

# Методы изготовления перовскитных солнечных элементов

А.О. Гаджей, С.В. Козлов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** в работе рассматриваются ключевые аспекты изготовления перовскитных солнечных элементов, их сильные и слабые стороны в сравнении с другими типами фотоэлектрических устройств. Анализируются различные подходы к повышению долговременной стабильности таких элементов.

**Ключевые слова:** перовскит, солнечный элемент, деградационная устойчивость, межслойный дизайн

## 1. Введение

Изменение климата стимулирует активный поиск возобновляемых источников энергии. Солнечная энергия в этом контексте является широкодоступной и способствует удовлетворению потребности в чистой и недорогой электроэнергии [1].

Солнечные элементы на основе перовскитоподобных материалов в настоящее время демонстрируют высокий коэффициент полезного действия (свыше 22%) и рассматриваются как перспективная альтернатива традиционным фотоэлементам. Они отличаются невысокой себестоимостью производства, а также такими свойствами, как полупрозрачность, малый вес и гибкость.

## 2. Устройство перовскитных солнечных элементов

Преобразование энергии электромагнитного излучения в электрический ток в таких устройствах происходит за счёт использования активного слоя из органических и неорганических перовскитоподобных соединений [2, 3]. Эффективное поглощение фотонов с энергией, превышающей ширину запрещённой зоны, ведёт к генерации носителей заряда. Под действием внутреннего электрического поля (обратного смещения) носители перемещаются в соответствующие транспортные слои [4,5] и затем регистрируются во внешней цепи. Типовая архитектура и послойное строение перовскитного солнечного элемента показаны на рис. 1.

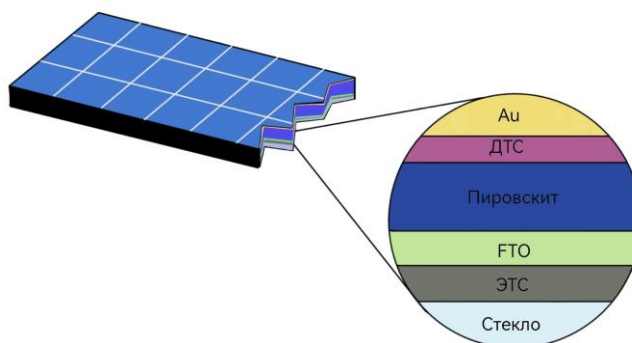


Рисунок 1. Типовая архитектура устройства перовскитных солнечных элементов

## 3. Методы повышения стабильности солнечного элемента

Большим недостатком перовскитных солнечных элементов является их низкая долговременная стабильность. Все причины деградации перовскитных солнечных

элементов принято разделять на две основные категории. К внешним факторам относят воздействия окружающей среды, такие как влажность, ультрафиолетовое излучение, температурные колебания и кислород. К внутренним причинам относятся точечные дефекты кристаллической решётки самого перовскита, включая атомные вакансии, атомы в междоузлиях и антиструктурные дефекты.

Особую проблему представляют вакансии, которые возникают при формировании перовскитной плёнки: они способствуют миграции ионов через активный слой, что приводит к нестабильной работе устройства и постепенному ухудшению его характеристик. Для улучшения фотоэлектрических параметров и повышения стабильности перовскитных солнечных элементов на основе  $\text{MAPbI}_3$  и  $\text{CsPbI}_3$ , в работе рассматривается применение различных пассивирующих добавок [6,7]. Такие добавки позволяют устранить или связать дефекты кристаллической структуры, а также уменьшить потери на безызлучательную рекомбинацию носителей заряда.

Была исследована возможность повышения проводимости и адгезионных свойств PEDOT:PSS путем допирования аминами. При этом необходимо сохранение оптического пропускания. Использовались методы объемного допирования (введение в раствор) и поверхностная обработка готовых пленок PEDOT:PSS рядом аминов (пентамин, октоамин, диэтиламин, бензоамин), в том числе в комбинации с 0,1% оксида графена. Проводимость оценивалась по удельному сопротивлению; оптические свойства – по пропусканию. Наиболее эффективным оказалось добавление 1–7 промилле аминов, что снижает сопротивление пленок до 50% за счет нейтрализации сульфогрупп PSS. Наибольший эффект достигается при использовании бензоамина в режиме поверхностной обработки с последующим отжигом. Пропускание пленок при этом практически не изменяется.

Помимо химической пассивации, перспективным направлением замедления деградации является развитие новых подходов к изготовлению активного слоя.

Наибольший интерес представляет органический перовскит  $\text{MAPbI}_3$ , благодаря более широкой запрещенной зоне, расширенному спектру поглощения и повышенной устойчивости к влаге по сравнению с неорганическими аналогами  $\text{CsPbX}_3$ . Он является перспективным материалом для солнечных элементов, работающих в воздушной атмосфере. Было рассмотрено влияние температуры отжига (80–150 °C) на морфологию, структуру и оптические свойства пленок  $\text{MAPbI}_3$ , синтезированных методом одноступенчатого центрифугирования из раствора MAI и  $\text{PbI}_2$  в атмосфере азота. Методом рентгенофазового анализа подтверждено формирование перовскитной фазы. Оптическая микроскопия показала, что при температурах отжига 100–110 °C формируется равномерная зернистая структура с высокой однородностью, обеспечивающая оптимальные фотоэлектрические характеристики. Повышение температуры до 120–140 °C приводит к образованию игольчатых кристаллов с увеличением площади границ раздела и ростом дефектов, что снижает подвижность зарядов, а при 150 °C наблюдается резкое уменьшение размеров кристаллов из-за высокой подвижности атомов. Таким образом, оптимальным температурным режимом для формирования высококачественных пленок  $\text{MAPbI}_3$  с однородной морфологией и минимальной дефектностью является диапазон 100–110 °C.

