

Saparbayev Aziz Adamovich
Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, katta ilmiy xodim
tel: +998887801441, email: saparbaevaziz83@gmail.com

UDK 621.315.592.3

Y6-SERIYALI FULLEREN BO'LMAGAN AKSEPTORLAR VA ULAR ASOSIDAGI FAOL QATLAMLARNING OPTIK XOSSALARI

Anotatsiya: Y6-seriyali fulleren bo'lmagan akseptorlar va ular asosidagi faol qatlamlar optik xossalari bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar ko'plab qiziqarli natijalarni ko'rsatmoqda. Ushbu maqolada Y6-seriyali fulleren bo'lmagan akseptorlar yordamida hosil qilingan eritma hamda faol qatlamlarning (ya'ni Y-ChC5 Y-C5Ch) optik xossalari va fotovoltaik parametrlari tahlil qilindi. Optik xossalari bo'yicha olingan natijalarga ko'ra, Y-ChC5 akseptor Y6 va Y-C5Ch akseptorlarga qaraganda barcha parametrlarda optimal ekanligi aniqlandi.

Kalit so'zlar: Fullerensiz akseptor, faol qatlam, Y6 akseptor, PQE, EO'S.

Сапарбаев Азиз Адамович
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий,
старший научный сотрудник
тел: +998887801441, email: saparbaevaziz83@gmail.com

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕФУЛЛЕРЕНОВЫХ АКЦЕПТОРОВ СЕРИИ Y6 И АКТИВНЫХ СЛОЕВ НА ИХ ОСНОВЕ

Аннотация: Исследования оптических свойств акцепторов серии Y6 без фуллеренов и активных слоев на их основе показывают множество интересных результатов. В данной статье проанализированы оптические свойства и фотовольтаические параметры растворов и активных слоев, сформированных с использованием акцепторов серии Y6 без фуллеренов (а именно Y-ChC5 и Y-C5Ch). Согласно полученным результатам по оптическим свойствам, установлено, что акцептор Y-ChC5 является оптимальным по всем

параметрам по сравнению с акцепторами Y6 и Y-C5Ch.

Ключевые слова: Нефуллереновый акцептор, активный слой, акцептор Y6, ПСЭ, ЭПЭ.

Saparbaev Aziz Adamovich

Institute of ion-plasma and laser technologies, senior researcher

Phone: +998887801441, email: saparbaevaziz83@gmail.com

OPTICAL PROPERTIES OF Y6-SERIES NON-FULLERENE ACCEPTORS AND ACTIVE LAYERS BASED ON THEM

Abstract: Research on the optical properties of Y6-series non-fullerene acceptors and the active layers based on them show many interesting results. In this article, the optical properties and photovoltaic parameters of the solution and active layers formed using Y6-series non-fullerene acceptors (specifically, Y-ChC5 and Y-C5Ch) were analyzed. According to the results obtained regarding optical properties, it was found that the Y-ChC5 acceptor is optimal in all parameters compared to the Y6 and Y-C5Ch acceptors.

Key words: Non-fullerene acceptor, active layer, Y6 acceptor, PSC, PCE.

Kirish.

