

Design, simulation and fabrication of perovskite solar cell based on $V_2O_5/Ag/WO_3$ transparent electrode

Madineh Nejadzangeneh¹, Mohsen Ghasemi^{*2,3}, Seyed Mohammad Bagher Ghorashi¹

¹Department of Laser and Photonics, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan, Iran

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

³Nanotechnology Research Institute, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Received: 28.11.2021 Final revised: 24.11.2022 Accepted: 06.02.2023

Doi: [10.22055/jrmbms.2023.18129](https://doi.org/10.22055/jrmbms.2023.18129)

Abstract

In this research, using the characteristic matrix theory, the three-layer $V_2O_5/Ag/WO_3$ (VAW) electrode as a transparent conductive structure is designed and its optimal structure is determined. Then, a perovskite solar cell based on a VAW three-layer electrode with Glass/ $V_2O_5/Ag/WO_3$ /PEDOT:PSS/ $CH_3NH_3PbI_3$ /PCBM/Al structure is considered and the optical properties of the perovskite solar cell are investigated using the transfer matrix method (TMM). In the following, it is shown that the effects of changing the thickness of the WO_3 layer on the optical properties of the three-layer VAW and the perovskite solar cell based on the VAW electrode are more significant than the effects of changing the thickness of the layer V_2O_5 . The maximum short circuit current density (19.3 mA/cm^2) in the perovskite solar cell based on the VAW electrode was obtained for the thicknesses of the V_2O_5 layer of 40 nm and WO_3 layer of 55 nm, which is 12.2% higher than the calculated value for perovskite solar cell based on ITO electrode (17.2 mA/cm^2). Finally, the perovskite solar cell based on the optimized VAW electrode was fabricated and the results showed that this solar cell has better performance than solar cell based on the commercial ITO electrode.

Keywords: Transparent conductive electrode, Dielectric/metal/dielectric, Perovskite solar cell, Simulation, Shortcut circuit current density

*Corresponding Author: ghasemi.mohsen@sku.ac.ir

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی بر پایه الکترو

شفاف $V_2O_5/Ag/WO_3$ مدینه نژاد زنگنه^۱، محسن قاسمی^{۲،*}، سید محمدباقر قریشی^۱^۱ گروه لیزر و فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران^۲ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران^۳ پژوهشکده فناوری نانو، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷ ویرایش نهایی: ۱۴۰۱/۰۹/۰۳ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

Doi: [10.22055/jrmb.2023.18129](https://doi.org/10.22055/jrmb.2023.18129)

چکیده

در این پژوهش الکترو سد سه لایه‌ای $V_2O_5/Ag/WO_3$ (VAW) به‌عنوان یک ساختار رسانای شفاف با استفاده از روش ماتریس مشخصه طراحی و ساختار بهینه آن تعیین می‌شود. سپس یک سلول خورشیدی پروسکایتی بر پایه الکترو سد سه لایه‌ای VAW با ساختار $Glass/V_2O_5/Ag/WO_3/PEDOT:PSS/CH_3NH_3PbI_3/PCBM/Al$ در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از فرمول‌بندی ماتریس انتقال، ویژگی‌های اپتیکی سلول خورشیدی پروسکایتی بررسی می‌شود. در ادامه نشان داده می‌شود که اثر تغییر ضخامت لایه WO_3 روی ویژگی‌های اپتیکی سه لایه‌ای VAW و سلول خورشیدی پروسکایتی بر پایه الکترو سد VAW چشمگیرتر از اثر تغییر ضخامت لایه دی الکتریک V_2O_5 است. مقدار بیشینه چگالی جریان مدار کوتاه 19.3 mA/cm^2 در سلول خورشیدی پروسکایتی، برای ضخامت لایه اکسید وانادیوم 40 نانومتر و ضخامت لایه اکسید تنگستن 55 نانومتر به‌دست آمد که از مقدار محاسبه شده برای سلول خورشیدی پروسکایتی با الکترو ITO (17.2 mA/cm^2)، 12.2% بیشتر است. در نهایت سلول خورشیدی پروسکایتی بر پایه الکترو سد بهینه شده VAW ساخته شد و نتایج نشان دادند که این سلول خورشیدی کارایی بهتری نسبت به سلول خورشیدی بر پایه الکترو سد تجاری ITO دارد.

کلیدواژگان: الکترو رسانای شفاف، دی الکتریک/فلز/دی الکتریک، سلول خورشیدی پروسکایتی، شبیه‌سازی، چگالی جریان

مدار کوتاه

مقدمه

کرده‌اند و بازده تبدیل توان گزارش شده برای آنها به 25 درصد رسیده است [۴]. یکی از پارامترهای مهم برای دستیابی به سلول‌های خورشیدی پروسکایتی با بازده بالا، ویژگی‌های الکترو سد شفاف آنهاست [۵]. الکترودهای شفاف باید هم‌زمان رسانایی سطحی و شفافیت اپتیکی بالایی داشته باشند. اکسید ایندیوم آلاییده شده با قلع^۱ (ITO) مرسوم‌ترین و در

پروسکایت‌های هیبریدی آلی-معدنی به دلیل ویژگی‌هایی نظیر گاف نواری قابل تنظیم، ضریب جذب بالا، تحرک پذیری و طول پخش زیاد حامل‌ها و همچنین قیمت پایین، گزینه مناسبی برای استفاده در سلول‌های خورشیدی هستند [۳-۱]. سلول‌های خورشیدی پروسکایتی در سال‌های اخیر به سرعت رشد

