

13.1

Экспериментальное исследование процессов теплопереноса в тонкопленочных структурах на основе перовскитов методом низкокогерентной тандемной интерферометрии

© В.В. Травкин^{1,2}, А.И. Коптяев², Г.Л. Пахомов^{1,2}, П.В. Волков¹, Д.А. Семиков^{1,2}, А.Ю. Лукьянов¹

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

² Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия

E-mail: trav@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 13 июля 2021 г.

В окончательной редакции 26 августа 2021 г.

Принято к публикации 27 августа 2021 г.

Исследованы процессы теплообмена в системе прототип солнечного элемента/окружающая среда в режиме, близком к эксплуатационному. В качестве прототипа использовалась тонкопленочная структура на основе гибридного многокомпонентного иодоплюмбатного перовскита. Построена математическая модель температурного поля и рассчитаны тепловые карты элемента для разных уровней освещенности. Установлено, что при диффузной инсоляции разогрев структуры (максимум в районе полутолщины) не превышает критического для стабильности перовскитной фазы порога из-за диссипации в окружающую среду.

Ключевые слова: перовскиты, тонкие пленки, теплоперенос, солнечные элементы, диффузная инсоляция.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.23.51781.18957

В настоящее время перовскитоподобные гибридные фотоабсорберы являются наиболее перспективными материалами для тонкопленочных солнечных элементов нового поколения, в том числе тандемной архитектуры [1], вследствие специфического сочетания оптоэлектронных свойств, технологичности и простоты изготовления. Однако такие фотоабсорберы недостаточно устойчивы к химической деградации, которую можно представить как фотолиз, пиролиз [2,3] и электролиз [4] — побочные процессы, которые в режиме генерации электроэнергии на масштабах времени более нескольких сотен часов существенно влияют на КПД солнечного элемента. Ранее мы исследовали проблемы фотолиза и электролиза перовскитного слоя при 1) приложении постоянного электрического поля и 2) облучении в коротковолновой части видимого диапазона [4,5]. Но в литературе по-прежнему мало внимания уделяется вопросу, сопровождается ли поглощение света перовскитом повышением локальной температуры, которое также может приводить к деградации (пиролиз), или же тепло рассеивается внутри элемента [3]. Чередующиеся функциональные (фотоабсорбирующие, зарядотранспортные, буферные) слои с различной теплопроводностью — неорганические, например оксид молибдена (MoO_3), $\kappa = 25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [6], и молекулярные, например металлофталоцианин, $\kappa < 0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [7], — могут влиять на эффективность теплоотведения с пленки перовскита на подложку. Следует отметить, что большое число интерфейсов, характерное для многослойного гибридного фотовольтаического преобразователя, является причиной значительных погрешностей при измерении температуры оптическими методами (например, с помощью пирометров) вследствие интерференционных

эффектов. Обычные „контактные“ методы контроля температуры (термопара и т.п.) также непригодны для решения этой задачи в связи с измерением температуры самого датчика вместо конкретной рабочей области образца. Поэтому правильнее использовать бесконтактные оптические методы, среди которых низкокогерентная тандемная интерферометрия с нанометровым разрешением обеспечивает наиболее адекватную оценку температуры в многослойных тонкопленочных структурах даже в экстремальных условиях [8].

В настоящей работе с использованием комбинации вакуумных и жидкостных методов осаждения были получены многослойные тонкопленочные структуры вида стекло/легированный оксид олова (FTO)/ MoO_3 (10 nm)/фталоцианин титанила TiOPc (25 nm)/гибридный трехкатионный иодоплюмбатный перовскит ($\text{Cs}_{0.1}\text{MA}_{0.8}\text{BA}_{0.1}$) PbI_3 (300 nm)/ MoO_3 (10 nm)/ TiOPc (25 nm)/ MoO_3 (10 nm). Такая схема была обусловлена необходимостью последующего изготовления прототипа тандемной конфигурации с двумя комплементарными фотоабсорберами, буферными и/или транспортными слоями. В качестве источника излучения использовалась ксеноновая дуговая лампа высокого давления с фильтром AM1.5G и фокусирующей линзой с диафрагмой. Подробное описание методик изготовления образцов можно найти в работах [5,9]. С помощью разработанной в ИФМ РАН оригинальной установки бесконтактного измерения температуры на базе тандемного низкокогерентного интерферометра (рис. 1) было проанализировано изменение реальной температуры образцов при непрерывном воздействии симулированного солнечного излучения различной длительности и интенсивности. Подробное описание методики измерения температуры

