

UDK 621.315.592.3

Otaqulova Nilufar Farhod qizi

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, tayanch doktorant
tel: +998943594939, Email: nilufarotaqulova98@gmail.com

Nurumbetova Lobar Rimbayevna

Toshkent davlat transport universiteti, assistent o'qituvchi

Email: lobar.nurumbetova@gmail.com

Allaquliyeva Shahlo Hakimboy qizi

Toshkent davlat transport universiteti, assistent o'qituvchi

Email: shahloallquliyeva@gmail.com

Saparbayev Aziz Adamovich

Ion plazma va lazer texnologiyalari instituti, yetakchi ilmiy xodim

Email: saparbaevaziz83@gmail.com

CsPbI₂Br PEROVSKIT QUYOSH ELEMENTLARINING SAMARADORLIGINI TRANEKSAMIK KISLOTA YORDAMIDA OSHIRISH

Annotatsiya

Perovskit quyosh elementlari yuqori samaradorlik va arzon ishlab chiqarish imkoniyatlari sababli keng tadqiq qilinmoqda. Ularning samaradorligi va barqarorligini oshirish uchun qo'shimcha moddalardan foydalanish samarali yondashuv hisoblanadi. Ushbu ishda traneksamik kislota qo'shimcha modda sifatida qo'llanib, MAAC (metilammoniy atsetat) eritmasida eritildi va perovskit prekursoriga qo'shildi. Bu modda perovskit kristallarining sifatli va zich o'sishini rag'batlantirdi. Tayyorlash jarayoni havoda, xona haroratida amalga oshirilganligi esa sanoatga mosligini oshiradi. 0.5% traneksamik kislota qo'shilganda, CsPbI₂Br perovskit qatlamining kristallik darajasi va yuzasining morfologiyasi yaxshilandi (SEM va XRD orqali tasdiqlangan). Natijada zaryad tashuvchilarning yashash vaqti va tashilish samaradorligi oshib, rekombinatsiya kamaydi hamda EO'S 7,63 % dan 12,14 % gacha ko'tarildi.

Kalit so'zlar: MAAC, traneksamik kislota, perovskit, EO'S, PQE, yutilish, FL intensivligi

UDC 621.315.592.3

Otaqulova Nilufar Farhod kizi

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, PhD
tel: +998943594939, Email: nilufarotaqulova98@gmail.com

Nurumbetova Lobar Rimbayevna

Tashkent State Transport University, assistant teacher
Email: lobar.nurumbetova@gmail.com

Allakulieva Shahlo Hakimboy kizi
Tashkent State Transport University, assistant teacher
Email: shahloallquliyeva@gmail.com

Saparbaev Aziz Adamovich
Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, leading researcher
Email: saparbaevaziz83@gmail.com

ENHANCING THE EFFICIENCY OF CsPbI₂Br PEROVSKITE SOLAR CELLS USING TRANEXAMIC ACID

Abstract

Perovskite solar cells have been extensively investigated due to their high efficiency and low fabrication cost. The use of additives is considered an effective strategy to enhance their efficiency and stability. In this work, tranexamic acid was employed as an additive, dissolved in a methylammonium acetate (MAAc) solution, and incorporated into the perovskite precursor. This additive promoted high-quality and compact growth of perovskite crystals. The fabrication process was carried out in ambient air at room temperature, which enhances its industrial applicability. Upon the addition of 0.5% tranexamic acid, the crystallinity and surface morphology of the CsPbI₂Br perovskite layer were significantly improved, as confirmed by SEM and XRD analyses. Consequently, the charge carrier lifetime and transport efficiency increased, recombination was suppressed, and the power conversion efficiency (PCE) increased from 7.63% to 12.14%.

Keywords: MAAc, tranexamic acid, perovskite, PCE, PSC, absorption, PL intensity.