* نویسنده مسئول: ghasemi.mohsen@sku.ac.ir

¹ Indium Tin Oxide

شفافیت اپتیکی این ساختارها را کنترل کرد [۶]. ساختارهای متقارن دی‌الکترونیک/فلز/دی‌الکترونیک مانند $WO_3/Ag/WO_3$ ، $AZO/Ag/AZO$ ، $WO_3/Ag/WO_3$ ، $TiO_2/Ag/TiO_2$ ، SnO_2 ، $MoO_3/Metal/MoO_3$ و برخی ساختارهای نامتقارن نظیر $WO_3/Ag/SnO_2$ و $WO_3/Ag/MoO_3$ به‌عنوان الکترون شفاف گزارش شده است [۱۷-۱۱]. در این پژوهش الکترون چند لایه‌ای با ساختار نامتقارن $V_2O_5/Ag/WO_3$ (VAW) به‌عنوان یک الکترون جایگزین مناسب برای ITO برای اولین بار طراحی می‌شود. از پنتاکسید وانادیوم (V_2O_5) به‌خاطر ضریب شکست بالا، شفافیت بالا در ناحیه مرئی و ثبات شیمیایی استفاده شده است [۱۸]. لایه Ag به‌خاطر رسانندگی بالا و جذب کمتر در ناحیه مرئی نسبت به بقیه فلزات انتخاب شده است [۱۹]. لایه اکسید تنگستن WO_3 علاوه بر داشتن شفافیت بالا، دارای تابع کار مناسب و تحرک‌پذیری بالای حامل بار است که می‌تواند نقش لایه بافر مناسب بین آند و لایه آلی انتقال دهنده حفره را بازی کند [۲۰]. علاوه بر این WO_3 به‌علت داشتن گاف نواری بالا می‌تواند سدی برای جریان الکترون‌ها شود و در نتیجه به‌عنوان لایه سدکننده الکترون نیز می‌تواند ایفای نقش کند [۲۱]. با استفاده از چارچوب اپتیک لایه‌های نازک و نظریه ماتریس مشخصه، ویژگی‌های اپتیکی چند لایه‌ای $V_2O_5/Ag/WO_3$ را پیش‌بینی و محاسبه می‌کنیم. در ادامه، با استفاده از روش اسمیت و فرمول‌بندی ماتریس انتقال، ویژگی‌های اپتیکی یک سلول خورشیدی پروسکایتی با الکترون بهینه شده $V_2O_5/Ag/WO_3$ تعیین و تجزیه و تحلیل می‌شود. در نهایت سلول خورشیدی پروسکایتی بهینه شده بر پایه الکترون VAW ساخته شده و با سلول خورشیدی پروسکایتی بر پایه الکترون مرسوم و تجاری ITO مقایسه می‌شود.

دسترس‌ترین الکترون شفاف با ویژگی‌های اپتیکی و الکترونیک مناسب است [۶]. با این حال شکننده است و ویژگی‌های آن در دمای بالا تغییر می‌کند که کاربرد آن را برای ادوات انعطاف‌پذیر محدود می‌کند. علاوه بر این ذخیره ایندیوم محدود است و استفاده از ITO به‌معنی تحلیل بیشتر ایندیوم در آینده نزدیک است [۷]. اکسید قلع آلاییده شده با فلوئور (FTO)، هم یکی دیگر از الکترون‌های شفاف مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی است که دارای مقاومت سطحی نسبتاً پایین است [۵]. اکسیدهای فلزی شفافیت خوبی در ناحیه مرئی دارند ولی رسانندگی سطحی خوبی از خود نشان نمی‌دهند و فرآیند آلیش برای بالا بردن رسانندگی‌شان هم فرآیندی دما بالا است [۸]. لایه‌های فلزی بسیار نازک هم علی‌رغم داشتن مقاومت سطحی پایین، شفافیت پایینی در ناحیه مرئی دارند و پایداری محیطی آنها نیز کم است [۸]. نانولوله‌های کربنی و گرافن هم با وجود داشتن انعطاف‌پذیری خوب، نسبت به ITO مقاومت الکترونیک بالایی دارند [۹، ۱۰]. ساختارهای چندلایه‌ای دی‌الکترونیک/فلز/دی‌الکترونیک که در دیودهای نورگسیل آلی و سلول‌های خورشیدی آلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، گزینه‌های رقابتی برای جایگزینی الکترون ITO به‌شمار می‌روند [۱۱]. این ساختارها ویژگی‌های امیدوارکننده‌ای نظیر خواص الکترونیک و اپتیکی قابل تنظیم از طریق تغییر ضخامت و جنس مواد، انباشت در دمای محیط، پایداری مکانیکی قابل انعطاف، یکنواختی سطحی قابل قبول و پایداری دمایی مناسب دارند. رسانایی الکترونیک این چند لایه‌ای‌ها اغلب به ضخامت فلز بستگی دارد که برای گذار از جزایر مجزا به لایه پیوسته باید ضخامت لایه فلزی در حدود ۲۰-۱۰ نانومتر انتخاب شود. با انتخاب مواد مناسب و ضخامت لایه‌های دی‌الکترونیک می‌توان

¹ -Fluorine-doped tin oxide

تئوری

$$\eta_r = \begin{cases} N_r \cos \theta_r = (n_r - ik_r) \cos \theta_r & \text{قطبش } s \\ \frac{N_r}{\cos \theta_r} = \frac{(n_r - ik_r)}{\cos \theta_r} & \text{قطبش } p \end{cases} \quad ۲$$

$$\delta_r = \frac{2\pi}{\lambda} N_r \cos \theta_r \quad ۳$$

در نهایت ضریب عبور و بازتاب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

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

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

که اندیس 0 مربوط به محیط ورودی و اندیس m مربوط به زیرلایه است [۲۳]. مقاومت سطحی ساختار چندلایه‌ای رسانای شفاف هم از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$R_{sh} = \frac{Z_0}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{R}} - 1 \right) \quad ۶$$

که در آن R بازتاب در ناحیه فروسرخ، R_{sh} مقاومت سطحی، $Z_0 = 377 \Omega$ امپدانس فضای آزاد است. رابطه ۶ ناشی از بازتاب در ناحیه فروسرخ توسط الکترون‌های رسانش است. در اینجا بازتاب در طول موج ۱۷۰۰ نانومتر می‌تواند به عنوان معیاری برای بازتاب در ناحیه فروسرخ به کار برده شود [۲۴]. ضریب شایستگی^۲ برای بررسی و مقایسه عملکرد لایه‌های رسانای شفاف تعریف شده است و شاخص مهمی است که رابطه بین خواص الکتریکی و اپتیکی پوشش‌های رسانای شفاف

در این بخش ابتدا ویژگی‌های الکترواپتیکی سه لایه‌ای دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک (DMD)^۱ به‌تنهایی و سپس ویژگی‌های سلول خورشیدی با الکتروود شفاف DMD فرمول‌بندی می‌شود.

ویژگی‌های الکترواپتیکی چند لایه دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک

ویژگی‌های اپتیکی چندلایه‌ای‌های دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک را می‌توان با استفاده از اپتیک لایه‌های نازک و تئوری ماتریس مشخصه بررسی و تحلیل کرد. در این تئوری فرض می‌شود که تمام لایه‌های انباشت شده تخت و همگن هستند، نور از یک زیرلایه نیمه بی‌نهایت که در آن ضخامت زیرلایه از لایه‌های روی آن بسیار بزرگتر است در راستای عمود وارد ساختار چندلایه‌ای می‌شود و کل ساختار توسط هوا احاطه شده است. این مدل بعد از وارد کردن ضریب شکست مختلط و ضخامت هر لایه به عنوان داده‌های ورودی، امکان محاسبه طیف تراگسیل، بازتاب و جذب کل ساختار چندلایه‌ای را فراهم می‌کند [۲۲]. براساس این تئوری، برای ساختارهای چندلایه‌ای که نور از چندین مرز عبور می‌کند، رابطه بین موج فرودی و عبوری به صورت زیر است:

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

که در آن k تعداد لایه‌هاست. δ_r ضخامت فازی و η_r گذرای اپتیکی مختلط هر لایه است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

