

**NAVOIY DAVLAT KONCHILIK VA TEXNOLOGIYALAR
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.31/2025.27.12.T.01.01. RAQAMLI ILMIY KENGASH**

DENOV TADBIRKORLIK VA PEDAGOGIKA INSTITUTI

SHUKUROV DILMUROD XURSANOVICH

**TANDEM QUYOSH ELEMENTLARI UCHUN YANGI AVLOD
ORGANIK YARIMO'TKAZGICH PIGMENTLAR OLISH
TEXNOLOGIYASINI ISHLAB CHIQISH**

**02.00.14 – Organik moddalar va ular asosidagi materiallar texnologiyasi
(texnika fanlari)**

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

UO‘K: 667.287.5; 667.287.53; 667.287.548.

Texnika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора технических наук (DSc)

Table of contents of the abstract of the dissertation of the doctor (DSc) of technical sciences

Shukurov Dilmurod Xursanovich

Tandem quyosh elementlari uchun yangi avlod organik yarimo‘tkazgich pigmentlar olish texnologiyasini ishlab chiqish..... 3

Шукуров Дилмурод Хурсанович

Разработка технологии получения органических полупроводниковых пигментов нового поколения для тандемных солнечных элементов..... 29

Shukurov Dilmurod

Development of a technology for obtaining new generation organic semiconductor pigments for tandem solar cells 59

E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 63

**NAVOIY DAVLAT KONCHILIK VA TEXNOLOGIYALAR
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.31/2025.27.12.T.01.01. RAQAMLI ILMIY KENGASH**

DENOV TADBIRKORLIK VA PEDAGOGIKA INSTITUTI

SHUKUROV DILMUROD XURSANOVICH

**TANDEM QUYOSH ELEMENTLARI UCHUN YANGI AVLOD ORGANIK
YARIMO‘TKAZGICH PIGMENTLAR OLISH TEXNOLOGIYASINI
ISHLAB CHIQISH**

02.00.14 – Organik moddalar va ular asosidagi materiallar texnologiyasi

**Texnika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Texnika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2026.3.DSc/T1116. raqam bilan ro'yxatga olingan.

Doktorlik dissertatsiyasi Denov tadbirkorlik va pedagogika institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (nsumt.uz) va "ZiyoNet" axborot ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi:

Turayev Xayit Xudaynazarovich
kimyo fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Vapoyev Husnitdin Mirzoyevich
texnika fanlari doktori, professor

Adilov Ravshan Irkinovich
texnika fanlari doktori, professor

Fayziyev Jaxongir Baxromovich
texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

Yetakchi tashkilot:

Qarshi davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.31/2025.27.12.T.01.01. raqamli ilmiy kengashning "3" oktyabr 2026-yil soat 9:00 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (210100, Navoiy viloyati, Navoiy shahri, G'alaba Shoh ko'chasi 76v-uy. Tel.: (+99879)-223-49-66, faks: (+99879) 223-53-62, e-mail: info@nsumt.uz).

Dissertatsiya bilan Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universitetining Axborot resurs markazida tanishish mumkin (№ 265 raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 210100, Navoiy viloyati, Navoiy shahri, G'alaba Shoh ko'chasi 76v-uy. Tel.: (+99879)-223-49-66, faks: (+99879) 223-53-62, e-mail: info@nsumt.uz

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil "16" sentyabr kuni tarqatildi.
(2026-yil "16" 09 dagi 27 raqamli reyestr bayonnomasi).



B.F.Muxiddinov

Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi, k.f.d., prof.

S.Sh.Sharipov

Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash kotibi, t.f.d., dots.

H.M.Vapoyev

Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash qoshidagi
ilmiy seminar raisi, t.f.d., prof.

KIRISH (fan doktori (DSc) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda aholi soni va ishlab chiqarish hajmining oshib borishi sababli energiyaga bo'lgan talab ham yildan yilga ortib bormoqda. Hozirgi vaqtda energiya bilan bog'liq bo'lgan muammolarni hal etishda eng samarali bo'lgan yechimlardan biri bu muqobil energiyalardan foydalanishdir. Bu esa energiyaga bo'lgan talabni qondirish bilan bir vaqtda elektr energiyasi olish tannarxini kamaytirish hamda noorganik va organik yarimo'tkazgich materiallar asosida arzon va istiqbolli quyosh elementlarini olishga imkon beradi. Ftalosianin asosidagi metallokompleks pigmentlarni sensibilizatorlar sifatida tandem quyosh elementlari uchun ishlatish quyosh elementlarining samaradorligini 30% gacha oshirish muhim amaliy ahamiyat kasb etadi. Muqobil energiyaga bo'lgan talabning bunday tez o'sishi tadqiqotchilar oldiga ishlab chiqarish amaliyotida nazariy va amaliy jihatdan muhim ahamiyatga ega bo'lgan noan'anaviy texnologiyalarni yaratish vazifalarini qo'yadi. Bu borada yarimo'tkazgich polimer materiallar, metall va metallas atomlar saqlagan ftalosianin bo'yoq moddalarga asoslangan quyosh nurlariga sezgir fotoelementlardan arzon va ekologik toza elektr energiyasini olish alohida ahamiyat kasb etadi.

Dunyoda yarimo'tkazgich ftalosianin asosidagi metallokompleks birikmalar hamda polimer bo'yoq pigmentlarga asoslangan yangi quyosh elementlarini yaratish va ishlab chiqarishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari jadallik bilan olib borilmoqda. Tandem asosida olingan quyosh elementlari amalda foydalanilayotgan quyosh elementlari ichida o'zining moslashuvchan sodda tuzilishi, ekologik tozaligi, iqtisodiy samaradorligi, texnik jihatdan xavfsizligi tufayli hozirda ishlab chiqarishda mavjud kremniy asosidagi quyosh elementlari bilan raqobatlasha oladigan quyosh elementlari bo'lib kelmoqda. Bu borada organik yarimo'tkazgich materiallar asosida tandem fotoelementlarini hosil qilish va ularni indiy, talliy oksidlarining o'rnini bosuvchi yarimo'tkazgich birikmalar sifatida ishlatishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Respublikamizda kimyo va energetika sanoat sohalarini rivojlantirish maqsadida zamonaviy talablarga javob bera oladigan yangi turdagi yarimo'tkazgich materiallar olish bo'yicha ilg'or ilmiy asoslangan chora-tadbirlarni joriy qilib, bir qator ilmiy-amaliy natijalarga erishilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 2-dekabrdagi PQ-436-son "2030-yilgacha O'zbekiston Respublikasining "yashil" iqtisodiyotga o'tishiga qaratilgan islohotlar samaradorligini oshirish bo'yicha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarorida "qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ishlab chiqarish quvvatini oshirish va ularning ulushini elektr energiyasini ishlab chiqarish umumiy hajmining 30 foizidan ko'prog'iga yetkazish"¹ ga yo'naltirilgan muhim vazifalar belgilab berilgan. Bu borada yashil energiya manbasi hisoblangan tandem quyosh elementlari uchun

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 2-dekabrdagi PQ-436-son "2030-yilgacha O'zbekiston Respublikasining "yashil" iqtisodiyotga o'tishiga qaratilgan islohotlar samaradorligini oshirish bo'yicha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarori

ftalosianin asosidagi metallokompleks pigmentlarni olish texnologiyasini ishlab chiqishga qaratilgan tadqiqotlar katta ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 21-mayda qabul qilingan O'RQ-539-son "Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish to'g'risida"gi Qonuni, 2023-yil 16-fevraldagi PQ-57-son "Qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi, 2020-yil 12-avgustdagi PQ-4805-son "Kimyo va biologiya yo'nalishlarida uzluksiz ta'lim sifatini va ilm-fan natijadorligini oshirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Qarorlarning ijrosini ta'minlashda hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti natijalari muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot ishi respublika fan va texnologiyalarni rivojlantirishning (VII). "Kimyo texnologiyalari va nanotexnologiyalar" hamda II. "Energetika, energiya va resurslarni tejash" kabi ustuvor yo'nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi². Ftalosianin, anilin va grafen asosidagi yarimo'tkazgich pigment materiallar olish va ular asosida muqobil energiya manbalaridan biri bo'lgan quyosh energiyasidan arzon, sifatli va ekologik toza elektr energiya olishga yo'naltirilgan ilmiy izlanishlar jahonning yetakchi ilmiy markazlari va oliy ta'lim muassasalarida, jumladan: Dezhou University Yuexing Zhang, University of Science and Technology, China University of Petroleum (East China (Xitoy), University of Ulsan (Janubiy Koreya), Palacký University Olomouc (Chexiya), (Tambov davlat texnika universiteti (Rossiya), Middle East Technical University (METU), Munzur University, Kafkas University, Firat University (Turkiya), San Jose State University, University of Massachusetts Amherst, Macau University of Science and Technology, University of California, Santa Barbara (UCSB), University of California, Santa Barbara (UCSB), Beijing University of Chemical Technology (BUCT), University of Connecticut, University of Tsukuba (Yaponiya), University of Pennsylvania (Yangi Zelandiya), Ftalosianin asosidagi yarim o'tkazgich materiallar bo'yicha Rossiya Fotovoltika laboratoriyasi (Ioffe Instituti), Fizika-Quyosh IICHB materialshunoslik instituti, (O'zbekiston), International Solar Energy Institute (O'zbekiston), Toshkent kimyo texnologiya ilmiy-tadqiqot instituti, Termiz davlat universiteti kabi Ilmiy tadqiqot markazlarida olib borilmoqda.

Dunyoda ftalosianin, anilin va grafen oksidi asosida fotoaktiv va fotosensibilizator pigmentlar olish va ular asosida quyosh va yorug'lik nuri asosida arzon, ekologik toza va muqobil energiya ishlab chiqarish bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar davomida quyidagi bir qator natijalar olingan, jumladan, mis (II/I) Red Ox mediator va porfirin bo'yoq bilan 14,3% samaradorlikka erishilgan

² Dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy-tadqiqotlar sharhi <http://www.scholar.google.com>, <http://www.sciencedirect.com> va boshqa manbaalar materiallari asosida tayyorlangan.

(Shveytsariya), xlorofill hosilalari bilan tabiiy bo'yoqlar asosida 8% samaradorlikka ega bo'yoq sezgir quyosh elementlari olingan (Malayziya), Spiro OMeTAD va CuSCN tarkibli elektron va kovak transporti materiallari ishlab chiqilgan (Shveytsariya), 15% dan ortiq samaradorlikka ega bo'lgan perovskit va tandem quyosh elementlari olingan (Singapur), 26% samaradorlikka ega yakka o'tishli perovskit quyosh elementi ishlab chiqilgan (Xitoy), perovskit-kremniy tarkibli tandem quyosh elementida 33,9%, qalay (Sn) asosidagi perovskit quyosh elementlarida 14% va qo'shaloq perovskit ($\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$) tarkibli quyosh elementida 10% samaradorlikka erishilgan (Buyuk Britaniya), fenetilammoniy yodid orqali quyosh elementlaridan foydalanish muddati oshirilgan (Janubiy Korea), grafen va grafen oksidi qatlamlari orqali fotoelementlardagi zaryad taqsimoti yaxshilangan (AQSh), ftalosianin asosidagi barqaror bo'yoq sezgir quyosh elementlari va mis-kalsiyli geteroleptik komplekslarga asoslangan pigmentlar olingan (O'zbekiston).

Dunyoda tandem asosidagi va bo'yoq sezgir quyosh elementlari uchun fotosensibilizator modda sitada ishlatiladigan ftalosianin, anilin va grafen oksidi asosida yarimo'tkazgich pigmentlar ishlab chiqarish bo'yicha ustuvor yo'nalishlarda quyidagi qator tadqiqotlar olib borilmoqda. Jumladan, yangi sensibilizator xususiyatiga ega polimer yarimo'tkazgich moddalar poliatsitelen, politiofen, izoindol asosidagi bo'yoq pigmentlar sintezi, ko'rinadigan va yaqin IQ sohada adsorbsiyalovchi porfirin va ftalosianin bo'yoqlari olish, ekologik toza bo'yoq sezgir quyosh elementlar uchun tabiiy bo'yoqlardan xlorofil, antosianinlardan foydalanish; tandem asosidagi quyosh elementlari orqali >35 % samaradorlikka erishish kabi bir qator katta masshtabda ishlab chiqarishga joriy etish bilan bog'liq muammolarni hal etishda muhim o'rin tutadi. Tarkibida markaziy atom sifatida lantanoid metall ionlari saqlagan hamda ftalosianin xalqalarida turli elektrodonor atomlarga ega funksional guruhlar saqlagan ftalosianin pigmentlarini olish texnologiyasini ishlab chiqish.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Dunyoda ftalosianin, grafen oksidi va anilin asosidagi yarimo'tkazgich pigmentlar olish, xossalarini yaxshilash va ishlatilish sohaslarini kengaytirish bo'yicha F. Yelmas, Hideki Shirakava, Alan Xeger, Alan Mak-Diarmid, T.V. Verniskaya, Qunfei Zhou, Zhen-Fei Liu, Tobin J. Marks, Pierre Darancet, Owen Melville, Benoit Lessard, Timothy Bender, A.Dideikin va Jingbin Zeng kabi olimlar o'z tadqiqotlarini olib borganlar³.

MDH davlatlari olimlaridan A.B. Kilimnik, Y.Y. Kondrakova, I.A. Belogoroxov, I. Aleksandrovich, T. Artur va D. Alexanderlar o'z tadqiqotlarida yarimo'tkazgich metalokompleks pigmentlar olish mexanizmlari, xossalari va qo'llanilish sohalari bo'yicha bir qator ishlarni amalga oshirganlar.

Mamlakatimizda ushbu sohada ilmiy izlanishlar olib borayotgan olimlardan A.T. Djalilov, X.X. Turaev, A.M. Nasimov, A.T. Tillayev, X.S. Beknazarov, M.U. Karimov, J.B. Fayziyev, A.G. Mahsumov, G.A. Ixtiyorova,

³ <https://pubs.acs.org/jpcafh/article-abstract/125/19/4055/584734/Electronic-Structure-of-Metallophthalocyanines-MPC?redirectedFrom=fulltext>

X.Sh. Toshpo'latov, M.O. Yusupov, D.A. Nabiyev, S.S. Sodiqov, F.Dj. Mirzayeva va boshqalarning ishlarini keltirib o'tish o'rinli bo'ladi.

Keltirilgan ma'lumotlarga asoslangan holda 3d-metall tuzlari, lantan tuzlari, kremniy xlorid, anilin, ftal anhidrid va grafen oksidi asosida quyosh nurlariga sezgir yarimo'tkazgich pigmentlar sintez qilish, ularning yarimo'tkazgich xususiyatlarini, tuzilishi va fizik-kimyoviy xossalarini tadqiqotning zamonaviy usullari yordamida tadqiq qilishdir. Shuningdek, quyosh nurlariga sezgir yarimo'tkazgich kompleks pigmentlar asosida ishlaydigan tandem quyosh elementlarining prinsipial texnologik sxemasini va ishlash prinsipi ilmiy va nazariy jihatdan asoslash, samarali, import o'rnini bosuvchi yangi yarimo'tkazgich materiallar olish texnologiyasini ishlab chiqish nazariy hamda amaliy ahamiyatga ega.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Termiz davlat universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq 2024-2028 yillarga mo'ljallangan FL-8323102103-sonli "Yangi avlod yarimo'tkazgichli tandem quyosh elementlari va ularni samaradorligini cheklovchi elektron-kovak tashish jarayonlari" mavzusidagi fundamental loyihasi hamda Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Innovatsion rivojlanish agentligi tomonidan e'lon qilingan "Akademik harakatchanlik" dasturi bo'yicha Denov tadbirkorlik va pedagogika instituti ilmiy-tadqiqot ishlariga muvofiq "Yarimo'tkazgich pigment materiallar sintezi va ularni yangi avlod quyosh elementlarini olishda qo'llash" mavzusidagi 2025-yil AK-25-61-son loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi quyosh nurlariga sezgir bo'yoqlardan tandem asosidagi quyosh elementlarini olish uchun yuqori fotosensibilizatsiya ko'effitsientiga ega, yangi, samarali organik yarimo'tkazgich sezgir bo'yoq materiallar olish texnologiyasini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

3d-metall tuzlari, lantan tuzlari, kremniy xlorid, ftal anhidrid, anilin va grafen oksidi asosida quyosh nurlariga sezgir organik yarimo'tkazgich pigmentlar sintezi hamda sintez jarayonining maqbul sharoitlarini aniqlash;

titan oksidi, rux oksidi va qalay oksidlari asosida maxsus bir tamoni shaffof bo'lgan shisha plastinka tayyorlash;

tandem quyosh elementlari uchun fotoanod sendvich qavat sifatida ishlatiladigan titan oksidi, rux oksidi suspenziyasi olish, shuningdek, quyosh elementlarini tayyorlashda ishlatiladigan elektrolit eritmalar tarkibi metodologiyasini ishlab chiqish;

olingan yarimo'tkazgich materiallarning tarkibi, tuzilishi va fizik-kimyoviy xossalarini tadqiqotning zamonaviy usullari yordamida, shuningdek, UB-spektrofotometr va volt-amper tahlil natijalaridan ularning fotosensibilizatorlik xususiyatlarini tadqiq qilish;

olingan yarimo'tkazgich materiallarning geometriya, frontier orbitallar, zaryad taqsimoti, yarimo'tkazuvchanlik xossalarini zichlik funksional nazariyasi asosida kvant-kimyoviy tahlil qilish;

quyosh nurlariga sezgir yarimo'tkazgich pigmentlar asosida ishlaydigan tandem quyosh elementlari tomonidan hosil qilingan kuchlanish va tok kuchi qiymatlarini o'lchash hamda turli nazariy va amaliy tadqiqotlar natijasida tegishli qatorlarni tuzish;

yarimo'tkazgich pigment materiallar asosida ishlaydigan tandem quyosh elementlarini tadqiq qilish, ushbu pigment materiallarni olish texnologiyasini ishlab chiqish hamda iqtisodiy asoslash.

Tadqiqotning obyekti sifatida ftalosianin pigmentlar, grafen oksidi, anilin, karbamid, 3d-metall tuzlari, elektrolit eritmalar, tandem quyosh elementlarini hosil qiluvchi shaffof shisha sendvich plastinkalar olingan.

Tadqiqotning predmetini ftalosianin asosidagi metalokompleks pigmentlarning kimyoviy o'zgarishlari, grafenning modifikatsiyasi, quyosh nurlariga sezgir moddalarning kimyoviy barqarorligi, pigmentlar, p-n o'tish jarayonlari tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida IQ-spektroskopiyasi, skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM), differensial termik tahlil, Keithley (Model 4200-C va RIGOL DM3058) volt-amper tahlili, element tahlili, kvant-kimyoviy tahlil kabi zamonaviy eksperimental tadqiqot usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

anilin, ftal ангидрид, карбамид, графен ва графен оксиди ҳамда ба'зи 3d металл тuzlari asosida yarimo'tkazgich pigment materiallar sintez qilingan;

anilin, ftal ангидрид, карбамид, графен ва графен оксиди ҳамда ба'зи 3d металл тuzlari asosida yarimo'tkazgich SiPc, FePc, CoPc, NiPc, LaPc, MnPc, PANI va GO markali pigmentlar olishning maqbul sharoitlari tanlangan;

sintez qilingan yangi CrPc, MnPc, NiPc, LaPc, FePc, CoPc markali pigmentlarning yorug'lik va quyosh nuri ostida individual ravishda 15 kun davomida kuchlanish (mV) va tok kuchi (mA) hosil qilish sig'imlari hisoblab chiqilgan;

Keithley (Model 4200-C) da hosil qilgan volt-amper tahlili asosida yarimo'tkazgich pigmentlarning tok kuchi va kuchlanish qiymatlari $LaPc < CrPc < MnPc < NiPc < FePc < CoPc$ qatorida ortib borishi aniqlangan;

zichlik funksional nazariyasi (DFT) asosida sintez qilingan pigmentlarning elektron transport, optik faollik va kimyoviy reaktivlik xususiyatlari nuqtai nazardan p-tipga kiruvchi yarimo'tkazgich materiallar ekanligi isbotlangan;

olingan yarimo'tkazgich pigmentlar asosida ishlaydigan tandem quyosh elementlari tomonidan olingan kuchlanish va tok kuchi qiymatlari, bo'yoq-sezgir quyosh elementlari tomonidan olingan kuchlanish va tok kuchi qiymatlariga nisbatan 20% ga yaxshilanganligi baholangan;

yarimo'tkazgich pigmentlar asosida olingan tandem quyosh elementlari tomonidan o'lchangan solishtirma elektr qarshilik ($\Omega \cdot cm$) qiymatlari maxsus shaffof shisha taglik substrat $In_2O_3 \cdot SnO_2 < Sitall < oddiy shisha taglik < Kremniy (Si)$ qatorida oshib borishi isbotlangan;

olib borilgan kvant-kimyoviy tahlillar asosida metall ftalosianin komplekslarining yarimo'tkazuvchanlik xossalari $LaPc < CrPc < MnPc < NiPc < FePc < CoPc$ qatorida yuqoriligi aniqlangan;

ftalosianin, anilin va grafen oksidi asosida termik barqaror yuqori assimiliyatsiya koeffitsientiga ega yarimo'tkazgich organik pigment materiallar olish texnologiyasi ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

anilin, ftal angidrid, karbamid, grafen va grafen oksidi hamda ba'zi 3d –metall tuzlari asosida yarimo'tkazgich pigment materiallar sintez qilingan;

3d-metall tuzlari asosida yuqori intensiv ftalosianin pigmentlar olishning maqbul sharoitlari, olingan pigmentlarning tarkibi, tuzilishi va fizik-kimyoviy xossalari zamonaviy analiz usullari yordamida aniqlangan;

pigmentlarning kimyoviy barqarorligi va ochiq osmon sharoitlarda qayta ishlatish hamda tandem asosidagi quyosh elementlariga qo'llash imkoniyatlari aniqlangan;

anilin, grafen oksidi hamda ftalosianin pigmentlari asosida yangi fotosensibilizator xossaga ega kuchlanish va tok kuchi hosil qiluvchi tandem quyosh elementlarini olishning prinsipial texnologik sxemasi ishlab chiqilgan;

anilin, grafen oksidi, ftal angidrid, 3d-metall tuzlari, karbamid va katalizator asosida yuqori intensiv yarimo'tkazgich organik pigment materiallar olish texnologiyasi ishlab chiqilgan hamda texnik-iqtisodiy jihatdan asoslangan.

Tadqiqot natijalarning ishonchliligi. Olingan natijalarning ishonchliligi, xulosalar va tavsiyalarning asosiligi, olingan birikmalarni identifikatsiyalash yuqori darajada zamonaviy kimyoviy, fizik-kimyoviy va fizik-mexanik usullar (IQ-spektroskopiyasi, skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM), differensial termik tahlil, element tahlili, Raman spektroskopiya, UB-spektrofotometr, RIGOL DM3058 va Keithley volt-ampmetr) bilan isbotlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati sintez qilingan bu turdagi moddalar yangi avlod quyosh elementlari uchun istiqbolli fotoanod materiallar sifatida yangi imkoniyatlarni beradi va fotokatalizatorlik rolini yanada oshirish orqali quyosh elementlarining energiya konvertatsiya samaradorligini yuqori darajaga ko'tarish orqali yuqori natijalarni qayd etish hamda hosil bo'ladigan tok kuchi va kuchlanishlarni yig'ib olish uchun tandem quyosh elementi tadqiq etilganligi hamda organik pigment materiallar ishlab chiqarish texnologiyasining ilmiy asosi yaratilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati olingan PANI, SiPc, LaPc, NiPc, FePc, CrPc, CoPc, MnPc va GO markali bo'yoq moddalar yarimo'tkazuvchanlik va optik xossalarni namoyon qilishi natijasida quyosh nurlariga sezgir bo'yoq moddalar bilan ishlaydigan tandem quyosh elementlarida foydalanishga xizmat qilishi bilan belgilanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Tandem quyosh elementlari uchun organik yarimo'tkazgich pigment materiallar olish texnologiyasini ishlab chiqish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

MePc, PANI va GO markali pigmentlar suv tizimlarida samarali korroziya ingibitori sifatida Sho'rtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasining "2027–2030-yillarda amaliyotga joriy etish bo'yicha istiqbolli ishlanmalar ro'yxati"ga kiritilgan (Sho'rtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasining 2026 yil 8

maydagi OP25/ED-2601-son ma'lumotnomasi). Natijada, MePc, PANI va GO markali antikorrozion bo'yoq pigment qoplamalari metall namunalarini himoyalash darajasini oshirish va metall korroziya tezligini 97 % gacha kamaytirish imkonini beradi;

grafen oksidi, anilin va 3d-metallar saqlagan organik yarimo'tkazgich ftalosianin bo'yoq pigmentlar olish texnologiyasi Sho'rtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasining "2027–2030-yillarda amaliyotga joriy etish bo'yicha istiqbolli ishlanmalar ro'yxati"ga kiritilgan (Sho'rtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasining 2026-yil 8-maydagi OP25/ED-2601-son ma'lumotnomasi). Natijada, grafen oksidi, anilin va tarkibida ba'zi 3d-metallar saqlagan organik yarimo'tkazgich ftalosianin bo'yoq pigmentlar olish texnologiyasi Sho'rtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasidagi metall konstruksiyalar va suv aylanma sistemalarini karroziyadan himoya qilish uchun samarali pigmentlar olish imkonini beradi;

3d-metall tuzlari saqlagan ftalosianin, anilin va grafen oksidi asosida sintez qilingan organik pigmentlar "Nasr Snack" MCHJ xorijiy korxonasida polimer salofan paketlarga rang berishda lok-bo'yoq sifatida amaliyotga joriy qilingan. (Nasr Snack MCHJ O'zbekiston–Tojikiston xorijiy korxonasining 2026-yil 5-maydagi 73-son ma'lumotnomasi). Natijada 3d-metall tuzlari saqlagan ftalosianin pigmentlari, anilin va grafen oksidi asosida PF-115 markali emalning yorqin rangli namunalarini olish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobasiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 24 ta, jumladan, 4 ta xalqaro va 20 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 46 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining fan doktori (DSc) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 22 ta ilmiy maqola, jumladan, 18 ta respublika va 4 ta xorijiy jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, beshta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat bo'lib, umumiy hajmi 195 sahifani tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi, muammoni yechishdagi ahamiyati va zaruriyati asoslangan, ilmiy-tadqiqot ishining maqsad va vazifalari, tadqiqot obyektlari va predmeti berilgan hamda tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishning ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati bayon qilingan, olingan natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarining amaliyotda qo'llanilishi bo'yicha tavsiyalar, nashr qilingan ishlar va dissertatsiyaning tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

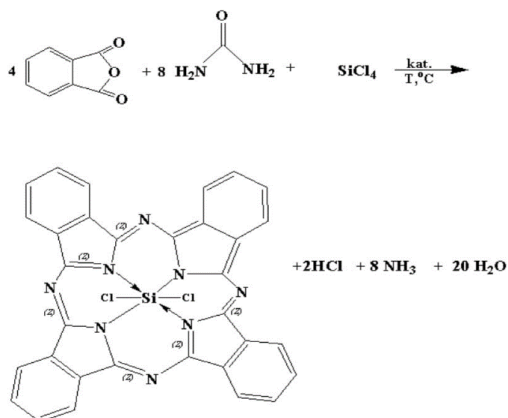
Dissertatsiyaning **"Yarimo'tkazgich pigment materiallar yaratish sohasidagi tadqiqotlarning hozirgi holati va rivojlanish istiqbollari"** deb nomlangan **birinchi bobida** asosan ftalosianin asosidagi metalokompleks

birikmalarning tuzilishi, sintezi va xossalari, ftalosianin asosidagi kompleks organik yarimo‘tkazgich materiallarning afzalliklari va amaliy qo‘llanilish sohalari hamda adabiyotlar qiyosiy tahlil qilingan. Yarimo‘tkazgich organik polimer materiallarning yangi turlarini yaratish borasida dunyo olimlari tomonidan olib borilayotgan tadqiqot usullariga haqida ma’lumotlar berilgan. Tabiiy bo‘yoqlar asosida quyosh elementlarini olish va ularning fotovoltik xossalari hamda ftalosianin pigmentlarini modifikatsiyalab rang intensivligini o‘zgartirish usullariga doir adabiyotlar sharhi keltirilgan. Shuningdek, tandem asosidagi quyosh elementlari uchun yarimo‘tkazgich pigmentlarni qo‘llashning yangi jihatlari hamda grafen va grafen oksidi asosidagi yarimo‘tkazgich materiallarning yarimo‘tkazgich xossalari va adabiyotlardagi ma’lumotlarni tanqidiy tahlil qilish asosida dissertatsiyaning maqsadi va vazifalari aniqlangan.

