

УДК 621.383

С.П. Малюков, А.В. Саенко, А.С. Рукавишникова, И.В. Куликова

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ
И СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОДА TiO_2 НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА**

Представлено моделирование вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик, сенсibilизированных красителем солнечных элементов (СКСЭ), для определения влияния толщины и структуры электрода TiO_2 на фотоэлектрические характеристики солнечного элемента. Моделирование осуществлялось с помощью разработанной электрической диффузионной модели СКСЭ. Проведенные теоретические исследования позволили определить оптимальную толщину электрода TiO_2 , соответствующую наибольшей точке максимальной плотности мощности и коэффициента полезного действия элемента.

Солнечный элемент; электрод TiO_2 ; электрическая диффузионная модель; фотоэлектрические характеристики.

S.P. Malyukov, A.V. Saenko, A.S. Rukavishnikova, I.V. Kulikova

**THEORETICAL RESEARCH OF INFLUENCE OF THICKNESS AND
STRUCTURE OF ELECTRODE TiO_2 ON PHOTO-ELECTRIC
CHARACTERISTICS OF THE SOLAR ELEMENT**

This work presents the simulation of current-voltage and voltage-watt characteristics of dye-sensitized solar cells (DSSC) to determine the effect of thickness and structure of TiO_2 electrode on photovoltaic characteristics of solar cells. Simulation was carried out with the help of the developed electrical diffusion model of DSSC. The theoretical study allowed to determine the optimal electrode thickness TiO_2 , corresponding to the highest point of the maximum power density and efficiency of the cell.

Solar cell; TiO_2 electrode; electrical diffusion model; photovoltaic characteristics.

Сенсibilизированные красителем солнечные элементы (СКСЭ) имеют уникальную структуру, значительно отличающуюся от других типов солнечных элементов, базирующихся преимущественно на полупроводниковом р-п-переходе. Основным преимуществом СКСЭ является относительная простота технологии изготовления, что служит основой для удешевления производства и массового использования данных элементов.

Конструкция и основные принципы функционирования СКСЭ (рис. 1) подробно описаны в работах [1–3]. Основным компонентом конструкции СКСЭ является фоточувствительный сенсibilизированный красителем пористый электрод TiO_2 , толщина и структура которого оказывают наибольшее влияние на характеристики солнечного элемента.

Исследования в области СКСЭ достигли той стадии, когда необходимы детализированные теоретические модели, которые могут оказать значительное влияние на оптимизацию характеристик этих элементов. В настоящее время существует всего лишь несколько работ, посвящённых моделированию СКСЭ [2–6], в которых представлены принципы построения моделей СКСЭ на основе процессов поглощения света, диффузии и рекомбинации электронов в электроде TiO_2 для построения установившейся вольт-амперной характеристики солнечного элемента. Существенным недостатком, ограничивающим область применения данных моделей, является отсутствие в них параметров структуры электрода TiO_2 , в частности диаметра частиц TiO_2 и его пористости, а также молярного коэффициента поглощения света адсорбированными молекулами красителя. В моделях [2–6] эти пара-

метры заменяются одним параметром, таким как коэффициент поглощения сенсibilизированного красителем электрода TiO_2 , который не позволяет оценить влияние структуры электрода TiO_2 на характеристики СКСЭ.

