

GIBRID PEROVSKIT QUYOSH ELEMENTLARIDA IONLAR VA DEFEKTLAR MIGRATSIYASINI FUNKSIONAL MODDA PBAT YORDAMIDA PASSIVATSIYALASH

Tojiboyev Ilhom Ibrohimjonovich

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, yetakchi ilmiy xodim

Quvondiqov Vaxobjon Ortiqovich

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, katta ilmiy xodim

Imomov Muhibjon Xabibjonovich,

Namangan davlat pedagogika instituti, v.b.dotsent

Boynazarov Ilhom Rustam o'g'li

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, tayanch doktorant

Soatillayev Alisher Ulug'bek o'g'li, assistent o'qituvchi

Namangan muhandislik-texnologiyalari instituti

email: ilhombaynazarov0821@gmail.com

tel: +998958771722

Annotatsiya: Yuqori samaradorlikka ega bo'lgan gibrid perovskit quyosh elementi PQE larning uzoq muddatli operatsion yoki eksplutatsion barqarorligiga hali erishilmagan va bu ularning amaliyotga keng miqyosda joriy etilishiga asosiy to'siq bo'lib qolmoqda. Oxirgi bir necha yillarda PQE fazaviy o'tish mexanizmlari, atrof-muhit, yorug'lik, issiqlik va stress ta'sirlarida barqarorligining o'zgarishi doimiy ravishda mazkur soha tadqiqotchilari oldidagi asosiy muammolardan biri bo'lib qolmoqda. Ushbu ishda biz PQE tarkibiga funksional modda PBAT polimerini kiritish orqali kristallanish jarayonini yaxshilash va undagi ionlar va defektlar migratsiyasi passivatsiyalashni tadqiq etdik.

Kalit so'zlar: PQE, PBAT, barqarorlik, samaradorlik, yutilish, fluoressensiya.

PASSIVATION OF ION AND DEFECT MIGRATION IN HYBRID PEROVSKITE SOLAR ELEMENTS USING FUNCTIONAL SUBSTANCE PBAT

Tojiboyev Ilhom Ibrohimjonovich

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, yetakchi ilmiy xodim

Quvondiqov Vaxobjon Ortiqovich

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, katta ilmiy xodim

Imomov Muhibjon Xabibjonovich,

Namangan davlat pedagogika instituti, dotsent

Boynazarov Ilhom Rustam o'g'li

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, tayanch doktorant

Soatillayev Alisher Ulug'bek o'g'li, assistent o'qituvchi

Namangan muhandislik-texnologiyalari instituti

email: ilhombaynazarov0821@gmail.com

tel: +998958771722

Abstract: The long-term operational or exploitation stability of high-efficiency hybrid perovskite solar cell PSCs has not yet been achieved, and this remains a major obstacle to their large-scale implementation. In the last few years, PSC phase transition mechanisms, and changes in stability under environmental, light, heat, and stress effects have been one of the main problems for researchers in this field. In this work, we investigated the improvement of the crystallization process and the passivation of ion and defect migration in it by introducing functional substance PBAT polymer into PSC.

Key words: PSC, PBAT, stability, efficiency, absorption, fluorescence.

**ПАССИВАЦИЯ МИГРАЦИИ ИОНОВ И ДЕФЕКТОВ В ГИБРИДНЫХ
ПЕРОВСКИТОВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА РВАТ**

Тажибаев Илхом Иброҳимжонович

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, ведущий научный
сотрудник

Кувондиқов Ваҳобжон Ортиқович

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, старший научный
сотрудник

Имомов Мухибжон Хабибжонович

Наманганский государственный педагогический институт, доцент

Бойназаров Илхом Рустам ўғли

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, базовый докторант

Соатиллаев Алишер Улугбек угли

Наманганский инженерно-технологический институт, ассистент учителя

email: ilhombaynazarov0821@gmail.com

tel: +998958771722

Аннотация: Долгосрочная оперативный или эксплуатационная стабильность высокоэффективных гибридных перовскитных солнечных элементов ПСЭ пока не достигнута, и это остается серьезным препятствием для их широкомасштабного внедрения. В последние несколько лет механизмы фазового перехода ПСЭ и изменения стабильности под воздействием окружающей среды, света, тепла и стресса стали одной из основных проблем для исследователей в этой области. В данной работе исследовано улучшение процесса кристаллизации и пассивации миграции ионов и дефектов в нем путем введения в ПСЭ функционального вещества полимера РВАТ.

Ключевые слова: ПСЭ, РВАТ, эффективность, стабильность, поглощение, флуоресценция.

