

Article

Har xil kovak tashuvchi qatlamlar yordamida perovskit quyosh elementlarning morfologiya va strukturasini yaxshilash

B.G'. Xidirov ¹ , S.R. Reymbayeva ² , L.R. Nurumbetova ³ , M.X. Imomov ^{*1} 

¹ Kondensirlangan muhitlar optikasi laboratoriyasi, U.A. Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, Toshkent, 100125, O'zbekiston

² Fizika fakulteti, M. Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti, Toshkent, 100174, O'zbekiston

³ Temir yo'l transporti muhandisligi fakulteti, Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent, 100204, O'zbekiston
boburbekhidirov94@gmail.com (B.X.), reymbayeva71@mail.ru (S.T.), lobar.nurumbetova@gmail.com (L.R.), muhibjonimomov@gmail.com (M.I.)

* Correspondence: muhibjonimomov@gmail.com; Tel.: +998 97 7280507 (M.I.)

Xulosa:

Bu ishda PEDOT:PSS va PTAA materiallarining kovak tashuvchi qatlam(KTQ) sifatida morfologik va strukturaviy xususiyatlari tahlil qilindi. Optik o'lchovlar PTAA plyonkasi ko'rinadigan yorug'lik sohasida yuqori o'tkazuvchanlikka ega ekanini ko'rsatdi. Atom kuchlari mikroskopiya(AFM) va skanerlovchi elektron mikroskopiya(SEM) tasvirlari PTAA asosida hosil qilingan perovskit quyosh element(PQE)larida perovskit tarkibidagi donachalar hajmi kattaroq va zichroq bo'lishini tasdiqladi. PTAA ishlatilgan PQElarida zaryadlar yaxshi ajraladi va energiya ko'proq saqlanadi. Shuning uchun ham, bu material PEDOT:PSS ga qaraganda yaxshiroq va kelajakda PQElar uchun istiqbolli variant deb qaralmoqda.

Kalit so'zlar: PTAA, SEM, AFM, PEDOT:PSS, perovskit quyosh elementlari.

Improving the morphology and structure of perovskite solar cells using different hole-carrying layers

Boburbek G.Khidirov ¹ , Sanobar R.Reymbayeva ² , Lobar R.Nurumbetova ³ , Muhibjon Kh.Imomov ^{*1} 

¹ Laboratory of Optics of Condensed Matter, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov, Tashkent, 100125, Uzbekistan

² Faculty of Physics, National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, 100174, Uzbekistan

³ Faculty of Railway Transport Engineering, Tashkent State Transport University, Tashkent, 100167, Uzbekistan

boburbekhidirov94@gmail.com(B.Kh.), reymbayeva71@mail.ru(S.T.), lobar.nurumbetova@gmail.com(L.R.), muhibjonimomov@gmail.com (M.I.)

Abstract:

In this work, the morphological and structural properties of PEDOT:PSS and PTAA materials as hole-transporting layers (HTLs) were analyzed. Optical measurements showed that the PTAA film has high transmittance in the visible light region. Atomic Force Microscopy (AFM) and Scanning Electron Microscopy(SEM) images confirmed that the perovskite grain size and density in the perovskite composition of the PTAA-based perovskite solar cells (PSCs) were larger. The PSCs using PTAA had better charge separation and higher energy storage. Therefore, this material is better than PEDOT:PSS and is considered a promising option for PSCs in the future.

Keywords: PTAA, SEM, AFM, PEDOT:PSS, perovskite solar cells

Kirish

So'nggi yillarda perovskit asosidagi quyosh elementlari (PQE) fotovoltaika sohasida shug'ullanayotgan ko'plab tadqiqotchilar e'tiborini tortmoqda. Sababi, ularning yuqori yorug'lik

Iqtibos: B.G'. Xidirov, S.R. Reymbayeva, L.R. Nurumbetova, M.X. Imomov. Har xil kovak tashuvchi qatlamlar yordamida perovskit quyosh elementlarning morfologiya va strukturasini yaxshilash. 2026, 3,1, 1. <https://doi.org/>

