

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке «Федерального
государственного бюджетного учреждения
высшего образования и науки Санкт-
Петербургского Национального
Исследовательского Академического
Университета имени Ж.И. Алфёрова
русской академии наук»
Д.ф.-м.н., член. корр. РАН



Егоров Антон Юрьевич

М.п.

«4» июль 2023 г.

Отзыв ведущей организации

«Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени
Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

о диссертационной работе **Ермановой Инги Олеговны «Модификация поверхности NiOx тонких пленок и многоступенчатая кристаллизация фотоактивных слоев для высокоэффективных р-і-п перовскитных солнечных элементов»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 — «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

В последние два десятилетия в области фотовольтаических исследований наблюдается значительное развитие, при этом на мировом уровне отмечается закрепление возобновляемой солнечной энергетики. Гибридная металлоорганическая фотовольтаика на основе перовскитных соединений как одна из представителей тонкопленочных технологий демонстрирует стабильный рост эффективности работы солнечных элементов, что позволило данному направлению стать одним из главных конкурентов традиционным кремниевой и галлий-

арсенидной нишам фотопреобразователей. Начиная с 2009 года, эффективность перовскитных солнечных элементов увеличилась с 3,8 до 26%, что предполагает не только научный, но также и коммерческий интерес со стороны предприятий. Успех перовскитной тематики основан не только на выдающихся оптоэлектронных и полупроводниковых свойствах данных материалов, подробно описанных в работе, но также на широком производственном выборе методов нанесения всех функциональных слоев.

Известно, что наибольшая эффективность преобразования солнечного света была зафиксирована в устройствах с мезоскопической $p-i-n$ конфигурацией. Однако, данная архитектура имеет ряд ограничений при создании устройств за счет применения высокотемпературных процессов и возникновения фотодегradации под воздействием ультрафиолетового освещения в диоксиде титана, что повышает рекомбинационный вклад в работоспособность устройства. В связи с данными обстоятельствами в данной работе автор использовал планарную $p-i-n$ архитектуру с p -типом проводимости оксида никеля (NiO_x) при сохранении первоначальной производительности устройств. Выбор дырочно-транспортного слоя был основан на его полупроводниковых свойствах и методе нанесения. Для снижения структурных дефектов на поверхности NiO_x /перовскит путем адаптации морфологии поверхности (сшивание некоординированных ионов на границах зерен в перовските) и предотвращение диффузии ионных дефектов вдоль устройства были применены два метода воздействия на слои.

В диссертационной работе автор применяет многоэтапную технологию кристаллизации тонких пленок перовскита для снижения дефектных состояний, увеличения размера зерен, большей диффузионной длины носителей, а также улучшения контакта и транспорта носителей между перовскитом и транспортным слоем электронов/дырок за счет химического взаимодействия между перовскитными пленками и оксидом никеля методом поверхностной модификации полимерами.

Важной особенностью работы также является масштабирование технологии перовскитных солнечных элементов. Таким образом, автор учитывает важные аспекты технологии перовскитной фотовольтаики и специфику эксплуатации устройств. Все это определяет актуальность диссертационной работы Ермановой Инги Олеговны.

Целью представленной работы является исследование приборных характеристик и процессов жидкофазного получения $p-i-n$ солнечных элементов на основе галогенидных перовскитов с модификацией интерфейса «зарядо-транспортный слой p -типа/фотопоглощающая пленка» органическими диэлектриками и полупроводниками для повышения КПД и стабильности работы элементов в эксплуатационных условиях.

Новизна исследования и полученных результатов заключается в следующем:

1. в применении модифицированного гидрофобного слоя NiO_x для создания аналога мезоскопического ДТС и увеличения площади интерфейса ДТС/перовскит и количества переносимых носителей зарядов. Модифицированный пористый NiO_x позволил адаптировать метод двухстадийной кристаллизации перовскитов ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPbI_3) и $\text{Cs}_{0,05}\text{MA}_{0,1425}\text{FA}_{0,8075}\text{PbI}_{2,7}\text{Br}_{0,3}$ (мультикатионный)) в планарной p-i-n конфигурации, что помогло достичь высоких стабильных значений КПД устройств.
2. Выявлено, что интеграция высокомолекулярных органических диэлектриков (PMMA, PEO) в p-i-n перовскитных солнечных элементах позволяет увеличить время жизни фотоносителей и снизить вклад процессов безызлучательной рекомбинации.
3. Определено, что использование тонких полимерных прослоек PMMA, PEO между дырочно-транспортным слоем NiO_x и перовскитом $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ведет к увеличению стабильности устройства под длительным освещением.