Kirish. An'anaviy va invert gibrid qo'rg'oshin-galogenidli perovskit quyosh elementlarining akkreditasiyalangan energiya o'zgartirish samaradorligi mos ravishda 25,7% [1] va 22,3% [2] ni tashkil qilmoqda. Bu energetika bozorida mavjud boshqa fotovoltaik texnologiyalari, shu jumladan kremniy va kadmiy-

tellurid bilan raqobatbardosh ko'rsatkich bo'lib, bunday yuqori darajadagi energiya o'zgartirish samaradorligi (EO'S) PQE ni tijoratlashtirish uchun asosiy to'siq emasligini ko'rsatadi. Biroq, yuqori samaradorlikka ega bo'lgan gibrid PQE larning uzoq muddatli operatsion yoki eksplutatsion barqarorligiga hali erishilmagan va bu ularning amaliyotga keng miqyosda joriy etilishiga asosiy to'siq bo'lib qolmoqda. Shu sababli, perovskitlarning fazaviy o'tish mexanizmlari [3] va atrof-muhit, yorug'lik, issiqlik va stress ta'sirlarida barqarorligi [4] doimiy ravishda mazkur soha tadqiqotchilarining diqqat markazida bo'lmoqda. Defektlarni passivatsiyalash va fazaviy chegara sirtlarini modifikatsiyalash [4-7] kristall tarkibi va texnologiyasini [8-9], inkapsulyatsiya texnologiyasini [10], elektrodnlarni [11] va transport qatlamini maqsadli tanlashni [12] qo'llash orqali tashqi faktorlar bosimini bartaraf etish orqali perovskitli fotovoltaik qurilmaning ishlash muddatini uzaytirish va barqarorligini oshirish mumkin. Yana bir muhim muammo bu perovskit quyosh elementlaridan qo'rg'oshin sizib chiqishi bilan bog'liq. CdTe ning suvdagi eruvchanlik doimiysi (K_{sp}) qo'rg'oshinni eruvchanlik doimiysidan 10-30 marta kam bo'lib, atrof-muhitni kamroq zaharlaydi. Pb^{2+} inson tanasiga kirganda to'qimalar va asab tizimining shikastlanishiga olib keladi. Shuning uchun, PQE dan amaliy maqsadlarda foydalanish uchun Pb^{2+} ionlari sizib chiqishini samarali yo'q qilish yoki minimallashtirish yo'llarini topish juda muhimdir.

Mazkur ishda antisolvent usuli bilan perovskit plyonkalariga implantasiya qilish uchun ekologik toza funksional modda poli(butilen adipat kotereftalat) (PBAT)ni [13] ionlar va defektlar migratsiyasiga, perovskit faol qatlamiga, perovskit quyosh elementining samaradorligi va barqarorligiga ta'sir mexanizmlari optik spektral xususiyatlari orqali tadqiq qildik.

Materiallar va PQE ning tayyorlanishi.

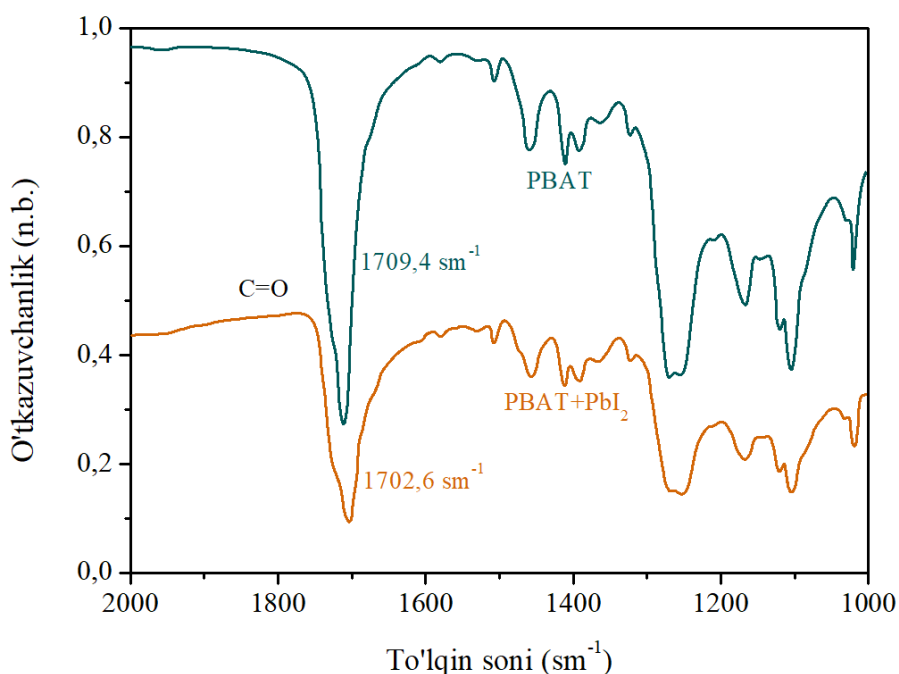
Sigma-Aldrich orqali Nikel nitrat geksagidrat ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, 99,999%), xlorbenzol (XB, 99,8%), suvsiz dimetil sulfoksid (DMSO, 99,8%) va N,Ndimetilformamid (DMF, 99,8%) xarid qilindi. Barcha fotovoltaik materiallar

