

07

## Фотоэлектрические параметры фотоприемников на основе тонких микрокристаллических пленок перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

© Д.В. Амасев<sup>1</sup>, К.А. Савин<sup>2,3,¶</sup>, С.Н. Николаев<sup>3</sup><sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия<sup>3</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

¶ E-mail: savinkonstantin93@gmail.com

Поступило в Редакцию 27 марта 2020 г.

В окончательной редакции 3 апреля 2020 г.

Принято к публикации 3 апреля 2020 г.

Исследованы фотоэлектрические характеристики фотодетекторов типа фотосопротивления на основе микрокристаллических пленок металлоорганического перовскита  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  с золотыми и алюминиевыми контактами. Максимальная величина фоточувствительности фотодетекторов составила 30 А/Вт. Времена нарастания и спада фотопроводимости составляли от 2.6 до 25.5  $\mu\text{s}$ .

**Ключевые слова:** фотодетекторы, металлоорганические перовскиты, фоточувствительность, фотопроводимость.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.13.49588.18316

Металлоорганические перовскиты на основе  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  (или  $\text{MAPbI}_3$ ) являются перспективными материалами для солнечных батарей, фотодетекторов, транзисторов и лазеров. Большой интерес к данному материалу вызван выдающимися свойствами материала, такими как ширина запрещенной зоны, оптимальная для создания солнечных элементов (1.6 eV), высокая подвижность и время жизни носителей заряда, которые являются ключевыми характеристиками для оптоэлектронных устройств. В частности, можно встретить большое количество работ, посвященных исследованию параметров фотодетекторов на основе как монокристаллического, так и микрокристаллического перовскита  $\text{MAPbI}_3$  [1]. На данный момент для времен нарастания и спада фотопроводимости достигнуты значения от 10 ms до 100 ns, а величина спектральной фоточувствительности достигает нескольких сотен А/Вт. Однако при создании таких фотодетекторов используются высокотехнологичные установки, сложные структуры самого фотодетектора, а также высокие напряженности электрического поля и интенсивности падающего света.

Несмотря на большое число научных работ, в том числе обзорных [1–4], посвященных параметрам фотодетекторов на основе перовскита, попытки создания прибора, который был бы доступным и сравнительно простым в изготовлении, остаются актуальными. Поэтому в настоящей работе проведены исследования фотоэлектрических свойств прибора фоторезистивного типа на основе перовскита, полученного наиболее простым и доступным способом.

Тонкие пленки перовскита  $\text{MAPbI}_3$  были приготовлены одноступенчатым методом из  $\text{MAI}$  и  $\text{PbI}_2$  [5]. Образованные пленки перовскита имели толщину  $\sim 350$  nm,

обладали микрокристаллической структурой. Поверх полученных пленок перовскита методом термического осаждения были напылены контакты в планарной встречно-штыревой конфигурации. Для фотоприемника № 1 (ФП1) в качестве материала контактов использовалось золото, а для фотоприемника № 2 (ФП2) — алюминий (из соображений доступности материала). Расстояние между контактами для ФП1 и ФП2 составляло соответственно 130 и 280  $\mu\text{m}$ , а длина контактов — 8.55 и 19 mm. Таким образом, площадь чувствительной области ФП1 составила  $1.11 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>, а ФП2 —  $5.32 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>. Поверхность изготовленных фотодетекторов не была инкапсулирована.

Вольт-амперная характеристика ФП1 исследовалась при электрических полях до 300 V/cm и во всем исследуемом диапазоне была линейной. Использование алюминия в качестве контактов для фотодетектора на основе перовскита приводит к образованию диода Шоттки и, как следствие, к нелинейности вольт-амперной характеристики.

Одной из ключевых характеристик любого фотодетектора является спектральная зависимость токовой фоточувствительности  $S_I$ . Данный параметр определяется соотношением

$$S_I = \frac{I_{ph} - I_d}{PS},$$

где  $I_{ph}$  — ток через прибор при освещении,  $I_d$  — ток в темноте,  $P$  — плотность мощности падающего освещения,  $S$  — площадь чувствительной области фотодетектора.

