

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.05/2025.27.12.FM/T.09.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

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

BOYNAZAROV ILHOM RUSTAM O'G'LI

**CsFAMA ASOSIDAGI PEROVSKIT QUYOSH ELEMENTLARI OPTIK,
FOTOVOLTAIK XUSUSIYATLARI HAMDA BARQARORLIGIGA CPTU
VA TCEP PASSIVLOVCHI MODDALARINING TA'SIRI**

01.04.05 – Optika

**fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2026

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
физико-математическим наукам**

**Contents of the dissertation abstract of Doctor of Philosophy (PhD) on
physical-mathematical sciences**

Boynazarov Ilhom Rustam o'g'li

CsFAMA asosidagi perovskit quyosh elementlari optik, fotovoltaik xususiyatlari
hamda barqarorligiga CPTU va TCEP passivlovchi moddalarining ta'siri.....3

Бойназаров Илхом Рустам угли

Влияние пассивирующих материалов CPTU и TCEP на оптические,
фотоэлектрические свойства и стабильность перовскитных солнечных
элементов на основе CsFAMA.....22

Boynazarov Ilhom Rystam ugli

Effect of CPTU and TCEP passivating materials on the optical, photovoltaic
properties and stability of CsFAMA-based perovskite solar cells.....43

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works.....47

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.05/2025.27.12.FM/T.09.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

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

BOYNAZAROV ILHOM RUSTAM O'G'LI

**CSFAMA ASOSIDAGI PEROVSKIT QUYOSH ELEMENTLARI OPTIK,
FOTOVOLTAIK XUSUSIYATLARI HAMDA BARQARORLIGIGA CPTU
VA TCEP PASSIVLOVCHI MODDALARINING TA'SIRI**

01.04.05 – Optika

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2026

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.3.PHD/FM1369 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya 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 rahbar:	Quvondiqov Vahobjon Ortiqovich fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim
Rasmiy opponentlar:	Rahmatullayev Ilyos Arzimurodovich fizika-matematika fanlari doktori, professor Urolov Shamsiddin Zayniddinovich fizika-matematika fanlari falsafa doktori (PhD), katta ilmiy xodim
Yetakchi tashkilot:	Chirchiq Davlat Pedagogika Universiteti

Dissertatsiya himoyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti huzuridagi DSc.05/2025.27.12.FM/T.09.01 raqamli Ilmiy kengashning 2026 yil "17" fevral 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 (№ 26/1 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 2026 yil "5" fevral kuni tarqatildi.
(2026 yil "5" fevral dagi № 26/1 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 (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va tadqiqotlarning zaruriyati. So'nggi yillarda perovskit quyosh elementlari (PQE) fotovoltaika sohasida inqilobiy texnologiya sifatida namoyon bo'ldi. Tarkibiy muhandislik va qurilma arxitekturasidagi so'nggi yutuqlar natijasida bu elementlar 27% gacha samaradorlikka erishdi. Ammo PQE larning nurlanish, kislorod, namlik va issiqlik ta'sirida tez degradatsiyaga uchrashi ularning sanoat miqyosida qo'llanilishini cheklab kelmoqda. Shu sababli tadqiqotchilar bu muammolarni yumshatish uchun bir qator texnologiyaviy yondashuvlarni ishlab chiqdilar.

Hozirda dunyoda tadqiqotchilarning yangicha yondashuvlari hamda inkapsulyasiya texnologiyalari yordamida PQE ning barqarorligi 9000 soatdan o'ttirilgan. Lekin transport qatlam sifatida metall oksidlarini qo'llanilishi natijasida ulardagi kislorodning ajralib chiqishi hamda migratsiyasi perovskit barqarorligini cheklab kelmoqda.

Bugungi kunda O'zbekistonda ham perovskit quyosh elementlarining fundamental nazariyasi, ularning samaradorligi hamda barqarorligini oshirish uchun katta hajmdagi tadqiqotlar olib borilmoqda. Xususan, CsFAMA asosidagi PQE samaradorligi 23% ga, barqarorligi esa 3250 soatgacha yetkazilgan. Lekin uzoq muddat barqaror hamda yuqori samaradorlikka ega arzon perovskit quyosh elementlarini yaratish dolzarb masala bo'lib turibdi.

Mazkur dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019 yil 22 avgustdagi PQ-4422 sonli "Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishning tezkor chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-4422 sonli, 2017 yil 26 maydagi "2017 - 2021 yillarda qayta tiklanuvchi energetikani yanada rivojlantirish, iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohada energiya samaradorligini oshirish chora-tadbirlari dasturi to'g'risida"gi PQ-3012 sonli qarorlari, 2019 yil 21 maydagi O'zbekiston Respublikasining 539-sonli "Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish to'g'risida"gi qonuni, 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 Farmonida belgilangan vazifalarni amalga oshirishda 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 asbobsozligi rivojlanishi" va II - "Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik" kabi ustuvor yo'nalishlariga muvofiq ravishda bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Planar strukturali PQE sohasidagi tadqiqotlar Koreyalik Park N.G. va Angliyalik G. Snait tomonidan ilk bor 2012 yilda boshlanganiga qaramasdan, qisqa vaqt ichida PQE samaradorligi 27% ga etdi. Oxirgi yillarda mazkur sohada dunyo miqyosida juda ko'plab salmoqli ilmiy va

amaliy natijalarga erishildi. 2013-2014 yillarda perovskitlarning degradatsiyasi sabablari chuqur tadqiq qilina boshlandi. Olimlar, ayniqsa, yo'qotilgan atomlar (Pb^{2+} vakansiyalari), ortiqcha yod ionlari yoki organik kationlarning (MA) noto'g'ri taqsimlanishi kabi defektlarning rekombinatsiyani kuchaytirishini ko'rsatdi. 2014 yili Oksford universitetining Snayt (Snaith) guruhi perovskit qatlamlarga xlor (Cl^-) qo'shilmalarini kiritganda samaradorlik 15% dan 20% gacha ko'tarilishini e'lon qildi. Cl^- ionlari Pb^{2+} vakansiyalarini to'ldirib, kristall panjarasini barqarorlashtirdi. Bu defekt passivatsiyasining yorqin misoli bo'ldi. SHu yili, Lyuis kislotalari (masalan, TiCl_4) va Lyuis asoslari (piridin) defektlarni passivatsiya qilishda samarali ekanligi aniklandi. 2015-yildan boshlab, perovskitlar uchun o'ziga xos passivatsiya usullari keng tarqala boshladi. Tadqiqotchilar asosan organik va noorganik passivatorlarni o'z ichiga oluvchi ikki ustuvor yo'nalish sifatida ajratishdi. 2015 yili Seok (Janubiy Koreya) guruhi CsBr va RbCl qo'shilmalarini kiritganda perovskitlarning barqarorligi va samaradorligi (20% dan ziyodga) oshirildi. Bu ionlar donachalar chegaralarida to'planib, defektlarni passivlaydi va elektron o'tkazuvchanlikni yaxshilash imkonini berdi. 2016 yili Grätzel guruhi feniletilammoniy yodid (PEAI) ni passivator sifatida ishlatishi natijasida u perovskit yuzasidagi Pb^{2+} vakansiyalariga bog'lanib, zaryadlar rekombinatsiyasini kamaytirdi va natijada 22% samaradorlikka erishildi. 2017 yildan boshlab, nanotexnologiyalar perovskitlardagi defektlarni boshqarishda muxim rol o'ynay boshladi. 2D/3D geterostrukturalarni yaratish (masalan, $\text{BA}_2\text{MA}_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$) defektlarni cheklash imkonini bergan. 2D qatlam 3D perovskitni suv va kisloroddan himoya qilish birgalikda, donachalar chegaralaridagi defektlarni passivatsiya qilgan. 2018 yili Massachusetts texnologiyalari instituti tadqiqotchilari grafen oksidini passivator sifatida qo'llab barqarorlikni 1000 soatgacha oshirdilar.

Mazkur sohada O'zbekistonda ham O'zR FA Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida prof. E. Zaxidov jamoasi, Polimerlar kimyosi va fizikasi institutida prof. N. Ashurov rahbarligidagi guruh, Samarqand davlat universitetida A. Zaxidov, E. Kurtalievlarining boshchiligidagi jamoalar bir qator tadqiqotlar olib borib muhim ilmiy-amaliy natijalarga erishishgan. Xususan, N. Ashurov organik perovskitlar, A. Saparbaev noorganik perovskitlarni samaradorligini oshirish, I. Tajibayev perovskit quyosh elementlari faol qatlam strukturaviy defektlarining ularning optik va fotovoltaik xususiyatlariga ta'siri, L. Nurimbetova CsPbI_3 va CsPbIBr_2 perovskitlarini barqarorligini oshirish yuzasidan tadqiqotlar olib borgan.

2020 yildan boshlab bugungi kungacha tadqiqotchilar real ekspluatatsion sharoitlar ta'sirida PQE degradatsiyasi mexanizmlarini o'rganish va bartaraf etish yuzasidan tadqiqotlar olib bormoqdalar. Bundan tashqari, sanoat miqyosida ishlab chiqarish uchun oson va masshtablashtirish imkoniyatlariga ega texnologiyalarni rivojlantirish ustida ham tadqiqotlar olib borilmoqda. Ammo bir necha funksional guruhga ega va perovskitda uchrovchi defektlarni passivatsiya qilish qobiyatiga ega moddalar qo'llangan holda va bir vaqtda bir necha texnologiyani qo'llab perovskit barqarorligini oshirish va uning optik, strukturaviy, fotovoltaik va barqarorlik parametrlarini korrelyasion o'rganish yuzasidan tizimli tadqiqotlar

mavjud emas. Shu sababli mazkur muammolarni bartaraf etish bo'yicha chuqur tadqiqotlar o'tkazish talab etiladi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqotlari O'zR FA Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida amalga oshirilayotgan FL-9024093524 sonli fundamental loyihasi, hamda davlat dasturi bo'yicha 2021-2025 yillarda olib borilayotgan "Yorug'lik energiyasini qayta o'zgartiruvchi tabiiy va sun'iy tizimlardagi fotomajburiy zaryadlar tashilish jarayonlarini o'rganish" mavzusidagi fundamental tadqiqot ishlari, Shimoli-g'arbiy politexnika universiteti va I. Karimov nomidagi TDTU bilan hamkorlikda amalga oshirilayotgan AL-8724053061 sonli O'zbekiston-Xitoy hamkorlikdagi (2025-2026 yy) loyihasi, Nanjing Tech universiteti va O'zR FA Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti bilan hamkorlikda amalga oshirilayotgan AL-8724053065 sonli O'zbekiston-Xitoy hamkorlikdagi (2025-2026 yy) loyihasi doirasida amalga oshirildi.

Dissertatsiya ishining maqsadi: [4-(carbamoithioylamino)phenyl]thiourea (CPTU) bilan hajmiy passivatsiya hamda Tris(2-carboxyethyl)phosphine hydrochloride (TCEP) bilan interfeys injeneriyasi yordamida CsFAMA perovskit quyosh elementlari samaradorligini hamda uzoq muddatli barqarorligini oshirishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

CsFAMA perovskit faol qatlam tarkibiga CPTU funksional molekulasini kiritish orqali strukturadagi defektlarni passivatsiya qilaolish mexanizmlarini aniqlash;

perovskit samaradorligi va barqarorligiga salbiy ta'sir qiluvchi I_2/I_3^- holatlari, yodning dissosiatitsiyasi hamda superoksid reaksiya kanallarini CPTU yordamida bloklash mexanizmini optik usullar yordamida tadqiq qilish;

CPTU funksional molekulasini yordamida hajmiy passivatsiya qilish strategiyasini qo'llab CsFAMA asosli PQE samaradorligi va barqarorligini oshirish;

optik usullar yordamida TCEP ning nikel oksidi (NiO_x) va [4-(3,6-dimethyl-9H-carbazol-9yl)butyl]phosphonic acid (Me-4PACz) o'rtasida paydo bo'luvchi bog'lanishlarni aniqlash hamda interfeysida hosil bo'luvchi defektlarini passivatsiyalash mexanizmlarini tadqiq qilish;

TCEP bilan modifikatsiyalash yordamida perovskit - NiO_x interfeysida zaryadlarning eksraksiyasini optik usullar orqali baholash;

TCEP yordamida NiO_x sirtidagi defekt holatlarini reduksiyalash hamda NiO_x /TCEP/Me-4PACz samarali strukturasi ishlab chiqish orqali kislorodning perovskitga zararli ta'sirini kamaytirish hisobiga PQE barqarorligini oshirish.

Tadqiqot obyekti CsFAMA perovskit faol qatlamlari, NiO_x va TCEP bilan modifikatsiyalangan NiO_x transport qatlamlari, CPTU molekulasini hamda u bilan passivatsiyalangan perovskit faol qatlami hamda ular asosidagi quyosh elementlari hisoblanadi.

Tadqiqotning predmetini PQE larining fotoelektrik va optik xususiyatlari, tuzoq holatlar dinamikasi, CsFAMA perovskiti optik va fotoelektrik xususiyatlari, CPTU molekulasi bilan hajmiy passivatsiyalangan CsFAMA perovskitining fotoelektrik xossalari va barqarorligi, shuningdek ushbu perovskit asosida tayyorlangan PQE lar tashkil etadi.

Tadqiqot usullari. PQE larini tayyorlashda spin-coating, antierituvchi, sirt va struktura modifikatsiyasi hamda termik ishlov berish usullari qo'llanilgan. Materiallarning kristall tuzilishi va morfologiyasini tahlil qilish uchun XRD, SEM, AFM usullaridan foydalanilgan. Optik va elektron xususiyatlar UV-Vis yutilish, in situ UV-Vis yutilish, statsionar fotolyuminessensiya, TRPL, Raman, IQ-Furye, UPS hamda XPS spektroskopiyalari yordamida tadqiq qilindi. Qurilmalarning elektr-fotovoltaiik parametrlarini baholashda $J-V$ xarakteristikasi, EQE, SCLC, elektrokimyoviy impedans spektroskopiyasi, Mott-Shotki tahlillari ishlatildi. Bu orqali samaradorlik, gisterezis indeksi, defektlar zichligi va energetik holatlar aniqlandi. Barqarorlik sinovlari halqaro standart usullar orqali o'tkazilib, qurilmalarning termik va ekspluatasion barqarorligi baholandi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagi natijalardan iborat:

ilk bor UV-Vis yutilish spektrlari tahlilidan I_3^- ning 288 nm va 352 nm, I_2 ning 503 nm pik o'zgarishi dinamikasidan CPTU moddasining yodid oksidlanish reaksiyalarini bostirishi, ya'ni yodning I_2/I_3^- holatlari CPTU tomonidan reduksiyalanishi aniqlandi.

CsFAMA fotolyuminessensiya spektri piki 787 nm dan CPTU qo'shilgandan so'ng 783 nm gacha 4 nm "ko'k siljishi" hamda intensivligini 3 martadan ko'proqqa ortishi orqali perovskit dona chegaralaridagi sayoz galogenid vakansiyalari/antisayt nuqsonlari kamayganini va lokal ta'sirlar zaiflashganini ko'rsatib berildi.

birinchi marta CPTU molekulasi CsFAMA perovskitlarda yod superoksidlanish reaksiyalarini bostiruvchi va defektlarni passivatsiya qiluvchi modifikator sifatida qo'llanildi, hamda CsFAMA perovskitini hajmiy passivatsiya qilish yordamida qurilmaning EO'S 20.74% dan 22.97% gacha oshirildi, ekspluatatsion barqarorligi esa 1000 soatda 84% saqlanishiga erishildi.

FTIR spektrlaridagi TCEP ning C=O guruh piki 1725 cm^{-1} dan 1709 cm^{-1} ga qizil siljishi, Me-4PACz dagi P-OH guruh tebranishi $\sim 940\text{ cm}^{-1}$ dan 929 cm^{-1} ga siljishi orqali TCEP NiO_x defektlarini passivlashtirishi hamda Me-4PACz o'zaro Van-der Vals bog'lanishi yordamida interfeysni yaxshilashi mexanizmlari ochib berildi.

birinchi marta Raman spektrlarida $\sim 930\text{ cm}^{-1}$ atrofida $\text{P}=\text{O}\cdots\text{Ni}$ koordinasion piki paydo bo'lganligi orqali TCEPO ning NiO_x yuzasiga kimyoviy integratsiyasi eksperimental jihatdan ko'rsatib berildi.

statsionar fotolyuminessensiya va TRPL tahlillari asosida TCEP modifikatsiyasidan so'ng fotolyuminessensiya intensivligi pasayishi va zaryad tashuvchilarning yashash vaqti 395 ns dan 306 ns gacha qisqarishi kuzatildi. Natijada perovskitdan NiO_x ga zaryadlarning eksraktsiyasi 1.3 marta orttirildi.

birinchi marta TCEP molekulasini $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ interfeysini modifikatsiya qiluvchi reduktant va passivator sifatida qo'llanildi, hamda $\text{NiO}_x/\text{TCEP}/\text{Me-4PACz}/\text{CsFAMA}$ perovskit strukturasida 26.34% samaradorlikka va 9369 soatlik (T_{80}) ekspluatatsion barqarorlikka erishildi. Bu amaldagi CsFAMA PQE lari uchun rekord ko'rsatkich hisoblanadi.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

CPTU molekulasini bilan perovskit faol qatlamini modifikatsiya qilish orqali yodning oksidlanish reaksiyalarini samarali bostirish, defekt holatlarini passivatsiya qilish va nurlanishsiz rekombinatsiyani keskin kamaytirishga erishildi. Natijada qurilmaning EO'S 20.74% dan 22.97% gacha oshdi, gisterezis indeksi 6.02% dan 2.18% gacha pasaydi va ishlash barqarorligi 1000 soatda 84% EO'S saqlanishi bilan ta'minlandi.

