NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-8]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

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

UO‘ K 620.91

BIR VA IKKI QATLAMLI TiO_2 FOTOANODLARNING MORFOLOGIYASINI RENTGEN TOMOGRAFIYASI ASOSIDA BAHOLASH

Sharipbayev Sobitxon Sobir o‘ g‘ li
Namangan davlat texnika universiteti, o‘ qituvchi
ORCID: 0009-0009-2269-7711
E-mail: Sharipbayev1999@mail.ru
Ergashov Abdurasul
Namangan davlat texnika universiteti, o‘ qituvchi
ORCID: 0000-0002-6141-0017
E-mail: e.abdurasul@nstu.uz
Tursunboyev Rahimjon Ibodullo o‘ g‘ li
Kosonsoy tumani 28-umumiy o‘ rta ta’ lim maktabi, o‘ qituvchi
ORCID: 0009-0005-2393-8362
E-mail: tursunboyevrahimjon215@gmail.com
Abdulazizov Baxrom Toshmirza o‘ g‘ li
Namangan davlat universiteti professori, fizika-matematika fanlari doktori (DSc)

Annotatsiya. *Ushbu maqolada bo‘ yoq bilan sensibilizatsiyalangan quyosh elementlari uchun mo‘ ljallangan bir va ikki qatlamli TiO_2 fotoanodlarning morfologik bir jinsliligi ilgari olingan rentgen tomografik tasvirlarning ikkilamchi tahlili asosida ko‘ rib chiqiladi. Tahlilning asosiy obyekti qoplamaning fazoviy uzluksizligi, lokal qalinligi va qalinlikning yuza bo‘ ylab taqsimotidir. Uch o‘ lchamli rekonstruksiya, nuqtaviy o‘ lchov va yuzaga nisbatan vaznlangan gistogramma o‘ zaro farqlanadigan axborot manbalari sifatida baholanadi. Bir qatlamli namunada keltirilgan 0,0541 mm lokal o‘ lchovning butun qoplama uchun o‘ rtacha qiymatni ifodalamasligi ko‘ rsatiladi. Qalinlik taqsimotidagi asosiy soha hamda qo‘ shimcha yelka morfologik notekislikni tekshirishga asos bo‘ lishi mumkinligi muhokama qilinadi. O‘ rtacha qalinlik, vaznlangan dispersiya, variatsiya koeffitsiyenti va belgilangan qalinlik oralig‘ idagi yuza ulushini birgalikda qo‘ llashga asoslangan baholash tartibi bayon etiladi. Tahlil qoplamaning lokal geometriyasini qatlamlar sonidan alohida baholash, tomografik segmentatsiya ta’sirini hisobga olish va morfologik xulosalarni kuzatuvning fazoviy aniqligi bilan chegaralash zarurligini ko‘ rsatadi.*

Kalit so‘ zlar*: TiO_2; fotoanod; rentgen mikrotomografiyasi; morfologiya; qalinlik taqsimoti; qatlam bir jinsliligi; morfometriya; segmentatsiya.*

ОЦЕНКА МОРФОЛОГИИ ОДНОСЛОЙНЫХ И ДВУХСЛОЙНЫХ TiO_2-ФОТОАНОДОВ НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Аннотация. *В данной статье морфологическая однородность однослойных и двухслойных TiO_2-фотоанодов, предназначенных для сенсибилизированных красителем солнечных элементов, рассматривается на основе вторичного анализа ранее полученных рентгенотомографических изображений. Основными объектами анализа являются пространственная непрерывность покрытия, локальная толщина и распределение толщины по поверхности. Трёхмерная реконструкция, точечные измерения и гистограмма, взвешенная по площади поверхности, рассматриваются как взаимодополняющие источники информации. Показано, что локальное значение толщины 0,0541 мм, приведённое для однослойного образца, не следует интерпретировать как среднюю толщину всего покрытия. Обсуждается возможность использования основной области распределения толщины и дополнительного плеча гистограммы в качестве признаков морфологической неоднородности. Представлен подход к оценке однородности, основанный на совместном использовании средней толщины, взвешенной дисперсии, коэффициента вариации и доли площади, соответствующей заданному диапазону толщины. Проведённый анализ показывает необходимость раздельной оценки локальной геометрии покрытия и количества слоёв, учёта влияния томографической сегментации, а также ограничения морфологических выводов пространственным разрешением метода наблюдения.*