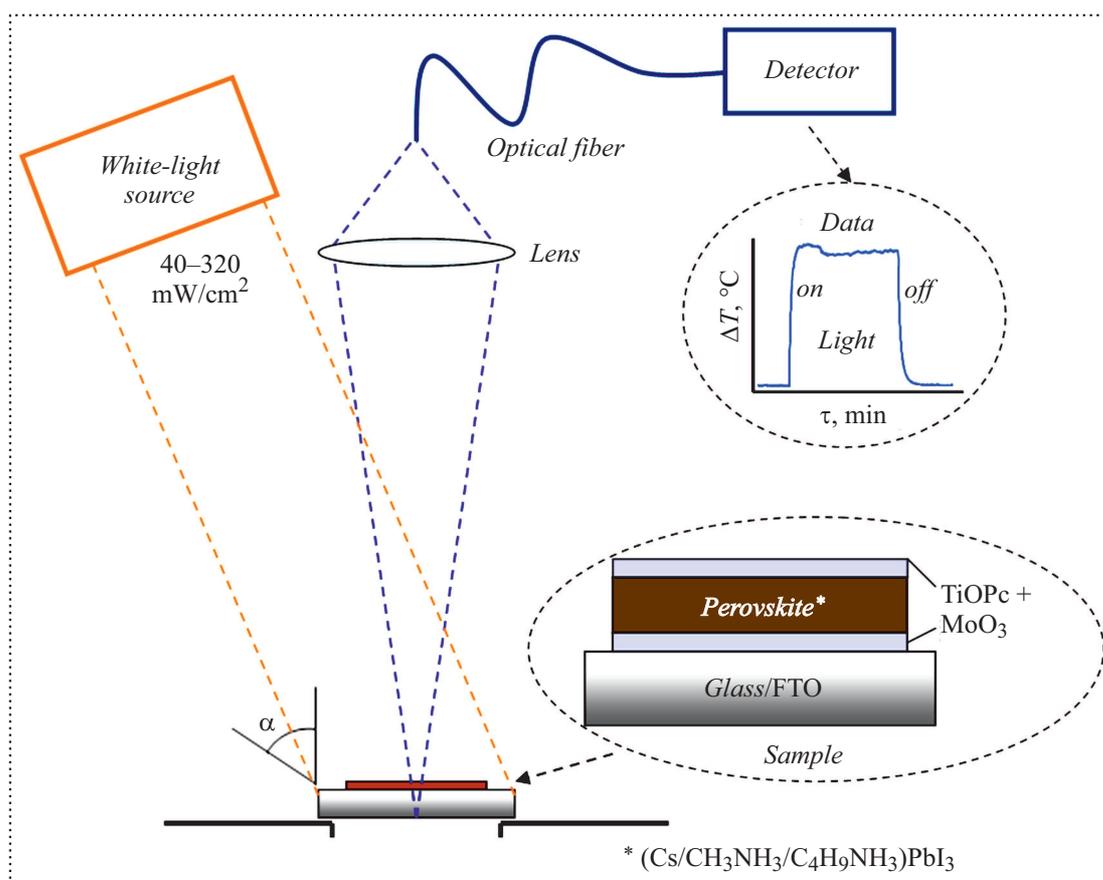


Рис. 1. Схема стенда бесконтактного контроля температуры тонкопленочных образцов.

можно найти в работе [8] и ссылках в ней. Численное моделирование процессов теплообмена в тонкопленочной структуре выполнялось в определенных граничных условиях: температуры окружающей среды, мощности падающего излучения, толщины и материала подложки. Вычисления проводились в системе Wolfram Mathematica методом конечных элементов с помощью алгоритмов Рунге–Кутты четвертого порядка. Вследствие большой разности размеров между переходными областями в слоях устройства, толщинами самих слоев и толщиной подложки были использованы сетки разных масштабов.

Исследуемые образцы размещались на бронзовом бруске, покрытом полированной черной алкидной эмалью, либо на подвесе из двух параллельных оптических волокон диаметром 250 μm. Тестировались два варианта: 1) стандартный солнечный элемент, сконструированный таким образом, чтобы поглощать максимальное количество падающего излучения; 2) полупрозрачный солнечный элемент с функционалом декорирующего энергогенерирующего покрытия. Мощность падающего излучения варьировалась в диапазоне 40–320 mW/cm² с целью моделирования различного уровня инсоляции. Одно солнце соответствует ~ 100 mW/cm², в реальных условиях инсоляция определяется географическими координатами, метеорологиче-

ской обстановкой и наличием солнечного концентратора в схеме фотопреобразователя.

