

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСИС»

Салогуб Татьяна Олеговна

РАЗРАБОТКА ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР
НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
МОЩНОСТИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ
ОСВЕЩЕННОСТИ

Специальность 2.2.3 – Технология и оборудование для производства
материалов и приборов электронной техники

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
проф., д.т.н. Саранин Данила Сергеевич

Москва – 2025

Общая характеристика работы

Актуальность. Спрос на портативные электронные устройства такие как устройства интернета вещей (IoT) и мелкая носимая электроника растет последние 10 лет. Рост числа IoT-устройств связан с развитием цифровой экономики, автоматизацией промышленности и бытовой сферы. По данным аналитической компании Statista, к 2025 году количество подключенных IoT-устройств в мире достигнет 75 миллиардов [1]. Носимая электроника, такая как умные часы и фитнес-трекеры, также демонстрирует устойчивый рост рынка, который, по прогнозам, превысит \$100 млрд к 2026 году (Grand View Research) [2]. Датчики Интернета вещей применяются во всех сферах деятельности человека и позволяют автоматизировать многие процессы в производстве, медицине, логистике, городской инфраструктуре и других областях. Эти тенденции подчеркивают необходимость разработки энергоэффективных решений для питания таких устройств.

Потребляемая мощность электронных беспроводных датчиков равна единицам микроватт (мкВт) и зависит от протокола связи (RFID, LoRA, BLE, ANT, ZigBee, WiFi и другие), по которому обеспечивается передача сигнала. Современные беспроводные датчики IoT требуют минимальной мощности для работы. Например, протоколы связи, такие как BLE (Bluetooth Low Energy), потребляют от 1 до 10 мкВт в режиме передачи данных [3]. Однако даже такие низкие энергозатраты становятся проблемой при массовом использовании устройств, особенно в удаленных или труднодоступных местах, где замена батареек или прокладка электрических сетей экономически нецелесообразна.

Оптимальный выбор источника энергии должен основываться на характеристиках окружающей среды, в которой функционируют датчики Интернета вещей (IoT). Устройства IoT могут работать в различных условиях: от помещений с искусственным освещением до открытых пространств с естественным светом. Например, датчики в умных домах или офисах часто находятся в условиях низкой освещенности, что требует разработки источников энергии, способных эффективно работать в таких условиях [4]. Стандартные параметры в типичных закрытых помещениях: температура около 25 °C, атмосферное давление равное 1 атм., уровень освещенности колеблется от 100 до 1000 люкс, а цветовая температура варьируется от 1500 К до 7200 К. Эти условия создаются с помощью обычных источников искусственного света, включая лампы накаливания, ксеноновые, галогенные, люминесцентные и светодиодные устройства. Поэтому актуален поиск решений, адаптированных к конкретным условиям эксплуатации.

Среди различных видов источников искусственного освещения светодиодные лампы (LED), наиболее распространенные на мировом рынке. Светодиодные лампы занимают более 60% мирового рынка освещения благодаря своей энергоэффективности и

долговечности. По данным Международного энергетического агентства (IEA), к 2030 году LED-освещение станет доминирующим источником света в мире [5]. Это делает их идеальным источником энергии для фотопреобразователей, используемых в IoT-устройствах, работающих в помещениях. Несмотря на высокую стоимость производства светодиодных ламп, по сравнению с другими технологиями, LED-лампы обеспечивают более длительный срок службы и высокую световую эффективность излучения по сравнению с лампами накаливания, флуоресцентными, галогеновыми источниками света. Белые светоизлучающие диоды могут быть изготовлены в широком диапазоне цветовых температур от теплого до холодного (1500 – 7200) К.

Оптимальным решением проблемы энергообеспечения устройств интернета вещей (IoT) является использование автономных источников питания, способных преобразовывать различные виды энергии, такие как механическая, тепловая или световая, в электрическую энергию [2]. Среди таких источников наиболее перспективными на сегодняшний день считаются фотовольтаические батареи, которые активно развиваются благодаря своим высоким показателям эффективности и относительно низкой стоимости. В последние годы мировое научное сообщество сосредоточено на разработке и совершенствовании нескольких направлений фотовольтаических технологий, которые условно делятся на три поколения:

1. **Первое поколение** – технологии на основе кристаллического кремния (c-Si) и полупроводниковых материалов группы A^{III}B^V с одним или несколькими гетеропереходами;
2. **Второе поколение** – тонкопленочные технологии, включающие материалы на основе аморфного кремния (a-Si:H), теллурида кадмия (CdTe), селенида меди-индия-галлия (CIGS), а также селенида меди-цинка-олова (CZTS);
3. **Третье поколение** – инновационные решения, такие как тонкие пленки органических соединений, сенсibilизированные красителями (DSSC), а также перовскитные материалы, включая галогенидные перовскиты.

Фотопреобразователи из каждой группы были протестированы в работе в условиях низкой освещенности. Результаты в условиях искусственного света показали фотопреобразователи третьего поколения: ФП на основе органических полупроводниковых материалов (ОСЭ) показали КПД 36,5 %; ячейки Гретцеля – 25,3 %. Однако передовыми фотопреобразователями (ФП) в развитии тонкопленочной фотовольтаики в последние годы являются фотопреобразователи на основе гибридных перовскитов, которые достигли значения КПД 45,5 % при работе под светодиодным излучением и являются одной из наиболее перспективных технологий преобразования света искусственных источников

излучения [5].

Органо-металлические перовскиты представляют собой перспективный класс материалов для создания солнечных элементов, сочетающих высокую эффективность и низкую себестоимость [5]. По сравнению с традиционными твердотельными фотоэлектрическими технологиями, перовскитные структуры обладают рядом ключевых преимуществ:

- высокая поглощающая способность – коэффициент поглощения перовскитного слоя достигает $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ [6];
- гибкость настройки оптических свойств – ширина запрещённой зоны (ШЗЗ) может регулироваться в диапазоне от 1,1 до 2,5 эВ за счёт варьирования состава галогенов или органических компонентов [5, 7–9];
- низкотемпературный синтез – процесс формирования слоев осуществляется при умеренных температурах (25–300 °C) [10];
- высокая подвижность носителей заряда по сравнению с органическими СЭ – значения подвижности электронов и дырок составляют (2–10) $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и (5–12) $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ соответственно [12, 13];
- технологическая масштабируемость – производство перовскитных фотоэлементов может осуществляться методами печати с использованием концепций «roll-to-roll» или «sheet-to-sheet», что снижает капитальные затраты (CAPEX) [14, 15].

Исследования показывают, что перовскитные фотоэлементы способны эффективно работать при освещенности ниже 200 люкс, что соответствует условиям слабого искусственного освещения в помещениях. Это возможно из-за того, что наличие рекомбинационных центров в перовскитном преобразователе не влияет на эффективность переноса носителей заряда при низком уровне инжекции (низкой освещенности). Высокое значение времени жизни носителей заряда в перовскитном слое связано с несколькими факторами, такими как: низкая скорость безызлучательной рекомбинации [16] низком заряде или нейтральном состоянии [17]; экранирование заряженных дефектов из-за высокой диэлектрической проницаемости гибридного перовскита [18]; образование связанных дефектов, которые не оказывают влияния на электронное строение [19,20].

Однако существуют и проблемы коммерциализации перовскитной технологии. Одной из них является деградация ФП вследствие наличия эффекта гистерезиса вольтамперных характеристик (ВАХ), которое возникает в том числе из-за наличия электрически активных дефектов на гетеропереходе ДТС/перовскит. Наличие отрицательно- и положительно-заряженных дефектов на границе с перовскитом с двух сторон порождает электрическое поле внутри светопоглощающего слоя, которое будет разделять не только электроны и

дырки, но и способствовать миграции ионов. Для интеграции перовскитной технологии в IoT девайсы необходимо разработать как стабильные простые и масштабируемые методы изготовления гетероструктуры ДТС/перовскит, так и синтезировать стабильные составы перовскита.

Важным аспектом при разработке технологии является оптимизация оптических свойств активного слоя под спектры излучения искусственных источников излучения для повышения КПД. Спектр излучения светодиодных ламп лежит в диапазоне длин волн (400 – 700) нм, таким образом для достижения минимальных электрических потерь край поглощения ФП должен быть не более 700 нм (ширина запрещенной зоны $< 1,77$ эВ). Частичное замещение аниона йода на анионы брома и хлора в составе перовскита позволяет варьировать значение ширины запрещенной зоны перовскита и таким образом «настраивать» поглощение на конкретный спектр излучения.

Спектры искусственных источников излучения имеют различный вид не только при сравнении типов ламп, но и при сравнении одного типа ламп, но с различной цветовой температурой. В периодической литературе множество отчетов об эффективности смешанных ФП при свете различных ламп и степени освещенности, однако влияние цветовой температуры источника освещения на выходные характеристики ФП еще не исследовались.

В контексте решения озвученных проблем необходима разработка технологии изготовления фотопреобразователя со стабильной архитектурой устройства и стабильным химическим составом перовскита, подходящим для работы в условии низкой освещенности.

Достижение этой цели позволит создать энергоэффективные и экономически выгодные источники энергии для IoT-устройств, что будет способствовать дальнейшему развитию технологий интернета вещей и носимой электроники.

