

## Физика конденсированного состояния

Научная статья

УДК 538.91

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16401>

### ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРОВСКИТНЫХ ПЛЕНОК $\text{MaPbI}_3$ , СФОРМИРОВАННЫХ ОДНОСТАДИЙНЫМ МЕТОДОМ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ

М. К. Овезов<sup>1</sup> ✉, А. А. Рябко<sup>1</sup>, А. Н. Алешин<sup>1</sup>,

В. А. Мошников<sup>2</sup>, В. М. Кондратьев<sup>3, 4</sup>, А. И. Максимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия;

<sup>3</sup> Академический университет имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>4</sup> Московский физико-технический институт

(Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

✉ [strontiumx94@gmail.com](mailto:strontiumx94@gmail.com)

**Аннотация.** В работе исследованы свойства пленок  $\text{MaPbI}_3$ , изготовленных с применением осадителя либо без него. Образцы обладали планарной геометрией на основе керамических подложек со встречно-штыревыми золотыми электродами, а также на основе стеклянных подложек. Образцы облучали зеленым светом от светодиодного источника, а для измерения вольтамперных характеристик использовали специальную установку. Поликристаллические пленки продемонстрировали высокую фоточувствительность (увеличение тока примерно на 2 порядка при облучении). Ширина их оптической запрещенной зоны была одинаковой вне зависимости от использования осадителя, однако предельные напряжения заполнения ловушек оказались весьма чувствительными к такому использованию. По данным оптической микроскопии, для микроструктуры пленки характерно образование крупных дендритных структур, т. е. при ее изготовлении происходило зародышеобразование в толще раствора. Этот механизм может быть удобным для использования пленок  $\text{MaPbI}_3$  в фотодетекторах.

**Ключевые слова:** металлорганический перовскит, полупроводящий полимер, механизм транспорта, солнечный элемент

**Финансирование:** Исследование проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-42-10029; <https://rscf.ru/en/project/23-42-10029/>.

**Для цитирования:** Овезов М. К., Рябко А. А., Алешин А. Н., Мошников В. А., Кондратьев В. М., Максимов А. И. Вольтамперные характеристики перовскитных пленок  $\text{MaPbI}_3$ , сформированных одностадийным методом центрифугирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 4. С. 9–19. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16401>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16401>

## CURRENT – VOLTAGE CHARACTERISTICS OF $\text{MaPbI}_3$ PEROVSKITE FILMS FORMED BY THE SINGLE-STAGE SPIN-COAT METHOD

M. K. Ovezov <sup>1</sup> ✉, A. A. Ryabko <sup>1</sup>, A. N. Aleshin <sup>1</sup>,  
V. A. Moshnikov <sup>2</sup>, V. M. Kondratyev <sup>3, 4</sup>, A. I. Maximov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute of RAS, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia;

<sup>3</sup> Alferov University of RAS, St. Petersburg, Russia;

<sup>4</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),  
Moscow, Russia

✉ [strontiumx94@gmail.com](mailto:strontiumx94@gmail.com)

**Abstract.** In the paper, the properties of  $\text{MaPbI}_3$  films made with or without a precipitant have been investigated. The samples had a planar geometry based on ceramic substrates with interdigitated gold electrodes and also based on glass substrates. The samples were irradiated with green light from a LED source, and a special setup was used to measure current–voltage (I–V) characteristics. The polycrystalline films exhibited high sensitivity (an increase in current by about 2 orders upon irradiation). The width of their optical band gap was the same regardless of the use of the precipitant but the maximum trap–filling voltages turned out to be very sensitive to such use. According to optical microscopy, the film microstructure was characterized by a growth of large long dendritic structures, i. e., the nucleation occurred in the solution mass during the films' making. This growth mechanism may be convenient for the use of  $\text{MaPbI}_3$  films in photodetectors.

**Keywords:** organometallic perovskite, semiconducting polymer, transport mechanism, solar cell

**Funding:** The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 23-42-10029; <https://rscf.ru/en/project/23-42-10029/>).

**For citation:** Ovezov M. K., Ryabko A. A., Aleshin A. N., Moshnikov V. A., Kondratyev V. M., Maximov A. I., Current – voltage characteristics of  $\text{MaPbI}_3$  perovskite films formed by the single-stage spin-coat method, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (4) (2023) 9–19. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16401>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

### Введение

Металлоорганические перовскиты, такие как  $(\text{Fa})(\text{Ma})\text{MX}_3$ , где Fa – формамидиний  $\text{CH}(\text{NH}_2)_2$ , Ma – метиламмоний  $\text{CH}_3\text{NH}_3$ , металл M = Pb, галоген X = Br или I, в последние годы привлекают все большее внимание для применения в солнечных элементах (СЭ) и фотодетекторах, детекторах рентгеновского излучения, а также мемристорных структурах [1 – 3]. СЭ на основе металлоорганических перовскитов демонстрируют эффективность, сравнимую с кремниевыми солнечными элементами (25,8 %) [4]. Для использования в СЭ, помимо пленок металлоорганических перовскитов, применяются пленки неорганических перовскитов  $\text{CsPbX}_3$  [5]. При этом перовскитные пленки  $\text{CsPbX}_3$  формируют не только из раствора, но также из суспензий коллоидных квантовых точек, использование которых позволяет управлять спектром поглощения СЭ, регулируя размеры квантовых точек [6 – 8]. Стоит также отметить растущий интерес к бессвинцовым



