

С.Р. Жантуаров^{1*} , Ж.Б. Омарова² , А.Б. Жапар¹,
А.К. Шонгалова¹ , Н.А. Чучвага¹ , К.С. Жолдыбаев¹,
К.П. Аймаганбетов¹ , М.Дж. Карни³ , Н.С. Токмолдин¹ 

¹Satbayev University, Физико-технический институт, Казахстан, г. Алматы

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

³Университет Суонси, Великобритания, г. Суонси

*e-mail: sultzhantuarov@mail.ru

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРИ ДЕГРАДАЦИИ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Метил-аммониевые свинцово-галогидные перовскиты широко признаны в качестве многообещающих материалов для фотоэлектрических приложений. Популярность этих материалов основана на высокой эффективности готовых фотопреобразователей, сопоставимой с эффективностью промышленных кремниевых солнечных элементов, а также на возможности значительного уменьшения стоимости производства. Перовскитные материалы имеют прямую и узкую ширину запрещенной зоны, в результате чего они обладают высокой эффективностью поглощения света, сопоставимой с кремнием, а для получения солнечных элементов требуется тонкий слой раствора, получаемого из растворов, что значительно снижает производство солнечных батарей из перовскита. Процесс изготовления перовскитных солнечных элементов достаточно прост и не требует высоких температур. Кроме того, простота изготовления лабораторных образцов предоставляет возможность разработки данной технологии с низкими капитальными издержками и позволяет присоединиться к общемировым исследованиям и тенденциям в этом направлении. В статье описываются результаты изготовления и изучения деградации под влиянием внешних факторов, атмосферы перовскитных плёнок и солнечных элементов, полученных при температуре 100 °С методом центрифугирования, который дает возможность быстро и легко нанести однородные пленки толщиной от нескольких нанометров до нескольких микрон.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, фотовольтаика, перовскитные солнечные элементы.

S.R. Zhantuarov^{1*}, Zh.B. Omarova², A.B. Zhapar¹,
A.K. Shongalova¹, N.A. Chuchvaga¹, K.S. Zholdybaev¹,
K.P. Aimagambetov¹, M.J. Carnie³, N.S. Tokmoldin¹

¹Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Kazakhstan, Almaty

²Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

³Swansea University, United Kingdom, Swansea

*e-mail: sultzhantuarov@mail.ru

Fabrication and degradation performance analysis of perovskite solar cells

Methyl-ammonium lead-halide perovskites are acknowledged as highly promising materials for photovoltaic applications. The popularity of these materials is due to the high efficiency of ready photovoltaic devices comparable to the efficiency of industrial silicon solar cells as well as the possibility of significant reduction in production cost. Perovskite materials have a straight and narrow bandgap, as a result of which they have a high light absorption efficiency comparable to silicon; and to obtain solar cells requires a thin layer of a solution obtained from solutions, which significantly reduces the production of solar cells from perovskite. The fabrication process for perovskite solar cells is rather simple and does not require high temperatures. Also, the ease of manufacturing of laboratory samples gives an opportunity to develop this technology with low capital expenditures and to join to the global research and trends in this field. The paper describes the results of fabrication and study of degradation under the influence of external factors, the atmosphere of perovskite films and solar cells obtained at a temperature

of 100° C by centrifugation, which makes it possible to apply uniform films with a thickness of several nanometers to several microns easy and quickly.

Key words: alternative energy, photovoltaics, perovskite solar cells.

С.Р. Жантуаров¹, Ж.Б. Омарова², А.Б. Жапар¹,
А.К. Шонғалова¹, Н.А. Чучвага¹, К.С. Жолдыбаев¹,
К.П. Аймағанбетов¹, М.Дж. Карни³, Н.С. Токмолдин¹

¹ Satbayev University, Физика-техникалық институты, Қазақстан, Алматы қ.

² Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

³ Суонси Университеті, Ұлыбритания, Суонси қ.

