

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI
ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI**

SAPARBAYEV AZIZ ADAMOVICH

**FULLERENSIZ POLIMER AKSEPTORLAR ASOSIDAGI QUYOSH
ELEMENTLARNING OPTIK SPEKTROSKOPIYASI**

01.04.05 – Optika

**Fizika-matematika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

Doktorlik (DSc) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi
Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации
Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Saparbayev Aziz Adamovich

Fullerensiz polimer akseptorlar asosidagi quyosh elementlarning optik
spektroskopiya.....5

Сапарбаев Азиз Адамович

Оптическая спектроскопия солнечных элементов на основе бесфуллереновых
полимерных акцепторов.....29

Saparbayev Aziz Adamovich

Optical spectroscopy of solar cells based on nonfullerene polymer
acceptors.....55

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works.....60

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI
ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI**

SAPARBAYEV AZIZ ADAMOVICH

**FULLERENSIZ POLIMER AKSEPTORLAR ASOSIDAGI QUYOSH
ELEMENTLARNING OPTIK SPEKTROSKOPIYASI**

01.04.05 – Optika

**Fizika-matematika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi oliy ta'lim fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.4.DSc/FM285 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Doktorlik dissertatsiyasi O'zR FA U.A.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.iplt.uz) hamda «ZiyoNet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi:

Zaxidov Erkin Agzamovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Maxmanov Urol Kudratovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Absanov Axmad Abdusattorovich
fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

Shaislamov Ulug'bek Alisherovich
fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

Yetakchi tashkilot:

Chirchiq davlat pedagogika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti huzuridagi DSc.02/30.30.12.2019.FM/T.65.01 raqamli Ilmiy kengashning **2025 yil "02" oktabr soat 14:30** dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100125, Toshkent sh., Do'rmon yo'li ko'chasi 33-uy. Tel./Faks: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz. Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ 11 raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100125, Toshkent sh., Do'rmon yo'li ko'chasi 33-uy. Tel./Faks: (+99871) 262-31-69.

Dissertatsiya avtoreferati **2025-yil "19" sentabr** kuni tarqatildi.
(2025-yil **"19"** sentabrdagi № 11 raqamli reestr bayonnomasi).



X.B. Ashurov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash raisi, t.f.d., professor

I.D. Yadgarov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash ilmiy kotibi, f-m.f.d., professor

U.K. Maxmanov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,
f-m.f.d., professor

KIRISH (Doktorlik dissertatsiyasi (DSc) annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Dunyoda bugungi kunda global energiya iste'molining doimiy ravishda oshib borishi arzon, barqaror va qayta tiklanadigan energiya olish texnologiyalarini rivojlantirishni dolzarb masalaga aylantirmoqda. Ushbu muammolarni hal qilish maqsadida polimer quyosh element (PQE)larning energiya o'zgartirish samaradorligi (EO'S) qiymati oshishi uchun yangi donor va akseptor polimerlarni sintez qilinmoqda. Fulleren tarkibli akseptorlar uchun yangi donor polimer materiallari sintez qilib olishga harakatlar besamar ketgach, tadqiqot jarayonlari boshqacha yondoshuvga o'tilmoqda, ya'ni yangi donor polimerlar uchun mos bo'lgan fullerensiz akseptor matertiallar sintez qilina boshlandi.

Hozirda dunyoda istiqbolli deb qaralayotgan PQElar faol qatlamida funksional xususiyatlari optimallashtirilgan, yangi sintez qilingan donor/akseptor materiallar qo'llanilmoqda. Fullerensiz akseptorlarni loyihalash va sintez qilish uchun tobora ko'proq sa'y-harakatlar amalga oshirildi va fullerensiz akseptorlarga asoslangan PQElarning EO'S ko'rsatkichi 19 % dan oshib, fulleren tarkibli akseptorlarga asoslangan PQElarning natijalariga nisbatan deyarli 2,5 barobar miqdorda oshishiga erishildi. Ammo, EO'S natijlari yuqori bo'lishiga qaramay hali ham yechilmagan muammolar anchagina bo'lib, bular ultrabinafsha nurlanishi tufayli kelib chiqadigan degradatsiya mavjud bo'lib, Quyosh nurlanishi ta'sirida polimerlar parchalanishi va xususiyatlarini yo'qotishi mumkin. Bu PQElarning ishlash muddatiga salbiy ta'sir qiladi va ularning samaradorligini pasaytiradi. Ushbu muammolarni bartaraf etish uchun yaxshilangan xususiyatlarga ega yangi polimerlarni tadqiq qilish va yaratish dolzarb masalalardan biri hisoblanmoqda.

Respublikamizda so'ngi yillarda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan keng foydalanish bilan birga yuqori samaradorlikli yangi tur fotovoltaik texnologiyalarni yaratish bo'yicha ko'plab tadqiqotlar olib borilmoqda. Xususan, polimer materiallarning fizikaviy-kimyoviy xossalarini o'rganish, ular asosida yangi tipdagi PQElarni yaratish xamda ularda zaryadlar tashilish jarayonlarini o'rganish bo'yicha fundamental va amaliy tadqiqotlar jadal sur'atlarda amalga oshirilmoqda. Bunday tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, PQElar faol qatlamida yangi sintez qilingan donor yoki fullerensiz akseptor materiallari qo'llash, ularga termik ishlov berish strukturaning kristallanishini yaxshilaydi va PQE samaradorligini keskin oshirishga imkon beradi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28 yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida" gi farmoni, 2019-yil 21 maydagi O'RQ-539-son "Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish" to'g'risidagi O'zbekiston respublikasining qonuni, 2019-yil 22-avgustdagi PQ – 4422-son "Iqtisodiy va ijtimoiy sohalarning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejaydigan texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanadigan energiya manbalarini rivojlantirish bo'yicha tezkor chora-tadbirlar to'g'risida" gi qarorlarda ko'zda tutilgan ilmiy texnik vazifalarni hal qilishga qaratilgan. Qarorlaridagi hamda muqobil energetikadan foydalanishga oid boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Ushbu dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarni rivojlantirishning: III - “Energetika, energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va elektron asbobsizligi rivojlanishi” va II - “Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik” kabi ustuvor yo‘nalishlariga muvofiq ravishda bajarilgan.

Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi¹. PQElarni rivojlantirish va samaradorligini oshirish ustida hozirgi kunda dunyo bo‘ylab juda ko‘plab tadqiqotlar olib borilmoqda. Amerikada Florida universiteti, Prinston universiteti, Michigan universiteti, Kembrij universiteti, Shimoliy Korolina universiteti va boshqa ko‘plab ilmiy tadqiqot markazlari markazlarida PQElar uchun yangi, istiqbolli materiallar yaratish, ularning samaradorligini oshirish bo‘yicha tizimly tadqiqotlar olib borilgan. PQElar sohasida tadqiqotlar qilib salmoqli natijalar olish bo‘yicha Xitoydagi universitetlar va Xitoy Fanlar akademiyasi tarkibidagi ko‘plab tadqiqot institutlari yaqqol peshqadamlik qilmoqda. Masalan, Jiangnan universiteti, Janubiy Xitoy texnologiya universiteti, Pekin universiteti, Markaziy Janubiy universiteti, Wuhan universiteti, Zhejiang universiteti, Tianjin universiteti, Nanjing Tech universiteti, Suzhou universitetlari shular jumlasidandir.

So‘nggi yillarda juda ko‘plab yangi donor va polimer materiallar sintez qilinib qisqa muddatda EO’S qiymatlari 8% dan 19 %gacha erishgan bo‘lsa, hozirgi kunda esa faqat EO’S qiymatini oshirish uchun emas, parallel ravishda tashqi muhit ta’siriga chidamli qilish usullari bo‘yicha ham keng ko‘lamli tadqiqotlar olib borilmoqda. Yangi donor va akseptor polimerlarni sintez qilish va PQElarda qo‘llashda Xitoylik tadqiqotchilar dunyo bo‘yicha asosiy o‘rinda hisoblanadi. Xie va Chjan PBDB-T: IT-M va PBDB-T: ITIC faol qatlamlar asosida PQElarning EO’S natijalarini bir xil qiymatlarda olishgan. Ular yuqori harakatchanlik manbai sifatida donor va fullerensiz akseptor ITICni keng diapazonli spektriga ega ekanligi ko‘rsatishdi va uning yuqori harakatchanligi va past LUMO darajalari PTB7-Th va PBDB-T kabi qisqa to‘lqin diapazonli yutilishga ega donorlar bilan yaxshi moslashishga imkon bergan. Chen va uning hamkasblari konjugatsiyalangan polimerning zanjirlararo agregatsiyasi yuqori harakatchanlik uchun foydali bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatdi, bu esa qisqa to‘lqin diapazonli yutilishga ega donorlar faol qatlam qalinligi oralig‘ida yuqori samaradorlikka erishishga imkon beradi. Masalan, Markaziy Janubiy universitetida Yingping va uning hamkasblari 2019-yilda mashhur Y1 deb nomlangan fullerensiz akseptorni sintez qilgan bo‘lib, bugungi kunda ular Y1, Y2, Y3, Y4, Y5 va Y6 deb nomlangan Y seriyali fullerensiz akseptorlarni sintez qilish natijasida samarali PQElar olishga erishildi. Yangi donor polimerlar bo‘yicha 2021-yili Liming Ding va uning hamkasblari ajoyib donor polimer D18 ni sintez qilib olishib va shu donor asosida o‘z vaqtida rekord natija EO’S 17,9 % olishgan. Hozirgi kunda D18 donor polimer orqali yangi donor polimerlar sintez qilinmoqda. Jiangnan Universitetida professor Renqinag Yang va Wang Xunchan jamoasi ko‘plab tadqiqotlar olib borishib, D18 asosida juda ko‘plab

¹ Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar <https://www.researchgate.net> , www.Elsevier.com , <https://www.wiley.com> , <http://www.nature.com> , <https://pubs.acs.org> va boshqa ilmiy ba’zalardagi manbalar asosida tuzildi.

yangi donor polimerlar va Y seriyali fullerensiz akseptorlar sintez qilib olinib PQElarning EO'S natijasi 19 % dan oshirishga erishdi. Bundan tashqari dunyo bo'ylab juda ko'p tadqiqotchi olimlar fullerensiz akseptorlar asosidagi PQElar sohasida eng yuqori samaradorliklarga erishmoqda.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. 1995-yillarda eng birinchi organik/polimer quyosh elementlari haqida maqolalar e'lon qilingandan buyon, PQElar sohasida juda ham ko'p ilmiy tadqiqotlar va natijalar olindi. 2008-yilda McNeill va boshqalar benzotiadiazolga asoslangan fullerensiz akseptor F8TBT ni sintez qilishgan va EO'Si 1,2% bo'lgan P3HT:F8TBT faol qatlamli PQE olishgan. 2009-yilda Yan va boshqalar naftalin diimid (NDI) asosida fullerensiz akseptor N2200ni sintez qilishgan va 300-900 nmni qamrab oluvchi keng yutilish spektri sohasiga ega bo'lgan. 2015-yilda Chjan va uning hamkasblari yangi akseptor polimer material ITIC haqida xabar berdi. ITIC polimerida LUMO energiya darajasi pasaytirildi, o'zgartirilgan strukturasi molekulyar zaryad o'tkazilishini yaxshiladi va yorug'lik yutilish koeffisientini oshirib, yutilish to'lqin sohasi ham kengaydi. 2015-yilda McCulloch va uning hamkasblari FBR deb nomlangan fulleren tarkibsiz akseptorni sintez qildi, bu sintez usuli arzon narxlardagi FBR materiallarni sintez qilish imkonini berishini isbotlab berishidi. 2018-yilda Li va uning hamkasblari PTQ10 deb nomlangan D-A polimer donorini sintez qildi. PTQ10 polimerida tiofen va diftor bilan almashtirilgan kinoksalin mos ravishda donor va akseptor birgalikda birlik sifatida qo'llanildi. Ushbu polimer ishlatiladigan sintez qilish bosqichlari sonini ikkitagacha kamaytirishi mumkinligini ko'rsatib berdi, ammo umumiy rentabellik (sintez qilingan polimerning tannarxi) boshqa polimer donorlariga qaraganda ~5-20 baravar yuqori edi.

1998-yildan 2022-yilgacha fullerensiz polimerlar bilan PQElar EO'S 1,9% dan 19,2% gacha yaxshilanib juda muhim yutuqlarga erishildi. Polimer quyosh elementlari respublikamizda yangi tadqiqot sohasi bo'lishiga qaramasdan O'zR FA Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida professor Zaxidov E.A. va uning jamoasi hamda O'zR FA Polimerlar kimyosi va fizikasi institutidagi professor N.R. Ashurov rahbarligida tadqiqotlar olib borilmoqda va muhim ilmiy natijalarga erishishgan. Xususan ushbu sohada M.X. Imomov va V.O.Quvondiqov tadqiqotlar olib borib polimer quyosh elementlarining spektral xususiyatlarini va strukturaviy degredatsiya jarayonlarini tadqiq qilgan.

Tadqiqot natijalarini umumlishtirib tahlil qiladigan bo'lsak, ko'plab konjugatsiyalangan polimerlarga asoslangan faol qatlam strukturasi haroratga bog'liq ravishda yaxshi kristallanishi aniqlangan, natijada PQElarda tok zichligi qiymatlarining ortishi aniqlangan. Ammo sintez qilingan fullerensiz akseptorlar asosidagi donor-akseptor eritmasiga qo'shimcha kimyoviy suyuqliklar kiritish, donor-akseptor eritmasiga yoki faol qatlamga turli termik qizdirib ishlov berish usullarini qo'llash natijasida faol qatlamning optik xossalari o'zgarishi bilan PQElarning fotovoltaiik parametrlari o'rtasidagi bog'liqliklar qonuniyati hali ham to'liq tahlil qilinib aniq bir qoida asosida tushuntirilishga erishilmagan, hamda hozirgi vaqtda PQElar sohasida juda ko'p tadqiqotlar o'tkazilmoqda va PQElarning ommabop qo'llanilishi uchun aniq bir tizimli yechim yoki protokol mavjud emas. Shu bilan birga yangi sintez qilib olingan fullerensiz akseptor va donordan iborat

faol qatlamlarga turli usullarda ishlov berish orqali faol qatlamlarda yorug'lik yutilishi, zaryadlar ajaralishi va tashilishi jarayonlarini optimallashtirish hamda ushbu jarayonlarning amalga oshirish mexanizmlarini optik va strukturaviy jihatdan to'liq tushuntirib berish PQElarning samaradorligining poydevoridir. PQElarni ommabop qo'llashda juda muhim rol o'ynaydigan kimyoviy tuzilishida yaxshi bog'lanishga va takrorlanishga ega fullerensiz akseptorlarni sintez qilish yoki yangi sintez qilingan donor polimerlar bilan fullerensiz akseptorlar asosidagi faol qatlamlarning optik va strukturaviy tuzilishiga ta'sir qiluvchi asosiy omillarni aniqlash bo'yicha juda ko'p tadqiqotlar o'tkazish PQElarning istiqbolli ravishda keng va hamyonbop qo'llash uchun asos yaratiladi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejaları bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqotlari AL-8724053065 "Kam uglerodli aqlli qishloq xo'jaligi uchun yuqori samarali yarim shaffof organik fotovoltai elementlar" 2025 – 2027 yillar uchun mo'ljallangan O'zRFA Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida bajarilayotgan O'zbekiston–Xitoy qo'shma xalqaro loyihasida, Davlat dasturi bo'yicha O'zR FA Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida olib borilayotgan "PM6 donor va fullerensiz akseptorlar asosidagi organik quyosh elementlari faol qatlamlarning agregatsiyalanish hamda kristallanish xususiyatlarini tadqiq qilish" mavzusidagi fundamental tadqiqot ishlari doirasida amalga oshirildi.

Dissertatsiya ishining maqsadi: Yangi donor va fullerensiz akseptor polimerlarning optik va strukturaviy xossalari, donor va fullerensiz akseptor polimerlar bilan turli sharoitda olingan faol qatlamlarning optik va strukturaviy xususiyatlarini optimallashtirish orqali PQElarning samaradorligini oshirish uchun fizikaviy omillarni aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

PQElarning asosiy komponentasi bo'lgan faol qatlam uchun qo'llaniladigan D18 polimerini va D18 strukturasi modifikatsiya qilingan D18-R donorlarning eritma va qatlam holatidagi yutilish va fluoressensiya spektrlarini tadqiq qilish;

D18 donor va sintez qilib olingan yangi D18-R donorlarni L8-Bo fullernsiz akseptor bilan aralashtirilib tayyorlangan eritmaning va faol qatlamlarning xususiy yutilish va fluoressensiya spektrlarini, GIWAXS rentgent analiz tasvirlarini va mikroskoplar orqali olingan tasvirlar yordamida morfologik xususiyatlarini tadqiq qilish;

D18 va D18-R donorlarni L8-Bo fullernsiz akseptor bilan aralashtirilib tayyorlangan eritmalariga qo'shimcha kimyoviy suyuqliklar qo'shib, turli usulda termik ishlovlar berish natijasida faol qatlamlarning yutilish spektrlari, morfologik xususiyatlari va GIWAXS difraksion tasvirlari orqali ularning samaradorligini aniqlash;

D18 va D18-R donorlarni L8-Bo fullernsiz akseptor bilan aralashtirilib tayyorlangan faol qatlam tarkibidagi donor-akseptorlarning massa nisbati bo'yicha ulushlari, donor-akseptor eritmasiga qo'shiladigan kimyoviy suyuqlik turi va miqdori, termik ishlov berish usuli va haroratini PQElarning samaradorligi uchun optimal qiymatlarni aniqlash;

sintez qilib olingan yangi PBB-TSA va PBB-TSD donorlarni, PBB-TSA:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F larning eritma holatida va yupqa qatlam holatida yutilish spektrlarini tadqiq qilish. Ushbu faol qatlamlar asosidagi PQElarning fotovoltaik parametrlarini optik va strukturaviy xossalari bilan qiyosiy o'rganish;

hajmiy getreostrukturali PBB-TSD:Y6 faol qatlam va qatlam qatlam strukturali PBB-TSD/Y6 faol qatlamlarning optik xossalari tadqiq qilish va ushbu faol qatlamlar asosidagi PQElarda eksiton dissosiasiyalanish va zaryadlar harakatchanlik xususiyatlarini spektroskopik va fotovoltaik usullarda tadqiq qilish;

fullerensiz akseptorlarda eksiton bog'lanish energiyasini kamaytirish maqsadida Y6 fullerensiz akseptor yordamida sintez qilib olingan yangi fullerensiz akseptorlar asosidagi faol qatlamlarning yutilish va fluoressensiya xossalari tadqiq qilish, turli sharoitdagi faol qatlam yutilish va fluoressensiya xossalari yordamida eksiton bog'lanish energiyasining o'zgarishlarini baholash;

sintez qilib olingan yangi Y6-seriyali fullerensiz akseptorlarning galogen bo'lmagan erituvchi toluolda eruvchanlik daraja miqdorini spektroskopik usulda baholash va ushbu yangi fullerensiz akseptorlar asosidagi PQElarning fotovoltaik parametrlarini hamda termik barqarorlikka ta'sirini aniqlash va qiyosiy tahlil qilish.

Tadqiqot ob'ekti: D18 donor va sintez qilib olingan yangi D18-R, PBB-TSA va PBB-TSD donorlar, L8-Bo, IT-4F, Y6 va Y6 fullerensiz akseptor yordamida sintez qilib olingan yangi fullerensiz akseptorlar.

Tadqiqotning predmeti. Yangi donorlar yoki fullerensiz akseptorlar asosidagi faol qatlamga ega PQElarda yorug'lik yutilishi va fluoressensiya xossalari, eksitonlar paydo bo'lishi mexanizmi, eksitonlar ajralishi va zaryadlar tashilish jarayonlari, donor va akseptor eritmalariga qo'shimcha kimyoviy suyuqlik qo'shilgan yoki qo'shilmagan holda eritmaga yoki faol qatlamga turli termik ishlov berish jarayonlari, fullerensiz akseptorlar asosidagi faol qatlamlarning yorug'lik yutilishi va PQElarda yorug'lik energiyasini elektr energiyasiga aylantirish jarayonlari.

Tadqiqot usullari. Dissertatsiya tadqiqot ishlarida spektroskopiya tadqiqotlari, AFM va TEM mikroskoplari, GIWAXS difraktometriya, PQElarnig fotovoltaik parametrlarini o'lchash usullari, donor va akseptorlar aralashmasidan iborat eritmadan "spin coating" usulida qatlamlar olish usuli, kimyoviy suyuqliklarni bug'lari yordamida qizdirish kabi usullardan foydalanildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagi natijalardan iborat:

D18 asosida sintez qilib olingan yangi D18-R seriyali donor polimerlarning eritma holatidagi va yupqa qatlam holatidagi tadqiqot namunalarning yutilish spektri orqali, yutilish spektri intensivligi va yutilish to'lqin uzunligi sohasini o'zgartirmasdan strukturasini o'zgartirish mumkinligi ko'rsatildi;

ilk marta yangi D18-R seriyali donor polimerlar bilan fullerensiz akseptor L8-Bo asosida hajmiy geterostrukturali faol qatlamlar olindi. D18-R seriyali yangi donor polimerlar D18 donor polimerga nisbatan optik xossalari va fotovoltaik parametrlari bo'yicha ham samarali ekanligi ko'rsatildi;

ilk bora yangi donor polimerlar va fullerensiz akseptor bilan olingan hajmiy geterostrukturali faol qatlamlar asosida shisha/ITO/PEDOT:PSS/faol qatlam/PDINN/Ag arxitektura iborat PQElar namunalari tayyorlandi.