Степень разработанности темы исследования. Анализ степени разработанности темы исследования свидетельствует о ее высокой актуальности и динамичном развитии, что подтверждается активным международным научным дискурсом, отраженным в материалах конференций PERENHAR-2020, MAPPIC и других форумов, на которых были апробированы результаты данной работы. Несмотря на значительный прогресс в области перовскитной фотовольтаики, подробно отраженный в многочисленных публикациях, ключевые аспекты, связанные с оптимизацией фотопоглощающих слоев для работы в специфических условиях низкой освещенности светодиодных источников с варьируемой цветовой температурой, остаются недостаточно изученными. Существенный пробел заключается в отсутствии комплексных методик, направленных на одновременное

повышение эффективности и подавление паразитных явлений в р-і-n фотопреобразователях для данного применения. Таким образом, представленное диссертационное исследование, все экспериментальные результаты которого были самостоятельно получены и верифицированы автором, направлено на восполнение данного пробела.

Цель работы

Разработка основ технологии изготовления гетероструктур ДТС/перовскит и оптимизации оптических свойств фотопоглощающего слоя для повышения КПД и минимизирования паразитных явлений р-і-n фотопреобразователей при работе в условиях низкой освещенности светодиодных ламп с цветовой температурой в диапазоне (1700 – 6500) К.

Для достижения цели данной работы решались следующие задачи

1. Разработка жидкофазного синтеза и технологических процессов нанесения слоя оксида никеля (NiO_x) для формирования гетероструктуры NiO_x /перовскит в составе перовскитного фотоэлектрического преобразователя
2. Выбор оптимальной ширины запрещенной зоны перовскитного слоя для работы в условиях низкой освещенности светодиодного излучения. Расчет предела Шокли-Квиссера для светодиодного источника излучения.
3. Синтез, отработка технологии жидкостного нанесения слоев четырех составов перовскита с ШЗЗ от 1,60 эВ до 1,97 эВ. Выбор оптимальной толщины перовскитного поглотителя для работы ФЭП в условиях низкой освещенности.
4. Расчет падающей мощности от светодиодного источника освещения на поверхность перовскитного ФЭП.
5. Определение зависимости численных параметров выходных характеристик р-і-n фотопреобразователей на основе перовскита (напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, фактор заполненности и КПД) от ШЗЗ перовскита.
6. Определение зависимости численных параметров выходных характеристик р-і-n фотопреобразователей на основе перовскита (напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, фактор заполненности и КПД) от цветовой температуры падающего света.

Научная новизна работы

- 1) Впервые разработана и экспериментально обоснована методика жидкофазного синтеза сплошных слоев NiO_x для формирования стабильных гетероструктур с перовскитным слоем, обеспечивающая отсутствие гистерезиса вольт-амперных

характеристик при низкой освещенности (100 – 1000) люкс. Установлено, что оптимальная температура пиролиза (300 °С) позволяет достичь контактного сопротивления (1 – 2) Ом·см², что на 50 % ниже аналогов.

2) Выявлена и количественно оценена зависимость КПД перовскитных элементов от цветовой температуры LED-освещения (1700 – 6500 К) для материалов с разной шириной запрещенной зоны (1,60 – 1,97) эВ. Доказано, что максимальный КПД (36,1 %) достигается при 1700 К для перовскита с $E_g = 1,72$ эВ, что обусловлено минимизацией спектрального рассогласования.

3) Разработана инвертированная структура перовскитного фотопреобразователя с неорганическим транспортным слоем NiO_x и оптимальной толщиной активного слоя (350 нм), обеспечивающая рекордную выходную мощность 90,2 мВт/см² при 1000 люкс. Установлено, что такая конфигурация подавляет поверхностную рекомбинацию на 30% по сравнению с нанопористыми аналогами.

4) Впервые проведен комплексный анализ пределов Шокли-Квайссера для LED-освещения, который показал, что перовскиты с $E_g = 1,72$ эВ имеют минимальные электрические потери при преобразовании искусственного света. Теоретические расчеты подтверждены экспериментальными данными для Cs-содержащих составов.

Объекты и методы исследования

Исследовались планарные p-i-n перовскитные солнечные элементы со структурой стекло/ITO/ NiO_x /перовскит/ $\text{PC}_{60}\text{BM}(\text{C}_{60})/\text{Cu}$. Ширина запрещенной зоны (1,6 – 1,97) эВ регулировалась Вг-анионным замещением в одно-, двух- и трехкатионных перовскитах.

Морфология, оптические и структурные свойства изучались с помощью сканирующей электронной микроскопии, УФ-видимой спектрофотометрии и рентгеновской дифрактометрии. Фотоэлектрические параметры (напряжение холостого хода, плотность тока короткого замыкания, фактор заполнения, эффективность) определялись по вольт-амперным характеристикам и спектрам внешней квантовой эффективности.

Комплексный анализ выявил взаимосвязь между катионным составом, структурой перовскита и функциональными характеристиками элементов. Использование транспортных слоев NiO_x и $\text{PC}_{60}\text{BM}(\text{C}_{60})$ с медным электродом обеспечило воспроизводимость результатов и установление ключевых закономерностей.

Практическая значимость работы

- 1) Разработана технология жидкофазного синтеза NiO_x -слоев, позволяющая создавать стабильные перовскитные элементы для IoT-устройств с КПД до 36 % при низкой освещенности. Метод исключает дорогостоящие вакуумные процессы, снижая себестоимость на 30 %, и обеспечивает воспроизводимость параметров при масштабировании.
- 2) Созданы прототипы перовскитных фотопреобразователей с КПД до 36,1 % при LED-освещении (1700 K), что на (20 – 28) % превышает показатели коммерческих аналогов. Устройства демонстрируют стабильную работу при типичных условиях эксплуатации IoT-датчиков (25 °C, 1 атм).
- 3) Разработаны рекомендации по выбору оптимальных параметров перовскитных структур ($E_g = (1,72 - 1,82)$ эВ, толщина 350 нм) для различных сценариев применения.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Гетероструктура NiO /перовскит MAPbI₃, изготовленная в высокотемпературном жидкостном процессе, позволяет устранить эффекты гистерезиса в экспериментальных условиях.
- Расчет условий предела Шокли-Квайзера выявил оптимальный край собственного поглощения перовскита с ШЗ 1,82 эВ при освещении светодиодными источниками белого свечения.
- ФЭП на основе широкозонного цезий содержащего перовскита, изготовленный методом жидкофазной кристаллизации, достигает КПД фотоэлектрического преобразования 36,1 % при излучении белого света с цветовой температурой 1700 K.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в данной диссертационной работе, были получены автором в ходе самостоятельных экспериментальных исследований в лаборатории перспективной солнечной энергетики НИТУ "МИСИС". Личный вклад автора включает полный цикл научной работы: от постановки целей и задач исследования до интерпретации конечных результатов. Автором самостоятельно разработаны методики синтеза и нанесения функциональных слоев, осуществлено изготовление всех исследуемых перовскитных структур, проведены измерения их фотоэлектрических характеристик, включая световые и темновые вольт-амперные характеристики, спектры внешней квантовой эффективности, а также структурные и морфологические исследования. Особое внимание было уделено оптимизации состава перовскитных материалов и технологии формирования многослойных структур. Все представленные экспериментальные данные получены

автором лично, методики измерений адаптированы для решения конкретных задач исследования, а анализ результатов проведен с использованием современных подходов к обработке научных данных. Интерпретация наблюдаемых закономерностей и выводы работы основаны исключительно на собственных экспериментальных результатах автора.

Апробация работы

Основные научные результаты диссертационного исследования были представлены автором на ряде престижных международных научных форумов, включая конференцию "Perovskites for Energy Harvesting: From Fundamentals to Devices (PERENHAR-2020)", конференцию ШОС 2020, а также на Второй (2020 г.) и Третьей (2021 г.) Московских осенних международных конференциях по перовскитной фотовольтаике (МАРРИС), проводившихся на базе МГУ имени М.В. Ломоносова. По материалам проведенных исследований опубликованы 3 статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных SCOPUS и Web of Science, а также 4 тезиса докладов, отражающие ключевые аспекты выполненной работы. Представленные на конференциях результаты получили положительную оценку научного сообщества и способствовали обсуждению актуальных вопросов в области перовскитной фотовольтаики. Достоверность результатов работы подтверждается актом о внедрении результатов диссертации в процесс выполнения научных исследований и разработок предприятия АО «НИИП», г. Лыткарино.

Структура и объем работы

Диссертационная работа структурно состоит из введения, пяти основных глав, заключения и библиографического списка, включающего 62 литературных источников. Общий объем работы составляет 67 страниц напечатанного текста, содержащего 42 иллюстраций, 6 таблиц, 14 математических формул и 1 приложение.

Материал изложен в соответствии с логикой проведенного исследования: от анализа современного состояния проблемы и обоснования выбора методик эксперимента через детальное рассмотрение полученных результатов к их комплексной интерпретации и выводам. Визуализация данных представлена в виде отобранных иллюстраций и таблиц, способствующих наглядному восприятию ключевых результатов работы.

Основное содержание диссертационной работы

Во введении приведены аргументы для обоснования актуальности темы исследований, связанной с разработкой энергоэффективных источников питания для устройств интернета вещей (IoT) и носимой электроники в условиях низкой искусственной

освещенности. Обоснована степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, апробация работы, а также представлена информация о структуре и объеме диссертации.