Xi'an Polymer Light Technology Corp kompaniyasidan sotib olindi va keyingi tozalashni talab qilmadi. PBAT Shenzhen eSUN Industrial Co., Ltd kompaniyasidan sotib olingan. Nikel oksidi nanozarralari (NiO_x NPs) avvalgi adabiyotlarga muvofiq sintez qilingan [1]. CsFAMA uch kationli perovskit prekursorli eritmasi qo'rg'oshin yodidi (PbI_2 , 1,30 M), seziy yodidi (CsI , 0,07 M), qo'rg'oshin bromidi (PbBr_2 , 0,21 M), metilamonium bromid (MABr , 0,21 M) va formamid yodid (FAI , 1.19 M) DMF/DMSO (4/1,V/V) aralash suvsiz erituvchisida solib aralashtirish orqali tayyorlandi 12 soat davomida aralashtiriladi.

ITO (Indium Tin Oxide) kvarts shisha tagliklar doimiy ravishda ultratovushli hammomda 15 daqiqa davomida deionizatsiyalangan suv, atseton va etanolda tozalandi. ITO kvarts shisha tagliklar azot bilan quritildi va keyin gidrofillikni oshirish uchun 15 daqiqa davomida UV-ozon bilan ishlov berildi. “spin coating” metodi orqali NiO_x (H_2O da 20 mg ml^{-1}) ITO ga 2000 aylanish tezligida 30 soniya davomida yotqizildi va keyin 10 daqiqa davomida 100°C da qizdirildi. NiO_x plyonkasi qalinligi taxminan 20 nm edi. Keyin qoplangan ITO qo'lqop qutisi (Glove boz)ga o'tkazildi. Perovskit eritmasi NiO_x teshik tashish qatlamiga (HTL) 10 soniya davomida 1000 aylanish tezligidan 30 soniya davomida 6000 aylanish tezligida protsedura bo'yicha qoplandi va 15 soniya davomida turli konsentratsiyali XB antisolventli 110 mkL PBAT polimerini protsedura tugashidan oldin yotqizildi. Shundan so'ng 750 nm qalinlikdagi perovskit plyonkasini olish uchun 20 daqiqa davomida 100°C da qizdirildi. Shundan so'ng, elektron transport qatlami (ETL) sifatida PCBM (99% tozalikda) va Fulleren (C_{60} , 99,5% soflikda) perovskit plyonkasida 30 s davomida 3000 aylanish tezlikda qoplandi. ETL qalinligi taxminan 45 nm. Keyinchalik, BCP (99% tozalik) 30 soniya davomida 5800 aylanish tezlikda aylantirildi. Nihoyat, asboblarni ishlab chiqarish xrom (Cr, 5 nm) va alyuminiy (Al, 100 nm) elektrodlarini 2×10^{-6} mbar ($0,1 \text{ sm}^2$ samarali maydon) vakuum ostida termal bug'lanish orqali amalga qoplandi.

Natijalar va muhokama.

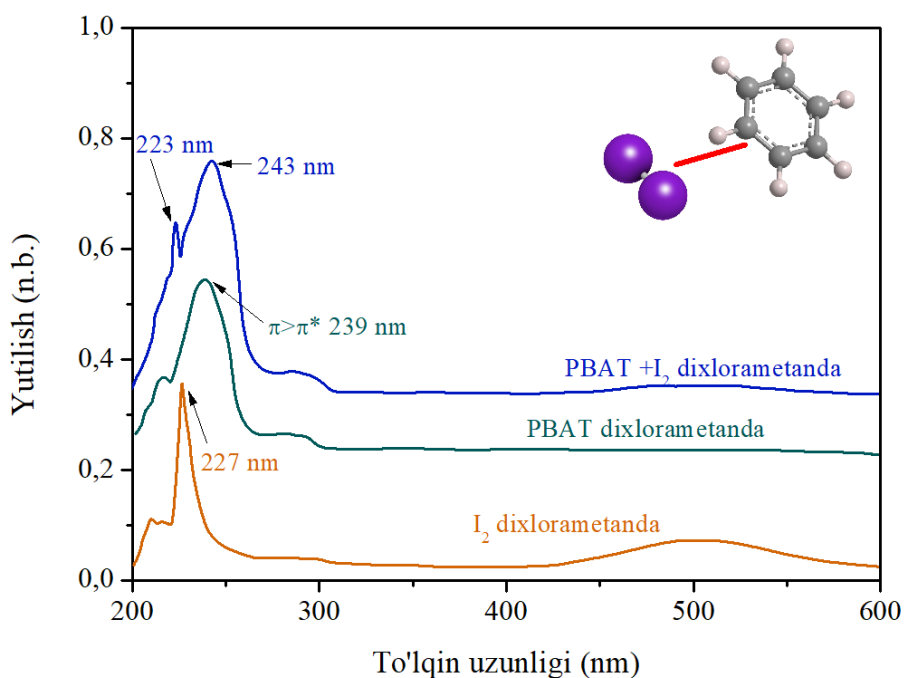
PBAT polimeri CsMAFA gibrid perovskitining moddalar bilan ta'sirlashishi mexanizmlarini tadqiq qilish uchun ularning turli optik spektrlari tadqiq qilindi. PBAT polimeri va PbI_2 o'rtasidagi o'zaro ta'sirlashish mexanizmlarini aniqlash uchun infraqizil Fur'e spektroskopiyasidan foydalanildi.