Shuningdek, ushbu PQElar yuqori fotovoltaiq qiymatlarga erishish uchun donor va akseptor massa ulushlari nisbatini, qo'shimcha erituvchilar turi va miqdori, termik ishlov berish jarayonidagi optimal haroratlar aniqlandi;

gibrid yon zanjir muhandisligi usulida olingan D18-R seriyali donorlarning yutish spektri to'liq uzunligi sohasini va intentsivligi samaradorligini kamaytirmasdan, yutilish koeffitsientini va diapazonini o'zgartirmasdan ochiq zanjir kuchlanishi (Voc) qiymatini pasaytirmasdan yuqori tok kuchi zichligi (J_{sc}) qiymatiga erishish mumkinligi polimerlarning optik va fotovoltaiq natijalari orqali ko'rsatildi;

ilk bora fullerensiz akseptor Y6 asosida yangi turdagi Y-C5Ch va Y-ChC5 fullerensiz akseptorlar asosida PM6:Y6, PM6:Y-C5Ch va PM6:Y-ChC5 faol qatlamlarning zaryad tashiluvchanligi va eksitonlar hosil bo'lishi samaradorliklari fotoluminessensiya xossalari orqali tadqiq qilindi. Yangi fullerensiz akseptorlar asosidagi faol qatlamlar strukturasi optimallashtirish hamda fullerensiz akseptorlarning eksitonlar bog'lanish energiyasini kamaytirish orqali PQElarning samaradorligini va termal barqarorligini yaxshilashga erishildi;

ilk bora yangi fullerensiz Y-ChC5 akseptorning eksiton bog'lanish energiyasini kamayishi natijasida PQElarda yuqori samarali zaryadni ajratish, tashish va yig'ish jarayonlarining samaradorligini oshirish mumkinligi ko'rsatildi va tashqi kvant samaradorligi 95% dan yuqori va eng maksimal 19,1% energiya o'zgartirish samaradorligiga erishildi;

PBB-TSD va Y6 fullersiz akseptorlar asosida qatlam qatlam va hajmiy getereostrukturali faol qatlamlarning optik xossalari hajmiy getereo strukturali faol qatlam bilan solishtirganda, qatlam qatlam strukturaga ega faol qatlamning yutilish spektri biroz qizil siljishga ega ekanligini, bu siljish esa Y6 fullersiz akseptorning yaxshilangan molekulyar tartibini namoyish etishi va o'z navbatida zaryad o'tkazishni yaxshilab, qatlam qatlam strukturali faol qatlamlarda tok kuchining oqimining kuchayishiga ijobiy ta'sir ko'rsatishi aniqlandi;

Y6 fullerensiz akseptorni strukturaviy o'zgartirishlar orqali eksiton bog'lanish energiyasini kamaytirish mumkinligi, erituvchilarda eruvchanlik darajasini va optik xususiyatlarini yanada takomillashtirish mumkinligini yutilish va fotoluminessensiya spektr natijalari orqali ko'rsatildi.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

- fullerensiz akseptor L8-Bo polimer va D18-R seriyali yangi donor polimerlar asosida faol qatlamlar turli sharoitlarda olinib, ular asosida shisha/ITO/faol qatlam/PDINO/Ag arxitektura shaklida PQElar tayyorlandi. PQElarning EO'S samaradorligi maksimal 19,2 % foizgacha oshirishga erishildi;

- donor polimerlarning yutilish spektriga ta'sir qilmasdan strukturasi o'zgartirish orqali PQElarning fotovoltaiq parametrlarini optimallashtirish usullari ishlab chiqildi;

- yangi sintez qilib olingan donor va fullerensiz akseptorlar asosida eksitonlar hosil bo'lishi va ajralishi, kristallanish ko'rsatkichlari yaxshilangan faol qatlamlar olish uchun faol qatlamga ishlov berish usullari ishlab chiqildi va shu usullar yordamida faol qatlamlarga ishlov berilib PQElar samaradorligi oshirildi;

- PQElarning optimal fotovoltaik qiymatlarga erishish uchun faol qatlam strukturasini donor va akseptorlar turiga qarab to'g'ri tanlash, faol qatlam uchun tayyorlangan eritmaga qo'shimchalar qo'shishda qo'shimcha turini va miqdorini, termik qizdirish usullarini aniqlash PQElarning EO'S qiymatlarining oshishi uchun muhim faktorlardan ekanligi tadqiqot natijalari yordamida ko'rsatildi;

- hajmiy geterostrukturali va qatlam qatlam usulda tayyorlangan faol qatlamlarda yorug'lik yutilishi, eksitonlar paydo bo'lishi va ajralishi samaradorligi, PQElarning yuqori EO'S qiymati faqatgina hajmiy geterostruktura usulda tayyorlangan faol qatlamlarda emas, aksincha donor va akseptor to'g'ri tanlansa qatlam qatlam usulda tayyorlangan faol qatlamlarning samaradorligi hajmiy geterostruktura usulda tayyorlangan faol qatlamlardan yaxshi bo'lishi ko'rsatildi;

- fullerensiz akseptorlar fullerenli akseptorlarga nisbatan har tomonlama (yutilish spektri intensivligi va keng to'liq uzunligi sohasiga egaligi, donorlarga moslashuvchanligi va boshqa parametrlari bo'yicha) samarali ekanligini D18:L8-Bo va D18:PCBM faol qatlamlarning optik xossalari va ular asosidagi PQElarning fotovoltaik parametrlari bo'yicha eksperimental ko'rsatildi;

- donor va akseptorlarni sintez qilib olish orqali va ular asosidagi faol qatlamlarning agregatsiyasini, kristallanish jarayonini va eksitonlar ajralishini boshqarish mumkinligini faol qatlamlarning yutilish va fluoressensiya spektr natijalari orqali ko'rsatildi;

- yangi sintez qilib olingan fullerensiz akseptorlarning eksiton bog'lanish energiyasining o'zgarganligini va galogen erituvchilarda eruvchanlik darajasini aniqlash uchun yutilish va FL spektrlaridan foydalanib tadqiqot natijalari olish mumkinligi ko'rsatildi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi: Yangi donor va fullerensiz akseptor eritmaları yoki donor-akseptor aralashmasi orqali tayyorlangan eritmalar va yupqa faol qatlam holatdagi tadqiqot namunalari yutilish va fluoressensiya spektrlari spektrofotometrlarda, faol qatlamlarning mikroskopik tasvirlarini olishda AFM va TEM mikroskoplarida, faol qatlamlarning strukturaviy holatini tadqiq qilishda GIWAXS reagent analiz usulida, PQElarning fotovoltaik parametrlarini o'lchashda maxsus standartga ega qurilmalar kabi eng ilg'or tadqiqot qurilmalarni va tadqiqot usullarini qo'llash, hamda yuqori aniqlikdagi zamonaviy o'lchov asboblari qo'llash bilan asoslanadi. PQElarning asosiy komponentasi bo'lgan faol qatlamlarning optik xossalari, strukturaviy parametrlarini va PQElarning samardorligini, barqarorligini o'rganish bo'yicha olingan tadqiqot natijalar va ularni tahlil qilish, o'rganilgan tadqiqot namunalarni nazariy tadqiq etishning asosiy qoidalariga asoslanadi va zamonaviy tadqiqotlar ma'lumotlariga to'liq mos keladi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Ushbu dissertatsiya tadqiqot ishining ilmiy ahamiyati yangi sintez qilingan D18-R strukturaga ega donor polimerlar va L8-Bo fullerensiz akseptor asosidagi faol qatlamlar olish usullari, faol qatlamlarga turli usullarda ishlovlar berish natijasida faol qatlamda yorug'lik yutilishi, agregatsiyalanish va eksitonlar dissotsatsiyalanish darajasi va zaryadlar tashilishining samaradorligining o'zgarishlari, faol qatlam strukturalarning tartiblanish/ kristallanish darajasi bilan bog'liqligini o'rganishga asoslanadi. Ikkinchidan fullerensiz akseptorlarning

strukturasini sintez qilish orqali o'zgartirilgan yangi fullerensiz akseptorlarning eksiton bog'lanish energiyasining o'zgarishi, optik xossalari, eksitonlar hosil bo'lishi va ajralishi samaradorliklari ularning yutilish va fluoessentsiya xossalari orqali o'rganishga asoslangan.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundaki, PQElarni ommabop qo'llanishi, sanoat darajasida tayyorlash uchun va yuqori samaradorlik qiymatlariga erishish uchun aniqlangan yangi sintez qilib olingan donor polimerlar va fullerensiz akseptorlarning faol qatlamdagi massa ulushlari nisbati, qo'shimcha kimyoviy suyuqliklar turi va miqdori, faol qatlamni qizdirish usullari va harorati, faol qatlamlarni tayyorlashda aniqlangan optimal qizdirish haroratlaridan kelgusi tadqiqot natijalarini yaxshilash uchun foydalanish mumkin. Shu bilan birga keyingi tadqiqot jarayonlarida PQElarning samaradorligini oshirishda donor va fullerensiz akseptorlarni sintez qilish orqali polimerlarning optik xossalarini pasaytirmagan holda ham PQElarning fotovoltaik parametrlarini oshirishda tavsiya etilgan ilmiy tadqiqot natijalaridan va samarali PQElar tayyorlashdagi tadqiqot usullaridan foydalanish mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinganligi.

Nano energy 101 (2022-yil) jurnalida nashr qilingan "Hammer throw-liked hybrid cyclic and alkyl chains: A new side chain engineering for over 18% efficiency organic solar cells" mavzusidagi maqolamizdagi tadqiqot natijalarimiz nufuzli xorijiy jurnallarda nashr etilgan ushbu (Energy & Environmental Science, 2024, 17, 1916, Advanced Materials 34(33), 2022, pp. 2204718, Advanced Materials 35(10), 2023, pp. 2210760, IF=25,81; Advanced Functional Materials, 33(28), 2023, pp. 2215204, IF= 18,5; IF=25,81; Energy & Environmental Science 16, 2023, pp. 3416-3429 IF= 32,4;) jurnallarda qo'shimchalarni qo'shish massa ulushlari, moslashuvchanlikning optimal muvozanati bilan tavsiflangan molekulyar struktura hamda uning qo'shimcha sifatida faol qatlam ichidagi eksiton diffuziyasi va dissotsiatsiya xususiyatlariga ta'siri o'rganilgan fizikaviy jarayonlarni tushuntirish imkonini bergan.

Advanced Materials jurnalidagi iqtibosda, donor material uchun D18 va akseptor material uchun L8-BO to'g'ri tanlanganligi va bu qatlamlarning yutilish sohasini, spektr kengligini tushuntirish va izohlash uchun foydalangan.

Keyingi iqtiboslarda shuningdek, donor polimerlari uchun kengaygan taqiqlangan soha energiyalari yoki LUMO energiya darajasining oshishi kuzatilganligi, siklogeksanga asoslangan alkil guruhidan Y6 hosilalari uchun ichki yon zanjir sifatida foydalanish mumkinligi tushuntirilgan.

ACS Applied Materials & Interfaces (2021-yil) jurnalida nashr qilingan "Benzobis(Thiazole)-Based Conjugated Polymer with Varying Alkylthio Side-Chain Positions for Efficient Fullerene-Free Organic Solar Cells" maqolamizda keltirilgan tadqiqot natijalarimiz nufuzli xorijiy jurnallarda nashr etilgan ushbu (Advanced Materials 36, 3 2024, pp. 2306990, IF=25,81; ACS Applied Materials & Interfaces 15, 24, 2023, pp. 29643–29652, IF= 8,5; Chinese Journal of Polymer Science 40, 2022, pp.147–156, IF= 4,1; International Journal of Quantum Chemistry 124, (1) 2024, pp. e27254, IF= 2,3;) maqolalarda BTZ birikmalari ko'pincha kuchli intermolekulalararo π - π bog'lam o'zaro ta'sirini ko'rsatadi va uzoq masofali

tartiblanganligini, polimer quyosh elementi qurilmalarida nisbatan kam energiya yo‘qotilishi va yuqori samaradorlik bo‘yicha tadqiqot natijalarini olishda va tushuntirishda foydalanilgan.

Keyingi iqtiboslarda polimer quyosh elementlarning (PQE) ishlashi yangi yorug‘lik yig‘uvchi materiallarning so‘nggi rivojlanishi tufayli sezilarli darajada yaxshilanganligini hamda PQElarda n-tipli materiallar sifatida qo‘llaniladigan ITIC va Y6 kabi fulleren bo‘lmagan tuzilmali akseptorlar p-tipli konjugatsiyalangan polimerlar bilan qo‘shimcha yutilishni ta‘minlashi va yorug‘lik energiyasini maksimal darajada elektr energiyasiga aylantirib berishini tushuntirishda qo‘llanilgan.

Keyingi iqtiboslarda p-konjugatsiyalangan polimerlarning bir turi sifatida donor(D)-akseptor(A) polimerlari polimer zanjirlarida ham elektron, ham kovak tashuvchi tuzilmalarga ega ekanligi, bu esa optik-elektron qurilmalarda zaryad tashish samaradorligini samarali oshirishda tadqiqotlarida foydalanilgan.

Aggregate (5) 2024-yil jurnalida nashr qilingan “Steric hindrance induced low exciton binding energy enables low-driving-force organic solar cells” mavzusidagi maqolamizdagi tadqiqot natijalarimiz nufuzli xorijiy jurnallarda nashr etilgan ushbu (Dyes and Pigments 237 (2025) pp.112713, IF=4,1; Physica B: Condensed Matter, 701 (2025) pp. 416952, IF= 2,8; Polymer Chemistry 2025, 16, pp. 475–483, IF=4,1; Solar RRL 2025, pp. 1-9, IF= 6;) eksitonlarning bog‘lanish energiyasini pasaytirish orqali eksitonlarning erkin zaryad tashuvchilarga termal dissotsiatsiyasini osonlashtiradi, bunda zaryadni ajratish va tashishni ortadi, bu esa o‘z navbatida fotovoltaik qurilmalar va polimer quyosh elementlarida energiya o‘zgartirish samaradorligini oshirishda foydalanilgan.

Keyingi iqtiboslarda g‘alayonlangan eksitonlar akseptorda zaryad tashuvchilarga ajralishi bilan akseptordan D18-Cl donorga kovaklar tez uzatilishi, donor polimerining yutilish sohasi o‘rta diapazonda va fullerensiz akseptorlar qisqa to‘lqin diapazonida yorug‘likning yutilishini sezilarli darajada oshirdi va energiya yo‘qotilishini kamaytirdi, bu esa energiya o‘zgartirish samaradorligini 20% dan oshishiga olib kelishini tushuntirishda foydalangan.

Tadqiqot natijalarining aprobat siyasi. Dissertatsiya tadqiqotining asosiy natijalari 20 ta, shu jumladan 11 ta xalqaro va 9 ta respublika ilmiy amaliy anjumanlarida ma’ruza va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya ishining mavzusi bo‘yicha olingan natijalar asosida 38 ta ilmiy ish nashr qilingan, shundan, O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 18 ta ilmiy maqola, jumladan, 12 tasi xorijiy nufuzli ilmiy jurnallardagi maqolalar, 6 tasi mahalliy ilmiy jurnallarda chop etilgan maqolalar. Shuningdek, 20 ta ma’ruza materiallari xalqaro va respublika konferensiya to‘plamlarida chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, beshta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati, hamda 105 ta rasm va 13 ta jadvaldan iborat bo‘lib, dissertatsiya hajmi 220 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi asoslangan, respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi, tadqiqotning maqsadi, vazifalari, obyekti va predmeti aniqlangan, ishning fan va texnologiyalarni rivojlantirishning muhim yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan hamda tadqiqot mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi va muammoning o'rganilganlik darajasi, ilmiy yangiligi, amaliy natijalari, natijalarning ishonchliligi, nazariy va amaliy ahamiyati, natijalarning amaliyotga joriy etilishi, e'lon qilinganligi, ishning tuzilishi haqidagi ma'lumotlar, dissertatsiya mavzusi bo'yicha mamlakatimizda va xorijda amalga oshirilgan ilmiy tadqiqotlar sharhi keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Polimer quyosh elementlari, polimer quyosh elementlar uchun materiallar va umumiy ma'lumotlar” (adabiyotlar sharhi)** nomli birinchi bobida PQElarida ishlatiladigan materiallar, PQElarining rivojlanish bosqichlari, PQElarining tuzilishi, faol qatlam sifatida ishlatiladigan materiallar, donor va akseptir materiallar turlari haqida, shuningdek, fullerensiz akseptorli polimer quyosh elementlarining optik strukturaviy va fotovoltaik xususiyatlari hamda faol qatlamda fotogeneratsiyalangan zaryadlarning harakatlanish mexanizmlariga oid nazariy va amaliy tadqiqotlar sharhi keltirilgan. Polimer quyosh elementlarining strukturaviy funksional tuzilishi va faol qatlamda polimer donor/fullerensiz akseptorlarni qo'llashning ahamiyati hamda bu sohada erishilgan yutuqlar, yechimini kutayotgan muammolar yoritilgan. PQElarda faol qatlamni tayyorlashda fullerensiz akseptorlarni qo'llash orqali faol qatlam strukturasi yaxshilash bo'yicha ko'plab olib borilgan tadqiqot ishlari tahlil qilingan. Shuningdek, faol qatlamda yorug'lik fotoni yutilishi natijasida eksiton hosil bolishi hamda eksitonlarning erkin elektron va kovakka ajralishi jarayonlari atroflicha tahlil qilingan.

Dissertatsiyaning ikkinchi bobida, fullerensiz akseptorlar asosidagi faol qatlamlarni olish va ishlov berish jarayonlari, PQElarni tayyorlash usullari, tadqiqot materiallarini tayyorlash qurilmalari, “Spin coating” qurilmasi, PQElarni tayyorlash jarayonlari, ularning optik, morfologik, strukturaviy va fotovoltaik xususiyatlarini aniqlashning eksperimental metodlari hamda tadqiqot qurilmalari bo'yicha batafsil ma'lumotlar keltirilgan.

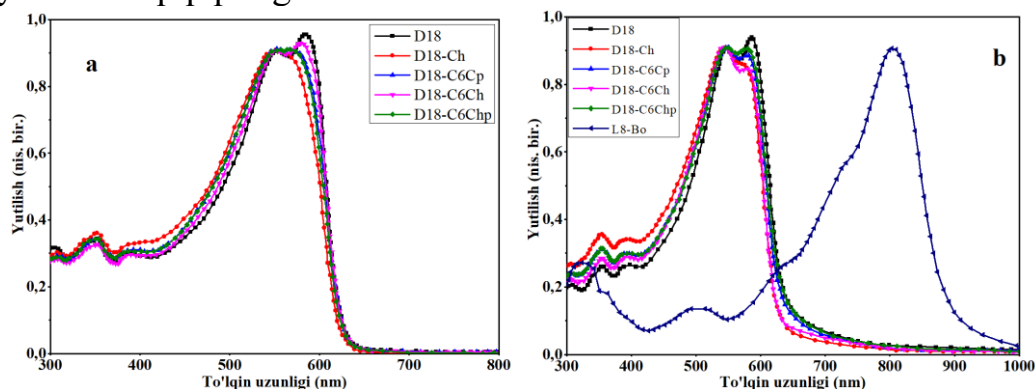
Ushbu tadqiqotlarda eritmalardan yupqa qatlamlar olishning “Spin coating” usuli qo'llanildi. “Spin coating” usuli bu ITO shisha yoki boshqa turdagi taglikka yupqa qatlamlarni yotqizish uchun ishlatiladigan usul bo'lib, odatda taglikning markaziga polimer eritmasining kichik tomchisini (20-25 μL miqdorda) joylashtirish va uni yuqori tezlikda aylantirishni o'z ichiga oladi. Polimer qatlamning natijaviy oxirgi qalinligi suyuqlikning va polimer eritmaning xususiyatlari (yopishqoqlik, quritish tezligi, qattiq moddalar foizi, sirt tarangligi va boshqalar)ga va aylanish jarayonining parametrlari (aylanish tezligi va vaqti, bug'lanish tezligi)ga bog'liq. “Spin coating” jarayonining tezligi va tezlashishi qoplangan qatlamning bir xilligi va qalinligiga katta ta'sir ko'rsatadi, shu bilan birga bug'lanish tezligi ham qoplangan faol,qatlam xususiyatlarini aniqlashda hal qiluvchi ahamiyatga ega bo'lib, jarayonning bir hil takrorlanishi ham muhim ahamiyatga egadir. Chunki

“spin coating” usulini qo'llash jarayondagi kichik o'zgarishlar ham qoplangan polimer qatlamda keskin o'zgarishlarga olib kelishi mumkin.

Yuqorida aytib o'tilganidek, qoplama jarayoniga ta'sir qiluvchi bir qancha asosiy omillar mavjud. Ular orasida aylanish tezligi, tezlashtirish, aylanish vaqti va boshqa turli sabablar bor. Polimer turlari va tagliklar turiga qarab “Spin coating” usulida olingan qatlamlar parametrlari bir biridan juda farq qiladi, shuning uchun sifatli ya'ni optimal qatlamlarni takror olish uchun qat'iy qoidalar yo'q, faqat umumiy ko'rsatmalar mavjuddir. Dissertatsiya ishida tadqiqot namunlarining yutilish spektrlari UV-1280 spektrofotometrda o'lchandi. Tadqiqot namunlarining fluoresensiya (FL) spektrlari esa shimadzu firmasining RF-6000 markali spektrofluoremetr qurilmasi yordamida olindi.

Shuningdek ushbu bobda faol qatlam strukturalarining absorbsion spektrlarini, morfologik tasvirlarini, hamda yupqa qatlamning strukturaviy xususiyatlarini o'rganishda qo'llanilgan metodlar, qurilmalar va o'lchovlarni amalga oshirish jarayonlari haqida ma'lumotlar keltirildi. Bundan tashqari absorbsion xarakteristikalarini va kristallik ko'rsatkichlarini aniqlash formulalari hamda tahlil qilish metodlari batafsil bayon qilindi. Tayyor quyosh element namunalarining fotovoltaiik parametrlarini va zaryadlar harakatchanlik qiymatlarini aniqlash formulalari hamda eksperimental metodlari keltirilgan.

Dissertatsiyaning uchinchi bobida istiqbolli PQElarning faol qatlamlarida qo'llash uchun turli sharoitda tayyorlangan D18 asosidagi donorlarning, L8-Bo fullerenisiz akseptorning va ular asosidagi faol qatlamlarning optik xossalari, morfologik va strukturaviy xossalari hamda shu faol qatlam asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlari, tashqi kvant samaradorligi va barqarorligi kabi xususiyatlari tadqiq qilingan.



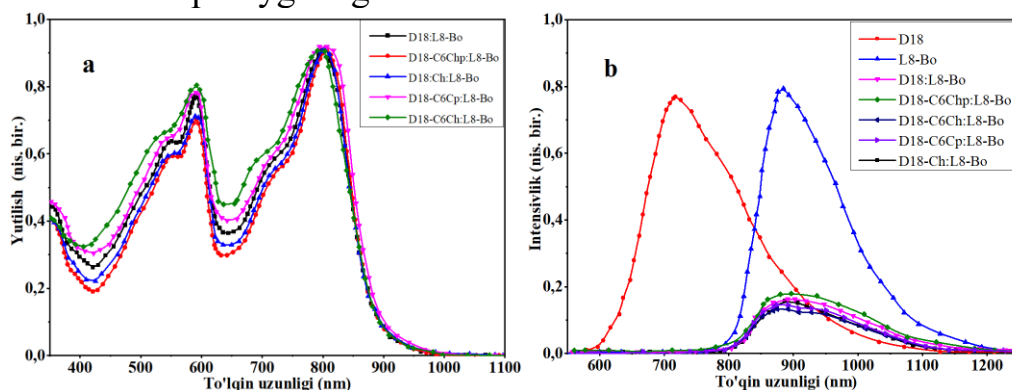
1-rasm. D18 va D18 tarkibga ega polimer (a)eritmalarining va (b)qatlamlarining yutilish spektri

D18 donorni modifikatsiya qilib yangi olingan donor polimerlarning strukturasining yutilish xossalari ta'siri birinchi navbatda tadqiq qilindi. 1a va 1b-rasmlarda gibriz zanjirli strukturaga ega barcha donor polimerlar eritma shaklida va qatlam holatida ham kichik batoxromik siljishlar va shunga o'xshash intensivlik cho'qqilariga ega ekanligini ko'rishimiz mumkin. Bu turli donor polimerlarning yutilish spektrlari ularning absorbsiya intensivligi (yutilish darajasi) to'lqin uzunligiga (nm) bog'liq ravishda o'zgarmoqda. Yutilish spektrining shakli D18 va

uning modifikatsiyalangan versiyalari bo'lgan D18-Ch, D18-C6Cp, D18-C6Ch va D18-C6Chp polimerlar juda o'xshash yutilish spektriga ega.

Barcha polimerlar 450–650 nm oralig'ida yuqori yutilish ko'rsatadi, bu esa ularning ushbu to'lqin uzunliklarida samarali yorug'lik yutish xususiyatlarini ko'rsatadi. D18 va boshqa polimerlarning yutilish piki 600 nm atrofida joylashgan. Bu pik polimerlar tomonidan yuqori yorug'lik energiyasini yutishga mos kelishini ko'rsatadi, bu esa PQElarda samaradorlik uchun muhim ahamiyatga ega. Yutilish spektri grafigidagi kichik farqlarni tahlil qiladigan bo'lsa, D18 va uning modifikatsiyalangan shakllari (masalan, D18-C6Ch, D18-C6Cp) orasida kichik farqlar ko'rinadi, bu ularning kimyoviy tuzilishida kichik o'zgarishlar tufayli yutilish spektrlarida ham unchalik sezilarli darajada o'zgarish bo'lmagan.

1b-rasmdagi faqat siklik zanjirli strukturani o'z ichiga olgan D18-Ch polimer qatlamning yutilish spektrida deyarli hech qanday yelka cho'qqisini ko'rsatmaydi, ammo tarmoqlanib yoyilib ketgan zanjirli strukturaga ega D18 uchun esa huddi eritma holatida o'lchangan yutilish spektridagi kabi sezilarli elka piklari mavjud, buning sababini esa katta siklik zanjirning sterik ta'siri tufayli agregatsiyaning optimal emasligini ko'rsatadi. Gibrid siklik va alkil zanjirlari bo'lgan uchta polimer (ya'ni, D18-C6Cp, D18-C6Ch va D18-C6Chp) o'rtacha elka pik intensivligini ko'rsatmoqda, bu natijalarni D18-Ch bilan solishtirib tahlil qiladigan bo'lsak, bu uchta polimerda ham sterik ta'sir saqlanib qolgan, ammo D18 polimerning yutilish pikiga nisbatan ancha pasayganligini ko'rsatadi.