Первая глава диссертации посвящена аналитическому обзору современных исследований в области перовскитной фотовольтаики. В ней рассмотрены оптические и полупроводниковые свойства галогенидных перовскитов, принципы работы перовскитных фотопреобразователей с p-i-n структурой, а также многофакторная природа гистерезисных явлений в таких элементах, включая ионную миграцию и сегнетоэлектрические свойства материалов. Особое внимание уделено перспективам применения перовскитных структур в условиях искусственного освещения.

Вторая глава описывает технологию изготовления и испытания перовскитных фотопреобразователей. Представлены методы оценки эксплуатационных характеристик солнечных элементов при искусственном свете, расчет энергетической эффективности фотоэлектрических преобразователей, комплексный анализ с использованием двухдиодной физической модели, а также описание аппаратно-измерительного комплекса исследования.

В данной главе подробно описан **разработанный комплексный технологический маршрут** изготовления планарных перовскитных солнечных элементов (ПСЭ), который включает в себя:

1. **Пикселизацию** прозрачного проводящего слоя (ITO) на стеклянных подложках методом лазерной резки и химического травления.
2. **Многостадийную** ультразвуковую и УФ-озоновую **очистку** подложек.
3. Технологию нанесения функциональных слоев методом центрифугирования в контролируемых условиях:
 - 3.1 **Дырочно-транспортного слоя** (ДТС) на основе оксида никеля (NiO) из двух типов прекурсоров (золь-гель и дисперсия наночастиц),
 - 3.2 **Активного слоя из гибридных перовскитов** (MAPi и трехкатионного CsFAMA) с оптимизированными режимами кристаллизации (скорости вращения, момент и объем сброса антирастворителя – хлорбензола, температурные режимы отжига).
 - 3.3 **Электронно-транспортного слоя** (PCBM) и блокирующего слоя (BCP).
4. **Напыление металлических электродов** методом термического испарения в вакууме.
5. **Инкапсуляцию** готовых устройств для стабилизации их характеристик.

Для реализации технологии использован *комплекс специализированного оборудования*: лазерный резак, центрифуги, перчаточный бокс с инертной атмосферой (O₂

$< 0.1 \text{ ppm}$, $\text{H}_2\text{O} < 1 \text{ ppm}$), установки термического напыления, что гарантирует воспроизводимость и высокое качество получаемых слоев.

Разработана методика оценки эффективности ПСЭ в условиях, имитирующих работу при искусственном освещении в помещении (100-1000 лк).

Создана *специализированная экспериментальная установка* (светонепроницаемый бокс с регулируемым светодиодным источником и калибровочным люксметром), позволяющая с высокой точностью ($\pm 1\%$ по току/напряжению) снимать вольт-амперные характеристики.

Представлена *методика расчета плотности падающей мощности* и КПД для источников света с разной цветовой температурой (2700 – 6500) К.

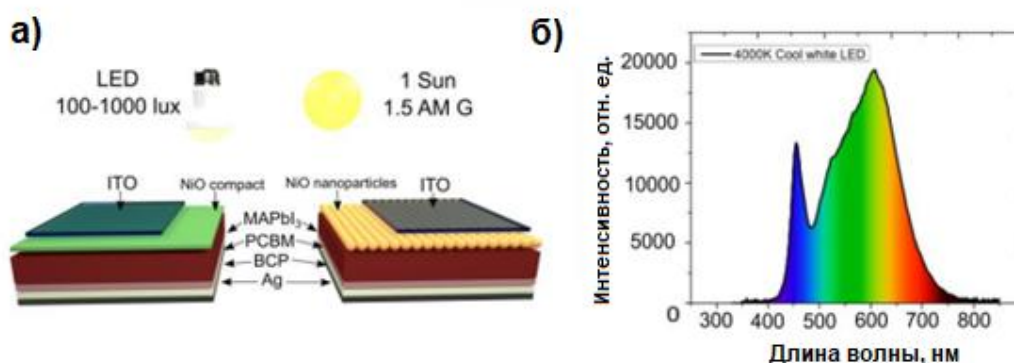
Для глубокого анализа характеристик устройств *применена и настроена двухдиодная физическая модель*, позволяющая точнее описывать поведение p-i-n структур по сравнению с классической однодиодной моделью. Разработанный алгоритм на основе метода координатного спуска позволяет точно экстрагировать ключевые параметры солнечных элементов.

Третья глава содержит результаты исследования корреляции параметров дырочно-транспортного слоя с характеристиками перовскитных солнечных элементов. Проведен структурно-морфологический анализ ДТС-материалов и их электрофизических свойств, экспериментальное определение рабочих параметров фотоэлектрических преобразователей, анализ темновых характеристик и механизмов рекомбинации, а также оценка показателей энергопреобразования в условиях искусственного света.

Была разработана и изготовлена серия p-i-n структур со следующей архитектурой: **стекло/ITO/NiO/перовскит ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)/PCBM/BSP/Ag**. В качестве активной задачи стояло сравнение двух технологий формирования ДТС:

1. **Сплошные слои (c-NiO)**, синтезированные методом жидкофазного нанесения прекурсора – трис-(этилендиамин)ацетата никеля(II) (TED-NiA) – с последующим *пиролизом при 300°C* на воздухе. Данная температура была выбрана как максимально допустимая для сохранения целостности и проводимости ITO-электрода.
2. **Нанопористые слои (np-NiO)**, сформированные методом низкотемпературного ($\leq 100^\circ\text{C}$) нанесения водной дисперсии готовых наночастиц NiO.

Такой подход позволил оценить не только влияние морфологии слоя, но и применимость низкотемпературных процессов, критически важных для интеграции с гибкими подложками. Структуры ПСЭ исследуемых в работе представлены на рисунке 1.



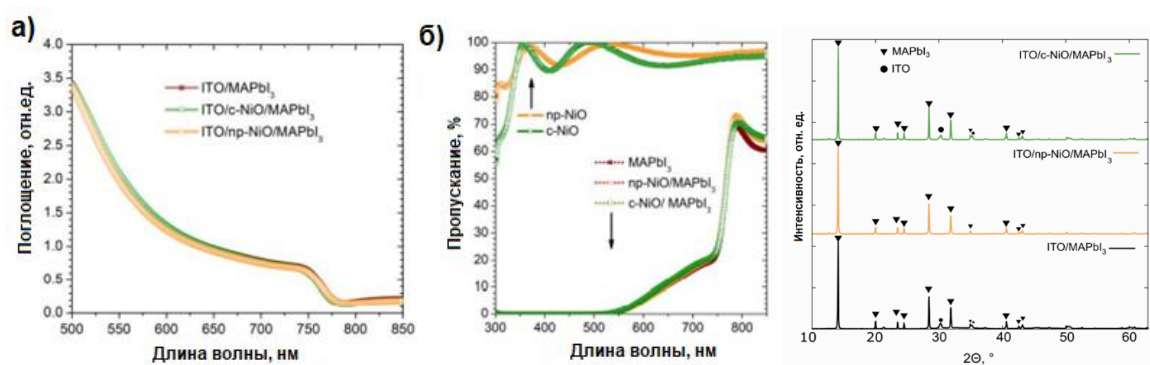
а – схематическое изображение разработанных архитектур перовскитных фотоэлементов;
 б – Нормированный спектр излучения светодиодного источника (цветовая температура 4000 K), использованного в экспериментах

Рисунок 1 – Конструктивные особенности разработанных перовскитных солнечных элементов и спектральные характеристики искусственного освещения

Комплексный анализ методами АСМ, СЭМ и ПЭМ выявил фундаментальные различия в структуре слоев:

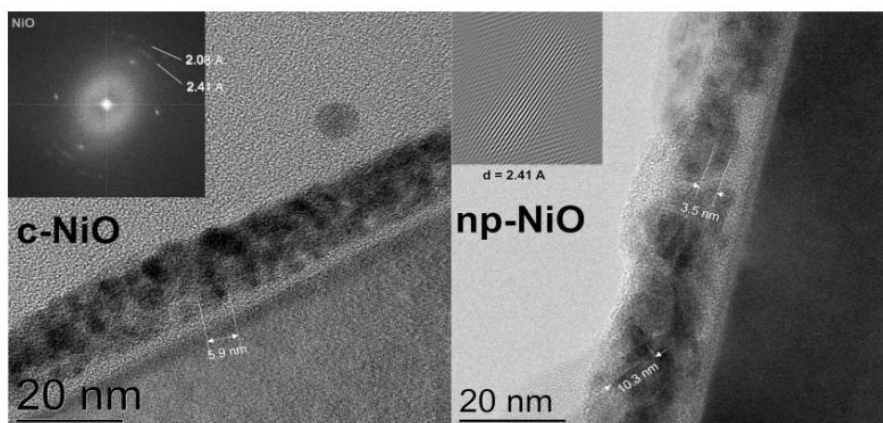
1. **c-NiO:** Формирует более гладкие (шероховатость ~ 15 нм), плотные, нанокристаллические пленки с меньшим размером кристаллитов ($\sim 5,9$ нм). РФЭС-анализ подтвердил чистоту фазы – слой состоит преимущественно из стехиометрического NiO.
2. **np-NiO:** Характеризуется развитой пористой структурой с высокой шероховатостью (до 40 нм) и большим разбросом размеров кристаллитов (3,5 – 10,5) нм. Ключевая технологическая особенность, выявленная РФЭС, – наличие на поверхности фазы Ni(OH)_2 .

