Разработка эффективных солнечных элементов на основе неорганического $CsPbI_3$ перовскита в атмосферных условиях

Э.А. Захидов[1], Ш.К. Нематов[1,2], Л.Р. Нурумбетова[1], А.Й. Тургунбоев[1], Б.Г. Хидиров[2,3], И.Р. Бойназаров[1], А.А. Сапарбаев[*1,3]

[1]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз имени У.А. Арифова, Дурмон йули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан
[2]Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, ул. Университетская 4, 100174, Ташкент, Узбекистан
[3]Национальный Университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, ул. Университетская 2, 100174, Ташкент, Узбекистан

Получена 05.02.2022

* Corresponding author: e-mail: saparbaevaziz83@gmail.com Phone: +998 88 780 14 41

В последнее время большое внимание уделяется солнечным элементам на основе неорганических перовскитов. Однако качество и толщина перовскитных пленок все еще неудовлетворительны из-за ограниченной растворимости исходных материалов. Здесь описан простой процесс нанесения двойного покрытия для изготовления высококачественной перовскитной пленки в атмосферных условиях. Такие дефекты, как точечные отверстия, эффективно устраняются нанесением второго покрытия с дальнейшим увеличением размеров зерен, что значительно подавляет рекомбинацию зарядов в перовскитных пленках. С изменением толщины пленки улучшается поглощение падающего света. Как следствие, в традиционных перевернутых планарных перовскитных солнечных элементах эффективность преобразования энергии достигает 11.4% при значительном улучшении параметров устройства, что на 43% больше по сравнению с контрольным устройством (8%). Стабильность устройства также улучшается за счет образования высококачественной перовскитной пленки при двойном покрытии. Результаты показывают, что метод двойного покрытия является многообещающим для разработки высокопрочных и эффективных перовскитных солнечных элементов.

Ключевые слова: перовскит $CsPbI_3$, рентгеноструктурный анализ, спектры поглощения, плотность тока.

Recently, much attention has been paid to solar cells based on inorganic perovskite materials. However, the quality and thickness of perovskite films are still unsatisfactory due to the limited solubility of the starting materials. Described here is a simple multiple coating process for fabrication high quality perovskite films under full air condition. Defects such as pinholes can be effectively eliminated by the second coating with a further increase in grain size, which significantly suppresses charge recombination in perovskite films. In addition, such film thickness can lead to improve the absorption of incident light. As a result, the traditional inverted planar perovskite solar cells achieve an energy conversion efficiency of 11.5% with significantly improved device parameters, which is 44% more than the control device (8%). In addition, the stability of the device is also improved by such high-quality multiple coated perovskite films. The results show that this multiple coating method is a promising choice for high strength and efficient perovskite solar cells.

Keywords: $CsPbI_3$ perovskite, X-ray diffraction (XRD) analysis, absorption spectra, current density.

DOI: https//doi.org/10.52304/.v24i1.310

I. Введение

В течение последнего десятилетия органические солнечные элементы и перовскитные солнечные элементы (ПСЭ) привлекли значительное внимание в качестве возобновляемых источников энергии нового поколения, имеющих такие преимущества, как низкая стоимость, гибкость, малый вес и экологичность, за счет производства из растворов [1–6]. Перовскитные материалы широко изучены из-за их превосходных фотофизических и других свойств [7–10]. Большие усилия были приложены для разработки высокопроизводительных ПСЭ, и эффективность преобразования энергии (ЭПЭ) за несколько лет была увеличена с 3.8% (в 2009 году [11]) до более чем 25.2% [12], что сделало ПСЭ наиболее перспективным для практического использования. Однако срок службы этих солнечных элементов оказался решающим ограничивающим фактором для реального применения. Несмотря на то, что в последнее время достигнуто серьёзное улучшение органо-неорганических ПСЭ с более совершенным активным слоем и высокостабильными интерфейсными материалами, слой перовскита по-прежнему поэтапно разлагается на йодид свинца и органический компонент из-за дефектов органического компонента, легкой сублимации, влажной коррозии или фотоокисления [13–16].

