных методом ALD при температурах 200–275 °C, на участках размером 5×5 мкм.

По данным рис. 5.1, с ростом температуры осаждения наблюдается последовательное изменение структуры: при 200 °C поверхность почти гладкая, при 225 °C появляются мелкие микроструктуры, при 250 °C они становятся более выраженными, что указывает на формирование кристаллической фазы. При 275 °C формируются агломераты из микроструктур - крупные кластеры ($\sim 0,5$ мкм) и мелкие сферические частицы (50–100 нм), что связано с десорбцией и объединением молекул. На основе AFM-изображений количественно оценены изменения морфологии поверхности, а значения параметров R_a и R_z приведены в таблице 5.1. Фазовое состояние плёнок TiO_2 , синтезированных при 200 °C, 225 °C, 250 °C и 275 °C, было исследовано методом XRD. Отсутствие пиков при 200 °C указывает на

аморфную структуру, тогда как при 225 °С и выше появляются пики, свидетельствующие о формировании кристаллического порядка. В плёнке TiO₂, синтезированной при 225 °С, зарегистрированы слабые пики, соответствующие плоскостям анатазной фазы, что указывает на начало кристаллизации и сосуществование аморфной и кристаллической фаз на фоне широкой аморфной подложки. По анализу Ритвелда доля кристаллической фазы составляет 25–30%, остальная часть остаётся аморфной, что свидетельствует о формировании лишь локальных кристаллических областей. При 250 °С и 275 °С наблюдаются чёткие и интенсивные пики, соответствующие плоскостям (101), (004), (200), (105) и (211), что подтверждает полную кристаллизацию плёнки. На основании данных AFM и XRD составлена условная схема механизма роста, зависящего от температуры, а также представлены XRD-дифрактограммы на рисунке 5.2.

Таблица 5.1. Значения параметров Ra и Rz, рассчитанные по профилю.

	200 °С	225 °С	250 °С	275 °С
Ra	0,14 нм	2,4 нм	2,69 нм	18,64 нм
Rz	1,73 нм	10,97 нм	17,44 нм	167,92 нм

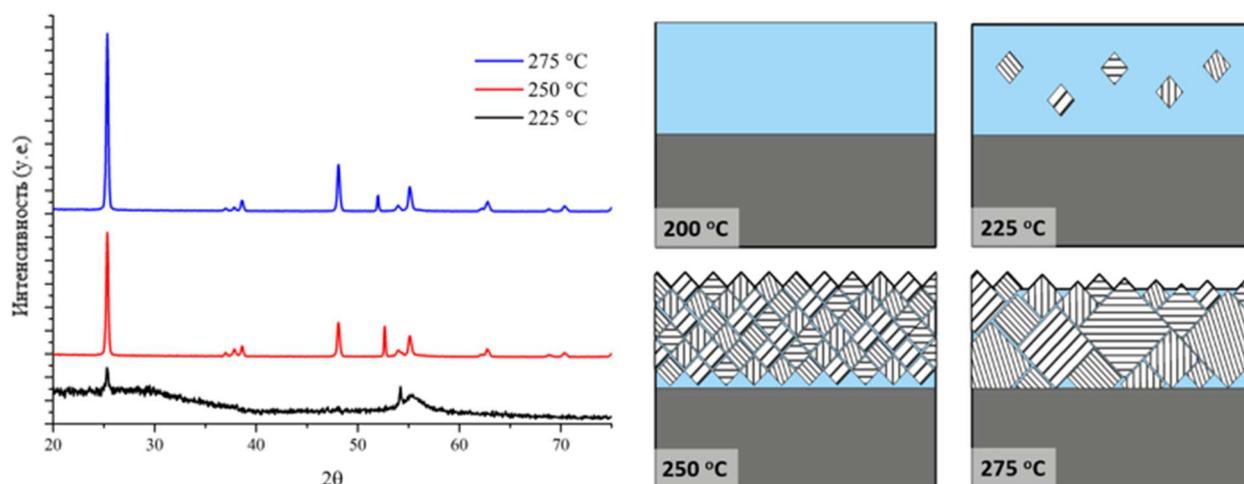


Рисунок 5.2. XRD-дифрактограммы плёнок TiO₂ и схематическое изображение механизма роста плёнок.