Для ФП1 и ФП2 были получены спектральные зависимости фоточувствительности при напряженности электрического поля  $\sim 75$  V/cm (рис. 1). В качестве источника освещения использовалась галогенная лампа накаливания. Для обоих фотодетекторов можно видеть

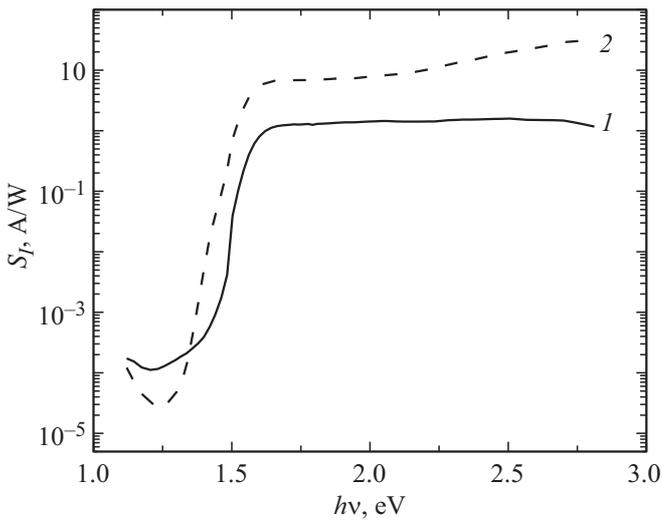


Рис. 1. Спектры токовой фоточувствительности ФП1 (1) и ФП2 (2).

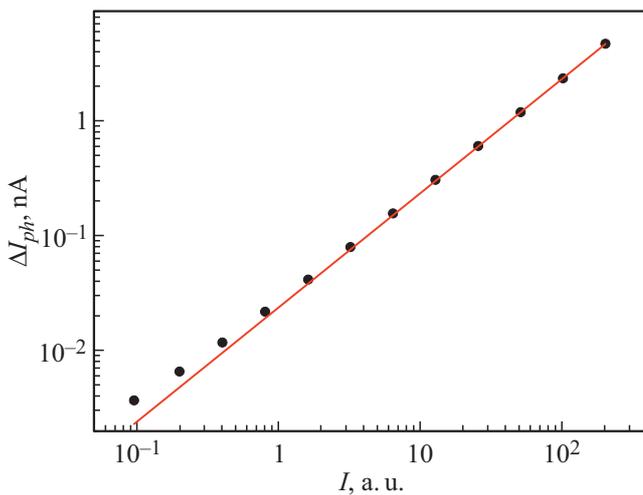


Рис. 2. Люкс-амперная характеристика ФП1.

резкое увеличение фоточувствительности вблизи края поглощения перовскита (1.6 eV). При этом  $S_I$  для ФП1 достигла величины 1.58 A/W, а для ФП2 — порядка 30 A/W. Полученные значения сравнимы с литературными данными [6,7]. Однако следует отметить, что в нашем случае использовалась тонкая пленка перовскита, обладающая микрокристаллической структурой, полученная достаточно простым одноступенчатым методом. Поэтому величина фоточувствительности ниже, чем в работе [7], в которой исследования проводились на монокристалле перовскита. Кроме того, в данной работе величина напряженности электрического поля была в 5–10 раз выше, чем в нашем случае (из-за геометрии контактов). Также для ФП1 (кривая 1) было обнаружено, что атмосфера воздуха не влияет на проводимость, несмотря на результаты измерений в работе [8].

Помимо спектральной зависимости фоточувствительности для ФП1 была получена люкс-амперная характеристика (ЛАХ) (рис. 2). Фотодетектор освещался фотонами с энергией 1.8 eV (межзонное поглощение). В зависимости от интенсивности падающего света изменялся фототок  $\Delta I_{ph}$ , протекающий через фотодетектор. Данная зависимость была аппроксимирована в программе Origin 9 степенной функцией, для которой справедливо

$$\Delta I_{ph} \sim I^\gamma,$$

где  $I$  — интенсивность падающего света,  $\gamma$  — показатель степени. В результате аппроксимации степенной функцией показатель  $\gamma$  равен единице, что означает линейную ЛАХ. Линейность характеристики указывает на то, что в данном материале преобладает мономолекулярный тип рекомбинации носителей заряда. Линейная ЛАХ является достоинством работы такого фотоприемника.