TCEP molekulasini yordamida $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ interfeysini modifikatsiya qilish interfeys defektlarini passivatsiyalab, zaryad tashuvchilarning ekstraktsiyasini yaxshiladi. Optimal 0.3 mg/mL TCEP konsentratsiyasida qurilma samaradorligi 26.40% ga yetdi, gisterezis 2.09% gacha pasaydi va barqaror ish rejimida uzoq muddat 9370 soat davomida quvvat saqlanishi ta'minlandi. Bu natijalar PQE ni sanoat miqyosida qo'llash uchun yangi qadam bo'lishi mumkin.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot natijalarining ishonchliligi bir nechta ilmiy asoslangan omillar bilan ta'minlangan bo'lib, ular quyidagicha izohlanadi: Har bir turdagi perovskit quyosh elementlari uchun 20 ta mustaqil qurilma tayyorlanib, ularning parametrlari statistik tahlil qilindi. Bu ma'lumotlar natijalarning tasodifiy emasligini, balki qayta ishlab chiqarishda ham takrorlanuvchan va barqaror ekanligini ko'rsatdi. Natijalarni tasdiqlash uchun bir nechta mustaqil zamonaviy tahlil usullari qo'llanildi. Barcha tadqiqotlar xalqaro standartlar asosida olib borildi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Ilmiy jihatdan asoslangan holda CPTU orqali optik passivatsiya mexanizmi - Pb-S va $\text{N-H}\cdots\text{I}$ bog'lanishlar orqali nurlanishsiz rekombinatsiya kanallarini to'suvchi va energiya yo'qotishni kamaytiruvchi tizim modellari taklif etildi. NiO_x interfeysining TCEP orqali reduksiya mexanizmi, defekt passivatsiya, va energetik sathlarning moslanish modeli tavsiflandi hamda perovskit–metall oksid interfeyslarini injenerlash uchun yangi konsepsiya ishlab chiqildi.

Dissertatsiyaning amaliy ahamiyatini esa CPTU molekulasini bilan perovskit faol qatlamini modifikatsiya qilish orqali yodning oksidlanish reaksiyalarini samarali bostirish orqali PQE larning ishlash barqarorligi 1000 soatda 84% EO'S saqlanishi hamda TCEP bilan NiO_x reduksiyalash natijasida PQE barqarorligini 9370 soatgacha oshirilganligi tashkil etadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinganligi.

CsFAMA asosidagi perovskit quyosh elementlari optik, fotovoltaiik xususiyatlari hamda barqarorligiga CPTU va TCEP passivlovchi moddalarining ta'siri qiyosiy taxlillari bo'yicha olingan ilmiy natijalari asosida:

perovskit quyosh elementlarining standart bir quyosh nurlanishi (AM 1.5 G) ostida eng yuqori va o'rtacha fotovoltaiik parametrlari aniqlash hamda statistik

baholash metodlaridan; perovskit quyosh elementlarining fotovoltaik parametrlari orqali ularning uzoq muddatli ekspluatatsion barqarorligini test qilish metodlaridan I.A.Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universitetida f.-m.f.d., prof. Ayupov Q.S. rahbarligida 2021-2025 yillarda olib borilgan № Ф-ОТ-2021-497 “Fotoelektrik issiqlik batareyalari asosidagi quyosh kogeneratsion qurilmalarini yaratishning ilmiy asoslarini ishlab chiqish” nomli fundamental loyiha ilmiy-texnikaviy vazifalarini bajarishda foydalanilgan. Ilmiy natijalardan fotoelektrik stansiyalarning energetik parametrlarini hisoblash, ishlab chiqarilayotgan elektr energiyasining sutkalik va oylik dinamikasini hisoblashning matematik modelini tuzishda samarali foydalanilgan.

TCEP moddasidan foydalanilgan holda kovak teshik tashuvchi qatlamdagi nuqsonlarni passivatsiya qilish usuli Xitoy Xalq Respublikasining Nanjing Texnologiya Universiteti (Kelajak texnologiyalari maktabi, Moslashuvchan elektronika yo’nalishi) da professor Sunsun Li rahbarligida 2023–2025 yillar mobaynida amalga oshirilgan BE2022023 raqamli loyiha doirasida organik quyosh elementlarini tayyorlashda qo’llanilgan. Ushbu yondashuvni amalda tatbiq etish qurilma samaradorligini 2% ga oshirish va 100 soatgacha ishlash barqarorligini yaxshilash imkonini bergan.

CsFAMA asosidagi perovskit quyosh elementlari optik, fotovoltaik xususiyatlari hamda barqarorligiga TCEP passivlovchi moddasining ta’siriga oid ilmiy natijalardan xorijiy jurnallardagi maqolalarda (*Journal of Alloys and Compounds*. 2025. V.1049. p.185407, IF=6.3; *ACS Photonics*. 2025, (ASAP) IF=6.7; *ACS Applied Materials & Interfaces*, V.17(42), p.58973-58982. IF=8.3) NiO_x/perovskit interfeysini modifikatsiya qilish, zaryadlar tashilish jarayonini yaxshilash, perovskit qurilma barqarorligi va EO’S ni oshirish strategiyasi sifatida foydalanilgan. Ilmiy natijalardan foydalanish PQE barqarorligi va samaradorligini oshirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya tadqiqotining asosiy natijalari 5 ta, shu jumladan 2 ta xalqaro va 3 ta respublika ilmiy amaliy anjumanlarida ma’ruza va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya tadqiqotlari davomida olingan natijalar asosida 9 ta ilmiy ish chop etilgan. O’zR OAK tomonidan fizika-matematika fanlari bo’yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 5 ta ilmiy maqola, jumladan, 2 tasi xorijiy nufuzli ilmiy jurnallardagi maqolalar, 3 tasi mahalliy ilmiy jurnallarda chop etilgan maqolalar. Shuningdek, 4 ta ma’ruza materiallari xalqaro va respublika konferensiya to’plamlarida chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to’rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro’yxati, hamda 43 ta rasm va 7 ta jadvaldan iborat bo’lib, dissertatsiya hajmi 130 betni tashkil etadi.

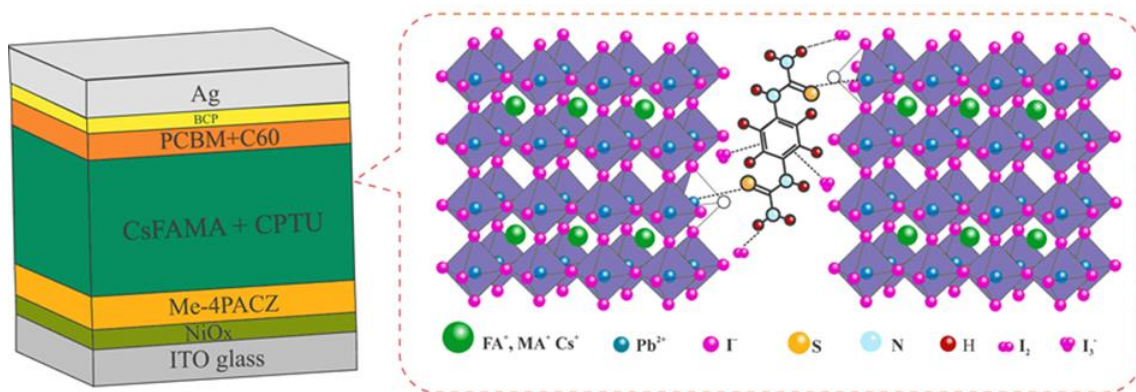
DISSERTATSIYNING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va tadqiqotlarning zaruriyati asoslangan. Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi, dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy guruhlar va tadqiqotchilarning ilmiy ishlari sharhi, mavzuning o'rganilganlik darajasi tag'lil qilingan. Mavjud va yechilmagan muammolarga asoslangan holda tadqiqotning maqsadi, vazifalari, ob'ekti, predmeti va tadqiqotlarda foydalanilgan usullar shakllantirilgan. Olingan natijalarning ilmiy yangiligi, amaliy ahamiyati, natijalarning ishonchliligi, ilmiy va amaliy ahamiyati hamda amaliyotga joriy qilinganligi batafsil yoritilgan. Dissertatsiya ishi doirasida chop etilgan ilmiy ishlar, natijalarning approbatsiyasi, ishning tuzilishi va dissertatsiya hajmi to'g'risida ma'lumotlar keltirilgan.

“CsFAMA perovskitini passivatsiya qilish: samaradorlik va barqarorlikni oshirish strategiyalarining kompleks tahlili” nomli birinchi bobda perovskit strukturasi, turli tarkibiy qismlari, ko'p tadqiq qilingan perovskit materiallar va ularning parametrlari haqidagi tadqiqotlar tahlil qilingan. PQE faol qatlamda uchrovchi defektlarning turlari, ularning qurilmaning parametrlariga ta'siri va ahamiyati to'risidagi adabiyot ma'lumotlari keltirilgan. Defektlarning hosil bo'lishi mexanizmlari, ularning migratsiyasi va ular ta'siridagi degradatsiya mexanizmlari to'liq tushuntirib berilgan. Bundan tashqari har hil turdagi defektlarni passivatsiya qilishning zamonaviy usullari o'rganilgan. Xorijiy tadqiqotchilarning aynan dissertatsiya ob'ektlari misolida turli passivatsion materiallar va texnologiyalarni qo'llash natijasida olingan natijalari solishtirma tahlil qilingan. Adabiyotlarda foydalanilgan moddalar va texnologiyalarning ustunlik va kamchiliklari aniqlangan va dissertatsiya maqsadiga mos holda vazifalarning shakllantirilib va tadqiqot yo'nalishlari aniqlab olingan.

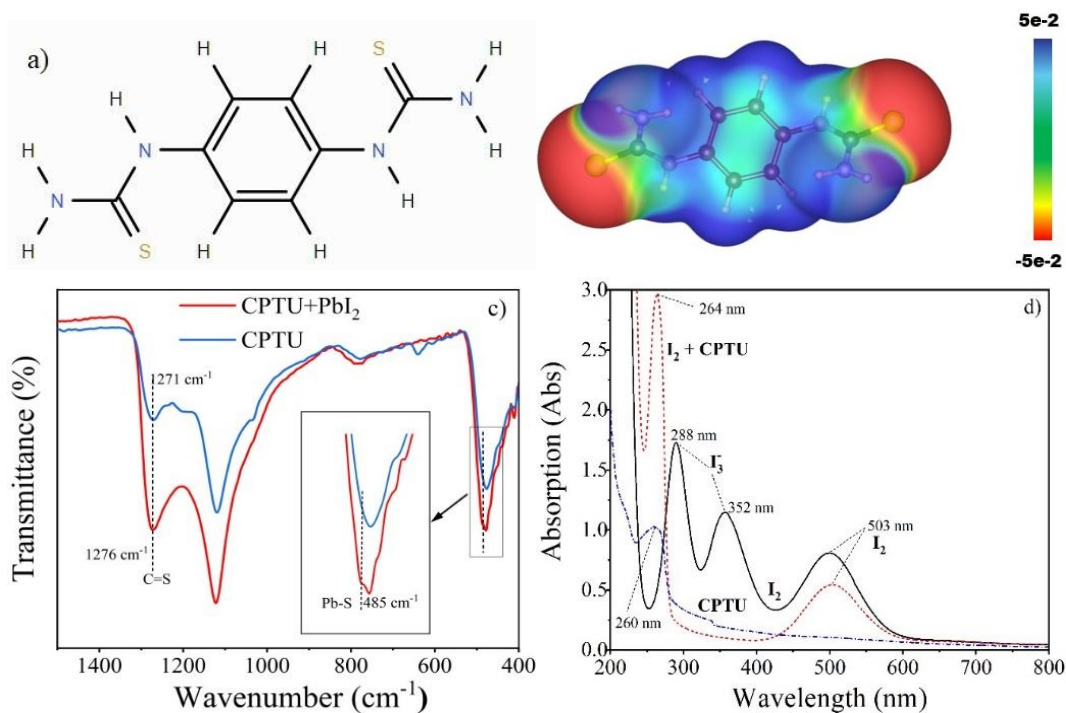
Dissertatsiyaning nomli ikkinchi bobida **“CsFAMA perovskiti yod superoksidlanishi va defektlarni CPTU funksional moddasi yordamida bartaraf etishning optik va fotovoltaik tadqiqi”** CsFAMA asosidagi PQE larning o'z-o'zidan shakllanuvchi molekulyar qatlam (SAM)ni qo'llash va perovskit kristallanish jarayonini optimallashtirish maqsadida CPTU molekulasi qo'llash orqali faza noustuvorligini kamaytirish, ishlash barqarorligi oshirish va degradatsiya mexanizmlari optik nuqtai nazardan tadqiq etishga doir natijalari keltirilgan.

CPTU modifikator qo'shimchasining haqiqatan ham CsFAMA perovskitining kristal tuzilishi va morfologiyasiga ta'sirini tasdiqlash uchun FTIR, Uv-Vis yutilish, SEM, EQE, tDOS tadqiqotlari o'tkazilgan. Tajribalar davomida tadqiq etilgan PQE 1-rasmda keltirilgan sxema asosida tayyorlandi.



1-rasm. ITO/NiO_x/Me-4PACz/CsFAMA+CPTU/PCBM+C₆₀/BCP/Ag perovskit quyosh elementlarining sxematik tasviri.

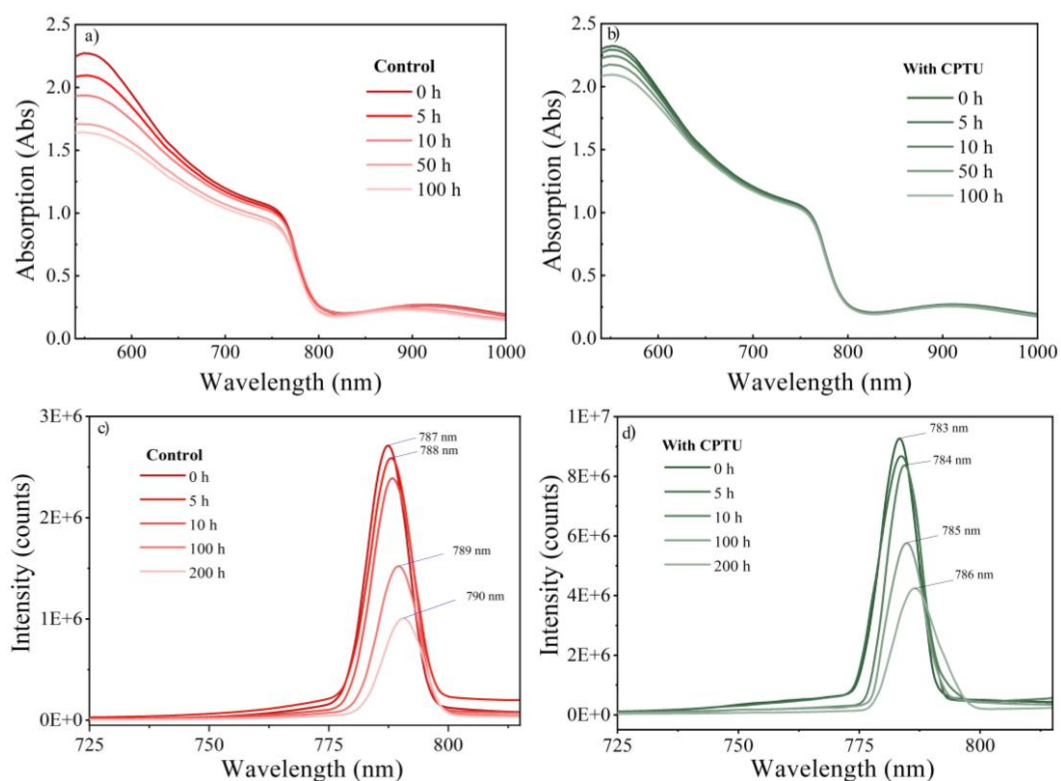
CPTU molekulasining C=S va –NH₂ guruhlarini orqali Pb²⁺ va I[–] nuqsonlari bilan kimyoviy bog'lanishi (C=S⋯Pb va N–H⋯I) yuqori aniqlikdagi FTIR va Uv-vis yutilish tahlillari orqali ilmiy jihatdan isbotlandi (2-rasm). Bu interfeysdagi nurlanishsiz rekombinatsiyani samarali passivatsiya qilish mexanizmi bo'la olishini anglatadi.



2-rasm: a) CPTU molekulasining kimyoviy tuzilishi. b) CPTU molekulasining zaryad taqsimoti. c) CPTU va CPTU+PbI₂ plyonkalarining FTIR spektrlari. d) dixlormetandagi CPTU va I₂ moddalarini (alohida va aralash holda) ning UV-Vis yutilish spektrlari.

CPTU moddasining perovskit barqarorligiga optik nuqtai nazardan ta'sirini baholash uchun perovskit plyonkalaridagi Uv-Vis yutilish va doimiy fotolyuminessensiya (steady-state PL) spektrlari hamda ularning degradatsiya jarayonidagi evolyutsiyasi tadqiq etildi (3-rasm). Nazorat plyonkasida yutilish spektri 5 soatlik ta'sirdan keyingina sezilarli o'zgarishga uchrashni boshlaydi.

