18

Улучшение морфологических и фотовольтаических параметров перовскитных солнечных элементов с использование различных дерочных транспортных слоев

© Б. Хидиров [1], Н. Отакулова [1], М. Захидова [2], Л. Нурумбетова [3], А. Сапарбаев [1,2,¶]

[1] Институт Ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз,
Ташкент, Узбекистан
[2] Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека,
Ташкент, Узбекистан
[3] Ташкентский государственный транспортный университет,
Ташкент, Узбекистан

¶e-mail: saparbaevaziz83@gmail.com

Поступила в редакцию 12.02.2026 г.
В окончательной редакции 07.05.2026 г.
Принята к публикации 12.05.2026 г.

Изучено влияние дырочно-транспортных слоёв Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) и Poly[bis(4-phenyl)(2,4,6-trimethylphenyl)amine](PTAA) на качество перовскитного активного слоя и эффективность солнечного элемента. При использовании PTAA в качестве интерфейсного материала перовскитный активный слой, полученный с добавкой 5 mol% N-метил-2-пирролидона, обладает высокоплотной кристаллической структурой, хорошим согласованием энергетических уровней и повышенной эффективностью переноса заряда. Перовскитные солнечные элементы на основе PTAA в ходе 80-дневных тестов стабильности сохранили 90% от первоначальной эффективности преобразования энергии. Полученные результаты открывают новые возможности для коммерциализации перовскитных солнечных элементов.

Ключевые слова: Перовскитные солнечные элементы, Poly[bis(4-phenyl)(2,4,6-trimethylphenyl)amine], Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate, N-метил-2-пирролидона, эффективность преобразования энергии.

DOI: 10.61011/OS.2026.07.63558.9097-26

Введение

В настоящее время промышленное производство и человеческое общество стремительно развиваются. В связи с этим широкомасштабное использование традиционных ископаемых источников топлива, таких как нефть, уголь и природный газ, приводит к возникновению глобальных экологических проблем [1]. Поэтому развитие возобновляемых и экологически чистых источников энергии стало актуальной задачей.

Одним из идеальных альтернативных источников энергии является солнечная энергия, которая отличается неисчерпаемостью и экологической чистотой. Солнечные элементы рассматриваются как важное решение в обеспечении энергией за счёт прямого преобразования солнечного излучения в электрическую энергию [2,3]. В последние годы перовскитные солнечные элементы (ПСЭ) благодаря высокой эффективности и относительно низкой стоимости производства привлекли большое внимание, и за короткий период времени эффективности преобразования энергии (ЭПЭ) ПСЭ достигла значения 26.7% [4,5]. Однако при создании высокоэффективных и стабильных ПСЭ одной из основных проблем, с которой сталкиваются многие исследователи, является выбор слоя переноса заряда [6,7]. Идеальный интерфейсный слой обеспечивает быстрое разделение зарядов, образующихся в перовске, снижает рекомбинацию и повышает эффективность устройства [5,8]. Кроме того, интерфейсный слой способствует формированию крупных и однородных зёрен перовскита, что повышает стабильность солнечного элемента. Известно, что PEDOT:PSS является проводящим полимером на водной основе и в настоящее время широко используется в качестве материала для модификации анодного интерфейса [9]. В области органических солнечных элементов и светоизлучающих диодов PEDOT:PSS считается одним из наиболее широко используемых материалов для переноса дырок. Энергетический уровень наивысшей занятой молекулярной орбитали (HOMO) PEDOT:PSS и его высокая проводимость способствуют эффективному переносу зарядов, тем самым повышая эффективность солнечного элемента. Однако недостатком PEDOT:PSS является его сильная кислотность, которая приводит к коррозии слоя ITO и снижает стабильность солнечного элемента. Добавка PSS повышает проводимость PEDOT, но одновременно вызывает неоднородность электрических свойств и микроструктуры материала [10]. Поэтому PEDOT:PSS не считается оптимальным дырочно-транспортным слоем для солнечных элементов.

В ПСЭ анодный интерфейс играет важную роль в повышении рабочих характеристик и стабильности устройства. Правильно подобранный анодный интерфейс снижает потери заряда в ПСЭ, увеличивает значение напряжения холостого хода (VOC) и улучшает стабильность ПСЭ. В настоящее время существует множество научных работ, посвящённых созданию эффективных и стабильных ПСЭ за счёт использования органических и неорганических материалов в качестве интерфейсных слоёв переноса заряда [11,12]. После замены PEDOT:PSS на органический материал PTAA было установлено, что ЭПЭ ПСЭ увеличилась до 18.9%, плотность тока короткого замыкания (JSC) достигла 23.16 mA/cm^2, а напряжение холостого хода (V_{OC}) — 1.04 V. Наиболее важным является то, что устройства сохранили 90% своей первоначальной эффективности в течение 80 дней. Это демонстрирует перспективы более широкого применения ПСЭ в будущем в качестве стабильного источника энергии. В данной статье проанализированы методы повышения эффективности и стабильности ПСЭ за счёт формирования высококачественных перовскитных активных слоёв, оптимизации интерфейсных слоёв и введения добавок в прекурсорный раствор перовскита.

Материалы и методы

Подложки стекло/ITO очищали в ультразвуковой ванне последовательно в ацетоне, деионизированной (DI) воде и изопропиловом спирте (IPA) по 13 min в каждом растворителе. Для удаления поверхностной влаги подложки стекло/ITO сушили потоком азота (N_2), после чего подвергали обработке кислородной (O_2) плазмой в течение 10 min. Затем в качестве дырочно-транспортного слоя раствор PEDOT:PSS (H.C. Starck, Германия) фильтровали через водный фильтр с размером пор 0.45 μm. После этого в атмосферных условиях проводили spin-coating при скорости 5000 rpm в течение 30 s и сушили при температуре 140°C в течение 10 min. В результате был получен гладкий и плотный PEDOT:PSS слой синего цвета.

Параллельно этому процессу отдельно готовили раствор PTAA (в толуоле с концентрацией 5 mg/mL), который также наносили на подложки ITO методом spin-coating при скорости 5000 rpm в течение 40 s, после чего отжигали при температуре 105°C в течение 10 min. Весь процесс работы с PTAA и PEDOT:PSS осуществлялся в азотной атмосфере внутри гловбокса.

