



УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ФТИ

им. А.Ф. Иоффе РАН, д.ф.-м.н.

Брунков П.Н.

«10» _____ 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Саранина Данилы Сергеевича

«Технология жидкофазного получения и легирования тонкопленочных перовскитов для повышения эксплуатационных характеристик солнечных батарей на их основе»,
представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по
специальности

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

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Мировое развитие фотовольтаики характеризуется постоянным ростом объёмов производства и расширением сфер применения фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Это стимулирует поиск и апробацию новых технологических решений, нацеленных на снижение себестоимости единицы установленной мощности и повышение КПД солнечных модулей.

Перовскитная фотовольтаика, основанная на гибридных или полностью неорганических галогенидных перовскитах, за счёт уникального сочетания фотофизических свойств (высокого коэффициента поглощения, амбиполярного транспорта, низкой безызлучательной рекомбинации) демонстрирует быстрый прогресс. В частности, КПД лабораторных образцов перовскитных солнечных элементов (ПСЭ) уже сопоставим с кристаллическим кремнием, а технологические подходы (жидкофазные методы нанесения, рулонные, экструзионные и др.) позволяют рассчитывать на снижение производственных затрат.

Однако одно из ключевых препятствий на пути промышленной реализации таких модулей — ограниченная долговечность перовскитных структур в условиях реальной эксплуатации и сложность обеспечения высокой однородности покрытия при масштабных

технологических процессах. Решение этих проблем видится в комплексной оптимизации состава перовскитных плёнок, введении легирующих и пассивирующих добавок, разработке методов масштабируемого жидкофазного нанесения с соответствующими режимами кристаллизации и последующей герметизации готовых приборов. В диссертации Д. С. Саранина рассмотрены все вышеперечисленные вопросы в комплексе. Предложены научно обоснованные подходы к формированию многослойных перовскитных гетероструктур в промышленных условиях (slot-die, струйная печать, лазерное скрайбирование и др.), включая меры по повышению стабильности путём легирования, введения функциональных наноматериалов и пассивации дефектных центров. Исследованы способы совмещения данных методов для создания полноформатных модулей и изделий на их основе, пригодных к практической эксплуатации. Всё вышесказанное подтверждает актуальность работы и своевременный характер исследовательской задачи, направленной на обеспечение конкурентоспособности и зрелости тонкоплёночных перовскитных технологий.

2. Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём работы составляет 257 страниц, включая 164 рисунка и 21 таблицу. Список использованных источников включает 278 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана решаемая научная проблема, определена научная новизна и практическая значимость, описана методология исследования и перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит анализ современного состояния развития фотовольтаики, включая актуальную статистику по рынку солнечных модулей и сравнительные характеристики кремниевых и тонкоплёночных технологий. Особое внимание уделено галогенидным перовскитам как наиболее перспективному материалу: описаны базовые полупроводниковые свойства, ключевые факторы деградации и вопросы применения жидкофазных методов нанесения, а также лазерного скрайбирования. Выделена главная проблема: совместить высокую эффективность перовскитных солнечных элементов с промышленной масштабируемостью и длительной стабильностью.

Вторая глава посвящена исследованию жидкофазной технологии получения тонкоплёночных перовскитных структур и методам их легирования. Подробно рассмотрены подходы к формированию дырочно-транспортных слоёв на основе NiO (в том числе наночастиц), применения буферных прослоек, введения новых функциональных материалов (Ti_3C_2) для повышения проводимости и пассивации. Исследована инженерия

интерфейсов p-i-n архитектуры, влияющая на повышение КПД и стабильность перовскитных элементов.

Третья глава посвящена анализу дефектной структуры перовскитных плёнок и их эволюции в условиях долговременной эксплуатации. Рассмотрены результаты релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) и сопоставление полученных параметров с показателями стабильности при фотонагрузках. Показано, что сочетание вакансий, антиструктурных и междоузельных дефектов йода определяет доминирующие пути деградации перовскитных устройств; введение Cl-анионов и иных легирующих агентов заметно снижает плотность глубоких дефектов и улучшает стабильность.

