

Article

D18:Y6 asosidagi faol qatlamlarning optik xossalariga termal ishlov berishning ta'siri

G.M. Sharopova ², N.F. Otaqulova ¹, A.A. Saidqulova ¹, S.R. Reymbayeva ², A.A. Saparbayev ^{*1,2}

¹ U.A. Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, Toshkent, 100125, O'zbekiston

² M. Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti, Toshkent, 100174, O'zbekiston

sharopovagulruxsor18@gmail.com (G.Sh.), otaqulovanilufar78@gmail.com (N.O.), adolatsaidqulova08@gmail.com (A.S.), reymbayeva71@mail.ru (S.T.), saparbaevaziz83@gmail.com (A.S.)

* Correspondence: saparbaevaziz83@gmail.com; Tel.: +998 88 7801441 (A.S.)

Xulosa:

Ushbu maqolada polimer quyosh element (PQE)larining samaradorligini oshirishga qaratilgan tadqiqot natijalari taqdim etilgan. Tadqiqotda D18 donor polimeri hamda Y6 akseptorning optik va fotovoltaiik xususiyatlari o'rganildi. Donor va akseptor materiallarning yorug'lik yutish spektrlari, energetik darajalari va o'zaro ta'siri tahlil qilindi. Eksperimental natijalar shuni ko'rsatdiki, D18 donor polimerining yorug'lik yutilish qobiliyati va fotovoltaiik samaradorligi yuqoriroq bo'lib, Y6 akseptori bilan birgalikda faol qatlam hosil qilinganda PQElarning 15.7% energiya o'zgartirish samaradorligi(EO'S)ga erishildi. Shuningdek, faol qatlamni erituvchi bug'ida qizdirish PQEning samaradorligiga sezilarli ijobiy ta'sir ko'rsatishi aniqlangan.

Kalit so'zlar: D18, Y6, faol qatlam, yutilish spektri, polimer quyosh elementlari.

The effect of thermal treatment on the optical properties of active layers based on D18:Y6

Gulrukhsor M.Sharopova ², Nilufar F.Otakulova ¹, Adolat A.Saidqulova ¹, Sanobar R.Reymbayeva ², Aziz A.Saparbaev ^{*1,2}

¹ Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov, Tashkent, 100125, Uzbekistan

² National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, 100174, Uzbekistan

sharopovagulruxsor18@gmail.com (G.Sh.), otaqulovanilufar78@gmail.com (N.O.), adolatsaidqulova08@gmail.com (A.S.),

reymbayeva71@mail.ru (S.T.), saparbaevaziz83@gmail.com (A.S.)

Iqtibos: G.M. Sharopova, N.F. Otaqulova, A.A. Saidqulova, S.R. Reymbayeva, A.A. Saparbayev. D18:Y6 asosidagi faol qatlamlarning optik xossalariga termal ishlov berishning ta'siri. **2025**, 2,2, 1. <https://doi.org/>

Olingan: 10.03.2025

Tuzatilgan: 18.03.2025

Qabul qilingan: 25.04.2025

Nashr qilingan: 30.04.2025

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted to for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract:

This study presents the experimental findings aimed at enhancing the performance of polymer solar cells (PSCs). The optical and photovoltaic properties of the D18 donor polymer and the Y6 acceptor were systematically investigated. Detailed analyses were conducted on the absorption spectra, energy level alignment, and intermolecular interactions of the donor and acceptor materials. The experimental results demonstrated that the D18 polymer possesses superior light-harvesting capabilities and photovoltaic performance. When employed as a photoactive layer in combination with the Y6 acceptor, the PSCs achieved a notable power conversion efficiency (PCE) of 15.7%. Furthermore, it was revealed that solvent vapor annealing of the active layer significantly influences the overall device efficiency, suggesting its critical role in optimizing the morphological and electronic properties of PSCs.

Keywords: D18, Y6, active layer, absorption spectrum, polymer solar cell.

