

- 5 Zhukeshov A. M., Amrenova A.U., Gabdullina A.T., Ibraev B.M. A plasma Formation in Pulsed Coaxial Gun at Continuously Filling Regime//American Journal of Physics and Applications. – 2013. - Vol. 1, No. 1. - P. 5-9.

УДК 535.342, 535.215

### **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСПОРТНОГО СЛОЯ TiO<sub>2</sub> НА ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРОВСКИТНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА**

Мукаметкали Т.М., Айтбаева Ж.М., Гунгышбаева Д.Н., Зейниденов А.К.,  
Карагандинский университет им. Е.А. Букетова, Центр Нанотехнологий и  
функциональных наноматериалов  
tmk625@mail.ru

В последнее время для создания преобразователей солнечной энергии большую привлекательность приобрела идея создания дешевых и технологичных перовскитных солнечных элементов (PSCs) с использованием органо-неорганических материалов. Быстрое развитие PSCs связано с обширными исследованиями в области композитных материалов, процессов кристаллизации пленки и транспортных слоев [1,2].

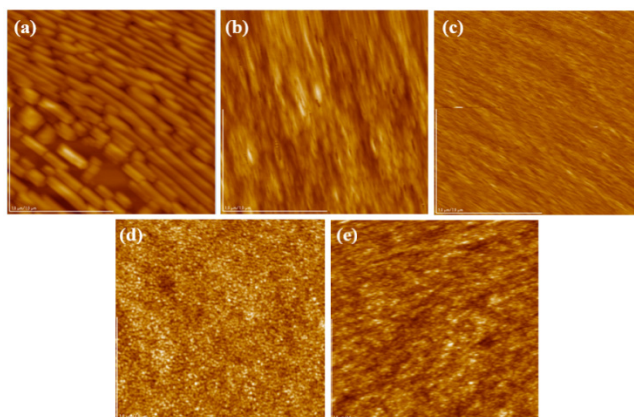
Многие исследователи были сосредоточены на пленках диоксида титана (TiO<sub>2</sub>) из-за его превосходных оптических и электрических свойств, таких как диэлектрическая стабильность, высокий показатель преломления, широкая запрещенная зона и высокий коэффициент пропускания в видимой области спектра [5]. Компактный слой TiO<sub>2</sub> обычно получают различными методами, такими как пиролиз аэрозольного распыления, термическое окисление [6], метод спинового покрытия, осаждение атомного слоя [7] и электрохимическое осаждение [8]. Кроме того, пленка TiO<sub>2</sub> является перспективным кандидатом на роль слоя переноса электронов (ETL) в перовскитных солнечных ячейках (PSC) в связи с лучшим поглощением на коротких длинах волн [9].

Перовскитные солнечные ячейки конструировались на стеклянных подложках покрытых тонким проводящим слоем FTO (15 Ом/см<sup>2</sup>), выполняющих функцию внешнего электрода (анода). На поверхность подложки с FTO методом spin-coating из раствора наносилась пленка TiO<sub>2</sub> (Ti-Nanoxide BL/SC- Solaronix), при скоростях вращения 3000, 4000, 5000 и 6000 rpm с последующим отжигом при температуре 500 °C в течение 60 минут. Пленка TiO<sub>2</sub> является селективным контактом, извлекающим электроны с фотоактивного слоя, с последующим транспортом электронов к катоду.

В качестве дырочно-транспортного слоя HTL использовался MoO<sub>3</sub> (Borun New Material Technology Co., Ltd.) при степенях вакуума 10<sup>-2</sup> Па. После на поверхность пленок при вакууме 10<sup>-3</sup> Па напылялся Ag электрод.

На рисунке 1 приведены АСМ снимки морфологии поверхности функциональных слоев PSCs. На рисунке 1a представлена морфология поверхности перовскита CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I<sub>3</sub>PbCl<sub>x</sub>, который имеет микрокристаллическую структуру с шероховатостью поверхности 5,9 нм, полностью покрывает поверхность FTO. Морфология поверхности ETL слоя TiO<sub>2</sub>, полученного при скорости вращения 3000 об/мин, имеет однородную и плотную мелкозернистую структуру с шероховатостью поверхности около 7,2 нм (рисунок 1b). При нанесении пленки на скорости 4000 об/мин шероховатость поверхности составляет около 7,9 нм (рисунок 1c). Однако, как видно из рисунков 1d и 1e, где представлена морфология поверхности слоя TiO<sub>2</sub>, полученного при скорости вращения в 5000 об/мин и 6000 об/мин, несмотря на схожую зернистую структуру, пленка имеет значительно меньшую степень шероховатости поверхности, которая составляет 3,8 нм и

3,6 нм соответственно. В таблице 1 приведены средний размер зерен и значения шероховатости функциональных слоев солнечной ячейки.



а)  $\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{I}_3\text{PbCl}_x$ ; б)  $\text{TiO}_2$  3000 rpm; в)  $\text{TiO}_2$  4000 rpm; г)  $\text{TiO}_2$  5000 rpm; д)  $\text{TiO}_2$  6000 rpm;  
Рисунок 1. Изображения поверхности компонентов перовскитной солнечной ячейки.