Ключевые слова: *TiO_2; фотоанод; рентгеновская микротомография; морфология; распределение толщины; однородность слоя; морфометрия; сегментация.*

EVALUATION OF THE MORPHOLOGY OF SINGLE-LAYER AND BILAYER TIO_2 PHOTOANODES BASED ON X-RAY TOMOGRAPHY

Abstract. *This article examines the morphological uniformity of single-layer and bilayer TiO_2 photoanodes intended for dye-sensitized solar cells on the basis of a secondary analysis of previously obtained X-ray tomographic images. The main objects of analysis are the spatial continuity of the coating, local thickness, and the surface distribution of thickness. Three-dimensional reconstruction, point measurements, and a surface-area-weighted histogram are considered as complementary sources of structural information. It is shown that the local thickness value of 0.0541 mm reported for the single-layer sample should not be interpreted as the average thickness of the entire coating. The main region of the thickness distribution and the additional shoulder of the histogram are discussed as possible indicators of morphological non-uniformity. An evaluation procedure is proposed based on the combined use of mean thickness, weighted variance, coefficient of variation, and the surface fraction within a specified thickness interval. The analysis demonstrates the need to assess the local geometry of the coating independently of the number of layers, to account for the influence of tomographic segmentation, and to limit morphological conclusions by the spatial resolution of the observation method.*

Keywords: *TiO_2; photoanode; X-ray microtomography; morphology; thickness distribution; layer uniformity; morphometry; segmentation.*

Kirish

Bo‘ yoq bilan sensibilizatsiyalangan quyosh elementlarida TiO_2 fotoanod bo‘ yoq molekulalari joylashadigan va elektronlar ko‘ chadigan fazoviy asosni hosil qiladi. Qoplamaning funksional xossalarini tushuntirishda uning kimyoviy tarkibi bilan birga geometrik tuzilishini ham hisobga olish zarur. Bir xil nominal qalinlikka ega ikki qoplama lokal yupqalashish, qalinlashish yoki qatlamning uzilishi tufayli morfologik jihatdan farq qilishi mumkin. TiO_2 asosidagi fotoanodlar haqidagi tadqiqotlar mazkur tuzilma va qurilma xossalarini birgalikda ko‘ rib chiqish uchun asos yaratadi [1, 2].

Morfologik bir jinslilik deganda qoplamaning butun yuzasi bo‘ ylab geometrik ko‘ rsatkichlari qanchalik barqaror ekanligi tushuniladi. Bu tushuncha faqat o‘ rtacha qalinlik bilan cheklanmaydi: bir xil o‘ rtachaga ega namunalarda tarqalish kengligi va keskin o‘ tish zonalari turlicha bo‘ lishi mumkin. Shuningdek, tekis tashqi sirt qoplama ichida qatlamlararo uzilishlar yo‘ qligini o‘ z-o‘ zidan isbotlamaydi. Shu sababli sirt ko‘ rinishi, kesim va uch o‘ lchamli rekonstruksiya birgalikda talqin qilinishi kerak.

Rentgen kompyuter tomografiyasi material ichidagi geometriyani uch o‘ lchamda tahlil qilish imkonini beradi. Miqdoriy baholashda rekonstruksiya, segmentatsiya va tanlangan tahlil hajmi yakuniy natijaga ta’sir ko‘ rsatadi [3, 4]. Ushbu ishning maqsadi oldingi TiO_2 tomografik materiallarini qalinlik bir jinsliligi nuqtai nazaridan qayta talqin qilish hamda lokal o‘ lchovlardan butun yuzaga oid xulosalarga o‘ tish uchun izchil morfometrik mezonlarni bayon etishdir. Ishning hissasi yangi tajriba seriyasini taqdim etishdan emas, mavjud tasviriy dalillarni o‘ lchov turi va fazoviy miqyos bo‘ yicha tartibli tahlil qilishdan iborat.

