



UDK: 621.315.592.3

**Nilufar OTAQULOVA,**

*U.A. Arifov nomidagi Ion plazma va lazer texnologiyalari instituti tayanch doktoranti*

*E-mail: otaqulovanilufar78@gmail.com*

**Lobar NURUMBETOVA,**

*Toshkent davlat transport universiteti assistent o'qituvchisi*

**Sanabar REYMBAYEVA,**

*O'zbekiston Milliy universiteti katta o'qituvchisi*

**Aziz SAPARBAYEV,**

*O'z RFA U.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti yetakchi ilmiy xodimi*

*O'zMU dotsenti, PhD G'.Eshonqulov taqrizi asosida*

### INVESTIGATING THE EFFICIENCY OF BASED ON CsPbI<sub>2</sub>Br SOLAR CELLS BY ADDITIVES TO PEROVSKITE SOLUTION

Annotation

Perovskite solar cells have garnered substantial attention from the global research community due to their rapidly improving power conversion efficiency and low-cost fabrication potential. In this study, tranexamic acid was introduced as an additive to enhance the photovoltaic performance of CsPbI<sub>2</sub>Br-based perovskite solar cells. Photovoltaic characterization demonstrated that the incorporation of 0.5% tranexamic acid led to a pronounced improvement in the current-voltage (J-V) characteristics of the devices. Consequently, both the open-circuit voltage and fill factor were markedly improved, resulting in an increase in power conversion efficiency from 7.63% to 12.14%. These findings confirm that tranexamic acid serves as an effective additive for regulating charge carrier dynamics and improving the overall photovoltaic performance of CsPbI<sub>2</sub>Br perovskite solar cells.

**Keywords:** CsPbI<sub>2</sub>Br perovskite, Solar cell, Efficiency, Acid, Current density.

### ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ CsPbI<sub>2</sub>Br С ДОБАВЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ К РАСТВОРУ ПЕРОВСКИТА

Аннотация

Известно, что в настоящее время перовскитные солнечные элементы вызывают значительный интерес со стороны мирового научного сообщества, и в результате многочисленных исследований в данной области были достигнуты существенные успехи. В данной работе транексамовая кислота была использована в качестве добавки с целью повышения фотогальванической эффективности перовскитных солнечных элементов на основе CsPbI<sub>2</sub>Br. Фотогальванические измерения показали, что добавление 0,5 % транексамовой кислоты приводит к заметному улучшению вольт-амперных характеристик устройств. В результате указанных улучшений были зафиксированы увеличение напряжения холостого хода и коэффициента заполнения, что привело к росту коэффициента преобразования энергии с 7,63 % до 12,14 %. Полученные результаты демонстрируют, что транексамовая кислота является эффективной добавкой для улучшения динамики носителей заряда и общей фотогальванической эффективности перовскитных солнечных элементов на основе CsPbI<sub>2</sub>Br.

**Ключевые слова:** CsPbI<sub>2</sub>Br перовскит, солнечная элемент, эффективность, кислота, плотность тока.

### PEROVSKIT ERITMASIGA QO'SHIMCHA MODDALAR QO'SHISH YORDAMIDA CsPbI<sub>2</sub>Br ASOSIDAGI QUYOSH ELEMENTLARNING SAMARADORLIGINI TADQIQ QILISH

