

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и инновационной
деятельности СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

д.т.н.

А.А. Семенов

2026 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

на диссертационную работу

Салогуб Татьяны Олеговны

**«Разработка основ технологии получения гетероструктур на основе
галогенидных перовскитов для повышения мощности фотопреобразователей
в условиях низкой освещенности»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и
приборов электронной техники

Актуальность темы диссертационного исследования

Современный этап развития электронной техники характеризуется интенсивным ростом рынка автономных устройств – сенсоров интернета вещей (IoT), носимой электроники, беспроводных систем мониторинга. Ключевым ограничением их широкого внедрения является проблема энергоснабжения: традиционные химические источники тока требуют периодической замены, что при прогнозируемых объемах парка IoT-устройств (до 75 млрд к 2025 году) создает серьезные логистические и экономические проблемы. Альтернативным решением выступает использование фотоэлектрических преобразователей, утилизирующих энергию искусственного освещения помещений, интенсивность которого составляет 100–1000 люкс.

Однако существующие фотоэлектрические технологии, оптимизированные для солнечного спектра (AM1.5G), демонстрируют недостаточную эффективность в условиях низкой освещенности. Галогенидные перовскиты рассматриваются как один из наиболее перспективных материалов для решения данной задачи благодаря уникальному сочетанию высокого коэффициента поглощения, амбиполярного характера проводимости и возможности точной настройки ширины запрещенной зоны путем изменения галогенидного состава. Последнее позволяет адаптировать спектральную чувствительность фотоприемников под конкретные источники излучения.

Вместе с тем, вопросы оптимизации технологии формирования гетероструктур, обеспечивающих минимальные рекомбинационные потери на границах раздела, и адаптации оптических свойств поглощающего слоя к спектральным характеристикам светодиодных источников с различной цветовой температурой (1700–6500 К) остаются недостаточно изученными. В этой связи диссертационная работа Салогуб Т.О., направленная на разработку технологических основ получения гетероструктур на основе галогенидных перовскитов с улучшенными характеристиками для работы в условиях низкой освещенности, является актуальной и практически значимой.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 98 страниц машинописного текста, включает 51 рисунок, 6 таблиц и список литературы из 62 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен аналитический обзор современных исследований в области перовскитной фотовольтаики. Рассмотрены кристаллическая структура, оптические и полупроводниковые свойства галогенидных перовскитов, принципы работы фотопреобразователей с p-i-n структурой. Особое внимание уделено анализу многофакторной природы гистерезисных явлений, включая ионную миграцию, сегнетоэлектрические свойства материалов и роль интерфейсной емкости. Завершается глава анализом перспектив применения перовскитных структур в условиях искусственного освещения.

Вторая глава посвящена методологии изготовления и испытания устройств. Подробно описаны методики оценки эксплуатационных характеристик при искусственном свете, расчет энергетической эффективности, комплексный анализ с использованием двухдиодной физической модели. Представлен аппаратно-измерительный комплекс, включающий оборудование для лазерной резки, центрифугирования, терморезистивного напыления, спектрофотометрии и электрофизических измерений.

В **третьей главе** представлены результаты исследования корреляции параметров дырочно-транспортного слоя с характеристиками перовскитных солнечных элементов. Проведен сравнительный анализ структурно-морфологических и электрофизических свойств компактных (c-NiO) и нанопористых (np-NiO) слоев оксида никеля. Установлено, что компактные слои c-NiO толщиной ≤ 10 нм, полученные пиролизом прекурсора при 300°C , обеспечивают формирование гетероструктуры с минимальной плотностью поверхностных состояний и позволяют достичь выходной мощности $90,2 \text{ мВт/см}^2$ при 1000 люкс, что на 20–28% превышает показатели аналогов с np-NiO.

В **четвертой главе** проведен анализ цвето-температурной зависимости рабочих параметров перовскитных фотоэлементов. Исследовано влияние цветовой температуры LED-освещения (1700–6500 К) на фотоэлектрические характеристики для серии материалов с шириной запрещенной зоны 1,60–1,97 эВ. Определена оптимальная толщина фотоактивного слоя (600 нм) для работы под LED-освещением. Показано, что максимальный КПД (36,1% при 1000 лк) достигается для состава с $E_g = 1,72$ эВ при теплом белом свете (1700 К). Проведено сопоставление экспериментальных данных с теоретическим пределом Шокли-Квайссера, показавшее, что достигнутый уровень КПД составляет 72% от расчетного предела.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы

Наиболее значимыми результатами, определяющими научную новизну исследования, являются:

1. Разработана и экспериментально обоснована методика жидкофазного синтеза компактных слоев оксида никеля (c-NiO) для формирования гетероструктуры NiO/перовскит. Установлено, что высокотемпературный пиролиз прекурсора при 300°C обеспечивает получение слоев толщиной ≤ 10 нм с чистотой фазы, отсутствием гидроксильных групп и контактным сопротивлением $1\text{--}2 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, что позволяет подавить гистерезис вольт-амперных характеристик в условиях низкой освещенности.

2. Впервые систематически исследована зависимость фотоэлектрических параметров перовскитных элементов от цветовой температуры LED-освещения (1700–6500 К) для серии материалов с шириной запрещенной зоны 1,60–1,97 эВ. Показано, что максимальный КПД

(36,1% при 1000 лк) достигается для состава с $E_g = 1,72$ эВ при теплом белом свете (1700 К), что обусловлено оптимальным согласованием спектра поглощения с излучением источника.

