

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/2025.27.12.FM/T.15.05
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**НАМАНГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ШАРИПБАЕВ СОБИТХОН СОБИР УГЛИ

**ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ TiO_2 ОТ ИХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО – МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Наманган – 2026

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

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

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on physical and mathematical sciences**

Шарипбаев Собитхон Собир угли

Зависимость эффективности солнечных элементов на основе TiO_2 от
их морфологических характеристик..... 3

Sharipbayev Sobitxon Sobir o'g'li

TiO_2 asosli quyosh elementlari samaradorligining ularning morfologik
xususiyatlariga bog'liqligi..... 20

Sharipbaev Sobitkhon Sobir ugli

Dependence of the efficiency of TiO_2 -based solar cells on their morpholog-
ical characteristics..... 35

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 38

НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/2025.27.12.FM/T.15.05
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

НАМАНГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ШАРИПБАЕВ СОБИТХОН СОБИР УГЛИ

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ TiO_2 ОТ ИХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО – МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ

Наманган – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии Наук Республики Узбекистан за № B2026.2.PhD/FM1547.

Диссертация выполнена в Наманганском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.namdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель:

Маматкаримов Одилжон Охундадаевич

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Расулов Рустам Явкачевич

доктор физико-математических наук, профессор

Юлчиев Шахриёр Хусанович

доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

Ташкентский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «5» сентябрь 2026 года в 12:00 часов на заседании Научного совета PhD.03/2025.27.12.FM/T.15.05 при Наманганском государственном техническом университете по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская-7, Административное здание Наманганского государственного технического университета, 3-здание, 1-этаж, малый зал совещаний, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: namdtu_info@edu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре Наманганского государственного технического университета (зарегистрирована за №____) по адресу: 160103, г. Наманган, ул. И.Каримов -12, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75.

Автореферат диссертации разослан «____» _____ 2026 г.
(протокол рассылки № ____ от «____» _____ 2026 г.)

М.Г. Дадамирзаев

Председатель Научного совета
по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

А.А. Абдукаримов

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, PhD., доцент

Н.Ю. Шарибаев

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире особое внимание уделяется развитию солнечной энергетики, эффективному использованию возобновляемых источников энергии и созданию высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей. В этом направлении сенситизированные красителем солнечные элементы (DSSC) признаны одной из наиболее перспективных фотоэлектрических систем благодаря простоте технологии изготовления, низкой себестоимости, экологической безопасности и возможности формирования на различных подложках. В качестве электрон-транспортного слоя в таких солнечных элементах широко применяется диоксид титана (TiO_2), представляющий собой полупроводниковый материал с широкой запрещённой зоной, высокой химической и термической стабильностью. Размер частиц, пористость, толщина слоя, удельная площадь поверхности и микроструктура фотоанода TiO_2 непосредственно влияют на адсорбцию красителя, транспорт электронов, процессы рекомбинации и эффективность поглощения света. В этой связи управление морфологическими характеристиками фотоанода TiO_2 , установление их взаимосвязи с фотоэлектрическими параметрами и исследование физических закономерностей повышения эффективности солнечных элементов имеют важное научное и практическое значение.

В ведущих мировых научно-исследовательских центрах проводятся исследования, направленные на повышение эффективности солнечных элементов нового поколения путём оптимизации структуры и свойств полупроводниковых материалов. При этом совершенствование технологий синтеза фотоанодов TiO_2 для сенситизированных красителем солнечных элементов (DSSC), управление их морфологической структурой, создание многослойных и иерархических архитектур фотоанодов, а также оптимизация процессов транспорта электронов и рекомбинации являются приоритетными направлениями научных исследований. Особое внимание также уделяется разработке физических моделей, позволяющих прогнозировать фотоэлектрические характеристики. Однако комплексное влияние размера частиц, пористости, толщины слоя, степени агрегации и удельной площади поверхности фотоанодов TiO_2 на фотоэлектрические параметры и эффективность солнечных элементов до настоящего времени изучено недостаточно. В связи с этим оптимизация морфологических характеристик фотоанодов TiO_2 и установление закономерностей зависимости их электрофизических и фотоэлектрических свойств от процессов транспорта электронов, рекомбинации и эффективности поглощения света являются одной из актуальных научных задач.

В Республике Узбекистан широко проводятся научные исследования, направленные на развитие науки и энергетической отрасли, в том числе физики полупроводниковых приборов и электронной техники. На основе фундаментальных исследований, имеющих важное значение для развития науки и их практического применения, в Стратегии развития Нового Узбекистана на

2022–2026 годы определены важные задачи, в частности: «обеспечение бесперебойного снабжения экономики электрической энергией, активное внедрение технологий „зелёной экономики“ во все отрасли и повышение энергоэффективности экономики на 20 процентов». Для реализации указанных задач важное значение имеют разработка новых материалов и структур для электроники и электротехники, устойчивых к внешним воздействиям, а также создание эффективных методов контроля их параметров.

Настоящее диссертационное исследование в определённой степени способствует реализации задач, определённых Указом Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № ПФ-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы», Указом Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года № ПФ-158 «О Стратегии „Узбекистан – 2030“», Постановлением Президента Республики Узбекистан от 30 мая 2019 года № ПП-4348 «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала отрасли», Постановлением Президента Республики Узбекистан от 10 июля 2020 года № ПП-4779 «О дополнительных мерах по повышению энергоэффективности экономики и снижению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетических ресурсов посредством привлечения имеющихся резервов», Постановлением Президента Республики Узбекистан от 19 марта 2021 года № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования в области физики и развитию научных исследований», а также других нормативно-правовых актов, относящихся к данной сфере деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Диссертационная работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки и технологий Республики Узбекистан F2. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Степень изученности проблемы. Впервые в мире технология изготовления сенсibilизированных красителем солнечных элементов (DSSC) была предложена Брайаном О'Риганом и Михаэлем Гретцелем и с тех пор привлекает широкое внимание научного сообщества. Благодаря низкой стоимости изготовления и достаточно высокой эффективности (в настоящее время во многих научно-исследовательских центрах мира достигнута эффективность около 13 %) данная технология является одним из основных направлений современных исследований и разработок. Исходя из уровня эффективности солнечных элементов данного типа, для успешной коммерциализации технологии производства фотоэлементов и фотосенсоров необходимо либо снизить стоимость изготовления, либо повысить их эффективность. Для достижения этой цели

² Указ Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года № УП-158 О Стратегии «Узбекистан — 2030». <https://lex.uz/uz/docs/-6600413>

³ <https://lex.uz/docs/-4360770>

⁴ <https://lex.uz/docs/-4890081>

⁵ <https://lex.uz/docs/-5338558>

требуется рациональное проектирование и оптимизация материалов и конструкций DSSC.

Основными компонентами DSSC являются прозрачная токопроводящая оксидная подложка FTO, на которой расположен катод с платиновым покрытием, светопоглощающий слой хромофорного сенсibilизатора, широкозонный полупроводник, а также жидкий или твёрдый редокс-электролит (дырочный проводник). В целом прозрачность слоя FTO составляет 85–95 %. Наиболее широко используемым материалом FTO является оксид, легированный фтором. Фотоанод солнечного элемента состоит из широкозонного полупроводника и слоя чувствительного хромофора либо другого красителя.

Во всём мире ведутся исследования по созданию высокочувствительных фотосенсоров на основе тонкоплёночных фотоэлементов и электронных устройств с чувствительными полупроводниковыми слоями. Работами М. Гретцеля и Дж. Р. Дюрранта показано повышение чувствительности сенсibilизированных солнечных элементов. В исследованиях Wichien Sang-aroon и Sarawut Tontapha (Университет Кхонкэн, Таиланд) отмечено, что природные красители благодаря низкой стоимости, доступности, широкому распространению и экологической безопасности могут эффективно использоваться в качестве сенсibilизаторов в DSSC. Подчёркивается, что применение красителей позволяет повысить эффективность фотогенерации в сенсibilизированных солнечных элементах.

В Республике Узбекистан среди различных технологий солнечной энергетики полупроводниковые сенсibilизированные красителем солнечные элементы (SBQE) рассматриваются как перспективный путь к развитию экономики, менее зависимой от добычи традиционных энергоресурсов и их экологического воздействия. Использование ультразвуковой обработки при изготовлении SBQE позволяет изменять рельеф фотоанода, обеспечивая более эффективное поглощение света за счёт формирования сложной поверхности, что способствует снижению себестоимости производства и сокращению сроков окупаемости.

Этапы развития солнечных фотоэлементов тесно связаны с повышением их коэффициента полезного действия, что свидетельствует о проведении наиболее масштабных исследований именно для фотоэлементов первого поколения и достижении высоких показателей эффективности. Поскольку фотогенерация происходит в фотоанодном слое TiO_2 , важной научной задачей является исследование изменений, возникающих при различных условиях кристаллизации этого слоя.

В научных школах известных узбекских учёных М. Бахадирханова, С. З. Зайнабидинова, М. С. Саидова и Р. А. Муминова проведены многочисленные исследования, направленные на повышение эффективности солнечных модулей на основе кристаллических, поликристаллических и аморфных полупроводников. Кроме того, академик А. Т. Мамадалимов проводил исследования по созданию полупроводниковых материалов на основе кремния, легирован-

ного глубокими примесями, а также различных природных органических соединений. В данном направлении профессора О. О. Маматкаримов, А. А. Абдукаримов и А. К. Эргашев проводят теоретические и прикладные исследования по адаптации солнечных элементов к различным климатическим условиям.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках фундаментального проекта FZ-2020092870 Наманганского государственного технического университета по теме: «Разработка рекомендаций по оптимальному использованию высокочувствительных сенсibilизированных красителем солнечных элементов (DSSC) в условиях Республики на основе исследования влияния температуры, ультразвука и концентрации компонентов на фотоэлектрические свойства их рабочих слоёв». Экспериментальные исследования проводились в научных лабораториях Ионного центра Университета Малайя (University of Malaya).

Цель исследования. Установление физических закономерностей, определяющих эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую в сенсibilизированных красителем солнечных элементах, путём оптимизации морфологических свойств фотоанодов TiO_2 , а также улучшение их электрофизических и фотоэлектрических характеристик.

Задачи исследования:

разработать технологию синтеза фотоанодов TiO_2 и изготовить на их основе экспериментальные образцы сенсibilизированных красителем солнечных элементов;

определить закономерности формирования размера частиц, пористости, толщины слоя и удельной площади поверхности путём исследования микроструктуры и морфологии фотоанодов TiO_2 ;

экспериментально определить влияние морфологических параметров фотоанодов TiO_2 на структурные, оптические, электрофизические и фотоэлектрические свойства, а также на процессы транспорта электронов и рекомбинации;

установить количественные зависимости между морфологическими параметрами фотоанода и основными фотоэлектрическими характеристиками солнечного элемента (J_{sc} , V_{oc} , FF и η), параметрами электронной диффузии и рекомбинации;

разработать полуэмпирическую модель взаимосвязи «морфология TiO_2 – электрофизические свойства – фотоэлектрическая эффективность» и обосновать физические критерии формирования оптимальной архитектуры фотоанода;

разработать практические рекомендации по оптимизации морфологии TiO_2 и созданию высокоэффективной конструкции солнечного элемента.

Объект исследования. Фотоанодная часть тонкоплёночных солнечных элементов на основе TiO_2 .

Предмет исследования. Физические закономерности и количественные зависимости, связывающие морфологические свойства фотоанода TiO_2 с его электрофизическими и фотоэлектрическими параметрами, а также физические критерии оптимизации архитектуры фотоанода для повышения эффективности солнечных элементов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы следующие методы: синтез фотоанодов TiO_2 и изготовление образцов солнечных элементов, исследование морфологии и микроструктурных характеристик фотоанодов методами SEM, AFM, XRD и BET, изучение оптических свойств методом УФ–видимой спектроскопии (UV–Vis), исследование процессов переноса заряда и рекомбинации методами импедансной спектроскопии и IMPS/IMVS, а также модернизированы и использованы современные методы определения фотоэлектрических параметров в условиях стандартного освещения AM 1.5G.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые установлены количественные корреляционные зависимости между морфологическими параметрами фотоанода TiO_2 (средний размер частиц 15–25 нм, пористость 50–60 % и толщина активного слоя 10–14 мкм) и основными фотоэлектрическими характеристиками солнечного элемента (J_{sc} , V_{oc} , FF и η);

установлено, что длина диффузии электронов (L_n) в мезопористом фотоаноде TiO_2 главным образом определяется структурой межчастичных контактов и степенью кристаллизации фазы анатаза, а также обосновано, что данный параметр является основным фактором, ограничивающим эффективную толщину фотоактивного слоя;

предложена полуэмпирическая модель, описывающая эффективность солнечного элемента (η) как функцию эффективной удельной площади поверхности, коэффициента диффузии электронов (D_n) и времени жизни электронов (τ_n), а также обоснована возможность её использования для прогнозирования оптимального сочетания морфологических параметров;

разработаны физические критерии применения блокирующего (компактного) и светорассеивающего (на основе субмикронных частиц TiO_2) слоёв на основе соотношений средней длины свободного пробега электронов, оптической толщины и сопротивления переносу заряда на интерфейсах (R_{ct});

разработаны практические рекомендации по формированию иерархической архитектуры фотоанода TiO_2 , состоящей из компактного слоя, мезопористого активного слоя и светорассеивающего слоя, а также обосновано, что их применение снижает потери на интерфейсную рекомбинацию, увеличивает оптический путь света и существенно повышает общую эффективность солнечного элемента.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны методы формирования фотоанодов TiO_2 с заданными морфологическими параметрами и технология их изготовления;

разработаны критерии оптимизации морфологических параметров фотоанода TiO_2 , которые могут быть использованы при создании лабораторных и опытных образцов DSSC, а также гибридных фотоэлектрических устройств с электронно-транспортным слоем TiO_2 ;

показано, что установленные корреляционные зависимости и разработанная полуэмпирическая модель позволяют научно обоснованно выбирать технологические режимы изготовления фотоанодов, сократить объём экспериментальных исследований и повысить воспроизводимость фотоэлектрических характеристик солнечных элементов.

