

УДК 621.383.51

PACS: 84.60.Jt

Влияние дырочного проводящего слоя Cu_2O на характеристики перовскитных солнечных элементов

А. В. Саенко, С. П. Малюков, А. В. Палий, Е. В. Гончаров

Предложена модель перовскитного солнечного элемента со структурой FTO/ TiO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ / Cu_2O /Au в программе численного моделирования SCAPS-1D. Проведено исследование влияния толщины слоя перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$, а также толщины, концентрации акцепторов и подвижности дырок в слое Cu_2O на фотоэлектрические характеристики солнечных элементов. Получено, что оптимальная толщина слоя перовскита составляет 600–700 нм. Увеличение толщины слоя Cu_2O от 50 до 500 нм не оказывает существенного влияния на эффективность солнечного элемента, при этом оптимальная концентрация акцепторов в слое Cu_2O составляет 10^{18} – 10^{19} см^{-3} , а подвижность дырок должна быть более 0,1 $\text{см}^2/(\text{В с})$. Показано, что перовскитный солнечный элемент с дырочным проводящим слоем Cu_2O обладает лучшими характеристиками по сравнению со слоем Spiro-OMeTAD и имеет наибольшую эффективность 21,55 %.

Ключевые слова: солнечный элемент, численное моделирование, перовскит, Cu_2O , толщина слоя, концентрация акцепторов, подвижность дырок, эффективность.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-45-51

Введение

В настоящее время активно исследуются солнечные элементы, включающие в качестве фотоактивного материала металлоорганические соединения со структурой перовскита,

такие как галогениды метиламмония свинца ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$). Эффективность данных солнечных элементов достигает более 20 %, а их технология изготовления не требует энергоемких и сложных технологических процессов, что делает возможность создавать легкие, недорогие и гибкие пленочные устройства [1–3]. Несмотря на впечатляющий прогресс перовскитных солнечных элементов, их коммерциализация по-прежнему требует решения нескольких проблем, включая стабильность при воздействии света, влажности и высокой температуры, а также усовершенствование процессов производства и оптимизация структуры.

Традиционная планарная $n-i-p$ -структура перовскитного солнечного элемента на стеклянной подложке включает электронный проводящий слой TiO_2 , фотоактивный слой $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$, дырочный проводящий слой Spiro-OMeTAD, а также фронтальный FTO и тыльный контакты Au. Полупроводник n -типа TiO_2 широко используется в данных солнечных элементах и характеризуется необходи-

Саенко Александр Викторович¹, к.т.н., доцент.
E-mail: avsaenko@sfnedu.ru

Малюков Сергей Павлович¹, д.т.н., профессор,
чл.-корр. РАЕН.
E-mail: spmalyukov@sfnedu.ru

Палий Александр Викторович², к.т.н., доцент.
E-mail: a.v.paliy@mail.ru

Гончаров Евгений Вячеславович¹, студент.
E-mail: evgenygoncharov1998@mail.ru

¹ Институт нанотехнологий, электроники
и приборостроения Южного федерального университета.
Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

² Политехнический институт
(филиал Донского государственного технического
университета в г. Таганроге).
Россия, 347904, г. Таганрог, ул. Петровская, 109-а.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2021 г.

© Саенко А. В., Малюков С. П., Палий А. В.,
Гончаров Е. В., 2021

мым расположением энергетических зон, отличными оптоэлектронными свойствами и высокой стабильностью [4–6]. Перовскит $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ обладает наилучшей термической стабильностью, высоким оптическим поглощением в видимой области спектра и большой диффузионной длиной носителей заряда [7]. В качестве дырочного проводящего слоя обычно используется органическое соединение Spiro-OMeTAD, которое имеет относительно высокую стоимость и низкую подвижность дырок. К тому же, несмотря на высокую эффективность традиционной структуры солнечного элемента, органические соединения склонны к химической нестабильности и быстрой деградации, а также обладают свойством гигроскопичности, что приводит к ускоренной деградации фотоактивного слоя перовскита [3].