Annotatsiya

Ma'lumki, hozirgi kunda perovskit quyosh elementlari dunyo olimlarining katta qiziqishiga sabab bo'lmoqda va bu sohada o'tkazilgan ko'plab tadqiqotlar natijasida bir qancha yaxshi natijalarga erishildi. CsPbI<sub>2</sub>Br asosidagi perovskit quyosh elementlarining fotovoltaiq samaradorligini oshirish maqsadida ushbu ishda traneksamik kislota qo'shimcha modda sifatida qo'llanildi. Fotovoltaiq o'lchovlar shuni ko'rsatdiki, 0,5 % traneksamik kislota qo'shilishi qurilmaning volt-amper xarakteristikalarini sezilarli darajada yaxshiladi. Ushbu yaxshilanishlar natijasida ochiq zanjir kuchlanishi va to'ldirish koeffitsienti oshib, energiya o'zgartirish samaradorligi 7,63 % dan 12,14 % gacha yetdi. Olingan natijalar traneksamik kislota CsPbI<sub>2</sub>Br perovskit quyosh elementlarida zaryad tashuvchilar dinamikasini yaxshilovchi samarali qo'shimcha ekanini ko'rsatadi.

**Kalit so'zlar:** CsPbI<sub>2</sub>Br perovskit, Quyosh element, Samaradorlik, Kislota, Tok zichligi.

**Kirish.** Bugungi kunda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish global miqyosda dolzarb masalalardan biri hisoblanadi. An'anaviy yoqilg'i manbalarining cheklanganligi va ekologik muammolarning keskinlashuvi quyosh energiyasidan samarali foydalanishni taqozo etmoqda[1, 2]. Shu nuqtai nazardan, perovskit quyosh elementlari (PQE) yuqori energiya o'zgartirish samaradorligi, past ishlab chiqarish xarajatlari va oddiy texnologik jarayonlari tufayli so'nggi yillarda ilmiy tadqiqotlarning markazida bo'lib kelmoqda[3]. Qisqa vaqt ichida perovskit quyosh elementlarining samaradorligi sezilarli darajada oshib, ularni an'anaviy kremniy asosidagi Quyosh elementlari bilan raqobatdosh darajaga olib chiqdi[4-7].

Organik–anorganik gibrid perovskit materiallar yuqori optik yutilish koeffitsienti, zaryad tashuvchilarining diffuziya uzunligi kattaligi va sozlanadigan taqiqlangan soha kengligi kabi afzalliklarga ega. Biroq, ularning namlik, issiqlik va yorug'lik ta'sirida barqarorligi yetarli darajada yuqori emasligi amaliy qo'llanilishini cheklab kelmoqda. Shu sababli so'nggi tadqiqotlarda to'liq noorganik perovskitlar, xususan CsPbI<sub>2</sub>Br asosidagi materiallar yuqori termal barqarorligi va mos optoelektron xossalari tufayli alohida e'tiborga olinmoqda[8].

CsPbI<sub>2</sub>Br perovskitlari nisbatan katta taqiqlangan soha kengligiga ega bo'lib, yuqori ochiq zanjir kuchlanishini ta'minlaydi. Shunga qaramay, ushbu materiallar asosida tayyorlangan faol qatlamlarda kristall panjaradagi nuqsonlar, donalar chegaralaridagi tuzoq holatlar va zaryad tashuvchilarning rekombinatsiyasi fotovoltaiq samaradorlikni cheklovchi asosiy omillar bo'lib qolmoqda[9-12]. Ushbu muammolarni bartaraf etish uchun perovskite faol qatlamini modifikatsiyalash, xususan, qo'shimcha moddalardan foydalanish samarali yondashuv sifatida keng tadqiq qilinmoqda.

Qo'shimcha moddalardan foydalanish perovskit kristallarining o'sish jarayonini boshqarish, donalar o'lchamini kattalashtirish, sirt va hajmiy nuqsonlarni passivatsiya qilish hamda zaryad tashuvchilarning tashilish xossalari yaxshilash imkonini beradi[13]. So'nggi yillarda organik kislotalar va funksional guruhlarga ega molekular perovskit qatlamlarida nuqsonlarni kamaytirishda samarali ekanligi ko'rsatib berildi[14]. Shu nuqtai nazardan, traneksamik kislota o'zining kimyoviy tuzilishi va funksional guruhlari tufayli perovskit kristallaridagi nuqsonlarni passivatsiya qilishda istiqbolli qo'shimcha sifatida qaralmoqda.