3. Определена оптимальная толщина фотоактивного слоя (600 нм) для работы под LED-освещением, превышающая оптимальное значение для стандартных условий AM1.5G (450 нм). Установлено, что разработанная инвертированная p-i-n архитектура с компактным слоем NiO обеспечивает выходную мощность до 90,2 мВт/см² при 1000 лк.

4. Проведен анализ пределов Шокли-Квайссера для LED-источников, на основании которого определен оптимальный диапазон ширины запрещенной зоны фотоабсорбера (1,72–1,82 эВ), обеспечивающий минимизацию спектральных потерь при преобразовании искусственного света.

Практическая значимость работы

1. Разработана воспроизводимая технология жидкофазного синтеза слоев NiO, не требующая сложного вакуумного оборудования и позволяющая снизить себестоимость изготовления гетероструктур на 25–30%.

2. Созданы лабораторные прототипы фотопреобразователей с КПД до 36,1% при LED-освещении (1700 К, 1000 лк), что на 20–28% превышает показатели известных аналогов.

3. Сформулированы рекомендации по выбору оптимальных параметров перовскитных структур ($E_g = 1,72$ –1,82 эВ, толщина активного слоя 600 нм) для различных условий внутреннего освещения (жилые, офисные, промышленные помещения).

4. Результаты работы внедрены в исследовательский процесс АО «НИИП» (г. Лыткарино), что подтверждено соответствующим актом.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов

Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексным применением современных физико-химических методов исследования: рентгеновской дифрактометрии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, спектрофотометрии. Электрофизические измерения выполнены на прецизионном оборудовании (Keithley 2401, солнечный симулятор класса AAA) с контролируемой погрешностью. Статистическая обработка результатов проведена для выборок не менее 10 образцов каждого типа. Теоретическое моделирование вольт-амперных характеристик по двухдиодной эквивалентной схеме обеспечило количественное совпадение расчетных и экспериментальных кривых с коэффициентом корреляции не ниже 0,98. Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами независимых исследований, опубликованными в рецензируемых журналах.

Основные результаты диссертации опубликованы в 3 рецензируемых журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, и апробированы на международных конференциях PERENHAR-2020, MAPPIC-2020, MAPPIC-2021.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы к использованию в организациях, занимающихся разработкой и производством фотоэлектрических преобразователей и автономных источников питания для устройств интернета вещей: АО «НИИП» (г. Лыткарино), АО «Российские космические системы» (г. Москва), ПАО «Сатурн» (г. Краснодар), а также в учебном процессе при подготовке специалистов в области материалов электронной техники и фотоэлектрического преобразования.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе исследовано влияние толщины перовскитного слоя (200, 450 и 600 нм) на фотоэлектрические характеристики, однако оптимизация толщины проводилась для фиксированного состава с $E_g = 1,72$ эВ. Неясно, будет ли сохраняться оптимальное значение

толщины 600 нм для других исследованных составов ($E_g = 1,60, 1,82$ и $1,97$ эВ) или для них требуется индивидуальная оптимизация данного параметра.

2. При сравнении компактных (с-NiO) и нанопористых (np-NiO) слоев автор убедительно показывает преимущество первых за счет подавления поверхностной рекомбинации. Однако из текста неясно, проводилась ли оценка долговременной стабильности сформированных гетероструктур, в частности, устойчивости границы раздела NiO/перовскит к диффузионным процессам при длительной эксплуатации.

3. В четвертой главе приведены зависимости фотоэлектрических параметров от цветовой температуры LED-освещения, однако измерения проводились только при двух фиксированных уровнях освещенности (200 и 1000 люкс). Было бы полезно исследовать промежуточные значения освещенности (например, 400 и 600 люкс) для более полного понимания характера выявленных зависимостей.

4. При анализе спектров внешней квантовой эффективности (рисунок 46) наблюдается снижение EQE для образца с $E_g = 1,97$ эВ в области 420–620 нм по сравнению с составами 1,72 и 1,82 эВ. Автор связывает это с локальными деформациями решетки и микроструктурными изменениями, однако количественной оценки влияния этих факторов не приведено. Желательно было бы провести более детальный анализ причин наблюдаемого снижения.

5. В работе отсутствует сравнение разработанных фотопреобразователей с коммерчески доступными аналогами (например, на основе аморфного кремния или CIGS) в одинаковых условиях измерений при LED-освещении. Такое сравнение позволило бы более наглядно продемонстрировать преимущества предложенных технологических решений.

6. В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки и стилистические погрешности, не влияющие на понимание материала, но требующие редакционной правки.

Указанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы и носят рекомендательный характер.

Заключение

Диссертационная работа Салогуб Татьяны Олеговны «Разработка основ технологии получения гетероструктур на основе галогенидных перовскитов для повышения мощности фотопреобразователей в условиях низкой освещенности» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научно-техническая задача – разработка технологических основ получения высокоэффективных гетероструктур на основе галогенидных перовскитов для преобразования энергии искусственного освещения, имеющая значение для развития электронной техники.

По актуальности, научной новизне, практической значимости, объему выполненных исследований и достоверности полученных результатов диссертационная работа соответствует требованиям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Салогуб Татьяна Олеговна – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

Заведующий кафедрой фотоники
доктор технических наук, доцент



Тарасов С.А.

02.03.2026

Ученый секретарь кафедры фотоники,
кандидат технических наук, доцент



Степанова О.С.

02.03.2026

Отзыв заслушан и обсужден на заседании кафедры фотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», протокол № 1 от 20.01.2026 г.

Полное наименование организации: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Адрес: 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5 литера Ф

Телефон: (812) 234-46-51

E-mail: info@etu.ru

Сайт: <https://etu.ru>