Достоверность результатов исследования обеспечивается применением современных аттестованных методов экспериментальной диагностики, использованием серийного научного оборудования (СЭМ высокого разрешения, дифрактометры, спектрофотометры типа Shimadzu UV-1900, импедансные анализаторы), статистическим набором экспериментальных данных, а также соответствием установленных закономерностей теоретическим представлениям физики полупроводников и результатам ведущих мировых научных групп.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость работы заключается в развитии представлений физики полупроводников о роли мезопористой морфологии в формировании фотоэлектрических свойств солнечных элементов, расширении круга количественных моделей, связывающих структурные и электрические характеристики, а также в установлении обобщённых физических критериев оптимизации архитектуры фотоанодов на основе широкозонных оксидов. Практическая значимость заключается в возможности целенаправленного проектирования фотоанодов TiO_2 с заранее заданными свойствами, что открывает перспективы повышения эффективности и стабильности DSSC и гибридных солнечных элементов, в том числе при их эксплуатации в условиях высокой инсоляции и повышенных температур, характерных для региона Центральной Азии.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по повышению эффективности солнечных элементов на основе TiO_2 посредством управления морфологическими свойствами фотоанода:

научные результаты, полученные при установлении влияния среднего размера частиц фотоанода TiO_2 (15–25 нм), его пористости (50–60 %) и толщины фотоактивного слоя (10–14 мкм) на основные фотоэлектрические параметры солнечных элементов (J_{sc} , V_{oc} , FF и коэффициент полезного действия), а также при разработке полуэмпирической модели, позволяющей оценивать морфологические параметры фотоанода, внедрены в АО «FOTON» при совершенствовании технологии производства полупроводниковых материалов и тонкоплёночных фотоэлектрических структур (справка АО «FOTON» № 154 от 2 июня 2026 года). В результате создана возможность оптимизации морфологических параметров фотоанода, выбора технологических режимов изготовления фотоэлектрических элементов и повышения эффективности преобразования энергии;

научные результаты по установлению зависимости длины диффузии электронов в мезопористом фотоаноде TiO_2 от структуры межчастичных контактов и степени кристаллизации фазы анатаза, а также по снижению рекомбинационных потерь, улучшению транспорта электронов и увеличению оптического пути света в иерархической структуре фотоанода использованы в Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah (UMPSA) при оценке фотоэлектрических характеристик высокочувствительных солнечных элементов на основе TiO_2 и совершенствовании технологии их изготовления (справка Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah (UMPSA) № SISTEC2026/INV/SPK/006 от 22 июня 2026 года). В результате создана возможность оптимизации фотоэлектрических параметров высокочувствительных солнечных элементов на основе TiO_2 , повышения эффективности преобразования энергии и совершенствования технологии изготовления фотоэлектрических устройств.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 8 научно-практических конференциях, в том числе на 4 международных и 4 республиканских.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано всего 18 научных работ, в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, опубликовано 9 научных статей, из них 2 — в зарубежных журналах, включённых в базу данных Scopus индексируемых в Q1 и Q3, и опубликована 1 монография.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка опубликованных работ, списка использованной литературы и приложений. Общий объём работы составляет 135 страницы и включает необходимое количество рисунков, графиков и таблиц, отражающих основные экспериментальные результаты и теоретические обобщения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и необходимость темы, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты, раскрыта научная и практическая значимость работы, приведены сведения о внедрении, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации, озаглавленной «**Физические основы морфологии и переноса заряда в солнечных элементах с фотоанодом на основе TiO_2** » рассмотрены принцип работы DSSC и их отличие от классических полупроводниковых фотоэлементов. Устройство включает прозрачный фотоанод на проводящем стекле FTO (светопропускание около 75 % при поверхностном сопротивлении 8,5 Ом/кв), мезопористый слой TiO_2 , краситель-сенситизатор, окислительно-восстановительный электролит и противоэлектрод (рис. 1).

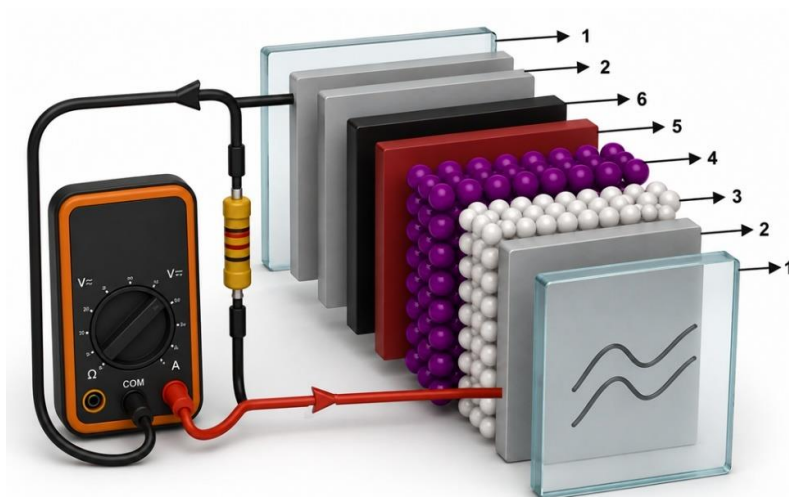


Рис. 1. Компоненты и структура DSSC на основе TiO_2 .

Проанализированы фазовый состав TiO_2 (анатаз, рутил, брукит) и зонная структура; показана анизотропия эффективной массы электрона в анатазе (около $1,1 m_0$ и $5,2 m_0$ по разным кристаллографическим направлениям). Установлено, что грани $\{001\}$ и $\{101\}$ анатаза по-разному влияют на адсорбцию красителя и инжекцию электронов (рис. 2).

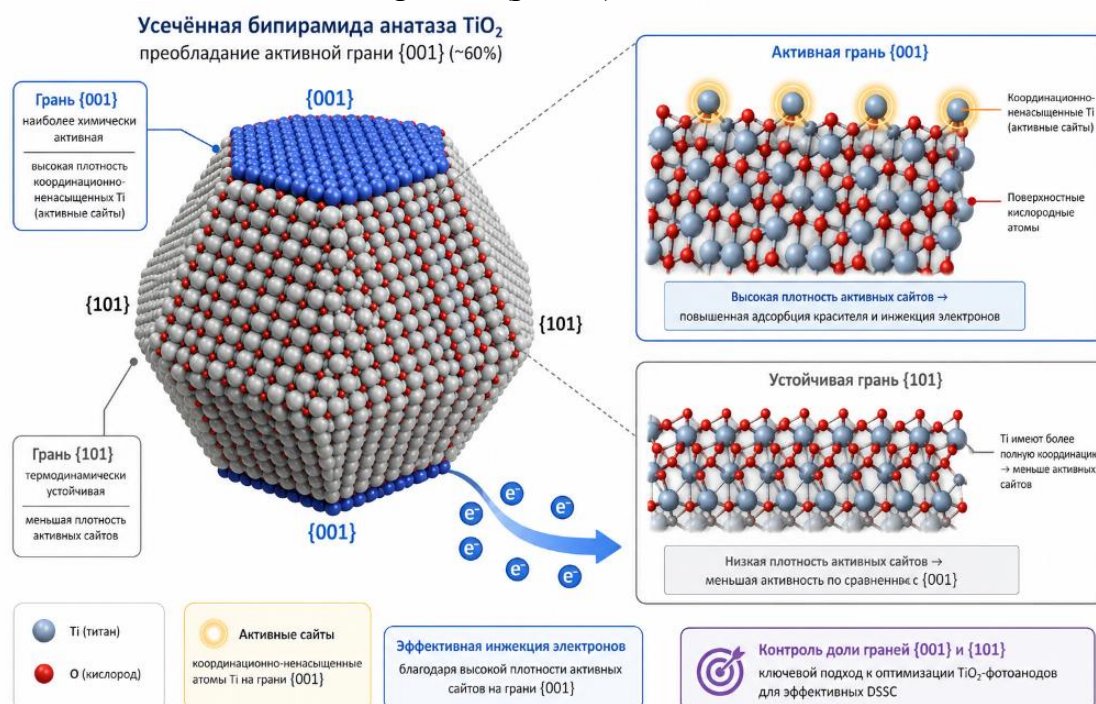


Рис. 2. Кристаллографическая морфология анатаза TiO_2 и роль граней $\{001\}$ и $\{101\}$

На основе анализа литературных данных обоснована актуальность исследования однослойных TiO_2 -фотоанодов и сформулирована постановка задачи.

Во второй главе диссертации, озаглавленной «**Формирование морфологии фотоанодов на основе TiO_2 для получения DSSC-структур**» систематизированы современные методы определения морфологических, фазово-структурных и оптических параметров. Изложены принципы рентгеновской

микротомографии и алгоритм Фельдкамп (FDK) реконструкции трёхмерной структуры, преобразование Радона, а также методы IMPS/IMVS для прямого измерения характеристического времени транспорта τ_d и времени жизни электронов τ_n . Коэффициент диффузии и диффузионная длина рассчитывались по соотношениям

$$Dn = d^2 / (\pi^2 \cdot \tau_d), \quad (1)$$

где d — толщина фотоактивного слоя, а диффузионная длина L_n — по формуле

$$L_n = \sqrt{(Dn \cdot \tau_n)}, \quad (2)$$

Методом рентгенофазового анализа определён фазовый состав порошков TiO_2 ; по ширине линии анатаза (101) рассчитаны размеры областей когерентного рассеяния (рис. 3).

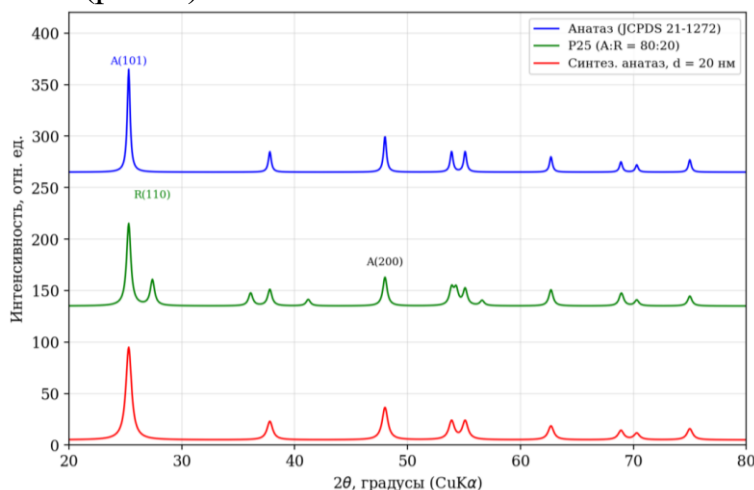


Рис. 3. Дифрактограммы порошков TiO_2 различного фазового состава

В третьей главе диссертации, озаглавленной «Влияние морфологии фотоанода TiO_2 на электрофизические и фотоэлектрические характеристики» представлены основные экспериментальные результаты работы. Методами СЭМ и оптической микроскопии показано, что однослойный TiO_2 -фотоанод характеризуется более однородным распределением наночастиц, улучшенной связностью пор и сниженной агломерацией по сравнению с двухслойной конфигурацией, для которой характерны высокая плотность поверхностных трещин и крупные поры, формирующие локальные центры рекомбинации (рис. 4).