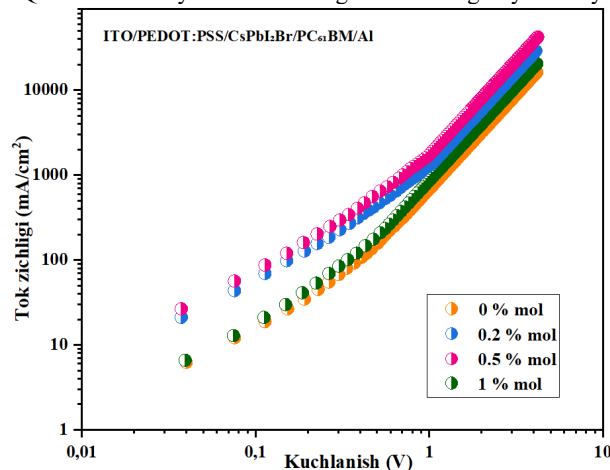
Mazkur ishda CsPbI<sub>2</sub>Br asosidagi perovskit quyosh elementlarining fotovoltaiq samaradorligini oshirish maqsadida traneksamik kislota qo'shimcha modda sifatida qo'llanildi. Tadqiqotda traneksamik kislolaning perovskit qatlamining zaryad tashuvchilar dinamikasiga, rekombinatsiya jarayonlariga hamda PQElarning fotovoltaiq parametrlariga ta'siri o'rganildi.

#### Tajriba usuli va qurilmalar

Quyosh elementini yig'ishda avvalo shisha/ITO tagliklar tayyorlanib, 9 daqiqa davomida kislorod plazmasi bilan ishlov berildi[15]. So'ng kovak tashuvchi qatlam sifatida PEDOT:PSS eritmasi (H.C. Starck, Germaniya) 0.45  $\mu\text{m}$  suvli filtr orqali filtrlandi. Keyin atmosfera sharoitida 4000 rpm tezlikda 30 soniya davomida spin-coating qilindi va 160 °C da 30 daqiqa quritildi. Natijada, silliq va zich ko'k rangli PEDOT:PSS qatlam olindi. Yorug'lik yutuvchi qatlam tayyorlashda MAAC eritmasiga 10 mg/ml konsentratsiyada traneksamik kislota qo'shildi va xona haroratida 2 soat aralastirildi[15]. Keyin PbI<sub>2</sub>, PbBr<sub>2</sub> va CsI tuzlari 1:1:2 mol nisbatda shu eritmada eritilib, 0,325 M konsentratsiya hosil qilindi va 60 °C da 6 soat aralastirildi. Olingan tiniq perovskit eritmasi 2500 rpm tezlikda 60 soniya davomida spin-coating qilinib, 130 °C da 10 daqiqa quritildi va qora-jigarrang qatlam olindi. Elektron tashuvchi qatlam sifatida PC<sub>61</sub>BM kukuni xlorbenzolda 20 mg/ml eritilib, 3000 rpm da 30 soniya spin-coating qilindi va 90 °C da 10 daqiqa quritildi. Metall elektrod sifatida 30 nm qalinlikdagi alyuminiy vakuum ostida bug' bilan cho'ktirildi. Qurilmaning samarali yuzasi 0,1 cm<sup>2</sup> bo'ladi. Natijada ITO/PEDOT:PSS/CsPbI<sub>2</sub>Br/PC<sub>61</sub>BM/Al tuzilmasidagi perovskit quyosh elementi tayyor bo'ldi.

#### Natija va muhokamalar

1-rasmda CsPbI<sub>2</sub>Br faol qatlamlaridagi zaryad tashuvchilarining ko'chish qobiliyatini aniqlash uchun SCLC usulida olingan J–V egri chiziqlari keltirilgan. Bu usul CsPbI<sub>2</sub>Br PQElarning zaryad tashish xususiyatlarini J–V egri chiziqlari asosida tahlil qilish imkonini beradi. Zaryad tashuvchilarning ko'chish qobiliyati oshishi ularning rekombinatsiya jarayonlarini sezilarli darajada kamaytiradi va natijada PQElar ichida zaryad tashilishining samaradorligini yaxshilaydi[16].



