



KO'P QATLAMLI QUYOSH ELEMENTLARINI MODELLASHTIRISH

Esonboyev Farruxbek Fayzullo o'g'li

Andijon davlat universiteti

1-bosqich magistranti

E-mail: esonboyevfarrux1202@gmail.com

Telefon raqam: +998934944460

Annotatsiya. Maqolada ko'p qatlamli quyosh elementlarini modellashtirishning zamonaviy optik–elektr yondashuvi yoritiladi. Qatlamlar bo'yicha spektral yutilish $A(\lambda)$, generatsiya profili $G(x)$ hamda zaryad tashuvchilar transporti (drift–diffusion) ni birlashtirgan hisoblash zanjiri taklif etiladi. Interfeys rekombinatsiyasi, qator (R_s) va shunt (R_{sh}) qarshiliklari, qatlam qalinligi hamda taqiqlangan zona kengligi (E_g) kabi omillarning J–V xarakteristika, tashqi kvant samaradorligi (EQE) va foydali ish koeffitsiyentiga (FIK) ta'siri tahlil qilinadi. Tadqiqot natijalari tandem elementlarda asosiy muammo — tok mosligi va optik yo'qotishlarni kamaytirish ekanini ko'rsatadi. Optimallashtirish uchun qatlam qalinliklarini ko'p mezonli tanlash hamda interfeys nuqson zichligini pasaytirish muhim ekani asoslanadi.

Kalit so'zlar: ko'p qatlamli quyosh elementi, tandem, multi-junction, optik modellashtirish, drift–diffusion, SCAPS-1D, TCAD, EQE, J–V, tok mosligi.

KIRISH

Quyosh fotoelektrik texnologiyalari energiya ta'minotini diversifikatsiya qilish va karbon izini kamaytirish nuqtayi nazaridan strategik yo'nalish bo'lib, O'zbekistonda ham qayta tiklanuvchi energiya loyihalari miqyosini kengaytirish bo'yicha huquqiy va amaliy choralar izchil kuchayib bormoqda. Ko'plab hududlarda yuqori insolatsiya resurslari mavjudligi fotoelektrik tizimlar loyihalanishini ilmiy asoslashni talab qiladi. Bunday sharoitda yuqori samaradorlikka erishishning



istiqbolli yo‘li — ko‘p qatlamli quyosh elementlaridir. Ko‘p qatlamli elementlarning g‘oyasi quyosh spektrini bir necha Eg qiymatlariga ega absorber qatlamlar orasida taqsimlab, foton energiyasining issiqlikka ketadigan yo‘qotishlarini kamaytirishga asoslanadi. Biroq qatlamlar soni ortishi bilan optik moslash, tok mosligi, interfeys nuqsonlari va termomexanik barqarorlik kabi masalalar murakkablashadi. Shu sababli modellashtirish dizayn siklining ajralmas qismi bo‘lib, material tanlashdan tortib texnologik parametrlarni optimallashtirishgacha bo‘lgan bosqichlarda vaqt va resurslarni tejaydi.

1-rasm. Ko‘p qatlamli (tandem) quyosh elementining soddalashtirilgan qatlamlar sxemasi

Orqa kontakt (Al/Ag)
HTL (a-Si:H/Poly-Si)
Pastki absorber (Si, $E_g \approx 1.12$ eV)
Rekombinatsiya/tunnel qatlam
Yuqori absorber (Perovskit, $E_g \approx 1.7$ eV)
ETL ($\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$)
Old kontakt (ITO/Ag)

TADQIQOT MAQSADI VA VAZIFALARI

Ma’naviy-texnik maqsad — ko‘p qatlamli quyosh elementining optik yutilish–generatsiya–transport zanjirini yagona hisoblash doirasida qurish hamda tandem struktura parametrlarini optimallashtirish uchun amaliy tavsiyalar ishlab chiqishdir.

- 1) spektral yutilishni qatlamlar kesimida baholash;
- 2) $G(x)$ profilini hosil qilish va drift–diffusion tenglamalarini yechish;
- 3) $J-V$, EQE va $P_{\max}$ ko‘rsatkichlarini hisoblash;
- 4) sezgirlik tahlili asosida samaradorlikni cheklovchi omillarni aniqlash.

