

UDK 621.315.592.3

Nurumbetova Lobar Rimbayevna

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, katta ilmiy xodim
tel: +998974547224, Email: lobar.nurumbetova@gmail.com

Saidqulova Adolat Axmed qizi

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, Stajor-tadqiqotchi
Email: adolatsaidqulova08@gmail.com

Otaqulova Nilufar Farxod qizi,

Ion plazma va Lazer texnologiyalari instituti, kichik ilmiy xodim
e-mail: otaqulovanilufar78@gmail.com

POLIMER QUYOSH ELEMENTNING SAMARADORLIGINI SUYUQ POLIMER QO'SHISH ORQALI OSHIRISH

ANNOTATSIYA: Ushbu ishda suyuq polimer penta-fluorofenilni faol qatlamning samaradorligini yaxshilash va nuqsonlarni kamaytirish uchun qo'shimcha sifatida qo'shildi. L8-BO akseptor eritmasiga qo'shimcha sifatida PFF₂₀ suyuq polimer qo'shildi, so'ng PQElarning optik xususiyatlari va fotovoltaik ishlashidagi o'zgarishlarni tahlil qilish uchun faol qatlamlar tayyorlandi. Tadqiqotlarimizda L8-BO ga 20 % miqdorda PFF qo'shilgan aralashma optimal tarkib ekanligi aniqlandi. L8-BO akseptor eritmasi orqali faol qatlamga PFF qo'shilishi bilan yorug'lik yutilishi ortdi, natijada ko'proq fotoinduksiyalangan tashuvchilar (elektronlar va kovaklar) hosil bo'lishi yaxshilandi. Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi ortishi va qatlamlar yuzalararo bo'ladigan yo'qotishlarning kamayganligi sababli to'ldirish faktori 79,8% bo'lib, tahminan 1,2% oshdi. Uchta asosiy parametr (J_{sc} , V_{oc} , FF) yaxshilangani natijasida umumiy samaradorlik EO'S 17,7% dan 18,7% ga oshdi.

Kalit so'zlar: PM6, L8-BO, polimer quyosh elementi (PQE), optik yutilish, Fotoluminessensiya, EO'S, donor, akseptor, PFF, GIWAXS.

UDC 621.315.592.3

Nurumbetova Lobar Rimbayevna

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Senior Researcher
tel: +998974547224, Email: lobar.nurumbetova@gmail.com

Saidkulova Adolat Akhmed qizi

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Intern-Researcher
Email: adolatsaidqulova08@gmail.com

Otakulova Nilufar Farxod qizi,

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Junior Researcher
Email: otaqulovanilufar78@gmail.com

INCREASING THE EFFICIENCY OF POLYMER SOLAR CELLS BY ADDING LIQUID POLYMER

Abstract: In this work, the liquid polymer penta-fluorophenyl was added as an additive to improve the efficiency of the active layer and reduce defects. The

liquid polymer PFF₂₀ was added as an additive to the L8-BO acceptor solution, and then active layers were prepared to analyze the changes in the optical properties and photovoltaic performance of the PSCs. In our studies, it was found that the mixture with 20% PFF added to L8-BO was the optimal composition. The addition of PFF to the active layer through the L8-BO acceptor solution increased the light absorption, resulting in the improved generation of more photoinduced carriers (electrons and holes). The filling factor was 79.8%, which was approximately 1.2% higher due to the increased mobility of charge carriers and the reduced interfacial losses between the layers. As a result of improvements in three key parameters (J_{sc} , V_{oc} , FF), the overall efficiency EOS increased from 17.7% to 18.7%.

Key words: PM6, L8-BO, PSC, optical absorption, photoluminescence, PCE, donor, acceptor, PFF, GIWAXS.

УДК 621.315.592.3

Нурумбетова Лобар Римбаевна

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, старший научный сотрудник

Email: lobar.nurumbetova@gmail.com

Саидкулова Адолат Ахмед кизи

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, стажер исследователь
телефон: +998942488442, Email: adolatsaidqulova08@gmail.com

Отакулова Нилуфар Фарход кизи

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, младший научный сотрудник

Email: otaqulovanilufar78@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПУТЕМ ДОБАВЛЕНИЯ ЖИДКОГО ПОЛИМЕРА

Аннотация: В этой работе жидкий полимер пентафторфенил был добавлен в качестве добавки для повышения эффективности активного слоя и уменьшения дефектов. Жидкий полимер PFF₂₀ был добавлен в качестве добавки к акцепторному раствору L8-BO, а затем были приготовлены активные слои для анализа изменений оптических свойств и фотоэлектрических характеристик ПСЭ. В наших исследованиях было обнаружено, что смесь с 20% PFF, добавленного к L8-BO, была оптимальным составом. Добавление PFF в активный слой через акцепторный раствор L8-BO увеличило поглощение света, что привело к улучшенной генерации большего количества фотоиндуцированных носителей (электронов и дырок). Фактор заполнения составил 79,8%, что было примерно на 1,2% выше из-за повышенной подвижности носителей заряда и уменьшенных интерфейсных потерь между слоями. В результате улучшений по трем ключевым параметрам (J_{sc} , V_{oc} , FF) общая эффективность EOS увеличилась с 17,7% до 18,7%.

Ключевые слова: PM6, L8-BO, полимерный солнечные элементы (ПСЭ), оптическое поглощение, Фотолюминесценция, донор, акцептор, PFF, ЭПЭ, GIWAXS.

Kirish

Polimer quyosh element (PQE)lari eritmani qayta ishlash osonligi, moslashuvchanlik va yarim shaffoflik kabi ajoyib xususiyatlari tufayli yangi avlod fotovoltaiik texnologiyasi sifatida jadallik bilan rivojlanmoqda [1-3]. Yangi Y seriyali akseptorlarning qo'llanishi PQElarning energiya o'zgartirish samaradorligini (EO'S) 19% dan oshdi va sanoatda qo'llanilish chegarasiga yaqinlashtirdi [4-6].