УДК 621.315.592.3
Отакулова Нилуфар Фарход кызы
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, докторант
телефон: +998943594939, Email: nilufarotaqulova98@gmail.com
Нурумбетова Лобар Римбаевна
Ташкентский государственный транспортный университет, помощник
учителя
Email: lobar.nurumbetova@gmail.com
Аллакулиева Шахло Хакимбой кызы

Ташкентский государственный транспортный университет, помощник
учителя

Email: shahloallquliyeva@gmail.com

Сапарбаев Азиз Адамович

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, ведущий научный
сотрудник

Email: saparbaevaziz83@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ CsPbI_2Br С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНЕКСАМОВОЙ КИСЛОТЫ

Аннотация

Перовскитные солнечные элементы активно исследуются благодаря их высокой эффективности и возможности низкочастотного производства. Использование добавок является эффективным подходом для повышения их эффективности и стабильности. В данной работе транексамовая кислота была использована в качестве добавки, растворённой в растворе метиламмоний ацетата (МААс), и введена в перовскитный прекурсор. Установлено, что данная добавка способствует формированию плотной и высококачественной кристаллической структуры перовскита. Процесс изготовления осуществлялся на воздухе при комнатной температуре, что повышает его промышленную применимость. При добавлении 0,5% транексамовой кислоты кристалличность и морфология поверхности перовскитного слоя CsPbI_2Br значительно улучшились, что было подтверждено результатами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа (SEM и XRD). В результате увеличилось время жизни и эффективность переноса носителей заряда, снизилась рекомбинация, а эффективность преобразования энергии (ЭПЭ) возросла с 7,63% до 12,14%.

Ключевые слова: метиламмоний ацетат (МААс), транексамовая кислота, перовскит, ЭПЭ, ПСЭ, поглощение, интенсивность фотолюминесценции.

Kirish

Noorganik qo'rg'oshin halidi (PQE) perovskit quyosh elementlari yuqori elektron harakatchanligi, yuqori yorug'lik yutish koeffitsienti, tashuvchining diffuziya

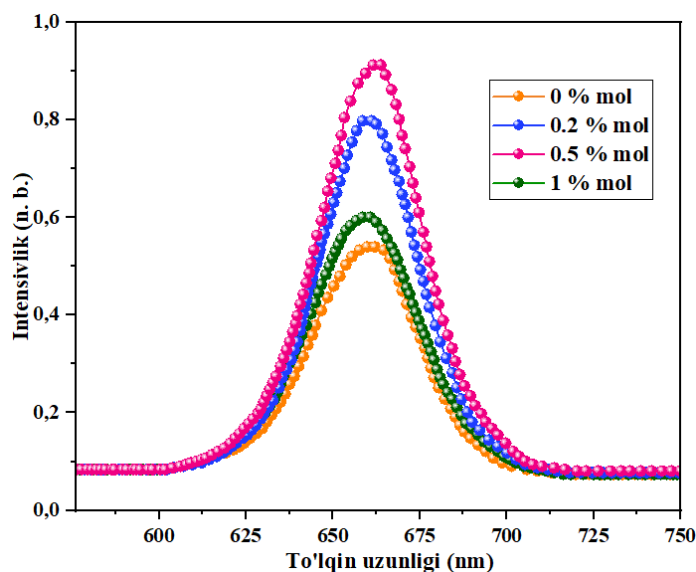
uzunligi kabi turli afzalliklarga ega bo'lganligi sababli quyosh elementlari uchun istiqbolli materiallar ekanligi isbotlandi[1-2]. Noorganik CsPbI_2Br perovskit materiallari yuqori termal barqarorlik va faza barqarorligiga ega ekanligi bilan perovskit asosidagi quyosh elementlari uchun istiqbolli hisoblanadi[3-5]. Biroq, CsPbI_2Br perovskitning barqaror va yuqori samaradorlikka ega kubik strukturali qora fazasini olish uchun $>250^\circ\text{C}$ yuqori haroratda qizdirish talab qilinadi[6]. Perovskit quyosh elementlari uchun kubik strukturali qora faza ideal holat hisoblanadi. Sababi bunday holatda perovskit faol qatlam ichida zaryadlarning harakatlanishi va yashash vaqti eng yaxshi natijaga erishadi, ya'ni ajralgan qarama-qarshi zaryad jufti eksitonning yashash vaqti uzoqroq bo'lib tezda rekombinatsiyaga uchramaydi. Shuningdek qora fazada perovskit faol qatlamning yutilish spektri ham keng diapazonda bo'ladi[7-10].