*e-mail: sultzhantuarov@mail.ru

Перовскитті күн элементтерін нашарлауы өнімділігін өндіру және талдау

Метил аммонийінің қорғасын галогенді перовскиттері фотоэлектрлік қосымшалар үшін перспективті материалдар ретінде кеңінен танымал. Бұл материалдардың танымалдылығы дайын фотоконверторлардың жоғары тиімділігіне, өнеркәсіптік кремний күн батареяларының тиімділігімен, сондай ақ өндіріс шығындарын едәуір төмендету мүмкіндігіне негізделген. Перовскитті материалдарда тікелей және тар тыйым салынған аймақ ені болатыны белгілі, нәтижесінде олар кремниймен салыстырғанда жарықты жұтудан жоғары тиімділікке ие, ал күн элементтерін алу үшін ерітінділерден алынатын ерітінді қабаты керек, және ол перовскиттан жасалған күн батареяларын өндірісін айтарлықтай төмендетеді. Перовскитті материалдарды әзірлеу үрдісі өте қарапайым және жоғары температураны қажет етпейді. Сонымен қатар, зертханалық үлгілерді жасаудың қарапайымдылығы аз шығындармен осы технологияны дамытуға мүмкіндік береді және әлемдік зерттеулер мен осы бағыттағы трендтерге қосылуға мүмкіндік береді. Бұл мақалада 100 °С температурада қалыңдығы бірнеше нанометрден бірнеше микрондар аралығында болатын біртекті қабықшаны тез және оңай жалатуға мүмкіндік беретін центрифугалау әдісімен жасалған перовскитті қабықшалар мен күн элементтерін сыртқы факторлардың, атмосферасының әсерінен деградацияны жасау және зерттеу нәтижелері сипатталған.

Түйін сөздер: баламалы энергетика, фотовольтаика, перовскиттік күн элементтері.

Введение

С каждым годом альтернативные источники энергии привлекают все больше внимания. Важным аргументом в использовании альтернативной энергии является истощаемость месторождений полезных ископаемых, применяемых для её выработки: уголь, нефть, газ. Кроме этого продукты сжигания мазута и угля на ТЭЦ, выходя в атмосферу, вызывают её загрязнение, что оказывает негативное влияние на экологию. Особое место среди альтернативных и возобновляемых источников энергии занимает энергия Солнца, которая изучается отдельной наукой – фотовольтаикой [1, 2].

Фотоэлектрические солнечные преобразователи основаны на явлении внутреннего фотоэффекта, среди которых традиционными и широко распространёнными на сегодняшний день являются кремниевые солнечные элементы и батареи на их основе, благодаря их долговечности (до 25 лет работы) и довольно высоким КПД от 15% и выше [3]. Однако, пока еще достаточно высокая себестоимость солнечных элементов на основе

кремния и других неорганических фотопреобразователей на основе соединений индия, теллура, селена, мышьяка, кадмия, арсенида галлия, сдерживает повсеместное применение данных типов солнечных батарей [4]. Кроме того, токсичность материалов, применяемых при их изготовлении; необходимость создания и использования специальных условий на определённых этапах производственного процесса, например, вакуума, высоких температур для плавления исходного сырья, использование точного и сложного оборудования, при изготовлении солнечных элементов также влияет на их цену. Наличие вышеуказанных проблем порождает необходимость поиска и разработки более дешёвых и широко распространённых материалов, а также более простых и менее затратных технологий производства для сокращения расходов в беспощадном использовании солнечной энергетике. Соединения на основе органических материалов демонстрируют высокий потенциал применения в качестве альтернативных материалов, которые позволяют решить данные проблемы. Эффективность элементов на основе органических мате-

риалов не всегда конкурирует с кремниевыми и неорганическими фотопреобразователями, но невысокая эффективность компенсируется возможностью производить их на большой площади. Кроме того, органические материалы обладают гибкостью, прозрачностью, малым весом, что расширяет область их применения [5–10]. В 2009 году в направлении исследований в области органических материалов для фотоэнергетики выделилась группа материалов на основе свинцово-галлоидных перовскитов ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$) [11–13], которые настоящий момент демонстрируют очень высокую эффективность, на уровне 22,1% для лабораторных образцов [14]. На данный момент основными задачами в области исследования перовскитных солнечных элементов является поиск решений по предотвращению деградации солнечных элементов в результате воздействия влаги и света, уменьшению токсичности используемых материалов и увеличению эффективности солнечных элементов [15–22]. Целью данной работы являлось изучить влияние окружающей среды на перовскитную плёнку $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_x\text{Cl}_x$ и солнечный элемент на основе свинцово-галлоидного метил-аммониевого перовскита (FTO-стекло/PCBM/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /Spiro-OMeTAD/Au) на примере отслеживания изменения вольт-амперной характеристики и оптической плотности.