Одним из способов исключения этих проблем является замена органической части устройства неорганическим элементом для получения цельнонеорганического ПСЭ, и недавние результаты показали приемлемые значения фотостабильности, влагостабильности и термостабильности таких устройств. Среди цельно-неорганических перовскитов на основе галогенидов металлов только $CsPbI_3$ с кубической фазой (α-$CsPbI_3$) обладает подходящей шириной запрещенной зоны (~1.72 эВ) для фотоэлектрических приложений [17–19]. Однако желаемый материал α-$CsPbI_3$ может быть образован при высокой температуре, выше 310°C, с помощью традиционных методов, приводящих к быстрой деградации до нежелательной желтой δ-фазы в атмосфере при комнатной температуре, когда ширина запрещенной зоны составляет ~2.82 эВ, что неприемлемо для фотоэлектрических приложений [20, 21]. Кроме того, толщина фотоактивного слоя, полученного традиционными методами, ограничена из-за плохой растворимости исходных материалов, что не позволяет обеспечить поглощение всего потока подающего света. Кроме того, готовые пленки имеют много дефектов, такие как отверстия и трещины, что приводит к ухудшению работы устройства [22-24]. В 2016 году Луо и др. использовали йодисто-водородную кислоту (HI) в качестве добавки к уже имеющемуся раствору и дополнительно использовали изопропанол для последующей обработки с целью повышения ЭПЭ, что привело к стабилизации α-$CsPbI_3$ при низкотемпературном фазовом переходе [25]. С тех пор было предпринято несколько попыток дальнейшего улучшения качества фотоактивных пленок, таких как введение небольшого количества добавок в предшественников перовскита [26, 27], последующая обработка поверхности для дальнейшего улучшения роста кристаллических зерен и/или улучшения стабильности [28–30], а также разработка новых методов выращивания высококачественной и стабильной пленки α-$CsPbI_3$ [31, 32]. Для практического применения простых и недорогих процессов ПСЭ изготовление тонкого, высококачественного активного слоя по-прежнему весьма желательно. В этой работе описывается простой процесс двойного (двухкратного) нанесения покрытия для изготовления высококачественной перовскитной пленки в атмосферных условиях. После приготовления первого слоя перовскита мы быстро наносим еще один слой сверху. При таком методе толщина изготовленного слоя перовскита, очевидно, увеличивается, но при этом также эффективно устраняются такие дефекты, как точечные отверстия и трещины в пленке, что приводит к увеличению ЭПЭ до 11.4%, что на 43% больше по сравнению с контрольным устройством (8%) в перевернутых планарных устройствах.

II. Описание объекта и методов исследования

Йод цезия (CsI) и йод свинца (PbI_2) были куплены в Сиане (Polymer Light Technology Inc, Китай). Водный раствор поли (3,4-этилен-диокситиофен)/поли(стиролсульфонат) (PEDOT:PSS) (Clevios PVP Al4083) и метиловый эфир [6,6]-фенил-C61-масляной кислоты (PC61BM) были приобретены у компании HC Starck (Леверкузен, Германия) и American Dye Sources Inc. (Бэд'Урф, Квебек, Канада) соответственно. Фторид лития (LiF, 99.99%) и йодистоводородная кислота (HI, 45

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

мас.%) были получены от Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd (Шанхай, Китай). Стеклянные подложки с покрытием из оксида индия и олова (ITO) с сопротивлением листа 15 Ом/см^2 были предоставлены компанией Shenzhen Display (Шэньчжэнь, Китай).

II.1. Изготовление и характеристики устройства

Стеклянные подложки, покрытые ITO, очищали ультразвуком в ацетоне, деионизированной (ДИ) воде и изопропиловом спирте (IPA) в течение 13 мин (в каждом), а затем сушили с использованием газообразного азота высокой чистоты. Затем PEDOT:PSS наносили центрифугированием (4000 об/мин, 20 с) на подложку, после чего отжигали в печи при 160°C в течение 20 минут на воздухе. Затем получали раствор предшественника с диметилформамидом в соотношении 1:1 M (0.5 M) и перемешивали в течение 12 час на воздухе. 66 мкл HI кислоты добавляли в 1 мл раствора предшественника перед приготовлением перовскитных пленок.

Пленку перовскита получали путем нанесения раствора при центрифугировании подложки при 4000 об/мин в течение 15 с. Чтобы улучшить качество пленки и ее толщину, процесс быстрого нанесения покрытия был повторен еще раз. Затем подложку нагревали при 100°C в течение 10 мин на плите в атмосферных условиях (рис. 1а). При этом цвет пленок изменялся от слегка светло-желтого до темно-коричневого (рис. 1б). После этого слой $PC_{61}BM$ наносили центрифугированием (1200 об/мин, 30 с) на пленку $CsPbI_3$. Катод, состоящий из LiF (1 нм) и Al (100 нм), осаждали в вакууме при остаточном давлении 5×10^{-4} Па с помощью термического испарителя. Структура ПСЭ проиллюстрирована на рис. 1в. Для покрытия перовскитной плёнки использовали “spin coating” метод с помощью спин-коатера модели RW-4A.

Спектры поглощения пленок на стекле ITO были получены на сканирующем спектрофотометре (Shimadzhu UV-1280). Bruker D8 ADVANCE был использован для записи дифракционных рентгеновских лучей (XRD) пленок перовскита. Морфология поверхности пленок была охарактеризована с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-4800 (СЭМ). Толщина пленок измерялась профилометром Veeco Dektak 150. Фотоэлектрические параметры регистрировали с помощью измерительного блока источника Keithley 2420 при стандартном освещении 100 мВт/см^2 (AM 1,5 G) от солнечного симулятора Ньюпорт. Спектры фотолюминесценции получены с помощью настольного спектрофлуориметра Horiba Jobin Yvon FluoroMax-4.