Влияние температуры подложки и числа циклов на оптическую плотность плёнок TiO₂: Оптические свойства TiO₂ оценены по спектрам поглощения. На рисунке 5.3 показаны спектры для плёнок при разных температурах синтеза. Установлено, что с повышением температуры спектры поглощения смещаются в длинноволновую область. При 200 °С характерен аморфный спектр, при 225 °С наблюдается частичная кристаллизация, а при 250 °С и 275 °С спектры совпадают, что указывает на формирование устойчивой анатазной фазы. Сравнение нормализованных спектров при разном числе ALD-циклов показало их идентичность, подтверждая отсутствие влияния толщины на положение спектра.

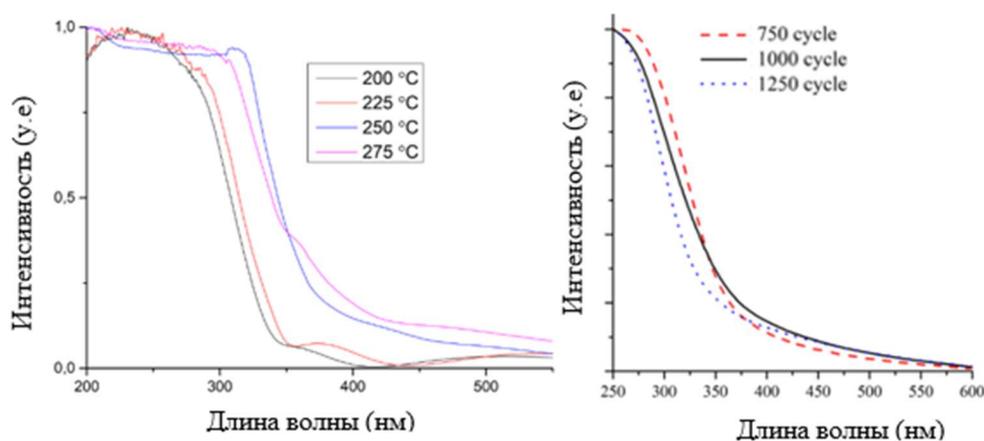


Рисунок 5.3. Спектры для TiO_2 , синтезированных при различных температурах и числе циклов.

Исследование фазовых переходов при последующей термической обработке: Фазовые изменения, происходящие после термической обработки аморфных плёнок TiO_2 , синтезированных методом ALD при 200 °C , были исследованы с использованием оптической микроскопии (рисунок 5.4).

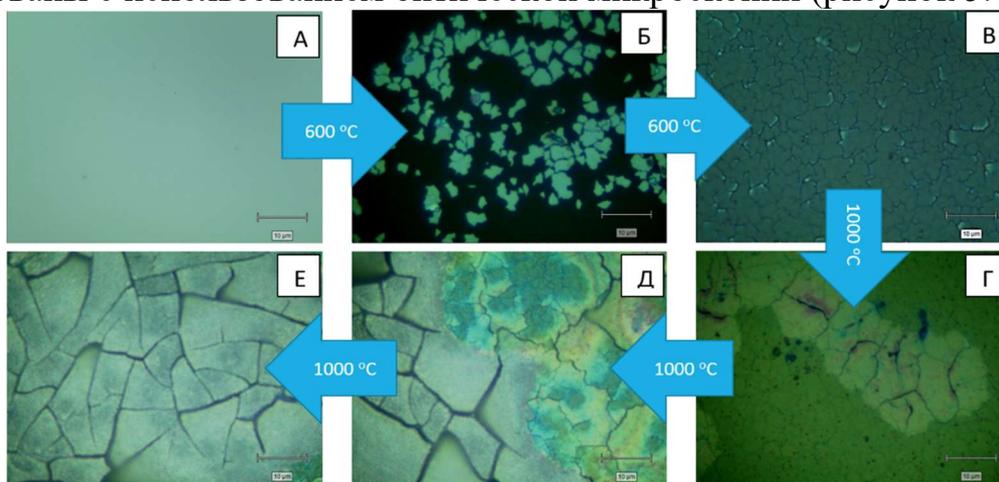


Рисунок 5.4. Оптические микроскопические изображения микроструктурных изменений плёнок TiO_2 , синтезированных методом ALD при 200 °C , после термической обработки при 600 °C и 1000 °C .