Olingan: 18.01.2026

Tuzatilgan: 30.01.2026

Qabul qilingan: 01.02.2026

Nashr qilingan: 04.02.2026

Copyright:



yutilish koeffitsienti, optimal taqiqlangan soha kengligi va oddiy texnologik usullar orqali ishlab chiqarish imkoniyati bu turdagi qurilmalarni kelajak uchun istiqbolli energiya manbai sifatida ko'rsatmoqda [1]. Biroq, PQE samaradorligini oshirishda faqat perovskit qatlami emas, kovak tashuvchi qatlam (KTQ) materiali ham muhim. KTQ materiallar zaryadlarni tezroq va samaraliroq tashishga yordam beradi, rekombinatsiyani kamaytiradi hamda perovskit qatlamining yaxshiroq kristallanish jarayoniga ta'sir ko'rsatadi[2–4]. Hozirgi kunda, ko'p ishlatiladigan PEDOT:PSS (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)) materiali yuqori o'tkazuvchanlikka ega bo'lsa-da, uning beqarorligi va namlikka sezgirliги sababli, muqobil material sifatida PTAA(Poly[bis(4-phenyl)(2,4,6-trimethylphenyl)amine]) kabi organik polimer asosidagi materiallar keng tadqiq qilinmoqda [5]. Chunki, PTAA qatlamining yuqori optik shaffofligi va sirt energiyasining mosligi perovskit faol qatlamining bir tekis yadrolanishini ta'minlab, donachalarning yirik va tartibli kristall holatda o'sishiga yordam beradi. Avvalgi tadqiqotlarda ko'rsatib o'tilgandek, taglik yuzasining silliqliги yoki notekis bo'lishi perovskit kristallarining o'sishiga va donachalar kattaligiga ta'sir qiladi [6–8]. Shu jihatdan, AFM (Atom kuch mikroskopiyasi) tasvirlari PEDOT:PSS va PTAA bilan modifikatsiyalangan tagliklarning sirt xususiyatlari bir-biridan farq qiladi: PTAA yuzasi nisbatan notekis bo'lib, bu kristallar yadrolanishi va donachalarning kattaroq bo'lib o'sishiga yordam beradi. SEM (Skanerlovchi elektron mikroskopiya) tasvirlari ham ushbu natijani tasdiqlaydi. PTAA asosida tayyorlangan perovskit faol qatlamlari zichroq va yirik donachalardan iborat bo'lib, bunday morfologiya zaryad tashuvchilarning uzluksiz va samarali transportini ta'minlaydi hamda interfeys va donalar chegaralarida yuzaga keladigan rekombinatsiya jarayonlarini kamaytiradi. Bu holat qurilmaning umumiy samaradorligini oshirishda muhim [9–11]. XRD (Rentgen difraksiyasi) spektrlari esa PTAA asosida hosil qilingan perovskit plyonkasida kristall fazaning yuqoriroq diffraksion piklari mavjudligini ko'rsatadi. Bu kristallarning yaxshiroq tuzilganini va fazaning barqarorligini anglatadi. Bu maqolada PTAA va PEDOT:PSS materiallarining kovak tashuvchi qatlam sifatidagi xususiyatlarini solishtirishga, asosan ularning strukturaviy va morfologik ta'sirini o'rganishga qaratilgan.

Materiallar va usullar

ITO shisha tagliklar dastlab ketma-ket aseton, dionizatsiyalangan suv va izopropanol bilan ultratovushli vannada har birini 10 daqiqa davomida tozalandi. Keyin, ITO shisha azot (N) gazi bilan quritildi va 10 daqiqa davomida kislorod (O) plazmasi yordamida ishlov berildi. PEDOT:PSS eritmasi ITO tagliklar ustiga 5000 aylanish/daqiqa (rpm) tezlikda 30 soniya davomida spin-coating qilindi va 140°C haroratda 10 daqiqa davomida qizdirildi. Shu jarayon bilan parallel ravishda PTAA eritmasi (toluolda 5 mg/mL konsentratsiyada) alohida tayyorlanib, ITO tagliklar ustiga u ham 5000 rpm tezlikda 40 soniya davomida sping-coating qilindi va 105°C da 10 daqiqa davomida qizdirildi. PTAA va PEDOT:PSS bilan ishlashning butun jarayoni azotli muhitdagi glovebox ichida amalga oshirildi.

MAPbI perovskit prekursor eritmasini tayyorlash uchun MAI va PbI₂ 1 : 1 molar nisbatda N,N dimetilformamid (DMF) va dimetilsulfoksid (DMSO) (9 : 1 hajmiy nisbat) aralashmasida aralashtirilib, eritma hosil qilindi. MAPbI perovskit prekursor eritmaları xona haroratida 12 soat davomida uzluksiz aralashtirilib, barcha qattiq moddalarning to'liq erib ketishiga erishildi.