Для приготовления прекурсорного раствора $MAPbI_3$ MAI и PbI_2 смешивали в молярном соотношении 1 : 1 в смеси N,N-диметилформамида (DMF) и диметилсульфоксида (DMSO) в объёмном соотношении 9:1, получая раствор с концентрацией 1.2 M. Прекурсорные растворы перовскита перемешивали при комнатной температуре в течение 12 h до полного растворения твёрдых компонентов. Перед процессом spin-coating в перовскитный раствор добавляли N-метил-2-пирролидона (NMP) в объёмной доле 5%. Перовскитный раствор наносили на слой PEDOT:PSS или PTAA методом spin-coating при скорости 4000 rpm в течение 30 s. В процессе spin-coating на поверхность перовскита капали толуол (антирастворитель), что позволило получить высококачественную поверхность. Перовскитные активные слои отжигали в печи при температуре 100°C в течение 10 min.

В качестве электрон-транспортного слоя порошок $PC_{61}BM$ растворяли в хлорбензоле с концентрацией 18 mg/mL, после чего наносили методом spin-coating при скорости 1500 rpm в течение 20 s и сушили при температуре 90°C в течение 10 min [13]. Затем образцы помещали в камеру термического испарения (evaporator), где в вакуумных условиях методом термического испарения через маску формировали алюминиевый (Al) электрод толщиной 100 nm с заданной площадью (~ 0.1 cm^2). Спектры поглощения перовскитных активных слоёв $MAPbI_3$ измеряли в диапазоне длин волн от 400 до 850 nm с использованием УФ-видимого спектрофотометра Shimadzu UV-1280. Спектры стационарной фотолюминесценции (ФЛ) регистрировали с помощью спектрометра Ocean Optics HR 2000+ при возбуждении на длине волны 507 nm. Морфология поверхности активных слоёв анализировалась с использованием сканирующего электронного микроскопа (SEM, Hitachi S-4800). Поверхностная топография и показатели шероховатости были исследованы с помощью атомно-силовой микроскопии (ACM, Bruker Dimension Icon). Вольт-амперные (J–V) характеристики перовскитных солнечных элементов $MAPbI_3$ измерялись при освещении AM 1.5G (100 mW/cm^2) с использованием источника-измерителя Keithley 2420 и солнечного симулятора Newport [14]. Интенсивность освещения калибровалась с помощью стандартного кремниевого солнечного элемента.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена диаграмма энергетических уровней перовскитных солнечных элементов $MAPbI_3$, изготовленных на основе дырочно-транспортных слоёв стекло/ITO/PTAA и стекло/ITO/PEDOT:PSS. В данной энергетической диаграмме уровни валентной зоны и зоны проводимости каждого слоя показаны в

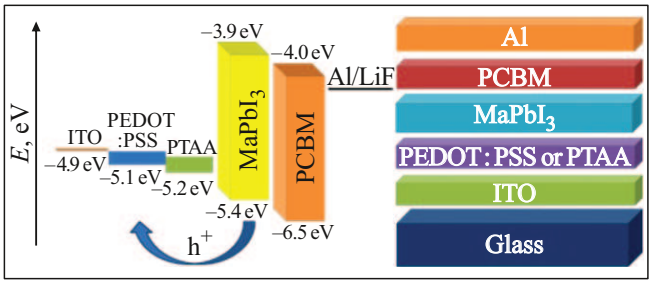

Рис. 1. Диаграмма энергетических уровней ПСЭ на основе $MAPbI_3$ с дырочными транспортными слоями PTAA и PEDOT:PSS.

единицах электрон-вольт (eV). Валентная зона ITO расположена примерно на уровне −4.9 eV и образует хорошее энергетическое согласование как со слоем PEDOT:PSS (≈ −5.1 eV), так и со слоем PTAA (≈ −5.2 eV), используемыми в качестве альтернативных дырочно-транспортных слоёв. Основная функция этих дырочно-транспортных слоёв заключается в селективной передаче дырок (h^+), образующихся в перовскитном слое, к электроду ITO и блокировании электронов. Валентная зона перовскитного слоя $MAPbI_3$ расположена примерно на уровне −5.4 eV, а зона проводимости — около −3.9 eV.

Поскольку энергетический уровень валентной зоны PEDOT:PSS и особенно PTAA очень близок к валентной зоне $MAPbI_3$, энергетический барьер для дырок практически отсутствует, что обеспечивает эффективное разделение и транспорт носителей заряда [15]. Поток дырок (h^+), обозначенный на диаграмме изогнутой стрелкой, отражает именно этот процесс. Расположенный над перовскитным слоем электрон-транспортный слой PCBM имеет уровень зоны проводимости около −4 eV, который хорошо согласуется с зоной проводимости $MAPbI_3$ [16,17]. Это обеспечивает эффективный перенос электронов из перовскита в PCBM и одновременно блокирует дырки. Верхний алюминиевый электрод (обычно в сочетании с LiF) обладает низкой работой выхода и эффективно собирает электроны во внешнюю цепь. Как показал анализ оптической пропускной способности, структура ITO/PTAA демонстрирует более высокую прозрачность в диапазоне 400−700 nm по сравнению с PEDOT:PSS. Это означает, что при использовании PTAA большее количество света достигает перовскитного активного слоя, в результате чего образуется больше электрон−дырочных пар. Энергетическая диаграмма, в свою очередь, показывает, что PTAA является не только оптически более выгодным, но и энергетически очень хорошо согласованным материалом с $MAPbI_3$.

На рис. 2 представлены спектры оптической пропускания слоёв стекло/ITO, стекло/ITO/PTAA и стекло/ITO/PEDOT:PSS в диапазоне длин волн 300−800 nm. Как видно из графика, чистая подложка стекло/ITO обладает высокой прозрачностью в области видимого света, при этом коэффициент пропускания сохраняется на уровне около 80−90% [18–20].