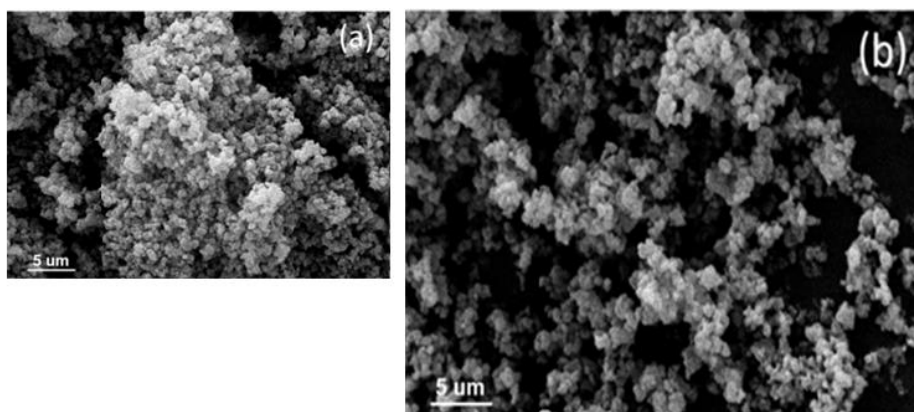


Рис. 4. СЭМ-изображения несенсибилизированного фотоанода: а) двухслойный; б) однослойный TiO_2

На рисунке 5 представлены изображения оптической микроскопии TiO_2 фотоанодов с различной архитектурой. Рисунок 5а соответствует двухслойному TiO_2 фотоаноду, тогда как рисунок 5б показывает однослойный TiO_2 фотоанод.

Установлены зависимости удельной поверхности, плотности адсорбции красителя и диффузионной длины электронов от среднего размера наночастиц TiO_2 , отражающие конкуренцию между ростом площади адсорбции и увеличением числа рекомбинационных центров при измельчении частиц (рис. 6).

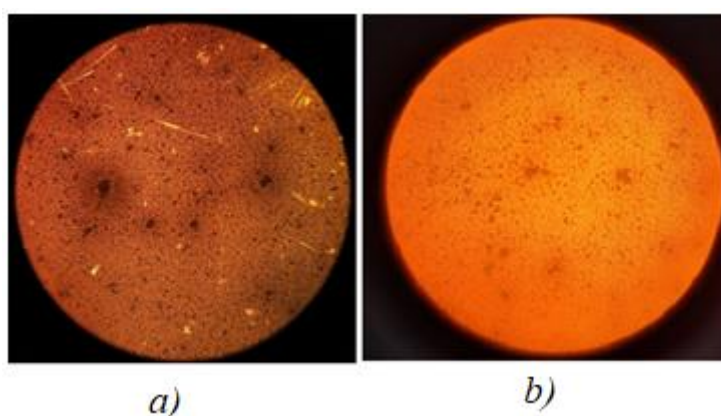


Рис. 5. Оптическая микроскопия фотоанодов: а) двухслойный; б) однослойный TiO_2

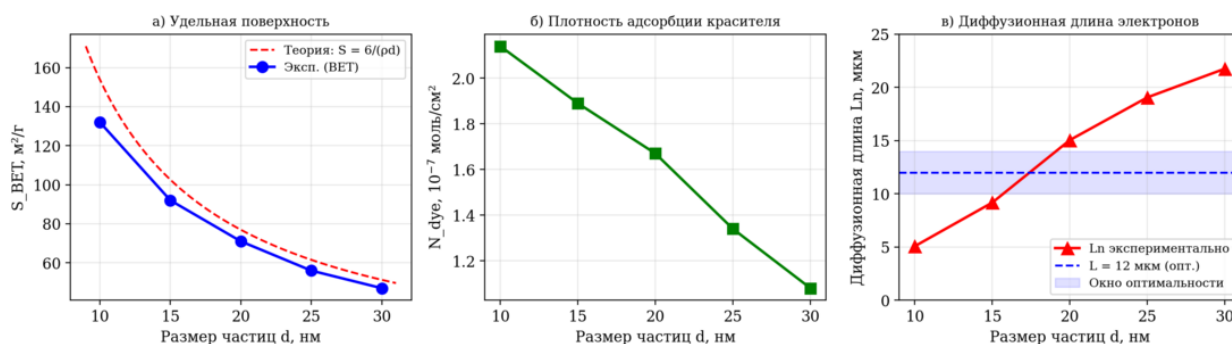


Рис. 6. Зависимости удельной поверхности, плотности адсорбции и диффузионной длины электронов от размера частиц TiO_2

Исследована зависимость фотоэлектрических параметров от состава гель-полимерного электролита при систематическом изменении соотношения РЕО/РММА; наибольшая эффективность достигнута для состава с преобладанием РММА. Зависимость фотоэлектрических параметров (U , J , FF и η) от состава электролита с различным соотношением.

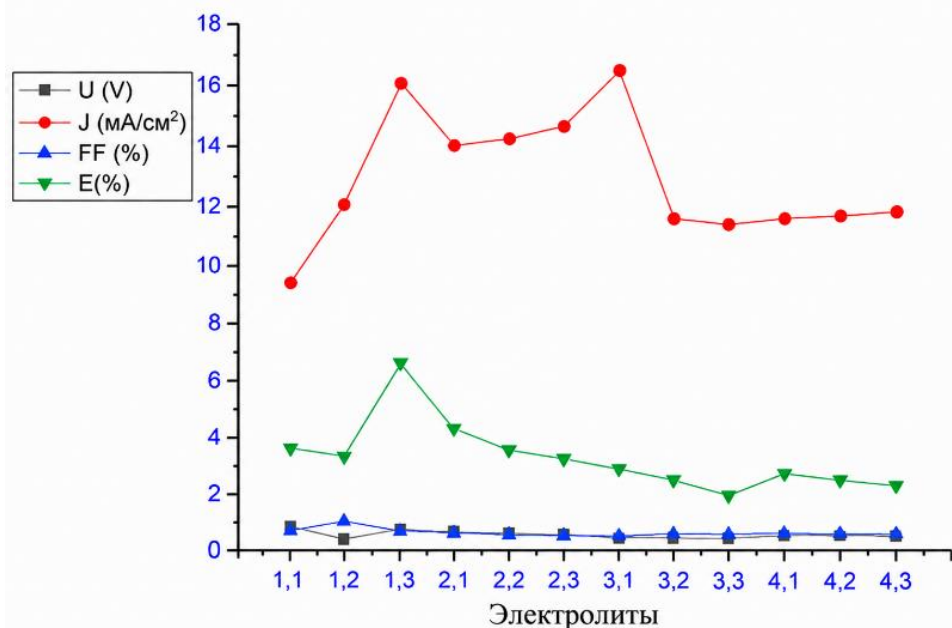


Рис. 7. Зависимость параметров (U , J , FF , η) от состава электролита РЕО/РММА.

РЕО/РММА представлена на рисунке 7. Исследуемые электролиты были приготовлены путем систематического изменения соотношения полиэтиленоксида (РЕО) и полиметилметакрилата (РММА) при сохранении постоянными концентраций DMF, ЕС, РС, ТРАИ и I_2 . Такой подход позволяет изолировать влияние полимерной матрицы на процессы переноса заряда и рекомбинации.

На рисунке 8 представлены вольт-амперные характеристики ($J-V$) изготовленных устройств DSSC с различным составом электролита.

Между исследованными образцами наблюдается явное различие в фотоэлектрических характеристиках. Образец 3 демонстрирует самую высокую плотность тока короткого замыкания ($J_{sc} \approx 16,5 \text{ мА/см}^2$), что указывает на улучшенное поглощение света и более эффективный перенос заряда внутри фотоанода. В отличие от него, образец 1 показывает самую низкую плотность тока ($J_{sc} \approx 9,5 \text{ мА/см}^2$), что предполагает

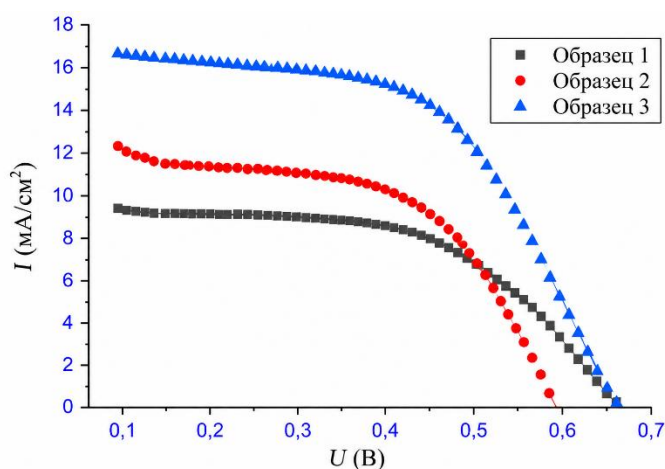


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики ($J-V$) DSSC с различным составом электролита.

более высокие потери на рекомбинацию или снижение эффективности использования красителя

Сводные количественные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение фотоэлектрических характеристик DSSC на основе TiO₂ (литература и настоящая работа)

Структура фотоанода	J _{sc} , мА/см ²	V _{oc} , В	FF	η, %
TiO ₂ DSSC, обработанный УФ/О ₃ (лит.)	15,15	0,756	0,711	8,34
Однослойный TiO ₂ DSSC (лит.)	8,04	0,752	0,51	3,06
Двухслойный TiO ₂ DSSC (лит.)	7,25	0,733	0,53	2,82
TiO ₂ DSSC с нанопроволоками Ag (лит.)	8,14	0,75	0,65	4,14
Однослойный TiO ₂ DSSC (настоящая работа)	16,5	0,62	0,63	6,47

На основе обобщения экспериментальных результатов построена корреляционная и полуэмпирическая модель взаимосвязи «морфология TiO₂ – электрофизические свойства – фотоэлектрическая эффективность». В качестве исходного принято выражение для эффективности:

$$\eta = J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF / P_{in} \quad (3)$$

Плотность тока короткого замыкания в спектральном представлении:

$$J_{sc} = q \int \Phi(\lambda) \cdot LHE(\lambda) \cdot \eta_{inj} \cdot \eta_{cc}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Эффективность светозахвата и сбора электронов:

$$LHE = 1 - \exp(-\varepsilon \cdot \Gamma D \cdot R_f(P) \cdot L/M) \quad (5)$$

$$\eta_{cc}(L_n, L) = \frac{L_n}{L} \tanh\left(\frac{L}{L_n}\right), \quad L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad (6)$$

Напряжение холостого хода:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1\right), \quad (7)$$

Объединённая полуэмпирическая модель эффективности:

$$\eta(D, P, L) = (1/P_{in}) \cdot q \cdot \Phi_{eff} \cdot LHE \cdot \eta_{cc} \cdot V_{oc} \cdot FF \quad (8)$$

Модель описывает конкуренцию двух групп процессов и приводит к существованию области морфологического компромисса, в которой эффективность максимальна. Адекватность подтверждена корреляционным анализом (коэффициент корреляции Пирсона, рис.10).

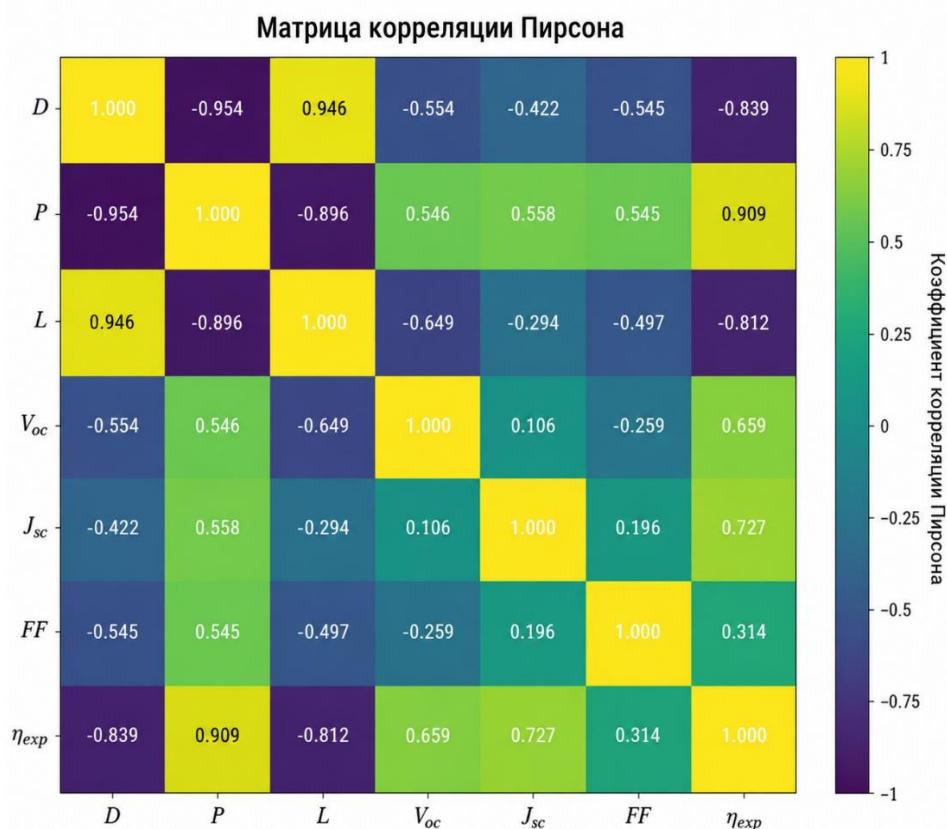


Рис.10. Матрица коэффициентов корреляции Пирсона между морфологическими параметрами TiO_2 и характеристиками DSSC

В четвёртой главе диссертации, озаглавленной «**Экспериментальная методика изготовления и сборки образцов**» описаны технологические процессы. Пасту TiO_2 (на основе TiO_2 P25) наносили на FTO-подложку методом контролируемого растекания, аналогичным методу ракельного ножа, с отжигом при $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 минут (рис. 11-12). Гель-полимерные электролиты готовили на основе PEO и PMMA с добавлением EC, PC, DMF, TPAI и I_2 ; сенсибилизацию проводили в растворе рутениевого красителя (Ruthenizer 535).