Методика и методы исследований

Перовскитные элементы изготавливали следующим образом: поверхность стекла, с нанесённым прозрачным проводящим слоем из оксида фтора-олова (FTO – fluorine-doped tin oxide), сначала очищали и обезжиривали, и после этого переходили к процессу подготовки растворов PC₆₀BM ($\text{C}_{72}\text{H}_{14}\text{O}_2$), Spiro-OMeTAD ($\text{C}_{81}\text{H}_{68}\text{N}_4\text{O}_8$), MAPbI ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$). После их подготовки переходили к осаждению на спиннере, модель WS-650-8B, производства «Laurell Technologies». Параметры осаждения методом центрифугирования для всех слоёв были одинаковые: 30 сек., 4000 об/мин.

Тонкие плёнки PC₆₀BM (Phenyl-C-61-butiricacidandmethylester – далее «PCBM»), играющие роль электропроводящих слоев n-типа проводимости, осаждались из раствора хлорбензола с концентрацией 20 мг/мл. Далее для улучшения проводящих свойств был нанесён слой из батокупроина (BCP) из раствора с концентрацией 1мг/мл в этаноле. Следующим шагом являлось нанесение активного светопоглощающего

слоя из раствора MAPbI. Он был приготовлен из порошков йодидов метиламмония (MAI) свинца (PbI), растворённых в смеси из диметилфторамида с объемом 0,8 мл и диметилсульфооксида – 0,2 мл. Для лучшего растворения твёрдых частиц проводили нагревание флакона при 60 °C. При центрифугировании, до его завершения, для ускорения процесса кристаллизации плёнки капали 100 мкл этилацетата. После окончания раскручивания образца, плёнку отожгли при 100 °C. Последним осаждали плёнку из раствора Spiro-OMeTAD, выполняющего функцию проводящего дырки слоя p-типа. Концентрация Spiro-OMeTAD, изначально представленного в виде порошка, растворённого в хлорбензоле, составляла 85 мг/мл. После осаждения плёнки выдерживались в темноте при сухой атмосфере 16 часов. Подготовка Spiro-OMeTAD и других растворов проводилась внутри перчаточного ящика. После центрифугирования были осажжены золотые контакты термовакuumным напылением на установке «Edwards 306».

Основная особенность солнечного элемента с архитектурой FTO/PCBM/BCP/MAPbI/Spiro-OMeTAD/Au в том, что составляющие её полупроводниковые слои обладают различными типами проводимости. Плёнка с PCBM – n-тип, и Spiro-OMeTAD – p-тип, перовскитный слой – i-тип, а вся структура относится к типу n-i-р-структуры. Основным интересом к солнечным элементам из перечисленных выше материалов был обусловлен тем, что нужно было получить устройство при температурах отжига плёнок до 100 °C, так как данное значение температур позволяет в дальнейших исследованиях попытаться изготовить его на гибких пластиковых подложках. Однако ниже будет изучаться вопрос влияния факторов среды, при которой хранились образцы, на соответствующие им параметры.

После завершения осаждения контактов солнечные элементы с активной площадью 0,087 см² были протестированы под имитатором солнечного излучения NewportOriel Sol3A класса AAA при освещении AM 1,5. Измерение оптических характеристик плёнок проводилось на приборе QEX-10, производства компании «PV Measurements, Inc.».

Условия хранения образцов: отсутствие света, хранение в пластиковом контейнере – для солнечных элементов, и в закрытой чашке Петри – для плёнок, комнатная температура, при нормальной влажности в помещении 30–60% [23]. После изготовления перовскитных фотопреобразователей были выбраны 3 наиболее

производительных образца под номерами №2, №4, №9.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены в виде результатов измерений, графики зависимости плотности токов короткого замыкания от напряжения холостого хода солнечного элемента с наиболее оптимальными кривыми до деградации и

после деградации. Каждый из солнечных элементов имеет свой номер, на поверхности которого расположено 4 контакта. Контакты, с которых снимали сигнал, пронумерованы в соответствии с номерами элементов: первая цифра означает номер образца, вторая цифра соответствует номеру контакта (пикселю), с которого получали сигнал. В таблицах 1 и 2 приведены их основные выходные параметры до и после деградации.

