

NAMANGAN DAVLAT
UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-9]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427



01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

UO' K 621.793

ATOM QATLAMLAB O' STIRISH USULIDA OLINGAN TiO_2 QATLAMLARIDA KEYINGI TERMİK ISHLOV BERISH NATIJASIDAGI FAZAVIY O' TISHLAR

Turdaliyev Temur Kamilovich

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti katta ilmiy xodimi

ORCID: 0000-0002-0732-9357

E-mail: turdaliev@iplt.uz

Annotatsiya: Ushbu ishda kremniy taglikda atom qatlamlilik o' stirish (ALD) usuli yordamida olingan TiO_2 yupqa qatlamlarining termik ishlov berish jarayonidagi fazaviy o' zgarishlari tadqiq etildi. Turli harorat va vaqt rejimlarida termik ishlov berish natijasida TiO_2 qatlamlarining amorf holatdan kristall holatga o' tishi hamda anataz va rutil polimorf fazalarining shakllanishi o' rganildi. Qatlamlarning strukturasi va fazaviy tarkibi termik ishlov berishdan oldin va keyin kombinatsion sochilish spektroskopiyasi (Raman) va rentgen nurlari difraktsiyasi (XRD) usullari yordamida tahlil qilindi. Olingan natijalar termik ishlov berishdan oldin TiO_2 qatlamining amorf holatda ekanligini ko' rsatdi. 600 °C haroratda termik ishlov berish natijasida amorf TiO_2 dan anataz kristall fazasiga o' tish kuzatildi. Termik ishlov berish haroratining yanada oshirilishi bilan anataz fazasining rutil fazaga transformatsiyasi boshlanishi aniqlandi. 1000 °C haroratda 2–3 soat davomida termik ishlov berish natijasida TiO_2 qatlamida anatazdan rutilga to' liq fazaviy o' tish amalga oshishi aniqlandi.

Kalit so' zlar: TiO_2 , ALD, yupqa qatlam, termik ishlov berish, amorf faza, anataz, rutil, fazaviy o' tish, Raman spektroskopiyasi, rentgen difraktsiyasi.

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В СЛОЯХ TiO_2 , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ, В РЕЗУЛЬТАТЕ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация: В данной работе исследованы фазовые изменения тонких слоев TiO_2 , полученных на кремниевой подложке методом атомно-слоевого осаждения, в процессе термической обработки. Изучен переход слоев TiO_2 из аморфного состояния в кристаллическое, а также формирование полиморфных фаз анатаза и рутила при различных режимах температуры и продолжительности термической обработки. Структура и фазовый состав слоев до и после термической обработки анализировались методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (Raman) и рентгеновской дифракции. Полученные результаты показали, что до термической обработки слой TiO_2 находится в аморфном состоянии. При термической обработке при температуре 600 °C наблюдался переход аморфного TiO_2 в кристаллическую фазу анатаза. При дальнейшем повышении температуры термической обработки было установлено начало трансформации фазы анатаза в рutil. При термической обработке при температуре 1000 °C в течение 3 часов происходил полный фазовый переход TiO_2 из анатаза в рutil.

Ключевые слова: TiO_2 , ALD, тонкая пленка, термическая обработка, аморфная фаза, анатаз, рutil, фазовый переход, спектроскопия комбинационного рассеяния, рентгеновская дифракция.

PHASE TRANSITIONS IN TiO_2 LAYERS OBTAINED BY ATOMIC LAYER DEPOSITION DURING THERMAL TREATMENT

Abstract: This study investigates the phase transformations of TiO_2 thin films deposited on a silicon substrate by atomic layer deposition (ALD) during subsequent thermal treatment. The transition of TiO_2 films from an amorphous to a crystalline state, as well as the formation of the anatase and rutile polymorphic phases, was studied under different thermal treatment temperatures and durations. The structure and phase composition of the films before and after thermal treatment were analyzed using Raman spectroscopy and X-ray diffraction (XRD). The obtained results showed that the TiO_2 film was in an amorphous state before thermal treatment. Thermal treatment at 600 °C resulted in the transformation of amorphous TiO_2 into the crystalline anatase phase. With a further increase in the thermal treatment temperature, the onset of the transformation of the anatase phase into the rutile phase was observed. Complete transformation of TiO_2 from anatase to rutile was achieved after thermal treatment at 1000 °C for 3 hours.

Keywords: TiO_2 , ALD, thin film, thermal treatment, amorphous phase, anatase, rutile, phase transition, Raman spectroscopy, X-ray diffraction.

Kirish

TiO₂ bir nechta polimorf shakllarda mavjud bo'lib, ularga barqaror rutil fazasi, shuningdek metastabil amorf faza, anataz va brukit fazalari kiradi [1,2]. Rutil va anataz turli fazaviy guruhlariga mansub tetragonal kristall tuzilishga ega [3-5]. TiO₂ ning barcha fazalari kristall tuzilishdagi farqlar tufayli turlicha elektr va strukturaviy xossalarni namoyon qilishi mumkin [2,6,7]. Turli kristall tuzilishga ega bo'lgan TiO₂ namunalari turli sohalarda qo'llanilishi mumkin. Jumladan, tibbiyot [8,9], fotokataliz [10,11], fotoelektrika [1,12], shuningdek mikro- va nanoelektronika sohaslarida [13,14] keng qo'llaniladi.