1-rasm. PBAT va PBAT- PbI_2 ning IQ-Fure spektrlari

1-rasmdan ko'rinib turibdiki, PBAT polimerining C=O bog'ining IQ sohadagi yutish piki $1709,4 \text{ sm}^{-1}$ ga teng. PBAT polimerini PbI_2 bilan aralashtirganda ular o'zaro ta'sirlashib, mazkur bog'lanish yutilish piki $1702,6 \text{ sm}^{-1}$ ga yetadi. C=O bog'lanishning valent tebranishlari $6,8 \text{ sm}^{-1}$ ga qizil rangga siljiydi, bu PBAT polimeridagi C=O va muvofiqlashtirilmagan PbI_2 o'rtasida xelatlovchi kuch mavjudligini va ushbu funksional polimer PbI_2 defektlarini bartaraf etishini ko'rsatadi. Shu bilan bir qatorda mazkur grafikdan ushbu ta'sirlashish PBATning funksional birligi C=O bog'lanishi va Pb o'rtasida sodir bo'layotganini aniqlash mumkin. Bu funksional guruh neytral PbI_2 , Pb_0 bilan bir qatorda Pb^{+2} ionlari bilan ham ta'sirlashib, perovskit plyonkalaridagi ushbu defektlarni passivlashtirish va tutib qolish xususiyatiga ega. Yuqoridagi natijalardan hulos qiladigan bo'lsak, mazkur ta'sirlashish energiyasi Van der Val's ta'sirlashishlariga mos keladi. PBAT perovskitdagi yuqorida keltirilgan moddalar

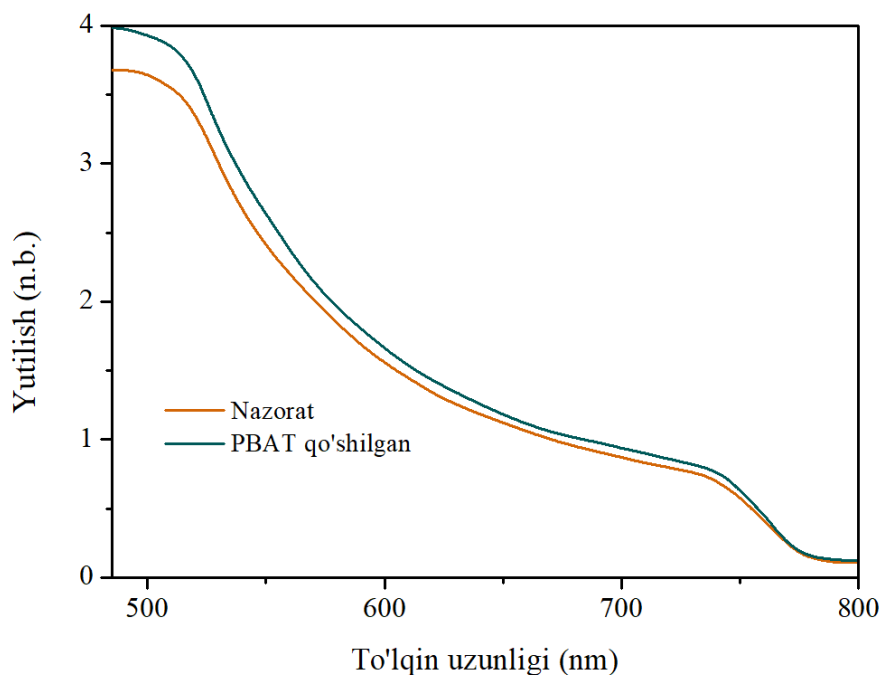
bilan kimyoviy bog‘ hosil qilmaydi va perovskit strukturasi ta'sir ko'rsatmaydi hamda ular o'rtasida korrelyatsiya mavjudligini ko'rsatadi.



2-rasm. Dixlormetanda eritilgan I₂, PBAT hamda PBAT+ I₂ ning ultrabinafsha va ko‘zga ko‘rinuvchi spektral sohalardagi yutilish spektrlari. Yuqori o‘ng burchakda benzol halqasi va I₂ ning o‘zaro ta'sirlashish sxemasi ko‘rsatilgan (binafsha shar- I, kulrang shar-uglerod, oq rang-vodorod).