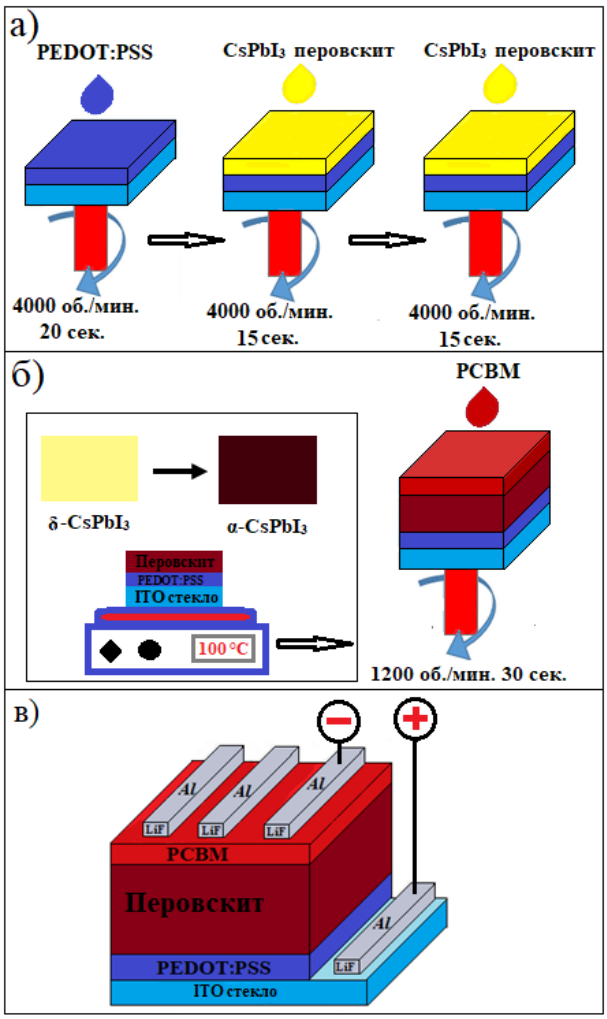


Рисунок 1. Схема приготовления пленки $CsPbI_3$ (а), структура перовскитного слоя (б) и ПСЭ (в).

III. Результаты и обсуждение

III.1. Оптические и морфологические свойства

Обычно слои перовскита α-$CsPbI_3$ получают из раствора-предшественника CsI и PbI_2 с соответствующей добавкой HI, чтобы они могли кристаллизоваться при низкой температуре обработки, около 100°C [24]. При комнатной температуре $CsPbI_3$ имеет орторомбическую структуру (желтая фаза δ-$CsPbI_3$), тогда как кубическая структура (черная фаза α-$CsPbI_3$) образуется только при

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

температуре выше ~100°C. [24]. Изображение готовых слоев представляет собой очень гладкую поверхность (рис. 1б). Однако в СЭМ-изображениях, показанных на рис. 2а, было обнаружено большое количество точечных отверстий, которые соответствовали ранее опубликованным результатам [24, 25]. Это приводит к появлению большого количества дефектов и/или центров рекомбинации и уменьшению сопротивления шунта, что приводит к снижению производительности устройства [32]. После быстрого нанесения второго капельного покрытия отверстия хорошо заделаны (рис. 2б). Кроме того, размер зерен кристалла перовскита еще более увеличился. Таким образом, в пленке с двойным покрытием точечные отверстия не зафиксированы, а толщина пленок увеличилась примерно на 20% (с 212 нм до 253 нм).

