بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

بررسی تأثیر لایه V_2O_5 روی ویژگی‌های اپتیکی سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی بر پایه الکترود $MoO_3/Au/V_2O_5$

مدینه نژادزنگنه[۱]، سید محمد باقر قریشی[۱]، محسن قاسمی[۲]

[۱] دانشگاه کاشان، دانشکده فیزیک، گروه لیزر و فوتونیک، madinezangene@gmail.com

[۲]دانشگاه شهرکرد، دانشکده علوم، گروه فیزیک، ghasemi.mohsen@sku.ac.ir

چکیده - در این کار سلول خورشیدی نیمه شفاف پروسکایتی با الکترود رسانای شفاف $MoO_3/Au/V_2O_5$ با ساختار $Glass/ITO/TiO_2/CH_3NH_3PbI_3/Spiro\text{-}OMeTAD/MoO_3/Au/V_2O_5$ در نظر گرفته شد و با محاسبه ویژگی‌های اپتیکی آن با استفاده از اپتیک لایه‌های نازک و همچنین روش اسمیت، اثر تغییر ضخامت لایه V_2O_5 روی جذب در لایه فعال و چگالی جریان مدار کوتاه بررسی شد. در نهایت بیشینه چگالی جریان مدار کوتاه برای ضخامت ۳۵ نانومتر از لایه ضخامت V_2O_5 به دست آمد.

کلید واژه- الکترود رسانای شفاف، چگالی جریان مدار کوتاه، دی الکتریک/فلز/دی الکتریک، سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی.

Investigation of the effect of V_2O_5 layer on the optical properties of semitransparent perovskite solar cell based on $MoO_3/Au/V_2O_5$ electrode

M. Nejad Zangeneh[1], S. M. B. Ghrashi[1], and M. Ghasemi[2]

[1] Department of Photonics, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan, Iran, madinezangene@gmail.com

[2] Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

Abstract- In this work, a semitransparent perovskite solar cell based on transparent conductive electrode $MoO_3/Au/V_2O_5$ with the structure of $Glass/ITO/TiO_2/CH_3NH_3PbI_3/Spiro\text{-}OMeTAD/MoO_3/Au/V_2O_5$ was considered, and the effect of changing the thickness of the V_2O_5 layer was investigated by calculating its optical properties using the optics of thin films and the Smith method. Finally, the maximum short circuit current density was obtained for a thickness of 35 nm of the V_2O_5 layer.

Keywords: Transparent conductive electrode, Shortcut circuit current density, Dielectric/metal/dielectric, Semitransparent perovskite solar cell.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

مقدمه

رشد سریع تحقیقات سلول‌های خورشیدی پروسکایتی (PSC)، نظرها را به سمت گونه‌های نیمه‌شفاف آنها که در فوتوولتائیک‌های یکپارچه کاربرد دارد، جلب کرده است. اگر در یک PSC معمولی الکترود فلزی مات با یک رسانای شفاف جایگزین شود، می‌توان یک دستگاه نیمه‌شفاف ساخت[۱]. فلزات فوق نازک، اکسیدهای رسانا، نانو سیم-های فلزی، پلیمرهای رسانا، نانو لوله‌های کربنی و گرافن نمونه الکترودهای شفاف هستند که در سلول‌های خورشیدی و بطور کلی در ادوات اپتوالکترونیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند[۲]. با این حال بسیاری از این گزینه‌ها، به علت داشتن معایبی نظیر رسانایی کم، شفافیت ناکافی، هزینه تولید بالا، نیاز به محلول‌ها یا پردازش در دمای بالا که با پروسکایت‌های آلی-فلزی سازگار نیستند، برای استفاده درPSCهای نیمه‌شفاف ناکارامدند[۳]. چند لایه‌ای‌های دی‌الکتریک/فلز/دی-الکتریک (DMD) گزینه مناسب هستند که ویژگی‌های امیدوارکننده‌ای مانند ویژگی‌های الکتریکی و اپتیکی قابل کنترل از طریق تغییر ضخامت و جنس مواد، انباشت در دمای محیط، پایداری مکانیکی به دلیل انعطاف‌پذیری فلز، پایداری دمایی و یکنواختی سطحی مناسب دارند. در این-کار چندلایه‌ای DMD با ساختار $MoO_3/Au/V_2O_5$ به عنوان الکترود شفافِ سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی مورد استفاده قرار گرفته است. ترازبندی مناسب بین لایه MoO_3 و لایه انتقال دهنده حفره، باعث می‌شود که لایه MoO_3 هم فرایند انتقال حفره را بهبود بخشد و هم سد کننده الکترون باشد. لایه فلزی Au که رسانندگی الکترود سه لایه‌ای را تأمین می‌کند، به شدت بازتابنده است و لایه V_2O_5 باعث ضد بازتابندگی آن می-شود و در نتیجه لایه V_2O_5 شفافیت الکترود سه لایه و کل سلول خورشیدی را بهبود می‌دهد[۴].