PBAT polimeri va I₂ o'rtasidagi o'zaro ta'sirlashish mexanizmlarini aniqlash uchun ularning dixlormetandagi alohida va aralashgan eritmalarining yutilish spektrlari tadqiq qilindi. Nazariy hisoblashlar PBAT polimerining benzol halqasi va I₂ molekulasini o'zaro ta'sirlashishi mumkinligini ko'rsatgan edi. 2-rasmdagi yutilish spektrlaridan ko'rish mumkinki, I₂ molekulasini 430-600 nm spektral sohada keng polosali molekulayar yutilish piki va o'ta qattiq ultrabinafsha spektral sohada 227 nm da keskin yutilish pikiga ega. PBAT polimeri esa ko'zga ko'rinuvchi sohada shaffof bo'lib, o'ta qattiq ultrabinafsha spektral sohada benzol halqasining tutashgan qo'sh bog'ining $\pi \rightarrow \pi^*$ o'tishi hisobiga 239 nm da yutilish pikiga ega. PBAT polimeri I₂ bilan aralashtirilganda, I₂ ning keskin piki katta energiyalar sohasiga 4 nm ga binafsha siljiydi va benzol halqasining yutilish piki esa kam

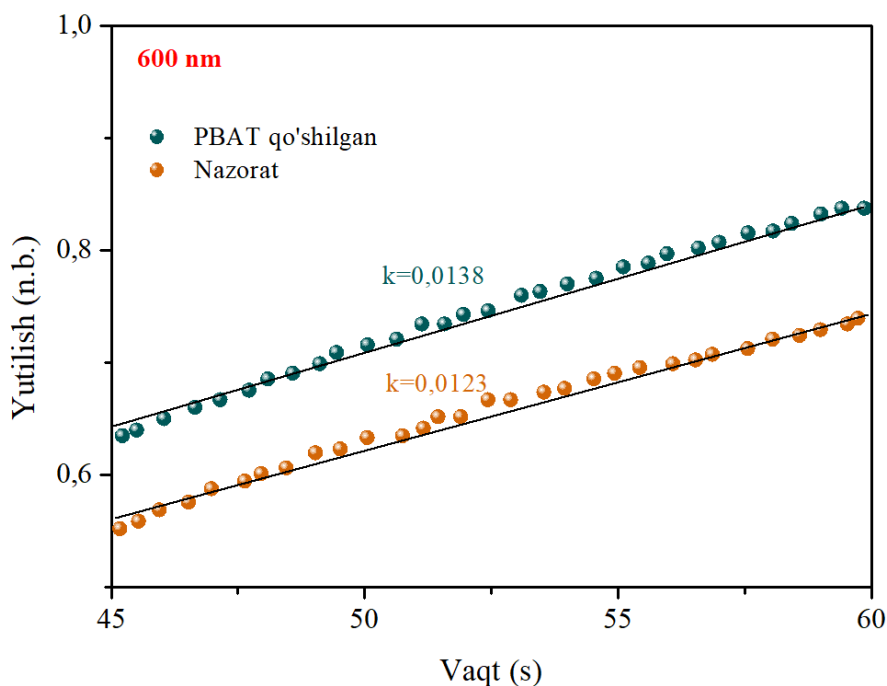
energiyalar sohasiga 4 nmga qizil siljiydi. Bu PBAT ning benzol halqasi I_2 bilan o'zaro ta'sirlashayotganini isbotlaydi. Grafikdagi natijalar va yutilish piklari siljishidan hisoblangan bog'lanish energiyalari ushbu ta'sirlashish donor-akseptor ta'sirlashish tabiatiga ega bo'lib, ular o'rtasida Van –der Val's bog'lanishi sodir bo'layotganini ko'rsatadi.



3-rasm. Perovskit plyonkalarining yutilish spektrlari.

Perovskit plyonkalarida kam sonli I_2 nuqsonlari paydo bo'ladi, chunki perovskit materiallari yodid tuzidagi yoki perovskit prekursor eritmasidagi I^- ionlari I_2 gacha oson oksidlanadi [14]. Bu esa o'z navbatida bog'lanmay qolgan Pb^{+2} ionlarini metal Pb_0 aylanishi va perovskitda bir vaqtning o'zida ikki turdagi defektlarning paydo bo'lishiga sabab bo'ladi. PBAT polimerining benzol halqalari elektrondonorlik xususiyatini namoyish etib, dissosiativ yod kabi akseptor turidagi zaryad va eksitonlar uchun tuzoq holatlarini kamaytirishi mumkinligi yuqoridagi natijalarda ko'rinib turibdi. Shu bilan bir qatorda PBAT polimeri manfiy zaryadlangan yoki dissosiativ holatdagi ionlar yoki molekulalar bilan kimyoviy bog' hosil qilmasligi va perovskit kimyoviy tuzilishi hamda kristall strukturasi buzmasligini xulosa qilish mumkin. Shuningdek, perovskit plyonkasining makroskopik parametri yutilish spektriga PBAT polimerining ta'siri 3- rasmda

