

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



02.00.00-KIMYO FANLARI
journal.namdu.uz
CHEMICAL SCIENCES

UDK:546.824-31:544.723.212:544.526.5

TiO₂/SiO₂ NANOKOMPOZITINING OLINISHI VA FIZIK-KIMYOVIY XUSUSIYATLARI

Nurullayev Fozil Ziyodulloyevich

Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti tadqiqotchisi

ORCID:0009-0005-2771-0349

fozilnurullayev1996@gmail.com

Ro' zimuradov Olim Narbekovich

ORCID:0000-0002-9186-9080

o.ruzimuradov@new.polito.uz

Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti professori

Boyqobilov Dilshod Baxriddinovich

Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti katta o' qituvchisi

ORCID:0009-0004-5523-0898

dilshodkimyo1988@gmail.com

Musayev Husniddin Baxtyorovich

"TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti tadqiqotchisi

ORCID:0000-0003-4290-0827

musaevkhusniddin90@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu tadqiqotda TiO₂/SiO₂ nanokompoziti sol-gel usuli yordamida sintez qilindi. Sintez jarayonida TiO₂ va SiO₂ kabi hosil qiluvchi prekursorlardan foydalanilib, nanokompozit materialini olish sharoitlari o' rganildi. Olingan namunalarning morfologik va strukturaviy xususiyatlari skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM), rentgen difraksiyasi (XRD), infraqizil spektroskopiyasi (FTIR) va Raman spektroskopiyasi yordamida o' rganildi va tahlil qilindi. XRD tahlili natijasida TiO₂ ning kristall anataz fazasi shakllangani, SiO₂ esa amorf holatda mavjudligi aniqlandi. FTIR va Raman spektroskopiyasi natijalari TiO₂ va SiO₂ tarkibiga xos tebranish modlarining mavjudligini ko' rsatdi. SEM tahlili orqali sintez qilingan nanokompozitining morfologik xususiyatlari o' rganildi. Olingan natijalar TiO₂ ning anataz fazasi va SiO₂ ning amorf tuzilishga ega bo' lgan TiO₂/SiO₂ nanokompozitini hosil qilganligini tasdiqladi. Aniqlangan strukturaviy xususiyatlar ushbu nanokompozitining fotokatalitik material sifatida kelgusida tadqiq etish uchun istiqbolli ekanligini ko' rsatadi.

Kalit so' zlar: sol-gel, TiO₂/SiO₂, nanokompozit, taqiqlangan energiya sohasi, SEM, Raman spektroskopiyasi.

ПОЛУЧЕНИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТА TiO₂/SiO₂

Аннотация: В данном исследовании наноконкомпозит TiO₂/SiO₂ был синтезирован золь-гель методом. В процессе синтеза использовались прекурсоры, формирующие TiO₂ и SiO₂, а также исследовались условия получения наноконкомпозитного материала. Морфологические и структурные свойства полученных образцов были исследованы и проанализированы с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгенофазового анализа (РФА), ИК-Фурье-спектроскопии (FTIR) и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР). Результаты РФА показали формирование кристаллической фазы анатаза TiO₂, тогда как SiO₂ присутствовал в аморфном состоянии. Результаты ИК-Фурье-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света подтвердили наличие колебательных мод, характерных для TiO₂ и SiO₂. С помощью СЭМ были исследованы морфологические характеристики синтезированного наноконкомпозита. Полученные результаты подтвердили формирование наноконкомпозита TiO₂/SiO₂, содержащего кристаллическую фазу анатаза TiO₂ и аморфную структуру SiO₂. Установленные структурные особенности свидетельствуют о перспективности данного наноконкомпозита для дальнейшего исследования в качестве фотокаталитического материала.

Ключевые слова: золь-гель, TiO₂/SiO₂ наноконкомпозит, запрещённая энергетическая зона, СЭМ, спектроскопия комбинационного рассеяния (КР).

SYNTHESIS AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF TiO₂/SiO₂ NANOCOMPOSITE

Abstract: In this study, a TiO₂/SiO₂ nanocomposite was synthesized using the sol-gel method. The synthesis process involved the use of precursors for the formation of TiO₂ and SiO₂, and the conditions for obtaining the nanocomposite material were investigated. The morphological and structural properties of the obtained samples were examined and analyzed using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and Raman spectroscopy. XRD analysis revealed the formation of the crystalline anatase phase of TiO₂, while SiO₂ was found to exist in an amorphous state. The FTIR and Raman spectroscopy results confirmed the presence of vibrational modes characteristic of TiO₂ and SiO₂. The morphological characteristics of the synthesized nanocomposite were studied using SEM. The results confirmed the formation of a TiO₂/SiO₂ nanocomposite consisting of the anatase phase of TiO₂ and an amorphous SiO₂ structure. The identified structural characteristics indicate that this nanocomposite is promising for further investigation as a photocatalytic material.