Ushbu ishda CsPbI_2Br eritmasiga turli mol miqdorlarida qo'shilgan traneksamik kislota qo'shimchasining perovskit faol qatlami sifati va xossalariga ta'siri o'rganildi. Traneksamik kislota bu tibbiyotda keng qo'llaniladigan va hozirgi kunda perovskit quyosh elementlarida ham qo'shimcha modda sifatida o'rganilayotgan organik birikma hisoblanadi. Molekulyar formulasi $\text{C}_8\text{H}_{15}\text{NO}_2$. Traneksamik kislota siklik (halqasimon) tuzilmaga ega bo'lib, siklogeksan halqasiga quyidagi ikkita guruh birlashtirilgan: $-\text{COOH}$ guruhi perovskitdagi Pb^{2+} bilan kovalent yoki vodorod bog' hosil qilishi orqali struktura barqarorligi oshiriladi[11-15]. NH_2 guruhi esa yodid yoki bromid bo'shliqlari bilan bog'lanib defektlarni passivlashtiradi[16]. Passivatsiya natijasida zaryad tashuvchilar rekombinatsiyasi kamayadi, bu esa samaradorlikni oshiradi. Shu bilan birga NH_2 guruhlari donalararo chegaralarda harakatlanadigan ionlarni ushlab qolishga yordam berishi mumkin, bu esa ionli migratsiyani kamaytiradi va stabil ishlashga olib keladi[17]. Traneksamik kislota kristallanish kinetikasini sekinlashtirib, donalarning yiriklashishiga va silliqroq qatlam hosil bo'lishiga yordam beradi. Yuzaga bog'langan traneksamik kislota molekulalari faol qatlamni namlik va havo ta'siridan himoya qiladi. Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, CsPbI_2Br asosidagi to'liq noorganik PQElarda organik aminokislotalar qo'shimchasi deyarli

qo‘llanilmagan. Avvalgi izlanishlar, odatda, kristall panjara barqarorligini oshirish va defektlarni kamaytirish uchun FeCl_2 , Mn^{2+} , YbCl_3 , TiCl_4 kabi noorganik tuzlar yoki yuzani passivlovchi noorganik qatlamlarga tayanadi. Shu nuqtai nazardan, halqasimon tuzilishga ega traneksamik kislota ($-\text{COOH}$ va $-\text{NH}_2$ guruhlari bilan) qo‘shilishi perovskit donalarining o‘rishini boshqarish, donalararo chegaralarni mustahkamlash va namlikka chidamlilikni yaxshilash orqali yangi, istiqbolli yondashuv sifatida ajralib turadi[18].

Natijalar va muhokamalar

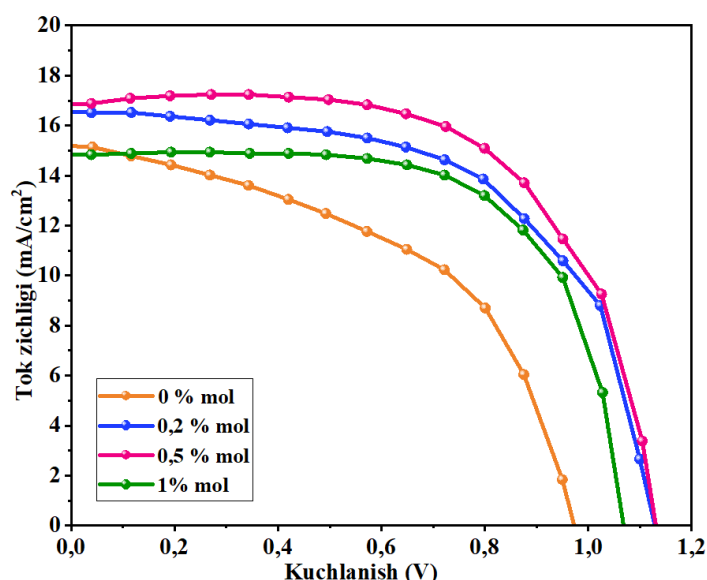
CsPbI_2Br perovskit faol qatlamlaridagi nurlanishsiz rekombinatsiya jarayonlarini baholash uchun fotolyuminessensiya (FL) spektrlari o‘lchandi. O‘lchovlar bir xil uyg‘otuvchi to‘lqin uzunligi va yoritish intensivligi sharoitida amalga oshirildi. FL o‘lchovi perovskit qatlamidan chiqayotgan fotonlar intensivligini aniqlash orqali faol qatlamdagi radiaktiv rekombinatsiya samaradorligini baholaydi[20-23].