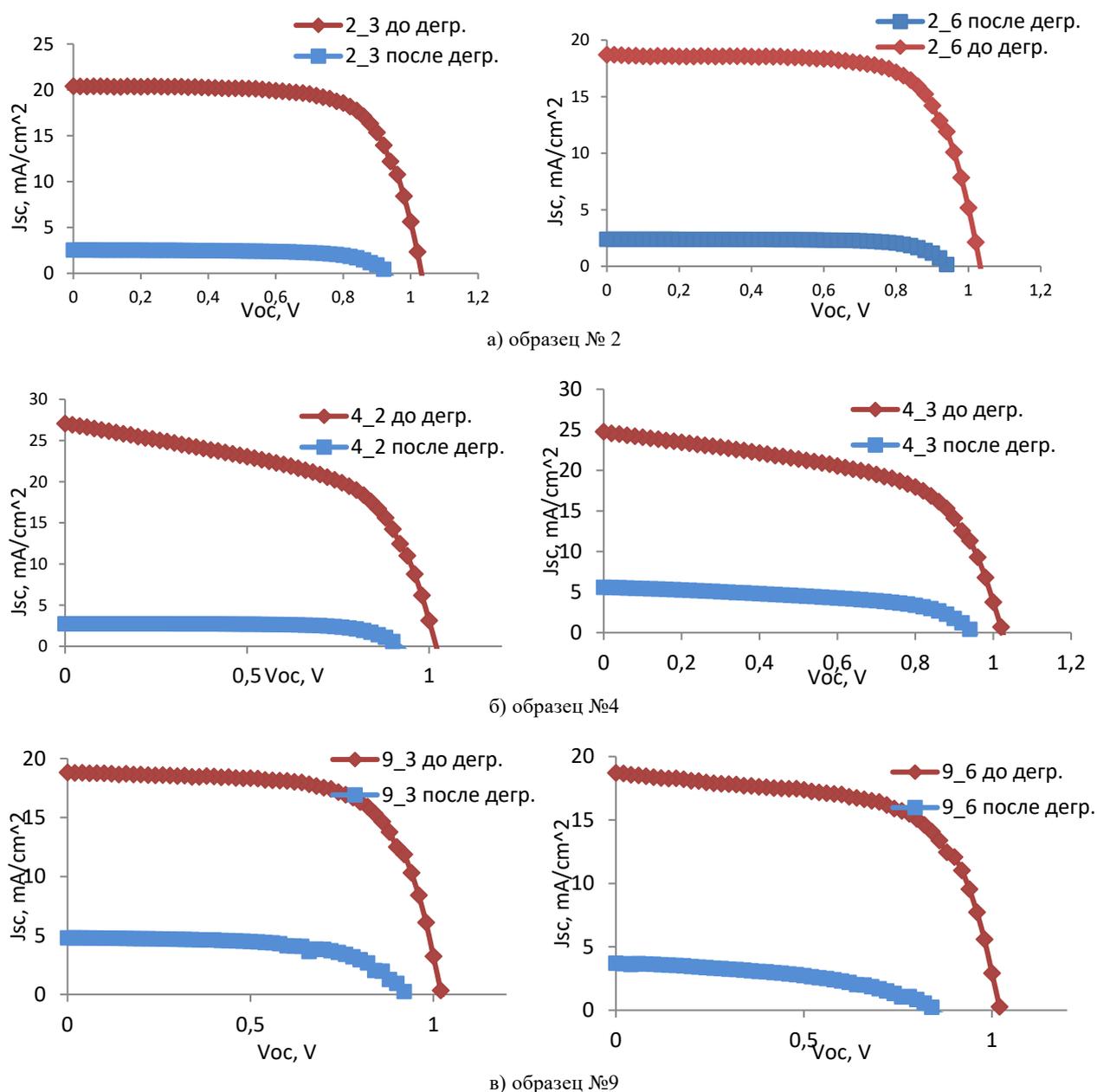


Рисунок 1 – Вольтамперные характеристики образцов измеренных до деградации и после деградации