Четвёртая глава посвящена масштабированию технологии изготовления модулей с использованием методов слот-матричной печати (slot-die), лазерного скрайбирования и оптимизации режимов нанесения органических прослоек. Представлены технологические режимы экструзии, вакуумной пост-обработки плёнок, многоступенчатого лазерного скрайбирования (P1–P2–P3) для создания последовательных подъячеек, а также описаны результаты по получению перовскитных модулей размером до 100×100 мм с КПД порядка 15 %.

Пятая глава описывает практическую реализацию технологии в виде создания полноформатных модулей и батарей. Подробно рассмотрены эксперименты по ламинации собранных модулей с применением низкотемпературных эластомеров и стеклянных подложек. Представлен опыт создания прототипов солнечных панелей 500×500 мм и раскладных автономных источников питания (пеналы) на основе перовскитных модулей. Зафиксирована высокая эффективность в условиях низкой освещённости, что даёт дополнительные ниши применения. В главе приведены акты внедрения, подтверждающие практическую значимость выполненных исследований.

В **заключении** подводятся итоги проведённой работы, формулируются основные выводы, подтверждающие достижение поставленных в начале диссертации целей и решение обозначенных задач. В приложениях приведены акты испытаний, подтверждающие результаты работы, а также патенты и свидетельства о государственной регистрации интеллектуальной собственности.

3. Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна диссертации подробно раскрыта в её основных положениях и заключается, в частности, в следующем:

1. Разработаны жидкофазные методы модификации перовскитных фотопреобразователей (ФЭП), включающие легирование низкоразмерными Ti_3C_2 и внедрение органических самособирающихся молекул (О-СМС), что позволило

существенно повысить КПД и рабочий ресурс перовскитных элементов за счёт подавления ионной миграции и коррозионных процессов.

2. Установлена закономерность взаимосвязи между химическим составом перовскита (особенно при легировании Cl, Cs и формамидиния), формированием глубоких центров дефектов и фазовой стабильностью тонкоплёночных структур, что позволило продлить срок службы и улучшить фотоэлектрические характеристики ФЭП.

3. Предложен комплексный технологический цикл масштабирования перовскитных модулей с применением slot-die нанесения, вакуумной пост-обработки мокрых плёнок и многоступенчатого лазерного скрайбирования, позволяющий формировать крупноформатные модули с КПД до 14–15 % и многократно снижать «мёртвые зоны» при соединении ячеек.

4. Показано, что перовскитные солнечные модули обладают значительно лучшими показателями при низкой освещённости по сравнению с кремниевыми аналогами, что открывает широкие перспективы их применения в автономных и маломощных системах энергообеспечения.

5. Разработаны инженерные решения по совместной ламинации перовскитных модулей, герметизации и созданию готовых изделий (раскладных пеналов, панелей на жёсткой подложке), подтверждённые актами внедрения в профильных предприятиях.

4. Практическая значимость выполненных исследований

Практическая значимость подтверждена следующими результатами:

- Разработаны и апробированы технологические инструкции на нанесение перовскитных плёнок методом слот-матричной печати, оптимизированные для серийного изготовления модулей и больших панелей (как в условиях лабораторий, так и опытно-промышленных линий).
- Созданы и испытаны опытные образцы модулей перовскитных солнечных батарей с площадью до 500×500 мм, прошедшие ресурсоналические проверки (УФ-облучение, термоциклирование и т. д.).
- Предложенные решения по введению легирующих наноматериалов Ti_3C_2 и хлоридных добавок в состав перовскитных плёнок подтвердили повышение стабильности свыше 3000 часов при стандартных протоколах (ISOS).
- Разработки диссертации защищены патентами РФ и международными заявками (PCT), а также внедрены в виде технологических процессов и отдельных изделий в ООО «НТЦ ТПТ» (г. Санкт-Петербург) и АО «ИСТОК» (г. Тверь).