1-rasm. CsPbI_2Br faol qatlamlarining FL spektrlari

1-rasmda turli miqdorda traneksamik kislota qo‘shilgan CsPbI_2Br perovskit faol qatlamlarining barqaror FL spektrlari keltirilgan. Barcha faol qatlamlarning FL intensivligi eng kuchli nurlanishni 660 nm da chiqaradi, bu esa ularning taqiqlangan soha kengligi taxminan 1,88 eV ekanligini bildiradi. Bu pik joylashuvining deyarli o‘zgarmasligi shuni anglatadiki, traneksamik kislota qo‘shimchasi perovskitning elektron tuzilmasini (taqiqlangan soha kengligini) o‘zgartirmagan, balki asosan faol qatlam yuzasi va donachalararo chegaralardagi

defektlar bilan bog‘liq jarayonlarga ta’sir qilgan. Birinchi holda ya’ni traneksamik kislota qo’shimchasi qo’shmasdan tayyorlangan faol qatlamlar eng past FL intensivligiga ega bo‘lib, bu yuqori nuqson zichligi va kuchli nurlanishsiz rekombinatsiya mavjudligini ko‘rsatadi. 0,2% traneksamik kislota qo’shib tayyorlangan faol qatlamlarning FL intensivligi traneksamik kislota qo’shilmagan CsPbI₂Br perovskit faol qatlamlarining FL intensivligiga qaraganda yuqoriroq, ammo 0,5% va 1% namunalariga nisbatan pastroq natija ko‘rsatdi. Bu shuni anglatadiki, traneksamik kislota molekulalari perovskit sirtidagi va donachalararo chegaralardagi defektlarning bir qismini passivlashtirgan bo‘lsa-da, bu konsentratsiya optimal darajaga yetmagan. Eng yuqori FL intensivligi 0,5% traneksamik kislota qo’shib tayyorlangan CsPbI₂Br perovskit faol qatlamlarida kuzatildi. Bu natija faol qatlamdagi zaryad tashuvchilar (elektron va kovaklar) yorug‘lik yutgandan so‘ng asosan nurlanish orqali qayta birikayotganini va nurlanmasdan yo‘qolib ketish ehtimoli keskin kamayganini ko‘rsatadi. Bunday kuchli FL intensivligi traneksamik kislota molekulalarining amin (–NH₂) va karboksil (–COOH) guruhlarini orqali perovskit yuzasida va donachalararo chegaralarda joylashgan Pb²⁺ ionlari hamda galogen bo‘shliqlari bilan kuchli bog‘lanishi natijasida defektlarni samarali passivlashtirishidan kelib chiqadi[24-25]. Defektlar kamayganda, zaryad tashuvchilar tuzoqqa tushmaydi va yorug‘lik chiqarish samaradorligi ortadi. Biroq traneksamik kislota miqdori 1% gacha oshirilganda, FL intensivligi keskin pasayib ketdi. Bu ehtimol, ortiqcha traneksamik kislota perovskit kristall o‘shishini buzib, yuzada ortiqcha organik qatlam hosil qilgani va natijada zaryad o‘tishini qisman cheklagani bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin.



2-rasm. Turli miqdorda traneksamik kislota qo'shimchasi kiritilgan CsPbI₂Br PQElarning J-V egri chiziqlari

