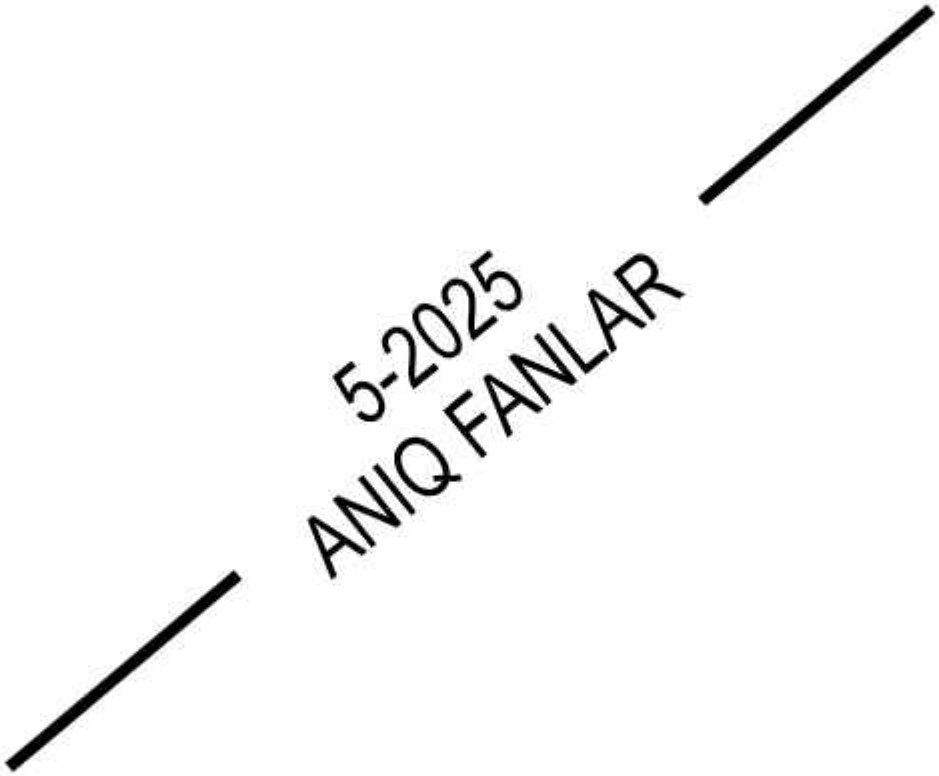
O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI

OLIY TA’LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

FARG‘ONA DAVLAT UNIVERSITETI

FarDU. ILMIY XABARLAR

1995-yildan nashr etiladi
Yilda 6 marta chiqadi



НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК. ФерГУ

Издаётся с 1995 года
Выходит 6 раз в год

FIZIKA-TEXNIKA

С.М.Отажонов, Р.Н.Эргашев, Қ.А.Ботиров, У.Х.Маъруфова, Л.Э.Эргашева
Исследование Влияния Глубоких Уровней На Фотоэлектрические Параметры Гетероструктур p-CdTe – n-CdS И p-CdTe – n-CdSe 4
M.A.Mamatova, M.Sh.Yusupova
Diodning volt–amper xarakteristikasi 10
A.A.Saparbayev, B.G'.Xidirov. L.R.Nurumbetova, Z.A.Shodiyeva
Har xil kovak tashuvchi qatlamlar yordamida perovskit quyosh elementlarning fotovoltaik parametrlarini yaxshilash 15
S.A.Ismoilova, Sh.Sh.Shuxratov
Alohida ta'lim ehtiyojlariga ega o'quvchilar uchun interfaol pedagogik yondashuvlar 22
M.K.Yuldashev
Kremniyning optik va elektr xossalari 27
A.A.Saparbayev, L.R.Nurumbetova, M.N.Akbarov
Donor:Y6 faol qatlam asosidagi polimer quyosh elementlarning optik va fotovoltaik parametrlarini tadqiq qilish 30

FarDU. Ilmiy xabarlar – Scientific journal of the Fergana State University

Volume 31 Issue 5, 2025-yil DOI: 10.56292/SJFSU/vol31_iss5/a163

UO'K: 621.383.2

HAR XIL KOVAK TASHUVCHI QATLAMLAR YORDAMIDA PEROVSKIT QUYOSH ELEMENTLARNING FOTOVOLTAIK PARAMETRLARINI YAXSHILASH

УЛУЧШЕНИЕ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПЕРОВСКИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛЯРНЫХ НОСИТЕЛЕЙ