Biroq, PQElarning rivojlanishida hali ham katta energiya yo'qotilishi va kuchli zaryad rekombinatsiyasi kabi muammolar mavjud [7-9]. Yangi donor/akseptor materiallaridan tashqari, morfologiyani tartibga solish PQE faoliyatini yanada yaxshilash uchun juda muhimdir. PQE morfologiyasini yaxshilash uchun bir nechta strategiyalar, shu jumladan faol qatlamga qo'shimcha qo'shish usulida ham bir qator tadqiqotlar olib borilib, bugungi kunda ular zamonaviy PQElar uchun keng qo'llanilmoqda [10-12].

Qo'shimcha qo'shish uchun yana bir nomzod sifatida izolyatsion suyuq polimerlar kirib kelmoqda. Misol uchun, Ye va uning hamkasblari PM6:L8-BO eritmaning hajmiga nisbatan 5% miqdorda PS-bpoli(etilen-rbutilen)-b-PS polimerlarini qo'shib EO'S qiymati 15,57% bo'lgan yuqori samaradorlikka erishgan. [13]. Chu va uning jamoadoshlari PM6:L8-BO aralashmalariga 30% poli(aril eter keton) moddalarini qo'shish orqali PQElarning yuqori EO'S ko'rsatkichini (15,8%) saqlab turgan holda mexanik xususiyatlarini sezilarli darajada yaxshilashga erishgan[14]. Bunday tadqiqotlarni davom ettirgasn holda, faol qatlamning mexanik xususiyatlarini, elektr o'tkazish samaradorligini va fotovoltaiik parametrlarini kuchaytira oladigan izolyatsion polimerlar uchun molekulyar dizayn yondashuvini o'rnatish uchun yanada chuqurroq o'rganishni talab qiladi.

Suyuq polimerlar yoki yon zanjirlari orqali qo'shilgan polimer materiallar orasidagi mikro o'lchamdagi fazaviy ajralishni optimallashtirishga yordam beradi. Bu esa donor va akseptor materiallar o'rtasida ko'proq interfeyslar hosil bo'lishiga hamda eksiton dissotsiatsiyasi uchun qulay sharoit yaratadi. Suyuq polimerlar o'zining yuqori plastiklik va moslashuvchan energiya darajasi tufayli zaryad tashuvchilar harakatini yaxshilaydi, rekombinatsiyaning oldini oladi. Donor-akseptor aralashmasiga suyuq polimerlar qo'shilganda faol qatlamning morfologiyasi yaxshilanadi. Barqaror hamda optimal darajada ajralgan fazalar hosil bo'ladi. Shu orqali yorug'likni yutish va zaryad tashishni yaxshilash mumkin bo'ladi[15].

Tadqiqot usullari: Ushbu ishda biz penta-ftorofenil bilan qoplangan polibutadien PFF(penta-ftorofenil)dan tashkil topgan suyuq polimer matritsasi bilan qo'shimcha sifatida foydalandik, u polimerlarga asoslangan izolyatsion qo'shimchalar sifatida ishlatilgan, bu PM6:L8-BO yupqa qatlamning morfologiyasini yaxshilab, donor va akseptorlarning o'zaro domenlar hosil bo'lishini yaxshilashga xizmat qiladi va bir vaqtning o'zida yuqori samaradorligini saqlab qoladi.

Bundan tashqari, ushbu suyuq polimer penta-ftor terminal guruhidan foydalanish tufayli kompozit faol qatlam ichida kuchli molekulalararo o'zaro ta'sirlarning mavjudligi, mexanik mustahkamlikni yaxshilab energiya yo'qotishini kamaytirish mumkin bo'lgan yetarli dinamik bog'lanishlarni ta'minlaydi va elektr xususiyatlarini nazorat qiladi [16].

Optimal aralashma tarkibini aniqlash maqsadida L8-BO akseptor qatlamiga 10%, 20% va 30% miqdorda PFF qo'shimchasi qo'shib tadqiqotlar olib borildi. 10% PFF qo'shilganda L8-BO akseptor qatlamining morfologiyasida biroz yaxshilanish kuzatilgan bo'lsa-da, bu miqdor donor va akseptor domenlari orasida yetarli darajada fazaviy ajralishni ta'minlay olmadi. 20% PFF qo'shilganda optimal nisbatda PFF qo'shilishi orqali donor (PM6) va akseptor (L8-BO) domenlarining o'lchami va domenlar ajralishi optimallashtirilganligini aniqladik. Bu eksiton diffuziyasi uchun qulay yo'llar yaratadi. Zaryad ajralish samaradorligini oshirdi va