Material va tahlil usullari

Tahlil materiali sifatida bir va ikki qatlamli TiO_2 fotoanodlar haqidagi tomografik tadqiqotning rekonstruksiyalari, kesim tasvirlari va qalinlik gistogrammasidan foydalanildi [1]. Dastlabki manbada shisha substrat ustidagi qoplamalar NanoVox-1000 mikro fokusli rentgen tomografiyasi tizimida tekshirilgani qayd etilgan. Bu maqolada yangi namuna tayyorlash yoki qayta skanerlash bajarilmadi; natijalar oldingi materialning ikkilamchi morfologik tahlili sifatida keltiriladi. Tasvirlar va ulardagi o‘ lchov yozuvlari manba bilan bog‘ langan holda saqlandi.

Kuzatuvlar uch darajaga ajratildi: qoplama yuzasining umumiy rekonstruksiyasi, alohida kesim yoki nuqtadagi geometrik o‘ lchov, hamda qalinlik sinflariga mos yuza taqsimoti. Birinchi daraja qatlamning umumiy uzluksizligini, ikkinchisi lokal qalinlikni, uchinchisi esa tanlangan sohadagi taqsimotni tavsiflaydi. Ushbu darajalar o‘ zaro to‘ ldiruvchi bo‘ lib, ularning hech biri qolgan ko‘ rsatkichlarni avtomatik almashtirmaydi.

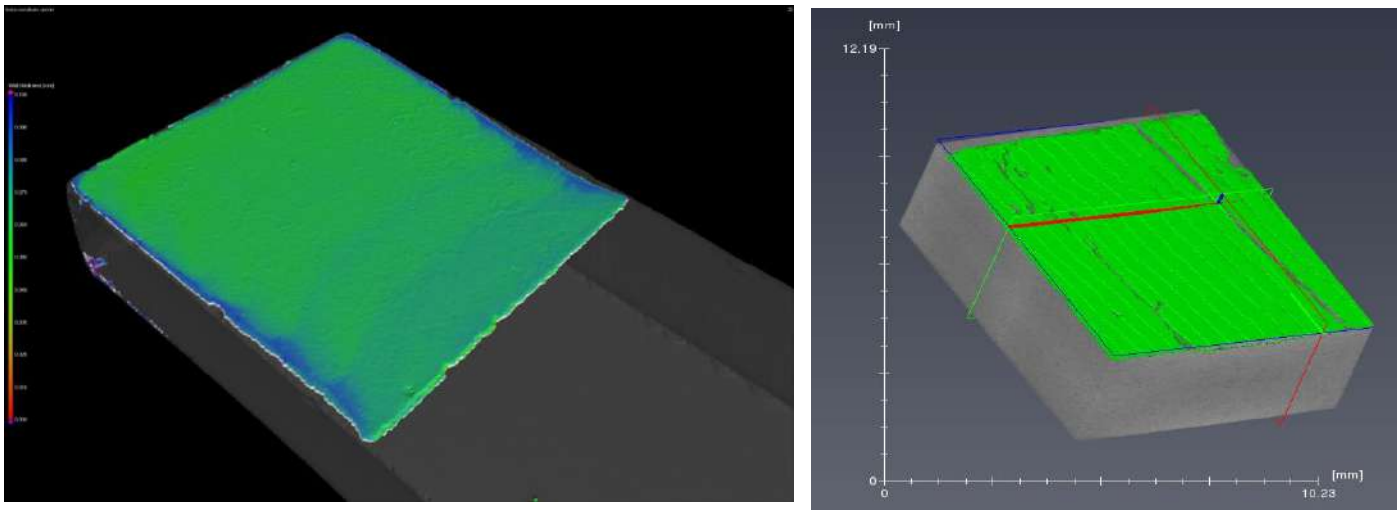
Tomografik tasvirda material chegarasini belgilash kulrang intensivlik va fazoviy kontrastga bog‘ liq. Voksel o‘ lchami, haqiqiy ajratish qobiliyati va segmentatsiya chegarasi qalinlik hisobiga ta’sir qilishi mumkin. Ushbu materialda rekonstruksiyaning dastlabki massivlari va kalibrlash protokoli taqdim etilmaganligi sababli yangi aniqlik qiymati yoki segmentatsiya barqarorligi sonli tarzda da’vo qilinmaydi. Kuzatilayotgan mikrometr darajasidagi qoplama geometriyasi TiO_2 ning nanometrli zarrachalar morfologiyasi bilan tenglashtirilmaydi. 6-rasm sifatida berilgan dastlabki gistogrammada ordinata Surface [mm²], abssissa esa Wall thickness [mm] bilan belgilangan [1]. Shuning uchun undagi ustunlarni o‘ lchovlar soni deb emas, qalinlik oralig‘ iga tegishli yuza ko‘ rsatkichi deb talqin qilish kerak. Quyida keltirilgan statistik

