

**ОТЗЫВ**  
**на автореферат диссертации**  
**Саранина Даниила Сергеевича**  
**«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

Диссертация посвящена важнейшей проблеме, связанной с совершенствованием технологии изготовления галогенидных перовскитных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) для солнечной энергетики. Выбранное направление сочетает в себе как фундаментальные аспекты: исследование физико-химических механизмов формирования тонкоплёночных перовскитных структур, влияние пассивации и легирования на функциональные характеристики, так и прикладные задачи: масштабируемые методы производства, разработка промышленных вариантов модулей. Особая актуальность и ценность исследований подчеркиваются ориентацией на комплексный анализ факторов, ограничивающий ресурс работы перовскитных устройств, и целенаправленной разработкой методов снижения деградационных процессов. Данные исследования не только соответствует приоритетным направлениям развития фотоэнергетики, но и отвечают современным требованиям по быстрому переходу к опытно-промышленным технологиям.

Автореферат демонстрирует полноту и комплексность подходов:

- Поставлен широкий круг задач, связанных с технологией получения перовскитных тонких плёнок с использованием жидкофазных методов (слот-матричное нанесение, струйная печать, экструзия и др.), а также адаптации этих методов к промышленным условиям.
- Особое внимание уделено внедрению пассивационных и легирующих добавок (максены  $\text{Ti}_3\text{C}_2$ , наночастицы  $\text{NiO}_x$  и др.), которые позволяют управлять морфологией и энергетическими свойствами гетероструктур.

- Подробно проанализированы механизмы деградации и методы стабилизации перовскитных структур (коррозионные эффекты, ионная миграция, фазовые переходы).
- Описан переход от лабораторных образцов (с площадью активной зоны  $\sim 0,1 \text{ см}^2$ ) к модулям (с размерами  $100 \times 100 \text{ мм}$ ) и полноформатным панелям (с размерами  $500 \times 500 \text{ мм}$ ).
- Продемонстрирована промышленная ламинация и многоступенчатое лазерное скрайбирование, что указывает на высокую степень технологической проработанности темы.

По тексту автореферата прослеживается чёткая логика научного поиска: от выявления основных механизмов безызлучательной рекомбинации и коррозионных процессов (миграции йодсодержащих ионов, склонности органического катиона к разложению при повышенной температуре и влажности) к формированию конкретных технологических решений по пассивации гетероструктур (p-p<sup>+</sup>, n-p<sup>+</sup>), замедлению деградации, повышению эффективности сборки фотогенерируемых носителей заряда. Значимый вклад вносит разработанная автором методика внесения функциональных наноматериалов (в частности,  $\text{Ti}_3\text{C}_2$ ) как в сам перовскитный слой, так и на тыльный контакт, что обеспечило достижение улучшенных характеристик за счёт блокирования ионных дефектов на контакте металл/полупроводник. Важным моментом является переход от лабораторных образцов (с площадью порядка нескольких  $\text{мм}^2\text{--}\text{см}^2$ ) к модулям в формате  $100 \times 100 \text{ мм}$  и даже полноформатным панелям ( $500 \times 500 \text{ мм}$ ) с последовательным соединением подъячеек, что свидетельствует о высокой степени технологической зрелости представленных разработок.

С точки зрения новизны исследований особого внимания заслуживают: систематическое исследование влияния хлоридных добавок на формирование многокатионных плёнок ( $\text{CsFAPbI}_3$ ), что приводит к подавлению процессов фазовой сегрегации и росту стабильности при многосуточном облучении; применение двумерных материалов ( $\text{Ti}_3\text{C}_2$ ) для формирования прослоек, предотвращающих коррозионные эффекты на катоде; а также методическая адаптация промышленных процессов (слот-матричное нанесение, вакуумная подсушка, лазерное скрайбирование на длине волны  $355 \text{ нм}$ ), позволяющая получать работоспособные перовскитные солнечные модули с КПД более  $15\%$  при тестировании в стандартных условиях. Наличие патентов и актов внедрения, а также создание реальных модулей, прошедших промышленную ламинацию, подтверждают практическую ценность результатов.

В диссертации подробно описано влияние глубоких дефектов на деградиционное поведение галогенидных перовскитов. Исследование энергетических уровней, связанных с миграцией йода, и описание механизма нейтрализации с помощью целенаправленной пассивации указывают на комплексный подход автора к задаче повышения ресурса эксплуатации. Особенно важно, что автор диссертации оценивает применимость полученных решений к крупномасштабному производству: показана совместимость жидкофазных методов нанесения с промышленными стандартами защиты и герметизации (инкапсуляции) тонкоплёночных покрытий. Практическое подтверждение в виде изготовленных демо-панелей и полученные электротехнические характеристики дополнительно подчёркивают высокий уровень проработанности темы. Сопровождающий исследование методический подход, включающий применение таких методов как рентгенофазовая дифракция, сканирующая электронная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света, профилирование Оже и т. д., обеспечивает объективную оценку создаваемых и исследуемых структур (включая состав плёнок на всех этапах), что придаёт дополнительную достоверность полученным результатам. Все положения, выносимые на защиту, последовательно подтверждаются экспериментальными данными и публикациями автора в рецензируемых журналах, а также патентными документами.

К замечаниям к автореферату диссертации можно отнести следующее:

В автореферате большее внимание уделено процессам формирования и стабилизации перовскитных плёнок, однако можно было бы ещё более детально сопоставить механизмы деградации в различных архитектурах (p-i-n / n-i-p). При этом следует отметить, что изложенные данные уже демонстрируют высокую научно-техническую ценность подхода и дают представление о влиянии ключевых факторов (легирования, состава, методов нанесения)

Указанное замечание не носит принципиального характера, представленная диссертационная работа заслуживает высокой положительной оценки.

Содержание автореферата диссертации «Технология жидкофазного получения и легирования тонкоплёночных перовскитов для повышения эксплуатационных характеристик солнечных батарей на их основе» и выводы в полной мере соответствуют требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС. П. Саранин Данила Сергеевич, заслуживает присуждения ему степени доктора технических

наук по специальности 2.2.3 - «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией Возобновляемых источников энергии,

Проректор по науке, д.ф.-м.н.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет  
имени Ж.И. Алфорова Российской академии наук

Мухин Иван Сергеевич

(951) 661 02 58

imukhin@spbau.ru

194021, Санкт-Петербург, улица Хлопина, дом 8, корпус 3, литер А

27.02.2025

Подпись удостоверяю.

*Сергей Мухин И.С. заверено*  
*Начальник отдела кадров*

*Е.М. Власов* 27.02.2025