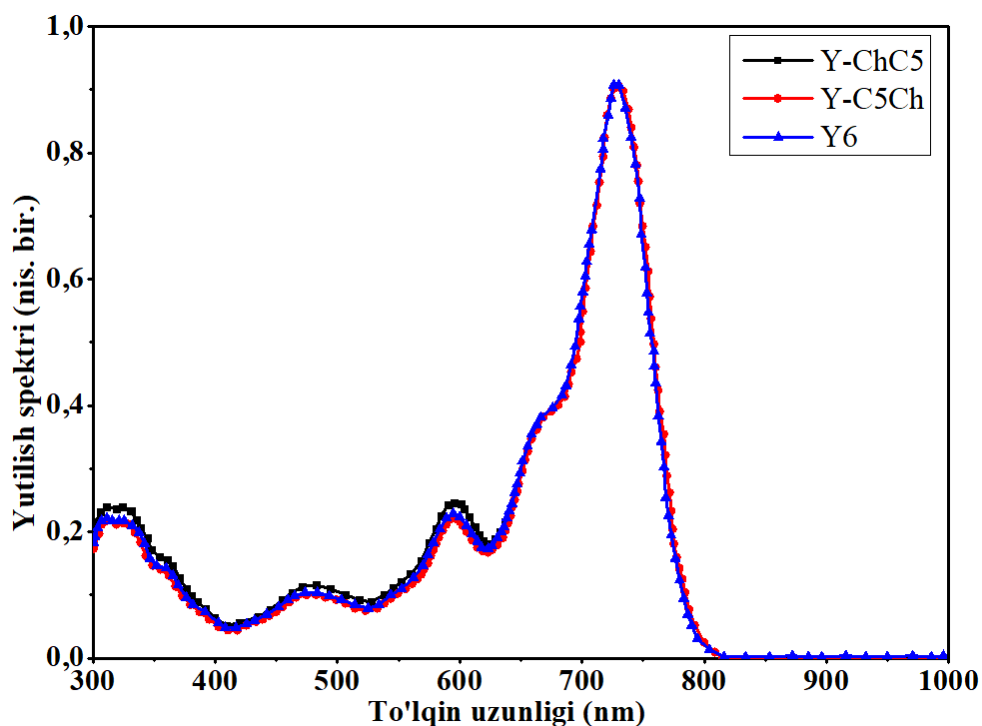
Polimer quyosh elementlari (PQE) quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish imkoniyatlarini taqdim etuvchi istiqbolli texnologiyalardan biri bo'lib, ularning arzonligi, yengilligi kabi xususiyatlari sababli e'tiborga loyiqdir. Hozirgi kunda PQE lar sohasida energiya o'zgartirish samaradorligi (EO'S) qiymati 19 % li natijaga erishildi[1]. 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. Shu sababli, dunyo olimlari xona haroratida eritma bilan donor-akseptorni aralashtirib faol qatlamni sintez qilish orqali hajmiy geterostrukturali PQE larni ishlab chiqish, optimal donar-akseptor materiallarni sintez qilish, ularning

degradatsiyasi, barqarorligi va samaradorligini oshirish borasida tadqiqot ishlarini olib borilmoqda. So‘nggi yillarda PQElar sohasida Y6-seriyali fullerensiz akseptorlar keng qo‘llanila boshlandi. Ularning yuqori EO’S sababli PQElar sohasida katta yutuqlarga erishilmoqda. Y6 akseptori asosan nur yutish va elektronlarni samarali uzatish xususiyatlariga ega bo‘lgan yuqori samarali fullerensiz strukturaga ega. Y6 va uning turli hosilalarini molekulyar tuzilishini o‘zgartirish orqali fotovoltaik samaradorligini oshirish mumkin. Y6 akseptori o‘zining keng spektrda nur yutish xususiyatiga ega bo‘lgan molekulalar toifasiga kiradi. Ayniqsa, Y6 qizil va yaqin infraqizil diapazonda juda samarali nur yutadi, bu esa fotonlarni elektr energiyasiga aylantirish jarayonida katta foyda beradi. Y6 o‘zining simmetrik tuzilishi bilan ajralib turadi va u kuchli elektron qabul qiluvchi xususiyatlarga ega. Bunday akseptorlar PQElar sohasidagi tadqiqotlarda keng ko‘lamda ishlatilmoqda va bu material asosidagi PQElar 18-19% darajadagi samaradorlikni ko‘rsatgan[2].

Bu ishda Y6 polimerining strukturasi modifikatsiya qilib olingan yangi akseptor polimerlarning optik xossalari tadqiq qilindi. Ushbu faol qatlamlar nur yutish spektrining kengayishi va elektron tashuvchilarning yuqori samaradorligi bilan tavsiflanadi. Y6 akseptoridan farqli ravishda, uning hosilalari bo‘lgan Y-C5CH va Y-ChC5 molekulalari elektron uzatishni yaxshilash va donordan akseptorga energiyani samarali yetkazish uchun ishlatiladi. Shuningdek, bu hosilalarning optik xossalari fotonlar bilan o‘zaro ta’sirni kuchaytirish uchun mo‘ljallangan, bu esa PQE samaradorligini oshiradi[3].