IMPROVING THE PHOTOVOLTAIC PARAMETERS OF PEROVSKITE SOLAR CELLS USING VARIOUS POLAR CARRIER LAYERS

Saparbayev Aziz Adamovich[1]
[1]Ion plazma va lazer texnologiyalari instituti, katta ilmiy xodim

Xidirov Boburbek G'ofurjonovich[2]
[2]Ion plazma va Lazer texnologiyalari instituti, tayanch doktorant

Nurumbetova Lobar Rimbayevna[3]
[3]Toshkent davlat transport universiteti, assistent o'qituvchi

Shodiyeva Zulayxo Abdimannon qizi[4]
[4]O'zbekiston milliy universiteti, magistr talabasi

Annotatsiya

Ushbu tadqiqotda PEDOT:PSS va PTAA kovak tashuvchi qatlamlarining perovskit plyonkasi sifati va energiya o'zgartirish samaradorligi(EO'S)ga ta'siri o'rganildi. PTAA interfeys materiali sifatida qo'llanganda, $MAPbI_3$ perkursor eritmasiga 5 mol% miqdorda N metil 2 pirrolidonni (NMP) qo'shimchasi qo'shib tayyorlangan perovskit plyonkasi yuqori zichlikdagi kristall tuzilishga ega bo'lib, energiya darajalari va zaryad uzatish samaradorligi yaxshilandi. PTAA qo'llanilgan perovskit quyosh elementi(PQE) 18,90% EO'S qiymatga erishdi, bu PEDOT:PSS ishlatilgan holatga nisbatan 2,3% yuqori. PTAA asosidagi namuna 80 kunlik inkapsulyatsiyasiz saqlashdan so'ng ham dastlabki EO'Sning 90% ini saqlab qoldi. Ushbu natijalar PQElarining tijoratlashtirilishiga yangi imkoniyatlar ochadi.

Аннотация

В данной работе исследовалось влияние дырочно-проводящих слоёв PEDOT:PSS и PTAA на качество и эффективность преобразования энергии (ЭПЭ) перовскитных плёнок. При использовании PTAA в качестве интерфейсного материала плёнка перовскита, полученная путём добавления 5 мол.% N-метил-2-пирролидона (NMP) к раствору-прекурсору $MAPbI_3$, имела кристаллическую структуру высокой плотности, а также улучшенные энергетические уровни и эффективность переноса заряда. Перовскитный солнечный элемент (ПСЭ) с использованием PTAA достиг значения ЭПЭ 18,90%, что на 2,3% выше, чем у PEDOT:PSS. Образец на основе PTAA сохранил 90% от исходного ЭПЭ даже после 80 дней хранения без капсулирования. Эти результаты открывают новые возможности для коммерциализации ПСЭ.

Abstract

In this study, the effects of PEDOT:PSS and PTAA hole-carrying layers on the quality and energy conversion efficiency (ECE) of perovskite films were investigated. When PTAA was used as the interface material, the perovskite film prepared by adding 5 mol% N methyl 2 pyrrolidone (NMP) to the $MAPbI_3$ precursor solution had a high-density crystal structure, and the energy levels and charge transfer efficiency were improved. The perovskite solar cell (PSC) using PTAA achieved an ECE value of 18.90%, which was 2.3% higher than that using PEDOT:PSS. The PTAA-based sample retained 90% of the initial ECE even after 80 days of unencapsulated storage. These results open up new opportunities for the commercialization of PSCs.

Kalit so'zlar: *PQE; PTAA; PEDOT:PSS; NMP; EO'S.*
Ключевые слова: *ПСЭ; PTAA; PEDOT:PSS; NMP; ЭПЭ.*
Key words: *PSC; PTAA; PEDOT:PSS; NMP; ECE.*

