

**CsPbI₃ PEROVSKIT QUYOSH ELEMENTLARINING
SAMARADORLIGIGA 3-FENOKSI-4-FTOR-BENZALDEGID
QO'SHIMCHASINING TA'SIRI**

Nurumbetova Lobar Rimbayevna

Ion plazma va lazer texnologiyalari instituti tayanch doktoranti,

Shukurullayeva Risolat Maksudjan qizi

Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston milliy universiteti talabasi

Email: lobar.nurumbetova@gmail.com

Annotatsiya. *To'liq noorganik CsPbI₃ perovskitlar yorug'likni yutish koeffitsientining yuqoriligi va quyosh elementlari uchun mos keladigan optimal taqiqlangan soha kengligi tufayli istiqbolli perovskit quyosh elementlaridan biridir. Ammo, CsPbI₃ perovskit faol qatlamdagi nuqsonlar va degradatsiya jarayonlari CsPbI₃ perovskit quyosh element (PQE) larining rivojlanishiga asosiy to'siqlardan biri bo'lmoqda. Perovskit faol qatlamdagi bog'lanmagan erkin qo'rg'oshin (Pb²⁺) va yod (I) ionlari muqarrar ravishda PQElarning struktura buzilishiga olib keladi. Boshqa tomondan, PQElar uchun atrof-muhitning ta'sirida oksidlanishini tufayli, tijoratlashtirish jarayoniga to'sqinlik qiladi va fotovoltaik ish faoliyatini yanada yomonlashtiradi. Shu sababli, 3-fenoksi-4-ftor-benzaldegid (FB) kislotasini qo'shish orqali perovskit faol qatlamlarining barqarorligi va samaradorligi oshirildi. FB kislotasini qo'shish orqali CsPbI₃ faol qatlamlar strukturasi, optik xossalari va zaryad tashish xususiyatlari yaxshilandi.*

Kalit so'zlar: CsPbI₃ perovskit, FB kislotasi, nuqson, nanoteshik, PQE.

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВЛЕНИЯ 3-ФЕНОКСИ-4-ФТОРБЕНЗАЛЬДЕГИДА
НА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ CsPbI₃
ПЕРОВСКИТА**

Нурумбетова Лобар Римбаевна

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, докторант.

Шукуруллаева Рисолат Максуджан кизи

Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, бакалавр.

Email: lobar.nurumbetova@gmail.com

Аннотация. Полностью неорганические CsPbI_3 перовскиты являются одними из перспективных перовскитных солнечных элементов благодаря их высокому коэффициенту светопоглощения и оптимальной запрещенной зоне который подходящей для солнечных элементов. Однако дефекты и процессы деградации в активном слое CsPbI_3 перовскита являются одним из основных препятствий для разработки CsPbI_3 перовскитных солнечных элементов (ПСЭ). Несвязанные свободные ионы свинца (Pb_2^+) и йода (I-) в активном слое перовскита неизбежно приводят к структурному нарушению ПСЭ. С другой стороны, для ПСЭ из-за окисления в окружающей среде это препятствует процессу коммерциализации и еще больше ухудшает фотоэлектрические характеристики. Таким образом, стабильность и эффективность активных слоев перовскита были повышены за счет добавления 3-фенокси-4-фторбензальдегидной (ФБ) кислотой. За счет добавления кислота FB были улучшены структура, оптические свойства и свойства переноса заряда CsPbI_3 активных слоев.

Ключевые слова: CsPbI_3 перовскит, ФБ кислота, дефект, наноотверстие, ПСЭ.