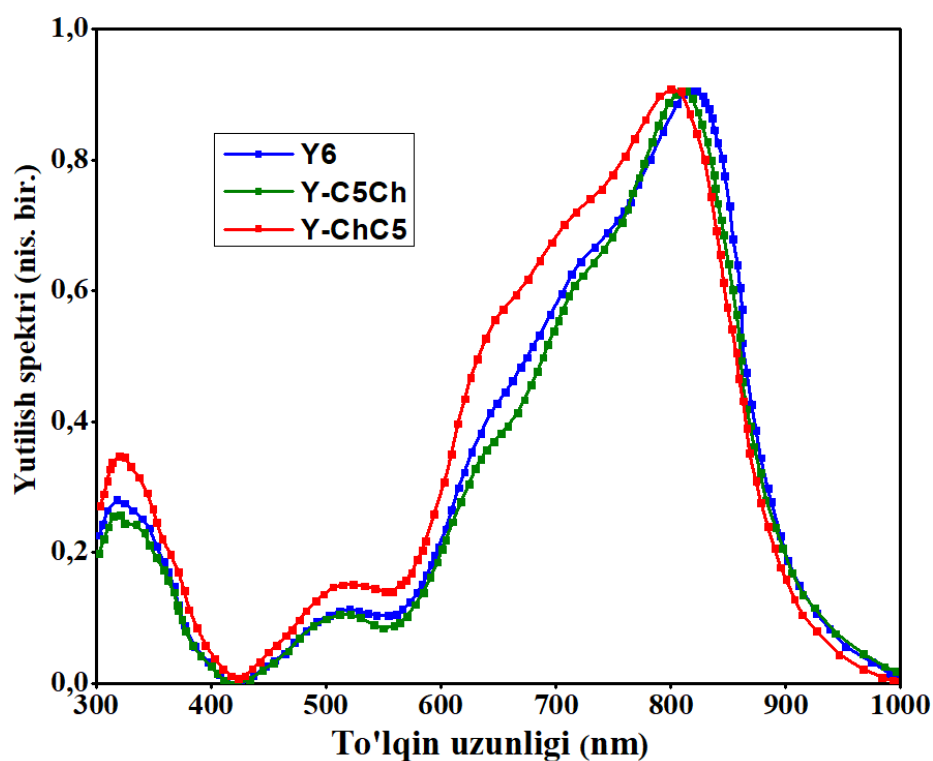
Natija va muhokamalar.

Biz dastlab Y-6, Y-C5Ch va Y-ChC5 akseptorlarning eritma va yupqa qatlam shaklidagi namunalarini 300-1000 nm oralig‘ida yutilish spektrlarini o‘lchadik.



1-rasm. Y6, Y-C5Ch va Y-ChC5 eritmalarining yutilish spektrlari

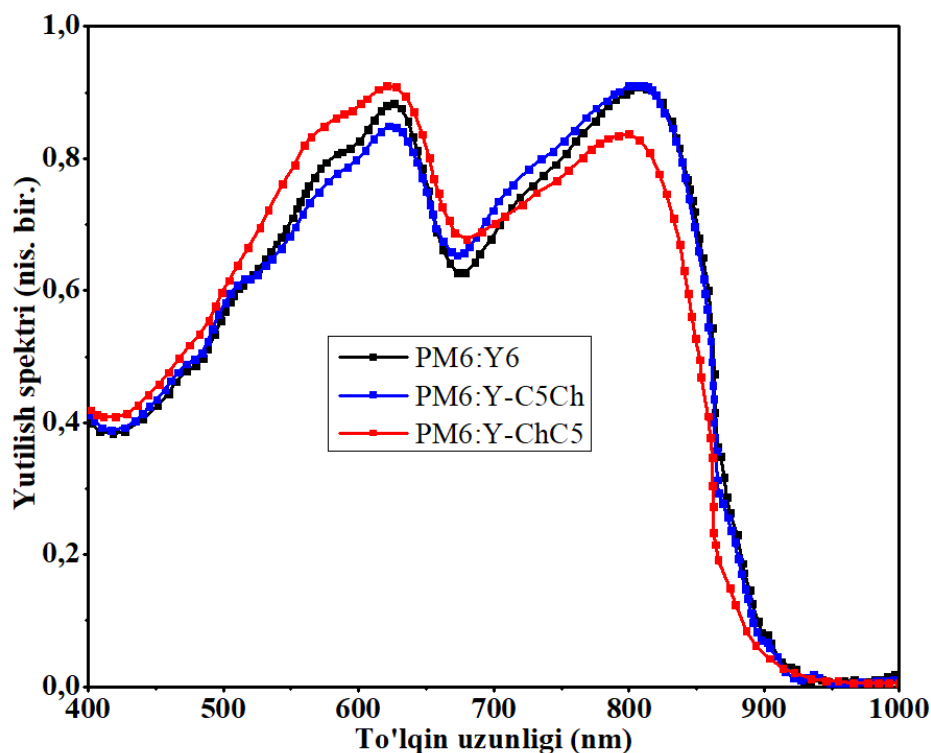
1-rasmida Y6, Y-C5Ch va Y-ChC5 eritmalarining yutilish spektrlari keltirilgan va yutilish spektri sohasi 800 nm dan boshlanishini ko‘rish mumkin. Asosiy yutilish spektr sohasi esa 550 nm dan 800 nm ga bo‘lgan oraliqda va asosiy yutilish piki 725 nm to‘lqin uzunligiga to‘g‘ri keladi. Demak Y6, Y-C5Ch va Y-ChC5 eritmaları mana shu maksimum piklarni hosil qiluvchi to‘lqin uzunliklarda yorug‘likni yaxshi yutishini ko‘rishimiz mumkin. Y6, Y-C5Ch va Y-ChC5 eritmalarining yutilish spektr shakllarining bir xilligini ularning bir xil konjugatsiyalangan asosiy strukturalari tufayli deb aytishimiz mumkin (Konjugatsiyalangan polimerlar organik makromolekulalar bo‘lib, ular o‘zgaruvchan ikki va bitta bog‘larning magistral ya’ni tarmoqlangan zanjiri bilan tavsiflanadi)[4].