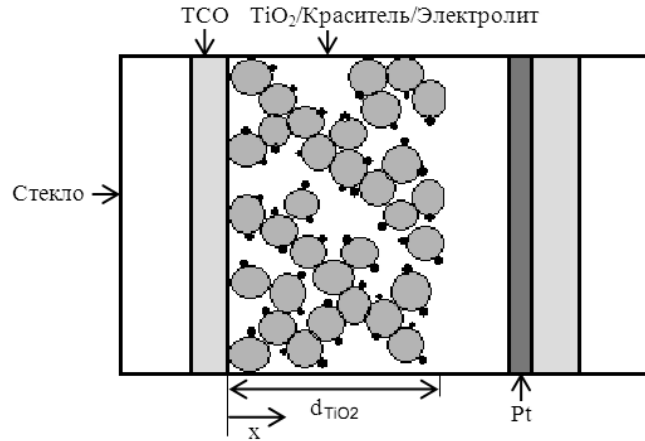


Рис. 1. Конструкция СКСЭ

В данной работе представлено моделирование вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик СКСЭ с целью теоретического исследования влияния толщины и структуры электрода TiO_2 на фотоэлектрические характеристики СКСЭ, такие как плотность тока короткого замыкания, напряжение холостого хода, коэффициент полезного действия (КПД), фактор заполнения и точка максимальной плотности мощности. Моделирование осуществлялось с помощью разработанной здесь электрической диффузионной модели СКСЭ, преимуществом которой является включение в неё параметров структуры электрода TiO_2 , что и позволило в полной мере осуществить упомянутое выше теоретическое исследование.

Рассмотрим основы построения электрической диффузионной модели СКСЭ на базе [3, 7–9]. В стационарном состоянии при освещении солнечного элемента, электроны, инжектирующиеся из возбуждённых молекул красителя, транспортируются за счёт диффузии в пористом полупроводниковом электроде TiO_2 к границе раздела TiO_2 /TCO (TCO – прозрачный проводящий оксид, например, $\text{SnO}_2\cdot\text{F}$) и рекомбинируют в основном с ионами окислителя I_3^- электролита на границе раздела TiO_2 /электролит. Эти процессы переноса, генерации и рекомбинации можно связать с помощью стационарного уравнения непрерывности и уравнения переноса для электронов в полупроводнике [9]. В результате получим следующее уравнение непрерывности:

$$D \frac{d^2 n(x)}{dx^2} - \frac{n(x) - n_0}{\tau} + \alpha \Phi e^{-\alpha x} = 0, \quad (1)$$

и диффузионное уравнение переноса для электронов в электроде TiO_2 , лежащие в основе электрической диффузионной модели СКСЭ:

$$J(x) = qD \frac{dn(x)}{dx}, \quad (2)$$

где x – координата, отсчитываемая от границы TiO_2 /TCO (см. рис. 1); $n(x)$ – неравновесная концентрация электронов в точке x ; q – заряд электрона; D – коэффициент диффузии электронов; n_0 – равновесная концентрация электронов в темноте ($n_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$); τ – время жизни электронов; Φ – плотность потока падающих фотонов; α – коэффициент поглощения света сенсibilизированным красителем электродом TiO_2 ; $J(x)$ – плотность тока.

Величина α определялась с помощью полученного нами в работе [11] выражения, исходя из пористой структуры электрода TiO_2 :

$$\alpha = \frac{6\varepsilon C_{\text{кр}}(1-p)\ln 10}{r}, \quad (3)$$

где ε – молярный коэффициент поглощения молекул красителя; $C_{\text{кр}}$ – концентрация молекул красителя на поверхности TiO_2 ; p – пористость плёнки TiO_2 ; r – диаметр частицы TiO_2 .

Для решения системы из уравнений (1) и (2) необходимо наличие двух граничных условий.

При работе СКЭС в режиме разности потенциалов V ($V \approx 0,1-0,7$ В) между уровнем Ферми в TiO_2 и окислительно-восстановительным потенциалом в электролите (рабочий режим), концентрация электронов на границе $\text{TiO}_2/\text{ТСО}$ ($x = 0$) возрастает до n , поэтому можно записать первое граничное условие в виде

$$n(0) = n = n_0 \exp\left(\frac{qV}{kTm}\right), \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана; m – фактор идеальности.

Второе граничное условие при $x = d$ будет иметь следующий вид:

$$\left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=d} = 0, \quad (5)$$

где d – толщина плёнки TiO_2 .