Таблица 1 – Параметры образцов вольт–амперных характеристик до деградации

Образец №	Номер контакта на поверхности образца (пиксель)	V _{oc} , V	J _{sc} , mA/cm ²	FF, %	Eff., %
9	9_3	1,02	18,83	68,25	13,11
	9_6	1,02	18,74	63,08	12,05
4	4_2	1,02	27,05	55,38	15,27
	4_3	1,02	24,73	57,95	14,40
2	2_3	1,03	20,40	71,63	15,07
	2_6	1,03	18,68	72,36	13,93

Таблица 2 – Параметры образцов вольт–амперных характеристик после деградации

Образец №	Номер контакта на поверхности образца (пиксель)	V _{oc} , V	J _{sc} , mA/cm ²	FF, %	Eff., %
9	9_3	0,92	4,79	59,67	2,63
	9_6	0,85	3,67	44,48	1,39
4	4_2	0,92	2,72	71,36	1,78
	4_3	0,94	5,58	52,76	2,78
2	2_3	0,93	2,53	69,11	1,62
	2_6	0,94	2,39	74,21	1,66

Из приведённых данных видно, что хранение образца в течение 5 дней при нормальных условиях влияет на производительность солнечных элементов: например, образец № 4 в точке 4_3 в 1–ый день показал эффективность в 14,40% ($V_{oc} = 1,02$ В, $J_{sc} = 24,73$ мА/см², $FF = 57,95\%$), в 5–ый день эффективность упала до 2,78% ($V_{oc} = 0,94$ В, $J_{sc} = 5,58$ мА/см², $FF = 52,76\%$). Аналогично падает производительность образцов №9, №2.

В эффективность солнечного элемента вносят вклад напряжение холостого хода V_{oc} , плотность тока короткого замыкания J_{sc} и фактор заполнения FF [24]. Заметно, что с течением времени данные параметры начинают уменьшаться, особенно во всех образцах падает V_{oc} и J_{sc} . Величина FF , напротив, в некоторых случаях растёт, например, у образцов №4 и №2 в точке 4_2 и 2_6, соответственно, но в основном также уменьшается в остальных точках образцов. Однако важно отметить, что FF обратно пропорционально зависит от значений V_{oc} и J_{sc} [8], соответственно основными параметрами эффективности солнечного элемента являются V_{oc} и J_{sc} . При этом необходимо отметить, что V_{oc} зависит от ширины запрещённой зоны поглотителя, а J_{sc} зависит от диапазона спектра, поглощаемого активным слоем в устройстве [24]. Таким образом, можно

заключить, что под действием факторов среды происходят изменения в ширине запрещённой зоны и ухудшается поглотательная способность активных слоёв в образцах

Возможно, также будет интересно изучить деградацию производительности перовскитных солнечных элементов на основе $CH_3NH_3PbI_xCl_x$, так как солнечный элемент на его основе будет меньше подвержен деградации. Данное утверждение строится на основании наблюдения за изменением оптической плотности перовскитной плёнки, хранящейся в аналогичных условиях, что и изученные выше солнечные элементы на основе $CH_3NH_3PbI_3$. Изучение стабильности плёнки $CH_3NH_3PbI_xCl_x$ с помощью наблюдения усреднённых значений оптических плотностей в диапазоне длин волн от 300 до 1100 нм, полученных из спектров пропускания, продемонстрировано на рисунке 2.

Как видно из полученных значений при трёхнедельном мониторинге среднее значение оптической плотности плёнки варьируется в очень узком интервале от 0,389 до 0,400, то есть изменения параметров незначительные порядка тысячных долей – 0,011. Исследование стабильности солнечных элементов на основе перовскитов $CH_3NH_3PbI_xCl_x$ планируется проводить в будущем, при дальнейших исследованиях.