EFFECT OF 3-PHENOXY-4-FLUORO-BENZALDEHYDE ADDITION ON PERFORMANCE OF CsPbI_3 PEROVSKITE SOLAR CELLS

Nurumbetova Lobar

Institute of Ion-plasma and laser technologies, Ph.D. student,

Shukurullaeva Risolat

National university of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, bachelor's student

Email: lobar.nurumbetova@gmail.com

Abstract All-inorganic CsPbI_3 perovskites are one of the promising perovskite solar cells due to their high light absorption coefficient and optical band gap which is suitable for solar cells. However, defects and degradation processes in

the active layer of CsPbI₃ perovskite are one of the main obstacles to the development of CsPbI₃ perovskite solar cells (PSCs). Unbound free lead (Pb²⁺) and iodine (I) ions in the perovskite active layer inevitably lead to structural damage to the PSCs. On the other hand, for PSCs, due to oxidation in the environment, hinders the commercialization process and further degrades the photovoltaic performance. Thus, the stability and efficiency of perovskite active layers were enhanced by the addition of 3-phenoxy-4-fluorobenzaldehyde (FB) acid. By adding acid FB, the structure, optical properties and charge transfer properties of CsPbI₃ active layers were improved.

Key words: CsPbI₃ perovskite, FB acid, defect, pinhole, PSC.

Kirish

So'nggi yillarda Perovskit Quyosh element (PQE) lari samaradorligining muntazam o'sib borishi va arzonligi kabi afzalliklari tufayli quyosh energiyasi texnologiyasi sohasida o'ziga jalb qiladigan fotovoltaiklardan biriga aylandi. Hozirgi vaqtda organik-noorganik gibrid PQE larning samaradorligi 25% dan oshishga ulgurdi[1]. Biroq, PQElarning issiqlikka va atmosfera sharoitiga nisbatan beqarorligi tufayli uzoq muddat foydalanib bo'lmasligi sababli tijorat maqsadida foydalanishga to'sqinlik qiladi[2-3]. Perovskitlar orasida CsPbI₃ perovskit yorug'likni yuqori yutish koeffisientini, PQElar uchun optimal bo'lgan taqiqlangan soxa kengligini (1,73 eV) va organik perovskitlarga qaraganda yaxshi barqarorlikni namoyish etadi. Ammo, CsPbI₃ bilan bog'liq asosiy muammolar mavjud bo'lib masalan, perovskit struktura fazasining beqarorligi (xona hararotida qora fazadan sariq fazaga o'tishi) va nanoteshikchalarga o'xshash tuzoq va kovak nuqsonlari kabi muammolar CsPbI₃ PQElar uchun energiya o'zgartirish samaradorligi (EO'S)ni va barqarorlikni yanada yaxshilashga to'sqinlik qiluvchi asosiy muammolarga aylandi[4-5]. Shu sababli, ba'zi tajriba usullarini, jumladan, interfaol passivatsiya (qatlamlararo reaksiyani bloklash), ion doping (kiritish) qilish va boshqa qo'shimcha tajriba usullari bilan qilingan ishlar PQElarning ish faoliyatini yaxshilash uchun juda ko'plab tadqiqotlar olib borilmoqda. CsPbI₃

PQElarning ishlashi vaqtida bog'lanmagan Pb^{2+} va I^- ta'siridagi kovak yetishmovchiligi nurlanishsiz rekombinatsiya markazlari sifatida hosil bo'lib, PQElarning samaradorligi va barqarorligiga keskin salbiy ta'sir qiladi. Ushbu nuqsonlar elektron va kovak tashuvchi qatlamlar va perovskit faol qatlam chegarasi sirtidagi kimyoviy buzilishning sababi deb hisoblanadi[6-8]. Demak, yuqori samarali PQElarni ishlab chiqarishda faol qatlam nuqsonlarini kamaytirish zarur. Perovskitlarni optimallashtirish tajribalarida turli nuqsonlarni kamaytirish strategiyalari C=O bog'larini o'z ichiga olgan ftorid ionlarini passivatorlar sifatida keng qo'llangan. Masalan, Li va uning guruhi NaF ni perovskit faol qatlamlariga kiritdi, natijada F ionlari nafaqat Pb^{2+} bilan ionli aloqalarni samarali hosil qila oladi, balki kationlar hosil qilgan nuqsonlarni va yod ionlari bilan bog'liq nuqsonlarni kamaytirib, MA/FA bilan kuchli vodorod aloqalarini ham hosil qila oldi. Nihoyat yaxshi ekologik barqarorlikka ega ($\text{Cs}_{0.05}\text{FA}_{0.54}\text{MA}_{0.41}$) $\text{Pb}(\text{I}_{0.98}\text{Br}_{0.02})_3$ perovskit faol qatlamga asoslangan PQElar 21,46% EO'Sga erishildi. Bundan tashqari, C=O bog'larini o'z ichiga olgan karbonil guruhlari Pb va I bilan bog'liq nuqsonlarning passivatsiyasiga o'xshash ta'sir ko'rsatadi[5].