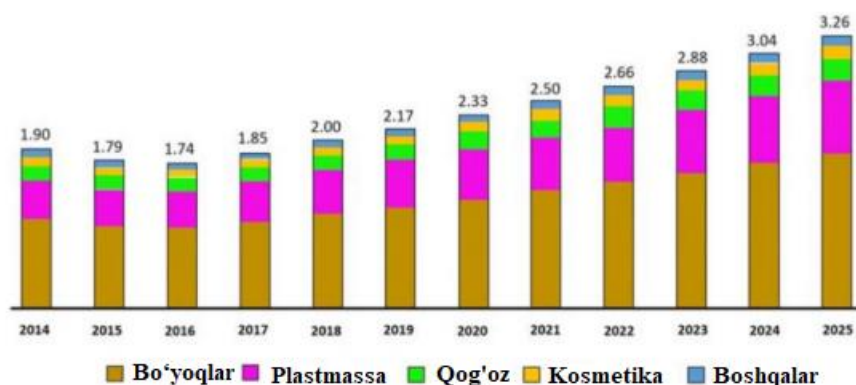
Keywords: sol-gel, TiO₂/SiO₂, nanocomposite, band gap, SEM, Raman spectroscopy.

Kirish

So' nggi yillarda atrof-muhitning sanoat chiqindilari bilan tobora ko' proq ifloslanishi, toza ichimlik suvi tanqisligi hamda qayta tiklanuvchi energiya manbalariga bo' lgan ehtiyojning ortishi yuqori samaradorlikka ega fotokatalitik materiallarni sintez qilishga qaratilgan tadqiqotlarni jadallashtirmoqda. Suv resurslarining ifloslanishi nafaqat suvdagi tirik organizmlarga zarar yetkazadi, balki oziq-ovqat zanjiri va suvni bevosita iste'mol qilish orqali inson salomatligi uchun ham xavf tug' diradi. Ayniqsa, quyosh energiyasidan samarali foydalanish orqali organik ifloslantiruvchi moddalarni parchalash va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini ishlab chiqish zamonaviy kimyoning ustuvor yo' naliqlaridan biriga aylangan. Bu muomoni hal qilishda anorganik oksidlovchilarning o' rni juda katta.

Bugungi kunda nanomateriallar o' ziga xos fizik-kimyoviy xususiyatlari tufayli turli sohalarda keng qo' llanilib, ularning ilmiy va amaliy ahamiyati tobora ortib bormoqda. Bunday nanomateriallardan **titan dioksid (TiO₂)** o' zining yuqori kimyoviy barqarorligi, iqtisodiy jihatdan arzonligi va kuchli oksidlovchi xususiyatlari tufayli bunday qo' llanmalar uchun eng muhim nanomaterial sifatida e'tirof etiladi. Ushbu materiallar orasida **TiO₂ asosidagi nanomateriallar** ko' plab afzalliklari, jumladan, tabiatda keng tarqalganligi, iqtisodiy jihatdan tejamkorligi, zaharsizligi, korroziyaga chidamliligi, kuchli oksidlanish-qaytarilish xususiyatlari hamda turli termik va kimyoviy sharoitlarda yuqori barqarorligi tufayli ko' lab tadqiqotlar olib borilmoqda [1]. Masalan quyosh elementlari, gaz sensorlari, fotokatalizatorlar [2], korroziyadan himoya qiluvchi qoplamalar [3] va atrof-muhitni tozalash texnologiyalarida [4] keng qo' llanilmoqda. Ayniqsa, TiO₂ ning fotokatalitik xususiyatlari organik ifloslantiruvchi moddalarni samarali oksidlash va mineralizatsiya qilish imkonini bergani sababli ekologik muammolarni hal etishda katta ahamiyat kasb etadi [5].

Hozirda TiO₂ ning dunyo miqyosida turli sohalarda qo' llanilishi sezilarli darajada ortmoqda. Misol uchun 1-rasmda 2014–2025-yillarda AQShda TiO₂ bozorining qo' llanilish sohalari bo' yicha hajmi (mlrd AQSh dollari hisobida) ko' rsatilgan [25].



1-rasm. 2014–2025-yillarda AQShda TiO₂ bozorining qo' llanilish sohalari bo' yicha hajmi [25].

Biroq, toza TiO₂ ning amaliy samaradorligini cheklovchi asosiy omillardan biri uning keng taqiqlangan energiya sohasi (3,2 eV) hisoblanadi [6]. Natijada material asosan ultrabinafsha nurlanish ta'siridagina faollashadi, holbuki quyosh nurlarining katta qismi (40-45 %) ko' rinadigan yorug' lik diapazoniga to' g' ri keladi [7]. Bundan tashqari,

fotogeneratsiyalangan elektron va kovaklarning tez rekombinatsiyalanishi fotokatalitik jarayon samaradorligini sezilarli darajada pasaytiradi [8,16]. Shu sababli, TiO_2 ning optik va elektron xususiyatlarini yaxshilash, xususan taqiqlangan energiya sohasini samarali boshqarish hamda ko' rinadigan yorug' likni yutish qobiliyatini oshirish bugungi kunda fotokataliz sohasidagi eng dolzarb ilmiy yo' naliqlardan biri hisoblanadi [9-10].

Yuqorida ta'kidlanganidek, TiO_2 ning fotokatalitik samaradorligi uning keng taqiqlangan energiya sohasi, yorug' lik ta'sirida hosil bo' ladigan elektron–kovak juftlarining tez qayta birikishi hamda nisbatan kichik solishtirma sirt maydoni bilan cheklanadi [11]. Shu sababli, TiO_2 ning strukturaviy va elektron xususiyatlarini yaxshilashga qaratilgan turli modifikatsiya usullari ishlab chiqilmoqda. Ular orasida kremniy dioksid (SiO_2) bilan nanokompozit material hosil qilish eng istiqbolli yondashuvlardan biri sifatida e'tirof etilmoqda [12,13].