TiO₂ yupqa qatlamlarini olishning bir nechta usullari mavjud bo'lib, ular qatoriga zol-gel usuli [15], reaktiv magnetron purkash [2], solvotermal sintez [6], termik oksidlash [16], atom qatlamlilik o'qirish (ALD) [7] va boshqa usullar kiradi. Sintez sharoitlari va qo'llaniladigan usullarga qarab, olingan TiO₂ turli xil morfologiyaga ega bo'lishi mumkin: nanozarrachalardan [17] nanoquvurlar [18] yoki nanosterjenlargacha [19].

TiO₂ da anataz fazasidan rutil fazasiga o'tishga ta'sir qiluvchi parametrlarni o'rganish gaz sensorlari va gazlarni ajratish uchun mo'ljallangan g'ovak membranalar kabi turli yuqori haroratli jarayonlar va qurilmalar uchun muhim ahamiyatga ega [20]. Ushbu fazaviy o'tish qurilmalarning xossalari va ishlash samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. TiO₂ polimorf fazalarining barqarorligi, fazaviy o'tish kinetikasi hamda ushbu jarayonga ta'sir qiluvchi omillarni tushunish zaruriy mikrotuzilmalarni shakllantirishda muhim ahamiyat kasb etadi. Mazkur jihatlar qurilmalarning uzoq muddatli ishlash barqarorligini ta'minlashda muhim hisoblanadi.

Ushbu tadqiqotning maqsadi kremniy taglikda ALD usuli yordamida TiO₂ yupqa qatlamini olish va turli termik ishlov berish rejimlarida uning amorf holatdan anataz fazasiga, keyin esa rutil fazasiga o'tish jarayonini o'rganishdan iborat.

Tadqiqod metodologiyasi

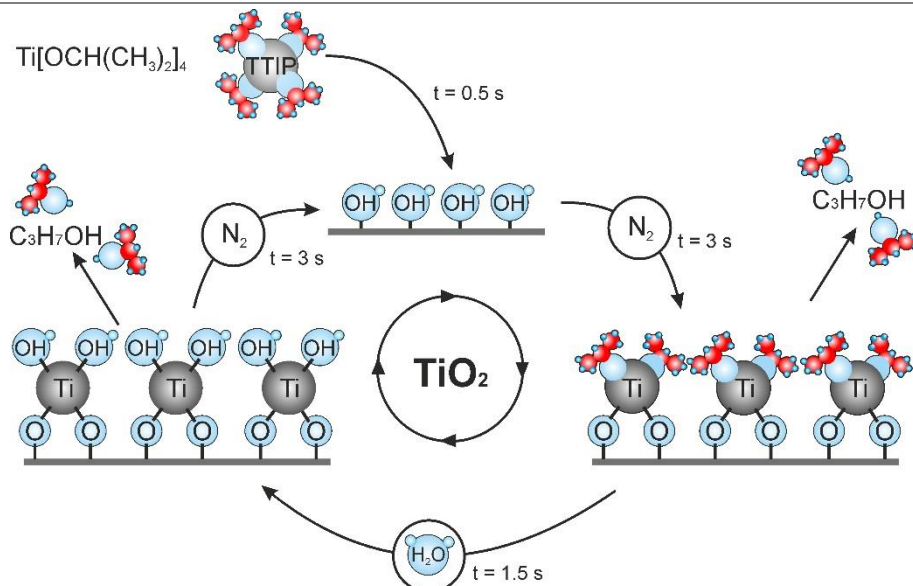
TiO₂ oldindan tayyorlangan Si(100) kremniy taglikka SENTECH Instruments GmbH kompaniyasining SI PEALD qurilmasida termik ALD usuli yordamida o'qirildi. ALD usuli gaz fazasida yupqa qatlamlarni olishga asoslangan kimyoviy jarayon bo'lib, u yuzada navbatma-navbat kechadigan va to'yinish xususiyatiga ega bo'lgan reaksiyalardan tashkil topadi. Ushbu xususiyat ALD usuliga turli xil materiallar yuzasida aniq qalinlikdagi va konform qoplamalarni hosil qilish imkonini beradi. Usulning asosiy mexanizmlari kimyoviy to'yinish va yuzadagi ketma-ket kimyoviy reaksiyalardan iborat. ALD usulining asosiy afzalliklaridan biri murakkab geometriyaga ega bo'lgan yuzalarda qatlam qalinligi va uning xususiyatlarini atom darajasida nazorat qilish imkoniyatidir. Bu mazkur usulning muhim ustunliklaridan biri hisoblanadi [21].

Prekursor sifatida titanizopropoksid (TTIP, Ti[OCH(CH₃)₂]₄) va suv (H₂O) ishlatildi. Gaz tashuvchi sifatida azot (N₂) qo'llanilib, uning oqim tezligi 120 sm³/min ni tashkil etdi. Reaktor ichidagi bosim ≈60 Pa darajasida ushlab turildi, taglik harorati esa ≈200°C ga teng belgilandi.