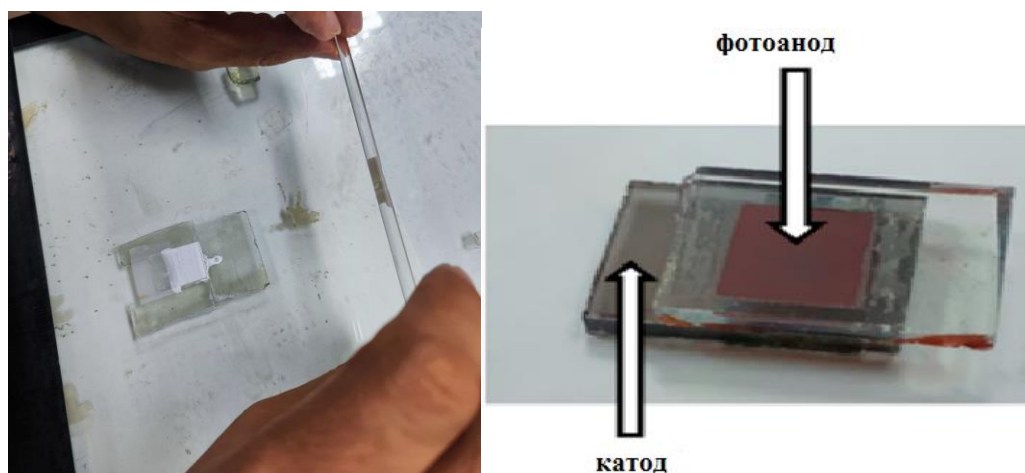


Рис.11-12. Приготовление пасты TiO_2 и внешний вид изготовленного солнечного элемента DSSC

Сформулированы практические рекомендации и предложена конструкция высокоэффективной DSSC на основе иерархической архитектуры «компактный слой – мезопористый активный слой – светорассеивающий слой».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Установлено, что морфологические параметры TiO_2 -фотоанода оказывают определяющее влияние на фотоэлектрические характеристики DSSC. Оптимальные значения среднего размера наночастиц 15–25 нм, пористости 50–60 % и толщины активного слоя 10–14 мкм обеспечивают наиболее благоприятные условия для адсорбции красителя, транспорта электронов и снижения рекомбинационных потерь.

2. Исследования морфологии методом СЭМ подтвердили формирование развитой мезопористой структуры TiO_2 с равномерным распределением наночастиц, что увеличивает эффективную площадь поверхности и количество адсорбированного красителя и приводит к росту плотности тока короткого замыкания J_{sc} .

3. Показано, что диффузионная длина электронов L_n определяется не только размером наночастиц, но и качеством межчастичных контактов и кристалличностью анатазной фазы; повышение кристалличности увеличивает D_n и τ_n , снижая вероятность рекомбинации.

4. Разработана полуэмпирическая модель «морфология TiO_2 – электрофизические свойства – фотоэлектрическая эффективность», позволяющая прогнозировать изменение эффективности в зависимости от удельной поверхности, D_n и τ_n , и применяемая для оптимизации конструкции DSSC на этапе проектирования.

5. Обоснованы физические критерии применения блокирующих и светорассеивающих слоёв: компактный блокирующий слой уменьшает рекомбинацию на границе FTO/ TiO_2 /электролит, а светорассеивающий слой увеличивает оптический путь света, повышая V_{oc} , J_{sc} и FF.

6. Разработаны практические рекомендации по созданию высокоэффективных DSSC: иерархическая архитектура «компактный – мезопористый активный – светорассеивающий слой» обеспечивает повышение общей эффективности преобразования солнечной энергии (до $\eta \approx 6,47$ % при $J_{sc} \approx 16,5$ мА/см^2).

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/2025.27.12.FM/T.15.05 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNVERSITETI

SHARIPBAYEV SOBITXON SOBIR O'G'LI

**TIO₂ ASOSLI QUYOSH ELEMENTLARI SAMARADORLIGINING
ULARNING MORFOLOGIK XUSUSIYATLARIGA BOG'LIQLIGI**

01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Namangan-2026

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Oliy attestatsiya komissiyasida B2026.2.PhD/FM1547 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Namangan davlat texnika universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasiga (www.namdtu.uz) va Ziyonet Axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi:

Mamatkarimov Odiljon Ohundadayevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Rasulov Rustam Yavkachovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yo'lchiyev Shahriyor Xusanovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Toshkent davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Namangan davlat texnika universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/2025.27.12.FM/T.15.05 raqamli Ilmiy kengashning 2026 yil "5" sentyabr soat 12:00 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel./faks: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: info@namdtu.uz, Namangan davlat texnika universiteti 3-bino, 1-qavat, ilmiy kengash xonasi).

Dissertatsiya bilan Namangan davlat texnika universitetiining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (_____ raqam bilan ro'yxatga olingan.) Manzil: 160103, Namangan shahri, I.Karimov ko'chasi, 12-uy. Tel: (99869) 234-14-85.

Dissertatsiya avtoreferati _____ yil "____" _____ da tarqatildi.
(2026 yil "____" _____ dagi № _____ raqamli reestr bayonnomasi.)

M.G'. Dadamirzayev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash raisi, f.-m.f.d., professor

A.A. Abdulkarimov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash ilmiy kotibi, PhD,
dotsent

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi. Jahonda quyosh energetikasini rivojlantirish, qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan samarali foydalanish va yuqori samaradorlikka ega fotoelektrik o'zgartirgichlarni yaratishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Shu yo'nalishda bo'yoq bilan sensibilizatsiyalangan quyosh elementlari (DSSC) tayyorlash texnologiyasining soddaligi, kam xarajat talab qilishi, ekologik xavfsizligi hamda turli substratlarda hosil qilinishi mumkinligi sababli istiqbolli fotoelektrik tizimlardan biri sifatida e'tirof etilmoqda. Mazkur quyosh elementlarida elektronlarni tashuvchi qatlam sifatida qo'llaniladigan titan dioksidi (TiO_2) keng taqiqlangan energetik zonaga ega bo'lgan, kimyoviy va termik barqarorligi yuqori yarimo'tkazgich material hisoblanadi. TiO_2 fotoanodining zarracha o'lchami, g'ovakliligi, qatlam qalinligi, solishtirma sirt maydoni va mikrostrukturasi bo'yoq adsorbsiyasi, elektronlar transporti, rekombinatsiya jarayonlari hamda yorug'likni yutish samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Shu jihatdan TiO_2 fotoanodining morfologik xususiyatlarini boshqarish, ularning fotoelektrik parametrlar bilan o'zaro bog'liqligini aniqlash hamda quyosh elementlari samaradorligini oshirishning fizik qonuniyatlarini tadqiq etish muhim ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etadi.

Jahondagi yetakchi ilmiy-tadqiqot markazlarida yangi avlod quyosh elementlari samaradorligini yarimo'tkazgich materiallarning tuzilishi va xossalarini optimallashtirish orqali oshirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu borada bo'yoq bilan sensibilizatsiyalangan quyosh elementlari (DSSC) uchun TiO_2 fotoanodlarini sintezlash texnologiyalarini takomillashtirish, ularning morfologik tuzilishini boshqarish, ko'p qatlamli va iyerarxik fotoanod arxitekturalarini yaratish, elektronlar transporti hamda rekombinatsiya jarayonlarini optimallashtirish ustuvor ilmiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Shuningdek, fotoelektrik tavsiflarni bashorat qiluvchi fizik modellarni ishlab chiqishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Biroq TiO_2 fotoanodlarida zarracha o'lchami, g'ovaklilik, qatlam qalinligi, agregatsiya darajasi va solishtirma sirt maydonining fotoelektrik parametrlar hamda quyosh elementi samaradorligiga kompleks ta'siri yetarli darajada tizimli o'rganilmagan. Shu sababli TiO_2 fotoanodlarining morfologik xususiyatlarini optimallashtirish, ularning elektrofizik va fotoelektrik xossalarining elektron transporti, rekombinatsiya jarayonlari hamda yorug'likni yutish samaradorligiga bog'liqlik qonuniyatlarini aniqlash dolzarb ilmiy masalalardan biri hisoblanadi.

Respublikamizda ilm – fanga va energetika sohasi rivojiga, jumladan, yarimo'tkazgichli qurilmalar fizikasi hamda elektronika asbobsizlik yo'nalishlarini rivojlantirishga qaratilgan ilmiy izlanishlar keng miqyosda amalga oshirilmoqda. Mamlakatimizda ilm-fanni rivojlantirish va uni yanada amaliy qo'llashda muhim ahamiyatga ega bo'lgan mazkur fundamental tadqiqotlar negizida 2022-2026 yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan "Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash hamda "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish" bo'yicha muhim vazifalar belgilab

qo'yilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, shuningdek, tashqi ta'sirlarga chidamli yangi elektronika va elektrotexnika materiallarini va ular asosidagi strukturalarni ishlab chiqishda, shuningdek, ularning kattaliklarini nazorat qilishning samarali usullarini yaratish ham muhim ahamiyatga ega.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni¹, 2023-yil 11-sentabrdagi PF-158-son "O'zbekiston — 2030" strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni², 2019-yil 30-maydagi PQ-4348-son "Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish uchun qulay shart-sharoitlar yaratish va tarmoqning investitsiyaviy hamda eksport salohiyatini oshirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarori³, 2020-yil 10-iyuldagi PQ-4779-son "Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg'i-energetika mahsulotlariga qamrligini kamaytirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarori⁴, 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-son "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Qarori⁵ hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqot Respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga bog'liqligi. Dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasining fan va texnologiyalar rivojlanishining F2. «Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik» ustuvor yo'nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Jahonda birinchi bo'lib (DSSC) ni tayyorlash texnologiyasi Oregon va Gratsel tomonidan taklif qilinganidan beri keng ilmiy jamiyat e'tiborini tortmoqda. Ushbu texnologiya past iqtisodiy sarflar va yaxshi samaradorligi bilan (hozirda Jahonnig ko'plab ilmiy tekshirish institutlarida 13%) bir qancha tadqiqotlar va rivojlanishlarning asosiy mavzusi bo'lib kelmoqda. Ushbu tipdagi fotoelementlarning samaradorlik darajasidan kelib chiqib, quyosh fotoelementlari foto sensorlari ishlab chiqarish texnologiyasini tijoratlashtirish jihatidan muvaffaqiyatli bo'lishi uchun fotoelement xarajatlarini pasaytirilishi yoki samaradorligini oshirilishi zarur. Bu maqsadga erishish DSSC fotoelementi materiallari va konfiguratsiyalarini to'g'ri loyihalash va optimallashtirish zarur.

DSSC ning asosiy komponentlari shaffof elektr o'tkazuvchi oksid FTO qatlamidan iborat bo'lib, ushbu qatlamda platina bilan qoplangan katodi joylashadi. Shu bilan birga, yorug'likni yutadigan xromofor sezgich qatlam, keng zonalariga ega yarimo'tkazgich va suyuqlik yoki qattiq redoks eritmasi (kovak o'tkazuvchikga ega) mavjud. Umuman olganda, FTO qatlamining shaffofligi 85% dan 95% gacha bo'ladi va ko'p ishlatiladigan FTO materiallari bu ftor bilan ligerlangan qo'rg'oshin

² O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 11-sentabrdagi PF-158-son "O'zbekiston — 2030" strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni. <https://lex.uz/uz/docs/-6600413>

³ <https://lex.uz/docs/-4360770>

⁴ <https://lex.uz/docs/-4890081>

⁵ <https://lex.uz/docs/-5338558>

oksididir. Fotoelementning fotoanod qismi esa keng zonali yarimo'tkazgich va sezgir xromofor yoki boshqa bo'yoqli qatlamdan tashkil topadi.

Jahonda yupqa qatlamli fotoelementlar va sezgir yarimo'tkazgich qatlamga ega elektron qurilmalar asosida sezgir fotosensorlar tayyorlash ustida izlanishlar olib borilmoqda. M. Gratzel, J.R. Durrantlar tomonidan tayyorlangan sezgir fotoelementlarning sezuvchanligi ortirilganligi ma'lum bo'ldi. Wichien Sang-aroon va Sarawut Tontapha (Thailand, Khon Kaen universiti) ishlarida tabiiy bo'yoqlarning arzon ishlab chiqarish sarflari, oson olinishi, ko'pligi va atrof-muhitga zarar yetkazmasligi sababli, ular DSSC ilovalarida bo'yoq sezgichlari sifatida foydalanish mumkinligi keltirib o'tilgan. DSSC-larda bo'yoqlar yordamida fotogeneratsiya samaradorligini ortirishga erishishilganligi takidlangan.