Значимость научных и практических результатов диссертации

1. Разработана технология двухстадийного нанесения перовскита с однокатионным и мультикатионным составами на воздухе для создания p-i-n планарных солнечных элементов на основе NiO_x транспортного слоя с эффективностью (14% для MAPbI_3 и 15,6% для мультикатионного).
2. Разработана технология нанесения пассивирующей прослойки на основе полиметилметакрилата (PMMA) и полиэтиленоксида (PEO) на интерфейсе NiO_x /перовскит для лучшей эффективности устройств и снижения уровня рекомбинации на интерфейсе ДТС/перовскит. Были достигнуты эффективности, равные 18,6% и 18,3% на подложках с активной площадью $0,09 \text{ см}^2$, и эффективности на пассивированных PMMA устройствах с увеличенной активной площадью: 15,2% ($S = 1 \text{ см}^2$), 14,4% ($S = 2,3 \text{ см}^2$) и 8% ($S = 10 \text{ см}^2$).
3. Подтверждены технологические возможности масштабирования перовскитных солнечных элементов с тонкопленочными прослойками органических диэлектриков при изготовлении модулей путем последовательного соединения 5 подъячеек площадью 2 см^2 ($5 \times 40 \text{ мм}^2$).
4. Фотовольтаические измерения (точки максимальной мощности, переходные измерения по напряжению, экстракция заряда, темновая ВАХ, внутренняя квантовая эффективность) подтвердили, что пассивация полимерами приводит к меньшей концентрации дефектов на границе раздела, что соответствует более высоким значениям параметров и меньшей динамике деградации.

5. Стабильность работы пассивированных устройств выросла в 14 раз (потеря 20% от начальной эффективности наблюдалась через 140 часов) по сравнению с исходным образцом (10 часов).

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертационной работы подтверждается корректностью формулировки цели и постановки задач, существенным объемом полученных экспериментальных данных и их анализом на основе подробного обзора литературных данных по тематике диссертации, применением в исследованиях современного технологического, измерительного и испытательного оборудования. Приведенные результаты хорошо согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для ознакомления и использования специалистами в области тонкопленочных оптоэлектроники ведущих научно-исследовательских организаций и промышленных предприятий: ГК «Хевел», АО «НПП «КВАНТ», ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике», Холдинг «Росэлектроника», Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН, Национальный исследовательский университет ИТМО, Институт синтетических полимерных материалов имени Н.С. Ениколопова РАН, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова.

Помимо этого, полученные результаты и разработанные методы следует рекомендовать для использования в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов в области электроники, наноэлектроники и альтернативной энергетике.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе описаны два полимера, но только один использован при исследовании возможности масштабирования устройств.
2. Отсутствие погрешностей на части экспериментальных графиках, а также аналитических расчетов по полученным результатам.
3. В достаточной мере не объяснены причины существенного снижения КПД при масштабировании модулей.
4. В работе периодически встречаются не общепринятые формулировки и терминология, также англицизмы и опечатки.

Сделанные замечания носят частный характер и не ставят под сомнения основные результаты и выводы диссертации, не снижают научной и практической значимости диссертации.

Общая оценка диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка используемых источников из 132 наименований. Работа изложена на 106 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков, 11 таблиц, 25 формул. В заключении приведено обобщение полученных результатов и выводы, отражающие результаты исследований.

Структура и содержание работы свидетельствуют о том, что в целом диссертация представляет собой завершенное научное исследование, в котором продемонстрирована актуальность, новизна и перспективность подходов. Выводы и заключения обоснованы и имеют научную и практическую ценность для разработок в области создания новых функциональных материалов.

По теме диссертации опубликованы 3 статьи, в журналах, входящих в базы цитирования SCOPUS и WoS, и 6 тезисов докладов. Публикации в авторитетных изданиях и выступления на международных конференциях свидетельствуют о том, что полученные автором диссертации результаты соответствуют уровню современной науки.

Заключение

Диссертационная работа Ермановой Инги Олеговны является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной автором на высоком научном и техническом уровне. Результаты и выводы диссертации являются достоверными и научно-обоснованными. Автореферат и публикации полно и правильно отражают содержание диссертации и её основные положения и выводы. По своей актуальности, научной новизне, практической значимости, достоверности, а также объему выполненных исследований и личному вкладу соискателя диссертационная работа Ермановой Инги Олеговны «Модификация поверхности NiOx тонких пленок и многоступенчатая кристаллизация фотоактивных слоев для высокоэффективных p-i-n перовскитных солнечных элементов» полностью отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям в соответствии с пп.9-14 «Положения о порядке присвоения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор Ерманова Инга Олеговна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 — «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

Отзыв составлен и принят на основании ознакомления с текстом диссертации, автореферата и публикаций соискателя, обсуждения доклада Ермановой И.О. на заседании тематического семинара, проведенном 02.06.2023 г. в Лаборатории Возобновляемых источников энергии «Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки Санкт-Петербургский Национальный Исследовательский Академический Университет имени Ж.И. Алфёрова российской академии наук».

Отзыв составил:

Заведующий Лабораторией
возобновляемых источников энергии
Федерального государственного бюджетного
учреждения высшего образования и науки
Санкт-Петербургский Национальный
Исследовательский Академический
Университет имени Ж.И. Алфёрова
российской академии наук.

д. ф-м. н., профессор

E-mail: imukhin@yandex.ru

Мухин Иван Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени
Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

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

Телефон: +7-(812) 297-21-45

Email: office@spbau.ru

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ



Специалист по кадрам
Рекалова Л.М.
«06» 06 2023.