SiO_2 yuqori solishtirma sirt maydoni, o' ziga xos g' ovak tuzilishi, kimyoviy inertligi va yaxshi termik barqarorligi bilan ajralib turadi. $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ nanokompozitida SiO_2 tayanch faza sifatida TiO_2 nanozarrachalarining bir tekis taqsimlanishini ta'minlaydi, ularning aglomeratsiyasini kamaytiradi va faol markazlar sonini oshiradi [14]. Bundan tashqari, SiO_2 qo' shilishi ifloslantiruvchi moddalarning adsorbsiyasini kuchaytiradi, fotokatalizatorning umumiy samaradorligini oshiradi. Natijada $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ nanokompoziti toza TiO_2 ga nisbatan ultrabinafsha va ayrim hollarda ko' rinadigan yorug' lik ostida ham yuqori fotokatalitik faollik namoyon etadi [15].

Bunda **SiO_2 adsorbent sifatida** organik bo' yoq molekularini TiO_2 ning faol markazlari yaqinida to' plash orqali fotokatalitik jarayon samaradorligini oshiradi. Shuningdek, bunday tayanch materiallar va kompozitlar **fotokatalizatorni eritmadan oson ajratib olish imkonini berishi** bilan birga, organik moddalar uchun **samarali adsorbentlar** sifatida ham keng e'tirof etilgan [17].

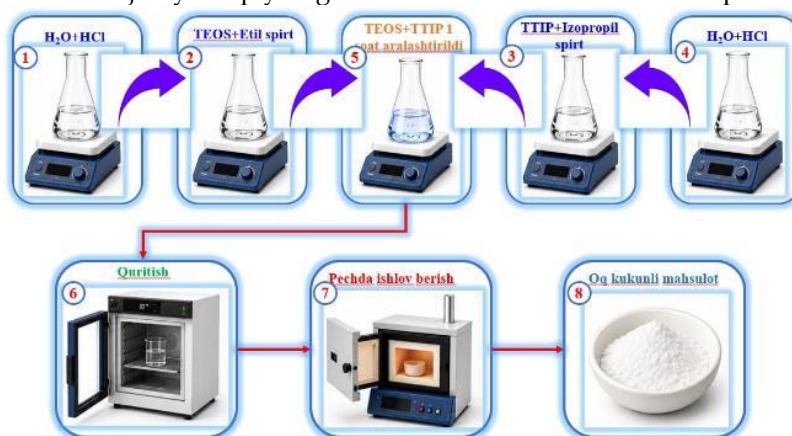
Tadqiqot metodologiyasi

Dastlab SiO_2 zollari TEOS (tetraetil ortosilikat) ning etanoldagi eritmasida (1:20 nisbatda) eritildi va 15 minut davomida aralashtirildi. So' ngra ushbu eritmaga suyultirilgan xlorid kislota (HCl) eritmasidan 5 ml qo' shildi. Hosil bo' lgan eritma magnitli aralashtirgich yordamida 30 daqiqa aralashtirildi.

Shundan keyin TTIP (titan (IV) izopropoksid) izopropil spirtida eritildi (1:20 nisbatda) va 15 daqiqa aralashtirildi. Ushbu eritmaga 5 ml suyultirilgan HCl kislota eritmasi tomizildi hamda 30 daqiqa magnitli aralashtirgichga qo' yildi. Shuni ta'kidlash lozimki, reaksiyada TEOS eritmasi 500 rpm, TTIP eritmasi esa 1100 rpm tezlikda magnitli aralashtirgichda olib borildi.

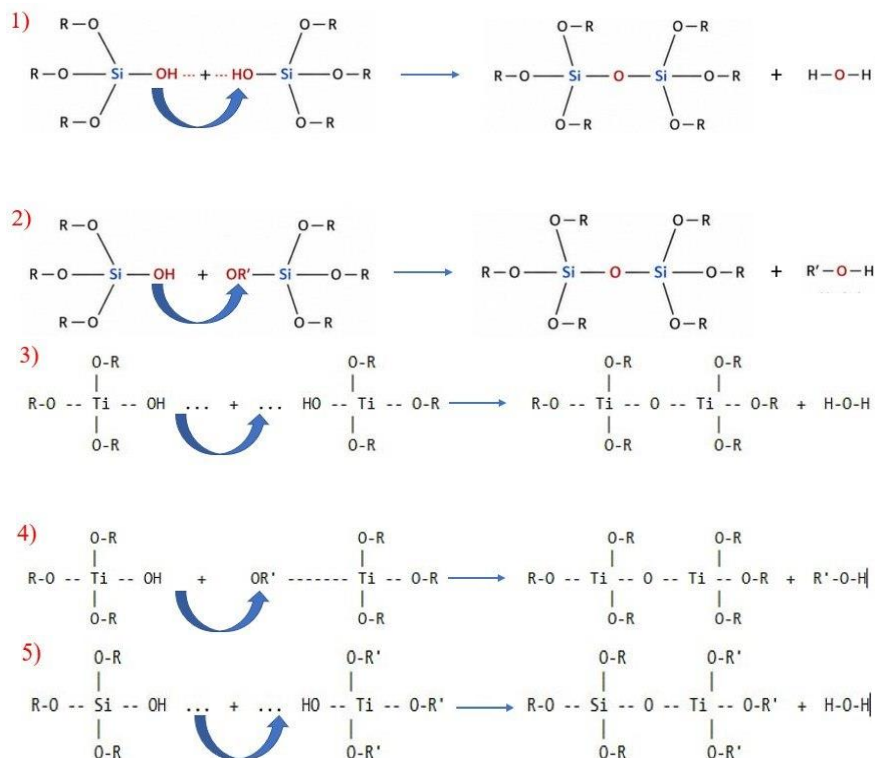
Hosil bo' lgan TEOS eritmasi TTIP eritmasiga tomchilatib qo' shildi va 1 soat aralashtirildi. Olingan eritma parafilm bilan yopilib, 24 soat davomida xona haroratida aralashma gel holatiga kelguncha ushlab turildi. So' ngra olingan gel 40 °C da 24 soat, 60 °C da ham 24 soat mufel pechiga qo' yildi hamda 80 °C da 72 soat quritildi. Olingan namuna chinni hovonchada maydalanib, pechda 300 °C va 500 °C da 3 soatdan kalsinatsiya qilindi.

