

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

Главным проблемой в современной фотовольтаике остаётся достижение баланса между высокой эффективностью и экономичной технологией формирования активных слоёв. Традиционные тонкоплёночные СБ (CdTe, CIGS, аморфный кремний) успешно реализуются в промышленности, но их изготовление обычно включает многоступенчатые вакуумные и термические операции (испарение, реактивное осаждение, легирование в безвоздушной среде), требующие существенных капиталовложений. Гибридные перовскиты, напротив, потенциально позволяют перейти к более простым и дешёвым жидкофазным методам нанесения, но при этом нуждаются в особом контроле морфологии и химического состава. Именно это и рассматривается в работе Д.С. Саранина: диссертация демонстрирует, что грамотное сочетание жидкофазных методов и вакуумных операций (обработка мокрых плёнок, лазерная абляция в газовой среде) способно обеспечить высокую степень однородности и надёжность тонкоплёночных структур на больших площадях.

Актуальность представленной темы подтверждает мировой тренд, когда даже в традиционных производственных линиях (где доминируют вакуумные процессы магнетронного распыления или термического испарения) внедряются частичные этапы жидкофазной печати (slot-die, струйная печать) для удешевления производства. Но переход к габаритным перовскитным модулям свыше 100×100 мм актуализирует вопрос о совмещении жидкофазных методов с вакуумными стадиями, такими как обработка мокрых покрытий при низком давлении (ОМПВ) или герметизация с помощью барьерных слоёв, зачастую наносимых в вакууме. Диссертант аккуратно рассматривает данные аспекты, нацеливаясь на то, чтобы дать технологически связное решение, не увеличивая капитальные затраты на оборудование.

Согласно автореферату, диссертация включает пять разделов, введение и заключение, а также приложения, список публикаций и патентов.

Во введении ставится цель повышения эксплуатационных свойств тонкоплёночных перовскитов, что обеспечивает конкурентное преимущество по отношению к вакуумным аналогам. Автор намечает путь: использовать жидкофазное формирование, дополненное специально подобранными вакуумными или полувакуумными (разреженная среда) операциями для оптимизации структуры и защиты от деградации.

Первый раздел даёт подробный обзор состояния научно-технологических разработок в области перовскитной фотовольтаики, характеризуя её плюсы (высокий КПД, низкая температура осаждения) и минусы (подверженность коррозии и миграции ионов) в сравнении с тонкоплёночными технологиями на основе CdTe, CIGS, GaAs, где вакуумные процессы (co-evaporation, sputtering) обеспечивают исторически отлаженную технологию. Автор подчёркивает, что, хотя гибридные перовскиты демонстрируют впечатляющие показатели при лабораторной площади, масштабирование вызывает трудности, обусловленные необходимостью устранения дефектов и внедрения стадий стабилизации в процессе нанесения.

Во втором разделе изложены основные технологические приёмы жидкофазного синтеза: от растворения прекурсоров до формирования плёнок методом slot-die, сопровождаемого вакуумной сушкой (ОМПВ). Здесь автор детализирует, почему вакуумные стадии важны для удаления остаточных растворителей и побочных продуктов, которые, оставшись в плёнке, приводят к повышенной дефектности и существенно снижают ресурс. Описаны режимы откачки, влияющие на скорость кристаллизации и контролирующие морфологию зёрен, что в конечном итоге формирует структуру перовскитной плёнки с заданными свойствами.

Третий раздел посвящен вопросам дефектной и легирующей инженерии. Проведены исследования свойств электрически активных дефектов, обсуждается их возможная природа. Обсуждается, как те или иные примеси или вакансии влияют на результат вакуумной сушки и последующие пост-обработки при пониженном давлении. Автор указывает, что именно сочетание химической пассивации межзеренных границ и вакуумного удаления побочных фаз создаёт комплексный эффект, повышающий стабильность. Спектроскопические данные (DLTS, рентгенофазовый анализ) подтверждают, что правильно организованная обработка даёт значительно более «чистую» перовскитную фазу.

Четвёртый раздел рассматривает вакуумную составляющую в лазерном скрайбировании (P1, P2, P3). В самом процессе абляции под вакуумом или в пониженной

газовой среде существенно снижается риск образования окислов или неконтролируемых реакций между расплавленными частицами и остаточными газами. Автор описывает, какие параметры давления и мощности лазера используются, чтобы не разрушить перовскитную плёнку по глубине и сохранять адгезию к подложке и селективным слоям. Это особенно важно на масштабируемых подложках, где любое повреждение приводит к шунтам и падению эффективности.

