

**ОТЗЫВ**  
**на автореферат диссертации**  
**Саранина Данилы 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**

Развитие фотовольтаической отрасли как одного из ключевых направлений мировой энергетики и необходимость снижения себестоимости вместе с повышением эффективности солнечных батарей делают актуальным исследование альтернативных к кремнию тонкопленочных технологий. Галогенидные перовскиты, благодаря своим уникальным оптоэлектронным свойствам, высокой эффективности поглощения света и потенциально низкой стоимости производства, выступают наиболее перспективным материалом. В диссертации главное внимание уделено разработке жидкофазных методов формирования перовскитных фотоактивных слоёв и их целенаправленному легированию. Жидкофазные технологии с использованием новых функциональных добавок и прослоек (в т.ч. материалы на основе карбидов титана, органические O-CMC), позволят в перспективе обеспечить надёжное масштабирование и конкурентную стоимость при массовом выпуске солнечных модулей. В условиях, когда мировые тенденции показывают возможный переход к промышленному производству перовскитных фотоэлектрических преобразователей уже в ближайшее десятилетие, тема диссертационного исследования приобретает особую актуальность.

В представленной диссертационной работе подробно описаны результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований по технологии изготовления тонкопленочных перовскитных фотоэлектрических устройств (ФЭП) с использованием различных легирующих агентов и прослоек, а также по изучению влияния данных добавок на ресурсную устойчивость и КПД солнечных батарей. Автором проанализированы современные подходы к пассивации поверхностных дефектов, внедрению низкоразмерных наноматериалов ( $\text{Ti}_3\text{C}_2$ ) и формированию многослойных структур с оптимизированным выравниванием энергетических уровней на гетерограницах в p-i-n приборных структурах. Значительное внимание уделено методам масштабирования процессов, включая применение слот-матричной печати (slot-die), лазерного скрайбирования и промышленной ламинации.

Особое место в работе занимает детальное исследование механизмов деградации перовскитных слоёв под действием света, повышенных температур, влаги и электрического поля; показано, как применение многокатионных составов

(CsFAPbI<sub>3</sub>, в том числе с хлоридными добавками) и различных пассивационных прослоек способствует повышению стабильности, в том числе при длительной эксплуатации. Разработаны экспериментальные модули размером 100 × 100 мм, а также полноформатная панель 500 × 500 мм, подтверждающие практическую реализуемость предложенных технологических решений и их промышленный потенциал.

Достоверность результатов исследования подтверждается многократными экспериментальными сериями, широким спектром аналитических методик (оптические и электрофизические измерения, рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия, спектроскопия Рамана и т.д.), а также серией актов внедрения и патентов.

Научная новизна работы очевидна из следующих аспектов: (1) автором впервые предложено применение функциональных низкоразмерных Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-модификаторов в составе многослойных структур, существенно повышающих стабильность и эффективность перовскитных ФЭП; (2) разработана и реализована комплексная технология масштабируемого жидкофазного нанесения перовскитных слоёв с интегрированным процессом легирования и пассивации; (3) обоснована методика многоступенчатого лазерного скрайбирования, адаптированная под особенности микрокристаллической структуры перовскитных модулей.

Практическая значимость работы подтверждается серией патентов и актов внедрения, полученных автором совместно с промышленными партнёрами. Созданы опытные образцы солнечных батарей формата модулей (100 × 100 мм) и полноформатной панели (500 × 500 мм), что говорит о технологической завершённости исследования и его готовности к дальнейшей опытно-промышленной апробации. Высокая результативность подтверждается количеством публикаций в рецензируемых научных журналах, входящих в международные базы данных (Web of Science, Scopus), а также выступлениями на ведущих российских и зарубежных конференциях. Полученные патенты (включая международные) демонстрируют высокий уровень проработанности технических решений и защищённость интеллектуальной собственности автора.

Сформулированные выводы являются логическим обобщением всей проделанной работы и полностью соответствуют поставленным целям и задачам исследования. Автор убедительно показывает, что управление составом перовскита, введение специальных добавок и прослоек, а также оптимизация технологий массового производства (слот-матричная печать и лазерное скрайбирование) позволяют достичь существенного повышения КПД и сроков службы перовскитных солнечных батарей.

Автореферат написан чётким научным языком, структура последовательно отражает общую концепцию и логику диссертационного исследования.

Приведённый графический и табличный материал даёт достаточно наглядное представление о ходе работы и её результатах.

Рекомендую положительно оценить представленную работу и считаю, что её автор, Саранин Д.С., заслуживает присуждения искомой учёной степени доктора технических наук. Диссертационная работа заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Содержание автореферата диссертации «Технология жидкофазного получения и легирования тонкопленочных 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 710.05-24, предъявляемым на соискание степени доктора технических наук, а её автор, 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:

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФГБУН  
Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской  
академии наук, специальность – 02.00.04. физическая химия

Тамеев Алексей Раисович

Телефон: 8 495 9554032

Email: [tameev@elchem.ac.ru](mailto:tameev@elchem.ac.ru)

119071 г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп.4

26 февраля 2025 г.

Подпись А.Р. Тамеева удостоверяю.

Секретарь Ученого совета ИФХЭ РАН  
к.х.н.



И.Г. Варшавская