Kirish

So'nggi o'n yilliklarda qazilma yoqilg'ılardan keng foydalanish natijasida iqlim o'zgarishi va global isishning keskin kuchayishi kuzatilmoqda. Ushbu atrof-muhit muammolarini bartaraf etish maqsadida qayta tiklanadigan va ekologik toza energiya manbalariga o'tish bo'yicha jiddiy ilmiy va texnologik tadqiqotlar olib borilmoqda. Shu nuqtai nazardan, quyosh energiyasi muqobil energiya manbalarining eng istiqbolli yo'nalishlaridan biri sifatida e'tirof etiladi. Quyosh energiyasini elektr energiyasiga to'g'ridan-to'g'ri aylantirish imkonini beruvchi asosiy texnologik yechim quyosh elementlari hisoblanadi[1,3]. Bu elementlar atrof-muhitga zarar yetkazmasdan energiya ishlab chiqarishni ta'minlashga xizmat qiladi. Quyosh elementlarining rivojlanish jarayoni bir nechta avlodlarga bo'linadi. Birinchi avlod an'anaviy kremniy asosidagi quyosh elementlarini o'z ichiga oladi, ikkinchi avlod esa yupqa qatlamli quyosh elementlari texnologiyasiga asoslanadi, uchinchi avlod — perovskit, organik va tandem quyosh elementlarini qamrab olgan yangi avlod texnologiyalaridan iborat Hozirgi kunda ekologik toza, qayta tiklanuvchi energiya manbalariga bo'lgan ehtiyoj ortib borar ekan, polimer quyosh element (PQE)lari istiqbolli texnologiyalardan biri sifatida alohida e'tibor qozonmoqda[4]. PQElarni tayyorlashda eritma orqali qayta ishlanishi, moslashuvchanligi, shaffofligi va yengil vaznga ega bo'lishi sababli keng ko'lamda sanoat ishlab chiqarish uchun istiqbolli texnologiya sifatida ko'rilmogda. Ayniqsa, yuqori darajadagi yorug'lik yutilishi va zaryad tashuvchanlik xususiyatlariga ega bo'lgan donor-akseptor tipidagi materiallar, masalan, D18 polimeri va Y6 akseptori, PQElarning samaradorligini oshirishda muhim ahamiyat kasb etmoqda. So'nggi yillarda PQElarning ish unumdorligini oshirish maqsadida ularning asosiy tarkibiy qismi bo'lgan faol qatlamlarni hajmiy geterotuzilma yoki qatlamli konfiguratsiya asosida shakllantirish texnologiyalari keng tatbiq etilmoqda. Bu yo'nalishda olib borilgan tadqiqotlar natijasi shuni ko'rsatadiki, 1998-yilda PQElarning EO'S atigi 1.9% ni tashkil qilgan bo'lsa, 2022-yilga kelib bu ko'rsatkich 19.2% gacha yetkazilgani bu sohada sezilarli yutuqlarga erishilganini ko'rsatadi[5,8]. Biroq, yuqori EO'S ko'rsatkichlariga erishilganiga qaramay, PQElar uchun donor va akseptor materiallarni tanlash texnologiyasi, shuningdek, donor-akseptor aralashmalaridan tashkil topgan faol qatlamlarning yutilish spektr to'lqin uzunligi sohasini kengaytirish kabi muhim masalalar haligacha to'liq yechimini topmagan.

So'nggi tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, PQEda samaradorlikni oshirishga qaratilgan izlanishlar natijasida D18 donor sifatida va Y6 esa fullerensiz akseptor sifatida keng qo'llanilib, taxminan 18% EO'Sga erishildi[9]. D18:Y6 asosidagi PQElar boshqa turdagi quyosh elementlariga nisbatan yuqori samaradorlik ko'rsatmoqda. Bunga ushbu komponentlar orasidagi bir-birini to'ldiruvchi optik va energetik xususiyatlar sabab bo'lib, ular samarali zaryad ajralishi va faol qatlam morfologiyasining boshqarilishini ta'minlaydi. Faol qatlamdagi komponentlarning tasodifiy taqsimlanishi, donor/akseptor nisbatlari, hamda materialga nisbatan qo'llaniladigan mexanik egilish (bukish) usuli zaryad tashuvchilarning rekombinatsiyasini nazorat qilishda hal qiluvchi rol o'ynaydi. Bu esa o'zaro kirishuvchi tarmoq hosil bo'lishiga bevosita ta'sir ko'rsatadi[10].

PQElarni samaradorligini oshirishga qaratilgan turli yondashuvlar mavjud bo'lib, ulardan biri erituvchi bug'ida qizdirish (EBQ) usuli hisoblanadi[11,13]. Ushbu texnologik yondashuv faol qatlamdagi komponentlar o'rtasida tartibli fazaviy tuzilmaning shakllanishi va nano-o'lchamdagi fazaviy ajralishni kuchaytirishga xizmat qiladi, bu esa zaryad tashuvchilarning ajralishi va tashilishi yanada samarali amalga oshirishini ta'minlaydi. Ushbu ishning asosiy maqsadi — D18:Y6 asosidagi faol qatlamlarga EBQ va termal qizdirish usullarini birgalikda qo'llash orqali PQEning samaradorligiga ko'rsatiladigan ta'sirni o'rganishdan iborat. Shu bois ushbu ishda D18 donor polimeri va Y6 fullerensiz akseptor materiallar asosida tayyorlangan faol qatlamlarni erituvchi bug'ida qizdirish (EBQ) va termal qizdirilish natijasida strukturaviy o'zgarishlar tufayli yuzaga keladigan optik va fotovoltaiik xossalarning o'zgarishlari batafsil o'rganildi va qiyosiy tahlil qilindi.

Materiallar va usullar

D18 donor polimeri o'zining o'ziga xos fizik-kimyoviy xususiyatlari bilan boshqa donor polimerlarga nisbatan muhim afzalliklarga ega bo'lib, turli xil PQElar uchun faol qatlamlar yaratishda keng qo'llanmoqda. Ushbu polimerning optik va fotovoltaiik xossalari, shuningdek, turli akseptor materiallar bilan yuqori darajada moslasha olishi uni PQElar sohasida faoliyat yuritayotgan tadqiqotchilar uchun muhim donor material sifatida ajralib turadi. D18 donor polimeri o'zining noyob strukturaviy tuzilishi va optik xususiyatlari tufayli organik yarimo'tkazgich texnologiyalarida keng qo'llanilish imkonini beruvchi istiqbolli komponent hisoblanadi. Bu esa uni nafaqat mavjud

qurilmalar samaradorligini oshirish, balki yangi avlod texnologiyalarini yaratishda ham muhim rol o'ynaydigan materialga aylantiradi.