1-rasm. CsPbI<sub>2</sub>Br PQElarning SCLC usulida olingan J–V egri chiziqlari

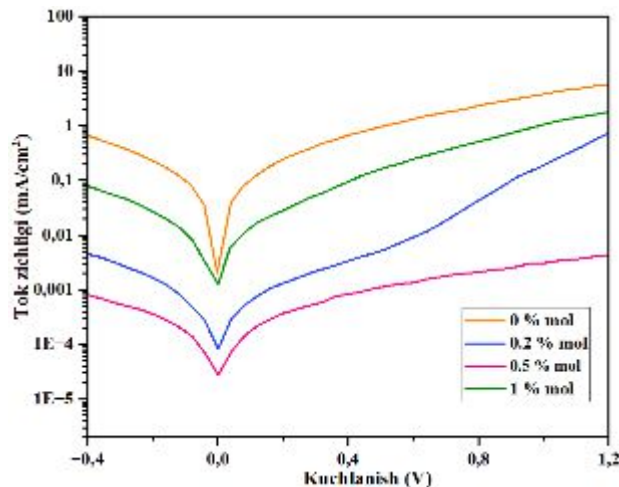
Shundan ko'rinadiki, traneksamik kislota qo'shimchasi kiritilgandan so'ng perovskit yupqa qatlamining elektron ko'chish qobiliyati yaxshilandi, eng yuqori qiymat esa 0,5 % traneksamik kislota qo'shilgan PQElarda kuzatildi. Bu esa elektronlarning tezroq va samaraliroq harakatini ta'minlanganligini bildiradi. Traneksamik kislota miqdori 1 % ga oshirganimizda esa oqim pasaydi, bu traneksamik kislolaning yuqori konsentratsiyasi perovskit kristall tuzilmasiga zarar yetkazib, elektron oqimini cheklayotganini ko'rsatadi. Umuman olganda, traneksamik kislota qo'shilishi natijasida perovskit yuzasi va donalar chegaralaridagi defektlar passivatsiya qilinishi orqali rekombinatsiya kamaydi va kristall sifati yaxshilandi. Shu orqali zaryad tashuvchilarning samarali harakat qilishi imkoniyati yaratiladi. Biroq optimaldan yuqori konsentratsiya aksincha salbiy ta'sir ko'rsatib, ortiqcha organik qatlam tufayli qurilmaning fotovoltaiq xususiyatlarini yomonlashtirdi. Shunday qilib, traneksamik kislolaning 0,5% miqdorida qo'shilishi CsPbI<sub>2</sub>Br PQElar uchun eng maqbul natijani berdi.

1-jadval. 0%, 0,2%, 0,5% va 1% miqdorda traneksamik kislota qo'shimchasi kiritilgan CsPbI<sub>2</sub>Br PQElarning TRPL va SCLC parametrlari

Traneksamik	0%	0.2%	0.5%	1%
-------------	----	------	------	----

kislota				
$\tau_{o'rt}$ (ns)	462	632	674	599
$C$ ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	0,025	0,038	0,059	0,027