Tadqiqotda moddalarni sintez jarayoni quyidagi sxematik tasvir asosida 8 ta bosqichda olib borildi (2-rasm).



2-rasm. $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ nanokompozit sintezining sxematik tasviri

Yuqoridagi jarayonning hosil bo' lish mexanizimi olingan mahsulotlar SiO_2 , TiO_2 va $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ nanokompozitlari quyidagi bosqichli reaksiyalar asosida boradi (1-5 reaksiyalar). Bunda hosil bo' lgan moddalar tarkibidagi Si, Ti oksidlari kislarodli ko' prik orqali kimyoviy bog' lanish orqali birikadi. Shu bilan birgalikda TTIP va TEOS ning gidroliz jarayonida HCl muhim o' rin tutadi. HCl asosan eritmaning pH ni nazorat qiladi. Bu jarayonda eritma pH qiymati kuchli kislotalilikni ($\text{pH}=1-2.5$) namoyon qiladi.



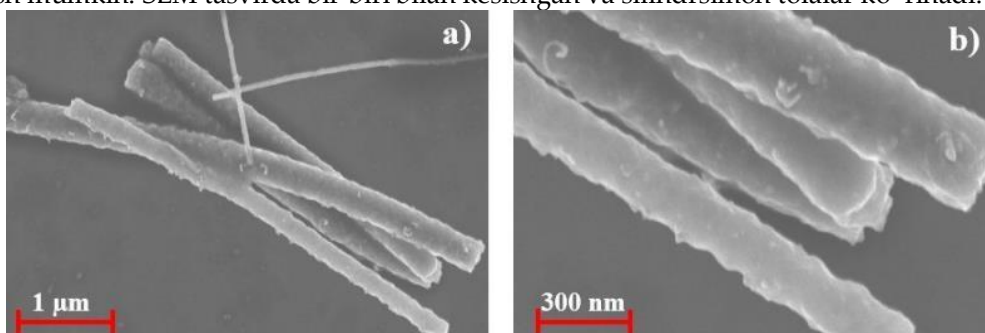
Natija va ularning tahlili

Sintez qilib olingan namunaning **sirt yuzasi** hamda **strukturaviy xossalari** batafsil tahlil qilindi. Quyda bu tahlillar ko'rsatilgan.

SEM tahlili

SEM odatda namunaning sirt morfologiyasini ya'ni namunaning sirt shaklini, g'adir-budurligini, sirt yuzadagi yoriqlarni, g'ovaklar va zarrachalar tuzilishini ko'rsatadi. Shuningdek, zarrachalar o'lchami va shaklini ham aniqlaydi [20].

Olingan namunaning SEM tahlili o'rganilganda (3-rasm) TiO₂/SiO₂ nanokompozitining tolasimon morfologiyaga ega ekanligi ko'rish mumkin. SEM tasvirda bir-biri bilan kesishgan va silindrsimon tolalar ko'rinadi.



3-rasm. TiO₂/SiO₂ nanomopozitining SEM tasvirlari. a) 1 μm b) 300 nm

Nanokompozitning SEM tasviridagi tolalar yuzasida mayda zarrachalar borligi ko'rinadi, bu esa TiO₂ zarrachalarining SiO₂ tolalari yuzasiga birikkanligiga ishora qiladi. Ushbu morfologiya nanokompozitning yuqori solishtirma sirt maydoniga ega ekanligidan dalolat beradi.

