

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

При переходе к крупноформатным изделиям (модулям и панелям) даже небольшие несовершенства в методах печати могут приводить к заметным неоднородностям в плёнках, что в конечном итоге сказывается на электрических характеристиках и долговечности прибора. Гибридные перовскиты, несмотря на их замечательные оптические и транспортные свойства, до сих пор слабо адаптированы к серийному выпуску, поскольку требуют строгого контроля состава, кристаллизации и совмещения нескольких слоёв в едином технологическом цикле. Диссертационная работа Д.С. Саранина напрямую отвечает этой задаче, подробно рассматривая вопросы печати (slot-die и др.), методики отжига, введения легирующих агентов и последующего структурирования.

Актуальность подтверждается глобальным трендом на снижение производственных затрат при создании солнечных батарей, где вакуумные методы всё ещё преобладают и характеризуются значительными расходами. Жидкофазные техники, включая струйную, экструзионную и прочие способы нанесения, потенциально позволяют удешевить процесс. Однако лишь при глубоком понимании механизмов роста плёнок, их дефектности и последующей стабилизации удаётся переходить от лабораторных образцов к полноценным модулям. Работа диссертанта содержит все необходимые компоненты: от выбора прекурсоров и растворителей до итоговой сборки и герметизации панелей.

Согласно автореферату, диссертация состоит из пяти глав, введения и заключения, а также содержит список публикаций и патентных документов.

Во введении обоснована цель исследования — повысить КПД и ресурс перовскитных солнечных батарей, сохранив экономичность и масштабируемость за счёт жидкофазного нанесения функциональных слоёв. Ключевым вызовом названы задачи по пассивации дефектов, устранению коррозионных эффектов на межфазных границах и внедрению стабилизирующих легирующих агентов, которые должны быть совместимы с процедурой печати.

В первой главе рассматриваются фундаментальные свойства перовскитных полупроводников и трудности, возникающие при формировании плёнок на больших площадях. Автор приводит сравнение с другими тонкоплёночными технологиями (CdTe, CIGS), акцентируя внимание на более простых способах приготовления перовскитных структур, но и более высокой их чувствительности к условиям влажности, растворимости и взаимодействию с субстратом.

Вторая глава представляет собой развернутый анализ различных жидкофазных методик: упоминаются традиционные способы, такие как центрифугирование (spin-coating) и струйная печать (inkjet), однако наиболее подробно разбирается щелевая экструзия (slot-die), которая позволяет равномерно распределять раствор на подложках большой площади. Показывается, что правильная композиция растворителей, скорость подачи и термические условия отжига играют критическую роль в зародышеобразовании и росте перовскитных кристаллов. Отдельно описано, как внедрение Cl^- в состав прекурсора влияет на кинетику перехода из жидкой фазы в твёрдую, а также уменьшает подвижность нежелательных ионов, способствуя формированию более стабильной микроструктуры.

Третья глава посвящена анализу дефектных центров и механизму пассивации за счёт максенов Ti_3C_2 и хлоридных легирующих агентов. Подчёркивается их совместимость с органическими растворителями в ходе печати и отсутствие фазовых искажений после отжига. Результаты широкого круга измерений (DLTS, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, адмиттансной спектроскопии) свидетельствуют о существенном снижении плотности рекомбинационных ловушек в интервале 0.4–0.7 эВ. Автор показывает, что эти эффекты особенно важны в случае крупноформатного нанесения, когда неоднородности в концентрации дефектов могли бы давать резкие перепады напряжений и приводить к потерям при последовательном соединении подъячеек.

В четвёртой главе рассматривается процесс лазерного структурирования (P1–P3) и формирование субмодулей. Описаны технологические аспекты: способы позиционирования луча, режимы накачки, защита перовскитных плёнок от локального перегрева. Подробно обсуждается задача обеспечения стабильного проводящего канала при переходе от одной подъячейки к другой, чтобы коэффициент заполнения (FF) и омические потери оставались в допустимых пределах.