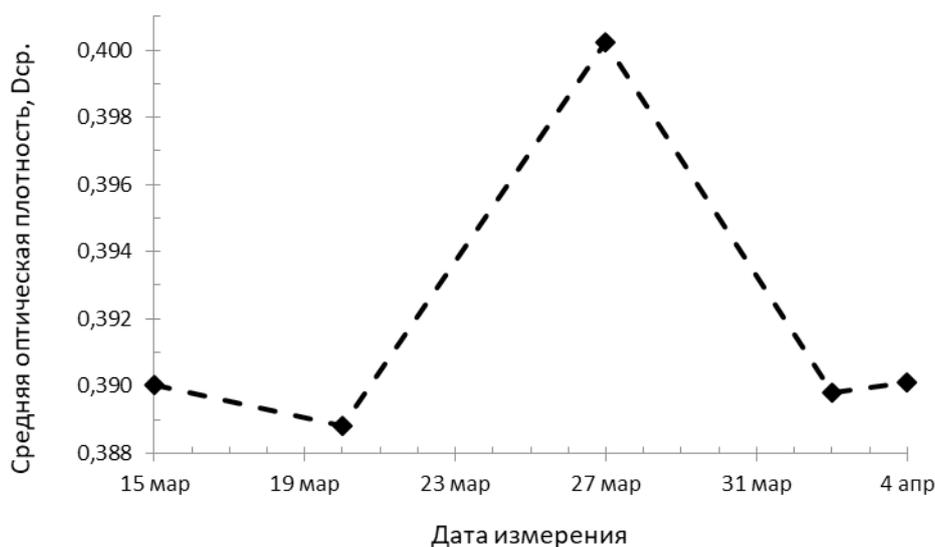


Рисунок 2 – Мониторинг средних значений оптических плотностей перовскитной плёнки $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_x\text{Cl}_{1-x}$ в течение трёх недель, точками отмечены даты измерений

Выводы

Высокая эффективность и относительно простая технология изготовления перовскитных солнечных элементов сделали данное направление исследований популярным и перспективным. Результаты, описанные в статье, показывают возможность участвовать и развиваться в данном направлении отечественным учёным, исследователям и разработчикам и приобщиться к общемировым тенденциям в развитии фотогальваники.

Критическими факторами, оказывающие влияние на свойства образцов являются влажность и воздух при указанных выше условиях хранения. Эти факторы способствуют постепенному поглощению образцами паров воды из окружающей атмосферы, а также их окислению [25,26]. Положительным моментом является,

что элемент может работать спустя 5 дней, отрицательным – падение эффективности заметное.

Решением в вопросах, связанных со стабильностью работы перовскитных фотопреобразователей под влиянием внешних факторов, является при потенциальном применении обеспечить герметизацию образца, чтобы оградить от влияния влажности и воздуха, пассивацию плёнок или использовать другие материалы, которые будут более устойчивы к факторам среды. В указанных направлениях и сосредоточено большинство исследований в данной области.

Работа выполнена в рамках проектов грантового и программы целевого финансирования Комитета Науки МОН РК ИРН АР05133651 и BR05236404, а также при поддержке фонда «Global Challenges Research Fund (GCRF)», RIG1029–107.

Литература

- 1 Karatayev M., Clarke M.L. Current energy resources in Kazakhstan and the future potential of renewables: A review //Energy Procedia. – 2014. – Vol. 59. – P. 97–104.
- 2 Павлов Н. Солнечная энергия – энергия будущего //Электроника. Наука Технология Бизнес. – 2013. – Vol. 1. – P. 130–137.
- 3 Green M.A. The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution //Prog. Photovoltaics Res. Appl. – 2009. – Vol. 17 – No 3. – P. 183–189.
- 4 Dinçer F. The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy //Renew. Sustain. Energy Rev. – 2010. – Vol. 15. – P. 713–720.
- 5 Di Giacomo F., Zardetto V., D’Epifanio A., Pescetelli S., Matteocci F., Razza S. Flexible perovskite photovoltaic modules and solar cells based on atomic layer deposited compact layers and UV-irradiated TiO_2 scaffolds on plastic substrates //Adv. Energy Mater. Wiley-VCH Verlag, – 2015. – Vol. 5 – No 8. – P. 1401808.