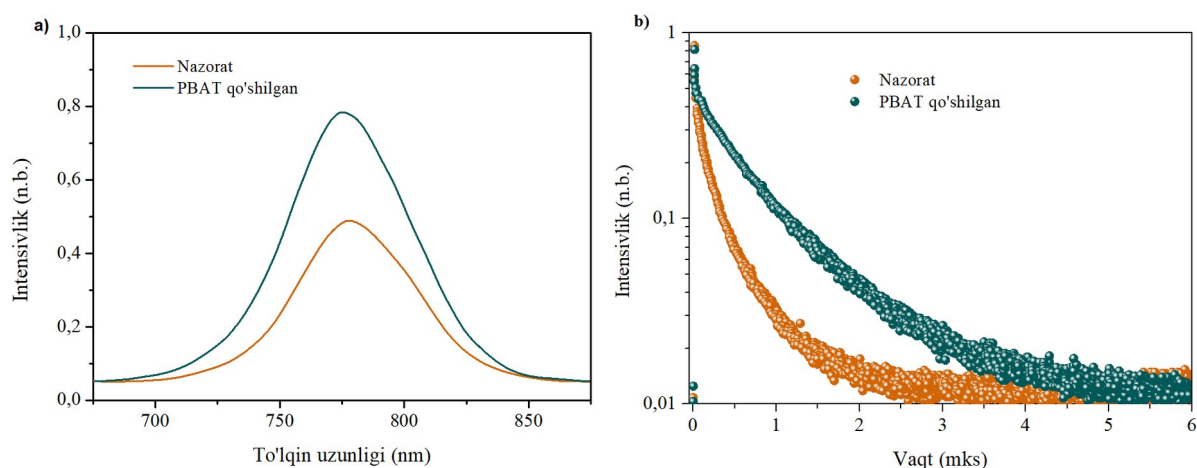
keltirilgan. Rasmdan ko‘rish mumkinki PBAT polimeri qo‘shilgandan so‘ng perovskit plyonkasining yutilishi kuchaygan, bu perovskit donachalarining kattalashgani bilan izohlanadi. Bundan tashqari, yutilish spektridan hisoblanadigan optik taqiqlangan soha kengligi xam PBAT polimeri qo‘shilgandan so‘ng o‘zgarmagan va 1.59 eV qiymatda qolgan.



4-rasm. Perovskit plyonkasining shakllanishi jarayonida nazorat va PBAT bilan modifikasiyalangan na'munalarning 600 nm da yutilish intensivligi vaqt bo'yicha o'zgarishi dinamikasi.

Kristallanish jarayonida yutilish spektri o‘zgarishini yanada yaqqolroq ko‘rinishda namoyon qilish uchun ushbu spektrlarni vaqt bo‘yicha o‘zgarishini tahlil qildik (4-rasm). Nazorat perovskit plyonkasiga qaraganda PBAT qo‘shilgandan so‘ng perovskit plyonkasi kristallanishi jarayoni ancha kechikadi. Garchi perovskit donachalari yadrolari bir vaqtda shakllanishni boshlagan bo‘lsa (25-s) ham PBAT perovskit plyonkasi shakllanishi va kristallanishi jarayoni kechiktirib turadi. 45 soniyadan so‘ng 600nm to‘lqin uzunlikda yutilish intensivligi o‘zgarishi dinamikasini tahlil qildik. 600 nm to‘lqin uzunligi tanlab olinganining sababi undan past to‘lqin uzunliklarida perovskit birlamchi eritmasining kristallanishi jarayonida yutilish spektri piklarining surilishi, turli oraliq faza

yutilish piklarini namoyon bo'lishi sababli past to'lqin uzunliklarda mazkur dinamikani baholash o'rinsiz. Nazorat plyonkasi na'munasi 600 nm da yutilish koefitsientini vaqt bo'yicha o'zgarishining qiyalik koefitsienti 0,0138 ni, PBAT bilan modifikasiyalangan perovskit plyonkasi uchun esa ushbu ko'rsatkich 0,0123 qiymatni tashkil etdi. Ushbu natija PBAT polimeri perovskit plyonkasidagi muvofiqlashtirilmagan Pb^{2+} va neyral yod bilan o'zaro ta'siri tufayli perovskit kristallanish jarayoni bu kuchlarni yengib o'tish uchun katta energiya talab qilinishi, shuning uchun perovskit kristallari past erkin energiya yo'nalishi bo'yicha kristallanishini ko'rsatadi. Natijada bu jarayon perovskit kristallarini shakllanishini sezilarli kechiktirishi, kristallanishda ishtirok etmayotgan PbI^2 ingibirlashi va kristallanishda ishtirok etishini ta'minlashi, turli neytral va ion defektlarni passivlashtirishi, nazoratga nisbatan sekin bo'lsada kattaroq kristallarni shakllantirishi va yuqoridagi sabablar natijasida yuqori sifatli perovskit plyonkasi hosil bo'lishiga yordam beradi. Kristallanish jarayoni PBAT molekulasiga parallel yo'nalishda kam energiyalar vektorida sodir bo'lishi perovskit plyonkasi katta yuzasiga pedpendikulyar, eksiton va zaryad tashilishi yo'nalishida sodir bo'lishi vertikal katta kristallarning o'sishiga sabab bo'ladi.