Проведенный анализ неорганических материалов с дырочной проводимостью показал, что наибольшим потенциалом для замены Spiro-OMeTAD обладает полупроводник p -типа Cu_2O с подходящим расположением энергетических зон (ширина запрещенной зоны 2,17 эВ), высокой подвижностью носителей заряда (до $110 \text{ cm}^2/(\text{V s})$), а также не токсичностью и невысокой стоимостью [8].

В настоящей работе создана модель перовскитного солнечного элемента со структурой FTO/ TiO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ / Cu_2O /Au в программе численного моделирования SCAPS-1D. Проведено исследование влияния толщины слоя перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$, а также толщины, концентрации акцепторов и подвижности дырок в слое Cu_2O на фотоэлектрические характеристики солнечных элементов. Целью работы являлось получение оптимальных параметров для перовскитных солнечных элементов с высокой эффективностью.

Структура устройства и параметры моделирования

Моделирование является необходимым этапом разработки и изготовления различных полупроводниковых устройств, в частности, солнечных элементов, которое позволяет снизить затраты на проведение экспериментальных исследований и оптимизацию характеристик устройств. Существует несколько программ, позволяющих разрабатывать и исследовать

солнечные элементы, среди которых AMPS-1D, SCAPS-1D, PC1D, AFORS-HET и другие [9–11].

SCAPS-1D является программой одномерного численного моделирования солнечных элементов. В основу SCAPS-1D положена нестационарная диффузионно-дрейфовая система уравнений полупроводника, в которую входят уравнения непрерывности и уравнение Пуассона [10–13]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_n \left(-n \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \varphi_t \frac{\partial n}{\partial x} \right) \right] + G - R = \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_p \left(p \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \varphi_t \frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] + G - R = \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = \frac{q}{\varepsilon_0} (n - p - N_D + N_A - p_t + n_t), \quad (3)$$

где n , p – концентрация электронов и дырок; μ_n , μ_p – подвижности электронов и дырок; φ – электрический потенциал; φ_t – температурный потенциал; q – элементарный заряд; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – диэлектрическая постоянная; G – скорость оптической генерации электронно-дырочных пар; R – скорость рекомбинации электронно-дырочных пар; N_D , N_A – концентрация донорной и акцепторной легирующей примеси; n_t , p_t – плотность ловушек для электронов и дырок.

При моделировании рассматривался перовскитный солнечный элемент с $n-i-p$ -структурой, состоящей из трех слоев и двух контактов: фронтальный контакт FTO, электронный проводящий слой TiO_2 , фотоактивный слой $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$, дырочный проводящий слой Cu_2O и тыльный контакт (Au). Основные физические параметры материалов, используемые при моделировании солнечного элемента, приведены в табл. 1 [13–18]. Для всех слоев эффективное сечение захвата электронов и дырок дефектом принималось равным $2 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$, а тепловая скорость носителей заряда 10^7 cm/s . Концентрация дефектов в перовските $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ составляла $2,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, что соответствует диффузионной длине электронов и дырок порядка 1 мкм [10]. Коэффициент поглощения для каждого слоя составлял 10^5 cm^{-1}

при стандартном спектре плотности потока фотонов AM1.5G. Тип дефектов выбирался нейтральным, поэтому механизм рекомбинации описывался согласно теории Шокли-Рида-Холла [15]. Величина последовательного сопротивления составляла 1 Ом см, а шунтирующего 10^6 Ом см. Напряжение на контактах варьировалось от 0 до 1,2 В.

Результаты моделирования

Для подтверждения используемых в моделировании параметров материалов солнечного элемента была создана модель в программе SCAPS-1D со структурой FTO/TiO₂ (50 нм)/CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x (400 нм)/Spiro-OMeTAD (250 нм)/Au и проведено сравнение результатов моделирования её фотоэлектрических характеристик с экспериментальными данными,

представленными в работе [19]. Результаты моделирования показывают близкое совпадение с экспериментальными данными, при этом солнечный элемент с дырочным проводящим слоем Cu₂O обладает лучшими параметрами по сравнению со слоем Spiro-OMeTAD и имеет эффективность η , равную 20,47 % (см. табл. 2).