На начальной стадии (А) поверхность однородна и оптически гладка, признаки кристалличности отсутствуют. На промежуточном этапе (Б) появляются центры кристаллизации — отдельные зерна, рассеивающие свет. С развитием рекристаллизации зерна срастаются в сплошной слой (В), где вследствие плотностных изменений и термомеханических напряжений формируется сеть трещин; завершается кристаллизация анатаза. Высокотемпературный отжиг при 1000 °C вызывает фазовый переход анатаза в рутил, сопровождающийся укрупнением кристаллов и изменением морфологии поверхности: фиксируются крупные зерна и микротрещины (Г), наблюдается продвижение фронта перехода и рост зёрен (Д), формируются устойчивые рутиловые кристаллы полигональной формы (Е).

Механизм роста носит локальный характер: зарождение происходит в энергетически выгодных точках, после чего кристаллы радиально

распространяются в аморфную область; фронт рекристаллизации последовательно переводит плёнку в кристаллическое состояние. Скорость и направление процесса определяются морфологией и толщиной плёнки, а также режимом термообработки, такие как температура, время и атмосфера.

Спектроскопический анализ фазовых переходов: Фазовые изменения, были подтверждены КРС и XRD (рисунок 5.5).

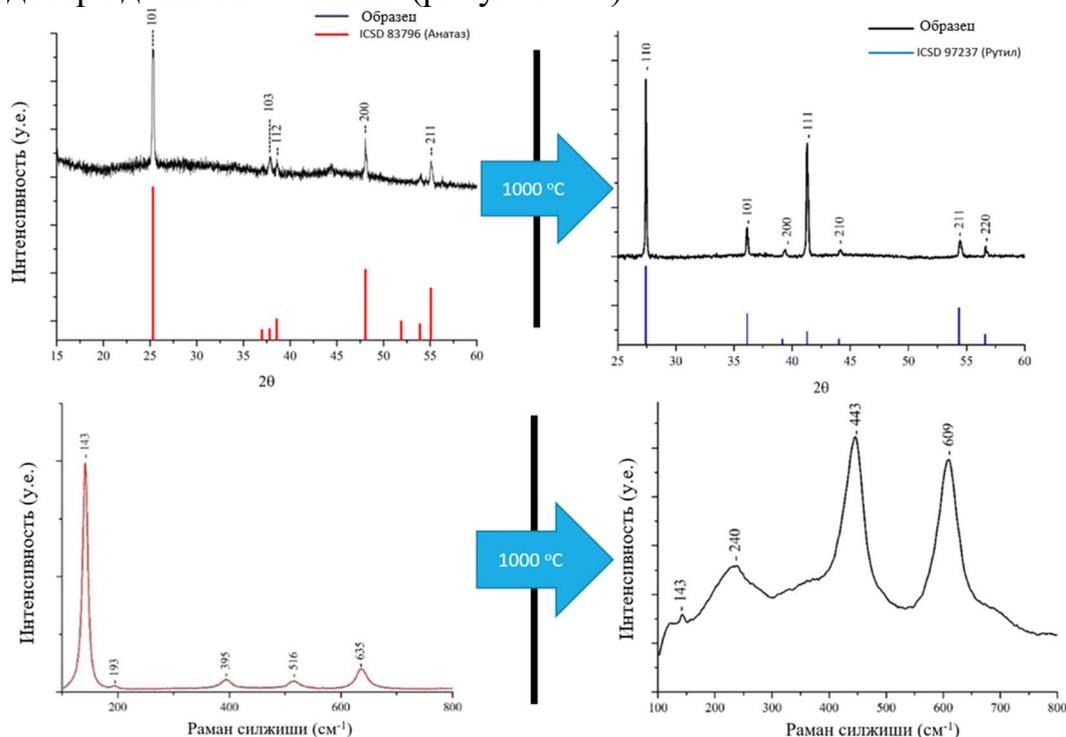


Рисунок 5.5. Раман-спектры и XRD-дифрактограммы образцов до и после термической обработки.

Исчезновение характерных для анатаза пиков рамановских спектрах и появление пиков, присущих рутилу, свидетельствуют о полном фазовом переходе при 1000 °С. Данные XRD также подтвердили высокую кристалличность, что проявляется в наличии интенсивных пиков рутиловой фазы и их изотропном распределении. Скорость фазового перехода определяется толщиной плёнки: при толщине 1,5 мкм он завершается за 3 ч, при 1 мкм - за 10 ч, а при 250 нм остаётся неполным даже спустя 48 ч.