² Figure of Merit

¹ Dielectric Metal Dielectric

ورودی به لایه‌های ۱ تا m که بین محیط شفاف و زیرلایه ساندویچ شده‌اند را نشان می‌دهد. در هر نقطه x داخل ساختار در لایه j ام در نظر گرفته می‌شود و میدان الکتریکی از مؤلفه مثبت $E_j^+(x)$ و یک مؤلفه منفی $E_j^-(x)$ تشکیل شده است. در فصل مشترک لایه j و k ، انتشار میدان الکتریکی به وسیله ماتریس مرزی I_{jk} به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$I_{jk} = \frac{1}{t_{jk}} \begin{bmatrix} 1 & r_{jk} \\ r_{jk} & 1 \end{bmatrix} \quad ۹$$

که r_{jk} و t_{jk} به ترتیب ضرایب بازتاب و عبوری برای یک موج تخت در مرز بین لایه j و k است. از طرف دیگر با انتشار نور در لایه تغییر فاز به وجود می‌آید که با ماتریس انتقال فاز به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$I_j = \begin{bmatrix} e^{-ik_j d_j} & 0 \\ 0 & e^{ik_j d_j} \end{bmatrix}, k_j = \frac{2\pi N_j \cos \theta_j}{\lambda} \quad ۱۰$$

که d_j و N_j ضریب شکست مختلط و ضخامت لایه j ام و θ_j زاویه شکست نور در لایه j ام است. رابطه میدان الکتریکی محیط‌های پیرامون (لایه‌های خارجی ۰ام و $m+1$ ام) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} E_{m+1}^+ \\ E_{m+1}^- \end{bmatrix} \quad ۱۱$$

که S ماتریس انتقال کل ساختار است و با ضرب ماتریس‌های انتقال به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \left(\prod_{v=1}^m I_{(v-1)v} L_v \right) I_{m(m+1)} \quad ۱۲$$

رابطه کلی که توزیع میدان الکتریکی در هر لایه j در ساختار را توصیف می‌کند به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E_j(x) = E_j^+(x) + E_j^-(x) = t_j^+ \left[e^{-ik_j x} + r_j'' e^{-ik_j(2d_j-x)} \right] E_0^+ \quad ۱۳$$

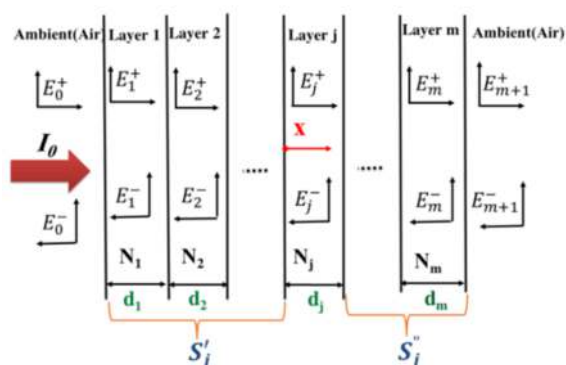
را نشان می‌دهد. این کمیت توسط هاک^۱ به صورت زیر تعریف شده است [۲۵]:

$$F_{TC} = \frac{T_{av}^{10}}{R_{sh}} \quad ۷$$

T_{av} میانگین عبور اپتیکی الکتروود شفاف در گستره طول موج نور خورشید است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{av} = \frac{\int T(\lambda) u_{AM1.5}(\lambda) d\lambda}{\int u_{AM1.5}(\lambda) d\lambda} \quad ۸$$

که $T(\lambda)$ طیف تراکسیل الکتروود شفاف و $u_{AM1.5}(\lambda)$ طیف چگالی شار نور خورشید است.



شکل ۱. ساختار چند لایه و میدان‌های الکتریکی داخل آن.

ویژگی‌های اپتیکی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مبتنی بر الکتروود چند لایه دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک

با استفاده از روش ماتریس انتقال و بر اساس مدل پترسون [۲۶] می‌توان خصوصیات اپتیکی سلول خورشیدی پروسکایتی را پیش‌بینی کرد. این روش فرض می‌کند تمام لایه‌ها همگن و همسانگرد باشند، فصل مشترک لایه‌ها مسطح و موازی‌اند و موج فرودی را با امواج تخت توصیف می‌کند. شکل ۱ موج‌های

^۱ Haacke

$$|E_j(x, \lambda)|^2 = \frac{n_0}{n_j} T_{DMD}(\lambda) \times \frac{e^{-\alpha_j x + R_m e^{-\alpha_j (2d_j - x)} + 2\sqrt{R_m} \cos\left[\frac{4\pi n_j}{\lambda}(d_j - x)\right]}}{|1 - \sqrt{R_m} R_{DMD} e^{-\alpha_j d_j} e^{-i\Delta\phi_j}|^2} \times |E_0^+|^2 \quad ۱۹$$

$$\Delta\phi_j = \phi_m + \phi_{DMD} + \sum_i \frac{4\pi n_i}{\lambda} d_i, \quad ۲۰$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

که T_{DMD} و R_{DMD} به ترتیب ضریب عبور و بازتاب از الکتروود سه لایه DMD ، ϕ_m و ϕ_{DMD} به ترتیب اختلاف فاز ناشی از بازتاب از سطح الکتروود فلزی و الکتروود سه لایه DMD است. اندیس i شامل لایه‌های بین دو الکتروود است (مانند لایه انتقال دهنده حفره (HTL^۱))، لایه فعال و لایه انتقال دهنده الکترون (ETL^۲)) [۲۸]. هنگامی که در سلول‌های خورشیدی لایه فعال توسط دو الکتروود بازتابنده ساندویچ می‌شود، میکروکاوک نوری تشکیل می‌شود. به منظور دستیابی به یک تشدید قوی در یک ساختار میکروکاوکی، ضخامت لایه فعال باید قابل مقایسه یا کوچکتر از طول موج نور مرئی باشد. در کاواک ممکن است تداخل سازنده یا مخرب رخ دهد. در اینجا برای یک طول موج معین λ شرایط تشدید نوری زمانی رخ می‌دهد که $\Delta\phi_j = m\lambda/2$ ، که منجر به بیشینه جذب در لایه جاذب می‌شود [۳]. تغییر در هر کدام از لایه‌های بین دو الکتروود فلزی منجر به تغییر ساختار کاواک و ویژگی‌های آن می‌شود. با استفاده از رابطه ۱۹ می‌توان متوسط انرژی جذب شده در واحد زمان را به صورت زیر به دست آورد:

$$Q(x, \lambda) = \frac{1}{2} c \epsilon_0 \alpha n |E(x, \lambda)|^2 \quad ۲۱$$

و در حالت ایده‌آل چگالی جریان مدار کوتاه نیز به صورت زیر قابل محاسبه است [۲۹]:

E_0^+ میدان الکتریکی نور ورودی از محیط پیرامون است. t_j^+ و r_j'' به ترتیب ضرایب عبور و بازتاب مختلط لایه j ام هستند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$t_j^+ = [S'_{j11} + S'_{j12} r_j'' e^{-2ik_j d_j}]^{-1} \quad ۱۴$$

$$r_j'' = S''_{j11} / S''_{j11} \quad ۱۵$$

S'_j و S''_j به ترتیب ماتریس‌های انتقال مجموعه لایه‌های قبل و بعد لایه j ام هستند و به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$S'_j = \begin{bmatrix} S'_{j11} & S'_{j12} \\ S'_{j21} & S'_{j22} \end{bmatrix} = \left(\prod_{v=1}^{j-1} I_{(v-1)v} L_v \right) I_{(j-1)j} \quad ۱۶$$

$$S''_j = \begin{bmatrix} S''_{j11} & S''_{j12} \\ S''_{j21} & S''_{j22} \end{bmatrix} = \left(\prod_{v=j+1}^m I_{(v-1)v} L_v \right) I_{m(m+1)} \quad ۱۷$$

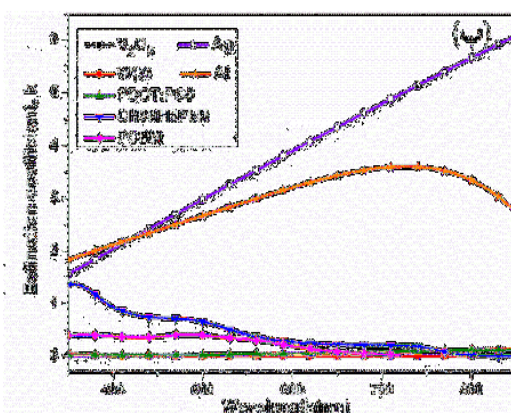
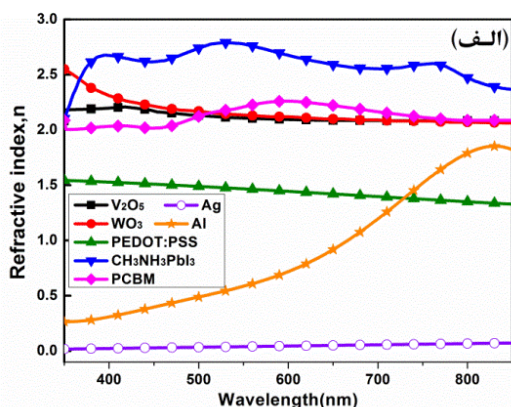
در واقع S'_j و S''_j ماتریس‌های انتقال جزئی‌اند که به صورت $S = S'_j L_j S''_j$ با ماتریس انتقال کل مرتبط‌اند [۲۷]. با جای‌گذاری روابط ۱۴ و ۱۵ در رابطه ۱۳ میدان الکتریکی در نقطه x در لایه j ام می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$E_j(x) = \frac{S''_{j11} e^{-ik_j(d_j-x)} + S''_{j21} e^{ik_j(d_j-x)}}{S'_{j11} S''_{j11} e^{-ik_j d_j} + S'_{j12} S''_{j21} e^{ik_j d_j}} E_0^+ \quad ۱۸$$

برای سلول خورشیدی با الکتروود سه‌لایه‌ای دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک (DMD)، با محاسبه ماتریس‌های انتقال جزئی و جای‌گذاری عناصر آن در رابطه بالا، مجذور میدان الکتریکی در لایه فعال به صورت زیر به دست می‌آید:

² Electron transport layer-

¹- Hole transport layer

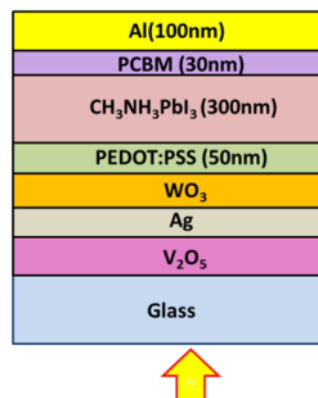


شکل ۳. ثوابت اپتیکی مواد استفاده شده در این مطالعه، (الف) ضریب شکست حقیقی n، (ب) ضریب خاموشی k [۳۰-۳۷ و ۳۰].

شبیه‌سازی‌های این پژوهش در نرم‌افزار Mathcad انجام شده است و ضرایب شکست لایه‌ها برحسب طول موج و ضخامت هر لایه به‌عنوان ورودی‌های مسئله هستند. ضرایب شکست مختلط مورد استفاده در این کار از مقالات تجربی مراجع [۲۸-۳۰ و ۳۵] استخراج و در شکل ۳ نمایش داده شده است.

$$J_{sc} = e \iint \frac{Q(x,\lambda)\lambda}{hc} d\lambda dx \quad ۲۲$$

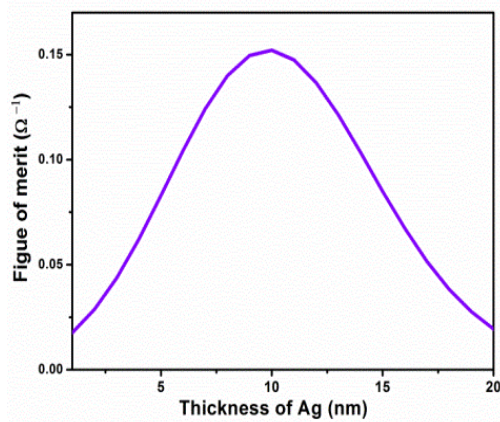
که در آن h ثابت پلانک، c سرعت نور در خلأ و e بار الکترون است.



شکل ۲. طرح نمادین سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده.

نتایج شبیه‌سازی

ساختار کلی سلول خورشیدی بررسی شده در این پژوهش در شکل ۲ الف نشان داده شده است. در این سلول خورشیدی با ساختار معکوس، سه‌لایه‌ای VAW ($V_2O_5/Ag/WO_3$) به‌عنوان الکتروود شفاف دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک (DMD)، PEDOT:PSS به‌عنوان لایه انتقال دهنده حفره (HTL)، لایه پروسکایت $CH_3NH_3PbI_3$ به‌عنوان لایه فعال، PCBM به‌عنوان لایه انتقال دهنده الکترون و لایه Al کاتد است. در تمام مراحل شبیه‌سازی قسمت‌های بعد، تنها ضخامت لایه‌های سه‌لایه‌ای VAW تغییر می‌کنند و بقیه لایه‌ها ضخامت‌شان به‌صورتی که در شکل ۲ نشان داده شده، ثابت است.