TADQIQOT METODLARI

Ko‘p qatlamli qurilmani modellashtirish odatda ikki darajali yondashuvni talab qiladi.

- 1) optik hisob;

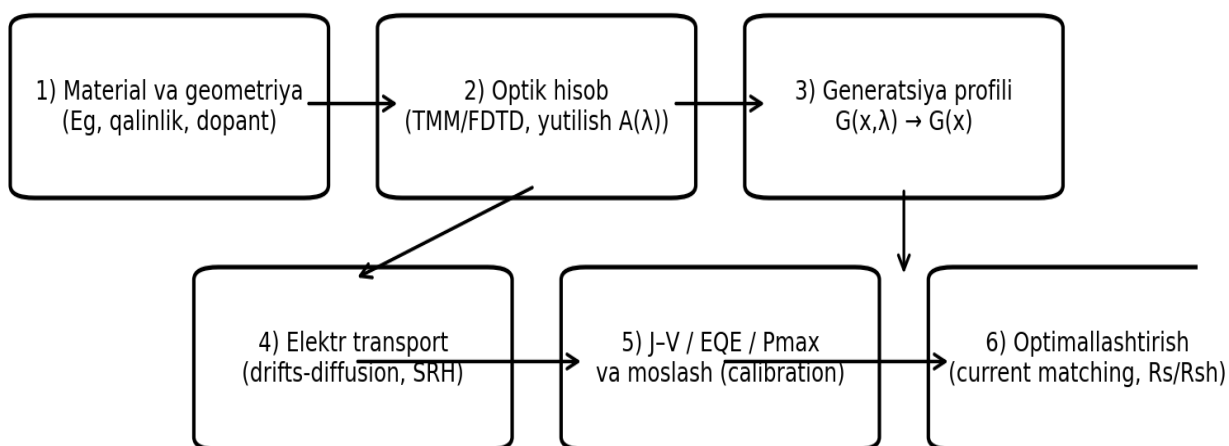


2) elektr transport hisoblari.

Optik blokda qatlamlarning sinish ko'rsatkichi $n(\lambda)$ va so'nish koeffitsiyenti $k(\lambda)$ ga tayangan holda transfer-matritsa usuli (TMM) yoki raqamli optik simulyatsiya (FDTD/FEM) orqali $A(\lambda)$ aniqlanadi. So'ngra fotogeneratsiya profili $G(x, \lambda) = \Phi(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) \cdot \exp(-\alpha x)$ ko'rinishida topilib, spektr bo'yicha integrallab $G(x)$ olinadi.

Elektr blokda zaryad tashuvchilar konsentratsiyalari $n(x)$, $p(x)$ uchun drift-diffusion tenglamalari va Puasson tenglamasi birgalikda yechiladi. Rekombinatsiya jarayonlari uchun Shockley-Read-Hall (SRH), radiatsion hamda Auger mexanizmlari hisobga olinadi. Interfeyslar uchun nuqsonlar zichligi D_{it} va sirt rekombinatsiya tezligi S parametr sifatida kiritiladi. Natijada J-V xarakteristika, ochiq zanjir kuchlanishi V_{oc} , qisqa tutashuv toki J_{sc} , to'ldirish faktori FF va samaradorlik $\eta = (V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF) / P_{in}$ baholanadi. Amaliy jihatdan ushbu ishda hisoblash jarayoni algoritmik tarzda ifodalandi va parametrlar bo'yicha sezgirlik tahlili o'tkazish uchun iteratsion optimallashtirish tavsiya etildi.

2-rasm. Ko'p qatlamli quyosh elementini modellashtirishning tavsiya etiladigan ish jarayoni



1-jadval. Tandem (Perovskit/Si) strukturasi uchun namunaviy parametrlar



Qatlam	Material (misol)	Eg (eV)	Qalinlik (nm)	Izoh
Old kontakt	ITO / Ag	—	150–300	Shaffof elektrod
ETL	SnO ₂ / TiO ₂	3.2–3.6	20–60	Elektron tashuvchi
Yuqori absorber	Perovskit	1.65–1.75	400–700	Spektrning 300–800 nm qismi
Rekomb. qatlam	Tunnel / ITO	—	5–30	Seriyali ulanish
Pastki absorber	Kristall Si	1.12	150000– 200000	800–1100 nm qismi
HTL	a-Si:H / NiOx	—	10–40	Teshik tashuvchi
Orqa kontakt	Al / Ag	—	500–1000	Metall elektrod