O'qirish jarayoni 7500 ALD siklini o'z ichiga olgan bo'lib, amalga oshirildi. Har bir ALD siklining davomiyligi 8 soniya bo'lib, u to'rtta ketma-ket bosqichni o'z ichiga oladi (Rasm 1).

Birinchi bosqichda 0,5 soniya davomida TTIP gazi reaktorga yuboriladi. Taglik yuzasiga adsorbsiyalanmagan TTIP molekulalari chiqarib tashlanadi, natijada yuzada izopropoksid gruppalar (-OCH(CH₃)₂) bilan bog'langan titan atomlari qoladi. Ushbu koordinatsion to'yinmagan titan birikmalari keyingi reaksiya bosqichi uchun faol markazlar bo'lib xizmat qiladi.

Ikkinchi bosqichda 3 soniya davomida reaksiya kamerasining azot bilan tozalanishi amalga oshiriladi. Bu jarayonda taglik yuzasiga adsorbsiyalanmagan TTIP molekulalari va reaksiya natijasida hosil bo'lgan qo'shimcha mahsulotlar, jumladan, TTIP parchalanishi natijasida ajralib chiqqan izopropanol guruhlari olib tashlanadi.



1 – rasm: ALD jarayoni sxemasi

Uchinchi bosqichda 1,5 soniya davomida reaktorga H_2O yuboriladi. H_2O molekulalari adsorbsiyalangan titan birikmalari bilan reaksiyaga kirishib, $-\text{OCH}(\text{CH}_3)_2$ guruhlarining gidroliziga va ularning gidroksil ($-\text{OH}$) guruhlari bilan almashinuviga olib keladi. Hosil bo'lgan $-\text{OH}$ guruhlari keyingi TTIP cho'ktirish sikli uchun faol markazlar bo'lib xizmat qiladi.

Yakuniy bosqichda 3 soniya davomida reaksiya kamerasining azot bilan tozalanishi amalga oshiriladi. Natijada gidroliz reaksiyasi davomida hosil bo'lgan uchuvchi qo'shimcha mahsulotlar, jumladan izopropanol ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) va suv bug'larini olib tashlanadi.

Ushbu bosqichlarning ketma-ket almashinishi TiO_2 yupqa qatlamining qatlamma-qatlam o'sishiga va uning qalinligini yuqori aniqlikda nazorat qilish imkonini beradi. Keltirilgan parametrlar asosida TiO_2 qatlamining o'sish tezligi har bir ALD sikli uchun 0,2 nm ni tashkil etdi. Natijada, 7500 ta ALD siklini amalga oshirish orqali qalinligi 1,5 mkm bo'lgan TiO_2 qatlami olindi.

Olingan TiO_2 qatlamlariga termik ishlov berish atmosfera bosimida havo muhitida SNOL mufel pechida amalga oshirildi. Termik ishlov berish 600 va 1000 °C haroratlarda olib borildi. Har bir tanlangan haroratda namunalari 1, 2 va 3 soat davomida ushlab turildi. Shu tariqa, har bir harorat uchun turli davomiylikdagi termik ishlov berish rejimlari qo'llanilib, harorat va ushlab turish vaqtining TiO_2 qatlamlarining fazaviy tarkibiga ta'siri o'rganildi.

Olingan namunalarning morfologik va strukturaviy xususiyatlari bir qator analitik usullar yordamida o'rganildi. Namunalarning sirt holati optik mikroskop yordamida 50× va 100× kattalashtirishda tadqiq qilindi.

Namunalarning strukturasi va fazaviy tarkibini o'rganish Raman usulida amalga oshirildi. Tadqiqotlar Buyuk Britaniyaning "Renishaw" kompaniyasi tomonidan ishlab chiqarilgan InVia Raman spektrometri yordamida bajarildi. Raman spektrlari to'liq uzunligi 532 nm bo'lgan RL532C100 modeli lazer manbasi yordamida qayd etildi. O'lchashlarda 100× obyektiv, 100 mVt nominal quvvatga ega lazer nurlanishining 1 mVt quvvati, 100–800 cm^{-1} to'liq sonlari diapazoni va 1800 chiziqlik/mm zichlikdagi difraksiyon panjara qo'llanildi. O'lchashlar xona haroratida (~25 °C) amalga oshirildi.