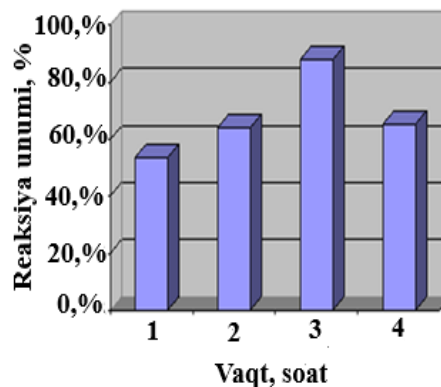
Dissertatsiyaning **“Tandem quyosh elementlarini olish uchun ishlatiladigan yarimo‘tkazgich pigment moddalar sintezi va tadqiqoti”** deb nomlangan **ikkinchi bobida** tadqiqot obyektlari va analizning zamonaviy usullari ilmiy asoslab berilgan. Tadqiqot usullari hamda anilin, grafen oksidi va ba’zi 3d-metall tuzlari karbamid, ftal anhidrid, tegishli katalizator asosida yarimo‘tkazgich organometall kompleks pigmentlar sintezi yoritilgan. Sovuq muhitda reaksiyalarni olib borish uchun sovutish aralashmasini tayyorlash, titan dioksidi, rux oksidi va sirt faol modda hamda etil spirti asosida fotokatalizator pasta tayyorlash jarayoni hamda elektrolit eritmalar tarkibi va ularning hosil qilish usullari keltirilgan.

Kremniy ftalosianin pigmentining sintezi

Kremniy ftalosianin pigment materiallarini sintez qilish asosida yuqori darajada barqaror fotoaktiv yarimo‘tkazgich birikmalarini ishlab chiqish katta ilmiy va amaliy ahamiyatga ega. Kremniy IV-xlorid, karbamid va ftal anhidrid hamda katalizator asosida tarkibida kremniy saqlovchi ftalosianin bo‘yoq moddasini sintez qilish uchun 6,8 gr (0,04 mol) kremniy IV-xlorid, 23,68 gr (0,16 mol) ftal anhidrid, 19,2 gr (0,32 mol) karbamid va umumiy massaga nisbatan 0.01% miqdorda katalizator sifatida natriy borgidrid qo‘shib yaxshilab aralashtirildi. Quyida kremniy ftalosianin yarimo‘tkazgich pigmentining hosil bo‘lish reaksiya tenglamasi tasvirlangan.



Kremniy ftalosianin pigmentining hosil bo‘lish reaksiya tenglamasi

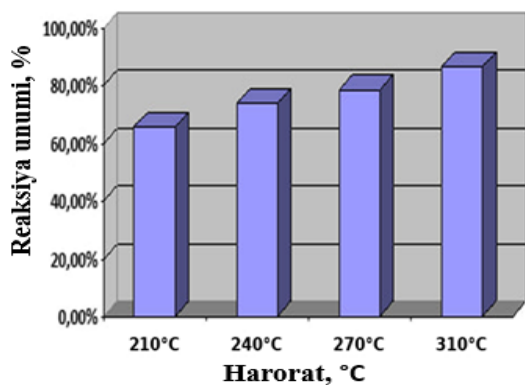


1-rasm. Kremniy ftalosianin pigmentining hosil bo‘lish unumiga vaqtning (soatda) ta’siri

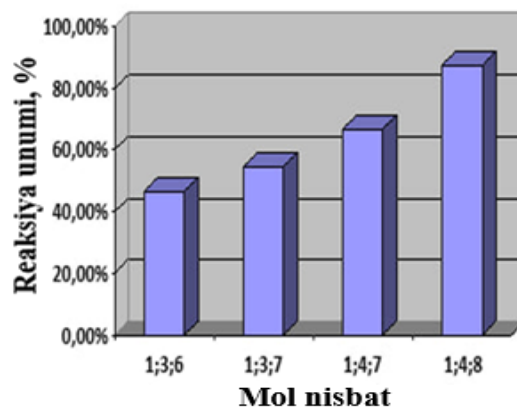
Jarayonning oxirida, qo'shimcha tozalash, eritish va neytrallash jarayonidan so'ng ko'k, och yashil kristallar paydo bo'lib stakan tagiga cho'ka boshlaydi. Olingan cho'kmani Natriy bikarbanat eritmasi bilan neytrallab so'ngra Byuxner voronkasida filtrlab, bir necha marotaba distillangan suv bilan yuvib olinadi.

Pigment sinteziga harorat, boshlang'ich reagentlar mol nisbati va vaqt kabi parametrlar ta'sirini o'rganish

Tadqiqot ishlari davomida harorat ta'sirining kremniy ftalosianin (SiPc) pigmenti hosil bo'lish unumiga ta'siri o'rganildi (2-rasm). Tajriba natijalari shuni ko'rsatdiki, sintez harorati 190°C dan 310°C gacha oshirilganda mahsulot hosil bo'lish unumi haroratga to'g'ridan-to'g'ri bog'liq holda muntazam ravishda, deyarli chiziqli tendensiya asosida ortib bordi. Ushbu qator tajribalar asosida 310°C sintez uchun optimal harorat sifatida qabul qilindi, chunki aynan mazkur sharoitda maksimal unumdorlik qayd etildi. Haroratning bundan yuqori qiymatlarida pigmentning unumining pasayishi va intensivligining ortishiga olib keladi, 310 °C yakuniy optimal harorat sifatida belgilandi.



2-rasm. Kremniy ftalosianin pigmentining hosil bo'lish unumiga haroratning ta'siri



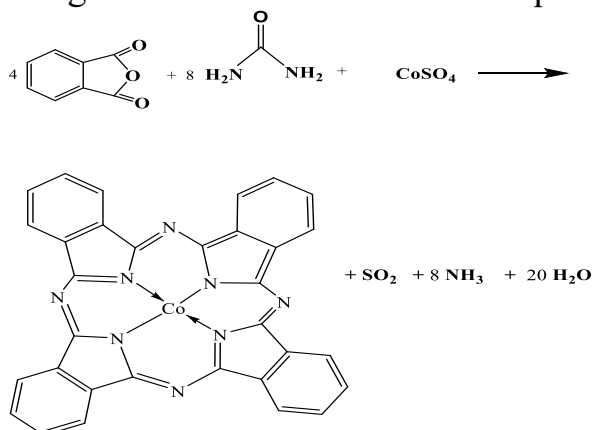
3-rasm. Kremniy ftalosianin pigmentining hosil bo'lish unumiga dastlabki moddalar mol nisbatining ta'siri

Boshlang'ich reagentlar mol nisbatining stexiometrik o'zgarishi kremniy ftalosianin sintezi unumdorligiga bevosita ta'sir ko'rsatib, reaksiya muvozanatni mahsulot hosil bo'lishi tomonga siljitadi. Tajriba natijalari shuni ko'rsatdiki, mol nisbatning 1:3;6 dan 1:4;8 gacha oshirilishi mahsulot chiqishini 45 % dan 90 % gacha bosqichma-bosqich (gradientli) ravishda oshirdi. Ushbu qonuniyat 1:4;8 nisbatni jarayonning kinetik jihatdan eng maqbul (optimal) nuqtasi sifatida tavsiflaydi, chunki aynan mazkur parametrdagi reagentlarning konversiya darajasi hamda molekulalararo samarali to'qnashuvlar ehtimolligi maksimallashadi va natijada yuqori texnologik samaradorlikka erishiladi (3-rasm).

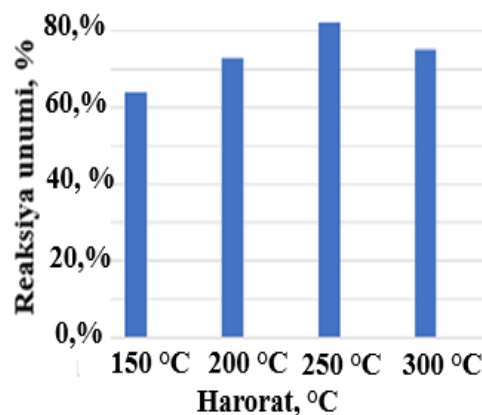
Kobalt ftalosianin pigmentining sintezi

Kobalt ftalosianin bo'yoq moddasini sintez qilishda bizga kobalt ikki sulfat, karbamid, ftal angidrid va katalizatorlar kerak bo'ldi. 400 ml hajmli termobarqaror stakanga 2,81 gr (0,01 mol) kobalt ikki sulfat, 5,92 gr (0,04 mol) ftal angidrid, 4,8 gr (0,08 mol) karbamid va umumiy massaga nisbatan 0.1 % miqdorda

katalizator sifatida ammoniy geptamolibdat qo'shib yaxshilab aralashtirildi. Oldindan yoqib tayyorlab qo'yilgan qizdirish pechidagi harorat 200 °C ga etganda stakandagi reaksiya aralashmani pechga 2,5 soat davomida qo'yildi. Natijada, rangsiz reaksiya aralashma harorat ta'sirida reaksiyaga kirishib qo'ng'ir rangli kukunsimon massaga aylanib qoladi. Uni pechdan olib, xona haroratida sovutib ustiga 96 % li kons sulfat kislota eritmasida 25 minut davomida aralashtirib turgan holda eritildi. Keyin, ushbu kons sulfat kislota eritilgan reaksiya aralashmaning ustiga stakaning bor hajmigacha to'ldirib qaynoq suv quyib yana aralashtirildi. Natijada, reaksiyaga to'liq kirishmay qolgan boshlang'ich mahsulotlar erib eritmaga o'tib reaksiya muhitidan chiqib ketadi.

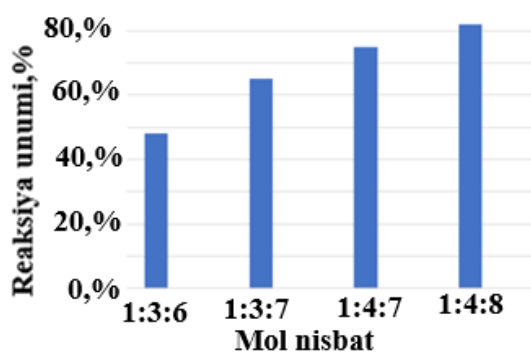


Kobalt ftalosianin pigmentining hosil bo'lish reaksiya mexanizmi

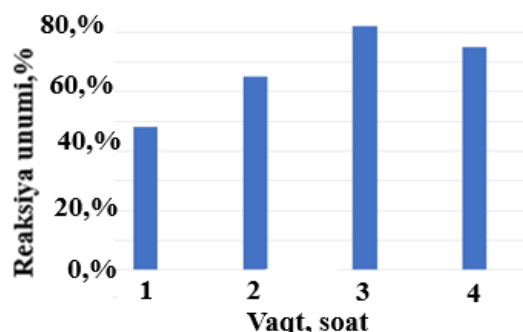


4-rasm. Kobalt ftalosianin pigmentining hosil bo'lish unumiga haroratning ta'siri

Tadqiqot ishlari davomida harorat omilining kobalt ftalosianin (CoPc) pigmenti sintezi unumiga ta'siri o'rganildi (4-rasm). Tajriba natijalari shuni ko'rsatdiki, sintez harorati 150°C dan 300°C gacha oshirilganda mahsulot hosil bo'lish unumi haroratga to'g'ridan-to'g'ri bog'liq holda muntazam ravishda, deyarli chiziqli tendensiya asosida ortib bordi. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, haroratning har 50°C ga oshishi mahsulot hosil bo'lish unumini o'rtacha 6-7 % ga yaxshilaydi. Sintez jarayoni uchun 250°C haroratni optimal harorat deb belgilandi, chunki aynan shu nuqtada maksimal unumdorlikka erishildi.



5-rasm. Kobalt ftalosianin pigmentining hosil bo'lish unumiga dastlabki moddalar mol nisbatining ta'siri

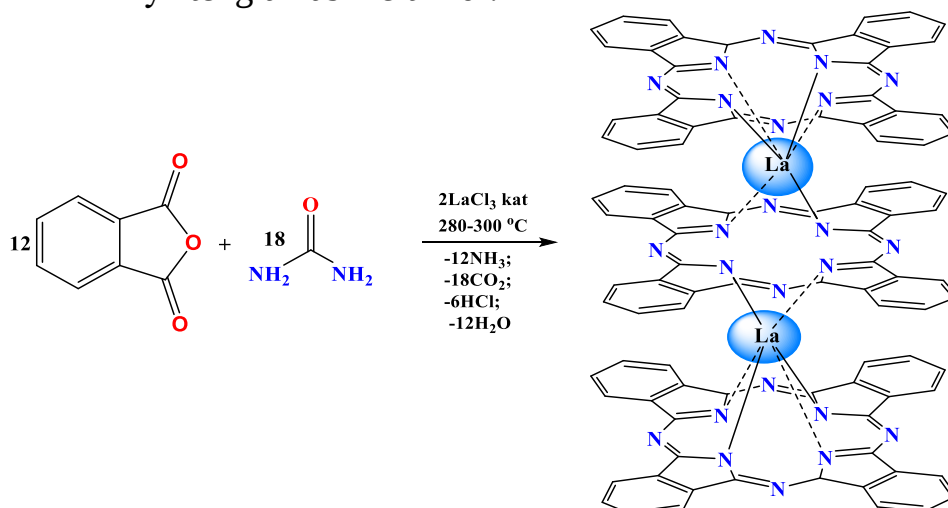


6-rasm. Kobalt ftalosianin pigmentining hosil bo'lish unumiga vaqtning (soatda) ta'siri

Tajribalar davomida kobalt ftalosianin hosil bo'lish unumiga boshlang'ich moddalar mol nisbatining ta'siri o'rganildi (5-rasm). Boshlang'ich reagentlar mol nisbatining stexiometrik o'zgarishi kobalt ftalosianin sintezi unumdorligiga bevosita ta'sir ko'rsatib, reaksiya muvozanatni mahsulot hosil bo'lishi tomonga siljitadi. Tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, mol nisbatning 1:3;6 dan 1:4;8 gacha oshirilishi mos ravishda mahsulot chiqishini 48 % dan 82 % gacha bosqichma-bosqich oshirdi. Ushbu qonuniyat 1:4;8 nisbatni jarayonning kinetik jihatdan eng maqbul (optimal) nuqtasi sifatida tavsiflaydi, chunki aynan mazkur parametrdagi reagentlar molekullarining o'zaro to'qnashuvlari soni ortadi va natijada yuqori texnologik samaradorlikka erishiladi. 6-rasmdagi grafik ma'lumotlariga ko'ra, qizdirish davomiyligining 1 soatdan 3 soatgacha uzayishi mahsulot chiqishini 50 % dan 82 % gacha oshirishni ta'minlaydi.

Lantan ftalosianin pigmentining sintezi

Hozirgi kunda ftalosianin asosidagi metalokompleks pigmentlarning juda ko'plab vakillari sintez qilinmoqda. Jumladan, tarkibida 3d-metallari hamda ishqoriy yer metallari saqlagan ftalosianin pigment sintezlari amalga oshirilgan. Ammo lantanoidlar sinfining metallari bilan ftalosianin pigmentlari sintezi ko'p amalga oshirilmagan. Lantanoidlar sinfining birinchi vakili hisoblangan lantan tuzi ishtirokida ftalosianin pigmenti sintezi amalga oshirildi. Lantan III xlorid, karbamid, ftal angidrid va katalizator sifatida natriy borhidrid ishtirokida markaziy atom sifatida lantan saqlovchi ftalosianin bo'yoq modda sintez qilindi hamda sintez qilish jarayonida harorat, boshlang'ich reagentlar mol nisbati va sarflangan vaqt kabi turli parametrlar ta'siri o'rganildi. Reaksiyada boshlang'ich reagentlar miqdori tegishli nisbat qilib olindi. Qizdirish pechidagi harorat kerakli darajaga yetganda stakandagi reaksiya aralashma pechga solindi. Jarayonning oxirida, qo'shimcha tozalash, eritish va neytrallashtirish jarayonidan so'ng to'q yashil rangli kristallar paydo bo'lib, stakan tagiga cho'ka boshladi. Olingan cho'kma Byuxner voronkasida filtrlab, bir necha marotaba distillangan suv va ammiak eritmasi bilan yuvib olinadi. Yuvib olingan mahsulotni quritish pechida 60 °C haroratda 24 soat davomida qo'yib quritildi. Quyida lantan ftalosianin yarimo'tkazgich pigmentining hosil bo'lish reaksiya tenglamasi keltirildi.

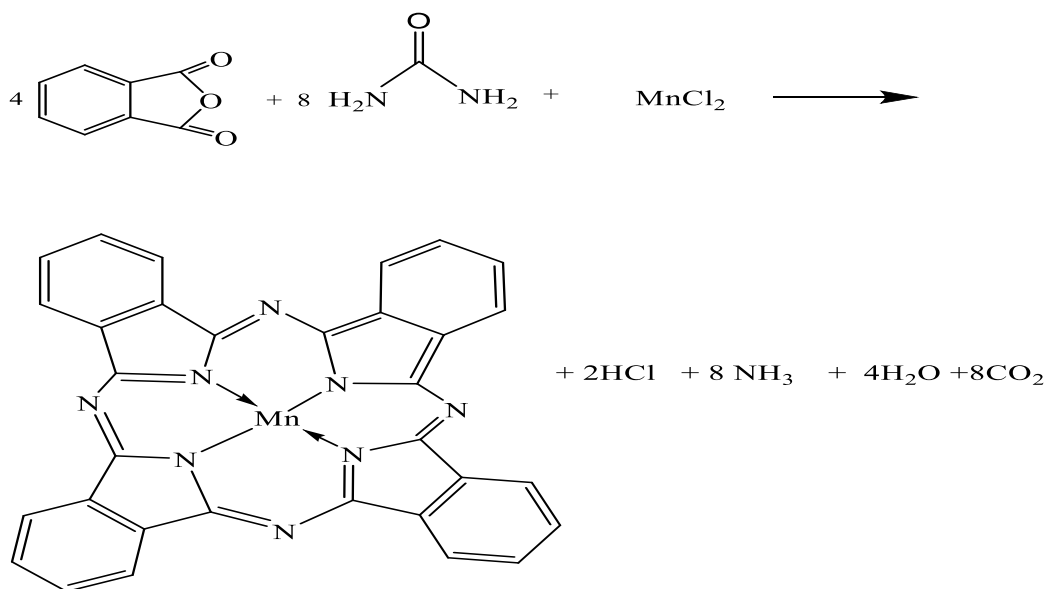


Lantan ftalosianin pigmentining hosil bo'lish reaksiya tenglamasi

Lantan ionining katta ion radiusi va yuqori koordinatsiya qobiliyati tufayli ftalosianin makrosikllari bilan termodinamik jihatdan barqaror ikki qatlamli komplekslarni hosil qiladi. Ushbu La^{3+} ioni energetik jihatdan juda qulay koordinatsiya muhitni yaratadi va natijada hosil bo'lgan sendvich tuzilishi pi-pi o'zaro ta'sirlar va samarali zaryad uzatish tufayli fotovoltik va yarimo'tkazgich xususiyatlarni ta'minlaydi. Tahlil va tajribalar shuni ko'rsatadiki, ko'plab lantanoidlar uchun ikki qatlamli kompleksning erkin energiyasi oddiy monoftalosianinnikidan pastroq. Shuning uchun reaksiya muvozanati ko'pincha sendvich kompleksining hosil bo'lishiga qarab siljiydi. Sendvich tuzilishning bu yo'nalishdagi fotovoltik xususiyatlarga ta'siri DFT hisob-kitoblari, UB-spektroskopiya, IQ spektroskopiya, Raman spektroskopiya, rentgen fazaviy va volt-amper xususiyatlari bilan tasdiqlanadi.

Marganes ftalosianin pigmentining sintezi

Marganes ftalosianin bo'yoq moddasini sintez qilishda marganes ikki xlorid, karbamid, ftal anhidrid va katalizatorlar kerak bo'ldi. 400 ml hajmli termobarqaror stakanga 1,98 gr (0,01 mol) marganes xlorid, 5,92 gr (0,04 mol) ftal anhidrid, 4,8 gr (0,08 mol) karbamid va umumiy massaga nisbatan 0.1% miqdorda katalizator qo'shib aralashtirildi. Oldindan yoqib tayyorlab qo'yilgan qizdirish pechidagi harorat 250°C ga yetganda stakandagi reaksiya aralashmani pechga 2,5 soat davomida qo'yildi. Natijada, rangsiz reaksiya aralashma harorat ta'sirida reaksiyaga kirishib qo'ng'ir rangli kukunsimon massaga aylanib qoladi. Uni pechdan olib, xona haroratida sovutib ustiga 96% li kons sulfat kislota eritmasida 30 minut davomida aralashtirib turgan holda eritildi. Jarayonning oxirida, qo'shimcha tozalash, eritish va neytrallash jarayonidan so'ng ko'k-yashil kristallar paydo bo'lib stakan tagiga cho'ka boshlaydi. Olingan cho'kmani qayta-qayta suv bilan yuvib cho'ktiriladi va ammiak eritmasi bilan neytrallab so'ngra Byuxner voronkasida filtrlab, bir necha marotaba distillangan suv bilan yuvib olinadi. Yuvib olingan mahsulotni quritish pechida 60°C haroratda 12 soat qo'yib quritildi.



Marganes ftalosianin pigmentining hosil bo'lish reaksiya tenglamasi

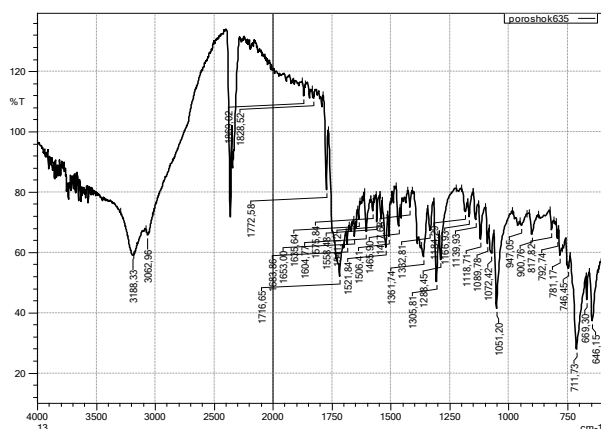
Quritiba olingan ko'k rangli pigment dimetilformamidda, dimetilsulfoksid hamda N-metil pirrolidonda yaxshi eriydi. Olingan mahsulotning unumi 80 % ni tashkil qildi. Sintez qilingan marganes ftalosianin bo'yoq moddasini adabiyotlardagi ma'lumotlarga solishtirib va fizik-kimyoviy analizlar qilib aniqladik. Sintez qilingan yangi fotokonduktiv bo'yoq modda o'zining ajoyib optik va fotokimyoviy xossalari bilan ajralib turadi. Shuningdek, uning termik jihatdan barqarorligi, quyosh nurlariga sezgirliги hamda eritmada turg'un ekanligi uning qo'llanilish sohalarini kengaytiradi. Hozirgi kunda ushbu (MnPc) marganes ftalosianin bo'yoq moddasining siztezi uni muqobil energiya manbalaridan biri bo'lgan to'rtinchi avlod quyosh elementlari hisoblangan quyosh nurlariga sezgir bo'yoqlar asosida ishlaydigan tandem asosidagi quyosh elementlariga sezgir bo'yoq modda sifatida ishlatilmoqda.

Dissertatsiyaning **“Tandem quyosh elementlari uchun ishlatiladigan organik yarimo'tkazgich pigmentlarning xossalari va ularning tadqiqoti”** deb nomlangan **uchinchi bobida** metall ftalosianinlar asosidagi p va n-tipli yarimo'tkazgich pigmentlarning p va n-tiplarini aniqlash, 3d-metall tutgan ftalosianin pigmentlarining optik va fotoelektrik xossalari, sintez qilingan fotosensibilizator xossaga ega pigmentlarning yarimo'tkazuvchanlik xususiyatlari, anilin, grafen oksidi hamda ftalosianin asosida olingan yarimo'tkazgich pigmentlarning infraqizil, Raman spektroskopik, element fluorescent, UB-spektroskopik, SEM, termik, rentgen fazaviy analiz tahlillari hamda volt-amper xususiyatlari o'rganilgan. Ftalosianin pigmentlari asosida tayyorlangan tandem quyosh elementlari tomonidan hosil qilingan kuchlanish va tok kuchi qiymatlari aniqlandi.

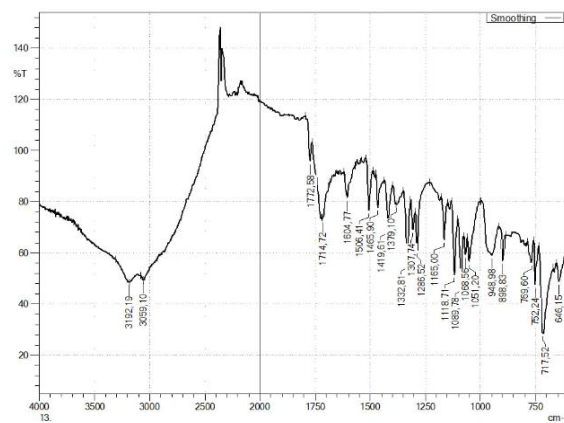
Olingan ftalosianin pigmentlarining IQ analiz tahlili

Tarkibida markaziy atom sifatida 3d-metall saqlagan ftalosianin komplekslarining olingan infraqizil (IQ-Fure) yutilish spektrlari $400-4000\text{ sm}^{-1}$ to'lqin uzunligi oralig'ida tahlil qilindi. Organik yarimo'tkazgichlar va murakkab makrosiklik birikmalarda yutilish chastotalarining siljishi hamda intensivligi bevosita molekulyar simmetriyaga, elektronlarning delokalizatsiyalanish darajasiga va markaziy metall ionining tabiatiga bog'liq bo'ladi.