1-jadvalda turli miqdorda traneksamik kislota qo'shimchasi kiritilgan CsPbI<sub>2</sub>Br PQElarning TRPL va SCLC natijalari keltirilgan. Natijalar shuni ko'rsatadiki, qo'shimcha qo'shilgan faol qatlamlar (0%) eng qisqa  $\tau_{o'rt}$  (462 ns) va eng past ko'chish qobiliyatiga (0,025  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ) ega bo'lgan. Bu holat bunday qatlamlarda kuchliroq nurlanishsiz rekombinatsiya sodir bo'layotganini va zaryad tashilish jarayoni samaradorligining pastligini anglatadi. 0,2% qo'shimcha kiritilganda  $\tau_{o'rt}$  qiymati 632 ns gacha oshgan, elektronlarning ko'chish qobiliyati esa 0,038  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ga yetgan. Bu esa rekombinatsiya jarayonining kamayganini va zaryad tashuvchilar harakati yaxshilanganligini ko'rsatadi. Eng yuqori samaradorlik 0,5% qo'shimcha qo'shilganda kuzatildi. Bunda  $\tau_{o'rt}$  qiymati 674 ns gacha oshib, elektronlarning ko'chish qobiliyati 0,059  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ni tashkil qildi. Ushbu natija perovskit qatlamida rekombinatsiya jarayonlari sezilarli darajada kamayganini va zaryad tashilish samaradorligi eng yuqori darajaga chiqqanini anglatadi. 1% qo'shimcha kiritilganda esa  $\tau_{o'rt}$  599 ns gacha kamaygan va elektron ko'chish qobiliyati 0,027  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ga tushib ketgan. Bu miqdorda qo'shimcha ortiqcha bo'lib, faol qatlam ichida qayta rekombinatsiya jarayonlarini kuchaytirishi mumkinligini ko'rsatadi. Umuman olganda, jadval natijalari qo'shimcha miqdorining perovskit qatlamlarining fotovoltaiik parametrlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishini yaqqol tasdiqlaydi. Optimal qiymat sifatida 0,5% miqdorda qo'shimcha qo'shish eng yuqori  $\tau_{o'rt}$  va eng katta tashuvchi ko'chish qobiliyatini ta'minlagan bo'lib, bu CsPbI<sub>2</sub>Br PQElarning samaradorligini oshirish uchun muhim omil hisoblanadi.



2-rasm. CsPbI<sub>2</sub>Br PQElarning yorug'lik tushmagan holatdagi J-V egri chiziqchlari

2-rasmda turli miqdorda traneksamik kislota qo'shilgan holda tayyorlangan CsPbI<sub>2</sub>Br PQElarning yorug'lik tushmagan holatdagi J-V egri chiziqchlari ko'rsatilgan. Ya'ni, CsPbI<sub>2</sub>Br PQElarga turli kuchlanishlar berilib, shu paytda oqayotgan tok zichligi (J, mA/cm<sup>2</sup>) o'lchandi. Grafik logarifmik shkalada berilganligi sababli tok qiymatlaridagi katta farqlar aniq ko'rinib turibdi. Yorug'lik tushmagan holatdagi J-V egri chiziqchlari quyosh elementining ichki sifatini baholash uchun juda muhim, ya'ni oqayotgan tok zichligi qanchalik kichik bo'lsa, demak defektlar kam va qurilmaning shunt qarshiligi yuqori bo'ladi [17]. Aksincha, nuqsonlar ko'p bo'lsa, faol qatlam ichida shunt yo'llar paydo bo'ladi va tok zichligi shu shunt yo'llar hisobiga ortadi. Bu esa qurilmaning sifati pastligini bildiradi. Yorug'lik tushmagan holatdagi J-V egri chiziqchlari grafidagi nol volt atrofidagi qiyalik PQElarning shunt qarshiligini ( $R_{sh}$ ) ko'rsatadi. Qiyalikning tik bo'lishi tok zichligining tez ortishini ko'rsatib,  $R_{sh}$  pastligini va shunt yo'llarning ko'pligini bildiradi, aksincha qiyalikning gorizontalga yaqinlashishi tok zichligining kichik bo'lishi hamda  $R_{sh}$  yuqori ekanidan dalolat beradi [18, 19]. Natijalarga ko'ra, 0% traneksamik kislota qo'shilganda qiyalik eng tik bo'lib, tok zichligi katta qiymatlarni namoyon etadi. Bu holat perovskit qatlamida ko'plab defektlar va shunt yo'llar mavjudligini ko'rsatadi. 0,2% mol traneksamik kislota qo'shilganda nol volt atrofidagi qiyalik ancha pasaydi, bu esa donachalararo chegaralar va ichki nuqsonlarning qisman passivatsiyalanishi natijasida shunt oqimlari kamayib,  $R_{sh}$  ortganini anglatadi. 0,5% traneksamik kislota qo'shilganda esa tok zichligi eng kichik qiymatga tushib, egri chiziq deyarli gorizontal ko'rinishga ega bo'ldi. Bu holat perovskit qatlamidagi nuqsonlarning samarali kamayishi va shunt qarshiligi ( $R_{sh}$ )ning maksimal qiymatga erishganini ko'rsatadi. Biroq 1% mol traneksamik kislota kiritilganda egri chiziqning qiyaligi qayta tiklanib, tok zichligi ortdi. Bu holat ortiqcha qo'shimcha modda ta'sirida yangi defektlarning yuzaga kelishi yoki ikkilamchi fazalarning shakllanishi bilan izohlanishi mumkin.