Основным фактором, влияющим на характеристики перовскитовых солнечных элементов, является толщина слоя перовскита CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x, поскольку она осуществляет поглощение солнечного излучения и генерацию электронно-дырочных пар. Для исследования влияния толщины слоя перовскита на характеристики солнечного элемента проведено моделирование при изменении толщины в диапазоне от 100 до 1000 нм и остальных параметров, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Физические параметры материалов структуры солнечного элемента

Параметры	TiO ₂	CH ₃ CN ₃ PbI _{3-x} Cl _x	Spiro-OMeTAD	Cu ₂ O
Толщина (нм)	50	400	250	250
N_A (см ⁻³)	–	–	10^{19}	10^{18}
N_D (см ⁻³)	10^{17}	–	–	–
E_g (эВ)	3,2	1,55	2,9	2,17
χ (эВ)	4,0	3,9	2,2	3,2
ϵ	9	6,5	3	7,11
N_C/N_V (см ⁻³)	$2,2 \times 10^{18}/1,8 \times 10^{19}$	$2,2 \times 10^{18}/1,8 \times 10^{19}$	$2,2 \times 10^{18}/1,8 \times 10^{19}$	$2,2 \times 10^{18}/1,8 \times 10^{19}$
μ_n/μ_p (см ² /(В с))	20/10	2/2	$10^{-4}/10^{-4}$	80/80
σ_n/σ_p	$2 \times 10^{-14}/2 \times 10^{-14}$	$2 \times 10^{-14}/2 \times 10^{-14}$	$2 \times 10^{-14}/2 \times 10^{-14}$	$2 \times 10^{-14}/2 \times 10^{-14}$
N_t (см ⁻³)	10^{15}	$2,5 \times 10^{13}$	10^{15}	10^{15}

Таблица 2

Теоретические и экспериментальные параметры солнечных элементов

	$J_{кз}$, mA/cm ²	$V_{кк}$, В	FF, %	η , %
FTO/TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x / Spiro-OMeTAD/Au (эксп. [15])	22,75	1,13	75,01	19,30
FTO/TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x / Spiro-OMeTAD/Au (теор.)	22,39	1,12	76,21	19,19
FTO/TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x /Cu ₂ O/Au (теор.)	22,53	1,12	80,79	20,47

Из рис. 1 видно, что эффективность солнечного элемента резко возрастает с 12,94 до 21,5 % при увеличении толщины слоя перовскита до 600 нм, затем незначительно возрастает до 700 нм и снижается после 700 нм. При увеличении толщины слоя перовскита поглощается большее количество фотонов, что приводит к генерации большего количества избы-

точных носителей заряда и, соответственно, к возрастанию плотности тока короткого замыкания с 12,92 до 25,61 mA/cm² (см. рис. 1). Увеличение толщины слоя перовскита также приводит к небольшому уменьшению напряжения холостого хода на 0,1 В (конкретно, с 1,18 до 1,08 В), что связано с увеличением плотности темнового тока насыщения J_0 за

счет возрастания вероятности рекомбинации носителей заряда. Это можно объяснить зависимостью напряжения холостого хода V_{OC} от плотности темного тока насыщения и фотогенерируемой плотности тока короткого замыкания J_{SC} [15–17], что отражается следующей формулой:

$$V_{OC} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{J_{SC}}{J_0} + 1 \right), \quad (4)$$

где A – коэффициент идеальности диода; kT/q – температурный потенциал. Напряжение холостого хода ограничивается величиной плотности темного тока насыщения, которая возрастает при увеличении толщины слоя перовскита. Таким образом, толщина слоя перовскита $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$, равная 600–700 нм, является оптимальной для получения высокоэффективных солнечных элементов.