NATIJALAR VA MUHOKAMA

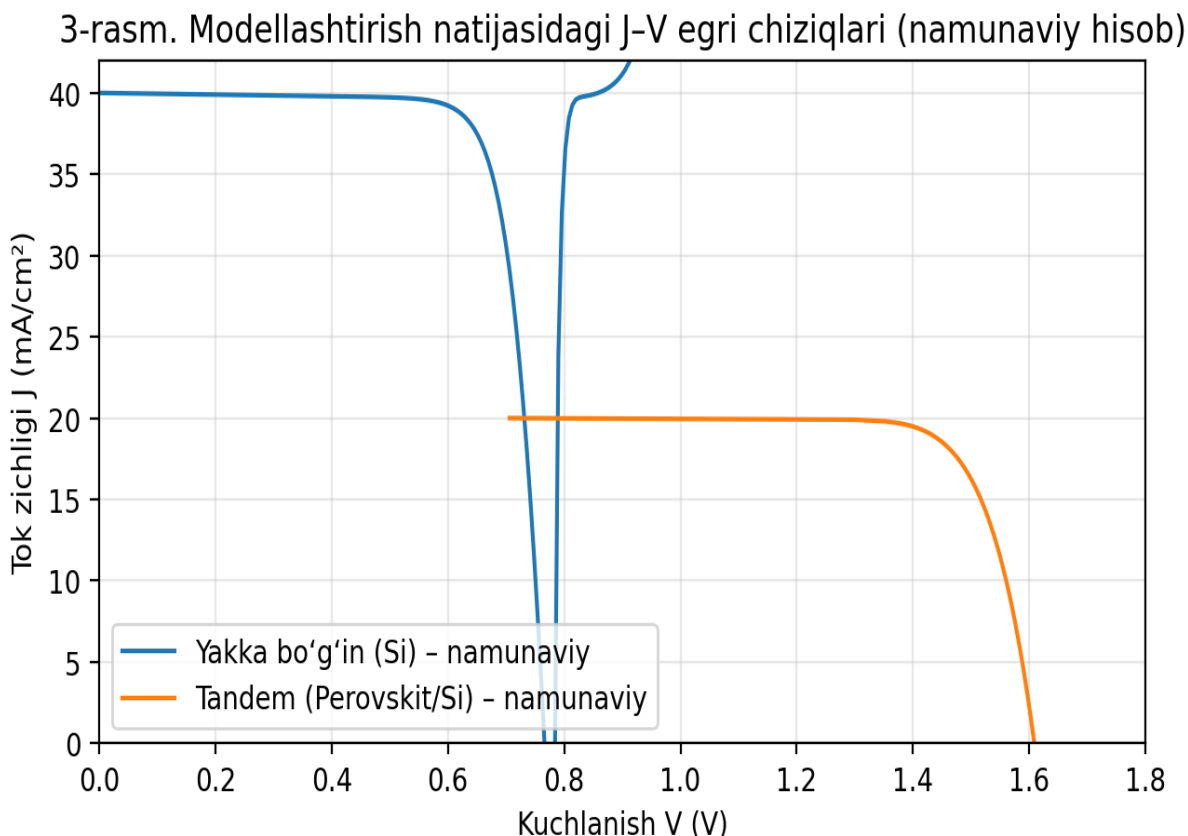
Sezgirlik tahlili uchta asosiy “tor bo‘g‘in”ni ajratib ko‘rsatadi.