Аналитически, решая в системе Maple уравнение (1) с учётом граничных условий (4) и (5) и уравнение (2) при $J(x)|_{x=0}$, получим взаимосвязь между плотностью фототока J и фотонапряжением V :

$$\begin{aligned} J = qD \left(e^{-\frac{d}{\sqrt{D\tau}}} \left(-n_0 e^{\frac{qV}{kTm}} + n_0 e^{\frac{qV}{kTm}} \alpha^2 \tau D + \alpha \Phi \tau + n_0 - n_0 \alpha^2 \tau D - \right. \right. \\ \left. \left. - e^{\left(\frac{d}{\sqrt{D\tau}} - ad\right)} \alpha^2 \tau^{3/2} \sqrt{D} \Phi \right) / \left(\sqrt{D\tau} \left(-e^{-\frac{d}{\sqrt{D\tau}}} + e^{-\frac{d}{\sqrt{D\tau}}} \alpha^2 \tau D - e^{\frac{d}{\sqrt{D\tau}}} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + e^{\frac{d}{\sqrt{D\tau}}} \alpha^2 \tau D \right) \right) - e^{\frac{d}{\sqrt{D\tau}}} \left(-n_0 \alpha^2 \tau D + n_0 e^{\frac{qV}{kTm}} \alpha^2 \tau D + \alpha \Phi \tau - n_0 e^{\frac{qV}{kTm}} + \right. \right. \\ \left. \left. + e^{\left(-\frac{d}{\sqrt{D\tau}} - ad\right)} \alpha^2 \tau^{3/2} \sqrt{D} \Phi + n_0 \right) / \left(\sqrt{D\tau} (-1 + \alpha^2 \tau D) \left(e^{-\frac{d}{\sqrt{D\tau}}} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + e^{\frac{d}{\sqrt{D\tau}}} \right) \right) + n_0 \alpha - \alpha (n_0 (-1 + \alpha^2 \tau D) - \alpha \Phi \tau) / (-1 + \alpha^2 \tau D) \right). \quad (6) \end{aligned}$$

Для построения характеристик СКЭС с помощью уравнения (6) необходимо рассчитать величину максимального фотонапряжения в элементе V_{XX} (напряжение холостого хода при $J = 0$), которая определяется из следующего выражения, полученного в системе Maple:

$$\begin{aligned} V_{XX} = \frac{kTm}{q} \left(\ln \left(e^{-\frac{d}{\sqrt{D\tau}}} \left(\alpha \Phi \tau - \alpha^4 \tau^{5/2} D^{3/2} \Phi + n_0 + 2\alpha^2 \tau^{3/2} \sqrt{D} \Phi - \right. \right. \right. \\ \left. \left. - 2n_0 \alpha^2 \tau D + n_0 \alpha^4 \tau^2 D^2 - \alpha^3 \Phi \tau^2 D - \alpha^4 \tau^{5/2} D^{3/2} \Phi e^{\frac{2d}{\sqrt{D\tau}}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \alpha^2 \tau^{3/2} \sqrt{D} \Phi e^{\frac{2d}{\sqrt{D\tau}}} - 2\alpha^2 \tau^{3/2} \sqrt{D} \Phi e^{\left(\frac{d}{\sqrt{D\tau}} - ad\right)} + 2\alpha^4 \tau^{5/2} D^{3/2} \Phi e^{\left(\frac{d}{\sqrt{D\tau}} - ad\right)} - \right. \right. \\ \left. \left. - \alpha \Phi \tau e^{\frac{2d}{\sqrt{D\tau}}} - n_0 e^{\frac{2d}{\sqrt{D\tau}}} - 2n_0 \alpha^2 \tau D e^{\frac{2d}{\sqrt{D\tau}}} - n_0 \alpha^4 \tau^2 D^2 e^{\frac{2d}{\sqrt{D\tau}}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \alpha^3 \Phi \tau^2 D e^{\frac{2d}{\sqrt{D\tau}}} \right) / \left(n_0 e^{-\frac{d}{\sqrt{D\tau}}} \left(-2\alpha^2 \tau D + \alpha^4 \tau^2 D^2 + 1 + 2\alpha^2 \tau D e^{\frac{2d}{\sqrt{D\tau}}} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \alpha^4 \tau^2 D^2 e^{\frac{2d}{\sqrt{D\tau}}} - e^{\frac{2d}{\sqrt{D\tau}}} \right) \right) \right). \quad (7) \end{aligned}$$

Максимальное значение плотности фототока J_{K3} СКЭС наблюдается в режиме короткого замыкания, т.е. при $V = 0$. В этом режиме генерируемые в элементе электроны не накапливаются в плёнке TiO_2 , а легко переходят в ТСО, образуя максимальную величину J_{K3} .