مبانی نظری و اصول شبیه‌سازی

به منظور طراحی سیستم سه لایه‌ای DMD از نظریه ماتریس انتقال لایه‌های نازک استفاده می‌شود[۵]. بر طبق این نظریه ماتریس مشخصه سیستم چند لایه‌ای به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{r=1}^{k} \begin{bmatrix} \cos\delta_r & \frac{i\sin\delta_r}{\eta_r} \\ i\eta_r \sin\delta_r & \cos\delta_r \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_m \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در آن k تعداد لایه‌ها، η_m و η_0 گذرایی نوری مختلط زیر لایه و هوا، η_r گذرایی نوری مختلط هرلایه، فاز ضخامت هر لایه هستند که به صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$\delta_r = \frac{2\pi}{\lambda} N_r \cos\theta_r \quad (۲)$$

$$\eta_r = \begin{cases} N_r \cos\theta_r = (n_r - i\kappa_r)\cos\theta_r \,(s-\text{polarization}) \\ \dfrac{N_r}{\cos\theta_r} = \dfrac{(n_r - i\kappa_r)}{\cos\theta_r} \qquad (p-\text{polarization}) \end{cases} \quad (۳)$$

ضریب عبور، بازتاب و جذب بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{4\eta_0 \,\mathrm{Re}(\eta_m)}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*} \quad (۴)$$

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C}\right)\left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C}\right)^* \quad (۵)$$

برای سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی با الکترود سه لایه‌ای دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک،(DMD)، با استفاده از روش اسمیت و با محاسبه ماتریس‌های انتقال لایه‌های مختلف، می‌توان میدان الکتریکی درون لایه فعال $E(x,\lambda)$ را محاسبه کرد. متوسط انرژی جذب شده در واحد زمان $Q(x,\lambda)$ و چگالی جریان مدار کوتاه J_{SC} در حالت ایده‌آل نیز به صورت روابط زیر قابل محاسبه است که در آن‌ها h ثابت پلانک، c سرعت نور در خلأ و e بار الکترون است[۶]:

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

$$Q(x,\lambda)=\frac{1}{2}c\varepsilon_0\alpha n\left|E(x,\lambda)\right|^2 \ ,\alpha=\frac{4\pi\kappa}{\lambda} \qquad (۶)$$

$$J_{SC}=e\iint\frac{Q(x,\lambda)\lambda}{hc}d\lambda\,dx \qquad (۷)$$

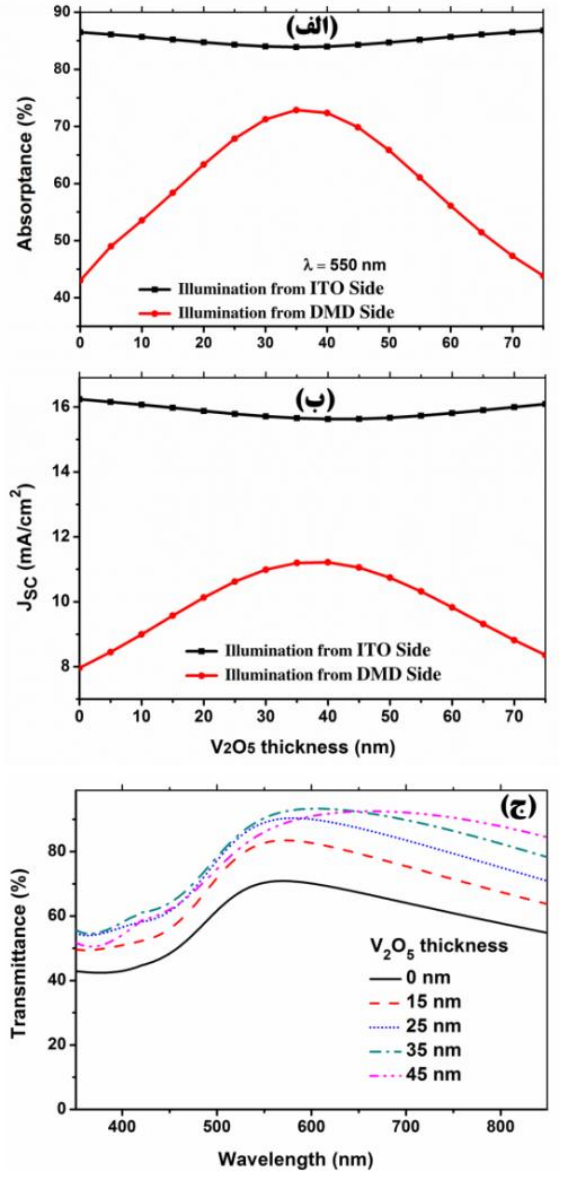
نتایج و بحث

ساختار کلی سلول خورشیدی بررسی شده در این پژوهش به صورت زیر است:

Glass/ITO/TiO_2(۳۰nm)/$CH_3NH_3PbI_3$(۳۰۰nm)/Spiro-OMeTAD(۲۰۰nm)/MoO_3(۱۰nm)/Au(۱۰nm)/V_2O_5

در این سلول خورشیدی نیمه‌شفاف، سه لایه‌ای $MoO_3/Au/V_2O_5$ به عنوان الکترود شفاف جلویی Spiro-OMeTAD به عنوان لایه انتقال دهنده حفره (HTL)، لایه پروسکایت $CH_3NH_3PbI_3$ به عنوان لایه فعال ، TiO_2 به عنوان لایه انتقال دهنده الکترون(ETL) و ITO الکترود شفاف پشتی است. از دو الکترود شفاف نور وارد سلول خورشیدی می‌شود و در لایه فعال جذب می‌شود. در تمام مراحل شبیه‌سازی قسمت‌های بعد، تنها ضخامت لایه‌ی دی‌الکتریک V_2O_5 تغییر می‌کند و بقیه لایه‌ها ضخامتشان ثابت است. شبیه‌سازی‌های این پژوهش در نرم‌افزار Mathcad انجام شده است و ضرایب شکست لایه‌ها برحسب طول موج و ضخامت هر لایه به عنوان ورودی‌های مسئله هستند. ضرایب شکست مختلط مورد استفاده در این کار از مقالات تجربی دیگران استخراج شده است[۷].

شکل ۱الف و ب به ترتیب تغییرات ضریب جذب برای طول موج ۵۵۰ نانومتر در لایه فعال و تغییرات جریان مدار کوتاه سلول خورشیدی نیمه‌شفاف مبتنی بر الکترود $MoO_3/Au/V_2O_5$ (MAV) بر حسب ضخامت لایه V_2O_5 برای دو جهت تابش از سمت الکترود شفاف MAV و الکترود ITO را نشان می‌دهد. برای این دو شکل چند نکته قابل ذکر است. اول اینکه تغییرات ضریب جذب برای طول موج ۵۵۰ نانومتر و تغییرات جریان مدار کوتاه این سلول برای جهت تابش از سمت الکترود ITO با تغییر ضخامت لایه V_2O_5 بسیار کم است، در صورتی‌که برای جهت تابش از سمت الکترود سه لایه MAV این تغییرات بر حسب تغییر ضخامت لایه V_2O_5 محسوس و چشمگیر است. دلیل این امر این است که برای تابش از سمت ITO، نور پس از عبور از ITO و قبل از رسیدن به الکترود MAV جذب می‌شود و تغییرات ضخامت لایه V_2O_5 تأثیر کمی روی جذب در لایه فعال و جریان مدار کوتاه دارد. تغییر اندکی نیز که وجود دارد ناشی از بازتاب اندک نوری است که به الکترود MAV می‌رسد و بازتاب می‌شود و دوباره در لایه فعال گیر می‌افتد و جذب می‌شود.



شکل ۱: الف) تغییرات ضریب جذب در لایه فعال ، ب) تغییرات چگالی جریان مدار کوتاه (J_{SC})بر حسب تغییر ضخامت لایه دی-

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

الکتریک بیرونی برای تابش از سمت کاتد و آند، ج) طیف عبور الکترود MAV برای ضخامت‌های مختلف لایه V_2O_5