KIRISH

Hozirgi kunda ishlab chiqarish sanoati va insoniyat jamiyati jadal rivojlanmoqda. Shu bois, neft, ko'mir va tabiiy gaz kabi an'anaviy qazib olinadigan yoqilg'i manbalar keng miqyosda qo'llanilishi natijasida, global ekologik muammolarni keltirib chiqarmoqda[1]. Shu sababli, qayta tiklanuvchi va ekologik toza energiya manbalarini rivojlantirish dolzarb masalaga aylandi. Ideal muqobil energiya manbalaridan biri bo'lgan quyosh energiyasi bitmas-tuganmasligi va ekologik tozaligi bilan ajralib turadi. Quyosh elementlari quyosh nurlarini to'g'ridan-to'g'ri elektr energiyasiga aylantirish orqali energiya ta'minotida muhim yechim sifatida qaralmoqda[2]. So'nggi yillarda perovskit quyosh elementlari (PQE) o'zining yuqori samaradorligi va nisbatan arzon ishlab chiqarish imkoniyati tufayli , qisqa vaqt ichida energiya o'zgartirish samaradorligi (EO'S) 26,7 % ko'rsatkichga erishdi [3]. Biroq, yuqori samarali va barqaror PQElarini tayyorlashda ko'plab tadqiqotchilar duch keladigan umumiy muammo interfeys transport qatlamini tanlashdir. Ideal interfeys qatlami perovskitda hosil bo'lgan zaryadlarni tez ajratadi, rekombinatsiyani kamaytiradi va samaradorlikni oshiradi. Bundan tashqari, Interfeys qatlami perovskit donachalarini yirik va bir tekst hosil qiladi, bu esa quyosh elementi qurilmasining barqarorligini oshiradi. Ma'lumki, PEDOT:PSS, suvli eritmada o'tkazuvchan polimer sifatida, hozirda keng qo'llaniladigan anod interfeysini modifikatsiyalash materialidir[4]. Organik fotovoltaik qurilmalar va yorug'lik chiqaruvchi diodlar sohasida PEDOT:PSS har doim eng ko'p ishlatiladigan kovaklarni tashish materiali hisoblanadi. PEDOT: PSS ning eng yuqori egallangan molekulyar orbital energiya darajasi (HOMO) va materialning o'tkazuvchanligi zaryadlarni samarali uzatishga yordam beradi, shu orqali quyosh elementining samaradorligini yaxshilaydi. PEDOT:PSSning kamchiligi shundaki, kuchli kislotaligi xususiyati ITO qatlamini yemiradi va qurilmaning barqarorligini kamaytiradi. PSS qo'shimchasi PEDOTning o'tkazuvchanligini oshiradi, lekin shu bilan birga elektr va mikrostrukturada bir xillikni yuzaga keltiradi. Shuning uchun, PEDOT:PSS quyosh elementi qurilmalari uchun eng zo'r kovak tashish materiali hisoblanmaydi. PQElarida anod interfeysi qurilmaning ishlashi va barqarorligini yaxshilash uchun muhim. Zo'r anod interfeysi perovskit quyosh elementida zaryad yo'qotishlarini kamaytirib, kuchlanish (Voc) qiymatini oshiradi va qurilmaning barqarorligini ham yaxshilaydi. Hozirgi vaqtda organik va noorganik materiallardan interfeysli transport qatlami sifatida foydalanib, samarali va barqaror PQElari yaratish bo'yicha ko'plab ilmiy ishlar mavjud [5]. PTAA organik materiali PEDOT:PSS o'rniga o'zgartirilgandan so'ng, qurilmaning energiya o'zgartirish samaradorligi 18,90% ga, qisqa tutashuv toki (23,16 mA/sm²) va ochiq zanjir kuchlanishi(1,04 V) yaxshilangani, eng asosiysi, 80 kun davomida dastlabki samaradorligining 90% ini saqlab qolgani kuzatilgan. Bu esa PQElarning kelajakda barqaror energiya manbai sifatida yanada keng qo'llanish imkoniyatlarini ko'rsatadi. Bu maqolada yuqori sifatli perovskit plyonkalarini hosil qilish, interfeys qatlamini optimallashtirish va perovskit prekursor eritmasiga qo'shimchalar kiritish orqali PQElarning samaradorligi va barqarorligini oshirish usullari tahlil qilindi.

MATERIALLAR VA TADQIQOT USULLARI

ITO shisha tagliklar dastlab ketma-ket aseton, ultra-toza suv va izopropanol bilan ultratovushli vannada har birini 10 daqiqa davomida tozalandi. Yuzadagi namlanishni yaxshilash uchun ITO shisha azot (N_2) gazi bilan quritildi va 10 daqiqa davomida kislorod (O_2) plazmasi yordamida ishlov berildi. PEDOT:PSS eritmasi ITO tagliklar ustiga 5000 aylanish/daqiqa (rpm) tezlikda 30 soniya davomida spin-coating qilinadi va 140°C haroratda 10 daqiqa davomida qizdiriladi.Shu jarayon bilan parallel ravishda PTAA eritmasi (toluenda 5 mg/mL konsentratsiyada) alohida tayyorlanib, ITO tagliklar ustiga u ham 5000 rpm tezlikda 40 soniya davomida sping-coating qilinadi va 105°C da 10 daqiqa davomida qizdiriladi. PTAA va PEDOT:PSS bilan ishlashning butun jarayoni azotli muhitdagi glovbox ichida amalga oshiriladi.