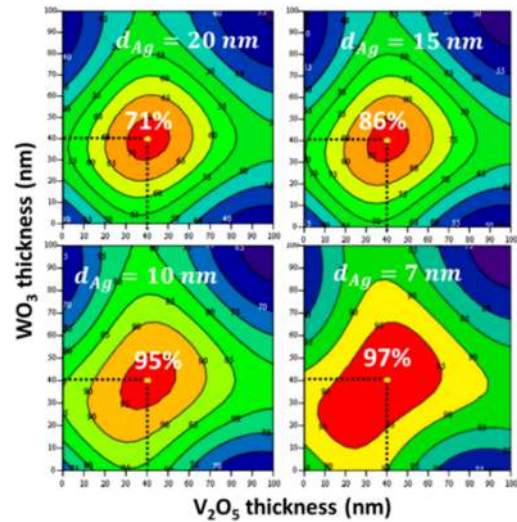


شکل ۵. تغییرات ضریب شایستگی با تغییر ضخامت لایه نقره را وقتی که ضخامت لایه V_2O_5 ، ۴۰ نانومتر و ضخامت لایه WO_3 ، ۴۰ نانومتر.

ضخامتی از Ag که در آن ضریب شایستگی ماکزیمم می‌شود، می‌بایست محاسبه شود. شکل ۵ تغییرات ضریب شایستگی با تغییر ضخامت لایه نقره را وقتی که ضخامت لایه V_2O_5 ، ۴۰ نانومتر و ضخامت لایه WO_3 ، ۴۰ نانومتر باشد نشان می‌دهد و مشخص است ضخامت ۱۰ نانومتر لایه نقره، بیشترین مقدار ضریب شایستگی را دارد. پس ساختار بهینه سه لایه‌ای VAW برای داشتن همزمان شفافیت اپتیکی بالا و مقاومت سطحی است.

تأثیر ضخامت لایه‌های WO_3 و V_2O_5 بر ویژگی‌های سلول خورشیدی پروسکایتی بر پایه الکتروود VAW

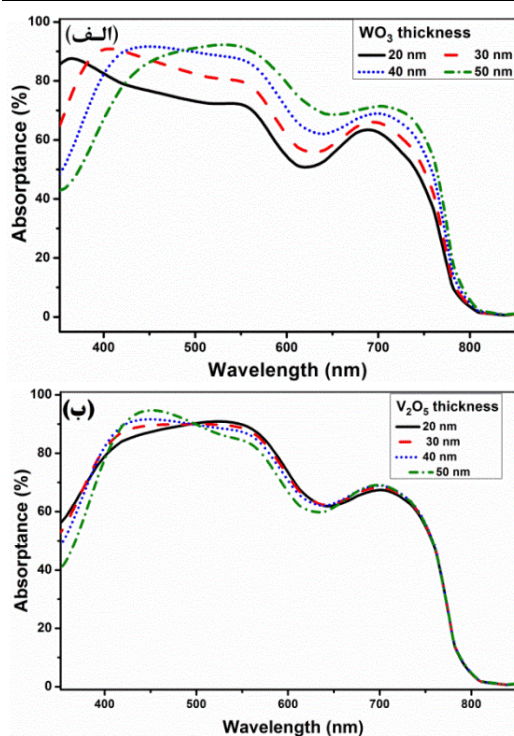
در قسمت قبل ویژگی اپتیکی سه لایه‌ای VAW به‌تنهایی بررسی شد، در حالی که برای تکمیل بررسی مؤثر بودن الکتروود شفاف VAW برای استفاده در سلول خورشیدی باید ویژگی‌های سلول خورشیدی پروسکایتی با این الکتروود نیز بررسی شود. شکل ۶ طیف جذب در لایه فعال سلول خورشیدی پیشنهادی را نشان می‌دهد که در نمودار الف ضخامت لایه V_2O_5 و Ag ثابت و برابر مقدار بهینه به‌دست آمده در قسمت قبل، یعنی به ترتیب ۴۰ و ۱۰ نانومتر در نظر گرفته شده



شکل ۴. تغییرات ضریب عبور متوسط در ناحیه مرئی T_{av} نسبت به تغییر ضخامت لایه‌های V_2O_5 و WO_3 برای مقادیر مختلف ضخامت لایه نقره.

بهینه‌سازی خواص اپتیکی سه لایه‌ای VAW

یکی از پارامترهای مهم برای بررسی کیفیت الکتروود شفاف، شفافیت آنها در ناحیه مرئی است. در اینجا ضریب عبور نور وقتی از سمت زیر لایه شیشه‌ای وارد سه لایه‌ای $V_2O_5/Ag/WO_3$ (VAW) می‌شود و از لایه PEDOT:PSS خارج می‌شود محاسبه و ضریب عبور متوسط در ناحیه مرئی T_{av} بهینه می‌شود. شکل ۴ ضریب عبور در ناحیه مرئی را برحسب تغییر ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک WO_3 و V_2O_5 نشان می‌دهد، در حالی که برای هر کدام از شکل‌ها ضخامت لایه فلزی Ag ثابت است. همان‌طور که برای همه ضخامت‌های Ag، بیشینه T_{av} زمانی اتفاق می‌افتد که ضخامت لایه اکسید وانادیوم ۴۰ نانومتر و ضخامت لایه اکسید تنگستن ۴۰ نانومتر باشد، یعنی با تغییر ضخامت لایه Ag، ضخامت‌های بهینه WO_3 و V_2O_5 تغییر نمی‌کند ولی مقدار تراگسیل متوسط بیشینه در ناحیه مرئی و در نتیجه ضریب شایستگی تغییر می‌کند.

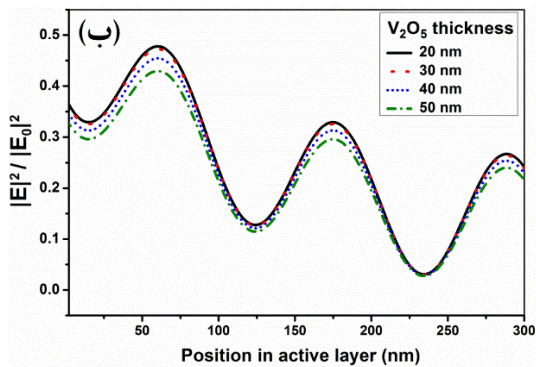
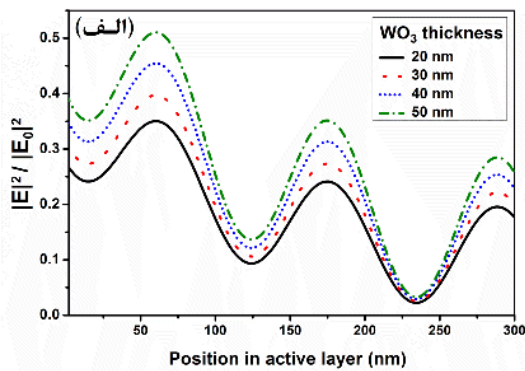


شکل ۶. جذب محاسبه شده در لایه فعال سلول خورشیدی پروسکایتی مورد بررسی الف: برای ضخامت‌های متفاوت لایه WO_3 ب: برای ضخامت‌های متفاوت لایه V_2O_5 .