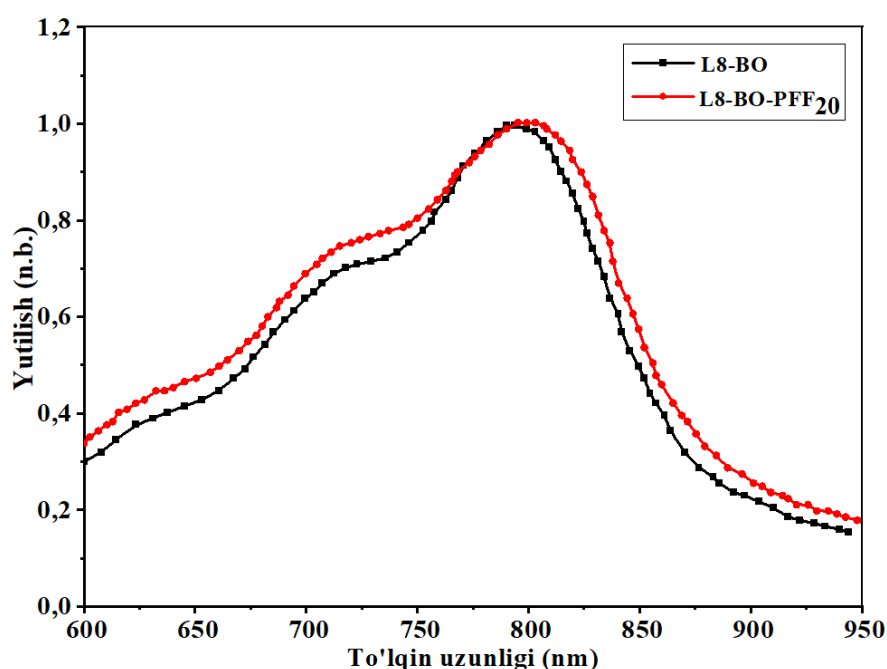
rekombinatsiyani kamaytirdi. 30% PFF qo'shilganda ortiqcha PFF esa teskari ta'sir ko'rsatib strukturada haddan tashqari fazalar ajralishi kuzatilib, zaryad tashilishini qiyinlashtirdi. Bundan tashqari PFF elektromanfiy guruhga ega bo'lgan birikma bo'lib, u L8-BO bilan aralashganda HOMO va LUMO darajalariga ta'sir qiladi. Shuning uchun 20% PFF qo'shganimizda energetik gradient (donor va akseptor o'rtasidagi LUMO farqi) yaxshilandi. Bu zaryad ajralishini osonlashtirib, V_{oc} (ochiq zanjir kuchlanishi) ni oshirdi. Shu bilan birga spektral yutilishni kengaytirishi, ayniqsa 20% PFF qo'shilganda L8-BO spektrida kengayish kuzatiladi bu esa o'z navbatida ko'proq foton yutilishi va yuqori tok zichligi oqimiga sabab bo'ladi.

Qisqacha qilib aytadigan bo'lsak 20% PFF qo'shilishi bu morfologik jihatdan eng mos domen strukturasi beradi, energetik jihatdan qulay darajalarni shakllantiradi, yorug'lik yutilishini va zaryad ajralishini kuchaytiradi, natijada samaradorlikni maksimal bo'lishiga xizmat qiladi.

Eritmani tayyorlash uchun akseptor L8-BO xloroform erituvchisida 10 mg/mL konsentratsiyasida eritildi. L8-BO-PFF₂₀ eritmasini olish uchun L8-BO ning 1 mL xloroformdagi eritmasiga 20% ya'ni 0,2 mL miqdorda PFF qo'shildi.

Tadqiqotda ishlatilgan qurilmalarni tayyorlash va ularning optik parametrlarini o'lchash jarayonlari quyidagi bosqichlardan iborat bo'ldi: Quyosh fotoelementlarini tayyorlash uchun shaffof o'tkazgichli oksid (ITO – indiy qalay oksidi) bilan qoplangan shisha tagliklar ishlatildi. ITO qoplangan shisha tagliklar ketma-ketlikda bir nechta bosqichlarda tozalandi. Birinchi ultratovushli vannada, asetonda, so'ng deionizatsiyalangan suvda va izopropil spirtida yuvildi. Tozalangan shisha tagliklar azot gazi yordamida quritildi. Qurilma tayyorlashdan oldin shisha tagliklar qo'shimcha ravishda kislorod plazmasi bilan 5 daqiqa davomida tozalandi[17]. Faol qatlamni hosil qilish uchun PEDOT:PSS (polistirensulfonat asosidagi poli(3,4-etilendioksitiofen)) eritmasi spin-koating usuli yordamida ITO yuzasiga yupqa qatlam sifatida yotqizildi. Bu qatlam 150 ° C da 15 daqiqa davomida pechkada qizdirilib quritildi. Donor va akseptor qatlamlar uchun PM6 xlorobenzol erituvchisida 10 mg/mL konsentratsiyasida eritildi, L8-BO

esa xloroform erituvchisida 10 mg/mL konsentratsiyasida eritildi. L8-BO-PFF₂₀ eritmasini olish uchun akseptor eritmasiga 20% miqdorda PFF qo'shilgandan so'ng PM6:L8-BO-PFF₂₀ aralashma 20 daqiqa davomida aralashtirildi. Keyin tayyor bo'lgan eritma PEDOT: PSS qoplangan tagliklar ustiga "spin coating" usuli bilan yotqizildi. Olingan faol qatlamlari 5 daqiqa davomida 85 °C da qizdirildi. Keyin, PDINN eritmasini (CH₃OH da) elektron tashish qatlami sifatida "spin coating" usuli bilan (2500 ayl/min. 30 sekund) faol qatlam ustiga qopolandi. Nihoyat, yuqori elektrod sifatida 100 nm qalinlikdagi kumush (Ag) qatlami vakuum sharoitida ($\sim 2 \times 10^{-4}$ Pa) bug'latish orqali yotqizildi. Tayyorlangan qurilmalarning volt-amper xarakteristikalari Keithley 2420 o'lchov tizimi yordamida aniqlangan[18]. Qurilmalar 100 mW/cm² (AM 1.5 G) nurlanish intensivligi ostida Newport quyosh simulyatori yordamida sinovdan o'tkazilgan. Eritma va qatlam shaklidagi materiallarning optik yutilish spektrlari "Shimadzu 1280" spektrofotometri yordamida o'lchandi. Yupqa qatlamlar yutilish spektrlari eritmalari 5,0 mg/mL konsentratsiyada tayyorlanib, 1500 ayl/min tezlikda spin-coating usuli yordamida shisha taglik ustiga qatlam holatida yotqizilib olindi. Tayyorlangan PQE an'anaviy tuzilishga ega bo'lib, quyidagi qatlamlardan tashkil topgan: ITO/PEDOT:PSS/faol qatlam/ PNDINN/Ag.