Эти структурные различия напрямую определили электрофизические свойства синтезированных покрытий. Слой np-NiO продемонстрировал на порядок меньшее удельное сопротивление ($\sim 2 \cdot 10^4$ Ом·см) по сравнению с c-NiO ($\sim 6 \cdot 10^5$ Ом·см). Это объясняется сочетанием большего размера кристаллитов (меньшая плотность границ зерен) и высокой ионной подвижностью в поверхностном гидроксидном слое. Несмотря на лучшее сопротивление, именно c-NiO-устройства показали рекордные характеристики при низкой освещенности. Оптические и структурные характеристики исследуемых слоев ДТС и перовскита представлены на рисунках 2-4.



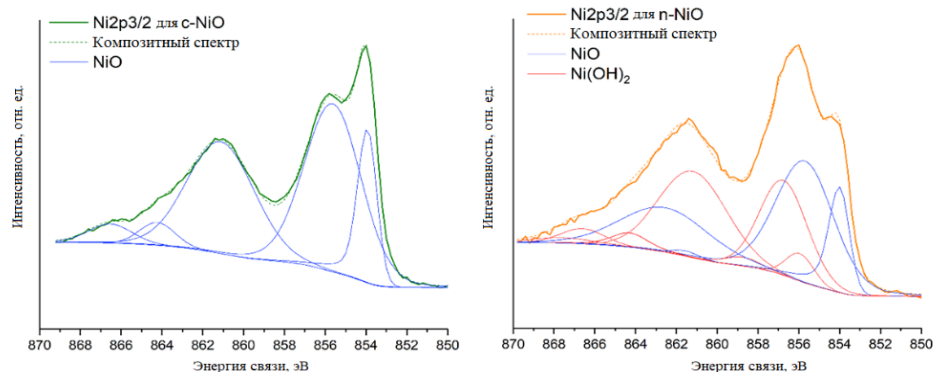
а – спектры поглощения структур ИТО/ДТС/перовскит для трех различных материалов ДТС; б – спектры пропускания пленок ДТС и композита ДТС/перовскит; в – рентгенограммы, полученные с использованием $\text{Cu K}\alpha$ -излучения

Рисунок 2 – Оптические и структурные характеристики исследуемых слоев ДТС и перовскита



а – сплошной слой c-NiO; б – нанопористый слой np-NiO

Рисунок 3 – Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) поперечных срезов слоёв оксида никеля на кремниевых подложках



а – спектр c-NiO (зеленая линия) с аппроксимацией мультиплетом NiO;

б – спектр np-NiO (оранжевая линия) с аппроксимацией суммой мультиплетов NiO и Ni(OH)₂

Рисунок 8 – Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) спектров Ni 2p_{3/2} для с-NiO и np-NiO

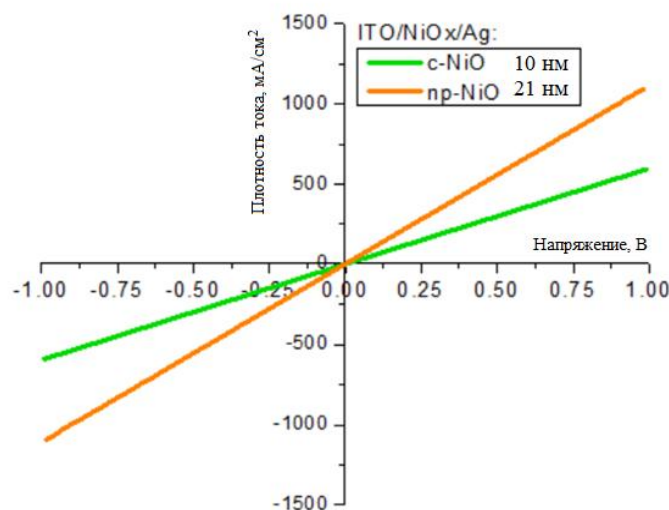
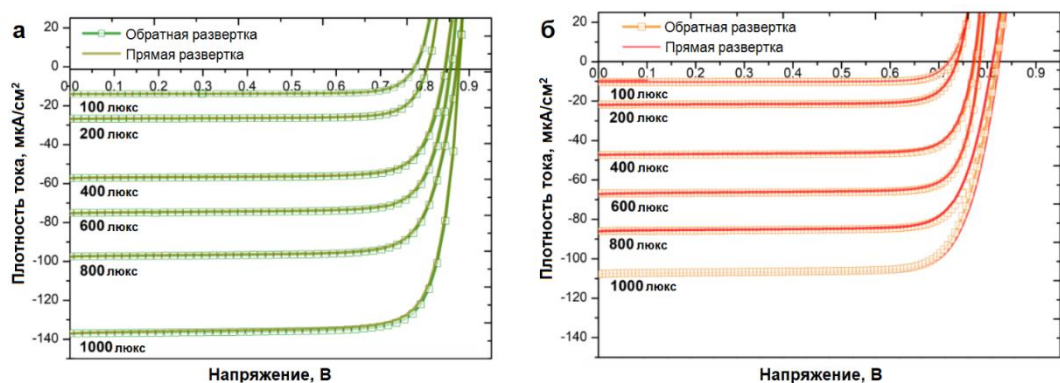


Рисунок 4 – Сравнение вольт-амперных зависимостей для различных архитектур дырочно-транспортных слоев

Таблица 1 – Результаты расчета удельного сопротивления тонкопленочных дырочно-транспортных слоев

Тип ДТС	Толщина пленки, нм	Сопротивление, Ом·см
с-NiO	10 ± 2	2,34·10 ⁵
np-NiO	21 ± 3	5,98·10 ⁴

Детальные электрические измерения, представленные на рисунке 4 и в таблице 1, при светодиодном освещении (LED) (4000 К, 100 - 1000 лк) выявили однозначное превосходство структур на основе с-NiO. Устройства с с-NiO стабильно показывали на (20 – 28) % более высокую выходную мощность. При освещенности 1000 лк среднее значение для с-NiO составило 90,2 мкВт/см² против 71,6 мкВт/см² для np-NiO. Максимальное достигнутое значение – 98,4 мкВт/см². Вольтамперные характеристики представлены на рисунке 5 и в таблицах 2, 3.



а – сплошной слой с-NiO; б – нанопористый слой pr-NiO;

Рисунок 5 – Электрические характеристики перовскитных солнечных элементов при искусственном освещении (LED, 4000 K)

Таблица 2 – Сводные электрофизические параметры устройств с компактным NiO-ДТС

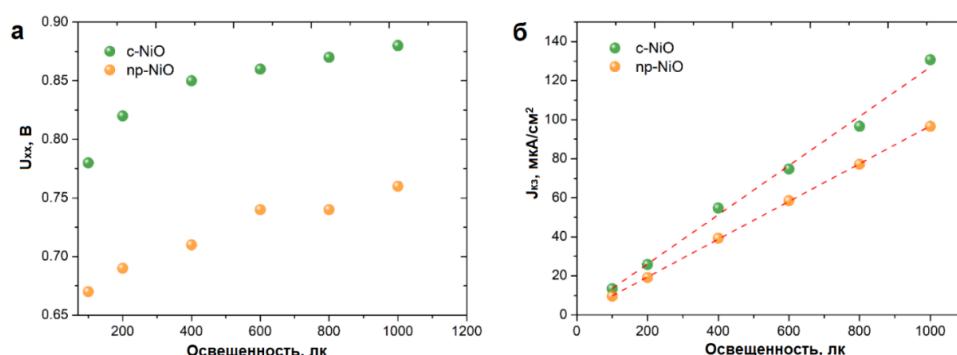
LED 4000 K		Сплошной слой NiO				
Освещенность		U_{xx} , В	J_{K3} , мкА/см ²	FF, %	P_{max} , мкВт/см ²	КПД, %
100 люкс	Среднее	0,78	-13,4	78	8,2	27,3
	Лучшее	0,79	-14,1	80	8,9	29,6
200 люкс	Среднее	0,82	-25,7	79	16,7	28,0
	Лучшее	0,84	-26,9	81	17,4	29,1
400 люкс	Среднее	0,85	-54,7	79	30,5	30,5
	Лучшее	0,88	-52,3	80	32,5	32,5
600 люкс	Среднее	0,86	-74,7	80	51,3	28,6
	Лучшее	0,88	-76,6	82	57,9	32,5
800 люкс	Среднее	0,87	-96,6	79	66,6	27,3
	Лучшее	0,88	-97,7	80	67,5	28,2
1000 люкс	Среднее	0,88	-130,7	79	90,2	30,1
	Лучшее	0,89	-139,6	81	98,4	32,9
		U_{xx} , В	J_{K3} , мА/см ²	FF, %	P_{max} , мВт/см ²	КПД, %
1,5 AM G	Лучшее	1,05	-19,5	80	16,3	16,3