перовскитным материалам, связанный, в первую очередь, с их низкой токсичностью [9]. Несмотря на то, что СЭ на основе бессвинцовых перовскитов демонстрируют меньшие значения КПД, по сравнению со свинцовыми (примерно на 6 %), показатели их стабильности вплотную приближаются к 2 тыс. часам работы в азотной атмосфере [10]. Наконец, перспективным направлением является создание tandemных структур на основе различных СЭ в сочетании с перовскитными фотовольтаическими элементами [11].

Среди перечисленных материалов со структурой перовскита для создания СЭ наиболее успешно применяется металлоорганический перовскит  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  (далее используется обозначение  $\text{MaPbI}_3$ ), который также широко используется для создания фотодетекторов и детекторов рентгеновского излучения. В последнее время для указанных детекторов применяют перовскит  $\text{MaPbI}_3$  в виде монокристалла, демонстрирующий плотность ловушечных состояний порядка  $10^{10} \text{ см}^{-3}$  и длину диффузии носителей заряда, превышающую 175 мкм [12, 13]. Хотя монокристаллический перовскит  $\text{MaPbI}_3$  также применим для создания фотовольтаических структур, сложность создания монокристалла большого диаметра делает его использование для СЭ экономически нецелесообразным. Для создания СЭ используют поликристаллические пленки, которые наносят из раствора такими методами, как распылением, струйной и трафаретной печатью, центрифугированием и другими [14].

Как правило, поликристаллические слои  $\text{MaPbI}_3$  наносят методом центрифугирования в две стадии, если растворы  $\text{PbI}_2$  и  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  наносят отдельно, либо за один прием, если наносится раствор  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Изготовители материалов отмечают, что двухстадийный метод позволяет получать более однородные пленки, но он более сложен технологически, тогда как пленки, изготовленные двумя разными методами, демонстрируют сравнимые показатели, причем некоторые (например, размер зерна) лучше у пленок, приготовленных одностадийным методом [15, 16].

Анализ имеющихся сведений позволил нам сделать выбор в пользу одностадийного метода. Часто при нанесении пленки используется осадитель, что позволяет добиться значительного повышения качества пленки [17 – 19]. В качестве осадителя можно использовать многие реагенты, но среди них выделяется этилацетат (EA), использование которого позволяет достичь достаточно высокого КПД фоточувствительного слоя (до 19,53 %). Кроме того, этот слой способен сохранять до 84,8 % изначальной эффективности при работе СЭ в условиях воздушной атмосферы в течение долгого времени (более 1900 ч) [20]. Отдельно стоит отметить сравнительно низкие стоимость и токсичность этилацетата, что значительно повышает его перспективность для коммерческого применения.

В данной работе исследовалось влияние технологии изготовления перовскитной пленки  $\text{MaPbI}_3$  на ее вольтамперные характеристики в планарных структурах, причем эта технология предусматривала внесение этилацетата в процессе одностадийной процедуры.

### Материалы и методы

Для приготовления образцов использовались порошки металлоорганических перовскитов  $\text{MaPbI}_3$ , приобретенные в корпорации «Сиань полимер лайт технолоджи корп.» (КНР). Пленки наносили методом центрифугирования из раствора диметилформамида и диметилсульфоксида (объемное соотношение 4:1) с массовой концентрацией  $\text{MaPbI}_3$  300 мг/мл с дальнейшим отжигом при температуре 110 °С в течение 10 мин. Скорость центрифугирования составляла 3000 об/мин (в течение 30 с) с предварительным центрифугированием на скорости 1000 об/мин (10 с). Образцы были получены двумя способами: с использованием этилацетата в качестве осадителя и без него. Введение осадителя осуществлялось на быстрой стадии центрифугирования.

Для измерения вольтамперных характеристик перовскитные пленки наносили на керамические подложки со встречно-штыревыми золотыми электродами (сенсорная платформа, “Tesla Vlatna” АО Чехия). Толщина электродов и расстояние между ними составляло 25 мкм (рис. 1).