При мощности облучения 40 mW/cm² чистая подложка стекло/FTO, размещенная на темной поверхности, нагревается на 15°C, а подложка с многослойной тонкопленочной структурой (покрытием) — на 20°C (рис. 2, a) относительно температуры окружающей среды (~ 23°C). На подвесе из оптоволокон при аналогичной мощности облучения разница температур между образцом и окружающей средой не превышает 10°C в случаях наличия либо отсутствия покрытия.

При 100 mW/cm² на подвесе чистая подложка и подложка с покрытием нагреваются на 15 и 25°C соответственно. Интересно, что подложка, на поверхность которой осажден только слой TiOPc толщиной 50 nm, нагревается почти на 20°C.

При 120 mW/cm² на темной поверхности (рис. 2, a) подложка с покрытием нагревалась на 40°C.

При 320 mW/cm² на темной поверхности (рис. 2, a) подложка с покрытием нагревалась на рекордные 90°C относительно температуры окружающей среды (~ 23°C).

Теоретические расчеты изменения температуры образцов, выполненные в соответствующих граничных условиях, показали хорошее соответствие результатов

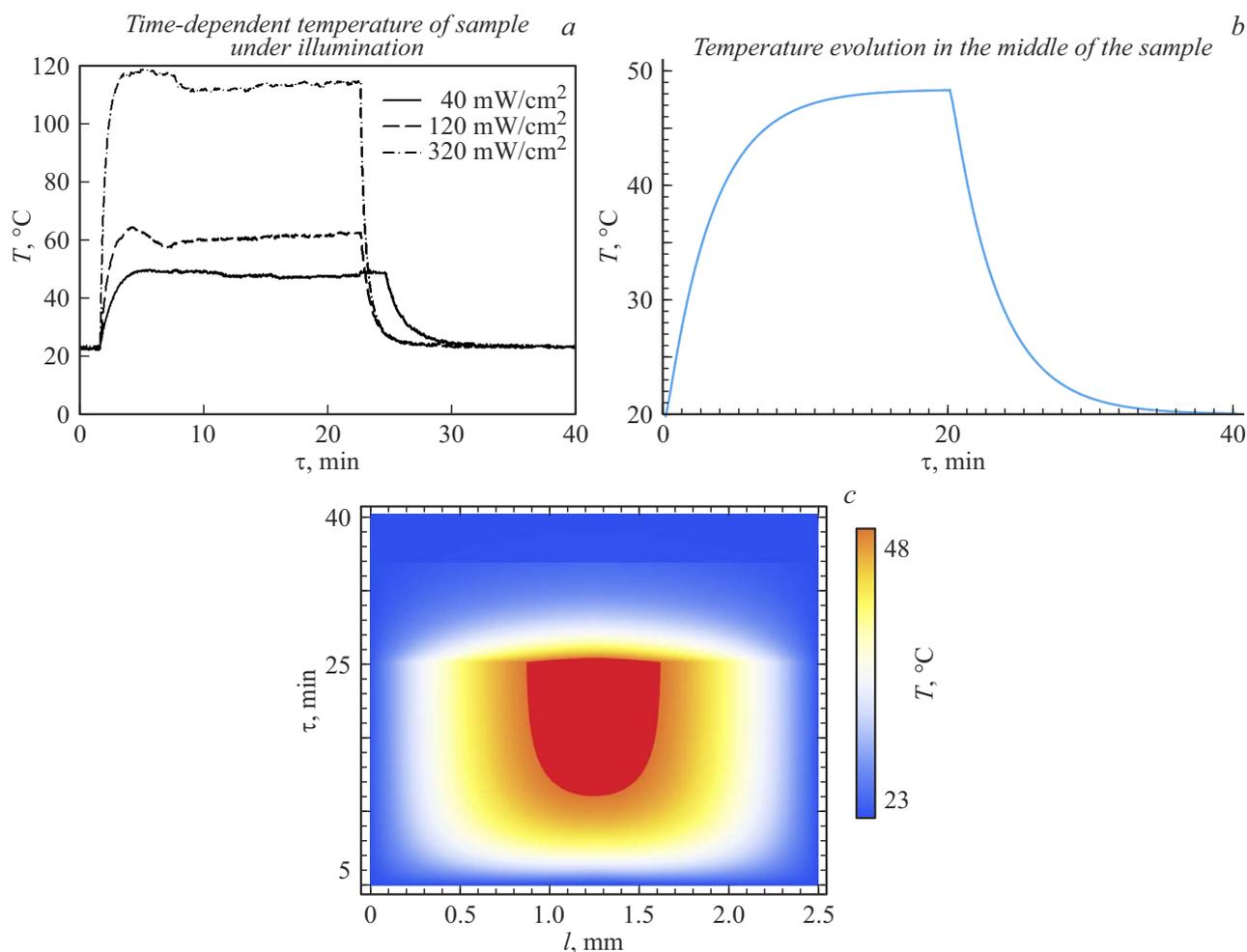


Рис. 2. Экспериментальные (a) и расчетный (b) профили изменения температуры тонкопленочной структуры на основе перовскита на подложке стекло/FTO при освещении симулированным солнечным излучением различной интенсивности. c — тепловая карта для расчетного профиля ($l = 2.5 \text{ mm}$ — толщина образца).

экспериментальным данным (рис. 2, b). Тепловая карта прототипа фотопреобразователя (рис. 2, c) показала, что тепловая энергия не аккумулируется в тонкопленочном покрытии, а быстро сбрасывается на подложку и затем медленно диссипирует в окружающую среду.

Таким образом, в условиях среднегодовой диффузной инсоляции, наблюдаемой на подавляющем большинстве территорий Российской Федерации, температура преобразователя не достигает критической (даже для иодопломбата метиламмония, MAPbI_3) температуры в $75\text{--}80^\circ\text{C}$ [10]. А конструктивная/технологическая организация теплоотвода в элементе с целью минимизации пиролиза является проблемой второго порядка по отношению к проблемам фотолиза и электролиза перовскита.

Финансирование работы