Оптические свойства плёнок после термической обработки: Фазовые изменения плёнок TiO_2 , вызванные термической обработкой, существенно повлияли на их оптические характеристики. На рисунке 5.6(а) показаны спектры поглощения для анатазной фазы, сформировавшейся непосредственно после синтеза, а также для аморфной и рутиловой фаз, полученных в результате термической обработки. Для аморфной плёнки характерен порог поглощения ~ 320 нм, связанный с локальными дефектами (кислородные вакансии). В анатазной фазе он смещён к 360–380 нм, в рутиловой — к 410–420 нм. Краевые переходы имеют экспоненциальный характер и обусловлены кислородными вакансиями. Согласно анализу по методу Тауца (рисунок 5.6(б)), оптическая ширина запрещённой зоны составляет: аморфная фаза 3,41 эВ, анатаз 3,25 эВ, рутил 3,05 эВ.

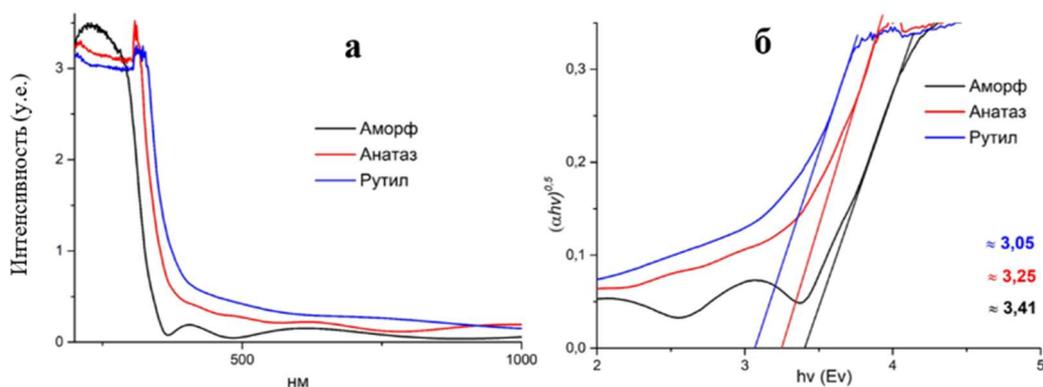


Рисунок 5.6. Оптические свойства плёнок TiO_2 : (а) спектры поглощения фаз; (б) ширина запрещённой зоны методом Тауца (б).

Изменения связаны как с фазовым состоянием материала, так и с наличием дефектов и степенью кристалличности, что соответствует литературным данным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При анодировании p-Si (100) с удельным сопротивлением 0,1 Ом•м в электролите $NF:C_2H_5OH:H_2O$ (1:1:1) при 36 мА/см² в течение 10-20 мин формируются поры цилиндрической формы глубиной 5-10 мкм и диаметром ~2,5 мкм. Морфология зависит от плотности тока, свойств подложки и концентрации электролита.

2. Плёнки TiO_2 и ZnO синтезированы методом термического ALD с использованием диэтилцинка и титанизопроксида при подаче воды как вторичного реагента. По данным SEM толщина слоёв составила ~47 нм для ZnO (400 циклов) и ~96 нм для TiO_2 (500 циклов), что соответствует скоростям роста 0,115 и 0,19 нм/цикл соответственно.

3. СЭМ ЭДС анализ показал, что плёнки TiO_2 и ZnO равномерно покрывают пористый кремний, включая внешнюю поверхность, стенки и дно пор. В слоях обнаружены только целевые элементы В слоях обнаружены только целевые элементы - титан и кислород для TiO_2 , цинк и кислород для ZnO, что подтверждает полное термическое разложение прекурсоров и удаление побочных продуктов из реакционной камеры.

4. Спектроскопия комбинационного рассеяния выявила пик при 433 см⁻¹, соответствующий моде $E_2(\text{high})$ вюрцитной фазы ZnO, и данные XRD с полным совпадением с эталоном ICSD № 98547 подтвердили, что плёнка ZnO толщиной около 47 нм имеет поликристаллическую гексагональную структуру вюрцита с размером кристаллитов 60 нм и изотропной текстурой.

5. В образцах с плёнкой TiO_2 толщиной около 96 нм спектроскопия комбинационного рассеяния выявила пики при 143, 194, 392 и 637 см⁻¹, характерные для анатазной фазы, а XRD анализ, полностью совпадающий с эталоном ICSD № 83796, подтвердил поликристаллическую структуру с размером кристаллитов порядка 40 нм и изотропной текстурой.