Таблица 3 – Сравнительные характеристики устройств с нанопористым NiO-ДТС

LED 4000 K		Слой наночастиц NiO				
Освещенность		U_{xx} , В	J_{K3} , мкА/см ²	FF, %	P_{max} , мкВт/см ²	КПД, %
100 люкс	Среднее	0,73	-10,1	79	5,8	19,5
	Лучшее	0,75	-10,4	80	6,1	20,1
200 люкс	Среднее	0,74	-21,1	79	12,0	20,1
	Лучшее	0,76	-22,1	81	13,1	21,9
400 люкс	Среднее	0,77	-45,2	77	28,4	23,7
	Лучшее	0,79	-47,3	79	30,4	25,4
600 люкс	Среднее	0,78	-65,3	78	41,3	23,0
	Лучшее	0,80	-66,9	80	43,4	24,1
800 люкс	Среднее	0,80	-87,2	80	54,2	22,6

	Лучшее	0,82	-90,0	82	57,4	24,0
1000 люкс	Среднее	0,80	-111,0	81	71,6	23,9
	Лучшее	0,82	-114,0	82	75,5	25,2
		U_{xx} , В	$J_{кз}$, мА/см ²	FF, %	$P_{\text{макс}}$, мВт/см ²	КПД, %
1,5 AM G	Лучшее	1,04	-18,0	81	15,1	15,1

Для с-NiO был зафиксирован КПД до 32,9 % при 1000 лк, что существенно выше, чем у аналогов с np-NiO (25,2 %). Напряжение холостого хода U_{xx} для с-NiO был стабильно выше на (5 – 7) % в диапазоне низких освещенностей (100 – 400 лк), достигая 0,88 В при 1000 лк. Зависимости тока короткого замыкания и напряжения холостого хода представлены на рисунке 6.



а – напряжение холостого хода U_{xx} ; б – плотность тока короткого замыкания $J_{кз}$

Рисунок 6 – Влияние интенсивности освещения на ключевые параметры

Технологическое объяснение парадокса низкой проводимости слоев с-NiO, на которых достигнуты высокие выходные параметры устройств, кроется в качестве границы раздела NiO/перовскит. Анализ темновых ВАХ (рисунок 7, таблица 4) с использованием двухдиодной модели показал на порядок меньшие токи насыщения (J_0) для с-NiO ($\sim 10^{-8}$ А/см² против $\sim 10^{-7}$ А/см² для np-NiO), что указывает на эффективное подавление рекомбинации. Меньшие коэффициенты неидеальности диода (2,67 – 2,83) для с-NiO против (3,19 – 3,86) для np-NiO, что свидетельствует о сниженном вкладе поверхностной рекомбинации через ловушки. Более высокое шунтирующее сопротивление (R_{sh}) структур на основе с-NiO подтверждает меньшее количество токов утечки.

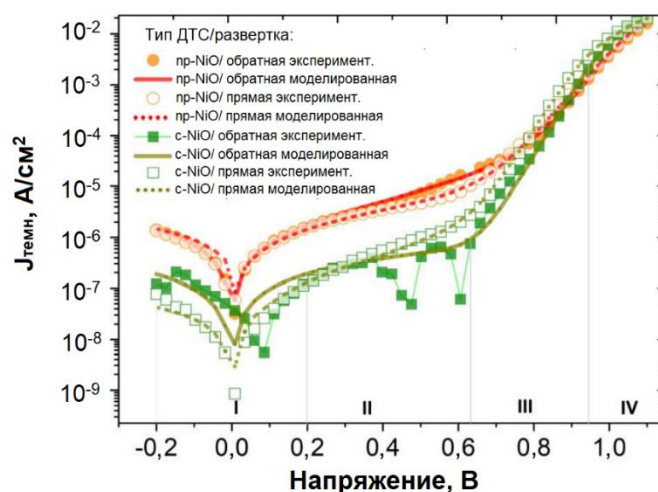


Рисунок 7 – Темновые характеристики устройств с различными ДТС при прямом/обратном сканировании

Таблица 4 – Параметры темновых характеристик, полученные при моделировании

Тип ДТС/Тип развертки	m_1	m_2	m (m_1+m_2)	J_{01} , нА/см ²	J_{02} , нА/см ²	R_s , Ом·см ²	R_{sh} , МОм·см ²
Нр-NiO/обратная развертка	1,631	1,562	3,194	60,3	300	1,99	0,140
Нр-NiO/прямая развертка	1,945	1,915	3,860	456	488	1,00	0,185
с-NiO/обратная развертка	1,340	1,330	2,670	4,61	5,71	3,15	1,1
с-NiO/прямая развертка	1,432	1,399	2,831	8,24	28,7	4,00	5,80

Таким образом, гладкая и химически чистая поверхность с-NiO, полученная пиролизом при 300°C, формирует более качественный, рекомбинационно-пассивный контакт с перовскитом, что является критически важным фактором в условиях низкой инжекции носителей заряда (низкая освещенность).

Экспериментально установлено строгое ограничение по толщине для с-NiO – не более 10 нм. Превышение этой величины приводит к резкому росту последовательного сопротивления, появлению S-образной деформации ВАХ и деградации всех выходных параметров из-за омических потерь. Нанопористый нр-NiO допускает большую толщину (~20 нм) благодаря лучшей собственной проводимости.

Проведенные исследования позволяют сделать основной **технологический вывод**: для создания высокоэффективных ПСЭ, предназначенных для работы в условиях низкой

искусственной освещенности, целесообразно использовать **компактные слои NiO, синтезированные методом пиролиза жидкостного прекурсора при 300°C.**

Несмотря на большее удельное сопротивление, именно сплошные слои обеспечивают формирование идеально гладкого и химически стабильного интерфейса с перовскитом, что минимизирует поверхностную рекомбинацию – основной фактор потерь при низких уровнях освещения. Разработанная технология обеспечивает воспроизводимое получение слоев оптимальной толщины (< 10 нм) и позволяет достигать рекордных для р-і-п архитектур значений выходной мощности (~ 100 мкВт/см²) и КПД (~ 33 %) в условиях, актуальных для питания IoT-устройств.

Низкотемпературный метод получения пр-NiO, хотя и уступает в эффективности, представляет самостоятельную ценность для разработки гибких и термочувствительных устройств, открывая путь к интеграции перовскитной фотовольтаики с новыми типами подложек.

Проведенный сравнительный анализ с литературными данными [11,18] демонстрирует конкурентоспособность разработанных структур, особенно в области низких освещенностей (< 800 люкс, рисунок 8). Устройства с с-NiO демонстрируют рекордные значения максимальной мощности при 600 люкс, превосходя все известные аналоги с р-і-п архитектурой. Полученные результаты подтверждают перспективность использования компактных слоев NiO для создания высокоэффективных перовскитных солнечных элементов, работающих в условиях искусственного освещения.

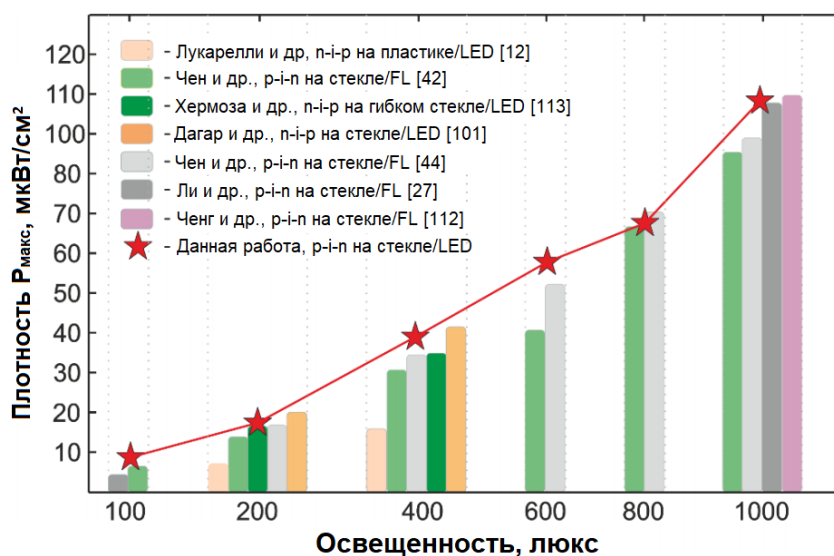


Рисунок 8 – Сравнительный анализ максимальной мощности различных архитектур ПСЭ при слабом освещении

Для количественной оценки работоспособности фотоэлектрических устройств в условиях внутреннего освещения был проведен расчет коэффициента полезного действия на основе спектральных характеристик используемой светодиодной лампы (рисунок 9). Методика расчета следовала установленному протоколу, детально описанному в работе [29], и учитывала как абсолютные значения освещенности, так и спектральное распределение энергии излучения.

Исследованные фотоэлектрические структуры демонстрируют высокую эффективность преобразования энергии в широком диапазоне освещенности (100-1000 люкс). Устройства на основе компактного NiO (с-NiO) стабильно превышают 28 % КПД, достигая максимального значения 32,9 % при 1000 люкс. Такие показатели свидетельствуют о незначительном влиянии ловушечных состояний на рабочие характеристики даже в условиях слабого освещения [54]. В случае нанопористого NiO (np-NiO) эффективность варьируется в пределах (20 – 26) %, что тем не менее представляет значительный практический интерес.