$MAPbI_3$ prekursor eritmasini tayyorlash uchun MAI va PbI_2 1 : 1 molar nisbatda N,N dimetilformamid (DMF) va dimetilsulfoksid (DMSO) (9 : 1 hajmiy nisbat) aralashmasida aralashtirilib, 1,2 M konsentratsiyali eritma hosil qilindi. Perovskit prekursor eritmalari xona haroratida 12 soat davomida aralashtirilib, qattiq moddalarning to'liq erib ketishiga erishildi.

N-metil-2-pirolidon (NMP) qo'shimchasi (hajmiy nisbati 5%) markazdan qochma kuch bilan tozalashdan oldin perovskit eritmasiga qo'shildi. Perovskit eritmasi PEDOT:PSS yoki PTAA qatlami ustiga 4000 rpm tezlikda 30 soniya davomida sping-coting usulida qoplandi. Sping-coating

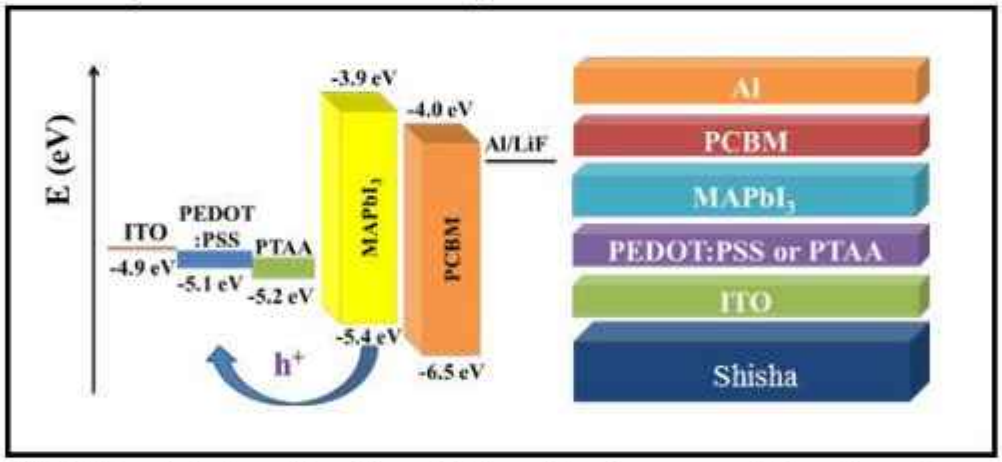
jarayonida perovskit yuzasiga toluol tomizilib (anti-solvent eritmasi), yuqori sifatli sirt olishga erishildi. Perovskit plyonkalari pechkada 100°C haroratda 10 daqiqa davomida qizdirildi.

Perovskit qatlami ustiga taxminan 30 nm qalinlikdagi [6,6]-fenil-C61-butirik kislota metil efiri (PCBM) plyonkasi 18 mg/mL konsentratsiyada 1500 rpm tezlikda 20 soniya davomida sping-coting usuli bilan qoplandi. Keyin namuna termik bug'latish kamerasiga(evaporator) o'tkazilib, 100 nm qalinlikdagi alyuminiy (Al) elektrod qatlami bug'latilib qoplandi.

ITO shisha ustidagi perovskit plyonkalarning yutilish spektrlari 400 dan 850 nm gacha bo'lgan to'lqin uzunlik diapazonida Shimadzu UV-1280 spektrofotometri yordamida o'lchandi. Statsionar holatdagi fotolyuminessensiya (FL) spektrlari Ocean Optics HR 2000+ spektrometri yordamida, 507 nm da eksitatsiya qilinib o'lchandi. Plyonkalarning sirt morfologiyasi skanerlovchi elektron mikroskop (SEM, Hitachi S-4800) yordamida tahllil qilindi. Qurilmalarning tok–kuchlanish (J-V) xarakteristikalari 1,5G AM yorug'lik sharoitida (100 mVt/sm²), Keithley 2420 manba-o'lchagich va Newport quyosh nurlanish simulyatori yordamida o'lchandi. Yorug'lik intensivligi standart kremniy quyosh elementi yordamida kalibrlandi.