Для исследования морфологии образцов методами оптической и растровой электронной микроскопии слои перовскитной пленки  $\text{MaPbI}_3$  наносили также на кремниевые подложки. Для определения ширины запрещенной зоны через обработку спектров оптического поглощения, такие слои наносились и на стеклянные подложки с покрытием ITO. Последнее представляет собой раствор, состоящий из индия (indium), кислорода (oxygen)

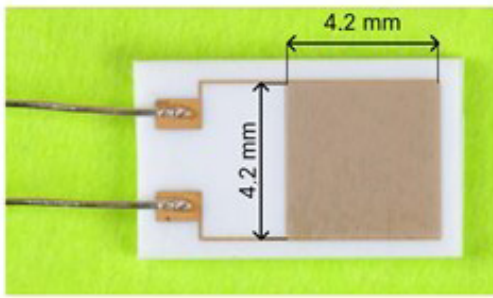


Рис. 1. Фотография керамической подложки с встречно-штыревыми электродами NiCr/Ni/Au (сенсорная платформа, “Tesla Blatna”). Размер области с этими электродами –  $4,2 \times 4,2$  мм

и олова (tin), т. е. оксида индия  $In_2O_3$  и оксида олова  $Sn_2O_3$ .

Вольтамперные характеристики (ВАХ) образцов были измерены на пикоамперметре Keithley 6487 (США) в условиях темноты и при облучении светодиодным источником с длиной волны 535 нм. Измерения спектров поглощения производились на спектрофотометре ПЭ-5400УФ (Россия). Микроструктура объектов исследовались с помощью поляризационного микроскопа ПОЛАМ-312 (Россия). Морфология покрытий исследовалась также с помощью растрового электронного микроскопа Zeiss Supra 25 (Германия).

### Результаты и их обсуждение

Полученные в работе образцы тонких поликристаллических пленок  $MaPbI_3$  демонстрировали характерный спектр оптического поглощения (кривая 1 на рис. 2,а). Оптическую ширину запрещенной зоны образцов определяли в координатах Тауца –  $(\alpha hv)^{1/r}$  от  $hv$  – путем экстраполяции линейного участка на ось абсцисс, где значение  $r$  выражает тип зависимости коэффициента поглощения полупроводника от длины волны облучения (большей края поглощения полупроводника). Поскольку  $MaPbI_3$  является прямозонным полупроводником, коэффициент поглощения описывается корневой зависимостью от длины волны ( $r = 1/2$ ).

Согласно полученным результатам, оптическая ширина запрещенной зоны  $E_g$  изготовленных пленок составила  $E_g \approx 1,58$  эВ, причем это значение не зависело от использования осадителя; оно является характерным для поликристаллических пленок  $MaPbI_3$ .

Результаты измерений ВАХ в темноте и при световом облучении показаны на рис. 3 и 4. Воздействие на образцы светового излучения зеленого цвета приводит к изменению тока приблизительно на два порядка, при этом использование осадителя не оказывает заметного влияния. Вольтамперные характеристики в темноте демонстрируют гистерезис, что связано с миграцией ионов (преимущественно это ионы  $I^-$ ), а также с режимом тока, ограниченного пространственным зарядом [20]. В то же время наблюдается влияние тех-

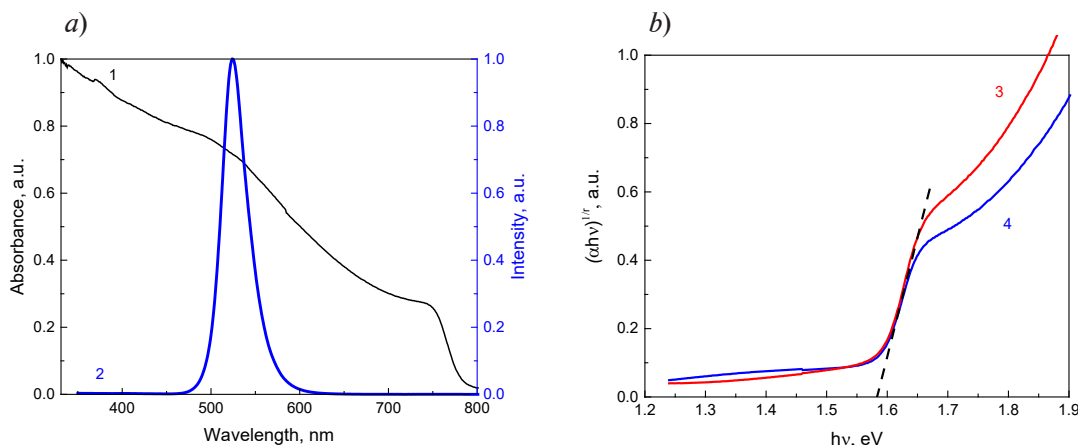


Рис. 2. Результаты исследования слоев  $MaPbI_3$  (кривая 1 на рис. 2,а и кривые 3, 4 на рис. 2,б), а также светодиода (кривая 2 на рис. 2,а):

1 – типичный спектр оптического поглощения; 3, 4 – спектры оптического поглощения в координатах Тауца для определения оптической ширины запрещенной зоны; представлены зависимости для образцов, приготовленных с применением осадителя (3) и без него (4); 2 – спектр электролюминесценции зеленого светодиода, использованный для регистрации фотоотклика образцов



нологии изготовления образцов: различаются значения предельного напряжения заполнения ловушек  $V_{TFL}$  для образцов, полученных с применением осадителя и без него.