Respublikamizda turli quyosh energetikasi texnologiyalari orasida yarimo'tkazgich asosidagi sezgir bo'yoqli quyosh elementlari (SBQE) energiya manbalarini qazib olishga va ularning ekologik ta'siriga bog'liq bo'lmagan iqtisodiyotga erishish imkonini beradi. SBQE-larini tayyorlanish jarayonida ultratovushdan foydalanish natijasida fotoanod relefini o'zgartirilishi va natijada murakkab relefli fotoanodda yorug'likning yuqori qiymatlarda yutilishiga erishishili arzon narxlarda ishlab chiqarilishga sabab bo'la oladi. Bu esa tezda o'z xarajatlarini qoplash imkoniyatini taqdim etadi.

Quyosh fotoelementlarining rivojlanish bosqichlari ularning foydali ish ko'effitsienti (FIK) bilan o'zaro bog'liq bo'lib, bu birinchi avlod fotoelementlarida ko'proq tadqiqotlar olib borilganligini va yuqori samaradorlikga erishilganligini ko'rsatadi. Fotoelementning fotogeneratsiya jarayoni sodir bo'luvchi fotoanod qismi bu TiO_2 qatlami ekanligi va uning fotoanodda kristallanish jarayoniga turlicha ta'sir etish orqali vujudga keluvchi o'zgarishni kuzatish muhimdir.

O'zbekistonlik mashhur akademiklar: M. Boxadixanov, S.Z. Zaynabidinov, M.S.Saidov, va R.A.Muminov ilmiy maktablarida kristall, polikristall va amorf yarimo'tkazgich asosidagi quyosh modullarining samaradorlik ko'rsatkichlarini oshirish borasida ko'plab tadqiqotlar olib borilgan. Bundan tashqari akademik, A.T. Mamadalimov chuqur sath hosil qiluvchi kirishmalar bilan legirlangan kremniy hamda ko'plab tabiiy organik moddalar asosida yarim o'tkazgich materiallar xosil qilish rajasida izlanishlar olib borganlar. Ushbu yo'nalishda professor O.O. Mamatkarimov, A.A. Abdulkarimov hamda A.Q. Ergashovlar tomonidan turli mintaqa sharoitiga moslashtira olish borasida nazariy va amaliy izlanishlar olib bormoqdalar.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.

Dissertatsiya tadqiqoti Namangan davlat texnika universitetining FZ-2020092870 raqamli fundamental loyihasi doirasida "Respublika sharoitida yuqori sezgir bo'yoqqa sezgir quyosh batareyalari (DSSC) dan optimal foydalanish bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqish, ularning ishchi qatlamlarining fotovoltaiik xususiyatlariga harorat, ultratovush va komponentlar konsentratsiyasining ta'sirini o'rganish asosida" mavzusida olib borildi. Eksperimental tadqiqotlar Malaya universitetining Ion markazi (University of Malaya) ilmiy laboratoriyalarida o'tkazildi.

Tadqiqotning maqsadi. TiO_2 fotoanodlarining morfologik xususiyatlarini optimallashtirish orqali bo'yoq bilan sezgirlangan quyosh elementlarining elektrofizik va fotoelektrik xarakteristikalarini yaxshilash hamda ularning quyosh energiyasini elektr energiyasiga konvertatsiya qilish samaradorligini belgilovchi fizik qonuniyatlarini aniqlashdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

TiO_2 fotoanodlarini sintez qilish texnologiyasini ishlab chiqish hamda ular asosida bo'yoq bilan sensibilizatsiyalangan quyosh elementlarining eksperimental namunalarini tayyorlash;

TiO_2 fotoanodlarining mikrostrukturasi va morfologiyasini o'rganish orqali zarrachalar o'lchami, g'ovaklilik, qatlam qalinligi va solishtirma sirt maydonining shakllanish qonuniyatlarini aniqlash;

TiO_2 fotoanodlarining morfologik parametrlarining strukturaviy, optik, elektrofizik va fotoelektrik xossalarga, shuningdek elektron transporti va rekombinatsiya jarayonlariga ta'sirini eksperimental aniqlash;

fotoanodning morfologik parametrlari bilan quyosh elementining asosiy fotoelektrik ko'rsatkichlari (J_{sc} , V_{oc} , FF va η), elektron diffuziyasi hamda rekombinatsiya parametrlari o'rtasidagi miqdoriy bog'liqliklarni aniqlash;

« TiO_2 morfologiyasi – elektrofizik xususiyatlar – fotoelektrik samaradorlik» bog'liqligining yarim empirik modelini ishlab chiqish hamda optimal fotoanod arxitekturasini shakllantirishning fizik mezonlarini asoslash.

TiO_2 morfologiyasini optimallashtirish va yuqori samarali quyosh batareyasi dizaynini yaratish bo'yicha amaliy tavsiyalar ishlab chiqish.

Tadqiqot obyekti. TiO_2 asosli yupqa qatlamli quyosh elementlarining fotoanod qismi.

Tadqiqot predmeti. TiO_2 fotoanodining morfologik xususiyatlarini uning elektrofizik va fotoelektrik parametrlari bilan bog'laydigan fizik qonuniyatlar va miqdoriy munosabatlar, shuningdek, quyosh batareyalarining samaradorligini oshirish uchun fotoanod arxitekturasini optimallashtirishning fizik mezonlari.

Tadqiqot usullari. Qo'yilgan vazifalarni yechish uchun quyidagi usullar qo'llanilgan: TiO_2 fotoanodlarini sintez qilish va quyosh elementlari namunalarini tayyorlash, fotoanodlarning morfologiyasi va mikrostrukturaviy xususiyatlarini SEM, AFM, XRD hamda BET usullari yordamida tadqiq qilish, optik xossalarni UV–Vis spektroskopiyasi, zaryad tashish va rekombinatsiya jarayonlarini impedans spektroskopiyasi hamda IMPS/IMVS usullari bilan o'rganish, fotoelektrik parametrlarini AM 1.5G standart yoritish sharoitida aniqlashning zamonaviy usullari modernizatsiya qilingan va foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat, ilk bor:

TiO_2 fotoanodining morfologik parametrlari (o'rtacha zarracha o'lchami 15–25 nm, g'ovakliligi 50–60 % va aktiv qatlam qalinligi 10–14 mkm) bilan quyosh elementining asosiy fotoelektrik ko'rsatkichlari (J_{sc} , V_{oc} , FF va η) o'rtasidagi miqdoriy korrelyatsion bog'liqliklar aniqlangan;

mezog'ovakli TiO_2 fotoanodida elektronlarning diffuziya uzunligi (L_n) asosan zarrachalararo kontaktlarning tuzilishi va anataz fazasining kristallanish darajasiga bog'liqligi aniqlangan hamda ushbu parametr fotoaktiv qatlamning samarali qalinligini belgilovchi asosiy cheklovchi omil ekanligi asoslangan;

quyosh elementi samaradorligini (η) samarali solishtirma sirt maydoni, elektronlar diffuziya koeffitsiyenti (D_n) va elektronlarning yashash vaqti (τ_n) funksiyasi sifatida tavsiflovchi yarim empirik model taklif qilingan hamda u morfologik parametrlarning optimal kombinatsiyasini prognoz qilish imkonini berishi asoslangan;

bloklovchi (kompakt) va yorug'lik sochuvchi (submikron TiO_2 zarrachalari asosidagi) qatlamlarni qo'llashning fizik mezonlari elektronlarning o'rtacha erkin yo'li, optik qalinlik va interfeyslardagi zaryad uzatish qarshiligi (R_{ct}) nisbatlari asosida ishlab chiqilgan;

TiO_2 fotoanodining ixcham qatlam, mezog'ovakli faol qatlam va yorug'lik sochuvchi qatlamdan iborat iyerarxik arxitekturasini shakllantirish bo'yicha amaliy tavsiyalar ishlab chiqilgan hamda ularning qo'llanilishi interfeys rekombinatsiya yo'qotishlarini kamaytirishi, yorug'likning optik yo'lini uzaytirishi va quyosh elementining umumiy samaradorligini sezilarli darajada oshirishi asoslangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

belgilangan morfologik parametrlarga ega TiO_2 fotoanodlarini shakllantirish usullari hamda ularning tayyorlash texnologiyasi ishlab chiqilgan;

TiO_2 fotoanodining morfologik parametrlarini optimallashtirish mezonlari ishlab chiqilgan bo'lib, ular laboratoriya va tajriba miqyosidagi DSSC hamda TiO_2 elektron transport qatlamiga ega gibrid fotovoltaik qurilmalarni yaratishda qo'llanishi mumkin;

aniqlangan korrelyatsion bog'liqliklar va ishlab chiqilgan yarim empirik model fotoanod tayyorlashning texnologik rejimlarini ilmiy asosda tanlash, eksperimental izlanishlar hajmini kamaytirish hamda quyosh elementlarining fotoelektrik xususiyatlari takrorlanuvchanligini oshirish imkonini berishi ko'rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi: Zamonaviy sertifikatlangan eksperimental diagnostika usullaridan foydalanish, seriyali ilmiy uskunalardan (yuqori aniqlikdagi SEM, difraktometrlar, Shimadzu UV-1900 tipidagi spektrofotometrlar, impedans analizatorlari) foydalanish, eksperimental ma'lumotlarning statistik to'plami, shuningdek, o'rnatilgan naqshlarning yarimo'tkazgichlar fizikasining nazariy tushunchalari va dunyoning yetakchi ilmiy guruhlar natijalariga mos kelishi bilan ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Ishning ilmiy ahamiyati mezopoz morfologiyaning roli haqidagi yarimo'tkazgichlar fizikasi konsepsiyalarini ishlab chiqishda yotadi. Quyosh batareyalarining fotovoltaik xususiyatlarini shakllantirishda, strukturaviy va elektr xususiyatlarini bog'laydigan miqdoriy modellar doirasini kengaytirishda va fotoanod arxitekturasini optimallashtirish uchun umumlashtirilgan fizik mezonlarni aniqlashda keng polosali oksidlarning roli. Amaliy ahamiyati oldindan belgilangan xususiyatlarga ega TiO_2

fotoanodlarini maqsadli loyihalash imkoniyatida yotadi, bu esa DSSC va gibrid quyosh batareyalarining samaradorligi va barqarorligini oshirishga yo'l ochadi, shu jumladan ulardan Markaziy Osiyo mintaqasiga xos bo'lgan yuqori insolyatsiya va yuqori harorat sharoitida foydalanish.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. TiO_2 asosidagi quyosh batareyalari fotoanodining morfologik xususiyatlarini boshqarish orqali ularning samaradorligini oshirish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

TiO_2 fotoanodining o'rtacha zarracha o'lchami 15–25 nm, g'ovakliligi 50–60 % va fotoaktiv qatlam qalinligi 10–14 mkm ning quyosh batareyalarining Jsc, Voc, FF va foydali ish koeffitsiyentiga ta'siri hamda fotoanod morfologik parametrlarini baholash imkonini beruvchi yarim empirik modelni ishlab chiqish bo'yicha olingan ilmiy natijalar "FOTON" aksiyadorlik jamiyatida yarimo'tkazgich materiallari va yupqa plyonkali fotoelektrik tuzilmalar ishlab chiqarish texnologiyasini takomillashtirishda joriy etilgan ("FOTON" aksiyadorlik jamiyatining 2026-yil 2-iyundagi 154-son ma'lumotnomasi). Natijada fotoanodning morfologik parametrlarini optimallashtirish, fotoelektrik elementlarning texnologik rejimlarini tanlash hamda energiya konversiyasi samaradorligini oshirish imkoniyati yaratilgan;

mezog'ovak TiO_2 fotoanodida elektron diffuziya uzunligining zarrachalararo kontaktlar tuzilishi va anataz fazasining kristallanish darajasiga bog'liqligi, shuningdek ierarxik fotoanod tuzilmasining rekombinatsiya yo'qotishlarini kamaytirishi, elektron transportini yaxshilashi va yorug'likning optik yo'lini oshirishi bo'yicha olingan ilmiy natijalar "Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah (UMPSA)"da yuqori sezgir TiO_2 asosidagi quyosh elementlarining fotoelektrik xususiyatlarini baholash va ularning texnologiyasini takomillashtirishda foydalanilgan (Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah (UMPSA)ning 2026-yil 22-iyundagi № SISTEC2026/INV/SPK/006 sonli ma'lumotnomasi). Natijada yuqori sezgir TiO_2 asosidagi quyosh elementlarining fotoelektrik parametrlarini optimallashtirish, energiya konversiyasi samaradorligini oshirish hamda fotoelektrik qurilmalar texnologiyasini takomillashtirish imkoniyati yaratilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobasiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 4 ta halqaro va 4 ta respublika miqyosidagi ilmiy – amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