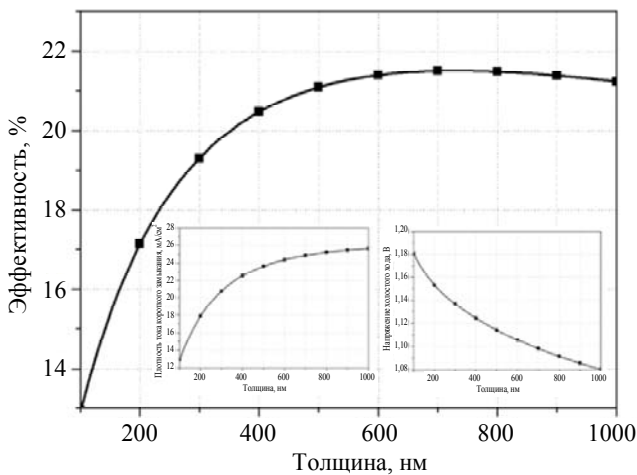


Рис. 1. Зависимости эффективности, плотности тока короткого замыкания и напряжения холостого хода солнечного элемента от толщины слоя перовскита.

Для исследования перспективности выбора Cu_2O в качестве дырочного проводящего слоя проведено моделирование влияния его параметров (толщины, концентрации акцепторов и подвижности дырок) на характеристики солнечного элемента со структурой FTO/ TiO_2 / $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$ (700 нм)/ Cu_2O /Au. (см. рис. 2).

Из рис. 2 видно, что увеличение толщины слоя Cu_2O от 50 до 500 нм не оказывает существенного влияния на эффективность

солнечного элемента. Это связано, в основном, с постоянным количеством фотогенерируемых носителей заряда в перовските и подтверждается результатами, представленными в работе [20]. В данном случае эффективность солнечного элемента составляет 21,5 % при оптимальной толщине 200 нм. Уменьшение толщины Cu_2O при постоянной эффективности может использоваться для снижения стоимости при изготовлении солнечных элементов.

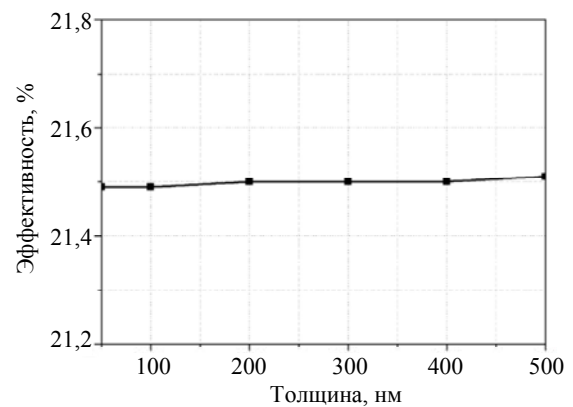


Рис. 2. Зависимости эффективности солнечного элемента от толщины слоя Cu_2O .

На рис. 3, а показано, что увеличение концентрации акцепторов от 10^{13} до 10^{21} cm^{-3} в дырочном проводящем слое Cu_2O приводит к увеличению эффективности солнечного элемента с 19,04 до 21,55 % до концентрации акцепторов 10^{19} cm^{-3} . Увеличение эффективности происходит за счет уменьшения удельного сопротивления слоя Cu_2O , при этом плотность тока короткого замыкания и напряжение холостого хода остаются практически постоянными при любой концентрации акцепторов. Таким образом, для получения высокой эффективности солнечного элемента концентрация акцепторов в слое Cu_2O должна быть 10^{18} – 10^{19} cm^{-3} .

На рис. 3, б показано, что увеличение подвижности дырок от 10^5 до 100 $cm^2/(V \cdot s)$ в дырочном проводящем слое Cu_2O приводит к существенному возрастанию эффективности солнечного элемента с 8,95 до 21,50 %. Это связано с повышением дырочной проводимости. Следовательно, оптимальная подвижность дырок в слое Cu_2O должна составлять более $0,1$ $cm^2/(V \cdot s)$.