ifodalar dastur eksportida har bir sinf uchun yuza ulushi berilgan holatga tegishli. Agar eksportda zichlik funksiyasi berilsa, vaznlarni aniqlashda sinf kengligi ham hisobga olinadi.

Qatlam geometriyasining qiyosiy tahlili

Uch o‘ lchamli rekonstruksiyalar qoplamaning substrat ustida tarqalishini va lokal relefini ko‘ rsatadi. Bir qatlamli namuna tasvirida sirt bo‘ ylab yo‘ nalgan izlar mavjud; shu sababli qatlamni mutlaq tekis yoki barcha miqyoslarda bir jinsli deb ta’riflash yetarlicha asoslanmaydi. Ikki qatlamli namunaning rangli xaritasi esa tanlangan sirt bo‘ ylab qalinlikka mos rang o‘ zgarishlarini ko‘ rsatadi. Markaziy va chekka sohalarni miqdoriy taqqoslash uchun bir xil rang shkalasi hamda mos tahlil sohasi talab etiladi.

Qatlamlar soni geometrik murakkablikka ta’sir qiladi: ikki qatlamli tizimda qo‘ shimcha ichki chegara mavjud bo‘ lishi mumkin. Biroq bu belgining o‘ zi ikki qatlamli namuna albatta notekis yoki nuqsonli ekanini anglatmaydi. Bir qatlamli tuzilma ichida ham lokal qalinlashish va qoplama uzilishi yuzaga kelishi mumkin. Shu bois konfiguratsiya haqidagi tavsif va o‘ lchangan bir jinslilik ko‘ rsatkichi alohida tushunchalar sifatida qo‘ llanadi.