N-metil-2-pirolidon (NMP) qoshimchasi perovskit prekursor eritmasiga 5% hajmiy nisbatda spin-coating jarayonidan oldin qoshildi[12]. Tayyor perovskit eritmasi PEDOT:PSS yoki PTAA qatlami ustiga 4000 rpm tezlikda 30 soniya davomida sping-coating usulida qoplandi. Sping-coating jarayonida perovskit yuzasiga toluol tomizilib (anti-solvent eritmasi), faol qatlam hosil qilindi, va keyin toluol qo'shilgan perovskit faol qatlamlari 100°C haroratda 10 daqiqa davomida pechkada qizdirildi. Qizdirib bo'lingandan keyin, perovskit faol qatlami ustiga taxminan 30 nm qalinlikdagi [6]-fenil-C61-butirik kislota metil efiri (PCBM) qatlami 18 mg/mL konsentratsiyada 1500 rpm tezlikda 20 soniya davomida sping-coating usuli bilan qoplandi. Keyin namuna termik bug'latish kamerasiga(evaporator, AJA Engineering) otkazilib, 100 nm qalinlikdagi alyuminiy (Al) elektrod qatlami bug'latilib qoplandi(1-rasm).

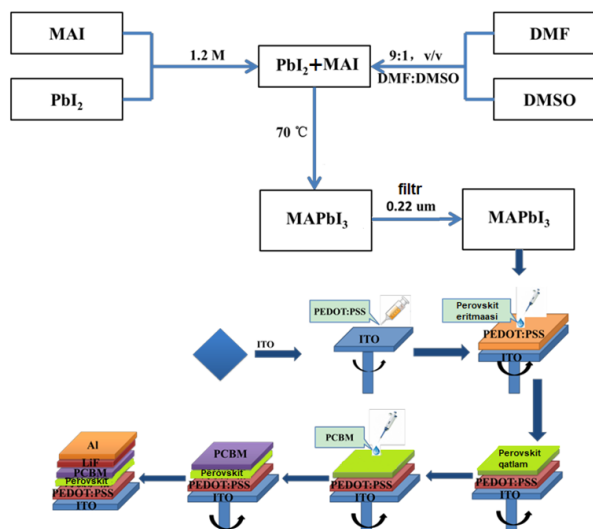


Figure 1. Preparation process of MAPbI₃ based perovskite solar cell

Rasm 1. MAPbI₃ asosli perovskit quyosh elementining tayyorlanish jarayoni

ITO shisha ustidagi perovskit faol qatlamlarning yutilish spektrlari 400 dan 850 nm gacha bolgan to'liq uzunlik diapazonida Shimadzu UV-1280 spektrofotometri yordamida olchandi. Statsionar holatdagi fotoluminessensiya (FL) spektrlari Ocean Optics HR 2000+ spektrometri yordamida, 507 nm to'liq uzunlikda olchandi. Faol qatlamlarning sirt morfologiyasi skanerlovchi elektron mikroskop (SEM, Hitachi S-4800) yordamida tahlil qilindi. Qurilmalarning tok-kuchlanish (J-V) xarakteristikalari 1,5G AM yorug'lik sharoitida (100 mVt/sm²), Keithley 2420 manba-olchagich va Newport quyosh nurlanish simulyatori yordamida olchandi. Yorug'lik intensivligi standart kremniy quyosh elementi yordamida kalibrlandi.