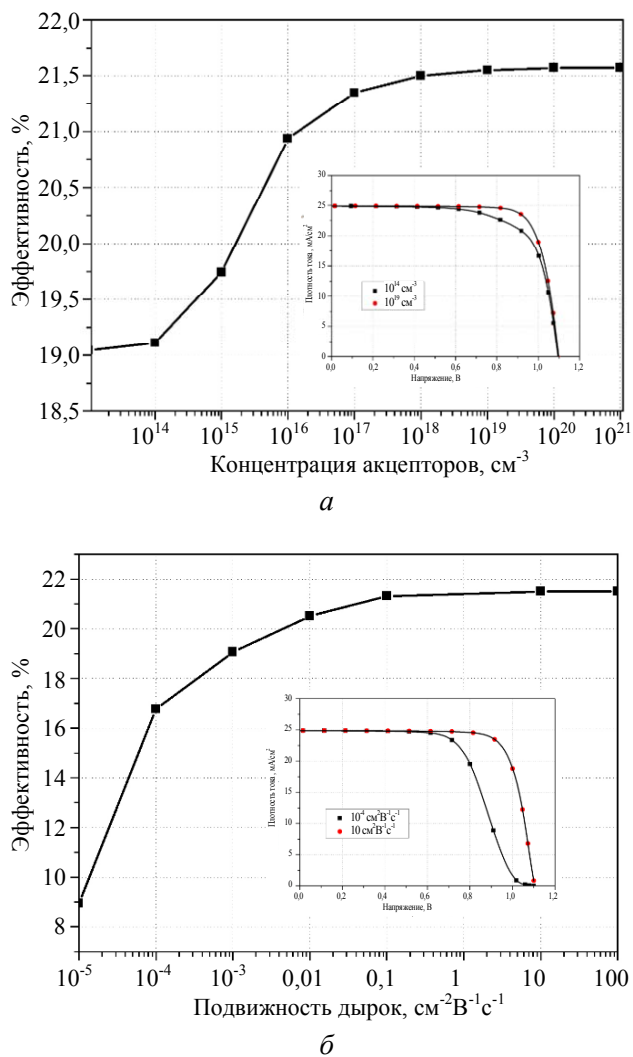


Рис. 3. Зависимость эффективности солнечного элемента от концентрации акцепторов (а) и подвижности дырок (б) в слое Cu_2O .

Заключение

В работе создана модель перовскитного солнечного элемента со структурой $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$ в программе SCAPS-1D. Проведено исследование влияния толщины слоя перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$, а также толщины, концентрации акцепторов и подвижности дырок в слое Cu_2O на фотоэлектрические характеристики солнечного элемента. Получено, что оптимальная толщина слоя перовскита составляет 600–700 нм. Увеличение толщины слоя Cu_2O от 50 до 500 нм не оказывает существенного влияния на эффективность солнечного элемента, при этом оптимальная концентрация акцепторов в слое Cu_2O составляет 10^{18} – 10^{19} см^{-3} , а подвижность дырок должна быть более $0,1 \text{ см}^2/(\text{В с})$.

Показано, что Cu_2O является перспективным материалом дырочного проводящего слоя для замены дорогостоящего органического соединения Spiro-OMeTAD, поскольку имеет высокую концентрацию акцепторов и подвижность дырок. При моделировании солнечного элемента со структурой $\text{FTO}/\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Au}$ получена наибольшая эффективность 21,55 % (ток короткого замыкания $24,87 \text{ мА}/\text{см}^2$, напряжение холостого хода 1,1 В и фактор заполнения 78,82 %). Результаты могут быть использованы при разработке и изготовлении перовскитных солнечных элементов с дырочным проводящим слоем Cu_2O .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-03041 мк.