Ushbu ishda ftor va karboksil guruhlari bo'lgan yangi 3-fenoksi-4-ftor-benzaldegid (FB) qo'shimcha sifatida perovskit yorug'lik yutuvchi qatlamida ikki tomonlama funksional passivator sifatida kiritilgan. Buning uchun CsI va HPbI_3 1:1 nisbatda olinib 1 ml DMFda eritilib CsPbI_3 eritmasi tayyorlandi. FB miqdori CsPbI_3 eritmasiga 0,0% dan 0,3 % ga (hajm bo'yicha) qo'shildi. Tayyor bo'lgan prekursorimizdan spin coating usulida ITO/PEDOT:PSS/Perovskit/PCBM/Al struktura shaklida PQElar olindi.

Tajriba usuli

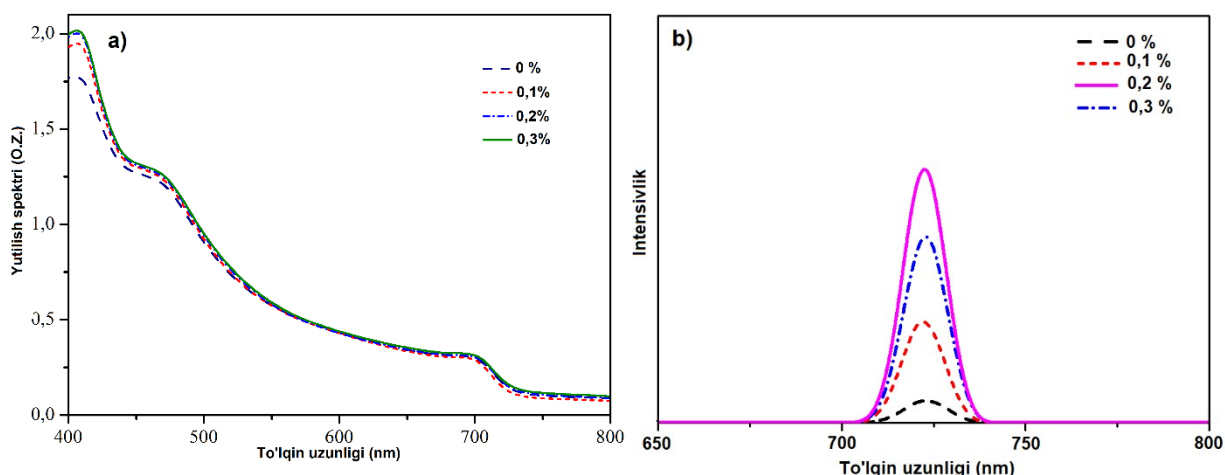
CsPbI_3 perovskit eritmasini tayyorlash uchun CsI va HPbI_3 DMFda 1:1 M nisbatda (0.5 M) sintez qilinib, xona haroratida 12 soat davomida aralashtirildi, so'ngra perovskit faol qatlamlarini tayyorlashdan oldin 1 mL perovskit eritmasiga har xil miqdorda (0,0% dan 0,3 % gacha hajm bo'yicha) FB kislotasi qo'shiladi. ITO (Indium qalay oksidi) shisha tagliklar ultratovushli vannada asetonda, deionizatsiya