Natijalar

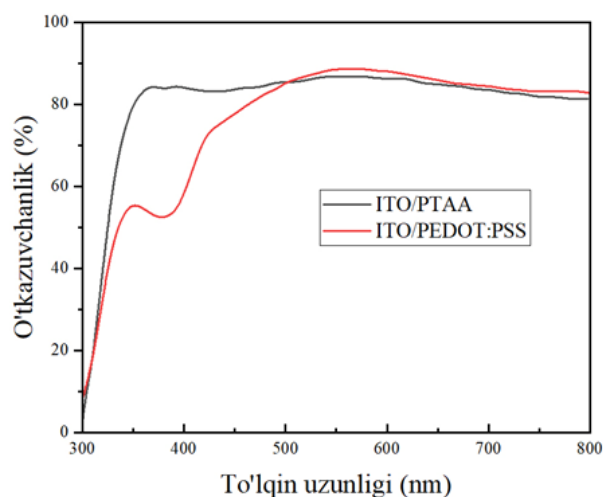


Figure 2. ITO/ PTAA va ITO/PEDOT:PSS o'tkazuvchanlik spektrlari

Rasm 2. ITO/ PTAA va ITO/PEDOT:PSS o'tkazuvchanlik spektrlari

2-rasmda turli faol qatlamli tagliklarning o'tkazuvchanligi sinovdan o'tkazilib, ularning strukturaviy xususiyatlari tavsiflandi. ITO/PEDOT:PSS va ITO/PTAA ning o'tkazuvchanlik spektrlarida, ikkala material ham ko'rinadigan yorug'lik sohasida yuqori o'tkazuvchanlikni qayd qildi. Ammo, butun spektr oralig'ida ITO/PTAA ni qisqa to'liq uzunliklarida(300-450 nm) ITO/PEDOT:PSS bilan solishtirganda o'rtacha 15-20 % gacha yaxshiroq natija berdi. To'liq uzunligi taxminan 500-800 nm oraliqdagi sohada esa ikki egri chiziq deyarli bir-biriga ustma-ust

tushdi. Bu yerda, faol qatlam o'tkazuvchanligi tahlili shuni ko'rsatadiki, ITO/PTAA quyosh nurining ko'p qismini deyarli yutmaydi va yorug'likni perovskitning faol qatlamiga minimal yo'qotish bilan o'tkazadi. Bu holat, PTAA ning taqiqlangan soha kengligi va ko'rinadigan spektr sohasida past yutilish koeffitsientiga ega ekanligi bilan izohlanadi.

Bundan tashqari, PTAA ning silliq va bir jinsli faol qatlam hosil qilishi yorug'likning interfeysda sochilishini hamda ichki optik yo'qotishlarni kamaytiradi. Natijada, PTAA interfeysining foton yo'qotishlarini kamaytirib, perovskite faol qatlamiga yorug'likni samaraliroq yetkazishini tasdiqlaydi. Shu sababli, PTAA asosidagi tuzilmalarda qurilmaning energiya o'zgartirish samaradorligi ortadi.

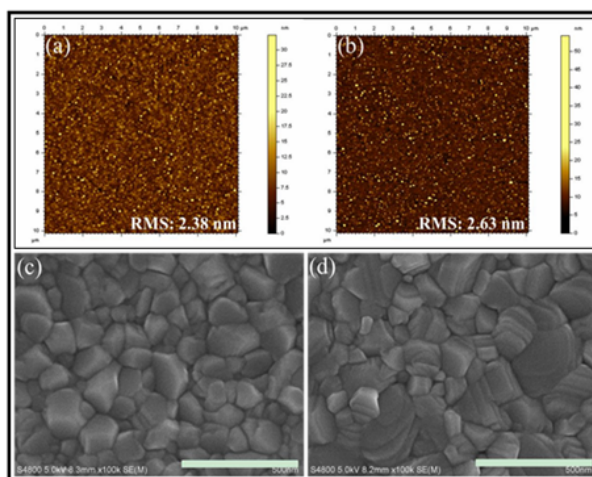


Figure 3. AFM images of (a) PEDOT:PSS and (b) PTAA, SEM images of (c) PEDOT:PSS/perovskite layer and (d) PTAA/perovskite layer

Rasm 3. (a) PEDOT:PSS va (b) PTAAning AFM tasvirlari, (c) PEDOT:PSS/perovskit qatlami va (d) PTAA/perovskit qatlamining SEM tasvirlari

Faol qatlam yuzasining nanomasshtabdagi morfologik xususiyatlarini aniqlash maqsadida AFM qo'llanildi[13].