Olingan marganes ftalosianin bo'yoq moddasining IQ-spektral tasviri 7-rasmda ko'rsatilgan. Benzol halqasining aromatik guruhining mavjudligi 3188 va $1653-1558\text{ sm}^{-1}$ dagi yutilish chiziqlari orqali aniqlanadi. $-C=N$ guruhlarini almashtirish tabiati 947 sm^{-1} dan past mintaqada kuchli yutilish bilan belgilanadi. Benzol halqasi 1417-sm^{-1} yutilish zonalarida aniqlanadi. 1635 sm^{-1} , ba'zan esa $2000-1604\text{ sm}^{-1}$ yutilish chiziqlari bilan sodir bo'ladi. $1288-947\text{ sm}^{-1}$ mintaqadagi chiziqlar ikkinchi darajali ahamiyatga ega. $=CH-$ guruhlarini uchun tekislikdan tashqari deformatsiya tebranishlarining kuchli chiziqlari ko'rinadi. $781-711\text{ sm}^{-1}$ mintaqadagi chiziqlar ortobenzol halqasini va $1683-1635\text{ sm}^{-1}$ dan 818 sm^{-1} gacha bo'lgan hududdagi yutilish zonalarida $-C=N$ guruhlariga xos bo'lgan yutilish cho'qqisi kuzatiladi. Shunday qilib, ftal angidridni karbamid va $MnCl_2$ bilan kondensatsiya qilish orqali yuqori fizik-kimyoviy xususiyatlarga ega bo'lgan ftalosianin bo'yog'i sintez qilindi va xossalari o'rganildi.



7-rasm. Marganes ftalosianin pigmentining IQ-spektr tasviri

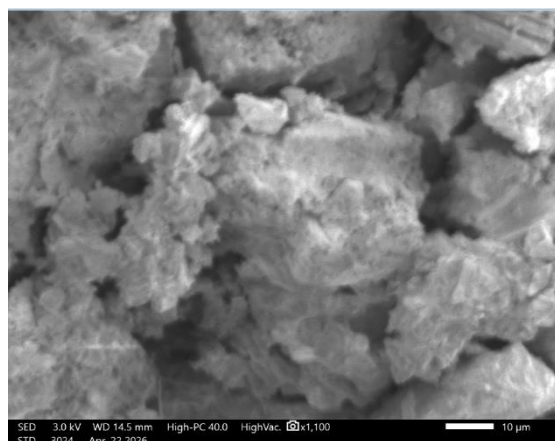
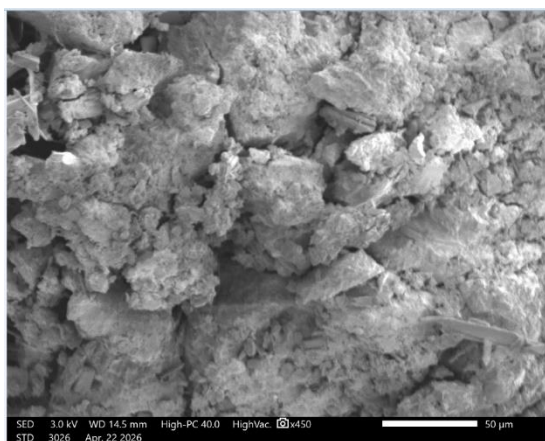


8-rasm. Kobalt ftalosianin pigmentining IQ-spektr tasviri

Sintez qilingan kobalt ftalosianin kompleks birikmasining infraqizil spektroskopik tasviri 8-rasmda keltirilgan. Olingan ushbu organik pigmentlarning funktsional guruhlari va taxminiy strukturaviy formulasini aniqlash uchun infraqizil spektroskopiya qoʻllanildi. Natijalar adabiyotda keltirilgan maʼlumotlar bilan taqqoslandi va tahlil qilindi. Kobalt ftalosianin kompleksining 400 sm^{-1} yaqin infraqizil toʻlqin uzunligi mintaqasida va 4000 sm^{-1} uzoq infraqizil toʻlqin uzunligi mintaqasida yutilish spektrlari koʻrsatilgan. Organik yarimoʻtkazgichlarda yutilish chastotalarining qiymati ishlatiladigan substrat materialining xususiyatlariga bogʻliq. $3059,10\text{ sm}^{-1}$ mintaqasidagi yutilish chiziqlari C-H bogʻlanishiga tegishli ekanligi aniqlandi. C=C bogʻlanishiga bogʻliq tebranishlar $1604,77\text{ sm}^{-1}$ yutilish chiziqlariga tegishli ekanligi kuzatildi. $1465,9\text{--}1419,61\text{ sm}^{-1}$ mintaqasidagi aromatik halqaning yutilish chiziqlari izoindolga mos kelishi aniqlandi. 1379 sm^{-1} dagi yutilish choʻqqilari pirrol halqasi bilan bogʻliqligi kuzatildi, benzol halqalarining yutilish polosalari esa $948,98\text{ sm}^{-1}$ da, ftalosianin halqalarining yutilish polosalari esa $752,24\text{ sm}^{-1}$ da kuzatildi.

Temir ftalosianin pigmentining SEM analiz tahlili

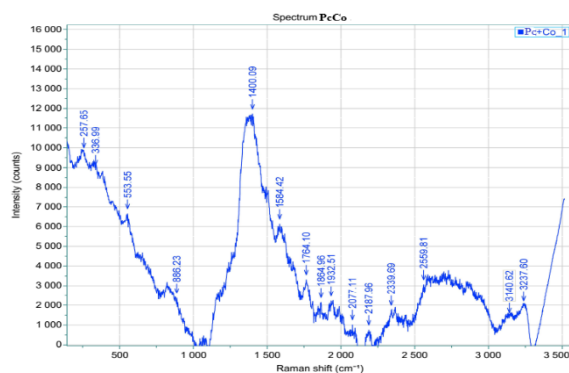
Ftalosianin asosidagi yarimoʻtkazgich pigmentlar morfologiyasi va tuzilishi skanerlash elektron mikroskopi yordamida tahlil qilindi. Temir ftalosianin pigmenti qatlamlaridagi gʻovaklar va katta sirt yuzasi sabab yarimoʻtkazgich TiO_2 bilan ishlov berilgan kompozitning koʻrinadigan yorugʻlik nurga sezgir boʻlgan boʻyoq moddalarni shimuvchanligini oshiradi. Natijada, ularning yuqori fotosensibilizatorlik xususiyatlari hisobiga tandem quyosh elementlarida foydalanishga imkon beradi. Yarimoʻtkazgichli ftalosianin pigmentlar yuqori sezgirliги va ishonchliligi, nisbatan keng konsentratsiya diapazonida kimyoviy komponentlarni aniqlash qobiliyati va tezkor javobi bilan ajralib turadi. Ushbu xususiyatlari jihatidan metall ftalosianin pigmentlar yuzasidagi gaz adsorbsiyasi tufayli yarimoʻtkazgich materiallarining elektr qarshiligidagi oʻzgarish natijasida qarab gaz sensorlarda foydalaniladi. Ftalosianin asosidagi yarimoʻtkazgichli pigmentlarning SEM analiz tahlillari natijasiga qarab ularning qaysi gazlarga nisbatan sensorlik xususiyatlarini aniqlash imkonini beradi.



9-rasm. Olingan temir ftalosianin FePc pigmentining SEM tasviri

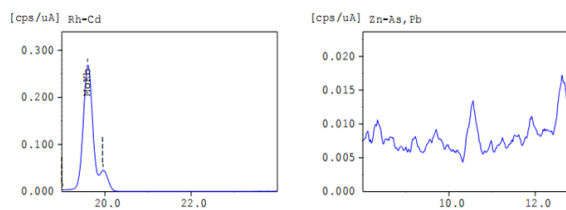
Kobalt ftalosianin pigmentining Raman spektroskopik tahlili

Tarkibida kobalt saqlagan ftalosianin pigmentining Raman spektroskopiya tahlili Yaponiyaning HORIBA Scientific firmasi tomonidan ishlab chiqarilgan jihozda amalga oshirildi.



10-rasm. Kobalt ftalosianin pigmentining Raman spektroskopik tasviri

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/ua)
Co	50.122 %	[0.263]	Quan-FP	CoKa	1879.4048
Mo	49.346 %	[0.200]	Quan-FP	MoKa	2881.5416
Ca	0.328 %	[0.035]	Quan-FP	CaKa	0.4541
Nb	0.205 %	[0.024]	Quan-FP	NbKa	13.7446



11-rasm. Kobalt ftalosianin pigmentining element fluorescent analizi

Kobalt ftalosianin pigmentining Raman spektroskopik tasviri 10-rasmda ko'rsatilgan. Pigmentning tarkibini o'rganish maqsadida o'tkazilgan Raman spektroskopiya tahlilida quyidagi xulosalar olindi. Benzol halqasidagi aromatik guruhining mavjudligi $3140, 62 \text{ cm}^{-1}$ dagi yutilish chizig'i orqali aniqlanadi. $3237,60 \text{ cm}^{-1}$ valent tebranishli sohalarida N-H bog'larga tegishli, $2559,81 \text{ cm}^{-1}$ sohada O-H (H bog' hosil qilgan) bog'lariga taalluqli valent, $1764,83 \text{ cm}^{-1}$ spektrlarda C=C bog'larga tegishli, valent va intensiv tebranish spektrlari ko'ringan. $1864,96 \text{ cm}^{-1}$ C=O bog'lariga taalluqli, $1584,42 \text{ cm}^{-1}$ sohasida differensial tebranishlarga ega N-H bog'lari spektrlari mavjud. $1400,09 \text{ cm}^{-1}$ sohadagi spektrlar C-H bog'lariga, shuningdek, $886,23 \text{ cm}^{-1}$ sohada Me-N bog'lariga tegishli differensial bog'lar spektrlari ko'ringan.

Kobalt ftalosianin pigmentining element fluorescent analizi tasviri 11-rasmda ko'rsatilgan. Moddaning atomar tarkibi har qanday ishlab chiqarishda ishlatilagan xomashyoni, ishlab chiqarishni hamda mahsulotlarni nazorat qilish uchun ma'lum bo'lishi kerak. Shuni hisobga olib, organik erituvchida eritib kichik konsentratsiyali eritmalarini olib element analizi o'tkazildi. Kichik konsentratsiyali

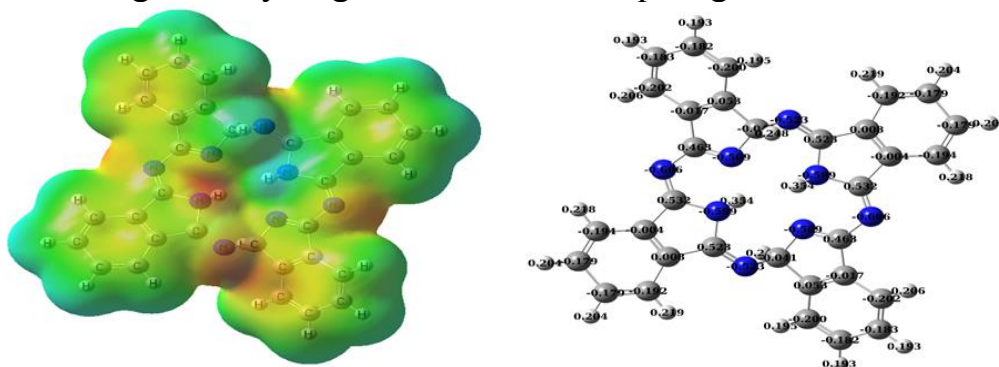
eritmalarini tayyorlab element analizi qilinganda o'rganilgan yutulish cho'qqilarida kobalt ftalosianin pigmentidan tashqari tajriba xatoligi darajasida molebdan va to'liq tozalanmagan reaksiyada katalizator sifatida ishlatilgan modda va neytrallashda ishlatilgan moddadan qolgan kalsiy qoldiqlari borligini ko'rsatdi.

Ftalosianin asosidagi metalokompleks pigmentlarini sintez qilishda izoindol ligand molekulasiining kvant-kimyoviy xususiyatlari

Ligandning kompleks hosil qilishdagi elektron xossalari aniqlash maqsadida uning kvant-kimyoviy parametrlariga asoslangan DFT hisoblashlari bajarildi. Hisoblashlar UB3LYP funksionali va 6-311G baza to'plamidan foydalangan holda Gaussian 09 dasturida olib borildi. Ligand molekulasiining HOMO va LUMO energiyalari mos ravishda $-5,76$ eV va $-2,29$ eV ni tashkil etdi. Ular orasidagi energetik farq:

$$\Delta E = |E_{\text{LUMO}} - E_{\text{HOMO}}| = 3,47 \text{ eV}$$

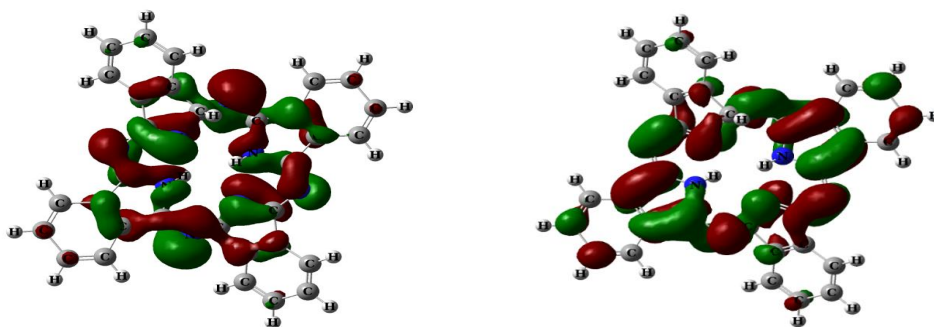
Bu qiymat molekulaning reaktivlik darajasi mo'tadil ekanligini bildiradi, ya'ni u elektron donorlikka moyil bo'lgan, ammo haddan tashqari reaktiv bo'lmagan tizimdir. HOMO orbitalining fazoviy taqsimoti molekula tarkibidagi konyugatsiyalashgan aromatik sistemalar va ularga tutashgan π -elektronlar bilan boyitilgan azot atomlarida lokalizatsiyalangan. Bu esa aynan ushbu atomlar orqali koordinatsion bog'lanish yuzaga kelishini taxmin qilishga asos beradi.



12-rasm. Izoindol ligandining ESP va Mullikin zaryad taqsimoti

LUMO orbitali molekulaning boshqa aromatik segmentlariga yo'naltirilgan bo'lib, u orqali reaktivlik ham ifodalanadi. Shunday qilib, HOMO komponentasi ligandning asosiy donorlik markazlarini aniqlaydi. ESP xaritasining fazoviy-strukturaviy tahlili ligand molekulasiida yuqori elektron zichlikka ega lokal donor markazlarining mavjudligini aniq tasdiqlaydi. Bu holat ligandning metall ionlar bilan yuqori selektivlik va yo'naltirilganlik asosida koordinatsiyalashish qobiliyatiga ega ekanligini ilmiy asoslaydi (12-rasm). Donor markazlarning elektrostatik sirt bo'yicha lokalizatsiyasi esa, ushbu ligandni geometrik jihatdan tartiblangan va elektronik jihatdan faol koordinatsion tizim sifatida tavsiflash imkonini beradi. ESP xaritasida kuzatilgan elektron zichlik zonalari, o'z navbatida, HOMO–LUMO orbitalarining fazoviy joylashuvi hamda Mulliken zaryad taqsimoti bilan to'liq muvofiqlikda ekanligi qayd etildi. Bunday moslik ligand molekulasiining kompleks hosil qilishdagi elektronik strukturasi, donorlik

markazlarining xarakteri va ularning fazoviy faolligini yagona kvant-kimyoviy model asosida ishonchli tarzda talqin qilish imkonini beradi.

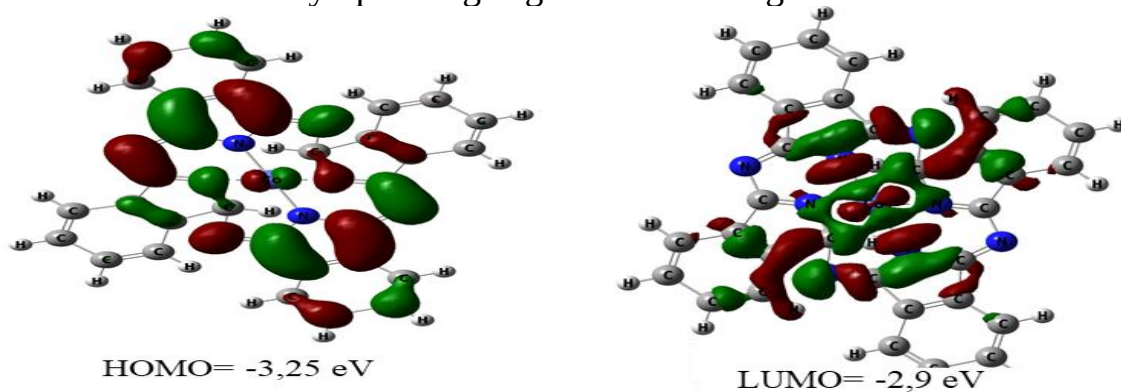


13-rasm. Izoindol ligandining HOMO-LUMO energiya darajalari

Kompleks birikmalarning yarimo‘tkazuvchanlik xossalari ularning elektron tuzilishiga, molekulyar orbitallarning energiya darajalariga, zaryad zichligining fazoda taqsimlanishiga, shuningdek, elektrostatik potensial maydonlarining xarakteristikalariga chambarchas bog‘liqdir. Ushbu parametrlar yarimo‘tkazuvchi sifatida ularning samaradorligini belgilovchi asosiy mezonlar hisoblanadi. Ayniqsa, HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) va LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) orasidagi energetik tafovut (ΔE) ushbu tizimlarning elektron o‘tishi va o‘zgaruvchan tashuvchanlik (conductivity) salohiyatini baholashda asosiy rol o‘ynaydi.

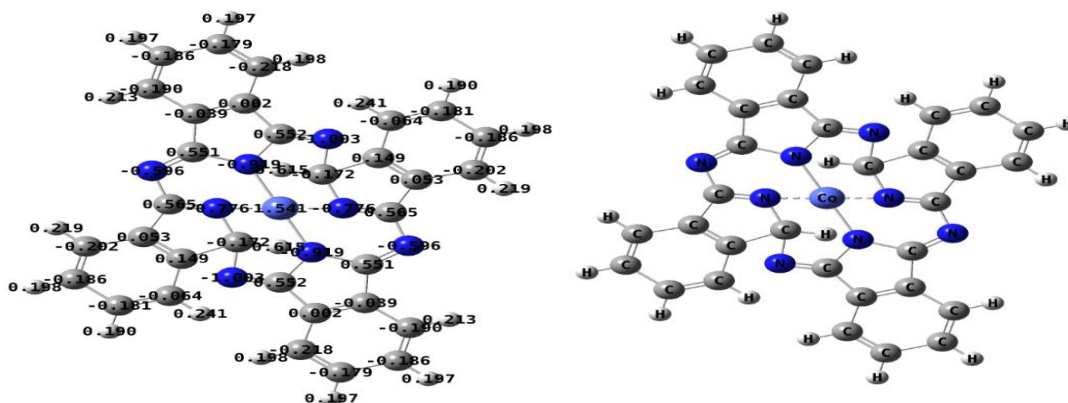
Kobalt ftalosianin pigmentining HOMO-LUMO energiya darajalari

Kobalt (Co(II)) ionini o‘z ichiga olgan kompleksda esa HOMO energiyasi – 3,25 eV, LUMO darajasi –2,90 eV bo‘lib, $\Delta E = 0,35$ eV ga teng 14-rasm. Bu esa ushbu kompleks elektronni HOMO dan LUMO ga ko‘chirish uchun ancha kam energiya talab etishini anglatadi. Kichik energetik tafovut molekulani yuqori darajadagi kimyoviy reaktivlik va oson eksitatsiyalanish xususiyatlari bilan ta’minlaydi. Bu esa uni zamonaviy elektronika, fotoelektrik sensorlar va katalitik tizimlarda foydalanish uchun istiqbolli yarimo‘tkazuvchi material sifatida ishlatish imkonini beradi hamda yuqori sezgirliги va ishonchliligi ko‘rsatadi.



14-rasm. Kobalt ftalosianin pigmentining HOMO-LUMO energiya darajalari tasviri

Kvant kimyoviy hisoblashlar asosida olingan orbital vizualizatsiyalar shuni ko'rsatadiki, har ikkala kompleksda HOMO orbitalar asosan aromatik halqalar va koordinatsiyalashgan azot atomlariga joylashgan bo'lib, π -elektron bulutiga boy struktura shakllangan. Bu esa elektron donor xossasini kuchaytiradi. LUMO esa ko'proq metall markaz atrofidagi ligand atomlari, ayniqsa kislorod va azot atomlari bilan chegaralangan hududlarda kontsentratsiyalashgan bo'lib, bu sohalar elektron akseptor xususiyatini namoyon etadi.



15-rasm. Kobalt ftalosianin pigmentining zaryad taqsimoti va struktura formulasi

Ftalosianin asosidagi komplekslarda erkin holatda elektronlar HOMO, ya'ni valent zonada joylashgan bo'ladi, quyosh yoki yurug'lik nuri ta'sirida elektronlar valent zonadan LUMO, ya'ni o'tkazuvchan zonaga harakatlanadi. Bu esa ayrim azot markazlarida kuchliroq elektron zichlikning ortishi kuzatilib, bu molekulaning elektron harakatchanligini va kimyoviy faolligini oshiradi. Aynan shuning uchun ham Co ftalosianin kompleksi kichik HOMO–LUMO tafovuti tufayli yuqori yarimo'tkazuvchanlik va optik sezuvchanlik xususiyatlariga olib keladi.

Harorat ta'sirida ftalosianin pigmentlarining elektr o'tkazuvchanligining o'zgarishi

Ftalosianin asosidagi metalokompleks materiallar shunchalik sezgir materiallarki, ularning elektr o'tkazuvchanligini o'lchashda muhit, ya'ni sharoit materialning o'zidan ham muhimroq o'rin tutadi. Ftalosianin asosidagi metalokompleks yarimo'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi doimiy (fizik konstanta) emas, balki muhitga qarab uning fizik-kimyoviy xossalari o'zgarib turadi. Maydon ta'sirining davomiyligiga, yuqori haroratlarda vakuumda qatlamning pasayish davomiyligiga va begona gaz molekulalarining mavjudligiga qarab, qatlamning o'tkazuvchanligi ko'proq yoki kamroq sezilarli o'zgarishlarga uchrashi mumkinligi sababli, ftalosianinlarning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi va fizik kattaliklari haqida gapirish mumkin emas. Shunga qaramay, biz tomonimizdan o'rganilgan ftalosianin pigmentlar qatlamlarining qarshilik qiymatlarini, shuningdek, vakuum sharoitida yangi (20 °C dan 180 °C gacha qizdirilgan) qatlamlar uchun ftalosianinlarning o'ziga xos solishtirma elektr o'tkazuvchanliklarining o'zgarishini keltiramiz.

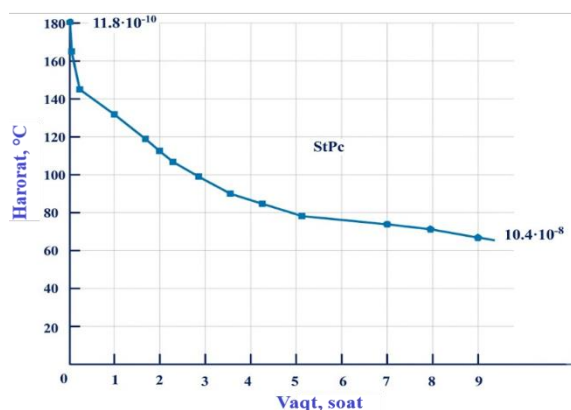
Tasvirlangan 16-rasmdagi grafikda organik ftalosianin yarimo'tkazgich pigmentlarga xos bo'lgan ikki jarayon sodir bo'ladi. Birinchisi degazatsiya (gazsizlantirish) bu ftalosianin pigmenti sirtiga yoki ichiga yutilgan (adsorbsiyalangan) gaz molekulalarining chiqib ketishi hisobiga o'tkazuvchanlikning pasayishiga olib keladi.

1-jadval

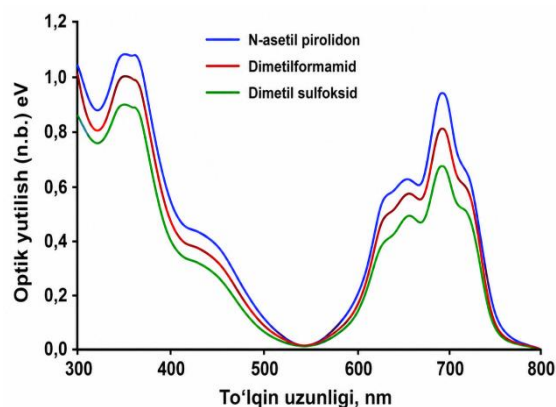
Kremniy ftalosianin pigmentining solishtirma elektr o'tkazuvchanligining haroratga bog'liqligi

№	Harorat, °C	Vaqt, soat	Solishtirma elektr o'tkazuvchanlik, $\text{Om}^{-1}, \text{sm}^{-1}$
1	20 °C	1	$9,6 \cdot 10^{-7}$
2	40 °C	2	$8,9 \cdot 10^{-7}$
3	60 °C	3	$10,4 \cdot 10^{-8}$
4	80 °C	4	$10,2 \cdot 10^{-8}$
5	100 °C	5	$10,1 \cdot 10^{-8}$
6	120 °C	6	$11,6 \cdot 10^{-9}$
7	140 °C	7	$10,5 \cdot 10^{-9}$
8	160 °C	8	$12,5 \cdot 10^{-10}$
9	180 °C	9	$11,8 \cdot 10^{-10}$

16-rasmda kremniy ftalosianin qatlamidan o'tuvchi tok kuchining vakuumda 20 °C dan 180 °C harorat oralig'ida qizdirish vaqtida vakuumda solishtirma elektr o'tkazuvchanlik xossasi o'rganildi. Doimiy ravishda matritsaga, ya'ni kremniy ftalosianin pigmentiga harorat berish orqali, ya'ni past energiyali holatdan yuqori energiyali holatga o'tish uchun tashqi manbadan energiya olish jarayoni va doimiy qo'llaniladigan maydonga bog'liq holda o'zgarishi ko'rsatilgan.