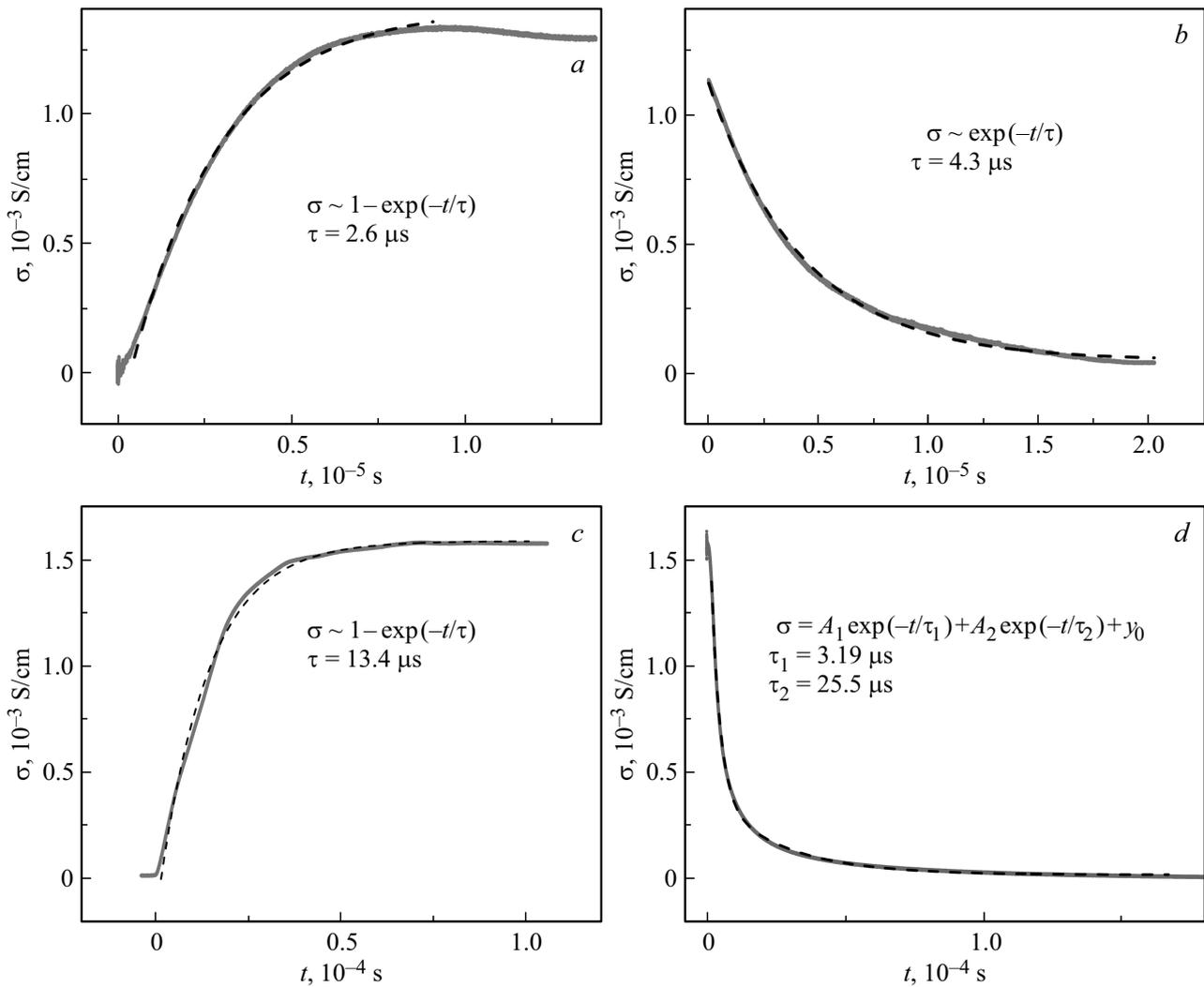
Другими важными характеристиками фотодетектора являются времена нарастания и спада фотопроводимости. Данные параметры для ФП1 и ФП2 (рис. 3) были получены при помощи осциллографа LeCroy waveRunner 62Xi-A, на который подавался сигнал с резистора, включенного в цепь с освещаемым светом фотодетектором. При этом в качестве источника освещения использовался импульсный лазер мощностью 20 mW с излучением на длине волны 650 nm. Длительность импульса составляла 0.5 ms, а частота повторений 1 kHz.