AFM (Atomic Force Microscope)-bu namuna sirtini atom va nanometr darajasida tahlil qilish uchun qo'llaniladigan o'lchov asbobidir. U asosan faol qatlam yuzasining g'adirdirirligini(notekisligini) ko'rsatish uchun atomlar orasidagi Van der Waals kuchidan foydalanadi. SEM (Scanning Electron Microscope) namunaning sirt morfologik xususiyatlarini aniqlashda ishlatiladi. Uning asosiy printsiplari shundaki, yuqori energiyali elektronlar nurlari namuna yuzasini bombardimon qiladi va tasvirlar elektromagnit nurlanish orqali hosil bo'ladi[14,16,17]. Demak, SEM sirtning morfologiyasini sifat jihatdan aniqlasa, AFM uni miqdoriy jihatdan tavsiflaydi. Shuning uchun, bu ikki asbob birgalikda qo'llanganda perovskit faol qatlam sifatini to'liq va ishonchli tahlil qilish imkonini beradi. 3-rasm (a) va (b) mos ravishda ITO shisha sirtiga yotqizilgan PEDOT:PSS va PTAA faol qatlamning AFM tasvirlariga ko'ra, ularning o'rtacha kvadrat (RMS) qiymatlari mos ravishda 2,38 nm va 2,63 nm ni tashkil qiladi. Bu ikki qatlam ham nanometr darajasida silliq sirtga ega ekanini bildiradi. Ammo, PTAA biroz yuqoriroq RMS qiymatga ega bo'lib, sirt mikro-notekisliklari PEDOT:PSS bilan taqqoslaganda ko'proq ekanini ko'rsatadi. Shu rasmning (c) va (d) SEM tasvirlaridan PEDOT:PSS/perovskit va PTAA/perovskit tizimlarining solishtirganimizda: PEDOT:PSS ustiga yotqizilgan perovskit faol qatlamida donachalar nisbatan mayda va zich joylashgan bo'lib, ayrim joylarda donachalar chegaralari yaqqol ko'rinadi. Bu holat interfeysda nuqsonlar va rekombinatsiya markazlarining ko'proq bo'lish ehtimolini anglatadi. Aksincha, PTAA ustida hosil bo'lgan perovskit faol qatlamida donachalar yirikroq, shakli aniq va bir-biri bilan yaxshiroq tutashgan. Sirt yanada kompakt va bir tekis bo'lib, donachalar chegaralari kamaygan. Bunday morfologiya zaryad tashuvchilarning harakatini osonlashtiradi va interfeysdagi rekombinatsiyani kamaytiradi. Demak, AFM natijalari ikkala transport qatlami ham silliq ekanligini, SEM tasvirlari PTAA/perovskit tizimida perovskit kristallari yirikroq va sifatliroq shakllanishini isbotlaydi. Bu esa PTAA asosida tayyorlangan qurilmalarda yuqoriroq energiya o'zgartirish samaradorlik va pastroq rekombinatsiya mavjudligini bildiradi.

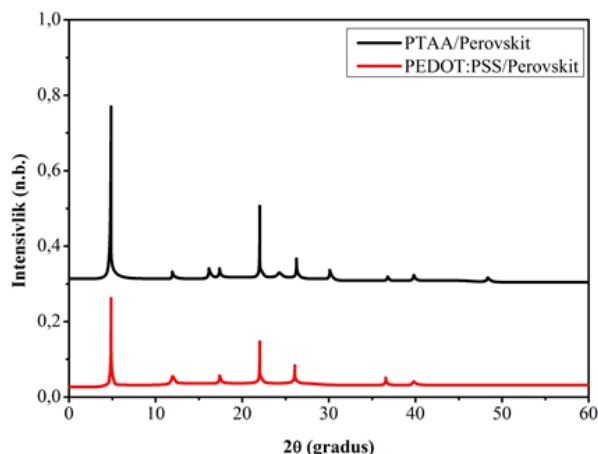


Figure 4. XRD spectra of perovskite films deposited on various hole-carrying layers

Rasm 4. Har xil kovak tashuvchi qatlamlar ustiga yotqizilgan perovskit faol qatlamlarining XRD spektrlari