NATIJALAR VA MUHOKAMALAR

1-rasmda perovskit quyosh elementining energiya darajalari va qatlamlar tuzilishi ko'rsatilgan. PTAA polimeri an'anaviy PEDOT:PSS materialiga nisbatan perovskit quyosh elementlari uchun bir qator afzalliklarga ega. Bundan tashqari, sirt bilan modifikatsiya qilingan PTAA ning energiya darajasi PEDOT:PSS dan bir oz pastroq bo'lib, u perovskit yutuvchi qatlamining energetik darajalariga ko'proq mos keladi [6]. Qurilmada energiya darajalarining moslashuvi, kovaklarning yuqori migratsiya qobilyati hamda plyonkaning yaxshi o'tkazuvchaligi PTAA ni samarali kovak tashuvchi qatlam sifatida ko'rsatadi. Shuning uchun, yuqori samaradorlikka ega bo'lgan perovskit quyosh elementi qurilmasini yaratish uchun an'anaviy PEDOT:PSS o'rniga PTAA materialli ishlatilgan. Qurilma tuzilishi: Shisha/ITO/PTAA/$MAPbI_3$/PCBM/LiF/Al. Qurilmaning ishlash mexanizmini tushuntiruvchi energiya diapazoni strukturasi diagrammasi 1-rasmda keltirilgan.



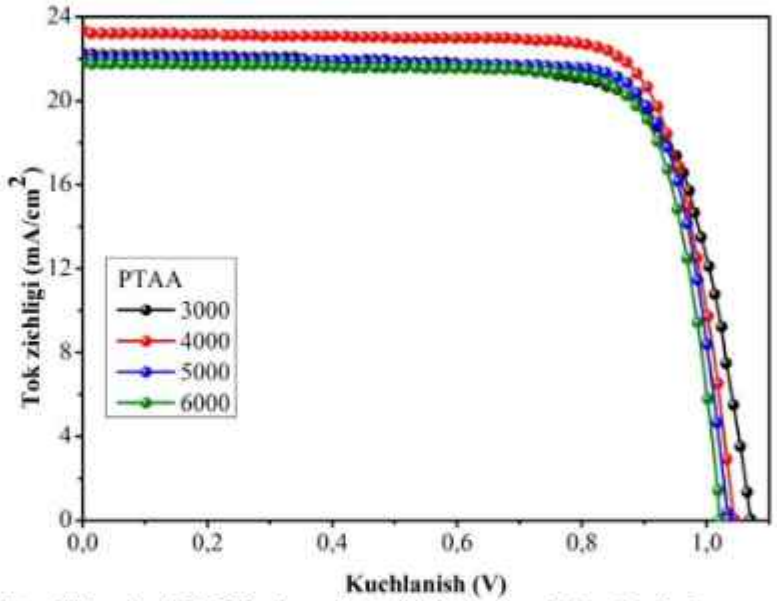
1-rasm. PTAA kovak tashuvchi qatlam sifatida qo'llanilgan perovskit qurilmasining energiya darajalari diagrammasi.

Jadval -1 Har xil tezlikda olingan PTAA materialining fotovoltaik parametrlari

Har xil tezlik(PTAA)	Voc (V)	Jsc (mA/cm2)	FF (%)	EO'S (%)
3000	1.07	22.01	75	17.63
4000	1.04	23.16	78	18.9
5000	1.03	21.98	80	18.08
6000	1.02	21.61	80	17.55

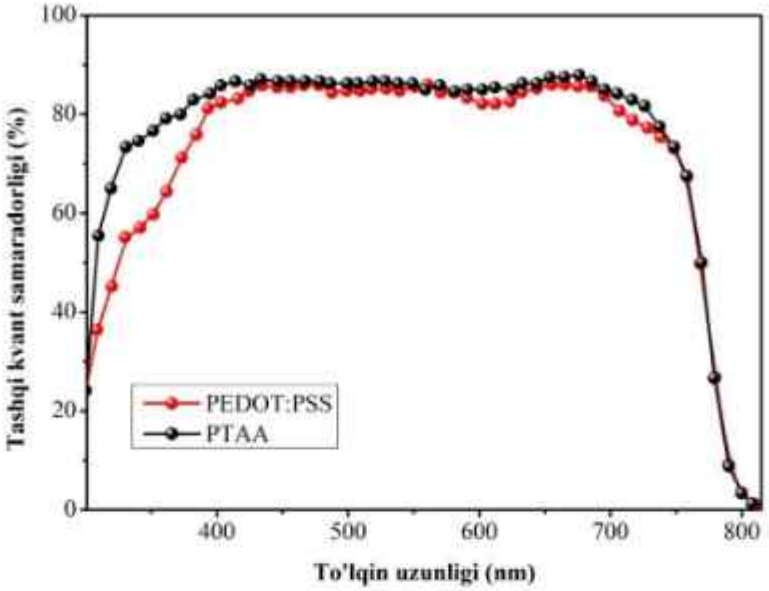
1-jadvalda 5 mol% NMP qo'shimchasi qo'shilgan optimallashtirilgan perovskit plyonkalarining fotovaltaik parametrlari ko'rsatilgan. Har xil tezliklarda PTAA kovak tashuvchi qatlami ishlatilgan PQElarining fotovaltaik parametrlarini tahlil qilinganda, ular PEDOT:PSS asosida tayyorlangan quyosh elementlarga qaraganda sezilarli darajada yuqori samaradorlik