Таблица 1. Шероховатость поверхности и размер зерен компонентов перовскитной солнечной ячейки

Sample	$R_a$ , nm	$D_{cp.}$ , нм
Пленка $\text{CH}_3\text{NH}_3 \text{I}_3\text{PbCl}_x$	5.9	200
Пленка $\text{TiO}_2$ – 3000 rpm	7.2	45
Пленка $\text{TiO}_2$ – 4000 rpm	7.9	40
Пленка $\text{TiO}_2$ – 5000 rpm	3,8	30
Пленка $\text{TiO}_2$ – 6000 rpm	3.6	25

На рисунке 2 приведены вольтамперные характеристики перовскитных солнечных ячеек. Из рисунка видно, что PSCs с пленкой  $\text{TiO}_2$  при скорости нанесения в 6000 об/мин имеет самые худшие фотовольтаические параметры, который обусловлен низким фактором заполнения (FF). Ячейки с пленками  $\text{TiO}_2$ , полученными при скоростях вращения 3000 об/мин, 4000 об/мин и 5000 об/мин, показывают лучшую эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую, которая составляет  $\eta=3,55\%$ ,  $\eta=3,6\%$  и  $\eta=4,28\%$  соответственно, по сравнению с эффективностью PSCs при 6000 об/мин ( $\eta=3,26\%$ ). Улучшение эффективности в большей степени обусловлено увеличением фактора заполнения ячеек (таблица 2).

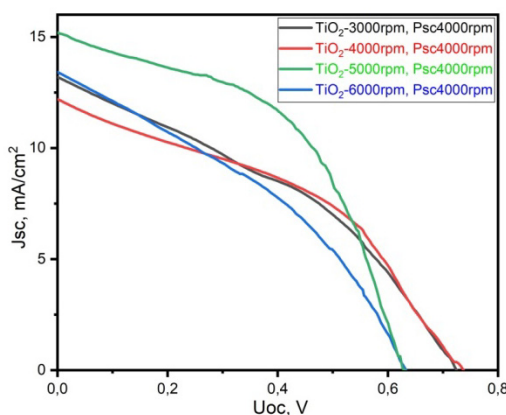


Рисунок 2. Вольтамперные характеристики перовскитных солнечных элементов

Таблица 2 – Параметры вольтамперных характеристик перовскитных солнечных ячеек

Образец	$J_{sc}$ mA/cm <sup>2</sup>	$U_{oc}$ V	$J_{max}$ mA/cm <sup>2</sup>	$U_{max}$ V	FF %	$\eta$ %
TiO <sub>2</sub> – 6, PSC-4	13.45	0.67	8.08	0.40	37.56	3.26
TiO <sub>2</sub> – 5, PSC-4	14.95	0.6	10.34	0.42	48.41	4.28
TiO <sub>2</sub> – 4, PSC-4	12.25	0.73	7.83	0.46	40.28	3.6
TiO <sub>2</sub> – 3, PSC-4	13.2	0.73	8.06	0.44	36.8	3.55

В данной работе показано, что нанесенные при разных скоростях вращения центрифуги пленки TiO<sub>2</sub> представляют собой электрон-транспортный слой для перовскитных солнечных ячеек. Ячейки с ETL слоем TiO<sub>2</sub>, полученным при скорости нанесения 6000 об/мин, показали самую низкую эффективность 3,26 %, в большей степени обусловленную низким фактором заполнения FF=37,6 %. Электрон-транспортный слой TiO<sub>2</sub>, полученный при скорости вращения 5000 об/мин, существенно увеличил фактор заполнения ячейки FF до 48,4% и эффективность составила 4,8%.

#### Литература:

1. Tai Q, Tang K-C, Yan F. Recent progress of inorganic perovskite solar cells. *Energy Environ Sci* 2019;12(8):2375–2405.
2. Jean, J.; Woodhouse, M.; Bulović, V. Accelerating Photovoltaic Market Entry with Module Replacement. *Joule* 2019, S2542435119304155. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.012>.
3. Wei Yin, Lijia Pan, Tingbin Yang and Yongye Liang Recent Advances in Interface Engineering for Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells // *Molecules*. – 2016. –V. 21(7). – P. 837.
4. Ke, W.J.; Fang, G.J.; Lei, H.W.; Qin, P.L.; Tao, H.; Zeng, W.; Wang, J.; Zhao, X.Z. An efficient and transparent CuS nanosheet film counter electrode for bifacial quantum-dot-sensitized solar cells. *J. Power Sources* 2014, 248, 809–815.
5. Kavan, L.; Tétreault, N.; Moehl, T.; Gratzel, M. Electrochemical characterization of TiO<sub>2</sub> blocking layers for dye-sensitized solar cells. *J. Phys. Chem. C* 2014, 118, 16408–16418.
6. Xia, J.B.; Masaki, N.; Jiang, K.J.; Yanagida, S. Deposition of a thin film of TiO<sub>x</sub> from a titanium metal target as novel blocking layers at conducting glass/TiO<sub>2</sub> interfaces in ionic liquid mesoscopic TiO<sub>2</sub> dye-sensitized solar cells. *J. Phys. Chem. B* 2006, 110, 25222–25228.
7. Chandiran, A.K.; Yella, A.; Stefić, M.; Heiniger, L.P.; Comte, P.; Nazeeruddin, M.K.; Graetzel, M. Low-temperature crystalline titanium dioxide by atomic layer deposition for dye-sensitized solar cells. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2013, 5, 3487–3493.
8. Zhan, Z.Y.; An, J.N.; Zhang, H.C.; Hansen, R.V.; Zheng, L.X. Three-dimensional plasmonic photoanodes based on Au-embedded TiO<sub>2</sub> structures for enhanced visible-light water splitting. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2014, 6, 1139–1144.
9. Wang, Y.; Wan, J.; Ding, J.; Hu, J.S.; Wang, D. A rutile TiO<sub>2</sub> electron transport layer for the enhancement of charge collection for efficient perovskite solar cells. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2019, 58, 9414–9418.