PQElar uchun faol qatlamlar D18 va Y6 polimerlarning o'zaro aralashmasi 1:1,6 nisbatlarda olinib, xlorobenzol erituvchisi yordamida aralashtirish yo'li bilan tayyorlandi. Bunda 11 mg/mL konsentratsiyaga ega aralashma 4,2 mg D18 va 6,7 mg Y6 dan iborat bo'lib, 1,0 mL miqdordagi xloroformda eritildi. Aralashma xona temperaturasida magnitli meshalka yordamida polimerlarning suyuqlik bo'ylab bir tekis konsentratsiyali aralashma tayyor bo'lishigacha aralashtirildi. Tayyor bo'lgan aralashmani "spin-coating" usulida shisha/ITO ustiga o'tqizildi va indiy qalay oksidi (ITO)dan shaffof elektrod sifatida foydalanildi. Buning uchun shisha/ITO tagliklari ultratovushli vannadan foydalanib ketma-ket, har biri 15 daqiqadan davom etadigan uchta bosqichda tozalandi: avval asetonda, so'ng deionizatsiyalangan suvda va izopropil spirtida yuvildi. Izopropil spirtida tozalab bo'lgandan so'ng tagliklar yuzasini yuqori tozalikdagi argan gazi yordamida purkash usuli bilan ITO shisha quritildi[14,17]. Tozalangan shisha/ITO tagliklar ustiga PEDOT:PSSni "spin-coating" usuli yordamida 3500 ayl/daq. tezlikda 50 sekund davomida aylantirib qalinligi 40 nm bo'lgan PEDOT:PSS qatlam hosil qilindi. Tayyor bo'lgan shisha/ITO/PEDOT:PSS tagliklar argon gazi bilan to'ldirilgan qo'lqopli maxsus qutiga joylashtirildi. Shisha/ITO/PEDOT:PSS tagliklari ustiga sof D18, Y6 va ularning aralashmalaridan tayyorlangan D18:Y6 yupqa faol qatlamlar 3800 ayl/daq tezlikda 30 sekund davomida "spin-coating" usuli yordamida qoplandi hamda EBQ va termal qizdirishning faol qatlamga ta'siri o'rganildi. EBQ usulini qo'lash uchun ITO/PEDOT:PSS/D18:Y6 qatlamlari 100µL xloroform solingan Petri idishiga 10 sekund davomida joylashtirildi, keyin esa qatlamlar esa mos ravishda 60°C, 80°C va 100°C haroratda 10 minut davomida termal qizdirildi. Oxirgi qatlamni hosil qilish uchun, 2,0 mg PDINN 1 mL metanol ichida eritildi va ushbu eritma faol qatlam ustiga 4000 ayl/daq tezlikda 30 sekund davomida "spin-coating" usuli bilan qoplandi[18].

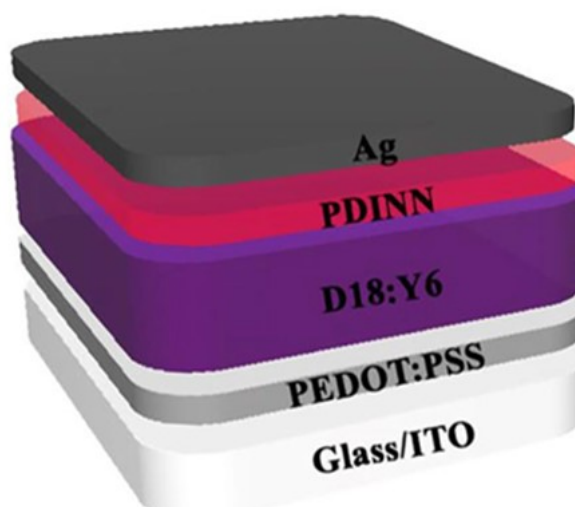


Figure 1. The general structure of PSCs

Rasm 1. PQElarning umumiy tuzilishi

Elektrod sifatida 100 nm qalinlikdagi kumush (Ag) qatlami vakuum sharoitida, 25 A tok kuchi va 3×10^{-5} Pa bosimda buglatish orqali yotqizildi. Natijada, 1-rasmda ko'rsatilganidek, shisha/ITO/PEDOT:PSS/D18:Y6/PDINN/Ag qatlamli tuzilishga ega PQE tayyorlandi.

Natijalar

2-rasmda turli sharoitlarda tayyorlangan D18 polimer qatlamlarning yutilish spektrlari berilgan. Bu grafikdan olingan natijalarga ko'ra, D18 polimer qatlamning yutilish spektri haroratga sezilarli darajada bog'liqligini ko'rishimiz mumkin. Faqat EBQ usulida tayyorlangan qatlamda 500–600 nm oralig'ida maksimal yutilish kuzatilib, bu polimerning amorf holatdagi o'ziga xos yutilish pikini aks ettiradi. 60°C da termal qizdirilganda yutilish intensivligi pasaygan bo'lib, bu past haroratda polimer zanjirlarining tartibsizligi va fazalararo masofa ortganini ko'rsatadi. 80°C haroratda qizdirilib tayyorlangan D18 qatlamda esa yutilish sezilarli oshib, optimal intensivlikka erishilgan. Bu polimer

zanjirlarining qisman tartiblanishi, kristallanish darajasi oshishi va optimal morfologik tuzilish hosil bo'lishi bilan tushuntiriladi. 100°C haroratda qizdirilib tayyorlangan D18 qatlamda da esa yutilish intensivligi yana kamayib, hatto 60°C da termal qizdirilgandagi D18 qatlamning yutilish spektri intensivligidan ham past natija ko'rsatgan, bu natija yuqori harorat tufayli polimer zanjirlari orasidagi tartib buzilishi va ortiqcha diffuziya jarayonlari yuz bergani ehtimolini ko'rsatadi. Bu holatlar D18 polimerning PQElardagi fotovoltaiik xossalriga bevosita salbiy ta'sir ko'rsatadi[19,21].