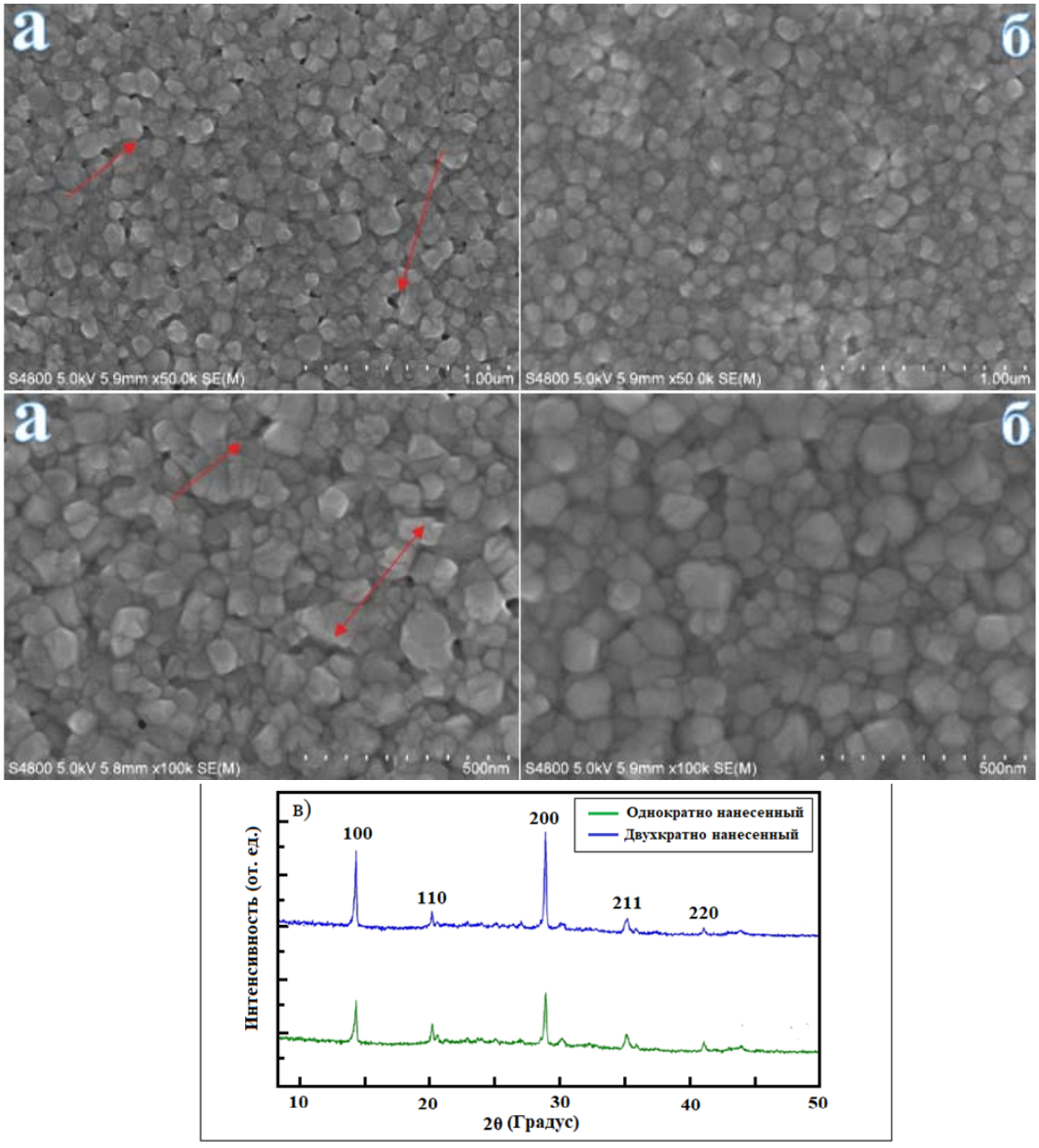


Рисунок 2. СЭМ фотографии (а) однослойного и (б) двойного перовскитного слоя и (в) рентгеноструктурный анализ кристаллических структур α-$CsPbI_3$ перовскита.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

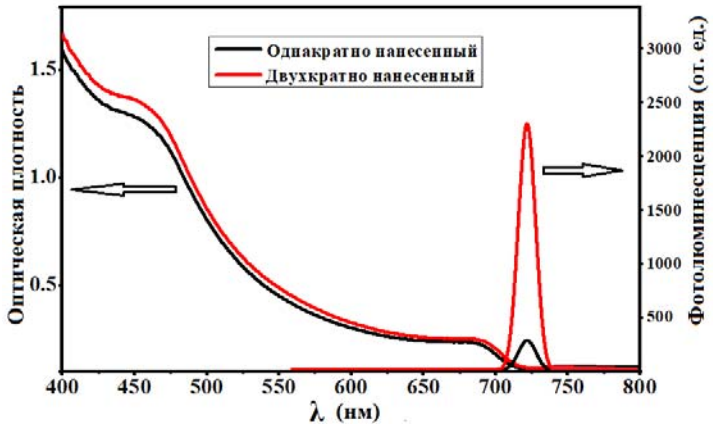


Рисунок 3. Спектры поглощения и фотолюминесценции слоя перовскита.

На рис. 3 показаны спектры поглощения слоя перовскита в УФ и видимой областях в двух изученных условиях. Эти две пленки демонстрируют сходные спектры поглощения света в широком диапазоне, что указывает на образование перовскита α-$CsPbI_3$. Кроме того, форма спектров поглощения и площадь поглощения перовскитных пленок, полученных при однократном и двукратном нанесении с отжигом при температуре 100°C, свидетель-ствуют о том, что черная фаза α-$CsPbI_3$ соответствует структуре перовскита, изученного ранее в работах [33, 34]. При этом следует обратить внимание на значительно более интенсивное поглощение в коротковолновой и ИК областях спектра при нанесении второго слоя.

Для дальнейшего исследования влияния качества пленки на улучшение характеристик устройства были получены спектры фотолюминесценции перовскитных пленок на кварцевом стекле, что позволяет избежать влияния инжекции заряда между перовскитом и электродом [35, 36]. Как видно на рис. 3, интенсивность фотолюминесценции перовскитной пленки с однократным покрытием более слабая, а интенсивность пленок с двойным покрытием значительно возрастает. Повышенная интенсивность фотолюминесценции указывает на то, что как плотность дефектов, так и плотность ловушек эффективно подавляются в пленках с вторичным покрытием.

Кроме того, проведен рентгеноструктурный анализ кристаллических структур пленок перовскита, полученных в различных условиях, как показано на рис. 2в. Видно, что в обеих пленках обнаружены дифракционные пики (100), (110), (200), (211) и (220), свидетельствующие об образовании кубической кристаллической фазы α-$CsPbI_3$ [36–38]. В пленке перовскита α-$CsPbI_3$ присутствие дифракционных пиков (100) и (200) указывает на образование кубической или черной фазы α-$CsPbI_3$, что согласуется с предыдущими результатами [25, 36]. Что касается пиковой интенсивности, то структура пленки с двойным покрытием значительно более совершенна, что является признаком роста кристалличности, и это согласуется с результатами, полученными на сканирующем электронном микроскопе (см. рис. 2а и 2б). Средний размер зерна, рассчитанный по формуле Шеррера, составляет около 43 нм и 55 нм соответственно для образца с одноразовым и двукратным покрытием вдоль пика (200) [39–41].

III.2. Фотоэлектрические параметры

Можно предположить, что улучшенный размер зерна и толщина пленки в сочетании с усовершенствованной морфологией поверхности привели к повышению ЭПЭ устройства, что будет дополнительно обсуждено ниже. Таким образом, перовскитные солнечные элементы с перевернутым планарным гетеропереходом со структурой TO/PEDOT:PSS/$CsPbI_3$/PC_{61}BM/LiF/Al были изготовлены в атмосферных условиях. Для сравнения также было подготовлено контрольное устройство с однократно нанесенным слоем перовскита.