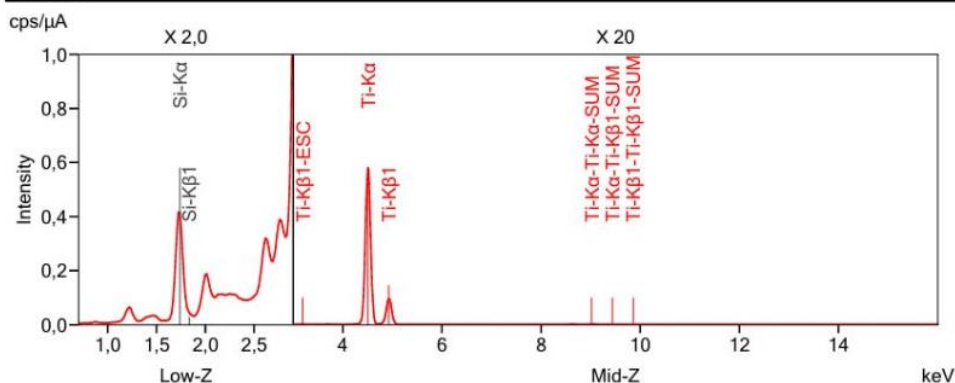
XRF tahlili

Sintez qilib olingan namunaning tarkibini bilish maqsadida XRF tahlili o'tkazildi (4-rasm). Bunda olingan natijalarga ko'ra namuna tarkibidagi moddalar ya'ni TiO₂ 88,4 %, SiO₂ 11,6 % ni tashkil qildi.

Analyzed result(FP method)

No.	Component	Result	Unit	LLD	LLQ	Element line	Intensity(cps/μA)
1	TiO ₂	88,4	mass%	0,0029	0,0086	M:Ti-Kα	103,34184
2	SiO ₂	11,6	mass%	0,0319	0,0956	L:Si-Kα	5,16899

Spectrum



4-rasm. TiO₂/SiO₂ nanokompozitning XRF tasviri

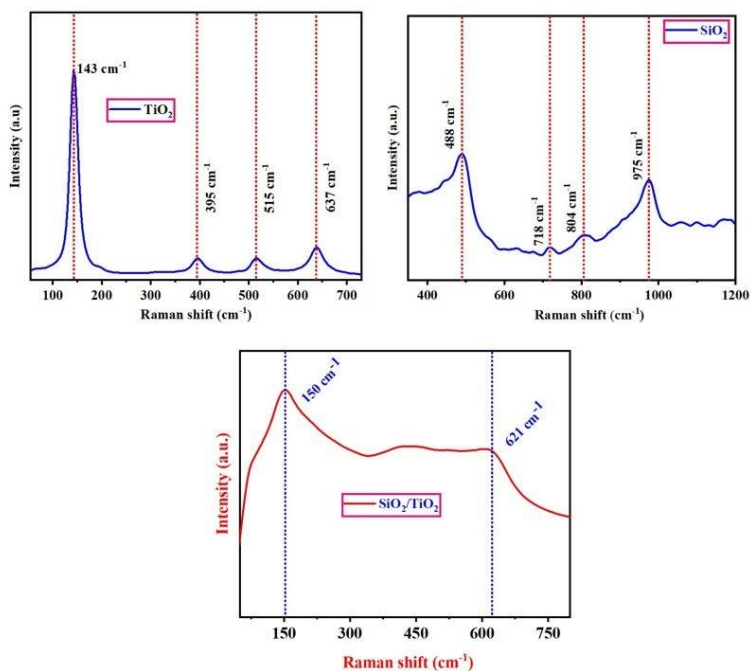
Bu XRF natijasiga ko' ra tanlangan parametrlar to' g' riligiga va moddalarni tozaligidan dalolat beradi.

Raman tahlili

Raman tahlili kristallik darajasi – materialning yaxshi kristallangan yoki amorf ekanligini ko' rish imkonini beradi. Bunda Raman tahlili atomlar orasidagi bog' lanishlarning turi va ularning tebranish modlarini aniqlaydi [21].

Nanokompozit materialning tuzilishini yanada chuqurroq tushunish maqsadida TiO₂, SiO₂ va TiO₂/SiO₂ nanokompozitining Raman spektri o' lchandi (5-rasm). Bunda 143 sm⁻¹ da kuzatilgan yuqori intensivlikdagi Raman cho' qqisi TiO₂ ning anataz fazasi mavjudligini ko' rsatadi. Ushbu sohada rutil fazasi ham Raman cho' qqisini namoyon qilishi mumkin bo' lsa-da, bu signal odatda juda kuchsiz bo' ladi. Shuning uchun ushbu cho' qqi asosan anataz fazali TiO₂ mavjudligi bilan bog' liq deb hisoblanadi [18]. Olingan SiO₂ namunasining Raman spektrida tahlilida 488 sm⁻¹ to' lqin uzunlikdagi cho' qqi amorf SiO₂ uchun mos keladi [28].

Ushbu TiO₂/SiO₂ ning Raman tasvirida (5-rasm) 150 cm⁻¹ o' rtacha intensivlikdagi cho' qqi hosil bo' ldi. Bunda hosil bo' lgan cho' qqining o' ng tomonga siljishi (144-150 cm⁻¹) TiO₂ strukturasi ga SiO₂ ning kiritilishi bilan bog' liq deb hisoblash mumkin.



5-rasm. Olingan namunalarning Raman tasvirlari

Shuningdek, ushbu namunada 621 cm⁻¹ sohada ham kuchsiz cho' qqi hosil bo' lganligini ko' rish mumkin. Bu cho' qqi ham TiO₂ ga tegishli bo' lib (TiO₂ ga xos bo' lgan 605 cm⁻¹) strukturaning o' zgarishi hisobiga siljiganini ko' rish mumkin bo' ladi. Bunda TiO₂ ga xos bo' lgan cho' qqilarning kuzatilishi TiO₂ strukturasi ning saqlanib qolganligidan dalolat beradi.