Мы также обнаружили некоторое повышение величины  $V_{TFL}$  после светового облучения образцов (использован светодиод зеленого свечения), что указывает на увеличение концентрации ловушек во время экспозиции.

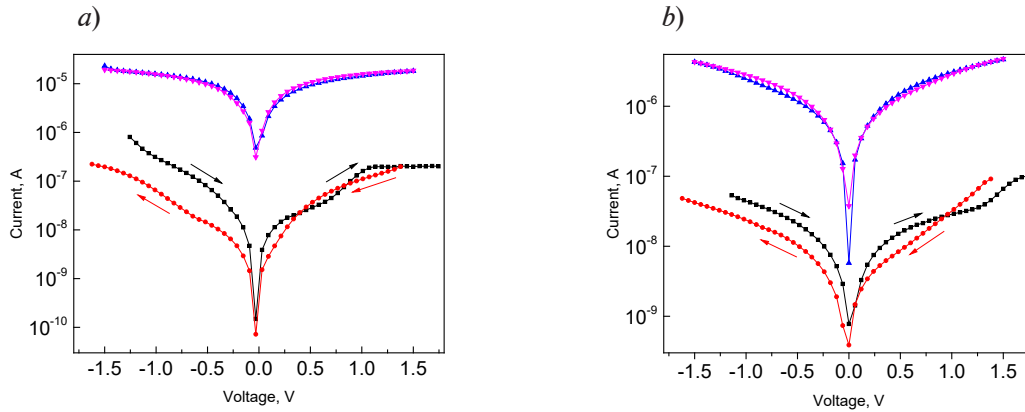


Рис. 3. ВАХ образцов, приготовленных без использования осадителя (a) и с его использованием (b) в условиях темноты (нижние кривые) и светового облучения зеленого цвета (верхние).

Стрелками показаны режимы изменения напряжения, приложенного к образцам

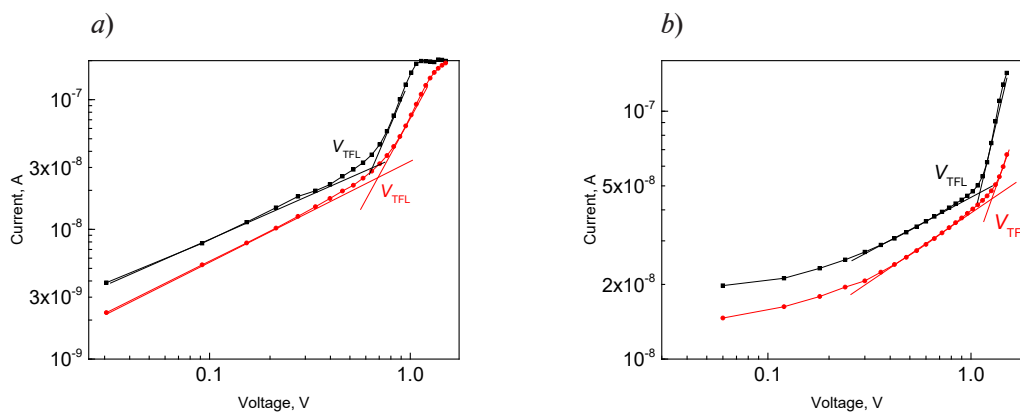


Рис. 4. Фрагменты ВАХ образцов, приготовленных без использования осадителя (a) и с его использованием (b) в условиях темноты, созданной до (кривые черного цвета) и после (красного цвета) светового облучения.

Наблюдается разница в значениях  $V_{TFL}$

В работе [20] отмечается, что подобное облучение может значительно ускорить или вызвать миграцию ионов и такая миграция наблюдается в широком температурном диапазоне. Сообщается также о снижении примерно в пять раз энергии активации миграции ионов (с 0,82 до 0,15 эВ при увеличении интенсивности светового излучения от 0 до 20 мВт/см<sup>2</sup>) [21].

Предельное напряжение заполнения ловушек  $V_{TFL}$  прямо пропорционально их концентрации:

$$V_{TFL} = \frac{eN_t L^2}{2\epsilon\epsilon_0}, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $N_t$  – концентрация ловушек,  $L$  – расстояние между электродами (25 мкм для нашего случая),  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала (для  $\text{MaPbI}_3$ ,  $\epsilon = 32$ ),  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная [18].

Отсюда концентрацию ловушек можно рассчитать по формуле

$$N_i = \frac{2\epsilon\epsilon_0 V_{\text{TFL}}}{eL^2}. \quad (2)$$

Для напряжения  $V_{\text{TFL}}$ , равного приблизительно 0,65 – 0,70 В для образца без осадителя и около 1,13 – 1,30 В для образца с осадителем, были получены значения  $N_i$ , равные ( $10^{14} \text{ см}^{-3}$ ): 3,68, 3,81, 6,09 и 7,01, соответственно.