Спектры стекло/ITO/PTAA и стекло/ITO/PEDOT:PSS показывают, что оба дырочно-транспортных слоя обладают высокой оптической пропускной способностью в видимой области, однако PTAA демонстрирует более высокую и стабильную оптическую прозрачность по всему спектральному диапазону по сравнению с PEDOT:PSS. В частности, в диапазоне 400−700 nm значение пропускания света составляет около 88−90%, что свидетельствует о том, что слой PTAA практически не поглощает свет и эффективно пропускает его к поглощающему перовскитному слою. В результате увеличивается количество фотонов, достигающих перовскитного слоя, что создаёт благоприятные условия для

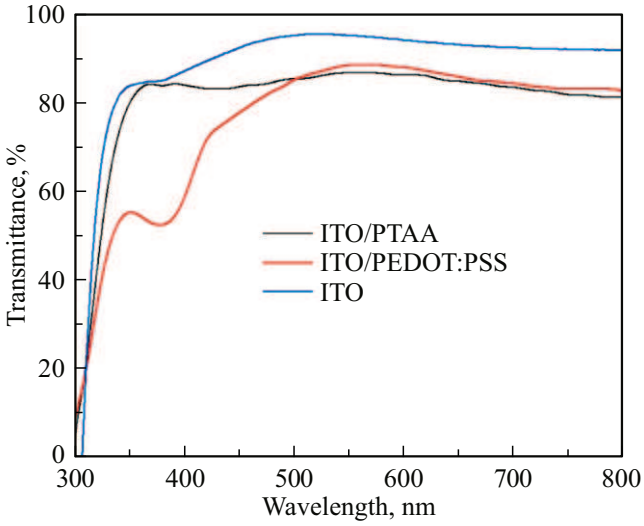

Рис. 2. Спектры оптического пропускания слоев стекло/ITO, стекло/ITO/PTAA и стекло/ITO/PEDOT:PSS.

повышения плотности тока короткого замыкания (JSC) и общей эффективности ПСЭ. В противоположность этому образец ITO/PEDOT:PSS обладает заметно более низкой оптической пропускной способностью, особенно в коротковолновой области 350−450 nm. Частичное поглощение света слоем PEDOT:PSS в этом диапазоне снижает количество излучения, достигающего перовскитного слоя, что может привести к уменьшению фототока, генерируемого в перовскитных солнечных элементах. Хотя при длинах волн выше 500 nm пропускание стекло/ITO, покрытого PEDOT:PSS, увеличивается до 80−85%, оно всё же остаётся ниже по сравнению со слоями, покрытыми PTAA, по всему спектральному диапазону. В результате уменьшается количество света, достигающего перовскитного слоя, что может отрицательно сказаться на плотности тока короткого замыкания ПСЭ [21,22]. Общий спектральный анализ показывает, что ПСЭ, изготовленные с использованием дырочно-транспортного слоя PTAA, обеспечивают более эффективный перенос зарядов, снижают рекомбинацию и, как следствие, повышают ЭПЭ солнечного элемента. Поэтому при создании высокоэффективных ПСЭ структура стекло/ITO/PTAA является более предпочтительной, поскольку способствует достижению более высокого фототока и ЭПЭ.

Кроме того, с целью оценки способности переноса дырок в активных слоях $MAPbI_3$, изготовленных на основе дырочно-транспортных слоёв PEDOT:PSS и PTAA, были измерены спектры ФЛ. Как видно из рис. 3, максимум ФЛ перовскитного активного слоя $MAPbI_3$ расположен примерно в области 760 nm, что хорошо согласуется с ранее опубликованными литературными данными [23, 24]. Структура стекло/ITO/перовскит демонстрирует наибольшую интенсивность ФЛ, что указывает на то, что фотоиндуцированные носители заряда,

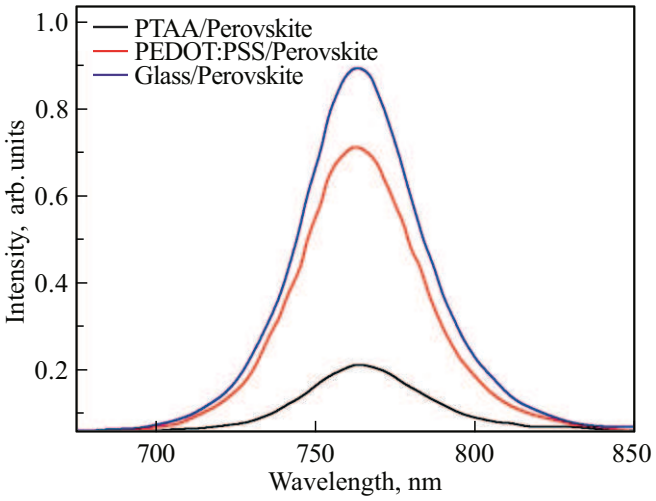

Рис. 3. ФЛ спектры ПСЭ на основе $MAPbI_3$, изготовленных с использованием слоёв переноса дырок стекло /ITO, стекло /ITO/PEDOT:PSS и стекло /ITO/PTAA.

образующиеся в перовскитном активном слое, в основном рекомбинируют по радиационному механизму, а экстракция зарядов практически отсутствует.

В структуре PEDOT:PSS/перовскит интенсивность ФЛ заметно снижается за счёт наличия дырочно-транспортного слоя, однако положение пика ФЛ практически сохраняется в той же области длин волн. Это свидетельствует о том, что ширина запрещённой зоны перовскита существенно не изменяется, но на интерфейсе с PEDOT:PSS происходит эффективная экстракция носителей заряда, в частности дырок. Вместе с тем гидрофильные и кислотные свойства PEDOT:PSS могут приводить к образованию дополнительных дефектных состояний на интерфейсе, что способствует частичной безызлучательной рекомбинации носителей заряда и обусловливает относительно более высокую интенсивность ФЛ [25,26]. В свою очередь структура PTAA/перовскит демонстрирует наименьшую интенсивность ФЛ. Это указывает на лучшую способность PTAA к переносу дырок и более эффективное согласование энергетических уровней с валентной зоной перовскита. В результате фотоиндуцированные дырки быстро и эффективно переносятся из перовскитного слоя в дырочно-транспортный слой, а вероятность рекомбинации внутри перовскита существенно снижается. Резкое уменьшение интенсивности ФЛ подтверждает высокую эффективность разделения зарядов на интерфейсе PTAA/перовскит и свидетельствует о том, что такая структура является более благоприятной для применения в солнечных элементах.