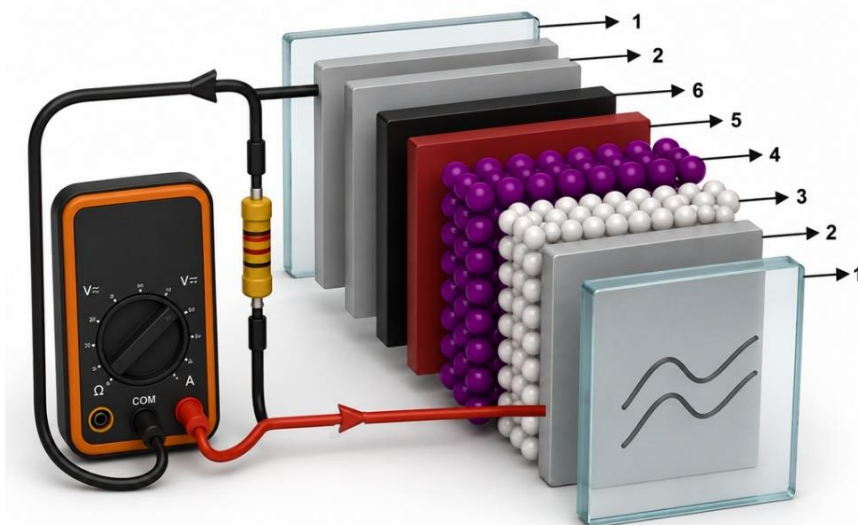
Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertasiya mavzusi bo'yicha jami 18 ta ilmiy ish chop etilgan, jumladan, 1 ta monografiya, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 7 ta ilmiy maqola, jumladan 2 tasi Q1 va Q3 kvartil, Scopus ma'lumotlar bazasida kiritilgan horijiy halqaro junallarda nashr qilingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertasiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 135 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida mavzuning dolzarbligi va zarurligi asoslanadi, maqsad va vazifalar shakllantiriladi, tadqiqotning obyekti va predmeti aniqlanadi, ilmiy yangilik va amaliy natijalar taqdim etiladi, ishning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib beriladi, amalga oshirish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi haqida ma'lumot beriladi.

Birinchi bob, “TiO₂ asosidagi fotoanodli quyosh batareyalarida morfologiya va zaryad tashishning fizik tamoyillari” DSSClarning ishlash printsipini va ularning klassik yarimo'tkazgichli quyosh batareyalaridan qanday farq qilishini o'rganadi. Qurilma o'tkazuvchan FTO oynasidagi shaffof fotoanoddan (taxminan 75% yorug'lik o'tkazuvchanligi, sirt qarshiligi 8,5 Ω/ kv.), mezoporoz TiO₂ qatlamidan, sensibilizator bo'yog'idan, oksidlanish-qaytarilish elektrolitidan va qarshi elektroddan iborat (1-rasm).



1- rasm. TiO₂ asosidagi DSSC ning komponentlari va tuzilishi

TiO₂ ning fazaviy tarkibi (anataz, rutil, brukit) va tasma tuzilishi tahlil qilindi; anatazdagi samarali elektron massasining anizotropiyasi ko'rsatildi (turli kristallografik yo'nalishlar bo'yicha taxminan 1,1 m₀ va 5,2 m₀). Anatazning {001} va {101} yuzlari bo'yoq adsorbsiyasi va elektron in'ektsiyasiga turlicha ta'sir ko'rsatishi aniqlandi (2-rasm).

TiO₂ - fotoanodlarni o'rganishning dolzarbligi asoslanadi va muammoning qo'yilishi shakllantiriladi.

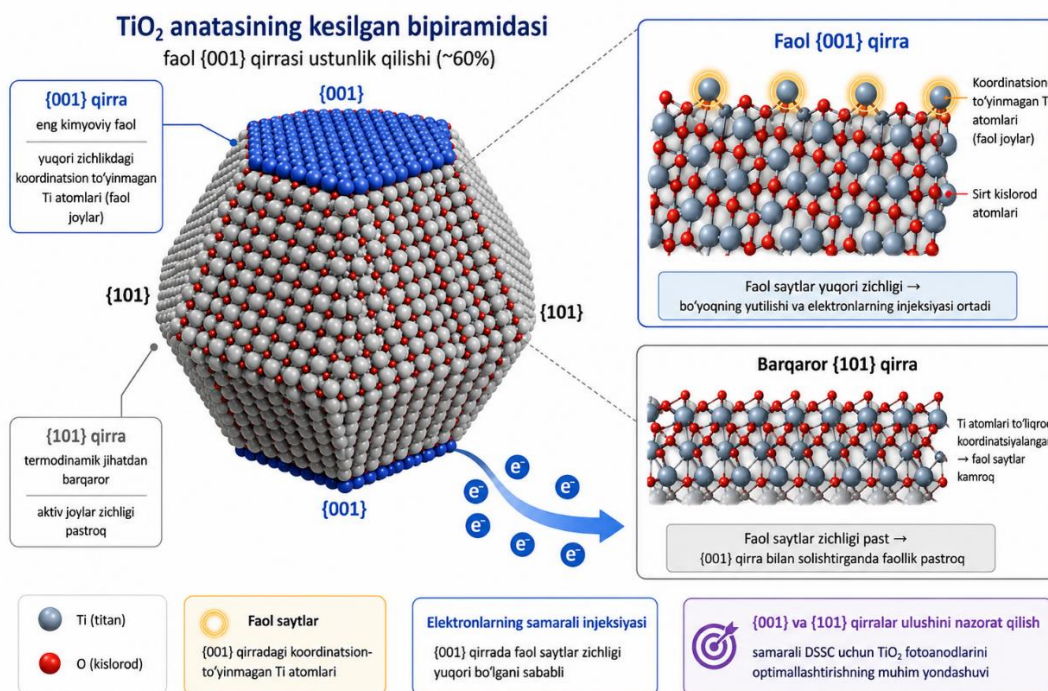
Ikkinchi bob, "DSSC tuzilmalarini olish uchun TiO₂ asosidagi fotoanodlarning morfologiyasini shakllantirish" da morfologik, fazaviy-strukturaviy va optik parametrlarni aniqlashning zamonaviy usullari tizimlashtirilgan. Rentgen mikrotomografiyasi tamoyillari va uch o'lchovli strukturani qayta tiklash uchun Feldkamp (FDK) algoritmi, Radon konvertatsiyasi va xarakterli tashish vaqti τ_d va elektronning umri τ_n ni to'g'ridan-to'g'ri o'lchash uchun IMPS/IMVS usullari keltirilgan. Diffuziya koeffitsienti va diffuziya uzunligi munosabatlar yordamida hisoblab chiqilgan.

$$Dn = d^2 / (\pi^2 \cdot \tau d), \quad (1)$$

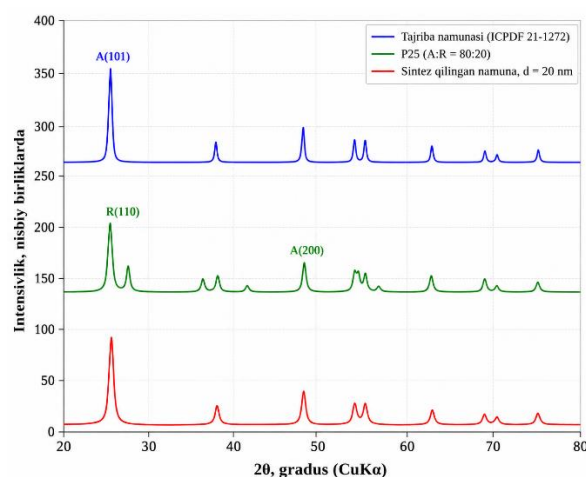
bu yerda d — fotoaktiv qatlamning qalinligi, L_n esa elektronlarning diffuziya uzunligi bo'lib, quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$L_n = \sqrt{(Dn \cdot \tau n)}, \quad (2)$$

TiO₂ kukunlarining fazaviy tarkibi rentgen-fazaviy tahlil yordamida aniqlandi; kogerent sochilish mintaqalarining o'lchamlari anataz {101} chizig'ining kengligi asosida hisoblab chiqildi (3-rasm).



2-rasm. Anatazning kristallografik morfologiyasi TiO₂ va {001} va {101} yuzlarining roli



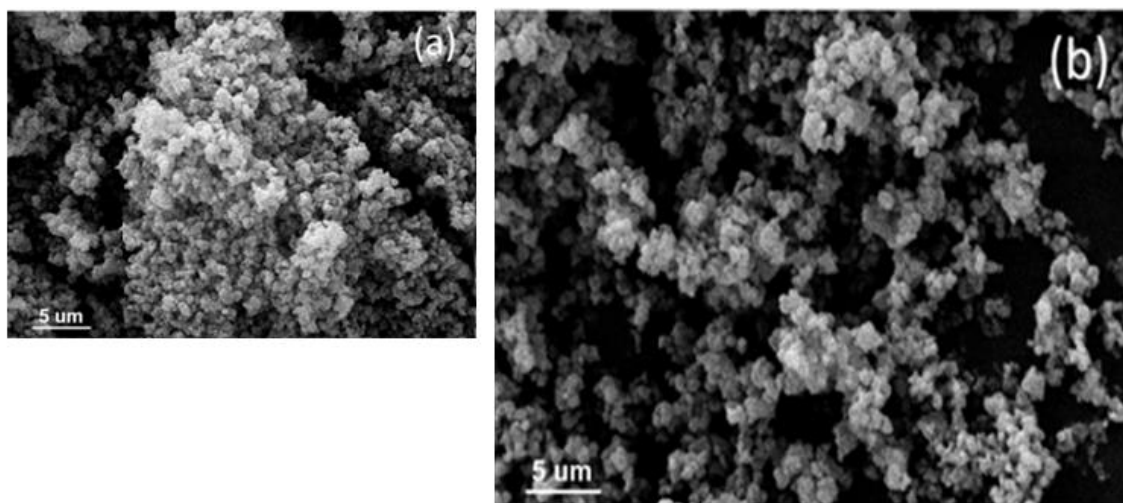
3-rasm. Turli fazali tarkibdagi TiO₂ kukunlarining difraksiya naqshlari.

Fotanod morfologiyasining ta'siri. Tadqiqotning asosiy eksperimental natijalari nomli uchinchi bobda TiO₂ elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlari tadqiq qilingan. SEM va optik mikroskopiya shuni ko'rsatdiki, bir qavatli TiO₂

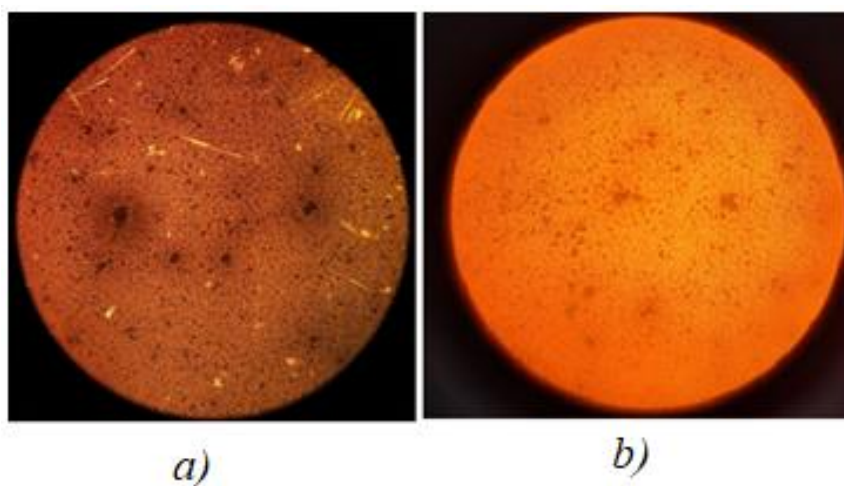
fotoanodi ikki qavatli konfiguratsiyaga nisbatan nanopartikullarning bir tekis taqsimlanishi, yaxshilangan g'ovak aloqasi va aglomeratsiyaning kamayishi bilan tavsiflanadi, bu esa sirt yoriqlarining yuqori zichligi va mahalliy rekombinatsiya markazlarini hosil qiluvchi katta g'ovaklar bilan tavsiflanadi (4-5- rasm).

TiO₂ nanopartikullarining o'rtacha kattaligiga solishtirma sirt maydoni, bo'yoq adsorbsiyasi zichligi va elektron diffuziya uzunligining bog'liqligi aniqlandi, bu zarrachalarni maydalash paytida adsorbsiya maydonining oshishi va rekombinatsiya markazlari sonining ko'payishi o'rtasidagi raqobatni aks ettiradi (6-rasm).