Таким образом, результаты, представленные в работе, могут быть внедрены в отрасль тонкоплёночной солнечной энергетики и являться основой для создания нового поколения модулей, обеспечивающих конкурентоспособность российских предприятий в данном сегменте.

5. Степень обоснованности и достоверности полученных результатов

Научная обоснованность работы подтверждается:

- использованием широкой совокупности современных методов исследования (спектроскопия, РСГУ, рентгенофазовый анализ, электронная и атомно-силовая микроскопия, измерение ВАХ, адмиттансной спектроскопии и т. д.);
- большим массивом экспериментальных данных, полученных с корректной математической обработкой;
- сопоставлением результатов с известными литературными источниками, зарубежными аналогами и данными независимых исследовательских групп;
- подтверждением работоспособности созданных опытных модулей в реальных условиях освещения (в том числе низкой интенсивности) и оформленными актами внедрения на профильных предприятиях.

6. Замечания по работе

При высокой научной и практической ценности работы следует отметить некоторые моменты:

1. В отдельных разделах второй и четвёртой глав недостаточно полно представлена статистическая обработка результатов (разброс КПД, повторяемость параметров при изготовлении больших партий образцов). Возможно, следовало бы подробнее описать методы математического планирования эксперимента при масштабировании.

2. В главе, посвящённой лазерному скрайбированию (четвёртая глава), автором рассматривается преимущественно УФ-лазер. Следовало бы дополнительно охарактеризовать возможности применения альтернативных лазерных систем (ИК, видимый диапазон) или хотя бы кратко обосновать выбор УФ-излучения с точки зрения универсальности и его влияния на перовскитные слои.

3. В третьей главе при обсуждении дефектной структуры (РСГУ и обратного РСГУ) автор достаточно подробно описывает физическую природу дефектов, однако сравнительная корреляция с технологическими режимами (например, температурами кристаллизации) могла бы быть изложена более наглядно.

4. При описании испытаний раскладной солнечной батареи подробно приводятся результаты для различных уровней освещённости, однако не указано, как проводились серийные измерения с точки зрения погрешности (погрешность определения освещённости, стабильности источника света и др.).

5. Следовало бы более чётко подчеркнуть пути дальнейшего развития технологии по повышению КПД модулей выше 20 % (например, через добавление оловянных перовскитов, уменьшение толщин поглощающих слоёв, смешанные галогениды и т.д.).

Указанные замечания не снижают общего высокого уровня работы и носят скорее рекомендательный характер.

7. Заключение

Представленная к защите диссертация Саранина Данилы Сергеевича «Технология жидкофазного получения и легирования тонкоплёночных перовскитов для повышения эксплуатационных характеристик солнечных батарей на их основе» выполнена на высоком научно-техническом уровне. Работа обладает несомненной теоретической и практической значимостью, результаты доказывают эффективность предложенных подходов к стабилизации и повышению КПД перовскитных фотопреобразователей и модулей в масштабируемом промышленном цикле.

Диссертация **соответствует** критериям, предъявляемым к работам на соискание учёной степени доктора технических наук в части оригинальности, новизны, теоретической и практической значимости, а её автор **заслуживает присуждения** учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации Саранина Данилы Сергеевича обсужден и утвержден на научном семинаре лаборатории Физико-химических свойств полупроводников ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Протокол № 1/02 от 10 февраля 2025 г.)

Доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией физико-
химических свойств полупроводников
ФГБУН Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе



Теруков Е.И.

Секретарь заседания
доктор.физ.-мат.наук, в.н.с.



Рудь.В.Ю.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Почтовый адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Официальный сайт в сети Интернет: www.ioffe.ru

e-mail: post@mail.ioffe.ru

Телефон: 812 247 22 45