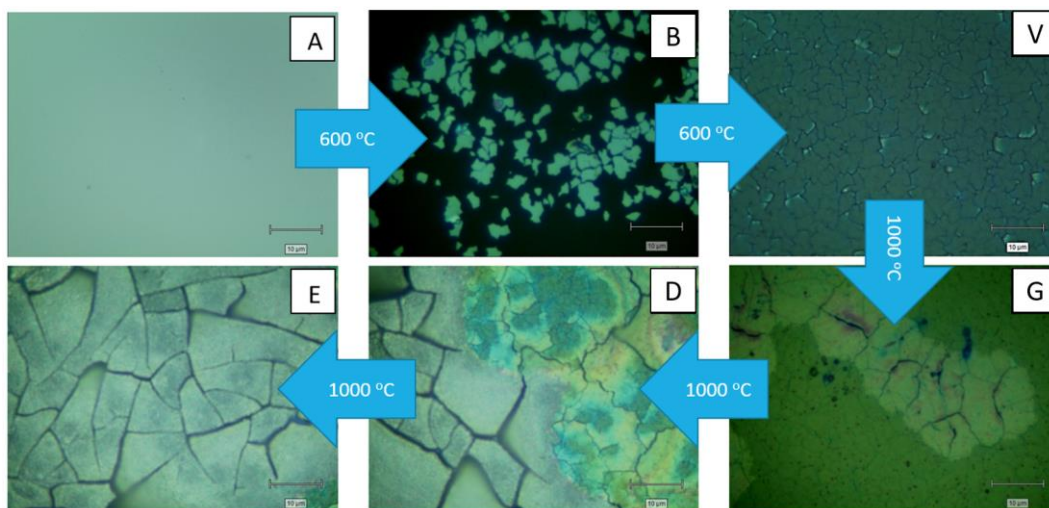
Namunalarning kristall tuzilishi va fazaviy tarkibi Rigaku SmartLab (Yaponiya) rentgen difraktometri yordamida XRD usulida o'rganildi. Rentgen nurlanish manbasi sifatida to'liq uzunligi $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ bo'lgan Cu K α nurlanishidan foydalanildi. Rentgen trubkasining ishlash parametrlari 40 kV va 50 mA ni tashkil etdi. Difraksiyon tasvirlar Bragg–Brentano geometriyasida D/teX Ultra 250 detektor yordamida qayd etildi. Skanerlash tezligi 5,00°/min, qadam 0,01° bo'lib, o'lchashlar $2\theta = 5\text{--}80^\circ$ diapazonida amalga oshirildi. Olingan difraktogrammlar asosida TiO_2 qatlamlarining kristall fazaviy tarkibi va termik ishlov berish natijasidagi fazaviy o'zgarishlar tahlil qilindi.

Tahlillar va natijalar

TiO_2 qatlamlarida amorf holatdan anataz fazasiga, keyin esa anatazdan rutil fazaga o'tish jarayonlari bir zumda sodir bo'lmaydi, balki muayyan harorat va vaqt oralig'ida kechadi. Ayniqsa, anatazdan rutil fazaga o'tish rekonstruktiv jarayon bo'lganligi sababli, uning kinetikasi vaqtga bog'liq [20]. Shuning uchun fazaviy o'tish kinetikasini zarur harorat va vaqt sharoitlariga ta'sir qiluvchi barcha omillarni hisobga olgan holda talqin qilish lozim. Legirlanmagan anataz uchun ushbu omillar qatoriga zarrachalarning o'lchami va shakli, namuna hajmi, qizdirish tezligi, ushlab turish davomiyligi va boshqa parametrlarni kiritish mumkin. [22]-ishda molekulyar-dinamik modellashirish usuli yordamida sof anatazdan rutil fazaga fazaviy o'tish 627–927 °C harorat oralig'ida sodir bo'lishi aniqlangan.

200 °C haroratda ALD usulida sintez qilingan amorf TiO_2 qatlamlariga 600 va 1000 °C haroratlarda termik ishlov berilgandan keyin yuz morfologiyasida yuz bergan o'zgarishlar optik mikroskopiya usuli yordamida o'rganildi. 2-rasmda termik ishlov berishdan oldingi va keyingi TiO_2 qatlamlarining optik mikroskopiya tasvirlari keltirilgan.

Amorf qatlama 600 °C dagi ishlov natijasida qayd etilgan 2 – rasmning A,B,V tasvirlarida, kristall shakllanish jarayonining boshlanishi aniq kuzatiladi. Chapdagi (A) tasvirda toza amorf yuz bo'lib, hech qanday kristallik struktura belgilari ko'rinmaydi. Bu holat sintezdan so'nggi holatni anglatadi. Markazdagi (B) tasvirda esa kristallashuv markazlari yorug'likni intensiv sochayotgan yirik donachalar ko'rinishida namoyon bo'ladi. Bu markazlar yuz bo'ylab bir maromda tarqalmagan bo'lib, hosil bo'lgandan so'ng kengaya boradi. Kristall anataz fazasi zichligi amorfga nisbatan yuqori bo'lganligi sabab qayta kristallashish jarayoni tugagach sirt morfologiyasi yoriq tirqishlar bilan qoplanganini (V) tasvirda ko'rish mumkin.



2 – rasm: 200 °C haroratda ALD usulida sintez qilingan TiO_2 qatlamlarining termik ishlov berishdan oldin hamda 600 va 1000 °C haroratlarda termik ishlov berilgandan keyingi optik mikroskopiya tasvirlari.

Keyingi termik ishlov berish natijasida yuz beradigan mikrostrukturaviy o'zgarishlar 2 - rasmning G, D va E tasvirlarida o'z aksini topgan. 1000 °C dagi ishlovda fazaviy o'tish to'liq amalga oshadi va rutil kristallik strukturasi hosil bo'ladi. (G) tasvirda yuzadagi katta strukturali donachalar va ular orasidagi keng yoriqlar ko'rinadi. Bu holat yuqori harorat ta'siridagi termik stress natijasida paydo bo'lgan mikroyoriqlarni anglatadi. Bu jarayon, xususan, kristallik fazaning zichligi, termik kengayish koeffitsiyenti va taglik bilan adgeziyasi o'rtasidagi farqlar natijasida ro'y beradi. (D) tasvirda rutil faza o'tish jarayoni davomida qanday shakllanayotgani ko'rinadi. (E) tasvirda esa to'liq rutilga aylangan qatlamning barqaror, poligonal shakldagi yirik kristall donachalari ko'zga tashlanadi. Ular o'zaro tutashgan, chekkalari aniq, bu strukturadagi fazaviy tartib va yuqori darajadagi kristallashuvni tasdiqlaydi.