Выходная плотность мощности (P), КПД (η) и фактор заполнения (FF) СКЭС определялись с помощью следующих выражений:

$$P = JV, \quad (8)$$

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{XX}J_{K3}}, \quad (9)$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{I_{cv}}, \quad (10)$$

где P_{max} – точка максимальной плотности мощности, I_{cv} – интенсивность падающего света.

Полученные в Maple выражения (6) и (7), а также (8)–(10) использовались при моделировании вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик СКЭС в системе Matlab.

При моделировании использовались следующие исходные параметры, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные параметры для СКЭС [2, 4]

Параметр	Величина
Плотность потока фотонов	$1,0 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
Молярный коэффициент поглощения	$0,7 \times 10^4 \text{ л/моль}\cdot\text{см}$
Концентрация молекул красителя	$1,3 \times 10^{-10} \text{ моль/см}^2$
Диаметр частиц TiO_2	25 нм
Пористость	0,5
Время жизни электрона	10 мс
Коэффициент диффузии электронов	$5,0 \times 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$
Фактор идеальности	4,5
Рабочая температура	300 К

На рис. 2 и 3 представлены полученные в ходе моделирования вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики СКЭС при различной толщине электрода TiO_2 (1, 5, 10, 30 и 100 мкм) и остальных исходных параметрах из табл. 1.

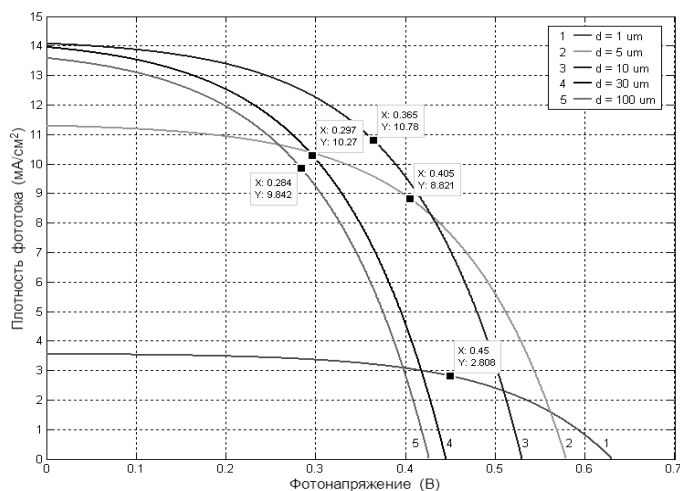


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики при различной толщине TiO_2

Данные результаты отражают влияние толщины электрода TiO_2 на плотность тока короткого замыкания $J_{\text{КЗ}}$, напряжение холостого хода $V_{\text{ХХ}}$, КПД и точки максимальной плотности мощности P_{max} . Величинам $J_{\text{КЗ}}$ соответствуют значения на оси плотности фототока в точках её пересечения с вольт-амперными характеристиками, а величинам $V_{\text{ХХ}}$ – значения на оси фотонапряжения также в точках её пересечения с вольт-амперными характеристиками. КПД, P_{max} элемента и соответствующие им оптимальные значения плотности фототока и фотонапряжения представлены на рис. 2 и 3 в виде (■).