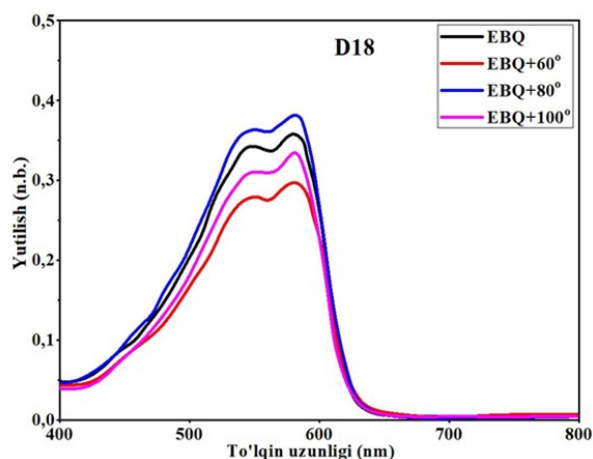


Figure 2. The absorption spectrum of the D18 polymer donor film after heating in solvent vapor and termal annealing

Rasm 2. Erituvchi bug'ida va termal qizdirilgan D18 polimer donor qatlamning yutilish spektri

Y6 akseptor polimerining yutilish spektri uning fotonlarni samarali o'zlashtirishi va ularni elektr energiyasiga aylantirish qobiliyatini yaqqol namoyon etadi. U keng diapozonli to'lqin uzunliklarda yuqori yutilish koeffitsientiga ega bo'lib, bu xususiyat uni quyosh spektrining katta qismini qamrab olishga imkon beradi. Ayniqsa, infraqizil sohaga yaqin to'lqin uzunliklarida ham sezilarli yutilish ko'rsatkichlari qayd etilishi, Y6 polimerining fotovoltaiik samaradorlikni oshirishdagi muhim ahamiyatini ko'rsatadi. Ushbu keng yutilish diapazoni va yuqori optik zichlikka ega bo'lishi tufayli Y6 akseptor polimeri samarali PQElar ishlab chiqishda asosiy material nomzodlardan biri hisoblanadi[22,24]. U nafaqat quyosh nurlaridan maksimal darajada foydalanish imkonini beradi, balki yangi avlod donor-akseptor juftliklarini yaratishda, qurilma samaradorligini oshirish va foton-elektron konversiya jarayonlarini optimallashtirishda muhim rol o'ynaydi.

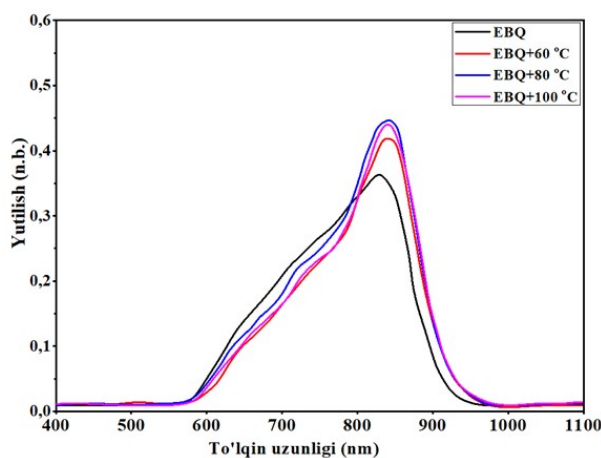


Figure 3. The absorption spectrum of the Y6 acceptor polymer after heating in solvent vapor and termal annealing

Rasm 3. Erituvchi bug'ida termal qizdirilgan Y6 akseptor polimer qatlamning yutilish spektri

3-rasmda Y6 akseptor polimerning turli haroratlarda erituvchi bugida qizdirilgandan keyingi yutilish spektri keltirilgan. Yutilish spektri 400 dan 1100 gacha bo'lgan to'liq uzunligi oraligida o'lchangan bo'lib, bu NIR (yaqin infraqizil) diapazonni ham qamrab oladi va Y6 polimerining keng spektrda yorug'likni yuta olish xususiyatini ko'rsatadi. Tahlil natijalariga ko'ra, barcha namunalar uchun yutilish maksimumi taxminan 820 – 850 oraligida kuzatildi. Bu Y6 molekulasining kuchli $\pi-\pi^*$ elektron o'tishlariga mos keladi [25]. Grafikga ko'ra, faqat EBQ usulida tayyorlangan qatlamda asosiy yutilish maksimal qiymatga yetmagan va yutilish darajasi taxminan 0.37 n.b. ga teng. Bu holatda molekulyar tartiblanish nisbatan past bo'lishi mumkin. 60° haroratda qizdirilib tayyorlangan Y6 akseptor qatlamining yutilish spektrida ozroq o'sish kuzatilgan va ushbu holatda zanjirlararo tartiblanish boshlangan. Harorat oshgan sari, ya'ni 80° va 100°C da qizdirib tayyorlangan qatlamda esa yutilish intensivligi ortib, 0.44 n.b. atrofida maksimal qiymatga erishgan, bu esa molekulalararo o'zaro ta'sirlarning kuchayganini va polimerning yaxshiroq kristallanayotganini bildiradi. Bu o'zgarishlar quyosh elementlari uchun tayyorlangan faol qatlamlarda yorug'likni samarali yutish va tashish jarayonlarini yaxshilaydi.