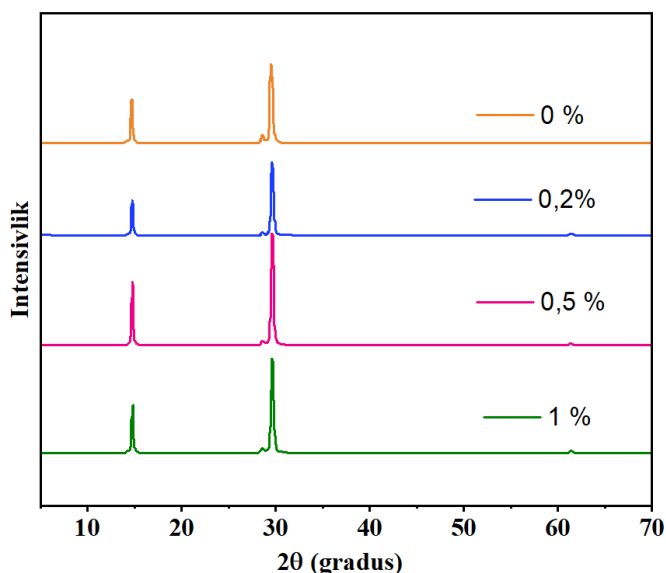
2-rasmda CsPbI₂Br PQElarning J–V egri chiziqlari keltirilgan. O'lchovlar, yuqorida tahlil qilingan yorug'lik tushmagan holatdagi J–V egri chiziqlari uchun qo'llanilgan PQElar tuzilishida amalga oshirildi va asosiy fotovoltaiik parametrlar (V_{OC} , J_{SC} , FF va EO'S) 1-jadvalda keltirilgan. Birinchi holda, ya'ni traneksamik kislota qo'shimchasi qo'shilmagan holatda fotovoltaiik parametrlar nisbatan past ko'rsatkichlarga ega bo'ldi: V_{OC} 1,005 V, J_{SC} 14,62 mA/cm², FF 51,93 %, EO'S esa 7,63 % ni tashkil etdi. Traneksamik kislota miqdori 0,2 % ga oshirilganda esa J_{SC} 16,6 mA/cm² va EO'S ning 11,03 % ga oshganligini ko'rishimiz mumkin, FF ham 59,08 % ga ko'tarilgan. 0.5% konsentratsiyada esa eng yuqori samaradorlikka erishildi va V_{OC} 1.13 V, J_{SC} 16.87 mA·cm⁻², FF 63.69 % EO'S 12.14% ga ko'tarildi.

1-jadval. Turli miqdorda traneksamik kislota qo'shimchasi kiritilgan CsPbI₂Br PQElarning fotovoltaiik parametrlari

Traneksamik kislota	V_{OC} (V)	J_{SC} (mA·c m-2)	FF (%)	EO'S (%)
0%	1.005	14.62	51.93	7.63
0.2%	1.125	16.6	59.08	11.03
0.5%	1.13	16.87	63.69	12.14
1%	1.058	15.21	66.81	10.75

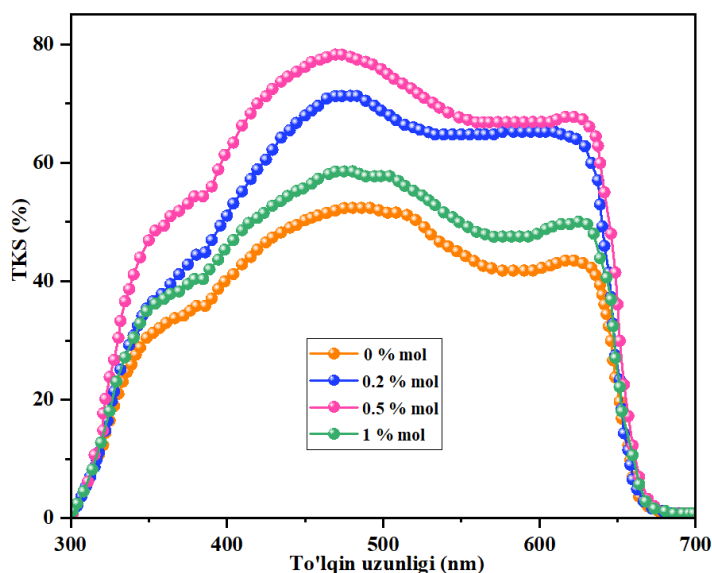
Bu natija traneksamik kislota qo'shilishi perovskit faol qatlamining sifatini yaxshilab, rekombinatsiya jarayonlarini kamaytirganini ko'rsatadi. Qo'shimcha miqdorini 1% ga oshirganimizda esa ko'rsatkichlar biroz pasaydi, V_{OC} 1.058 V, J_{SC} 15.21 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ va EO'S 10.75% ga kamaydi. Bu ortiqcha qo'shimcha faol qatlamda yangi nuqson markazlarini hosil qilib, rekombinatsiya jarayonlarini kuchaytirganini ko'rsatadi. Xulosa qilib aytganda, traneksamik kislota qo'shilishi CsPbI₂Br PQElarning samaradorligini sezilarli darajada oshiradi.