**Xulosa.** Xulosa qilib aytganda olingan natijalar traneksamik kislotaning optimal konsentratsiyasi 0,5% mol ekanligini va shu miqdorda qo'shilgan traneksamik kislota qo'shimchasi perovskit qatlamidagi nuqsonlarni samarali passivatsiya qilib, PQElarning elektr xossalari yaxshilashini ko'rsatdi.

CsPbI<sub>2</sub>Br PQElarning yorug'lik tushmagan holatdagi J-V egri chiziqchlari grafigi orqali oqish toki (leakage current) kamaygani va diod xususiyatlarining yaxshilanganini aniqlandi, bu esa rekombinatsiya yo'qotishlarining pasayganidan dalolat beradi. CsPbI<sub>2</sub>Br faol qatlamlaridagi zaryad tashuvchilarining ko'chish qobiliyatini aniqlash uchun SCLC usulida olingan J-V egri chiziqchlari tahlili esa tuzoq holatlar zichligining kamayganini va zaryad tashuvchilarning tashilish xossalari yaxshilanganini ko'rsatdi.

#### ADABIYOTLAR

1. A.S. Abouzied, A. Basem, A. Almadhor, N.A. OTHMAN, F. Alimova, S.M. Shaaban, H. Albalawi, H.E. Ali, Optimization of CsPbI<sub>2</sub>Br-Based Perovskite Solar Cells with TiCl<sub>4</sub> Doping for Improved Stability and Performance, Surfaces and Interfaces, DOI (2025) 107038.