2-rasm. D18, D18 asosida sintez qilib olingan polimer donorlar asosidagi faol qatlamlarning (a) yutilish va (b) FL spektrlari

2a-rasmdagi grafikda D18 va uning modifikatsiyalangan donor polimerlar bilan fulleren bo'lmagan L8-Bo akseptor aralashmasi asosida olingan faol qatlamlarning yutilish spektrlari berilgan. Eng avvalo, grafikdagi yutilish spektrining shakliga to'xtaladigan bo'lsak, barcha faol qatlamlar uchun 400–900 nm oralig'ida yaxshi yutilish intensivligini ko'rsatmoqda. Har bir faol qatlamning yutilish spektrida to'lqin uzunligi 600 nm atrofida va 800 nm atrofida kuchli yutilish piklari mavjud. Bunday piklarning shakllanishiga sabab, D18 va L8-Bo polimerlarning yutilish spektr grafiga qaralsa o'z o'zidan tushunarli bo'ladi. 3a-rasmdagi grafikning 600 nm atrofidagi yutilish piklari bu D18 polimerga tegishli bo'lsa, 800 nm atrofidagi yutilish piklari esa L8-Bo akseptorga tegishli. Endi D18 donor polimerlarning modifikatsiya qilingan versiyalari orasidagi yutish spektrini tahlil qiladigan

bo'lsak, D18-C6Ch:L8-Bo faol qatlam eng kuchli yutilish ko'rsatkichiga ega bo'lib, ayniqsa, 600 nm va 800 nm atrofida boshqa namunalar bilan solishtirganda biroz balandroq yutilish ko'rsatmoqda. D18-C6Chp:L8-Bo faol qatlamning yutilish intensivligi boshqa faol qatlamlarga nisbatan eng past yutilish ko'rsatkichlarini ko'rsatmoqda, ayniqsa katta to'liq uzunliklari (800–900 nm) sohasida buni yaqqol ko'rish mumkin. Barcha faol qatlamlarning 900 nm dan keyingi to'liq uzunliklarda yutilish intensivligi sezilarli darajada pasayadi. Bu esa ushbu faol qatlamlar asosidagi PQElarning uzoq infraqizil to'liq uzunligi sohasida yorug'likni samarali yuta olmasligi sababli samarali elektr energiya ishlab chiqarolmasligini xulosa qilishimiz mumkin.

2b-rasmdagi grafikda turli modifikatsiyadagi D18 polimeri va L8-Bo akseptorlar asosida faol qatlamlar uchun olingan FL spektrlari ko'rsatilgan bo'lib, bu FL spektrlari D18 donor polimeri va L8-Bo akseptorning FL spektri bilan solishtirilgan. 2b-rasmda qizil chiziq bilan berilgan grafik bu sof D18 polimerining FL spektridir. U 700 nm atrofida eng yuqori intensivlikka ega bo'gan bo'lsa, L8-Bo akseptor faol qatlamning FL spektri (ko'k chiziq) esa yuqori intensivlikni 900 nm atrofida ko'rsatmoqda. Bu spektr grafigidan ko'rishimiz mumkinki, L8-Bo akseptorning FL spektri D18 donor polimerning FL spektriga nisbatan nisbatan ancha uzoq to'liq uzunliklarida joylashgan. Buning sababini donor ba akseptorning optik taqiqlangan soha kengligining qiymati turlicha ekanligi bilan izohlaymiz.

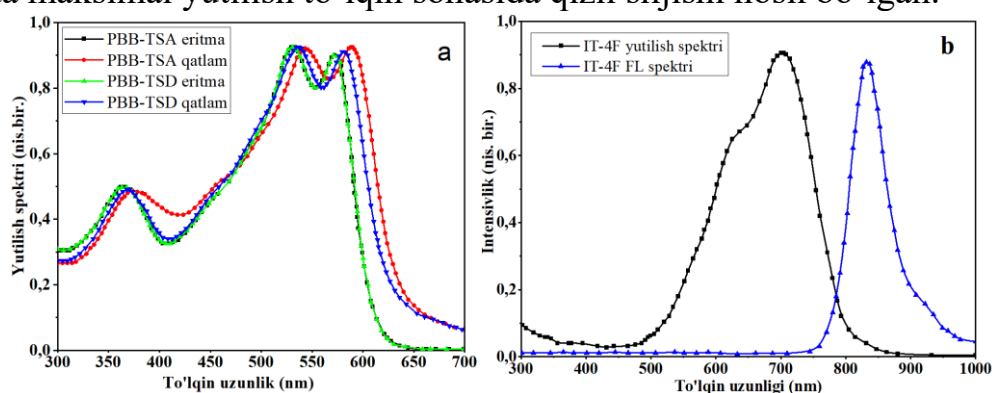
D18-C6Chp:L8-Bo, D18-C6Ch:L8-Bo, D18-C6Cp:L8-Bo va D18-Ch:L8-Bo faol qatlamlarning fotoluminessensiya spektrlarning intensivligi ancha past bo'lib, D18 polimer va uning turli modifikatsiyalangan strukturali polimerlar bilan L8-Bo akseptorning turli xil modifikatsiyalari fotoluminessensiya spektrlarda farq qiladi.

D18 va D18 asosida sintez qilib olingan polimer donorlar va L8-Bo akseptor aralashmasi asosida tayyorlagan faol qatlamlar asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlari o'lgangan. Fotovoltaiik parametrlari natijalarini tahlil qiladigan bo'lsak, eng yuqori samaradorlik D18-C6Ch:L8-Bo qatlamida kuzatildi, barcha parametrlar yuqori qiymatga erishgan ya'ni J_{SC} 25.46 mA/cm², FF 78.7% va EO'S 18.2% bo'lgan. Yuqoridagi xususiyatlarga qo'shimcha ravishda samarali qo'zg'alish dissotsiatsiyasini, past zaryad rekombinatsiyasini va muvozanatli zaryadni tashishni keltirib chiqaradi, bu esa yuqori samarali PQElar tayyorlash imkonini beradi. D18-C6Ch:L8-Bo asosidagi optimallashtirilgan PQElar sezilarli EO'S qiymat 16,7 %dan 18,20% ga oshirishga erishildi.

Dissertatsiyaning to'rtinchi bobida turli sharoitda tayyorlangan PBB-TSA va PBB-TSD donorlar bilan IT-4F va Y6 akseptorlar asosidagi faol qatlamlarning optik xossalari, morfologik va strukturaviy xossalari hamda shu faol qatlam asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlari, tashqi kvant samaradorligi va barqarorligi tadqiq qilingan. Yangi sintez qilib olingan PBB-TSD va PBB-TSA ning donor va akseptor strukturasiga mos ravishda alkallanish yon zanjiri kiritilishi tufayli HOMO energiya darajasini pasaytirishi va oshirishi mumkinligi, bu esa turli xil fullerensiz akseptorlar bilan mos kelishini ta'minlashi ko'rsatildi. Yutilish spektr natijalaridan fazalarni ajratish va tartiblangan molekulyar tartiblanish DIO qo'shimchasining kiritilishi bilan amalga oshirilishi isbotlandi, bu esa kovak/elektron harakatchanligini yaxshilashga olib keldi. DIO qo'shimchasi orqali faol

qatlamlarning samaradorligi oshishini faol qatlamlarning optik xossalarini tadqiq qilgan holda hulosasi qilindi.

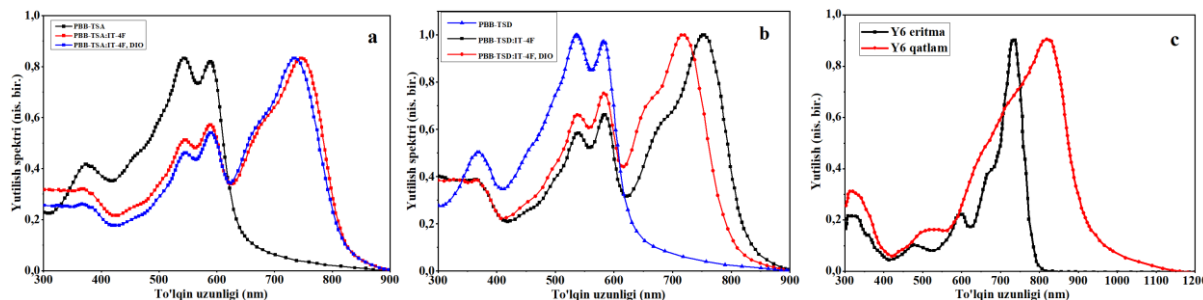
3a-rasmda yangi PBB-TSA va PBB-TSD polimerlarning yorug'lik yutilish spektrlari ko'rsatilgan. PBB-TSA uchun 375 nm va 368 nm da joylashgan intensiv yutilish cho'qqisi PBB-TSD uchun konjugatsiyalangan π - π^* bog'larning o'tishlari uchun ahamiyatlidir. PBB-TSA uchun 543 va 589 nm va PBB-TSD uchun 538 va 578 nm bo'lgan yorug'lik yutilish piklari bilan birga 450 nm to'lqin uzunligidan katta bo'lgan yorug'lik to'lqin uzunligi yutilish diapazonlari donor (BDT) va akseptor (BBT) birliklari o'rtasidagi kuchli molekulyar zaryad o'tkazuvchanligi bilan bog'liqligi bilan tushuntirish mumkin. Ikkala polimerning eritmasi orqali olingan spektrlarning yelka piklari kuchli agregatsiya harakatini ko'rsatadi. Kvars shisha ustiga yotqizilgan polimer qatlamlarning yutilish spektrining intensivligi va shakli eritmadagiga o'xshash yutilish spektrini ko'rsatadi, ammo yupqa polimer qatlamlarda maksimal yutilish to'lqin sohasida qizil siljishi hosil bo'lgan.



3-rasm. (a)PBB-TSA va PBB-TSD donor polimerlarning eritmada va kvars shisha ustiga yotqizilgan qatlamlarining yutilish spektrlari. (b)IT-4F akseptor polimer qatlamning yutilish va FL spektri

3b-rasmda fullerensiz akseptor IT-4F ning yutilish va FL spektrlari berilgan bo'lib, IT-4F ning yutilish spektrini tahlil qiladigan bo'lsak, yutilish to'lqin uzunligi sohasi 500 nm dan 800 nm gacha ekanligini, bu esa PBB-TSA va PBB-TSD donor polimerlarning yutilish spektri sohasini to'ldirib davom etishini anglashimiz mumkin. Chunki donorlarning yutilish spektri to'lqin uzunligi sohasi 400 nm dan 600 nm gacha ekanligini IT-4F akseptor esa 500 nm dan 800 nm gacha yutilish spektriga ega va bu donor va akseptor aralashmasidan tayyorlangan faol qatlamlarning yutilish spektrining to'lqin uzunligi sohasi ancha keng bo'lishini ta'minlaydi. Bu esa o'z o'zidan PQElarning fotovoltaiik parametrlarining samaradorligiga olib keladi. Fullerensiz akseptor IT-4F ning FL spektrini tahlil qiladigan bo'lsak, FL spektrining maksimumi 800 nm atrofida ko'rinadi. Bu, akseptorning qayta chiqishi vaqtida energiya yo'qotishining minimal bo'lishini anglatadi. FL spektrining intensivligi, yutilish spektriga nisbatan pastroq bo'lishi mumkin, bu esa akseptorning fotonlarni qanchalik samarali chiqarayotganini ko'rsatadi. IT-4F akseptorining yutilish va FL spektrlarini tahlil qilish, uning samaradorligini, energiya yo'qotish mexanizmlarini va potensial kamchiliklarini aniqlash uchun zarurdir.

4a-rasmda PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning va PBB-TSA:IT-4F eritmasiga 1,8-diiodooktan (DIO) qo'shimchasi kiritilgan PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning yutilish spektri berilgan. Bu ikkita faol qatlamlarning yutilish spektrni solishtirish uchun PBB-TSA donor qatlamning ham yutilish spektri berilgan. PBB-TSA:IT-4F faol qatlamining DIO qo'shimchasiz optimal yutilish spektri 746 nm to'lqin uzunligida, DIO qo'shimchasi qo'shilgan PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning maksimal yutilish spektri esa 734 nm to'lqin uzunligida hosil bo'lishini ko'rishimiz mumkin.



4-rasm. Turli sharoitda olingan (a)PBB-TSA:IT-4F va (b)PBB-TSD:IT-4F faol qatlamlarning, (c)Y6 fullerensiz akseptorning eritma va qatlam holatidagi yutilish spektrlari

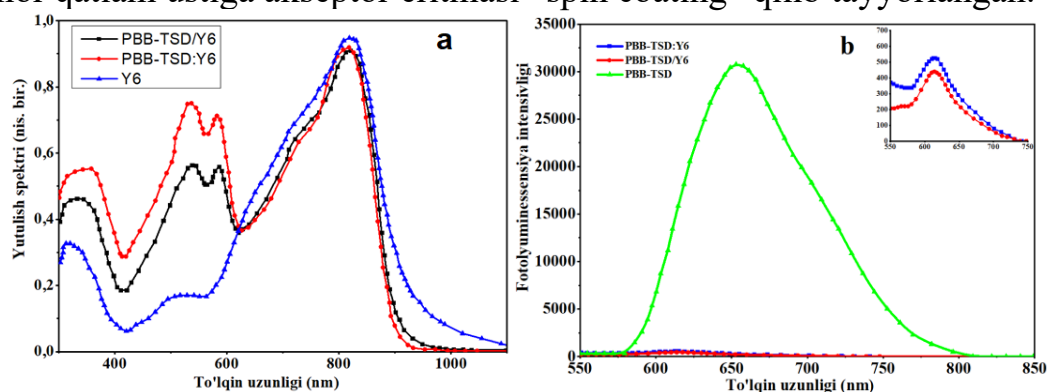
Bu olingan spektr grafiklaridan shuni ko'rishimiz mumkinki, DIO qo'shimchasini kiritganimizda PBB-TSA:IT-4F maksimum piklari qisqa to'lqin uzunligi tomon siljiganini ko'rishimiz mumkin. Bunda maksimum pik nuqtasi qisqa to'lqin uzunligiga ya'ni ko'k siljishga ega va siljish 12 nmga teng. Bundan tashqari 600 nm dan kichik to'lqin uzunliklarida DIO qo'shimcha qo'shilgan eritmada olingan faol qatlamlarning yutilish intensivligi qiymati DIO qo'shilmagan eritma orqali tayyorlangan faol qatlamlar yutilishi intensivligidan farq qilmoqda. Misol uchun, 545 nm to'lqin uzunligiga mos keladigan pik nuqtasini olsak ikkita pik bir-biridan 1,12 marta farq qilmoqda, 590 nm to'lqin uzunligiga mos keladigan opik nuqtasida esa 1.07 marta farq qilmoqda. Bu farqlarni faol qatlam strukturasi DIO eritmasi qo'shilgach, donor va akseptor bir-biri bilan yaxshi aralashganini va natijada olingan faol qatlam morfologiyasi yaxshilangan holda molekulalar bir-biriga yaqin zichroq joylashib tartiblanganligi bilan tushuntiriladi. PBB-TSA donor faol qatlamning 545 va 590 nm to'lqin uzunligiga mos keluvchi yutilish pik nuqtasi mos ravishda 1,61 va 1,42 marta farq qilmoqda. Buning sababi donor fullerensiz akseptor bilan eritmada aralashtirilib faol qatlam hosil qilingach, donor va akseptor bir-biri bilan yaxshi aralashma hosil qilganligi va faol qatlam hosil qilganda struktura fazalari qayta taqsimlanib optimal faol qatlam hosil qilgan deya olamiz.

4b-rasmda PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning va PBB-TSD:IT-4F eritmasiga DIO qo'shimchasi qo'shilgan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning yutilish spektri berilgan. Bu ikkita faol qatlamlarning yutilish spektrni solishtirish uchun PBB-TSD donor qatlamning ham yutilish spektri berilgan. DIO qo'shimchasi qo'shilmagan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning yutilish spektrining piki 753 nm to'lqin uzunligida, DIO qo'shimchasi qo'shilgan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning maksimal yutilish spektri esa 717 nm to'lqin uzunligida hosil bo'lishini ko'rishimiz mumkin. Bu yutilish spektr grafiklaridan DIO qo'shimchasini kiritganimizda PBB-

TSD:IT-4F maksimum piklari qisqa to'liqin uzunligi tomon siljiganini, bunda maksimum pik nuqtasi qisqa to'liqin uzunligiga (ko'k siljish) 36 nmga siljigan. Bundan tashqari huddi PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning yutilish spektri kabi 600 nm dan kichik to'liqin uzunliklarida DIO qo'shimcha qo'shilgan eritmada olingan faol qatlamlarning yutilish intensivligi qiymati DIO qo'shilmagan eritma orqali tayyorlangan faol qatlamlar yutilishi intensivligidan farq qilmoqda. Misol uchun, 536 nm to'liqin uzunligiga mos keladigan pik nuqtasini olsak ikkita pik bir biridan 1,19 marta farq qilmoqda, 582 nm to'liqin uzunligiga mos keladigan yutilish pik nuqtasida esa 1,14 marta farq qilmoqda.

4c-rasmdagi grafiklarda Y6 akseptorning eritma va qatlam holatidagi yutilish spektrlarini solishtirishsak, Y6 eritmasining yutilish spektrining piki 735 nm to'liqin uzunligiga mos kelmoqda. Bu yutilish piki eritmada Y6 molekularining individual optik xususiyatlarini aks ettiradi. Y6 qatlami yutilish spektri grafida esa yutilish piki biroz qizil tarafga siljigan bo'lib, yutilish pikining qiymati 818 nm to'liqin uzunligiga mos keladi. Bu yutilish piki Y6 akseptor qatlamdagi molekulararo o'zaro ta'sirlar, ya'ni π - π tartiblanganlik va molekularning tartiblangan tuzilishi natijasida yuzaga keladi.

PBB-TSD donor va Y6 fullerensiz polimer bilan HGS va QQS usulida tayyorlangan PQElarning strukturasi berilgan, rasmda berilgan strukturalardan ma'lumki bu ikkita PQE strukturasi faqatgina faol qatlam strukturasi bilan farq qilmoqda(6-rasmda). HGS strukturali faol qatlam donor va akseptor polimerlar massa bo'yicha 1:1, 1:1,2 va 1:1,4 nisbatlar bo'yicha eritma tayyorlanib faol qatlamlar spin coating usulida olingan. PBB-TSD donor va Y6 fullerensiz polimer bilan HGS (PBB-TSD:Y6) usulida tayyorlangan faol qatlamda donor va akseptor massa nisbatlari bo'yicha bitta idishga solinib eritmada aralashtirib tayyorlanadi. PBB-TSD donor va Y6 fullerensiz polimer bilan QQS (PBB-TSD/Y6) usulida tayyorlangan faol qatlamlarda esa oldin donor eritmasi "spin coating" qilingan, keyin donor qatlam ustiga akseptor eritmasi "spin coating" qilib tayyorlangan.



5-rasm. PBB-TSD donor, qatlam qatlam va hajmiy getereo struktura usulda tayyorlangan faol qatlamlarning (a) yutilish spektrlari va (b) FL spektrlari

5a-rasmda PBB-TSD donor va fullerensiz akseptor Y6 asosida qatlam qatlam va hajmiy getereo struktura usulda tayyorlangan faol qatlamlarning yutilish spektrlari berilgan. Yutilish spektrlari grafigidan ko'rinib turibdiki, qatlam qatlam va hajmiy getereo strukturali faol qatlamlarning ikkalasida ham yutilish to'liqin uzunligi sohasi 300 dan 1000 nm gacha bo'lgan keng qamarab olgan va juda

o'xshash grafik shakllariga ega. Ikkala qatlamma qatlam va hajmiy getereo strukturali faol qatlamlarning qisqa to'lqin uzunligi sohasida 540 nm va 585 nm atrofida ikkita aniq yorug'lik yutilish piklari mavjud, bu ikkala faol qatlamda ham PBB-TSD polimer donorning kuchli agregatsiya harakatini ko'rsatadi. Qatlamma qatlam va hajmiy getereo strukturali faol qatlamning optik xossalarini hajmiy getereo strukturali faol qatlam bilan solishtirganda, Qatlamma qatlam strukturaga ega faol qatlamning yutilish spektri biroz qizil siljishga ega ekanligini ko'rsatadi, bu siljish esa Y6 fullernsiz akseptorning yaxshilangan molekulyar tartibini namoyish etadi. Bu esa o'z navbatida zaryad o'tkazishni yaxshilaydi va qatlamma qatlam strukturali faol qatlamlarda tok kuchining oqimining kuchayishiga ijobiy ta'sir ko'rsatadi.

5b-rasmda PBB-TSD donor, qatlamma qatlam va hajmiy getereo struktura usulda tayyorlangan faol qatlamlarning FL spektrlari faol qatlamda eksitondan foydalanish jarayonini yoritish uchun o'lchandi. PBB-TSD donor va faol qatlamlar donor-akseptor chegarasida eksiton dissotsiatsiyasi va zaryad uzatish samaradorligini aniqlash uchun 560 nm to'lqin uzunligida lazer bilan g'alayontirildi.

PBB-TSD va Y6 asosidagi qatlamma-qatlam va HGS strukturasiga ega PQElar tadqiq qilinganda, turli xil usulda olingan faol qatlamlarning yutilish va FL spektr natijalari qatlamma qatlam olingan faol qatlamning optik xususiyatlari yaxshiroq ekanligi ko'rsatildi. Buning sababini qatlamma-qatlam olingan faol qatlam strukturasiga HGS strukturasiga qaraganda ko'proq tartiblangan molekulyar bog'lanishlar va kerakli donor/akseptor vertikal faza ajratishini ko'rsatganligi bilan tushuniriladi.

PBB-TSA:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F PQElarning samaradorligini oshirish maqsadida faol qatlamlar tarkibiga 1,8-diodoktan (DIO), xloronaftalin (CN), va difenil efir (DPE) qo'shimcha sifatida turli kichik konsentratsiyalarda kiritib ularning fotovoltaik parametrlarini tahlil qildik.

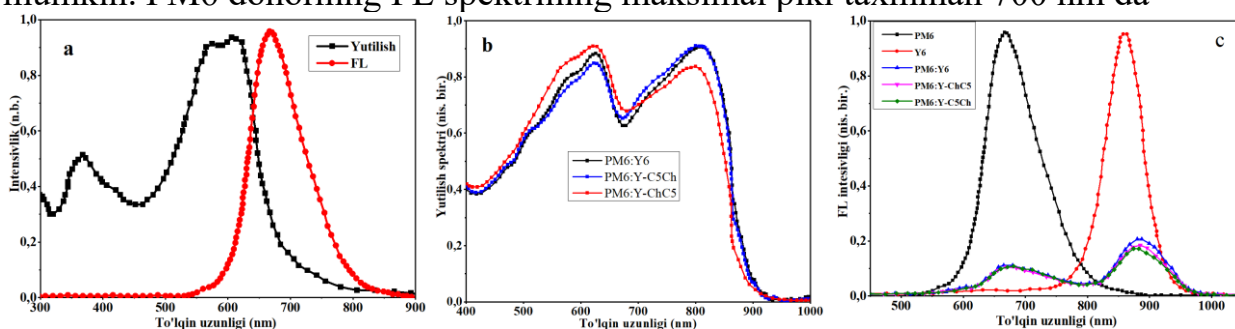
PQElarning fotovoltaik parametrlari eng yaxshi natija ya'ni faol qatlamlarning morfologiyasini optik xossalarini optimallashtirish tufayli J_{sc} va FF qiymatlari ikkala PBBTSD va PBB-TSA asosidagi faol qatlamlar sosidagi PQElar ko'rsatdi. Ya'ni, optimallashtirilgan PBB-TSD: IT-4F faol qatlamlarga asoslangan PQElar 0,89 V V_{oc} , 21,9 J_{sc} va 74,5% FF bilan 14,6% EO'S bilan eng yuqori fotovoltaik parametrlarga erishdi.