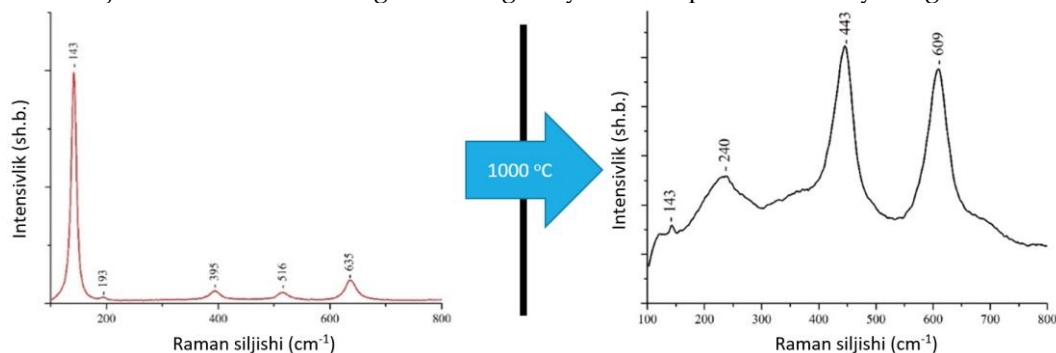
Kristall shakllanish jarayoni, termik ishlov paytida birdaniga butun qatlam bo'ylab emas, balki qayta kristallashish markazlari shakllanishi orqali amalga oshadi. Bu markazlar avvalo energetik faol nuqtalarda paydo bo'ladi. Ushbu nuqtalarda anataz fazasiga xos kristall zarrachalari shakllanadi va ular atrofidagi amorf sohaga bosim va harorat ta'sirida asta-sekin kengayadi. Bu jarayon qayta kristallashish frontining radial yo'nalishda kengayishi orqali kechadi. Front o'sishi bilan bog'liq ravishda kristall tuzilmasi tarqalib boradi va avval shakllangan mikrodonachalar birlashib, bir maromda o'sgan kristall tuzilmalarni hosil qiladi.

Yuqoridagi optik mikroskopiya tasvirlarida kuzatilgan morfologik o'zgarishlar Raman spektroskopiyasi va XRD tahlillari natijalari bilan tasdiqlandi. TiO_2 ning anataz va rutil fazalari tetragonal kristall tuzilishga ega bo'lgan polimorf shakllar hisoblanadi. Ushbu fazalar turli kristall simmetriya va atomlarning o'zaro joylashish tartibi bilan farqlanadi. Anataz fazasi $I4_1/amd$ fazaviy guruhiga, rutil fazasi esa $P4_2/mnm$ fazaviy guruhiga mansub. Anataz va rutil fazalarida Ti atomlari kislorod atomlari bilan oktaedrik koordinatsiyada joylashgan bo'lib, oktaedrlarning o'zaro bog'lanish tartibi va kristall panjara zichligi ularning turli struktur va energetik xususiyatlarini belgilaydi.

Anataz fazasining Raman spektrida bir qator xarakterli tebranish modalari kuzatiladi. Ular orasida taxminan 144, 197, 394, 516 va 639 cm^{-1} sohalarida joylashgan cho'qqilar anataz fazasiga xos bo'lib, mos ravishda Eg, Eg, B1g, A1g va Eg simmetriyalı tebranish modalari bilan bog'liq [4,23,24]. Rutil fazasida esa taxminan 143, 240, 447 va 610 cm^{-1} sohalarida Raman-aktiv tebranish modalari kuzatiladi. Shu sababli Raman spektrida anatazga xos cho'qqilarning yo'qolishi va rutilga xos cho'qqilarning paydo bo'lishi TiO_2 qatlamida fazaviy transformatsiya sodir bo'lganligini aniqlash imkonini beradi. 3-rasmda TiO_2 qatlamlarining termik ishlov berishdan keyingi Raman spektrlari keltirilgan. 600 °C haroratda termik