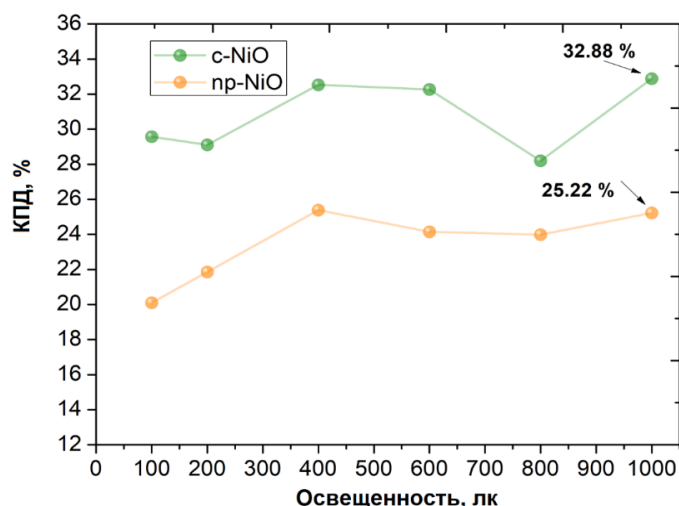
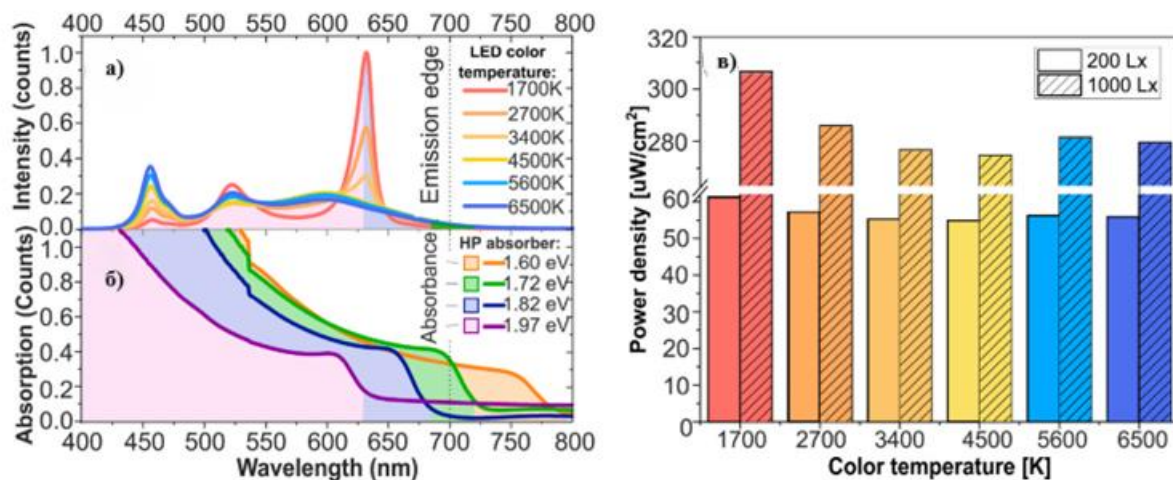


Рисунок 9 – Зависимость эффективности преобразования от интенсивности искусственного освещения

В четвертой главе диссертационной работы представлены результаты комплексного исследования влияния спектрального состава искусственного освещения, определяемого его цветовой температурой (в диапазоне 1700 – 6500 К), на вольт-амперные характеристики и эффективность преобразования энергии тонкопленочными перовскитными фотоэлементами с варьируемой шириной запрещенной зоны (1,60 – 1,97) эВ.

Целью главы являлась оптимизация фотоактивных материалов и архитектуры устройств для применения в качестве автономных источников энергоснабжения в условиях

низкой интенсивности светодиодного (LED) освещения, характерного для интернета вещей (IoT).



а – Нормализованные спектры излучения LED ламп с цветовой температурой в диапазоне значений (1700 – 6500) К; б – спектры поглощения структур ИТО/перовскит для четырех различных составов перовскита с ШЗЗ 1,60 эВ, 1,72 эВ, 1,82 эВ, 1,97 эВ; в – выходная мощность LED ламп с цветовой температурой в диапазоне значений (1700 – 6500) К; Рисунок 10 – Характеристики LED ламп с различной цветовой температурой в диапазоне значений (1700 – 6500) К. Пунктирная линия соответствует краю излучения светодиода. Заполненные цветом области при (1,60 – 1,82) эВ показывают спектральное расширение поглощения по сравнению с перовскитом с ШЗЗ 1,97 эВ

В рамках исследований были синтезированы и детально охарактеризованы перовскитные пленки на основе твердых растворов галогенидов свинца состава $\text{FA}_{0.95}\text{Cs}_{0.05}\text{Pb}(\text{I}_{1-x}\text{Br}_x)_3$. Методами рентгеноструктурного анализа установлено формирование тригональной перовскитной фазы (пространственная группа P3m1). Сканирующая зондовая микроскопия подтвердила формирование высококачественных поглощающих слоев с субмикронным размером кристаллитов (191 – 229) нм и низкой шероховатостью (2,3 – 6,8) нм. На основе синтезированных пленок была изготовлена серия р-и-п фотоэлементов с архитектурой ИТО/ NiO_x /перовскит/ C_{60} /BCP/Ag.

Проведенный спектральный анализ выявил существенную зависимость распределения энергии в спектре LED-источников от цветовой температуры: низкотемпературное излучение (1700 К) характеризуется доминированием длинноволновой компоненты (~ 635 нм), в то время как высокотемпературное (6500 К) – коротковолновой (~ 460 нм, рисунок 10). Установлено, что состав с шириной запрещенной зоны 1,72 эВ

демонстрирует наилучшее спектральное согласование с излучением светодиодов (рассогласование не превышает 0,05 эВ).

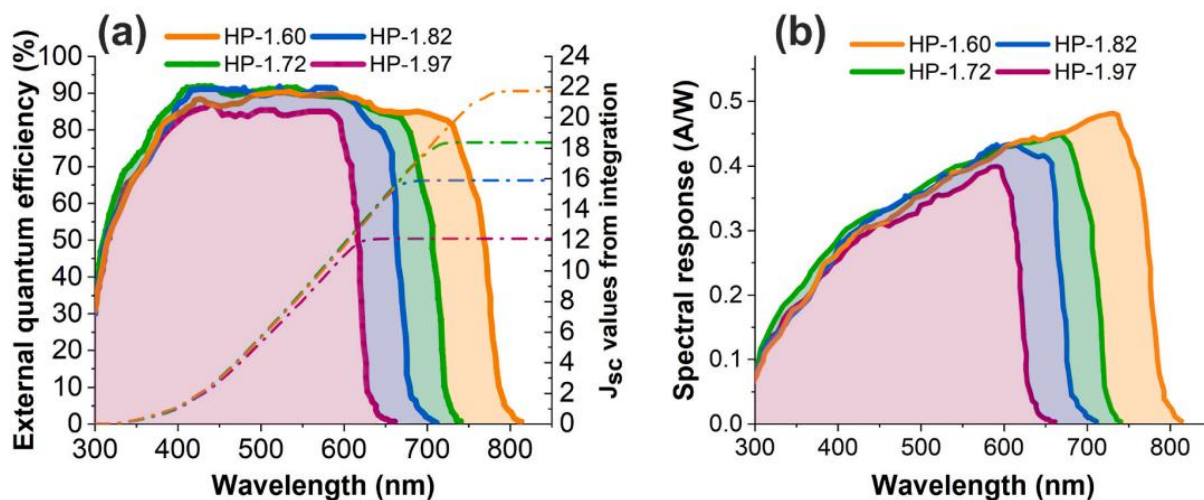


Рисунок 11 – Внешняя квантовая эффективность (а) и спектральная чувствительность (б) приборов HP-1.60, HP-1.72, HP-1.82 и HP-1.97. На графиках внешней квантовой эффективности также приведены значения интегрального тока короткого замыкания ($J_{кз}$), рассчитанные путём интегрирования в диапазоне 300–850 нм для стандартной солнечной интенсивности (1 солнце) со спектральной освещённостью AM 1.5 G (100 мВт/см²).

В результате систематических измерений фотоэлектрических параметров в зависимости от толщины фотоактивного слоя (200, 450, 600 нм) и условий освещения (200 – 1000 лк) установлены следующие закономерности:

- оптимальная толщина перовскитного слоя для работы при искусственном освещении составила 600 нм, что обусловлено необходимостью полного поглощения фотонов в области края фундаментального поглощения материала, где локализован максимум спектральной плотности мощности LED-источников;
- ток короткого замыкания ($J_{кз}$, рисунок 11) продемонстрировал выраженную зависимость от цветовой температуры и ширины запрещенной зоны. Максимальные абсолютные значения $J_{кз}$ (до 158,6 мкА/см² при 1000 лк) зарегистрированы для составов с ШЗЗ (1,60 – 1,72) эВ при цветовой температуре 1700 К. Наименьшие относительные потери $J_{кз}$ при варьировании ЦТ от 1700 К до 6500 К наблюдались для образцов с ШЗЗ 1,72 эВ.