На рис. 4 и в табл. 1 показаны кривые зависимости плотности тока от напряжения (*J*-*V*) и соответствующие параметры устройства. Устройство показывает ЭПЭ 8% при токе короткого замыкания (J_{SC}) 12.54 мА/см^2, напряжении холостого хода (V_{OC}) 0.94 В и коэффициенте заполнения

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

(FF) 68.1%, а также при освещении AM 1.5 G, что сопоставимо с предыдущими данными с использованием аналогичного метода [26].

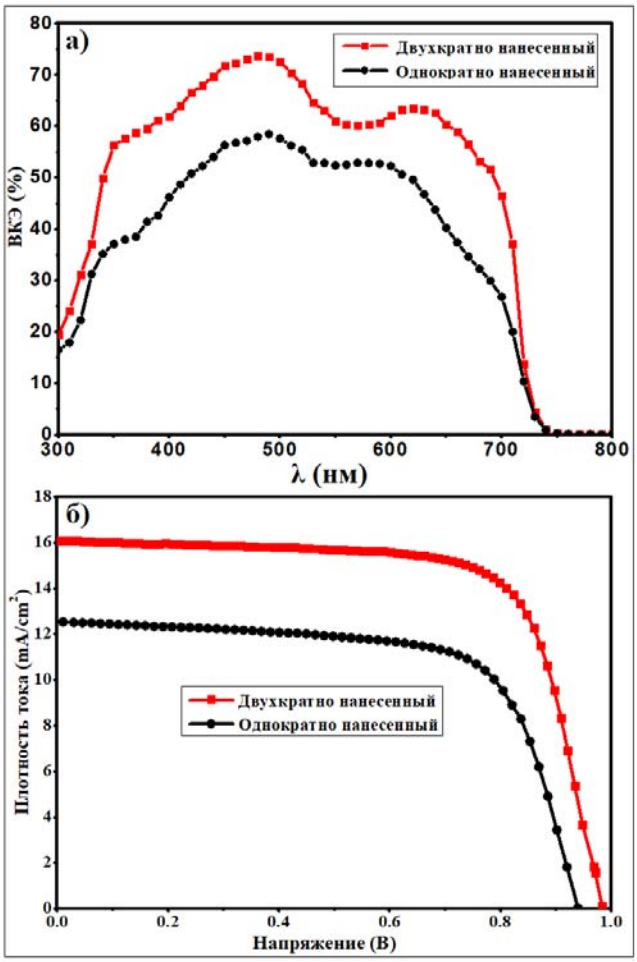


Рисунок 4. (а) Спектры внешней квантовой эффективности ВКЭ и (б) кривые вольтамперной характеристики перовскитных солнечных элементов.

Таблица 1. Фотоэлектрические параметры солнечных элементов.

Солнечный элемент	V_{OC}, В	J_{SC}, mA/cm^2	FF, %	ЭПЭ, %
Однократно нанесённый	0.94	12.54	68.1	8.0
Двухкратно нанесённый	0.98	16.05	72.4	11.4

Однако фотоэлектрические характеристики исследуемого устройства все еще ограничены относительно низкими значениями J_{SC}, V_{OC} и FF. Как обсуждалось выше, одна из причин заключается в том, что такая перовскитная пленка, образованная центрифугированием, имела множество точечных отверстий, а размеры зерен контрольных пленок были относительно небольшими, что могло бы привести к серьезной рекомбинации заряда и, следовательно, к плохому J_{SC}. Другой причиной является ограниченная толщина перовскитных пленок, полученных в традиционных условиях, из-за плохой растворимости исходных материалов, что снижает эффективность поглощения света. Если толщина пленки увеличивается за счет снижения скорости нанесения покрытия, то характеристики устройства также ухудшаются (рис. 5а).

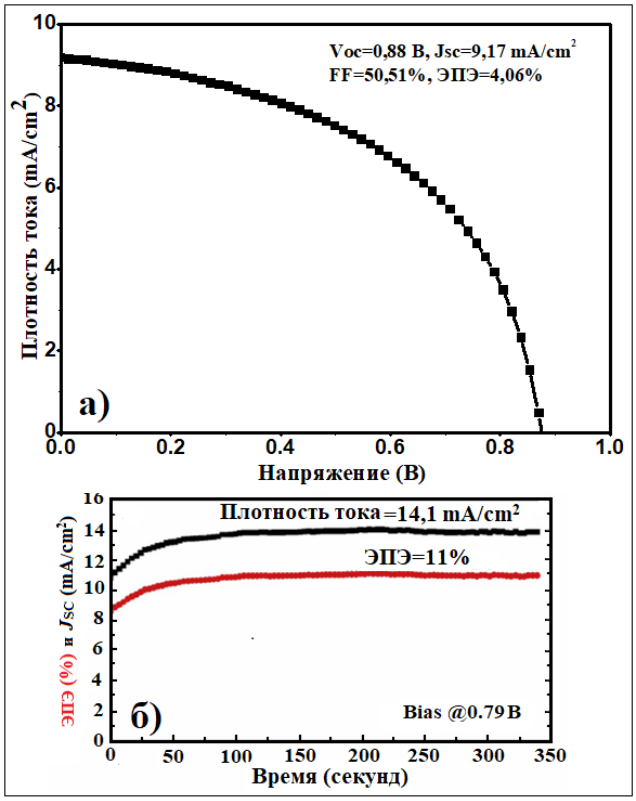


Рисунок 5. (а) Кривая вольтамперной характеристики с однократным нанесением покрытия при 3000 об/мин и (б) стабильная выходная мощность пленки перовскита, полученная методом двукратного нанесёния покрытия.