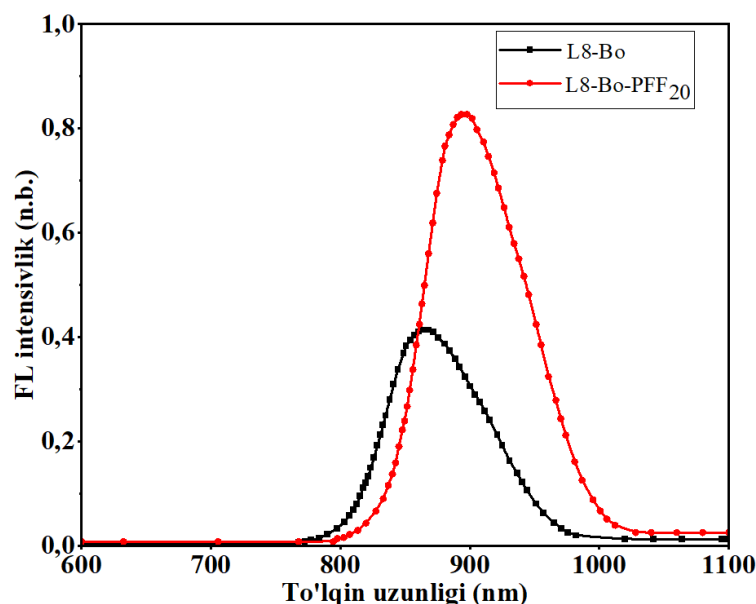


1-rasm. L8-BO va L8-BO:PFF yupqa qatlamlarining yutilish spektri.

1-rasmda L8-BO qatlamning va L8-BO-PFF₂₀ aralashmaning yupqa qatlamning yutilish spektrlari tadqiq qilinganda L8-BO yupqa qatlamning 796 nm to'liq uzunligiga to'g'ri keluvchi maksimal yutilish piki PFF 20 % kiritilgandan so'ng 801 nm qizil to'liq uzunligi tomonga siljidi hamda yutilish biroz oshganligini ko'rsatdi. Ayniqsa 725 nm da L8-BO-PFF₂₀ ning yutilish koeffitsienti aniq oshdi, L8-BO yupqa qatlam yutilishidan $7,61 \times 10^4 \text{ sm}^{-1}$ gacha taxminan 1,08 marta yaxshilandi.

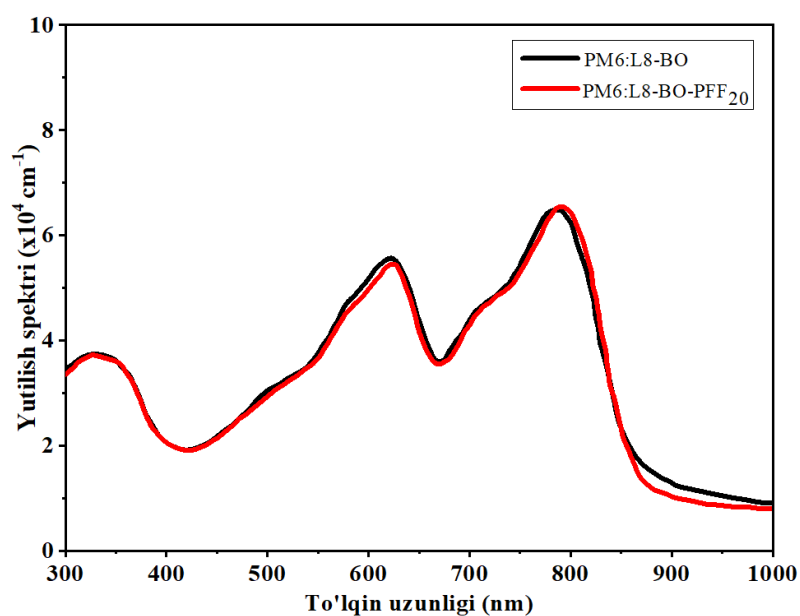
L8-BO:PFF₂₀ yupqa qatlamning yutilish spektri pikining qizil siljishini sababi PFF qo'shimchasi L8-BO ga qo'shilganda, bu moddalar o'rtasida π - π bog'lar hamda boshqa turdagi molekulalararo o'zaro bog'lanishlar yuzaga keladi. Bu holat L8-BO molekulalarining tartibliroq joylashuviga olib keladi, bu esa ularning elektron holatlarini past energiyaga siljitadi, natijada yutilish spektridagi pik qizil tomonga siljiydi. L8-BO:PFF₂₀ yupqa qatlam hosil bo'lganda, molekulalar orasidagi o'zaro ta'sir kuchayadi, bu esa konjugatsiyalangan yani tarmoqlangan tizimning kengayishiga olib keladi. Kengaygan π -konjugatsiya tizimi yorug'likni pastroq energiyada yutishga moyil bo'ladi, bu esa spektrda uzunroq to'liq uzunligi tomonga siljishni keltirib chiqaradi.