برای تابش از سمت الکترود MAV نیز چند نکته وجود دارد. اول اینکه ضریب جذب در لایه فعال و جریان مدار کوتاه برای تابش از سمت الکترود MAV در تمام ضخامت‌های لایه V_2O_5، از ضریب جذب در لایه فعال و جریان مدار کوتاه برای تابش از سمت الکترود ITO کمتر است. دلیل این اتفاق به علت این است که برای تابش از سمت الکترود ITO نوری که در لایه فعال جذب می‌شود شامل نوری است که از الکترود ITO وارد می‌شود و همچنین نوری است که توسط الکترود MAV بازتاب می-شود و دوباره در لایه فعال گیر می‌افتد و جذب می‌شود. بنابراین برای تابش از سمت الکترود ITO نوری که به لایه فعال می‌رسد بیشتر است. نکته دیگر تغییرات شدید ضریب جذب در لایه فعال و جریان مدار کوتاه برای تابش از سمت الکترود MAV با تغییر ضخامت لایه V_2O_5 است. مشخص است ابتدا با افزایش ضخامت لایه V_2O_5 تا حدود ۳۵ نانومتر ضریب جذب در لایه فعال و جریان مدار کوتاه افزایش چشمگیری دارد و بعد از آن با افزایش ضخامت لایه V_2O_5، ضریب جذب در لایه فعال و جریان مدار کوتاه کاهش می‌یابند. دلیل این اتفاق به تغییرات طیف عبور از الکترود MAV با تغییر ضخامت لایه V_2O_5 بر می‌گردد. شکل ۱ ج طیف عبور از الکترود MAV برای ضخامت‌های مختلف لایه V_2O_5 را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که با حضور لایه V_2O_5ضریب عبور از الکترود MAV افزایش می‌یابد که ناشی از کم شدن بازتاب در حضور لایه V_2O_5 است. با افزایش ضخامت لایه V_2O_5 تا نزدیک ۳۵ نانومتر هم ضریب عبور در طول‌موج‌های ۳۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر که قله‌ی جذب لایه فعال پروسکایتی است افزایش می‌یابد و هم عبور در طول موج‌های ۴۵۰ تا ۵۵۰ نانومتر که قله‌ی شدت تابش نور خورشید است زیاد می‌شود، که همین موجب بیشینه بودن جذب سلول و در نتیجه بیشینه بودن جریان مدار کوتاه سلول در ضخامت حدود ۳۵ تا ۴۰ نانومتر لایه V_2O_5 می‌شود. در ضخامت‌های بیشتر لایه V_2O_5 هم عبور در قله‌ی جذب لایه فعال و هم در قله‌ی شدت تابش نور خورشید کاهش می‌یابد و به دنبال آن کاهش در جذب و جریان مدار کوتاه سلول رخ می‌دهد. پس ضخامت ۳۵ نانومتر لایه V_2O_5 ضخامت بهینه برای داشتن بیشینه جریان مدار کوتاه است.

نتیجه‌گیری

ویژگی‌های اپتیکی سلول خورشیدی نیمه شفاف پروسکایتی مبتنی بر الکترود $MoO_3/Au/V_2O_5$ محاسبه شد و از آنجایی‌که تغییر ضخامت لایهV_2O_5 ضریب عبور نور از الکترود سه لایه‌ای را تغییر می‌دهد، جذب در لایه فعال و جریان مدار کوتاه برای وقتی نور از سمت الکترود سه لایه‌ای وارد می‌شود با تغییر ضخامت لایه V_2O_5 تغییر می‌کند. در نهایت ضخامت بهینه V_2O_5 برای داشتن بیشینه جریان مدار کوتاه ۳۵ نانومتر به دست آمد.

مرجع‌ها

[1] E.D. Gaspera, Y. Peng, Q. Hou, L. Spiccia, "Ultra-thin high efficiency semitransparent perovskite solar cells." Nano Energy. vol. 13, pp. 249-257, 2015.

[2] D.Chen, S. Pang, L. Zhou, X. Li, "An efficient TeO2/Ag transparent top electrode for 20%-efficiency bifacial perovskite solar cells with a bifaciality factor exceeding 80%", J. Mater. Chem. A, vol. 7, 2019

[3] F.He, H.You; X. Li, D. Chen, "Transparent Ultrathin Metal Electrode with Microcavity Configuration for Highly Efficient TCO-Free Perovskite Solar Cells", Materials, Vol.13, 2020.

[4] P. Shangzheng, X. Li, H. Dong, D. Chen," Efficient Bifacial Semitransparent Perovskite Solar Cells Using Ag/V2O5as Transparent Anodes. ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 10, 2018.

[5] H. A. MacLeod, *Thin-Film Optical Filte (4th ed.)*, CRC Press, 2010.

[6] T. Bendib, H. Bencherif, M. A. Abdi, F. Meddour, L. Dehimi, M. Chahdi, "Combined Optical-Electrical modeling of perovskite solar cell with an optimized design". Optical Materials. Vol.109, 2020.

[7] W. Sha, X. Ren, L. Chen, W. Choy, "Supplementary Information_The Efficiency Limit of CH3NH3PbI3 Perovskite Solar Cells", Applied Physics Letters, vol. 106, 2015.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]