



UDK: 621.315.592.3

Lobar NURUMBETOVA,

U.A. Arifov nomidagi Ion plazma va Lazer texnologiyalari instituti katta ilmiy xodimi

E-mail: lobar.nurumbetova@gmail.com

Nilufar OTAQULOVA,

U.A. Arifov nomidagi Ion plazma va Lazer texnologiyalari instituti kichik ilmiy xodimi

Sanabar REYMBAEVA,

O'zbekiston Milliy universiteti o'qituvchisi

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

INVESTIGATION OF POLYMER SOLAR CELL EFFICIENCY THROUGH THE ADDITION OF A POLYMER SOLUTION TO THE PM6 DONOR

Annotation

In this study, a liquid-crystalline tetrafluorophenyl azide (PFFA) polymer was incorporated as an additive into the PM6:L8-BO donor/acceptor blend, specifically into the donor component PM6, achieving enhanced morphology and higher efficiency. This modification broadened the optical absorption spectrum of the active layer, increasing the probability of photon absorption and generating more photoinduced charge carriers (electrons and holes). The suppression of interfacial recombination processes and the improvement of charge carrier mobility led to an increase in the fill factor (FF) up to 79.4%. As a result of the improved photovoltaic parameters (J_{sc} , V_{oc} , FF) of the polymer solar cells (PSCs), the power conversion efficiency (PCE) increased from 17.7% to 18.2%.

Keywords: PSC, photoluminescence (PL), PCE, donor, acceptor, PFFA, GIWAXS.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО РАСТВОРА В ДОНОР PM6

Аннотация

В работе исследовано влияние жидкокристаллического полимера тетрафторфенил азид (PFFA) на морфологию и фотогальванические характеристики полимерных солнечных элементов (ПСЭ) на основе донорно-акцепторной системы PM6:L8-BO. Полимерная добавка вводилась в донорный компонент PM6, что обеспечило формирование более упорядоченной морфологии активного слоя. Модификация привела к расширению спектра поглощения, повышению вероятности фотонного поглощения и генерации большего числа фотоиндуцированных носителей заряда (электронов и дырок). Снижение рекомбинационных потерь на межфазных границах и увеличение подвижности носителей способствовали росту фактора заполнения (FF) до 79,4%. Совокупное улучшение параметров J_{sc} , V_{oc} и FF обеспечило увеличение коэффициента преобразования энергии (КПД) с 17,7% до 18,2%.

Ключевые слова: ПСЭ, фотолюминесценция (ФЛ), КПД, донор, акцептор, PFFA, GIWAXS.

PM6 DONORGA POLIMER ERITMASINI QO'SHISH ORQALI POLIMER QUYOSH ELEMENTLARING SAMARADORLIGINI TADQIQ QILISH

Annotatsiya

Ushbu ishda suyuq kristall xususiyatga ega tetra-ftorofenil azid (PFFA) polimeri PM6:L8-BO donor/akseptor aralashmaga qo'shimcha sifatida ya'ni donor PM6 ga qo'shildi va yaxshilangan morfologiya bilan birga yuqori samaradorlikka erishildi. Bu modifikatsiya natijasida faol qatlarning yorug'lik yutilish spektri kengayib, fotonlarning yutilish ehtimoli oshdi va ko'proq fotoinduksiya qabul qilgan zaryad tashuvchilar (elektronlar va kovaklar) hosil bo'ldi. Fazalararo chegaralarda rekombinatsiya jarayonlarining susayishi va zaryad tashuvchilarning harakatchanligining ortishi tufayli to'ldirish faktori (FF) 79,4% gacha ko'tarildi. Polimer quyosh elementlari (PQE)ning fotovoltaiik parametrlari (J_{sc} , V_{oc} , FF) yaxshilangani natijasida energiya o'zgartirish samaradorligi (EO'S) 17,7% dan 18,2% ga oshdi.

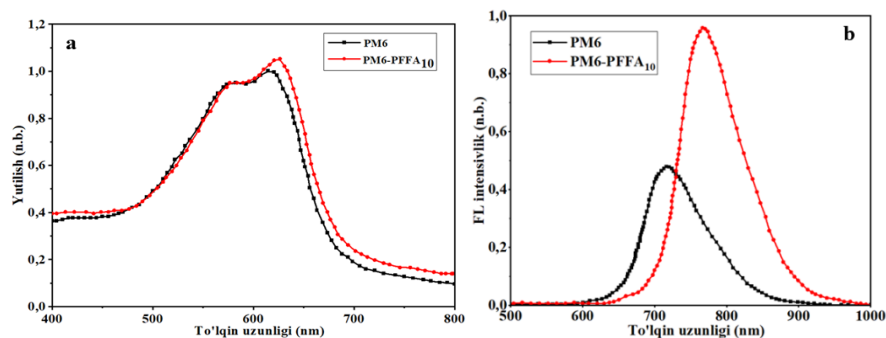
Kalit so'zlar: PQE, Fotolyuminessensiya (FL), EO'S, donor, akseptor, PFFA, GIWAXS.