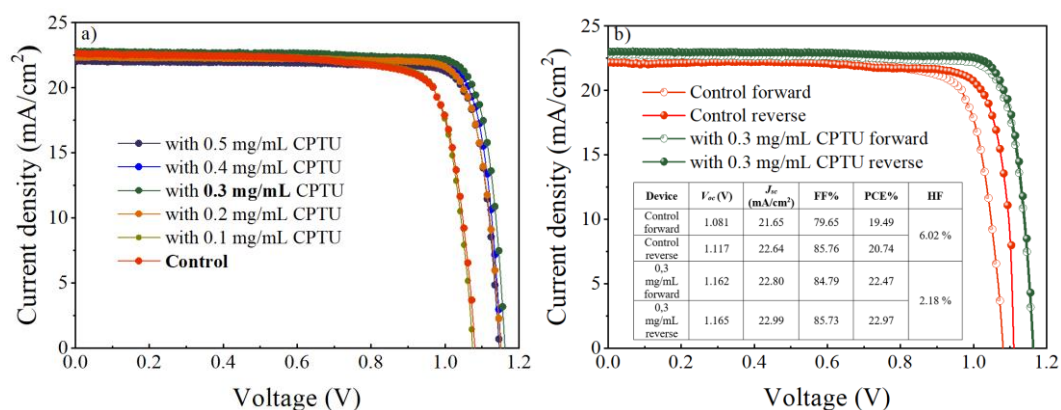
Dastlab, perovskit plyonka o'zining asosiy yutilish to'liq uzunligi (≈ 552 nm) da kiruvchi nurning 99.465% qismini yutadi. Ammo 100 soatdan so'ng bu qiymat 97.682% gacha pasaygan. Bu esa perovskit materialining tarkibiy kimyoviy o'zgarishi va degradatsiyaga uchraganligini anglatadi. Bunday o'zgarishlar asosan superoksidlanish va yodid oksidlanishi reaksiyalari natijasida, ya'ni nurlanish va kislorod ta'sirida yuz beradi. CPTU bilan passivatsiya qilingan perovskit plyonkasining (3b-rasm) boshlang'ich yutilish qiymati 99.528% bo'lib, 100 soat degradatsiyadan keyin ham u 99.187% darajada saqlanib qoladi. Demak, yutilish nuqtai nazaridan degradatsiya ta'siri nazorat plyonkasida faqat 5 soat ichida kuzatilsa, CPTU bilan passivatsiya qilingan plyonkada bu o'zgarish faqat 100 soatdan keyin namoyon bo'ladi.



3-rasm: Tabiiy muhit sharoitida va AM 1.5 G nurlanishi ostida degradatsiya jarayoni vaqtida a) nazorat hamda b) CPTU bilan passivatsiya qilingan perovskit plyonkalari uchun yutilish spektrlarining evolyusiyasi. c) va d) Xuddi shu sharoitlarda nazorat va CPTU bilan passivatsiya qilingan perovskit plyonkalari uchun doimiy fotolyuminessensiya spektrlarining evolyutsiyasi.

CPTU modifikatsiyasi natijasida perovskit materialining optik yutilish ko'effitsiyenti 15% gacha oshishi, fotolyuminessensiya intensivligi 3 barobar ortishi, hamda zaryad tashuvchilar yashash vaqtining 384 ns dan 829 ns gacha uzayishi ilmiy jihatdan aniq miqdorlarda isbotlandi.

CPTU moddasining kiritilishi qurilmaning fotovoltaik parametrlariga ta'sirini baholash uchun volt-ampere ($J-V$) xarakteristikalarini tadqiq etildi (4-rasm).



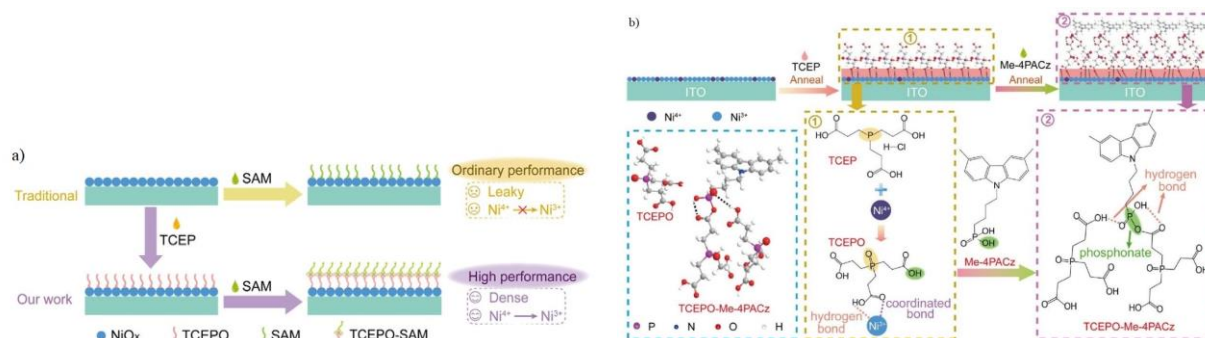
4-rasm: a) Turli konsentratsiyalarda CPTU qoʻshilgan va passivatsiya qilingan PQE hamda nazorat qurilmalarining J – V xarakteristikalarini. b) 0.3 mg/ml CPTU bilan passivatsiya qilingan PQE qurilmalari uchun oldingi va orqa skan boʻyicha J – V chiziqlari, fotovoltaiik parametrlari hamda hisoblangan gisterezis koeffitsientlari.

4-rasmda keltirilganidek, 0.3 mg/ml CPTU miqdorida tayyorlangan perovskit qurilmasi eng yuqori $V_{oc} = 1.165$ V va $J_{sc} = 22.99$ mA/cm^2 qiymatlariga erishgan. Bu esa perovskit strukturasi kristalllashish darajasi yaxshilanganini, defektlar zichligi kamayganini va zaryad tashuvchilarning yashash vaqim oshganini aniq tasdiqlaydi. Olingan eksperimental maʼlumotlar asosida perovskit qurilmalari uchun gisterezis koeffitsiyenti (HF) ilmiy manbalarda keltirilgan formula yordamida hisoblab chiqildi. Hisoblash natijalari shuni koʻrsatdiki, CPTU moddasini qoʻshish orqali gisterezis koeffitsiyenti 6.02% dan 2.18% gacha pasaydi. Bu natija perovskit strukturasi ichidagi defektlarning samarali passivatsiya qilinganligini anglatadi.

Inkapsulyasiya qilingan qurilmaning ekspluatatsion barqarorligini tekshirish uchun 45 °C temperaturada 1 quyosh yorugʻligi taʼsirida UB – filtrlarsiz havo atmosferasida sinovlar olib borildi. Nazorat qurilmalari 1000 soatlik sinovlardan soʻng dastlabki samaradorligini 69%ni saqlab qolgan boʻlsa, CPTU bilan modifikatsiyalangan perovskit quyosh elementlari dastlabki samaradorlikni 84%ni saqlab qoladi.

Dissertatsiyaning **“NiO_x va oʻz-oʻzidan shakllanuvchi molekular interfeysini TCEP molekulasi bilan modifikatsiyalashning transport qatlam va CsFAMA perovskiti morfologik va optik parametrlariga taʼsiri”** nomli uchinchi bobida TCEP reduktand moddasi yordamida yordamida kovak tashuvchi qatlam va perovskite faol qatlam interfeysini passivatsiya qilishga doir tadqiqot natijalari keltirilgan.

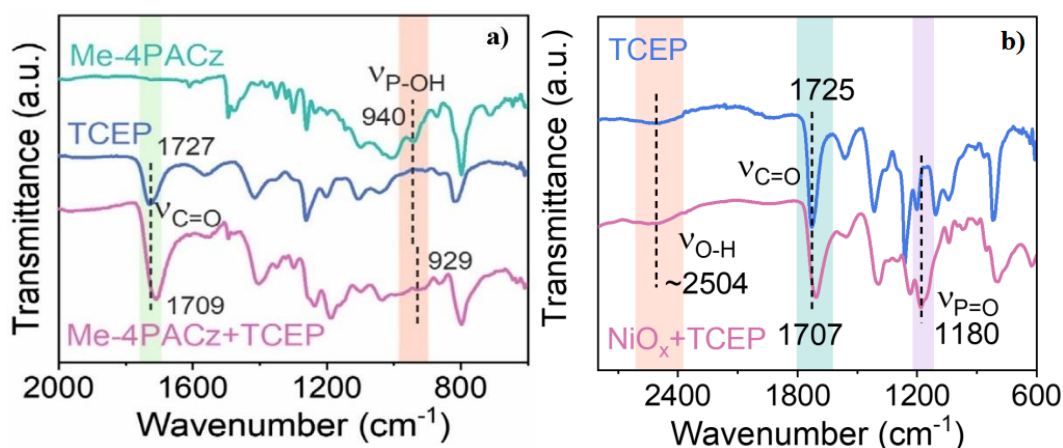
NiO_x va TCEP molekulasi oʻzaro taʼsirlashish mexanizmlarini aniqlash uchun FTIR, Uv-Vis yutilish, SEM, AFM, XRD, DFT, EQE, Raman, XPS, ToF-SIMS, insitu Uv-Vis yutilish tadqiqotlari tadqiq etildi.



5-rasm: a) NiO_x va NiO_x/TCEP taglik ustidagi SAM qatlami qoplanish va b) kiritilgan reduktant molekula yordamida integratsiyalangan NiO_x -SAMs KTQ. Mos ravishda TCEP molekulasining NiO_x va Me-4PACz bilan ta'sirlashish reaksiyasining sxematik diagrammasi.

5-rasmda NiO_x yuzasidagi kimyoviy muhitni TCEP orqali qayta konfiguratsiyalash orqali elektron tuzilishni va SAM qatlamining molekulyar shakllanishini optimallashtirish mexanizmi keltirilgan. NiO_x yuzasi avval TCEP bilan ishlov beriladi. TCEP molekulasidagi fosfin va karboksil guruhlari NiO_x yuzasi bilan koordinasion ($\text{C}=\text{O}\cdots\text{Ni}$) va vodorodli ($\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}-\text{Ni}$) bog'lar orqali mustahkam bog' hosil qiladi. Bu jarayon natijasida, Ni^{4+} markazlarining pasayishi va ularning Ni^{3+} holatiga reduksiyalanishi amalga oshadi. TCEP oksidlanganda TCEPO hosil bo'ladi va uning $-\text{COOH}$ guruhlari Me-4PACz molekulasidagi $-\text{PO}(\text{OH})_2$ guruhlari bilan degidratatsiya reaksiyasiga kirishib, $\text{P}-\text{O}-\text{C}$ fosfonat bog'lari hamda qo'shimcha vodorod bog'larini shakllantiradi. Chegaraviy defekt holatlari passivatsiyalanadi, NiO_x yuzasidagi ortiqcha oksidlovchi markazlarni yo'qotadi va zararli interfeys reaksiyalarini kamaytiradi. Bu esa SAMs qatlamlarining zichligi va barqarorligini sezilarli darajada oshiradi.

TCEP molekulasi va Me-4PACz hamda NiO_x bilan o'zaro ta'sir mexanizmlarini o'rganish maqsadida Furiye infraqizil spektroskopiyasi (FTIR) tahlillari o'tkazildi.

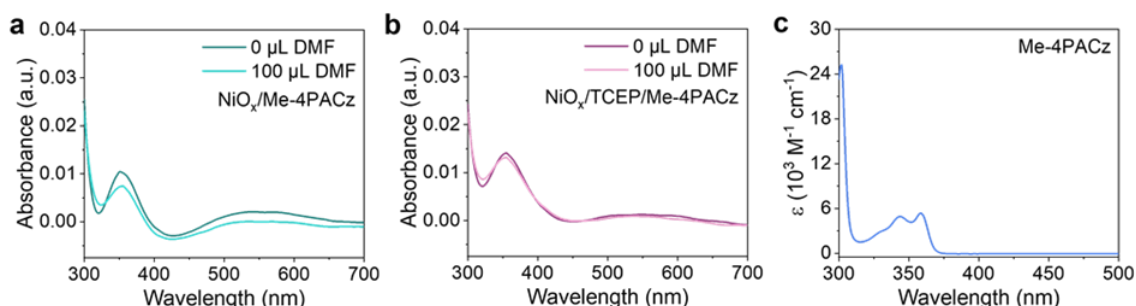


6-rasm. TCEP va NiO_x+TCEP plyonkalari FTIR spektrlari.

6a-rasmdan ko'rish mumkinki, sof Me-4PACz namunalarida 940 cm^{-1} atrofida fosfonat guruhiga mansub $\text{P}-\text{OH}$ xarakterli piki qayd etildi, bu esa $-\text{PO}(\text{OH})_2$ guruhlarning erkin holda mavjudligini tasdiqlaydi. TCEP molekulasida

esa 1727 cm^{-1} da karboksil guruhining asosiy C=O piki kuzatildi, bu uning reaktivligini ko'rsatadi. Me-4PACz va TCEP birgalikda tahlil qilinganda, C=O piki 1727 dan 1709 cm^{-1} ga, P–OH piki 940 dan 929 cm^{-1} ga siljidi. Bu o'zgarish degidratatsiya reaksiyasi tufayli yangi P–O–C ester bog'larining hosil bo'lganidan dalolat beradi.

TCEP molekulasida karboksil guruhlariga tegishli O–H (2504 cm^{-1}) va C=O (1725 cm^{-1}) piklari kuzatilgan (6b-rasm). NiO_x yuzasiga TCEP adsorbsiya qilinganda, C=O piki $1725 \rightarrow 1707\text{ cm}^{-1}$ ga siljidi, O–H piki intensivligi pasaydi, shuningdek 1180 cm^{-1} da yangi P=O piki paydo bo'ldi. Bu holat TCEPning oksidlanib TCEPO ga aylangani va NiO_x yuzasi bilan ham koordinasion, ham kovalent bog'lar hosil qilganini ko'rsatadi. Ushbu natijalar nazariy hisoblashlar, yutilish, XRD, XPS spektrlari natijalariga mos keladi va ularni tasdiqlaydi.

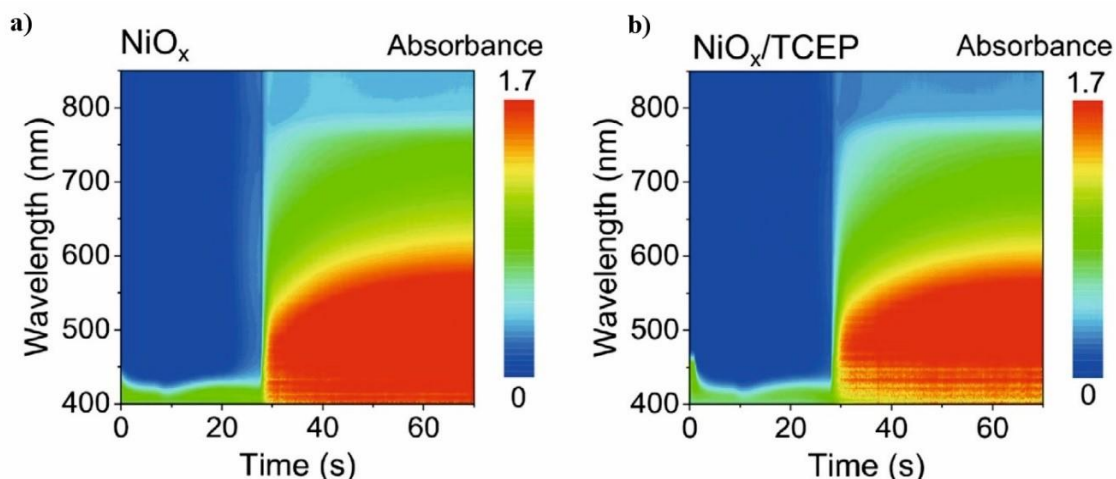


7-rasm. Sof va 100 μL DMF bilan ishlovdan keyin (a) NiO_x/Me-4PACz va (b) NiO_x/TCEP/Me-4PACz interfeyslarining Uv-Vis yutilish spektrlari. (c) Me-4PACz ning DMF dagi $5 \times 10^{-5}\text{ M}$ eritmasi yutilish spektri.

Me-4PACz molekulasini barqarorligini aniqlash maqsadida NiO_x/Me-4PACz va NiO_x/TCEP/Me-4PACz qoplamalari sof holatda va 100 μL DMF erituvchisi ta'sirida tahlil qilindi. Shuningdek, Me-4PACz molekulasini alohida holda ham tekshirildi (7-rasm).

NiO_x/TCEP/Me-4PACz sof holatidagi hamda 100 μL DMF bilan yuvilgandan keyingi spektrlari deyarli bir xil bo'lib, intensivlikda pasayish kuzatilmadi. Bu holat TCEP orqali interfeysda hosil bo'lgan P–O–C kimyoviy bog'lar SAM qatlamini mustahkamlab, erituvchi ta'siriga chidamli qilganini ko'rsatadi.

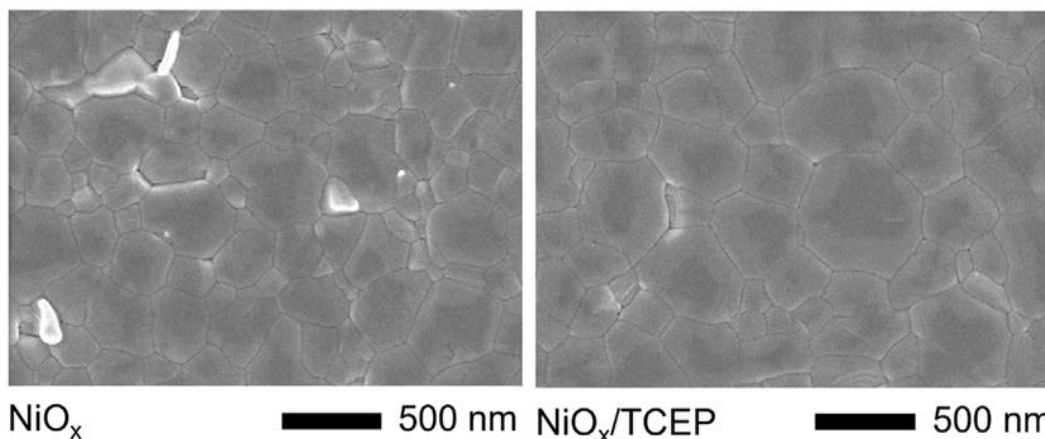
TCEPning NiO_x/Me-4PACz interfeysiga kiritilishi perovskit strukturasi kristallanish jarayoniga ta'sirini tadqiq qilish uchun in situ UV-Vis yutilish tadqiqotlari amalga oshirildi (8-rasm).