Dissertatsiyaning beshinchi bobida Y6-seriyali fullerensiz akseptorlarning optik xossalarini tahlil qilish natijasida Y-ChC5 akseptori eng yaxshi natijalarga ega ekanligi aniqlandi. Ushbu akseptorning ta'qiqlangan energiya soha kengligi (1.11 eV) eng kichik bo'lib, bu uning yorug'likni kengroq diapazonda yutish imkoniyatini oshirdi. Eritma va yupqa qatlam shaklidagi namunalar 300-1000 nm oralig'ida o'lchangan bo'lib, natijalar Y-ChC5 ning eng keng yutilish spektriga ega ekanligini ko'rsatdi. Yupqa qatlamlarda yutilish spektrining qizil tomonga siljishi molekulalararo o'zaro ta'sir va agregatsiyalashuv jarayonining kuchayishi bilan bog'liq ekanligi aniqlandi. Fotolyuminessensiya (FL) spektrlari tadqiq qilinib, donor-akseptor aralashmali faol qatlamlarda FL intensivligi keskin kamayganligi kuzatildi. Bu esa eksitonlarning samarali zaryadlarga ajralishini va elektron tashilishini tasdiqlaydi. Umuman olganda, Y-ChC5 eng optimal optik xossalarga ega

bo'lib, yuqori yorug'lik yutilish qobiliyati, past eksiton bog'lanish energiyasi, samarali zaryad ajralishi va barqarorligi tufayli polimer quyosh elementlari uchun eng istiqbolli fullerensiz akseptor sifatida baholandi. Donor va akseptor polimerlarning va ular asosidagi faol qatlamlarning optik xossalarning natijalarini to'liq faol qatlamlar asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlari tasdiqlashi ko'rastildi.

Yangi fullerensiz akseptorlarning faol qatlam sifatida tadqiq qilish uchun PM6 donor polimer bilan faol qatlamlar olindi. 6a-rasmda PM6 donor polimer qatlamning yutilish va FL spektrlari berilgan bo'lib, PM6 donor polimer qatlamining yutilish spektri 300-700 nm oralig'ida yutilish intensivligini ko'rsatadi.

PM6 donor polimerining maksimal yutilish piki ~600 nm atrofida joylashgan. Ammo, 300-400 nm oralig'ida yutilishning pasaygani va yuqori to'lqin uzunliklarida (700-900 nm) yutilishning deyarli nolga tengligini ko'rishimiz mumkin. PM6 donorning FL spektrining maksimal piki taxminan 700 nm da



6-rasm. (a)PM6 donor polimer qatlamning yutilish va FL spektrlari.

(b)PM6:Y6, PM6:Y-C5Ch va PM6:Y-ChC5 faol qatlamlarining yutilish spektrlari. (c)PM6, Y6 qatlamlar va PM6:Y6, PM6:Y-C5Ch, PM6:Y-ChC5 faol qatlamlarining FL spektrlari

joylashgan bo'lib, bu FL spektr sohasi donor polimer nurlanish orqali qayta chiqaradigan fotonlarning asosiy diapazonini bildiradi. PM6 donor qatlamining yutilish spektri va FL spektrining bir-biriga nisbatan yaqin joylashuvi PM6 polimerining yuqori darajada samarali yorug'lik-emissiya xususiyatlarini ko'rsatadi.

PM6 donor polimerning FL spektri eksitonlar hosil bo'lish samaradorligi bilan bevosita bog'liq, chunki FL spektri faol qatlamlarda eksitonlarning rekombinatsiyasi va nurlanishini aks ettiradi. PM6 donor qatlamning FL spektrining maksimal piki yutilish spektri pikiga yaqin joylashganligini ko'rishimiz mumkin, buning sababini yutilgan fotonlarning sezilarli qismi eksitonlar hosil qilishda va keyinchalik nurlar chiqarishda ishtirok etishini bilan tushuntiriladi. Eksitonlarning hosil bo'lish samaradorligini oshirish uchun PM6 qatlamidagi nuqsonlarni minimallashtirish, nurlanishsiz yo'qotishlarni kamaytiruvchi strategiyani qo'llash masalan, mos donar-akseptor juftlar asosida faol qatlamlar tayyorlash, eksiton diffuziya masofasini oshirish, bu esa faol qatlam qatlam samaradorligini yaxshilaydi.

Yangi fullerensiz akseptorlar va PM6 donor bilan birgalikda faol qatlam olindi va ularning ya'ni PM6:Y6, PM6:Y-C5Ch va PM6:Y-ChC5 faol qatlamlarining yutilish spektrlari tadqiq qilindi. 6b-rasmda uchta fullerensiz akseptorlar asosidagi

faol qatlamlarning yutilish spektri grafigi berilgan. 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.

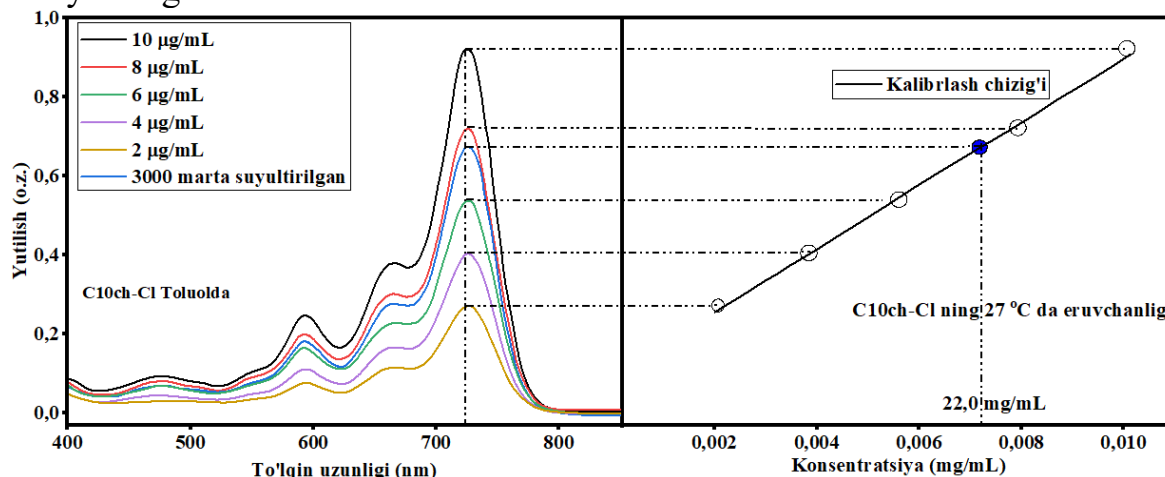
PM6:Y6 qatlami 600-900 nm oralig'ida yuqori yutilish ko'rsatkichini ko'rsatmoqda. Grafikni taxlil qiladigan bo'lsak PM6:Y6 va PM6:Y-C5Ch qatlamlarining yutilish spektri va yutilish sohasi deyarli bir xil va 680 nm dan 900 nm to'liq uzunligi sohasida joylashgan Y6 hamda Y-C5Ch qatlamlarning FL intensivligi 400 nm dan 680 nm gacha to'liq uzunligi sohasida joylashgan PM6 donor qatlamlarning FL intensivligidan yuqoriroq ekanligini ko'rishimiz mumkin.

6c-rasmda PM6, Y6 qatlamlar va PM6:Y6, PM6:Y-C5Ch, PM6:Y-ChC5 faol qatlamlarining FL spektrlari keltirilgan. Ushbu FL spektrlari 550 nm to'liq uzunlikka ega lazer nuri faol qatlamlarga yo'naltirilgan holda olingan. Grafikka qaraydigan bo'lsak, PM6 qatlami 580 nm dan 820 nm gacha bo'lgan to'liq uzunliklarida FL nurlanishini ko'rsatmoqda va 690 nm to'liq uzunlikda maksimum pik hosil bo'lganini ko'rishimiz mumkin. Y6 qatlamining FL intensivligi esa 750-950 nm to'liq uzunligi oraliklarida kuzatilgan va 860 nm to'liq uzunligi atrofida maksimum pik hosil qilgan. So'ngra PM6:Y6, PM6:Y-C5Ch, PM6:Y-ChC5 faol qatlamlarning FL spektrlari o'Ichandi. Grafikdan ko'rish mumkinki, PM6 donorga Y6 akseptor hamda Y6 akseptorning hosilalari Y-C5Ch, Y-ChC5 qo'shilgandan keyin eksiton zaryadlarga ajralishi hisobiga zaryadlarni rekombinatsiyasi yo'qolib, FL intensivlik piki bir necha barobarga keskin kamaydi.

PM6:Y6 asosli PQElarning fotovoltaik ko'rsatkichlarini tahlil qiladigan bo'lsak, bunda ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}) 0,847 V, qisqa tutashuv tok zichligi (J_{sc}) 26.5 mA sm^{-2} , to'ldirish faktori (FF) 74,3 % va EO'S esa 16,7 % tashkil qildi. PM6:Y-C5Ch faol qatlamlarga asoslangan PQElarning fotovoltaik natijalari esa ochiq zanjir kuchlanishi 0,86 V, qisqa tutashuv tok zichligi 26,3 mA sm^{-2} , 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 sm^{-2} , to'ldirish faktori 79,4% va EO'S esa 19,1 % ga oshdi.

Dissertatsiyaning oltinchi bobida Y6 va Y6 fullerensiz akseptordan sintez qilib olingan yangi C10ch-F va C10ch-Cl fullerensiz akseptorlarning toluol erituvchisida eruvchanligini yutilish spektri intensivliklari bo'yicha baholashga qaratildi. Yon zanjir muhandisligi asosida Y6 akseptorning strukturasiga fluor va xlor atomlarini kiritish bilan modifikatsiya qilinib, Y6 asosida olingan yangi C10ch-F va C10ch-Cl fullerensiz akseptorlarning toluolda eruvchanligi, Y6, C10ch-F va C10ch-Cl fullerensiz akseptor eritmalarining Y6 fullerensiz akseptorga nisbatan toluolda eruvchaligi juda katta farq mavjudligi, ya'ni eruvchanlik xossasi yuqoriligi Buger-berr-Lambert qonuni bo'yicha isbotlandi. Natijada Y6, C10ch-F va C10ch-Cl akseptorlarning to'yingan eritma miqdor konsentratsiya qiymatlari (11 mg/mL, 21 mg/mL va 22 mg/mL) aniqlandi. Y6, C10ch-F va C10ch-Cl fullerensiz akseptor eritmasining har xil haroratlarda olingan FL spektr piklarining joylashish to'liq uzunliklari natijalaridan C10ch-Cl fullerensiz akseptorning eng yaxshi eruvchanlikka ega ekanligi ko'rsatildi.

7-rasmda har xil konsentratsiyaga ega C10ch-Cl akseptorning toluolda yutilish spektrini va uning eruvchanligini baholash uchun foydalanilgan grafik natijalari keltirilgan. Grafik ikki qismdan iborat bo'lib, chap tomondagi grafikda turli konsentratsiyalardagi (2–10 $\mu\text{g/mL}$) Y6 eritmaları uchun yutilish spektrlari tasvirlangan. Yutilish spektrlarini tahlil qiladigan bo'lsak, 700 nm atrofida maksimal yutilishga ega bo'lib, bu natija Y6 fullerensiz akseptor eritmaning optik xususiyatlariga mos keladi.



7-rasm. C10ch-Cl fullerensiz akseptorning toluolda har xil konsentratsiyalarda yutilish spektri

Buger-beer-lambert qonuniga asosan C10ch-Cl eritmasining konsentratsiya oshgani sari yutilish intensivligi ortib borayotganini kuzatish mumkin. Eritmalarning yutilish pik qiymatlari va ularga mos keluvchi konsentratsiyalar bo'yicha kalibrlash chizig'i chizildi. C10ch-Cl fullerensiz akseptor eritmasining to'yingan darajasigacha yetkazish uchun eritmada ortiqcha C10ch-Cl ch'kindilari ajralib chiqadigan darajaga yetguncha aralashtirilgan. Natijada eritmada cho'kma hosil bo'lish chegrasiga yetganda konsentratsiya oshirilishi to'xtatilib, hosil bo'lgan no'malum konsentratsiyali eritmaning yutilish spektri o'lchandi. Bu noma'lum konsentratsiyali C10ch-Cl fullernsiz akseptorning yutilish spektrini o'lchashdagi muammoni hal qilish uchun bu eritmani 3000 marta suyultirildi. 3000 marta suyultirishning asosiy sababi yuqori konsentratsiyali C10ch-Cl eritmasining yutilish spektrini optik diapazonda to'g'ri o'lchashdir.

Optimallashtirilgan donor:akseptorning toluoldagi aralashmasi(massa bo'yicha 1:1,2 nisbatda, donor uchun 7 mg/ml)ga eritmaning hajmi bo'yicha 0,5 % DIO ning optimal miqdori qo'shilib optik xossalari, strukturaviy o'zgarishlari, fotovoltaiik parametrlari tadqiq qilindi. Yangi fullerensiz akseptorlarning toluolda eruvchanligini oshishi tufayli PM6:C10ch-F va PM6:C10ch-Cl faol qatlamlar asosidagi PQElarning samaradorligi PM6:Y6 faol qatlam asosidagi PQElar samaradorligidan (18,4%/11,4%) 1,6 marta oshirishga erishildi. PM6:C10ch-F:C10ch-Cl faol qatlamlar asosidagi PQElar eng yuqori EO'S qiymati ya'ni 19,2% ga erishildi.

XULOSALAR

1. D18-R seriyali donor polimerlarning eritma holatidagi va yupqa qatlam holatidagi yutilish spektrlari natijalaridan, yutilish spektri intensivligi va sohasini o'zgartirmasdan D18 asosida sintez qilib olingan D18-R seriyali donor polimerlarning strukturasini PQElar uchun optimallashtirish mumkinligi ko'rsatildi.
2. Ilk marta D18-R seriyali donor polimerlar bilan fullerensiz akseptor L8-Bo asosida hajmiy geterostrukutrali faol qatlamlarning D18 donor polimeriga nisbatan optik xossalari va fotovoltaik parametrlari bo'yicha ham samarali ekanligi ko'rsatildi.
3. Yutilish spektri to'liq uzunligi sohasini va intensivligining samaradorligini kamaytirmasdan, D18-R seriyali donorlar asosidagi faol qatlamlarda yutilish koeffitsientini pasaytirmasdan ya'ni J_{sc} qiymatini pasaytirmasdan yuqori V_{oc} ga erishish mumkinligi ko'rsatildi. Natijada D18-R seriyali donorlar tarkibga ega faol qatlam asosidagi PQElarning EO'S samaradorligi 16,7 %dan 18,2 % foizgacha oshirishga erishildi.
4. Donor:IT-4F Faol qatlamlarning yutilish spektr natijalaridan fazalarning ajralishi va tartiblangan molekulyar tartiblanish DIO qo'shimchasidan foydalanganda boshqa qo'shimchalarga nisbatan faol qatlamlarning samaradorligi optimalroq bo'lishi hulosa qilindi. Bu xulosalarimizni PQElarning fotovoltaik parametrlari ham tasdiqladi.
5. donor va akseptor polimerlar to'g'ri tanlansa qatlamma-qatlam va hajmiy getereo strukturaga ega faol qatlamlarning yutilish va FL spektr natijalaridan qatlamma-qatlam strukturali faol qatlamning optik xususiyatlari yaxshiroq bo'lishi ko'rsatildi. Yutilish/FL spektrlari va fotovoltaik parametr natijalaridan qatlamma-qatlam va hajmiy getereo struktura shaklidagi faol qatlamlarning samaradorligini oshirish uchun materiallarni to'g'ri tanlash strategiyasi muhimligi xulosa qilindi.
6. Yangi Y-C5Ch va Y-ChC5 fullerensiz akseptorlarning FL spektrlari natijalaridan, Y-C5Ch va Y-ChC5 fullerensiz akseptorlarning FL spektrlarining 0–0 va 0–1 ajratilgan Gauss spektrlaridan Y-C5Ch va Y-ChC5 akseptorlarda Y6 akseptorga nisbatan ko'proq nurlanishli rekombinatsiya bo'lishi isbotlandi.
7. Har bir faol qatlamni faol qatlam tarkibida bo'lgan fullerensiz akseptorning FL spektrlari bilan qiyosiy tadqiq qilinganda faol qatlamlarning FL intensivligining qiymati PQElarning samaradorligiga teskari proporsional bo'lishi, bu qonuniyat yangi fullerensiz akseptorlar asosidagi faol qatlamlar uchun ham o'rinli ekanligi ko'rsatildi.
8. Fullerensiz akseptorlarning haroratga bog'liq FL spektr natijalaridan qaysi akseptor eng kichik eksiton bog'lanish energiyasiga ega ekanligini formula yordamida hisoblab topish mumkinligi ko'rsatildi, natijada eng kichik E_b ega bu Y-ChC5 fullerensiz akseptor ekanligi va Y6 fullerensiz akseptorning E_b qiymatiga nisbatan 1,5 marta kamayganligi isbotlandi.
9. Donor/akseptor polimerlarning va ular asosidagi faol qatlamlarning optik xossalari natijalarini faol qatlamlar asosidagi PQElarning fotovoltaik parametrlari to'liq tasdiqlashi ko'rastildi. Bu tasdiqlash xulosalarini PM6:Y-ChC5 asosidagi faol qatlamning boshqa faol qatlamlarga nisbatan yaxshi optik

xossalariga va optimal energiya o'zgartirish samaradorlik qiymati bo'lgan 19,2%ga erishildi.

10. Faol qatlamlarning yutilish spektr natijalari va PQElarning fotovoltaik natijalari haqqoniyligini ya'ni yutilish spektri yaxshi bo'lgan faol qatlam asosidagi PQElarning fotovoltaik parametrlari optimal bo'lishi bir biri bilan uzviy bog'liq holda bo'layotganini PQElarning TKS spektrlari natijalari bilan isbotlandi.
11. PM6:fullerensiz akseptorlar asosidagi PQElarning EO'S qiymati oshirishga erishilib, qo'shimcha ravishda ularning barqarorlik parametrlari bo'yicha ham samaradorlikka erishilgani isbotlandi. Natijada 85 gradus issiqlikka va yorug'likka chidamliligi bo'yicha 1400 soatdan keyin EO'S qiymatining 80 foizdan ko'prog'ini saqlab qolishi ko'rsatildi.
12. Y6 akseptor asosida olingan yangi C10ch-F va C10ch-Cl fullerensiz akseptorlar Y6 fullerensiz akseptorga nisbatan toluolda eruvchaligi ikki barobar farq qilishi Buger-Lambert-Ber qonuni bo'yicha yutilish spektrlari orqali isbotlandi. Y6, C10ch-F va C10ch-Cl fullerensiz akseptor eritmalarining har xil haroratlarda olingan FL spektr piklarining joylashish to'lqin uzunliklari natijalaridan C10ch-Cl fullerensiz akseptorning eng yaxshi eruvchanlikka ega ekanligi xulosa qilinib, Buger-Lambert-Ber qonuni bo'yicha olingan natijalar to'liq tasdiqlandi.
13. Xlor molekulari ftor molekulariga qaraganda Y6 akseptor xossalariga kuchliroq ta'sir ko'rsatib, kengroq yutilish diapazoni va yuqoriroq intensivlik hosil qilishi ko'rsatildi. Akseptorlarning toluolda eruvchanligini oshirish tufayli PQElarning samaradorligi (18,4%/11,4%) 1,6 marta oshirishga erishildi.
14. Fullerensiz akseptorlarning eruvchanligi, optik va fotovoltaik parametrlari yaxshilanishi bilan birga yangi fullerensiz akseptorlar asosidagi PQElarning issiqlikka va yorug'likka chidamliligi 1,5 marta oshirishga erishildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-
ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**ИНСТИТУТ ИОНО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

САПАРБАЕВ АЗИЗ АДАМОВИЧ

**ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СОЛНЕЧНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ БЕСФУЛЛЕРЕНОВЫХ
ПОЛИМЕРНЫХ АКЦЕПТОРОВ**

01.04.05 – Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ
Диссертации доктора (DSc) физико-математических наук**

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора наук (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2024.4.DSc/FM285.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.iplt.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант:

Захидов Эркин Агзамович

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Махманов Урол Кудратович

доктор физико-математических наук, профессор

Абсанов Ахмад Абдусатторович

доктор физико-математических наук, доцент

Шаисламов Улугбек Алишерович

доктор физико-математических наук, доцент

Ведущая организация:

Чирчикский государственный педагогический университет

Защита диссертации состоится «**02**» **октября 2025 г. в 14:30 часов** на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 при Институте Ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули 33. Тел./Факс: (99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института Ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за № **11**) по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули 33. Тел./Факс: (99871) 262-32-54.

Автореферат диссертации разослан «**19**» **сентябрь 2025 г.**
(протокол реестра №**11** от «**19**» **сентябрь 2025 г.**)



Х.Б. Ашуров
Председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

И.Д. Ядгаров
Ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.,
профессор

У.К. Махманов
Председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (Аннотация диссертации доктора наук, DSc)

Актуальность и востребованность темы диссертации. Постоянный рост мирового потребления энергии сегодня делает разработку доступных, устойчивых и возобновляемых энергетических технологий актуальной задачей. Для решения этих проблем синтезируются новые донорные и акцепторные полимеры, повышающие эффективность преобразования энергии (ЭПЭ) полимерный солнечный элемент (ПСЭ). После того, как попытки синтезировать новые донорные полимерные материалы для акцепторов, содержащих фуллерены, оказались безуспешными, исследователи переходят к другому подходу, а именно к синтезу акцепторных материалов, не содержащих фуллерены, подходящих для новых донорных полимеров.

В настоящее время в активном слое ПСЭ используются вновь синтезированные донорно-акцепторные материалы с оптимизированными функциональными свойствами, которые в мире считаются перспективными. Большие усилия были приложены для разработки и синтеза акцепторов, не содержащих фуллерены, и в настоящее время ЭПЭ ПСЭ на основе акцепторов, не содержащих фуллерены, превысило 19%, что почти в 2,5 раза больше по сравнению с результатами ПСЭ на основе акцепторов, содержащих фуллерены. Однако, несмотря на высокие эксплуатационные характеристики ЭПЭ, все еще существует множество нерешенных проблем, среди которых деградация, вызванная ультрафиолетовым излучением, которая может привести к разрушению полимеров и потере ими своих свойств под воздействием солнечной радиации. Это также отрицательно влияет на срок службы ПСЭ и снижает их эффективность. Для решения этих проблем одной из актуальных задач считается исследование и разработка новых полимеров с улучшенными свойствами.

В последние годы в нашей республике наряду с широким использованием возобновляемых источников энергии проводятся обширные исследования по созданию новых видов высокоэффективных фотоэлектрических технологий. В частности, быстрыми темпами ведутся фундаментальные и прикладные исследования по изучению физико-химических свойств полимерных материалов, созданию на их основе новых типов ПСЭ, изучению процессов переноса заряда в них. Подобные исследования показывают, что использование в активном слое ПСЭ вновь синтезированных донорных или акцепторных материалов, не содержащих фуллерены, с последующей термической обработкой улучшает кристаллизацию структуры и позволяет резко повысить эффективность ПСЭ.

Диссертационное исследование направлено реализацию задач, изложенных в Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № RF-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы» и в Постановлении от 22 августа 2019 года № PQ-4422 «О мерах по повышению энергоэффективности экономических и социальных сфер, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», а также в других нормативно-правовых документах, касающихся использования альтернативной энергетики.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данная диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан: III - «Энергетика, энергосбережение, транспорт, развитие машиностроения и электроники» и II - «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации¹. В настоящее время по всему миру широко проводятся исследования с целью разработки и повышения эффективности ПСЭ. В США систематические исследования по данной теме проводятся в Университете Флориды, в Принстонском и Мичиганском и Кембриджском университетах, в Университете Северной Каролины и многих других научных центрах с целью создания новых, перспективных материалов для ПСЭ и повышения их ЭПЭ. Университеты КНР и многие институты Китайской академии наук являются лидерами в достижении значительных результатов в исследованиях по повышению ЭПЭ в ПСЭ. Среди них Университет Цзянхэнь, Южно-Китайский технологический университет, Пекинский университет, Центральный южный университет, Уханьский университет, Чжэцзянский университет, Тяньцзиньский университет, Нанкинский технический университет и Сучжоуский университет широко известны по своим практическим результатам.