ko'rsatdi. Optimallashtirilgan sharoitda energiya o'zgartirish samaradorligi (EO'S) 16,59% dan 18,90% gacha oshdi. Bunday yaxshilanishning asosiy sababi — qisqa tutashuv toki Jsc ning oshishi bo'ldi: PEDOT:PSS da ~21,5 mA/sm² bo'lsa, PTAA ishlatilganda 23,16 mA/sm² ga yetdi. Bu esa PTAA kovak tashuvchi qatlami zaryad tashuvchilarni samaraliroq ajratib olish va tashish imkonini berganini ko'rsatadi. Shuningdek, energiya darajalarining yaxshiroq moslashuvi tufayli ochiq zanjir kuchlanishi Voc ham 0,95 V dan 1,04 V gacha ko'tarildi. Fill faktor (FF) esa 80% ga yaqin qiymatga yetdi, bu esa ichki yo'qotishlar kamayganini bildiradi. Natijada, PTAA dan foydalanilganda PEDOT:PSS ga qaraganda PQElarida samaraliroq kovak tashuvchi qatlam ekanligini va qurilmaning umumiy samaradorligini sezilarli darajada oshirishini isbotladi.



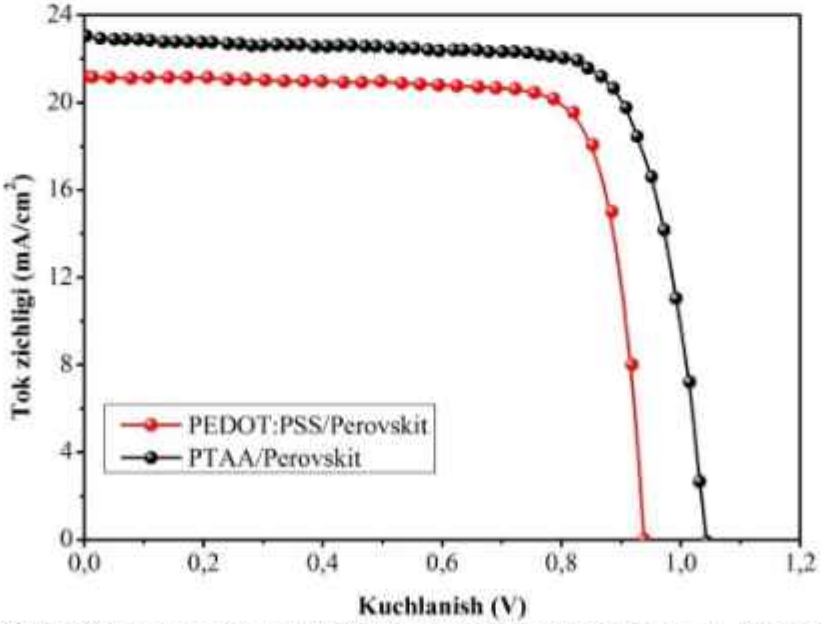
2-rasm. Turli tezliklardagi PTAA kovak tashish qatlamining Volt-Amper xarakteristika spektrlari

2-rasmda PTAA asosidagi turli aylanish tezliklarida (3000, 4000, 5000, 6000 rpm) tayyorlangan perovskit quyosh elementlarining J–V egri chiziqlari keltirilgan. Natijalardan ko'rinib turibdiki, 3000 rpm tezlikda tayyorlangan qurilma yuqori kuchlanish sohasida teziroq pasayib pastroq samaradorlikga erishgan. Xuddi shunday 5000 va 6000 rpm tezliklarda ham tok zichligi pastroq qiymat qayd etgan(22 mA/cm² atrofida) natijada bu yerda ham samaradorlik kamaygan, bu esa plyonka sifatining yomonlashishi bilan izohlanadi. Ammo, boshqa tezliklarda tayyorlangan qurilmalardan farqli ravishda 4000 rpm tezlikda tayyorlangan qurilma eng yuqori tok zichligi (≈23,16 mA/cm²) va barqaror J–V egri chizig'iga ega bo'lib, optimal natija ko'rsatgan. Demak, optimal aylanish tezligi 4000 rpm bo'lib, u perovskit plyonkaning yaxshiroq morfologiyasini ta'minlab, qurilmaning energiya o'zgartirish samaradorligini oshirishga yordam beradi.