Значения  $V_{\text{TFL}}$ , а значит и концентрации ловушек, оказались меньше для образца, полученного без осадителя, что не согласуется с литературными данными [16, 22].

Результаты растровой электронной микроскопии (рис. 5, *c, d*) показали, что использование осадителя (этилацетата) в данных условиях приводит к увеличению размеров кристаллитов пленки, по сравнению с пленкой без использования осадителя. Также в пленках наблюдаются поры, вызванные условиями испарения растворителя. Согласно данным оптической микроскопии (рис. 5, *a*) образца, полученного с осадителем, наблюдаются области подложки, не покрытые перовскитной пленкой, однако области, покрытые пленкой  $\text{MaPbI}_3$ , – однородны. В то же время для образца, полученного без использования осадителя, наблюдается не только гетерогенное зародышеобразование на интерфейсе с подложкой, но и рост крупных вытянутых ( $\sim 50 \text{ мкм}$ ) дендритных структур (рис. 5, *d*).

Очевидно, что при нагреве испарение растворителя из раствора  $\text{MaPbI}_3$  может приводить к увеличению концентрации растворенного вещества в приповерхностной области. Также градиент температуры от поверхности подложки к поверхности пленки приводит к снижению растворимости пленки  $\text{MaPbI}_3$  в приповерхностной области.

Таким образом, обеспечиваются условия нуклеации в приповерхностной области пленки раствора с последующим ростом дендритных структур. В то же время энергетически выгодна нуклеация на границе раздела фаз, которая обуславливает рост

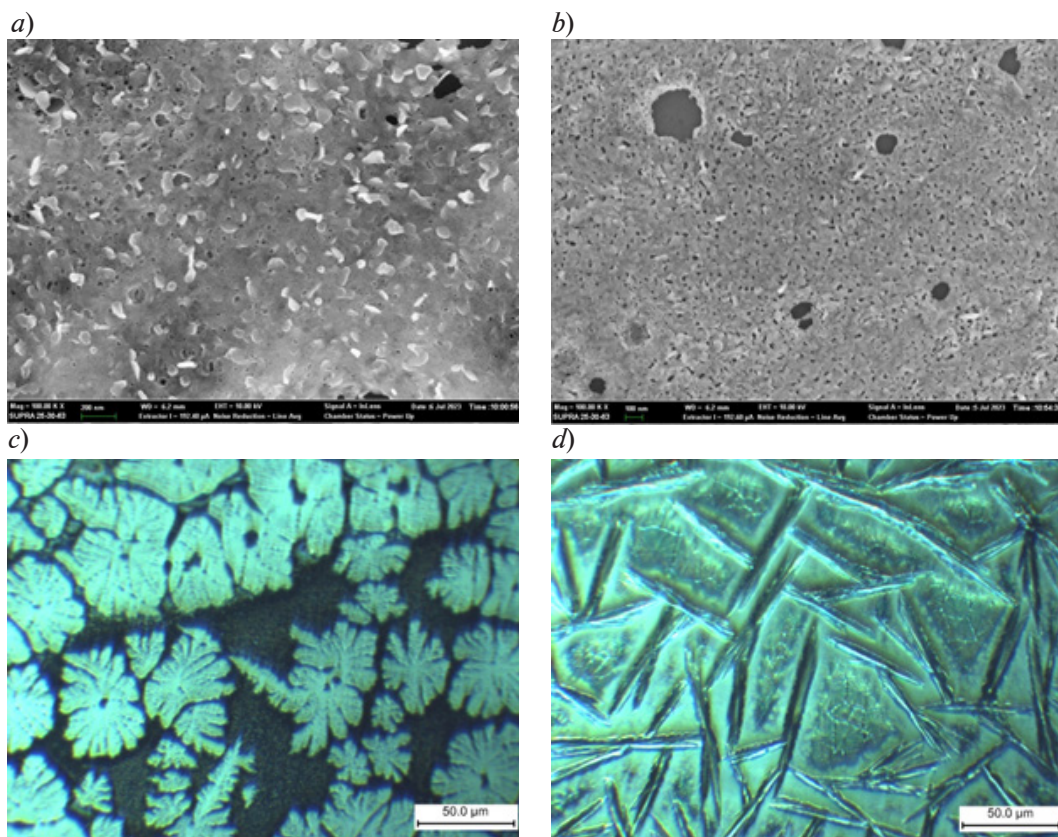


Рис. 5. Микрофотографии слоев  $\text{MaPbI}_3$  для образцов, приготовленных с использованием осадителя (*a, c*) и без него (*b, d*), полученные методами оптической (*a, b*) и растровой электронной (*c, d*) микроскопии



поликристаллической пленки непосредственно на поверхности подложки (рис. 5, *b*). Следовательно, осадитель приводит к увеличению размеров кристаллитов пленки, сформированных на границе раздела фаз, однако условия роста пленки без использования осадителя приводят к росту вытянутых структур  $\text{MAPbI}_3$  большего масштаба.