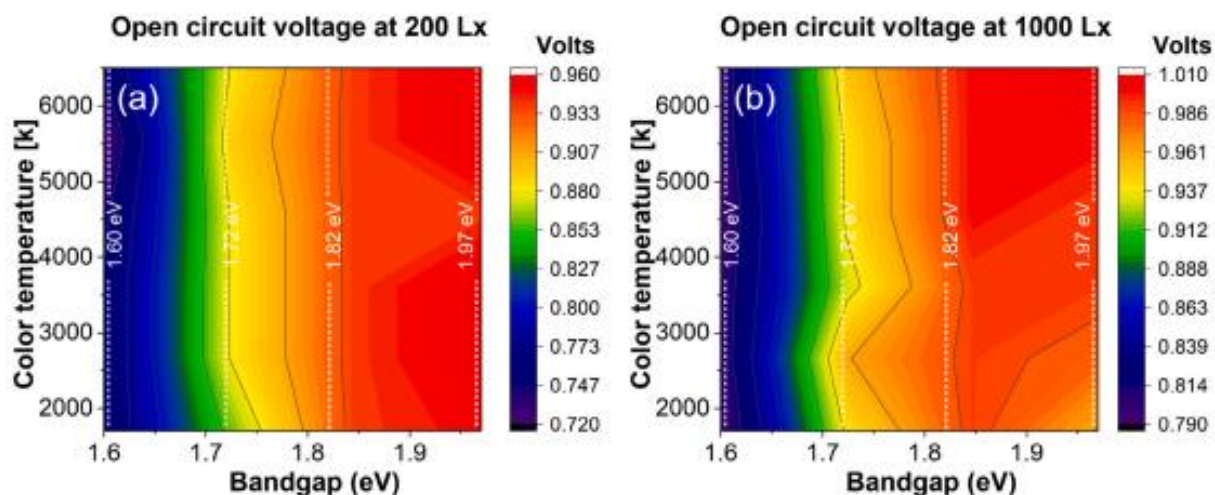


Рисунок 12 – Цветовые карты значения напряжения холостого хода (V_{xx}) лучших образцов перовскитных солнечных элементов при различных цветовых температурах при (a) 200 люкс и (b) 1000 люкс

- напряжение холостого хода (V_{xx}) показало слабую зависимость от цветовой температуры, однако его абсолютное значение закономерно возрастало с увеличением ширины запрещенной зоны (от 1,03 В до 1,22 В при AM 1.5G, рисунок 12).

- максимальная эффективность преобразования энергии (КПД) была достигнута для фотоэлементов на основе материала с ШЗЗ 1,72 эВ. Данные устройства продемонстрировали рекордные и стабильные значения КПД в диапазоне цветовых температур (1700 – 6500) К: от 31,8 % до 36,1 % при освещенности 1000 лк и свыше 32 % при 200 лк (рисунок 13).

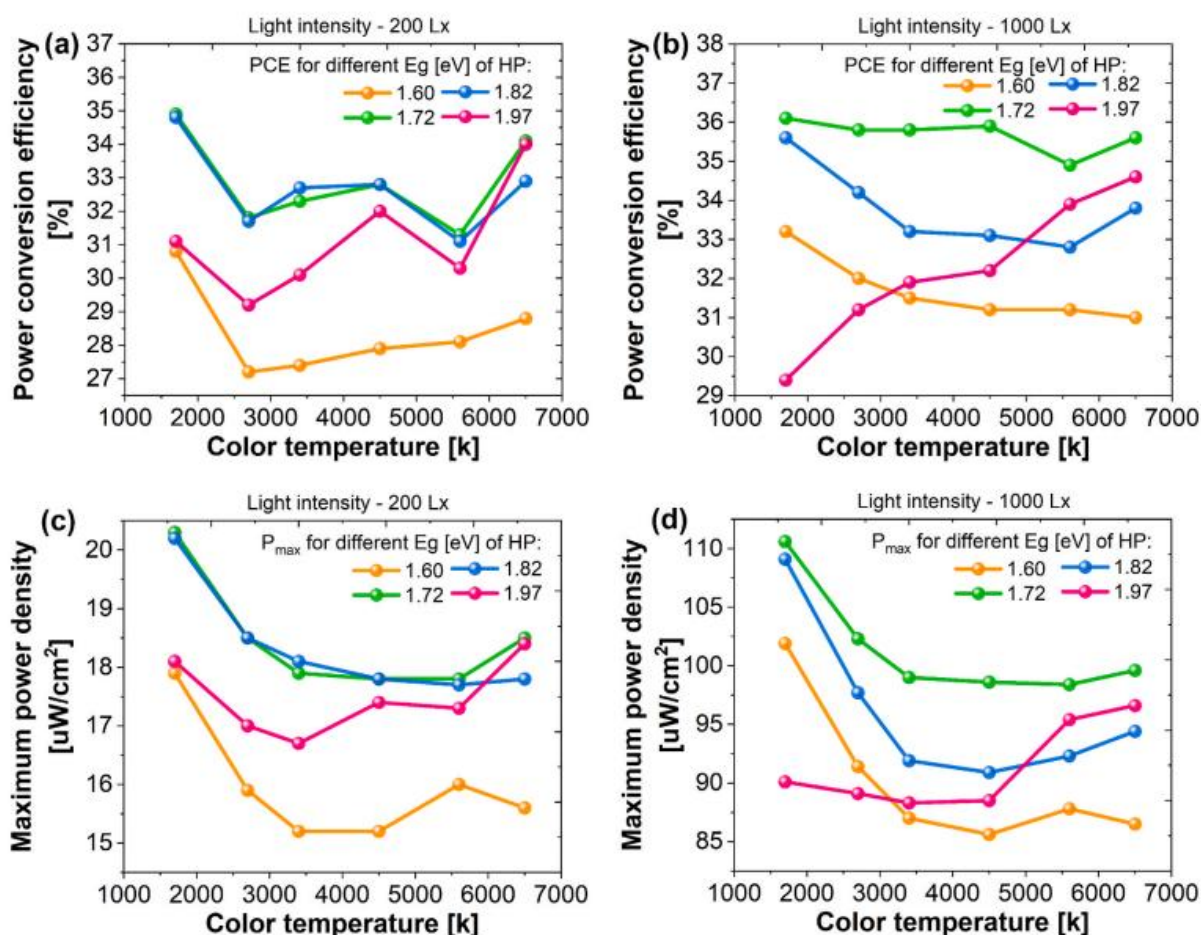


Рисунок 13 – Зависимость эффективности преобразования энергии (КПД) и выходной мощности (P_{max}) оптимальных образцов перовскитных солнечных элементов на основе HP-1,60, HP-1,72, HP-1,82 и HP-1,97 от цветовой температуры источника освещения при интенсивности 200 люкс (а, в) и 1000 люкс (б, г)

Сравнение с теоретическим пределом Шокли-Квайссера показало, что экспериментально достигнутые значения КПД для наиболее эффективных образцов составляют до 72 % от расчетного теоретического предела для данных условий освещения, что свидетельствует о значительном потенциале дальнейшей оптимизации параметров перовскитных фотоэлементов (рисунок 14).

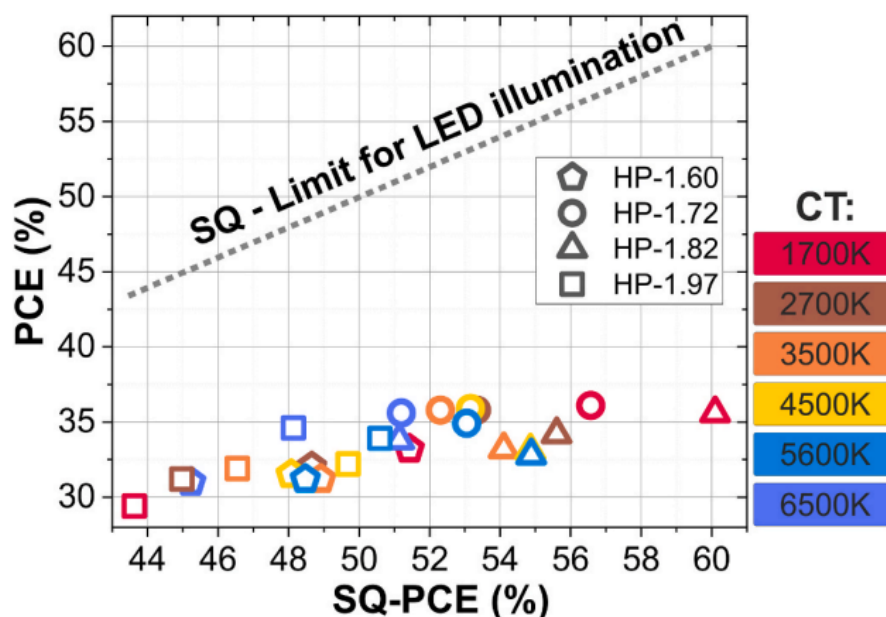


Рисунок 14 – Сопоставление экспериментальных значений КПД с теоретическим пределом Шокли-Квайссера для различных E_g поглотителя и цветовых температур. Форма маркеров соответствует E_g , цвет – CT

Научная новизна результатов заключается в установлении фундаментальных взаимосвязей между спектральным составом искусственного освещения, шириной запрещенной зоны фотоабсорбера, толщиной активного слоя и выходными фотоэлектрическими параметрами перовскитных элементов.

Практическая значимость работы заключается в разработке научно обоснованных рекомендаций по проектированию специализированных перовскитных фотоэлементов для автономного электропитания IoT-устройств: материалы с ШЗЗ (1,60 – 1,72) эВ оптимальны для условий «теплого» освещения (жилые и офисные помещения), в то время как широкозонные перовскиты ($E_g \sim 1,97$ эВ) перспективны для применения при «холодном» свете (промышленные объекты).