#### 4. Заключение

Анализ актуальных методов изготовления и повышения стабильности перовскитных солнечных элементов показал, что главным препятствием для их коммерциализации остается низкая деградационная устойчивость. Она обусловлена как внешними факторами среды, так и внутренними дефектами кристаллической решетки, в частности вакансиями, вызывающими нежелательную миграцию ионов.

Одним из эффективных способов повышения стабильности является химическая

пассивация дефектов. Перспективным подходом также служит модификация транспортных слоев: объемное допирование аминами или поверхностная обработка пленок PEDOT:PSS (особенно с использованием бензоамина). Она позволяет существенно улучшить их проводимость и адгезионные свойства без ухудшения оптического пропускания.

Для активного слоя на основе органического перовскита MAPbI<sub>3</sub> выявлен оптимальный температурный режим отжига (100–110 °С). Данный диапазон способствует формированию равномерной зернистой структуры с минимальным количеством дефектов и высокими фотоэлектрическими характеристиками. Режимы с повышенной температурой ведут к неконтролируемому росту игольчатых кристаллов и снижению подвижности носителей заряда.

#### Список литературы

1. Наноархитектоника и новые материалы: от электроники до медицины / Е.Н. Муратова, В.А. Мошников // Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение» YOUNG ISC, 2024. С.20–21
2. Research and optimization of crystallization processes of solutions of hybrid halide perovskites of the CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> composition / E.N. Muratova, V.A. Moshnikov, A.N. Aleshin, et.al. // *Glass Physics and Chemistry*, 2023. Т. 49. – № 6. С. 672–679
3. Improving the Conductivity of the PEDOT:PSS Layers in Photovoltaic Cells Based on Organometallic Halide Perovskites / Y. Spivak, E. Muratova, V. Moshnikov, et.al. // *Materials*, 2022. 15 (3). – P. 990.
4. Получение и свойства наноразмерной пленки диоксида титана для транспортного слоя n-типа фотовольтаической ячейки / Гагарина А.Ю., Безверхний В.П., Муратова Е.Н., и др. // *Физика и техника полупроводников*, 2024. Т. 58. – № 11. – С. 591–593
5. Moshnikov, V.A.; Muratova, E.N.; Vrublevsky, I.A.; Maximov, A.I.; Bessonov, V.B.; Parfenovich, S.E.; Tuchkovsky, A.K.; Kozodaev, D.A. Charge Carrier Transport and Localized States in Graphite-like Amorphous Carbon Films at Room Temperatures. *Materials* 2025, 18, 3977. <https://doi.org/10.3390/ma18173977>
6. Carbon quantum dots: organic–inorganic perovskite composites for optoelectronic applications / G.V. Nenashev, R.S. Kryukov, M.S. Istomina et.al. // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023. Т. 34. – № 31. – С. 2114.
7. Effect of barium doping on the behavior of conductivity and impedance of organic-inorganic perovskite films / G.V. Nenashev, A.N. Aleshin, A.A. Ryabko, et.al. // *Solid State Communications*, 2024. Vol. 388. – P.115554
8. AFM for monitoring interphase interfaces of solar cells / E. Muratova, D. Kozodaev, V. Moshnikov, et.al. // *European Materials Research Society. B. Advancing sustainable organic photovoltaics: from experiments and materials to applications and device models*, 2024. P. 00370
9. Moshnikov, V.A.; Muratova, E.N.; Vrublevsky, I.A.; Bessonov, V.B.; Parfenovich, S.E.; Maximov, A.I.; Gagarina A.Yu.; Kovalenko D.A.; Kozodaev, D.A. Influence of Temperature on Electron Transport, Current-Voltage Characteristics, and Capacitive Properties of MIM Nanostructures with Amorphous Niobium Pentoxide // *Applied Nano*. 2026 7(1), 8. <https://doi.org/10.3390/applnano7010008>
10. Muratova E.N., Ryabko A.A., Moshnikov V.A., Vrublevsky I.A., Maximov A.I., Tuchkovsky A.K. Electron transport, charge transfer and localized states of charge carriers in nanosized anodic TiO<sub>2</sub> films // *Nanomanufacturing* 2026, 6, 6. <https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing6010006>
11. Spivak, Y.; Muratova, E.; Moshnikov, V.; Tuchkovsky, A.; Vrublevsky, I.; Lushpa, N. Improving the Conductivity of the PEDOT:PSS Layers in Photovoltaic Cells Based on Organometallic Halide Perovskites // *Materials*, 2022, 15 (3), P. 990. <https://doi.org/10.3390/ma15030990>
12. Александрова О.А., Бобков А.А., Максимов А.И., и др. Наноструктурные оксидные материалы в современной микро-, нано- и оптоэлектронике / под ред. В. А. Мошникова, О.А. Александровой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 266 с.