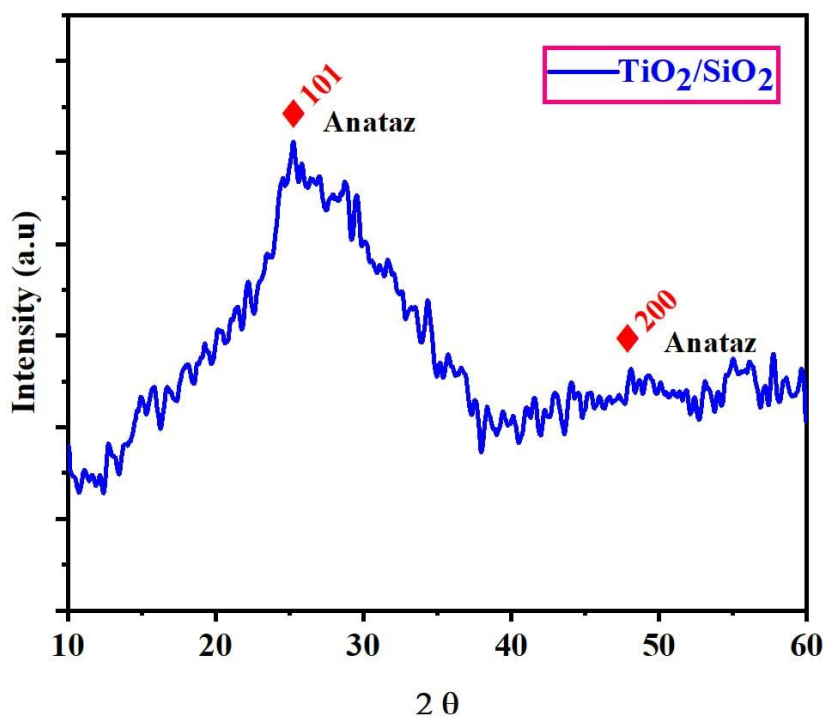
Bu namunada SiO_2 ga xos bo'lgan cho'qqilar namoyon bo'lmadi. Chunki SiO_2 amorf modda bo'lganligi sababli Raman spektrlari SiO_2 uchun keng va kuchsiz bo'lishi mumkin [26].

XRD tahlili

Ushbu tadqiqot davomida sol-gel usuli yordamida sintez qilib olingan nanokompozit material atomlarining kristall ichida qanday tartibda joylashganligini va qanday kristall fazalar mavjudligini o'rganish maqsadida XRD tahlili o'rganildi (6-rasm).

Bunda namunaning XRD spektrida asosan ikkita cho'qqi kuzatilgan bo'lib, $2\theta = 25.3^\circ$, 48.0° qiymatlarda difraksiya signali kuzatildi. Tahlil davomida mos ravishda **anataz kristall shaklining saqlanib qolganligini tegishli (101) va (200) kristallografik tekisliklarning** mavjudligidan bilish mumkin.

Shuningdek, ushbu rentgenogrammada boshqa birmuncha past intensivlikdagi cho'qqilarning ham mavjudligi ko'rinadi.



6-rasm. $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ nanokompozitining XRD difraktogrammasi

Yana shuni ta'kidlash lozimki, namunada SiO_2 ga tegishli yuqori intensivlikdagi difraksiyon cho'qqilarning kuzatilmaganligi SiO_2 ning amorf holatda mavjudligi bilan izohlash mumkin bo'ladi. Bunda keskin cho'qqilar mavjud bo'lmasada lekin $2\theta = 22.5^\circ$ atrofida kuchsiz tebranish mavjudligi kuzatilgan [22]. SiO_2 ga xos bo'lgan cho'qqining kichik intensivlikdagi tebranishi

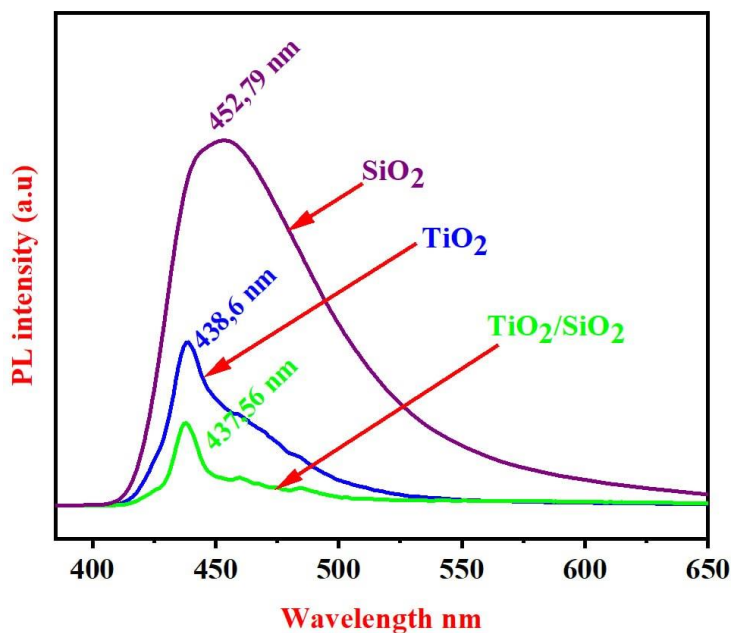
6-rasmdagi XRD ma'lumotlarida ham keltirib o'tildi.