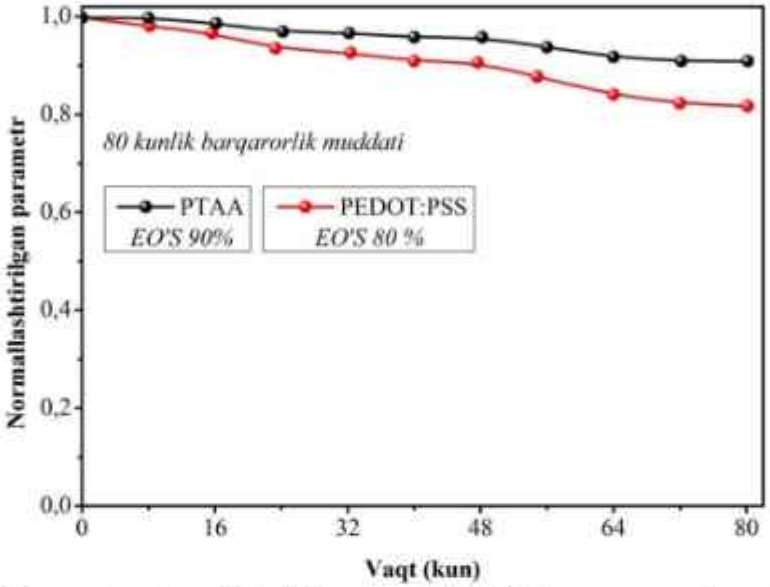
3-rasm. PEDOT:PSS va PTAA materiallarining tashqi kvant samaradorligi spektrlari

Quyosh elementining yorug‘likni yutishi va zaryadlarni samarali ajratishi Tashqi kvant samaradorligi spektri(TKS) orqali tekshirildi. PTAA kovak tashuvchi qatlami sifatida qo‘llanganda tok zichligi (Jsc) 21,06 mA/sm² bo‘ldi, bu PEDOT:PSS ishlatilgandagi tok zichligi 20,46 mA/sm² ga qaraganda yuqoriroq, bu asosan J-V egri chizig'i bilan o'lchangan qurilma parametrlaridan olingan tok zichligi (Jsc) qiymatiga mos keladi[7]. Bu shuni anglatadiki, PTAA bilan tayyorlangan perovskit plyonkasi zaryadlarni yaxshiroq tashiydi, rekombinatsiyani kamaytiradi va natijada quyosh elementining energiya o’zgartirish samaradorligini(EO’S) oshiradi. 3-rasmda perovskit quyosh elementlarining tashqi kvant samaradorligi (TKS) spektrlari keltirilgan bo‘lib, unda turli kovak tashuvchi qatlam materiallari (KTQ) – PEDOT:PSS (qizil chiziq) va PTAA (qora chiziq) taqqoslangan. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, PTAA asosidagi qurilma 300–450 nm qisqa to‘lqin uzunliklarida sezilarli darajada yuqori samaradorlik ko‘rsatmoqda, 450–750 nm diapazonida esa har ikkala qurilma deyarli 80–90% atrofida barqaror natijaga erishgan. Ammo, to’lqin uzunligi 750–800 nm oralig‘ida esa samaradorlik pasaygan. Bu natijalar PTAA qatlami PEDOT:PSS ga nisbatan zaryad tashuvchilarning uzatilishini samaraliroq amalga oshirishini, natijada tok zichligi (Jsc) va energiya o’zgartirish samaradorlikning ortishini tasdiqlaydi.



4-rasm. PEDOT:PSS/Perovskit va PTAA/Perovskit qurilmalarining J–V xarakteristikalari

4-rasmda PEDOT:PSS/Perovskit va PTAA/Perovskit asosida tayyorlangan qurilmalarning volt-amper xarakteristikalari keltirilgan. Grafikdan ko'rinib turibdiki, PTAA asosida tayyorlangan qurilma PEDOT:PSS ga nisbatan ancha yuqori natijalarni qayd qilgan. Xususan, PTAA/Perovskit qurilmasida qisqa tutashuv toki zichligi (Jsc) taxminan 23 mA·cm^{-2}, ochiq zanjir kuchlanishi (Voc) esa ≈1,05 V atrofida, PEDOT:PSS/Perovskit qurilmasida bu qiymatlar mos ravishda 21 mA·cm^{-2} va ≈0,95 V ni tashkil etadi. Shuningdek, PTAA asosidagi qurilmaning egri chizig'i sohasi kengroq va balandroq bo'lib, bu fill factor (FF) ning yuqoriligi va qarshilikning (R) pastligini ko'rsatadi. Ushbu natijalar PTAA materialining perovskit bilan energiya darajalari yaxshi moslashuvi, interfeysda rekombinatsiya jarayonlarining kamayishi va tashuvchi zarralarning samaraliroq transporti bilan tushintiriladi.