Работа поддерживалась проектом ИФМ РАН ГЗ 0035-2019-0024-C-01 в части разработки системы мониторинга температуры и проектом Российского фонда фун-

даментальных исследований № 20-38-70123 в части получения тонкопленочных фотовольтаических структур на основе перовскитов и исследования процессов теплопереноса в них.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Torabi, A. Behjat, Y. Zhou, P. Docampo, R.J. Stoddard, H.W. Hillhouse, T. Ameri, *Mater. Today Energy*, **12**, 70 (2019). DOI: 10.1016/j.mtener.2018.12.009
- [2] E.J. Juarez-Perez, Z. Hawash, S.R. Raga, L.K. Ono, Y.B. Qi, *Energy Environ. Sci.*, **9** (11), 3406 (2016). DOI: 10.1039/C6EE02016J
- [3] A.F. Akbulatov, M.I. Ustinova, G.V. Shilov, N.N. Dremova, I.S. Zhidkov, E.Z. Kurmaev, L.A. Frolova, A.F. Shestakov, S.M. Aldoshin, P.A. Troshin, *J. Phys. Chem. Lett.*, **12** (18), 4362 (2021). DOI: 10.1021/acs.jpcclett.1c00883

- [4] M.N. Drozdov, P.A. Yunin, V.V. Travkin, A.I. Koptyaev, G.L. Pakhomov, *Adv. Mater. Interfaces*, **6** (12), 1900364 (2019). DOI: 10.1002/admi.201900364
- [5] V.V. Travkin, P.A. Yunin, A.N. Fedoseev, A.I. Okhapkin, Y.I. Sachkov, G.L. Pakhomov, *Solid State Sci.*, **99**, 106051 (2020). DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2019.106051
- [6] Q. Xiao, C. Zhan, Y. You, L. Tong, R. Wei, X. Liu, *Mater. Lett.*, **227**, 33 (2018). DOI: 10.1016/j.matlet.2018.05.035
- [7] O. Kamoun, A. Mami, M.A. Amara, R. Vidu, M. Amlouk, *Micromachines*, **10** (2), 138 (2019). DOI: 10.3390/mi10020138.
- [8] P.V. Volkov, A.V. Goryunov, D.N. Lobanov, A.Y. Lukyanov, A.V. Novikov, A.D. Tertyshnik, M.V. Shaleev, D.V. Yurasov, *J. Cryst. Growth*, **448**, 89 (2016). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2016.05.029
- [9] A.G. Boldyreva, I.S. Zhidkov, S. Tsarev, A.F. Akbulatov, M.M. Tepliakova, Y.S. Fedotov, S.I. Bredikhin, E.Y. Postnova, S.Y. Luchkin, E.Z. Kurmaev, K.J. Stevenson, P.A. Troshin, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12** (16), 19161 (2020). DOI: 10.1021/acsami.0c01027
- [10] A. Kumar, U. Bansode, S. Ogale, A. Rahman, *Nanotechnology*, **31** (36), 365403 (2020). DOI: 10.1088/1361-6528/ab97d4