Shu bilan birgalikda SiO_2 ning amorf holatda bo'lishi va uning TiO_2 zarrachalari sirtida yupqa qatlam ko'rinishida dispersiyalanishi SiO_2 ga xos aniq kristall difraksiya cho'qqilarining kuzatilmasligiga olib kelishu adabiyotlarda keltirilgan [23-24].

PL tahlili

Fotoluminessensiya (PL) tahlili fotogeneratsiyalangan elektron–kovak juftlarining rekombinatsiya jarayonini o'rganish uchun amalga oshirildi [27].

PL tahlili natijalariga ko'ra, SiO_2 nanomunasida 452.79 nm, TiO_2 da 438.6 nm, $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ nanokompozitida esa 437.56 nm dagi cho'qqilar kuzatildi (7-rasm). Bunda to'lqin uzunligining kamayishi foton energiyasining ortishiga va bu esa fotokatalizning samarali bo'lishiga olib keladi. 7-rasm ma'lumotlariga ko'ra $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ nanokompozitining PL intensivligi toza TiO_2 va SiO_2 larga nisbatan sezilarli darajada kamayganligini kuzatish mumkin. PL intensivligining pasayishi elektron–kovak juftlarining rekombinatsiyasi susayganligini va zaryad tashuvchilarning ajralish samaradorligi ortganligini ko'rsatadi. Bu holatda SiO_2 ning TiO_2 nanomaterialida zaryad tashuvchilarning rekombinatsiyasini cheklashdagi rolini ko'rsatadi. Natijada zaryad tashuvchilarning davomiyligi ortadi hamda ularning fotokatalitik reaksiyalarda muhim ahamiyat kasb etadi.



7-rasm. TiO₂/SiO₂ nonokompozitining PL tasviri

Olingan namunalarning PL tahlili tadqiqotning samarali olib borilganligidan dalolat beradi.

Xulosa

Umuman olganda TiO₂/SiO₂ sol-gel usulda muvaffaqiyatli sintez qilindi. Bunda namuna tarkibini 88.4% TiO₂ va qolgan qismini SiO₂ tashkil qildi. Shuningdek, ushbu modifikatsiyada tarkibiy qismlarning asosiy strukturasi saqlanib qolingaligini XRD ($2\theta=25.3$) va Raman tahlillar (153 cm^{-1}) bilan isbotlash mumkin. Shu bilan birgalikda namunaning sirt yuzasi SEM tahlili bilan batafsil o'rganildi. Olingan tahlil natijalari sintez jarayonida belgilangan texnologik parametrlarning to'g'ri tanlanganligi va jarayonning belgilangan sharoitlarda amalga oshirilganligini ko'rsatadi. Shu bilan birgalikda namunalarning PL tahlili fotokatalizning samarali borishiga olib keladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Boykobilov D., Thakur S., Samiev A., Nasimov A., Turaev K., Nurmanov S., Ruzimuradov, O. Electrochemical synthesis and modification of novel TiO₂ nanotubes: Chemistry and role of key synthesis parameters for photocatalytic applications in energy and environment //Inorganic Chemistry Communications. – 2024. – T. 170. – P. 113419.
2. Peiris S., Silva HB de., Ranasinghe K.N., Bandara S.V., Perera I.R. Recent development and future prospects of TiO₂ photocatalysis //Journal of the Chinese Chemical Society. – 2021. – T. 68. – №. 5. – P. 738-769..
3. Su S., Abulikemu H., Yu R., Hu S., Shu F., Lei B., Yuan X. Triple-synergistic BNNSs@ PDA/ODA/TiO₂-reinforced silicone-epoxy coatings with enhanced mechanical robustness and marine corrosion protection //Progress in Organic Coatings. – 2026. – T. 214. – P. 110044.
4. Tomić J., Malinović N. Titanium dioxide photocatalyst: Present situation and future approaches //AIDASCO Reviews. – 2023. – T. 1. – №. 2. – P. 26-30.
5. Enang O. T., Azeez B.O., Ogunyemi BT., Sulayman A.A., Araromi D.O., Raimi M.O. Revolutionizing hemodialysis water quality: Development and evaluation of TiO₂ nanoparticle-enhanced microporous filters //Advances in Nanoparticles. – 2025. – T. 14. – №. 1. – P. 12-36.
6. Haque S., Khan MM., Jahan MS., Ahad A., Sayedi TA., Khan MI., Neha TR. Rare earth doped TiO₂ thin film: A review on structural, optical, photocatalytic, magnetic, and electrical properties //Next Materials. – 2026. – T. 11. – P. 101661..
7. Rai N., Morales L. O., Aphalo P. J. Perception of solar UV radiation by plants: photoreceptors and mechanisms //Plant Physiology. – 2021. – T. 186. – №. 3. – P. 1382-1396.
8. Miad A Al., Miad A Al., Saikat SP., Alam MK., Sahadat Hossain M., Bahadur NM., Ahmed S. Metal oxide-based photocatalysts for the efficient degradation of organic pollutants for a sustainable environment: a review //Nanoscale Advances. – 2024. – T. 6. – №. 19. – P. 4781-4803.
9. Khan M. S., Li Y., Li D.S., Qiu J., Xu X., Yang H.Y. A review of metal-organic framework (MOF) materials as an effective photocatalyst for degradation of organic pollutants //Nanoscale Advances. – 2023. – T. 5. – №. 23. – P. 6318-6348.
10. Li X., Wei H., Song T., Lu H., Wang X. A review of the photocatalytic degradation of organic pollutants in water by modified TiO₂ //Water Science & Technology. – 2023. – T. 88. – №. 6. – P. 1495-1507.