8-rasm: a) NiO_x va b) NiO_x/TCEP interfeys ustida o'stirilgan perovskit plyonkalarining in situ UV-Vis yutilish spektrlari

Natijalar tahlili TCEP ning $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ interfeysiga kiritilishi perovskit kristallanish tezligini kamaytirishini ko'rsatdi. Bu esa katta hajmdagi sifatli plyonka olish imkonini beradi va turli hajmiy defktlar miqdorini kamaytirishga yordam beradi. Ushbu natijalar SEM, AFM tavsirlari tomonidan ham tasdiqlandi.

NiO_x/TCEP interfeysini perovskit morfologiyasiga ta'sirini baholash uchun ularning SEM tasvirlari o'rganildi.



9-rasm. NiO_x va NiO_x/TCEP tagliklar ustiga yotqizilgan perovskit faol qatlamlarining pastki yuzalarining SEM tasvirlari

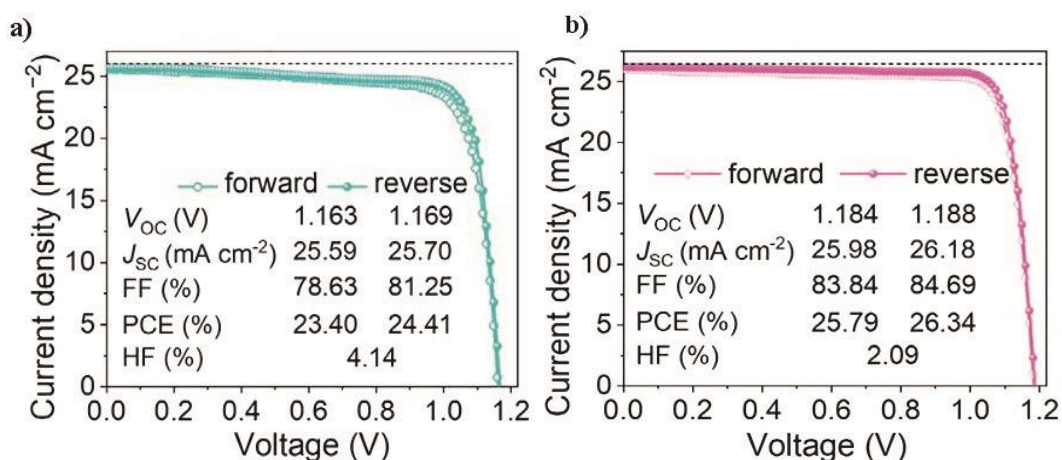
Keltirilgan SEM tasvirlaridan ko'rinib turibdiki TCEP kiritilishi natijasida perovskit plyonka morfologik parametrlari yaxshilangan ya'ni yuzada donacha tuzilishi bir xil, yirik va donacha chegaralari aniq hamda barqaror taqsimlangan.

“ NiO_x va o'z-o'zidan shakllanuvchi molekular interfeysini TCEP molekulas bilan modifikatsiyalashning CsFAMA perovskiti asosidagi quyosh elementining fotovoltaik va barqarorlik parametrlariga ta'siri” nomli 4-bobda TCEP ning NiO_x yuzasiga adsorbsiyalanishining perovskit plyonka fotovoltaik va barqarorlik parametrlariga ta'siriga doir tadqiqot natijalari yoritilgan. TCEP funksional molekulasining perovskit quyosh elementlarining fotovoltaik parametrlariga ta'sirini o'rganish maqsadida ITO-shisha/ NiO_x/TCEP yoki TCEP

siz/Me-4PACz/CsFAMA/PEACl/PC₆₁BM+C60/BCP/Ag arxitekturali planar struktura tayyorlandi.

Tajriba natijalariga ko'ra, TCEP konsentratsiyasining ortishi bilan J_{SC} va V_{OC} yaxshilanib borgan, bu esa interfeysdagi defektlarning samarali passivatsiyalanishi va zaryad tashish yo'qotishlarining kamayishini ko'rsatadi. Ayniqsa 0,3 mg/mL TCEP qo'llanilganda qurilma fotovoltaik parametrlari J_{SC} , V_{OC} va FF eng yuqori qiymatlarga yetib, EO'S maksimal darajaga ko'tarilgan. Konsentratsiyaning bundan ortiqcha oshishi esa (0,5 mg/mL gacha) teskari ta'sir ko'rsatib, parametrlarning pasayishiga, ya'ni optimal qiymatdan og'ishishiga sabab bo'ladi.

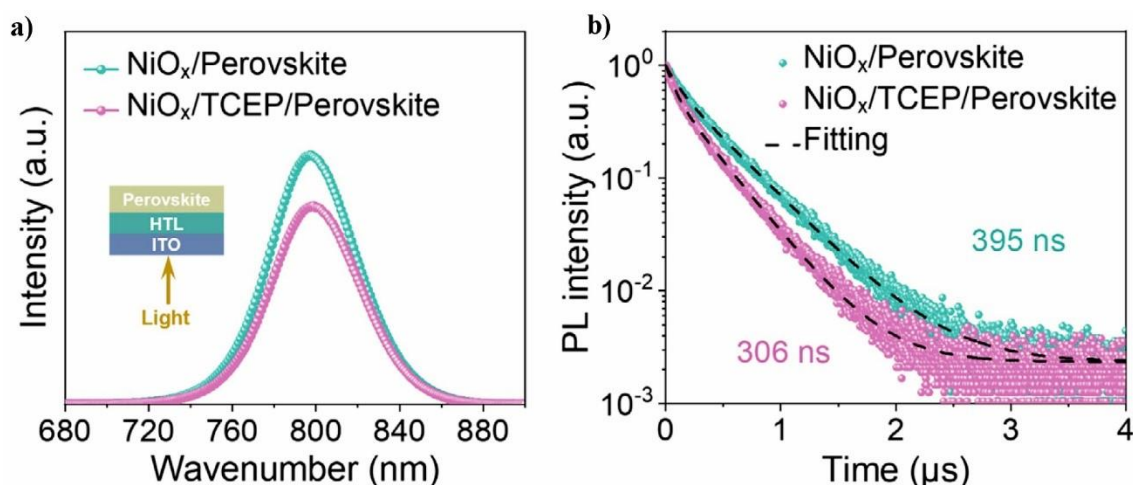
Perovskit quyosh elementlarining sifati hamda zaryad tashuvchilarning inersiyaviy xususiyatlarini baholash maqsadida, nazorat va TCEP funksional molekulasini bilan modifikatsiya qilingan kovak tashuvchi qatlamga ega fotovoltaik qurilmalarning to'g'ri va teskari skanerlashdagi $J-V$ xarakteristikalari tahlil qilindi.



10-rasm. Nazorat (NiO_x) va TCEP bilan modifikatsiya qilingan (NiO_x/TCEP) perovskit quyosh elementlarining to'g'ri va teskari skanerlashdagi $J-V$ xarakteristikalari.

Natijalardan ko'rish mumkinki, TCEP bilan modifikatsiya qilingan qurilma ancha yuqori natijalarni namoyon etgan: $V_{OC} = 1.184-1.188$ V, $J_{SC} = 25.98-26.18$ mA·sm⁻², FF = 83.84–84.69%, va EO'S = 25.79–26.34%. Shu bilan birga, HF qiymati 4,14% dan 2.09% gacha pasaygan, ya'ni gisterezis ta'siri sezilarli darajada kamaygan.

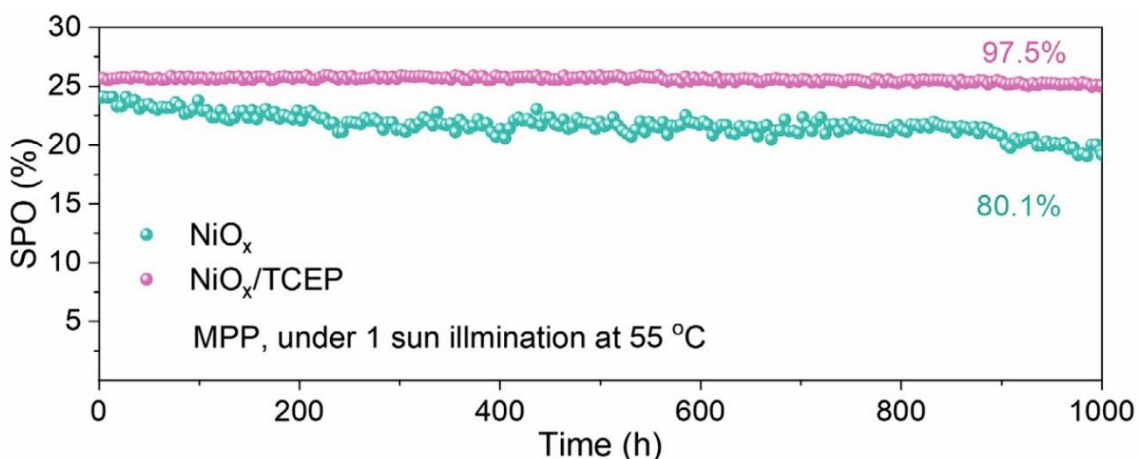
Nazorat va TCEP bilan modifikatsiya qilingan KTQ ga ega CsFAMA perovskit qurilmalarida fazalar orasidagi zaryadlarni ajralishi, uzatilishi kinetikasi va qayta kombinatsiyalanish mexanizmlarini chuqur tahlil qilish maqsadida stasionar fotoluminessensiya va TRPL spektrlari tadqiq etildi.



11-rasm. TCEP bilan modifikatsiya qilingan $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ interfeyslari ustiga yotqizilgan CsFAMA perovskit plyonkalarining stasionar va kechikkan fotolyuminessensiya tahlili

11a-rasmda keltirilgan stasionar fotolyuminessensiya spektrlaridan ko'rinib turibdiki, $\text{NiO}_x/\text{TCEP}/\text{perovskit}$ namunasida fotolyuminessensiya intensivligi TCEP siz nazorat namunasiga nisbatan pastroq. Bu holat TCEP modifikatsiyasidan so'ng interfeysdagi zaryad tashish jarayoni samaraliroq kechayotganini ko'rsatadi. Kechikkan fotolyuminessensiya tahlillaridan aniqlanishicha, zaryad tashuvchilarning yashash vaqti 395 ns dan 306 ns gacha qisqargan. Bu natija KTQ/perovskit interfeysidagi defekt holatlari konsentratsiyasining kamayganini, hamda ular orqali kechadigan zaryadlarning nurlanishsiz rekombinatsiya jarayonlari samarali passivatsiyalanganini anglatadi.

Perovskitning degradatsiyalanish sabablaridan biri doimiy yorug'lik ta'siri va tashqi elektr yuklamasidir. Shuning uchun nazorat va TCEP bilan modifikatsiyalangan qurilmalarning germetizatsiya qilingan holdagi ishchi barqarorligini (MPP tracking) 55°C haroratda, havo muhitida, bir quyosh nurlanishi ostida 1000 soat davomida kuzatildi.



12-rasm. NiO_x va NiO_x/TCEP interfeyslariga ega perovskit qurilmalarining 55°C haroratda, havo muhitida va 1 quyosh yoritish sharoitida ekspluatasion barqarorligi sinovlari.

12-rasmda ko'rsatilganidek, NiO_x KTQ ga ega PQE 1000 soatdan so'ng 80,1% samaradorlikni saqlab qolgan bo'lsa, TCEP bilan modifikatsiya qilingan $\text{NiO}_x/\text{TCEP}/\text{KTQ}$ ga ega PQE 97,5% darajada barqarorlikni saqlab qolgan. Samaradorlikning vaqt bo'yicha chiziqli bog'lanishiga ko'ra, NiO_x qurilmasining T_{80} nazariy xizmat muddati ≈ 1457 soat, NiO_x/TCEP qurilmasiniki esa ≈ 9369 soat bo'lib, bu uning ancha barqaror ish sharoitini ta'minlashini ko'rsatadi.

Xulosada dissertatsiya ishining asosiy xulosalari bayon etilgan.

XULOSALAR

1. CPTU ning tiokarbamid guruhiga tegishli FTIR spektralaridagi 1271 cm^{-1} dagi xarakterli tebranish piki PbI_2 qo'shilgandan so'ng 1276 cm^{-1} gacha yuqori chastota tomonga siljidi, hamda bu CPTU molekulasi $\text{C}=\text{S}$ bog'ining Pb^{2+} ionlari bilan $\text{C}=\text{S} \cdots \text{Pb}$ koordinatsion, hamda 485 cm^{-1} dagi yangi tebranish polosi esa $\text{Pb}-\text{S}$ bog'lanishlari hosil bo'lganligini tasdiqlaydi. Ushbu hosil bo'lgan bog'lanishlar CPTU va PbI_2 o'rtasida o'zaro Van-der-Vaals ta'sir mavjudligini ko'rsatadi.
2. CPTU molekulasi I_2 va yodning ion shakli I_3^- bilan donor-akseptor ko'rinishida bo'g'lanib, uning oksidlanishini oldini olishi I_2 ning 503 nm dagi yutilish piki 1.7 marta kamayganligi, I_3^- ga xos 288 va 352 nm dagi piklar deyarli to'liq yo'qolganligi Uv-Vis yutilish spektrlari tahlillari orqali ko'satib berildi. Shu bilan bir qatorda CPTU ning xususiy yutilish piki esa 260 nm dan 264 nm gacha qizil siljishi bilan birga intensivligi 10 martadan ortiq oshganligi aniqlandi. Ushbu natijalar CPTU molekulasi yodning superoksidlanish reaksiyalarini cheklashini va fotokimyoviy degradatsiyani sezilarli darajada kamaytirishini isbotlaydi.
3. CsFAMA asosidagi PQE CPTU bilani modifikatsiyalanganda optik yutilish koeffitsienti 15% ga, fotoluminessensiya intensivligi esa 3 barobarga ortib, zaryad tashuvchilar yashash vaqti 384 ns dan 829 ns gacha uzayishi aniqlandi. Buning natijasida qurilma EO'S 20.74% dan 22.97% gacha oshishiga hamda PQE barqarorligining 1000 soat uzluksiz ishlashdan so'ng $T_{80} = 84\%$ gacha saqlanilishiga erishildi. Ushbu natijalar CPTU moddasining perovskit strukturasidagi defektlarni samarali passivatsiya qilganligini hamda struktura degradatsiyani sezilarli sekinlashtirganidan dalolat beradi.
4. FTIR spektrlari tahlili natijalarida TCEP ning NiO_x yuzasiga adsorbsiyasidan keyin $\text{C}=\text{O}$ karboksil pik $1725-1727 \text{ cm}^{-1}$ dan $1707-1709 \text{ cm}^{-1}$ ga qizil tomonga siljishi ko'rsatishi TCEP va NiO_x o'rtasida $\text{C}=\text{O} \cdots \text{Ni}$ koordinasion bog'lanish hosil qilinishini ko'rsatadi. Shuningdek, $\approx 1180 \text{ cm}^{-1}$ da yangi $\text{P}=\text{O}$ pikning namoyon bo'lishi TCEP ning oksidlanishi hamda $\text{Ni}-\text{O}/\text{P}=\text{O} \cdots \text{Ni}$ turdagi bog'lanishlar shakllanganligini tasdiqlaydi. Bundan tashqari Me-4PACz ning $\text{P}-\text{OH}$ tebranish polosasining $\approx 11 \text{ cm}^{-1}$ ga, TCEP ning $\text{C}=\text{O}$ polosi esa 18 cm^{-1} ga siljishi degidratatsiya orqali $\text{P}-\text{O}-\text{C}$ ester/fosfonat bog'lari hosil bo'layotganini isbotlaydi.

5. In-situ UV–Vis spektrlari va SEM/AFM tahlillaridan aniqlandiki, TCEP kiritilishi natijasida perovskit kristallanish tezligining sekinlashishi hisobiga yirik donali, kam defektli plyonka hosil bo'lishi aniqlandi. Ushbu natijalar interfeysdagi defektlar samarali passivatsiya qilinganligini anglatadi.
6. XPS spektrlari tahlillariga ko'ra TCEP reduksiyasi tufayli yuqori valentli Ni^{4+} markazlari ulushi 26.9% dan 20.6% gacha kamayganligi, Ni^{3+} ulushi esa 35.4% dan 41.3% gacha ortganligi aniqlandi. Ushbu o'zgarishlar zararli oksidlovchi markazlarning qisqarganligi va optik defekt sathlarining ham kamayganligini, hamda interfeysdagi rekombinatsiya jarayonlarini samarali kamaytirganini anglatadi.
7. Fotolyuminessensiya va TRPL tahlillaridan TCEP modifikatsiyasidan so'ng fotolyuminessensiya intensivligi pasayishi va zaryad tashuvchilarning yashash vaqti 395 ns \rightarrow 306 ns gacha qisqarishi aniqlandi. Bu natija perovskitdan kovak tashuvchi qatlarga zaryadlarning tez va samarali ekstraksiyasini, ya'ni nurlanishsiz rekombinatsiya kanallarining pasayganini ko'rsatadi.
8. TCEP molekulasidagi fosfin va karboksil guruhlarini $\text{Ni}^{4+} \rightarrow \text{Ni}^{3+}$ reduksiyasini amalga oshirishi hisobiga, $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ interfeysidagi defektlarini samarali passivatsiya qildi. Buning natijasida $\text{NiO}_x/\text{TCEP}/\text{Me-4PACz}/\text{CsFAMA}$ perovskit strukturasi 9369 soatlik (T_{80}) ishchi barqarorlikka erishildi, hamda bu amaldagi CsFAMA tizimlari uchun eng yuqori ko'rsatkich hisoblanadi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.05/2025.27.12.FM/T.09.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

ИНСТИТУТ ИОНО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

БОЙНАЗАРОВ ИЛХОМ РУСТАМОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ПАССИВИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ СРТУ И ТСЕР НА
ОПТИЧЕСКИЕ, ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И
СТАБИЛЬНОСТЬ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ CSFAMA**

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ташкент – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2025.3.PhD/FM1369.

