

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Саранина Данилы Сергеевича на тему «Технология жидкофазного получения и легирования тонкопленочных перовскитов для повышения эксплуатационных характеристик солнечных батарей на их основе», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники», и состоявшейся в НИТУ МИСИС 03 марта 2025 года

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 25.11.2024, протокол № 24.

Диссертационная работа выполнена на кафедре полупроводниковой электроники и физики полупроводников НИТУ МИСИС. Научный консультант – д.т.н., профессор кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников НИТУ МИСИС Таперо Константин Иванович.

**Экспертная комиссия** утверждена Диссертационным советом (протокол № 24 от 25.11.2024 г.) в составе:

1. Калошкин Сергей Дмитриевич – д.ф.-м.н., директор института новых материалов и нанотехнологий, профессор кафедры физической химии НИТУ МИСИС - председатель комиссии;
2. Родин Алексей Олегович – д.ф.-м.н., профессор кафедры физической химии НИТУ МИСИС;
3. Пархоменко Юрий Николаевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков НИТУ МИСИС;
4. Мухин Сергей Иванович – д.ф.-м.н., заведующий кафедрой теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСИС;
5. Гладышев Павел Павлович – д.х.н., профессор кафедры химии, новых технологий и материалов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «УНИВЕРСИТЕТ «ДУБНА»;
6. Тарасов Сергей Анатольевич – д.т.н., заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина);
7. Шевалеевский Олег Игоревич – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией солнечных фотопреобразователей Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН.

В качестве ведущей организации утверждено федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

**Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований** в области разработки жидкофазной технологии получения и легирования гибридных перовскитных фотопреобразователей (ФЭП) достигнуты следующие существенные результаты:

- Разработаны эффективные методы модификации интерфейсов и введения легирующих агентов, в частности, низкоразмерных  $Ti_3C_2$ , в жидкофазном цикле изготовления перовскитных ФЭП, позволяющие повысить КПД солнечных элементов и

увеличить их ресурс за счёт подавления безызлучательной рекомбинации и снижения коррозионных процессов на контактах.

- Предложены и реализованы новые подходы подавления коррозии в перовскитных структурах путём комбинированной стабилизации состава перовскитов CsFAPbI<sub>3</sub>, легирования Cl-добавками, интеграции буферных прослоек, а также интеграции пассивирующих органических полупроводников O-CMS. Доказано, что внедрение Ti3C2 предотвращает миграцию йодсодержащих ионов к металлическим электродам и повышает стабильность ФЭП при длительной эксплуатации.

- Выявлены закономерности изменения параметров дефектов, энергии активации и концентрации, в перовскитных ФЭП при таких факторах воздействия как: влажность, термонагрузка, высокая инсоляция, электрическое поле. Показано, что подавление уровней 0,7 эВ ионных дефектов позволяет повысить долговременную стабильность.

- Разработаны и испытаны масштабируемые жидкофазные slot-die технологии (щелевая печать) формирования перовскитных модулей площадью до 100×100 мм с возможностью последовательного соединения подъячеек, что принципиально важно для перехода к опытному промышленному производству солнечных модулей на основе перовскитов.

- Описаны и внедрены многоступенчатые лазерные процессы скрайбирования (P1, P2, P3) ультрафиолетовым импульсным излучением 355 нм для структурирования подъячеек с минимальными потерями площади мертвых зон. Показана возможность получения последовательного соединения ячеек с КПД модулей до 15,6%.

- Подтверждена эффективность перовскитных ФЭП в режимах низкой освещённости, что делает их перспективными для автономного питания беспроводной электроники и датчиков. Проведённые натурные испытания продемонстрировали высокий потенциал разворачиваемых гибких и жёстких модулей как для стационарных, так и мобильных приложений.

Результаты, полученные соискателем, вносят значимый вклад в развитие базовых подходов масштабируемой технологии фотоэнергетики на основе перовскитных полупроводников, формируют комплексные решения по повышению КПД и долговечности устройств, демонстрируют возможность перехода от лабораторных разработок к опытным линиям пилотного производства.

#### **Теоретическая значимость подтверждена тем, что:**

- Научно обоснован и проверен на практике механизм легирования галогенидных перовскитов с использованием карбидов переходных металлов, внесены уточнения в модели ионно-дефектной миграции при различных конфигурациях гетероструктур p-i-n.

- Детально проанализированы процессы образования глубоких центров рекомбинации, интерпретированы энергетические состояния дефектов, возникающих при масштабировании ФЭП, и выявлена связь стабильности приборных параметров с характером химических связей на границе раздела перовскит/зарядо-транспортный слой.