Kirish. PQElar quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish imkoniyatlarini taqdim etuvchi istiqbolli texnologiyalardan biri bo'lib, ularning arzonligi, yengilligi kabi xususiyatlari sababli e'tiborga loyiqdir. Hozirgi kunda PQElar sohasida EO'S qiymati 19 % natijaga erishildi[1-4]. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari orasida PQElar qiziqarli xossalarga ega, masalan, ular xona haroratida eritmani qayta ishlash orqali ishlab chiqarilish mumkin bo'lgan, yupqa va mexanik moslashuvchan, yengil quyosh elementlari bo'lishi tufayli olimlar tomonidan katta qiziqish uyg'otgan[5,6]. Shu sababli, dunyo olimlari xona haroratida eritma bilan donor-akseptorni aralashtirib faol qatlam eritmasini tayyorlash orqali hajmiy geterostrukturali PQE larni ishlab chiqish, optimal donar-akseptor materiallarni sintez qilish, ularning barqarorligi va samaradorligini oshirish borasida tadqiqot ishlari olib bormoqda. Misol uchun, Xiangyu Shen va hamkasblari tomonidan yuqori qaynash haroratli erituvchilarda PQE samaradorligini oshirish uchun yangi fullerensiz akseptor L8BO-2O sintez qilindi[7]. L8BO-2O molekulasida alkoksi yon zanjirlar orqali PM6:Y6 tizimida molekulararo agregatsiyani kamaytirib, donor va akseptorlarning o'zaro aralashuvini yaxshiladi hamda optimal fazaviy ajralishni ta'minladi. 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[8]. Ushbu ishda faol qatlam morfologiyasini yaxshilash, fazaviy ajralish kinetikasini optimallashtirish hamda zaryad tashuvchilar dinamikasini yaxshilash maqsadida fazaviy ajralishni nazorat qila oluvchi suyuq polimer qo'shimchalaridan foydalanildi.

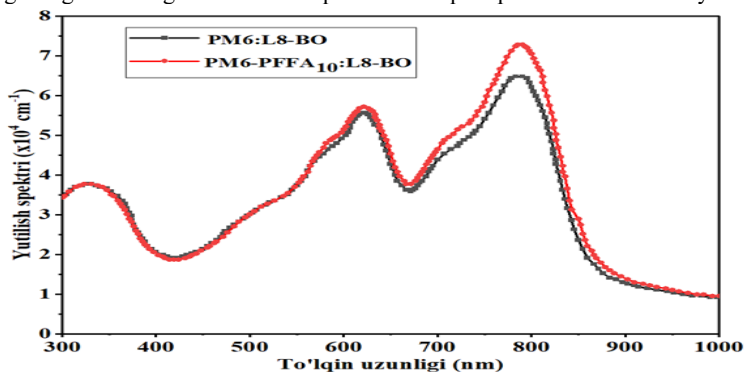
Tadqiqot usullari. PQElarni tayyorlashda qo'shimcha komponent sifatida tetra-ftorofenil azid bilan modifikatsiyalangan polibutadien (PFFA) asosidagi suyuq polimerdan foydalanildi. Mazkur polimer izolyatsion qo'shimcha vazifasini bajarib, PM6:L8-BO yupqa qatlamining morfologiyasini tartibga soladi, donor va akseptor komponentlarning barqaror domenlar hosil qilishini qo'llab-quvvatlaydi hamda qurilmaning yuqori samaradorligini saqlab qolishga yordam beradi[9]. Optimal aralashma tarkibini aniqlash maqsadida PM6 donor qatlamiga 10%, 20% va 30% miqdorda PFFA qo'shimchasi qo'shilib tadqiqotlar olib borildi. 10% PFFA qo'shimchasi qo'shilganda PM6 donorning optik va elektr xususiyatlari (masalan, nur yutish, zaryad tashish samaradorligi) eng yaxshi balansda bo'ldi. Bu optimal konsentratsiya donor materialning tuzilishi va fazaviy ajralishiga ta'sir ko'rsatib morfologiyasini yaxshiladi. 10% PFFA qo'shish donor-akseptor interfeysini va donor fazasining mikrostrukturasi yaxshiladi. Bu zaryad tashish va o'tish samaradorligini oshiradi, ya'ni fotovoltaiik qurilmaning umumiy samaradorligini oshiradi. 20% va 30% PFFA qo'shilganda esa PFFA molekullari optimaldan oshib ketganligi sababli, donor materialning kristallik darajasi pasayishiga hamda zaryad tashish yo'llarining buzilishiga olib keladi[8]. Bu esa elektr xususiyatlarining yomonlashishiga sabab bo'lib, qurilmaning samaradorligini kamaytiradi. Qisqacha xulosa qiladigan bo'lsak 10% PFFA qo'shilishi PM6 donor materialining mikrostrukturasi va elektr-optik xususiyatlarini optimal darajada yaxshilaydi. Shu bilan birga, yuqori miqdorda PFFA (20%, 30%) qo'shilishi materialning strukturaviy va funksional sifatlariga zarar yetkazishi mumkin, shuning uchun 10% qo'shish eng optimal hisoblanadi.