Таким образом, спектры оптической пропускной способности и диаграммы энергетических уровней демонстрируют взаимодополняющие результаты. Использование слоя PTAA в ПСЭ одновременно снижает оптические потери и создаёт благоприятную энергетическую среду для переноса дырок. По этой причине структура ITO/PTAA/$MAPbI_3$/PCBM/Al в ПСЭ с архитектурой p–i–n считается более предпочтительной по сравнению со структурами на основе- PEDOT:PSS. Применение PTAA в качестве дырочно-транспортного слоя в ПСЭ $MAPbI_3$, а также введение добавки NMP в прекурсорный раствор $MAPbI_3$, привело к заметному повышению эффективности устройств. Результаты оценивались на основе СЭМ-изображений и значений RMS шероховатости поверхности, определённых методом АСМ.

Атомно-силовая микроскопия является эффективным методом исследования, позволяющим точно отображать морфологические особенности поверхности образцов и оценивать степень шероховатости активного слоя на основе межатомных ван-дер-ваальсовых сил [27]. Сканирующая электронная микроскопия также широко применяется для анализа морфологии поверхности и основана на формировании изображения за счёт взаимодействия пучка высокоэнергетических электронов с поверхностью образца и возникающего электромагнитного излучения [28,29]. На рис. 4, *a* и 4, *b* представлены АСМ-изображения ПСЭ $MAPbI_3$, изготовленных с использованием дырочно-транспортных слоёв PEDOT:PSS и PTAA соответственно. Среднеквадратичная шероховатость поверхности (RMS) составила 2.38 nm для PEDOT:PSS и 2.63 nm для PTAA. Более высокая шероховатость поверхности активных слоёв, сформированных на PTAA, по сравнению с PEDOT:PSS, оказала заметное влияние на процесс формирования перовскитной тонкой плёнки. Это можно объяснить тем, что относительно большая шероховатость поверхности при использовании PTAA способствует образованию большего числа центров зародышеобразования (nucleation) перовскитных кристаллов. В результате кристаллы перовскита формируются более равномерно и контролируемо по всей поверхности. Согласно литературным данным, на гладких поверхностях число центров зародышеобразования меньше, и кристаллы формируются более случайным образом и имеют меньшие размеры [30–32]. Средняя шероховатость поверхности PTAA, напротив, способствует как вертикальному, так и горизонтальному росту кристаллов, а также их слиянию и укрупнению. В результате уменьшается число границ зёрен и связанных с ними дефектных состояний, а также существенно снижаются процессы безызлучательной рекомбинации.

Из СЭМ-изображений $MAPbI_3$ ПСЭ, приведённых на рис. 4, *c* и 4, *d*, видно, что поверхности активных слоёв, сформированных на PEDOT:PSS и PTAA, являются однородными и плотными. Однако в активных слоях, полученных на основе PTAA (Среднее значение $\approx 250-350$ nm), наблюдаются значительно более крупные перовскитные кристаллические зёрна по сравнению со слоями на PEDOT:PSS (Среднее значение $\approx 180-220$ nm). Это указывает на то, что использование PTAA в качестве дырочно-транспортного слоя не только улучшает перенос дырок и снижает рекомбинацию

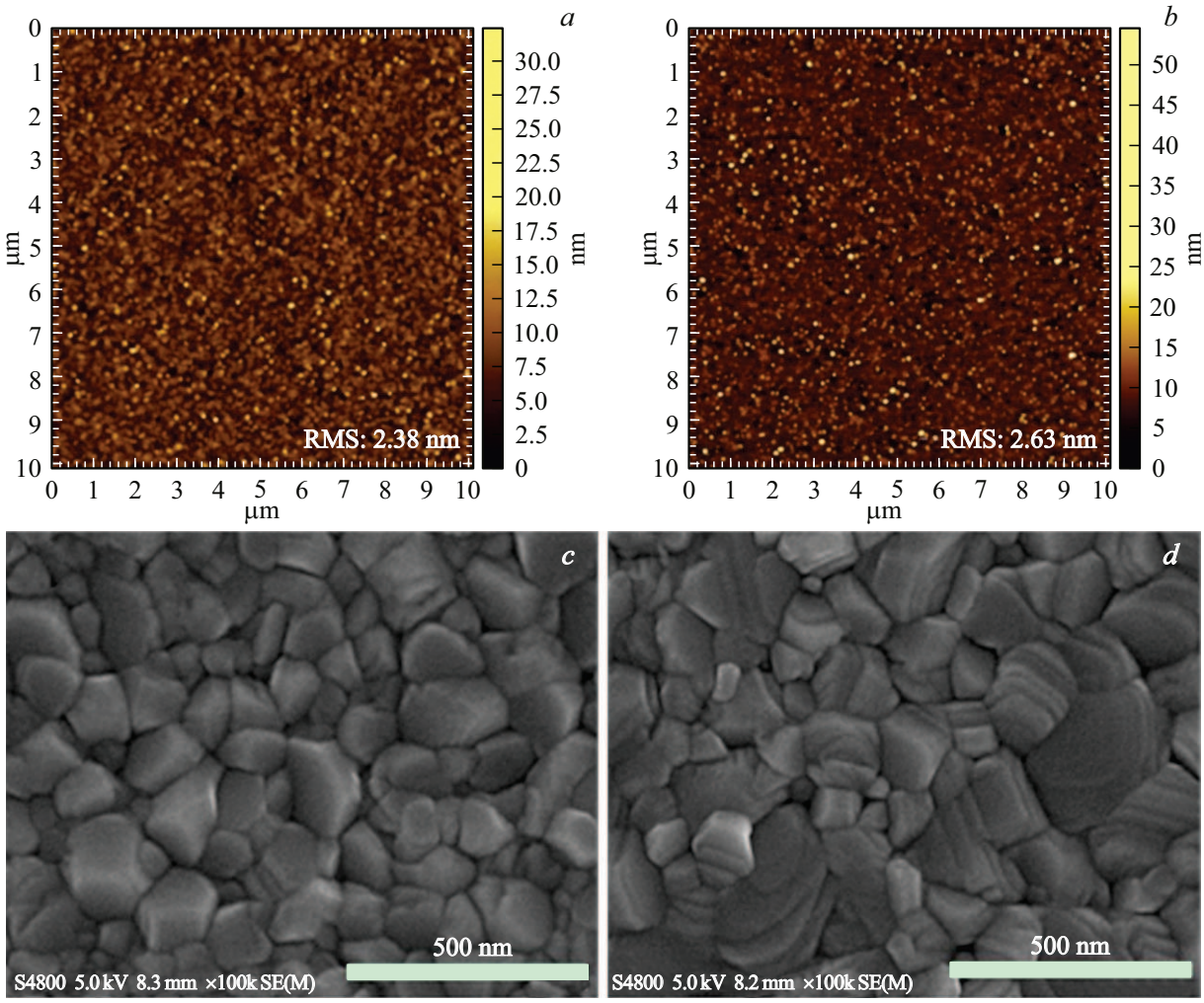

Рис. 4. Изображения MAPbI3 ПСЭ, полученные с помощью АСМ и СЭМ, на основе (a, c) PEDOT:PSS и (b, d) дырочно-транспортных слоев PTAA.