3-rasmda 0%, 0.2%, 0.5% va 1% miqdorda traneksamik kislota qo'shimchasi kiritilgan CsPbI₂Br PQElarning XRD (rentgen difraksiyasi) spektrlari keltirilgan. Traneksamik kislota turli konsentratsiyalarda qo'shilishi CsPbI₂Br PQElarning kristall tuzilishiga sezilarli ta'sir ko'rsatdi. Grafikdan ko'rish mumkinki, barcha namunalarning difraksiya intensivligining eng yuqori piklari asosan ikkita joyda mavjud bo'lib, bu ikkita XRD piklar (100) va (200) CsPbI₂Br faol qatlamlarning kub fazali strukturasi mos keladigan 14,6° va 29,5° sohalarda joylashgan. 0% ya'ni traneksamik kislota qo'shilmagan holatda tayyorlangan CsPbI₂Br PQElarning XRD spektrida boshqa qo'shimcha kiritilgan namunalardan taqqoslaganda intensivlik ancha past bo'lib, bu perovskitning kristallik darajasi va fazaviy barqarorligi yetarli darajada shakllanmaganini bildiradi. Qo'shimcha miqdori 0.2% ga oshirilganda, piklar joylashuvi deyarli o'zgarmagan holda intensivlikning biroz oshishi kuzatildi. Bu esa kristallanish jarayonining yaxshilanishi va panjara defektlarining kamayganligini ko'rsatadi.



3-rasm. Turli miqdorda traneksamik kislota qo'shimchasi kiritilgan CsPbI₂Br PQElarning XRD spektrlari

Traneksamik kislota konsentratsiyasi 0.5% ga yetganda esa CsPbI₂Br PQElarning XRD spektr intensivligi eng yuqori bo'ldi, bu optimal miqdorda traneksamik kislota qo'shilishi kristall panjaraning ichki tartibini yanada mustahkamlab, yuqori sifatli kristallar hosil bo'lishiga xizmat qilganini bildiradi. Shu bilan birga, traneksamik kislota miqdorini 1% ga oshirganimizda, CsPbI₂Br PQElarning XRD spektr piklarida pasayish kuzatildi. Bu ortiqcha traneksamik kislota konsentratsiyasi panjarada ichki stress hosil qilib, kichik ikkilamchi fazalarning paydo bo'lishiga olib kelganligidan bo'lishi mumkin. Umuman olganda, XRD natijalari traneksamik kislota qo'shilishi, perovskitlarning kristall sifati va barqarorligini oshirishda muhim rol o'ynashini ko'rsatdi. Ushbu jarayonning fizik kimyoviy asosiy sababi shundaki, traneksamik kislota molekulalarida mavjud bo'lgan funksional guruhlar (–COOH va –NH₂) qo'shimcha ravishda O–Pb o'rtasida vodorod bog'lanishlarini hosil qiladi. Bu bog'lanishlar kristall o'sishini vaqtincha sekinlashtiradi, ya'ni birdaniga tez kristallanishni cheklaydi. Natijada perovskit donalari asta-sekin va bir xil yo'nalishda o'sadi, bu esa faol qatlamning morfologiyasini sezilarli darajada yaxshilaydi. Shu orqali faol qatlamda bo'shliqlar va donalararo nuqsonlar kamayadi, butun qatlam bir tekis qoplanadi va yuqori sifatli, silliq yuzaga ega bo'ladi. SEM tasvirlarida ham bu jarayon tasdiqlangan, ya'ni qo'shimchasiz namunaga qaraganda traneksamik kislota qo'shilgan holatda faol qatlamning yuzasi zichroq, g'ovaksiz va donalar kattaroq bo'lib o'sgan. Demak, XRD va SEM natijalari bir-birini to'ldirib, traneksamik kislota qo'shimchasi perovskit faol qatlamlarining struktura va morfologik sifatini yaxshilashda muhim rol o'ynashini ko'rsatmoqda.