16-rasm. Kremniy ftalosianin pigmentining solishtirma elektr o'tkazuvchanligining haroratga bog'liqligi

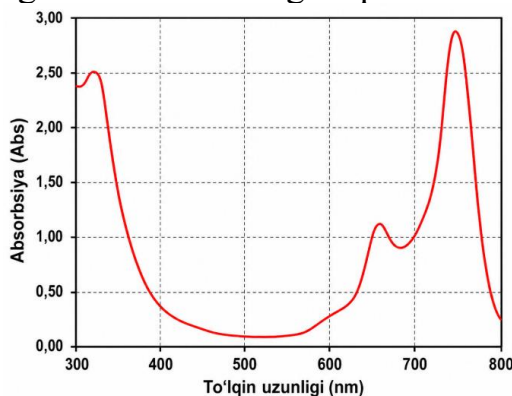


17-rasm. Kobalt ftalosianin pigmentining optik yutilish spektr tasviri

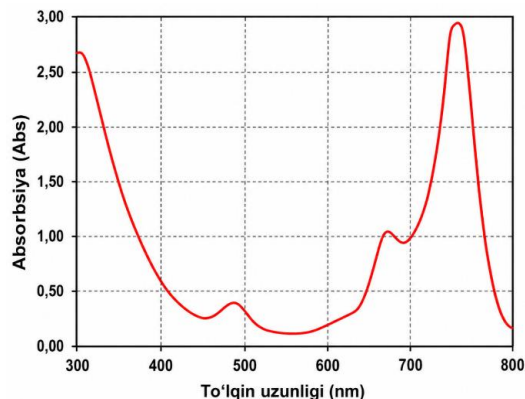
Grafikdan ko'rinib turibdiki, hatto 6 soatdan keyin ham havosiz muhitda pigment molekulasinining elektr qarshiligi barqarorlashmagan, ya'ni yakuniga yetmaganligini ko'rishimiz mumkin. Harorat va vaqt oshib borgan sari ftalosianin asosidagi yarimo'tkazgich pigmentning tok intensivligining pasayganligini ko'rishimiz mumkin.

Tarkibida 3d-metall saqllovchi ftalosianin pigmentining optik yutilish xossalari

Metall ftalosianinlarning yutilish (absorbsiya) spektrlarida ikki asosiy va juda kuchli intensivlikka ega bo'lgan soha mavjud: Birinchisi 300–400 nm oralig'ida joylashgan Soret chizig'i (Soret bandi) bo'lib bu yuqori energiyali kuchli yutilish cho'qqisi hisoblanib ultrabinafsha (ko'k) sohada yutiladi. Ikkinchi 650–800 nm oralig'ida joylashgan Q chizig'i (Q-bandi) bo'lib past energiyali pigment rangini belgilovchi ko'rinadigan qizil-ko'k sohada yutiladi.



18-rasm. Lantan ftalosianin pigmentining optik yutilish spektri



19-rasm. Xrom ftalosianin pigmentining optik yutilish spektri

Yutilish spektridagi cho'qqilarning shakli va joylashuvi ftalosianin molekulasining markaziy va tashqi o'rinbosarlar tarkibiga, turli erituvchilarda eruvchanligiga, shuningdek, molekulyar tuzilmalarining o'ziga xos xususiyatlariga bog'liq holda o'zgarishi mumkin. Ammo ligandning π -orbitalari ham π -donor, ham π -akseptor bo'lishi mumkin. Pirrol azot atomlari orbitallari markaziy metall atomining koordinatsiyasini belgilaydi va ular bilan birgalikda π -orbitalar bog'langan elektron tizimini hosil qiladi. Bu grafik turli erituvchilar ta'sirida spektr cho'qqilarining siljishi va intensivligi farqlarini ko'rsatadi. 18-rasmda lantan ftalosianin pigmentining optik yutilish spektri, 19-rasmda esa xrom ftalosianin pigmentining optik yutilish spektr tasvirlari keltirildi. Bu spektr tasvirlari turli organik erituvchilar ta'sirida spektr cho'qqilarining siljishi va intensivligi farqlarini ko'rsatadi.

Ftalosianin pigmentlari asosida tayyorlangan tandem quyosh elementlari tomonidan hosil qilingan kuchlanish va tok kuchi qiymatlari

Quyidagi 20 va 21-rasmlarda kobalt ftalosianin bo'yoq moddasi asosida hosil qilingan kontaktida Keithley Model 4200-C raqamli multimetr yordamida 15 kun davomida quvvat chiqishini (mV) va (mA) larda o'lchash orqali olingan qiymatlar keltirildi. Metall ftalosianin asosidagi bo'yoq molekulalarining yorug'likni yutish xususiyatlarini sinovdan o'tkazish davomida kobalt ftalosianin moddasining 1 % li eritmasidan foydalanildi. Yarimo'tkazgich kobalt ftalosianin moddasini dimetilformamiddagi eritmasini maxsus shaffof shisha pastinka yordamida kontakt hosil qilib quvvat chiqishi o'rganildi va quyidagi natijalar olindi: 2-jadval.

Metall ftalosianin asosidagi bo'yoq molekulalarining yorug'likni yutish xususiyatlarini sinovdan o'tkazish davomida kobalt ftalosianin moddasining 1 % li

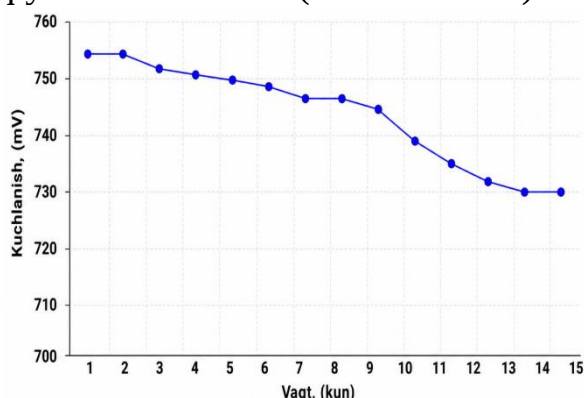
eritmasidan foydalanildi. Yarimo'tkazgich kobalt ftalosianin moddasini dimetilformamiddagi eritmasini maxsus shaffof shisha pastinka yordamida kontakt hosil qilib quvvat chiqishini, ya'ni kuchlanish va tok kuchi qiymatlarini o'lchashdan maqsad, bu biz tavsiya etayotgan yarimo'tkazgich pigmentlarning fotoelektrik va volt-ampere xususiyatlari turg'unligini o'rganish juda muhim hisoblanadi.

2-jadval

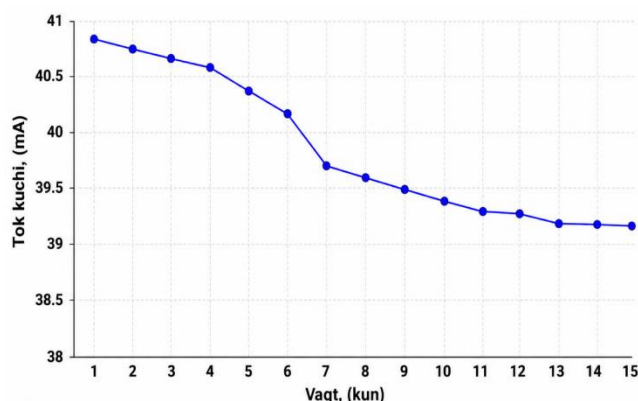
Kobalt ftalosianin asosidagi quyosh elementi tomonidan o'lchangan kuchlanish (mV), tok kuchi (mA), qarshilik (Om) $\bar{U}$ qiymatlari

№. Vaqt, kun	Kuchlanish, (mV)	Tok kuchi, (mA)	Solishtirma qarshilik, (om) $\bar{U}$
1	755	40,9	10,18
2	755	40,8	10,16
3	752	40,7	11,65
4	751	40,6	11,78
5	750	40,4	12,45
6	749	40,2	12,61
7	747	39,7	13,25
8	747	39,6	13,25
9	745	39,5	14,2
10	739	39,4	14,6
11	735	39,3	14,8
12	732	39,3	15,6
13	730	39,2	15,7
14	730	39,2	15,7
15	730	39,2	15,7

Bizning o'lchovlarimiz davomida kunlik ob-havo sharoitiga va kunning qismiga qarab quvvat chiqishi kuchlanish va tok kuchi qiymatlari o'zgarib turadi shuni hisobga olib kunning har xil qismida o'lchovlar olinib ularning o'rtacha qiymatlari keltirildi (20-21-rasmlar).



20-rasm. Kobalt ftalosianin pigmenti asosida hosil qilingan kontaktning quvvat chiqishi (mV)



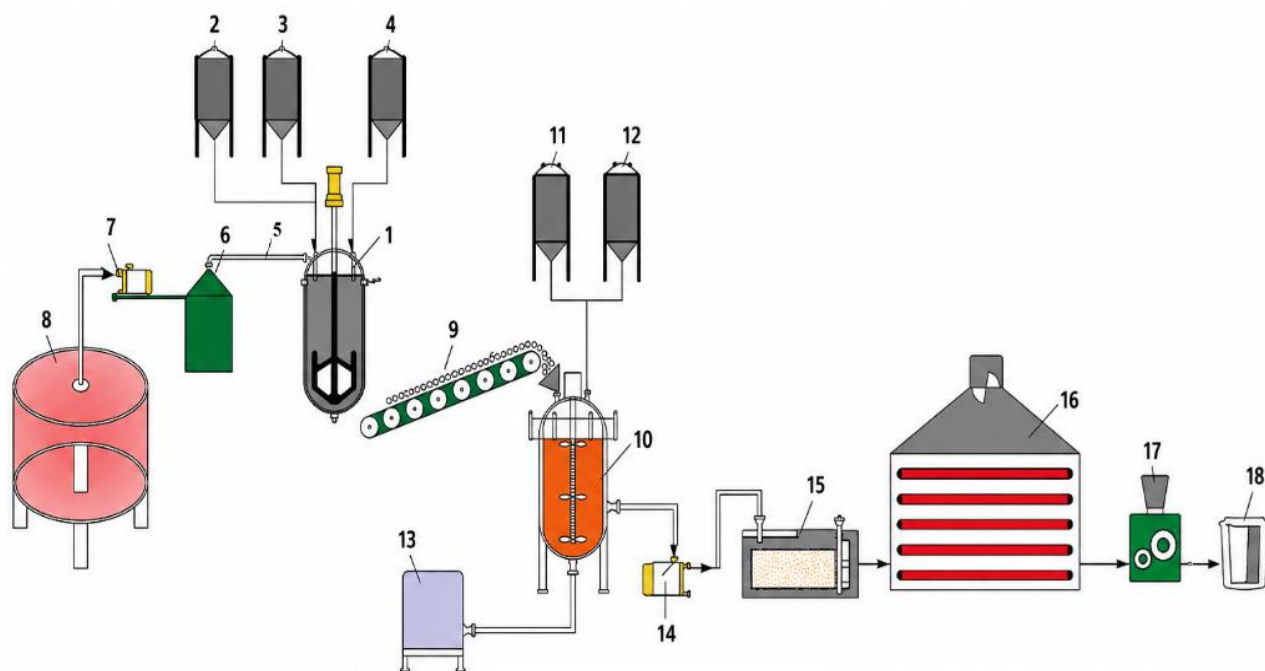
21-rasm. Kobalt ftalosianin pigmenti asosida hosil qilingan kontaktning quvvat chiqishi (mA)

Yuqoridagi natijalardan kuchlanish va tok kuchining eng yuqori ko'rsatkich sifatida birinchi kun 755 (mV), 40,9 (mA) va eng past ko'rsatkich sifatida esa o'lchashning oxirgi kuni 730 (mV), 39,2 (mA) qiymatlar qayd etildi. Tandem

asosidagi quyosh elementlariga anataza strukturasi ega TiO_2 nanomateriali va yarimo'tkazgich sezgir bo'yoq sifatida kobalt ftalosianin pigmenti yordamida muvaffaqiyatli ishlab chiqildi va (755 mV va $40,9 \text{ mA sm}^{-2}$) eng yuqori samaradorlikka erishildi. Kuchlanish (mV) va amper (mA sm^{-2}) qiymatlarini aniqlash uchun sezgirlik 300 mVt/sm^2 yorug'lik manbai ostida 15 kun davomida o'lchandi. Natijada, olingan turli markadagi yarimo'tkazgich bo'yoq pigmentlar asosida hosil qilingan kontaktda quvvat chiqishini, ya'ni kuchlanish va tok kuchining eng yuqori, o'rtacha va quyi ko'rsatgich qiymatlari ko'rsatib berildi.

Dissertatsiyaning **“Tandem quyosh elementlari uchun ishlatiladigan organik yarimo'tkazgich materiallarning kvant-kimyoviy xususiyatlari”** deb nomlangan **to'rtinchi bobida** ftalosianin asosidagi metalokompleks pigmentlarini sintez qilishdagi izoindol ligand molekulasi va kvant-kimyoviy xususiyatlari, pigmentlarning geometriyasi va spin xususiyatlarini hisoblash usullari, shuningdek, 3d-metall tuzlari asosida olingan ftalosianin metalokompleks pigment molekulasi va kvant-kimyoviy xossalari muhokama qilingan.

Dissertatsiyaning **“Tandem quyosh elementlari uchun ishlatiladigan organik yarimo'tkazgich materiallar olish texnologiyasi va uning texnik-iqtisodiy asoslari”** deb nomlangan **beshtinchi bobida** anilin, grafen oksidi hamda ftalosianin asosida yarimo'tkazgich metalokompleks pigmentlar olishning prinsipial texnologik sxemasi va xomashyo sarfi me'yorlari, shuningdek, organik yarimo'tkazgich pigmentlar ishlab chiqarishning iqtisodiy samaradorligini hisoblash jarayonlari muhokama qilingan.



22-rasm. Kremniy ftalosianin pigmentini ishlab chiqarishning prinsipial texnologik sxemasi: 1–Sintez reaktori; 2- Ftal anhidrid uchun sig'im; 3–Kremniy tuzlari uchun sig'im; 4–Karbamid uchun sig'im; 5-Gaz chiqish nayi; 6-ftalamid uchun sig'im; 7 –Nasos; 8 –suvli idish; 9–lenta; 10- Kislotalik va ishqorli ishlov berish reaktori; 11–Sulfat kislota uchun sig'im; 12-Natriy karbonat uchun sig'im;

13-qoldiq eritmadagi suvni texnik suvga aylantirish reaktori, 14- nasos; 15-Filtr; 16-Quritish pechi; 17-Maydalagich; 18-tayyor mahsulot.

Ftalosianin asosida yarimo'tkazgich metalokompleks pigmentlar olishning prinsipial texnologik sxemasi va xomashyo sarfi me'yorlari ishlab chiqildi. 22-rasm kremniy ftalosianin pigmentini ishlab chiqarishning texnologik sxemasi keltirilgan. Kremniy ftalosianin pigmentining texnologik sxemasi maqbul sharoitlardan kelib chiqqan holda ftalosianin pigmentlari sintezi uchun eng qulay jarayon hisoblanadi. Sintez jarayonida harorat bosqichma-bosqich 200 °C dan 300 °C gacha bo'lgan haroratga yetkaziladi va aralashtirish maxsus germetik aralashtirgich yordamida uzluksiz amalga oshiriladi.

Asosiy reaksiya yakunlangandan 2 soat o'tgandan so'ng qizdirish jarayoni to'xtatiladi va reaktor harorati 60 °C gacha sovitiladi. Shundan so'ng reaksiya aralashmaga konsentrlangan sulfat kislota qo'shiladi. Ftalosianinlar sintezida asosiy xom-ashyo sifatida ftal anhidrid, karbamid, 3d-metall tuzlari (Co^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cr^{3+} , Si^{4+}) hamda katalizator qo'llaniladi. Ftal anhidrid aromatik halqaga ega bo'lgani sababli makrohalqada hosil bo'ladigan funksional guruhlarning paydo bo'lishiga asos bo'ladi. Metall ftalosianinlar kristall strukturaga ega, suvda juda kam eruvchan pigmentlar bo'lib, yuvish jarayonida buzilmaydi. Yuvish jarayoni pigment sifatining eng muhim bosqichlaridan biri bo'lib, issiq suv, organik spirtlar yoki suyultirilgan kislotalar yordamida ion qoldiqlari, eriydigan organik aralashmalar va qayta ishlangan texnik suv ajratib olinadi. Sintez jarayoni bilan birgalikda asosiy iqtisodiy samaradorlik xarajatlari ishlab chiqilgan.

XULOSA

Tandem quyosh elementlari uchun yangi avlod organik yarimo'tkazgich pigmentlar olish texnologiyasini ishlab chiqish mavzusida texnika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlarga asoslangan holda, nazariy va amaliy ahamiyatga ega bo'lgan quyidagi xulosalar taqdim etiladi:

1. Markaziy atom sifatida kremniy, lantan va 3d-metall tutgan turli MePc, PANI, GO markali yarimo'tkazgich ftalosianin bo'yoq pigmentlar sintez qilindi hamda sintez jarayonining maqbul sharoitlari taklif etildi.

2. Sintez qilingan turli markadagi yarimo'tkazgich pigmentlarning kimyoviy barqarorligi H_2SO_4 , HCl kabi kuchli mineral kislotalarning 96 % li konsentrlangan eritmalarida, shuningdek, kuchli oksidlovchi H_2O_2 va ammiakning 10 % li eritmaları kabi turli agressiv muhitlarda sinovdan o'tkazildi hamda ushbu pigmentlarning yuqori intensivligi organik erituvchilarning 0.1 %, 0.5 %, 1 % li eritmaları tashkil etishi ko'rsatildi. Olingan yarimo'tkazgich pigmentlardan SiPc va MnPc ning kimyoviy barqarorligi qolgan pigmentlarga nisbatan ancha yuqori ekanligi ko'rsatib berildi.

3. Differensial-termik tahlil natijalari asosida olingan pigmentlarning termik barqarorligi $\text{PANI} < \text{LaPc} < \text{NiPc} < \text{CoPc} < \text{MnPc} < \text{FePc} < \text{SiPc} < \text{GO}$ qatorida ortib borishi aniqlandi. Skanerlovchi elektron mikroskop energiya dispersion

analiz tahlilida 3d-metall tuzlari, anilin va ftal angidrid, karbamid, grafen oksidi va tegishli katalizator olingan pigmentlarning mikrogʻovakli tuzilishi koʻrsatib berildi.

4. Sintez qilingan yarimoʻtkazgich va fotosensibilizator PANI, MePc, GO, LaPc markali pigmentlarning 20 °C dan 180 °C gacha haroratlar oraligʻida vakuum sharoitda individual ravishda harorat va vaqtga nisbatan solishtirma elektr oʻtkazuvchanligi aniqlandi. Bunda yarimoʻtkazgich kremniy ftalosianin kompleks pigmenti $11,8 \cdot 10^{-10}$ oʻziga xos fotokimyoviy xossalarni namoyon qildi.

5. Sintez qilingan grafen oksidi, anilin va tarkibida baʼzi 3d-metallar saqlagan ftalosianin boʻyoq pigmentlar maxsus shaffof shisha taglikka fotokatalizator sifatida qoplangan titan dioksidi va rux oksidiga chuqur shimdirish orqali koʻrinadigan va infraqizil nurlarga sezgir fotosensibilizatorlik xususiyati jihatidan tandem asosidagi quyosh elementlariga kiritilgan hamda mavjud tabiiy pigmentlarga nisbatan foydali ish koeffisienti 20% gacha oshganligi tavsiflandi.

6. Ftal angidrid, karbamid, anilin, grafen oksidi va 3d-metall tuzlari asosida olingan yarimoʻtkazgich boʻyoq pigmentlar asosida hosil qilingan kontaktda 15 kun davomida quvvat chiqishini, yaʼni kuchlanish va tok kuchining eng yuqori, oʻrtacha va quyi koʻrsatgich qiymatlari koʻrsatib berildi.

7. Keithley (Model 4200-C) da hosil qilgan volt-amper tahlili asosida yarimoʻtkazgich pigmentlarning tok kuchi va kuchlanish qiymatlari $\text{LaPc} < \text{CrPc} < \text{MnPc} < \text{NiPc} < \text{FePc} < \text{CoPc}$ qatorida ortib borishi aniqlangan. Shuningdek, zichlik funksional nazariyasi (DFT) asosida sintez qilingan pigmentlarning elektron transport, optik faollik va kimyoviy reaktivlik xususiyatlari nuqtai nazardan p-tipga kiruvchi yarimoʻtkazgich materiallar sifatida taklif etildi.

8. Yarimoʻtkazgich pigmentlar asosida olingan tandem quyosh elementlari tomonidan oʻlchangan solishtirma elektr qarshilik ($\text{om} \cdot \text{sm}$) qiymatlari maxsus shaffof shisha taglik substrat $\text{In}_2\text{O}_3 \cdot \text{SnO}_2 < \text{Sitall} < \text{oddiy shisha taglik} < \text{Kremniy (Si)}$ qatorida oshib borishini namoyon qildi hamda turli nazariy va amaliy tadqiqotlar natijasida tegishli qonuniyatlar ishlab chiqildi.

9. Reaksiya haroratini 200 °C dan 300 °C gacha oraliqda saqlangan holda, dastlabki reagentlar mol nisbati, sarflangan vaqt va tegishli haroratda ushlab turish vaqti hamda qoʻshiladigan kislota konsentratsiyasi mahsulotning rang intensivligiga taʼsiri koʻrsatib berildi.

10. Mazkur pigmentlar “NASR SNACK” MCHJ xorijiy korxonasida OʻZBEKISTON-TOJIKISTON qoʻshma korxonasida lok-boʻyoq mahsulotlarini yaxshilash uchun qoʻllanish imkoniyati yaratildi. Natijada, 3d-metall tuzlari saqlagan ftalosianin pigmentlari asosida PF-115 markali emalning yorqin rangli namunalari olish imkoniyati yaratildi.

11. Tandem quyosh elementlari uchun fotoanod sendvich qavat sifatida ishlatiladigan titan oksidi, rux oksidi suspenziyasini olish, shuningdek, quyosh elementlari uchun ishlatiladigan elektrolit eritmalar tarkibi va uni tayyorlash metodikasi tavsiya etildi. Shuningdek, termik barqaror yuqori assimiliyatsiya koeffisientiga ega yarimoʻtkazgich kremniy ftalosianin pigmentini olish texnologiyasi ishlab chiqildi hamda ishlab chiqarishning iqtisodiy samaradorligi asoslab berildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.31/2025.27.12.T.01.01. ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАВОЙСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ДЕНАУСКИЙ ИНСТИТУТ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА И
ПЕДАГОГИКИ**

ШУКУРОВ ДИЛМУРОД ХУРСАНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПИГМЕНТОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
ДЛЯ ТАНДЕМНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

02.00.14 – Технология органических веществ и материалов на их основе

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора технических наук (DSc)**

Тема диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан под номером B2026.3.DSc/T1116.

Докторская диссертация выполнена в Денауском институте предпринимательства и педагогики.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу www.nsumt.uz и информационно-образовательном портале Ziyonet по адресу www.ziyonet.uz.

Научный консультант:

Тураев Хайит Худайназарович
доктор химических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Вапоев Хуснитдин Мирзаевич
доктор технических наук, профессор

Адилов Равшан Иркинович
доктор технических наук, профессор

Файзиев Жахонгир Бахромович
доктор технических наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Каршинский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «3» октября 2026 г. в «9:00» часов на заседании Научного совета DSc.31/2025.27.12.T.01.01 при Навоийском государственном горно-технологическом университете по адресу: 210100, Навоийская область, город Навои, улица Галаба Шох, дом 76в. Тел.: (+99879)-223-49-66, факс: (+99879) 223-53-62, e-mail: info@nsumt.uz.

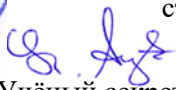
С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Навоийского государственного горно-технологического университета (зарегистрирован за №265). Адрес: 210100, Навоийская область, город Навои, улица Галаба Шох, дом 76в. Тел.: (+99879)-223-49-66, факс: (+99879) 223-53-62, e-mail: info@nsumt.uz.

Автореферат диссертации разослан «16» сентябрь 2026 года.

(Реестр протокола рассылки №27 от «16» 09 2026 года).




Мухиддинов Б.Ф.
Председатель Научного совета
по присуждению ученых
степеней, д.х.н., проф.


Шарипов С.Ш.
Учёный секретарь Научного совета
по присуждению ученых
степеней, д.т.н., доц.


Вапоев Х.М.
Председатель Научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.т.н., проф.

ВВЕДЕНИЕ (Автореферат диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и необходимость темы диссертации. Во всем мире в связи с непрерывным ростом численности населения и объемов производства, потребность в энергоресурсах неуклонно возрастает из года в год. В настоящее время одним из наиболее эффективных путей решения существующих энергетических проблем является использование альтернативных источников энергии. Это позволяет не только удовлетворить растущий спрос на энергию, но и снизить себестоимость производства электроэнергии, а также создать недорогие и перспективные солнечные элементы на основе неорганических и органических полупроводниковых материалов. Применение металлокомплексных пигментов на основе фталоцианина в качестве сенсibilизаторов в tandemных солнечных элементах обладает высокой практической значимостью, позволяя повысить их коэффициент полезного действия до 30%. Столь стремительный рост спроса на альтернативные источники энергии ставит перед исследователями задачу разработки нетрадиционных технологий, обладающих высокой теоретической и практической значимостью для производственной сферы. В этом контексте получение недорогой и экологически чистой электроэнергии с использованием фоточувствительных элементов на основе полупроводниковых полимерных материалов и фталоцианиновых красителей, содержащих атомы металлов и неметаллов приобретает особое значение.

В мире активно ведутся научно-исследовательские работы, направленные на создание и производство новых солнечных элементов на основе полупроводниковых металлокомплексных соединений фталоцианина, а также полимерных красителей-пигментов. Солнечные элементы, полученные на основе tandemной структуры, среди используемых на практике аналогов выделяются своей гибкой и простой конструкцией, экологической чистотой, экономической эффективностью и технической безопасностью, благодаря чему сегодня они становятся способными конкурировать с существующими кремниевыми солнечными элементами. В этом направлении особое внимание уделяется созданию tandemных фотоэлементов на основе органических полупроводниковых материалов и их использованию в качестве полупроводниковых соединений, заменяющих оксиды индия и таллия.

В Республике Узбекистан, в рамках стратегического развития химической и энергетической отраслей промышленности, путем внедрения передовых научно обоснованных подходов к получению новых видов полупроводниковых материалов, отвечающих требованиям современности, достигнут ряд значимых научно-практических результатов. Постановлением Президента Республики Узбекистан № ПП-436 «О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан к «зеленой» экономике до 2030 года» от 2 декабря 2022 года, определены важнейшие задачи по наращиванию производственных мощностей

возобновляемых источников энергии и доведению их доли в общем объеме выработки электроэнергии до 30 процентов и более¹. В этом контексте особую научную и практическую значимость приобретают исследования, направленные на разработку технологии получения металлокомплексных пигментов на основе фталоцианина для tandemных солнечных элементов, выступающих в качестве источника «зеленой» энергии.