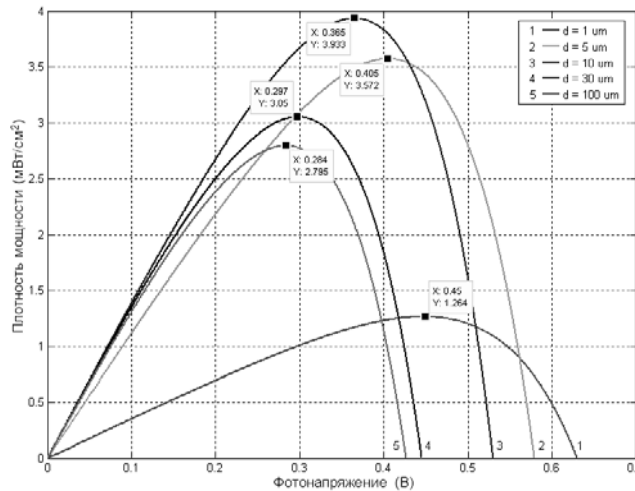


Рис. 3. Вольт-ваттные характеристики при различной толщине TiO_2

На рис. 4 представлены графики изменения величин $J_{\text{КЗ}}$, $V_{\text{ХХ}}$, FF, КПД и P_{max} от толщины электрода TiO_2 . Построение графиков осуществлялось с помощью функции интерполяции в среде Mathcad на основе данных, полученных в ходе моделирования вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик СКЭС.

Представленные на рис. 4 результаты показывают, что при увеличении толщины электрода TiO_2 $J_{\text{КЗ}}$ сначала резко возрастает, затем достигает максимума и постепенно снижается (рис. 4,а). Такое изменение $J_{\text{КЗ}}$ можно объяснить фотогенерацией электронов. Так, для представленных в табл. 1 величин пористости и диаметра частиц TiO_2 , увеличение толщины электрода TiO_2 непосредственно увеличивает его внутреннюю площадь поверхности, что приводит к большему количеству адсорбированных молекул красителя на поверхности TiO_2 . Следовательно, более толстый электрод TiO_2 может поглощать большее количество фотонов, что приводит к дополнительной фотогенерации электронов и более высокому значению $J_{\text{КЗ}}$. Однако, если толщина электрода TiO_2 становится больше, чем глубина проникновения в него света, то дальнейшее увеличение толщины электрода не приводит к дополнительной фотогенерации электронов и, следовательно, $J_{\text{КЗ}}$ дальше не может возрастать. Вместо этого увеличение толщины TiO_2 за пределы глубины проникновения света создаёт большее количество рекомбинационных центров, которые приводят к возрастанию потерь электронов и соответственно постепенному снижению $J_{\text{КЗ}}$.