В последние годы было синтезировано много новых донорных и полимерных материалов, позволивших достичь значения ЭПЭ от 8% до 19%. В настоящее время проводятся системные исследования не только с целью увеличения значения ЭПЭ, но и с целью повышения его устойчивости к воздействию окружающей среды. Китайские исследователи находятся на переднем крае по синтезу новых донорных и акцепторных полимеров и их применения. Се и Чжан получили одинаково высокие схожие результаты ЭПЭ в ПСЭ на основе активных слоев PBDB-T:IT-M и PBDB-T:ITIC. Они показали, что донор и акцептор ITIC, не содержащий фуллерены, как высокоподвижный источник, имеет широкополосный спектр поглощения, а его высокая подвижность и низкие уровни LUMO позволяют ему хорошо сочетаться с донорами с коротковолновым поглощением, такими как PTB7-Th и PBDB-T. Чен и его коллеги показали, что межцепочечная агрегация сопряженного полимера может быть полезна для высокой мобильности, позволяя донорам с коротковолновым поглощением достигать высокой эффективности в диапазоне толщины активного слоя. Например, в 2019 году Инпин и его коллеги из Центрального южного университета синтезировали известный бесфуллереновый акцептор под названием Y1, а в настоящее время они синтезировали серию бесфуллереновых акцепторов серии Y, названных Y1, Y2, Y3, Y4, Y5 и Y6, что привело к созданию эффективных ПСЭ. Что касается новых донорных полимеров, в 2021 году Дин и его коллеги синтезировали

¹ Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации составлен на основе: научных баз данных <https://www.researchgate.net>, www.Elsevier.com, <https://www.wiley.com>, <http://www.nature.com>, <https://pubs.acs.org> и других.

выдающийся донорный полимер D18 и достигли рекордного показателя ЭПЭ в 17,9% на основе этого донора. В настоящее время синтезируются новые донорные полимеры с использованием полимера D18. В Университете Цзянхань группа профессора Яна и Сюнчана провела обширные исследования и синтезировала ряд новых донорных полимеров и акцепторов серии Y без фуллеренов на основе D18, что повысило эффективность ЭПЭ ПСЭ вплоть до 19%. Кроме того, многие исследователи по всему миру добиваются высочайшей эффективности в области ПСЭ на основе акцепторов, не содержащих фуллеренов.

Степень изученности проблемы. С момента публикации первых статей об органических/полимерных солнечных элементах в 1995 году в области ПСЭ было проведено множество научных исследований и получен целый ряд важнейших результатов. В 2008 году МакНейл и др. синтезировали акцептор F8TBT на основе бензотиadiaзола, не содержащий фуллеренов, и изготовили PQE с активным слоем P3HT:F8TBT с ЭПЭ 1,2%. В 2009 году Ян и др. синтезировали бесфуллереновый акцептор N2200 на основе нафталиндиимида (NDI), имеющий широкий спектральный диапазон поглощения, охватывающий область 300–900 нм. В 2015 году Чжан и его коллеги сообщили о новом акцепторном полимерном материале ITIC. В полимере ITIC уровень энергии LUMO был снижен, такая структура способствовала переносу молекулярного заряда, а диапазон длин волн поглощения был расширен, что заметно увеличило коэффициент поглощения света. В 2015 году Маккалок и его коллеги синтезировали акцептор без фуллеренов, названный FBR, продемонстрировав, что этот метод синтеза позволяет синтезировать недорогие FBR-материалы. В 2018 году Ли и его коллеги синтезировали донорный полимер под названием PTQ10. В полимере PTQ10 в качестве донорных и акцепторных звеньев использовались тиофен- и дифторзамещенные хиноксалины, соответственно. Этот полимер показал, что можно сократить количество стадий синтеза до двух, но общий выход (стоимость синтезированного полимера) был в 5-20 раз выше, чем у других полимерных доноров.

С 1998 по 2022 год был достигнут значительный прогресс в повышении ЭПЭ ПСЭ с полимерами, не содержащими фуллеренов, с 1,9% до 19,2%. Несмотря на то, что полимерные солнечные элементы являются новым направлением исследований в нашей республике, научные группы под руководством профессора Захидова Э.А. в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан и профессора Ашурова Н.Р. в Институте химии и физики полимеров Академии наук Республики Узбекистан ведутся научные исследования и получены важные научные результаты. В частности, Кувондилов В.О. и Имомов М.Х. провели цикл исследований по изучению процессов структурной деградации через спектральные свойства органических солнечных элементов, состоящих из донора P3HT с фуллереном PCBM и акцепторов ITIC без фуллерена.

Обобщая результаты указанных исследований, можно сказать, что структура активного слоя ПСЭ на основе многих сопряженных полимеров

хорошо кристаллизуется в зависимости от температуры, что приводит к увеличению значений плотности тока. Однако взаимосвязь между изменениями оптических свойств активного слоя и фотоэлектрическими параметрами ПСЭ в результате добавления дополнительных химических веществ в донорно-акцепторный раствор на основе синтезированных акцепторов без фуллеренов, а также применения различных методов термического нагрева к донорно-акцепторному раствору или активному слою до сих пор не была полностью проанализирована и объяснена на основе четких правил. В настоящее время продолжается множества исследований в этой области, но нет научно обоснованного четкого и систематического решения для применения ПСЭ. При этом оптимизация процессов поглощения света, разделения зарядов и транспорта в активных слоях путем обработки вновь синтезированных бесфуллереновых акцепторных и донорных активных слоев различными способами, а также полное объяснение механизмов этих процессов в оптических и структурных терминах является основой повышения эффективности ПСЭ. Синтез акцепторов без фуллеренов с хорошей связью и повторяемостью химической структуры, играет очень важную роль в таком применении ПСЭ. Выявление основных факторов, влияющих на оптические и структурные свойства активных слоев на основе акцепторов без фуллеренов с вновь синтезированными донорными полимерами, создаст базу для широкого и эффективного применения ПСЭ.

Связь диссертационных исследований с планами научно-исследовательских работ. Диссертационная работа выполнена в рамках совместного узбекско-китайского международного проекта МУК-2021-47 «Гибкая органическая фотовольтаика: перспективный портативный возобновляемый источник энергии» (2021-2022 гг.), реализованного совместно Институтом ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз и Институтом биоэнергетики и биотехнологии г. Циндао (Китай), фундаментального проекта ФЗ-20200929177 «Процессы энергообмена и фотоиндуцированной миграции заряда в перспективных перовскитных солнечных элементах» (2022-2026 гг.), реализуемого совместно с Ташкентским государственным техническим университетом имени И.А. Каримова, и фундаментальной научно-исследовательской работы «Исследование процессов фотоиндуцированного переноса заряда в природных и искусственных системах, преобразующих световую энергию» по Государственной научно-технической программе Института ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз на 2021-2024 гг.

Цель диссертационной работы. Целью работы является изучение оптических и структурных свойств новых донорно акцепторных полимеров без фуллеренов и активных слоев, полученных с использованием таких полимеров без фуллеренов в различных условиях, а также выявление физических факторов оптимизации и повышения эффективности ПСЭ.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- исследование спектров поглощения и флуоресценции полимера D18, используемого в активном слое и являющегося основным компонентом ПСЭ, а также доноров D18-R, представляющих собой модифицированные структуры D18;

- изучение спектров удельного поглощения и флуоресценции, изображений рентгеновского анализа GIWAXS, а также морфологических свойств раствора и активных слоев, приготовленных путем смешивания донора D18 и вновь синтезированных доноров D18-R с акцептором L8-Bo, не содержащим фуллерены, с использованием изображений, полученных с помощью микроскопов;

- определение эффективности активных слоев по спектрам поглощения, морфологическим свойствам и дифракционным изображениям GIWAXS в подвергнутых термической обработке и полученных путем добавления дополнительных химических жидкостей к растворам, и смешиванием донора D18 и донора D18-R с акцептором L8-Bo, не содержащим фуллерен;

- определение оптимальных значений эффективности ПСЭ, и массового соотношения доноров-акцепторов в активном слое, приготовленном путем смешивания донора D18 и доноров D18-R с акцептором L8-Bo, не содержащим фуллеренов, типа и количества жидкости, добавляемой в раствор «донора-акцептор», а также способа и температуры термообработки;

- изучение спектров поглощения вновь синтезированных доноров PBB-TSA и PBB-TSD, PBB-TSA:IT-4F и PBB-TSD:IT-4F в растворе и тонкослойном состоянии. Сравнительное исследование фотоэлектрических параметров ПСЭ на основе данных по оптическим и структурным свойствам;

- исследование оптических свойств активного слоя PBB-TSD:Y6 с объемной гетероструктурой и активных слоев PBB-TSD:Y6 со слоистой структурой, исследование свойств диссоциации экситонов и подвижности зарядов в ПСЭ на основе таких активных слоев спектроскопическими и фотовольтаическими методами;

- исследование абсорбционных и флуоресцентных свойств активных слоев на основе новых бесфуллереновых акцепторов, синтезированных с использованием бесфуллеренового акцептора Y6, с целью снижения энергии связи экситона в бесфуллереновых акцепторах, а также оценка изменений энергии связи экситона с использованием абсорбционно-флуоресцентных свойств, полученных в различных условиях;

- спектроскопическая оценка растворимости новых синтезированных бесфуллереновых акцепторов серии Y6 в безгалогеновом растворителе толуоле, а также определение и сравнительный анализ фотоэлектрических параметров и термической стабильности ПСЭ на основе таких бесфуллереновых акцепторов.

Объекты исследования. Донор D18 и новые синтезированные доноры D18-R, L8-Bo, PBB-TSA, PBB-TSD, IT-4F, Y6 и бесфуллереновые акцепторы, синтезированные с использованием бесфуллеренового акцептора Y6.

Предмет исследования. Светопоглощающие и флуоресцентные свойства ПСЭ с активными слоями на основе вновь синтезированных доноров

или акцепторов, не содержащих фуллерены, механизм образования экситонов, процессы разделения экситонов и переноса заряда физические механизмы, термической обработки раствора или активного слоя с добавлением или без добавления химических веществ к растворам донора и акцептора, светопоглощение активных слоев на основе акцепторов, не содержащих фуллерены, процессы преобразования световой энергии в электрическую в ПСЭ.

Методы исследований. В диссертационном исследовании использовались такие методы, как оптическая спектроскопия, АСМ и ТЭМ микроскопия, GIWAXS дифрактометрия, методы измерения фотовольтаических параметров ПСЭ, метод получения слоев из раствора, состоящего из смеси доноров и акцепторов «спин-коатинг», нагрев химических веществ с помощью паров.

Научная новизна исследования:

- на основе изучения спектров поглощения исследовательских образцов новой серии донорных полимеров D18-R, синтезированных на основе D18 в растворе и тонкослойном состоянии, показано, что структуру можно модифицировать без значительного изменения интенсивности и спектра поглощения указанных полимеров;

- впервые получены объемные гетероструктурированные активные слои на основе бесфуллеренового акцептора L8-Bo с новыми донорными полимерами серии D18-R; показано, что вновь синтезированные донорные полимеры более эффективны с точки зрения оптических и фотоэлектрических параметров, чем донорный полимер D18. Состояние кристаллизации и агрегация активных слоев D18-R:L8-Bo можно контролировать по оптическим и фотоэлектрическим свойствам активных слоев, в том числе при термическом нагреве активного слоя;

- впервые получены образцы ПСЭ с архитектурой стекло/ITO/PEDOT:PSS/активный слой/PDINN/Ag на основе объемных гетероструктурированных активных слоев с использованием новых донорных полимеров и акцепторов, не содержащих фуллеренов; определены соотношение массовых долей донора и акцептора, тип и количество дополнительных растворителей, а также оптимальные температуры термической обработки для достижения высоких значений фотоэлектрических параметров этих ПСЭ;

- с помощью оптических и фотоэлектрических характеристик полимеров показана возможность достижения высоких значений V_{oc} без снижения поглощения доноров серии D18-R, полученных методом гибридной инженерии боковых цепей.

- впервые продемонстрирована возможность оценки эффективности переноса заряда и генерации экситонов в активных слоях PM:Y6, PM6:Y-C5Ch и PM6:Y-ChC5 на основе бесфуллеренового акцептора Y6 с помощью флуоресцентных характеристик. Предложена новая стратегия повышения эффективности и термической стабильности ПСЭ путем оптимизации

структуры активных слоев на основе новых акцепторов без фуллеренов и снижения энергии связи экситона акцепторов без фуллеренов;

- впервые показано, что новый акцептор Y-ChC5, не содержащий фуллерены, может повысить эффективность процессов разделения, транспорта и сбора зарядов в ПСЭ за счет снижения энергии связи экситона, при этом достигнуты ВКЭ выше 95% и наиболее высокое значение ЭПЭ в 19,1%;

- впервые изучены спектры поглощения новых донорных полимеров PBB-TSA и PBB-TSD; показано, что пики поглощения находятся при 543 и 589 нм в PBB-TSA и 538 и 578 нм в PBB-TSD, т.е. поглощения сдвинув на 40 нм по сравнению с донорными (BDT) и акцепторными (BBT) единицами;

- с помощью данных по поглощению и флуоресценции показано, что энергия связи экситона можно снижать за счет структурных модификаций акцептора Y6, не содержащего фуллерен, за счет чего уровень растворимости и оптические свойства в растворителях могут быть значительно улучшены;

- при сравнении оптических свойств слоистой структуры и объемной гетероструктуры на основе бесфуллереновый акцепторов PBB-TSD и Y6 установлено, что спектр поглощения активного слоя со слоистой структурой имеет незначительное смещение в красную область, что свидетельствует об улучшении молекулярного порядка бесфуллеренового акцептора Y6 и, в свою очередь, улучшает перенос заряда и тем самым положительно влияет на увеличение тока в активном слое со слоистой структурой;

- подтвержден механизм снижения интенсивности фотолуминесценция активного слоя за счет оптимизации сильного взаимодействия полимерного донора с акцептором, не содержащим фуллерен, и процесса диссоциации экситонов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

- получены активные слои на основе бесфуллеренового акцепторного полимера L8-Bo и новых донорных полимеров серии D18-R в различных условиях, а также изготовлены на их основе ПСЭ с архитектурой стекло/ITO/активный слой/PDINO/Ag. Достигнут максимальный рост ЭПЭ эффективности ПСЭ вплоть до 19,2%;

- разработаны методы оптимизации фотоэлектрических параметров ПСЭ путем изменения структуры донорных полимеров без влияния на спектр поглощения;

- разработаны методы обработки активных слоев для получения активных слоев с улучшенными характеристиками формирования и разделения экситонов, а также кристаллизации на основе вновь синтезированных доноров и акцепторов, не содержащих фуллерены; эффективность ПСЭ значительно повышена путем обработки активных слоев с использованием этих методов;

- результаты исследований показали, что правильный выбор структуры активного слоя с учетом типа доноров и акцепторов, количества добавок в раствор, приготовленной для активного слоя, а также определение методов термического нагрева являются важнейшими факторами повышения ЭПЭ ПСЭ для достижения оптимальных фотоэлектрических показателей;

- показано, что высокая эффективность поглощения света, генерации и разделения экситонов, а также высокие значения ЭПЭ ПСЭ в активных слоях, приготовленных методом и объемной гетероструктуры и послойным методом. Причем при правильном подборе донора и акцептора эффективность активных слоев, приготовленных методом послойной гетероструктуры, может быть лучше, чем у активных слоев, приготовленных методом объемной гетероструктуры;

- экспериментально показано, что по активные слои D18:L8-Bo и D18:PCBM и ПСЭ на их основе акцепторы без фуллеренов по всем оптическим и фотоэлектрическим показателям (интенсивность, спектр поглощения, диапазон длин волн, адаптивность доноров и другие) более эффективны, чем акцепторы, содержащие фуллерены;

- изучение спектров поглощения и флуоресценции активных слоев D18:L8-Bo и D18:PCBM показало, что на их основе можно создавать доноры и акцепторы, и эффективно управлять процессами агрегации, кристаллизации и разделения экситонов активных слоев;

- показано, что с помощью спектров поглощения и фотолуминесценция можно довольно точно оценить изменения энергии связи экситонов во вновь синтезированных акцепторах, не содержащих фуллеренов, а также степени их растворимости в галогенных растворителях.

Достоверность результатов исследований. Исследования спектров поглощения и флуоресценции вновь синтезированных донорных и акцепторных растворов, не содержащих фуллерены, или растворов, приготовленных из донорно-акцепторных смесей, а также тонких образцов активных слоев проводились на самых современных приборах с использованием методов, таких как оптическая спектроскопия, АСМ и ТЭМ микроскопия, для получения микроскопических изображений активных слоев, рентгеновский анализ GIWAXS для изучения структурного состояния активных слоев; на специальных эталонных приборах для измерения фотоэлектрических параметров ПСЭ. Результаты исследований оптических свойств и структурных параметров активных слоев, являющихся основными компонентами ПСЭ, а также эффективности ПСЭ базируются на принципах теоретического анализа и полностью согласуются с данными исследований других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость данной диссертационной работы основана на изучении физических особенностей получения активных слоев на основе вновь синтезированных донорных полимеров со структурой D18-R и акцептора L8-Bo, не содержащего фуллерен, изменений уровней поглощения света, агрегации и диссоциации экситонов, эффективности переноса заряда в активном слое в результате обработки активных слоев различными методами, а также взаимосвязи между упорядоченностью и кристаллизацией структур активных слоев. Кроме того, структура таких акцепторов, не содержащих фуллерены, изучена с точки зрения взаимосвязи между энергией связи

экситона, оптическими свойствами, а также эффективностью генерации и диссоциации экситонов.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что соотношение массовых долей вновь синтезированных донорных полимеров и акцепторов, не содержащих фуллерены, в активном слое, тип и количество дополнительных химических веществ, способы и температура нагрева активного слоя, могут быть использованы для улучшения результатов будущих разработок с целью широкого применения ПСЭ, путем достижения высоких значений ЭПЭ. При этом в дальнейшем возможно использование результатов предлагаемых научных исследований и методов получения эффективных ПСЭ для повышения фотоэлектрических параметров ПСЭ без ухудшения оптических свойств полимеров путем синтеза донорных и бесфуллереновых акцепторов для повышения эффективности ПСЭ.

Внедрение результатов исследования.

Результаты наших исследований в статье «Hammer throw-like hybrid cyclo and ally chains: A new side chain engineering for over 18% efficient organic solar cells», опубликованной в журнале Nano energy 101 (2022), были опубликованы в престижных зарубежных журналах (Energy & Environmental Science, 2024, 17, 1916, Advanced Materials 34(33), 2022, стр. 2204-718, Advanced Materials 35(10), 2023, стр. 2210-760, IF=25.81; Advanced Functional Materials, 33(28), 2023, стр. 2215-204, IF= 18.5; IF=25.81; Energy & Environmental Science 16, 2023, стр. 3416-3429 IF= 32.4;) Молекулярная структура, характеризующаяся оптимальным балансом гибкости и ее дополнительным влиянием на свойства диффузии и диссоциации экситонов внутри активного слоя, позволила объяснить изучаемые физические процессы.

В статье в журнале Advanced Materials говорится, что D18 был выбран в качестве донорного материала, а L8-BO — в качестве акцепторного материала, и что эти слои использовались для объяснения и интерпретации диапазона поглощения и спектральной ширины слоев.

В следующих цитатах также объясняется, что для донорных полимеров наблюдались расширенные энергии запрещенного поля, или уровни энергии LUMO, что позволяет предположить, что алкильная группа на основе циклогексана может использоваться в качестве внутренней боковой цепи для производных Y6.

Результаты наших исследований, представленные в нашей статье «Сопряженный полимер на основе бензобис(тиазола) с различными положениями боковой цепи алкилтиогрупп для эффективных органических солнечных элементов без фуллерена», опубликованной в журнале ACS Applied Materials & Interfaces (2021), согласуются с результатами этих статей, опубликованных в престижных зарубежных журналах (Advanced Materials 36, 3 2024, стр. 2306990, IF=25,81; ACS Applied Materials & Interfaces 15, 24, 2023, стр. 29643–29652, IF=8,5; Chinese Journal of Polymer Science 40, 2022, стр. 147–156, IF=4,1; International Journal of Quantum Chemistry 124, (1) 2024, стр. e27254, IF= 2,3;) Соединения BTZ часто демонстрируют сильные межмолекулярные π - π -связующие взаимодействия. и дальний порядок, и

использовался для получения и объяснения результатов исследований относительно низких потерь энергии и высокой эффективности в полимерных солнечных элементах.

Приведенные ниже выдержки используются для объяснения того, что производительность полимерных солнечных элементов (PSC) значительно улучшилась благодаря недавней разработке новых светособирающих материалов, а также того, что неструктурированные на основе фуллеренов акцепторы, такие как ITIC и Y6, которые используются в качестве материалов p-типа в PSC, обеспечивают дополнительное поглощение с помощью сопряженных полимеров p-типа и максимально увеличивают преобразование световой энергии в электрическую.

В приведенных ниже цитатах отмечается, что донорные (D)-акцепторные (A) полимеры, как тип p-сопряженных полимеров, имеют в своих полимерных цепях как электронные, так и дырочные транспортные структуры, которые использовались в исследованиях для эффективного повышения эффективности переноса заряда в оптоэлектронных устройствах.

Результаты наших исследований в статье «Низкая энергия связывания экситонов, вызванная стерическими препятствиями, позволяет создавать органические солнечные элементы с низкой движущей силой», опубликованной в журнале *Aggregate* (5) 2024, согласуются с результатами этих исследований, опубликованных в престижных зарубежных журналах (*Dyes and Pigments* 237 (2025) pp.112713, IF=4.1; *Physica B: Condensed Matter*, 701 (2025) pp.416952, IF=2.8; *Polymer Chemistry* 2025, 16, pp.475–483, IF=4.1; *Solar RRL* 2025, pp.1-9, IF=6;) за счет снижения энергии связи экситонов облегчается тепловая диссоциация экситонов на свободные носители заряда, тем самым увеличивая разделение и транспорт заряда, что, в свою очередь, использовалось для повышения эффективности преобразования энергии в фотоэлектрические устройства и полимерные солнечные элементы.

В следующих отрывках он используется для объяснения того, что быстрый перенос дырок от акцептора к донору D18-Cl, когда возбужденные экситоны диссоциируют на носители заряда в акцепторе, значительно увеличивает диапазон поглощения донорного полимера в диапазоне средних и коротких длин волн акцепторов, не содержащих фуллерен, и снижает потери энергии, что приводит к эффективности преобразования энергии более 20%.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на 20 конференциях, включая 11 международных и 9 республиканских научно-практических конференций.

Публикация результатов исследования. По теме диссертационного исследования опубликовано 38 научных работ, из которых 18 статей были опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. В том числе 12 статей опубликованы в авторитетных международных научных журналах, а 6 — в

местных научных журналах. Кроме того, материалы 20 докладов были опубликованы в сборниках международных и республиканских конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованных источников, а также включает в себя 105 рисунков и 13 таблиц. Общий объём диссертации составляет 220 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, ее соответствие приоритетным направлениям развития науки и техники республики, определены цель, задачи, объект и предмет исследования, указано соответствие диссертационной работы важнейшим направлениям развития науки и техники, дается обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации, установлены уровень изученности проблемы, научная новизна, практические результаты, достоверность результатов, теоретическая и практическая значимость, внедрение результатов в практику, публикации, сведения о структуре работы представлен обзор научных исследований, проведенных в нашей стране и за рубежом по теме диссертации.

В первой главе диссертации под названием **«История полимерных солнечных элементов, материалы для полимерных солнечных элементов» (обзор литературы)** представлен обзор теоретических и практических исследований по материалам, используемым в ПСЭ, этапам разработки ПСЭ, структуре ПСЭ, материалам, используемым в качестве активного слоя, типам донорных и акцепторных материалов, а также опто-структурным и фотоэлектрическим свойствам бесфуллереновых акцепторных полимерных солнечных элементов, механизмам перемещения фотогенерированных зарядов в активном слое. Описаны структурно-функциональная структура полимерных солнечных элементов и важность использования полимерных доноров/акцепторов без фуллеренов в активном слое, а также достижения и проблемы в этой области. Подробно проанализированы процессы образования экситонов и их разделения экситонов на свободные электроны и дырки в активном слое ПСЭ.