qilingan (DI) suvda va izopropil spirtida (IPA) har biri 10 daqiqa davomida tozalanib, so'ngra esa toza azot gazi yordamida quritildi. Shundan so'ng, shisha/ITO sirt tayyor bo'lgach, spin qoplama usuli yordamida PEDOT:PSS ni 4000 ayl./min. (ayl./min.-bir daqiqadagi aylanishlar soni) tezlik bilan 20 sekund davomida aylantirilib 50 nm qalinlik atrofida yotqiziladi va tayyor PEDOT:PSS qatlamlaridagi suv molekulalarini yo'qotish uchun pechda atmosfera sharoitida 15 daqiqa davomida 150 °C da qizdiriladi. PEDOT:PSS qatlami tayyor bo'lgach CsPbI₃ perovskit eritmasini 15 soniya davomida 4000 ayl./min. tezlikda spin-qoplama usuli bilan tayyorlanadi. Tayyor bo'lgan perovskit faol qatlamlari 140 °C haroratda 10 daqiqa davomida atmosfera sharoitida qizdiriladi. CsPbI₃ faol qatlamlari tayyor bo'lgach, 12 mg/mL miqdorda dixlorobenzoldagi PC₆₁BM eritmasini 1200 ayl./min. tezlikda 30 sekund davomida aylantirish orqali PC₆₁BM 50 nm qalinlikda perovskit faol qatlami ustiga qoplangan.

Barcha struktura tayyor bo'lgach, vakuum sharoitida 5x10⁻⁴ Pa bosim ostida Al ni termal bug'lantirish usuli yordamida (qalinligi 100 nm) Al katod yotqizilgan. Natijada, ITO/PEDOT:PSS/CsPbI₃/PC₆₁BM/Al strukturaga ega bo'lgan PQE tayyor bo'ladi.

Natijalar va muhokama

1a-rasmda CsPbI₃ eritmasiga 0,0% dan 0,3 % ga qo'shilib tayyorlangan perovskit faol qatlamlarning yutish spektrlari keltirilgan bo'lib, yutilish spektri grafigida CsPbI₃ perovskit eritmasiga 0,1 %, 0,2%, va 0,3% FB kislotasi qo'shilganda yutilish spektrining grafiklari deyarli bir-biriga ustma ust tushgan, faqat FB miqdori oshib borgani sayin CsPbI₃ faol qatlamlarning yutilish spektri 400 dan 550 nm to'lqin sohasida kuchliroq yutilish intensivligi bilan PQElarning yorug'likni yutish qobiliyatining yaxshilanganligini ko'rsatadi. Buni sababini perovskit faol qatlamlarning FB qo'shimchasi qo'shish natijasida yuqori kristallilik strukturasi hosil bo'lganligi bilan tushuntiriladi[9].

