



شبیهسازی منحنی جریان- ولتاژ سلول خورشیدی نانوساختاری پروسکایت با نرم افزار کامسول و تعیین ضخامت لایه جاذب بهینه

مرضيه بني اسدي، مجتبي رحيمي، حميدرضا باغشاهي، محمدرضا فروزشفرد

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، marziebaniasadi1394@gmail.com

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، m_rahimi@vru.ac.ir

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، baghshahi@vru.ac.ir

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، m.forouzeshfard@yahoo.com

در بررسی سلولهای خورشیدی شبیه سازی از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا باعث صرفهجویی قابل توجه در هزینه ها و زمان انجام تحقیقات و تخمینی از شرایط بهینه سلول می گردد. در این مقاله یک سلول خورشیدی نانوساختار پروسکایت با استفاده از نرم افزار کامسول شبیه سازی کردیم و در ادامه برای رسیدن به بیشترین بازده تبدیل توان، ضخامت لایه پروسکایت بهینه سازی شده است. بیشترین مقدار بازده بدست آمده در بهینه سازی ضخامت پروسکایت، مقدار ٪۶/۶ در ضخامت سانوم تا در مدر این آمد. کلید واژه – پروسکایت، سلول خورشیدی، شبیه سازی، کامسول.

Simulation of I-V Curve of Perovskite Nano-structured Solar Cell by COMSOL Software and Determination of Optimum Thickness of Absorber Layer

Marzie Baniasadi, Mojtaba Rahimi, Hamidreza Baghshahi, Mohammadreza Forouzeshfard

Vali-e-Asr University of Rafsanjan, marziebaniasadi1394@gmail.com

Vali-e-Asr University of Rafsanjan, m_rahimi@vru.ac.ir

Vali-e-Asr University of Rafsanjan, baghshahi@vru.ac.ir

Vali-e-Asr University of Rafsanjan, m.frouzeshfard@yahoo.com

Abstract - Simulation is dramatically important for investigation of solar cells, because it noticeably makes the research more efficiently done. Additionally, it makes possible the estimation of optimal conditions for solar cells. In this paper, we have simulated a nano-structured Perovskite solar cell using Comsol software. Next, thickness of Perovskite layer was optimized to achieve the highest power efficiency which was 6.6% in 300 nm thickness. Keywords: Solar Cell, Perovskite, Simulation, COMSOL.

مقدمه

دو عامل اصلی که در عملکرد هر سلول خورشیدی بررسی می شود، افزایش بازده تبدیل توان وکاهش هزینههای تولید آن است. سلولهای خورشیدی پروسکایتی به دلیل قابلیت ساخت آنها بر یایه مواد محلول و کاهش هزینه تولید و همچنین بازده بالاتری که نسبت به سایر سلولها از خود نشان دادند، بسیار مورد توجه قرار گرفتهاند [۴-۱]. پژوهشهای تجربی زیادی برای بهبود کارایی این نوع سلولها انجام شده است، اما در زمینه شبیه سازی سلولهای پروسکایتی گزارشهای کمتری ارائه شده است. شبیهسازی رايانهاي مي تواند به عنوان يک ابزار قدر تمند براي تجزيه و تحليل عملكرد سلول خورشيدى استفاده شود. سيلواكو و كامسول از جمله نرم افزارهایی هستند كه امكان شبیه سازی سلول خورشیدی در آنها وجود دارد [۷-۵]. ما قصد داریم در این مقاله به کمک نرم افزار کامسول یک سلول خورشیدی پروسکایتی تک کاتیونه را شبیه سازی کنیم و مشخصه های آن از جمله ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ضریب پرکنندگی و بازده را محاسبه کنیم و با تغییر ضخامت لایه پروسکایت به ضخامت بهینه پروسکایت برای افزایش بازده سلول دست یابیم.

ساختار سلول خورشیدی و معادلات حاکم

در شکل ۱ ساختار لایهای سلول خورشیدی پروسکایتی تک کاتیونه مشاهده می شود. اولین لایه یک الکترود شفاف است که برروی شیشه لایه نشانی شده است. این الکترود به منظور جلوگیری از خروج بارهای الکتریکی تولید شده در FTO می نور، به خارج از سلول به کار می رود. FTOساختاری است که در این لایه استفاده می شود. لایه بعدی، Tio_2 (تیتانیم اکسید) است که نیم رسانای نوع n می باشد و به عنوان لایه انتقال دهنده الکترون عمل می کند. لایه بعدی جاذب پروسکایت است که در این لایه از $CH_3NH_3PbI_3$ (متیل آمونیوم سرب یدید) استفاده شده است. سپس لایه