میانگین جذب در لایه فعال پروسکایت در محدوده طول موج از ۴۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر به‌عنوان تابعی از ضخامت لایه‌های WO_3 و V_2O_5 در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است بیشینه میانگین جذب (۷۳٫۷ درصد) در ضخامت ۴۰ نانومتر لایه V_2O_5 و ۵۰ نانومتر لایه WO_3 رخ می‌دهد. مشاهده می‌شود برای یک ضخامت ثابت ۵۰ نانومتر از WO_3 ، وقتی ضخامت لایه V_2O_5 صفر تا صد نانومتر تغییر می‌کند، میانگین جذب در محدوده ۷۳-۶۰ درصد تغییر می‌کند و برای یک ضخامت ثابت ۴۰ نانومتر از V_2O_5 ، وقتی ضخامت لایه WO_3 صفر تا صد نانومتر تغییر می‌کند، این بدین معنی است که میانگین جذب به تغییر

و ضخامت لایه WO_3 تغییر می‌کند و در نمودار ۶ ضخامت لایه WO_3 و Ag ثابت و برابر مقدار بهینه به‌دست آمده در قسمت قبل یعنی به ترتیب ۴۰ و ۱۰ نانومتر در نظر گرفته شده و ضخامت لایه V_2O_5 تغییر می‌کند. همان‌گونه که دیده می‌شود با تغییر ضخامت لایه WO_3 نسبت به حالت تغییر ضخامت لایه V_2O_5 شکل طیف جذبی تغییرات بیشتری دارد (هم از لحاظ شدت پیک جذبی و هم طول موج پیک جذبی). در واقع جذب در لایه جاذب سلول خورشیدی به تغییر ضخامت لایه WO_3 حساس‌تر از تغییر ضخامت لایه V_2O_5 است. در رابطه ۱۹ ضریب بازتاب و تغییر فاز ناشی از بازتاب از سطح VAW لحاظ می‌شود. از آنجایی‌که عمده بازتاب از سطح VAW از مرز Ag/WO_3 رخ می‌دهد، پس تغییر در ضخامت لایه WO_3 به‌طور مستقیم در ϕ_{DMD} ظاهر می‌شود و در نتیجه تغییر در ضخامت لایه WO_3 مستقیم در میدان الکتریکی، جذب و چگالی جریان مدار کوتاه اثرگذار است، در صورتی‌که تغییر در ضخامت لایه V_2O_5 فقط به‌اندازه تغییر در T_{DMD} نمود پیدا می‌کند. لازم به‌ذکر است در سلول خورشیدی پروسکایتی بررسی شده در اینجا، لایه WO_3 قبل از لایه آلی PEDOT:PSS قرار می‌گیرد و به‌عنوان یک لایه بافر و تزریق‌کننده حفره (HIL) باعث می‌شود لایه‌های Ag/WO_3 از نظر تابع کار برای آند شدن مناسب باشند. برعکس، لایه V_2O_5 بیشتر برای تنظیم ویژگی‌های اپتیکی الکتروود سه لایه‌ای استفاده می‌شود [۳۶].

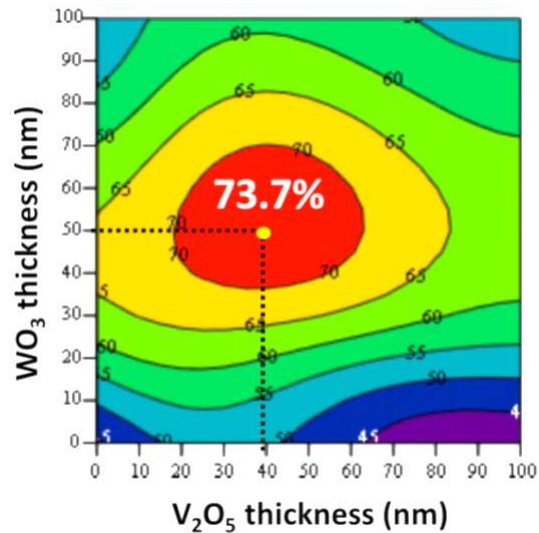
وجود دارد که توسط پارامترهای لایه جاذب و کاتد فلزی تعیین می‌شود و نقش DMD تنها در تعیین شدت مجذور میدان الکتریکی است [۲۸]. با مقایسه شکل ۸ الف و ۸ ب مشخص است که تغییر ضخامت لایه WO_3 نسبت به تغییر ضخامت لایه V_2O_5 تأثیر بیشتری روی شدت میدان الکتریکی در لایه جاذب دارد. لایه WO_3 یکی از لایه‌های میکروکاوک است و تغییر ضخامت آن طول کاواک را تغییر می‌دهد و در نتیجه انتظار داریم شدت میدان الکتریکی را تغییر دهد، ولی لایه V_2O_5 تنها تأثیرش روی T_{DMD} است.



شکل ۸ مجذور میدان الکتریکی نسبی (نسبت به میدان فرودی E_0) در طول موج ۶۰۰ نانومتر در لایه جاذب سلول خورشیدی پروسکایتی مورد بررسی (الف) برای ضخامت‌های متفاوت لایه WO_3 (ب) برای ضخامت‌های متفاوت لایه V_2O_5

تغییرات چگالی جریان مدار کوتاه (J_{SC}) سلول خورشیدی طراحی شده برحسب تغییر ضخامت لایه‌های WO_3 و V_2O_5 در شکل ۹ نشان داده شده

ضخامت لایه WO_3 بیشتر از تغییر ضخامت لایه V_2O_5 حساس است.



شکل ۷. میانگین جذب در لایه فعال سلول خورشیدی پروسکایتی مورد بررسی در محدوده طول موجی ۴۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر برحسب تغییر ضخامت لایه‌های WO_3 و V_2O_5 .

شکل ۸ تغییرات نسبی مجذور میدان الکتریکی (نسبت به میدان فرودی E_0) در لایه فعال سلول خورشیدی مورد مطالعه برحسب فاصله از مرز لایه فعال/لایه انتقال دهنده حفره و به‌طور نوعی برای طول موج ۶۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد. در شکل ۸ الف ضخامت لایه V_2O_5 ثابت و برابر ۴۰ نانومتر در نظر گرفته شده و ضخامت لایه WO_3 تغییر می‌کند، و در قسمت ۸ ب ضخامت لایه WO_3 ثابت ۴۰ نانومتر در نظر گرفته شده و ضخامت لایه V_2O_5 تغییر می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود مجذور میدان الکتریکی در لایه جاذب پروسکایتی روند نزولی دارد که این نشان‌دهنده کاهش شدت در این لایه است. نکته دیگر اینکه توزیع فضایی مجذور میدان الکتریکی در لایه جاذب مستقل از ساختار DMD است و با تغییر ضخامت لایه‌های DMD تنها شدت میدان تغییر می‌کند. در رابطه ۱۹، توزیع فضایی مجذور میدان الکتریکی در صورت کسر

ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی

به منظور بررسی عملکرد الکتروود بهینه شده، سلول خورشیدی پروسکایتی با ساختار زیر:

Glass/V₂O₅(40nm)/Ag(10nm)/WO₃(55nm)/PEDOT:PSS(50nm)/CH₃NH₃PbI₃(300nm)/PCBM(30nm)/Al(100nm)

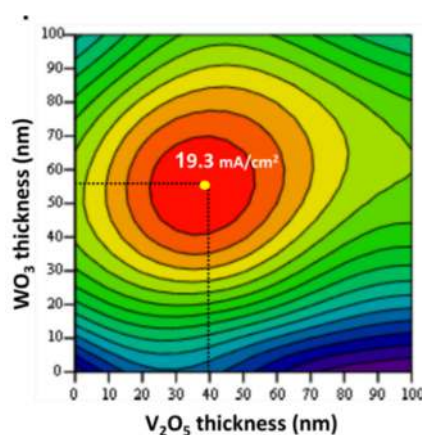
ساخته شد. ابتدا زیرلایه‌های شیشه‌ای به ترتیب با استون، اتانول، متانول و دی‌کلرومتان به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه آلتراسونیک تمیز شدند. پس از شستشو با آب مقطر، قبل از قرار دادن در محفظه خلأ با گاز نیتروژن خشک شدند. لایه‌های الکتروود سه لایه‌ای V₂O₅/Ag/WO₃ تحت خلأ

۵×۱۰^{-۵} میلی بار روی زیرلایه‌های تمیز شده و بدون شکستن خلأ به صورت متوالی با استفاده از دستگاه تبخیر حرارتی (مدل TE302 ساخت شرکت یارنیکان صالح ایران) انباشت شدند. در طی انباشت، نرخ انباشت لایه‌های WO₃ و V₂O₅ ۰/۱ نانومتر بر ثانیه و Ag ۰/۰۵ نانومتر بر ثانیه انتخاب شدند. پس از لایه‌نشانی، الکتروود سه لایه‌ای در هوا و در دمای ۱۸۰°C به مدت یک ساعت بازپخت شدند. برای این منظور، متوسط آهنگ افزایش دما تا رسیدن به دمای ۱۸۰°C، ۹°C/min انتخاب شد و پس از رسیدن به دمای مذکور ۶۰ دقیقه در این دما فرآیند بازپخت انجام شد. مقاومت این الکتروود با دستگاه گمانه چهار نقطه‌ای ۵/۹ اهم بر مربع و میانگین ضریب عبور در ناحیه مرئی با دستگاه اسپکتروفوتومتر (مدل Shimadzu-UV 3100) ۸۸/۳ درصد اندازه‌گیری شد. بعد از آماده‌سازی الکتروود VAW، لایه انتقال دهنده حفره PEDOT:PSS با دستگاه لایه‌نشانی چرخشی (مدل VLC 409-G) روی الکتروود VAW با سرعت ۳۲۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۶۰ ثانیه لایه‌نشانی شد و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۵۰°C خشک شد. برای لایه‌نشانی لایه

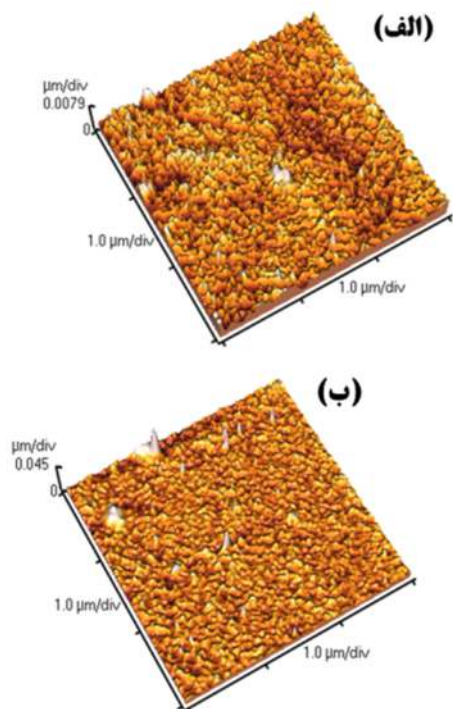
است. همان طوری که مشخص است بیشینه J_{SC} (۱۹,۳ mA/cm²) زمانی اتفاق می‌افتد که ضخامت لایه V₂O₅ ۴۰ نانومتر و ضخامت لایه WO₃ ۵۵ نانومتر باشد. مشاهده می‌شود برای یک ضخامت ثابت ۵۵ نانومتر از WO₃، وقتی ضخامت لایه V₂O₅ صفر تا صد نانومتر تغییر می‌کند، J_{SC} در محدوده ۱۷-۱۹,۳ mA/cm² برای یک ضخامت ثابت ۴۰ نانومتر از V₂O₅، وقتی ضخامت لایه WO₃ صفر تا صد نانومتر تغییر می‌کند، J_{SC} در محدوده ۱۳-۱۹,۳ mA/cm² تغییر می‌کند و این بدین معنی است که حساسیت J_{SC} به تغییر ضخامت لایه WO₃ بیشتر از تغییر ضخامت لایه V₂O₅ است. به منظور مقایسه محاسبات J_{SC} برای سلول خورشیدی با الکتروود ITO با ساختاری مشابه یعنی ساختار زیر:

Glass/ITO(120nm)/PEDOT:PSS(50nm)/CH₃NH₃PbI₃(300nm)/PCBM(30nm)/Al(100nm)

نیز انجام شد و مقدار J_{SC} برای ۱۷,۲ mA/cm² محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بیشینه J_{SC} محاسبه شده برای سلول خورشیدی مبتنی بر الکتروود VAW (۱۹,۳ mA/cm²) به اندازه ۱۲,۲٪ از سلول مبتنی بر لایه‌های ITO بیشتر است.



شکل ۹. جریان چگالی مدار کوتاه J_{SC} محاسبه شده سلول خورشیدی پروسکایتی بر حسب تغییر ضخامت لایه‌های V₂O₅ و WO₃.



شکل ۱۰. تصاویر AFM از سطح الف: سه لایه‌ای VAW و ب: ITO تجاری.

منحنی مشخصه $J-V$ در تاریکی و تحت روشنایی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی با الکتروود VAW بهینه شده و ITO در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای فتوولتائیک مربوط به این سلول‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

با استفاده از الکتروود VAW به علت حضور لایه تزریق کننده حفره WO_3 و همچنین بهبود ویژگی‌های سطح الکتروود، تزریق حامل‌های بار بهبود می‌یابد و منجر به افزایش چگالی جریان در حالت تاریکی نسبت به الکتروود ITO می‌شود. جریان مدار کوتاه سلول خورشیدی پروسکایتی با الکتروود VAW تحت روشنایی 17.6 mA/cm^2 است در حالی که این کمیت برای سلول خورشیدی پروسکایتی با الکتروود ITO مقدار 15.9 mA/cm^2 است. ضریب پرشدگی نیز از 49.34 درصد به 60.32 درصد ارتقاء می‌یابد.