4-rasmdan ko'rinib turibdiki, PEDOT:PSS/Perovskit va PTAA/Perovskitlardan tayyorlangan perovskit plyonkalarining XRD tasvirlarida MAI va PbI₂ bilan bog'liq diffraksiya piklari ko'rinmaydi, bu perovskit plyonkalarini tayyorlash jarayonida MAI va PbI₂ to'liq MAPbI₃ ga aylanganini ko'rsatadi. 4-rasmda uchta kristall tekislik (110), (220) va (312) ga mos ravishda 2 14,17°, 28,49° va 31,90° da nisbatan yuqori uchta diffraksiya pikki mavjud bo'lib, ular ortorombik strukturani tashkil qiladi. Berilgan XRD grafigidagi, qora chiziq ya'ni PTAA/perovskit namunasi uchun difraksiyon piklarning intensivligi ancha yuqori va aniq shakllangan. Bu holat perovskit plyonkasida kristallik darajasi yuqori ekanini, ya'ni donachalarning yaxshiroq tartiblanganini va panjara strukturasi yaxshi shakllanganini anglatadi. Bu yerda, piklarning keskin va baland bo'lishi kristall o'lchamining kattalashganini hamda nuqsonlar zichligining kamayganini ko'rsatadi. Lekin, qizil chiziqdagi PEDOT:PSS/Perovskit namunasi piklar nisbatan past intensivlikka ega bo'lib, perovskit qatlamining kristallanish jarayoni yetarli darajada shalillanmaganligini anglatadi. Bunday holatda amorf faza ulushi ko'proq yoki kristall donachalar o'lchami kichikroq degani. Natijada, donachalar chegaralarida rekombinatsiya markazlari soni ortib, zaryad tashuvchilarning samarali transporti cheklanadi. Demak, XRD natijalari PTAA asosida tayyorlangan perovskit qatlamlarida yuqori kristallik va yaxshiroq faza shakllanishini ko'rsatadi.

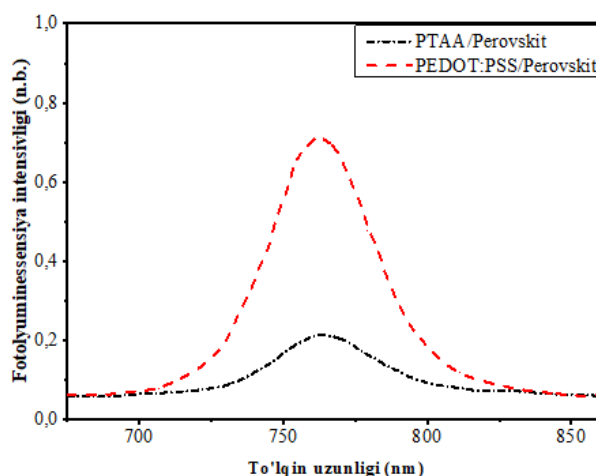


Figure 5. Photoluminescence spectra of perovskite films deposited on different hole-carrying layers

Rasm 5. Har xil kovak tashuvchi qatlamlar ustiga yotqizilgan perovskit plyonkalarining fotolyuminessensiya spektrlari

Bundan tashqari, 5-rasmda har xil kovak tashuvchi qatlamlar ustiga yotqizilgan perovskit faol qatlamlarining fotolyuminessensiya (FL) spektrlari keltirilgan. Bunda, PEDOT:PSS/Perovskit namunasi PTAA/Perovskit namunasiga qaraganda ancha yuqori FL intensivligini namoyon etadi. Bu

holat perovskit faol qatlamida nurlanuvchi rekombinatsiya jarayonlari ya'ni elektron va kovaklarning sezilarli qismi interfeysda yoki hajmda nurlanish orqali qayta birlashayotganini bildiradi [18–20]. Bu xususiyat interfeysda mavjud bo'lgan energetik to'siqlar yoki nuqson holatlari sababli zaryad tashuvchilarning transport qatlamiga samarali uzatilmasligini anglatadi. Aksincha, PTAA/Perovskit namunasining FL intensivligi sezilarli darajada past. Bu esa perovskit qatlamida hosil bo'lgan kovaklarning PTAA qatlamiga samarali ekstraksiyalanayotganini ko'rsatadi. Natijada, nurlanuvchi rekombinatsiya kamayadi va zaryad tashuvchilar tok hosil qiladi. Demak, FL intensivligining pasayishi material sifati yomonlashganini emas, interfeysda zaryad uzatilish samaradorligi oshganini bildiradi. Shu sababli, mazkur spektral natijalar PTAA/perovskit interfeysining energetik moslashuvi yaxshiroq ekanligidan dalolat beradi.