ЛИТЕРАТУРА

- Hobeom Kim, Kyung-Geun Lim, Tae-Woo Lee // Energy Environ. Sci. 2016. Vol. 9. P. 12.
- Hyun Suk Jung, Nam-Gyu Park // Small. 2015. Vol. 11. P. 10.
- Aglikov A. S., Kudryashov D. A., Mozharov A. M., Makarov S. V., Bolshakov A. D., Mukhin I. S. // Tech. Phys. 2019. Vol. 64. P. 422.
- Weifu Sun, Kwang-Leong Choy, Mingqing Wang // Molecules. 2019. Vol. 24. P. 3466.
- Mingzhen Liu, Johnston Michael B., Snaith Henry J. // Nature. 2013. Vol. 501. P. 393.
- Malyukov S. P., Sayenko A. V., Klunnikova Y. V. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 475(1). P. 012008.
- Wolf Stefaan De, Holovsky Jakob, Moon Soo-Jin, Loper Philipp, Niesen Bjoern, Ledinsky Martin, Haug Franz-Josef, Yum Jun-Ho, Ballif Christophe // J. Phys. Chem. Lett. 2014. Vol. 5. P. 1035.
- Kudryashov D. A., Gudovskikh A. S., Babichev A. V., Filimonov A. V., Mozharov A. M., Agekyan V. F., Borisov E. V., Serov A. Yu., Filosofov N. G. // Semiconductors. 2017. Vol. 51. No. 1. P. 11.
- Burgelman M., Nollet P., Degraeve S. // Thin Solid Films. 2000. Vol. 361–362. P. 527.
- Minemoto T., Murata M. // J. of Appl. Phys. 2014. Vol. 116. P. 054505.
- Yassine Raoui, Hamid Ez-Zahraouy, Najim Tahiri, Omar El Bounagui, Shahzada Ahmad, Samrana Kazim // Solar Energy. 2019. Vol. 193. P. 948.
- Malyukov S. P., Sayenko A. V., Ivanova A. V. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 151. P. 012033.

13. Rozhko A. A., Petrov V. V., Sayenko A. V. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1035. P. 012032.
14. Hui-Jing Du, Wei-Chao Wang, Jian-Zhuo Zhu // Chin. Phys. B. 2016. Vol. 25. No. 10. P. 108803.
15. Takashi Minemoto, Yu Kawano, Takahito Nishimura, Jakapan Chantana // Optical Materials. 2019. Vol. 92. P. 60.
16. Neelima Singh, Alpana Agarwal, Mohit Agarwal // Solar Energy. 2020. Vol. 208. P. 399.
17. Abdelaziz S., Zekry A., Shaker A., Abouelatta M. // Optical Materials. 2020. Vol. 101. P. 109738.
18. Yu Kawano, Jakapan Chantana, Takahito Nishimura, Takashi Minemoto // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2020. Vol. 205. P. 110252.
19. Huanping Zhou, Qi Chen, Gang Li, Song Luo, Tze-bing Song, Hsin-Sheng Duan, Ziruo Hong, Jingbi You, Yongsheng Liu, Yang Yang // Science. 2014. Vol. 345. No. 6196. P. 542.
20. Abdelkader Hima, Nacereddine Lakhdar, Boubaker Benhaoua, Achour Saadoune, Imad Kemerchou, Fatiha Rogti // Superlattices and Microstructures. 2019. Vol. 129. P. 240.

PACS: 84.60.Jt

Influence of a Cu₂O hole-transport layer on perovskite solar cells characteristics

A. V. Sayenko¹, S. P. Malyukov¹, A. V. Pali², and E. V. Goncharov¹

¹ Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering,
Southern Federal University
2 Shevchenko st., Taganrog, 347922, Russia
E-mail: avsaenko@sfedu.ru

² Polytechnic Institute (branch) Don State Technical University in Taganrog
109-a Petrovskaya st., Taganrog, 347904, Russia

Received February 16, 2021

The article is devoted to the creation of a model of a perovskite solar cell with the FTO/TiO₂/CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x/Cu₂O/Au structure in the SCAPS-1D numerical simulation program. The effect of the thickness of the CH₃NH₃PbI_{3-x}Cl_x perovskite layer, as well as the thickness, concentration of acceptors, and hole mobility in the Cu₂O layer on the photoelectric characteristics of solar cells has been studied. It was found that the optimal thickness of the perovskite layer is 600–700 nm. An increase in the thickness of the Cu₂O layer from 50 nm to 500 nm does not have a significant effect on the efficiency of the solar cell, while the optimal concentration of acceptors in the Cu₂O layer is 10¹⁸–10¹⁹ cm⁻³, and the hole mobility should be more than 0.1 cm²/Vs. It is shown that a perovskite solar cell with a hole conductive layer Cu₂O has better characteristics compared to the Spiro-OMeTAD layer and has the highest efficiency of 21.55 %.

