

**Д.С. Камбар, Т.Е. Сейсембекова, Б.В. Командир,  
А.К. Аймуханов, А.К. Зейниденов**

Карагандинский университет им. Е.А. Букетова  
Центр Нанотехнологий и функциональных наноматериалов  
Караганда, Казахстан

## **КОНКУРЕНТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В ИНВЕРТИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{SnO}_2$**

***Аннотация.** Установлено, что есть оптимальная толщина пленок  $\text{SnO}_2$ , при которой наблюдается баланс между эффективностью транспорта и рекомбинацией носителей зарядов. В этом случае электроны в фотоактивном слое обладают максимальным временем жизни носителей заряда и низкой вероятностью к рекомбинации. Анализ полученных ВАХ показал, что использование  $\text{SnO}_2$  приводит к повышению эффективности преобразования солнечной энергии.*

**D.S. Kambar, T.E. Seisembekova, B.V. Komandir,  
A.K. Aimukhanov, A.K. Zeinidenov**

Karaganda State University named after Academician E.A. Buketova  
Center of Nanotechnology and Functional Nanomaterials  
Karaganda, Kazakhstan

## **COMPETITIVE CHARGE TRANSPORT PROCESSES IN THE INVERTED POLYMER SOLAR CELLS BASED ON $\text{SnO}_2$ THIN FILMS**

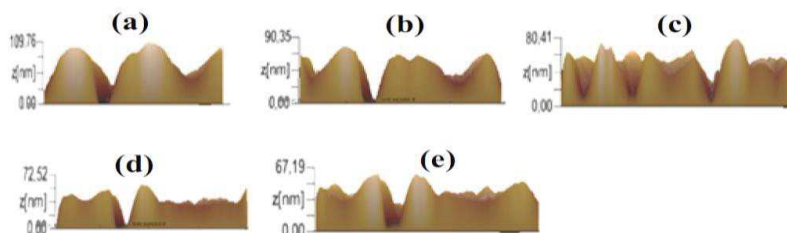
***Abstract.** It is established that there is an optimal thickness of  $\text{SnO}_2$  films, at which a balance is observed between the efficiency of transport and recombination of charge carriers. In this case, the electrons in the photoactive layer have the maximum lifetime of charge carriers and a low probability of recombination. Analysis of the obtained VAC showed that the use of  $\text{SnO}_2$  leads to an increase in the efficiency of solar energy conversion. It is established that the current density of the photoelectrode depends on the thickness of the  $\text{SnO}_2$  films.*

Оксид  $\text{SnO}_2$  обладает лучшей дырочной проводимостью [1], что даст возможность более быстрому переносу фотоиндуцированных дырок с активного слоя к электроду и тем самым снизит вероятность рекомбинации носителей заряда и увеличит фототок ячейки. ОСЭ на основе  $\text{SnO}_2$  электрода имеют недостаточно высокое фотонапряжение

из-за более низкого положения квазиуровня Ферми электронов (EF) в SnO.

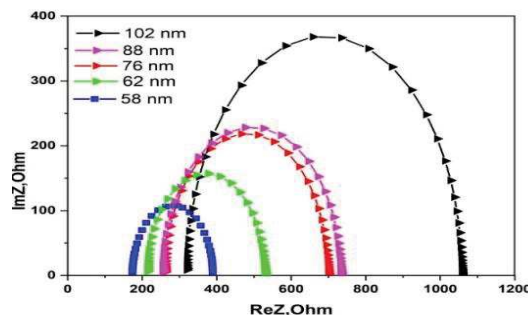
Снимки морфологии поверхности пленок SnO<sub>2</sub> в масштабе 1x1 мкм представлены на рис. 1. Как видно из АСМ-изображений, нанесение раствора при различных оборотах центрифуги оказывает влияние на морфологию поверхности. Морфология пленок SnO<sub>2</sub>, полученных при оборотах вращения центрифуги 2000-4000 об/мин, имеют шероховатость поверхности 4,8-2,7 нм соответственно. Увеличение скорости вращения центрифуги 5000-6000 об/мин приводит к уменьшению шероховатость поверхности до 1,6 нм.

Изучение толщины пленки SnO<sub>2</sub> производилось по глубине царапины на поверхности SnO<sub>2</sub>. Данные о толщине полученных пленок SnO<sub>2</sub> при разных оборотах центрифуги представлены на рис. 1.