зарядов, но и эффективно стимулирует рост кристаллических зёрен в перовскитном слое. В результате формируются высококачественные активные слои с крупноразмерными перовскитными зёрнами. Согласно анализу литературных данных, крупные кристаллические зёрна перовскита в сочетании с эффективными дырочно-транспортными слоями улучшают транспорт носителей заряда, уменьшают рекомбинационные потери, что приводит к увеличению плотности тока и, как следствие, к повышению ЭПЭ ПСЭ. Это наглядно подтверждается СЭМ-изображениями перовскитных слоёв на основе PTAA, в которых наблюдаются более крупные зёрна.

На рис. 5 представлены XRD спектры перовскитных солнечных элементов $MAPbI_3$, изготовленных на основе дырочно-транспортных слоёв PEDOT:PSS и PTAA. В обоих случаях отсутствие дифракционных пиков, характерных для MAI и PbI_2, подтверждает полное превращение исходных прекурсоров в фазу $MAPbI_3$ в процессе формирования перовскитного слоя. Интенсивные дифракционные пики, наблюдаемые при углах $2\theta = 14.17°$, $28.49°$ и $31.90°$, соответствуют кристаллографическим плоскостям (110), (220) и (312) соответственно, что указывает на ортогональную кристаллическую структуру $MAPbI_3$ [33,34]. Несмотря на то, что перовскитные активные слои были сформированы на различных дырочно-транспортных слоях, их кристаллические фазы оказались схожими, что свидетельствует о том, что оба дырочно-транспортных слоя являются благоприятными для формирования высококачественной перовскитной фазы. Однако интенсивность дифракционных пиков перовскитных активных слоёв, сформированных на основе PTAA, значительно выше по сравнению со слоями на PEDOT:PSS, что хорошо согласуется с результатами АСМ- и СЭМ-анализов.

На рис. 6 и в таблице представлены вольт-амперные $(J-V)$ характеристики и фотогальванические параметры ПСЭ $MAPbI_3$, изготовленных с добавлением 5 об.% N-метил-2-пирролидона (NMP) в прекурсорный раствор перовскита и с использованием PTAA в качестве дырочно-транспортного слоя. Из графиков видно, что

Фотоэлектрические параметры слоев ITO/PTAA/MAPbI3/PCBM/Al, нанесенных методом центрифугирования с различной скоростью

Скорость вращения, rpm	VOC, V	JSC, mA/cm^2	FF, %	ЭПЭ, %
3000	1.07	22.01	75	17.63
4000	1.04	23.16	78	18.9
5000	1.03	21.98	80	18.08
6000	1.02	21.61	80	17.55

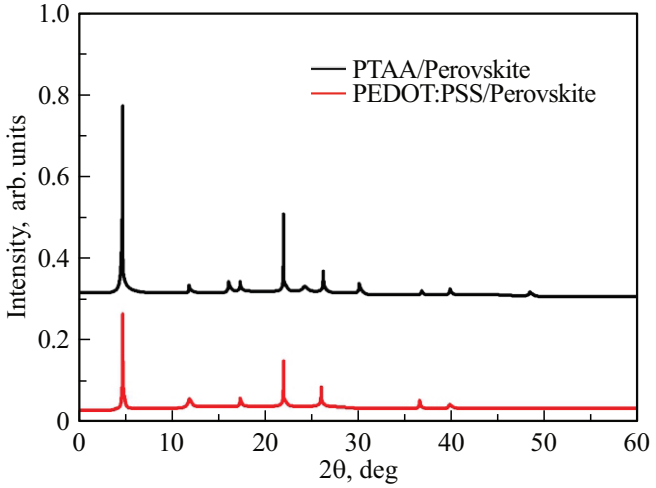

Рис. 5. Рентгенодифракционные (XRD) спектры ПСЭ на основе $MAPbI_3$, изготовленных с применением дырочных транспортных слоёв PEDOT:PSS и PTAA.

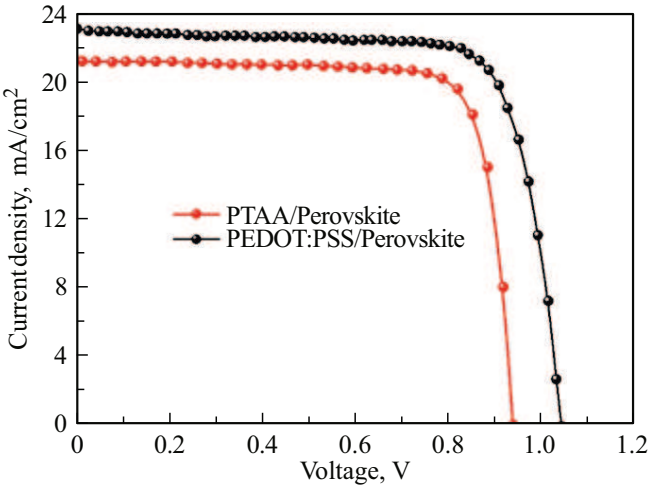

Рис. 7. Вольт-амперные характеристики ПСЭ на основе $MAPbI_3$ с дырочными транспортными слоями PTAA и PEDOT:PSS.