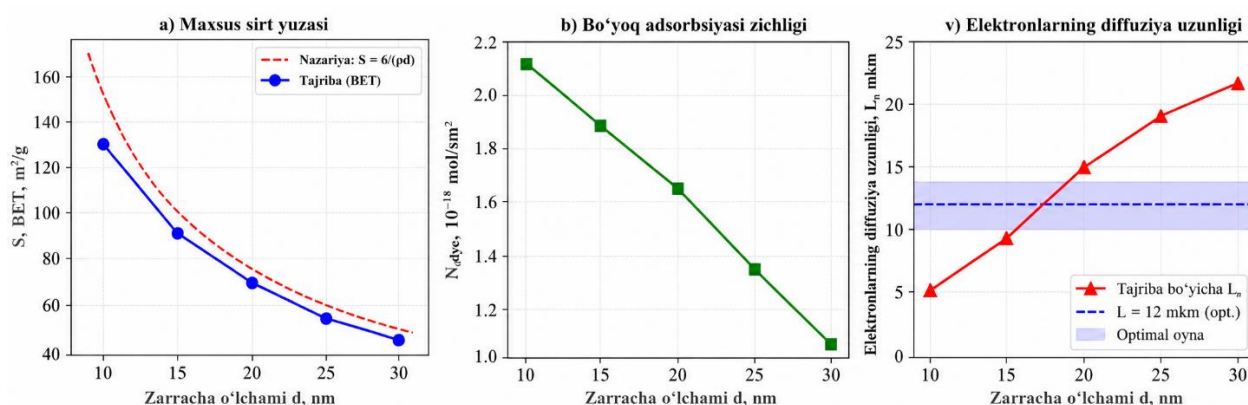
Fotovoltaik parametrlarning gel-polimer elektrolit tarkibiga bog'liqligi PEO/PMMA nisbatining tizimli o'zgarishlari bilan o'rganildi; eng yuqori samaradorlikka PMMA ustunlik qiladigan tarkib uchun erishildi(8-9-rasm).



4-rasm. Sezgirlanmagan fotoanodning SEM tasvirlari: a) ikki qavatli; b) bir qavatli TiO₂



5-rasm. Fotoanodlarning optik mikroskopiya: a) ikki qavatli; b) bir qavatli TiO₂

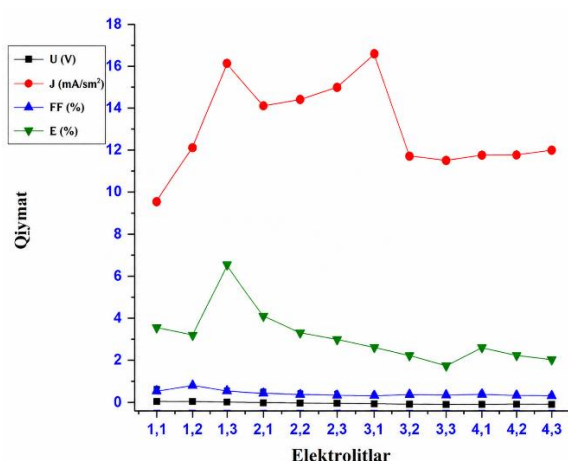


6-rasm. TiO_2 ning solishtirma sirt maydoni, adsorbsiya zichligi va elektron diffuziya uzunligining zarracha hajmiga bog'liqligi.

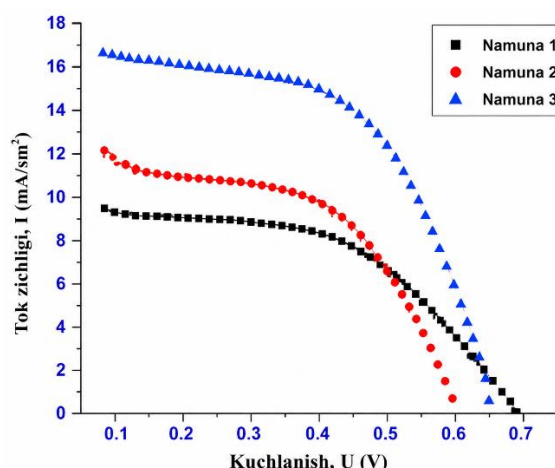
Xulosa miqdoriy natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval – TiO_2 asosidagi DSSClarning fotovoltaiik xususiyatlarini taqqoslash (adabiyotlar va ushbu ish).

Fotoanod tuzilishi	$J_{sc}, \text{mA/sm}^2$	V_{oc}, B	FF	$\eta, \%$
TiO_2 DSSC (lit.)	15.15	0.756	0.711	8.34
Bir qatlamli TiO_2 DSSC (lit.)	8.04	0.752	0.51	3.06
Ikki qavatli TiO_2 DSSC (lit.)	7.25	0.733	0,53	2.82
Nanosimlar bilan TiO_2 DSSC Ag (lit.)	8.14	0,75	0,65	4.14
Bir qavatli TiO_2 DSSC (hozirgi ish)	16.5	0.62	0.63	6.47



8-rasm. Parametrlarning (U, J, FF, η) PEO/PMMA elektrolitining tarkibiga bog'liqligi.



9-rasm. Turli elektrolit tarkibiga ega DSSC ning volt-amper xususiyatlari ($J-U$).

Eksperimental natijalar xulosasi asosida TiO_2 morfologiyasi, elektrofizik xususiyatlar va fotovoltaiik samaradorlik o'rtasidagi bog'liqlikning korrelyatsiya va yarim empirik modeli tuzildi. Samaradorlik uchun quyidagi ifoda dastlabki model sifatida qabul qilindi:

$$\eta = J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF / P_{in} \quad (3)$$

Qisqa tutashuv toki zichligining spektral ko‘rinishdagi ifodasi:

$$J_{sc} = q \int \Phi(\lambda) \cdot LHE(\lambda) \cdot \eta_{inj} \cdot \eta_{cc}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Yorug‘likni ushlab hamda elektronlarni yig‘ish samaradorligi.

$$LHE = 1 - \exp(-\varepsilon \cdot \Gamma D \cdot R_f(P) \cdot L/M) \quad (5)$$

$$\eta_{cc}(L_n, L) = \frac{L_n}{L} \tanh\left(\frac{L}{L_n}\right), \quad L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad (6)$$

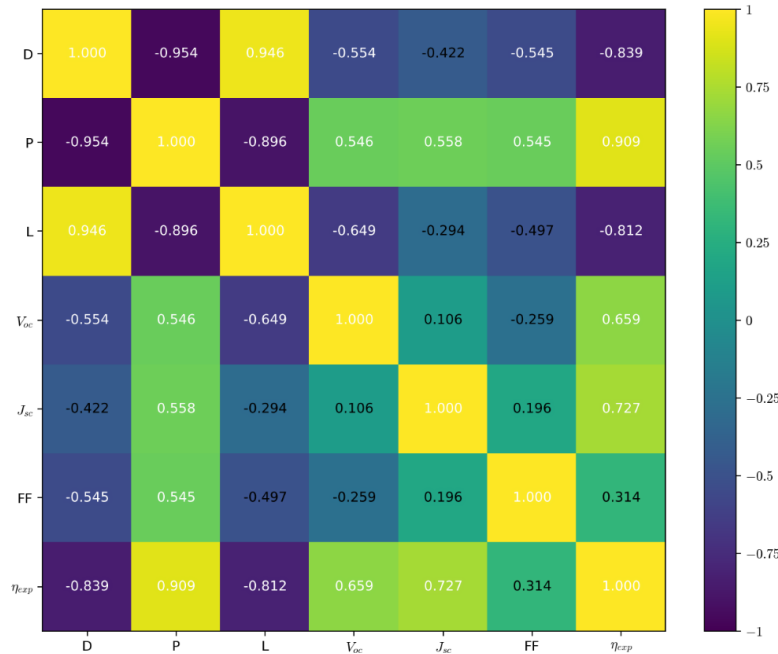
Salt ishlash kuchlanishi:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1\right), \quad (7)$$

Quyosh elementi samaradorligining birlashtirilgan yarim empirik modeli:

$$\eta(D, P, L) = (1/P_{in}) \cdot q \cdot \Phi_{eff} \cdot LHE \cdot \eta_{cc} \cdot V_{oc} \cdot FF \quad (8)$$

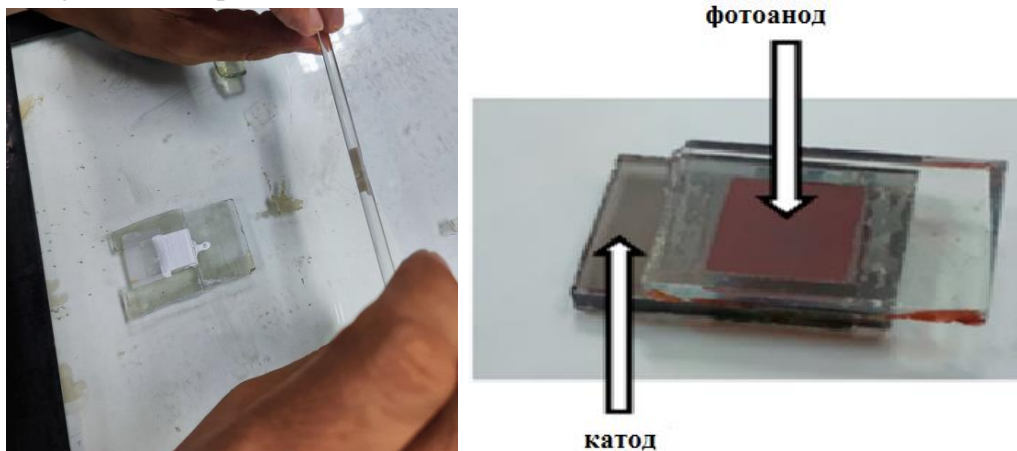
Model ikki guruh jarayonlar o'rtasidagi raqobatni tasvirlaydi va samaradorlik maksimal darajada oshiriladigan morfologik murosaga kelish sohasining mavjudligiga olib keladi. Uning haqiqiyliги korrelyatsiya tahlili (Pearson korrelyatsiya koeffitsienti) bilan tasdiqlanadi.



10-rasm. TiO₂ ning morfologik parametrlari va DSSC xususiyatlari o'rtasidagi Pearson korrelyatsiya koeffitsientlari matritsasi.

4-bob, "Namuna tayyorlash va yig'ishning eksperimental metodologiyasi", jarayon oqimini tasvirlaydi. TiO₂ pastasi (TiO₂ P25 asosida) FTO substratiga shifokor pichog'i usuliga o'xshash boshqariladigan yoyish usuli yordamida surtili, so'ngra

450°C da 30 daqiqa davomida tavlandi. Polimer gel elektrolitlari PEO va PMMA yordamida EC, PC, DMF, TPAI va I₂ qo'shilgan holda tayyorlandi; sensibilizatsiya ruteniy bo'yoq eritmasida (Ruthenizer 535) amalga oshirildi. Mezoporoz faol qatlam - yorug'lik sochuvchi qatlam" ierarxik arxitekturasiga asoslangan yuqori samarali DSSC dizayni taklif qilindi.



11-12. rasm. TiO₂ pastasini tayyorlash usuli va 1 Ishlab chiqarilgan DSSC quyosh batar-eyasining tashqi ko'rinishi

XULOSA

1. TiO₂ fotoanodining morfologik parametrlari DSSClarning fotovoltaik xususiyatlariga hal qiluvchi ta'sir ko'rsatishi aniqlandi. O'rtacha nanozarrachalar hajmi 15–25 nm, g'ovakliligi 50–60% va faol qatlam qalinligi 10–14 mkm ning optimal qiymatlari bo'yoq adsorbsiyasi, elektron tashish va rekombinatsiya yo'qotishlarini kamaytirish uchun eng qulay sharoitlarni ta'minlaydi.

2. SEM morfologiyasi tadqiqotlari nanopartikullarning bir tekis taqsimlanishiga ega bo'lgan rivojlangan mezoporoz TiO₂ tuzilishining shakllanishini tasdiqladi, bu esa samarali sirt maydonini va adsorbsiyalangan bo'yoq miqdorini oshiradi va qisqa tutashuv tok zichligining oshishiga olib keladi.

3. Elektron diffuziya uzunligi L_n nafaqat nanozarrachalarning kattaligi, balki zarrachalararo kontaktlarning sifati va anataz fazasining kristalligi bilan ham belgilanishi ko'rsatilgan; kristallikning oshishi D_n va τ_n ni oshiradi, bu esa rekombinatsiya ehtimolini kamaytiradi.

4. “TiO₂ morfologiyasi – elektrofizik xususiyatlar – fotovoltaik samaradorlik” ning yarim empirik modeli ishlab chiqildi, bu ma'lum sirt maydoniga, D_n va τ_n ga qarab samaradorlikning o'zgarishini bashorat qilish imkonini beradi va loyihalash bosqichida DSSC dizaynini optimallashtirish uchun qo'llaniladi.

5. Bloklovchi va yorug'lik sochuvchi qatlamlardan foydalanishning fizik mezonlari asoslantirilgan: ixcham bloklovchi qatlam FTO/ TiO₂ /elektrolit chegarasida rekombinatsiyani kamaytiradi va yorug'lik sochuvchi qatlam yorug'likning optik yo'lini oshiradi, Voc, Jsc va FF ni oshiradi.