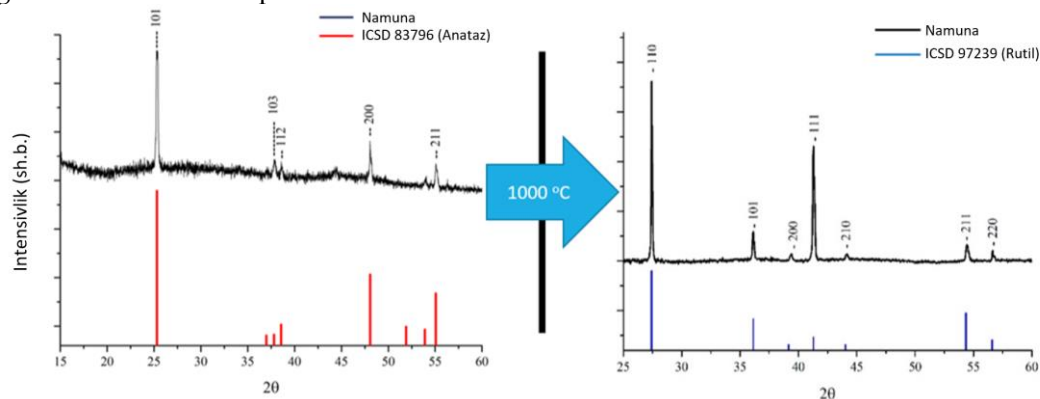
ishlov berilgan namuna spektrida 143, 193, 395, 516 va 635 cm^{-1} atrofidagi xarakterli cho'qqilar kuzatilib, ular TiO_2 ning anataz fazasiga mos keladi [4,23,24]. Bu natija 600 $^{\circ}\text{C}$ haroratda dastlab amorf holatda bo'lgan TiO_2 qatlamining kristallanib, anataz fazasi shakllanganligini ko'rsatadi.

1000 $^{\circ}\text{C}$ haroratda 3 soat davomida termik ishlov berilgandan keyin Raman spektri sezilarli darajada o'zgaradi. Bunda 143, 240, 443 va 609 cm^{-1} sohalarida rutil fazasiga xos xarakterli cho'qqilar qayd etildi [4,24]. Shu bilan birga, anataz fazasiga xos bo'lgan 193, 395, 516 va 635 cm^{-1} atrofidagi cho'qqilarning yo'qolishi kuzatildi. Olingan natijalar 1000 $^{\circ}\text{C}$ da termik ishlov berish natijasida anataz fazasining rutil fazaga deyarli to'liq transformatsiyalanganini ko'rsatadi.



3-rasm. TiO_2 qatlamlarining 600 $^{\circ}\text{C}$ da termik ishlov berilgandan keyingi (chapda) va 1000 $^{\circ}\text{C}$ da 3 soat davomida termik ishlov berilgandan keyingi (o'ngda) Raman spektrlari.

Raman spektroskopiyasi natijalari XRD tahlili bilan ham tasdiqlandi. 4-rasmda TiO_2 qatlamlarining termik ishlov berishdan oldingi va 1000 $^{\circ}\text{C}$ da 3 soat davomida termik ishlov berilgandan keyingi rentgen difraktogrammlar taqqoslangan. 600 $^{\circ}\text{C}$ da termik ishlov berilgandan keyin $2\theta = 25,3^{\circ}, 37,8^{\circ}, 48,0^{\circ}, 54,0^{\circ}$ va $55,1^{\circ}$ atrofidagi difraksion maksimumlar kuzatildi. Ushbu maksimumlar mos ravishda anataz fazasining (101), (103), (112), (200) va (211) kristallografik tekisliklariga tegishli bo'lib, TiO_2 qatlamida anataz fazasi mavjudligini tasdiqlaydi [3,7,20]. 1000 $^{\circ}\text{C}$ haroratda 3 soat davomida termik ishlov berilgandan keyin difraktogrammada anataz fazasiga xos maksimumlar o'rniga rutil fazasiga tegishli difraksion chiziqlar shakllandi.



4-rasm. TiO_2 qatlamlarining 600 $^{\circ}\text{C}$ da termik ishlov berilgandan keyingi (chapda) va 1000 $^{\circ}\text{C}$ da 3 soat davomida termik ishlov berilgandan keyingi (o'ngda) XRD tahlili.

Jumladan, rutil fazasining (110), (101), (200), (111), (210), (211) va (220) kristallografik tekisliklariga mos keluvchi maksimumlar aniq qayd etildi. Olingan natijalar TiO_2 qatlamida anatazdan rutilga fazaviy o'tish amalga oshganligini ko'rsatadi. Raman va XRD tahlillarining natijalari bir-birini to'ldirib, TiO_2 qatlamlarida termik ishlov berish natijasida ketma-ket fazaviy o'zgarishlar sodir bo'lishini ko'rsatadi. Dastlab 200 $^{\circ}\text{C}$ da ALD usulida olingan TiO_2 qatlami amorf holatda bo'ladi. 600 $^{\circ}\text{C}$ da termik ishlov berish natijasida amorf qatlam kristallanib, anataz fazasi shakllanadi. Haroratning yanada oshirilishi anataz fazasining barqarorligini pasaytirib, uning rutil fazaga transformatsiyalanishi uchun sharoit yaratadi. 1000 $^{\circ}\text{C}$ da 3 soat davomida termik ishlov berish natijasida anataz fazasiga xos Raman va XRD signallarining yo'qolishi hamda rutil fazasiga xos signallarning shakllanishi anataz-rutil fazaviy o'tishining deyarli to'liq amalga oshganini ko'rsatadi.

Xulosa

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, ALD usulida 200 $^{\circ}\text{C}$ haroratda olingan TiO_2 yupqa qatlamlari dastlab amorf va bir tekis sirt morfologiyasiga ega bo'ladi. Termik ishlov berish natijasida ushbu qatlamlarning strukturasi va morfologiyasi bosqichma-bosqich o'zgaradi. 600 $^{\circ}\text{C}$ haroratda amorf TiO_2 qatlamining kristallanishi va anataz fazasining

shakllanishi, haroratning 1000 °C gacha oshirilishi natijasida esa anataz fazasining rutil fazasiga transformatsiyasi kuzatildi.