6. Спектральные эллипсометрические данные для наноплёнок ZnO и TiO_2 были проанализированы с использованием трёхосцилляторной модели, основанной на обобщённой функции Тауца–Лоренца. Полученные значения

показали высокую степень согласия между моделью и экспериментом: среднеквадратичная ошибка по параметрам Ψ и Δ составила 1.11 для ZnO и 1.25 для TiO₂. Рассчитанные по модели значения толщины и скорости роста полностью совпали с результатами СЭМ, что подтверждает достоверность и корректность выбранного моделирования.

7. Анализ спектральных эллипсометрических данных показал, что плёнка ZnO проявляет сильное поглощение вплоть до 390 нм и становится прозрачной при длинах волн выше 500 нм. Для TiO₂ интенсивное поглощение наблюдается до 345 нм, а начиная с 400 нм плёнка практически прозрачна. Максимальные значения показателя преломления составили: для ZnO - $n = 2.38$ при 370 нм, для TiO₂ - $n = 2.5$ при 310 нм; при дальнейшем увеличении длины волны показатель преломления экспоненциально уменьшается. Ширина запрещённой зоны была определена равной 3.1 эВ для ZnO и 3.3 эВ для TiO₂.

8. При синтезе плёнок TiO₂ методом термического ALD с использованием ТПР и воды в качестве прекурсоров было установлено, что температура подложки оказывает определяющее влияние на морфологию и структуру слоёв. При 200 °С формируется полностью аморфная плёнка с шероховатостью поверхности, не превышающей 0.2 нм. При 225 °С наблюдается переходная аморфно-анатазная структура с шероховатостью около 2 нм. При 250 °С образуется полностью поликристаллическая анатазная плёнка с шероховатостью порядка 2 нм и равномерной поверхностью. При 275 °С сохраняется поликристаллическая анатазная структура, однако вследствие резкого увеличения шероховатости морфология поверхности становится неоднородной. Таким образом, определено, что температурное «окно» ALD для аморфного TiO₂ соответствует 200 °С, а для анатазной модификации - 250 °С. Установлено, что спектральная область оптического поглощения зависит от температуры синтеза, но не от толщины плёнки.

9. В синтезированных плёнках TiO₂ при термической обработке наблюдались фазовые переходы аморфная фаза - анатаз - рутил. Показано, что процесс протекает через зарождение центров кристаллизации с их последующим ростом и зависит от толщины. Для плёнки толщиной 1.5 мкм переход в рутил при 1000 °С происходил за 2-3 часа, для слоя толщиной 1 мкм - примерно за 10 часов. При этом плёнки толщиной 250 нм и тоньше сохраняли фазовую стабильность вплоть до 48 часов отжига при 1000 °С.

10. Структурные исследования показали, что в процессе фазового перехода происходят уплотнение слоя, возникновение внутренних напряжений и формирование микротрещин, при этом данные изменения оказывают влияние и на оптические свойства поглощения. Высокая термическая стабильность плёнок толщиной менее 250 нм - будь то аморфные, анатазные или смешанные аморфно-анатазные структуры - позволяет рассматривать их в качестве перспективных функциональных материалов для высокотемпературно-устойчивых фотокаталитических, сенсорных и фотоэлектрических устройств.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 INSTITUTE OF ION-PLASMA
AND LASER TECHNOLOGIES**

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

TURDALIEV TEMUR KAMILOVICH

**STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF TiO₂ AND ZnO
NANOLAYERS PRODUCED BY ATOMIC LAYER DEPOSITION ON
THE SURFACE OF POROUS SILICON AND SILICON OXIDE**

01.04.12 – Physics and technology of nanomaterials

**ABSTRACT
of dissertation of the doctor of Philosophy (PhD)
on physical and mathematical sciences**

TASHKENT – 2025

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number № B2024.4.PhD/FM1213

Dissertation has been prepared at the Institute of Ion-plasma and laser technologies.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.iplt.uz) and on Information-educational portal «ZiyoNet» (<http://www.ziynet.uz>).

Scientific supervisor: **Ashurov Khatam Bakhronovich**
Doctor of Technical Science, professor

Official opponents: **Nuritdinov Izzatillo**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Quvondiqov Vahobjon Ortiqovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Senior researcher

Leading organization: **Tashkent State Technical University
named after Islam Karimov**

The defense will take place on «__» _____ 2025 at _____ at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, 33 Durmon yuli street. Phone/fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

The PhD dissertation is can be looked through in the Information-Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № __) (Address: 100125, 33, Durmon yuli str., Tashkent, Uzbekistan. Phone: (+99871) 262-31-69).