Natijalar va muhokama. 1a-rasmda PM6 va PM6:PFFA₁₀ yupqa qatlamlarining yutilish spektrlari ko'rsatilgan. PM6:PFFA₁₀ yupqa qatlami PM6 qatlamiga nisbatan butun spektr oralig'ida kuchliroq yutilishga ega. Bu shuni anglatadiki, PFFA qo'shilishi bilan optik yutilish yaxshilanadi va bu quyosh nuri spektrining ko'proq qismini yutishga yordam beradi. Har ikki qatlam 450–750 nm oralig'ida kuchli yutilishga ega. PM6:PFFA₁₀ spektri ozgina kengaygan, ayniqsa 700–750 nm oralig'ida, bu esa past energiyali fotonlarni ham samarali yutishini ko'rsatadi. Ikkala qatlamda ham yutilish piklari o'xshash joyda joylashgan (~610–620 nm), bu PM6 asosiy donor materiali sifatida o'z strukturaviy xususiyatlarini saqlab qolayotganini bildiradi. Ammo PM6:PFFA₁₀ qatlamida bu pik balandroq, bu yutilish ko'rsatkichining oshganligidan dalolat beradi. Yutilishning oshishiga sabab esa PFFA qo'shilishi tufayli materialda yaxshiroq fazaviy ajralish va yaxshiroq molekullararo tartiblanish yuzaga kelganligi deb aytish mumkin[11-15]. PM6:PFFA₁₀ qatlamining yutilish spektri PM6 ga nisbatan kuchliroq va kengroq, bu esa quyosh elementlari samaradorligini oshirishga yordam beradi. Bu qo'shilgan PFFA modifikatori optik xususiyatlarni yaxshilashda muhim rol o'ynaganini ko'rsatadi.



1-rasm. a) PM6 va PM6:PFFA₁₀ yupqa qatlamlarining yutilish va b) FL spektri.