2-rasm. Y6, Y-C5Ch va Y-ChC5 faol qatlamlarining yutilish spektrlari

2-rasmda Y-ChC5 Y6 va Y-C5Ch faol qatlamlarining yutilish spektri grafigi berilgan bo'lib, yutilish spektri 430 nm dan deyarli 950 nm to'lqin uzunligi sohasida yorug'lik nurini yutishini ko'rishimiz mumkin. Yutilish grafigida Y6 qatlamning asosiy yutilish piki 822 nm to'lqin uzunligida, Y-C5Ch qatlamning yutilish piki 810 nm to'lqin uzunligida va Y-ChC5 qatlamning yutilish piki 800 nm to'lqin uzunligida kuzatildi. Shu bilan birga 320 nm hamda 510 nm to'lqin uzunliklarida ham kichikroq yutilish piklari mavjud. Grafikdan ko'rishimiz mumkinki, Y-ChC5 akseptor Y6 va Y-C5Ch akseptorlarga nisbatan kengroq yutilish spektriga va biroz katta optik ta'qiqlangan soha kengliklariga ega. Bu farq sterik to'siq ta'siri natijasida molekula ichidagi va molekulalararo o'zaro ta'sirlarning o'zgarishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Shu bilan birga yupqa qatlamlarda molekulalar ko'pincha bir-biriga yaqinroq joylashadi, bu agregatsiyaga olib kelishi mumkin. Bu agregatsiya molekulalararo o'zaro ta'sirlarni, masalan, konjugatsiyalangan tizimlarda $\pi-\pi$ ta'sirni keltirib chiqaradi, bu esa molekulalarning energiya darajasini o'zgartiradi va yutilish to'lqin uzunligini o'zgartiradi (agar u uzoqroq to'lqin uzunliklariga o'tsa, ko'pincha qizil siljish deb ataladi). Undan tashqari yupqa qatlamni o'rab turgan muhit eritma bilan

solishtirganda boshqacha sindirish ko'rsatgichiga ega, va bu to'lqin uzunligining oshishiga yutilish sohasining kengayishiga olib keladi[5]. Bu omillar birlashib, yupqa qatlamning va eritmaning yutilish to'lqin uzunliklari UV spektrida har xil bo'lishiga olib keladi. Yupqa qatlamning yutilish spektrida yutilish boshlanishi qizil to'lqin uzunligi tomonga siljigan, bu siljish yupqa qatlamning eritmaga nisbatan kuchliroq kristallanish va agregatsiyalanish xususiyatiga ega ekanligini bildiradi[6].