The abstract of the dissertation is sent out on «__» _____ 2025.

(Mailing report № _____ on «__» _____ 2025).

Kh.B. Ashurov
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, Doctor of Technical Science, professor

I.D. Yadgarov
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

U.K. Makhmanov
Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work. Synthesis of TiO₂ and ZnO films by the ALD method on the surface of macroporous silicon, silicon, and quartz substrates, as well as investigation of their morphological, structural, and optical properties, including the study of the influence of synthesis conditions and subsequent thermal treatment on phase transformations.

Objectives of the study: based on the purpose mentioned above, the following tasks were defined.

Implementation of the technology for producing macroporous silicon and investigation of the morphology of the obtained samples to identify factors influencing the process.

Synthesis of thin TiO₂ and ZnO films on prepared substrates by thermal ALD.

Study of morphological, structural, and optical properties of the obtained samples using Raman spectroscopy, X-ray diffraction, optical absorption spectroscopy, and atomic force microscopy.

Development and analysis of a film model for studying thickness and optical characteristics using spectroscopic ellipsometry.

Investigation of the effect of substrate temperature during thermal ALD synthesis on the phase state of TiO₂, as well as on its structural and optical properties.

Study of phase transitions in TiO₂ films occurring as a result of subsequent thermal treatment.

The objectives of the research: The object of the study comprises porous silicon, flat monocrystalline silicon, quartz glass substrates, and TiO₂ and ZnO nanolayers synthesized on their surfaces by the Atomic Layer Deposition method.

The scientific novelty of the research is as follows:

- For the first time, ZnO layers with a thickness of ~50 nm were synthesized by thermal ALD using diethylzinc and water at a substrate temperature of 200 °C on macroporous and flat silicon substrates. It was established that an isotropic polycrystalline structure with a hexagonal nanocrystalline lattice corresponding to the wurtzite phase was formed.

- For the first time, TiO₂ layers with a thickness of ~100 nm were synthesized by thermal ALD using titanium isopropoxide and water at a substrate temperature of 225 °C on macroporous and flat silicon substrates. It was found that an isotropic polycrystalline structure with the presence of the anatase phase was formed.

- For the first time, a three-oscillator layered model based on the generalized Tauc–Lorentz function was developed for the spectral ellipsometry range of 240–1000 nm. This model makes it possible to determine with high accuracy the thickness and optical constants of TiO₂ and ZnO films synthesized by ALD, taking into account the contribution of fundamental and defect-related energy states.

- For the first time, the dependence of phase transitions in TiO₂ layers synthesized by thermal ALD using titanium isopropoxide and water on their thickness was established. In particular, it was experimentally shown that layers up to 250 nm thick exhibit high thermal stability at temperatures up to 1000 °C.

- For the first time, in amorphous TiO₂ layers synthesized by thermal ALD, subsequent thermal treatment revealed processes of transition from the amorphous structure to anatase and rutile, densification of morphology, and formation of microcracks, as well as a reduction in the contribution of localized energy states in the optical absorption region and its shift toward longer wavelengths. At the same time, the values of the optical constants were found to be independent of the number of synthesis cycles.

Implementation of the research results. A utility model patent was obtained from the Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan (“Method for Obtaining a Coating from a Sensitive Material for Gas Sensors”, No. FAP 2698, November 18, 2024). The developed utility model provides for the use of TiO₂ films synthesized by the ALD method as a sensitive material for gas sensors.

The article “Morphology and Optical Characteristics of TiO₂ Nanofilms Grown by Atomic-Layer Deposition on a Macroporous Silicon Substrate” (Journal of Applied Spectroscopy, 2024, Vol. 91, No. 4, DOI: 10.1007/s10812-024-01783-z) was cited in a number of scientific publications, including Shengxi Jiao and Zhenqiu Gao, *Opt. Mater. Express* 15, (2025); Nedelin, S.V., Zolotovskii, N.A., Voronin, A.S. et al., *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 88, (2024); and A.A. Rakhimov, I.Kh. Khudaykulov, A.A. Ismatov, *East European Journal of Physics*, 3 (2025).