Результаты настоящего диссертационного исследования в определенной мере будут способствовать обеспечению исполнения Закона Республики Узбекистан от 21 мая 2019 года № ЗРУ-539 «Об использовании возобновляемых источников энергии», Постановлений Республики Узбекистан № ПП-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий» от 16 февраля 2023 года и № ПП-4805 «О мерах по повышению качества непрерывного образования и результативности науки по направлениям химии и биологии» от 12 августа 2020 года, а также реализации задач, закрепленных в других нормативных правовых актах, связанных с этой деятельностью.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данная научно-исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан – VII. «Химические технологии и нанотехнологии» и II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации². Научные исследования, направленные на получение полупроводниковых пигментных материалов на основе фталоцианина, анилина и графена, а также на использование этих материалов для преобразования солнечной энергии одного из альтернативных источников в дешевую, качественную и экологически чистую электроэнергию, ведутся в ведущих научных центрах и высших учебных заведениях мира. В частности, подобные работы проводятся в таких научно-исследовательских центрах, как: Университет Дзэжоу (Юэсин Чжан), Университет науки и технологий Китая, Китайский университет нефти (Восточный Китай), Ульсанский университет (Южная Корея), Университет Палацкого в Оломоуце (Чехия), Тамбовский государственный технический университет (Россия), Ближневосточный технический университет (METU), Университет Мунзур, Университет Кафкас, Университет Фырат (Турция), Государственный университет Сан-Хосе, Массачусетский университет в Амхерсте, Макаоский университет науки и технологий, Калифорнийский университет в Санта-Барбаре (UCSB), Пекинский университет химической технологии (BUCT), Коннектикутский университет, Цукубский университет (Япония), Пенсильванский университет

¹ Постановления Президента Республики Узбекистана от 2 декабря 2022 года № ПП-436 «О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан к «зеленой» экономике до 2030 года»

² Обзор международных научных исследований по теме диссертации подготовлен на основе сайтов <https://scholar.google.com>, <http://www.sciencedirect.com> и других источников.

(Новая Зеландия), Российская лаборатория фотовольтаики (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе), Институт материаловедения НПО «Физика-Солнце» (Узбекистан), Международный институт солнечной энергетики (Узбекистан), Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии, а также Термезский государственный университет.

В ходе проведенных в мире исследований по получению фотоактивных и фотосенсибилизирующих пигментов на основе фталоцианина, анилина и оксида графена, а также по их применению в производстве дешевой, экологически чистой и альтернативной энергии на основе солнечного света, были получены следующие результаты: эффективность 14,3% с использованием медиатора Red Ox меди (II/I) и порфиринового красителя (Швейцария), сенсибилизированные красителями солнечные элементы с эффективностью 8% на основе натуральных красителей с производными хлорофилла (Малайзия), разработаны материалы для переноса электронов и дырок, содержащие Spiro OMeTAD и CuSCN (Швейцария), получены перовскитные и tandemные солнечные элементы с эффективностью более 15% (Сингапур), разработан однопереходный перовскитный солнечный элемент с эффективностью 26% (Китай), эффективность 33,9% в tandemном солнечном элементе с перовскитно-кремниевой композицией, 14% в перовскитных солнечных элементах на основе олова (Sn) и двойного перовскита Достигнута эффективность солнечного элемента ($\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$) в 10% (Великобритания), йодид фенилэтиламмония продлил срок службы солнечных элементов (Южная Корея), слои графена и оксида графена улучшили распределение заряда в фотоэлектрических элементах (США), получены стабильные солнечные элементы с сенсибилизацией красителями на основе фталоцианина и пигментов на основе гетеролептических комплексов меди и кальция (Узбекистан).

В мире по приоритетным направлениям создания полупроводниковых пигментов на основе фталоцианина, анилина и оксида графена, применяемых в качестве фотосенсибилизаторов в tandemных и сенсибилизированных красителем солнечных элементах, ведется ряд исследований. В частности, особое внимание уделяется синтезу новых полимерных полупроводниковых материалов, обладающих сенсибилизирующими свойствами, а также красителей и пигментов на основе полиацетилена, политиофена и изоиндола; получению порфириновых и фталоцианиновых красителей с поглощением в видимой и ближней инфракрасной областях спектра; применению природных красителей, таких как хлорофилл и антоцианины, для создания экологически чистых сенсибилизированных солнечных элементов. Кроме того, важнейшее место в решении задач, связанных с масштабированием и внедрением данных технологий в промышленное производство, занимает достижение эффективности tandemных солнечных элементов на уровне свыше 35%. Отдельным приоритетным направлением является разработка технологии получения фталоцианиновых пигментов, содержащих в качестве центрального атома ионы металлов-лантаноидов, а также функциональные

группы с различными электронодонорными атомами в фталоцианиновых кольцах.

Степень изученности проблемы. Во всем мире исследования по получению полупроводниковых пигментов на основе фталоцианина, оксида графена и анилина, а также по улучшению их характеристик и расширению областей применения проводились⁴ такими выдающимися учеными, как Ф. Йелмас, Хидеки Ширакава, Алан Хегер, Алан МакДиармид, Т.В. Верниская, Цюньфэй Чжоу, Чжэнь-Фэй Лю, Тобин Дж. Маркс, Пьер Дарансе, Оуэн Мелвилл, Бенуа Лессар, Тимоти Бендер, А. Дидейкин и Цзинбинь Цзэн.

Среди ученых стран СНГ А.Б. Килимник, Е.Е. Кондракова, И.А. Белогорохов, И. Александрович, Т. Артур и Д. Александр в своих трудах выполнили ряд фундаментальных исследований, посвященных механизмам получения, свойствам и областям применения полупроводниковых металлокомплексных пигментов.

В нашей стране научные изыскания в данной области успешно ведутся рядом ученых, среди которых особо следует отметить А.Т. Джалилов, Х.Х. Тураев, А.М. Насимов, А.Т. Тиллаев, Х.С. Бекназаров, М.У. Каримов, Дж.Б. Файзиев, А.Г. Махсумова, Г.А. Ихтиёрова, Х.Ш. Ташпулатов, М.О. Юсупов, Д.А. Набиев, С.С. Содиков, Ф.Дж. Мирзаева и других исследователей.

Опираясь на вышеизложенные данные, актуальной задачей представляется синтез фоточувствительных полупроводниковых пигментов на основе солей 3d-металлов, солей лантана, хлорида кремния, анилина, фталевого ангидрида и оксида графена, а также всестороннее исследование их полупроводниковых характеристик, структуры и физико-химических свойств с применением современных аналитических методов. Кроме того, важнейшее теоретическое и практическое значение имеют научно обоснованная разработка принципиальной технологической схемы и теоретическое обоснование механизма работы tandemных солнечных элементов, функционирующих на основе фоточувствительных полупроводниковых комплексных пигментов, а также создание высокоэффективной технологии получения новых полупроводниковых материалов, способных стать импортозамещающей продукцией.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование проводилось в рамках фундаментального проекта FL-8323102103 по теме: «Полупроводниковые tandemные солнечные элементы нового поколения и процессы переноса электронов и дырок, ограничивающие их эффективность» на 2024-2028 годы в соответствии с научно-исследовательским планом Термезского государственного университета, а также проекта АК-25-61 на 2025 год по теме: «Синтез полупроводниковых пигментных материалов и их применение для получения солнечных элементов нового поколения» в

³ <https://pubs.acs.org/jpcafh/article-abstract/125/19/4055/584734/Electronic-Structure-of-Metallophthalocyanines-MPC?redirectedFrom=fulltext>

рамках программы «Академическая мобильность», объявленной Агентством по инновационному развитию при Министерстве высшего образования, науки и инноваций.

Целью исследования является разработка технологии получения новых, эффективных, с высоким коэффициентом фотосенсибилизации органических полупроводниковых красителей, чувствительных к солнечному свету для tandemных солнечных элементов.

Задачи исследования:

синтез органических полупроводниковых пигментов, чувствительных к солнечному свету, на основе солей 3d-металлов, солей лантана, хлорида хрома, фталевого ангидрида, анилина и оксида графена а также определение оптимальных условий процесса синтеза;

подготовка специальной односторонней прозрачной стеклянной пластины на основе оксида титана, оксида цинка и оксидов олова;

приготовление суспензий оксида титана и оксида цинка, используемых в качестве сэндвич-слоев фотоанода для tandemных солнечных элементов, а также разработка методики составления электролитных растворов, используемых при изготовлении солнечных элементов;

исследование состава, структуры и физико-химических свойств полученных полупроводниковых материалов с использованием современных методов исследования, а также их фотосенсибилизирующих свойств по результатам УФ-спектрофотометрии и вольт-амперного анализа;

квантово-химический анализ геометрии, граничных орбиталей, распределения заряда и полупроводниковых свойств полученных полупроводниковых материалов на основе теории функционала плотности;

измерение значений напряжения и тока, генерируемых tandemными солнечными элементами на основе полупроводниковых пигментов, чувствительных к солнечному свету, и составление соответствующих серий на основе различных теоретических и практических исследований;

исследование tandemных солнечных элементов на основе полупроводниковых пигментных материалов, разработка технологии получения этих пигментных материалов и проведение экономического обоснования.

Объектами исследования были выбраны фталоцианиновые пигменты, оксид графена, анилин, мочевины, соли 3d-металлов, электролитные растворы и прозрачные стеклянные пластины типа «сэндвич», образующие tandemные солнечные элементы.

Предметом исследования являются химические превращения металлокомплексных пигментов на основе фталоцианина, модификация графена, химическая стабильность светочувствительных материалов, пигментов и процессы п-н-переходов.

Методы исследования. В исследовании использовались современные экспериментальные методы, такие как ИК-спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), дифференциальный термический анализ,

вольтамперометрический анализ (Keithley модель 4200-С и RIGOL DM3058), элементный анализ и квантово-химический анализ.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

синтезированы полупроводниковые пигментные материалы на основе анилина, фталевого ангидрида, мочевины, графена и оксида графена, а также некоторых солей 3d-металлов;

выбраны оптимальные условия для получения полупроводниковых пигментов SiPc, FePc, CoPc, NiPc, LaPc, MnPc, PANI и GO на основе анилина, фталевого ангидрида, мочевины, графена и оксида графена, а также некоторых солей 3d-металлов;

рассчитано качество генерации напряжения (мВ) и тока (мА) синтезированных новых пигментов марок CrPc, MnPc, NiPc, LaPc, FePc, CoPc под воздействием света и солнечного света индивидуально в течение 15 дней;

установлено, что значения тока и напряжения полупроводниковых пигментов возрастают по порядку $\text{LaPc} < \text{CrPc} < \text{MnPc} < \text{NiPc} < \text{FePc} < \text{CoPc}$ на основе вольт-амперного анализа, проведенного на приборе Keithley (модель 4200-С);

доказано, что пигменты, синтезированные на основе теории функционала плотности (DFT), являются полупроводниковыми материалами р-типа с точки зрения электронного транспорта, оптической активности и химической реактивности;

установлено, что значения напряжения и сила тока tandemных солнечных элементов на основе полученных полупроводниковых пигментов, улучшились на 20% по сравнению со значениями напряжения и силы тока, красительно-сенсibilизированных солнечных элементов;

доказано, что значения удельного сопротивления ($\text{Ом} \cdot \text{см}$), измеренные tandemными солнечными элементами на основе полупроводниковых пигментов, возрастают в порядке $\text{In}_2\text{O}_3 \cdot \text{SnO}_2 < \text{Citall} < \text{обычная стеклянная подложка} < \text{кремний (Si)}$;

установлено на основе квантово-химического анализа, что полупроводниковые свойства комплексов металлофталоцианинов возрастают по порядку $\text{LaPc} < \text{CrPc} < \text{MnPc} < \text{NiPc} < \text{FePc} < \text{CoPc}$;

разработана технология получения термостабильных полупроводниковых органических пигментных материалов с высоким коэффициентом ассимиляции на основе фталоцианина, анилина и оксида графена.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

синтезированы полупроводниковые пигментные материалы на основе анилина, фталевого ангидрида, мочевины, графена и оксида графена, а также некоторых солей 3d-металлов;

определены оптимальные условия получения высокоинтенсивных фталоцианиновых пигментов на основе солей 3d-металлов, состав, структура и физико-химические свойства полученных пигментов с использованием современных аналитических методов;

определена химическая стабильность пигментов и возможности их повторного использования в условиях открытого воздуха а также применения в tandemных солнечных элементах;

разработана принципиальная технологическая схема получения tandemных солнечных элементов с новыми фотосенсибилизирующими свойствами на основе анилина, оксида графена и фталоцианиновых пигментов;

разработана и технико-экономически обоснована технология получения высокоинтенсивных полупроводниковых органических пигментных материалов на основе анилина, оксида графена, фталевого ангидрида, солей 3d-металлов, мочевины и катализатора.

Достоверность результатов исследования. Надежность полученных результатов, достоверность выводов и рекомендаций, а также идентификация полученных соединений были подтверждены с помощью самых современных химических, физико-химических и физико-механических методов (ИК-спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), дифференциальный термический анализ, элементный анализ, рамановская спектроскопия, УФ-спектрофотометр, RIGOL DM3058 и вольт-амперметр Keithley).

Научная и практическая значимость результатов исследований.

Научная значимость результатов исследования объясняется тем, что синтезированные вещества этого типа открывают новые возможности в качестве перспективных фотоанодных материалов для солнечных элементов нового поколения, а также тем, что tandemные солнечные элементы были изучены с целью достижения высоких результатов за счет повышения эффективности преобразования энергии солнечных элементов до высокого уровня путем дальнейшего усиления фотокаталитической роли и сбора генерируемого тока и напряжения, и заложена научная основа для технологии производства органических пигментных материалов.

Практическая значимость результатов исследования определяется тем, что полученные красители на основе PANI, SiPc, LaPc, NiPc, FePc, CrPc, CoPc, MnPc и GO проявляют полупроводниковые и оптические свойства, что позволяет использовать их в tandemных солнечных элементах, функционирующих на основе светочувствительных красителей.

Внедрение результатов исследования. На основе научных результатов, полученных при разработке технологии получения органических полупроводниковых пигментных материалов для tandemных солнечных элементов:

пигменты MePc, PANI и GO включены в «Список перспективных разработок для практического применения в 2027–2030 годах» Шуртанского департамента нефтегазодобычи в качестве эффективных ингибиторов коррозии в водных системах (Справка Шуртанского департамента нефтегазодобычи №OP25/ED-2601 от 8 мая 2026 г.). В результате антикоррозионные пигментные покрытия на основе MePc, PANI и GO

позволяют повысить уровень защиты металлических образцов и снизить скорость коррозии металла до 97%;

технология получения органических полупроводниковых фталоцианиновых пигментов для красок, содержащих оксид графена, анилин и 3d-металлы, включена в «Список перспективных разработок для реализации в 2027–2030 годах» Департамента нефтегазодобычи Шуртана (Справка Шуртанского департамента нефтегазодобычи №ОР25/ЕD-2601 от 8 мая 2026 г.). В результате технология получения органических полупроводниковых фталоцианиновых пигментов для красок, содержащих оксид графена, анилин и некоторые 3d-металлы, позволяет получать эффективные пигменты для защиты от коррозии металлических конструкций и систем циркуляции воды в Департаменте нефтегазодобычи Шуртана;

органические пигменты, синтезированные на основе фталоцианина, анилина и оксида графена, содержащие соли 3d-металлов, были внедрены на зарубежном предприятии ООО «Nasr Snack» в качестве лака для окрашивания полимерной целлофановой упаковки. (Справка узбекско-таджикского изарубежного предприятия ООО «Nasr Snack» № 73 от 5 мая 2026 г.). В результате удалось получить яркие цветные образцы эмали марки ПФ-115 на основе фталоцианиновых пигментов, содержащих соли 3d-металлов, анилин и оксид графена.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на 24 научно-практических конференциях, в том числе на 4 международных и 20 республиканских.

Опубликованность результатов исследования. В общей сложности по тематике диссертации опубликовано 46 научных работ, из которых 22 научные статьи, в том числе 18 в республиканских и 4 в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских (DSc) диссертаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 195 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении устанавливается актуальность темы диссертации, ее важность и необходимость в решении проблемы, излагаются цели и задачи научно-исследовательской работы, объекты и предмет исследования, указывается актуальность исследования для приоритетных направлений развития науки и техники в республике, описывается научная новизна и практическая значимость исследования, раскрывается научно-практическое значение полученных результатов, даются рекомендации по применению результатов исследования на практике, предоставляется информация о опубликованных работах и структуре диссертации.

Первая глава диссертации, озаглавленная «Современное состояние и перспективы развития исследований в области создания

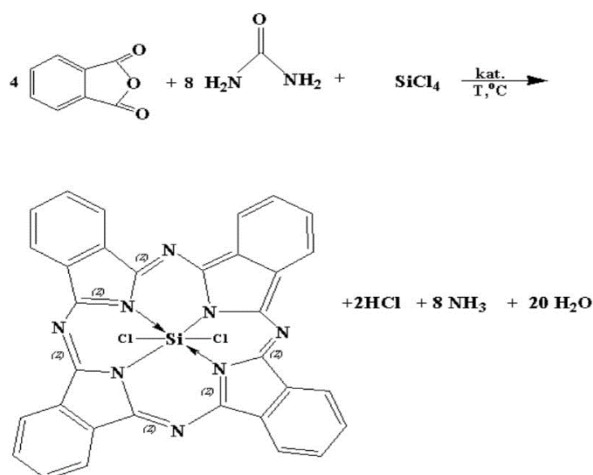
полупроводниковых пигментных материалов» в основном анализирует структуру, синтез и свойства металлокомплексных соединений на основе фталоцианина, преимущества и практическое применение комплексных органических полупроводниковых материалов на основе фталоцианина, а также проводит сравнительный анализ литературы. Представлена информация о методах исследований, проводимых учеными мира для создания новых типов полупроводниковых органических полимерных материалов. Рассмотрена литература по получению солнечных элементов на основе природных красителей и методам изменения их фотоэлектрических свойств и интенсивности цвета путем модификации фталоцианиновых пигментов. Также на основе критического анализа данных литературы определены новые аспекты использования полупроводниковых пигментов для tandemных солнечных элементов, а также полупроводниковые свойства полупроводниковых материалов на основе графена и оксида графена.

Вторая глава диссертации, озаглавленная **«Синтез и исследование полупроводниковых пигментных материалов, используемых для получения tandemных солнечных элементов»** научно обосновывает объекты исследования и современные методы анализа. Описаны методы исследования и синтез полупроводниковых металлоорганических комплексных пигментов на основе анилина, оксида графена и некоторых солей 3d-металлов, мочевины, фталевого ангидрида, а также соответствующих катализаторов. Представлены приготовление охлаждающей смеси для проведения реакций в холодной среде, процесс приготовления фотокаталитической пасты на основе диоксида титана, оксида цинка и поверхностно-активных веществ и этилового спирта, а также состав электролитных растворов и способы их приготовления.

Синтез кремнийфталоцианинового пигмента

Разработка высокостабильных фотоактивных полупроводниковых соединений на основе синтеза кремнийсодержащих фталоцианиновых пигментов имеет большое научное и практическое значение. Для синтеза кремнийсодержащего фталоцианинового красителя на основе хлорида кремния IV, мочевины и фталевого ангидрида с катализатором тщательно перемешали 6,8 г (0,04 моль) хлорида кремния IV, 23,68 г (0,16 моль) фталевого ангидрида, 19,2 г (0,32 моль) мочевины и 0,01% от общей массы борогидрида натрия в качестве катализатора. Уравнение реакции образования полупроводникового кремнийсодержащего фталоцианинового пигмента приведено ниже.

В конце процесса, после дополнительной очистки, растворения и нейтрализации, начинают образовываться синие и светло-зеленые кристаллы, которые оседают на дно стакана. Образовавшийся осадок нейтрализуют раствором бикарбоната натрия, затем фильтруют через воронку Бюхнера и несколько раз промывают дистиллированной водой.



Уравнение реакции образования кремнийфталоцианинового пигмента

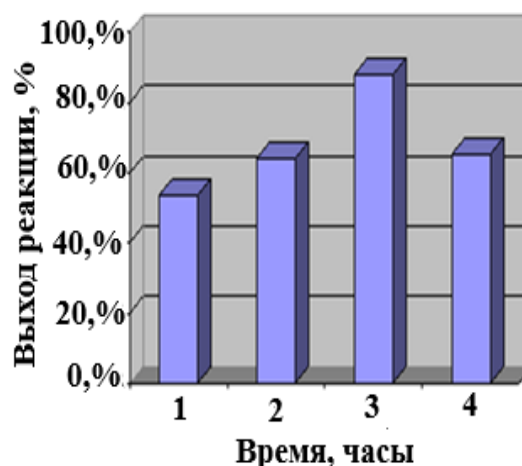


Рис. 1. Влияние времени (в часах) на выход кремнийфталоцианинового пигмента

Исследование влияния таких параметров, как температура, молярное соотношение исходных реагентов и время, на синтез пигмента

В ходе исследования изучалось влияние температуры на выход пигмента кремнийфталоцианина (SiPc) (рис. 2). Экспериментальные результаты показали, что при повышении температуры синтеза от 190 °С до 310 °С выход продукта увеличивался по закономерной, почти линейной зависимости, прямо пропорционально температуре. На основании этой серии экспериментов 310 °С была принята в качестве оптимальной температуры синтеза, поскольку именно при этих условиях был зафиксирован максимальный выход. Более высокие температуры приводят к снижению выхода и увеличению интенсивности пигмента, и 310 °С была определена как окончательная оптимальная температура.

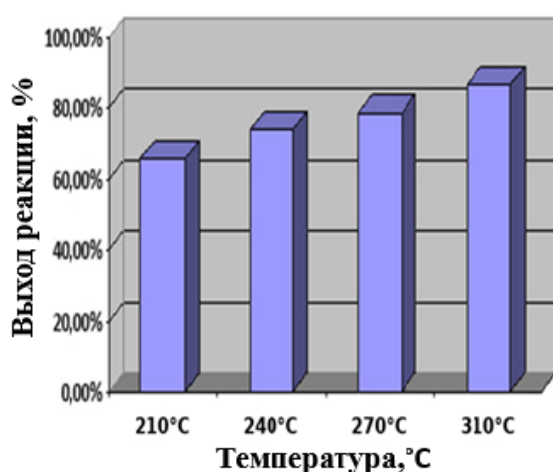


Рис. 2. Влияние температуры на выход кремнийфталоцианинового пигмента

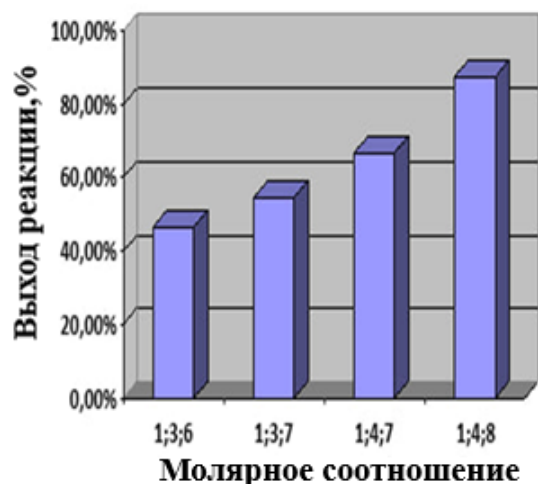
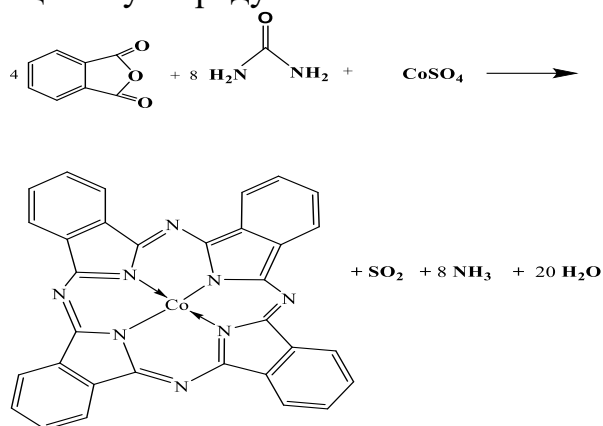


Рис. 3. Влияние молярного соотношения исходных материалов на выход кремнийфталоцианинового пигмента

Стехиометрическое изменение молярного соотношения исходных реагентов напрямую влияет на выход синтеза кремниевого фталоцианина, смещая равновесие реакции в сторону образования продукта. Экспериментальные результаты показывают, что постепенное (градиентное) увеличение молярного соотношения от 1:3;6 до 1:4;8 повышает выход продукта с 45% до 90%. Этот закон характеризует соотношение 1:4;8 как кинетически наиболее благоприятную (оптимальную) точку процесса, поскольку именно при этом параметре степень превращения реагентов и вероятность эффективных межмолекулярных столкновений максимальны, и, как следствие, достигается высокая технологическая эффективность (рис. 3).

Синтез пигмента кобальтового фталоцианина

Для синтеза кобальтового фталоцианинового красителя нам потребовались дисульфат кобальта, мочевины, фталевый ангидрид и катализаторы. В термостабильный стакан объемом 400 мл добавили 2,81 г (0,01 моль) дисульфата кобальта, 5,92 г (0,04 моль) фталевого ангидрида, 4,8 г (0,08 моль) мочевины и 0,1% гептамолибдата аммония в качестве катализатора и тщательно перемешали. Когда температура в предварительно нагретой печи достигла 200 °С, реакционную смесь в стакане поместили в печь на 2,5 часа. В результате бесцветная реакционная смесь под воздействием температуры превратилась в коричневую порошкообразную массу. Ее вынули из печи, охладили до комнатной температуры и растворили в 96%-ном концентрированном растворе серной кислоты при перемешивании в течение 25 минут. Затем реакционную смесь, растворенную в концентрированной серной кислоте, заливали кипятком до полного объема стакана и снова перемешивали. В результате продукты, которые не полностью прореагировали, растворялись в растворе и покидали реакционную среду.



Механизм реакции образования пигмента фталоцианина кобальта

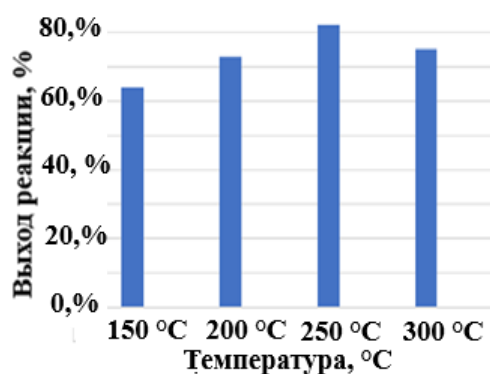


Рис. 4. Влияние температуры на выход пигмента фталоцианина кобальта

В ходе исследования изучалось влияние температуры на выход продукта при синтезе пигмента фталоцианина кобальта (CoPc) (рис. 4). Экспериментальные результаты показали, что при повышении температуры синтеза от 150°С до 300°С выход продукта увеличивался по закономерной,

почти линейной зависимости, прямо пропорционально температуре. Полученные результаты показывают, что повышение температуры на 50°C увеличивает выход продукта в среднем на 6-7%. Температура 250°C была определена как оптимальная температура для процесса синтеза, поскольку именно при этой температуре достигается максимальный выход.