**Рис. 1 - Изображения толщины пленок SnO<sub>2</sub> полученных при разных скоростях вращения**  
а) 2000 об/мин, б) 3000 об/мин, в) 4000 об/мин, д) 5000 об/мин, е) 6000 об/мин.

Исследования механизмов транспорта и рекомбинации носителей заряда в тонких пленках смеси полимеров РТВ7-ТН:ITIC с различной толщиной SnO<sub>2</sub> проводились методом импедансной спектроскопии [2]. Импеданс спектры в координатах Найквиста на основе тонких пленок представлены на рис. 2. В таблице 1 представлены основные электротранспортные свойства. Для интерпретации спектров импеданса использовалась эквивалентная электрическая схема. Фитинг спектров импеданса рассчитывался при помощи программного пакета EIS-analyzer. Используя метод импедансной спектроскопии, был проведен анализ электротранспортных характеристик солнечных ячеек [3]. Анализ годографов показал, что изменение толщины пленок SnO<sub>2</sub> приводит к изменению электротранспортных характеристик полимерного солнечного элемента.



**Рис. 2 - Годографы импеданса инвертированных нанокompозитных ОСЯ на основе пленок SnO<sub>2</sub> с различной толщиной**

С увеличением скорости вращения spin-coater, толщина пленок SnO<sub>2</sub> уменьшается, что должно способствовать уменьшению сопротивления ( $R_w$ ) пленки. Из таблицы видно, что с уменьшением толщины пленок сопротивление  $R_w$  также уменьшается, что в целом должно улучшать инжекцию электронов в FTO. Однако, как видно из таблицы, уменьшение толщины фотоактивного слоя приводит также к уменьшению сопротивления  $R_{rec}$ , что приводит к усилению рекомбинации электронов на границе раздела. С одной стороны уменьшения  $R_w$ , способствует быстрому транспорту электронов, но с другой стороны происходит конкурирующий процесс рекомбинации через сопротивления  $R_{rec}$ , которая также уменьшается, что увеличивает скорость рекомбинации.

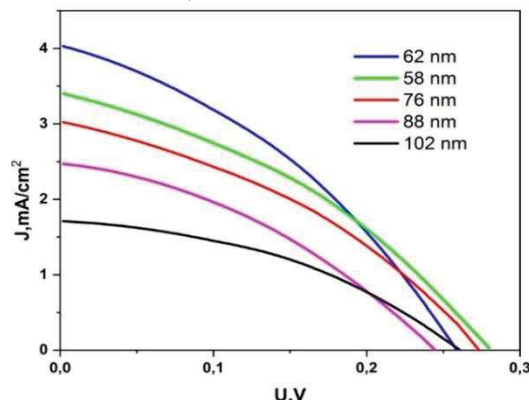
Мы предполагаем, что есть оптимальная толщина пленок SnO<sub>2</sub>, где наблюдается баланс между эффективностью инжекции и рекомбинацией носителей зарядов. В этом случае электроны в фотоактивном слое обладают максимальным временем жизни носителей заряда и низкой вероятностью к рекомбинации. Из анализа спектров импеданса следует, что оптимальной является толщина 58 нм, где время жизни носителей заряда составило  $\tau_{eff} = 0,9$  мс (таблица 1).

**Таблица 1 - Значение электрофизических параметров пленок SnO<sub>2</sub>**

Film thickness, rpm	$R_w$ , (Ohm)	$R_{rec}$ , (Ohm)	$R_{rec} / R_w$	$\tau_{eff}$ , (ms)	$k_{eff}$ , (s <sup>-1</sup> )
58	174	215	1.2	0.9	10704
62	214	314	1.4	0.8	12221
76	245	458	1.8	0.5	18190
88	262	437	1.6	0.4	20768
102	320	738	2.3	0.4	23711

На рис. 3 приведены вольтамперные характеристики органических солнечных ячеек на основе фотоактивного слоя РТВ7-Th:ITIC с разной толщиной пленок SnO<sub>2</sub>. В таблице 2 приведены фотовольтаические параметры органических солнечных ячеек. При фотовозбуждении фотоактивного слоя РЗНТ:ICMA образуется

электрон-дырочная пара, которая затем на границе раздела распадается на свободные носители заряда [4]. После электрон инжектируется в ETL нанокompозитный слой SnO<sub>2</sub> а дырка в HTL слой MoO<sub>3</sub>. Параметры ВАХ зависят от толщины слоя SnO<sub>2</sub>.