Keywords: solar cell, numerical simulation, perovskite, Cu₂O, layer thickness, acceptor concentration, hole mobility, efficiency.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-45-51

REFERENCES

1. Hobeom Kim, Kyung-Geun Lim, and Tae-Woo Lee, Energy Environ. Sci. **9**, 12 (2016).
2. Hyun Suk Jung and Nam-Gyu Park, Small **11**, 10 (2015).

3. A. S. Aglikov, D. A. Kudryashov, A. M. Mozharov, S. V. Makarov, A. D. Bolshakov, and I. S. Mukhin, *Tech. Phys.* **64**, 422 (2019).
4. Weifu Sun, Kwang-Leong Choy, and Mingqing Wang, *Molecules* **24**, 3466 (2019).
5. Mingzhen Liu, Michael B. Johnston, and Henry J. Snaith, *Nature* **501**, 393 (2013).
6. S. P. Malyukov, A. V. Sayenko, and Y. V. Klunnikova, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **475** (1), 012008 (2019).
7. Stefaan De Wolf, Jakub Holovsky, Soo-Jin Moon, Philipp Loper, Bjoern Niesen, Martin Ledinsky, Franz-Josef Haug, Jun-Ho Yum, and Christophe Ballif, *J. Phys. Chem. Lett.* **5**, 1035 (2014).
8. D. A. Kudryashov, A. S. Gudovskikh, A. V. Babichev, A. V. Filimonov, A. M. Mozharov, V. F. Agekyan, E. V. Borisov, A. Yu. Serov, and N. G. Filosofov, *Semiconductors* **51**, 11 (2017).
9. M. Burgelman, P. Nollet, and S. Degraeve, *Thin Solid Films* **361–362**, 527 (2000).
10. T. Minemoto and M. Murata, *J. Appl. Phys.* **116**, 054505 (2014).
11. Yassine Raoui, Hamid Ez-Zahraouy, Najim Tahiri, Omar El Bounagui, Shahzada Ahmad, and Samrana Kazim, *Solar Energy* **193**, 948 (2019).
12. S. P. Malyukov, A. V. Sayenko, and A. V. Ivanova, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **151**, 012033 (2016).
13. A. A. Rozhko, V. V. Petrov, and A. V. Sayenko, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **1035**, 012032 (2021).
14. Hui-Jing Du, Wei-Chao Wang, and Jian-Zhuo Zhu, *Chin. Phys. B* **25**, 108803 (2016).
15. Takashi Minemoto, Yu Kawano, Takahito Nishimura, and Jakapan Chantana, *Optical Materials* **92**, 60 (2019).
16. Neelima Singh, Alpana Agarwal, and Mohit Agarwal, *Solar Energy* **208**, 399 (2020).
17. S. Abdelaziz, A. Zekry, A. Shaker, and M. Abouelatta, *Optical Materials* **101**, 109738 (2020).
18. Yu Kawano, Jakapan Chantana, Takahito Nishimura, and Takashi Minemoto, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **205**, 110252 (2020).
19. Huanping Zhou, Qi Chen, Gang Li, Song Luo, Tze-bing Song, Hsin-Sheng Duan, Ziruo Hong, Jingbi You, Yongsheng Liu, and Yang Yang, *Science* **345**, 542 (2014).
20. Abdelkader Hima, Nacereddine Lakhdar, Boubaker Benhaoua, Achour Saadoune, Imad Kemerchou, and Fatiha Rogti, *Superlattices and Microstructures* **129**, 240 (2019).