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 руководитель:

Кувондилов Вахобжон Ортикович
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Рахматуллаев Илёс Арзимуродович
доктор физико-математических наук, профессор

Уролов Шамсиддин Зайниддинович
доктор философии (PhD) по физике и математики, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Чирчикский Государственный Педагогический Университет

Защита диссертации состоится «17» февраля 2026 г. в 14:30 на заседании Научного совета DSc.05/2025.27.12.FM/T.09.01 по присуждению ученых степеней 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 № 26/1) по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули 33. Тел./факс: (99871) 262-32-54.

Автореферат диссертации разослан «5» февраля 2026 г.
(Реестр протокола рассылки № 26/1 от «5» февраля 2026 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 философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В последние годы перовскитные солнечные элементы (ПСЭ) проявили себя как революционная технология в области фотовольтаики. Благодаря достижениям в области инженерии состава и архитектуры устройств, эффективность данных элементов достигла 27%. Однако быстрая деградация ПСЭ под воздействием светового излучения, кислорода, влаги и повышенной температуры остаётся серьёзным препятствием для их промышленного применения. В связи с этим исследователи разработали ряд технологических подходов, направленных на минимизацию указанных проблем.

В настоящее время в мире благодаря новым подходам и технологиям инкапсуляции достигнута долговременная стабильность ПСЭ — более 9000 часов. Тем не менее использование металлических оксидов в качестве транспортных слоёв приводит к выделению и миграции кислорода, что ограничивает стабильность перовскитных структур.

В Узбекистане также ведутся масштабные исследования, направленные на повышение эффективности и стабильности перовскитных солнечных элементов, а также на изучение их фундаментальных физических закономерностей. В частности, в CsFAMA-основанных ПСЭ достигнута эффективность до 23%, а стабильность - до 3250 часов. Однако создание недорогих, долговечных и высокоэффективных перовскитных солнечных элементов остаётся одной из наиболее актуальных научно-технических задач.

Данная диссертационная работа, в определенной мере способствует реализации задач, обозначенных в ряде нормативных документов Республики Узбекистан, включая Постановление Президента Республики Узбекистан № PQ-4422 от 22 августа 2019 года «О мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», Постановление № PQ-3012 от 26 мая 2017 года «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017–2021 годы», Закон Республики Узбекистан № 539 от 21 мая 2019 года «Об использовании возобновляемых источников энергии», а также Указ Президента Республики Узбекистан № RF-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы».

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».

Степень изученности проблемы. Несмотря на то, что исследования в области перовскитных солнечных элементов (ПСЭ) с планарной структурой были впервые начаты в 2012 году корейским ученым Н.Г. Парком и

британским исследователем Г. Снейтом, их эффективность за короткий срок достигла 27%. В последние годы в этой сфере были достигнуты значительные научные и практические результаты.

В 2013–2014 годах началось углубленное изучение причин деградации перовскитов. Ученые установили, что дефекты, такие как вакансии свинца (Pb^{2+}), избыток ионов йода или неправильное распределение органических катионов (МА), усиливают рекомбинационные процессы. В 2014 году группа Снейта из Оксфордского университета объявила, что добавление хлорид-ионов (Cl^-) в перовскитные слои позволило повысить КПД с 15% до 20%. Хлорид-ионы заполняют вакансии Pb^{2+} , стабилизируя кристаллическую решетку, что стало ярким примером пассивации дефектов. В том же году было установлено, что пассивация с использованием кислот Льюиса (например, TiCl_4) и оснований Льюиса (пиридин) также эффективна.

С 2015 года начали активно применяться различные методы пассивации, и исследования сосредоточились на двух ключевых направлениях: органических и неорганических пассиваторах. В 2015 году группа Сока (Южная Корея) продемонстрировала, что добавление CsBr и RbCl улучшает стабильность и эффективность перовскитов (более 20%). Эти ионы концентрировались на границах зерен, пассивируя дефекты и улучшая электронную проводимость. В 2016 году группа Гретцеля использовала в качестве пассиватора фенилэтиламмоний йодид (PEAI), который связывается с вакансиями Pb^{2+} на поверхности перовскита, снижая рекомбинацию зарядов и повышая эффективность до 22%.

С 2017 года нанотехнологии стали играть важную роль в управлении дефектами в перовскитах. Развитие 2D/3D-гетероструктур (например, $\text{BA}_2\text{MA}_{n-1}\text{Pb}_n\text{I}_{3n+1}$) позволило одновременно защитить 3D-перовскиты от воздействия воды и кислорода, а также пассивировать дефекты на границах зерен. В 2018 году исследователи Массачусетского технологического института применили графен-оксид в качестве пассиватора, что позволило увеличить стабильность устройств до 1000 часов.

В Узбекистане также ведутся исследования в данной области. В Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз под руководством проф. Э. Захидова, в Институте химии и физики полимеров под руководством проф. Н. Ашурова, а также в Самаркандском государственном университете в группах А. Захидова и Э. Курталиева были достигнуты важные научно-практические результаты. В частности, Н. Ашуровым проведены исследования органических перовскитов, А. Сапарбаевым значительно повышена эффективность неорганических перовскитов, И. Таджибаев выявил влияние структурных дефектов в активном слое перовскитных солнечных элементов на их оптические и фотоэлектрические свойства, а Л. Нуримбетовой изучено повышение стабильности перовскитов CsPbI_3 и $\text{CsPbI}_3\text{Br}_2$.

С 2020 года по настоящее время ученые активно изучают механизмы деградации ПСЭ в реальных условиях эксплуатации и разрабатывают методы

их устранения. Также ведутся исследования по созданию технологических решений, пригодных для промышленного производства и масштабирования. Однако до сих пор отсутствуют системные исследования, в которых одновременно применялись бы различные функциональные добавки, обладающие способностью пассивировать дефекты в перовските, а также анализировалась корреляция между стабильностью, оптическими, структурными и фотоэлектрическими характеристиками материалов. Таким образом, требуется проведение более глубоких исследований в данном направлении.

Связь диссертационных исследований с планами научно-исследовательских работ. Диссертационные исследования были выполнены в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз в рамках фундаментального проекта № FL-9024093524, а также в рамках фундаментальных научно-исследовательских работ, проводимых по государственной программе в 2021–2025 годах по теме «Изучение процессов переноса фотогенерированных зарядов в природных и искусственных системах, преобразующих световую энергию». Кроме того, исследования осуществлялись в рамках узбекско-китайского совместного проекта № AL-8724053061 (2025–2026 гг.), реализуемого в сотрудничестве с Северо-Западным политехническим университетом и Ташкентским государственным техническим университетом имени И. Каримова, а также узбекско-китайского совместного проекта № AL-8724053065 (2025–2026 гг.), выполняемого совместно Нанкинским технологическим университетом и Институтом ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности и долговременной стабильности перовскитных солнечных элементов CsFAMA путём объёмной пассивации с использованием CPTU и инженерии интерфейса с применением TCSP.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

оценка эффективности пассивации дефектов CsFAMA-перовскита молекулой CPTU с использованием оптических методов анализа;

изучение механизмов блокировки состояний I_2/I_3^- , диссоциации йода и каналов реакций супероксида, возникающих на стадии подготовки прекурсора и оказывающих отрицательное влияние на эффективность и стабильность перовскита, с применением CPTU;

повышение эффективности и стабильности CsFAMA-основанных ПСЭ путем применения стратегии объёмной пассивации с использованием функциональной молекулы CPTU;

исследование механизмов пассивации дефектов, связанных с NiO_x , Me-4PACz и перовскитом, при помощи TCSP с использованием оптических методов;

оценка эффективности TCSE-модификации в повышении экстракции зарядов на интерфейсе перовскит- NiO_x с применением оптических методов анализа;

достижение долговременной стабильности ПСЭ посредством предотвращения вредного воздействия кислорода на перовскит, реализуемого за счёт редукции дефектных состояний на поверхности NiO_x и формирования эффективной архитектуры $\text{NiO}_x/\text{TCSE}/\text{Me-4PACz}$.

Объект исследования. Объектом исследования являются активные слои перовскита CsFAMA, транспортные слои NiO_x и модифицированные TCSE слои NiO_x , молекула CPTU, а также перовскитные активные слои, пассивированные CPTU, и солнечные элементы, созданные на их основе.

Предмет исследования. Предметом исследования являются фотоэлектрические и оптические свойства перовскитных солнечных элементов, динамика ловушечных состояний, фотоэлектрические свойства и стабильность CsFAMA-перовскита, объёмно пассивированного молекулой CPTU, и соответствующих перовскитных солнечных элементов.

Методы исследований. При изготовлении перовскитных солнечных элементов применялись методы спин-коутинга, использование антирастворителей, а также модификация поверхности/структуры и последующая термическая обработка. Для анализа кристаллической структуры и морфологии материалов использовались методы XRD, SEM и AFM. Оптические и электронные свойства исследовались с применением UV-Vis поглощения, *in situ* UV-Vis поглощения, стационарной фотолюминесценции, TRPL, Raman, ИК-Фурье (FTIR), UPS и XPS. Для оценки электрических и фотоэлектрических параметров устройств использовались вольт-амперные характеристики ($J-V$), методы EQE, SCLC, EIS и анализ Мотта-Шоттки. Эти методы позволили определить эффективность устройств, индекс гистерезиса, плотность дефектных состояний и энергетические уровни. Испытания стабильности проводились в соответствии с международными стандартными методиками, что позволило оценить термическую и эксплуатационную стабильность изготовленных перовскитных солнечных элементов.

Научная новизна исследования:

впервые на основе анализа спектров UV-Vis поглощения, включая динамику изменения пиков I_3^- при 288 нм и 352 нм, а также I_2 при 503 нм, было установлено, что молекула CPTU подавляет реакции окисления йодида, то есть приводит к восстановлению состояний I_2/I_3^- ;

показано, что пик фотолюминесценции CsFAMA смещается с 787 нм до 783 нм (синее смещение на 4 нм), а интенсивность увеличилась более чем в 3 раза, что указывает на снижение концентрации неглубоких галогенидных вакансий и антиузельных дефектов на границах зёрен, а также на ослабление локальных взаимодействий;

впервые было показано, что объёмная пассивация перовскита CsFAMA с помощью CPTU может повысить эффективность преобразования энергии с

20,74% до 22,97%, при этом эксплуатационная стабильность сохраняется на уровне 84% после 1000 часов работы;

данные ИК-спектроскопии продемонстрировали, что пик группы C=O TCER смещается с 1725 см^{-1} до 1709 см^{-1} , а вибрация группы P–OH в Me-4PACz — с $\approx 940\text{ см}^{-1}$ до 929 см^{-1} , что свидетельствует о пассивировании дефектов NiO_x TCER-молекулами и улучшении интерфейса за счёт взаимодействий типа Ван-дер-Ваальса между TCER и Me-4PACz;

впервые экспериментально доказано, что появление координационного пика $\text{P}=\text{O}\cdots\text{Ni}$ ($\sim 930\text{ см}^{-1}$), в раман-спектрах свидетельствует о химической интеграции TCERO с поверхностью NiO_x ;

анализ стационарной фотолюминесценции и TRPL спектров показал, что после модификации TCER наблюдается уменьшение интенсивности фотолюминесценции и сокращение времени жизни носителей заряда с 395 нс до 306 нс, что указывает на повышение скорости экстракции зарядов из перовскита в NiO_x в 1.3 раза;

демонстрирована возможность использования молекулы TCER в качестве редуктора и пассиватора для модификации интерфейса $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$. В структуре $\text{NiO}_x/\text{TCER}/\text{Me-4PACz}/\text{CsFAMA}$ -перовскита была достигнута эффективность 26,34% и эксплуатационная стабильность $T_{80} = 9369$ часов, что является рекордным показателем для CsFAMA-перовскитных солнечных элементов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

модификация активного слоя перовскита с использованием молекулы CPTU позволила эффективно подавлять реакции окисления йода, пассивировать дефектные состояния и значительно снизить скорость безызлучательной рекомбинации. В результате эффективность преобразования энергии устройства повысилась с 20,74% до 22,97%, индекс гистерезиса снизился с 6,02% до 2,18%, а эксплуатационная стабильность обеспечила сохранение 84% начальной эффективности после 1000 часов работы;

модификация интерфейса $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ с помощью молекулы TCER обеспечила пассивацию дефектов интерфейса и улучшению экстракции носителей заряда. При оптимальной концентрации 0,3 мг/мл TCER эффективность устройства достигла 26,40%, индекс гистерезиса снизился до 2,09%, а в условиях долговременной эксплуатации обеспечено сохранение мощности на протяжении 9370 часов. Полученные результаты демонстрируют новый технологический подход к повышению эффективности и стабильности CsFAMA-перовскитных солнечных элементов, что может стать важным шагом к их промышленному внедрению;

Достоверность результатов исследований. Надёжность и достоверность полученных результатов обеспечена рядом научно обоснованных факторов, которые можно пояснить следующим образом: для каждого типа перовскитных солнечных элементов было изготовлено по 20 независимых устройств, параметры которых подвергались статистическому анализу. Полученные данные показали, что результаты не являются

случайными, а характеризуются воспроизводимостью и стабильностью при повторных экспериментах. Для подтверждения выводов были использованы несколько независимых современных аналитических методов, что позволило обеспечить высокую степень объективности и сопоставимости результатов. Все исследования проводились в соответствии с международными стандартами и методическими требованиями, что гарантирует достоверность и научную обоснованность выводов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость диссертации связана с тем, что в ней впервые предложена оптическая модель пассивации с использованием молекулы CPTU и основанная на формировании связей Pb–S и водородных связей N–H \cdots I, которые эффективно блокируют безызлучательные рекомбинационные каналы и снижают потери энергии в активном слое перовскита. Разработаны и теоретически обоснованы модели механизма редукции NiO_x с помощью TCSP, а также механизмы дефектной пассивации и согласования энергетических уровней, что позволило сформулировать новую концепцию инженерии интерфейсов перовскит–металлооксид.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что модификация активного слоя перовскита молекулой CPTU обеспечивает эффективное подавление реакций окисления йода, благодаря чему эксплуатационная стабильность ПСЭ сохраняется на уровне 92% от исходной эффективности после 1000 часов работы. Кроме того, редукция слоя NiO_x с помощью TCSP позволила повысить стабильность перовскитных солнечных элементов до 9370 часов, что подтверждает высокую прикладную ценность разработанных подходов для практической реализации долговечных и высокоэффективных перовскитных солнечных элементов.

Внедрение результатов исследования.

На основе научных результатов, полученных при сравнительном анализе влияния пассивирующих веществ CPTU и TCSP на оптические, фотоэлектрические свойства и стабильность перовскитных солнечных элементов на основе CsFAMA, были разработаны и внедрены следующие методические и прикладные подходы:

методы определения максимальных и средних фотоэлектрических параметров перовскитных солнечных элементов под стандартным солнечным излучением AM 1.5 G, а также статистической оценки параметров устройств и тестирования их долговременной эксплуатационной стабильности использовались при выполнении фундаментального проекта № Ф-ОТ-2021-497 «Разработка научных основ создания солнечных когенерационных установок на основе фотоэлектрических тепловых батарей», выполненного в Ташкентском государственном техническом университете имени И. А. Каримова под руководством доктора физико-математических наук, профессора К. Айупова (2021–2025 гг.). Полученные в рамках диссертационной работы данные были эффективно использованы при расчёте энергетических параметров фотоэлектрических станций, а также при

моделировании суточной и месячной динамики выработки электрической энергии,

метод пассивирования дефектов в слое транспортировки дырок с использованием вещества TCSP был применён в Китайской Народной Республике, в Нанкинском технологическом университете (Школа перспективных технологий, направление — гибкая электроника) под руководством профессора Сунсун Ли в рамках проекта № BE2022023 (2023–2025 гг.) для разработки органических солнечных элементов. Реализация данного подхода позволила повысить эффективность устройств на 2% и улучшить эксплуатационную стабильность до 100 часов работы.

Научные результаты, связанные с влиянием пассивирующего вещества TCSP на оптические и фотовольтаические свойства, а также стабильность перовскитных солнечных элементов на основе CsFAMA, были использованы в зарубежных научных публикациях (*Journal of Alloys and Compounds*. 2025. V.1049. p.185407, IF=6.3; *ACS Photonics*. 2025, (ASAP), IF=6.7; *ACS Applied Materials & Interfaces*, V.17(42), p.58973–58982, IF=8.3) в качестве стратегии модификации интерфейса NiO_x /перовскит, улучшения процессов переноса зарядов, повышения стабильности перовскитных устройств и эффективности. Использование данных научных результатов позволило повысить стабильность и эффективность ПСЭ.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на 5 научно-практических конференциях, включая 2 международных и 3 республиканских.

Публикация результатов исследования. По результатам диссертационного исследования опубликовано 9 научных работ. Среди них 5 научных статей в изданиях, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов доктора философии (PhD) диссертаций, в том числе 2 статьи в высокорейтинговых зарубежных научных журналах и 3 статьи в научных изданиях Узбекистана. Кроме того, 4 доклада были опубликованы в сборниках материалов международных и республиканских конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четыре главы, заключения и списка использованной литературы, а также содержит 43 рисунка и 7 таблиц. Общий объём диссертации составляет 130 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В разделе «Введение» обоснована актуальность темы диссертации и необходимость проведения исследований. Рассмотрено соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, проведен обзор научных работ по теме диссертации, а также проанализирована степень изученности данной темы.