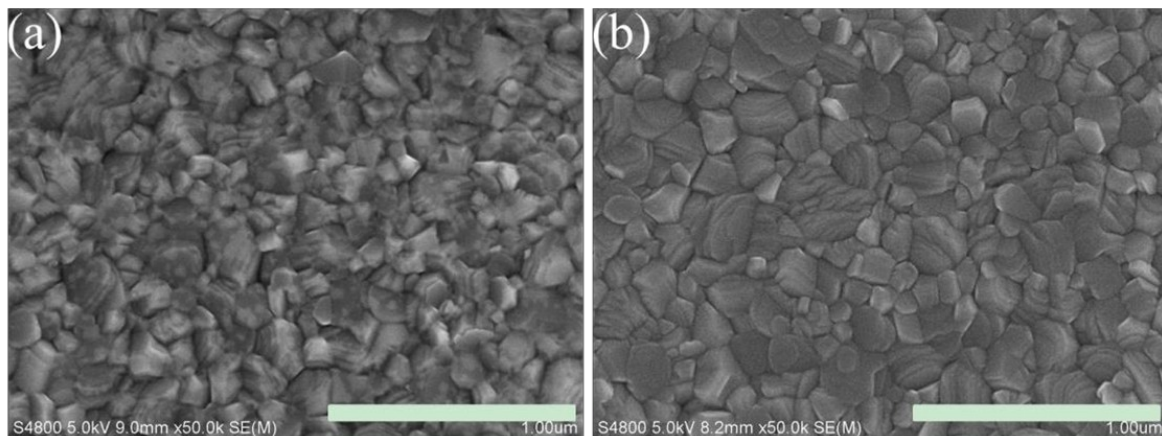


1-rasm. Turli miqdorda FB qo'shilgan perovskit faol qatlamlarning yutilish va (FL) spektrlari

Yutilish spektri grafiklari natijalaridan olgan xulosalarimizni tasdiqlash uchun CsPbI_3 eritmasiga 0,0 % dan 0,3 % gacha FB kislotasi qo'shib tayyorlangan perovskit faol qatlamlarning fotolyumenisensiya (FL) spektrlarini ham o'lchandi. 1b-rasmda CsPbI_3 faol qatlamlarining FL spektrlari ko'rsatilgan bo'lib, FB kislotasi bilan ishlov berilgan perovskit faol qatlamlarning FL intensivligi turli darajadagi qoniqarli natijalarni ko'rsatadi, bu esa perovskit faol qatlamida ko'proq eksitonlar hosil bo'lishini va eksitonlar ajralishining yaxshilanganligini ko'rsatadi. E'tiborli jihat, FB miqdorining ortib borishi bilan FL intensivligi oshadi va 0,2 % dan keyin pasayishni boshlaydi. FL spektri grafiklaridan xulosa qilinadigan bo'lsa 0,2% FB kislotasi qo'shilgan perovskit faol qatlamlar eng yuqori FL intensivligini hosil qildi, bu esa o'z navbatida PQElarda zaryad tashuvchilarning paramterlarini yaxshilab, zaryad harakatchanligini samarali ravishda yaxshilashi mumkinligini ko'rsatadi. Zaryad tashuvchilarning ko'rsatkichlarining yaxshilanishi kattaroq zarra hajmi va zichroq faol qatlam morfologiyasi bilan bog'liq bo'lib, bu esa nuqson zichligi va nurlanishsiz rekombinatsiyalarning kamayishiga olib keladi. Demak perovskit eritmasiga 0,2% FB kisloatsi qo'shish tufayli eng yaxshi EO'S natijani olishimiz mumkin ekan.

CsPbI_3 perovskit faol qatlamlarning yutilish va FL spektrlari natijalariga mos ravishda 2-rasmda CsPbI_3 eritmasiga FB kislotasi qo'shilmagan va 0,2 mol% FB

kislota qo'shilgan perovskit faol qatlamlarning SEM tasvirlari ko'rsatilgan. FB kislota qo'shilmagan perovskit faol qatlamlarda kichik zarralar o'lchamini va yomon faol qatlam morfologiyasi strukturasi ko'rsatadi. Shu bilan birga, zarralar chegaralarida ko'plab nanoteshiklar va nuqsonlarni kuzatish mumkin, bu esa perovskit faol qatlamida zaryadlarni uzatish samaradorligiga sezilarli salbiy ta'sir ko'rsatadi.