Хотя условия формирования пленок при использовании полированной поверхности кремниевых подложек и керамических подложек различны ввиду различной концентрации позиций нуклеации на поверхности подложки и гидрофобности, мы предполагаем, что особенности формирования пленок должны быть аналогичны. Таким образом, пленка, состоящая из вытянутых структур, имеет меньшую концентрацию границ зерен, что приводит к снижению концентрации ловушек и напряжения  $V_{\text{TFL}}$ . Хотя такой механизм роста негативным образом сказывается на использовании поликристаллической пленки в фотовольтаических структурах, он может оказаться удобным для использования пленок  $\text{MAPbI}_3$  в фотодетекторах. В то же время использование осадителя предпочтительно с точки зрения морфологии такой пленки для создания фотовольтаических структур.

### Выводы

Изготовленные для исследования пленки металлоорганического перовскита  $\text{MAPbI}_3$  демонстрируют высокий отклик на световое облучение в видимой области спектра (на излучение зеленого цвета светодиодом), а также на характерный режим тока, ограниченного пространственными зарядами. Темновые вольтамперные характеристики (ВАХ) демонстрируют гистерезис, обусловленный миграцией ионов.

Было обнаружено, что пленки  $\text{MAPbI}_3$ , приготовленные по описанной методике без использования осадителя, содержат крупные дендритные структуры, обеспечивающие снижение предельного напряжения заполнения ловушек. Мы предполагаем, что такая морфология пленок может способствовать их успешному использованию в качестве фотодетекторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sakhatskyi K., Türedi B., Matt G. J., et al. Stable perovskite single-crystal X-ray imaging detectors with single-photon sensitivity // *Natural Photonics*. 2023. Vol. 17. June. Pp. 510–517.
2. Wang H., Sun Y., Chen J., Wang F., Han R., Zhang C., Kong J., Li L., Yang J. A. Review of perovskite-based photodetectors and their applications // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. No. 24. P. 4390.
3. Nenashev G. V., Aleshin A. N., Shcherbakov I. P., Petrov V. N. Effect of temperature variations on the behavior of a two-terminal organic-inorganic halide perovskite rewritable memristor for neuromorphic operations // *Solid State Communications*. 2022. Vol. 348–349. 1 June. P. 114768.
4. Roy P., Ghosh A., Barclay F., Khare A., Cuce E. Perovskite solar cells: A review of the recent advances // *Coatings*. 2022. Vol. 12. No. 8. P. 1089.
5. Wang J., Zhang J., Zhou Y., Liu H., Xue Q., Li X., Jen A. K. Highly efficient all-inorganic perovskite solar cells with suppressed non-radiative recombination by a Lewis base // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. January. P. 177.
6. Sadhu A. S., Huang Y.-M., Chen L.-Y., Kuo H.-C., Lin C.-C. Recent advances in colloidal quantum dots or perovskite quantum dots as a luminescent downshifting layer embedded on solar cells // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. No. 6. P. 985.
7. Srivastava A. K., Zhang W., Schneider J., Halpert J. E., Rogach A. L. Luminescent down-conversion semiconductor quantum dots and aligned quantum rods for liquid crystal displays // *Advanced Science*. 2019. Vol. 6. No. 22. P. 1901345.
8. Александрова О. А., Галиева Д. М., Дробинцева А. О. и др. Наночастицы, наносистемы и их применение. Ч. 1. Коллоидные квантовые точки. Под ред. В. А. Мошникова, О. А. Александровой. Уфа: Аэтерна, 2015. 236 с.
9. Shi Z. J., Guo J., Chen Y. H., Li Q., Pan Y. F., Zhang H. J., Xia Y. D., Huang W. Lead-free organic-inorganic hybrid perovskites for photovoltaic applications: Recent advances and perspectives // *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29. No. 16. 3 February. P. 1605005.