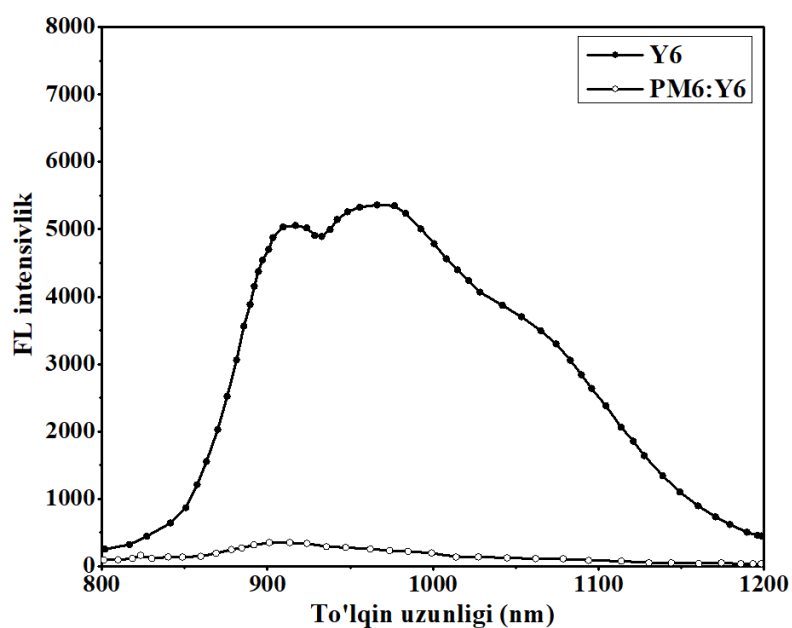


3-rasm. PM6:Y6, PM6:Y-C5Ch va PM6:Y-ChC5 faol qatlamlarining yutilish spektrlari

3-rasmida PM6:Y6, PM6:Y-C5Ch va PM6:Y-ChC5 faol qatlamlarining yutilish spektrlari ko'rsatilgan. Ularning yutilish spektrlariga qaraydigan bo'lsak donor PM6 ning yorug'likni yutish sohasi 400 nm dan 680 nm gacha va Y6, Y-ChC5 va Y-C5Ch akseptorlarning yorug'likni yutish sohasi 680 nm dan 900 nm gacha ekanligini ko'rishimiz mumkin. PM6:Y6 qatlami 600-900 nm oralig'ida yuqori yutilish ko'rsatkichini ko'rsatmoqda. Grafikni taxlil qiladigan bolsak PM6:Y6 va PM6:Y-C5Ch qatlamlarining yutilish spektri va yutilish sohasi deyarli bir xil va 680 nm dan 900 nm to'lqin uzunligi sohasida joylashgan Y6 hamda Y-C5Ch qatlamlarning FL intensivligi 400 nm dan 680 nm gacha to'lqin uzunligi sohasida

joylashgan PM6 donor qatlamlarning FL intensivligidan yuqoriroq ekanligini ko'rishimiz mumkin.

Shu bilan birga PM6:Y-ChC5 qatlamining yutilish spektri va yutilish sohasi qisqa to'lqin uzunligi tomon biroz siljiganini ko'rishimiz mumkin. Bunda maksimum piklar 600nm va 800 nm tolqin uzunligi sohasida kuzatildi. Yutilish spektrining bunday qisqa to'lqin uzunligi tomon siljishi spektroskopiyada - "Gipsoxrom" deb ataladi. Gipsoxrom deb - yutilish spektrining yuqori energiyaga yoki qisqaroq to'lqin uzunligiga siljishi aytiladi. Bu albatta konjugatsiyalangan polimer materiallarining π - π^* o'tishlari hamda bog'lanish darajalari bilan bog'liq. Demak bu ikkala PM6:Y-ChC5 donor-akseptor polimer materiallari o'zaro birikib bir birini to'ldirib bir-biri bilan yaxshi D-A struktura hosil qilgan deya xulosa qilishimiz mumkin[7].