- 6 Susrutha B., Giribabu L., Singh S.P. Recent advances in flexible perovskite solar cells //Chem. Commun. Royal Society of Chemistry. – 2015. – Vol. 51 – No 79. – P. 14696–14707.
- 7 Weerasinghe H. C., Dkhissi Y., Scully A. D., Caruso R. A., Cheng Y. B. Encapsulation for improving the lifetime of flexible perovskite solar cells //Nano Energy. Elsevier Ltd. – 2015. – Vol. 18. – P.118–125.
- 8 Парашук Д. Ю., Кокорин А.И. Современные фотоэлектрические и фотохимические методы преобразования солнечной энергии //Российский химический журнал. – 2008. – Т. 52. – No. 6 – С. 107-117.
- 9 Sharma K., Sharma V., Sharma S. S. Dye-sensitized solar cells: fundamentals and current status //Nanoscale research letters. – 2018. – Vol. 13. – No. 1. – P. 381.
- 10 Сигаев А.П. Применение золь-гель-технологии для создания полупроводниковой структуры фотоэлектрического преобразователя энергии //Молодой ученый. – 2014. – Vol. 21. – P. 231–234.
- 11 Carnie M.J., Charbonneau C., Davies M. L., O'Regan B., Worsley D. A., Watson T. M. Performance enhancement of solution processed perovskite solar cells incorporating functionalized silica nanoparticles //J. Mater. Chem. A. Royal Society of Chemistry. – 2014. – Vol. 2. – No 40. – P. 17077–17084.
- 12 Qin P., Tanaka S., Ito S., Tetreault N., Manabe K., Nishino H., Grätzel M. Inorganic hole conductor-based lead halide perovskite solar cells with 12.4% conversion efficiency //Nat. Commun. Nature Publishing Group. – 2014. – Vol. 5. – No 1. – P.1–6.
- 13 Liao W.Q., Zhang Y., Hu C. L., Mao J. G., Ye H. Y., Li P. F., Xiong R. G. A lead-halide perovskite molecular ferroelectric semiconductor //Nat. Commun. Nature Publishing Group. – 2015. – Vol. 6. – No 1. – P.1–7.
- 14 Yang W. S., Park B. W., Jung E. H., Jeon N. J., Kim Y. C., Lee D. U., Seok S. I. Iodide management in formamidiniumlead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells //Science. – 2017. – Vol. 356. – No 6345. – P.1376–1379.
- 15 Wang D., Wright M., Elumalai N. K., Uddin A. Stability of perovskite solar cells //Solar Energy Materials and Solar Cells. Elsevier. – 2016. – Vol. 147. – P. 55–275.
- 16 Babayigit A., Ethirajan A., Muller M., Conings B. Toxicity of organometal halide perovskite solar cells //Nature Materials. Nature Publishing Group. – 2016. – Vol. 15 – No 3. – P.247–251.
- 17 Hao F., Stoumpos C. C., Cao D. H., Chang R. P., Kanatzidis M. G. Lead-free solid-state organic-inorganic halide perovskite solar cells //Nat. Photonics. Nature Publishing Group. – 2014. – Vol. 8. – No 6. – P. 489–494.
- 18 Berhe T. A., Su W. N., Chen C. H., Pan C. J., Cheng J. H., Chen H. M. Organometal halide perovskite solar cells: Degradation and stability //Energy and Environmental Science. Royal Society of Chemistry. – 2016. – Vol. 9. – No 2. – P.323–356.
- 19 Boix P. P., Nonomura K., Mathews N., Mhaisalkar S. G. Current progress and future perspectives for organic/inorganic perovskite solar cells //Materials Today. Elsevier B.V. – 2014. – Vol. 17. – No 1. – P. 6–23.
- 20 Niu G., Guo X., Wang L. Review of recent progress in chemical stability of perovskite solar cells //J. Mater. Chem. A. Royal Society of Chemistry. – 2015. – Vol. 3. – No 17. – P.8970–8980.
- 21 Dunfield S. P., Bliss L., Zhang F., Luther J. M., Zhu K., van Hest M. F. From Defects to Degradation: A Mechanistic Understanding of Degradation in Perovskite Solar Cell Devices and Modules //Adv. Energy Mater. Wiley-VCH Verlag. – 2020. – Vol. 10. – No 26. – P. 1904054.
- 22 Divitini G., Cacovich S., Matteocci F., Cinà L., Di Carlo A., Ducati C. In situ observation of heat-induced degradation of perovskite solar cells //Nature Energy. Nature Publishing Group. – 2016. – Vol. 1. – No 1. – P.1–6.
- 23 ГОСТ 30494–96 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещении. – Госстрой России, 1999. – С. 6-7
- 24 Reshi H. A., Zargar R. A. Perovskite Solar Cells: The Challenging Issues for Stable Power Conversion Efficiency //Recent Development in Optoelectronic Devices. – 2018. – Vol. 117.
- 25 Emami S., Andrade L., Mendes A. Recent progress in long-term stability of perovskite solar cells //U.Porto J. Eng. – 2015. – Vol. 1. – No 2. – P. 52–62.
- 26 Eperon G.E., Habisreutinger S. N., Leijtens T., Bruijns B. J., van Franeker J. J., DeQuilettes D. W. The Importance of Moisture in Hybrid Lead Halide Perovskite Thin Film Fabrication //ACS Nano. American Chemical Society. – 2015. – Vol. 9. – No 9. – P. 9380–9393.