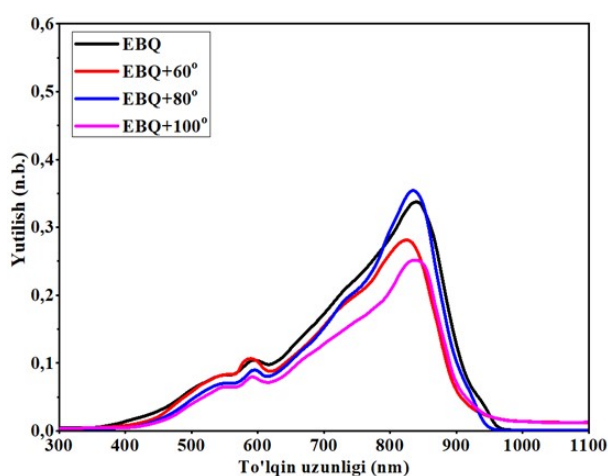


Figure 4. Absorption spectra of the D18:Y6 active layers fabricated under different conditions

Rasm 4. Turli sharoitlarda tayyorlangan D18:Y6 faol qatlamlarning yutilish spektrlari

4-rasmda D18:Y6 asosida tayyorlangan faol qatlamlarning erituvchi bug'ida va turli haroratlarda termal (60°C, 80°C va 100°C) qizdirilgandan keyingi yutilish spektrlari keltirilgan bo'lib, grafikdan D18:Y6 faol qatlamining yutilish spektri juda keng to'liq sohasida ekanligini ko'rishimiz mumkin. Eksperimental natijalar shuni ko'rsatdiki, faqat EBQ usulida tayyorlangan D18:Y6 faol qatlam namunasi yuqori yutilish ko'rsatkichlariga ega bo'lib, 820 nm to'liq uzunligi atrofida maksimal yutilish kuzatilgan. Bu holat D18:Y6 komponentlari o'rtasidagi yaxshi fazaviy ajralish va tartibli molekulyar tuzilmani ko'rsatadi. Harorat oshirilganda (60°C, 80°C, 100°C) esa namunalar o'zgarishga uchragan. Faol qatlam 60°C haroratda qizdirilganda yutilish intensivligi biroz kamaygan. Bu kamayish molekulalar o'rtasidagi tartiblanish boshlanishi, lekin hali optimal holatga yetmaganligini bildiradi. 80°C da qizdirilgan qatlamda esa eng yuqori yutilishga etilgan. Ayniqsa, 800–850nm oralig'ida yutilish maksimumi kuchli bo'lib, bu holat faol qatlamda optimal morfologiya hosil bo'lganini va komponentlar o'rtasidagi fazaviy ajralish kuchayganini anglatadi. Bu natija quyosh elementlari samaradorligini oshirish uchun aynan shu harorat optimal ekanligini ko'rsatadi. Faol qatlam 100°C haroratda qizdirilganda yutilish keskin pasaygan. Bu holat yuqori harorat ta'sirida faol qatlamning morfologiyasi buzilganini, ehtimol, komponentlar orasida agregatsiya kuchayganini yoki fazaviy ajralish yomonlashganini ko'rsatadi. Demak, D18:Y6 asosida tayyorlangan faol qatlamlar uchun erituvchi bugida 80°C da qizdirish optimal deb hisoblanadi. Aynan shu sharoitda qatlamning optik yutilish xossalari maksimal darajada namoyon bo'lgan bo'lib, bu fotovoltaiq qurilmalarda yuqori samaradorlikka erishishda muhim ahamiyat kasb etadi.

5-rasmda D18:Y6 asosida tayyorlangan faol qatlamlarning atom-kuch mikroskopi (AFM) yordamida olingan faol qatlam tasvirlari keltirilgan. Chapdagi tasvirda qizdirilmagan namuna, o'ngdagi tasvirda esa EBQ usulidan so'ng olingan namuna aks ettirilgan. Har ikkala holatda ham 2×2μm maydon bo'yicha fazaviy taqsimot ko'rsatilgan. Qizdirilmagan namunada fazaviy struktura

ancha tartibsiz bo'lib, domenlar o'zaro aniq ajralmagan, yirik va noaniq shakllar ko'zga tashlanadi. Bu holat D18 va Y6 komponentlari orasida optimal fazaviy ajralish yuz bermaganini ko'rsatadi. Natijada bunday morfologiya tashuvchi zaryadlarning samarali ajralishi va tashilishini cheklashi mumkin. EBQ usulidan keyin olingan faol qatlam tasvirida esa mikrostrukturaviy tuzilma ancha ixcham, tartiblangan va domenlar o'zaro aniq ajralgan ko'rinishga ega. Bu fazaviy ajralish va domen o'lchamlarining yaxshilanganidan dalolat beradi. Bunday morfologik optimallashtirish faol qatlamda zaryad ajralishi, tashilishi va rekombinatsiya jarayonlarini ijobiy tomonga o'zgartirib, qurilmaning fotoelektrik samaradorligini oshirishga xizmat qiladi. Yuqoridagi tadqiqotlarimizdan olingan xulosalarni tekshirish uchun turli sharoitlarda tayyorlangan D18:Y6 faol qatlam asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlari tadqiq qilindi.