The results obtained from the synthesis of TiO₂ layers by thermal ALD using titanium isopropoxide and water, as well as from subsequent thermal treatment, which enabled a detailed characterization of structural changes and phase transition processes in the films, were implemented by LLC “SGD Systems” in 2024–2025 within the framework of the applied program “Special Implants for Medical Use” (Company certificate of LLC “SGD Systems” No. 20/08 dated August 20, 2025). The application of these scientific results made it possible to deposit biostable TiO₂ coatings on spinal implants, to apply TiO₂ onto the surface of 3D-printed implants in order to improve their biological compatibility with the human body, and also to enhance their mechanical strength, wear resistance, and mobility when replacing bone tissue.

Structure and volume of dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of 186 references, 61 figures, and 10 tables. The total volume is 120 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS
I bo'lim (часть I; part I)

1. T.K. Turdaliev, Optical performance and crystal structure of TiO₂ Thin film on glass substrate grown by atomic layer deposition, East European Journal of Physics, No 1, 2025, <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-1-27>
2. T.K. Turdaliev, R.Kh. Ashurov, Kh.Kh. Zokhidov, F.I. Abdurakhmanov, Kh.B. Ashurov, Growth and optical characterization of ZnO Films on macroporous silicon by ALD method; Applied Solar Energy, Vol. 60, No. 4 2024, <https://doi.org/10.3103/S0003701X24602448>
3. T.K. Turdaliev, Kh.B. Ashurov, R.Kh. Ashurov; Morphology and optical characteristics of TiO₂ nanofilms grown by atomic-layer deposition on a macroporous silicon substrate; Journal of Applied Spectroscopy, Vol. 91, No. 4, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10812-024-01783-z>
4. T.K. Turdaliev, Kh.Kh. Zokhidov, F.I. Abdurakhmanov, A.A. Rakhimov, Kh.B. Ashurov; Phase Transition During Heat Treatment in TiO₂ Films Prepared by Atomic Layer Deposition; «Physics of the Solid State», Vol. 66, No. 7, 2024, DOI: 10.61011/PSS.2024.07.58992.115
5. T.K. Турдалиев, Ф.И. Абдурахманов, К.К. Медведева, Х.Б. Ашуров; Кристаллическава структура и оптические свойства наноплёнок TiO₂, полученных методом атомно-слоевого осаждения на подложке из стекла; «Узбекский физический журнал» Vol. 27, No. 2, 2025, <https://doi.org/10.52304/.v27i2.588>
6. T.K. Turdaliev, Kh.Kh. Zokhidov, F.I. Abdurakhmanov, Z.Z. Eshonqulova; Atom qatlamlab cho'ktirish usuli bilan olingan TiO₂ yupqa qatlaming tuzilishi va optik yutish xususiyatlari; «Namangan davlat universiteti Ilmiy axborotnomasi» No. 5, 2025
7. T.K. Турдалиев, Х.Х. Зоҳидов, Р.Х. Ашуров; Исследование метода термального атомно-слоевого осаждения для создания функциональных покрытий TiO₂ на макропористой кремниевой подложке; «Узбекский физический журнал» Vol. 25, No. 3, 2023, <https://doi.org/10.52304/.v25i3.456>
8. T.K. Турдалиев, М.М. Адилов, Р.Х. Ашуров; Фотолюминесценция и спектры комбинационного рассеяния наноструктурированного пористого кремния; «Узбекский физический журнал» Vol. 25, No. 1, 2023, <https://doi.org/10.52304/.v25i1.403>
9. T.K. Turdaliev, X.B. Ashurov, F.I. Abdurakhmanov; “Gaz sensorlari uchun sezgir materialdan qoplamani olish usuli” № FAP 2698 07.04.2025

II bo'lim (часть II; part II)

10. T. Turdaliev, K. Medvedeva; Composite of Anatase and Porous Silicon Formed by ALD for Purification Applications; The 2025 Spring Meeting of the European Materials Research Society (E-MRS) Session F, Convention & Exhibition Centre of Strasbourg (France), 26 – 30 May, 2025.