Исходя из существующих нерешенных проблем сформулированы цель, задачи, объект, предмет исследований, а также описаны методы, использованные в работе. Подробно раскрыты научная новизна полученных результатов, их практическая значимость, достоверность, научная и практическая ценность, а также внедрение результатов в практику. Приведена информация о научных публикациях, выпущенных в рамках диссертационного исследования, апробации результатов, структуре работы и объеме диссертации.

В первой главе под названием **«Пассивирование CsFAMA-перовскита: комплексный анализ стратегий повышения эффективности и стабильности»** представлен детальный анализ структуры перовскита, различных его составных компонентов, а также наиболее исследованные перовскитные материалы и их параметры, известные в научной литературе. Рассмотрены виды дефектов, возникающих в активном слое ПСЭ, их влияние на фотоэлектрические параметры устройств и физическая роль этих процессов. Подробно объяснены механизмы образования дефектов, их миграция, а также механизмы деградации, обусловленные присутствием и движением дефектных состояний. Особое внимание уделено современным методам пассивации различных типов дефектов, применяемым для повышения стабильности и эффективности перовскитных солнечных элементов. Проведён сравнительный анализ результатов зарубежных исследований, в которых рассматривалось использование различных пассивирующих материалов и технологий, направленных на устранение поверхностных и объёмных дефектов. На основе анализа литературных данных определены преимущества и недостатки используемых веществ и технологических подходов, что позволило сформулировать цели и задачи настоящего исследования, а также определить основные направления экспериментальных работ, направленных на оптимизацию процессов пассивации и повышение стабильности CsFAMA-перовскитных солнечных элементов.

Во второй главе диссертации, озаглавленной **«Оптические и фотоэлектрические исследования процессов суперокисления йода и устранения дефектов в перовските CsFAMA с использованием функционального молекула CPTU»**, представлены результаты исследований, направленных на снижение фазовой нестабильности, повышение эксплуатационной стабильности и изучение механизмов деградации с оптической точки зрения для ПСЭ на основе CsFAMA. В целях оптимизации процесса кристаллизации перовскита и формирования самоорганизующихся молекулярных слоёв (SAM) применялась функциональная молекула CPTU. Использование данной молекулы позволило снизить фазовую нестабильность CsFAMA-перовскита, повысить долговременную стабильность работы устройств, а также провести комплексное оптическое исследование механизмов деградации, связанных с

суперокислением йода и образованием дефектных состояний в активном слое перовскита.

Обработка перовскита осуществлялась в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.

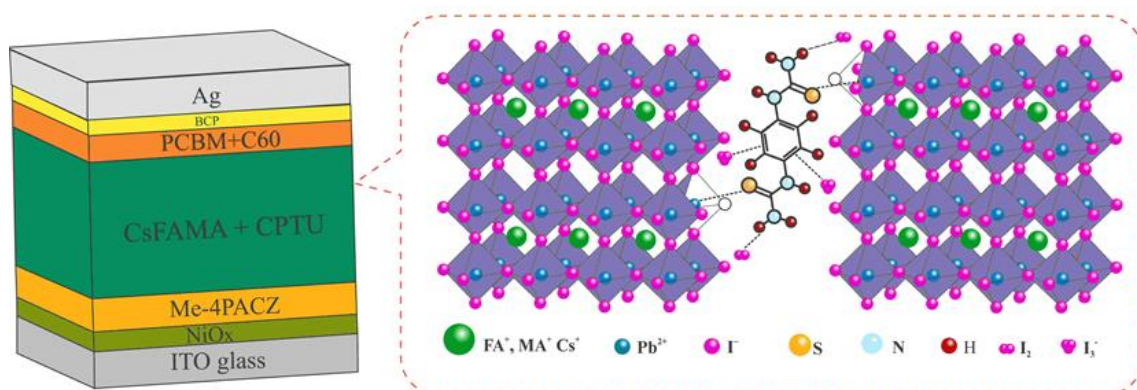


Рисунок 1. схематическое изображение структуры ПСЭ ITO/NiO_x/Me-4PACz/CsFAMA+CPTU/PCBM+C₆₀/BCP/Ag.

Для подтверждения того, что добавление модификатора CPTU действительно оказывает влияние на кристаллическую структуру и морфологию CsFAMA-перовскита, были проведены исследования с использованием FTIR, UV–Vis поглощения, SEM, EQE и tDOS анализов.

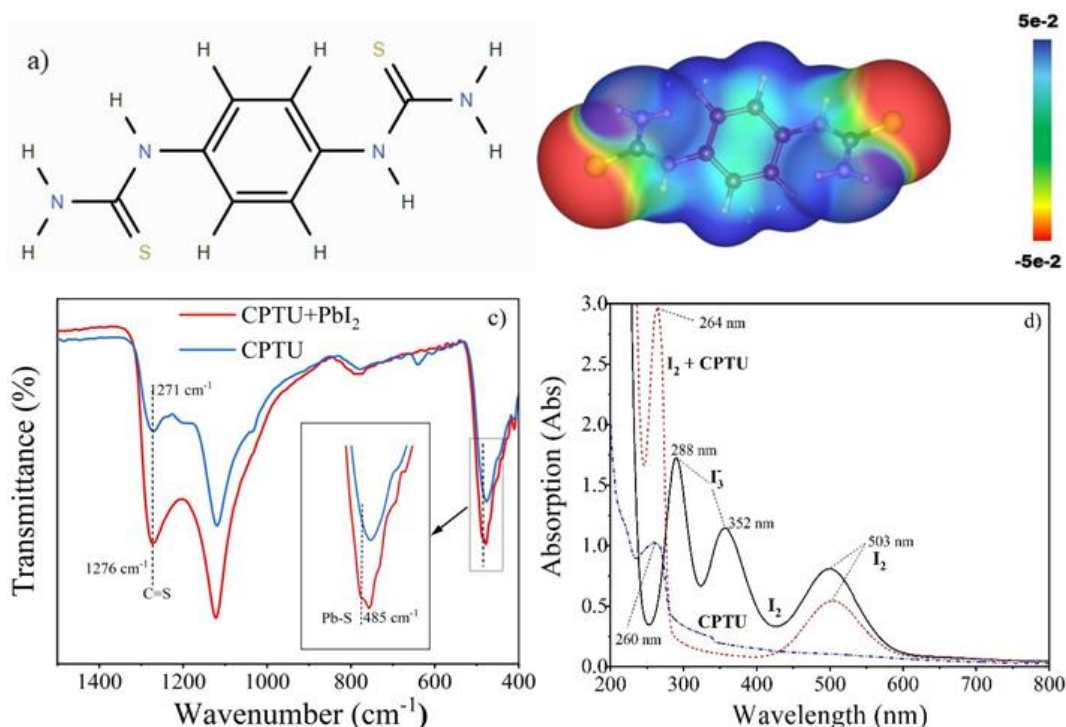


Рисунок 2. а) химическая структура молекулы CPTU; б) распределение заряда в молекуле CPTU, в) FTIR-спектры плёнок CPTU и CPTU+PbI₂; (д) UV–Vis-спектры поглощения веществ CPTU и I₂ (по отдельности и в смеси) в дихлорметане.

Высокоточные FTIR- и UV–Vis спектры поглощения (рисунок 2) продемонстрировали, что функциональные группы C=S и –NH₂ молекулы

CPTU образуют химические связи с дефектами Pb^{2+} и I^- в структуре перовскита — ($\text{C}=\text{S}\cdots\text{Pb}$ и $\text{N}-\text{H}\cdots\text{I}$). Эти результаты экспериментально подтверждают способность CPTU к химическому взаимодействию с дефектными центрами, что, в свою очередь, обеспечивает эффективную пассивацию безызлучательных рекомбинационных каналов на интерфейсе и способствует улучшению оптических и фотоэлектрических характеристик устройства.

Для оценки влияния вещества CPTU на стабильность перовскита с оптической точки зрения были исследованы спектры поглощения (UV–Vis) и стационарной флуоресценции (steady-state PL) перовскитных плёнок, а также эволюция этих спектров в процессе деградации (рисунок 3).

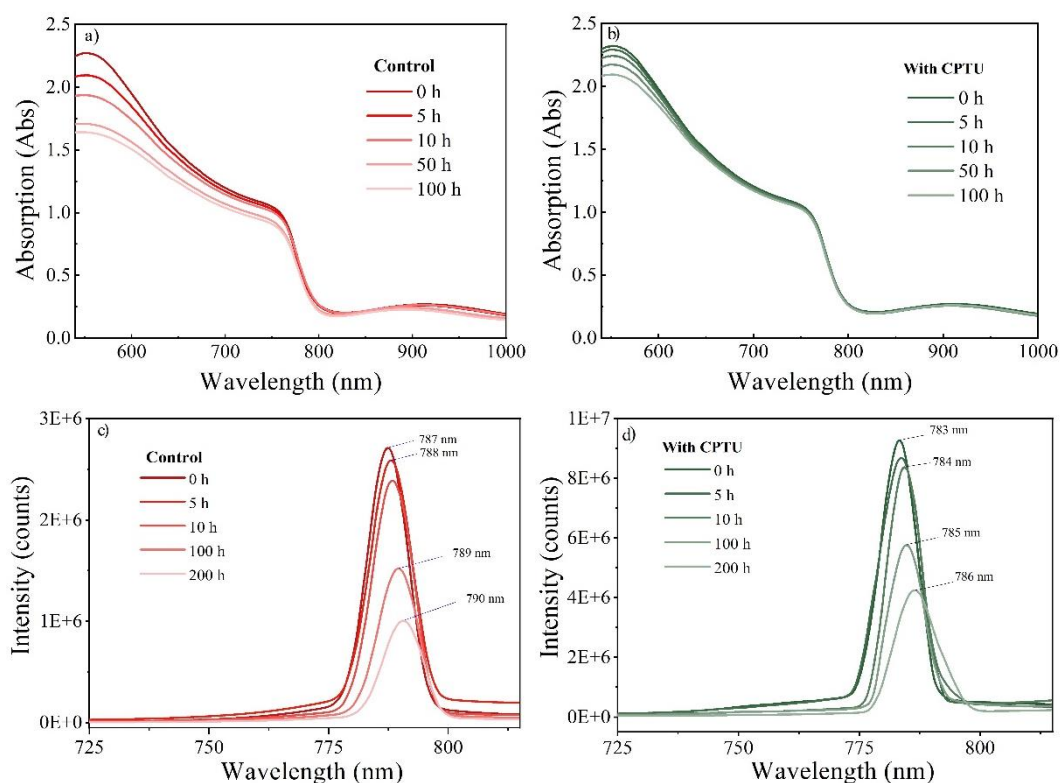


Рисунок 3. Эволюция спектров поглощения для перовскитных плёнок. а) контрольного образца и б) плёнки, пассивированной CPTU, в процессе деградации при воздействии естественных условий окружающей среды и солнечного излучения стандарта AM 1.5 G, в) и г) эволюция спектров стационарной флуоресценции для тех же образцов (контрольного и пассивированного CPTU) при аналогичных условиях деградации.

Установлено, что у контрольной плёнки спектр поглощения начинает заметно изменяться уже после 5 часов воздействия внешних факторов. В исходном состоянии перовскитная плёнка поглощает 99,465% падающего излучения при основной длине волны ≈ 552 нм. Однако через 100 часов данный показатель снижается до 97,682%, что свидетельствует о химических изменениях в структуре материала и начале деградационных процессов. Эти изменения, как показано, происходят в результате реакций суперокисления и окисления йодидов под воздействием излучения и кислорода. В отличие от

этого, перовскитная плёнка, пассивированная CPTU (рисунок 3б), демонстрирует значительно более высокую стабильность: начальное значение поглощения составляет 99,528%, и даже после 100 часов деградации оно сохраняется на уровне 99,187%. Таким образом, если для контрольного образца заметное ухудшение наблюдается уже через 5 часов, то для плёнки, модифицированной CPTU, аналогичные изменения проявляются только после 100 часов, что подтверждает эффективность пассивации CPTU в подавлении деградации перовскита.

В результате модификации перовскитного материала с помощью CPTU было установлено увеличение оптического коэффициента поглощения до 15%, а также рост интенсивности фотолуминесценции в 3 раза. Кроме того, время жизни носителей заряда увеличилось с 384 нс до 829 нс, что экспериментально подтверждает уменьшение плотности дефектных состояний и эффективное подавление безызлучательной рекомбинации.

Для оценки влияния введения вещества CPTU на фотоэлектрические параметры устройств были изучены $J-V$ характеристики перовскитных солнечных элементов (рисунок 4).

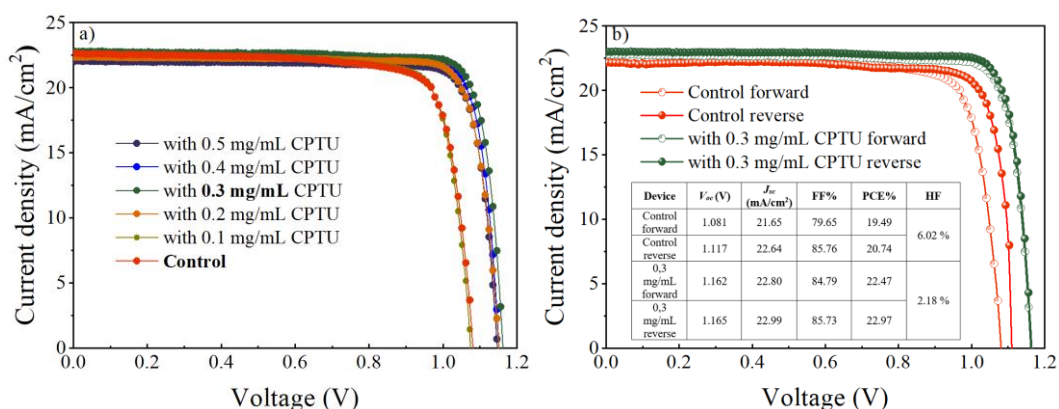


Рисунок 4. а) $J-V$ характеристики ПСЭ, пассивированных CPTU при различных концентрациях, а также контрольных устройств без добавки модификатора, б) прямые и обратные сканы $J-V$ -кривых, фотоэлектрические параметры и рассчитанные коэффициенты гистерезиса для устройств, пассивированных 0,3 мг/мл CPTU.

Как показано на рисунке 4, перовскитное устройство, изготовленное с добавлением 0,3 мг/мл CPTU, демонстрирует наилучшие фотоэлектрические параметры, достигая значений $V_{oc} = 1,165$ В и $J_{sc} = 22,99$ мА/см². Эти результаты однозначно указывают на улучшение степени кристаллизации перовскитной структуры, снижение плотности дефектных состояний и увеличение времени жизни носителей заряда. На основе полученных экспериментальных данных для перовскитных солнечных элементов был рассчитан коэффициент гистерезиса (HF) с использованием формулы, приведённой в литературных источниках. Расчёты показали, что при добавлении вещества CPTU значение HF снижается с 6,02% до 2,18%, что свидетельствует об эффективной пассивации дефектов в объёме и на

границах зёрен перовскитной плёнки, а также о стабилизации межфазных переходов в структуре устройства.

Для оценки эксплуатационной стабильности инкапсулированных устройств проводились испытания при температуре 45 °С под воздействием солнечного излучения AM 1.5G без УФ-фильтров в атмосферных условиях. После 1000 часов испытаний контрольные устройства сохраняли 69% от первоначальной эффективности, тогда как перовскитные солнечные элементы, модифицированные CPTU, сохраняли 84% исходной эффективности. Это подтверждает, что CPTU значительно повышает долговременную устойчивость и подавляет фотоиндуцированную деградацию CsFAMA-перовскита.

Глава 3 диссертации, озаглавленная «Влияние модификации интерфейса NiO_x и самоорганизующихся молекулярных слоёв (SAM) молекулой TCEP на морфологические и оптические параметры транспортного слоя и CsFAMA-перовскита», посвящённых пассивированию интерфейса между слоем транспортировки дырок и активным перовскитным слоем с использованием вещества-редуктора TCEP. Проведённые эксперименты были направлены на выявление механизма взаимодействия TCEP с поверхностью NiO_x , снижение концентрации дефектных состояний и улучшение согласования энергетических уровней на границе раздела слоёв, что обеспечивает повышение эффективности переноса зарядов и общей стабильности перовскитных солнечных элементов.

Для выявления механизмов взаимодействия между NiO_x и молекулой TCEP были проведены комплексные исследования с использованием следующих аналитических методов: FTIR, UV–Vis поглощения, SEM, AFM, XRD, DFT, EQE, Raman, XPS, ToF–SIMS и in situ UV–Vis-спектроскопия.

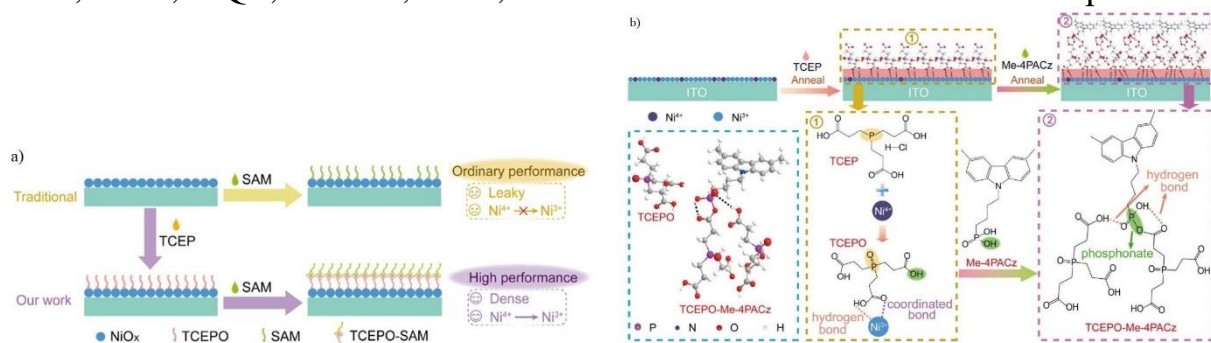


Рисунок 5. а) осаждение слоя SAM на подложку NiO_x и NiO_x/TCEP , б) формирование интегрированного транспортного слоя $\text{NiO}_x\text{--SAMs}$ с использованием введённой редукционной молекулы TCEP. Соответственно приведена схематическая диаграмма реакций взаимодействия молекулы TCEP с поверхностью NiO_x и слоем Me-4PACz.