10. Gao W., Ran C., Li J., Dong H., Jiao B., Zhang L., Lan X., Hou X., Wu Z. Robust stability of efficient lead-free formamidinium tin iodide perovskite solar cells realized by structural regulation // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2018. Vol. 9. No. 24. Pp. 6999–7006.
11. Li H., Zhang W. Perovskite tandem solar cells: From fundamentals to commercial deployment // *Chemical Reviews*. 2020. Vol. 120. No. 18. Pp. 9835–9950.
12. Rong Sh.-Sh., Faheem M. B., Li Y.-B. Perovskite single crystals: Synthesis, properties, and applications // *Journal of Electronic Science and Technology*. 2021. Vol. 19. No. 2. P. 100081.
13. Lian Zh., Yan Q., Gao T., Ding J., Lv Q., Ning Ch., Li Q., Sun J.-L. Perovskite  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(\text{Cl})$  single crystals: Rapid solution growth, unparalleled crystalline quality, and low trap density toward  $10^8 \text{ cm}^{-3}$  // *Journal of the American Chemical Society*. 2016. Vol. 138. No. 30. Pp. 9409–9412.
14. Zhang Y., Zhang H., Zhang X., Wei L., Zhang B., Sun Y., Hai G., Li Y. Major impediment to highly efficient, stable and low-cost perovskite solar cells // *Metals*. 2018. Vol. 8. No. 11. P. 964.
15. Xiao M., Huang F., Huang W., Dkhissi Y., Zhu Y., Etheridge J., Gray-Weale A., Bach U., Cheng Y., Spiccia L. A fast deposition-crystallization procedure for highly efficient lead iodide perovskite thin-film solar cells // *Angewandte Chemie International Edition*. 2014. Vol. 53. No. 37. Pp. 9898–9903.
16. Ahmed D. S., Mohammed B. K., Mohammed M. K. A. Long-term stable and hysteresis-free planar perovskite solar cells using green antisolvent strategy // *Journal of Materials Science*. 2021. Vol. 56. No. 27. Pp. 15205–15214.
17. Shaikh J. S., Shaikh N. S., Sheikh A. D., Mali S. S., Kale A. J., Kanjanaboos P., Hong C. K., Kim J. H., Patil P. S. Perovskite solar cells: In pursuit of efficiency and stability // *Materials & Design*. 2017. Vol. 136. 15 December. Pp. 54–80.
18. Li D., Shi J., Xu Y., Luo Y., Wu H., Meng Q. Inorganic-organic halide perovskites for new photovoltaic technology // *National Science Review*. 2018. Vol. 5. No. 4. Pp. 559–576.
19. Zhang W., Li Y., Liu X., Tang D., Li X., Yuan X. Ethyl acetate green antisolvent process for high-performance planar low-temperature  $\text{SnO}_2$ -based perovskite solar cells made in ambient air // *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 379. 1 January. P. 122298.
20. Zhang P., Gu N., Song L., Chen X., Du P., Zha L., Chen W.-Hs., Xiong J. The disappearing additive: introducing volatile ethyl acetate into a perovskite precursor for fabricating high efficiency stable devices in open air // *Nanoscale*. 2022. Vol. 14. No. 13. Pp. 5204–5213.
21. Khan R., Ighodalo K. O., Xiao Z. Ion migration in metal halide perovskites solar cells, soft-matter thin film solar cells: Physical processes and device simulation. Melville, New York: AIP Publishing LLC, 2020. Pp. 1–283.
22. Zhao Y.-C., Zhou W.-K., Zhou X., Liu K.-H., Yu D.-P., Zhao K. Quantification of light-enhanced ionic transport in lead iodide perovskite thin films and its solar cell applications // *Light: Science & Applications*. 2017. Vol. 6. No. 5. 5 May. P. e16243.

## REFERENCES

1. Sakhatskyi K., Türedi B., Matt G. J., et al., Stable perovskite single-crystal X-ray imaging detectors with single-photon sensitivity, *Nat. Photon.* 17 (June) (2023) 510–517.
2. Wang H., Sun Y., Chen J., et al., Review of perovskite-based photodetectors and their applications, *Nanomater.* 12 (24) (2022) 4390.
3. Nenashv G. V., Aleshin A. N., Shcherbakov I. P., Petrov V. N., Effect of temperature variations on the behavior of a two-terminal organic-inorganic halide perovskite rewritable memristor for neuromorphic operations, *Solid State Commun.* 348–349 (1 June) (2022) 114768.
4. Roy P., Ghosh A., Barclay F., et al., Perovskite solar cells: A review of the recent advances, *Coat.* 12 (8) (2022) 1089.
5. Wang J., Zhang J., Zhou Y., et al., Highly efficient all-inorganic perovskite solar cells with suppressed non-radiative recombination by a Lewis base, *Nat. Commun.* 11 (Jan) (2020) 177.
6. Sadhu A. S., Huang Y.-M., Chen L.-Y., et al., Recent advances in colloidal quantum dots or perovskite quantum dots as a luminescent downshifting layer embedded on solar cells, *Nanomater.* 12 (6) (2022) 985.
7. Srivastava A. K., Zhang W., Schneider J., et al., Luminescent down-conversion semiconductor quantum dots and aligned quantum rods for liquid crystal displays, *Adv. Sci.* 6 (22) (2019) 1901345.