11. T. Turdaliev, K. Medvedeva, M. Adilov; Nanostructured Anatase on Porous Silicon as a Functional Composite for Environmental Applications; The 2025 Spring Meeting of the European Materials Research Society (E-MRS) Session J, Convention & Exhibition Centre of Strasbourg (France), 26 – 30 May, 2025.
12. Т.К. Турдалиев, Х.Б. Ашуров, Р.Х. Ашуров; Применение метода атомно-слоевого осаждения в создании функциональных покрытий; PROCEEDINGS of the iv-international conference on integrated innovative development of zarafshan region: achievements, challenges and prospects dedicated to the 65th Anniversary of Navoi Mining and Metallurgical Company; 16-17 November, 2023. Navoi, Uzbekistan
13. Т.К. Турдалиев, Х.Б. Ашуров, Р.Х. Ашуров; Осаждение ZnO на Si подложку методом атомно-слоевого осаждения для фотоэлектрических приложений; Материалы II- международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и нанoeлектроники» Конференция посвящается 80-летию Академии наук Республики Узбекистан и памяти академика Т.М.Муминова Ташкент, 27-28 октября 2023 г.
14. Т.К. Турдалиев, Р.Х. Ашуров, Х.Х. Зоҳидов; Формирование тонких слоев TiO₂ на макропористом кремнии методом атомного слоевого осаждения; МАТЕРИАЛЫ Республиканской научно-практической конференции с участием зарубежных учёных «Проблемы и перспективы оптики и лазерной физики» Посвящается 80-летию образования Академии наук Республики Узбекистан 26 октября 2023 г.
15. Т.К. Турдалиев, Х.Б. Ашуров, Р.Х. Ашуров; Атомно-слоевое осаждение ZnO для формирования функциональных слоев в пористом кремнии; “Физика ва электрониканинг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани Б.Е.Умирзаковнинг 75 йиллик таваллудига бағ’ишланади Тошкент, 2023 йил, 3-4 ноябр
16. Т.К. Турдалиев, Х.Х. Зоҳидов, Х.Б. ашуров; Оптические свойства ультратонкой пленки ZnO, осажденной методом атомно-слоевого осаждения на кремниевой подложке; X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии — ЛаПлаз-2024» 26 марта — 29 марта 2024 года, Москва, НИУаУ МИФИ
17. T. Turdaliev, Kh. V. Ashurov; Photoluminescence of nanostructured porous silicon; 1st International Conference of Low-Dimensional Advanced Materials "ICLODAM-24", 18-22 February 2024, Tashkent, Uzbekistan
18. T. Turdaliev, Kh. V. Ashurov, F. I. Abdurakhmanov, Kh. Kh. Zokhidov; Raman spectrum analysis of TiO₂ deposited by thermal ald method on various substrates; 1st International Conference of Low-Dimensional Advanced Materials "ICLODAM-24", 18-22 February 2024, Tashkent, Uzbekistan
19. Т.К. Турдалиев, Х.Х. Зоҳидов, Ф.А. Абдурахманов, К.К. Медведева, Х.Б. Ашуров; Влияние термообработки на фазовый переход в плёнке диоксида титана, полученной методом атомно-слоевого осаждения; Девуатауа

международнауа конференциуа по физической электронике IPES-9 «3-4 октября 2024, Ташкент

20. Т.К. Турдалиев, Х.Х. Зохидов, Ф.А. Абдурахманов, К.К. Медведева, Х.Б. Ашуров; Анализ структурных и оптических характеристик плёнок диоксида титана, осаждённых методом атомно-слоевого осаждения на пористый кремний; "Девуатауа международнауа конференциуа по физической электронике IPES-9 «3-4 октября 2024, Ташкент

21. Т. К. Турдалиев, Х.Б.Ашуров, О.Л.Войтик, К.И.Делендик, Н.В.Колуаго, Л. Ю.Рощин, С.Е.Максимов, Р.Х.Ашуров; Синтез тонких пленок на поверхности пористого кремния; "Девуатауа международнауа конференциуа по физической электронике IPES-9 «3-4 октября 2024, Ташкент

22. Т.К. Турдалиев, С.Е. Максимов, Х.Б. Ашуров, О.Л. Войтик, К.И. Делендик, Н.В. Колуаго, Л. Ю.Рощин; Формирование медных и оксидных пленок на пористом кремнии «Современные проблемы физики, энергетики и теплотехники» 5 Декабря 2024, Самарканд

23. Т.К. Турдалиев, Ф.И. Абдурахманов, Х.Х. Зохидов, Х.Б. Ашуров; Фазовые переходы в пленках TiO_2 полученных методом атомно-слоевого осаждения и подвергнутых термической обработке «Современные проблемы физики, энергетики и теплотехники» 5 Декабря 2024, Самарканд

24. Т.К. Turdaliev, Z.Z. Eshonqulova; Atom-qatlamli cho'ktirish ususli yordamida olingan TiO_2 yuqqa qatlamining tuzilmasi va optik xossalari; Proceedings of International Conference «Fundamental and applied research in physics» May 16-17, 2025, Toshkent