Во второй главе диссертации под названием **«Методы приготовления исследовательских образцов и измерения их оптических, структурно-морфологических и фотоэлектрических параметров»** приведены подробные сведения о процессах получения и обработки активных слоев на основе бесфуллереновых акцепторов, о методах приготовления ПСЭ, об устройствах и приборах для приготовления материалов, о специальных процессах приготовления полимерных солнечных элементов, об экспериментальных методах определения оптических, морфологических, структурных и фотоэлектрических свойств материалов.

В этой главе также представлена информация об особенностях методов, приборов, о процессах точных измерений, используемых для изучения спектров поглощения и морфологических изображений наноструктур активных слоев, а также структурных свойств тонких пленок. Кроме того,

подробно описаны формулы и методы анализа для определения характеристик поглощения и показателей кристалличности. Представлены формулы и экспериментальные методы определения фотоэлектрических параметров и значений подвижности зарядов готовых образцов фотоэлектрических ячеек.

В третьей главе диссертации «**Эффективность вновь синтезированных доноров на основе D18 и бесфуллереновых акцепторных ПСЭ на основе L8-Bo**» исследованы оптические свойства, морфологические и структурные свойства доноров на основе D18, бесфуллереновых акцепторов L8-Bo и активных слоев на их основе, приготовленных в различных условиях для использования в активных слоях перспективных ПСЭ, а также фотовольтаические параметры, внешняя квантовая эффективность и стабильность ПСЭ на основе данного активного слоя.

Впервые исследовано влияние структуры вновь синтезированных донорных полимеров, модифицированных из донора D18, на абсорбционные свойства. На рисунке 1(а и б) видно показаны, батохромные сдвиги в спектрах донорных полимеров с гибридной цепной структурой наблюдаемые как в растворе, так и в слоистом состоянии. Спектры поглощения этих донорных полимеров немного различаются как по интенсивности поглощения, так и по спектру. При этом форма спектров полимеров D18 и его модифицированных версий, D18-Ch, D18-C6Cp, D18-C6Ch и D18-C6Chp, в целом похожи.

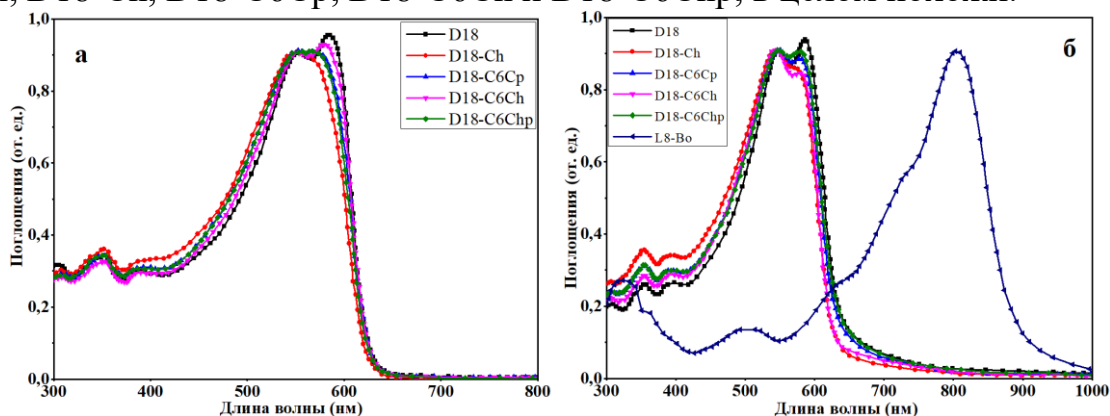


Рисунок 1. Спектры поглощения полимерных растворов (а) и слоев (б) состава D18 и D18

Все полимеры демонстрируют достаточно высокое поглощение в диапазоне 450–650 нм, что указывает на их высокую эффективность на этих длинах волн. Пики поглощения D18 и других полимеров расположены около 600 нм. И это указывает на соответствие максимума поглощения полимерами высокой световой энергии, что важно для эффективности в ЭКЭ. При анализе спектров поглощения небольшие различия между спектром D18 и его модифицированными формами (например, D18-C6Ch, D18-C6Cp), объяснены небольшими изменениями в их химической структуре.

Спектр поглощения полимерного слоя D18-Ch, содержащего только циклическую цепочечную структуру на рисунке 2b, практически не показывает плечевого пика, но для D18 с разветвленной цепочечной структурой имеется значительный плечевой пик, как и в спектре поглощения, измеренном в растворе, что указывает на то, что агрегация не является

оптимальной из-за стерического эффекта большой циклической цепи. Три полимера с гибридными циклическими и алкильными цепями (D18-C6Cp, D18-C6Ch и D18-C6Chp) демонстрируют умеренную интенсивность плечевого пика, что при сравнении с D18-Ch указывает, что стерический эффект сохраняется во всех трех полимерах, но пик поглощения D18 значительно снижен по сравнению с пиком поглощения полимера.

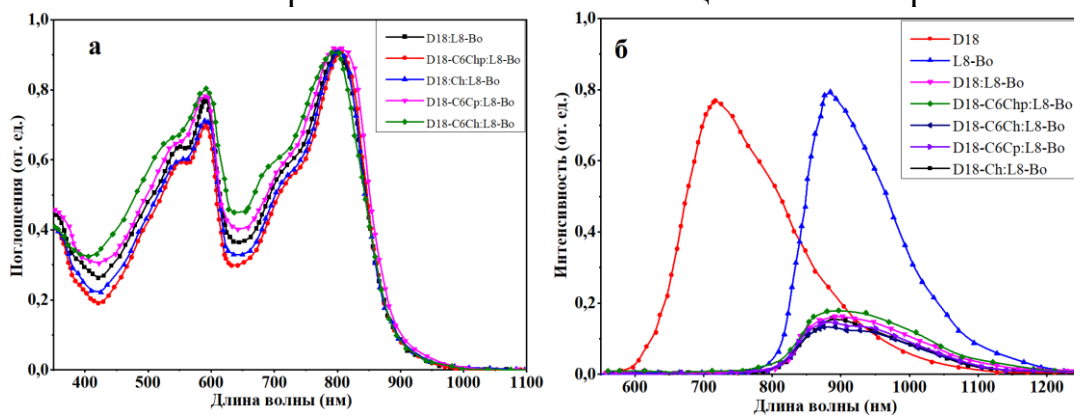


Рисунок 2. Спектры поглощения (а) и фотолюминесценция (б) активных слоев на основе D18 и полимерные доноры на основе D18.

На рисунке 2а представлены спектры поглощения активных слоев, полученных на основе смеси D18 и модифицированных им донорных полимеров с нефуллереновым акцептором L8-Bo. Прежде всего, если посмотреть на форму спектра поглощения на графике, то он демонстрирует хорошую интенсивность поглощения в диапазоне 400–900 нм во всех активных слоях. Спектр поглощения каждого активного слоя имеет выраженные пики поглощения на длинах волн около 600 нм и около 800 нм. Причина образования таких пиков становится очевидна, если взглянуть на спектр поглощения полимеров D18 и L8-Bo. Пики поглощения около 600 нм в спектре на рисунке 2а принадлежат полимеру D18, тогда как пик поглощения около 800 нм принадлежат акцептору L8-Bo. Анализируя спектр поглощения среди модифицированных версий донорных полимеров D18, D18-C6Ch:L8-Bo имеет самое сильное поглощение, особенно около 600 нм и 800 нм, показывая более высокое поглощение по сравнению с другими образцами. Интенсивность поглощения активного слоя D18-C6Chp:L8-Bo показывает самое низкое значение поглощения по сравнению с другими активными слоями, особенно в области длинных волн (800–900 нм). Интенсивность поглощения всех активных слоев существенно уменьшается на длинах волн выше 900 нм. Это означает, что ПСЭ на основе этих активных слоев не могут эффективно поглощать свет в дальнем инфракрасном диапазоне длин волн и, следовательно, не могут эффективно генерировать электроэнергию.

На рисунке 2б показаны спектры фотолюминесценции активных слоев на основе различных модификаций полимера D18 и акцепторов L8-Bo, и эти спектры фотолюминесценции сопоставлены со спектром фотолюминесценции донорного полимера D18 и акцептора L8-Bo. Спектр, показанный на рисунке 2б, представляет собой спектр фотолюминесценции чистого полимера D18.

Наибольшая интенсивность наблюдается около 700 нм, тогда как спектр фотолюминесценция активного слоя акцептора L8-Bo демонстрирует наибольшую интенсивность около 900 нм. Из этого спектра видно, что фотолюминесценция акцептора L8-Bo расположена на относительно больших длинах волн, чем фотолюминесценция донорного полимера D18. Мы объясняем это тем, что оптические ширины запрещенной зоны донора и акцептора различаются друг от друга.

Спектр фотолюминесценция активного слоя D18:L8-Bo отражает связь между компонентами D18 и L8-Bo. Снижение интенсивности обоих пиков (700 нм и 900 нм) и возникновение небольших дополнительных пиков, что указывает на наличие передачи энергии между компонентами.

Интенсивность фотолюминесценции активного слоя D18-C6Chr:L8-Bo, D18-C6Ch:L8-Bo, D18-C6Cr:L8-Bo и D18-Ch:L8-Bo значительно ниже, а спектры фотолюминесценции полимера D18 и его различных модифицированных структурных полимеров с разными модификациями акцептора L8-Bo различаются.

Определены фотоэлектрические параметры ПСЭ на основе активных слоев, изготовленных из полимерных доноров D18 и смесей на основе D18 и акцепторов L8-Bo. Наибольшая эффективность наблюдалась в слое D18-C6Ch:L8-Bo, при этом все параметры достигли высоких значений, а именно J_{sc} 25,46 мА/см², FF 78,7% и ЭПЭ 18,2%. В дополнение к вышеуказанным свойствам наблюдается эффективная диссоциация возбуждения, низкая рекомбинация заряда и сбалансированный перенос заряда, что позволяет получать высокоэффективный ПСЭ. Оптимизированный ПСЭ на основе D18-C6Ch:L8-Bo достиг значительную ЭПЭ 18,20%.

В четвертой главе диссертации под названием **«Оптические и структурные свойства активных слоев, полученных в различных условиях с использованием донорных полимеров PBB-TSA и PBB-TSD с акцепторами, не содержащими фуллеренов»** исследованы оптические свойства, морфологические и структурные свойства активных слоев на основе доноров PBB-TSA и PBB-TSD и акцепторов IT-4F и Y6, приготовленных в различных условиях, а также фотовольтаические параметры, внешняя квантовая эффективность и стабильность ПСЭ на основе данного активного слоя. Показано, что вновь синтезированные PBB-TSD и PBB-TSA способны понижать или повышать уровень энергии НОМО путем введения боковых цепей алкилирования в донорную и акцепторную структуры, соответственно, что обеспечивает их совместимость с различными акцепторами, не содержащими фуллеренов. На основании результатов анализа спектра поглощения показано, что при введении добавки DIO достигается фазовое разделение и молекулярное упорядочение, что приводит к улучшению подвижности дырок/электронов. Повышение эффективности активного слоя за счет добавления DIO было достигнуто путем изучения оптических свойств активных слоев.

На рисунке 3а показаны спектры поглощения света вновь синтезированными полимерами PBB-TSA и PBB-TSD. Интенсивные пики

поглощения при 375 нм и 368 нм для PBB-TSA значимы для переходов сопряженных π - π^* связей для PBB-TSD. Полосы поглощения на длинах волн более 450 нм, а также пики поглощения света при 543 и 589 нм для PBB-TSA и 538 и 578 нм для PBB-TSD можно объяснить сильным переносом молекулярного заряда между донорными (BDT) и акцепторными (BBT) единицами. Пики плеч спектров, полученных из раствора обоих полимеров, указывают на сильное агрегационное поведение. Интенсивность и форма спектра поглощения полимерных слоев, нанесенных на кварцевое стекло, показывают спектр поглощения, аналогичный спектру в растворе, однако в тонких полимерных слоях наблюдается красное смещение максимума поглощения.

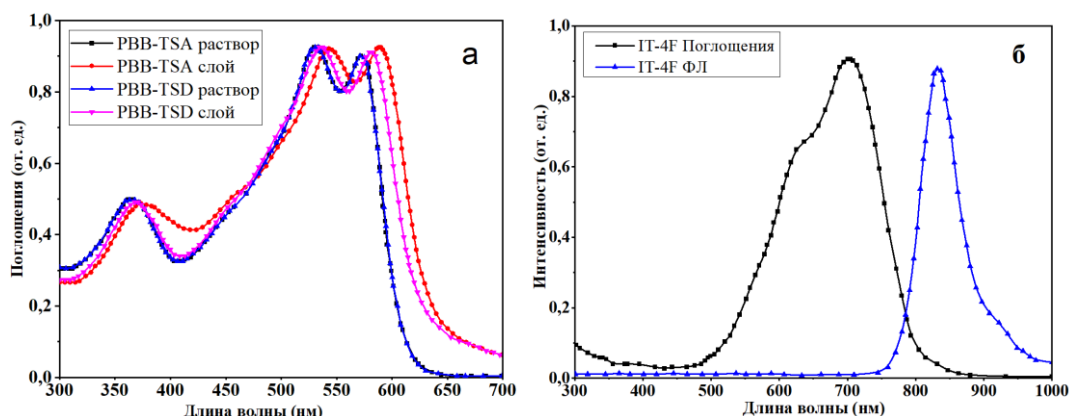


Рисунок 3. (а) Спектры поглощения донорных полимерных слоев PBB-TSA и PBB-TSD в растворе и в виде слоя, нанесенного на кварцевое стекло. (б) Спектр ФЛ акцепторного полимерного слоя IT-4F.

На рисунке 3б показаны спектры поглощения и ФЛ акцептора IT-4F, не содержащего фуллерен. Анализируя спектр поглощения IT-4F, можно увидеть, что диапазон длин волн поглощения составляет от 500 нм до 800 нм, что дополняет и расширяет спектральный диапазон поглощения донорных полимеров слоев PBB-TSA и PBB-TSD. Поскольку спектр поглощения донора имеет диапазон длин волн от 400 нм до 600 нм, а акцептор IT-4F имеет спектр поглощения в области от 500 нм до 800 нм, это обеспечивает то, что спектр поглощения активных слоев, приготовленных из смеси донора и акцептора, имеет значительно более широкий диапазон длин волн. Это в свою очередь приводит к повышению эффективности фотоэлектрических параметров ПСЭ. Если проанализировать спектр фотолюминесценция бесфуллеренового акцептора IT-4F, то максимум спектра фотолюминесценция наблюдается около 800 нм. Это означает, что потери энергии при переизлучении акцептора минимальны. Интенсивность фотолюминесценция может быть ниже спектра поглощения, что указывает на то, насколько эффективно акцептор излучает фотоны. Анализ спектров поглощения и фотолюминесценция акцептора IT-4F был необходим для определения его эффективности, механизмов потери энергии и потенциальных недостатков.

На рисунке 4а показан спектр поглощения активного слоя PBB-TSA:IT-4F и активного слоя PBB-TSA:IT-4F с добавлением DIO к раствору PBB-

TSA:IT-4F. Для сравнения спектров поглощения этих двух активных слоев также приведен спектр поглощения донорного слоя PBB-TSA. Видно, что оптимальный спектр поглощения активного слоя PBB-TSA: IT-4F без добавки DIO характеризуется пиком на длине волны 746 нм, а максимальное спектр поглощение активного слоя PBB-TSA: IT-4F с добавкой DIO достигается на длине волны 734 нм.

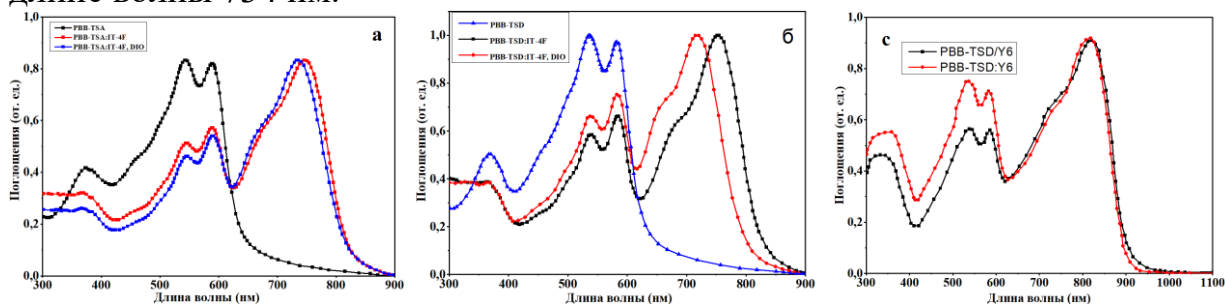


Рисунок 4. Спектры поглощения активных слоев (а) PBB-TSA:IT-4F и (б) PBB-TSD:IT-4F, (с) акцептора Y6 без фуллера в растворе и слоевых состояниях, полученные при различных условиях

Из этих двух спектров видно, что при введении добавки DIO максимальные пики PBB-TSA:IT-4F смещаются в сторону более коротких длин волн. В этом случае имеет более короткую длину волны, то есть сдвиг в синюю область, и величине сдвиг составляет 12 нм. Кроме того, при длинах волн ниже 600 нм интенсивность поглощения активных слоев, полученных из раствора с добавлением DIO, отличается от интенсивности поглощения активных слоев, приготовленных из раствора без добавления DIO. Например, если взять точку, соответствующую длине волны 545 нм, то два пика будут отличаться в 1,12 раза, а в точке, соответствующей длине волны 590 нм, они будут отличаться в 1,07 раза. Эти различия объясняются тем, что после добавления раствора DIO в структуру активного слоя донор и акцептор лучше смешиваются друг с другом, а результирующая морфология активного слоя улучшается, молекулы располагаются ближе друг к другу и плотнее. Пики поглощения, соответствующие длинам волн 545 и 590 нм донорного активного слоя PBB-TSA, различаются в 1,61 и 1,42 раза, соответственно. Это происходит потому, что при смешивании донора с акцептором, не содержащим фуллерен, в растворе для формирования активного слоя донор и акцептор образуют хорошую смесь друг с другом, а при формировании активного слоя структурные фазы перераспределяются, образуя оптимальный активный слой.

На рисунке 4б показан спектр поглощения активного слоя PBB-TSD:IT-4F и активного слоя PBB-TSD:IT-4F с добавлением DIO к раствору PBB-TSD:IT-4F. Для сравнения спектров поглощения этих двух активных слоев также приведен спектр поглощения донорного слоя PBB-TSD. Видно, что пик поглощения активного слоя PBB-TSD:IT-4F без добавки DIO расположен на длине волны 753 нм, а максимум спектра поглощения активного слоя PBB-TSD:IT-4F с добавкой DIO расположен на длине волны 717 нм. Из сравнения этих спектров поглощения видно, что при введении добавки DIO пики PBB-

TSD:IT-4F смещаются в сторону более коротких длин волн, при этом точка максимума смещается в сторону более коротких длин волн («синий» сдвиг) на 36 нм. Кроме того, как и в спектре поглощения активного слоя PBB-TSA:IT-4F, значение интенсивности поглощения активных слоев, полученных из раствора с добавлением DIO, при длинах волн ниже 600 нм отличается от интенсивности поглощения активных слоев, приготовленных из раствора без добавления DIO. Например, если взять пик, соответствующий длине волны 536 нм, то два пика будут отличаться по интенсивности в 1,19 раза, тогда как пик поглощения, соответствующий длине волны 582 нм, будет отличаться в 1,14 раза.

Если сравнить спектры поглощения акцептора Y6 в растворном и слоевом состояниях на спектрах рисунка 4в, то пик поглощения раствора Y6 соответствует длине волны 735 нм. Этот пик поглощения отражает индивидуальные оптические свойства молекул Y6 в растворе. В спектре поглощения слоя Y6 пик немного смещен в красную сторону, а значение пика поглощения соответствует длине волны 818 нм. Этот пик поглощения возникает из-за межмолекулярных взаимодействий в акцепторном слое Y6, т. е. π - π -упорядочения и упорядоченной структуры молекул.

Приведены структуры ПСЭ, полученных методами HGS и QQS с донором PBB-TSD и полимером Y6, не содержащим фуллерен. Из структур, представленных на рисунке, видно, что эти две структуры ПСЭ отличаются только структурой активного слоя (рисунок 6). Структурированный активный слой HGS был изготовлен методом центрифугирования с использованием раствора донорного и акцепторного полимеров в массовых соотношениях 1:1, 1:1,2 и 1:1,4. Активный слой, приготовленный методом HGS с донором PBB-TSD и полимером Y6, не содержащим фуллерен, готовят путем помещения донора и акцептора в одну емкость в массовых соотношениях и смешивания их в растворе. В активных слоях, приготовленных методом QQS (PBB-TSD/Y6) с донором PBB-TSD и полимером Y6, не содержащим фуллерен, сначала наносился раствор донора методом центрифугирования, а затем на слой донора методом центрифугирования наносился раствор акцептора.

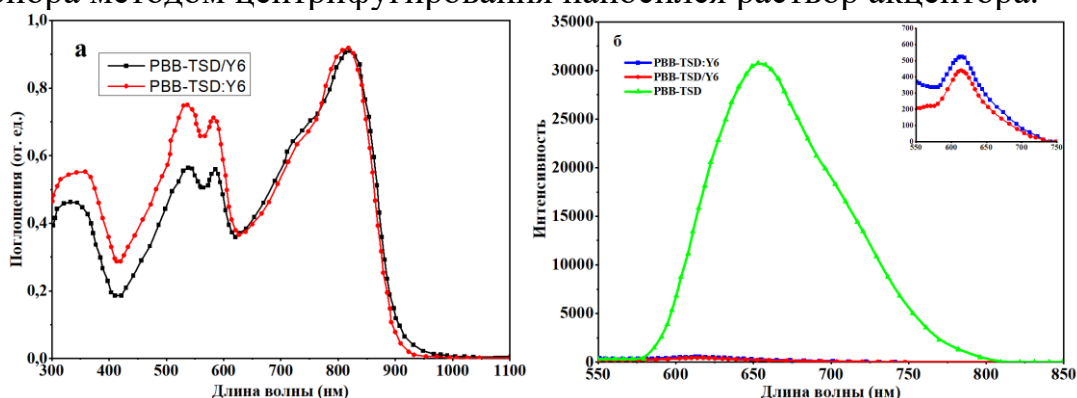


Рисунок 5. Спектры поглощения (а) и фотолуминесценция (б) донорных, а также послойных и объемных гетероструктурированных активных слоев PBB-TSD, полученных методом

На рисунке 5а представлены спектры поглощения активных слоев, изготовленных методами послойного и объемного гетероструктурирования на основе донора PBB-TSD и бесфуллеренового акцептора Y6. Из спектров поглощения видно, что как слоистый слой, так и активные слои объемной гетероструктуры имеют широкий диапазон длин волн поглощения от 300 до 1000 нм и имеют очень схожие графические формы. В коротковолновой области как двухслойных, так и объемных гетероструктурных активных слоев наблюдаются два четких пика поглощения при 540 нм и 585 нм, что указывает на сильное агрегационное поведение полимерного донора PBB-TSD в обоих активных слоях. Сравнивая оптические свойства послойного и объемного гетероструктурного активного слоя показано, что спектр поглощения послойного активного слоя имеет небольшое смещение в красную область, что свидетельствует об улучшении молекулярного порядка свободного от фуллерена акцептора Y6. Это, в свою очередь, улучшает перенос заряда и положительно влияет на увеличение тока в активных слоях с послойной структурой.

На рисунке 5б показаны спектры фотолюминесценции донора PBB-TSD, слой за слоем и объемных гетероструктурных активных слоев для выяснения процесса использования экситонов в активном слое. Донорный и активный слои PBB-TSD были облучены лазером на длине волны 560 нм для определения диссоциации экситонов и эффективности переноса заряда на границе донор-акцептор.