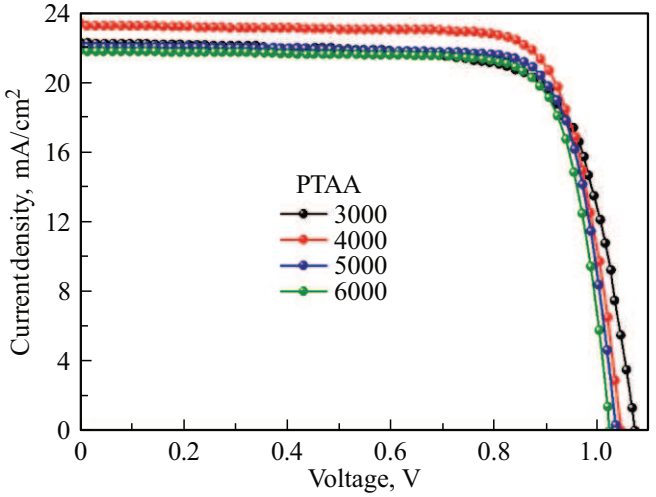

Рис. 6. Вольт-амперные характеристики слоев ITO/PTAA/$MAPbI_3$/PCBM/Al, нанесенных методом центрифугирования с различной скоростью.

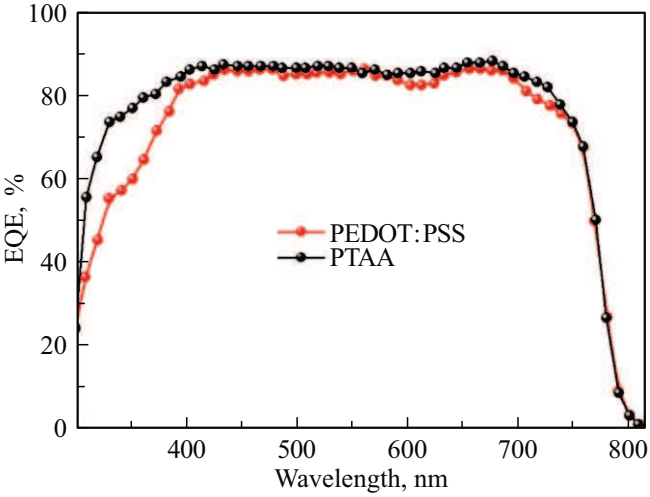

Рис. 8. Спектры ВКЭ ПСЭ на основе $MAPbI_3$, изготовленных с использованием дырочных транспортных слоёв PTAA и PEDOT:PSS.

элементы $MAPbI_3$, полученные методом spin-coating при скорости 4000 rpm, демонстрируют более высокие характеристики по сравнению с образцами, изготовленными при других скоростях вращения. При этом $J-V$-кривая для образцов, нанесённых при 4000 rpm, имеет большую площадь и более выраженную форму, что указывает на более высокий коэффициент заполнения (FF) и меньшее последовательное сопротивление (R).

Толщина активного слоя напрямую связана со скоростью вращения при spin-coating: с увеличением скорости

вращения толщина активного слоя уменьшается. Анализ фотогальванических параметров, приведённых в таблице, показывает, что с увеличением скорости вращения „spin-coater“ ЭПЭ перовскитных солнечных элементов сначала возрастает, достигая оптимального значения, а затем снижается. Как видно из полученных результатов, перовскитные солнечные элементы, сформированные при скорости осаждения 4000 rpm, продемонстрировали наилучшие фотовольтаические характеристики. В частности, напряжение холостого хода (VOC) составило 1.04 V, плотность тока короткого замыкания (J_{SC} — 23.16 mA/cm^2 коэффициент заполнения (FF) — 78%, а ЭПЭ достигла 18.9%. Из этого можно сделать вывод, что формирование активных слоёв методом spin-coating при скорости 4000 rpm обеспечивает оптимальную толщину перовскитного слоя и способствует равномерному и упорядоченному росту кристаллических зёрен. В результате достигаются оптимальные условия для эффективного переноса дырок. Напротив, при увеличении скорости нанесения до 5000–6000 rpm чрезмерное уменьшение толщины слоя PTAA приводит к недостаточному росту перовскитных кристаллических зёрен. Это вызывает увеличение плотности дефектов на межслойных интерфейсах и усиление рекомбинации носителей заряда, что негативно сказывается на фотогальванических характеристиках ПСЭ.

На рис. 7 представлены вольт-амперные характеристики ПСЭ $MAPbI_3$, изготовленных на основе дырочно-транспортных слоёв PTAA и PEDOT:PSS. Как видно из графика, элементы на основе PTAA демонстрируют более высокие характеристики по сравнению с элементами на основе PEDOT:PSS. Кроме того, $J-V$-кривые для устройств на основе PTAA имеют большую площадь и более выраженную форму, что свидетельствует о более высоком коэффициенте заполнения (FF) и меньшем сопротивлении (R). Полученные результаты объясняются хорошим энергетическим согласованием PTAA с перовскитом, снижением рекомбинационных процессов на интерфейсе и более эффективным транспортом носителей заряда. ЭПЭ ПСЭ на основе PTAA значительно возросла по сравнению с устройствами, в которых PEDOT:PSS использовался в качестве дырочно-транспортного слоя: значение ЭПЭ увеличилось с 16.59% до 18.90%. Такое повышение эффективности связано прежде всего с заметным увеличением плотности тока короткого замыкания (JSC), которая возросла с 21.49 mA cm^{-2} до 23.16 mA cm^{-2}. Одновременно, за счёт лучшего согласования энергетических уровней, напряжение холостого хода (VOC) увеличилось с 0.95 V до 1.04 V, а коэффициент заполнения (FF) приблизился к 80%.

На рис. 8 представлены спектры внешней квантовой эффективности (ВКЭ) перовскитных солнечных элементов $MAPbI_3$, изготовленных с использованием дырочно-транспортных слоёв PTAA и PEDOT:PSS. Как видно из графика, в коротковолновой области 320–400 nm значения ВКЭ для ПСЭ на основе PTAA значительно выше по сравнению с устройствами на основе PEDOT:PSS.