**Рис. 3 - Вольтамперная характеристика полимерного солнечного элемента в зависимости толщины пленок SnO<sub>2</sub>**

С уменьшением толщины пленок SnO<sub>2</sub> до значения 62 нм наблюдается возрастание значения тока короткого замыкания в 2,3 раза и изменения напряжения холостого хода в 1,12 раз (таблица 2). Причем как видно из рисунка при дальнейшем уменьшении толщины SnO<sub>2</sub> наблюдается уменьшения значения тока короткого замыкания. Наблюдаемой уменьшение значения тока, очевидно, связано с тем, что пленка становится настолько тонкой, что в ней образуются разрывы, через которые происходит утечка тока. При толщине пленки 62 нм КПД ячейки составляет 0,38%. При уменьшении толщины пленки до 58 нм КПД ячейки уменьшилось до 0,17 %.

**Таблица 2 - Фотовольтаические характеристики органических солнечных ячеек**

SnO film thickness, nm	$J_{sc}$ mA/cm <sup>2</sup>	$U_{oc}$ V	$J_{max}$ mA/cm <sup>2</sup>	$U_{max}$ V	$FF$ %	$\eta$ %
58	3.4	0.28	2.0	0.18	0.38	0.29
62	4.0	0.25	2.4	0.16	0.38	0.38
76	3.0	0.27	1.8	0.17	0,37	0.26
88	2.5	0.24	1.7	0.15	0,43	0.23
102	1.7	0.25	1.1	0.16	0.41	0.17

Методом золь-гель разработаны методы синтеза пленок SnO<sub>2</sub>. Показано, что при уменьшении толщины пленки до 58 нм шероховатость поверхности уменьшается до 1,6 нм. С уменьшением толщины пленок SnO<sub>2</sub> до значения 62 нм также наблюдается возрастание значения тока короткого замыкания в 2,3 раза и изменения

напряжения холостого хода в 1,12 раз. Аналогично, как и в случае пленок ZnO, при дальнейшем уменьшении толщины SnO<sub>2</sub> наблюдается уменьшения значения тока короткого замыкания. При толщине пленки 62 нм КПД ячейки составляет 0,38%. При уменьшении толщины пленки до 58 нм КПД ячейки уменьшилось до 0,17%. Наблюдаемой уменьшение значения тока для пленок ZnO и SnO<sub>2</sub>, очевидно, связано с тем, что пленка становится настолько тонкой, что в ней образуются разрывы, через которые происходит утечка тока.

### **Список использованных источников**

1 Rogé V., Didierjean J., Crêpellièrè J., Arl D., Michel M., Fechete I., Dinia A., Lenoble D. Tuneable Functionalization of Glass Fibre Membranes with ZnO/SnO<sub>2</sub> Heterostructures for Photocatalytic Water Treatment: Effect of SnO<sub>2</sub> Coverage Rate on the Photocatalytic Degradation of Organics // Catalysts. – 2020. – Vol.10, No.733. – P.1-18. DOI: 10.3390/catal10070733.

2 Гнеденков С., Синебрюхов С. Импедансная спектроскопия в исследовании процессов переноса заряда // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2006. – No. 5. – С. 6–16.

3 Huang Y.F., Inigo A.R., Chang C.C., Li K.C., Liang C.F., Chang C.W., Lim T.S., Chen S.H., White J.D., Jeng U.S., Su A.C., Huang Y.S., Peng K.Y., Chen S.A., Pai W.W., Lin C.H., Tameev A.R., Novikov S.V., Vannikov A.V., Fann W. Nanostructure-dependent Vertical Charge Transport in MEH-PPV Films // Advanced Functional Materials. – 2007. – Vol.17, No.15. – P.2902-2910. DOI:10.1002/adfm.200600825.

4 Dang M.T., Hirsch L., Wantz G. P3HT:PCBM, best seller in polymer photovoltaic research // Advanced Materials. – 2011. – Vol. 23, Iss.31. – P. 3597-3602. DOI: 10.1002/adma.201100792.

УДК 678.033:678.073

**А.В. Касперович, О.М. Касперович, А.Ф. Петрушеня,  
Л.А. Ленартович**

Белорусский государственный технологический университет,  
Минск, Республика Беларусь

### **ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА**

*Аннотация.* Введение в полимер функциональных добавок приводит к целенаправленному изменению их свойств. В статье рассматривается влияние