11. Zhang W. He H., Li H., Duan L., Zu L., Zhai Y., Li W., Wang L., Fu H., Zhao D. Visible-light responsive TiO₂-based materials for efficient solar energy utilization //Advanced Energy Materials. – 2021. – T. 11. – №. 15. – P. 2003303.
12. Tabassum S., Bashar, M. S., Siddika, A., Yeasmin, N., Naznin, S., Afrin, S., Eti, S. A., & Md Ismail, A. B. Synthesis of TiO₂/SiO₂ composite photocatalyst for efficient dye decolorization using a custom-built photocatalytic reactor //Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research. – 2025. – T. 60. – №. 3. – P. 203-212.
13. Khan S., Xu ZD., Hussain I., Xu Y., Huang ., B Sun. Rheological performance of titanium oxide nanoparticles on silica-based shear-thickening fluids //Surfaces and Interfaces. – 2025. – P. 108122.
14. Lyu J., L Sun., J Zhong., Q Fu., M Zhang., S Wang., J Li. Shielding of surface photogenerated charges by SiO₂ coating for the photocatalytic degradation of air pollutants //Chemical Engineering Journal. – 2016. – T. 303. – P. 314-321.
15. Wu W., W Yang., J Zhong., H Peng., L Meng., S Zhao. Preparation of mesoporous nanosphere SiO₂/TiO₂ composite materials and the photocatalytic degradation performance of different dyes //RSC advances. – 2026. – T. 16. – №. 10. – P. 9280-9292.
16. Musaev K., Ruzimuradov O., Razzokov J., Parmanov A., Khaydarov I., Mamatkulov Sh., Suyunova F., Tursunov Sh, Shodieva K., Abdelmonaim A. Unveiling the role of Cr-doping in modulating the textural and optical properties of sol-gel derived TiO₂ nanomaterials for photocatalytic activity //Next Materials. – 2026. – T. 13. – P. 102793.
17. Musaev K., Mirkhamitova D., Yarbekov A., Nurmanov S., Akbarov K., O Ruzimuradov. Facile synthesis of SiO₂-TiO₂ photocatalyst nanoparticles for degradation of phenolic water pollutants //SN Applied Sciences. – 2019. – T. 1. – №. 10. – P. 1164.
18. Koizhaiganova M., Aslan A., Göde C., Meyer M. Preparation and characterization of TiO₂-silicone nanocomposite obtained by sol-gel method //Annals of The University of Oradea Fascicle of Textiles, Leatherwork. – 2015. – T. 16. – №. 1. – P. 123-126.
19. Gatou M. A., Fiorentis E., Lagopati, N., Pavlatou, E. A. Photodegradation of rhodamine B and phenol using TiO₂/SiO₂ composite nanoparticles: A comparative study //Water. – 2023. – T. 15. – №. 15. – P. 2773.
20. Mohammed A., Abdullah A. Scanning electron microscopy (SEM): A review //Proceedings of the 2018 international conference on hydraulics and pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania. – 2018. – T. 2018. – P. 7-9.
21. Rostron P., Gaber S., Gaber D. Raman spectroscopy, review //laser. – 2016. – T. 21. – P. 24.
22. Meftah N., Hani A., Merdas A. Extraction and physicochemical characterization of highly-pure amorphous silica nanoparticles from locally available dunes sand //Chemistry Africa. – 2023. – T. 6. – №. 6. – P. 3039-3048.
23. Meftah N, Hani A, Merdas A, Sadik C, & Sdiri A (2021) A holistic approach towards characterizing the El-Oued siliceous sand (eastern Algeria) for potential industrial applications. Arab. J. Geosci. 14(23) 1–14.
24. Hossain S.S., Mathur L., Bhardwaj A., Roy P.K. (2019) A facile route for the preparation of silica foams using rice husk ash. Int. J. Appl. Ceram. Technol. 16(3) 1069–1077.
25. Parrino F., Palmisano L. (ed.). Titanium dioxide (TiO₂) and its applications. – elsevier, 2020.
26. Cordoba A., Rivera-Muñoz E. M., Velázquez-Castillo R., Esquivel K. PDMS/TiO₂ and PDMS/SiO₂ nanocomposites: mechanical properties' evaluation for Improved Insulating Coatings //Nanomaterials. – 2023. – T. 13. – №. 10. –P. 1699.
27. Li F., Li, H., Guan, L. X., Yao, M. M. Nanocrystalline Co²⁺/F⁻ codoped TiO₂/SiO₂ composite films for environmental applications //Chemical Engineering Journal. – 2014. – T. 252. – P. 1-10.
28. Stenger I., Siozade, L., Gallas, B., Fisson, S., Vuye, G., Rivory, J. Near infrared absorption of Si nanoparticles embedded in silica films //Surface science. – 2007. – T. 601. – №. 14. – P. 2912-2916.