5- rasm.PQElarining saqlash vaqti bo'yicha normallashtirilgan parametrga bog'liqlik garafigi

5-rasmda PEDOT:PSS va PTAA asosidagi perovskit quyosh elementlarining 80 kunlik barqarorlik testi natijalari keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, PTAA asosidagi qurilma vaqt o'tishi bilan yuqori barqarorlikni qayd qilgan. Xususan, 80 kun oxirida PTAA/Perovskit qurilmasi dastlabki samaradorligining 90 % ini saqlab qoldi, PEDOT:PSS/Perovskit qurilmasida esa bu ko'rsatkich 80 % ni tashkil etdi. Bu natija PTAA ning interfeysda kuchliroq kimyoviy barqarorlikka ega ekanligini va PEDOT:PSS ga xos bo'lgan kislotali xususiyat hamda ITO bilan yuzaga keladigan korroziya muammosidan holi ekanligini ko'rsatadi. Natijada, PTAA asosidagi KTQ uzoq muddatli ishlash va qurilma barqarorligini ta'minlashda samaraliroq material sifatida ko'riladi.

XULOSA

Ushbu tadqiqotda perovskit quyosh elementlarining samaradorligi va barqarorligini oshirish maqsadida turli interfeys muhandisligi yondashuvlari o'rganildi. NMP qo'shimchasining kiritilishi natijasida perovskit plyonkalarining morfologiyasi sezilarli darajada yaxshilanib, silliq va nuqsonsiz sirt hosil qilindi hamda qurilma samaradorligi 12,30 % dan 16,59 % gacha oshdi. Shu bilan birga, PEDOT:PSS o'rniga PTAA dan foydalanish kovak tashuvchi qatlam sifatida samarali yechim bo'lib, energiya darajalari moslashuvining yaxshilanishi, yuqori Voc va Jsc qiymatlari, shuningdek, 18,90 % gacha samaradorlikka erishishga olib keldi. Muhimi, PTAA asosidagi qurilma inkapsulyatsiyasiz sharoitda ham 80 kun davomida dastlabki samaradorligining 90 % ini saqlab qoldi.

Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, qo'shimcha muhandislik yondashuvlari va mos interfeys materiallaridan foydalanish perovskit quyosh elementlarining yuqori samaradorligi va uzoq muddatli barqarorligini ta'minlashda muhim ahamiyat kasb etadi. Bu esa toksik bo'lmagan, barqaror va tijoratlashtirishga yaroqli perovskit quyosh elementlarini ishlab chiqish istiqbollari uchun mustahkam ilmiy asos yaratadi.

MOLIYALASHTIRISH

Ushbu ish O'zbekiston Respublikasi Innovatsion rivojlanish vazirligining Fundamental tadqiqotlar dasturi doirasidagi Fz-20200929177 loyiha doirasida amalga oshirildi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Renewables, REN21. "Global status report." *Secretariat: Paris, France* (2019).
2. Green, Martin A., et al. "Solar cell efficiency tables (version 62)." *Progress in photovoltaics: research and applications* 31 (2023): 651-663.
3. Energy, NREL Transforming. "Best research-cell efficiency chart." *URL: https://www. nrel. gov/pv/cellefficiency. html* (2024).
4. Li, Jiangsheng, et al. "Graphdiyne-doped P3CT-K as an efficient hole-transport layer for MAPbI3 perovskite solar cells." *ACS Applied Materials & Interfaces* 11.3 (2018): 2626-2631.
5. Jiang, Qi, et al. "Planar-structure perovskite solar cells with efficiency beyond 21%." *Advanced materials* 29.46 (2017): 1703852.
6. Kim, Youngwoong, et al. "Sequentially fluorinated PTAA polymers for enhancing VOC of high-performance perovskite solar cells." *Advanced Energy Materials* 8.29 (2018): 1801668.
7. Ke, Qi Bin, et al. "Understanding the PEDOT: PSS, PTAA and P3CT-X hole-transport-layer-based inverted perovskite solar cells." *Polymers* 14.4 (2022): 823.