Из таблицы можно видеть, что времена нарастания и спада фотопроводимости ФП1 существенно меньше, чем для ФП2. Также данные значения находятся на уровне величин, представленных в работе [9], где структура прибора была более сложной, а также в работе [10], в которой проводимость осуществлялась в сэндвич-конфигурации контактов, а не в планарной. Можно предположить, что различие во временах нарастания и спада может быть вызвано как геометрией контактов (расстояние между контактами в случае алюминиевых контактов в 2 раза больше), так и материалом контакта: энергетический уровень Ферми золота ближе к валентной зоне перовскита, чем энергетический уровень Ферми алюминия, что делает золото более перспективным материалом для контактов, чем алюминий. В то же время использование алюминия экономически выгоднее, поэтому фотоприемники на основе перовскита с алюминиевыми контактами также могут найти применение в тех случаях, когда быстродействие фотодетектора не является главным параметром.

В заключение отметим, что были созданы фотодетекторы фоторезистивного типа на основе металлоорганических перовскитов, полученных наиболее доступным

Времена нарастания и спада фотопроводимости ФП1 и ФП2

Параметр	ФП1	ФП2
Время нарастания, $\mu\text{s}$	2.6	13.4
Время спада, $\mu\text{s}$	4.3	3.19, 25.5



**Рис. 3.** Временные зависимости нарастания и спада фотопроводимости ФП1 (a — нарастание, b — спад) и ФП2 (c — нарастание, d — спад).

способом — одноступенчатым методом из жидкой фазы. Для ФП1 максимальная величина фоточувствительности при напряженности электрического поля 80 V/cm составила 1.58 A/W, а для ФП2 — 30 A/W. При этом ФП1 обладает линейной люкс-амперной характеристикой, а также временем нарастания/спада фотопроводимости 2.6/4.3  $\mu\text{s}$ , что позволяет ставить его на один уровень с более сложными и дорогими структурами.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект мол\_а № 18-32-00417).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] Wang Y, Gao M, Wu J, Zhang X // Chin. Phys. B. 2019. V. 28. N 1. P. 018502.
- [2] Miao J, Zhang F // J. Mater. Chem. C. 2019. V. 7. N 7. P. 1741–1791.
- [3] Xie C, Liu C, Loi H, Yan F / Adv. Funct. Mater. First published: 15 August 2019. P. 1903907. <https://doi.org/10.1002/adfm.201903907>
- [4] Mei F, Sun D, Mei S, Feng J, Zhou Y, Xu J, Xiao X // Adv. Phys. X. 2019. V. 4. N 1. P. 1592709.
- [5] Saranin D.S, Mazov V.N, Luchnikov L.O, Lypenko D.A, Gostishev P.A, Muratov D.S, Podgorny D.A, Migunov D.M, Didenko S.I, Orlova M.N, Kuznetsov D.V, Tameev A.R, Di Carlo A // J. Mater. Chem. C. 2018. V. 6. N 23. P. 6179–6186.
- [6] Yao F, Gui P, Zhang Q, Lin Q // Mol. Syst. Des. Eng. 2018. V. 3. N 5. P. 702–716.
- [7] Lian Z, Yan Q, Lv Q, Wang Y, Liu L, Zhang L, Pan S, Li Q, Wang L, Sun J // Sci. Rep. 2015. V. 5. N 1. P. 16563.

- [8] Амасев Д.В., Тамеев А.Р., Казанский А.Г. // ФТП. 2019. Т. 53. В. 12. С. 1625–1630.  
DOI: 10.21883/ФТП.2019.12.48615.9202 [Пер. версия: 10.1134/S1063782619160024].
- [9] Li F, Ma C, Wang H, Hu W, Yu W, Sheikh A.D., Wu T. // Nature Commun. 2015. V. 6. N 1. P. 8238.
- [10] Dong R., Fang Y., Chae J., Dai J., Xiao Z., Dong Q., Yuan Y., Centrone A., Zeng X., Huang J. // Adv. Mater. 2015. V. 27. N 11. P. 1912–1918.