2-rasmda L8-BO va L8-BO-PFF₂₀ eritmalarining yupqa qatlam xolatidagi fotolyuminissensiya (FL) spektrlari berilgan bo'lib, spektrdan L8-BO-PFF₂₀ yupqa qatlamining FL spektri intensivligi L8-BO yupqa qatlam FL spektri intensivligiga qaraganda oshganligini ko'rish mumkin, bu PFF₂₀ ning qo'shilishi aralash yupqa qatlam interfeysida zaryad tashuvchilarning to'planishi yaxshilanganligini ko'rsatadi. Ya'ni bu yupqa qatlamda nurlanishsiz rekombinatsiyaga sabab bo'luvchi defektlar kamayganligi, xosil bo'layotgan eksitonlar zaryad tashuvchilarga ajralishi samarali ravishda yaxshilanganligi bilan izoxlash mumkin. FL intensivligi ortishi PQElar samaradorligini oshirish uchun juda muximdir, chunki bu energiyaning nurlanishsiz rekombinatsiya orqali samarali ravishda elektr energiyasiga aylanishini ta'minlaydi.



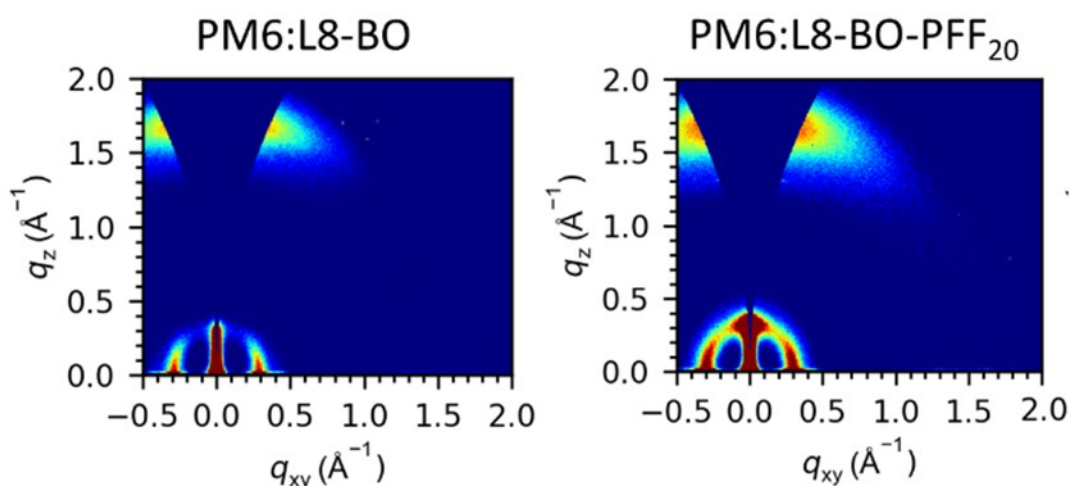
2-rasm. L8-BO va L8-BO: PFF qatlamlarning FL spektri.

L8-BO-PFF₂₀ spektrining pikki biroz siljigan yani qizil siljishni ko'rsatmoqda. Buning sabab PFF₂₀ qo'shilishi molekulalararo masofani oshirib elektron holatlarni barqarorlashtirishi deyish mumkin. Qisqacha xulosa qiladigan bo'lsak L8-BO va L8-BO-PFF₂₀ qatlamlari orasidagi FL spektridagi farqini molekulalararo o'zaro ta'sirlar, dispersiya darajasi va elektron holatlarning o'zgarishi bilan izoxlash mumkin.



3-rasm. PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF faol qatlamlarning yutilish spektri.

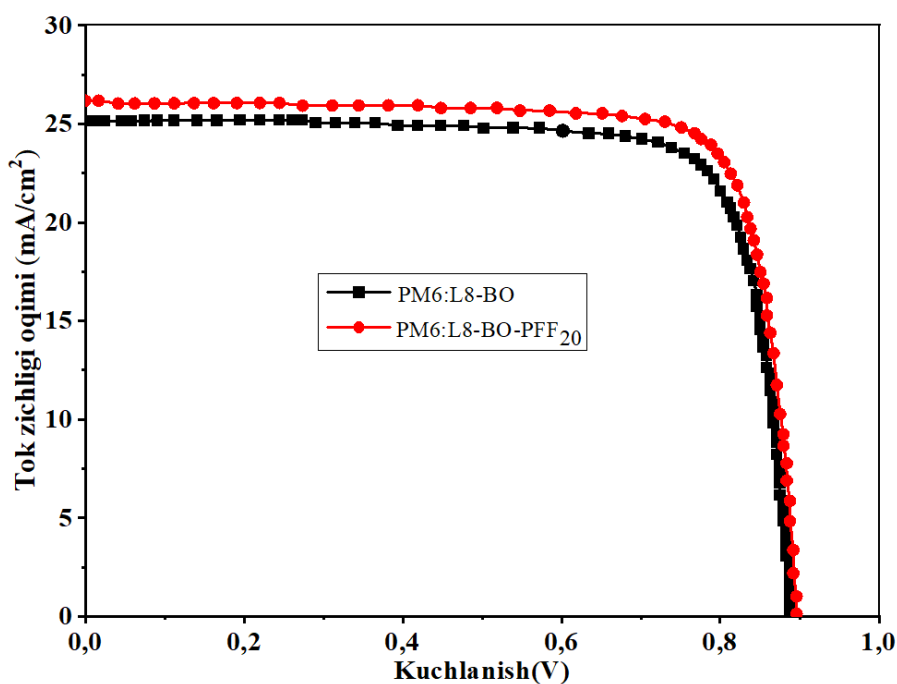
3-rasmda PM6 donor bilan L8-BO akseptor va PFF₂₀ suyuq polimerning aralashmasi asosida olingan faol qatlamlarning yutilish spektrlari berilgan. Ikkala faol qatlamlar uchun ham 450–900 nm oralig‘ida yaxshi yutilish intensivligini ko‘rsatmoqda. Bunday to‘lqin uzunligi sohasida yutilish spektrining yaxshi bo‘lishi quyosh nurlanishi spektrining katta qismini yutilishiga imkon berib PQElarning samaradorligini yanada oshiradi. Har bir faol qatlamning yutilish spektrida to‘lqin uzunligi 600 nm atrofida va 800 nm atrofida kuchli yutilish piklari mavjud. Bunday piklarning shakllanishiga sabab, PM6 va L8-Bo polimerlarning xususiy yutilish piklari xisoblanadi. Grafikning 600 nm atrofidagi yutilish piklari bu PM6 polimerga tegishli bo‘lsa, 800 nm atrofidagi yutilish piklari esa L8-Bo akseptorga tegishli. PFF₂₀ suyuq kristalning yutilish spekridagi xissasiga keladigan bo‘lsak faol qatlamlar yutilish spektrlarida akseptorga tegishli pikda yutilish oshganligini va qizil siljishni ko‘rsatmoqda.