2-rasm. FB kisloatsi qo'shilmagan (a) va qo'shilgan (0,2 mol%) (b) perovskit faol qatlamlarning SEM tasvirlari

Biroq, 0,2 mol% FB kislota qo'shilgan perovskit faol qatlamlarida zichroq joylashgan zarralar, kamroq nanoteshiklar va kattaroq zarralar mavjudligini ko'rishimiz mumkin. Bu shuni anglatadiki, o'rtacha miqdordagi FB kislota qo'shilishi perovskit faol qatlam morfologiyasini samarali ravishda yaxshilashi va faol qatlam kristalliligini oshiradi. Demak, FB kislotasi qo'shilgan perovskit faol qatlamga ega PQElarning samaradorligi yaxshi bo'ladi deya hulos qilish mumkin. Yuqorida berilgan perovskit faol qatlamlarning optik xossalardan va SEM tasvirlaridan olingan xulosalarni tasdiqlash maqsadida CsPbI₃ eritmasiga 0,0 mol% dan 0,3 mol% gacha FB kislotasi qo'shib tayyorlangan PQElarning fotovoltaik parametrlari ham o'lchandi.

1-jadval. Turli miqdorda FB qo'shilgan PQElarning fotovoltaik parametrlari

FB miqdori	V _{OC} , (V)	J _{sc} , (mA/sm ²)	FF, (%)	EO'S (%)
0.0 mol %	0,96	15,66	73	10,97

0.1 mol %	0,99	16,94	75	12,58
0.2 mol %	1,05	20,01	78	16,38
0.3 mol %	1,02	19,68	76	15,25

1-jadvalda keltirilgan fotovoltaik parametr natijalarni tahlil qiladigan bo'lsak, huddi optik xossalari kabi F ionlarining sinergik passivatsiyasi ostida optimallashtirilgan perovskit qatlamlari kattaroq zarra o'lchami, nuqsonli holatlar kamayishi va yuqori kristallilik bilan yaxshilangan morfologiyani ko'rsatishi tifaqli PQElarning fotovoltaik parametrlari ham FB qo'shilmagan PQElarning parametridan ancha yaxshi natijalarni ko'rsatgan. Umuman olganda, FB kislotasi qo'shilgan PQElarning yaxshilangan ochiq zanjir kuchlanishining qiymati (V_{oc}), tok kuchi oqimining zichligi qiymati (J_{sc}) va EO'S natijalari FB qo'shimchasi qo'shish bilan eksiton ajratish va zaryad tashilishning yaxshilanishini optik xossalari bilan birgalikda tasdiqlaydi[10-11]. FB qo'shimchasining $CsPbI_3$ perovskit quyosh elementlarining fotovoltaik parametrlariga ta'sirini tahlil qiladigan bo'lsak, PQElarning fotovoltaik parametrlari FB ortib borishi bilan yaxshilangan, ya'ni V_{oc} qiymati 0,0 mol%, 0,1 mol%, 0,2 mol% va 0,3 mol% larda mos ravishda 0,96 V, 0,99 V, 1,05 V va 1,02 V qiymatlarga erishgan. Tok kuchi oqimining zichligi qiymati (J_{sc}) ham namunalar uchun mos ravishda 15,66 mA/sm², 16,94 mA/sm², 20,01 mA/sm² va 19,68 mA/sm² va EO'S qiymatlari mos ravishda 10,97%, 12,58%, 16,38%, 15,25% natijalarga erishildi. PQE larning faol qatlamining sirt va struktura morfologiyasining sifatini belgilovchi "to'ldirish faktori" (FF-Fill Factor) qiymatlari 74% dan 79% gacha oshganligi bu perovskit faol qatlamlarning sirt morfologik sifati va kristall o'lchami juda yaxshi shakllanganligini bildiradi. Olingan barcha parametrlaridan ko'rishimiz mumkinki FB kislotasini qo'shish orqali tayyorlangan perovskit faol qatlamlar ichida eng yaxshi fotovoltaik parametrlari 0,2 mol % miqdorda FB kislotasi qo'shish orqali erishildi.