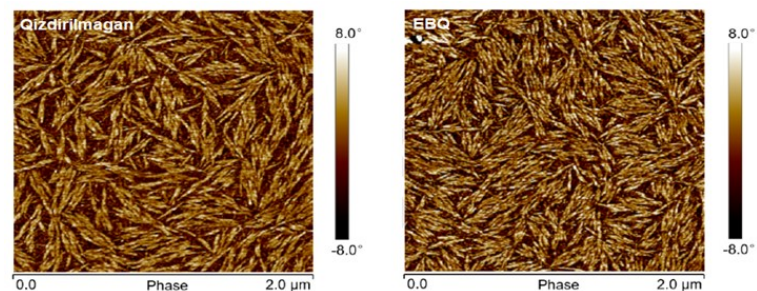


Figure 5. AFM images of freshly prepared D18:Y6 active layers and those obtained after the SVA method

Rasm 5. D18:Y6 faol qatlamlarning yangi tayyorlangan va EBQ usulidan keyin olingan AFM tasvirlari

Table 1. Photovoltaic parameters of PSCs based on D18:Y6 active layers prepared under different conditions

Jadval 1. Turli sharoitlarda tayyorlangan D18:Y6 faol qatlam asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlari

Qizdirish usuli	V_{oc} (V)	J_{sc} mA/cm ²	FF (%)	EO'S (%)
EBQ	0,84	24,55	46,4	9,6
EBQ + 60 °C	0,87	24,76	62,5	13,5
EBQ + 80 °C	0,81	25,46	76,8	15,7
EBQ+ 100 °C	0.63	23,88	44,1	6.6

1-jadvalda D18:Y6 faol qatlam asosidagi PQElari uchun har xil termik ishlov berish sharoitida olingan asosiy fotovoltaiik parametrlar – ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}), qisqa tutashuv tok zichligi (J_{sc}), to'ldirish faktori (FF) va EO'S keltirilgan. Jadvaldagi natijalardan ko'rinib turibdiki, quyosh elementlariga termal ishlov berish ularning samaradorligiga sezilarli darajada ta'sir ko'rsatadi. Dastlabki EBQ holatida quyosh elementi o'rtacha ko'rsatkichlarga ega bo'lib, EO'S 9.6% ni tashkil etadi. Boshqa namunalarga qaraganda nisbatan 46,4% past FF qiymati va EO'S ko'rsatkichlari faol qatlam strukturasi molekulyar tartibsizlik, fazalararo noto'g'ri ajralish va rekombinatsiya jarayonlarining yuqoriligidan dalolat beradi. Faol qatlam 60°C haroratda qizdirilganda EO'S ko'rsatkichlari 9.6% dan 13.5% gacha oshganligini ko'rishimiz mumkin. V_{oc} ning ortishi (0.87 V) D18:Y6 faol qatlamda kamroq energetik defektlar yoki rekombinatsiya holatlari mavjudligini anglatadi. FF ning 46.4% dan 62.5%ga ortishi esa fazaviy ajralishning optimallashtirishi va tashuvchi zarralar(alektron va teshiklar)ning samarali ajratilishi hamda tashilishi uchun qulay bo'lgan morfologik tuzilmaning shakllanishi bilan bog'liq. D18:Y6 faol qatlam 80 °C haroratda qizdirilganda EO'S maksimal qiymatga – 15.7% ga yetadi. Bunday yuqori samaradorlik aktiv qatlamda mukammal morfologiya shakllanishi bilan bog'liq. Bu sharoitda J_{sc} yuqori bo'lishini yorug'likni yaxshi yutishi va hosil bo'lgan eksitonlarning samarali ajralishi bilan izohlashimiz mumkin. FF 76.8% ga yetishi tashuvchi zarralarning kam yo'qotishlar bilan elektrodgacha yetib borishini anglatadi. Bu holatda molekulararo tartib va fazaviy ajralish optimal darajada bo'lib, D18 va Y6 fazalari orasida aniq chegaralar hosil bo'ladi – bu esa elektron va kovaklar ajralish va tashilishini osonlashtiradi. Faol qatlamni termik qizdirish 100 °C ga yetkazilganda EO'S keskin pasayib, atigi 6.6% ni tashkil etadi. V_{oc} 0.63 V gacha tushib ketgan bo'lib, bu yuqori darajadagi rekombinatsiya yoki energetik defektlar mavjudligidan dalolat beradi. FF 44.1% gacha kamayishi va J_{sc} ning ham biroz kamayishi,

aktiv qatlamda ortiqcha kristallanish yoki donor va akseptor komponentlar o'rtasidagi fazalararo uyg'unlikning buzilishi bilan bog'liq. Bunday holatlarda zaryad tashuvchilarning ajralishi va samarali tashilishi uchun zarur bo'lgan morfologik barqarorlik buziladi. Natijada zaryad tashuvchilarning harakati cheklanadi va rekombinatsiya oshadi. Demak, termal ishlav berish D18:Y6 asosidagi PQElarda fotoelektrik parametrlarni sezilarli darajada yaxshilashi mumkin. Ayniqsa, 80°C haroratda termal qizdirish D18:Y6 faol qatlamlarida optimal morfologik va strukturaviy xossalarni shakllantirib maksimal EO'S (15.7%) ni ta'minlaydi. Bu esa EO'S ni oshirish uchun termal qizdirish haroratini aniq nazorat qilish zarurligini ko'rsatadi.