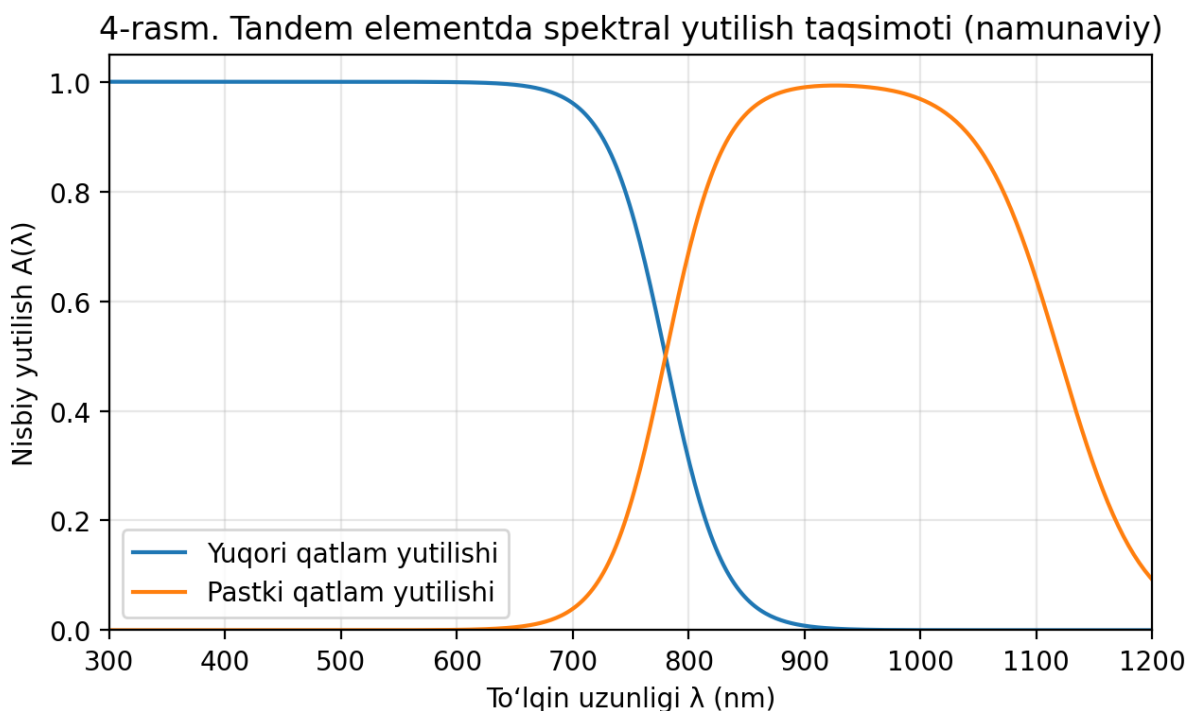
- 1) Tok mosligi. Tandem element seriyali ulanganligi sababli umumiy tok kichik tokli bo‘g‘in bilan cheklanadi. Yuqori absorber qalinligini oshirish J_{sc} ni oshirishi mumkin, ammo pastki bo‘g‘in foton oqimini kamaytiradi. Shuning uchun qalinliklar “muvozanat nuqtasi”da tanlanishi zarur.
- 2) Interfeys nuqsonlari. Dit va S ortishi V_{oc} hamda FF ni keskin pasaytiradi. Ayniqsa rekombinatsiya/tunnel qatlam atrofidagi sirt holatlari umumiy yo‘qotishlarga sezilarli hissa qo‘shadi.
- 3) R_s/R_{sh} . kontaktlar va qatlamlarning elektr qarshiligi (R_s) ortishi P_{max} ni



kamaytiradi, shunt oqish yo‘llari (R_{sh}) esa qorong‘i tokni oshirib FF ni yomonlashtiradi.

3-rasmda yakka bo‘g‘inli (Si) va tandem (Perovskit/Si) strukturalar uchun namunaviy J–V egri chiziqlari keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki, tandemda kuchlanish yig‘iladi (V_{oc} ortadi), ammo tok mosligi sababli J qiymati cheklanishi mumkin. Optik yo‘qotishlarni kamaytirish uchun antirefleks qoplamalar, teksturalangan sirtlar hamda shaffof elektrodning spektral o‘tkazuvchanligini optimallashtirish muhim. 4-rasm spektral yutilishning qatlamlar bo‘yicha taqsimlanishini ko‘rsatadi: yuqori qatlam qisqa to‘lqin uzunliklarda asosiy yutilishni ta‘minlaydi, pastki kremniy qatlam esa uzun to‘lqinli fotonlarni qabul qiladi. Shu tarzda issiqliklash yo‘qotishlari kamayadi va nazariy jihatdan yuqori samaradorlikka erishish imkoni paydo bo‘ladi.