При исследовании ПСЭ с слой за слоем и объемного гетероструктурированного структурами на основе PBB-TSD и Y6 спектральные результаты поглощения и ФЛ активных слоев, полученные разными методами, показали, что оптические свойства слой за слоем активного слоя лучше. Это объясняется тем, что послойная структура активного слоя демонстрирует более упорядоченные молекулярные связи и желаемое вертикальное разделение фаз донор/акцептор, чем структура слой за слоем.

Для повышения эффективности PBB-TSA:IT-4F и PBB-TSD:IT-4F ПСЭ мы добавили 1,8-диодокан (DIO), хлорнафталин (CN) и дифениловый эфир (DPE) в качестве добавок в активные слои в различных малых концентрациях и проанализировали их фотоэлектрические параметры.

Фотоэлектрические параметры ПСЭ показали наилучшие результаты, т.е. значения J_{sc} и FF за счет оптимизации морфологии и оптических свойств активных слоев, как для ПСЭ на основе активных слоев PBB-TSD, так и для PBB-TSA. То есть оптимизированные ПСЭ на основе активного слоя PBB-TSD:IT-4F достигли самых высоких фотоэлектрических параметров при 0,89 В V_{OC} , 21,9 J_{sc} и 74,5% FF при 14,6% ЭПЭ.

Пятая глава диссертации «**Новые бесфуллереновые акцепторы серии Y6 для высокоэффективных полимерных солнечных элементов**». В пятый главе анализ оптических свойств вновь синтезированных бесфуллереновых акцепторов серии Y6 и показано, что наилучшие результаты дает акцептор Y-ChC5. Этот акцептор имеет наименьшую ширину запрещенной зоны (1,11 эВ),

что увеличивает его способность поглощать свет в более широком диапазоне. Образцы в виде раствора и тонкой пленки были измерены в диапазоне 300–1000 нм. Результаты показали, что Y-ChC5 имеет самый широкий спектр поглощения. Установлено, что «красное» смещение спектра поглощения в тонких слоях связано с усилением межмолекулярных взаимодействий и процессов агрегации. Исследованы спектры фотолюминесценции и обнаружено, что интенсивность фотолюминесценции резко снижается в активных слоях со смесями донора и акцептора. Это подтверждает разделение экситонов на заряды и эффективный электронный транспорт. В целом Y-ChC5 обладает наиболее оптимальными оптическими свойствами и оценен как наиболее перспективный бесфуллереновый акцептор для полимерных солнечных элементов благодаря своей высокой способности поглощать свет, низкой энергии связи экситона, эффективному разделению заряда и стабильности. Показано, что результаты исследования оптических свойств донорных и акцепторных полимеров и активных слоев на их основе подтверждаются фотоэлектрическими параметрами ПСЭ на основе полностью активных слоев.

Для исследования вновь синтезированных акцепторов, не содержащих фуллеренов, в качестве активных слоев были получены активные слои с донорным полимером PM6. На рисунке 6а показаны спектры поглощения и ФЛ слоя донорного полимера PM6. Спектр поглощения донорного полимерного слоя PM6 показывает демонстрирует высокую интенсивность поглощения в диапазоне 300–700 нм.

Пик поглощения донорного полимера PM6 находится при ~600 нм. Однако мы видим, что поглощение уменьшается в диапазоне 300–400 нм, а при более высоких длинах волн (700–900 нм) поглощение практически равно нулю. Пик спектра фотолюминесценции донора PM6 находится при 700 нм, что представляет собой основной пик фотонов, переизлучаемых донорным полимером при облучении. Относительно близкое совпадение спектра поглощения и спектра фотолюминесценции донорного слоя PM6 свидетельствует о высокоэффективных светоизлучающих свойствах полимера PM6.

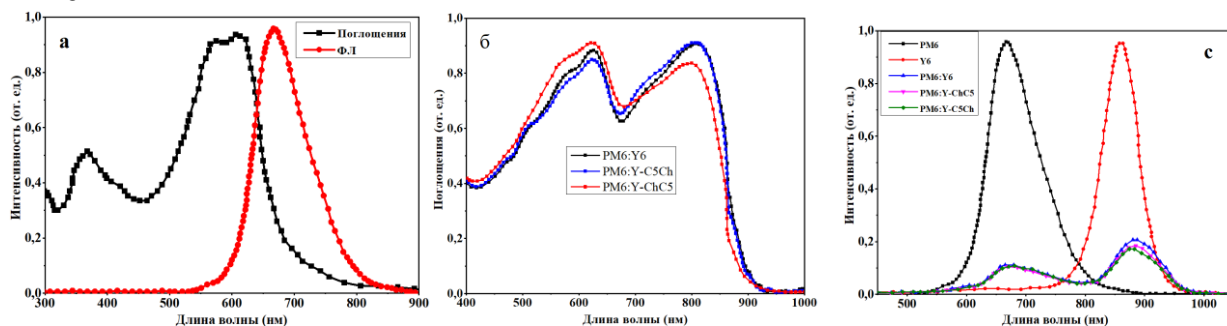


Рисунок 6. (а) Спектры поглощения и фотолюминесценции слоя донорного полимера PM6. (б) Спектры поглощения активных слоев PM6:Y6, PM6:Y-C5Ch и PM6:Y-ChC5. (с) Спектры фотолюминесценции слоев PM6, Y6 и активных слоев PM6:Y6, PM6:Y-C5Ch, PM6:Y-ChC5

Спектр фотолюминесценции донорного полимера РМ6 напрямую связан с эффективностью генерации экситонов, поскольку спектр фотолюминесценции отражает рекомбинацию и испускание экситонов в активных слоях. Видно, что максимальный пик спектра фотолюминесценции донорного слоя РМ6 расположен близко к пику спектра поглощения, что объясняется тем, что значительная часть поглощенных фотонов участвует в образовании экситонов и последующем излучении света. Для повышения эффективности генерации экситонов необходимо минимизировать дефекты в слое РМ6, применить стратегию, снижающую безызлучательные потери, например, подготовить активные слои на основе подходящих донорно-акцепторных пар, а также увеличить расстояние диффузии экситонов, что повышает эффективность слоя активного слоя.

Активный слой был получен с использованием вновь синтезированных акцепторов, не содержащих фуллеренов, и донора РМ6, и исследованы спектры поглощения их активных слоев, а именно РМ6:Y6, РМ6:Y-C5Ch и РМ6:Y-ChC5. На рисунке 6б представлены спектры поглощения активных слоев на основе трех акцепторов, не содержащих фуллерен. Сравнивая их спектры поглощения, можно видеть, что донор РМ6 имеет диапазон поглощения от 400 нм до 680 нм, а акцепторы Y6, Y-ChC5 и Y-C5Ch имеют диапазон поглощения от 680 нм до 900 нм.

Активный слой РМ6:Y6 демонстрирует высокое поглощение в диапазоне 600-900 нм. Анализируя график, можно увидеть, что спектры поглощения РМ6:Y6 и РМ6:Y-C5Ch практически одинаковы, а интенсивность фотолюминесценции слоев Y6 и Y-C5Ch в диапазоне длин волн от 680 нм до 900 нм выше интенсивности фотолюминесценции донорных слоев РМ6 в диапазоне длин волн от 400 нм до 680 нм.

На рисунке 6с представлены спектры фотолюминесценции слоев РМ6, Y6 и активных слоев РМ6:Y6, РМ6:Y-C5Ch, РМ6:Y-ChC5. Эти спектры фотолюминесценции были получены путем направления лазерного света с длиной волны 550 нм на активные слои. Глядя на график, мы видим, что слой РМ6 демонстрирует фотолюминесценцию -излучение на длинах волн от 580 нм до 820 нм с максимальным пиком при 690 нм. Интенсивность фотолюминесценции слоя Y6 наблюдалась в диапазоне длин волн 750-950 нм и формировала максимальный пик около длины волны 860 нм. Затем были измерены спектры фотолюминесценции активных слоев РМ6:Y6, РМ6:Y-C5Ch и РМ6:Y-ChC5. Из графика видно, что после добавления к донору РМ6 акцептора Y6 и производных акцептора Y6 Y-C5Ch, Y-ChC5 рекомбинация зарядов исчезла за счет разделения зарядов экситонов, а пик интенсивности фотолюминесценции резко уменьшился в несколько раз.

Анализируя фотоэлектрические характеристики ПСЭ на основе РМ6:Y6, напряжение холостого хода (V_{OC}) составило 0,847 В, плотность тока короткого замыкания (J_{SC}) составила 26,5 мА см⁻², коэффициент заполнения (FF) составил 74,3%, а ЭПЭ составил 16,7%. Фотоэлектрические результаты ПСЭ на основе активных слоев РМ6:Y-C5Ch составили напряжение холостого хода 0,86 В, плотность тока короткого замыкания 26,3 мА см⁻², коэффициент

заполнения 76,7% и ЭПЭ 17,4%. При этом напряжение холостого хода ПСЭ на основе активных слоев PM6:Y-ChC5 увеличилось на 0,897 В, плотность тока короткого замыкания на 26,8 мА·см⁻², коэффициент заполнения на 79,4%, а ЭПЭ на 19,1%.

В шестой главе «Спектроскопическое определение растворимости новых бесфуллереновых акцепторов серии Y6 в негалогеновых растворителях», показанд, что акцептор Y6 был модифицирован путем введения в его структуру атомов фтора и хлора на основе инженерии боковой цепи, что новые бесфуллереновые акцепторы C10ch-F и C10ch-Cl, полученные на основе Y6, более растворимы в толуоле, чем бесфуллереновый акцептор Y6, и что растворимость раствора бесфуллереновых акцепторов Y6, C10ch-F и C10ch-Cl в толуоле сильно отличается от растворимости бесфуллеренового акцептора Y6, то есть что свойство растворимости выше в соответствии с законом Бугера-Берра-Ламберта. В результате были определены значения концентрации насыщенных растворов акцепторов Y6, C10ch-F и C10ch-Cl (11 мг/мл, 21 мг/мл и 22 мг/мл). Результаты длин волн спектральных пиков ФЛ, полученные при различных температурах для растворов акцепторов Y6, C10ch-F и C10ch-Cl, не содержащих фуллерен, показали, что наилучшей растворимостью обладает акцептор C10ch-Cl, не содержащий фуллерен. Оптимизированная смесь донора и акцептора в толуоле (1:1,2 по массе, 7 мг/мл для донора) была добавлена с оптимальным количеством 0,5% DIO по объему раствора, и были изучены ее оптические свойства, структурные изменения и фотоэлектрические параметры.

На рисунке 7 представлены графические результаты, использованные для оценки спектра поглощения акцептора C10ch-Cl в толуоле с различными концентрациями и его растворимости. График состоит из двух частей, график слева отображает спектры поглощения растворов C10ch-Cl при различных концентрациях (2–10 мкг/мл). Анализируя спектры поглощения, можно отметить, что максимум поглощения приходится на длину волны около 700 нм, что согласуется с оптическими свойствами раствора акцептора Y6, не содержащего фуллерен.

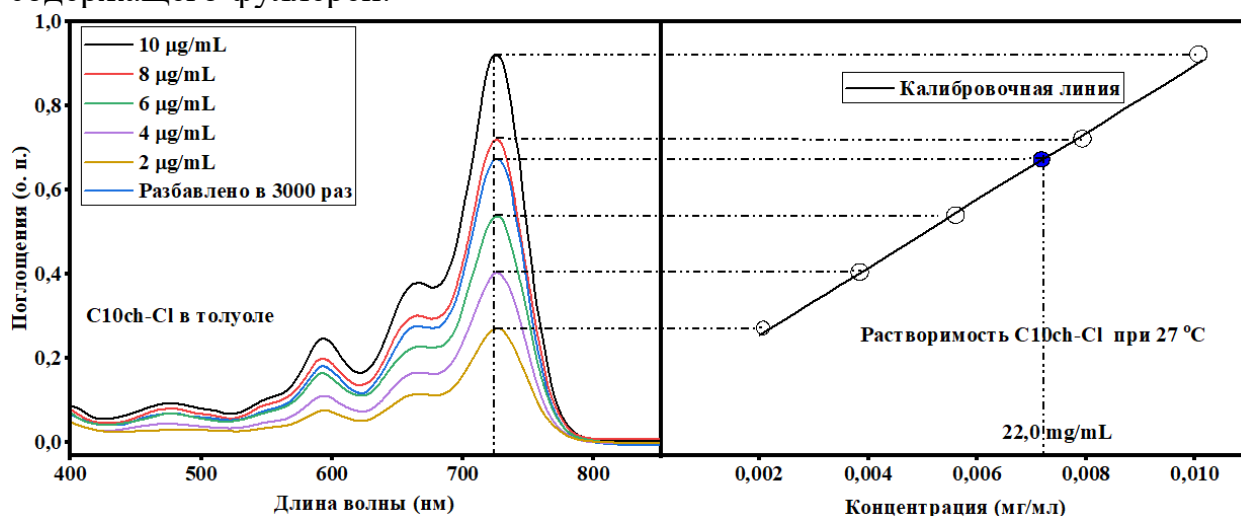


Рисунок 7. Спектр поглощения акцептора C10ch-Cl без фуллерена в толуоле при различных концентрациях

Согласно закону Бугера-Бера-Ламберта можно наблюдать, что интенсивность поглощения раствора C10ch-Cl увеличивается с увеличением концентрации. Калибровочную кривую строили на основе значений пиков поглощения растворов и их соответствующих концентраций. Для достижения уровня насыщения раствора акцептора Y6, не содержащего фуллерен, раствор перемешивали до тех пор, пока не отделились избытки осадков C10ch-Cl. В результате, когда раствор достигал порога выпадения осадка, рост концентрации прекращался, и измерялся спектр поглощения полученного раствора неизвестной концентрации. Для решения задачи измерения спектра поглощения неизвестной концентрации акцептора C10ch-Cl, не содержащего фуллерен, данный раствор был разбавлен в 3000 раз. Основной причиной 3000-кратного разбавления является необходимость точного измерения спектра поглощения высококонцентрированного раствора C10ch-Cl в оптическом диапазоне.

Оптимизированная смесь донора и акцептора в толуоле (1:1,2 по массе, 7 мг/мл для донора) была добавлена с оптимальным количеством 0,5% DIO по объему раствора, и были изучены ее оптические свойства, структурные изменения и фотоэлектрические параметры. Благодаря повышенной растворимости вновь полученных бесфуллереновых акцепторов в толуоле достигнуто повышение эффективности ПСЭ на основе активных слоев PM6:C10ch-F и PM6:C10ch-Cl в 1,6 раза (18,4%/11,4%) по сравнению с эффективностью ПСЭ на основе активного слоя PM6:Y6. Наибольшее значение ЭПЭ, 19,2%, было достигнуто для ПСЭ на основе активных слоев PM6:C10ch-F:C10ch-Cl.

Выводы

1. Из результатов спектров поглощения серии донорных полимеров D18-R в растворе и в тонких пленках показано, спектров поглощения донорных полимеров серии D18-R в растворном и тонкопленочном состоянии показано, что структура донорных полимеров серии D18-R, синтезированных на основе D18, может быть оптимизирована для ЭПЭ без изменения интенсивности и диапазон спектра поглощения.
2. Впервые показано, что объемные гетероструктурные активные слои на основе бесфуллеренового акцептора L8-Bo с донорными полимерами серии D18-R более эффективны по оптическим свойствам и фотоэлектрическим параметрам, чем донорный полимер D18.
3. Показано, что возможно достижение высокого значения Voc без снижения диапазона длин волн спектра поглощения и эффективности интенсивности, а также без снижения коэффициента поглощения в активных слоях на основе доноров серии D18-R, т.е. без снижения значения Jsc. В результате Jsc эффективность ПСЭ на основе активных слоев с донорами D18-R серии была увеличена с 16,7% до 18,2%.
4. Донор:IT-4F. На основании результатов спектров поглощения активных слоев был сделан вывод, что эффективность активных слоев более оптимальна при использовании добавки DIO для разделения фаз и

- упорядочения молекул по сравнению с другими добавками. Эти выводы также были подтверждены фотоэлектрическими параметрами ЭКЭ.
5. Показано, что при правильном выборе донорных и акцепторных полимеров оптические свойства активного слоя с послойной структурой будут лучше, чем результаты поглощения и спектральные характеристики ФЛ активных слоев с послойной и объемной гетероструктурой. На основании результатов спектров поглощения/ФЛ и фотоэлектрических параметров сделан вывод о том, что правильная стратегия выбора материала имеет важное значение для повышения эффективности активных слоев в виде послойных и объемных гетероструктур.
 6. Из результатов спектров ФЛ новых акцепторов Y-C5Ch и Y-ChC5 без фуллерена, а также из разделенных 0–0 и 0–1 гауссовых спектров спектров ФЛ акцепторов Y-C5Ch и Y-ChC5 без фуллерена, было доказано, что в акцепторах Y-C5Ch и Y-ChC5 образуется больше экситонов, чем в акцепторе Y6.
 7. При сравнении спектров фотолюминесценции (ФЛ) активных слоев с акцептором без фуллерена, содержащимся в составе активного слоя, было установлено, что интенсивность ФЛ обратно пропорциональна эффективности преобразования солнечной энергии (ПСЭ). Эта закономерность также наблюдается для активных слоев, основанных на синтезированных новых безфуллереновых акцепторах.
 8. Было показано, что из спектров ФЛ, зависящих от температуры, акцепторов, не содержащих фуллерен, можно с помощью формулы рассчитать, какой акцептор имеет наименьшую энергию связи экситона. В результате было доказано, что наименьшее значение E_b имеет акцептор Y-ChC5, не содержащий фуллерен, а акцептор Y6, не содержащий фуллерен, имеет в 1,5 раза меньшее значение E_b .
 9. Показано, что результаты оптических свойств донорно-акцепторных полимеров и активных слоев на их основе полностью подтверждаются фотоэлектрическими параметрами ПСЭ на основе активных слоев. Результаты проверки показывают, что активный слой на основе PM6:Y-ChC5 имеет лучшие оптические свойства, чем другие активные слои, и было достигнуто оптимальное значение эффективности преобразования энергии 19,2%.
 10. Достоверность результатов спектров поглощения активных слоев и фотоэлектрических результатов ПСЭ, то есть оптимальные фотоэлектрические параметры ЭПЭ на основе активного слоя с хорошим спектром поглощения неразрывно связаны друг с другом, была доказана результатами спектров ВКЭ ПСЭ.
 11. Было доказано, что значение ЭПЭ ПСЭ на основе PM6:акцепторов без фуллеренов было увеличено, и, кроме того, была достигнута их эффективность с точки зрения параметров стабильности. В результате было показано, что он сохраняет более 80 процентов своего значения

ЭПЭ после 1400 часов воздействия тепла и света при температуре 85 градусов.

12. Доказано, что спектры поглощения новых бесфуллереновых акцепторов C10ch-F и C10ch-Cl, полученных на основе акцептора Y6, по закону Бугера-Ламберта-Бера различаются по растворимости в толуоле в два раза по сравнению с бесфуллереновым акцептором Y6. Из результатов длин волн спектральных пиков ФЛ, полученных при различных температурах для растворов акцепторов Y6, C10ch-F и C10ch-Cl, не содержащих фуллерен, сделан вывод, что акцептор C10ch-Cl, не содержащий фуллерен, обладает наилучшей растворимостью, а результаты, полученные по закону Бугера-Ламберта-Бера, полностью подтвердились.
13. Было показано, что молекула хлора оказывает более сильное влияние на акцепторные свойства Y6, чем молекула фтора, обеспечивая более широкий диапазон поглощения и более высокую интенсивность. За счет повышения растворимости акцепторов в толуоле достигнуто увеличение эффективности ЭПК в 1,6 раза (18,4%/11,4%).
14. Наряду с улучшением растворимости, оптических и фотоэлектрических параметров бесфуллереновых акцепторов достигнуто 1,5 раз повышение термо- и светостойкости ПСЭ на основе новых бесфуллереновых акцепторов.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 ON AWARD
OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA AND
LASER TECHNOLOGIES NAMED AFTER U.A. ARIFOV**

**INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES
NAMED AFTER U.A. ARIFOV**

SAPARBAEV AZIZ ADAMOVICH

**OPTICAL STRUCTURAL AND PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF
ORGANIC SOLAR CELLS BASED ON SMALL MOLECULE DONOR-
ACCEPTORS**

01.04.05 – Optics

**Abstract
of doctoral dissertation (DSc) on physical and mathematical sciences**

Tashkent- 2025

The theme of doctoral dissertation (DSc) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science & Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2024.4.DSc/FM285.

Dissertation has been prepared at Institute of Ion-plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.iplt.uz) and on Information-education portal «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Scientific consultant:

Zakhidov Erkin Agzamovich

doctor of physical and mathematical sciences,
professor

Official opponents:

Makhmanov Urol Kudratovich

doctor of physical and mathematical sciences,
professor

Absanov Akhmad Abdusattorovich

doctor of physical and mathematical sciences,
associate professor

Shaislamov Ulugbek Alisherovich

doctor of physical and mathematical sciences,
associate professor

Leading organization:

Chirchik State Pedagogical University

The defense will take place on **“02” October 2025 at 14:30** at the meeting of scientific council number DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 at the Institute of Ion – plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, st. Durmon yuli 33. Tel./Fax: (99871) 262–32–54, e-mail: info@iplt.uz).

The doctoral dissertation is possible to review in Information-resource centre at the Institute of Ion – plasma and Laser Technologies (is registered № 11) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, st. Durmon yuli 33. Tel./Fax: (99871) 262–32–54, e-mail: info@iplt.uz).

The Abstract of the dissertation sent out on **“19” September 2025**.
(Mailing report №11 on **“19” September 2025**).



Kh.B. Ashurov

Chairman of Scientific Council on award of
scientific degrees, doctor of technical sciences,
professor

I.D. Yadgarov

Scientific secretary of scientific council on
award of scientific degrees, doctor of physical and
mathematical sciences, professor

U.K. Makhmanov

Chairman of scientific seminar under scientific
council on award of scientific degrees, doctor of
physical and mathematical sciences, professor

INTRODUCTION (Abstract of DSc dissertation)

Topicality and necessity of the thesis. The constant increase in global energy consumption today makes the development of cheap, sustainable, and renewable energy technologies an urgent issue. To address these challenges, new donor and acceptor polymers are being synthesized to increase the power conversion efficiency (PCE) of perovskite solar cells (PSCs). After initial attempts to synthesize new donor polymer materials for fullerene-containing acceptors proved unsuccessful, research shifted to a different approach—synthesizing fullerene-free acceptor materials suitable for new donor polymers.

Currently, newly synthesized donor/acceptor materials with optimized functional properties are being used in the active layer of PSCs, which are considered promising worldwide. Efforts to design and synthesize fullerene-free acceptors have increased, and PSCs based on these materials have achieved PCE performance exceeding 19%, nearly 2.5 times higher than that of PSCs based on fullerene-containing acceptors. However, despite the high PCE performance, there remain many unresolved issues, such as degradation caused by ultraviolet radiation, which can cause polymers to decompose and lose their properties when exposed to solar radiation. This negatively affects the service life of PSCs and reduces their efficiency. To overcome these challenges, research and development of new polymers with improved properties is considered a critical issue.

Conformity of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan. This dissertation is conducted in accordance with the priority areas of the development of science and technology in the Republic of Uzbekistan, specifically III - Development of Energy, Energy Resource Efficiency, Transport, Machinery, and Electronics' and II - 'Physics, Astronomy, Energy, and Engineering.

Review of international research on the topic of the dissertation Currently, a lot of research is being conducted around the world to develop and improve the efficiency of PSCs. In America, the University of Florida, Princeton University, University of Michigan, University of Cambridge, University of North Carolina and many other scientific research centers have conducted systematic research on creating new, promising materials for PSCs and increasing their PCE. In terms of obtaining significant results in research in the field of PSCs, universities in China and many institutes under the Chinese Academy of Sciences have maintained a clear leadership. For example, Jiangnan University, South China University of Technology, Peking University, Central South University, Wuhan University, Zhejiang University, Tianjin University, Nanjing Tech University, Suzhou University are among them.