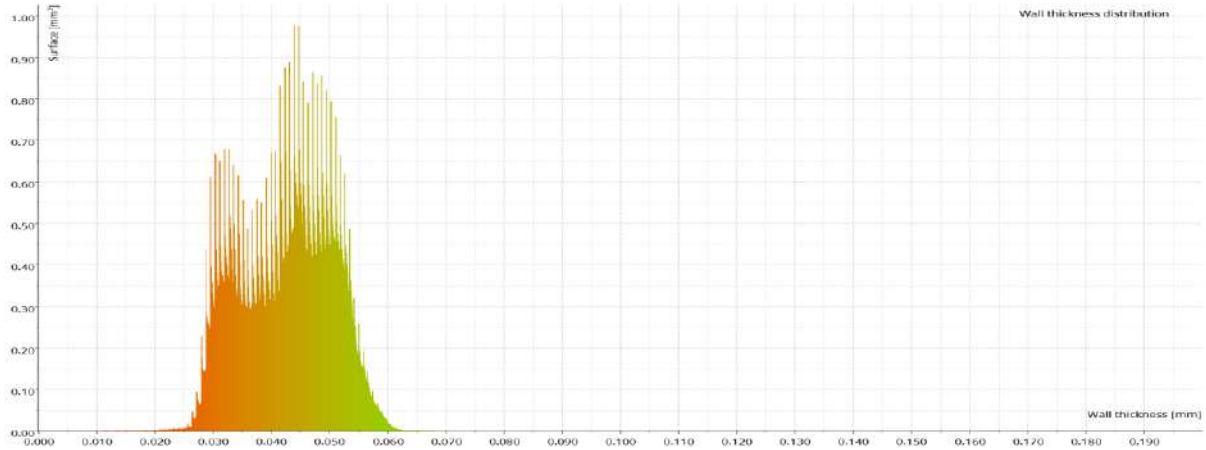


1-rasm. Ikki qatlamli (chapda) va bir qatlamli (o‘ ngda) TiO_2 fotoanodlarning dastlabki rekonstruksiyalari [1].

Lokal qalinlik va yuza bo‘ yicha taqsimot

Bir qatlamli namunaning alohida tasvirida Line: 0.0541 mm yozuvi mavjud [1]. Birlik almashtirish orqali bu qiymat 54,1 μm ga teng. U belgilangan kesim yoki nuqtaga tegishli lokal o‘ lchovdir. Shu bitta qiymat asosida namunaning o‘ rtacha qalinligi, dispersiyasi yoki ishonch oralig‘ ini hisoblash mumkin emas. Qoplama markazidan olingan o‘ lchov chekka zonalarni ham ifodalashi alohida tekshirilishi kerak.

2-rasm. Bir qatlamli fotoanod uchun manbada keltirilgan qalinlik taqsimoti [1]. Abssissa — qalinlik (mm), ordinata — yuza (mm^2).



Gistogrammada ko‘ rinadigan asosiy signal taxminan 0,030–0,055 mm sohada jamlangan; kichikroq signal bu oraliqdan tashqarida ham kuzatiladi. Grafikning 0,03 mm atrofidagi yelkasi va 0,04–0,05 mm oralig‘ idagi balandroq sohasi taqsimotni faqat bitta modal qiymat bilan ifodalash yetarli bo‘ lmasligini ko‘ rsatadi. Bu vizual kuzatuv normal taqsimotni rad etuvchi statistik test o‘ rnini bosmaydi. Ammo simmetriya va bir cho‘ qqililik haqidagi xulosani tekshirishga asos beradi.

Taqsimotdagi yelka sirtning turli zonalari, qoplash yo‘ nalishi, chekka effektlar yoki tasvirni segmentatsiyalash xususiyatlari bilan bog‘ liq bo‘ lishi mumkin. Mazkur ehtimollarni ajratish uchun qalinlik xaritasini fazoviy zonalarga bo‘ lib qayta hisoblash kerak. Faqat gistogramma yordamida qaysi qalinlik qiymati namunaning qaysi joyiga tegishli ekanini tiklab bo‘ lmaydi. Shuning uchun xarita va gistogramma birgalikda saqlanishi morfologik tahlilning muhim talabidir.

Morfometrik baholash mezonlari

Qalinlikning yuzaga nisbatan vaznlangan o‘ rtacha qiymatini aniqlash uchun har bir sinfning reprezentativ qalinligi h_i va unga tegishli yuza A_i olinadi. Teng kenglikdagi tor sinflarda h_i sifatida sinf markazidan foydalanish mumkin; keng yoki notekis sinflarda bu yaqinlashishning ta’siri alohida baholanadi. Vaznlar $w_i = A_i / \Sigma A_i$ tarzida normallashtiriladi. O‘ rtacha qalinlik va taqsimot tarqalishi quyidagicha ifodalanadi.