4-rasm. PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF20 faol qatlamlarining GIWAXS tasvirlari.

Bu PFF₂₀ qo‘shilishi yutilish qobiliyatini kuchaytirganini bildiradi, ya‘ni ko‘proq fotonlar yutilishiga xizmat qiladi. Har ikki spektr grafigida uchta asosiy pik mavjud: bu piklar ~365 nm (UV soha), ~615 nm (ko‘rinadigan soha) va ~810 nm (yaqin IQ soha) to‘lqin uzunligida bo‘lib, bu polimerlarning foton yutilish sohasini ko‘rsatadi. PM6, L8-BO va PFF₂₀ ning o‘ziga xos yutilish piklari shu sohalarda joylashgan.

4-rasmda PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlamlarining GIWAXS (Grazing Incidence Wide Angle X-ray Scattering) tasvirlari berilgan bo‘lib, bu tasvirlar orqali faol qatlamlarning molekulyar tartibini va kristallik darajasini aniqlash mumkin. q_z o‘qi – faol qatlam yuzasiga perpendikulyar yo‘nalishdagi q_{xy} o‘qi – faol qatlam yuzasiga parallel yo‘nalishdagi fazoviy chastota komponentasi. PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlamlarining tuzilishini tahlil qiladigan bo‘lsak, ko‘rinib turibdiki, aniq va intensiv diffuziya halqalari mavjud tasvir bu PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlamning GIWAXS tasviri hisoblanadi, bu holatda tarqalish intensivligi kuchliroq va aniqroq, ayniqsa pastki markaziy sohalarda (yaqin $0.3 \text{ \AA}^{-1}$ atrofida) — bu yuqoriroq kristallik va molekulyar joylashuvning tartiblilik darajasi yuqoriligini ko‘rsatadi. Yo‘ylar va signalning kuchayishi PM6:L8-BO qatlamiga nisbatan yaxshilangan “ π - π stacking” (molekulalararo o‘zaro ta’sir) mavjudligini bildiradi. Bu holat tashuvchanlikni va qurilmaning fotoelektrik xossalarini yaxshilashga xizmat qiladi. PM6:L8-BO faol qatlamning GIWAXS tasviri natijalaridan amorf fazaning ko‘proq ustunligini va past tartiblanishni ko‘rishimiz mumkin, shu tufayli bu faol qatlam PQElar uchun PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlamdek samarali bo‘lmasligi huddi faol qatlamlarning optik xossalari bo‘yicha chiqargan ilmiy xulosalarimizga mos keladi.



5-rasm. PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlamlar asosidagi

PQElarning volt-amper xarakteristikasi.

5-rasmdagi grafikda PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ asosidagi quyosh elementlarining volt-amper ($I-V$) xarakteristikasi ko'rsatilgan. Asosiy parametrlarini tahlil qilsak qisqa tutashuv tok zichligi oqimi (J_{sc}) eng yuqori qiymati PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ qatlamlar asosidagi PQElarda mos ravishda $\sim 25,3 \text{ mA/cm}^2$ va $\sim 26,2 \text{ mA/cm}^2$ qiymatlarga ega. Bundan aytish mumkinki PFF₂₀ qo'shilishi natijasida J_{sc} ortgan. Bu oldingi grafikdagi yutilish spektrining yaxshilanishi bilan bog'liq. Ko'proq fotonlar yutilgani sababli, ko'proq elektronlar hosil bo'lmoqda. Ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}) esa har ikki holatda ham $V_{oc} \sim 0,889-0,897 \text{ V}$ atrofida, ya'ni deyarli bir xil. PFF₂₀ qo'shilishi V_{oc} ga sezilarli ta'sir ko'rsatmagan, bu esa energetik sathlar o'xshashligicha qolganligini bildiradi.

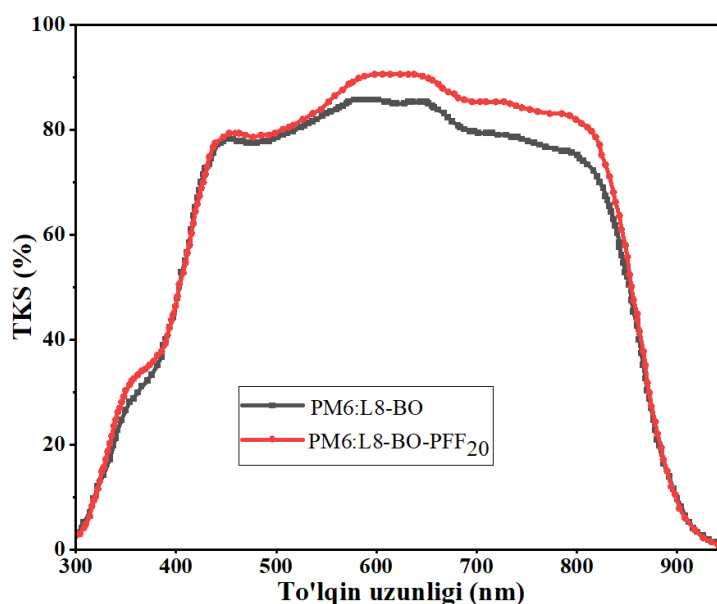
To'ldirish faktori (FF) va volt-amper xarakteristikasida PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlam asosidagi PQEda egri chiziq yuzasi kengroq, bu esa yuqori to'ldirish faktori va kam yo'qotishlar borligini bildiradi. EO'S, J_{sc} va FF oshganligi sababli, PM6:L8-BO-PFF₂₀ asosidagi qurilmaning umumiy fotoelektrik samaradorligi yuqoriroq bo'ladi[19]. Bu natijalar PFF qo'shimchasi fotovoltaik qurilmalar samaradorligini oshirishda foydali ekanini ko'rsatadi.