Degree of problem study. Since the first papers on organic/polymer solar cells were published in 1995, a lot of scientific research and results have been obtained in the field of PQEs. In 2008, McNeill et al. synthesized the benzothiadiazole-based fullerene-free acceptor F8TBT and fabricated a P3HT:F8TBT active layer PQE with an EO of 1.2%. In 2009, Yan et al. synthesized the naphthalene diimide (NDI)-based fullerene-free acceptor N2200 and had a broad absorption spectral range covering

300–900 nm. In 2015, Zhang and his colleagues reported a new acceptor polymer material, ITIC. In the ITIC polymer, the LUMO energy level was lowered, the push-pull structure promoted molecular charge transfer, and the light absorption coefficient was increased, and the absorption wavelength range was also broadened. In 2015, McCulloch and colleagues synthesized a fullerene-free acceptor called FBR, demonstrating that this synthesis method allows for the synthesis of low-cost FBR materials. In 2018, Li and colleagues synthesized a D-A polymer donor called PTQ10. In the PTQ10 polymer, a thiophene- and difluoro-substituted quinoxaline was used as the donor and acceptor units, respectively. This polymer was shown to reduce the number of synthesis steps used to two, but the overall yield (cost of the synthesized polymer) was ~5–20 times higher than other polymer donors.

From 1998 to 2022, significant progress was made in improving the efficiency of polymer solar cells (PQEs) with fullerene-free polymers, increasing from 1.9% to 19.2%. Although polymer solar cells are a relatively new area of research in our republic, studies are being conducted at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, under the leadership of Professors Zakhidov E.A. and Kuvondikov V.O., and at the Institute of Polymer Chemistry and Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, under the leadership of Professor N.R. Ashurov. These institutions have achieved significant scientific results. In particular, M.Kh. Imomov has conducted research on and studied the structural degradation processes through the spectral properties of organic solar cells consisting of fullerene (PCBM) with a P3HT donor and fullerene-free ITIC acceptors.

The purpose of the dissertation work: The active and structural properties of the active layers of Akseeptor and Fullerene are to optimize the active and structural properties of polymers through various conditions and to identify physical factors to improve the efficiency of PSC.

Scientific novelty of the research work:

-It was shown through the absorption spectra of research samples of the new D18-R series of donor polymers synthesized on the basis of D18 in the solution state and in the thin layer state that the structure can be changed without changing the intensity of the absorption spectrum and the absorption wavelength range;

- for the first time, volumetric heterostructured active layers based on the fullerene-free acceptor L8-Bo with the new D18-R series donor polymers were obtained. The synthesized new donor polymers were shown to be more effective in terms of optical properties and photovoltaic parameters compared to the D18 donor polymer. The crystallization state and aggregation of the D18-R:L8-Bo active layers were shown to be good even without thermal heating of the active layer through the optical and photovoltaic properties of the active layers;

- For the first time, samples of PSCs consisting of glass/ITO/PEDOT:PSS/active layer/PDINN/Ag architecture were prepared based on volumetric heterostructured active layers obtained with new donor polymers and fullerene-free acceptor synthesized for the first time. Also, the ratio of donor and acceptor mass fractions, the type and amount of additional solvents, and the optimal temperatures during the thermal treatment process were determined to achieve high

photovoltaic values for these PSCs;

- It was demonstrated through optical and photovoltaic results of polymers that it is possible to achieve high V_{oc} without reducing the absorption spectrum of the D18-R series donors obtained by the hybrid side chain engineering method, the wavelength range and intensity efficiency, reducing the non-radiative recombination V_{oc} in the active layers, and reducing the absorption coefficient (without losing the J_{sc} value);

- for the first time, the charge transport and exciton generation efficiencies of new types of Y6, Y-C5Ch and Y-ChC5 active layers based on the fullerene-free acceptor Y6 were studied through fluorescence properties. A new strategy was proposed to improve the efficiency and thermal stability of PSCs by optimizing the structure of active layers based on new fullerene-free acceptors and reducing the exciton binding energy of fullerene-free acceptors;

- for the first time, it was shown that the new fullerene-free Y-ChC5 acceptor can facilitate highly efficient charge separation, transport, and collection processes in PSCs as a result of the decrease in exciton binding energy, and EQE above 95% and one of the highest PCE values of 19.1% were achieved;

- for the first time, the absorption spectra of the new PBB-TSA and PBB-TSD donor polymers were studied, and it was found that the absorption peaks at 543 and 589 nm for PBB-TSA and 538 and 578 nm for PBB-TSD, as well as the absorption bands at wavelengths greater than 450 nm, are associated with strong molecular charge transfer between the donor (BDT) and acceptor (BBT) units;

- It was shown through absorption and fluorescence spectral results that the exciton binding energy can be reduced through structural modifications of the Y6 fullerene-free acceptor, and the solubility level and optical properties in solvents can be further improved;

- When comparing the optical properties of the layered layer and bulk heterostructure active layers based on PBB-TSD and Y6 fullerene-free acceptors with the bulk heterostructure active layer, it was found that the absorption spectrum of the active layer with the layered layer structure has a slight red shift, which indicates the improved molecular order of the Y6 fullerene-free acceptor and, in turn, improves charge transfer and has a positive effect on the increase in current flow in the active layers with the layered layer structure;

- The reason for the decrease in the FL intensity of the active layers was confirmed by the optimization of the strong interaction between the polymer donor and the fullerene-free acceptor and the dissociation process of excitons.

Application of the research results.

Our research results in our article “Hammer throw-liked hybrid cyclic and alkyl chains: A new side chain engineering for over 18% efficiency organic solar cells” published in the journal Nano energy 101 (2022) have been published in prestigious foreign journals (Energy & Environmental Science, 2024, 17, 1916, Advanced Materials 34(33), 2022, pp. 2204718, Advanced Materials 35(10), 2023, pp. 2210760, IF=25.81; Advanced Functional Materials, 33(28), 2023, pp. 2215204, IF=18.5; IF=25.81; Energy & Environmental Science 16, 2023, pp. 3416-3429 IF=32.4;) The molecular structure, characterized by an optimal balance of flexibility

and its effect on exciton diffusion and dissociation properties within the active layer, allowed to explain the studied physical processes.

A citation in the journal *Advanced Materials* states that D18 for the donor material and L8-BO for the acceptor material were correctly chosen and used to explain and interpret the absorption region and spectral width of these layers.

Further citations also explain that the broadened band gap energies or LUMO energy levels were observed for the donor polymers, and that the cyclohexane-based alkyl group can be used as an internal side chain for Y6 derivatives.

Our research results presented in our article “Benzobis(Thiazole)-Based Conjugated Polymer with Varying Alkylthio Side-Chain Positions for Efficient Fullerene-Free Organic Solar Cells” published in the journal *ACS Applied Materials & Interfaces* (2021) are consistent with the results of these articles published in prestigious foreign journals (*Advanced Materials* 36, 3 2024, pp. 2306990, IF=25.81; *ACS Applied Materials & Interfaces* 15, 24, 2023, pp. 29643–29652, IF= 8.5; *Chinese Journal of Polymer Science* 40, 2022, pp.147–156, IF= 4.1; *International Journal of Quantum Chemistry* 124, (1) 2024, pp. e27254, IF= 2.3;) BTZ compounds often exhibit strong intermolecular π - π bonding interactions. and long-range ordering, and has been used to obtain and explain the research results on relatively low energy loss and high efficiency in polymer solar cell devices.

In the following excerpts, it is explained that the performance of polymer solar cells (PQEs) has been significantly improved due to the recent development of new light-harvesting materials, and that non-fullerene-structured acceptors such as ITIC and Y6, which are used as n-type materials in PQEs, provide additional absorption with p-type conjugated polymers and maximize the conversion of light energy into electrical energy.

In the following excerpts, it is explained that donor (D)-acceptor (A) polymers, as a type of p-conjugated polymers, have both electron and hole-transporting structures in the polymer chains, which has been used in research to effectively improve the charge transport efficiency in optoelectronic devices.

Our research results in our article “Steric hindrance induced low exciton binding energy enables low-driving-force organic solar cells” published in the journal *Aggregate* (5) 2024, published in prestigious foreign journals (*Dyes and Pigments* 237 (2025) pp.112713, IF=4.1; *Physica B: Condensed Matter*, 701 (2025) pp. 416952, IF= 2.8; *Polymer Chemistry* 2025, 16, pp. 475–483, IF=4.1; *Solar RRL* 2025, pp. 1-9, IF= 6;) facilitate the thermal dissociation of excitons into free charge carriers by reducing the binding energy of excitons, thereby increasing charge separation and transport, which in turn has been used to increase the energy conversion efficiency in photovoltaic devices and polymer solar cells.

In the following excerpts, it is used to explain that the rapid transfer of holes from the acceptor to the D18-Cl donor, as the excited excitons dissociate into charge carriers in the acceptor, significantly increases the absorption range of the donor polymer in the mid-range and the short-wavelength range of the fullerene-free acceptors, and reduces energy loss, leading to an energy conversion efficiency of more than 20%.

Publication of the results. A total of 38 scientific works have been published

on the topic of the dissertation, including 18 scientific articles—12 of which are in prestigious international journals and 6 in local scientific journals. Additionally, 20 conference papers have been published in the proceedings of international and national conferences.

Structure and volume of dissertation. The dissertation consists of an introduction, six chapters, a conclusion, 105 figures, 13 tables, and a reference list containing 202 sources. The total length of the dissertation is 220 pages.

E‘LON QILINGAN ISHLAR RO‘YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo‘lim (I часть; part I)

- 1A Zhiya Li, Xunchang Wang, Nan Zheng, Aziz Saparbaev, Jiayi Zhang, Cong Xiao, Shiyun Lei, Xufan Zheng, Manxue Zhang, Yuda Li, Biao Xiaoa and Renqiang Yang. Over 17% efficiency all-small-molecule organic solar cells based on an organic molecular donor employing a 2D side chain symmetry breaking strategy//*Energy & Environmental Science*, 15(10), (2022), 4338-4348. <https://doi.org/10.1039/D2EE02107B> (IF = 32.4)
- 2A Xunchang Wang, Cong Xiao, Xiaokang Sun, Aziz Saparbaev, Shiyun Lei, Mingrui Zhang, Tian Zhong, Zhiya Li, Jiayi Zhang, Manxue Zhang, Yun Yu, Biao Xiao, Chunming Yang, Renqiang Yang. Hammer throw-liked hybrid cyclic and alkyl chains: A new side chain engineering for over 18% efficiency organic solar cells//*Nano Energy*, 101, (2022), 107538. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107538> (IF = 16.8)
- 3A Ibrahim Oladayo Raji, Shuguang Wen, Yonghai Li, Da Huang, Xiaoyan Shi, Aziz Saparbaev, Chuantao Gu, Chunming Yang, Xichang Bao. Benzo bis (Thiazole)-Based Conjugated Polymer with Varying Alkylthio Side-Chain Positions for Efficient Fullerene-Free Organic Solar Cells//*ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(30), (2021), 36071-36079. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c07822> (IF = 8.33)
- 4A Yueyue Gao, Aziz Saparbaev, Yong Zhang, Renqiang Yang, Fengyun Guo, Yulin Yang, Liancheng Zhao. Efficient polymer solar cells based on poly (thieno {2, 3-f} benzofuran-co-thienopyrroledione) with a high open circuit voltage exceeding 1 V//*Dyes and Pigments*, 146, (2017), 543-550. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.07.057> (IF = 3.767)
- 5A Xin Liang, Shuai Zhang, Yuanwei Wu, Jiuxing Wang, Chunpeng Yang, Aziz Saparbaev, Shuguang Wen, Xichang Bao. Layer-by-layer solution-process enables higher crystallinity and desirable phase separation in non-fullerene organic solar cells//*Organic Electronics*, 107, (2022), 106560. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2022.106560> (IF = 3.2)
- 6A Yixuan Luo, Xunchang Wang, Manxue Zhang, Xiaokang Sun, Aziz Saparbaev, Shiyun Lei, Jiayi Zhang, Biao Xiao, Chunming Yang, Zhitian Liu, Renqiang Yang. High-Efficiency Semi-Transparent Organic Solar Cells Using Pentacyclic Aromatic Lactam-Containing Terpolymer Strategy for Eco-Friendly Greenhouse // Application. *Solar RRL*, 6(12), (2022), 2200679. <https://doi.org/10.1002/solr.202200679> (IF = 8.31)
- 7A Dong Han, Shuguang Wen, Kai Song, Jing Lv, Chunming Yang, Tao Zhuang, Aziz Saparbaev, Mingliang Sun, Xichang Bao. Benzobisthiazole and rhodanine based low energy level small molecule donors for organic solar cells // *Dyes and Pigments*, (2024), 112564. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2024.112564> (IF = 4.15)
- 8A Tianyu Hu, Xufan Zheng, Cong Xiao, Junchi Su, Aziz Saparbaev, Ming Wan, Jingnan Wu, Huimin Xiang, Yun Yu, Ergang Wang, Xunchang Wang, Renqiang Yang. Composite side chain induced ordered preaggregation in liquid state for high-performance non-halogen solvent processed organic solar cells // *Nano Energy*, 130, (2024). 110172. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110172> (IF = 16.8)
- 9A Tianyu Hu, Xufan Zheng, Ting Wang, Aziz Saparbaev, Bowen Gao, Jingnan Wu, Jingyi Xiong, Ming Wan, Tingting Cong, Yuda Li, Ergang Wang, Xunchang Wang, Renqiang Yang. Steric hindrance induced low exciton binding energy enables low-driving-force organic solar cells // *Aggregate*, 5(5), (2024). e632. <https://doi.org/10.1002/agt2.632> (IF = 13.9)
- 10A Xin Jing, Xuebing Li, Yong Zhao, Quanliang Wang, Xiao Kang, Xiaojie Liu, Aziz Saparbaev, Feng Li, Mingliang Sun. Effects of Additional Flexible and Rigid Structure on BDT-BDD Terpolymer and the Performance of Organic Solar Cells // *Polymers*, 17(2), (2025), 248. <https://doi.org/10.3390/polym17020248> (IF = 4.9)
- 11A Yurong He, Wentao Miao, Tianyu Hu, Junchi Su, Aziz Saparbaev, Ming Wan, Jingnan Wu, Yuda Li, Huimin Xiang, Ergang Wang, Xunchang Wang, Renqiang Yang. Siloxane

Decorated Water-Obstructing Guest for Efficient Air-Processed OSCs//*Advanced Science*, (2025), 2412190. <https://doi.org/10.1002/advs.202412190> (IF = 14.3)

- 12A Yuchen Liao, Huimin Xiang, Tianyu Hu, Aziz Saparbaev, Xufan Zheng, Ming Wan, Jingnan Wu, Yating Xie, Shiqi Hu, Qi Xiao, Biao Xiao, Ergang Wang, Xunchang Wang, Renqiang Yang. Dual Liquid Rubber Matrix Based Highly Efficient and Mechanically Robust Layer-by-Layer Organic Solar Cells//*SusMat*, 2025; 0:e70005 <https://doi.org/10.1002/sus2.70005> (IF = 18.7)
- 13A Saparbayev Aziz Adamovich, Ro'ziyev Farid Murtoza o'g'li, Turg'unboyev Abror Yulchi o'g'li, Imomov Muhibjon Xabibjonovich. PBB-TSD va Y6 polimerlarga asoslangan polimer quyosh elementlarining xossalarini tadqiq qilish // *NamDU ilmiy axborotnomasi*–2023-yil_9-son. ISSN 2181-0427 B 19-25.
- 14A Э.А. Захидов, А.А. Сапарбаев. Разработки и ключевые проблемы в области полимерных солнечных // «Узбекский физический журнал», №4 (2023). С 60-67
- 15A Aziz Saparbayev, Abror Turg'unboyev, Farid Ro'ziyev, Muhibjon Imomov, Sanobar Reymbayeva, Hamida Ibragimova. D18 va D18-C6CH donor polimerlarning optik va fotovoltaiik xususiyatlari // *O'zMU xabarlari*, 2024,(3/1) ISSN2181-7324 B 504-507.
- 16A Saparbayev A.A. D18 Donor polimer va turli akseptorlar bilan olingan faol qatlamlarning optik xossalari // *Scientific reports of Bukhara state university* 2024/10 (115), B. 113-119.
- 17A Saparbayev A.A. D18 Donorning strukturasi modifikatsiya qilib olingan yangi donor polimerlarning optik xossalari // *O'zMU* 2024
- 18A Saparbayev A.A. Y6-Seriyali fulleren bo'lmagan akseptorlar va ular asosidagi faol qatlamlarning optik xossalari // *NamDU* 2024, 11-son B. 76-80

II Bo'lim (II часть; part II)

- 19A Shu Wen, A.Saparbaev, Benzobisthiazole based conjugated polymers for organic solar cells / *International Conference on Physical Electronics. IPEC-8*, 23-24-September Tashkent-2021. pp.165-166.
- 20A L.R Nurumbetova, Sh.A Saidqulova, A.A Saparbayev. Donor va akseptor materiallarning va ular aralashmasi asosidagi quyosh elementlardagi faol qatlamlar samaradorligini spektroskopik tadqiq qilish / *Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo'tkazgich materiallar II xalqaro ilmiy anjumani*. 2021 - yil 19-20 noyabr, TDTU.134-137 b.
- 21A Shuxratova L.O', Saparbaev A.A, Ruziev F.M. PTBFDPPD va PBDTPDP asosidagi Quyosh elementlarining fotovoltaiik parametrlarini o'rganish / “Ilmiy tadqiqotlar sammiti” (Scientific research summit) Toshkent 2022 yil 22 fevral.
- 22A A Yu. Turgunboev, I.R. Boynazarov, L.O'. Shuxratova, Sh.A.Saidqulova, A.A. Saparbaev. Turli sharoitlarda tayyorlangan PBB-TSD va PBB-TSA asosidagi organik quyosh elementlarining fotovoltaiik parametrlari / *O'zMU* 22-fevral, 2022 yil Toshkent. Respublika ko'p tarmoqli ilmiy sammit materiallari to'plami II qism, 931-934 b.
- 23A Jo'rayeva Sh.A, Saparbayev A.A. P3HT va ITIC moddalar asosidagi faol qatlamlar strukturasiining spektroskopik tahlili / *international scientific forum Uzbekistan*, Tashkent – 22.06.2022. 236-237 b.
- 24A Jo'rayeva Sh.A., Nurumbetova L.R, Saparbayev A.A. “Polimer quyosh elementlarining degradatsiya ta'sirida parametrlarining o'zgarishining spektroskopik tahlili” / *Respublika ilmiy-amaliy konferentsiyasi*, Navoiy, 2022-yil 24-noyabr, 483-484-485-betlar.
- 25A F.M. Ro'ziyev, A.Y. Turg'unboyev, B.G'. Xidirov, I.R. Boynazarov, A.A. Saparbayev. Turli usulda “spin coating” qilingan polimer faol qatlamlarning optik xossalari / “Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari” mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani. Namangan 2023 yil, 12-aprel. B.51-53
- 26A Saparbayev A.A, Turg'unboyev A.Y, Ro'ziyev F.M, Quvondikov V.O. O'zaro har xil nisbatli donor-akseptor ega faol qatlamlarning yutilish hamda fotoluminessensiya spektrlari / “Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy

- muammolari” mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani. 2023-yil. 12-aprel Namangan. B.71-73
- 27A Turg'unboyev A.Y., Saparbaev A.A., Quvondikov V.O., Ro'ziyev F.M. P₃HT:PCBM asosli faol qatlamlarining turli xil sharoitlardagi yutilish spektrlari va fotoluminessensiya intensivliklari / Yarimo'tkazgichlar va polimerlar fizikasi, nanotexnologiya sho'balaridagi ma'ruzalarga asoslangan 2-TOM Optika va lazer fizikasi, Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni (RIAK-XVI-2023), 28-29-aprel 2023-yil B.92-95
 - 28A Erkin Zakhidov, Aziz Saparbaev, Vakhobjon Kuvondikov. Nonfulleren based conjugated polymers for organic solar cells / 3d International conference on nanophotonics, metamaterials and photovoltaics (ICNMP-2023), Samarkand (Uzbekistan) from the 23d to the 27th of May 2023 P.11-12
 - 29A Turg'unboev A.Y., Saparbayev A.A., Quvondiqov V.O., Samarali organik quyosh elementlarini olishda fulleren bo'lmagan akseptorlarning o'rni / International scientific conference of oung scientists. 2023. P.200-202.
 - 30A Zaxidov E.A., Saparbayev A.A. Polimer quyosh elementlari uchun tarkibida fulleren bo'lmagan (fullerensiz) akseptor materiallar. “Optika va lazer fizikasining muammo va istiqbollari” ilmiy-amaliy konferensiyasi, 2023-yil 26 oktyabr, Toshkent, O'zbekiston, B 23-24
 - 31A A.Y. Turg'unboyev, I.R. Boynazarov, F.M. Ro'ziyev, V.O. Quvondiqov, A.A. Saparbayev. D18-C6Ch:L8-Bo asosli yangi stukturali fulleren bo'lmagan organik quyosh elementlari / O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining 80 yilligiga bag'ishlangan “Optika va lazer fizikasining muammo va istiqbollari” ilmiy-amaliy konferensiyasi, 2023-yil 26 oktyabr, Toshkent, O'zbekiston, B 140-141
 - 32A Ro'ziyev F.M, Saparbaev A.A, Turg'unboyev A.Y, Boynazarov I.R. Polimer quyosh elementlar uchun fulleren asosli materiallar / O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasining 80 yilligiga bag'ishlangan “Optika va lazer fizikasining muammo va istiqbollari” ilmiy-amaliy konferensiyasi, 2023 yil 26 oktyabr, Toshkent, O'zbekiston. B 43-44
 - 33A Saparbayev A.A. Turg'unboyev A.Y. D18 asosidagi donor va L8-Bo akseptor faol qatlamga ega polimer quyosh elementlarning optik va fotovoltaiik parametrlari / Fizika fanining rivojida istedadli yoshlarning o'rni” Respublika ilmiy-amaliy konferensiya (RIAK-XVII-2024), O'zMU, 5-6-aprel, B326-329
 - 34A A.Y Turg'unboyev, A.A Saparbaev, V.O. Quvondikov, F.M. Ro'ziyev, I.R. Boynazarov. Spektroskopik usuldan foydalanib organik quyosh elementlari uchun samarali P₃HT:PC₆₁BM asosli faol qatlam olish / Zarafshon vohasini kompleks innovatsion rivojlantirish yutuqlari, muammolari va istiqbollari v-xalqaro ilmiy-amaliy anjumani. 18-19 April, 2024 Navoi, Uzbekistan, B 325-327.
 - 35A Turg'unboyev A.Y, Saparbaev A.A, Quvondiqov V.O, Tajiboyev I.I, Boynazarov I.R. Har xil sharoitda olingan P₃HT:PC₆₁BM faol qatlamlarning optik xossalari / Ninth international conference on physical electronics IPEC-9 october 3-4 2024, Tashkent, Uzbekistan, pp. 133-134.
 - 36A Saparbayev Aziz Adamovich, Otaqulova Nilufar Farxod qizi. Turli haroratlarda tayyorlangan D18 donor polimer eritmasining yutilish spektrlari / Kogerent optika va lazer fizikasining dolzarb muammolari» mavzusida xalqaro ilmiy-amaliy anjuman. B.489-492
 - 37A Saparbayev A.A. D18 donor polimer qatlamlarning optik xossalari / “Fizikaning zamonaviy muammolari va rivojlanish istiqbollari” I xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya, 22-23 oktabr, 2024-yil Namangan. B. 398-399
 - 38A Saparbayev A.A, Otaqulova N.F. D18:PC₇₁BM va D18:L8-Bo polimer faol qatlamlarning yutilish spektrlari "Fizikada, energetika va issiqlik texnikasining zamonaviy muammolari" birinchi xalqaro ilmiy-texnik konferensiya, Samarqand, 5-dekbar 2024, 187-188.

Avtoreferat «O‘zMU xabarlari» jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.

Bosmaxona litsenziyasi:



9338

Bichimi: 84x60 $\frac{1}{16}$. «Times New Roman» garniturası.
Raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i: 3,75. Adadi 100 dona. Buyurtma № 29/25.

Guvohnoma № 851684.
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Beruniy ko‘chasi, 83-uy.