Рис. 5. Влияние молярного соотношения исходных материалов на выход пигмента фталоцианина кобальта

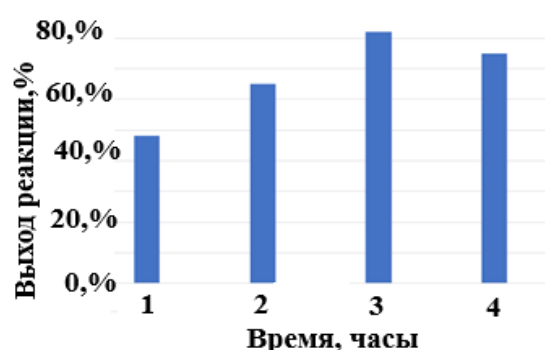


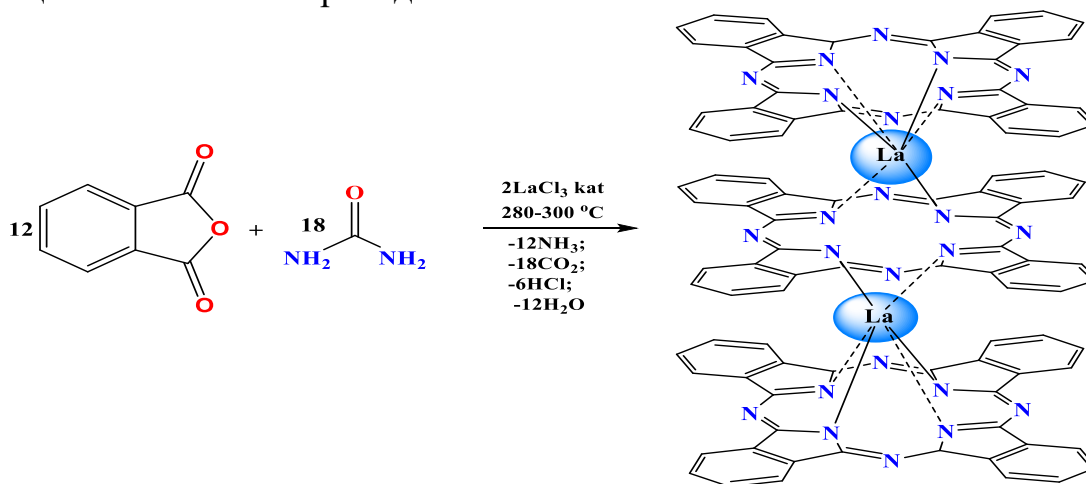
Рис. 6. Влияние времени (в часах) на выход пигмента фталоцианина кобальта

В ходе экспериментов изучалось влияние молярного соотношения исходных материалов на выход образования фталоцианина кобальта (рис. 5). Стехиометрическое изменение молярного соотношения исходных реагентов напрямую влияет на выход синтеза фталоцианина кобальта, смещая равновесие реакции в сторону образования продукта. Экспериментальные результаты показывают, что увеличение молярного соотношения от 1:3;6 до 1:4;8 постепенно увеличивало выход продукта с 48% до 82%. Этот закон характеризует соотношение 1:4;8 как кинетически наиболее благоприятную (оптимальную) точку процесса, поскольку именно при этом параметре увеличивается число столкновений молекул реагентов, и, как следствие, достигается высокая технологическая эффективность. Согласно графическим данным на рис. 6, увеличение продолжительности нагрева с 1 часа до 3 часов обеспечивает увеличение выхода продукта с 50% до 82%.

Синтез фталоцианинового пигмента лантана

В настоящее время синтезируется большое количество представителей металлокомплексных пигментов на основе фталоцианина. В частности, были синтезированы фталоцианиновые пигменты, содержащие 3d-металлы и щелочноземельные металлы. Однако синтез фталоцианиновых пигментов с металлами класса лантанидов не получил широкого распространения. Синтез фталоцианинового пигмента был проведен в присутствии соли лантана, которая считается первым представителем класса лантанидов. Фталоцианиновый краситель, содержащий лантан в качестве центрального атома, был синтезирован в присутствии хлорида лантана III, мочевины, фталевого ангидрида и борогидрида натрия в качестве катализатора, и изучено влияние различных параметров, таких как температура, молярное соотношение исходных реагентов и время, затраченное на процесс синтеза.

Количество исходных реагентов в реакции отбиралось в соответствующем соотношении. Когда температура в нагревательной печи достигла требуемого уровня, реакционную смесь в стакане поместили в печь. В конце процесса, после дополнительной очистки, растворения и нейтрализации, появились темно-зеленые кристаллы, которые начали оседать на дно стакана. Образовавшийся осадок отфильтровали через воронку Бюхнера и несколько раз промыли дистиллированной водой и раствором аммиака. Промытый продукт высушили в сушильном шкафу при 60 °С в течение 24 часов. Уравнение реакции образования полупроводникового пигмента фталоцианина лантана приведено ниже.



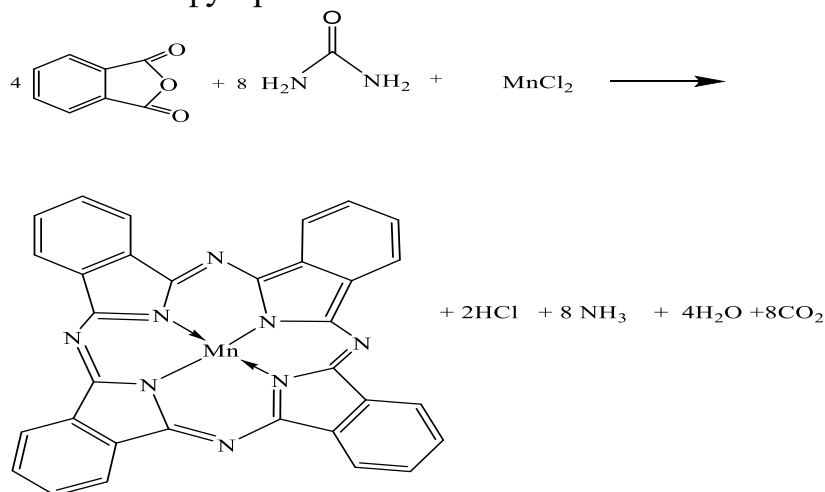
Уравнение реакции образования пигмента фталоцианина лантана

Благодаря большому ионному радиусу и высокой координационной способности иона лантана, он образует термодинамически стабильные двухслойные комплексы с макроциклами фталоцианина. Этот ион La^{3+} создает энергетически очень выгодную координационную среду, а образующаяся сэндвич-структура обеспечивает фотоэлектрические и полупроводниковые свойства за счет π - π взаимодействий и эффективного переноса заряда. Анализ и эксперименты показывают, что для многих лантанидов свободная энергия двухслойного комплекса ниже, чем у простого монофталоцианина. Поэтому равновесие реакции часто смещается в сторону образования сэндвич-комплекса. Влияние сэндвич-структуры на фотоэлектрические свойства в этом направлении подтверждается расчетами DFT, УФ-спектроскопией, ИК-спектроскопией, рамановской спектроскопией, рентгенофазовым анализом и вольт-амперными характеристиками.

Синтез пигмента марганцевого фталоцианина

Для синтеза марганцевого фталоцианинового красителя требовались дихлорид марганца, мочевины, фталевый ангидрид и катализаторы. В термостойкий стакан объемом 400 мл добавили и перемешали 1,98 г (0,01 моль) хлорида марганца, 5,92 г (0,04 моль) фталевого ангидрида, 4,8 г (0,08 моль) мочевины и катализатор в количестве 0,1% по массе от общей массы. Когда температура в предварительно нагретой печи достигала 250°C,

реакционную смесь в стакане помещали в печь на 2,5 часа. В результате бесцветная реакционная смесь под воздействием температуры превращалась в коричневую порошкообразную массу. Ее извлекали из печи, охлаждали до комнатной температуры и растворяли в 96%-ном концентрированном растворе серной кислоты при перемешивании в течение 30 минут. В конце процесса, после дополнительной очистки, растворения и нейтрализации, появляются сине-зеленые кристаллы, которые начинают оседать на дно стакана. Образовавшийся осадок многократно промывают водой, осаждают, нейтрализуют раствором аммиака, затем фильтруют на воронке Бюхнера и несколько раз промывают дистиллированной водой. Промытый продукт сушат в сушильном шкафу при 60°C в течение 12 часов.



Уравнение реакции образования марганцевого фталоцианинового пигмента

Высушенный синий пигмент хорошо растворяется в диметилформамиде, диметилсульфоксиде и N-метилпирролидоне. Выход полученного продукта составил 80%. Мы сравнили синтезированный марганцевый фталоцианиновый краситель с данными из литературы и провели физико-химический анализ. Синтезированный новый фотопроводящий краситель отличается превосходными оптическими и фотохимическими свойствами. Кроме того, его термическая стабильность, чувствительность к солнечному свету и стабильность в растворе расширяют области его применения. В настоящее время синтез этого марганцевого фталоцианинового красителя (MnPc) используется в качестве чувствительного красителя для tandemных солнечных элементов, который считается одним из солнечных элементов четвертого поколения, являющихся одним из альтернативных источников энергии.

Третья глава диссертации, озаглавленная «Свойства и исследование органических полупроводниковых пигментов, используемых в tandemных солнечных элементах» включает определение p- и n-типа полупроводниковых пигментов на основе металлофталоцианинов, оптические и фотоэлектрические свойства фталоцианиновых пигментов, содержащих 3d-металлы, полупроводниковые свойства синтезированных пигментов с фотосенсибилизирующими свойствами, инфракрасную,

рамановскую спектроскопию, элементную флуоресценцию, УФ-спектроскопию, СЭМ, термический анализ, рентгенофазовый анализ и вольт-амперные характеристики полупроводниковых пигментов на основе анилина, оксида графена и фталоцианина. Были определены значения напряжения и тока, генерируемых tandemными солнечными элементами, изготовленными на основе фталоцианиновых пигментов.

ИК-анализ полученных фталоцианиновых пигментов

Полученные инфракрасные (ИК-Фур) спектры поглощения комплексов фталоцианина, содержащих 3d-металл в качестве центрального атома, были проанализированы в диапазоне длин волн $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. В органических полупроводниках и сложных макроциклических соединениях сдвиг и интенсивность частот поглощения напрямую зависят от молекулярной симметрии, степени делокализации электронов и природы центрального иона металла.

ИК-спектральное изображение полученного марганцевого фталоцианинового красителя показано на рисунке 7. Присутствие ароматической группы в бензольном кольце определяется линиями поглощения при 3188 и $1653\text{--}1558\text{ см}^{-1}$. Природа замещения групп --C=N определяется сильным поглощением в области ниже 947 см^{-1} . Бензольное кольцо обнаруживается в полосах поглощения при 1417 см^{-1} . Это явление проявляется в виде линий поглощения при 1635 см^{-1} , а иногда и при $2000\text{--}1604\text{ см}^{-1}$. Линии в области $1288\text{--}947\text{ см}^{-1}$ имеют второстепенное значение. Для групп =CH-- видны сильные линии внеплоскостных деформационных колебаний. Линии в области $781\text{--}711\text{ см}^{-1}$ представляют собой ортобензольное кольцо, а зоны поглощения в области от $1683\text{--}1635\text{ см}^{-1}$ до 818 см^{-1} представляют собой группы --C=N . Таким образом, был синтезирован фталоцианиновый краситель с высокими физико-химическими свойствами путем конденсации фталевого ангидрида с мочевиной и MnCl_2 , и изучены его свойства.

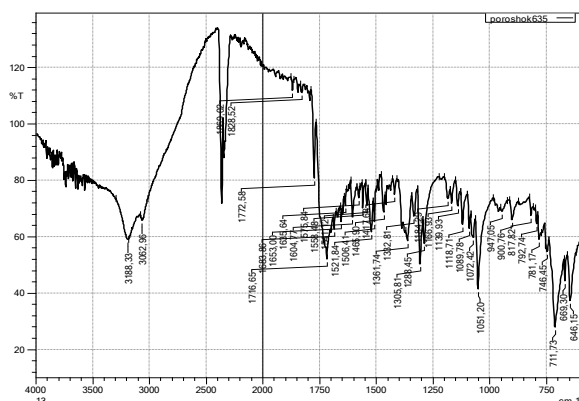


Рис.7. ИК-спектр пигмента фталоцианина марганца

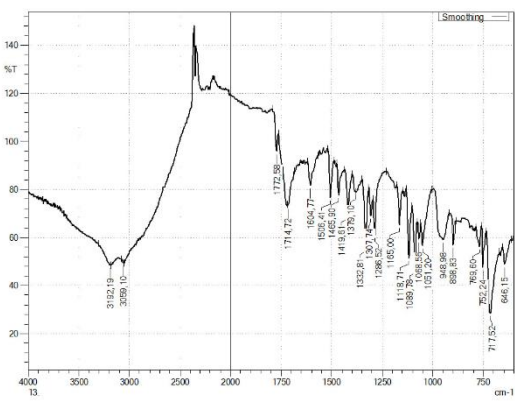


Рис.8. ИК-спектр пигмента фталоцианина кобальта

На рисунке 8 представлено инфракрасное спектроскопическое изображение синтезированного комплексного соединения фталоцианина кобальта. Инфракрасная спектроскопия использовалась для определения

функциональных групп и приблизительной структурной формулы полученных органических пигментов. Результаты были сопоставлены и проанализированы с данными, представленными в литературе. Показаны спектры поглощения комплекса фталоцианина кобальта в ближней инфракрасной области длин волн 400 см^{-1} и в дальней инфракрасной области длин волн 4000 см^{-1} . Значения частот поглощения в органических полупроводниках зависят от свойств используемого материала подложки. Линии поглощения в области $3059,10\text{ см}^{-1}$ были отнесены к связи C-H. Колебания, обусловленные связью C=C, наблюдались в области поглощения $1604,77\text{ см}^{-1}$. Линии поглощения ароматического кольца в области $1465,9\text{--}1419,61\text{ см}^{-1}$ были отнесены к изоиндолу. Было установлено, что пики поглощения при 1379 см^{-1} связаны с пиррольным кольцом, полосы поглощения бензольных колец наблюдались при $948,98\text{ см}^{-1}$, а полосы поглощения фталоцианиновых колец при $752,24\text{ см}^{-1}$.

СЭМ-анализ пигмента фталоцианина железа

Морфология и структура полупроводниковых пигментов на основе фталоцианина были проанализированы с помощью сканирующей электронной микроскопии. Благодаря порам и большой площади поверхности в слоях железосодержащих фталоцианиновых пигментов, композит, обработанный полупроводником TiO_2 , увеличивает поглощение красителей, чувствительных к видимому свету. В результате их высокие фотосенсибилизирующие свойства позволяют использовать их в tandemных солнечных элементах. Полупроводниковые фталоцианиновые пигменты характеризуются высокой чувствительностью и надежностью, способностью обнаруживать химические компоненты в относительно широком диапазоне концентраций и быстрым откликом.

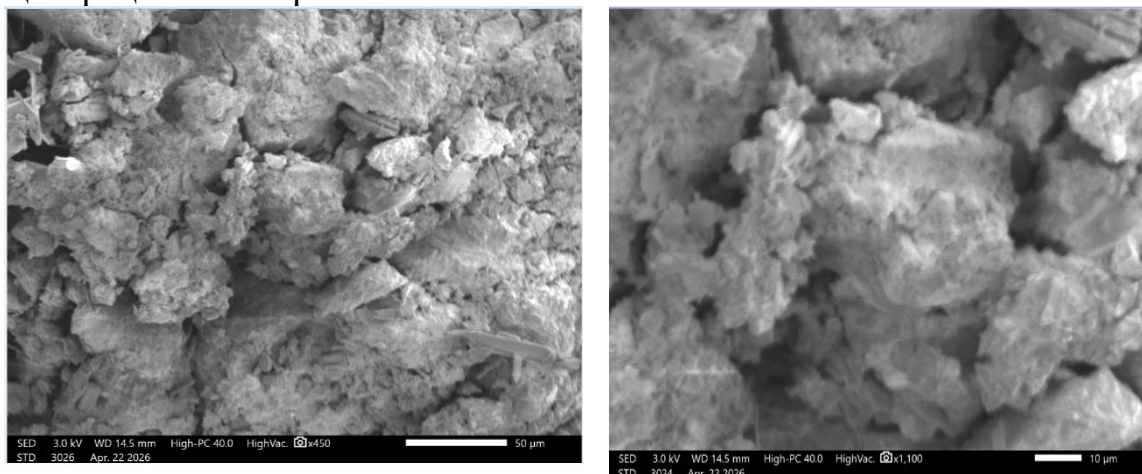


Рис.9. СЭМ-анализ полученного пигмента фталоцианина железа FePc

Благодаря этим свойствам металлофталоцианиновые пигменты используются в газовых сенсорах, основанных на изменении электрического сопротивления полупроводниковых материалов вследствие адсорбции газа на поверхности. Анализ фталоцианиновых полупроводниковых пигментов с

помощью СЭМ позволяет определить сенсорные свойства, к каким газам они чувствительны.

Рамановская спектроскопия пигмента фталоцианина кобальта

Рамановская спектроскопия пигмента фталоцианина, содержащего кобальт, была проведена на приборе производства японской компании HORIBA Scientific.

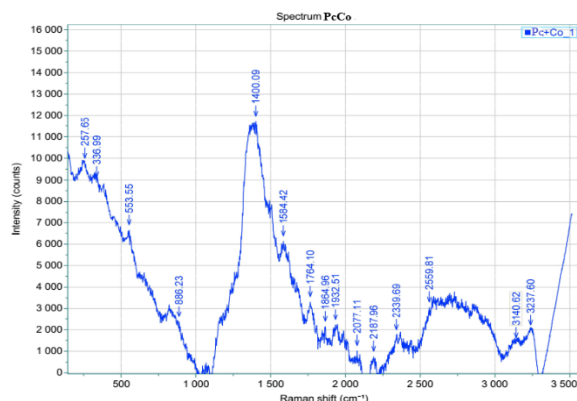


Рис.10. Рамановское спектроскопическое изображение пигмента фталоцианина кобальта

Analyte	Result	[3-sigma]	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
Co	50.122 %	[0.263]	Quan-PP	CoKa	1879.4048
Mo	49.346 %	[0.200]	Quan-PP	MoKa	2881.5416
Ca	0.328 %	[0.035]	Quan-PP	CaKa	0.4541
Nb	0.205 %	[0.024]	Quan-PP	NbKa	13.7446

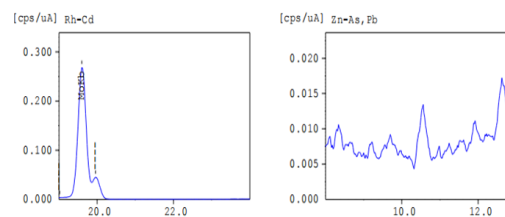


Рис.11. Элементный флуоресцентный анализ пигмента фталоцианина кобальта

На рис. 10 представлено изображение рамановской спектроскопии пигмента фталоцианина кобальта. На основании анализа рамановской спектроскопии, проведенного для изучения состава пигмента, были сделаны следующие выводы. Присутствие ароматической группы в бензольном кольце определяется линией поглощения при $3140,62 \text{ см}^{-1}$. Валентные колебательные спектры в области $3237,60 \text{ см}^{-1}$ соответствуют связям N-H, валентные колебательные спектры в области $2559,81 \text{ см}^{-1}$ соответствуют связям –O-H (образующим водородные связи), а валентные и интенсивные колебательные спектры связей –C=C– видны в области $1764,83 \text{ см}^{-1}$. Валентные и интенсивные колебательные спектры в области $1864,96 \text{ см}^{-1}$ соответствуют связям C=O, а область $1584,42 \text{ см}^{-1}$ соответствует связям N-H с дифференциальными колебаниями. Спектры в области $1400,09 \text{ см}^{-1}$ были связаны с C-N связями, а спектры дифференциальных связей в области $886,23 \text{ см}^{-1}$ были связаны с Me-N связями.

Элементарный флуоресцентный анализ пигмента фталоцианина кобальта показан на рисунке 11. Элементный состав вещества должен быть известен для контроля сырья, используемого в любом производстве, продукции и изделиях. С учетом этого, элементный анализ проводился путем растворения пигмента в органическом растворителе и взятия небольших концентраций его растворов. При приготовлении небольших концентраций его растворов и проведении элементного анализа изученные пики поглощения показали, что, помимо пигмента фталоцианина кобальта, в пределах экспериментальной погрешности присутствовали остатки молибдена и кальция из вещества, использованного в качестве катализатора в

неполностью очищенной реакции, и вещества, использованного в нейтрализации.

Квантово-химические свойства молекулы изоиндольного лиганда при синтезе металлокомплексных пигментов на основе фталоцианина

Для определения электронных свойств лиганда в процессе комплексообразования были выполнены расчеты методом DFT на основе его квантово-химических параметров. Расчеты проводились в программе Gaussian 09 с использованием функционала UB3LYP и базисного набора 6-311G. Энергии HOMO и LUMO молекулы лиганда составили $-5,76$ эВ и $-2,29$ эВ соответственно. Разница энергий между ними равна:

$$\Delta E = |E_{\text{LUMO}} - E_{\text{HOMO}}| = 3,47 \text{ eV}$$

Это значение указывает на умеренную реактивность молекулы, то есть на то, что это система, склонная к донорству электронов, но не чрезмерно реактивная. Пространственное распределение орбитали HOMO распределено в сопряженных ароматических системах молекулы и атомах азота, обогащенных π -электронами, расположенных рядом с ними. Это дает основания полагать, что координационные связи образуются именно через эти атомы.

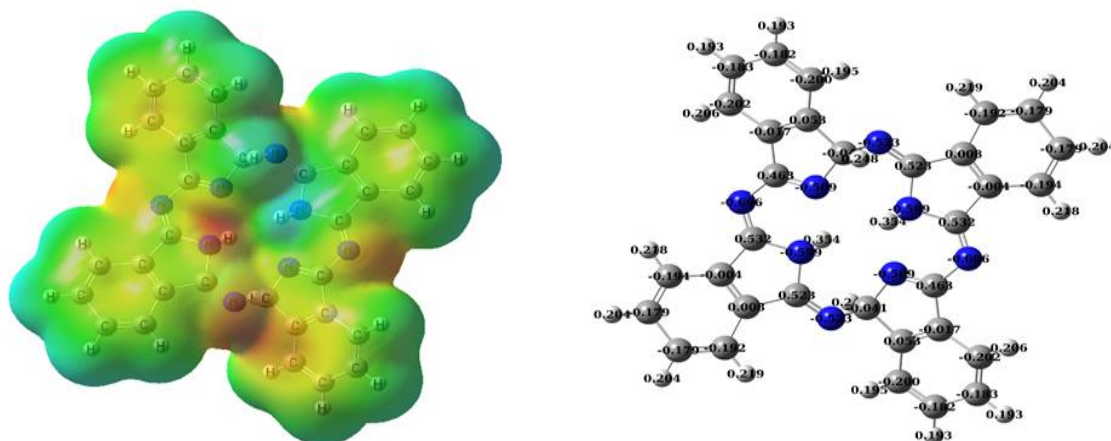


Рис. 12. Распределение электростатического потенциала и заряда по методу Муллекаина для изоиндольного лиганда

Орбиталь LUMO направлена к другим ароматическим сегментам молекулы, через которые также проявляется реакционная способность. Таким образом, компонент HOMO определяет основные донорные центры лиганда. Пространственно-структурный анализ карты ESP четко подтверждает наличие локальных донорных центров с высокой электронной плотностью в молекуле лиганда. Этот факт научно обосновывает способность лиганда координироваться с ионами металлов с высокой селективностью и направленностью (рис. 12). Локализация донорных центров на электростатической поверхности позволяет охарактеризовать этот лиганд как геометрически упорядоченную и электронно-активную координационную систему. Было отмечено, что зоны электронной плотности, наблюдаемые на карте ESP, в свою очередь, полностью согласуются с пространственным расположением орбиталей HOMO–LUMO

и распределением заряда по Малликену. Такое соответствие позволяет надежно интерпретировать электронную структуру молекулы лиганда в комплексообразовании, природу донорных центров и их пространственную активность на основе единой квантово-химической модели.

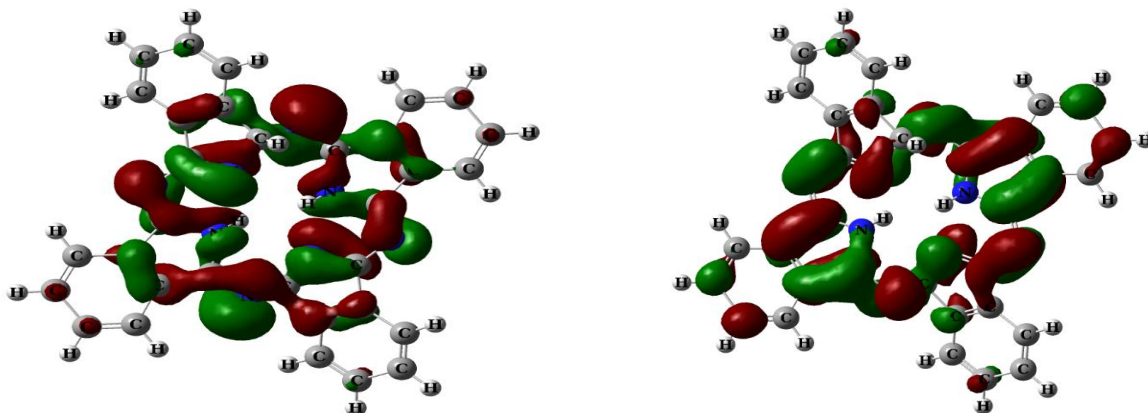


Рис.13. Энергетические уровни НОМО-LUMO лиганда изоиндола

Полупроводниковые свойства сложных соединений тесно связаны с их электронной структурой, энергетическими уровнями молекулярных орбиталей, пространственным распределением плотности заряда и характеристиками их электростатических потенциальных полей. Эти параметры являются основными критериями определения их эффективности в качестве полупроводников. В частности, разница энергий (ΔE) между НОМО (высшей занятой молекулярной орбиталью) и LUMO (низшей незанятой молекулярной орбиталью) играет ключевую роль в оценке электронного перехода и потенциала проводимости этих систем.

Уровни энергии НОМО-LUMO комплекса фталоцианина кобальта

В комплексе, содержащем ион кобальта (Co(II)), энергия НОМО составляет $-3,25$ эВ, уровень LUMO $-2,90$ эВ, а $\Delta E = 0,35$ эВ (рис. 14). Это означает, что для переноса электрона из НОМО в LUMO этому комплексу требуется гораздо меньше энергии.