$$\bar{h}_A = \sum_i w_i h_i; \quad {\sigma_A}^2 = \sum_i w_i (h_i - \bar{h}_A)^2 \quad (1)$$

Bu yerda σ_a o‘ lchangan yuza taqsimotining tavsifiy standart og‘ ishini bildiradi. U mustaqil namunalarning o‘ rtacha qiymati uchun standart xato yoki ishonch oralig‘ i emas. Tomografik qo‘ shni nuqtalar fazoviy bog‘ langanligi sababli juda ko‘ p vokselning mavjudligi ko‘ p mustaqil namuna o‘ lchanganiga tenglashtirilmaydi.

O‘ rtacha qalinliklari turlicha bo‘ lgan namunalardagi nisbiy notekislik variatsiya koeffitsiyenti bilan ifodalanishi mumkin. Texnologik maqsad sifatida oldindan tanlangan [h_-, h_+] qalinlik oralig‘ iga tushuvchi yuza ulushi esa qoplamaning qancha qismi talabga mos ekanini ko‘ rsatadi.

$$CV_A = \frac{\sigma_A}{\bar{h}_A} \times 100\%; \quad F = \frac{\sum_{i \in I} A_i}{\sum_i A_i} \times 100\% \quad (2)$$

Bu yerda $I — h_i$ qiymati [h_-, h_+] oralig‘ iga tushadigan sinflar to‘ plami.

CV_a kamayishi qalinlikning nisbiy tarqalishi torayganini bildiradi, ammo qatlam uzilishlari yo‘ qolganini isbotlamaydi. F[h_-,h_+] uchun chegaralar natijani ko‘ rgandan keyin emas, texnologik talab yoki mustaqil mezon asosida belgilanadi. Ushbu maqolada dastlabki sinf yuzalari mavjud emasligi sababli CV_a va F ning sonli qiymatlari hisoblanmagan; formulalar keyingi eksport tahlili uchun aniq baholash tartibini belgilaydi.

Bir jinslilikni tavsiflashda o‘ rtacha qalinlikka median, kvartillar oralig‘ i va fazoviy xarita ham qo‘ shilishi maqsadga muvofiq. Median taqsimot markazini, kvartillar oralig‘ i esa asosiy yuza ulushi qanchalik keng qalinlik diapazonini egallashini ko‘ rsatadi. Keskin lokal o‘ tishlarni tekshirish uchun qalinlik gradienti xaritasi ishlatilishi mumkin, biroq shovqin va silliqlashning gradientga ta’siri nazorat qilinishi zarur.

1-jadval. Qatlam bir jinsliligini tavsiflovchi ko‘ rsatkichlar

Ko‘ rsatkich	Ifodalaydigan xossa	Talqin chegarasi
Lokal qalinlik	Tanlangan nuqtadagi geometriya	Butun yuzaning o‘ rtachasi emas
Yuza bo‘ yicha o‘ rtacha qalinlik	Taqsimotning vaznlangan markazi	Lokal nuqsonlarni yashirishi mumkin
Variatsiya koeffitsiyenti	Qalinlikning nisbiy tarqalishi	Qatlam uzluksizligini o‘ lchamaydi
Maqsadli oraliqdagi yuza ulushi	Belgilangan qalinlik talabiga moslik	Oldindan belgilangan chegaralarni talab etadi
Qalinlik xaritasi	Notekisliklarning joylashuvi	Rang shkalasi va segmentatsiyaga bog‘ liq

Natijalarning morfologik va texnologik talqini

Ko‘ rib chiqilgan tasvirlar fotoanod sifatini baholashda bitta nominal qalinlik yetarli emasligini ko‘ rsatadi. Qoplamaning ma’lum qismi maqsadli qalinlikka yaqin bo‘ lsa ham, alohida yupqa yoki qalin zonalar saqlanib qolishi mumkin. Bir xil o‘ rtacha qiymatga ega ikki namuna ana shu zonalarning ulushi va joylashuvi bilan farqlanadi. Shu sababli qoplash texnologiyasini taqqoslash uchun o‘ rtacha qiymat, tarqalish va uzluksizlik birgalikda berilishi kerak.

