

## ОТЗЫВ

доктора технических наук, профессора Рисованого Владимира Дмитриевича на автореферат диссертации Саранина Данила Сергеевич «Технология жидкофазного получения и легирования тонкопленочных перовскитов для повышения эксплуатационных характеристик солнечных батарей на их основе», представленный на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.3. «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

За последние 30 лет достигнут значительный прогресс в области науки и техники по применению органических и гибридных полупроводников на основе кристаллического кремния в качестве основы солнечных панелей. Рост и расширение сферы применения фотоэлектрических преобразователей энергии и необходимость удешевления производственного цикла стимулирует развитие новых технологий. Поэтому актуальность диссертационной работы, посвященной масштабированию процессов жидкофазного изготовления перовскитных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с модульным соединением, повышения их эксплуатационных характеристик, созданием полного технологического цикла с высоким выходом годного за настройки химических и оптоэлектронных свойств интерфейсов в тонкопленочных устройствах, не вызывает сомнения.

Исследования направлены на повышение воспроизводимости структурного совершенства перовскитных микрокристаллических слоев, оптоэлектронных свойств гетероструктур в перовскитных ФЭП и снижения эффективности транспорта фотоносителей при масштабировании размеров устройств от  $\sim 0.1$  см<sup>2</sup> (лабораторные ячейки) до  $\sim 100$  см<sup>2</sup> (полупромышленные модули) с применением промышленных технологических процессов. Для установления точных механизмов деградации и их реального вклада в транспорт фотоносителей проведено комплексное исследование изменений фазового состава, численных параметров дефектов, времени жизни фотоносителей и

приборных характеристик ФЭП, изучена взаимосвязь фотоэлектрических параметров со структурными изменениями в перовскитных пленках, динамика коррозии в зарядотранспортных слоях и численными параметрами заряженных дефектов. Показано, что Сэндвичная архитектура перовскитных ФЭП с тонкопленочными покрытиями от нескольких нм до 1 микрона требует нивелирования химического взаимодействия между сформированным покрытием на подложке. Поэтому введение легирующих примесей и модификаторов поверхности для нейтрализации состояний технологически реализовано с использованием стандартных растворителей и применимости слот-матричного нанесения с продолжительным межоперационным периодом. В этой связи критичным фактором является однородность толщины, смачиваемости, воспроизводимости свойств для масштабированных ячеек. Сочетание сильного оптического поглощения гибридных перовскитов и низкой концентрации собственных дефектов, оцениваемой в пределах от  $10^{12}$  до  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, позволяет повысить КПД ячеек в условиях низкой освещенности.

Научная новизна проведенных исследований состоит в разработке прекурсора для жидкофазного получения оксидных зарядо-транспортных материалов для перовскитных ФЭП р-і-n архитектуры, определении влияния буферной прослойки низкоразмерного  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  на динамику процессов коррозии интерфейса металл/полупроводник в перовскитном ФЭП, выявлении закономерности изменения численных параметров дефектов в перовскитных ФЭП при воздействии внешних эксплуатационных факторов, варьировании зарядо-транспортных слоев и использовании пассивационных прослоек, разработке технологических режимов масштабирования жидкофазной технологии перовскитных модулей и батарей р-і-n архитектуры, включающий послойное широкоформатное нанесение на принципах экструзии и многоступенчатое лазерное скрайбирование.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждена изготовлением и внедрением на предприятии АО «ИСТОК» солнечных батарей на основе масштабированных перовскитных модулей размером 100 x 100 мм, выполненных по жидкофазной технологии, с мощностью от 4.7 до 6.4 Вт в виде раскладываемого матерчатого пенала (600 x 400 мм) и жесткой панели на химически упрочненном стекле (500 x 500 мм), подтверждением практической эффективности применения перовскитных солнечных модулей и батарей при эксплуатации, в том числе, в режимах засветки с низкой освещенностью для автономного питания электроники. Технологические разработки защищены в виде секретов производства и Патентов на изобретения, включая иностранные.

Замечания на автореферат:

1. Первая глава посвящена обзору современного состояния фотовольтаики. Но из автореферата не совсем понятно, какие конкретные научно-технические задачи должны быть решены для повышения характеристик и эксплуатационных свойств перовскитных солнечных модулей и батарей.

2. Одна из целей диссертационной работы является «разработка новых технологических решений перовскитных ФЭП». В выводе 6 говорится, что «с применением разработанной жидкофазной технологии перовскитных модулей были разработаны изделия...». Но в автореферате не приводятся схемы изготовления с последовательностью операций, их параметров, по которым были изготовлены или можно изготовить перовскитные ФЭП нового поколения.

3. Приводится множество полученных экспериментально физических величин, но для большинства из них не указаны погрешности. Например, на стр.22 говорится, что «плотность мощности достигла 90,2 мкВт/см<sup>2</sup>». Значимое значение, скорее всего, выражается целым числом 90 и погрешность

будет целым числом, без дроби. КПД на стр.34 также правильней указывать целыми числами.

Сделанные замечания не снижают общее положительное впечатление от диссертационной работы.

Считаю, что представленная диссертационная работа соответствует требованиям определенным Порядком присуждения ученых степеней НИТУ МИСИС о присуждении ученой степени доктора технических наук, а ее автор Саранин Данила Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Профессор, доктор технических наук

Научный руководитель АО «НИИ НПО «ЛУЧ»

 В.Д. Рисованный

Подпись Рисованого В.Д. заверяю

Начальник отдела кадров

 М.В. Мельникова