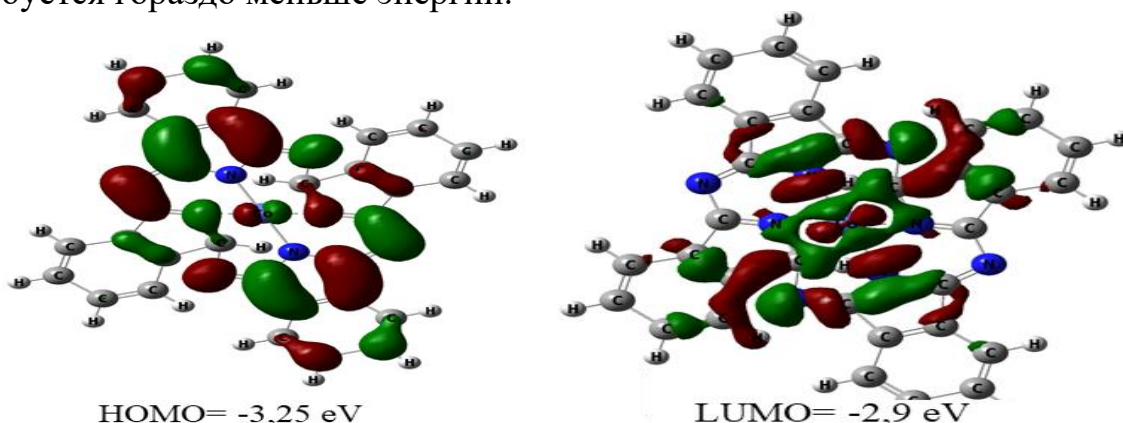


Рис. 14. Диаграмма энергетических уровней НОМО-LUMO пигмента фталоцианина кобальта

Небольшая разница энергий обеспечивает молекуле высокую химическую реактивность и легкость возбуждения. Это позволяет использовать ее в качестве перспективного полупроводникового материала в

современной электронике, фотоэлектрических датчиках и каталитических системах, демонстрируя высокую чувствительность и надежность.

Визуализация орбиталей, основанная на квантово-химических расчетах, показывает, что в обоих комплексах орбитали НОМО в основном расположены на ароматических кольцах и координированных атомах азота, образуя структуру, богатую π -электронными облаками. Это усиливает электронно-донорные свойства. Орбитали LUMO более сконцентрированы в областях, ограниченных атомами лигандов вокруг металлического центра, особенно атомами кислорода и азота, которые проявляют электронно-акцепторные свойства.

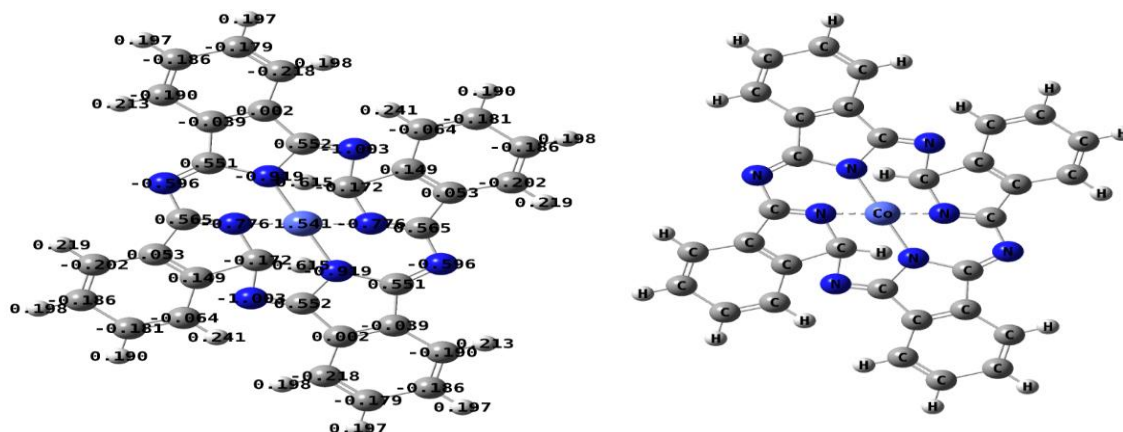


Рис.15. Распределение заряда и структурная формула пигмента фталоцианина кобальта

В комплексах на основе фталоцианина электроны в свободном состоянии находятся в НОМО (валентной полосе), но под воздействием солнечного света или света электроны перемещаются из валентной полосы в LUMO (зону проводимости). Это приводит к более значительному увеличению электронной плотности на некоторых азотных центрах, что повышает подвижность электронов и химическую активность молекулы. Именно поэтому комплекс кобальта с фталоцианином, благодаря малому зазору между НОМО и LUMO, обладает высокими полупроводниковыми свойствами и оптической чувствительностью.

Изменения электропроводности фталоцианиновых пигментов под воздействием температуры

Металлокомплексные материалы на основе фталоцианина настолько чувствительны, что окружающая среда, то есть условия, играют более важную роль в измерении их электропроводности, чем сам материал. Электропроводность металлокомплексных полупроводников на основе фталоцианина не является постоянной (физической константой), а её физико-химические свойства изменяются в зависимости от окружающей среды. Поскольку проводимость слоя может изменяться более или менее значительно в зависимости от длительности воздействия поля, длительности восстановления слоя в вакууме при высоких температурах и наличия посторонних молекул газа, невозможно говорить об удельной

электропроводности и физических величинах фталоцианинов. Тем не менее, мы представляем значения сопротивления слоев фталоцианиновых пигментов, исследованных нами, а также изменение удельной электропроводности фталоцианинов для свежих слоев (нагретых от 20 °С до 180 °С) в вакуумных условиях.

График на рисунке 16 иллюстрирует два процесса, характерных для органических фталоцианиновых полупроводниковых пигментов. Первый — это дегазация, которая приводит к снижению проводимости из-за высвобождения молекул газа, абсорбированных (адсорбированных) на поверхности или внутри фталоцианинового пигмента.

Таблица 1

Температурная зависимость удельной электропроводности кремнийфталоцианинового пигмента

№	Температура, °С	Время, часы	Относительная электропроводность, Ом ⁻¹ , см ⁻¹
1	20 °С	1	$9,6 \cdot 10^{-7}$
2	40 °С	2	$8,9 \cdot 10^{-7}$
3	60 °С	3	$10,4 \cdot 10^{-8}$
4	80 °С	4	$10,2 \cdot 10^{-8}$
5	100 °С	5	$10,1 \cdot 10^{-8}$
6	120 °С	6	$11,6 \cdot 10^{-9}$
7	140 °С	7	$10,5 \cdot 10^{-9}$
8	160 °С	8	$12,5 \cdot 10^{-10}$
9	180 °С	9	$11,8 \cdot 10^{-10}$

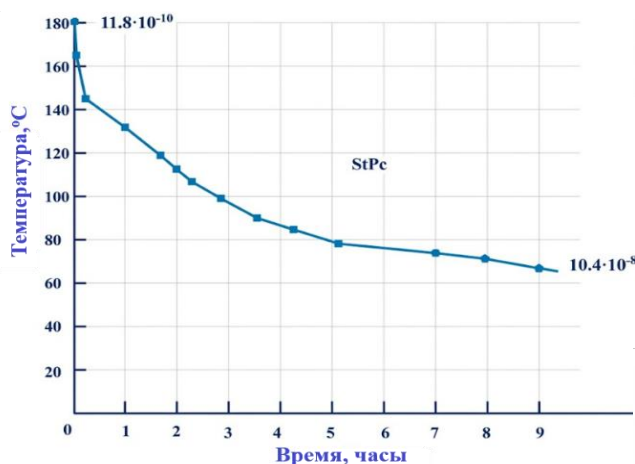


Рис.16. Графическое представление температурной зависимости удельной электропроводности кремнийфталоцианинового пигмента

На рис. 16 показана относительная электропроводность слоя кремниевого фталоцианина в вакууме при нагреве в диапазоне температур от 20 °С до 180 °С. Постоянный ток представляет собой процесс получения

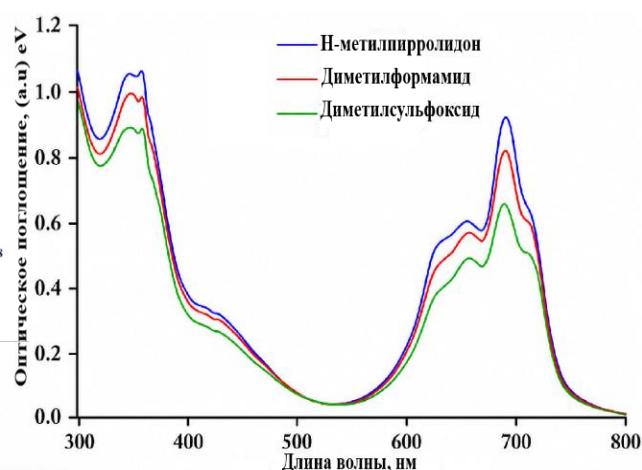


Рис.17. Спектр оптического поглощения пигмента фталоцианина кобальта

энергии из внешнего источника для ее передачи из низкоэнергетического состояния в высокоэнергетическое состояние путем нагрева матрицы, т. е. кремниевого фталоцианинового пигмента, и ее изменение в зависимости от приложенного поля.

Как видно из графика, даже после 6 часов в бескислородной среде электрическое сопротивление молекулы пигмента не стабилизировалось, то есть не достигло своего максимума. С повышением температуры и времени наблюдается снижение силы тока полупроводникового пигмента на основе фталоцианина.

Оптические абсорбционные свойства некоторых фталоцианиновых пигментов содержащих 3d-металлы

Спектры поглощения металлофталоцианинов имеют две основные и очень интенсивные полосы: первая линия Сорета (полоса Сорета), расположенная в диапазоне 300–400 нм, представляющая собой высокоэнергетический сильный пик поглощения и поглощающаяся в ультрафиолетовой (синей) области. Вторая Q-линия (Q-полоса), расположенная в диапазоне 650–800 нм, поглощающаяся в видимой красно-синей области и определяющая цвет пигмента при низкой энергии.

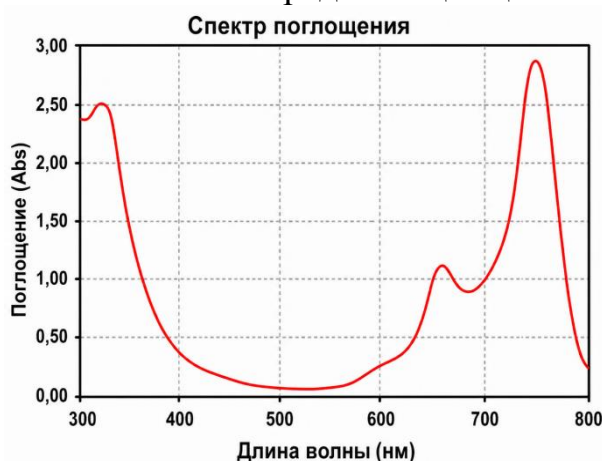


Рис.18. Спектр оптического поглощения пигмента фталоцианина лантана

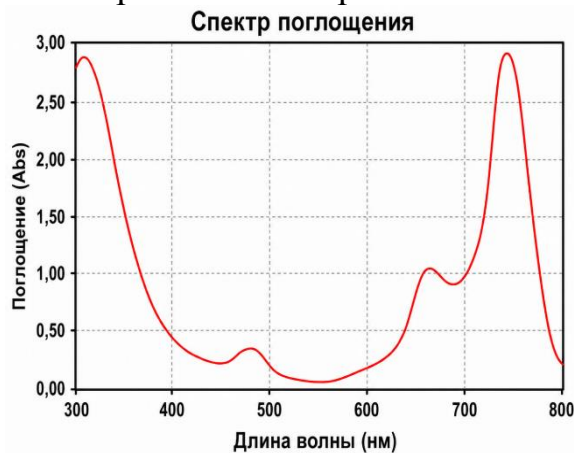


Рис.19. Спектр оптического поглощения пигмента фталоцианина хрома

Форма и расположение пиков в спектре поглощения могут варьироваться в зависимости от состава центральных и внешних заместителей молекулы фталоцианина, его растворимости в различных растворителях, а также специфических свойств его молекулярной структуры. Однако π -орбитали лиганда могут быть как π -донорами, так и π -акцепторами. Орбитали атомов азота пиррола определяют координацию центрального атома металла и вместе с ними образуют связанную электронную систему π -орбиталей. На этом графике показаны различия в сдвигах и интенсивностях спектральных пиков под воздействием различных растворителей. На рисунке 18 показан спектр оптического поглощения фталоцианинового пигмента лантана, а на рисунке 19-спектр оптического поглощения фталоцианинового пигмента хрома. Эти спектральные изображения показывают различия в

сдвигах и интенсивностях спектральных пиков под воздействием различных органических растворителей.

Значения напряжения и тока, генерируемые tandemными солнечными элементами на основе фталоцианиновых пигментов

На рис. 20 и 21 ниже показаны значения, полученные при измерении выходной мощности (мВ) и (мА) контакта, сформированного на основе красителя фталоцианина кобальта, с помощью цифрового мультиметра Keithley Model 4200-C в течение 15 дней. При тестировании светопоглощающих свойств молекул красителя на основе фталоцианина металла использовался 1%-ный раствор фталоцианина кобальта.

Таблица 2

Значения напряжения (мВ), тока (мА) и сопротивления (Ом), измеренные солнечным элементом на основе фталоцианина кобальта

№. Время, день	Напряжение (мВ)	Сила тока, (мА)	Относительное сопротивление, (ом) $\bar{U}$
1	755	40,9	10,18
2	755	40,8	10,16
3	752	40,7	11,65
4	751	40,6	11,78
5	750	40,4	12,45
6	749	40,2	12,61
7	747	39,7	13,25
8	747	39,6	13,25
9	745	39,5	14,2
10	739	39,4	14,6
11	735	39,3	14,8
12	732	39,3	15,6
13	730	39,2	15,7
14	730	39,2	15,7
15	730	39,2	15,7

Выходная мощность изучалась путем формирования контакта с использованием раствора полупроводникового фталоцианина кобальта в диметилформамиде с помощью специального прозрачного стеклянного диска, и были получены следующие результаты (табл. 2).

При исследовании светопоглощающих свойств молекул красителей на основе металлофталоцианина использовался 1%-ный раствор фталоцианина кобальта. Целью измерения выходной мощности, т.е. значений напряжения и тока, при контакте раствора полупроводника фталоцианина кобальта в диметилформамиде с использованием специальной прозрачной стеклянной пластины является изучение стабильности фотоэлектрических и вольт-амперных характеристик рекомендуемых нами полупроводниковых пигментов. В ходе наших измерений значения выходной мощности,

напряжения и тока изменялись в зависимости от суточных погодных условий и времени суток, при этом измерения проводились в разное время дня, а их средние значения представлены на рисунках 20-21.

Согласно приведенным выше результатам, максимальные значения напряжения и тока были зафиксированы в первый день 755 (мВ) и 40,9 (мА), а минимальные в последний день измерений 730 (мВ) и 39,2 (мА). Были успешно разработаны tandemные солнечные элементы с использованием наноматериала TiO_2 со структурой анатаза и пигмента фталоцианина кобальта в качестве полупроводникового чувствительного красителя, и достигнута максимальная эффективность (755 мВ и $40,9 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$). Чувствительность к определению значений напряжения (мВ) и тока ($\text{мА} \cdot \text{см}^{-2}$) измерялась в течение 15 дней при освещенности источником света 300 мВт/см^2 . В результате были показаны выходная мощность, то есть максимальные, средние и минимальные значения напряжения и тока в контакте, сформированном на основе полупроводниковых красящих пигментов различных марок.

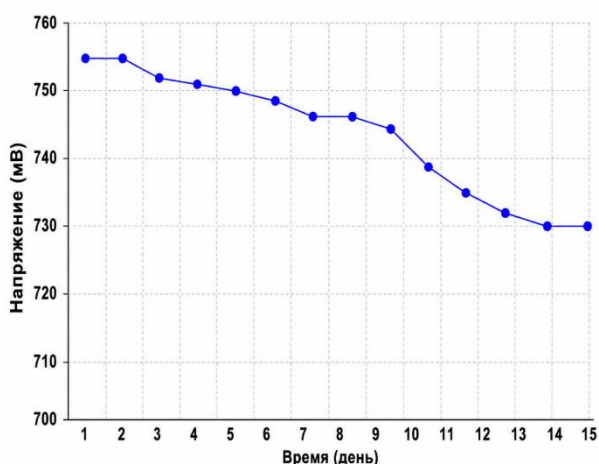


Рис. 20. Выходная мощность (мВ) контакта, созданного с использованием красителя фталоцианина кобальта

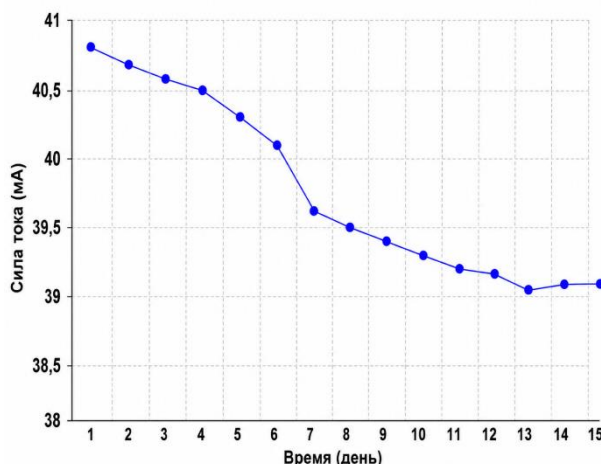


Рис. 21. Выходная мощность (мА) контакта, созданного с использованием красителя фталоцианина кобальта

Согласно приведенным выше результатам, максимальные значения напряжения и тока были зафиксированы в первый день и составили 755 (мВ) и 40,9 (мА) соответственно, а минимальные значения в последний день измерений и составили 730 (мВ) и 39,2 (мА). Были успешно разработаны tandemные солнечные элементы с использованием наноматериала TiO_2 со структурой анатаза и пигмента фталоцианина кобальта в качестве полупроводникового чувствительного красителя, при этом была достигнута максимальная эффективность (755 мВ и $40,9 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$). Чувствительность измерялась в течение 15 дней при освещенности 300 мВт/см^2 для определения значений напряжения (мВ) и тока ($\text{мА} \cdot \text{см}^{-2}$).

Четвертая глава диссертации, озаглавленная «Квантово-химические свойства органических полупроводниковых материалов, используемых в tandemных солнечных элементах» посвящена квантово-химическим

свойствам молекулы изоиндольного лиганда при синтезе металлокомплексных пигментов на основе фталоцианина, методам расчета геометрии и спиновых свойств пигментов, а также квантово-химическим свойствам молекулы металлокомплексного пигмента на основе фталоцианина, полученной на основе солей 3d-металлов.

В пятой главе диссертации, озаглавленной «Технология получения органических полупроводниковых материалов, используемых в tandemных солнечных элементах, и ее технико-экономические основы» рассматривается технологическая схема и нормы потребления сырья для получения полупроводниковых металлокомплексных пигментов на основе анилина, оксида графена и фталоцианина, а также процессы расчета экономической эффективности производства органических полупроводниковых пигментов.

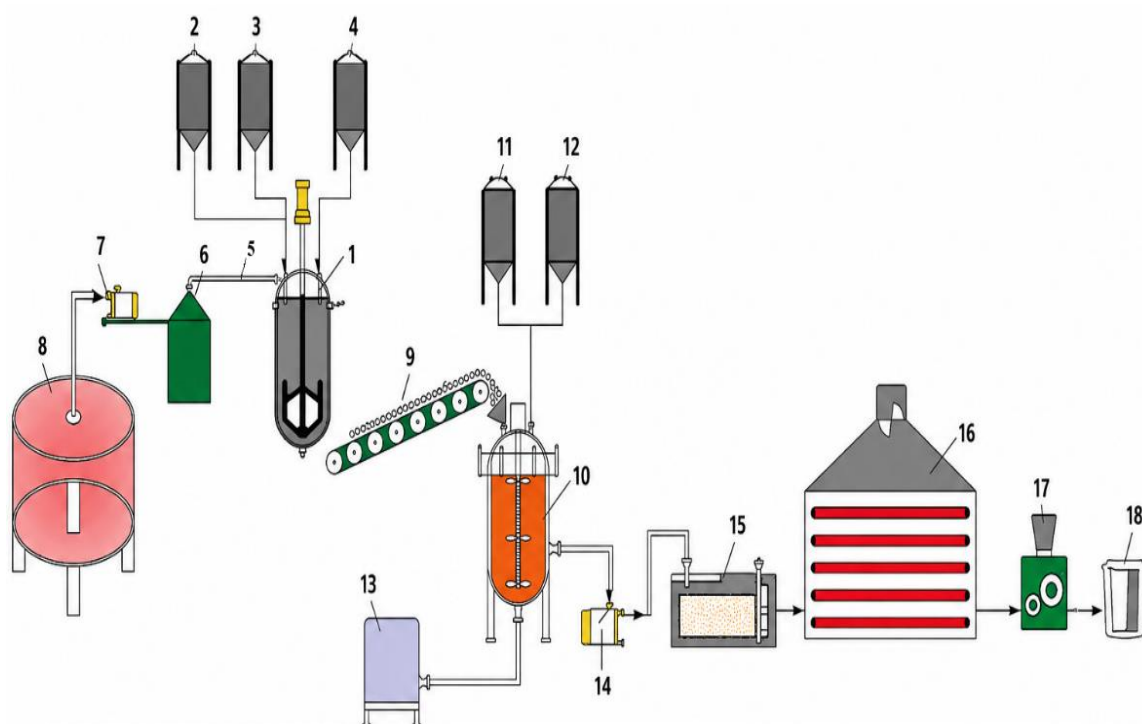


Рис.22. Принципиальная технологическая схема получения кремниевого фталоцианинового пигмента: 1 – Реактор синтеза; 2 – Емкость для фталевого ангидрида; 3 – Емкость для солей кремния; 4 – Емкость для мочевины; 5 – Газоотводная труба; 6 – Емкость для фталамида; 7 – Насос; 8 – Резервуар для воды; 9 – Лента; 10 – Реактор для обработки кислотой и щелочью; 11 – Емкость для серной кислоты; 12 – Емкость для карбоната натрия; 13 – Реактор для преобразования воды из остаточного раствора в техническую воду; 14 – Насос; 15 – Фильтр; 16 – Сушильная печь; 17 – Дробилка; 18 – Готовый продукт.

Разработана принципиальная технологическая схема получения полупроводниковых металлокомплексных пигментов на основе фталоцианина и нормы расхода сырья. На рис. 22 приведена технологическая схема производства кремнийфталоцианинового пигмента. Технологическая

схема кремнийфталоцианинового пигмента считается наиболее подходящим процессом для синтеза фталоцианиновых пигментов, исходя из оптимальных условий. В процессе синтеза температура поэтапно повышается от 200 °С до 300 °С, а перемешивание осуществляется непрерывно с помощью специальной герметичной мешалки.

Через 2 часа после завершения основной реакции процесс нагревания прекращают, а температуру в реакторе охлаждают до 60 °С. После этого к реакционной смеси добавляют концентрированную серную кислоту. В качестве основного сырья при синтезе фталоцианинов используются фталевый ангидрид, карбамид, соли 3d-металлов (Co^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cr^{3+} , Si^{4+}), а также катализатор. Благодаря наличию ароматического кольца, фталевый ангидрид служит основой для образования функциональных групп в макроцикле. Металлофталоцианины представляют собой пигменты с кристаллической структурой, обладающие очень низкой растворимостью в воде и не разрушающиеся в процессе промывки. Процесс промывки является одним из важнейших этапов обеспечения качества пигмента, в ходе которого с помощью горячей воды, органических спиртов или разбавленных кислот удаляются ионные остатки и растворимые органические примеси, а также отделяется отработанная техническая вода. Наряду с процессом синтеза были разработаны основные статьи затрат и показатели экономической эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований, проведенных в рамках диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук (DSc) по теме «Разработка технологии получения органических полупроводниковых пигментов нового поколения для tandemных солнечных элементов», представлены следующие выводы, имеющие теоретическое и практическое значение:

1. Синтезированы полупроводниковые фталоцианиновые пигменты различных марок (MePc, PANI, GO), содержащие в качестве центрального атома кремний, лантан и 3d-металлы, а также предложены оптимальные условия протекания процесса синтеза.

2. Химическая стабильность синтезированных полупроводниковых пигментов различных марок была исследована в различных агрессивных средах, таких как 96%-ные концентрированные растворы сильных минеральных кислот (H_2SO_4 , HCl), а также 10%-ные растворы сильного окислителя H_2O_2 и аммиака. При этом было показано, что высокая интенсивность данных пигментов обеспечивается 0,1%, 0,5% и 1% растворами в органических растворителях. Установлено, что химическая стабильность полученных полупроводниковых пигментов SiPc и MnPc значительно выше по сравнению с остальными пигментами.

3. На основе результатов дифференциально-термического анализа установлено, что термическая стабильность полученных пигментов

возрастает в ряду: PANI < LaPc < NiPc < CoPc < MnPc < FePc < SiPc < GO. Исследование методом энергодисперсионной спектроскопии в растровом электронном микроскопе показало микропористую структуру пигментов, полученных на основе солей 3d-металлов, анилина, фталевого ангидрида, карбамида, оксида графена и соответствующего катализатора.

4. В вакуумных условиях индивидуально для каждого образца определена удельная электрическая проводимость синтезированных полупроводниковых и фотосенсибилизирующих пигментов марок PANI, MePc, GO и LaPc в зависимости от температуры и времени в диапазоне от 20 °С до 180 °С. При этом полупроводниковый комплексный пигмент кремнийфталоцианина проявил специфические фотохимические свойства на уровне $11,8 \cdot 10^{-10}$.

5. Синтезированные фталоцианиновые пигменты на основе оксида графена, анилина и некоторых 3d-металлов, путем глубокой пропитки диоксида титана и оксида цинка, нанесенных на специальную прозрачную стеклянную подложку в качестве фотокатализатора, были внедрены в tandemные солнечные элементы в качестве фотосенсибилизаторов, чувствительных к видимому и инфракрасному излучению. Установлено и описано, что коэффициент полезного действия (КПД) таких элементов возрос на 20% по сравнению с использованием существующих природных пигментов.

6. На контакте, сформированном на основе полупроводниковых пигментов, полученных из фталевого ангидрида, карбамида, анилина, оксида графена и солей 3d-металлов, в течение 15 дней исследована выходная мощность, а именно зафиксированы максимальные, средние и минимальные значения напряжения и силы тока.

7. На основе вольтамперных характеристик, снятых на приборе Keithley (модель 4200-С), установлено, что значения силы тока и напряжения для полупроводниковых пигментов возрастают в ряду: LaPc < CrPc < MnPc < NiPc < FePc < CoPc. Кроме того, с использованием теории функционала плотности (DFT) синтезированные пигменты предложены в качестве полупроводниковых материалов p-типа, обладающих высокими характеристиками переноса заряда, оптической активности и химической реакционной способности.

8. Измерения удельного электрического сопротивления (Ом·см) на tandemных солнечных элементах, созданных на основе полупроводниковых пигментов, показали, что его значения возрастают в зависимости от типа прозрачной подложки (субстрата) в ряду: $\text{In}_2\text{O}_3 \cdot \text{SnO}_2$ < ситалл < обычное стекло < кремний (Si). В результате комплекса теоретических и экспериментальных исследований выявлены и обоснованы соответствующие закономерности.