References

- 1 M. Karatayev and M.L. Clarke, Energy Procedia 59, 97–104 (2014).
- 2 N. Pavlov, Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes 1, 130–137 (2013). (In Russ).
- 3 M.A. Green, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 17.3, 183–189 (2009).
- 4 F. Dinçer, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15.1 713–720 (2011).
- 5 F. Di Giacomo, Advanced Energy Materials 5, 8 (2015)
- 6 B. Susrutha, L. Giribabu, and S. P. Singh, Chemical communications 51,79 (2015).
- 7 H.C. Weerasinghe, Y. Dkhissi, A.D. Scully, R.A. Caruso, and Y.B. Cheng, Nano Energy, 118–125 (2015).
- 8 P.D. Yur'yevich and K.A. Il'ich, Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal 52.6 (2008). (In Russ).
- 9 K. Sharma, V. Sharma, S. and S. Sharma, Nanoscale research letters 13, 381–427 (2018).
- 10 A. P. Sigayev, Molodoy uchenyy 21, 231–234 (2014). (In Russ).
- 11 M.J. Carnie, C. Charbonneau, M.L. Davies, B.O. Regan, D.A. Worsley, and T.M. Watson, Journal of Materials Chemistry A 2.40, 17077–17084 (2014).
- 12 P. Qin, Nature communications 5.1, 1–6 (2014).
- 13 W. Q. Liao, Nature communications 6.1, 1–7 (2015).

- 14 W. S. Yang, *Science* 356.6345, 1376–1379 (2017).
- 15 D. Wang, M. Wright, N. K. Elumalai, and A. Uddin, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 147, 255–275 (2016).
- 16 A. Babayigit, A. Ethirajan, M. Muller, and B. Conings, *Nature Materials* 15.3, 247–251 (2016).
- 17 F. Hao, C.C. Stoumpos, D.H. Cao, R.P.H. Chang, and M.G. Kanatzidis, *Nature Photonics* 8.6, 489–494 (2014).
- 18 T.A. Berhe, *Energy and Environmental Science* 9.2, 323–356 (2016).
- 19 P.P. Boix, K. Nonomura, N. Mathews, and S. G. Mhaisalkar, *Materials Today* 17.1, 16–23 (2014).
- 20 G. Niu, X. Guo, and L. Wang, *Journal of Materials Chemistry* 3.17, 8970–8980 (2015).
- 21 S.P. Dunfield, *Advanced Energy Materials* 10.26, 1904054 (2020).
- 22 G. Divitini, S. Cacovich, F. Matteocci, L. Cinà, A. Di Carlo, and C. Ducati, *Nature Energy* 1.1, 1–6 (2016).
- 23 GOST 30494–96 *Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures* (Gostroy Rossii, 1999), p.6–7. (In Russ).
- 24 Z.R.A. Reshi H. A., *Recent Development in Optoelectronic Devices* 117 (2018).
- 25 S. Emami, L. Andrade, and A. Mendes, *U. Porto Journal of Engineering* 1.2, 52–62, (2015).
- 26 G.E. Eperon, *ACS Nano* 9.9, 9380–9393, (2015).