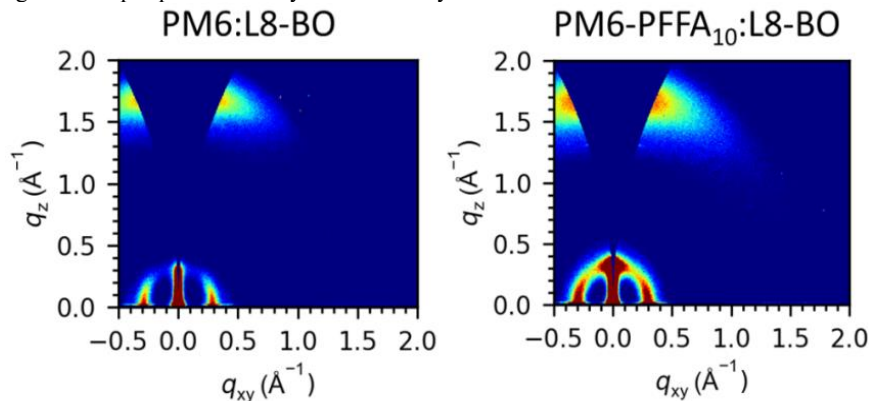
1b-rasmda PM6 va PM6:PFFA₁₀ qatlamlarining fotoluminetsensiya (FL) spektrlari ko'rsatilgan. Grafikdan ko'rish mumkinki, PM6:PFFA₁₀ qatlamining FL intensivligi PM6 qatlamining FL intensivligidan yuqoriroq. Bu shuni anglatadiki, PFFA donor materialida molekulyar tartiblanishni yaxshilashi, fazaviy ajralishni optimallashtirib defektlarni kamaytirganligi sababli eksiton rekombinatsiyasini kuchaytirgan hamda energiya yo'qotilishi kamaygan. PM6 qatlamning yutilish piki maksimumi taxminan 715–720 nm da, PM6:PFFA₁₀ qatlamning yutilish piki maksimumi taxminan 760 nm da bo'lib biroz qizil tomonga siljigan. Bu PFFA molekullarining PM6 bilan o'zaro ta'siri natijasida PM6ning elektron tuzilmasida o'zgarishlar bo'lganini bildiradi. Bu holat π - π bog'lanishning kuchayishi, donor molekullarning strukturaviy o'zgarishi hamda fazaviy ajralish darajasining o'zgarishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. PM6:PFFA₁₀ qatlamida FL intensivligi yuqoriroq bunga sabab rekombinatsiya samaradorligi oshgan bu o'zgarishlar PFFA qo'shilishi orqali optoelektron xossalari yaxshilanganini ko'rsatadi.



2-rasm. PM6:L8-BO va PM6:PFFA₁₀:L8-BO faol qatlamlarning yutilish spektri.

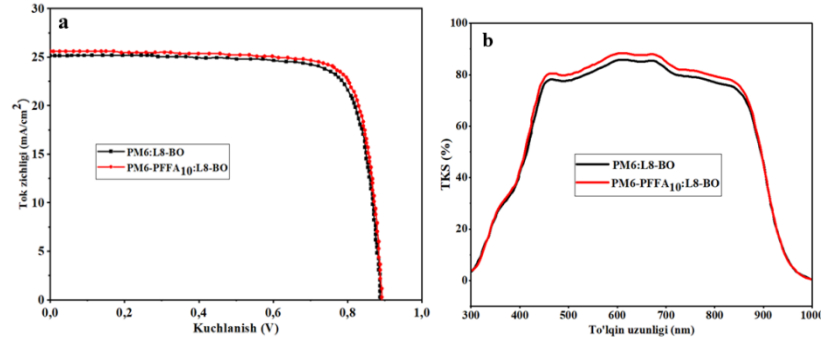
2-rasmda PM6:L8-BO va PM6-PFFA₁₀:L8-BO faol qatlamlarining yutilish spektri ko'rsatilgan bo'lib, ikkala qatlamning ham yutilish spektri o'xshash spektral shaklga ega, bu ularning bir xil asosiy komponentlardan (PM6 va L8-BO) iborat ekanini ko'rsatadi. PM6-PFFA₁₀:L8-BO qatlamining yutilish intensivligi PM6:L8-BO ga qaraganda deyarli barcha to'liq uzunliklarida bir oz yuqori. Ayniqsa 700–850 nm oralig'ida sezilarli farq bor, bu PFFA₁₀ modifikatsiyasi spektral yutilishni yaxshilaganini ko'rsatadi. PFFA₁₀ qo'shilishi faol qatlamdagi fazoviy tartiblanishni yaxshilash bilan birga molekulararo o'zaro ta'sirlarni kuchaytirishi sababli yutilish oshganligini natijada tashuvchilarning ajralishi va tashilishi samaraliroq bo'ladi. PM6-PFFA₁₀:L8-BO aralashmasi, oddiy PM6:L8-BO ga qaraganda yorug'likni kuchliroq yutadi, ayniqsa 700–850 nm oralig'ida. Bu o'zgarish PFFA₁₀ qo'shimchasi tufayli yuzaga kelib, materialning optik va elektron xossalari yaxshilagan. Bu esa quyosh elementi samaradorligini oshirish uchun xizmat qiladi [16-18].