1-jadval. PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlamlar asosidagi PQElarning fotovoltaik parametrlari

Faol qatlam	J_{sc} , (mA/cm ²)	V_{oc} , (V)	FF, (%)	EO'S, (%)
PM6:L8-BO	25,3	0,889	78,6	17,7
PM6:L8-BO-PFF ₂₀	26,2	0,897	79,8	18,7

1-jadvalda PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ asosidagi PQElarning asosiy fotovoltaik parametrlari keltirilgan. Bu yerda PFF₂₀ qo'shilishi bilan yorug'lik yutilishi ortgan, natijada ko'proq eksitonlar (elektronlar va kovaklar) hosil bo'lgan. Shuning hisobiga tok zichligi qiymatlari PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlamlar asosidagi PQElar uchun mos ravishda $25,3 \text{ mA/cm}^2$ va $26,2 \text{ mA/cm}^2$

qiymatda bo'lib, $\approx 0,9 \text{ mA/cm}^2$ o'sish ko'rsatdi. V_{oc} – Ochiq zanjir kuchlanishi PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlamlar asosidagi PQElari uchun mos ravishda 0,889 V va 0,897 V qiymaga ega bo'lib deyarli bir biriga yaqin qiymatni ko'rsatdi. Bu kichik o'sish rekombinatsiya jarayonlarining kamayganligini hamda energiya sathlarining bir biriga mos kelishini anglatadi. Zaryad tashuvchilarning harakati yaxshilanishi va kontakt interfeyslaridagi yo'qotishlarning kamayganligi sababli to'ldirish faktori ham 78,6% va 79,8% bo'lib, taxminan 1,2% oshdi.



6-rasm. PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlamlar asosidagi PQElarning tashqi kvant samaradorligi spektrlari.

Uchta asosiy parametr (J_{sc} , V_{oc} , FF) yaxshilangani sababli energiya o'zgartirish samaradorlik oshgan ya'ni 17,7% dan 18,7% ga oshdi. Bundan xulosa qiladigan bo'lsak PM6:L8-BO-PFF₂₀ aralashmasi quyosh elementining uchta asosiy fotovoltaiik parametrini yaxshilagan. Bu shuni ko'rsatadiki, PFF₂₀ modifikatori optik, elektr va morfologik xossalarni yaxshilab, quyosh elementlarining umumiy samaradorligini 18,7% gacha oshirgan.

6-rasmda PM6:L8-BO va PM6:L8-BO-PFF₂₀ asosidagi polimer quyosh elementlarining tashqi kvant samaradorligi spektrlari keltirilgan. Tashqi kvant samaradorligi quyosh elementi tomonidan yutilgan har bir foton uchun hosil bo'lgan elektronlarning foizini bildiradi. Yuqori tashqi kvant samaradorligi qiymati bu fotonlarni elektronga aylantirish samaradorligi yuqori ekanligini anglatadi.

Spektr natijalaridan tahlil qilsak, PM6:L8-BO faol qatlam asosidagi PQning tashqi kvant samaradorligiga nisbatan PM6:L8-BO-PFF₂₀ faol qatlam asosidagi PQning tashqi kvant samaradorligi spektri 550–850 nm oralig'ida ancha yuqori bo'ldi. Buni PFF₂₀ qo'shilishi PM6:L8-BO aralashmali faol qatlamidagi fazaviy ajralishni yaxshilaganligi hamda donor va akseptor komponentlarning yanada aniqroq domenlarga ajralishini ta'minlashi bilan elektron va kovaklar uchun uzluksiz harakatlanishiga yo'l ochib bergan. PFF₂₀ bilan morfologiya yaxshilanganidan so'ng, eksitonlar donor va akseptor chegarasiga samaraliroq yetib boradi va ajraladi, bu esa o'z navbatida fototok hosil bo'lishini kuchaytiradi. PFF₂₀ elektron energiya darajasi PM6 va L8-BO bilan mos bo'lgani uchun energiya darajalari o'rtasida moslikni ta'minlaydi, bu esa energiya yo'qotilishini kamaytiradi. Bundan tashqari PFF₂₀ polimer strukturasi orqali elektron/kovaklarning harakatchanligi oshadi, bu esa tashqi kvant samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Xulosa