Xulosa

Ushbu tadqiqot natijalarida ITO/PTAA va ITO/PEDOT:PSS asosidagi perovskit tuzilmalarining optik va strukturaviy xususiyatlari natijalari farq qildi. O'tkazuvchanlik spektrlari ham PEDOT:PSS ga qaraganda PTAA qatlamining qisqa to'lqin uzunliklarida yuqoriroq optik shaffoflikka ega ekanini va yorug'likning perovskit faol qatlamiga samaraliroq yetib borishini tasdiqladi. AFM va SEM tahlillari PTAA ustida hosil bo'lgan perovskit plyonkalari yirikroq va bir jinsli kristall donachalar bilan tavsiflanishini hamda interfeysda nuqsonlar kamayishini namoyon qildi. PTAA/perovskit tuzilmasining XRD natijalari PEDOT:PSS/perovskitga qaraganda yuqori kristallik darajasi shakllandi. Bundan tashqari, FL spektrlari ham PTAA interfeysida zaryad tashuvchilarning samarali ekanligi va rekombinatsiyaning kamayganini ko'rsatdi. Umuman olganda, PTAA asosidagi tuzilmalar PEDOT:PSS ga nisbatan barqaror perovskit quyosh elementlarini ishlab chiqarishda kelajakda istiqbolli kovak tashuvchi qatlam ekanligini isbotladi.

Mualliflarning hissalari

Original matnni yozish, B. X.; optik va fotovaltaik parametrlarni o'lchash, L. N.; SEM tasvirlarini o'lchash, S. R.; ma'lumotlarga kuratorlik qilish, M. I.

Authors' contribution

Writing the original text: B. Kh.; Measuring optical and photovoltaic parameters: L. N.; Measuring SEM images: S. R.; Data curation: M. I.

Moliyalashtirish

Ushbu maqoladagi olingan natijalar O'zRFA U. Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti bazaviy moliyalashtirish mablag'lari ko'magida bajarilgan.

Funding source

The results obtained in this article were carried out with the support of the basic funding of the Ion-Plasma and Laser Technologies Institute named after U. Arifov of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

Etika tamoyillariga muvofiqlik

Ushbu tadqiqotda inson yoki hayvon subyektlari ishtirok etmaganligi sababli, etik ko'rib chiqish va tasdiqlash talab etilmaydi. Shu bois, tadqiqotga nisbatan etik tasdiqlash qo'llanilmaydi.

Ethics approval

Since this study does not involve human or animal subjects, ethical review and approval is not required. Therefore, ethical approval does not apply to research.

Nashrga xabardor qilingan rozilik

Ushbu tadqiqotda inson ishtirokchilari jalb qilinmagan. Shu sababli, xabardor qilingan rozilik talab etilmaydi.

Consent for publication

Human participants were not involved in this study. For this reason, informed consent is not required.

Ma'lumotlar mavjudligi to'g'risidagi bayonot

Ushbu maqolada keltirilgan natijalarni tasdiqlovchi barcha eksperimental ma'lumotlar mualliflar tomonidan saqlanmoqda va asosiy matn hamda rasm/jadval shaklida maqola ichida taqdim etilgan. Qo'shimcha ma'lumotlar asosli so'rov asosida muallif(lar)dan olinishi mumkin.

Data Availability Statement

All experimental data confirming the results presented in this article are held by the authors and presented within the article in the form of the main text and image/table. Additional information can be obtained from the author(s) based on a reasoned query.

Rahmatnomalar

Mualliflar ushbu tadqiqotni amalga oshirishda texnik yordam ko'rsatgan va laboratoriya sharoitlarini ta'minlagan Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti hamda O'zbekiston Milliy universiteti jamoasiga minnatdorchilik bildiradilar.

Acknowledgments

The authors thank the team of the Institute of Ion-plasma and laser technologies and the National University of Uzbekistan, which provided technical assistance in the implementation of this research and provided laboratory conditions.

Manfaatlar to'qnashuvi

Mualliflar ushbu tadqiqot bo'yicha hech qanday manfaatlar to'qnashuvi yo'qligini e'lon qiladilar. Tadqiqot natijalarini taqdim etish yoki talqin qilishga ta'sir qiluvchi har qanday shaxsiy, moliyaviy yoki boshqa manfaatlar mavjud emas.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest in this study. There are no personal, financial or other interests that affect the presentation or interpretation of research results.