2. T. Baikie, Y. Fang, J.M. Kadro, M. Schreyer, F. Wei, S.G. Mhaisalkar, M. Graetzel, T.J. White, Synthesis and crystal chemistry of the hybrid perovskite (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>)PbI<sub>3</sub> for solid-state sensitised solar cell applications, *Journal of Materials Chemistry A*, 1 (2013) 5628-5641.
3. T.T. Ava, A. Al Mamun, S. Marsillac, G. Namkoong, A review: thermal stability of methylammonium lead halide based perovskite solar cells, *Applied Sciences*, 9 (2019) 188.
4. G.E. Eperon, S.D. Stranks, C. Menelaou, M.B. Johnston, L.M. Herz, H.J. Snaith, Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells, *Energy & Environmental Science*, 7 (2014) 982-988.
5. X. Zheng, C. Wu, S.K. Jha, Z. Li, K. Zhu, S. Priya, Improved phase stability of formamidinium lead triiodide perovskite by strain relaxation, *ACS Energy Letters*, 1 (2016) 1014-1020.
6. R.J. Sutton, G.E. Eperon, L. Miranda, E.S. Parrott, B.A. Kamino, J.B. Patel, M.T. Hörlantner, M.B. Johnston, A.A. Haghighirad, D.T. Moore, Bandgap-tunable cesium lead halide perovskites with high thermal stability for efficient solar cells, *Advanced Energy Materials*, 6 (2016) 1502458.
7. G.E. Eperon, G.M. Paternò, R.J. Sutton, A. Zampetti, A.A. Haghighirad, F. Cacialli, H.J. Snaith, Inorganic caesium lead iodide perovskite solar cells, *Journal of Materials Chemistry A*, 3 (2015) 19688-19695.
8. M. Kulbak, D. Cahen, G. Hodes, How important is the organic part of lead halide perovskite photovoltaic cells? Efficient CsPbBr<sub>3</sub> cells, *The journal of physical chemistry letters*, 6 (2015) 2452-2456.
9. B. Gao, J. Meng, Highly stable all-inorganic CsPbI<sub>2</sub>Br perovskite solar cells with 11.30% efficiency using crystal interface passivation, *ACS Applied Energy Materials*, 3 (2020) 8249-8256.
10. J.H. Heo, F. Zhang, C. Xiao, S.J. Heo, J.K. Park, J.J. Berry, K. Zhu, S.H. Im, Efficient and stable graded CsPbI<sub>3</sub>-xBr<sub>x</sub> perovskite solar cells and submodules by orthogonal processable spray coating, *Joule*, 5 (2021) 481-494.
11. Z. Dong, W. Li, H. Wang, X. Jiang, H. Liu, L. Zhu, H. Chen, High-temperature perovskite solar cells, *Solar RRL*, 5 (2021) 2100370.
12. R. Shannon, C. Prewitt, *Acta Crystallogr. A, Sect. A*, 32 (1976) 751.
13. Z. Li, M. Yang, J.-S. Park, S.-H. Wei, J.J. Berry, K. Zhu, Stabilizing perovskite structures by tuning tolerance factor: formation of formamidinium and cesium lead iodide solid-state alloys, *Chemistry of Materials*, 28 (2016) 284-292.
14. Q. Sun, W.-J. Yin, Thermodynamic stability trend of cubic perovskites, *Journal of the American Chemical Society*, 139 (2017) 14905-14908.
15. Y. Chen, T. Shi, P. Liu, W. Xie, K. Chen, X. Xu, L. Shui, C. Shang, Z. Chen, H.-L. Yip, The distinctive phase stability and defect physics in CsPbI<sub>2</sub>Br perovskite, *Journal of Materials Chemistry A*, 7 (2019) 20201-20207.
16. H. Sun, J. Zhang, X. Gan, L. Yu, H. Yuan, M. Shang, C. Lu, D. Hou, Z. Hu, Y. Zhu, Pb-reduced CsPb<sub>0.9</sub>Zn<sub>0.1</sub>I<sub>2</sub>Br thin films for efficient perovskite solar cells, *Advanced energy materials*, 9 (2019) 1900896.
17. S.S. Mali, J.V. Patil, J.A. Steele, S.R. Rondiya, N.Y. Dzade, C.K. Hong, Implementing dopant-free hole-transporting layers and metal-incorporated CsPbI<sub>2</sub>Br for stable all-inorganic perovskite solar cells, *ACS Energy letters*, 6 (2021) 778-788.
18. K. Zheng, J. Ge, C. Liu, Q. Lou, X. Chen, Y. Meng, X. Yin, S. Bu, C. Liu, Z. Ge, Improved phase stability of CsPbI<sub>2</sub>Br perovskite by released microstrain toward highly efficient and stable solar cells, *InfoMat*, 3 (2021) 1431-1444.
19. J. Lin, M. Lai, L. Dou, C.S. Kley, H. Chen, F. Peng, J. Sun, D. Lu, S.A. Hawks, C. Xie, Thermochromic halide perovskite solar cells, *Nature materials*, 17 (2018) 261-267.