После модификации с помощью быстрого капельного покрытия второй раз с помощью прекурсоров перовскита толщина пленки и морфология поверхности пленок были значительно улучшены до почти полного устранения точечных отверстий и отросших зерен. Эти результаты означают, что процесс двойного покрытия может эффективно устранить дефекты и плотность ловушек в перовскитной пленке и улучшить перенос заряда. Таким образом, ЭПЭ устройства достигает 11.4%, и все связанные параметры устройства, включая J_{SC}

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

(16.05 мА/см^2), V_{OC} (0.98 В) и FF (72.4%), были качественно улучшены.

Таким образом, дефектность и толщина модифицированной перовскитной пленки могут быть эффективно улучшены, что будет однородно улучшать фотоотклик во всем диапазоне.

Спектры внешней квантовой эффективности (ВКЭ) устройств представлены на рис. 4а, и они хорошо согласуются со спектрами поглощения перовскита. Хотя формы кривых ВКЭ для устройств без второго покрытия и со вторым покрытием похожи, абсолютные значения ВКЭ у них сильно различаются, что согласуется с результатами кривых *J-V*. Также были измерены изменения выходной мощности с течением времени при фиксированном напряжении в точке максимальной мощности (0.79 В) на кривой *J–V*, как показано на рис. 5б.

Для устройства со вторым покрытием был получен высокий стабильный выходной сигнал с ЭПЭ 11.0% и J_{SC} 14.1 мА/см^2, который остается почти постоянным в долгосрочном масштабе. Такой высокий и стабильный ЭПЭ выходной мощности можно объяснить улучшенным качеством слоя перовскита с быстрым нанесением второго покрытия. Кроме того, стабильность устройства ПСЭ со вторым покрытием также была протестирована в перчаточном боксе, и результаты представлены в табл. 2. Спустя 60 дней устройство все еще показывало ЭПЭ 7.5%, что указывает на то, что такая технология двойного покрытия является эффективным методом повышения как эффективности, так и стабильности.

Таблица 2. Изменения фотоэлектрических параметров солнечных элементов с течением времени.

Время (сутки)	V_{OC}, В	J_{SC}, mA/cm^2	FF, %	ЭПЭ, %
1	0.98	15.65	74.2	11.4
3	0.96	13.21	75.6	9.53
7	0.96	10.74	77.4	7.98
60	0.96	10.55	74.1	7.5

Известно, что дефекты и/или ловушки в фотоактивных слоях могут действовать как центры рекомбинации зарядов, что может существенно повлиять на производительность устройства [40].

Эти результаты дополнительно демонстрируют, что метод двойного покрытия может эффективно улучшить качество пленки и производительность устройства. Для того чтобы сделать вывод, является ли метод эффективным, большое значение имеет воспроизводимость фотоэлектрических характеристик солнечных элементов. Известно, что качество пленки перовскита является ключевым фактором для создания эффективных ПСЭ. Благодаря такому быстрому повторному нанесению покрытия, поры в перовскитных пленках были эффективно устранены, а размер зерен снова увеличился. В общем, можно сказать, что высокая производительность исследованных устройств обусловлена значительно улучшенным качеством фотоактивных слоев.

IV. Заключение

Таким образом, высококачественные пленки перовскита были получены методом двукратного нанесения покрытия в атмосферных условиях. Результаты демонстрируют, что точечные отверстия в пленках эффективно устранены и размеры зерен увеличены, рекомбинация зарядов также значительно подавлена. Кроме того, толщина пленки увеличена, что позволяет лучше использовать интенсивность падающего света. Следовательно, эффективные инвертированные ПСЭ из α-$CsPbI_3$ демонстрируют высокий ЭПЭ вплоть до 11.4% при улучшенных параметрах устройства. Результаты работы показывают, что простые методы могут эффективно улучшить производи-тельность устройства и открыть путь для потенциальных практических приложений.

Метаданные

Development of efficient solar cells based on inorganic $CsPbI_3$ perovskite in air conditions

E.A. Zakhidov[1], Sh.K. Nematov[1,2], L.R. Nurumbetova[1], A.Y. Turgunboev[1], B.G. Khidirov[1,2], I.R. Boynazarov[1], A.A. Saparbaev[1,3]

[1]Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan Academy of Sciences, Durmon yuli str., 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan

[2]Tashkent State Technical University, University str., 2, 100174, Tashkent, Uzbekistan

[3]National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, University str., 4, 100174, Tashkent, Uzbekistan

Recently, much attention has been paid to solar cells based on inorganic perovskite materials. However, the quality and thickness of perovskite films are still unsatisfactory due to the limited solubility of the starting materials. Described here is a simple multiple coating process for fabrication high quality perovskite films under full air condi-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

tion. Defects such as pinholes can be effectively eliminated by the second coating with a further increase in grain size, which significantly suppresses charge recombination in perovskite films. In addition, such film thickness can lead to improve the absorption of incident light. As a result, the traditional inverted planar perovskite solar cells achieve an energy conversion efficiency of 11.5% with significantly improved device parameters, which is 44% more than the control device (8%). In addition, the stability of the device is also improved by such high-quality multiple coated perovskite films. The results show that this multiple coating method is a promising choice for high strength and efficient perovskite solar cells.