Qisqartmalar

PQE	Perovskit quyosh elementi
KTQ	Kovak tashuvchi qatlam
SEM	Skanerlovchi elektron mikroskopiyasi
ITO	Indiy qalay oksidi
AFM	Atom kuchlari mikroskopiyasi
RMS	O'rtacha kvadrat qiymati
FL	Fotoluminessensiya

Adabiyot

- [1] Kojima A., Teshima K., Shirai Y., Miyasaka T. "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells". J. Am. Chem. Soc., 2009.
- [2] Green M.A., Ho-Baillie A., Snaith H.J. "The emergence of perovskite solar cells". Nat. Photonics, 2014.
- [3] Correa-Baena, J.-P., Saliba, M., Buonassisi, T., Grätzel, M., Abate, A., et al. Prominent challenges for perovskite solar cells to reach the market. Energy Environmental Science, 2017, 10, 710-727.
- [4] Yang W.S., Park B.W., Jung E.H., Jeon N.J., et al. "Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells". Science, 2017.
- [5] Li N., Niu X., Chen Q., Zhou H. "Towards commercialization: the operational stability of perovskite solar cells" Chem. Soc. Rev., 2020.
- [6] Bhushan, B. Springer Handbook of Nanotechnology. Springer, 3rd ed. (2010).
- [7] Goldstein, J. et al. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. Springer, 4th ed. (2018).
- [8] Shao, Y., Xiao, Z., Bi, C., Yuan, Y., Huang, J., et al. Origin and elimination of photocurrent hysteresis by fullerene passivation in perovskite solar cells. Nature Communications, 2014, 5, 5784.
- [9] Abate, A., Saliba, M., Hollman, D. J., Stranks, S. D., Wojciechowski, K., et al. Supramolecular halogen bond passivation of organic-inorganic halide perovskite solar cells. Nano Letters, 2014, 14, 3247-3254.
- [10] Chiang, C.-H., Wu, C.-G., Bulk heterojunction perovskite-PCBM solar cells with high fill factor. Nature Photonics, 2016, 10, 196-200.
- [11] Wang, Q., Dong, Q., Li, T., Gruverman, A., Huang, J., et al. Thin insulating tunneling contacts for efficient and water-resistant perovskite solar cells. Advanced Materials, 2016, 28, 6734-6739.
- [12] Zakhidov, E.A., Nematov, S.K., Saparbaev, A.A. et al. N-Methyl-2-Pyrrolidone as an Efficiency and Stability Additive for Perovskite Solar Cells. Appl. Sol. Energy 59, 435-440 (2023).

- [13] Xiao, Z., Dong, Q., Bi, C., Shao, Y., Yuan, Y., Huang, J., et al. Solvent annealing of perovskite-induced crystal growth for photovoltaic-device efficiency enhancement. *Advanced Materials*, 2014, 26, 6503–6509.
- [14] Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Joy, D.C., Lyman, C.E., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., Michael, J.R. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer, New York, 2018, 1–40.
- [15] Reimer, L., Hawkes, P.W., Spence, J.C.H. *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*. Springer, Berlin, 1998, 3–25.
- [16] Egerton, R.F., Li, P., Malac, M. Radiation damage in the TEM and SEM. *Micron* 35, 399–409, 2004.
- [17] Newbury, D.E., Ritchie, N.W.M., Joy, D.C., Lyman, C.E., Michael, J.R. Electron-excited X-ray microanalysis: fundamentals and analytical applications. *Journal of Materials Science* 50, 493–518, 2015.
- [18] Stranks, S.D., Eperon, G.E., Grancini, G., Menelaou, C., Alcocer, M.J.P., Leijtens, T., Herz, L.M., Petrozza, A., Snaith, H.J. Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber. *Science* 342, 341–344, 2013.
- [19] De Quilettes, D.W., Vorpahl, S.M., Stranks, S.D., Nagaoka, H., Eperon, G.E., Ziffer, M.E., Snaith, H.J., Ginger, D.S. Impact of microstructure on local carrier lifetime in perovskite solar cells. *Science* 348, 683–686, 2015.
- [20] Herz, L.M., Johnston, M.B., Snaith, H.J., Stranks, S.D. Radiative and nonradiative recombination in metal halide perovskites. *Accounts of Chemical Research* 49, 225–234, 2016.

Nashriyot javobgar emas/ eslatmasi:

Barcha nashrlarda keltirilgan bayonotlar, fikrlar va ma'lumotlar faqat mualliflar va ishtirokchilarga tegishlidir, na Jurnal va na muharrirlar. Jurnal va muharrirlar, mazkur kontentda keltirilgan har qanday g'oyalar, usullar, ko'rsatmalar yoki mahsulotlar natijasida insonlar yoki mulkka yetkazilgan har qanday zarar uchun javobgar emas.

Disclaimer of liability/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals. The authors and participants, and the Journal and the editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.