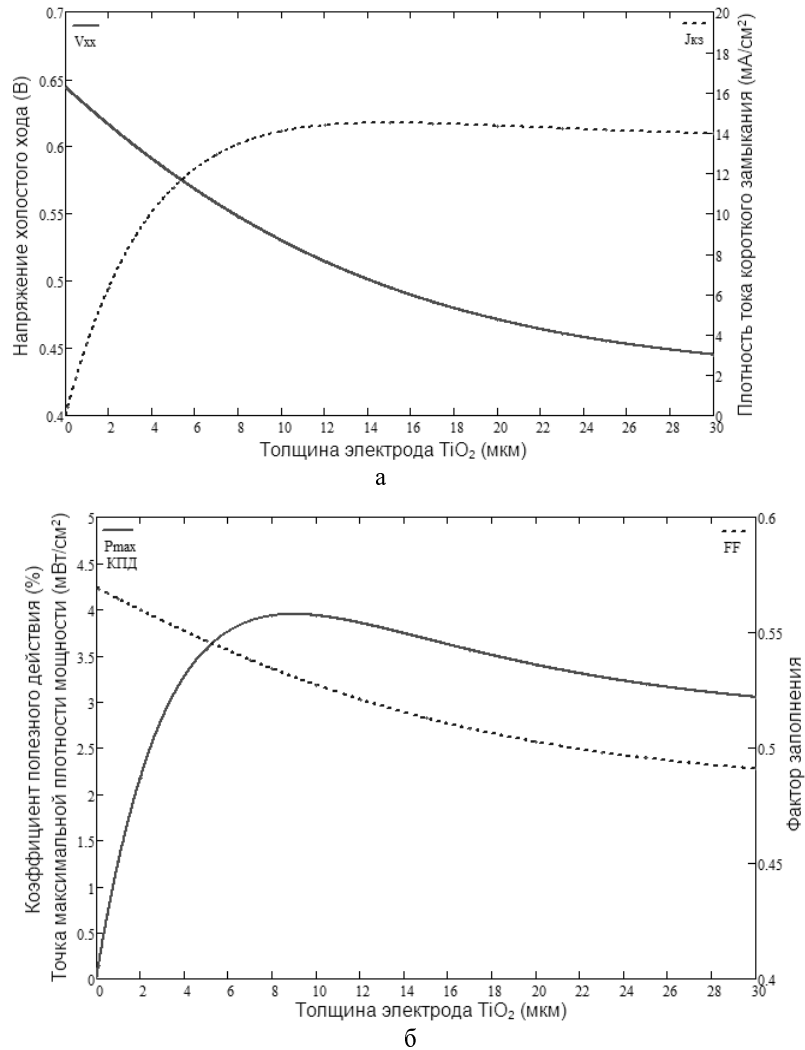


Рис. 4. Влияние толщины электрода TiO_2 на $J_{\text{кс}}$, V_{xx} , P_{max} и КПД

На рис. 4,а также показано, что V_{xx} уменьшается с увеличением толщины электрода TiO_2 . Это явление можно объяснить эффектом «разжижения» электронов. По мере проникновения света вглубь электрода его интенсивность постепенно уменьшается. Поэтому при увеличении толщины электрода TiO_2 избыточная концентрация электронов в электроде становится меньше, в результате чего и происходит снижение V_{xx} . Более высокое последовательное сопротивление более толстого электрода TiO_2 также вносит свой вклад в снижение фотонапряжения. Изменение фактора заполнения FF и точки максимальной плотности мощности P_{max} от толщины электрода TiO_2 показано на рис. 4,б. FF уменьшается с увеличением толщины электрода, что свидетельствует об увеличении внутреннего сопротивления в элементе. Сочетание изменений плотности фототока, фотонапряжения и фактора заполнения предполагает существование оптимальной толщины электрода TiO_2 , которая соответствует наиболее высокой P_{max} для заданной интенсивности падающего света (плотности потока фотонов). Из результатов моделирова-

ния, показанных на рис. 4,б, следует, что оптимальная толщина электрода TiO_2 составляет порядка 9 мкм. Так как КПД для СКСЭ определяется из отношения P_{\max} к падающей интенсивности света, то зависимость КПД от толщины электрода TiO_2 соответствует зависимости P_{\max} от толщины электрода TiO_2 (рис. 4,б). Таким образом, для максимизации КПД и P_{\max} СКСЭ необходима оптимальная толщина электрода TiO_2 , равная 9 мкм.

Полученный в результате моделирования КПД СКСЭ не очень высок (около 4 %). Это потому что при расчетах величины рекомбинации $\frac{n(x)-n_0}{\tau}$ в уравнении (1) электронов в TiO_2 с ионами в электролите в процессе моделирования использовались средние значения параметров, влияющих на рекомбинацию.

На рис. 5 и 6 показано влияние параметров пористой структуры TiO_2 (диаметра частиц и пористости TiO_2) на характеристики СКСЭ. На рис. 5 представлено изменение КПД и P_{\max} от диаметра частиц TiO_2 при оптимальной толщине электрода 9 мкм и остальных параметрах из табл. 1.

При увеличении диаметра r частиц TiO_2 происходит уменьшение P_{\max} и КПД (рис. 5), а соответственно и $J_{\text{КЗ}}$ и $V_{\text{ХХ}}$. Это связано с уменьшением внутренней площади поверхности электрода TiO_2 , пригодной для адсорбции молекул красителя, согласно полученной нами формуле [11]

$$S_{\text{нов. TiO}_2} = \frac{6abd(1-p)}{r}, \quad (11)$$

где a и b – длина и ширина фоточувствительного электрода TiO_2 .

Поэтому увеличение диаметра частиц TiO_2 приводит к снижению концентрации генерируемых избыточных носителей в сенсibilизированном красителем электроде TiO_2 из-за меньшего количества адсорбированных на поверхности TiO_2 молекул красителя [12].