3-rasmda PM6:L8-BO va PM6-PFFA₁₀:L8-BO PQElarning GIWAXS tasvirlari keltirilgan. Bu GIWAXS tasvirlari PM6:L8-BO va PM6-PFFA₁₀:L8-BO faol qatlamlarining nanostrukturaviy tartibini ko'rsatadi. PM6:L8-BO faol qatlamning GIWAXS tasvirida q_z yo'nalishida (vertikal) dastlabki diffuziya signali mavjud, bu lamellar (qatlamli) tartiblanishni ko'rsatadi. q_{xy} yo'nalishida (gorizontal) esa kamroq diffuziya mavjud, bu faqat bitta ustun tartiblanish yo'nalishi borligini bildiradi. PM6-PFFA₁₀:L8-BO faol qatlamning GIWAXS tasviriga qarasa q_z va q_{xy} yo'nalishlarida ham kuchliroq va kengroq diffuziya signallari mavjud. Bu kuchli signallar ko'proq kristallik va yaxshi molekulyar tartiblanishni bildiradi.



3-rasm. PM6:L8-BO va PM6-PFFA₁₀:L8-BO PQElarning GIWAXS tasvirlari.

Ayniqsa q_z bo'yicha ko'rsatilgan kuchli signal “face-on” orientatsiyani, ya'ni molekularning taglik yuzasida tartiblanishini ko'rsatadi, bu eksiton hosil bo'lishi va tashilishi uchun qulay. PFFA₁₀ qo'shilishi PM6:L8-BO aralashmaning molekulyar tuzilishini yaxshilagan va kristal strukturani tartiblagan bu esa qurilma samaradorligining yuqori bo'lishiga xizmat qiladi.



4-rasm. a) PM6:L8-BO va PM6-PFFA₁₀:L8-BO faol qatlam asosidagi PQElarning volt-ampere xarakteristikasi va b) tashqi kvant samaradorligi spektrlari.

4a-rasmda PM6:L8-BO va PM6-PFFA₁₀:L8-BO asosidagi PQElarning volt-ampere xarakteristikasi grafigi ko'rsatilgan. Grafikdan ko'rish mumkinki, FF yuzasi ikkala holda ham deyarli bir xil. Bunda FF qiymatlari mos ravishda 78,6 va 79,4 ga teng. FF parametri asosan faol qatlamning sifatini belgilab beradi, faol qatlam qanchalik kub fazaga yaqin bo'lsa va iloji boricha nuqsonlarsiz optimal qalinlikka ega bo'lsa FF parametrlar ham yuqori qiymatga erishadi. Bu grafikdan xulosa qilib shuni aytish mumkinki, PM6-PFFA₁₀:L8-BO faol qatlam asosidagi PQElarda yorug'lik yutilishi yaxshilangan, yuqoriroq ochiq zanjir kuchlanishiga erishgan hamda to'liq samaradorlik ortgan. Bu o'zgarishlar PFFA₁₀ qo'shilishi natijasida molekulyar tartib, fazaviy ajralish hamda energetik darajalar muvofiqligining yaxshilanishi bilan bog'liq bo'ladi [19, 20].

1-jadval. PM6:L8-BO va PM6-PFFA₁₀:L8-BO faol qatlamlar asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlari

Faol qatlam	Jsc, (mA/cm ²)	Voc, (V)	FF, (%)	EO'S, (%)
PM6:L8-BO	25,3	0,889	78,6	17,7
PM6-PFFA ₁₀ :L8-BO	25,7	0,891	79,4	18,2

1-jadvalda PM6:L8-BO va PM6-PFFA₁₀:L8-BO asosidagi PQElarning asosiy fotovoltaiik parametrlari keltirilgan. Bu yerda PFFA₁₀ 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-PFFA₁₀:L8-BO faol qatlamlar asosidagi PQElar uchun mos ravishda 25,3 mA/cm² va 25,7 mA/cm² qiymatda bo'lib, bir oz o'sish ko'rsatdi. Ochik zanjir kuchlanishi (V_{oc}) PM6:L8-BO va PM6-PFFA₁₀:L8-

BO faol qatlamlar asosidagi PQElari uchun mos ravishda 0,889 V va 0,891 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 79,4% bo'lib, bir oz oshdi. Har uchala parametrdagi o'sish umumiy samaradorlikni ~1% ga oshirgan.

4b-rasmda PM6:L8-BO va PM6-PFFA₁₀:L8-BO faol qatlam asosidagi PQElarning tashqi kvant samaradorligi spektrlari keltirilgan. PM6-PFFA₁₀:L8-BO faol qatlam asosidagi PQElarning TKS spektri PM6:L8-BO faol qatlam asosidagi PQElarning TKS spektridan butun diapazon bo'ylab biroz yuqori qiymatga ega. PM6-PFFA₁₀:L8-BO faol qatlam asosidagi PQElarning TKS qiymati 450–850 nm oralig'ida yuqori, bunga sabab yorug'lik yutilish samaradorligi shu soxada oshgan, zaryad ajralishi va tashilishi yaxshilangan, rekombinatsiya esa kamaygan. Bu natijalar esa volt-amper xarakteristikasi grafigi va yutulish spektri natijalari to'liq mos keladi.