9. При поддержании температуры реакции в диапазоне от 200 °С до 300 °С установлено влияние мольного соотношения исходных реагентов, общего времени процесса и времени изотермической выдержки, а также концентрации добавляемой кислоты на интенсивность окраски конечного продукта.

10. Внедрена возможность применения данных пигментов для улучшения качества лакокрасочных материалов на узбекско-таджикском совместном предприятии ООО «NASR SNACK». В результате разработана технология получения ярко окрашенных образцов эмали марки ПФ-115 на основе фталоцианиновых пигментов, содержащих соли 3d-металлов.

11. Разработаны методика получения суспензии диоксида титана и оксида цинка, используемой в качестве сэндвич-слоя фотоанода для tandemных солнечных элементов, а также рекомендованы составы электролитных растворов и методы их приготовления для солнечных элементов. Кроме того, разработана технология получения термостабильного полупроводникового пигмента кремнийфталоцианина с высоким коэффициентом поглощения (ассимиляции) и обоснована экономическая эффективность производства.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.31/2025.27.12.T.01.01
FOR AWARDING ACADEMIC DEGREES AT NAVOI STATE
UNIVERSITY OF MINING AND TECHNOLOGIES**

DENOV INSTITUTE OF ENTREPRENEURSHIP AND PEDAGOGY

SHUKUROV DILMUROD

**DEVELOPMENT OF A NEW GENERATION ORGANIC
SEMICONDUCTOR PIGMENT PRODUCTION TECHNOLOGY FOR
TANDEM SOLAR CELLS**

02.00.14 – Technology of organic substances and materials based on them

**DISSERTATION ABSTRACT
of the doctor of technical sciences (DSc)**

The topic of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences (DSc) is registered with the Higher Attestation Commission under the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under the number B2026.3.DSc/T1116.

The dissertation has been prepared at the Denov institute of entrepreneurship and pedagogy.

The abstract of dissertation in three (uzbek, russian, english (resume)) is available online nsumt.uz and on the website of «ZiyoNet» information-educational portal www.ziynet.uz.

Scientific adviser:

Turaev Khayit

Doctor of chemical sciences, Professor

Official opponents:

Vapoev Husnitdin

Doctor of Technical Sciences, Professor

Adilov Ravshan

Doctor of Technical Sciences, Professor

Fayziev Jahkongir

Doctor of Technical Sciences, Researcher

Leading organization:

Karshi State Technical University

The defense of the dissertation will take place on “3” october 2026 at “9:00” hours at a meeting of the scientific Council DSc.31/2025.27.12.T.01.01 at the Navoi State University Of Mining And Technologies at the address: 210100, Navoi region, Navoi city, Galaba Shah street, house 76v. Tel.: (+99879)-223-49-66, fax: (+99879) 223-53-62, e-mail: info@nsumt.uz.

The dissertation is registered in the Information Resource Center of Navoi State Mining and Technological University under No. 265, which can be found in the IRC (210100, Navoi region, Navoi city, Galaba ave, 76v. Tel.: (+99879)-223-49-66, fax: (+99879) 223-53-62, e-mail: info@nsumt.uz).

The dissertation abstract was sent out on “16” september 2026.
(protocol at the register No.27 dated “16” 09 2026).



B.Mukhiddinov

Chairman of the Academic Council
Awarding the Scientific Degrees,
Doctor of Chemical Sciences, Professor

S.Sharipov

Secretary of the Academic Council
Awarding the Scientific Degrees,
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

H.Vapoev

Chairman of the Scientific Seminar
at the Academic Council Awarding the Scientific Degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

INTRODUCTION (Abstract of a doctoral dissertation)

The aim of the research is to develop a technology for producing novel, highly efficient organic semiconductor dyes with a high photosensitization coefficient that are sensitive to sunlight for application in tandem solar cells.

The objects of the study were phthalocyanine pigments, graphene oxide, aniline, urea, 3d-metal salts, electrolyte coatings, and tandem solar-encapsulated glass sandwich panels.

The scientific novelty of the study is as follows:

Semiconductor pigment materials were synthesized based on aniline, phthalic anhydride, urea, graphene and graphene oxide, and some 3d metal salts;

Optimal conditions for obtaining semiconductor SiPc, FePc, CoPc, NiPc, LaPc, MnPc, PANI and GO pigments based on aniline, phthalic anhydride, urea, graphene and graphene oxide, and some 3d metal salts were selected;

The voltage (mV) and current (mA) generation capacities of the synthesized new CrPc, MnPc, NiPc, LaPc, FePc, CoPc pigments under light and sunlight for 15 days were calculated individually;

Based on the volt-ampere analysis performed on Keithley (Model 4200-C), it was found that the current and voltage values of semiconductor pigments increase in the order $\text{LaPc} < \text{CrPc} < \text{MnPc} < \text{NiPc} < \text{FePc} < \text{CoPc}$;

It was proven that the pigments synthesized based on density functional theory (DFT) are p-type semiconductor materials in terms of electron transport, optical activity and chemical reactivity properties;

It was estimated that the voltage and current values obtained by tandem solar cells based on the obtained semiconductor pigments were improved by 20% compared to the voltage and current values obtained by dye-sensitized solar cells;

It was proven that the resistivity ($\text{ohm}\cdot\text{cm}$) values measured by tandem solar cells based on semiconductor pigments increased in the order $\text{In}_2\text{O}_3\cdot\text{SnO}_2 < \text{Citall} < \text{ordinary glass substrate} < \text{Silicon (Si)}$;

Based on the quantum-chemical analyses conducted, it was determined that the semiconductor properties of metal phthalocyanine complexes are high in the order $\text{LaPc} < \text{CrPc} < \text{MnPc} < \text{NiPc} < \text{FePc} < \text{CoPc}$;

a technology for obtaining thermally stable, high-assimilation coefficient semiconductor organic pigment materials based on phthalocyanine, aniline and graphene oxide has been developed.

Implementation of research results. Based on scientific findings obtained during the development of technology for producing organic semiconducting pigment materials for tandem solar cells:

MePc, PANI, and GO pigments have been included in the "List of Promising Developments for Practical Application in 2027–2030" by the Shurtan Oil and Gas Production Department as effective corrosion inhibitors for aqueous systems (Reference No. OP25/ED-2601 from the Shurtan Oil and Gas Production Department, dated May 8, 2026). Consequently, anti-corrosion pigment coatings based on MePc, PANI, and GO enhance the protection of metal samples and reduce the metal corrosion rate by up to 97%;

the technology for producing organic semiconducting phthalocyanine pigments incorporating graphene oxide, aniline, and 3d-metals for use in paints has been included in the "List of Promising Developments for Implementation in 2027–2030" by the Shurtan Oil and Gas Production Department (Reference No. OP25/ED-2601 from the Shurtan Oil and Gas Production Department, dated May 8, 2026). This technology enables the production of effective pigments for protecting metal structures and water circulation systems at the Shurtan Oil and Gas Production Department;

organic pigments synthesized from phthalocyanine, aniline, and graphene oxide, and containing 3d-metal salts, have been implemented at the foreign enterprise Nasr Snack LLC as a coating for coloring polymer-based cellophane packaging. (Reference No. 73 dated May 5, 2026, from the Uzbek-Tajik and foreign enterprise Nasr Snack LLC). As a result, it was possible to obtain brightly colored samples of PF-115 grade enamel based on phthalocyanine pigments containing 3d-metal salts, aniline, and graphene oxide.

Structure and volume of the dissertation. The structure of the dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The size of the dissertation is 195 pages.

E'lon qilingan ishlar ro'yxati
Список опубликованных работ
List of publications
I bo'lim (I часть; part I)

1. Shukurov D.X., Turaev X.X., Karimov M.U. Noorganik va organik yarimo'tkazgich birikmalar sintezi va tadqiqoti // Monografiya. – Termiz: Xonjiza maskani O'K nashriyoti, – 2023. – B. 112. ISBN: 978-9910-9582-4-3.

2. Shukurov D.X. Grafen va grafen oksidi sintezi, xossalari va ularning qo'llanilish sohalari // Monografiya. – Termiz: Publishing Center nashriyoti, – 2025. – B. 100. ISBN: 978-9910-8422-1-4

3. Shukurov D.Kh., Turaev Kh.Kh., Muminova Sh.N., Rashidova G.E. Study of synthesized graphene oxide // Academic Research in Educational Sciences (ARES), – 2022. № 3/12. – P. 582-585. <https://ares.uz/uz/maqola-sahifasi/study-synthesized-graphene-oxide> (02.00.00.№20)

4. Shukurov D.X., Turaev X.X., Turdimurodov O.E., Rashidova G.E. Синтез и исследование оксида графена // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2022. 12 (105). – С.147-152. <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14789> (02.00.00.№1)

5. Shukurov D.Kh., Turaev Kh.Kh., Kholnazarov B.A., Kasimov Sh.A., Jumayeva Z.E, Tillayev X.R. Synthesis of zinc phthalocyanine pigment and its application to new generation solar cells // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – 2023. Vol.71, Issue 4. – P. 453–461. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I4P238>. **Scopus**. SJR-0.188.

6. Shukurov D.Kh., Turaev Kh.Kh., Kholnazarov B.A., Kasimov Sh.A., Muqimova G.J., Jumayeva Z.E., Alimnazarov B.Kh. Synthesis of Graphene Oxide and its Physicochemical Study // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – 2024. Vol. 72. Issue 4. – P. 137–144. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I4P114>. **Scopus**. SJR-0,164.

7. Shukurov D.X., Turayev X.X., Murtozayev Y.R., Eshmurod Sh.Y. Tarkibida kobalt saqlagan ftalosianin pigmentining sintezi va fizik kimyoviy analizi // “Central Asian Food Engineering and Technology” elektron ilmiy jurnali. – 2024. №2/10. – B. 106–110. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20363033> (02.00.00.№24)

8. Murtozayev Y.R., Shukurov D.X., Hasanov B.Sh., Eshmurodov Sh.Y. Kobalt ftalosianin bo'yoq pigmentining sintezi. // Academic Research in Educational Sciences (ARES) – 2024. № 3/12. – B. 181–184. <https://cyberleninka.ru/article/n/kobalt-ftalosianin-bo-yoq-pigmentining-sintezi/viewer> (02.00.00.№20)

9. Shukurov D.Kh., Turaev Kh.Kh., Ruziyev O.A., Rakhimov A.Kh., Ruziboyeva G.S. Synthesis and Investigation of Cobalt-Containing Phthalocyanine Pigment // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – 2025. Vol.73. Issue 10. – P.151–160. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V73I10P112>. **Scopus**. 2025. SJR-0,164.

10. Shukurov D.Kh., Turaev Kh.Kh., Ruziboyeva G.S., Eshmurodov Sh.Y. Synthesis of semiconductor pigment materials and their application in obtaining

new generation solar cells // O'zbekiston kimyo jurnali. – 2025. №3. – P.14-21.
<https://academy.uz/uz/journals/uzbekiston-kime-zurnali> (02.00.00. №7)

11. Shukurov D.X., Turaev X.X., Eshmurodov Sh.Y. Tarkibida kobalt saqlagan ftalosianin pigmentining termik va raman spektroskopik tahlili. // O'zbekiston milliy universiteti xabarlar. – 2025. №3/2. – B. 456–460.
<https://journals.nuu.uz/index.php/actanuuz/article/view/11425> (OAK rayosatining 2014-yil 26-martdagi № 02-0071-raqam ostida ro'yxatdan o'tgan) (02.00.00.№13)

12. Shukurov D.X., Turaev X.X. Temir ftalosiyanin pigmentining sintezi va uning differensial termogravimetrik tahlili // O'zbekiston milliy universiteti xabarlar. – 2026. №1. – B. 479-482.

<https://journals.nuu.uz/index.php/actanuuz/article/view/9354> (OAK rayosatining 2014-yil 26-martdagi № 02-0071-raqam ostida ro'yxatdan o'tgan) (02.00.00.№13)

13. D.X.Shukurov., Turaev X.X., I.A.Umbarov. Tarkibida mis saqlagan ftalosianin kompleksi va izoindol ligand molekulasi kvant-kimyoviy xossalari tahlili // QarDU xabarlar. – 2025. № 4/2. – B. 73-79.

[https://qarshidu.uz/source/new%20kitob/QarDu%20aniq%20fanlar%204\(2\)%202025%20Songi.pdf](https://qarshidu.uz/source/new%20kitob/QarDu%20aniq%20fanlar%204(2)%202025%20Songi.pdf) (OAK rayosatining 2022 yil 31-martdagi 314/9.2-son qarori). (02.00.00.№32)

14. Shukurov D.X., Turaev X.X. Tarkibida kobalt saqlagan ftalosianin kompleksi va izoindol ligand molekulasi kvant-kimyoviy xossalari tahlili // Qo'qon DPI. Ilmiy xabarlar. – 2025. №8. – B. 355–366. <https://journals-kokandsu.uz/index.php/kspi/issue/view/31/32> (02.00.00.№29)

15. Shukurov D.X., Boysariyev Sh.T., Eshmurodov Sh.Y. Mis saqlagan ftalosianin pigment sintezi va uning kvant kimyoviy xossalari tahlili // Qo'qon DPI. Ilmiy xabarlar. – 2025. № 11. – B. 105-112.

https://www.researchgate.net/publication/400119712_Qo'qon_DPI_Ilmiy_xabarlar_2025-yil_11-son_A_seriya (02.00.00.№29).

16. Shukurov D.X., Turaev X.X. Grafen oksidining skanerlovchi elektron mikroskopiyasi va termik tahlil usullari yordamida strukturaviy va termal xossalari o'rganish // “Central Asian Food Engineering and Technology” elektron ilmiy jurnali. – 2025. №3/4. – B. 115-121.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.20363033> (02.00.00.№24)

17. Shukurov D.X., Turaev X.X., Karimov M.U. Kremniy ftalosiyanin pigmentining kvant-kimyoviy va yarimo'tkazuvchanlik xususiyatlari tahlili. // Development of science. – 2025. № 11/6. – B. 42-49.

<https://devos.uz/article.php?id=2645> (OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qarori). (02.00.00.№38)

18. Shukurov D.X., Turaev X.X., Karimov M.U. Marganes ftalosiyanin pigmentining geometriyasi va spin xususiyatlarini hisoblash natijalari // Development of science. – 2025. № 12/2. – B. 23-30.

<https://devos.uz/article.php?id=2812> (OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qarori). (02.00.00.№38)

19. Shukurov D.X., Turaev X.X., Eshmurodov Sh.Y., Saidova Z.A. Kremniy ftalosiyanin pigmentining kvant-kimyoviy tahlili // FarDU ilmiy xabarlar jurnali. –

2026. № 32/2. – B. 57-61. <https://journal.fdu.uz/main/article/6929> (OAK rayosatining 2020-yil 2-sentabrdagi 1109-raqam ostida ro'yxatdan o'tgan). (02.00.00.№17)

20. Shukurov D.X., Adinayev X.A., Eshmurodov Sh.Y., Fayziyeva Sh., Mamatova S.A. Temir ftalosianin pigmentining sintezi va uning differensial termogravimetrik tahlili // FarDU ilmiy xabarlar jurnali. – 2026. № 3. – B. 15-22. <https://journal.fdu.uz/main/article/7104> (OAK rayosatining 2020-yil 2-sentabrdagi 1109-raqam ostida ro'yxatdan o'tgan). (02.00.00.№17)

21. Shukurov D.X., Turaev X.X. Tarkibida lantan saqlagan ftalosianin bo'yoq moddasining sintezi va xossalari. "Central Asian Food Engineering and Technology" elektron ilmiy jurnali. – 2026. №4/5. – B. 25-28. <https://zenodo.org/records/20363033> (02.00.00.№24)

22. Shukurov D.X., Turaev X.X., Boysariyev Sh.T., Toshtemirov I.E. Kremniy ftalosianin pigmentining sintezi va uning rentgen fazaviy tahlili // QarDU xabarlar. – 2026. № 2/1. – B. 117–123. [https://qarshidu.uz/source/jurnal/%202026/2\(2\).pdf](https://qarshidu.uz/source/jurnal/%202026/2(2).pdf) (02.00.00.№32)

II bo'lim (II часть; part II)

23. Shukurov D.Kh., Turaev Kh. Kh., Kasimov Sh.A., Muqimova G.J., Jumayeva Z.E., Alimnazarov B.Kh., Ismatov S.Sh. The Current State of Research in the Field of Obtaining Semiconductor Prospects for Development // E3S Web of Conferences 529, 01044 (2024). ICSMEE'24. – 2024. – P.1–17. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452901044>. Scopus. SJR-0,164.

24. Shukurov D.X., Sayitmurodova F.I., Eshimbetova D.O., Donayeva Y.B. Sintez qilingan grafen oksidining rentgen fazaviy analiz tahlilini o'rganish // "Nazariy va eksperimental kimyo hamda kimyoviy texnologiyaning zamonaviy muammolari" Xalqaro ilmiy-amaliy anjumani materiallari. – 2023. – B. 554–557. <https://host1.qarshidu.uz/oz/news/224-nazariy-va-eksperimental-kimyo-hamda-kimyoviy-texnologiyaning-zamonaviy-muammolari>

25. Shukurov D.X., Ruziboyeva G.S., Yusupov D.A., Mahammadiyev H.O., Murtazayev Y.R. Kremniy ftalosianin sintezi va uning fizik- kimyoviy tadqiqoti // "O'quvchi faoliyatini rivojlantirish kontekstida innovatsion ta'lim texnologiyalaridan fanlararo sinxron-asinxron foydalanish" xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya materiallari. – 2023. 29-30-sentyabr. – B. 306-310. <https://dtpi.uz/konferensiya-toplamlari-2025/>

26. Shukurov D.X., Jalmatova G.S. Фотокаталитические свойства TiO_2 используемого в производстве чувствительных к красителям солнечных элементов. // Journal of universal science research. ISSN.2181-4570. – 2023. – С. 225-231. <https://universalpublishings.com/index.php/jusr/article/view/1593/3044>

27. Shukurov D.X., Eshimbetova D.O., Jalmatova G.S. Mis ftalosianin pigmenti asosidagi yarimo'tkazgich bo'yoqlarning tadqiqoti // "Aniq va tabiiy fanlarning rivojlanish istiqbollari" Respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2024. 7-may. – B. 5–9. <https://ilmiyanjumanlar.uz/archive/article/id/5071>

28. Shukurov D.X., Xushboqova G.M., Donayeva S.Y., Eshmurodov Sh.Y. Rux ftalosianin bo‘yoq moddaning fizik kimyoviy xossalari tadqiqoti // “Aniq va tabiiy fanlarning rivojlanish istiqbollari” Respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2024. 7-may. – B. 257-259.

<https://ilmiyanjumanlar.uz/uploads/conferences/0029/2.39.pdf>

29. Shukurov D.X., Sadayev S.U., Normurodova X.D., Ochilova D.X., Murtazayev Y.R. Fotoanod qoplama sifatida ishlatiladigan titan dioksidi va rux oksidi suspenziyasini tayyorlash. // “Aniq va tabiiy fanlarning rivojlanish istiqbollari” Respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2024. 7-may. – B. 93–95. <https://ilmiyanjumanlar.uz/uploads/conferences/0029/1.26.pdf>

30. Shukurov D.Kh., Turaev Kh.Kh., Kasimov Sh.A. Photoelectric study of silicon-containing phthalocyanine pigment. // The Eighth International Symposium on Materials for Energy Storage and Conversion. – Baku, 07-10 October. – 2024. – P. 101-102. <https://mesc-is.org/wp-content/uploads/2025/02/mesc-is-2024-proceedingsf.pdf>

31. Shukurov D.X., Turaev X.X., Boysariyev Sh.T. Chemical composition of conductive transparent glass substrates for tandem solar cells. // “Fan va ishlab chiqarish sohalarida zamonaviy fizik-kimyoviy tadqiqot usullari integratsiyasi” mavzusida (xalqaro olimlar ishtirokida) ilmiy-amaliy anjumani materiallari. – 2025. 17-18-oktabr. – B. 210-212. <https://library.ziyonet.uz/ru/book/147349>

32. Shukurov D.X., Eshmurodov Sh.Y. Mis ftalosianin kompleksining homo-lumo energiya darajalari aniqlash. // “Fan va ishlab chiqarish sohalarida zamonaviy fizik-kimyoviy tadqiqot usullari integratsiyasi” mavzusida (xalqaro olimlar ishtirokida) ilmiy-amaliy anjumani materiallari. – 2025. 17-18-oktyabr. – B. 527-528. <https://library.ziyonet.uz/ru/book/147349>

33. Shukurov D.X., Eshmurodov Sh.Y., Saidova Z.A. Mis ftalosianin kompleksidagi izoindol ligandining kvant kimyoviy tahlili. XXI asrda ilm-fan taraqqiyotining asosiy tendensiyalari va xususiyatlari xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2025. 10-oktabr. – B. 148-151. <https://www.in-academy.uz/index.php/EJAR/article/view/6642>

34. Shukurov D.X., Eshmurodov Sh.Y., Saidova Z.A. Mis ftalosianin kompleksidagi izoindol ligandining HOMO-LUMO tahlili. // XXI asrda ilm-fan taraqqiyotining asosiy tendensiyalari va xususiyatlari xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2025. 10-oktabr. – B. 112-115. <https://zenodo.org/records/17279276>

35. Shukurov D.X., Boysariyev Sh.T. Izoindol ligand molekulasiining kvant-kimyoviy xossalari. // “Kimyo va biologiya fanlarning dolzarb masalalari va zamonaviy tendensiyalari mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – 2025. 24-25-oktyabr. – B. 378-380. <https://drive.google.com/file/d/1HWvYAcPRNCYyQdUhBcak4MjLGZp4NYND/view>

36. Shukurov D.X., Fayzullayev I.Q., Ashurov A.B. Sintez qilingan grafen oksidining skanerlovchi elektron mikroskopik analizi. // “Zamonaviy kimyoning dolzarb muammolari, echimlari va rivojlantirish istiqbollari” xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2025. 14-may. – B. 30-32. <https://dtpi.uz/wp->

[content/uploads/2026/07/Zamonaviy_kimyoning_dolzarb_muammolari_Toplam_Oxir_1449.pdf](#)

37. Shukurov D.X., Elboyev R.F., Choriyev A. Grafen oksidining zamonaviy va istiqbolli sohalarda ishlatilishi. // “Zamonaviy kimyoning dolzarb muammolari, yechimlari va rivojlantirish istiqbollari” xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2025-yil 14-may. – B. 64-65. https://dtpi.uz/wp-content/uploads/2026/07/Zamonaviy_kimyoning_dolzarb_muammolari_Toplam_Oxir_1449.pdf

38. Shukurov D.X., Po‘latova Sh.X, Eshmurodov Sh.Yu. Kremniy ftalosianin pigmentining sintezi. // “Aniq va tabiiy fanlarning rivojlanish istiqbollari” respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2024. 7-may. – B. 34-36. <https://zenodo.org/records/11114277>

39. Shukurov D.X., Eshmurodov Sh.Y., Toshtemirov I.A. Organik yarimo‘tkazgich birikmalar ishlab chiqarish texnologiyasi. // “Zamonaviy kimyoning dolzarb muammolari, yechimlari va rivojlantirish istiqbollari” xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2025. 14-may. – B. 154-156. https://dtpi.uz/wp-content/uploads/2026/07/Zamonaviy_kimyoning_dolzarb_muammolari_Toplam_Oxir_1449.pdf

40. Shukurov D.X., Turaev X.X., Boysariyev Sh.T. Grafenli Cu asosidagi perovskit quyosh hujayrasini samaradorligin oshirish. // “Zamonaviy kimyoning dolzarb muammolari, yechimlari va rivojlantirish istiqbollari” xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallari. – 2025. 14-may. –B. 166-168. https://dtpi.uz/wp-content/uploads/2026/07/Zamonaviy_kimyoning_dolzarb_muammolari_Toplam_Oxir_1449.pdf

41. Shukurov Dilmurod., Turaev Khayit., Kasimov Sherzod., Tojiyev Panji., Ruzimuradov Olim. Photochemical properties of cobalt phthalocyanine pigment for the of solar cells. // The Ninth International Symposium on Materials for Energy Storage and Conversion.– 2026. 01-04 September. – Kocaeli (Türkiye), – P. 130–131. <https://mesc-is.org/wp-content/uploads/2026/02/proceedings-mesc-is25.pdf>

42. Shukurov D.Kh., Turaev Kh.Kh., Kasimov Sh.A., Tojiyev P.J., Ruzimuradov O.N. X-ray phase analysis of synthesized graphene oxide. // Золь-гель синтез и исследование неорганических соединений, гибридных функциональных материалов и дисперсных систем «золь-гель 2025» VIII Международная Евро-Азиатская конференция. Гомель, – 2025. 22–26 сентября года. – М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. – P. 90-91. <https://e.lanbook.com/book/516003>

43. Shukurov D.X., Eshmurodov Sh.Y., Saidova Z.A. Tarkibida lantan saqlagan ftalosianin bo‘yoq moddasining sintezi. // “Aniq va tabiiy fanlar rivoji: fundamental tadqiqotlar va pedagogik innovatsiyalar” xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – 2026. 25-aprel. – B. 215-216. https://dtpi.uz/wp-content/uploads/2026/07/Toplam_15.06.pdf

44. Shukurov D.X., Elboyev R.F., Mamatova S.A., Fayziyeva Sh.A. Grafen oksidining antikarrozion qoplama materiallar olishdagi ahamiyati. // “Aniq va tabiiy fanlar rivoji: fundamental tadqiqotlar va pedagogik innovatsiyalar” xalqaro

ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – 2026. 25-aprel. – B. 217-2019.
https://dtpi.uz/wp-content/uploads/2026/07/Toplam_15.06.pdf

45. Shukurov D.X., Eshmurodov Sh.Y., Toshtemirov I.A. Nikel ftalosianin bo‘yoq pigmentining termik barqarorligini tahlil qilish. // “Zamonaviy tibbiyotda xalq tabobati va fundamental fanlar integratsiyasi: innovatsion yechimlar platformasi” mavzusidagi xalqaro ilmiy anjuman materiallari. – 2026. – 2-may. – B. 556-558.

<https://ubsutest.ubsu.uz/storage/conferences/files/01KWGHZWW5RPMN5YV8EEAS4H9Q.pdf>

46. Shukurov D.X., Eshmurodov Sh.Y., Elboyev R.F. p-aminoazobenzol bo‘yog‘ining sintezi va uning fizik-kimyoviy xossalarini tadqiq etish. // “Zamonaviy tibbiyotda xalq tabobati va fundamental fanlar integratsiyasi: innovatsion yechimlar platformasi” mavzusidagi xalqaro ilmiy anjuman materiallari. – 2026. – 2-may. – B. 558-560.

<https://ubsutest.ubsu.uz/storage/conferences/files/01KWGHZWW5RPMN5YV8EEAS4H9Q.pdf>

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

Bosishga ruxsat etildi 15.09.2026 yil.
Ofset bosma qog‘ozi. Qog‘oz bichimi 60Ch84 1/16.
“Times New Roman” garniturası. Ofset bosma usuli.
Shartli b.t. 4,1. Adadi 80 nusxa. Buyurtma № 259.