انتقال دهنده حفره که نیم رسانا نوع p است بر روی لایه جاذب قرار می گیرد. تر کیب استفاده شده برای این لایه، اسپایروامتاد (Spiro-OMeTAD) است. لایه آخر لایه ای فلزی از جنس طلا یا نقره است که بهعنوان اتصال خارجی روی لایه انتقال دهنده حفره قرار می گیرد [۲]. همان طور که می دانیم انتقال دهنده حفره قرار می گیرد [۲]. همان طور که می دانیم انتقال بار در مواد نیم رسانا توسط الکترون ها و حفره ها انجام می شود. معادلات اصلی انتقال حامل ها در نیم رساناها بدون توجه به ساختار پیوند آن ها، همواره معادله پواسون و معادلات پیوستگی جریان الکترون و حفره هستند. معادله (۱)، معادله پواسون است که توزیع میدان درون سلول و معادلات (۲) و (۳) معادلات پیوستگی هستند که جریان حامل های بار را در سلول توضیح می دهند.



$$\nabla \cdot (\varepsilon \, \nabla \phi) = -\rho \tag{(1)}$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_n + G_n - U_n \tag{(Y)}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_p + G_p - U_p$$

که ϕ پتانسیل الکتریکی، q بار الکتریکی، \mathcal{E} ثابت دی الکتریک نیمرسانا، G_p و G_p بهترتیب نرخ کل تولید الکترون و حفره هستند. U_n و U_p به ترتیب نرخ بازترکیب الکترون و حفرهاند و ρ چگالی بار هستند. همچنین I_n و J_p چگالی جریان الکترون و حفره میباشند [۳].

شبیهسازی سلول خورشیدی توسط نرم افزار کامسول

یکی از مشخصههای مهم سلول خورشیدی نمودار جریان ولتاژ است. ما برای رسیدن به این منحنی، یک سلول

Downloaded from www.opsi.ir on 2025-06-14

(٣)

خورشیدی پروسکایتی را در نسخه ۵/۴ نرم افزار کامسول شبیه سازی کردیم. فیزیک مورد استفاده در نرم افزار، semiconductor است. در قسمت Geometry، هندسه سلول تعریف می شود. سلول تحت تابش طیف استاندارد نور خورشید (AM1.5) قرار می گیرد و با حل معادلات ۱، ۲ و ۳ که به صورت غیر وابسته به زمان حل می شوند، نمودار جریان-ولتاژ سلول حاصل می شود [۶]. در شبیه سازی انجام شده پارامترهای زیادی استفاده شده است که در جدول ۱ به برخی از آن ها اشاره شده است.

پارامتر	Tio2	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	Spiro
t (nm)	۵.	۳	۵.
$E_g(eV)$	٣/٢	1/0	۲
ε	٩	Ŷ/ð	٣
$\chi(eV)$	۴	٣/٩٣	۲/۴
$N_D(cm^{-1})$	١. ١٩	•	•
$N_A(cm^{-1})$	٠	۱.۱۳	1.14

شبيەسازى.	در	شده	استفاده	ىترھاى	پاراه	خى	۱ بر-	جدول
-	-			-		_	-	

نمودار جریان-ولتاژ حاصل از پارامترهای بالا در شکل زیر قابل مشاهده است.



نتایج حاصل از شبیهسازی در جدول ۲ مشاهده میشوند:
جدول ۲ نتایج شبیهسازی سلول خورشیدی.

پارامتر	نتايج شبيهسازي
$J_{sc}(mA/cm^2)$))/))
$V_{oc}\left(V ight)$	• /AY
I_{mp} (mA/cm ²)	٩/۵۴٣
$V_{mp}(V)$	•/۶٩۴
P_{mpp} (mW/cm ²)	୫/୫۹ ነ
FF (%)	۶۸
η (%)	۶/۶

 I_{mp} و V_{mp} حداکثر جریان و ولتاژ در نقطهای است که بیشترین توان در سلول تولید میشود (قسمت زانویی نمودار). V_{oc} حداکثر ولتاژ در نقطهای که در آن جریان صفر است و J_{sc} نیز حداکثر چگالی جریان در نقطهای است که ولتاژ صفر است. ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه به طور مستقیم از نمودار جریان-ولتاژ استخراج می شوند و برای محاسبه ی فاکتور گنجایش (FF) و بازده تبدیل توان (۱) به ترتیب از روابط زیر استفاده می شود:

$$FF = \frac{I_{mp} v_{mp}}{J_{sc} V_{oc}} \tag{f}$$

$$\eta = \frac{I_{mp}V_{mp}}{P_{in}} \tag{(a)}$$

توان طيف استاندارد تابش نور خورشيد $P_{in}=100 \ mw/cm^2$ است [۴].