5-rasm. Nazorat va PBAT bilan modifikasiyalangan perovskit plyonkalari na'munalarining fluoressensiya (a) va kechikkan floressensiya spektrlari.

Perovskit faol qatlamidagi defektlarning miqdori va holati, PBAT polimerining defektlarni passivlashtirish imkoniyatini optik usulda tadqiq qilishda fluoressensiya va kechikkan fluoressensiya usullaridan ham foydalanilgan holda

tadqiqotlar olib borildi. Eksitonlar va zaryad tashuvchilarning rekombinatsiyasi to'g'risidagi sifat ko'rsatkichlarini perovskit plyonkasining eksiton fluoressensiyasidan baholash mumkin. 5 (a) – rasmdan ko'rish mumkinki, PBAT polimeri qo'shilgandan so'ng perovskit plyonkalari eksiton fluoressensiyasining intensivligi sezilarli ortgan. Bundan tashqari PBAT bilan modifikasiyalangan plyonkaning fluoressensiya piki (778nm) nazorat plyonkasi fluoressensiya pikiga (780 nm) nisbatan 2 nmga kichik to'liqlar (yuqori energiyalar) sohasiga surilgan. Bu PBAT polimeri C=O funksional guruhi va benzol halqasi perovskit donachalari chegarasidagi sirt defektlarini passivlashtirishi, strukturasidagi nurlanishsiz rekombinasiya markazlarini hamda defektlarini kamaytirganligini anglatadi.

Nazorat va PBAT bilan modifikasiyalangan perovskit plyonkalari na'munalarining kechikkan fluoressensiya spektrlari 5 (b) – rasmda keltirilgan. Fluoressensiyaning vaqt bo'yicha so'nishining funksiyasi matematik ko'rinishda quyidagicha biekspontensial approksimasiyasiga:

$$\gamma = A_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) \quad (1)$$

Bu yerda γ – so'nish funksiyasi, A_1 – tezkor so'nish hadi bo'lib, u eksitonlar va zaryad tashuvchilarning sirtida sodir bo'ladigan rekombinasiyasi miqdori va uning umumiy fluoressensiyaga ta'siri ifodalaydi. Mazkur parametrdan sirtiy defektlar haqida sifat ko'rsatkichlari va baholashlarni amalga oshirish mumkin. τ_1 – tezkor so'nish vaqti bo'lib, u eksitonlar va zaryad tashuvchilarni sirtidagi rekombinasiya markazlariga yetib borish vaqtini ifodalaydi hamda mazkur parametrdan zaryad tashuvchilarni xarakat yo'nalishlarini baholash mumkin. A_2 – sekinroq so'nish hadi bo'lib, u zaryad tashuvchilarning hajmiy rekombinasiya markazlari bilan ta'sirlashishi umumiy fluoressensiyaga ta'sir miqdorini ifodalaydi. Ushbu parametrdan hajmiy defektlarni miqdori va kristall donachalari hajmi to'g'risida sifat ko'rsatkichlarini aniqlash mumkin. τ_2 – sekinroq so'nish vaqti bo'lib, u eksitonlar va zaryad tashuvchilarni xajmiy rekombinasiya markazlari bilan ta'sirlashish vaqtini ko'rsatadi. Bundan tashqari kechikkan fluoressensiyaning

qiymatlaridan eksitonlarni o'rtacha yashash vaqtini ham aniqlash mumkin. Buning uchun fluoressensiyaning $\tau = 2.7183$ marta kamayish vaqti aniqlanadi. Ushbu parametrlarning hisoblangan qiymatlari 1-jadvalda keltirilgan.

1 – jadval. Nazorat va PBAT-modifikatsiyalangan perovskit plyonkalari na'munalari kechikkan fluoressensiyasi approksimasiya parametrlari.

Na'muna turi	τ_1 (ns)	A_1 (%)	τ_2 (ns)	A_2 (%)	τ_o (ns)
Nazorat	60	23.45	410	76,55	395
PBAT qo'shilgan	220	18.55	870	81.45	835