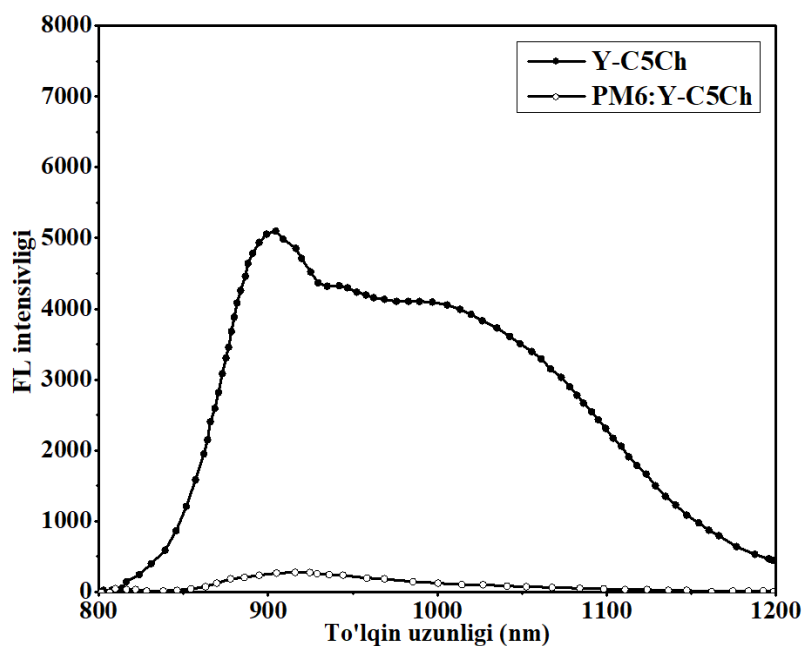


4-rasm. Y6 va PM6:Y6 qatlamlarning FL spektrlari

Zaryad o'tkazish samaradorligini yanada tasdiqlash uchun FL so'nishi o'lchovlari o'tkazildi.

4-rasmda Y6 va PM6:Y6 qatlamlarning FL spektrlari keltirilgan. Ushbu FL spektrlari 750 nm to'lqin uzunlikka ega lazer nuri faol qatlamlarga yo'naltirilgan holda olingan bo'lib, Y6 akseptor qatlamlarga yorug'lik tushgan paytda eksitonlarning nurlanish piki hosil bo'lgan bu degani eksitonlar paydo bo'lishini boshlaydi. Ya'ni zaryadlar ajralishi ro'y bermaganligi hamda donor qatlam mavjud

bo'lmaganligi uchun eksitonlar rekombinatsiyaga uchrashi natijasida 910 nm va 970 nm to'lqin uzunlikda eksitonlar rekombinatsiyasining nurlanishining piki kuzatilgan. Y6 akseptorga PM6 donor qo'shilgandan keyin eksiton zaryadlarga ajralishi hisobiga zaryadlarni rekombinatsiyasi yo'qolib, FL intensivlik piki bir necha barobarga keskin so'nadi. Bunga sabab D-A asosli faol qatrlamda eksitonlar zaryadlarga ajralishi va erkin zaryadlarni hosil bo'lishi ya'ni fotozaryadlarnig optimal holatgacha hosil bo'lishiga olib keladi[8].



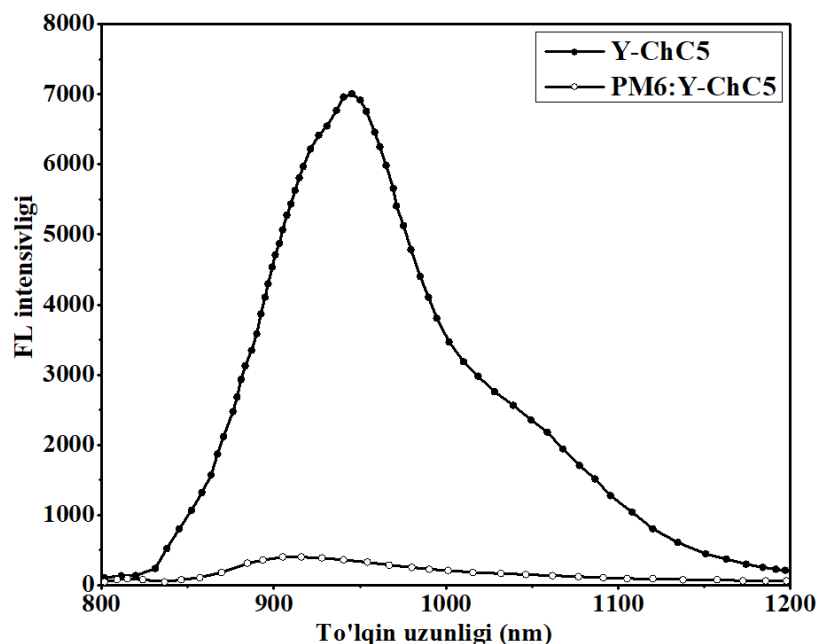
5-rasm. Y-C5Ch va PM6:Y-C5Ch qatlamlarning FL spektrlari

5-rasmda Y-C5Ch va PM6:Y-C5Ch qatlamlarning FL spektrlari keltirilgan. Grafikka qaraganda, Y-C5Ch qatlamida kuchli FL intensivligi kuzatilmoqda, PM6:Y-C5Ch qatlamida esa FL intensivligi sezilarli darajada pasaygan.