Пятая глава обобщает результаты апробации и тестирования модулей (общая мощность 4,7–6,4 Вт, стабильная работа до 2000–3000 часов при различных внешних

факторах). Делается вывод, что технология слот-матричной печати в комбинации с правильно подобранным легированием перовскитной структуры обеспечивает воспроизводимую и однородную плёнку по всей площади. Дополнительно приводятся данные о рассеянном свете и работе в нестандартных условиях освещённости, что свидетельствует о высокой универсальности решений.

Новизна работы основана на системном подходе к внедрению масштабируемых печатных методов (slot-die) для создания функциональных перовскитных устройств. Автор не только описывает повышение КПД, но и последовательно объясняет, почему добавки Cl^- и Ti_3C_2 оказываются совместимы с растворёнными прекурсорами и как они помогают стабилизировать промежуточные стадии при формировании плёнки (зародыши, рост кристаллитов, удаление растворителя). Предложенная методология сочетает фундаментальные принципы формирования твёрдой фазы из раствора (управляемая диффузия компонентов, контроль концентрации и вязкости раствора) с точными режимами термообработки, что подтверждается целой серией измерений по дефектности. Уровень доверия к результатам высок, поскольку часть решений уже защищена патентами, а сами модули проверялись в профильных организациях, где технологические процессы масштабируются с лабораторных форматов до полу-промышленных.

С практической точки зрения, применение печатных процессов позволяет значительно упростить линию изготовления, исключая громоздкие вакуумные установки и снижая стоимость оборудования. То, что автор добился равномерности пленок на площадях 100×100 мм и смог составить модули ещё большего формата (600×400 мм в раскладываемой конфигурации), свидетельствует о хороших перспективах внедрения. Данные о стабильной работе в течение нескольких тысяч часов под непрерывным облучением демонстрируют, что выбранная схема легирования и пассивации действительно смягчает проблемные аспекты жидкофазных перовскитных технологий (коррозию, миграцию ионов, деградацию межзеренных границ). Тем самым представленная работа даёт комплексное решение, позволяющее производить тонкоплёночные фотовольтаические панели без ухудшения технико-экономических показателей, что крайне важно для конкурентоспособности новой технологии.

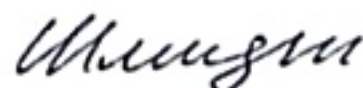
К содержанию работы есть несколько замечаний. Хотелось бы уточнить, насколько Ti_3C_2 изменяет поверхностные свойства плёнки после формирования. Возникают ли при длительном воздействии влаги из внешней среды дополнительные фазы, связанные с окислением максенов и переходом их в иные химические формы? Перспективным может стать расширение печатных методик за счёт применения рулонного нанесения (roll-to-roll),

если удастся добиться такой же стабильности поглощающих слоёв. В будущем работа могла бы охватить испытания на действительно непрерывных производственных линиях. Замечания имеют рекомендательный характер и не умаляют качества работы и полученных результатов.

Научное содержание, обоснованность и достоверность положений вынесенных на защиту сомнений не вызывает, т.к. они сформулированы на основе результатов, представленных на Российских конференциях и в статьях, опубликованных в журналах, входящих в перечень Scopus и WoS. Кроме того, все экспериментальные результаты получены хорошо разработанными и апробированными методиками.

Судя по автореферату, диссертационная работа Куланчикова Юрия Олеговича является законченным исследованием, включающим новые научные и практически значимые результаты. Считаю, что автореферат 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».

Шмидт Наталия Михайловна

 / Шмидт Н.М./

доктор физ.-мат.-наук по специальности физика

полупроводников и диэлектриков,

главный научный сотрудник ФТИ им. А.Ф.Иоффе

(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26, Тел. (+7) 911-167-12-36, тел. 89111671236, e-mail : Natalia.Shmidt@mail.ioffe.ru)

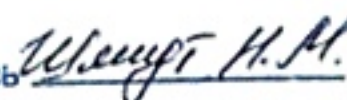
Согласна на предоставление и обработку


персональных данных



12.02.2025



Подпись  удостоверяю
зав.отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе

 , 