4-rasm. Turli miqdorda traneksamik kislota qo‘shilgan CsPbI₂Br PQElarning TKS spektrlari

4-rasmda turli miqdorda traneksamik kislota qo‘shilgan CsPbI₂Br PQElarning butun to‘lqin uzunliklari bo‘yicha tashqi kvant samaradorligi (TKS) spektrlari keltirilgan. Barcha namunalarning TKS egri chiziqlari 300 dan 700 nm gacha bo‘lgan keng to‘lqin uzunligi diapazonini qamrab oladi, bu esa CsPbI₂Br perovskit faol qatlamlarning keng spektrli yorug‘likni samarali yutishini ko‘rsatadi. Grafikdan ko‘rish mumkinki, traneksamik kislota qo‘shilmagan namunada TKS qiymatlari eng past bo‘lib, bu holat faol qatlam yuzasida va donalararo chegaralarda mavjud bo‘lgan nuqsonlar hamda zaryad tashuvchilarning nurlanishsiz rekombinatsiyasi bilan izohlanadi. Umuman olganda, TKS spektri natijalari shuni ko‘rsatadiki, traneksamik kislota qo‘shilishi perovskit faol qatlamlarining yorug‘likdan foydalanish qobiliyatini sezilarli darajada yaxshilaydi va eng optimal natija 0.5% konsentratsiyada kuzatiladi.

Xulosa

Xulosa qilib aytganda, traneksamik kislota qo‘shimchasining qo‘llanishi CsPbI₂Br asosidagi PQElarning optik, fotovoltaik va morfologik xususiyatlarini sezilarli darajada yaxshiladi. Optimal 0.5% konsentratsiyada tayyorlangan faol qatlamlar yanada zichroq morfologiyaga ega bo‘lib, bo‘shliqlar sezilarli darajada kamaydi, kristallanish darajasi oshdi, ichki nuqson zichligi qisqardi hamda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi yaxshilandi. Natijada CsPbI₂Br asosidagi

PQElarning ochiq zanjir kuchlanishi 1.13 V, tok zichligi 16.87 mA/cm², to'ldirish faktori 63.69% va EO'S 12.14% ga oshdi. Bu qiymat qo'shimcha qo'shilmasdan tayyorlangan PQElardagi 7.63% EO'S dan ancha yuqori bo'lib, traneksamik kislotaning samarali qo'shimcha sifatida muhim ahamiyatga ega ekanligini isbotlaydi. Shunday qilib, traneksamik kislota CsPbI₂Br asosidagi PQElarda samaradorlik va barqarorlikni oshirish uchun istiqbolli qo'shimcha modda sifatida tavsiya etilishi mumkin.

Minnatdorchilik

Ushbu maqoladagi olingan natijalar Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi tomonidan moliyalashtirilgan FZ-20200929177-raqamli —Istiqbolli perovskitli quyosh elementlarida energiya almashinishi va zaryadlarning fotomajburiy migratsiyasi jarayonlarini mavzusi bo'yicha loyiha doirasida bajarilgan.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Wang, D., et al., *Stability of perovskite solar cells*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016. **147**: p. 255-275.
2. Zhang, Y., et al., *High efficiency (16.37%) of cesium bromide—passivated all-inorganic CsPbI₂Br perovskite solar cells*. Solar RRL, 2019. **3**(11): p. 1900254.
3. Targhi, F.F., Y.S. Jalili, and F. Kanjouri, *MAPbI₃ and FAPbI₃ perovskites as solar cells: Case study on structural, electrical and optical properties*. Results in physics, 2018. **10**: p. 616-627.
4. Targhi, F., Y. Jalili, and F. Kanjouri, *MAPbI₃ and FAPbI₃ perovskites as solar cells: Case study on structural, electrical and optical properties*. Results Phys. **10**, 616–627. 2018.
5. Swarnkar, A., W.J. Mir, and A. Nag, *Can B-site doping or alloying improve thermal-and phase-stability of all-inorganic CsPbX₃ (X= Cl, Br, I) perovskites?* ACS Energy Letters, 2018. **3**(2): p. 286-289.
6. Song, J., et al., *Progress and perspective on inorganic CsPbI₂Br perovskite solar cells*. Advanced Energy Materials, 2022. **12**(40): p. 2201854.