Ko'rinib turibdiki, Y-C5Ch qatlami 800 nm dan 1200 nm gacha bo'lgan to'lqin uzunliklarida FL intensivligini ko'rsatmoqda va eng yuqori intensivlik 900-1000 nm oralig'ida kuzatilmoqda. Bu shuni anglatadiki, Y-C5Ch qatlami ushbu to'lqin uzunligida eng yuqori FL intensivligiga ega.

PM6:Y-C5Ch qatlamida Y-C5Ch ga qaraganda sezilarli darajada past FL intensivligi ko'rinmoqda. Y-C5Ch qatlamida kuzatilyotgan bu past intensivlik qatlamda FL so'nishini ko'rsatadi, bu hodisa odatda zaryad o'tkazish samaradorligining oshishi bilan bog'liq. Grafikdan xulosa qilish mumkinki, PM6:Y-C5Ch qatlamida zaryad o'tkazish samaradorligi yuqori bo'lib, bu FL

intensivligining kamayishiga olib kelgan.



6-rasm. Y-ChC5 va PM6:Y-ChC5 qatlamlari uchun FL spektrlari

6-rasm rasmdagi grafikda Y-ChC5 va PM6:Y-ChC5 qatlamlari uchun FL intensivligi to'liq uzunligiga bog'liq ravishda ko'rsatilgan. Ko'rinib turibdiki, Y-ChC5 qatlami 800 nm dan 1200 nm gacha bo'lgan to'liq uzunliklarida FL nurlanishini ko'rsatmoqda va 950 nm to'liq uzunlikda maksimum pik hosil bo'lganini ko'rishimiz mumkin. PM6:Y6 qatlamida esa Y-ChC5 ga qaraganda sezilarli darajada past FL intensivligi ko'rinmoqda. Bu past intensivlik boya ko'rib o'tganimizdek qatlamda FL so'nishini (quenching) ko'rsatadi, bu hodisa odatda zaryad o'tkazish samaradorligining oshishi bilan bog'liq bo'ladi. Umuman, grafik Y-C5Ch moddasining FL intensivligi ancha kuchli ekanligini va PM6 bilan aralashtirilganda FL intensivligi sezilarli darajada pasayishini ko'rsatadi[9].

Yuqorida keltirilgan barcha spektr natijalardan PM6:Y-ChC5 faol qatlamga asoslangan PQElarning fotovoltaiik parametrlari PM6:Y6 va PM6:Y-C5Ch faol qatlamga asoslangan PQElarning fotovoltaiik parametrlaridan juda katta farq bilan yaxshiroq bo'lish kerak degan xulosaga kelish mumkin[10]. Bu xulosalarimizni tekshirish uchun bu ikki xil faol qatlamga asoslangan PQElarning fotovoltaiik parametrlari o'lchandi. Jadvalda PM6:Y6, PM6:Y-ChC5 hamda PM6:Y-C5Ch asosli PQElarning fotovoltaiik parametrlari ko'rsatilgan. PM6:Y6 asosli PQElarning fotovoltaiik ko'rsatkichlarini tahlil qiladigan bo'lsak, bunda ochiq

zanjir kuchlanishi(V_{oc}) 0,847 V, qisqa tutashuv tok zichligi (J_{sc}) 26.5 mA/cm² , to'ldirish faktori (FF) 74,3 % va EO'S esa 16,7 % tashkil qildi.

1-jadval.

PM6:akseptor (1:1,2 w/w) asosidagi PQElarning fotovoltaik parametrlari.