Raman spektroskopiyasi va XRD natijalari fazaviy o' tishning birdaniga sodir bo' lmasligini, balki harorat va termik ishlov berish davomiyligiga bog' liq holda bosqichma-bosqich kechishini ko' rsatdi. 1000 °C da 3 soat davomida termik ishlov berilganda anataz fazasiga xos signallarning yo' qolishi va rutil fazasiga xos signallarning shakllanishi anataz → rutil o' tishining deyarli to' liq amalga oshirishini ko' rsatdi. Bu holat TiO₂ ning yuqori harorat ta'sirida fazaviy jihatdan o' zgarishi uchun ma'lum vaqt talab qilinishini ko' rsatadi. Shuning uchun TiO₂ ni yuqori haroratli muhitda ishlaydigan funksional qatlam, xususan katalitik material sifatida qo' llashda, uning fazaviy barqarorligini va ishlash haroratini hisobga olish muhimdir. Yuqori harorat ta'sirida fazaviy o' tish bir zumda emas, balki vaqt davomida asta-sekin sodir bo' lishi sababli, materialning dastlabki fazaviy holati vaqt o' tishi bilan o' zgarishi mumkin.

Optik mikroskopiya natijalari fazaviy o' zgarishlar bilan birga TiO₂ qatlamlarining sirt morfologiyasi ham sezilarli ravishda o' zgarishini ko' rsatdi. Dastlabki amorf qatlamning nisbatan bir tekis sirt tuzilishidan farqli ravishda, kristallanish va keyingi fazaviy transformatsiya jarayonida sirtning zichlashishi hamda yirikroq strukturaviy elementlarning shakllanishi kuzatildi. Ayniqsa, yuqori haroratda rutil fazasining shakllanishi bilan qatlamning yanada zichlashgani va sirt morfologiyasida mikroyo' riqlar paydo bo' lgani aniqlandi. Ushbu o' zgarishlar fazaviy qayta tashkil topish jarayonida qatlam strukturasi o' zgarishi bilan bog' liq bo' lib, termik ishlov berish natijasida amorf qatlamdan kristall holatga o' tish va keyinchalik rutil fazasining shakllanishi qatlamning morfologik holatiga bevosita ta'sir qilishini ko' rsatadi.

Olingan natijalar TiO₂ qatlamlarining fazaviy holatini termik ishlov berish harorati va davomiyligi orqali boshqarish mumkinligini ko' rsatadi. Shu bilan birga, yuqori haroratda ishlatiladigan TiO₂ qatlamlarida fazaviy transformatsiya va zichlashish jarayonlari materialning dastlabki xossalari o' zgartirishi mumkinligi aniqlandi. Demak, TiO₂ qatlamini ma'lum funksional vazifa, jumladan katalitik qo' llanilish uchun tanlashda nafaqat uning boshlang' ich fazasini, balki ish harorati va shu haroratda bo' lish vaqtini ham hisobga olish zarur.

Mualliflar hissasi, manfaatlar to' qnashuvi va moliyalashtirish

Mualliflar hissasi: barcha mualliflar tadqiqot konsepsiyasi, ma'lumotlarni tahlil qilish va maqola matnini tayyorlashda teng hissa qo' shgan. Manfaatlar to' qnashuvi: mualliflar manfaatlar to' qnashuvi yo' qligini bildiradi. Moliyalashtirish: tadqiqot № IL-5421101842 ilmiy loyihasi doirasida moliyaviy qo' llab-quvvatlangan.

Foydalanilgan adabiyotlar

- [1] Hmoud. Al-Dmour. Capacitance response of solar cells based on amorphous Titanium dioxide (A-TiO₂) semiconducting heterojunctions[J]. AIMS Materials Science, 2021, 8(2): 261-270. doi: 10.3934/matricsci.2021017
- [2] В.М. Иевлев, С.Б. Куцев, А.Н. Латышев, Л.Ю. Леонова, О.В. Овчинников, М.С. Смирнов, Е.В. Попова, А.В. Костюченко, С.А. Солдатенко. Спектры поглощения тонких пленок TiO₂, синтезированных реактивным высокочастотным магнетронным распылением титана. Физика и техника полупроводников, 48(7) (2014).
- [3] Jia, J., Yamamoto, H., Okajima, T. et al. On the Crystal Structural Control of Sputtered TiO₂ Thin Films. Nanoscale Res Lett 11, 324 (2016). <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1531-5>
- [4] T. Sekiya, S. Ohta, S. Kamei, M. Hanakawa, S. Kurita. Raman spectroscopy and phase transition of anatase TiO₂ under high pressure. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 62(4), 717–721 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0022-3697\(00\)00229-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3697(00)00229-8)
- [5] J. Li, S. Meng, L. Qin, H. Lu. Optical properties of anatase and rutile TiO₂ studied by GGA + U. Chinese Physics B, 26(8), 087101 (2017). <https://doi.org/10.1088/1674-1056/26/8/087101>
- [6] S. R. de Lazaro, R. A. P. Ribeiro, L. H. da S. Lacerda, 'Quantum Chemistry Applied to Photocatalysis with TiO₂', Titanium Dioxide. InTech, ISBN 978-953-51-3414-5 (2017) 221-222, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69054>
- [7] Shi, YJ., Zhang, RJ., Zheng, H. et al. Optical Constants and Band Gap Evolution with Phase Transition in Sub-20-nm-Thick TiO₂ Films Prepared by ALD. Nanoscale Res Lett 12, 243 (2017). <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2011-2>
- [8] E.A. Abdulhameed, N.H. Al-Rawi, M. Omar, N. Khalifa, A.B.R. Samsudin, Titanium dioxide dental implants surfaces related oxidative stress in bone remodeling: a systematic review, PeerJ 10 (2022) 12951, <https://doi.org/10.7717/peerj.12951>
- [9] De Pasquale I, Lo Porto C, Dell'Edera M, Petronella F, Agostiano A, Curri ML, Comparelli R. Photocatalytic TiO₂-Based Nanostructured Materials for Microbial Inactivation. Catalysts. 2020; 10(12):1382. <https://doi.org/10.3390/catal10121382>
- [10] А.А. Гончаров, А.Н. Добровольский, Е.Г. Костин, И.С. Петрик, Е.К. Фролова. Оптические, структурные и фотокаталитические свойства наноразмерных пленок диоксида титана, осажденных в плазме магнетронного разряда. Журнал технической физики, 84(6) (2014)