Polimer faol qatlam morfologiyasini modifikatsiya qilish maqsadida penta-ftorli terminal guruhdan foydalanib kuchli molekulalararo o'zaro ta'sirlar mustahkamlandi. Bu shuni ko'rsatadiki, PFF₂₀ modifikatori optik, elektr va morfologik xossalarni yaxshilab, PQElarning umumiy samaradorligini 18,7 % gacha oshirdi. Faol qatlam eritmalariga optimal miqdordagi ya'ni 20 % PFF suyuq polimer eritmasi qo'shilishi bilan PM6:L8-BO faol qatlamda π - π bog'lanishni kuchaytirib, zaryadni tashish qobiliyatini saqlab qolgan holda strukturaviy tartibni yaxshilashga erishildi. Faol qatlam eritmasiga PFF₂₀ qo'shilishi yorug'lik yutilish qobiliyatini kuchaytirdi, ya'ni ko'proq fotonlar yutilishiga xizmat qildi. PFF₂₀ elektron energiya darajasi PM6 va L8-BO bilan mos bo'lgani uchun energiya darajalari o'rtasida moslikni ta'minladi, bu esa energiya yo'qotilishini kamaytirdi. Bu xulosalarimizni PQning fotovoltaik parametrlari ham tasdiqladi, ya'ni faol qatlamning morfologiyasini optik xossalarni optimallashtirish tufayli J_{sc} va FF qiymatlari yaxshilandi. Natijada, optimallashtirilgan PM6:L8-BO-PFF₂₀

aralashmali faol qatlam asosidagi PQEning fotovoltaik parametrlari V_{oc} 0,897 V, J_{sc} 26,2 mA/cm², FF 79,8 % va EO'S 18,7 % qiymatga erishildi.

Minnatdorchilik. Ushbu maqoladagi olingan natijalar Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi innovatsion rivojlanish agentligi tomonidan moliyalashtirilgan AL-8724053065-raqamli ilmiy loyiha doirasida bajarilgan.

Adabiyotlar ro'yxati

1. J. S. Park, G. U. Kim, S. Lee, et al., "Material Design and Device Fabrication Strategies for Stretchable Organic Solar Cells," *Advanced Materials* 34, no. 31 (2022): 2201623.
2. J. Yao, Q. Chen, C. Zhang, Z. Zhang, and Y. Li, "Perylene-Diimide-Based Cathode Interlayer Materials for High Performance Organic Solar Cells," *SusMat* 2, no. 3 (2022): 243–263.
3. S. Chu and A. Majumdar, "Opportunities and Challenges for a Sustainable Energy Future," *Nature* 488, no. 7411 (2012): 294–303.
4. Z. Chen, J. Zhu, D. Yang, et al., "Isomerization Strategy on a Non-Fullerene Guest Acceptor for Stable Organic Solar Cells With Over 19%Efficiency," *Energy & Environmental Science* 16, no. 7 (2023): 3119–3127.
5. Q. Zhu, J. Xue, H. Zhao, et al., "Highly Efficient Organic Solar Cells With Superior Deformability Enabled by Diluting the Small Molecule Acceptor Content," *Journal of Materials Chemistry A* 10, no. 15 (2022): 8293–8302.
6. D. J. Lipomi, B. C. K. Tee, M. Vosgueritchian, and Z. Bao, "Stretchable Organic Solar Cells," *Advanced Materials* 15, no. 15 (2003): 1771–1775.
7. Z. Wang, D. Zhang, M. Xu, et al., "Intrinsically Stretchable Organic Solar Cells With Simultaneously Improved Mechanical Robustness and Morphological Stability Enabled by a Universal Crosslinking Strategy," *Small* 18, no. 26 (2022): 2201589.
8. J.Qiu,Q.Zhou, M.Yu,etal.,"ModulatingCsPbl," *SusMat* 3, no. 6 (2023): 894–908.
9. J. W. Lee, H. G. Lee, E. S. Oh, et al., "Rigid- and Soft-Block-Copolymerized Conjugated Polymers Enable High-Performance Intrinsi-cally Stretchable Organic Solar Cells," *Joule* 8, no. 1 (2024): 204–223.
- 10.L. Tian, C. Liu, and F. Huang, "Recent Progress in Side Chain Engi-neering of Y-Series Non-Fullerene Molecule and Polymer Acceptors," *Science China Chemistry* 67, no. 3 (2024): 788–805.

11. Q. Fan, Q. Xiao, H. Zhang, et al., "Highly Efficient and Stable ITO-Free Organic Solar Cells Based on Squaraine N-Doped Quaternary Bulk Heterojunction," *Advanced Materials* 36, no. 3 (2024): 2307920.
12. X. Sun, X. Ding, F. Wang, et al., "Binary Organic Solar Cells With >19.6% Efficiency: The Significance of Self-Assembled Monolayer Modification," *ACS Energy Letters* 9 (2024): 4209–4217.
13. Z. Peng, K. Xian, Y. Cui, et al., "Thermoplastic Elastomer Tunes Phase Structure and Promotes Stretchability of High-Efficiency Organic Solar Cells," *Advanced Materials* 33, no. 49 (2021): 2106732.
14. J. Wang, C. Han, J. Han, et al., "Synergetic Strategy for Highly Efficient and Super Flexible Thick-Film Organic Solar Cells," *Advanced Energy Materials* 12, no. 31 (2022): 2201614.
15. S. Seo, J.W. Lee, D. J. Kim, et al., "Poly (dimethylsiloxane)-Block-PM6 Polymer Donors for High-Performance and Mechanically Robust Polymer Solar Cells," *Advanced Materials* 35, no. 24 (2023): 2300230.
16. Y. Zheng, S. Zhang, J. B. H. Tok, and Z. Bao, "Molecular Design of Stretchable Polymer Semiconductors: Current Progress and Future Directions," *Journal of the American Chemical Society* 144, no. 11 (2022): 4699–4715.
17. J. Hou, O. Ingans, R. H. Friend and G. Feng, *Nature Mater.*, 2018, 17, 119–128.
18. H. Liang, Y. Wang, X. Guo, D. Yang, X. Xia, J. Wang, L. Zhang, Y. Shi, X. Lu.
19. Y. Cai, Q. Li, G. Lu, et al., "Vertically Optimized Phase Separation With Improved Exciton Diffusion Enables Efficient Organic Solar Cells With Thick Active Layers," *Nature Communications* 13, no. 1 (2022): 2369.