В пятом разделе приводятся итоги ресурсных испытаний модулей, подтверждающих высокую стойкость к влаге и температурным нагрузкам. Показаны мощности 4,7–6,4 Вт (для формата 100×100 мм), а время наработки до серьёзной деградации (T80 более 2000–3000 часов) указывает на правильность выбранной стратегии совмещения жидкофазных процедур с вакуумными стадиями, включая герметизацию и ламинацию.

Новизна работы состоит в том, что автор предлагает технологическую схему, где жидкофазное нанесение основного фотоактивного слоя перовскита органично дополнено вакуумными операциями, такими как откачка растворителя, формирование буферных слоёв и лазерная абляция в низком давлении. Такой гибридный подход показал улучшение структурной однородности и чистоты перовскитной плёнки, что существенно увеличивает ресурс батарей. Методы спектрального и дифракционного анализа подтверждают, что оптимизированные по давлению режимы ионной/паровой откачки устраняют остаточные следы растворителей и снижают риск гигроскопических продуктов в объёме плёнки.

Достоверность выводов подкреплена актами внедрения и патентной документацией. Экспериментальные исследования охватывают весь цикл — от приготовления раствора и настройки вакуумной сушки до сборки модулей и их длительных испытаний. Автор опирается на современные представления о физике гибридных материалов и убедительно показывает, что без вакуумных процедур при жидкофазном пути изготовления перовскитов не достичь требуемой стабильности для промышленного выпуска.

Практическая ценность работы в том, что предлагается хорошо проработанный подход, частично исключая вакуумные методы при формировании активного слоя, но сохраняющий вакуумные стадии там, где они приносят наибольшую пользу. Это обеспечивает снижение общих издержек, не приводя к сложностям в линии производства (вакуумные станции всё равно могут использоваться для удалённых этапов). Длительные ресурсные испытания доказывают, что надлежащая вакуумная post-обработка позволяет

изготавливать модули с удовлетворяющими требованиям рынка параметрами стабильности и долговечности. Достижение КПД 15–17% на больших форматах при мощности модулей 4,7–6,4 Вт и сроке жизни свыше 2000 часов ясно свидетельствует о готовности данных подходов к пилотным промышленным внедрениям.

Суммируя, можно сказать, что в автореферате четко обозначены цель и задачи исследования. Полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью. Защищаемые положения сформулированы грамотно. Основные выводы по работе соответствуют полученным данным. Результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, патентах, а также апробированы на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях. Основные результаты, научные положения и выводы диссертации не вызывают сомнений с точки зрения их достоверности.

Следует высказать несколько замечаний к тексту автореферата:

1. Высокий КПД элементов при низкой освещенности представляет интерес, однако было бы полезно выявить причину такого повышения.
2. Одним из направлений разработки солнечных элементов на основе гибридных перовскитов является разработка материалов, не содержащих свинец. Было бы полезно хотя бы кратко, обсудить это направление в литобзоре.
3. Следует высказать замечания и по оформлению автореферата. В нем содержатся грамматические ошибки, есть повторы текста.

Тем не менее, указанные недостатки не являются принципиальными и не снижают общего хорошего впечатления от работы. Представленная работа вносит значительный вклад в понимание и практику совмещения жидкофазных и вакуумных процессов при создании перовскитных фотопреобразователей. Автор раскрывает механизмы взаимодействия между фазой перовскита и остаточными растворителями, демонстрирует важность вакуумных стадий сушки и структурирования, а также подтверждает эффективность комплекса мер длительными испытаниями реальных модулей. Как следует из автореферата, работа Д.С. Саранина представляет собой законченную работу, выполненную на высоком уровне и отвечающую 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».

Главный научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.10– физика полупроводников и диэлектриков), профессор



Якимов Евгений Борисович

Почтовый адрес: 142432, Московская обл., Ногинский р-н, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6.

Тел.: +7-496-52-44182, e-mail: yakimov@iptm.ru

Подпись Е.Б. Якимова ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ИПТМ РАН

Канд. физ.-мат. н.