8. Aleksandrova O. A., Galieva D. M., Drobinceva A. O., et al., Nanochastitsy, nanosistemy i ikh primeneniye. Ch.1. Kolloidnyye kvantovyye tochki [Nanoparticles, nano systems and their application. Part 1. Colloidal quantum dots], Aeterna Publishing, Ufa, 2015 (in Russian).
9. Shi Z. J., Guo J., Chen Y. H., et al., Lead-free organic-inorganic hybrid perovskites for photovoltaic applications: Recent advances and perspectives, Adv. Mater. 29 (16, 3 Febr.) (2017) 1605005.
10. Gao W., Ran C., Li J., et al., Robust stability of efficient lead-free formamidinium tin iodide perovskite solar cells realized by structural regulation, J. Phys. Chem. Lett. 9 (24) (2018) 6999–7006.
11. Li H., Zhang W., Perovskite tandem solar cells: From fundamentals to commercial deployment, Chem. Rev. 120 (18) (2020) 9835–9950.
12. Rong Sh.-Sh., Faheem M. B., Li Y.-B., Perovskite single crystals: Synthesis, properties, and applications, J. Electron. Sci. Technol. 19 (2) (2021) 100081.
13. Lian Zh., Yan Q., Gao T., et al., Perovskite  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3(\text{Cl})$  single crystals: Rapid solution growth, unparalleled crystalline quality, and low trap density toward  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ , J. Am. Chem. Soc. 138 (30) (2016) 9409–9412.
14. Zhang Y., Zhang H., Zhang X., et al., Major impediment to highly efficient, stable and low-cost perovskite solar cells, Metals. 8 (11) (2018) 964.
15. Xiao M., Huang F., Huang W., et al., A fast deposition-crystallization procedure for highly efficient lead iodide perovskite thin-film solar cells, Angew. Chem. Int. Edit. 53 (37) (2014) 9898–9903.
16. Ahmed D. S., Mohammed B. K., Mohammed M. K. A., Long-term stable and hysteresis-free planar perovskite solar cells using green antisolvent strategy, J. Mater. Sci. 56 (27) (2021) 15205–15214.
17. Shaikh J. S., Shaikh N. S., Sheikh A. D., et al., Perovskite solar cells: In pursuit of efficiency and stability, Mater. Design. 136 (15 Dec) (2017) 54–80.
18. Li D., Shi J., Xu Y., et al., Inorganic-organic halide perovskites for new photovoltaic technology, Natl. Sci. Rev. 5 (4) (2018) 559–576.
19. Zhang W., Li Y., Liu X., et al., Ethyl acetate green antisolvent process for high-performance planar low-temperature  $\text{SnO}_2$ -based perovskite solar cells made in ambient air, Chem. Eng. J. 379 (1 Jan) (2020) 122298.
20. Zhang P., Gu N., Song L., et al., The disappearing additive: introducing volatile ethyl acetate into a perovskite precursor for fabricating high efficiency stable devices in open air, Nanoscale. 14 (13) (2020) 5204–5213.
21. Khan R., Ighodalo K. O., Xiao Z., Ion migration in metal halide perovskites solar cells, soft-matter thin film solar cells: Physical processes and device simulation, AIP Publishing LLC, Melville, New York (2020) 1–283.
22. Zhao Y.-C., Zhou W.-K., Zhou X., et al., Quantification of light-enhanced ionic transport in lead iodide perovskite thin films and its solar cell applications, Light Sci. Appl. 6 (5, 5 May) (2017) e16243.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ОВЕЗОВ Максат Кемалович** – младший научный сотрудник лаборатории неравновесных процессов в полупроводниках Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

strontiumx94@gmail.com

ORCID: 0009-0009-6273-1478

**РЯБКО Андрей Андреевич** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории неравновесных процессов в полупроводниках Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

a.a.ryabko93@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9626-7612

**АЛЕШИН Андрей Николаевич** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией неравновесных процессов в полупроводниках Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

aleshin.transport@mail.ioffe.ru

ORCID: 0000-0001-5449-4446

**МОШНИКОВ Вячеслав Алексеевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.

197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

vamoshnirov@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6500-5492

**КОНДРАТЬЕВ Валерий Михайлович** – аспирант Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург; младший научный сотрудник Московского физико-технического института (Национального исследовательского университета), г. Москва, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8/3

kvm\_96@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3469-5897

**МАКСИМОВ Александр Иванович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.

197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

aimaximov@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0195-8870

## THE AUTHORS

### **OVEZOV Maksat K.**

*Ioffe Institute, RAS*

26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia

strontiumx94@gmail.com

ORCID: 0009-0009-6273-1478

### **RYABKO Andrey A.**

*Ioffe Institute, RAS*

26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia

a.a.ryabko93@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9626-7612

### **ALESHIN Andrey N.**

*Ioffe Institute, RAS*

26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia

aleshin.transport@mail.ioffe.ru

ORCID: 0000-0001-5449-4446

### **MOSHNIKOV Vyacheslav A.**

*St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"*

5 Professor Popov St., St. Petersburg, 197376, Russia

vamoshnirov@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6500-5492

**KONDRATYEV Valeriy M.**

*Alferov University, RAS*

*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*

8/3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia

kvm\_96@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3469-5897

**MAXIMOV Alexander I.**

*St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"*

5 Professor Popov St., St. Petersburg, 197376, Russia

aimaximov@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0195-8870

*Статья поступила в редакцию 14.09.2023. Одобрена после рецензирования 20.10.2023.  
Принята 20.10.2023.*

*Received 14.09.2023. Approved after reviewing 20.10.2023. Accepted 20.10.2023.*