Munozara

Xulosa o'rnida D18 konjugatsiyalangan polimer va Y6 fullerensiz akseptor aralashmasidan tashkil topgan faol qatlamga EBQ va termal qizdirish jarayonlarining birgalikdagi ta'siri tadqiq qilindi. Faol qatlamlarni EBQ va 80 °C da termal qizdirish, D18 va Y6 komponentlari o'rtasida optimal fazaviy ajralishni ta'minladi. Bu fazaviy ajralish donor va akseptor molekularining o'zaro tartibli joylashishini kuchaytirib, zarralarni tashuvchanligini optimallashtirishga yordam berdi. Shuningdek, faol qatlam yuzasining morfologiyasi yaxshilanib, sirt silliqdigi oshdi va nano-o'lchamdagi donor va akseptor domenlari o'rtasida samarali bog'lanish zonalari hosil bo'ldi. Bu esa foton yutilishidan keyin hosil bo'lgan eksitonlarning dissotsiatsiyasi va zaryad tashuvchilarning ajralishi jarayonlarini sezilarli darajada samaraliroq bo'lishiga olib keldi. Ushbu optimallashtirilgan morfologik va strukturaviy xossalarni natijasida qurilmada yorug'lik yutilishi, zaryad ajralishi va tashilishi optimallashti. Shuningdek, rekombinatsiya jarayonlari kamaytirilib, ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}), qisqa tutashuv tok zichligi (J_{sc}), toldirish faktori (FF) va EOS kabi asosiy fotovoltaiik parametrlar sezilarli darajada yaxshilandi.

Mualliflarning hissalari

Original matnni yozish, G. Sh.; optik parametrlarini o'lchash, N. O.; fotovoltaiik parametrlarni o'lchash, A. S.; SEM tasvirlarini o'lchash, S. R.; ma'lumotlarga kuratorlik qilish, A. S.

Authors' contribution

Writing the original text: G. Sh.; Measuring optical parameters: N. O.; Measuring photovoltaic parameters: A. S.; Measuring SEM images: S. R.; Data curation: A. S.

Moliyalashtirish

Ushbu maqoladagi olingan natijalar O'zRFA U. Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti bazaviy moliyalashtirish mablag'lari ko'magida bajarilgan.

Funding source

The results obtained in this article were carried out with the support of the basic funding of the Ion-Plasma and Laser Technologies Institute named after U. Arifov of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

Etika tamoyillariga muvofiqlik

Ushbu tadqiqotda inson yoki hayvon subyektlari ishtirok etmaganligi sababli, etik ko'rib chiqish va tasdiqlash talab etilmaydi. Shu bois, tadqiqotga nisbatan etik tasdiqlash qo'llanilmaydi.

Ethics approval

Since this study does not involve human or animal subjects, ethical review and approval is not required. Therefore, ethical approval does not apply to research.

Nashrga xabardor qilingan rozilik

Ushbu tadqiqotda inson ishtirokchilari jalb qilinmagan. Shu sababli, xabardor qilingan rozilik talab etilmaydi.

Consent for publication

Human participants were not involved in this study. For this reason, informed consent is not required.

Ma'lumotlar mavjudligi to'g'risidagi bayonot

Ushbu maqolada keltirilgan natijalarni tasdiqlovchi barcha eksperimental ma'lumotlar mualliflar tomonidan saqlanmoqda va asosiy matn hamda rasm/jadval shaklida maqola ichida taqdim etilgan. Qo'shimcha ma'lumotlar asosli so'rov asosida muallif(lar)dan olinishi mumkin.

Data Availability Statement

All experimental data confirming the results presented in this article are held by the authors and presented within the article in the form of the main text and image/table. Additional information can be obtained from the author(s) based on a reasoned query.

Rahmatnomalar

Mualliflar ushbu tadqiqotni amalga oshirishda texnik yordam ko'rsatgan va laboratoriya sharoitlarini ta'minlagan Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti hamda O'zbekiston Milliy universiteti jamoasiga minnatdorchilik bildiradilar.

Acknowledgments

The authors thank the team of the Institute of Ion-plasma and laser technologies and the National University of Uzbekistan, which provided technical assistance in the implementation of this research and provided laboratory conditions.

Manfaatlar to'qnashuvi

Mualliflar ushbu tadqiqot bo'yicha hech qanday manfaatlar to'qnashuvi yo'qligini e'lon qiladilar. Tadqiqot natijalarini taqdim etish yoki talqin qilishga ta'sir qiluvchi har qanday shaxsiy, moliyaviy yoki boshqa manfaatlar mavjud emas.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest in this study. There are no personal, financial or other interests that affect the presentation or interpretation of research results.

Qisqartmalar

PQE	Polimer quyosh elementi
EBQ	Erituvchi bug'ida qizdirish
EO'S	Energiya o'zgartirish samaradorligi
ITO	Indiy qalay oksidi
V _{oc}	Ochiq zanjir kuchlanishi
J _{sc}	Qisqa tutashuv tok zichligi
FF	To'ldirish faktori