Morfologik notekislik qoplama hosil qilish jarayonidagi pasta yoyilishi, quritish va qatlamlararo qo‘ shilish bilan bog‘ liq bo‘ lishi mumkin. Biroq mazkur omillarning sababiy ta’sirini isbotlash uchun jarayon parametrlarini nazorat qilib o‘ zgartirgan tajribalar zarur. Hozirgi tasvirlar sababni yakuniy aniqlashdan ko‘ ra tekshirilishi kerak bo‘ lgan zonalarni belgilashga xizmat qiladi. Bu yondashuv keyingi tajribada qaysi joylardan kesim olish va qaysi parametrlarni qayd etishni asoslash imkonini beradi.

Qalinlik bir jinsliligi bilan elektron yig‘ ilishi o‘ rtasidagi bog‘ lanish fizik jihatdan muhim bo‘ lsa-da, morfologik tasvirning o‘ zi rekombinatsiya tezligi yoki elektron yashash vaqtini bermaydi. Bunday bog‘ lanishni tekshirish uchun aynan bir namuna identifikatoriga tegishli morfologik va elektrokimyoviy natijalar juftlanishi lozim. Mazkur ish xulosalari esa qoplama geometriyasi va uning baholash mezonlari doirasida shakllantiriladi.

Xulosa

Bir va ikki qatlamli TiO_2 fotoanodlar haqidagi tomografik materialning ikkilamchi tahlili qoplama arxitekturasi, lokal qalinlik va yuza bo‘ yicha taqsimot turli morfologik ko‘ rsatkichlar ekanini ko‘ rsatdi. Qatlamlar sonining o‘ zi bir jinslilik darajasini belgilamaydi; xulosa bir xil mezon bilan olingan qalinlik va uzluksizlik ma’lumotlariga tayanishi kerak.

Tasvirdagi 54,1 μm qiymat lokal o‘ lchov sifatida talqin qilindi. Yuzaga bog‘ langan gistogrammadagi asosiy soha va qo‘ shimcha yelka taqsimot shaklini sonli tekshirish zarurligini ko‘ rsatadi. Mavjud tasviriy material asosida yangi o‘ rtacha qalinlik, standart og‘ ish yoki normal taqsimot parametrlari da’vo qilinmadi.

Qatlam bir jinsliligini baholash uchun yuzaga nisbatan vaznlangan o‘ rtacha qalinlik, tavsifiy standart og‘ ish, variatsiya koeffitsiyenti va belgilangan oraliqdagi yuza ulushini birgalikda qo‘ llash asoslandi. Ushbu mezonlarni fazoviy xarita va segmentatsiyaga sezgirlik tekshiruvi bilan birlashtirish TiO_2 qoplamalarining morfologik sifatini izchil taqqoslash imkonini beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Mamatkarimov O. O., Sharibaev N. Yu., Abdukarimov A. A., Sharipbaev S. S., Ergashov A. Q. Three-dimensional X-ray tomographic analysis of single- and bilayer TiO_2 photoanodes for dye-sensitized solar cells. Tahlil uchun taqdim etilgan mualliflar qo‘ lyozmasi.

2. Sharipbaev S. S. et al. Development of a single-layer TiO_2 photoanode for DSSCs with structural and photovoltaic analysis. Results in Physics. 2026. Article 108693. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2026.108693

3. Maire E., Withers P. J. Quantitative X-ray tomography. International Materials Reviews. 2014;59(1):1–43. https://doi.org/10.1179/1743280413Y.0000000023

4. Withers P. J., Bouman C., Carmignato S. et al. X-ray computed tomography. Nature Reviews Methods Primers. 2021;1:18. https://doi.org/10.1038/s43586-021-00015-4