Основной вывод четвертой главы: Установлено, что перовскитные фотоэлементы на основе композиции $\text{FA}_{0.95}\text{Cs}_{0.05}\text{Pb}(\text{I}_{1-x}\text{Br}_x)_3$ с шириной запрещенной зоны 1,72 эВ и толщиной активного слоя ~ 600 нм являются наиболее перспективным решением для эффективного преобразования энергии искусственного LED-освещения, демонстрируя высокий и стабильный КПД, превышающий 35 % при интенсивности 1000 лк, в широком диапазоне цветовых температур.

В заключении подведены итоги работы, сформулированы основные выводы и результаты диссертационного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее диссертационное исследование посвящено систематическому изучению характеристик перовскитных солнечных элементов с транспортными слоями NiO_x различной морфологии в условиях низкоинтенсивного освещения (100 – 1000) люкс. В работе проведен сравнительный анализ оптических, структурных и поверхностных свойств тонких пленок NiO_x, синтезированных двумя методами: высокотемпературным пиролизом прекурсора (300°C) и методом нанесения диспергированных наночастиц (100°C).

Экспериментальные результаты выявили ключевую зависимость электрофизических параметров устройств от кристаллической структуры и поверхностных характеристик транспортных слоев. Рентгеноструктурный анализ показал существенное различие в размерах кристаллитов: для компактных слоев (с-NiO) характерны образования размером ~5,9 нм, тогда как для нанопористых пленок (np-NiO) зафиксирован широкий диапазон (3,5 – 10,5 нм). Особое внимание заслуживает обнаруженное различие в поверхностной функционализации - в отличие от с-NiO, нанопористые слои демонстрировали наличие гидроксильных групп, что подтверждено методами ИК-спектроскопии.

Исследование вольт-амперных характеристик выявило существенную корреляцию между морфологией транспортного слоя и параметрами устройств. Установлено, что образцы с np-NiO демонстрируют более низкое контактное сопротивление (1 – 2) Ом·см² против (3 – 4) Ом·см² для с-NiO), однако это преимущество нивелируется повышенными токами утечки и сниженным шунтирующим сопротивлением. Как следствие, устройства на основе с-NiO показали превосходство по ключевым эксплуатационным параметрам: средняя выходная мощность составила 90,2 мВт/см² при 1000 люкс, что на (20 – 28) % превышает показатели аналогов с np-NiO (71,6 мВт/см²). При этом в стандартных условиях тестирования (AM 1.5 G) разница в эффективности преобразования энергии между конфигурациями оказалась менее выраженной (16,4 % для с-NiO против 15,1 % для np-NiO), что свидетельствует о различном влиянии морфологии транспортного слоя на процессы переноса заряда в условиях низкой и стандартной освещенности. Полученные данные позволяют заключить, что превосходство компактных слоев NiO_x в условиях низкоинтенсивного освещения обусловлено подавлением поверхностной рекомбинации на границе раздела и снижением паразитных токов утечки.

В ходе проведенного исследования была выполнена комплексная оценка влияния цветовой температуры LED-освещения на фотоэлектрические характеристики перовскитных солнечных элементов с различной шириной запрещенной зоны (1,60 – 1,97) эВ. Экспериментально установлено, что все исследуемые конфигурации

демонстрируют максимальную производительность при теплом белом свете (1700 K), при этом оптимальные показатели эффективности преобразования энергии (КПД (34,9 – 36,1) % при 1000 люкс) достигнуты для элементов с шириной запрещенной зоны 1,72 эВ, что объясняется наилучшим соответствием их спектра поглощения характеристикам LED-излучения.

Полученные результаты выявили принципиально различный характер зависимости КПД от цветовой температуры для материалов с крайними значениями E_g : при переходе от 1700 K к 6500 K эффективность элементов с $E_g = 1,60$ эВ снижалась на 6,6 %, тогда как для образцов с $E_g = 1,97$ эВ наблюдался рост КПД на 17,7%. Такое поведение обусловлено особенностями спектрального рассогласования и открывает перспективы для создания специализированных перовскитных материалов, оптимизированных под конкретные условия эксплуатации. Проведенное сопоставление экспериментальных данных с теоретическим пределом Шокли-Квайссера показало значительный потенциал для дальнейшего улучшения характеристик, особенно в части повышения напряжения холостого хода и коэффициента заполнения.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Le T. S. et al. **All-slot-die-coated inverted perovskite solar cells in ambient conditions with chlorine additives** //Solar RRL. – 2022. – Т. 6. – №. 2. – С. 2100807.
2. Saranin D. et al. **Hysteresis-free perovskite solar cells with compact and nanoparticle NiO for indoor application** //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2021. – Т. 227. – С. 111095.
3. Talbanova N. et al. **Color-temperature performance of perovskite solar cells under indoor illumination** //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2023. – Т. 254. – С. 112284.

Основные научные результаты диссертационного исследования были апробированы и представлены научному сообществу в ходе следующих **международных научных мероприятий**:

1. Конференция «Perovskites for Energy Harvesting: From Fundamentals to Devices (PERENHAR-2020)» — международный форум, посвященный проблематике применения перовскитных материалов в энергетике. Доклад на тему: «**Output performance of planar perovskite solar cells at different conditions of indoor illumination**», 2020 год.

2. Конференция, организованная в рамках Шанхайской организации сотрудничества (ШОС), доклад на тему: **«Разработка перовскитных модулей для работы интернет вещей в условиях низкой освещённости»**, 2020 год.
3. Вторая Московская осенняя международная конференция по перовскитной фотовольтаике (МАРРІС-2020), проведенная на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Доклад на тему: **«Цвето-температурная зависимость выходной мощности перовскитных фотопреобразователей при работе в условиях рассеянного света»**, 2020 год.
4. Третья Московская осенняя международная конференция по перовскитной фотовольтаике (МАРРІС-2021), организованной МГУ имени М.В. Ломоносова. Доклад на тему: **«P-i-n perovskite solar cells for indoor and BIPV applications»**, 2021 год.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2030 | Statista [Electronic resource]. URL: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>.
- 2 Research G.V. Wearable Technology Market Size, Share & Trends Analysis Report [Electronic resource]. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wearable-technology-market>.
- 3 Bluetooth SIG. Bluetooth Low Energy Technology [Electronic resource]. URL: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/low-energy/>.
- 4 Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment // ICT Express. Vol. 5(1). P. 1–7.
- 5 Grandhi G. K. et al. Promises and challenges of indoor photovoltaics // Nature Reviews Clean Technology. – 2025. – Т. 1. – №. 2. – С. 132-147.
- 6 Best Research-Cell Efficiencies 2025 // NREL. – URL: <https://www.nrel.gov/> (дата обращения: 19.03.2025).
- 7 Lee H.K.H. et al. Outstanding Indoor Performance of Perovskite Photovoltaic Cells - Effect of Device Architectures and Interlayers // Sol. RRL. 2019. Vol. 3, № 1. P. 1800207.
- 8 Cojocaru L. et al. Determination of unique power conversion efficiency of solar cell showing hysteresis in the I-V curve under various light intensities // Sci. Rep. 2017.
- 9 Matiko J.W. et al. Review of the application of energy harvesting in buildings // Measurement Science and Technology. 2014.
- 10 Steim R. et al. Organic photovoltaics for low light applications // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. Elsevier, 2011. Vol. 95, № 12. P. 3256–3261.
- 11 Chen C.Y. et al. Perovskite Photovoltaics for Dim-Light Applications // Adv. Funct. Mater. 2015.
- 12 Dagar J. et al. Highly efficient perovskite solar cells for light harvesting under indoor illumination via solution processed SnO₂/MgO composite electron transport layers // Nano Energy. 2018.
- 13 Yan N. et al. Recent progress of thin-film photovoltaics for indoor application // Chinese Chem. Lett. Chinese Chemical Society, 2020. Vol. 31, № 3. P. 643–653.
- 14 Kim S. et al. Recent progress in solar cell technology for low-light indoor applications // Curr. Altern. Energy. 2019. Vol. 03. P. 1–15.
- 15 Heffernan E. et al. Zero carbon homes: Perceptions from the UK construction industry // Energy Policy. 2015. Vol. 79. P. 23–36.

- 16 Lee M.M. et al. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites // *Science*, 80. 2012.
- 17 Brown T.M. et al. Progress in flexible dye solar cell materials, processes and devices // *J. Mater. Chem. A*. 2014. Vol. 2, № 28. P. 10788–10817.
- 18 Zhao C. et al. Interface Modification by Ionic Liquid: A Promising Candidate for Indoor Light Harvesting and Stability Improvement of Planar Perovskite Solar Cells // *Adv. Energy Mater.* 2018. Vol. 8, № 24. P. 1–8.
- 19 Xia H.R. et al. Organohalide lead perovskite based photodetectors with much enhanced performance // *Chem. Commun. Royal Society of Chemistry*, 2014. Vol. 50, № 89. P. 13695–13697.
- 20 Saidaminov M.I. et al. Planar-integrated single-crystalline perovskite photodetectors // *Nat. Commun. Nature Publishing Group*, 2015. Vol. 6. P. 4–10.