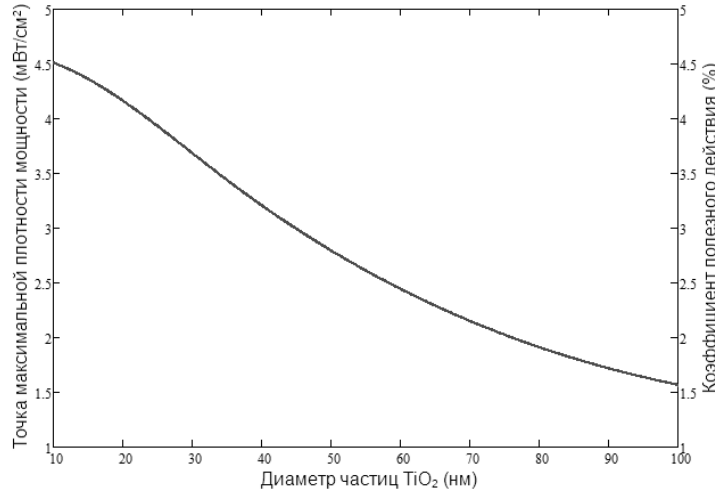


Рис. 5. Влияние диаметра частиц TiO_2 на P_{\max} и КПД элемента

На рис. 6 представлено изменение КПД и P_{\max} от пористости электрода TiO_2 при оптимальной толщине электрода 9 мкм, диаметре частиц TiO_2 25 нм и остальных параметрах из табл. 1. Из рис. 6 видно, что увеличение пористости TiO_2 негативно сказывается на характеристиках СКСЭ, что приводит к уменьшению величин P_{\max} , и КПД, а соответственно и $J_{\text{КЗ}}$ и $V_{\text{ХХ}}$. Уменьшение $J_{\text{КЗ}}$, $V_{\text{ХХ}}$ и P_{\max} также объясняется снижением концентрации генерируемых избыточных электронов в TiO_2 вследствие уменьшения внутренней площади поверхности электрода TiO_2 .