- Расширена научная база данных по оценке механизмов деградации и метастабильности полупроводниковых материалов перовскитной группы при внешних эксплуатационных воздействиях.

**Методология работы** основывается на комплексном применении современных физических, физико-химических, спектроскопических и микроскопических методов исследования особенностей строения и свойств кристаллических перовскитных плёнок, гетероструктур на их основе, а также динамики процессов деградации. Соискатель использовал: методы рентгенофазового анализа, фотоэлектронную спектроскопию, атомно-силовую микроскопию, сканирующую электронную микроскопию, спектры

оптического поглощения и фотолюминесценции, в том числе время-разрешённой, термическое и световое старение образцов, натурные испытания, стандартные и модельные измерения вольт-амперных характеристик ФЭП при разных уровнях освещённости и спектральном составе, методики спектральной квантовой эффективности, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Совокупность этих методов позволила получить достоверные и всесторонние данные о процессах формирования и деградации перовскитных слоёв, найти оптимальные технологические параметры.

**Практическая значимость** определяется тем, что:

1. Разработаны перспективные технологические маршруты жидкофазного получения тонкоплёночных перовскитов, сочетающие высокую производительность (slot-die печать, экструзия) и стабилизацию приборных характеристик.

2. Предложены конкретные рецептуры легирования и пассивации перовскитных материалов с использованием  $Ti_3C_2$  и органических (полимерных) прослоек, обеспечивающих КПД до 20% для ФЭП небольшой площади и до 15% для собранных модулей.

3. Разработан и внедрён многоступенчатый лазерный процесс (скрайбирование P1, P2, P3 на длине волны 355 нм), позволяющий формировать последовательное соединение подъячеек с минимальными потерями площади для промышленных модулей.

4. Получены промышленные прототипы солнечных модулей 100×100 мм и батарей на химически упрочнённом стекле 500×500 мм для наземного и мобильного применения. Подтверждена реальная эффективность их натурной эксплуатации.

5. Результаты защищены 8 патентами РФ, 3 зарубежными патентами и 2 секретами производства; проведены испытания с привлечением профильных промышленных предприятий (АО «ИСТОК», ООО «Научно-технический центр тонкоплёночных технологий в энергетике»), что свидетельствует о востребованности разработанных решений.

### **Оценка достоверности результатов исследования**

Для экспериментальных исследований использовалось современное оборудование и стандартизованные методики измерений фотоэлектрических параметров, в том числе специализированные стенды для тестирования солнечных батарей по стандарту AM1.5 G. Результаты воспроизводимы и подтверждены исследованиями в соавторстве с ведущими научными центрами. Широкое обсуждение итогов на 22 международных конференциях, а также согласованность выводов с данными независимых групп подтверждают высокую достоверность и корректность научной интерпретации.

### **Личный вклад соискателя**

Соискатель лично участвовал во всех ключевых этапах работы: от постановки цели и задач, выбора методик, проведения экспериментальных исследований, анализа и обобщения результатов, до подготовки научных статей, патентов и участия в разработке технологических регламентов для опытно-промышленных линий. Основная часть представленных в диссертации экспериментальных данных получена автором самостоятельно или под его непосредственным руководством.

### **Основные публикации по теме исследования**

Результаты работы опубликованы в 20 печатных работах в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и в базы Web of Science/Scopus, имеется 8 патентов.

Пункт 2.6 Положения о порядке присуждения ученых степеней соискателем учёной степени НИТУ МИСИС не нарушен.

Диссертация Саранина Данила Сергеевича соответствует критериям, указанным в п. 2 Положения о порядке присуждения учёных степеней, принятых в НИТУ МИСИС. Работа представляет собой законченное научно-квалификационное исследование, в котором:

- сформулированы новые научно обоснованные решения, направленные на повышение эффективности и стабильности перовскитных солнечных батарей;
- предложены масштабируемые технологические процессы жидкофазного нанесения и легирования, подтверждённые патентами и актами внедрения;
- обеспечено существенное расширение знаний в области гибридных перовскитных полупроводников и перспективных методов их промышленного изготовления.

Полученные в диссертации результаты и выводы обладают высокой научной новизной, имеют важное практическое значение для внедрения в современную фотоэнергетику, а также создают основу для дальнейших научных исследований и разработок.

Экспертная комиссия, учитывая высокую актуальность, теоретический и практический вклад, а также уровень научных результатов, пришла к решению о возможности присуждения Саранину Данилу Сергеевичу учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Результаты голосования: при проведении тайного голосования экспертная комиссия в составе 6 человек, участвовавших в заседании, из 7 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 6, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии

Калошкин Сергей Дмитриевич

03.03.2025