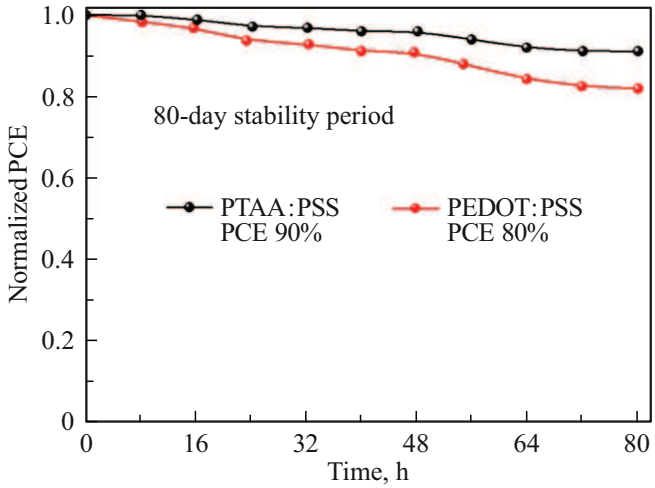

Рис. 9. Нормализованные значения ЭПЭ ПСЭ на основе $MAPbI_3$ с дырочными транспортными слоями PTAA и PEDOT:PSS в зависимости от времени хранения.

Это объясняется меньшими оптическими потерями в слое PTAA и сниженной поверхностной рекомбинацией на интерфейсе PTAA/перовскит. Кроме того, введение добавки NMP существенно улучшило качество перовскитного активного слоя и снизило плотность дефектов в нём. В случае PEDOT:PSS более низкие значения ВКЭ, особенно в коротковолновой области, могут быть связаны с собственным поглощением данного слоя, а также с потерями носителей заряда на интерфейсе ITO/PEDOT:PSS. В диапазоне длин волн 450–750 nm ПСЭ, изготовленные с использованием обоих дырочно-транспортных слоёв, демонстрируют стабильные значения ВКЭ на уровне примерно 80–90%. Этот диапазон соответствует области основной фотогенерации в перовскитном слое, а высокие значения ВКЭ указывают на эффективное разделение сгенерированных электрон–дырочных пар и их транспорт к электродам. При этом слегка более высокие значения ВКЭ для ПСЭ на основе PTAA по сравнению с PEDOT:PSS свидетельствуют о более высокой подвижности дырок в PTAA и лучшем согласовании энергетических уровней. В целом спектры ВКЭ показывают, что ПСЭ на основе PTAA обеспечивают повышенный внешний квантовый выход в расширенном спектральном диапазоне, особенно в коротковолновой области, по сравнению с PEDOT:PSS. В результате использование PTAA в качестве дырочно-транспортного слоя создают благоприятные условия для достижения высоких значений плотности тока короткого замыкания JSC и ЭПЭ, что ещё раз подчёркивает важность интерфейсной инженерии в ПСЭ.

На рис. 9 приведены результаты 80-дневного испытания стабильности перовскитных солнечных элементов $MAPbI_3$ в азотной среде. Элементы были изготовлены с использованием дырочно-транспортных слоёв PTAA и PEDOT:PSS. Как видно из графика, ПСЭ на основе PTAA демонстрируют высокую стабильность характери-

стик во времени. В частности, по истечении 80 дней устройства на основе PTAA сохранили около 90% своей первоначальной эффективности, тогда как для устройств на основе PEDOT:PSS этот показатель составил около 80%. Такое улучшение стабильности ПСЭ в основном связано с заменой кислотного дырочно-транспортного слоя PEDOT:PSS на PTAA, что снижает деградацию подложки стекло/ITO, повышает рабочие характеристики устройств и существенно улучшает их долгосрочную стабильность.

Заключение

В настоящей работе были исследованы различные подходы интерфейсной инженерии с целью повышения эффективности и стабильности ПСЭ. Введение добавки NMP привело к значительному улучшению морфологии перовскитных активных слоёв, формированию гладкой и практически бездефектной поверхности, а также к увеличению ЭПЭ ПСЭ с 16.59% до 18.90%. Примечательно, что устройство на основе PTAA даже без инкапсуляции сохранило 90% своей первоначальной эффективности в течение 80 дней. Полученные результаты показывают, что применение дополнительных инженерных подходов и правильно подобранных интерфейсных материалов играет ключевую роль в обеспечении высокой эффективности и долговременной стабильности перовскитных солнечных элементов. Это создаёт прочную научную основу для разработки нетоксичных, стабильных и пригодных к коммерциализации ПСЭ.