11. [11] N. Shehzad, M. Tahir, K. Johari, T. Murugesan, M. Hussain. A critical review on TiO₂ based photocatalytic CO₂ reduction system: Strategies to improve efficiency. *Journal of CO₂ Utilization*, 26, 98–122 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.04.026>
12. [12] Erdem Cuce, Pinar Mert Cuce, Saffa Riffat, TiO₂ nano-coated thin film PV glazing with superior thermal resistance, self-cleaning, electricity generation and adaptive optical control, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 17, 2022, Pages 130–139, <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab080>
13. [13] A. Garzon-Roman, C. Zuñiga-Islas, D.H. Cuate-Gomez, A. Heredia-Jimenez. TiO₂/porous silicon heterostructures formation by simple and low-cost methods for electronics applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 349, 114064 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.114064>
14. [14] E.A. Nunes Simonetti, T. Cardoso de Oliveira, Á.E. do Carmo Machado, A.A. Coutinho Silva, A. Silva dos Santos, L. de Simone Cividanes. TiO₂ as a gas sensor: The novel carbon structures and noble metals as new elements for enhancing sensitivity – A review. *Ceramics International*, 47(13), 17844–17876 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.189>
15. [15] Liang Y, Sun S, Deng T, Ding H, Chen W, Chen Y. The Preparation of TiO₂ Film by the Sol-Gel Method and Evaluation of Its Self-Cleaning Property. *Materials*. 2018; 11(3):450. <https://doi.org/10.3390/ma11030450>
16. [16] Исаханов, З., Косимов, И., Ахунов, Ш., Халматов, А., Абдуваитов, А., Ташмухамедова, Д., & Умирзаков, Б. (2023). Изменение состава и электронной структуры поверхности Ti при термическом окислении и имплантации ионов O₂⁺. «Узбекский физический журнал», 25(2).
17. [17] J. Roy. The synthesis and applications of TiO₂ nanoparticles derived from phytochemical sources. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 106, 1–19 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.10.024>
18. [18] A.A. Сушникова, A.A. Валеева, И.Б. Дорошева, A.A. Ремпель. Фазовый переход первого рода в нанотубулярном диоксиде титана. *Физика твердого тела*, 63(12) (2021).
19. [19] J. Jitputti, Y. Suzuki, S. Yoshikawa. Synthesis of TiO₂ nanowires and their photocatalytic activity for hydrogen evolution. *Catalysis Communications*, 9(6), 1265–1271 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2007.11.016>
20. [20] Hanaor, D.A.H., Sorrell, C.C. Review of the anatase to rutile phase transformation. *J Mater Sci* 46, 855–874 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10853-010-5113-0>
21. [21] Onn TM, Küngas R, Fornasiero P, Huang K, Gorte RJ. Atomic Layer Deposition on Porous Materials: Problems with Conventional Approaches to Catalyst and Fuel Cell Electrode Preparation. *Inorganics*. 2018; 6(1):34. <https://doi.org/10.3390/inorganics6010034>
22. [22] Radhi, A., Iacobellis, V. & Behdian, K. Parametric crystalline characterization of Anatase/Rutile polymorphic ceramic. *Appl. Phys. A* 129, 295 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06562-9>
23. [23] W.F. Zhang, Y.L. He, M.S. Zhang, Z. Yin, Q. Chen. Raman scattering study on anatase TiO₂ nanocrystals. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33(8), 912–916 (2000). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/8/305>
24. [24] Maftei AE, Buzatu A, Damian G, Buzgar N, Dill HG, Apopei AI. Micro-Raman—A Tool for the Heavy Mineral Analysis of Gold Placer-Type Deposits (Pianu Valley, Romania). *Minerals*. 2020; 10(11):988. <https://doi.org/10.3390/min10110988>