7. Ho-Baillie, A., et al., *Untapped potentials of inorganic metal halide perovskite solar cells*. Joule, 2019. **3**(4): p. 938-955.
8. Debnath, P., et al., *Synergistic effects of rubidium bromide on CsPbBr₃ perovskite solar cell performance*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2025. **36**(14): p. 827.
9. Abouzied, A.S., et al., *Optimization of CsPbI₂Br-Based Perovskite Solar Cells with TiCl₄ Doping for Improved Stability and Performance*. Surfaces and Interfaces, 2025: p. 107038.
10. Yin, G., et al., *Precursor engineering for all-inorganic CsPbI₂Br perovskite solar cells with 14.78% efficiency*. Advanced functional materials, 2018. **28**(39): p. 1803269.
11. Bai, D., et al., *Interstitial Mn²⁺-driven high-aspect-ratio grain growth for low-trap-density microcrystalline films for record efficiency CsPbI₂Br solar cells*. ACS Energy Letters, 2018. **3**(4): p. 970-978.
12. Patil, J.V., et al., *Novel ytterbium-doped CsPbI₂Br thin-films-based inorganic perovskite solar cells toward improved phase stability*. Materials Today Chemistry, 2021. **22**: p. 100557.
13. Ozturk, T., et al., *Composition engineering of operationally stable CsPbI₂Br perovskite solar cells with a record efficiency over 17%*. Nano Energy, 2021. **87**: p. 106157.
14. Xiao, C., et al., *Junction quality of SnO₂-based perovskite solar cells investigated by nanometer-scale electrical potential profiling*. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017. **9**(44): p. 38373-38380.
15. Yan, L., et al., *Interface engineering for all-inorganic CsPbI₂Br perovskite solar cells with efficiency over 14%*. Advanced materials, 2018. **30**(33): p. 1802509.
16. Wang, Y., et al., *A facile low temperature fabrication of high performance CsPbI₂Br all-inorganic perovskite solar cells*. Solar Rrl, 2018. **2**(1): p. 1700180.

17. Zhang, X., et al., *Thermal conduction-induced crystallization and achieving high efficiency in HTM-free carbon-based CsPbI₂Br solar cells by regulating the dipole moment of aliphatic amine acetate additives*. Journal of Materials Chemistry C, 2025. **13**(14): p. 7071-7081.
18. Wang, W., et al., *Modification of compact TiO₂ layer by TiCl₄-TiCl₃ mixture treatment and construction of high-efficiency carbon-based CsPbI₂Br perovskite solar cells*. Journal of Energy Chemistry, 2021. **63**: p. 442-451.
19. Chao, L., et al., *Room-temperature molten salt for facile fabrication of efficient and stable perovskite solar cells in ambient air*. Chem, 2019. **5**(4): p. 995-1006.
20. Pascoe, A.R., et al., *Planar versus mesoscopic perovskite microstructures: The influence of CH₃NH₃PbI₃ morphology on charge transport and recombination dynamics*. Nano Energy, 2016. **22**: p. 439-452.
21. Kim, S., et al., *Intensifying Chelation of Pb-Related Defects for Enhancing Stability in Halide Perovskite Thin-Film Solar Cells*. Solar RRL, 2025: p. 202500212.
22. Tailor, N.K., et al., *Recent progress in morphology optimization in perovskite solar cell*. Journal of Materials Chemistry A, 2020. **8** (41): p. 21356-21386.
23. Idígoras, J., et al., *The interaction between hybrid organic–inorganic halide perovskite and selective contacts in perovskite solar cells: an infrared spectroscopy study*. Physical Chemistry Chemical Physics, 2016. **18**(19): p. 13583-13590.
24. Li, B., et al., *Interfacial engineering by using self-assembled monolayer in mesoporous perovskite solar cell*. RSC advances, 2015. **5**(114): p. 94290-94295.
25. Li, J., D. Hu, and Q. Chen, *Pb₂⁺/Co₂⁺ modified growth and phase transitions of CsPbBr₃ in heavy metal oxide glass with enhanced magnetic and magneto-optical properties*. Journal of the European Ceramic Society, 2024. **44**(4): p. 2206-2222.