Xulosa

Olingan natijalardan kelib chiqib quyidagi xulosalarga kelindi. Nazorat perovskit plyonkasi na'munasi sirtiy defektlar parametriga (23,45%) nisbatan PBAT bilan modifikatsiyalangan perovskit na'munasida approksimasiya ko'rsatkich 18,55% darajaga kamaydi. Bu PBAT polimeri perovskit donachalari chegarasidagi defektlar kamaytirganligini ko'rsatadi. Shunindek sirtidagi rekombinasiya bo'lish vaqti ham nazoratga nisbatan PBAT polimeri qo'shilgan perovskit plyonkalarida deyarli 4 barobar ortgan. Bu perovskit kristallarini zaryadlar va energiya tashilishi yo'nalishida tekis, uzun va tartibli o'sganligini ko'rsatadi. Bundan tashqari, PBAT qo'shilgan na'munalarda nazoratga nisbatan xajmiy rekombinasiya vaqtini 2 martadan (410 nsdan 870 nsgacha) ko'proq ortganligi PBAT polimeri nafaqat sirtiy, balki xajmiy defektlar miqdorini ham kamaytirganligidan dalolat beradi. Eksitonlarning o'rtacha yashash vaqtining 395 nsdan 835 nsgacha oshishi esa PBAT perovskitdagi defektlarni kamaytirish, donachalar xajmini oshirishi bilan bir qatorda donachalar o'rtasida bog'lovchi ko'priklar vazifasini bajarib, zaryad va energiya tashilishi yaxshilashini ko'rsatadi.

Minnatdorchilik: Ushbu ish O'zbekiston Respublikasi innovatsion rivojlanish agentligi tasarrufidagi $\Phi 3$ -20200929177 loyihasi doirasida amalga oshirildi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

1. H. Min, D. Y. Lee, J. Kim, G. Kim, K. S. Lee, J. Kim, M. J. Paik, Y. K. Kim, K. S. Kim, M. G. Kim, T. J. Shin, S. H. Seok, *Nature* **2021**, 598, 444.
2. X. Zheng, Y. Hou, C. Bao, J. Yin, F. Yuan, Z. Huang, K. Song, J. Liu, J. Troughton, N. Gasparini, C. Zhou, Y. Lin, D.-J. Xue, B. Chen, A. K. Johnston, N. Wei, M. N. Hedhili, M. Wei, A. Y. Alsalloum, P. Maity, B. Turedi, C. Yang, D. Baran, T. D. Anthopoulos, Y. Han, Z.-H. Lu, O. F. Mohammed, F. Gao, E. H. Sargent, O. M. Bakr, *Nat. Energy* 2020, 5, 131.
3. R. Guo, D. Han, W. Chen, L. Dai, K. Ji, Q. Xiong, S. Li, L. K. Reb, M. A. Scheel, S. Pratap, N. Li, S. Yin, T. Xiao, S. Liang, A. L. Oechsle, C. L. Weindl, M. Schwartzkopf, H. Ebert, P. Gao, K. Wang, M. Yuan, N. C. Greenham, S. D. Stranks, S. V. Roth, R. H. Friend, P. Müller-Buschbaum, *Nat. Energy* 2021, 6, 977.
4. S. Wang, B. Yang, J. Han, Z. He, T. Li, Q. Cao, J. Yang, J. Suo, X. Li, Z. Liu, S. F. Liu, C. Tang, A. Hagfeldt, *Energy Environ. Sci.* 2020, 13, 5068.
5. J. Yang, Q. Cao, Z. He, X. Pu, T. Li, B. Gao, X. Li, *Nano Energy* 2021, 82, 105731.
6. Q. Cao, Y. Li, H. Zhang, J. Yang, J. Han, T. Xu, S. Wang, Z. Wang, B. Gao, J. Zhao, X. Li, X. Ma, S. M. Zakeeruddin, W. E. I. Sha, X. Li, M. Grätzel, *Sci. Adv.* 2021, 7, eabg0633.
7. Q. Cao, J. Yang, T. Wang, Y. Li, X. Pu, J. Zhao, Y. Zhang, H. Zhou, X. Li, X. Li, *Energy Environ. Sci.* 2021, 14, 5406.
8. N. J. Jeon, J. H. Noh, W. S. Yang, Y. C. Kim, S. Ryu, J. Seo, S. I. Seok, *Nature* 2015, 517, 476.
9. S. Chen, X. Xiao, B. Chen, L. L. Kelly, J. Zhao, Y. Lin, M. F. Toney, J. Huang, *Sci. Adv.* 2021, 7, eabb2412.
10. S. Ma, G.-Z. Yuan, Y. Zhang, N. Yang, Y. Li, Q. Chen, *Energy Environ. Sci.* 2022, 15, 13.
11. S. Wu, R. Chen, S. Zhang, B. H. Babu, Y. Yue, H. Zhu, Z. Yang, C. Chen, W. Chen, Y. Huang, S. Fang, T. Liu, L. Han, W. Chen, *Nat. Commun.* 2019, 10, 1161.
12. Q. Cao, Z. Li, J. Han, S. Wang, J. Zhu, H. Tang, X. Li, X. Li, *Sol. RRL* 2019, 3, 1900333.
13. J. Chen, J. Wu, P. Raffa, F. Picchioni, C. E. Koning, *Prog. Polym. Sci.* 2021, 125, 101475.
14. S. Chen, X. Xiao, H. Gu, J. Huang, *Sci. Adv.* 2021, 7, eabe8130.