Faol qatlam	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	EO'S (%)
PM6:Y6	0.847	26.5	74.3	16.7
PM6:Y-C5Ch	0.862	26.3	76.7	17.4
PM6:Y-ChC5	0.897	26.8	79.4	19.1

PM6:Y-C5Ch faol qatlamlarga asoslangan PQElarning fotovoltaik natijalariga keladigan bo'lsak, bunda ochiq zanjir kuchlanishi 0,86 V, qisqa tutashuv tok zichligi 26,3 mA/cm² , to'ldirish faktori 76,7% va EO'S esa 17,4 % tashkil qildi. Shu bilan birga PM6:Y-ChC5 faol qatlamlarga asoslangan PQElarda ochiq zanjir kuchlanishi 0,897 V, qisqa tutashuv tok zichligi 26,8 mA/cm² , to'ldirish faktori 79,4% va EO'S esa 19,1 % ga oshdi.

Xulosa

Xulosa qilib aytganda, Y6-seriyali fullerensiz akseptorlar va ularning optik xossalari bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar polimer quyosh elementlarining samaradorligini sezilarli darajada oshirishda muhim ahamiyat kasb etar ekan. Olingan natijalaresa qisqa tutashuv tok zichligi va energiyani o'zgartirish samaradorligining yuqori darajada bo'lishi Y6-seriyali akseptorlarning yuqori nur yutish qobiliyatiga va elektron uzatishda yaxshi natijalarga erishayotganini tasdiqlaydi. Umuman olganda, Y6-seriyali fullerensiz akseptorlar va ularning hosilalari fotovoltaik qurilmalarning kelajakdagi rivojlanishi va organik quyosh elementlarining samaradorligini oshirishda katta istiqbolga ega bo'lishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Wang, Jianqiu, et al. "Binary organic solar cells with 19.2% efficiency enabled by solid additive." *Advanced Materials* 35.25 (2023): 2301583.

2. Duan, Tainan, et al. "Electronic Configuration Tuning of Centrally Extended Non-Fullerene Acceptors Enabling Organic Solar Cells with Efficiency Approaching 19%." *Angewandte Chemie International Edition* 62.42 (2023): e202308832.
3. L. Zhu, J. Zhang, Y. Guo, C. Yang, Y. Yi, Z. Wei, *Angew. Chem. Int.Ed.* 2021, 133, 15476. 42. T. Wang, W. Wang, Y. Cui, J. Ren, Z. Chen, J. Wang, H. Li, J. Li, J. Hou, *Adv. Funct. Mater.* 2024, 2400729.
4. W. Gao, F. Qi, Z. Peng, F. R. Lin, K. Jiang, C. Zhong, W. Kaminsky, Z. Guan, C. S. Lee, T. J. Marks, H. Ade, A. K. Y. Jen, *Adv. Mater.* 2022, 34, 2202089.
5. H. Liang, X. Bi, H. Chen, T. He, Y. Lin, Y. Zhang, K. Ma, W. Feng, Z. Ma, G. Long, C. Li, B. Kan, H. Zhang, O. A. Rakitin, X. Wan, Z. Yao, Y. Chen, *Nat. Commun.* 2023, 14, 707.
6. Y. Chang, J. Zhang, Y. Chen, G. Chai, X. Xu, L. Yu, R. Ma, H. Yu, T. Liu, P. Liu, Q. Peng, H. Yan, *Adv. Energy Mater.* 2021, 11, 2100079.
7. X. Xue, K. Weng, F. Qi, Y. Zhang, Z. Wang, J. Ali, D. Wei, Y. Sun, F. Liu, M. Wan, J. Liu, L. Huo, *Adv. Energy Mater.* 2019, 9, 1802686.
8. Y. Li, N. Zheng, L. Yu, S. Wen, C. Gao, M. Sun, R. Yang, *Adv. Mater.* 2019, 31, 1807832.
9. G. Chai, Y. Chang, Z. Peng, Y. Jia, X. Zou, D. Yu, H. Yu, Y. Chen, P. Chow, K. Wong, J. Zhang, H. Ade, L. Yang, C. Zhan, *Nano Energy* 2020, 76, 105087.
10. J. Wu, Z. Ling, L. R. Franco, S. Y. Jeong, Z. Genene, J. Mena, S. Chen, C. Chen, C. M. Araujo, C. F. N. Marchiori, J. Kimpel, X. Chang, F. H. Isikgor, Q. Chen, H. Faber, Y. Han, F. Laquai, M. Zhang, H. Y. Woo, D. Yu, T. D. Anthopoulos, E. Wang, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2023, 62, e202302888.