6. Yuqori samarali DSSClarni yaratish bo'yicha amaliy tavsiyalar ishlab chiqildi: “ixcham – mezoporoz faol – yorug'lik sochuvchi qatlam” ierarxik arxitekturasini quyosh energiyasini konvertatsiya qilishning umumiy samaradorligini oshirishni ta'minlaydi (Jsc ≈ 16,5 mA/sm² da η ≈ 6,47% gacha).

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/2025.27.12.FM/T.15.05
ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
AT THE NAMANGAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

NAMANGAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SHARIPBAEV SOBITKHON SOBIR UGLI

**DEPENDENCE OF THE EFFICIENCY OF TiO_2 -BASED SOLAR CELLS
ON THEIR MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS**

01.04.10 – Physics of semiconductors

**ABSTRACT OF DISSERTATION DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Namangan – 2026

The topic of the Doctor of Philosophy (PhD) dissertation in Engineering Sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under No. B2026.2.PhD/FM1547.

The dissertation was completed at the Namangan State Technical University.

The abstract of the dissertation is available in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is posted on the website Of the Scientific Council (www.nammti.uz) and on the Information and Educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: **Mamatkarimov Odiljon Ohundadaevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Rasulov Rustam Yavkachovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Yulchiev Shahriyor Khusanovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Tashkent State Technical University**

The defense of the dissertation will be held at 12:00 on “5” september 2026 at the meeting of Scientific Council PhD.03/2025.27.12.FM/T.15.05 at the Namangan State Technical University (Adress: 160115, Namangan city, Kasansay Str. 7, Building 3, 1st floor, Academic Council Room, tel. (+99869)228-76-68, 225-10-07, Fax: (+99869) 228-76-75. e-mail: info@namdtu.uz)

You can get acquainted with the dissertation work at the Information Resource Center of the Namangan state technical university (registration number No. ____). Address: 160103, Namangan city, I,Karimov Str. 12, tel. (+99869) 234-14-85; Fax: (+99869) 234-19-96, e-mail: info@namdtu.uz

The abstract of the dissertation was sent on "____" _____, 2026.
(mailing protocol No. ____ on “____” _____ 2026)

M. Dadamirzayev
Chairman of Scientific Council on
award of Scientific Degrees, Doctor
of Physical and Mathematical
Sciences, Professor

A.A. Abdukarimov
Scientific Secretary of Scientific
Council on award of Scientific De-
grees, Doctor of Philosophy (PhD),
Associate Professor

N.Sharibayev
Chairman of the Scientific Seminar
at the Scientific Council on award
of Scientific Degrees, Doctor of
Physical and Mathematical Sci-
ences, Professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD thesis)

The aim of the research is to establishment of physical regularities governing the influence of morphological characteristics of the TiO₂ photoanode (particle size, porosity, layer thickness, specific surface area, and architectural organization) on the electrophysical and photoelectric properties of solar cells, and on this basis, the development of scientifically substantiated criteria for morphology optimization to enhance the efficiency of solar energy conversion.

The object of the study is solar cells based on mesoporous and hierarchical TiO₂ photoanode layers sensitized with Ru(II)-type dyes, as well as the physical processes of charge carrier generation, transport, and recombination occurring therein.

The subject of the study is physical regularities and quantitative relationships linking the morphological characteristics of the TiO₂ photoanode to its electrophysical and photoelectric parameters, as well as physical criteria for optimizing the photoanode architecture to enhance the efficiency of solar cells.

The scientific novelty of the dissertation is as follows:

for the first time, quantitative correlations have been established between the morphological parameters of the TiO₂ photoanode (average particle size of 15–25 nm, porosity of 50–60%, and active layer thickness of 10–14 μm) and the main photovoltaic characteristics of the solar cell (J_{sc} , V_{oc} , FF, and η);

it has been established that the electron diffusion length (L_n) in a mesoporous TiO₂ photoanode is primarily determined by the structure of interparticle contacts and the degree of crystallization of the anatase phase, and it has been substantiated that this parameter is the principal factor limiting the effective thickness of the photoactive layer;

a semi-empirical model has been proposed that describes the solar cell efficiency (η) as a function of the effective specific surface area, electron diffusion coefficient (D_n), and electron lifetime (τ_n), and its capability to predict the optimal combination of morphological parameters has been substantiated;

physical criteria for the application of blocking (compact) and light-scattering (based on submicron TiO₂ particles) layers have been developed based on the relationships between the mean free path of electrons, optical thickness, and charge-transfer resistance at the interfaces (R_{ct});

practical recommendations have been developed for forming a hierarchical TiO₂ photoanode architecture consisting of a compact layer, a mesoporous active layer, and a light-scattering layer, and it has been demonstrated that their application reduces interfacial recombination losses, increases the optical path length of light, and significantly improves the overall efficiency of the solar cell.

Implementation of the research results. Based on the obtained scientific results on enhancing the efficiency of TiO₂-based solar cells through the control of photoanode morphological characteristics:

the scientific results obtained by establishing the influence of the average TiO₂ photoanode particle size (15–25 nm), porosity (50–60%), and photoactive layer thickness (10–14 μm) on the main photovoltaic parameters of solar cells (J_{sc} , V_{oc} ,

FF, and power conversion efficiency), as well as by developing a semi-empirical model for evaluating the morphological parameters of the photoanode, have been implemented at JSC “FOTON” in improving the technology for manufacturing semiconductor materials and thin-film photovoltaic structures (certificate of JSC “FOTON” No. 154 dated June 2, 2026). As a result, it became possible to optimize the morphological parameters of the photoanode, select appropriate technological conditions for fabricating photovoltaic cells, and improve energy conversion efficiency;

the scientific results on establishing the dependence of the electron diffusion length in a mesoporous TiO_2 photoanode on the structure of interparticle contacts and the degree of anatase phase crystallization, as well as on reducing recombination losses, improving electron transport, and increasing the optical path length in the hierarchical photoanode structure, have been applied at Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah (UMPSA) for the evaluation of the photovoltaic characteristics of highly sensitive TiO_2 -based solar cells and the improvement of their fabrication technology (certificate of Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah (UMPSA) No. SISTEC2026/INV/SPK/006 dated June 22, 2026). As a result, it became possible to optimize the photovoltaic parameters of highly sensitive TiO_2 -based solar cells, enhance energy conversion efficiency, and improve the fabrication technology of photovoltaic devices.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. The total length of the dissertation is 135 pages.

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

I часть (1 bo'lim; part 1)

1. Mamatkarimov O.O., Sharibaev N.Yu., Abdulkarimov A.A., Ergashev A.Q., Fazliddinov S.F., Axmadjonova M.X., Sharipbayev S.S. Development of a single-layer TiO₂ photoanode for DSSCs with structural and photovoltaic analysis. // Results in Physics.-2026. –Vol. 86. –No. 7. –Pp. 108693. (№1, №3, WoS, Scopus, Q1; <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2026.108693>)
2. Mamatkarimov O.O., Sharibaev N.Yu., Abdulkarimov A.A., Sharipbayev S.S. Development of a single-layer TiO₂ photoanode for dye-sensitized solar cell (DSSC) // East European Journal of Physics. – 2026. –No. 1. –Pp. - . <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2026-1-44> (Scopus, Q3).
3. Sharipbayev S.S., Mamatkarimov O.O., Belousov P.A., Legkonogikh S.V., Tokhirjonova M.R. TiO₂ asosidagi bo'yoq bilan sezgirlashtirilgan quyosh elementlarini sanoat tomografiyasi vositasida o'rganish va tahlil qilish. // Buxoro davlat universiteti ilmiy axboroti. 2025, №6, 201–208-b. https://buxdu.uz/media/jurnal-lar/ilmiy_axborot/ilmiy_axborot_6_2025_1.pdf
4. Sharipbayev S.S. Методика изготовления новых сенсibilizированных красителем солнечных элементов на основе TiO₂. // Scientific Journal of Mechanics and Technology. Volume 5, Issue 4, Special Issue, 2024. –Pp. 313–320. <https://mextexuz.uz/media/files/mextex-jurnal4-maxsus.pdf>
5. Sharipbayev S.S., Mamatkarimov O.O., Sharibaev N.Yu., Axmadjonova M.X. Ko'p qatlamli quyosh elementlarida TiO₂ fotoanod morfologiyasining adgezion xususiyatlari va mexanik ishonchliligi. // Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi. -2026, -№4, -b. 219–223. <https://journal.namdu.uz/file/2026061607030206.pdf>
6. Sharipbayev S.S., Mamatkarimov O.O., Axmadjonova M.X. Морфология фотоанодов DSSC и её влияние на эффективность фотоэлектрических преобразователей. // Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi. 2026, №4, 196–200-b. <https://journal.namdu.uz/file/2026061607030206.pdf>
7. Sharipbayev S.S. Влияние морфологии фотоанодов DSSC на характеристики фотоэлектрических преобразователей. // Fan va texnologiyalar taraqqiyoti. 2026, №2, 58–62-b. <https://journal.bstu.uz/index.php/FTT/en/issue/view/103>
8. Sharipbayev S.S., Mamatkarimov O.O. Three-dimensional X-ray tomographic analysis of single- and bilayer TiO₂ photoanodes for dye-sensitized solar cells. // Eureka Journal of Physical and Chemical Research. Volume 2, Issue 4, 2026. <https://eurekaoya.com/index.php/1/article/view/766>
9. Sharipbayev S.S. Influence of PEO/PMMA polymer electrolyte composition on charge transport and recombination dynamics in dye-sensitized solar cells. // American Innovator: Journal of Emerging Technologies and Research. Volume 1, Issue 3, 2026. <https://scientajournals.com/index.php/4/article/view/57>

II часть (2 bo‘lim; part 2)

10. Sharipbayev S.S., Abdukarimov A.A. Yuqori sezgir bo‘yoqli quyosh elementlari sifatini baholash usulini ishlab chiqish. // “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi, zamonaviy elektronika va energetikaning fundamental va amaliy muammolari” respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. 2024. 40–45-b. <https://anjumanlar.uz/conference/115>

11. Sharipbayev S.S. Методы создания и повышения эффективности сенсibilizированных красителем солнечных элементов на основе TiO₂. // “Farg‘ona viloyati hududiy elektr ta‘minoti tizimining energiya samaradorligini oshirish” mavzusidagi xalqaro ilmiy-texnik anjuman materiallari. 2025. 208–210-b.

12. Sharipbayev S.S., Abdukarimov A.A. Modern technology for dye-sensitized solar cells (DSSC) using TiO₂. // “Farg‘ona viloyati hududiy elektr ta‘minoti tizimining energiya samaradorligini oshirish” mavzusidagi xalqaro ilmiy-texnik anjuman materiallari. 2025. 226–228-b.

13. Sharipbayev S.S. Method for the manufacturing and optimization of dye-sensitized solar cells based on TiO₂. // International Conference “New Materials and Solar Technologies”. Institute of Materials Science, Academy of Sciences of Uzbekistan. 2025. 79–80-b. <https://imssolar.uz/wp-content/uploads/2025/06/%D0%A1%D0%91%D0%9E%D0%A0%D0%9D%D0%98%D0%9A-2025-IMS.pdf>

14. Sharipbayev S.S. Методика изготовления и оптимизации сенсibilizированных красителем солнечных элементов на основе TiO₂. // “Yashil iqtisodiyot uchun elektr mashinalari va yuritmalarining rivoji” mavzusidagi Respublika ilmiy-texnika anjumani materiallari. 2025. 544–546-b.

15. Sharipbayev S.S. Упрощённая технология сенсibilizированных солнечных элементов DSSC с применением однослойного TiO₂. // V Respublika ilmiy anjumani materiallari. 2025. 240–242-b.

16. Sharipbayev S.S. Simplified technology for dye-sensitized solar cells (DSSC) using a single-layer TiO₂. // “Energetika va energiya tejash muammolari” Respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari. 2025. 293–295-b.

17. Sharipbayev S.S., Axmadjonova M.X. Роль морфологии TiO₂ в работе сенсibilizированных красителем солнечных элементов. // “Yashil energetika, zamonaviy fizika hamda elektronikaning fundamental va amaliy muammolari” xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. 2026. <https://unilibrary.uz/articles/871542>

18. Монография // Шарипбаев С.С., Шарипбаев Э.Ю. Современные методы контроля качества солнечных элементов на основе TiO₂ и их промышленное применение. – ISBN: 978-9910-743-37-5.

Avtoreferat “Namangan davlat texnika universiteti ilmiy-texnika jurnali”
tahriridan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi
(17.08.2026 y.).

Bosishga ruxsat etildi: 17.08.2026 y.
Bichimi 60x84 1/16, «Times New Roman»
Garniturada raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i 3.0 Adadi: 60. Buyurtma: № 08/15
PRINT GRANIT bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko‘chasi 7-uy