2-jadval. Quyosh elementlarini modellashtirishda ko‘p uchraydigan dasturiy yondashuvlar (qisqacha)

Platforma	Kuchli tomoni	Cheklovi	Qo‘llanish holati
MATLAB/Simulink	Tizim darajasida PV modul/invertor modeli; tez prototiplash	Material/fizika chuqurligi cheklangan	Stansiya va modul ish rejimi
SCAPS-1D / 1D solverlar	Yupqa qatlam va hetero-o‘tishlar uchun tez elektr hisob	3D geometriya va murakkab optikaga mos emas	Yupqa qatlam, interfeys tahlili
TCAD (Sentaurus va b.)	Puasson + drift–diffusion;	Hisoblash resursi talabchan	Si va murakkab strukturalar



	texnologik parametrlarga yaqin		
Python (pplib va h.k.)	Ochiq kod; iqlim/insolatsiya bilan integratsiya	Material darajasidagi PV hujayrani to'liq bermaydi	Resurs baholash va energiya prognozi

XULOSA

Ko'p qatlamli quyosh elementlarini modellashtirish optik va elektr jarayonlarni birlashtirgan holda olib borilganda dizayn qarorlarini tez va aniq asoslash imkonini beradi. Tadqiqotda tandem strukturalar samaradorligini asosan uch omil cheklashi ko'rsatildi. Tok mosligi, interfeys rekombinatsiyasi va R_s/R_{sh} yo'qotishlari. Amaliy tavsiya sifatida qatlam qalinliklarini spektral yutilish bo'yicha muvozanatlash, interfeyslarni passivatsiya qilish orqali D_{it} va S ni kamaytirish, kontakt/elektrodlar qarshiligini pasaytirish hamda antirefleks yechimlarni qo'llash taklif etiladi. Kelgusi ishlar uchun optik (TMM/FDTD) va elektr (TCAD) hisoblarni birlashtirgan ko'p fizikali platforma hamda real tajriba ma'lumotlari bilan kalibrlash muhim yo'nalish sifatida tavsiya qilinadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Safarov A. va boshqalar. "Quyosh fotopanellarining samaradorligiga ta'sir qiluvchi omillarni modellashtirish". (Matlab/Simulink asosida). 2024. (PDF).
2. Roziqov J.Yu. o'g'li va boshqalar. "Quyosh radiatsiyasini Python dasturlash yordamida modellashtirish va eksperimental ma'lumotlar bilan taqqoslash". Research Focus International Scientific Journal, 2025, 4(11), 80–86.
3. Mirzaalimov N.A. o'g'li. "Kremniy quyosh elementlari asosida 3D formatli fotoelektrik modullarini ishlab chiqish". Avtoreferat, 2023.



4. (ZiyoNET) “Kremniy asosli p–n o‘tishli turli strukturalarga ega quyosh elementlarining modellashtirish natijalari” (ilmiy-texnik material). 2024. (PDF).
5. Buxoro davlat universiteti. “Ilmiy axborot” (2024, №5) to‘plamida: CsPbI₃ perovskit quyosh elementlarining optik va fotovoltaik parametrlari bo‘yicha maqola. 2024.
6. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori: PQ-57-son, 16.02.2023. “2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya loyihalari ...” (Lex.uz).
7. Gazeta.uz. “O‘zbekistonga ayrim quyosh panellari importi 2025-yildan cheklanadi” (normativ talablar va bozor sifati haqida). 15.11.2024.
8. Gazeta.uz. “O‘zbekistonda umumiy quvvati 2,4 GVt bo‘lgan oltita quyosh va shamol loyihasi ...” 28.12.2023.
9. (ZiyoNET) “Yarimo‘tkazgichli qurilmalar, jumladan quyosh elementi modellashtirishning optik va elektr bosqichlari” (o‘quv-uslubiy material). 2023.
10. (ZiyoNET) “Quyosh issiqlik/energiyaviy tizimlarida matematik modellashtirish bo‘yicha metodik materiallar” (PDF).
11. (Sputnik O‘zbekiston) “Quyosh batareyalari samaradorligi bo‘yicha yangi rekord o‘rnatildi” (perovskit texnologiyasi haqida). 14.08.2017.
12. (Sunchees/UZ) “Quyosh batareyasining samaradorligi 29.52% ga etadi” (tandem xujayra haqida umumiy sharh).