



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



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

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 نیمه‌شفاف پروسکایتی با الکتروود رسانای شفاف $MoO_3/Au/V_2O_5$ با ساختار $Glass/ITO/TiO_2/CH_3NH_3PbI_3/Spiro-OMeTAD/MoO_3/Au/V_2O_5$ 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- الکتروود 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 Zangeneh¹, S. M. B. Ghrashi¹, and M. Ghasemi²

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

² Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Shahrood, Shahrood, 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 $Glass/ITO/TiO_2/CH_3NH_3PbI_3/Spiro-OMeTAD/MoO_3/Au/V_2O_5$ 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.

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:

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

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

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

$$\eta_r = \begin{cases} N_r \cos \theta_r = (n_r - i k_r) \cos \theta_r & (s - \text{polarization}) \\ \frac{N_r}{\cos \theta_r} = \frac{(n_r - i k_r)}{\cos \theta_r} & (p - \text{polarization}) \end{cases} \quad (3)$$

ضریب عبور، بازتاب و جذب بصورت زیر محاسبه می‌شود:

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

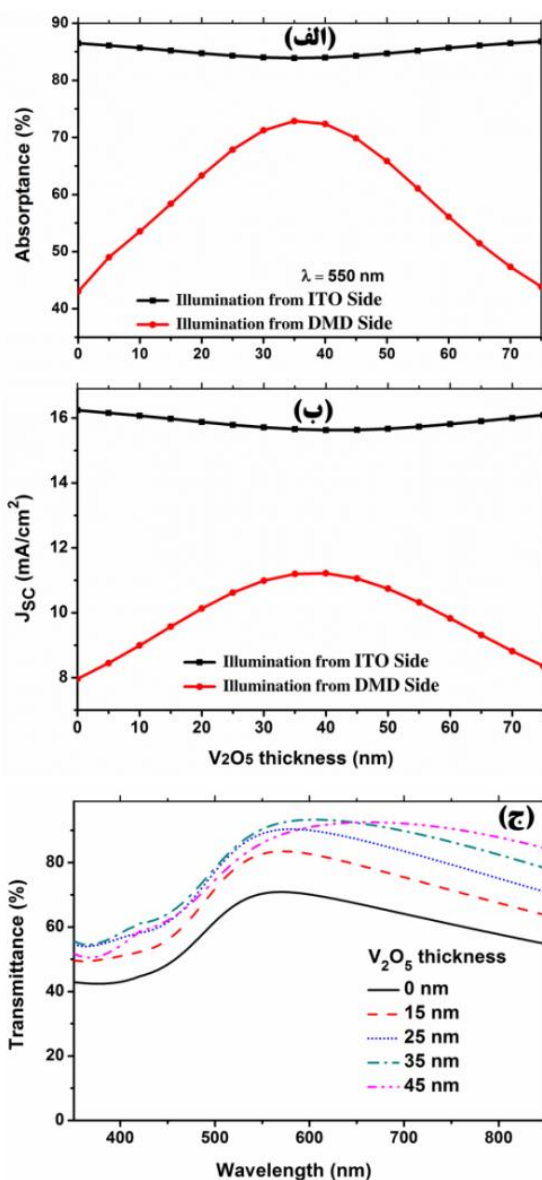
$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (5)$$

برای سلول خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایتی با الکتروده 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]:

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 الکتروده 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 در PSC‌های نیمه‌شفاف ناکارآمدند [۳]. چند لایه‌ای‌های دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک (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 $\text{MoO}_3/\text{Au}/\text{V}_2\text{O}_5$ به عنوان الکتروده شفاف 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 الکتروده سه لایه‌ای را تأمین می‌کند، به شدت بازتابنده است و لایه V_2O_5 باعث ضد بازتابندگی آن می‌شود و در نتیجه لایه V_2O_5 شفافیت الکتروده سه لایه و کل سلول خورشیدی را بهبود می‌دهد [۴].

ضخامت لایه V_2O_5 بسیار کم است، در صورتی که برای جهت تابش از سمت الکتروده 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 الکتروده 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 الکتروده 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-

$$Q(x, \lambda) = \frac{1}{2} c \epsilon_0 \alpha n |E(x, \lambda)|^2, \alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \quad (6)$$

$$J_{sc} = e \iint \frac{Q(x, \lambda) \lambda}{hc} d\lambda dx \quad (7)$$

نتایج و بحث

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

Glass/ITO/TiO₂(۳۰ nm)/CH₃NH₃PbI₃(۳۰۰ nm)/Spiro-
o-OMeTAD(۲۰۰ nm)/MoO₃(۱۰ nm)/Au(۱۰
nm)/V₂O₅

در این سلول خورشیدی نیمه‌شفاف، سه لایه‌ای Spiro-OMeTAD به عنوان الکترود شفاف جلویی (HTL)، لایه پروسکایت CH₃NH₃PbI₃ به عنوان لایه فعال، TiO₂ 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 لایه دی‌الکتریک V₂O₅ 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 ۱ الف 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 V₂O₅/Au/MoO₃ (MAV) بر حسب ضخامت لایه V₂O₅ برای دو جهت تابش از سمت الکتروده 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 الکتروده ITO با تغییر

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 الکتروکود $MoO_3/Au/V_2O_5$ محاسبه شد و از آنجایی که تغییر ضخامت لایه V_2O_5 ضریب عبور نور از الکتروکود سه لایه‌ای را تغییر می‌دهد، جذب در لایه فعال و جریان مدار کوتاه برای وقتی نور از سمت الکتروکود 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 TeO_2/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/V_2O_5 as Transparent Anodes. ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 10, 2018.
- [5] H. A. MacLeod, *Thin-Film Optical Filter (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 $CH_3NH_3PbI_3$ Perovskite Solar Cells", Applied Physics Letters, vol. 106, 2015.

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

برای تابش از سمت الکتروکود MAV نیز چند نکته وجود دارد. اول اینکه ضریب جذب در لایه فعال و جریان مدار کوتاه برای تابش از سمت الکتروکود MAV در تمام ضخامت‌های لایه V_2O_5 ، از ضریب جذب در لایه فعال و جریان مدار کوتاه برای تابش از سمت الکتروکود ITO کمتر است. دلیل این اتفاق به علت این است که برای تابش از سمت الکتروکود ITO نوری که در لایه فعال جذب می‌شود شامل نوری است که از الکتروکود ITO وارد می‌شود و همچنین نوری است که توسط الکتروکود MAV بازتاب می‌شود و دوباره در لایه فعال گیر می‌افتد و جذب می‌شود. بنابراین برای تابش از سمت الکتروکود 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 الکتروکود 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 الکتروکود MAV با تغییر ضخامت لایه V_2O_5 بر می‌گردد. شکل ۱ ج طیف عبور از الکتروکود MAV برای ضخامت‌های مختلف لایه V_2O_5 را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که با حضور لایه V_2O_5 ضریب عبور از الکتروکود 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 طول موج‌های 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