Xulosa

FB qo'shimchasi qo'shish orqali sifatli va kristal o'lchamlari yaxshi shakllangan sirt morfologiyasi, nuqsonlar va tuzoqlarning kamayganligi, eksitonlar xosil bo'lishi va zaryadlarning tashilishi yaxshilangan perovskit faol qatlamlar tayyorlashga erishildi. FB kislotasining nuqsonlarni kamaytiruvchi ajoyib xususiyati tufayli 16,3 % dan yuqori samaradorlikka va PQElarning yaxshilanlangan barqarorligiga erishildi. Bizning tajribamiz unumdorlikni optimallashtirishning yangi variantlarini, shuningdek, noorganik CsPbI₃ PQElar uchun nuqsonlarni va tuzoq zichliklarini kamaytirish jarayonlarini taqdim etadi. FB kislotasining kiritilishi toza CsPbI₃ faol qatlamining nuqsonlarning zichligini samarali ravishda kamaytiradi va tashuvchi qatlamlarning tashish samaradorligini oshiradi.

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 jarayonlari" mavzusi bo'yicha loyiha doirasida bajarilgan.

Maqolalar ro'yxati

1. Kim, Gi-Hwan, and Dong Suk Kim. "Development of perovskite solar cells with > 25% conversion efficiency." *Joule* 5.5 (2021): 1033-1035.
2. W. Xiang, W. Tress, Review on recent progress of all-inorganic metal halide perovskites and solar cells, *Adv. Mater.* 31 (44) (2019), 1902851.
3. Y. Wang, Y. Chen, T. Zhang, X. Wang, Y. Zhao, Chemically stable black phase CsPbI₃ inorganic perovskites for high-efficiency photovoltaics, *Adv. Mater.* 32 (45) (2020), 2001025.
4. B. Li, Y. Zhang, L. Fu, T. Yu, S. Zhou, L. Zhang, L. Yin, Surface passivation engineering strategy to fully-inorganic cubic CsPbI₃ perovskites for high-performance solar cells, *Nat. Commun.* 9 (1) (2018) 1076.
5. N. Li, S. Tao, Y. Chen, X. Niu, C.K. Onwudinanti, C. Hu, Z. Qiu, Z. Xu, G. Zheng, L. Wang, Y. Zhang, L. Li, H. Liu, Y. Lun, J. Hong, X. Wang, Y.

- Liu, H. Xie, Y. Gao, Y. Bai, S. Yang, G. Brocks, Q. Chen, H. Zhou, Cation and anion immobilization through chemical bonding enhancement with fluorides for stable halide perovskite solar cells, *Nat. Energy* 4 (5) (2019) 408–415.
6. J. Jiang, Z. Jin, F. Gao, J. Sun, Q. Wang, S.F. Liu, CsPbCl₃-driven low-trap-density perovskite grain growth for >20% solar cell efficiency, *Adv. Sci.* 5 (7) (2018), 1800474.
 7. R.H. Bube, Trap density determination by space-charge-limited currents, *J. Appl. Phys.* 33 (5) (1962) 1733–1737.
 8. K. Wang, Z. Jin, L. Liang, H. Bian, H. Wang, J. Feng, Q. Wang, S. Liu, Chlorine doping for black γ -CsPbI₃ solar cells with stabilized efficiency beyond 16%, *Nano energy* 58 (2019) 175–182.
 9. T. Liu, Y. Liu, M. Chen, X. Guo, S. Tang, R. Zhang, Z. Xie, J. Wang, A. Gu, S. Lin, N. Wang, Fluorinated black phosphorene nanosheets with robust ambient stability for efficient and stable perovskite solar cells, *Adv. Funct. Mater.* 32 (1) (2021).
 10. J. Huang, H. Wang, Y. Li, F. Zhang, D. Zhang, S. Liu, Diaminobenzene dihydroiodide-MA_{0.6}FA_{0.4}PbI_{3-x}Cl_x unsymmetrical perovskites with over 22% efficiency for high stability solar cells, *Adv. Funct. Mater.* 32 (16) (2022), 2110788.
 11. W. Chen, X. Li, Y. Li, Y. Li, A review: crystal growth for high-performance all-inorganic perovskite solar cells, *Energy Environ. Sci.* 13 (7) (2020) 1971–1996.