شكل ۳ نمودار جريان-ولتاژ ضخامتهاي مختلف پروسكايت.

۹۱۵

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

در ادامه برای رسیدن به ضخامت بهینه لایه پروسکایت به منظور دستیابی به بیشترین بازده، ضخامت پروسکایت را از ۲۰۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر تغییر میدهیم. شکل ۳ نمودار جریان-ولتاژ سلول خورشیدی را بهازای ضخامتهای ذکر شده نشان میدهد.

نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول زیر مشاهده می شوند: جدول ۳ نتایج شبیه سازی با تغییر ضخامت لایه پروسکایت.

t (nm)	$\frac{J_{sc}}{(mA/cm^2)}$	V_{oc} (V)	FF (%)	η (%)
۲۰۰	٩/۶۱١	۰/۸۹۶	۷۳	۶/۳
۳۰۰	11/11	٠/٨٧٩	۶٨	818
4	۱۱/۸۹	•/894	۶۳	۶/۴
۵۰۰	17/71	۰/۵۵۱	۵۷	۶
۶۰۰	17/78	٠/٨٢	۴۸	۴/٨
٧٠٠	١٢/•٧	•/827	49	۴/٨
٨٠٠	11/77	٠/٨١٧	40	۴/۳
٩٠٠	۱۱/۳۹	• / \ • Y	47	٣/٨
1	۱٠/٩۶	•/٧٩٧	47	٣/۴

نتيجه گيرى:

در این پژوهش یک سلول خورشیدی پروسکایت بهطور کامل در نسخه ۸/۴ نرم افزار کامسول شبیهسازی شد. برای دستیابی به یک سلول خورشیدی با عملکرد بهینه، می توان پارامترهای مختلف از جمله ضخامت لایهها، جنس مواد لایهها از جمله لایهی مزومتخلخل و لایه جاذب را تغییر داد. همچنین اضافه کردن بعضی عناصر مانند گرافن به بهبود عملکرد سلول کمک می کند. در اینجا ما فقط ضخامت لایه جاذب که حاوی پروسکایت تککاتیونه منحنی جریان ولتاژ (شکل۳) نشان می دهد که بهترین بازده تبدیل توان مقدار ٪۶/۶ برای ضخامت لایه جاذب، است. اما با آنکه انتظار داریم با افزایش ضخامت لایه جاذب، ناحیه جذب فوتونی افزایش پیدا کند و بازده بالا رود، اما به

علت سایر فرآیندهای فیزیکی از جمله بازتر کیب بازده سلول کاهش پیدا می کند. شکل ۳ به وضوح نشان می دهد تغییر ضخامت لایه ی جاذب تأثیر چندانی در ولتاژ مدار باز ندارد، اما به طور قابل ملاحظه ای جریان مدار کوتاه و در حقیقت کیفیت سلول را تغییر می دهد. مهم ترین پیشنهادات برای بهبود کیفیت سلول به شرح زیر پیشنهاد می گردند: الف) کاهش ضخامت لایه Spiro-OMeTAD. ب) جایگزینی Cl به جای I با توجه به گاف انرژی آن. ب) جایگزینی Nc بسته به ساختار مورد نظر. ج) تغییر ساختار پروسکایت تککاتیونه به سه کاتیونه مراجع:

[1] National Renewable Energy Laboratory (NREL), Best Research-Cell Efficiency Chart, 2019.

[2] Zh. Singling, D. Zhao, Ch.Ch. Chua, X. Shi, Hz. Li, "Highly efficient and stable perovskite solar cells enabled by all-cross-linked charge-transporting layers" Joul., Vol. 2, pp. 168-183, 2017.

[3] M. Grätzel, "The rise of highly efficient and stable perovskite solar cells", Acc. Chem., Vol. 50, pp. 487-491, 2017.

[4] S. H. Turren-Cruz, M. Saliba, "Enhanced charge carrier mobility and lifetime suppress hysteresis and improve efficiency in planar perovskite solar cells", Energ. Environ. Sci. Vol. 11, No. 1, pp. 78-86, 2018.

[5] K. R. Adhikari, S. Gurung, "Comparative study on MAPbI3 based solar cells using different electron transporting materials", phys status solidi (c)., Vol. 13, No. 1, pp. 13-17, 2016.

[6] H. Gill Sang, J. Sun Yoo, and et al "Highly stable perovskite solar cells in humid and hot environment", J. Mat. Chem. Vol. 5, No. 28, pp. 14733-14740, 2017.

[7] Kang, A. Kafi, M. H. Zandi, and et al. "Simulation analysis of graphene contacted perovskite solar cells using SCAPS-1D", Opt. and Quantum Electron. Vol. 51, No. 4, pp. 91, 2019.