Финансирование работы

Данная работа была выполнена в рамках проекта Fz-20200929177 программы фундаментальных исследований Министерства инновационного развития Республики Узбекистан.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R. Renewables. Global status report, Secretariat: Paris, France, (2019). [Электронный ресурс]. URL: http://www.ren21.net/gsr-2019
[2] M.A. Green, E.D. Dunlop, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, G. Siefer, X. Hao. Progr. Photovolt.: Res. Appl., **31**, 651 (2023). DOI: 10.1002/pip.3726
[3] Y.Kim, E. H.Jung, G.Kim, D.Kim, B. J.Kim, J.Seo. Adv. Energy Mater., **8**, 1801668 (2018). DOI: 10.1002/aenm.201801668
[4] N.T. Energy. Best research-cell efficiency chart, (2024). [Электронный ресурс]. URL: https://www.nrel.gov/pv/cellefficiency.html
[5] W. Deng, X. Liang, P.S. Kubiak, P.J. Cameron. Adv. Energy Mater., **8** , 1701544 (2018). DOI: 10.1002/aenm.201701544
[6] V.A. Moshnikov, E.N. Muratova, I.A. Vrublevsky, V.B. Bessonov, S.E. Parfenovich, A.I. Maximov, A.Y. Gagarina, D.A. Kavalenka, D.A. Kozodaev. Applied Nano, **7**, 8 (2026). DOI: 10.3390/applnano7010008
[7] E.N. Muratova, A.A. Ryabko, V.A. Moshnikov, I.A. Vrublevsky, A.I. Maximov. Nanomanufacturing, **6**, 6 (2026). DOI: 10.3390/nanomanufacturing6010006
[8] O. Ergen, S.M. Gilbert, T. Pham, S.J. Turner, M.T.Z. Tan, M.A. Worsley, A. Zettl. Nature materials, **16**, 522 (2017). DOI: 10.1038/nmat4795
[9] J. Li, M. Zhao, C. Zhao, H. Jian, N. Wang, L. Yao, C. Huang, Y. Zhao, T. Jiu. ACS Applied Materials & Interfaces, **11**, 2626 (2018). DOI: 10.1021/acsami.8b16594
[10] Y.Wu, F.Xie, H.Chen, X.Yang, H.Su, M.Cai, Z.Zhou, T.Noda, L.Han. Adv. Mater., **29**, 1701073 (2017). DOI: 10.1002/adma.201701073
[11] Q. Jiang, Z. Chu, P. Wang, X. Yang, H. Liu, Y. Wang, Z. Yin, J. Wu, X. Zhang, J. You. Advanced materials, **29**, 1703852 (2017). DOI: 10.1002/adma.201703852
[12] M. Wang, Y. Feng, J. Bian, H. Liu, Y. Shi. Chemical Physics Letters, **692**, 44–49 (2018). DOI: 10.1016/j.cplett.2017.12.017
[13] N. Otakulova, M. Zakhidova, S.K. Nematov, L. Nurumbetova, M. Saqlain, B. Shahid, A. Saparbaev. Journal of Applied Spectroscopy, **92**, 1049–1057 (2025). DOI: 10.1007/s10812-025-02006-9
[14] Z. Chen, B. Turedi, A.Y. Alsalloum, C. Yang, X. Zheng, I. Gereige, A. AlSaggaf, O.F. Mohammed, O.M. Bakr. ACS Energy Letters, **4**, 1258–1259 (2019). DOI: 10.1021/acsenergylett.9b00700
[15] J. Li, T. Jiu, C. Duan, Y. Wang, H. Zhang, H. Jian, Y. Zhao, N. Wang, C. Huang, Y. Li. Nano Energy, **46**, 331–337 (2018). DOI: 10.1016/j.nanoen.2018.02.003
[16] H. Kim, J. Lee, B. Kim, H.R. Byun, S.H. Kim, H.M. Oh, S. Baik, M.S. Jeong. Sci Rep **9**, 15461 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-51945-9
[17] A.J. Doolin, R.G. Charles, C.S. De Castro, R.G. Rodriguez, E.V. Péan, R. Patidar, T. Dunlop, C. Charbonneau, T. Watson, M.L. Davies.Green chemistry, **23**, 2471–2486 (2021). DOI: 10.1039/D1GC00079A
[18] R. Lu, Y. Liu, J. Zhang, D. Zhao, X. Guo, C. Li, Chemical Engineering Journal, **433**, 133845 (2022). DOI: 10.1016/j.cej.2021.133845
[19] M.B. Islam, M. Yanagida, Y. Shirai, Y. Nabetani, K. Miyano. Solar Energy Materials and Solar Cells, **195**, 323–329 (2019). DOI: 10.1016/j.solmat.2019.03.004
[20] Y. Chen, X. Zuo, Y. He, F. Qian, S. Zuo, Y. Zhang, L. Liang, Z. Chen, K. Zhao, Z. Liu. Advanced Science, **8**, 2001466 (2021). DOI: 10.1002/advs.202001466
[21] Y. Jiang, E.J. Juarez-Perez, Q. Ge, S. Wang, M.R. Leyden, L.K. Ono, S.R. Raga, J. Hu, Y. Qi. Materials Horizons, **3**, 548–555 (2016). DOI: 10.1039/C6MH00160B
[22] M. Li, Z. Yue, Z. Ye, H. Li, H. Luo, Q.D. Yang, Y. Zhou, Y. Huo, Y. Cheng. Small, **20**, 2311400 (2024). DOI: 10.1002/smll.202311400
[23] A. Kogo, R. Ishikawa, T.N. Murakami. ACS Applied Energy Materials, **7**, 7769–7774 (2024). DOI: 10.1021/acsaem.4c01559
[24] B. Chen, J. Peng, H. Shen, T. Duong, D. Walter, S. Johnston, M.M. Al-Jassim, K.J. Weber, T.P. White,

K.R. Catchpole. Advanced Energy Materials, **9**, 1802790 (2019). DOI: 10.1002/aenm.201802790
[25] N. Li, A. Feng, X. Guo, J. Wu, S. Xie, Q. Lin, X. Jiang, Y. Liu, Z. Chen, X. Tao. Advanced Energy Materials, **12**, 2103241 (2022). DOI: 10.1002/aenm.202103241
[26] W. Qiu, Y. Wu, Y. Wang, Z. Yang, R. Yang, C. Zhang, Y. Hao, Y. Hao. Chemical Engineering Journal, **468**, 143656 (2023). DOI: 10.1016/j.cej.2023.143656
[27] L.-C. Chen, C.-H. Tien, Z.-L. Tseng, J.-H. Ruan. Nanomaterials, **9**, 121 (2019). DOI: 10.3390/nano9010121
[28] G. Abdelmageed, L. Jewell, K. Hellier, L. Seymour, B. Luo, F. Bridges, J.Z. Zhang, S. Carter. Applied Physics Letters, **109**, 233905 (2016). DOI: 10.1063/1.4967835
[29] B. Kim, M. Kim, H. Kim, S. Jeong, J. Yang, M.S. Jeong. ACS Applied Materials & Interfaces, **14**, 35726–35733 (2022). DOI: 10.1021/acsami.2c07866
[30] W.M. Franssen, B.J. Bruijnaers, V.H. Portengen, A.P. Kentgens. ChemPhysChem, **19**, 3107–3115 (2018). DOI: 10.1002/cphc.201800732
[31] M. Cha, P. Da, J. Wang, W. Wang, Z. Chen, F. Xiu, G. Zheng, Z.-S. Wang. Journal of the American Chemical Society, **138**, 8581 (2016). DOI: 10.1021/jacs.6b04190
[32] Z. Wu, M. Sytnyk, J. Zhang, G. Babayeva, C. Kupfer, J. Hu, S. Arnold, J. Hauch, C. Brabec, I.M. Peters. Energy & Environmental Science, **17**, 4248–4262 (2024). DOI: 10.1039/D4EE00409D
[33] J. Li, J. Dagar, O. Shargaieva, M.A. Flatken, H. Köbler, M. Fenske, C. Schultz, B. Stegemann, J. Just, D.M. Többens. Advanced Energy Materials, **11**, 2003460 (2021). DOI: 10.1002/aenm.202003460
[34] J. Tao, Z. Wang, H. Wang, J. Shen, X. Liu, J. Xue, H. Guo, G. Fu, W. Kong, S. Yang. ACS Applied Materials & Interfaces, **13**, 44451–44459 (2021). DOI: 10.1021/acsami.1c11064