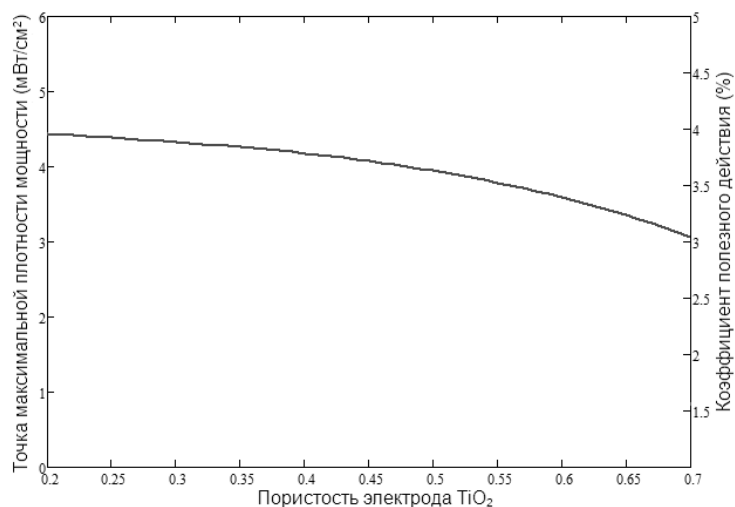


Рис. 6. Влияние пористости электрода TiO₂ на P_{max} и КПД элемента

Таким образом, в работе представлена разработанная электрическая диффузионная модель СКСЭ, учитывающая параметры структуры электрода TiO₂ и позволяющая показать влияние толщины, диаметра частиц и пористости электрода TiO₂ на фотоэлектрические характеристики СКСЭ с целью их максимизации. В результате моделирования установлено, что величины точки максимальной плотности мощности и КПД сначала резко возрастают с увеличением толщины TiO₂, а затем, достигая максимума, плавно снижаются. Исходя из этого, была определена оптимальная толщина электрода TiO₂, равная 9 мкм, которая соответствует наибольшей точке максимальной плотности мощности (4 мВт/см²) и КПД. Также было показано, что на КПД и точку максимальной плотности мощности большее влияние оказывает диаметр частиц TiO₂ (10–100 нм) и в меньшей степени пористость (0,2–0,7). Из полученных результатов следует, что для максимизации характеристик СКСЭ диаметр частиц TiO₂ должен составлять 10–30 нм, а пористость – 0,3–0,5 при оптимальной толщине пленки TiO₂ 9 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gratzel M. Review Dye-sensitized solar cells // Journal of Photochemistry and Photobiology: Photochemistry Reviews. – 2003. – P. 145-153.
2. Nithyanandam K., Pitchumani R. Analysis and design of dye sensitized solar cells // Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference. – 2010. – P. 1-8.
3. Wenger S., Schmid M., Rothenberger G., Gratzel M., Schumacher J.O. Model-based optical and electrical characterization of dye-sensitized solar cells // 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. – 2009. – P. 51-57.
4. Sodergren S., Hagfeldt A., Olsson J., Lindquist S.E. Theoretical models for the action spectrum and the current-voltage characteristics of microporous semiconductor-films in photoelectrochemical cells // J. Phys. Chem. – 1994, № 98. – P. 5552-5556.
5. Gomez R., Salvador P. Photovoltage dependence on film thickness and type of illumination in nanoporous thin film electrodes according to a simple diffusion model // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 2005. – № 88. – P. 377-388.
6. Onodera M., Ogiya K., Suzuki A., Tsuboi H., Hatakeyama N., Endou A., Takaba H., Kubo M., Miyamoto A. Modeling of dye-sensitized solar cells based on TiO₂ electrode structure model // Japanese Journal of Applied Physics. – 2010. – № 49 – P. 73-77.
7. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.

8. *Kureichik V.M., Malioukov S.P., Kureichik V.V., Malioukov A.S.* Genetic algorithms for applied CAD problems // Springer, 2009. – 236 p.
9. *Степаненко И.П.* Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2003. – 488 с.
10. *Плесков Ю.В.* Фотоэлектрохимическое преобразование солнечной энергии. – М.: Химия, 1990. – 176 с.
11. *Малюков С.П., Саенко А.В.* Моделирование поглощения солнечного излучения плёнкой TiO_2 в сенсibilизированном красителем солнечном элементе // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 148-153.
12. *Малюков С.П., Саенко А.В.* Исследование спектра поглощения красителя эозина для применения в солнечных элементах на основе TiO_2 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 98-102.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Малюков Сергей Павлович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: malyukov@fep.tti.sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; заведующий кафедрой; д.т.н.; профессор; член-корреспондент РАЕН.

Саенко Александр Викторович – e-mail: aleks@fep.tti.sfedu.ru; кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

Куликова Ирина Владимировна – e-mail: irma@fep.tti.sfedu.ru; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н., доцент.

Руквишник Анна Сергеевна – Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) Южно-Российского государственного университета экономики и сервиса; e-mail: annaru14@gmail.com; 344018, г. Ростов-на-Дону, ул. Варфоломеева, 215; кафедра материаловедения, конструирования и технологии швейных изделий; к.т.н.; доцент.

Malyukov Sergey Pavlovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: malyukov@fep.tti.sfedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; head the department; dr. of eng. sc.; professor; corresponding member RANS.

Saenko Alexandr Victorovich – e-mail: aleks@fep.tti.sfedu.ru; the department of electronic apparatuses design; post-graduate student.

Kulikova Irene Vladimirovna – e-mail: irma@fep.tti.sfedu.ru; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; associate professor.

Rukavishnikova Anna Sergeevna – Rostov Institute of Technology Services and Tourism (branch) South-Russian State University of Economics and Service; e-mail: annaru14@gmail.com; 215, Varfolomeev street, Rostov-on-Don, 344018, Russia; the department of materials science; engineering and technology garments; cand. of eng. sc.; associate professor.