Keywords: $CsPbI_3$ perovskite, X-ray diffraction (XRD) analysis, absorption spectra, current density.

Литература

[1] L. Meng, Y. Zhang, X. Wan, C. Li, X. Zhang, Y. Wang, X. Ke, Z. Xiao, L. Ding, R. Xia, H. Yip, Y. Cao, Y. Chen. Science **361**, 1094-1098 (2018).
[2] Y. Liu, J. Zhao, Z. Li, C. Mu, W. Ma, H. Hu, K. Jiang, H. Lin, H. Ade, H. Yan. Nat. Commun. **5**, 5293 (2014).
[3] J. Li, Z. Liang, Y. Wang, H. Li, J. Tong, X. Bao, Y. Xia. J. Mater. Chem. C **6**, 11015-11022 (2018).
[4] J. Li, Y. Wang, Z. Liang, N. Wang, J. Tong, C. Yang, X. Bao, Y. Xia. ACS Appl. Mater. Interfaces **11**, 7022-7029 (2019).
[5] E. Zakhidov, M. Imomov, V. Quvondikov, Sh. Nematov, I. Tajibaev, A. Saparbaev, I. Ismail, B. Shahid, and R. Yang. Applied Physics A **125**, No.11, 1-7 (2019).
[6] X. Bao, Q. Zhu, M. Qiu, A. Yang, Y. Wang, D. Zhu, J. Wang, R. Yang. J. Mater. Chem. A **3**, 19294-19298 (2015).
[7] Q. Dong, Y. Fang, Y. Shao, P. Mulligan, J. Qiu, L. Cao, J. Huang. Science **347**, 967-970 (2015).
[8] J. Ding, S. Du, Y. Zhao, Z. Zuo, H. Cui, X. Zhan, Y. Gu, H. Sun. J. Mater. Sci. **52**, 276-28 (2017).
[9] W. Zhang, G.E. Eperon, H.J. Snaith. Nat. Energy **1**, 16048 (2016).
[10] J. Ding, S. Du, Z. Zuo, Y. Zhao, H. Cui, X. Zhan. J. Phys. Chem. C **121**, 4917-4923 (2017).
[11] A. Kojima, K. Teshima, K. Shirai, T.J. Miyasaka. J. Am. Chem. Soc. **131**, 6050-6051 (2009).
[12] Kim, Gi-Hwan, and Dong Suk Kim. Joule **5**, No.5, 1033-1035 (2021).
[13] D. Bryant, N. Aristidou, S. Pont, M. Sanchez-Molina, T. Chotchunangatchaval, S. Wheeler, J.R. Durrant, S.A. Haqu. Energy Environ. Sci. **9**, 1655-1660 (2016).
[14] J.C. Ke, A. Walton, D.J. Lewis, A. Tedstone, P. O'Brien, A.G. Thomas, W.R. Flavell. Chem. Commun. **53**, 5231-5234 (2017).
[15] E.J. Juarez-Perez, Z. Hawash, S.R. Raga, L.K. Ono, Y. Qi. Energy Environ. Sci. **9**, 3406-3410 (2016).
[16] Y. Yuan, Q. Wang, Y. Shao, H. Lu, T. Li, A. Gruverman, J. Huang. Adv. Energy Mater. **6**, 1501803 (2016).
[17] E. Mosconi, A. Amat, M.K. Nazeeruddin, M. Gratzel, F.D. Angelis. J. Phys. Chem. C **117**, 13902-13913 (2013).
[18] E.M. Sanehira, A.R. Marshall, J.A. Christians, S.P. Harvey, P.N. Ciesielski, L.M. Wheeler, P. Schulz, L.Y. Lin, M.C. Beard, J.M. Luther. Sci. Adv. **3**, eaao4204 (2017).
[19] Y.G. Kim, T.Y. Kim, J.H. Oh, K. Soon Choi, Y.J. Kim, S.Y. Kim. Phys. Chem. Chem. Phys. **19**, 6257-6263 (2017).
[20] H. Choi, J. Jeong, H.-B. Kim, S. Kim, B. Walker, G.-H. Kim, J.Y. Kim. Nano Energy **7**, 80-85 (2014).
[21] M. Ahmad, G. Rehman, L. Ali, M. Shafiq, R. Iqbal, R. Ahmad, T. Khan, S. Jalali-Asadabadi, M. Maqbool, I. Ahmad. J. Alloy. Comp. **705**, 828-839 (2017).
[22] Gao, Feng, Yang Zhao, Xingwang Zhang, and Jingbi You. Advanced Energy Materials **10**, No.13 1902650 (2020).
[23] G. Eperon, G. Paterno, R. Sutton, A. Zampetti, A. Haghighirad, F. Cacialli, H. Snaith. J. Mater. Chem. **3**, 19688-19695 (2015).
[24] C.Stoumpos Constantinos and Mercouri G. Kanatzidis. Accounts of Chemical Research **48**, No.10, 2791-2802 (2015).
[25] P. Luo, W. Xia, S. Zhou, L. Sun, J. Cheng, C. Xu, Y. Lu. J. Phys. Chem. Lett. **7**, 3603-3608 (2016).
[26] D.Y. Heo, S.M. Han, N.S. Woo, Y.J. Kim, T. Kim, Z. Luo, S.Y. Kim. J. Phys. Chem. C **122**, 15903-15910 (2018).
[27] X. Ding, H. Chen, Y. Wu, S. Ma, S. Dai, S. Yang, J. Zhu. J. Mater. Chem. A **6**, 18258-18266 (2018).
[28] B. Li, Y. Zhang, L. Fu, T. Yu, S. Zhou, L. Zhang, L. Yin. Nat. Commun. **9**, 1076 (2018).
[29] S. Xiang, Z. Fu, W. Li, Y. Wei, J. Liu, H. Liu, L.n Zhu, R. Zhang, H. Chen. ACS Energy Lett. **3**, 1824-1831 (2018).
[30] Y. Wang, T. Zhang, M. Kan, Y. Zhao. J. Am. Chem. Soc. **140**, 12345-12348 (2018).
[31] P. Wang, X. Zhang, Y. Zhou, Q. Jiang, Q. Ye, Z. Chu, X. Li, X. Yang, Z. Yin, J. You. Nat. Commun. **9**, 2225 (2018).
[32] B. Zhao, S. Jin, S. Huang, N. Liu, J. Ma, D. Xue, Q. Han, J. Ding, Q. Ge, Y. Feng, J. Hu. J. Am. Chem. Soc. **140**, 11716-11725 (2018).
[33] C. Yang, J. Wang, X. Bao, J. Gao, Z. Liu, R. Yang. Electrochim. Acta **281**, 9-16 (2018).
[34] D.M. Trots, S.V. Myagkota. J. Phys. Chem. Solids **69**, 2520-2526 (2008).
[35] M. Liu, M. Johnston, H. Snaith. Nature **501**, 395-398 (2013).
[36] Z.G. Ji, S.C. Zhao, C. Wang, K. Liu. Mater. Sci. Eng. B **117**, 63-66 (2005).
[37] O.N. Yunakova, V.K. Miloslavskii, E.N. Kovalenko. Optic Spectrosc. **112**, 91-96 (2012).
[38] D. Zhang, S.W. Eaton, Y. Yu, L. Dou, P. Yang. J. Am. Chem. Soc. **137**, 9230-9233 (2015).
[39] A. Saparbaev, M. Zhang, V. Kuvondikov, L. Nurumbetova, I. Oladayo Raji, I. Tajibaev, E. Zakhidov, X. Bao, and R. Yang. Solar Energy **228**, 405-412 (2021).
[40] J. Kruger, R. Plass, C. Le, M. Piccirelli, M. Gratzel, U. Bach. Appl. Phys. Lett. **79**, 2085-2087 (2001).
[41] C. Gao, H. Dong, X. Bao, Y. Zhang, A. Saparbaev, Yu, S. Wen, R. Yang, L. Dong. J. Mater. Chem. C **6**, 8234-8241 (2018).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