На рисунке 5 представлена схема механизма оптимизации электронной структуры поверхности NiO_x и формирования SAM-слоя при обработке TCEP. Поверхность NiO_x предварительно обрабатывалась TCEP. Фосфиновые и карбоксильные группы молекулы TCEP формировали

координационные ($\text{C}=\text{O}\cdots\text{Ni}$) и водородные ($\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}-\text{Ni}$) связи с поверхностью оксида. В результате происходило восстановление Ni^{4+} до Ni^{3+} , то есть редукция оксидной фазы NiO_x , сопровождаемая образованием ТСЕРО. Дальнейшее взаимодействие карбоксильных групп ТСЕРО с фосфатными группами $-\text{PO}(\text{OH})_2$ молекулы Me-4PACz приводило к реакции дегидратации с образованием фосфонатных связей ($\text{P}-\text{O}-\text{C}$) и дополнительных водородных взаимодействий. Это обеспечивало пассивирование поверхностных дефектных состояний, устраняло избыточные окислительные центры на NiO_x и снижало вероятность вредных интерфейсных реакций. В результате таких преобразований значительно повышается плотность и стабильность SAM-слоёв, а также улучшается контакт между транспортными и активным слоями, что способствует повышению эффективности переноса зарядов и долговременной стабильности перовскитных солнечных элементов.

С целью изучения механизмов взаимодействия молекулы ТСЕР с Me-4PACz и NiO_x были проведены исследования методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR).

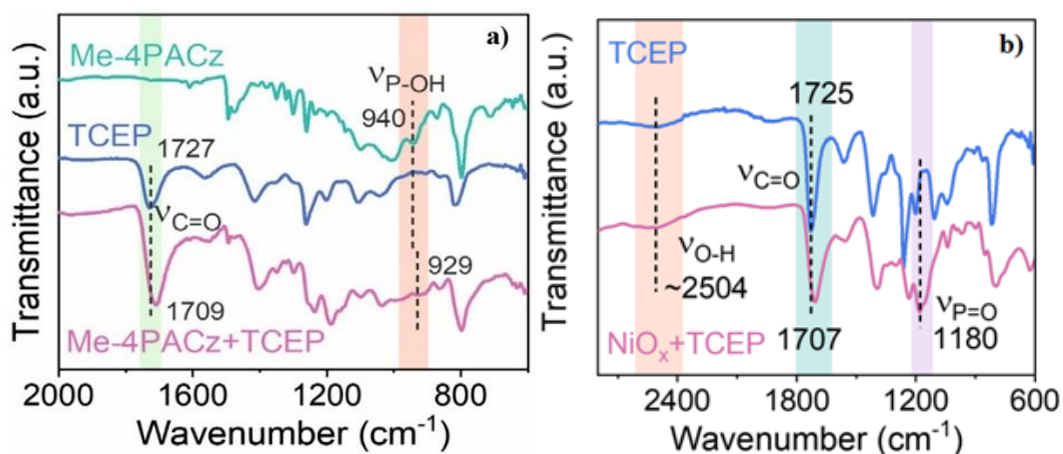


Рисунок 6. FTIR-спектры плёнок ТСЕР и NiO_x+TCEP , отражающие особенности химического взаимодействия и образование координационных связей между функциональными группами ТСЕР и поверхностью NiO_x .

Как видно из рисунка 6а, для чистого образца Me-4PACz фиксируется характерный пик при $\approx 940 \text{ cm}^{-1}$, соответствующий фосфонатной группе ($\text{P}-\text{OH}$), что подтверждает наличие свободных $-\text{PO}(\text{OH})_2$ групп. В спектре ТСЕР наблюдается интенсивный пик при 1727 cm^{-1} , относящийся к карбонильным ($\text{C}=\text{O}$) колебаниям карбоксильных групп, что свидетельствует о высокой реакционной способности молекулы. При совместном анализе Me-4PACz и ТСЕР отмечено смещение пиков: $\text{C}=\text{O}$ с 1727 до 1709 cm^{-1} и $\text{P}-\text{OH}$ с 940 до 929 cm^{-1} . Такое сдвигание указывает на протекание дегидратационной реакции с образованием новых фосфонатных эфиров ($\text{P}-\text{O}-\text{C}$), что свидетельствует о химическом взаимодействии между функциональными группами ТСЕР и Me-4PACz.

В молекуле ТСЕР наблюдаются пики, характерные для $\text{O}-\text{H}$ ($\approx 2504 \text{ cm}^{-1}$) и $\text{C}=\text{O}$ ($\approx 1725 \text{ cm}^{-1}$) групп (рисунок 6б). После адсорбции ТСЕР на

поверхность NiO_x пик $\text{C}=\text{O}$ смещается с 1725 до 1707 см^{-1} , интенсивность $\text{O}-\text{H}$ колебаний уменьшается, а в области $\approx 1180\text{ см}^{-1}$ появляется новый пик, соответствующий $\text{P}=\text{O}$ колебаниям. Эти изменения подтверждают, что ТСЕР подвергается окислению до ТСЕРО и образует с поверхностью NiO_x как координационные, так и ковалентные связи. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными DFT-расчётов, а также спектрами поглощения, XRD и XPS, что комплексно подтверждает механизм химической интеграции ТСЕР с NiO_x .

Для оценки стабильности молекулы Me-4PACz были проведены исследования покрытий $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ и $\text{NiO}_x/\text{ТСЕР}/\text{Me-4PACz}$ в исходном состоянии и после воздействия 100 мкл растворителя DMF. Кроме того, для сравнения была проанализирована чистая Me-4PACz-плёнка (рисунок 7).

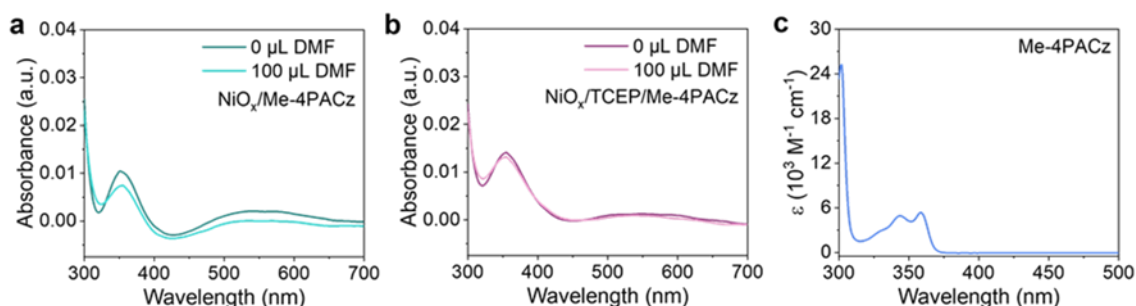


Рисунок 7. а) UV–Vis-спектры интерфейса $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ в исходном состоянии и после обработки 100 мкл DMF, б) UV–Vis-спектры интерфейса $\text{NiO}_x/\text{ТСЕР}/\text{Me-4PACz}$ до и после воздействия DMF, в) спектр поглощения раствора Me-4PACz в DMF при концентрации $5 \times 10^{-5}\text{ M}$.

Как видно, спектры $\text{NiO}_x/\text{ТСЕР}/\text{Me-4PACz}$ в исходном состоянии и после промывки 100 мкл DMF практически идентичны — значительного снижения интенсивности не наблюдается. Этот факт указывает на то, что химические связи $\text{P}-\text{O}-\text{C}$, сформированные на интерфейсе при участии ТСЕР, эффективно укрепляют слой SAM, делая его устойчивым к воздействию растворителей. Таким образом, введение ТСЕР обеспечивает повышенную химическую и термическую стабильность межфазного слоя, предотвращая его разрушение при контакте с прекурсорными растворами перовскита.

Для изучения влияния введения ТСЕР в интерфейс $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ на процесс кристаллизации перовскитной структуры были проведены *in situ* UV–Vis исследования (рисунок 8).

Анализ полученных результатов показал, что введение ТСЕР в интерфейс $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ приводит к замедлению скорости кристаллизации перовскитной структуры. Это обеспечивает формирование высококачественной плёнки с увеличенным размером зёрен, способствует снижению количества объёмных дефектов и повышает однородность морфологии. Указанные закономерности были подтверждены результатами SEM- и AFM-исследований.

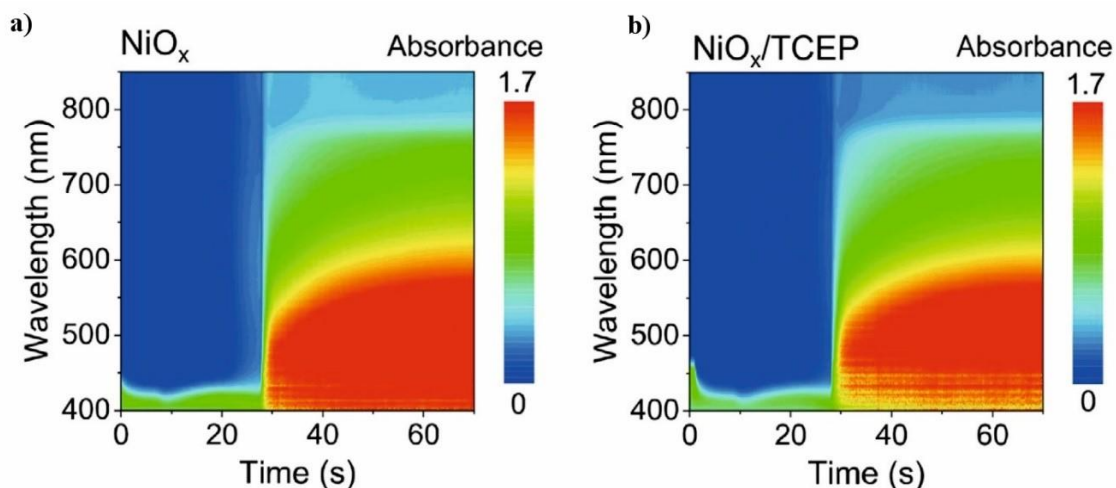


Рисунок 8. In situ UV–Vis-спектры поглощения перовскитных плёнок, выращенных на интерфейсах а) NiO_x и б) NiO_x/TCEP .

Для оценки влияния интерфейса NiO_x/TCEP на морфологию перовскита были изучены его SEM-изображения.

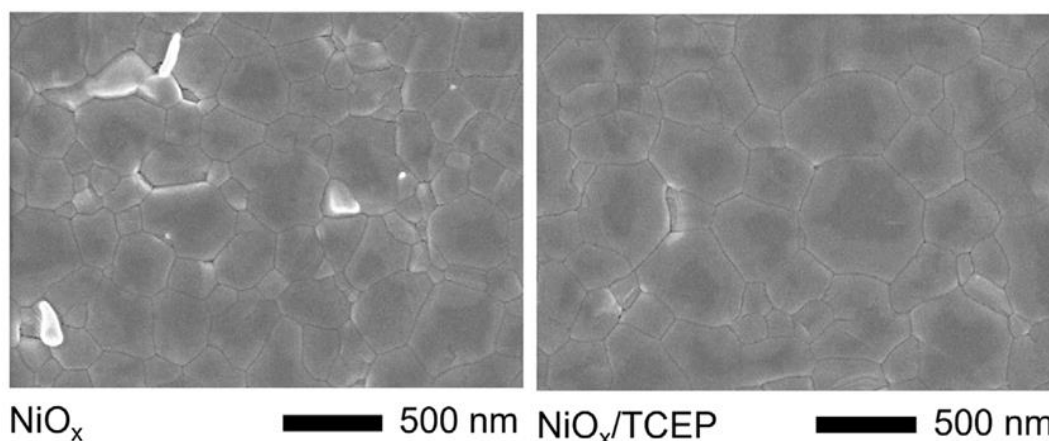


Рисунок 9. SEM-изображения нижних поверхностей (bottom-view) активных перовскитных слоёв, сформированных на подложках NiO_x и NiO_x/TCEP .

Как видно из приведённых SEM-изображений, введение TCEP приводит к улучшению морфологических параметров перовскитной плёнки. Наблюдается более однородная структура поверхности, укрупнение зёрен, а также снижение плотности микродефектов и повышение сплошности покрытия, что подтверждает положительное влияние TCEP на процесс формирования и качество перовскитного слоя.

В главе 4, «Влияние модификации интерфейса NiO_x и самоорганизующихся молекулярных слоёв (SAM) молекулой TCEP на фотоэлектрические и стабильностные параметры перовскитных солнечных элементов на основе CsFAMA», посвящён влиянию адсорбции молекулы TCEP на поверхность NiO_x на фотоэлектрические и стабильностные параметры перовскитных солнечных элементов. С целью изучения воздействия функциональной молекулы TCEP на фотовольтаические характеристики устройств были изготовлены планарные солнечные элементы

архитектуры: ИТО-стекло/ NiO_x /ТСЕР (или без ТСЕР)/Me-4PACz/CsFAMA/PEACl/ $\text{PC}_{61}\text{BM}+\text{C}_{60}$ /BCP/Ag.

Экспериментальные результаты показывают, что с увеличением концентрации ТСЕР J_{SC} и V_{OC} возрастают, что свидетельствует об эффективной пассивации дефектов на интерфейсе и снижении потерь при переносе заряда. Особенно при концентрации 0,3 мг/мл ТСЕР наблюдались наиболее высокие значения параметров J_{SC} , V_{OC} и FF, что обеспечило максимальную КПД. Дальнейшее увеличение концентрации до 0,5 мг/мл приводило к обратному эффекту — снижению всех параметров вследствие отклонения от оптимальных условий пассивации.

С целью оценки качества перовскитных солнечных элементов и инерционных свойств переноса зарядов были проанализированы J – V характеристики фотогальванических устройств, содержащих слой переноса дырок без модификации (контрольный образец) и с модификацией функциональной молекулой ТСЕР, зарегистрированные при прямом и обратном сканировании.

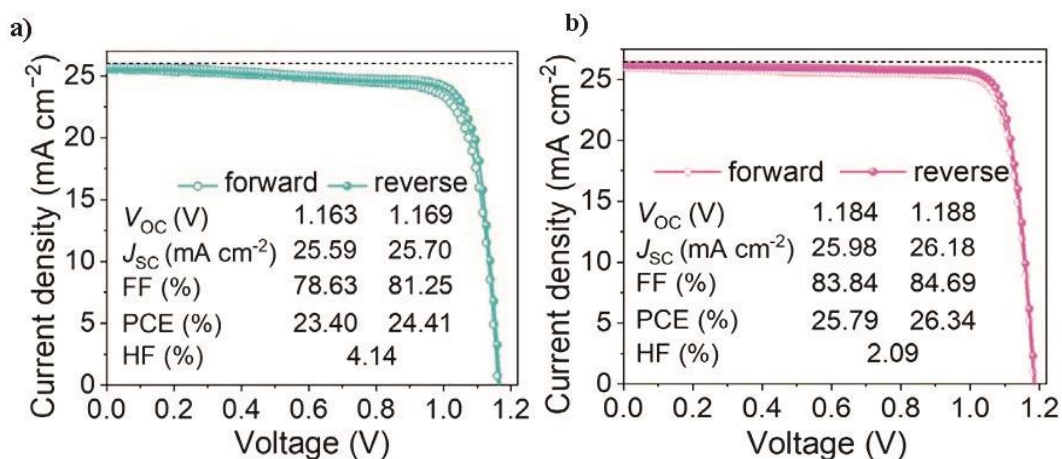


Рисунок 10. J – V характеристики ПСЭ: контрольного образца (NiO_x) и устройства, модифицированного ТСЕР (NiO_x/TCEP), зарегистрированные в режимах прямого и обратного сканирования.

Как видно из полученных результатов, устройство, модифицированное ТСЕР, демонстрирует значительно более высокие фотоэлектрические параметры: $V_{\text{OC}} = 1.184$ – 1.188 В, $J_{\text{SC}} = 25.98$ – 26.18 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, FF = 83.84–84.69%, а КПД достигает 25.79–26.34%. Кроме того, значение коэффициента гистерезиса (HF) снизилось с 4.14% до 2.09%, что указывает на существенное подавление эффекта гистерезиса и улучшение динамики переноса зарядов в устройстве.

С целью глубокого анализа процессов разделения, переноса и рекомбинации зарядов между фазами в перовскитных устройствах на основе CsFAMA, содержащих дырочный транспортный слой без и с модификацией ТСЕР, были проведены исследования стационарной фотолюминесценции и TRPL.

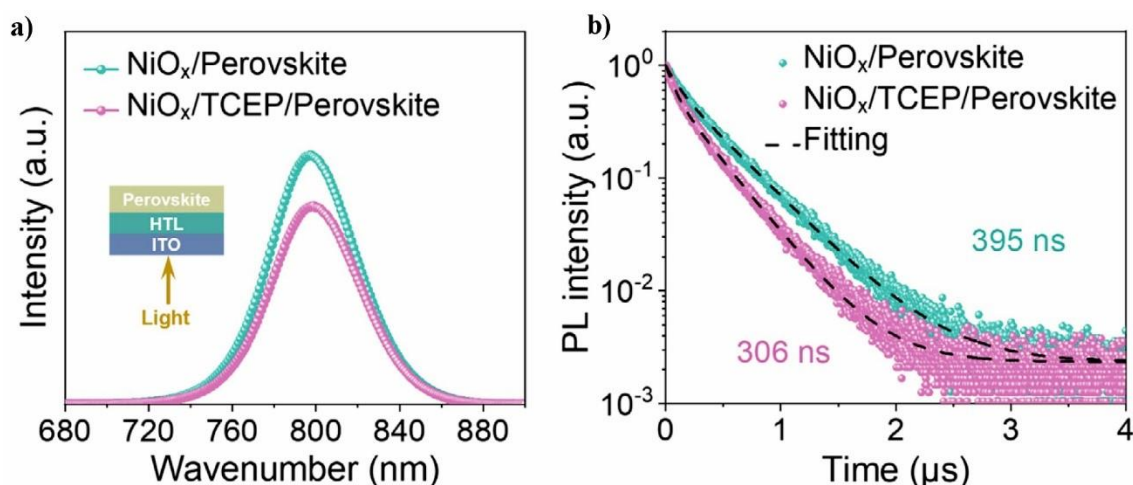


Рисунок 11. Стационарная фотолюминесценция и TRPL перовскитных плёнок CsFAMA, осаждённых на интерфейсы $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$, модифицированные молекулой TCEP.