Xulosa. Tadqiqotda PM6:L8-BO asosidagi PQElarga suyuq kristall xususiyatga ega tetra-ftorofenil azid bilan modifikatsiyalangan polibutadien (PFFA) qo'shimchasi kiritildi. Optimal 10% PFFA qo'shilishi faol qatlamning morfologiyasini tartibga solib, π - π bog'lanishni kuchaytirdi, yorug'lik yutilish spektrini kengaytirdi hamda zaryad tashish samaradorligini oshirdi. Natijada J_{sc}, Voc va FF kabi fotovoltaiq parametrlar yaxshilanib, umumiy samaradorlik 17,7% dan 18,2% gacha ko'tarildi. Yuqori miqdordagi PFFA (20–30%) esa kristallik darajani pasaytirib, samaradorlikni kamaytirdi. Optimal darajada kiritilgan PFFA polimerlarga xos fazaviy ajralishni boshqarib, qurilmaning optik va elektr xossalari birgalikda yaxshilashi isbotlandi.

Moliyalashtirish

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

ADABIYOTLAR

1. M. Nur-E-Alam, M.S. Islam, T. Abedin, M.A. Islam, B.K. Yap, T.S. Kiong, Current Opinion in Colloid Interface Science, (2025) 101895.
2. P.V. Kamat, in, ACS Publications, 2025, pp. 896-897.
3. L.A. Castriotta, F. De Rossi, M. Bonomo, ACS Energy Letters, 10 (2025) 283.
4. H. Zhu, B. Shao, Z. Shen, S. You, J. Yin, N. Wehbe, L. Wang, X. Song, M. Abulikemu, A. Basaheeh, Nature Photonics, 19 (2025) 28-35.
5. G. G. Njema, J.K. Kibet, S.M. Ngari, Next Energy, 6 (2025) 100182.
6. J. Chen, X. Wang, T. Wang, J. Li, H.Y. Chia, H. Liang, S. Xi, S. Liu, X. Guo, R. Guo, Nature Energy, 10 (2025) 181-190.
7. X. Sun, X. Ding, F. Wang, et al., "Binary Organic Solar Cells With >19.6% Efficiency" ACS Energy Letters 9 (2024): 4209–4217.
8. Q. Fan, Q. Xiao, H. Zhang, et al., "Highly Efficient and Stable ITO-Free Bulk Heterojunction," Advanced Materials 36, no. 3 (2024): 2307920.
9. J. W. Lee, H. G. Lee, E. S. Oh, et al., "Rigid- and Soft-Block-Copolymerized Conjugated Polymers" Joule 8, no. 1 (2024): 204–223.
10. L. Tian, C. Liu, and F. Huang, "Recent Progress in Side Chain Engineering of Y-Series Non-Fullerene Molecule and Polymer Acceptors," 34, no. 31 (2022).
11. 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.
12. S. Chu and A. Majumdar, "Opportunities and Challenges for a Sustainable Energy Future," Nature 488, no. 7411 (2012): 294–303.
13. Z. Chen, J. Zhu, D. Yang, et al., "Isomerization Strategy on a Non-Fullerene" Energy & Environmental Science 16, no. 7 (2023): 3119–3127.
14. Q. Zhu, J. Xue, H. Zhao, et al., "Highly Efficient Organic Solar Cells With Acceptor Content," Journal of Materials Chemistry A 10, no. 15 (2022): 8293–8302.
15. D. J. Lipomi, B. C. K. Tee, M. Vosgueritchian, and Z. Bao, "Stretchable Organic Solar Cells," Advanced Materials 15, no. 15 (2011): 1771–1775.
16. Z. Wang, D. Zhang, M. Xu, et al., "Intrinsically Stretchable Organic Solar Cells With Simultaneously" Small 18, no. 26 (2022): 2201589.
17. J. Qiu, Q. Zhou, M. Yu, et al., "Modulating CsPbI₃," SusMat 3, no. 6 (2023): 894.
18. Z. Peng, K. Xian, Y. Cui, et al., "Thermoplastic Elastomer Tunes Phase Structure" Advanced Materials 33, no. 49 (2021): 2106732.
19. 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.
20. 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.