Adabiyot

- [1] Nur-E-Alam M, Islam MS, Abedin T, Islam MA, Yap BK, Kiong TS, Das N, Rahman MR, Khandaker MU. Current Opinion in Colloid Interface Science. 2025;101895.
- [2] Xu W, Chang Y, Zhu X, Wei Z, Zhang X, Sun X, Lu K, Wei Z. Organic solar cells based on small molecule donor and polymer acceptor. Chin Chem Lett. 2022;33:123–132.
- [3] Liu Y, Li B, Ma C-Q, Huang F, Feng G, Chen Q, Luo Q. Recent progress in organic solar cells (Part I: material science). Sci China Chem. 2022;65:224–268.
- [4] Li H, Lu K, Wei Z. Polymer/small molecule/fullerene based ternary solar cells. Adv Energy Mater. 2017;7:1602540.
- [5] Tang CW. Two-layer organic photovoltaic cell. Appl Phys Lett. 1986;48:183–185.
- [6] Yu G, Gao F, Heeger AJ. Polymer photovoltaic cells: Enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions. Science. 1995;270:1789–1791.
- [7] Gasparini N, Salteo A, McCulloch I, Baran D. The role of the third component in ternary organic solar cells. Nat Rev Mater. 2019;4:229–242.
- [8] Lin Y, Wang J, Zhang ZG, Bai H, Li Y, Zhu D, Zhan X. An electron acceptor challenging fullerenes for efficient polymer solar cells. Adv Mater. 2015;27:1170–1174.
- [9] Yuan J, Zhang Y, Zhou L, Peng H, Johnson PA. Single-junction organic solar cell with over 15% efficiency using electron-deficient core. Joule. 2019;3:1140–1151.
- [10] Jeong SY, Woo HY, Wu Q, Zhang X, Yuan G, Zhang F. Layered optimization strategy enables over 17.8% efficiency. Chem Eng J. 2022;442:136368.
- [11] Gao J, Wang J, An Q, Ma X, Hu Z, Xu F. Over 16.7% efficiency of ternary organic photovoltaics by employing extra PC71BM. Sci China Chem. 2020;63:83–91.

- [12] Jiang M, Zhi H-F, Zhang. Controlling morphology and voltage loss with ternary strategy triggers efficient all-small-molecule organic solar cells. *ACS Energy Lett.* 2023;8.
- [13] Ma X, Zeng A, Gao J, Hu Z, Xu C, Son JH, Jeong SY, Zhang C, Li M, Wang K. Approaching 18% efficiency of ternary organic photovoltaics with wide bandgap polymer donor and well compatible Y6:Y6-I-O as acceptor. *Nat Sci Rev.* 2021;8:nwaa305.
- [14] Zhang S, Ma X, Niu L, Jeong SY, Woo HY, Zhou Z, Zhang F. 18.66% efficiency of polymer solar cells employing two nonfullerene acceptors with fluorine or chlorine substitution. *Sol RRL.* 2023;7:2200957.
- [15] Gao J, Ma X, Xu C, Wang X, Son JH, Jeong SY, Zhang Y, Zhang C, Wang K, Niu L. Over 17.7% efficiency ternary-blend organic solar cells with low energy-loss and good thickness-tolerance. *Chem Eng J.* 2022;428:129276.
- [16] Fan Q, Lin FR, Ma W, Jen AK-Y. Selenium-fused Y6 derivatives and their derived polymerized small molecule acceptors for efficient organic solar cells. *Sci China Chem.* 2022;66:615–619.
- [17] Wang X, Sun Q, Gao J, Ma X, Son JH, Jeong SY, Hu Z, Niu L, Woo HY, Zhang J. Ternary organic photovoltaic cells exhibiting 17.59% efficiency with two compatible Y6 derivations as acceptor. *Sol RRL.* 2021;5:2100007.
- [18] Li X, Luo S, Sun H, Sung HH-Y, Yu H, Liu T, Lu X. Medium band-gap non-fullerene acceptors based on a benzothiophene donor moiety enabling high-performance indoor organic photovoltaics. *Energy Environ Sci.* 2021;14:4555–4563.
- [19] Gao J, Yu N, Chen Z, Wei Y, Li C, Liu T, Gu X, Zhang J, Wei Z, Tang Z. Over 19.2% efficiency of organic solar cells enabled by precisely tuning the charge transfer state via donor alloy strategy. *Adv Sci.* 2022;9:2203606.
- [20] Li G, Zhu R, Yang Y. Polymer solar cells. *Nat Photonics.* 2012;6:153–161.
- [21] Pan YQ, Sun GY. Star-shaped non-fullerene small acceptors for organic solar cells. *ChemSusChem.* 2019;12:4570–4600.
- [22] Zhao CC, Wang JX, Zhao XY, Yang RQ, Tang JG. Recent advances, challenges and prospects in ternary organic solar cells. *Nanoscale.* 2021;13:2181–2208.
- [23] Armin A, Li W, Sandberg OJ, Xiao Z, Ding LM, Nelson J, Neher D, Vandewal K, Shoaee S, Wang T, et al. A history and perspective of non-fullerene electron acceptors for organic solar cells. *Adv Energy Mater.* 2021;11:2003570.
- [24] Wang G, Melkonyan FS, Facchetti A, Marks TJ. All-polymer solar cells: Recent progress, challenges, and prospects. *Angew Chem Int Ed.* 2019;58:4129–4142.
- [25] Xiong J, Jin K, Jiang Y, Qin J, Wang T, Liu J, Liu Q, Peng H, Li X, Sun A. Thiolactone copolymer donor gifts organic solar cells a 16.72% efficiency. *Sci Bull.* 2019;64:1573–1576.

Nashriyot javobgar emas/ eslatmasi:

Barcha nashrlarda keltirilgan bayonotlar, fikrlar va ma'lumotlar faqat mualliflar va ishtirokchilarga tegishlidir, na Jurnal va na muharrirlar. Jurnal va muharrirlar, mazkur kontentda keltirilgan har qanday g'oyalar, usullar, ko'rsatmalar yoki mahsulotlar natijasida insonlar yoki mulkka yetkazilgan har qanday zarar uchun javobgar emas.

Disclaimer of liability/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals. The authors and participants, and the Journal and the editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.