Как видно из стационарных спектров фотолюминесценции (рисунок 11a), интенсивность флуоресценции в образце $\text{NiO}_x/\text{TCEP}/\text{перовскит}$ значительно ниже, чем у контрольного образца без TCEP. Это свидетельствует о том, что после модификации TCEP процесс переноса зарядов на интерфейсе происходит более эффективно, что приводит к снижению вероятности радиационной рекомбинации.

Анализ TRPL показал, что время жизни носителей заряда уменьшилось с 395 нс до 306 нс. Такой результат указывает на сокращение концентрации дефектных состояний в области интерфейса слой переноса дырок/перовскит и подтверждает, что нерадикационные каналы рекомбинации были эффективно пассивированы.

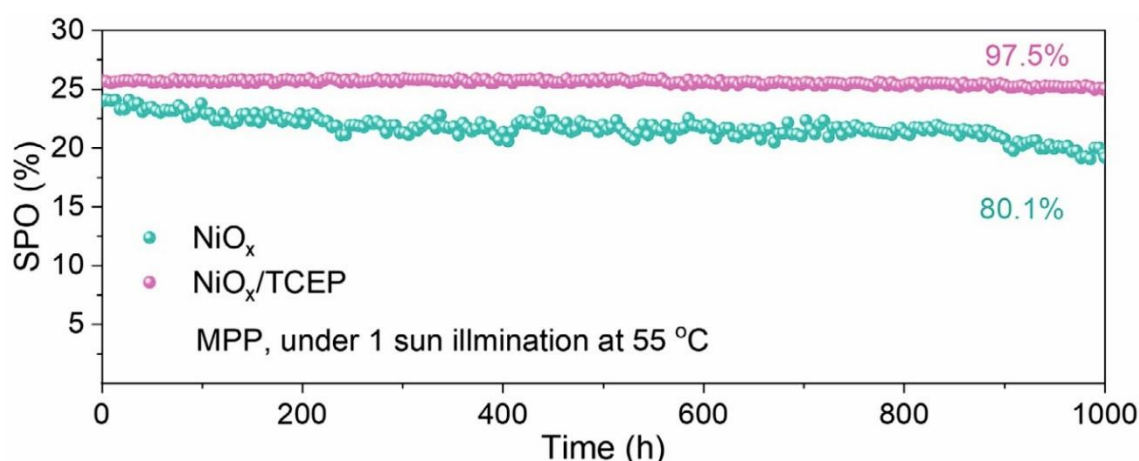


Рисунок 12. Испытания эксплуатационной стабильности перовскитных устройств с интерфейсами NiO_x и NiO_x/TCEP при температуре 55°C , в атмосфере воздуха и при освещении мощностью одного солнца (1 sun).

Одним из ключевых факторов деградации перовскитных структур является длительное воздействие света и внешней электрической нагрузки. В связи с этим была проведена оценка рабочей стабильности (MPP tracking) для герметизированных контрольных и TCEP-модифицированных устройств при

температуре 55°C, в атмосфере воздуха и при освещении “одним солнцем” (one-sun, белый LED) на протяжении 1000 часов.

Как показано на рисунке 12, устройство с интерфейсом NiO_x сохраняет 80,1% своей начальной эффективности после 1000 часов работы, тогда как модифицированное устройство $\text{NiO}_x\text{--SAMs}$, обработанное TCSP, демонстрирует значительно более высокую стабильность — 97,5% сохранённой эффективности за тот же период. Согласно линейной зависимости эффективности от времени, теоретический срок службы (T_{80}) для устройства на основе NiO_x составляет приблизительно 1457 часов, тогда как для устройства NiO_x/TCSP этот показатель достигает ≈ 9369 часов, что свидетельствует о существенном повышении эксплуатационной стабильности и эффективном подавлении деградиационных процессов при использовании TCSP в качестве модификатора интерфейса.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Выводы

1. Характерная полоса колебаний с частотой 1271 см^{-1} во FTIR-спектре, относящаяся к тиокарбамидной группе CPTU, при добавлении PbI_2 смещается в область более высоких частот, до 1276 см^{-1} , которое свидетельствует об образовании координационного взаимодействия $\text{C}=\text{S}\cdots\text{Pb}$, когда связь $\text{C}=\text{S}$ в молекуле CPTU координируется ионами Pb^{2+} . При этом появление новой полосы на 485 см^{-1} подтверждает формирование связей Pb--S , а образование такой связи указывает на наличие взаимодействия Ван-дер-Ваальса между CPTU и PbI_2 , обеспечивающего устойчивое сопряжение на межфазной границе.
2. Молекулы CPTU могут интенсивно взаимодействовать в виде «донор–акцептор» с I_2 и его ионными формами (I_2 , I_3^-), эффективно подавляя процессы окисления йодидов, что отражается в изменении интенсивности полосы поглощения молекулярного йода I_2 при 503 нм в 1,7 раза характерных полос I_3^- при 288 и 352 нм. При этом собственная полоса поглощения CPTU смещается в красную сторону с 260 нм до 264 нм, а её интенсивность возрастает более чем в 10 раз. Эти результаты свидетельствуют о том, что CPTU значительно ограничивает реакции суперокисления йода в перовскитной среде и существенно снижает скорость фотохимической дегградации материала.
3. В перовскитных солнечных элементах на основе CsFAMA, модифицированных CPTU оптический коэффициент поглощения увеличивается на 15%, интенсивность фотолюминесценции в 3 раза, а время жизни носителей заряда с 384 нс до 829 нс. В результате этого КПД устройства повысилась с 20.74% до 22.97%, а эксплуатационная стабильность (T_{80}) после 1000 часов непрерывной работы сохранилась на уровне 84%. Эти результаты свидетельствуют о том, что CPTU

эффективно пассивирует дефекты в структуре перовскита и существенно замедляет деградацию кристаллической решётки, обеспечивая улучшенные оптические и эксплуатационные характеристики устройства.

4. Анализ FTIR-спектров показал, что после адсорбции TCSP на поверхности NiO_x полоса колебаний C=O карбоксильной группы смещается из области $1725\text{--}1727\text{ см}^{-1}$ в область $1707\text{--}1709\text{ см}^{-1}$ (красное смещение), что свидетельствует об образовании координационной связи $\text{C=O}\cdots\text{Ni}$ между TCSP и поверхностью NiO_x . Кроме того, появление новой полосы P=O при $\approx 1180\text{ см}^{-1}$ подтверждает окисление TCSP до TCSP=O и формирование связей типа $\text{Ni-O/P=O}\cdots\text{Ni}$. Дополнительно установлено, что вибрационная полоса P-OH в молекуле Me-4PACz смещается примерно на 11 см^{-1} , а полоса C=O в TCSP — на 18 см^{-1} , что однозначно указывает на образование P-O-C (эфирных/фосфонатных) связей в результате дегидратации.
5. Данные in-situ UV-Vis спектроскопии, и SEM и AFM анализа структуры показали, что введение TCSP приводит к замедлению скорости кристаллизации перовскита, что способствует формированию крупнозернистой и малодефектной плёнки. При этом дефекты области интерфейса могут эффективно пассивироваться, обеспечивая более стабильную и однородную морфологию перовскитного слоя.
6. Согласно анализу XPS-спектров, в результате редукции, вызванной действием TCSP, доля высоковалентных центров Ni^{4+} уменьшилась с 26,9% до 20,6%, тогда как содержание Ni^{3+} увеличилось с 35,4% до 41,3%. Эти изменения свидетельствуют о снижении концентрации вредных окисдирующих центров, уменьшении плотности оптических дефектных состояний, а также об эффективном подавлении рекомбинационных процессов на интерфейсе.
7. Анализ данных по фотолюминесценции и TRPL показал, что модификация TCSP вызывает подавление фотолюминесценции и сокращение ее времени жизни носителей заряда с 395 нс до 306 нс, что свидетельствует о возможности более быстрого и эффективного переноса зарядов из перовскита в слой переноса дырок и снижении доли безызлучательной рекомбинации возбуждения.
8. Благодаря способности функциональных групп фосфина и карбоксила, входящих в состав молекулы TCSP, инициировать редукцию $\text{Ni}^{4+} \rightarrow \text{Ni}^{3+}$, была достигнута эффективная пассивация дефектов на интерфейсе $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$. В результате в перовскитной архитектуре $\text{NiO}_x/\text{TCSP}/\text{Me-4PACz}/\text{CsFAMA}$ обеспечена эксплуатационная стабильность $T_{80} = 9369$ часов, что на сегодняшний день является наивысшим показателем для CsFAMA-систем.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.05/2025.27.12.FM/T.09.01 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**

BOYNAZAROV ILHOM RUSTAM UGLI

**EFFECT OF CPTU AND TCEP PASSIVATING MATERIALS ON THE
OPTICAL, PHOTOVOLTAIC PROPERTIES AND STABILITY OF
CSFAMA-BASED PEROVSKITE SOLAR CELLS**

01.04.05 – Optics

Abstract
of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

Tashkent- 2026

The theme of PhD dissertation was registered by the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science & Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2025.3.PhD/FM1369.

The dissertation has been prepared at the U.A. Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies.

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-educational portal «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: **Vakhobjon Ortikovich Kuvondikov**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

Official opponents: **Rahmatullayev Ilyos Arzimurodovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Urolov Shamsiddin Zayniddinovich
Doctor of Philosophy (PhD) in Physics and Mathematics, Senior Researcher

Leading organization: **Chirchik State Pedagogical University**

The defense will take place on «17» **February 2026** at **14:30** at the meeting of Scientific Council number DSc.05/2025.27.12.FM/T.09.01 at the U.A. Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, Durmon yuli St., 33. Tel./Fax: (99871) 262–32–54, e-mail: info@iplt.uz).

The dissertation is possible to review in the Information-Resource Centre at the Institute Ion – Plasma and Laser Technology (is registered № **26/1**) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, Durmon yuli St., 33. Tel./Fax: (99871) 262–32–54, e-mail: info@iplt.uz).

The abstract of the dissertation was sent out on «5» **February 2026**.

(Mailing report № **26/1** on «5» **February 2026**).



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 PhD dissertation)

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.’

The purpose of the dissertation work is to enhance the efficiency and long-term operational stability of CsFAMA-based perovskite solar cells through the implementation of bulk passivation using CPTU molecules and interfacial engineering employing TCEP modifiers.

Scientific novelty of the research work:

For the first time, analysis of UV–Vis absorption spectra, including the dynamic changes of I_3^- peaks at 288 nm and 352 nm and the I_2 peak at 503 nm, revealed that the CPTU molecule suppresses iodide oxidation reactions, meaning that the I_2/I_3^- states are reduced by CPTU.

It was demonstrated that the photoluminescence peak of CsFAMA shifts from 787 nm to 783 nm (a 4 nm “blue shift”) after CPTU incorporation, while the PL intensity increases by more than a factor of 3. This indicates a reduction in shallow halide vacancies/antisite defects at perovskite grain boundaries and weakened local trap states.

For the first time, CPTU was employed as a modifier capable of suppressing iodine superoxidation reactions and passivating defects in CsFAMA perovskites. Bulk passivation using CPTU increased the device energy conversion efficiency from 20.74% to 22.97%, while operational stability retained 84% of the initial performance after 1000 hours.

FTIR analysis revealed a red shift of the TCEP C=O peak from 1725 cm^{-1} to 1709 cm^{-1} , and a shift of the P–OH vibration in Me-4PACz from $\sim 940\text{ cm}^{-1}$ to 929 cm^{-1} , elucidating the mechanisms through which TCEP passivates NiO_x defects and improves the interface via van der Waals interactions.

For the first time, the appearance of a Raman peak corresponding to $\text{P}=\text{O}\cdots\text{Ni}$ coordination around $\sim 930\text{ cm}^{-1}$ experimentally confirmed the chemical integration of TCEPO on the NiO_x surface.

Steady-state PL and TRPL analyses showed that after TCEP modification, the PL intensity decreases and the charge carrier lifetime shortens from 395 ns to 306 ns. As a result, charge extraction from perovskite to NiO_x increased by a factor of 1.3. For the first time, Raman spectra exhibited a $\text{P}=\text{O}\cdots\text{Ni}$ coordination peak around $\sim 930\text{ cm}^{-1}$, providing direct experimental evidence of the chemical integration of oxidized TCEP (TCEPO) with the NiO_x surface;

For the first time, TCEP was used as a reductant and passivator to modify the $\text{NiO}_x/\text{Me-4PACz}$ interface. The $\text{NiO}_x/\text{TCEP}/\text{Me-4PACz}/\text{CsFAMA}$ perovskite structure achieved a power conversion efficiency of 26.34% and an operational stability of 9369 hours (T_{80}), representing a record performance for CsFAMA-

based perovskite solar cells.

Publication of the results. A total of 9 scientific papers have been published based on the results of the dissertation research. Among these, 5 articles appeared in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations, including 5 articles in reputable international scientific journals and 3 articles in national scientific publications. In addition, 4 conference presentations were published in the proceedings of international and national conferences.

Structure and volume of dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, and a list of references, and it contains 43 figures and 7 tables. The total length of the dissertation is 130 pages.

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

I bo'lim (I часть; part I)

- 1A. Boynazarov, I., Feng, G., Nematov, S., He, X., Li, X., & Tajibaev, I. Enhanced Stability through Efficient Suppression of Iodine Oxidation Pathways in CsFAMA Perovskite Solar Cells via Thiourea-Based Molecule. Energy Technology, 2025, e202500820. (№1, Web of Science; IF = 3.6)
- 2A. Hui Chen, Qi Cao, Xingyu Pu, Qingyuan Zhao, Xilai He, Zihao Zhou, Tong Wang, Guangpeng Feng, Ranhao Yin, Zhongwei Chen, Ilkhom Tajibaev, Ilkhom Boynazarov, Yijun Bai, Shiyao Jia, Xuanhua Li. Strong Coupling of NiO_x and Self-Assembled Molecules via Inserted Reductant for High-Performance Inverted Perovskite Solar Cells. Advanced Materials, 2025, e10553. (№1, Web of Science; IF = 27)
- 3A. Ne'matov Sherzod Qalandarovich, Tojiboyev Ilhom Ibrohimjonovich, Quvondiqov Vahobjon Ortiqovich, Imomov Muhibjon Xabibjonovich, Boynazarov Ilhom Rustam o'g'li. 4PT molekulasi yordamida qo'shimcha muhandislik orqali CsFAMA asosidagi perovskit quyosh elementlari samaradorligi va barqarorligini oshirishning optik-spektral tadqiqi // Buxoro davlat universiteti ilmiy axboroti 2025/9 (126) B. 42-47. (01.00.00: №3)
- 4A. Tojiboyev Ilhom Ibrohimjonovich, Quvondiqov Vahobjon Ortiqovich, Boynazarov Ilhom Rustam o'g'li, Ro'ziyev Farid Murtoza o'g'li, Turg'unboyev Abror Yulchi o'g'li. TCPH orqali perovskit quyosh elementlari kovak tashuvchi qatlami modifikatsiyasi // Buxoro davlat universiteti ilmiy axboroti 2025/9 (126) B. 70-75. (01.00.00: №3)
- 5A. Tojiboyev Ilhom Ibrohimjonovich, Quvondiqov Vahobjon Ortiqovich, Boynazarov Ilhom Rustam o'g'li. Tritosiyaturik kislota trinatriy tuzi qo'shilishining csfama asosidagi perovskit quyosh elementlari morfologik xususiyatlariga ta'siri // NamDU Ilmiy Axborotnomasi 2025-5-son, B 128-131. (01.00.00: №14)

II bo'lim (II часть; part II)

- 6A. Boynazarov I.R. O'z-o'zidan yig'iluvchi molekular yordamida CsFAMA asosidagi perovskit quyosh elementlarining fotovoltaiik parametrlarini yaxshilash / Fizikada fundamental va amaliy tadqiqotlar, O'zMU, 16-17-may, 2025-yil. B. 186-188
- 7A. Boynazarov I.R, Tajibayev I.I, Quvondiqov V.O, Qo'shimcha muhandislik yordamida CsFAMA asosidagi perovskit quyosh elementlarining fotovoltaiik parametrlarini yaxshilash / Professor T.S. Kamalov tavalludining 90 yilligiga bag'ishlangan "Energetika va energiya tejash muammolari" Respublika ilmiy-amaliy anjumani. 2025-yil 14-15 may. B. 313-314

- 8A. Boynazarov I.R, Imomov M.X. Qo'shimcha muhandislik yordamida CsFAMA asosidagi perovskit quyosh elementlarining elektr xossalarini yaxshilash / "Zamonaviy fizika va energetikani fundamental va amaliy muammolari" Namangan 5-6 iyun, 2025. B. 81-83
- 9A. Boynazarov I.I. Efficient Suppression of Iodine Oxidation Pathways in Perovskites via Thiourea-based Molecular Engineering / Workshop on International Conference on Advanced Materials and Energy Storage Systems. Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies Academy of Sciences of Uzbekistan, May 21-23, 2025, Tashkent.