Атмосфера шароитида ноорганик $CsPbI_3$ перовскит асосида самарали қуёш элементларини ясаш

Э.А. Захидов[1], Ш.К. Нематов[1,2], Л.Р. Нурумбетова[1], А.Й. Тургунбоев, Б.Ғ. Хидиров[2,3], И.Р. Бойназаров[1], А.А. Сапарбаев[1,3]

[1]Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, ЎзФА, Дўрмон йўли 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон
[2]Ислом Каримов номидаги Тошкент Давлат Техника Университети, Университет кўчаси 2, 100174, Тошкент, Ўзбекистон
[3]Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий Университети, Университет кўчаси 4, 100174, Тошкент, Ўзбекистон

Сўнгги пайтларда ноорганик перовскит материалларига асосланган қуёш элементларига катта эътибор берилмоқда. Бироқ, перовскит материалларнинг чекланган эрувчанлиги туфайли перовскит плёнкаларининг сифати ва қалинлиги ҳали ҳам қониқарли эмас. Бу мақолада атмосфера шароитида юқори сифатли перовскит плёнкаларини ясаш учун оддий бир нечта қоплама методи тасвирланган. Перовскит плёнкаларида заряднинг ташилиш механизмини янада ошириш ва наноўлчамдаги тешиклар каби нуқсонлар йўқотиш учун икки марта спин соатинг усулини қўллаш орқали самарали тарзда бартараф этилиши мумкин. Бундан ташқари, яхшиланган плёнка қалинлиги тушаётган ёруғликнинг ютилишини яхшилайди. Натижада, планар перовскит қуёш элементларининг энергия ўзгартириш самарадорлиги (ЭЎС) сезиларли даражада яхшиланди ва ЭЎС 11.4% га этди, бу бир марта спин соатинг қоплама усули билан олинган перовскит қуёшг элементининг ЭЎС (8%) дан 43% га кўпдир. Бундан ташқари, перовскит плёнкаларининг барқарорлиги ҳам яхшиланган.

Калит сўзлар. $CsPbI_3$ перовскит, XRD анализ, ютилиш спектри, ток зичлиги.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.