پروسکایتی از روش دو مرحله‌ای استفاده شده است. در این روش ابتدا با روش لایه‌نشانی چرخشی با سرعت چرخش 4000 دور بر دقیقه محلول یدید سرب روی لایه‌های قبلی لایه‌نشانی شد و سپس با غوطه‌ور کردن نمونه‌ها درون محلول متیل آمونیوم یدید به مدت 5 دقیقه، لایه پروسکایتی تشکیل می‌شود. در نهایت نمونه‌های آماده شده در دمای 70°C به مدت 20 دقیقه خشک شدند. روی لایه پروسکایتی لایه انتقال دهنده الکترون PCBM محلول در 1 و 2 دی کلروبنزن با دستگاه لایه‌نشانی چرخشی با سرعت 1200 دور بر دقیقه در مدت 60 ثانیه لایه‌نشانی شد. در آخر هم کاتد Al به ضخامت 120 نانومتر با استفاده از دستگاه تبخیر حرارتی در محفظه خلأ لایه نشانی شد. برای مقایسه، یک سلول خورشیدی پروسکایتی مشابه روی الکتروود تجاری در دسترس ITO (با مقاومت سطحی 15 اهم بر مربع و عبور متوسط 86.2 درصد در ناحیه مرئی) همزمان ساخته شد. اندازه‌گیری منحنی‌های جریان-ولتاژ سلول‌های خورشیدی پروسکایتی تحت تابش نور و در تاریکی با استفاده از شبیه‌ساز خورشیدی با شدت 100 mw/cm^2 و دستگاه مشخصه یاب I-V (مدل Keithley 2400) انجام شد. از آنجایی که مورفولوژی سطحی الکتروودها نقش مهمی در کاهش مقاومت تماسی و کاهش نشت جریان تماسی در سلول‌های خورشیدی ایفا می‌کند [۳۷]، از سطح سه لایه‌ای بهینه شده VAW و لایه ITO تجاری تصاویر AFM با استفاده از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM مدل Veeco-auto probe-cp_research) تهیه شد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. جذر میانگین مربعی ناهمواری سطحی (RMS) برای سه لایه‌ای VAW مقدار 1.31 nm و برای لایه ITO مقدار 2.82 nm تعیین شد که هموارتر بودن سطح الکتروود VAW نسبت به ITO را نشان می‌دهد.

همکار [۴۰]، در سلول خورشیدی پروسکایتی از لایه ITO به‌عنوان جایگزین الکتروود $\text{SnO}_2/\text{Au}/\text{SnO}_2$ بهره‌جستند که جریان مدار کوتاه آن 13.19 mA/cm^2 و بازده این سلول ۸.۳٪ گزارش شد که مقادیرشان از نتایج ما کمتر هستند.

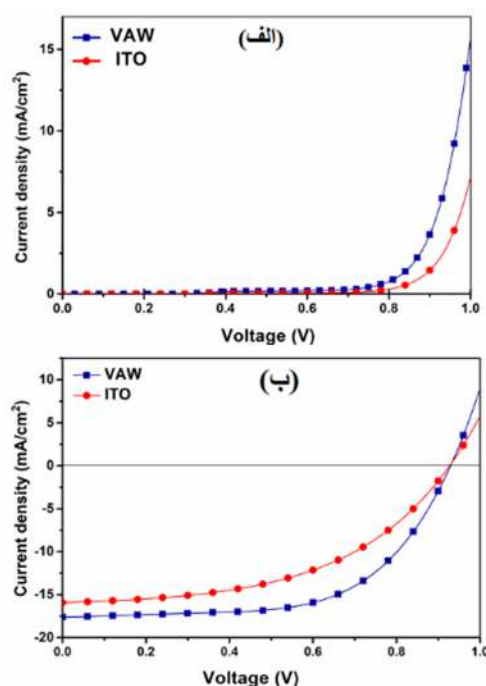
به‌طور کلی نتیجه می‌گیریم که ساختار چند لایه‌ای $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Ag}/\text{WO}_3$ به‌عنوان یک الکتروود مؤثر در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی می‌تواند جایگزین مناسبی برای الکتروود مرسوم ITO باشد.

جدول ۱. مشخصات سلول‌های خورشیدی پروسکایتی با الکترودهای متفاوت VAW و ITO.

الکتروود	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF (%)	η_p (%)
ITO	۱۵.۹۲	۰.۹۳	۴۹.۳۴	۷.۳۰
VAW	۱۷.۶۰	۰.۹۳	۶۰.۳۲	۹.۸۷

نتیجه‌گیری

در این مقاله سامانه چندلایه‌ای رسانای شفاف $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Ag}/\text{WO}_3$ (VAW) به‌عنوان جایگزینی مناسب برای اکسید ایندیوم آلیبده‌شده با قلع ITO با استفاده از نظریه ماتریس مشخصه لایه‌های نازک و با تکیه بر خواص اپتیکی طراحی و شبیه‌سازی شده است. ساختار بهینه سامانه سه لایه‌ای رسانای شفاف $\text{V}_2\text{O}_5(40\text{nm})/\text{Ag}(10\text{nm})/\text{WO}_3(40\text{nm})$ تعیین شد و مقدار تراگسیل متوسط برای این ساختار در ناحیه مرئی، ۹۵ درصد محاسبه شده است. با استفاده از روش ماتریس انتقال ویژگی‌های اپتیکی یک سلول خورشیدی پروسکایتی بر پایه الکتروود سه لایه‌ای VAW با ساختار $\text{Glass}/\text{V}_2\text{O}_5/\text{Ag}/\text{WO}_3/\text{PDOT}:\text{PSS}/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{PCBM}/\text{Al}$



شکل ۱۱. منحنی مشخصه چگالی جریان-ولتاژ الف: در تاریکی، ب: تحت روشنایی با آندهای VAW و ITO.

افزایش چگالی جریان مدار کوتاه و ضریب پرشدگی در سلول بر پایه الکتروود VAW ناشی از اثرات تزریق کنندگی حفره لایه WO_3 ، هموارتر بودن سطح لایه VAW و کمتر بودن مقاومت سطحی الکتروود VAW نسبت به ITO است. همچنین، مشاهده می‌شود که V_{oc} هر دو سلول تقریباً یکسان هستند که این پدیده به دلیل یکسان بودن پتانسیل داخلی دو سلول است [۳۸]. همچنین نتایج نشان داد بازده از مقدار ۷.۳٪ به ۹.۸۷٪ افزایش می‌یابد یعنی بازده تبدیل توان سلول خورشیدی پروسکایتی ساخته شده بر الکتروود بهینه شده VAW، ۲.۵۷٪ بالاتر از سلول ساخته شده با الکتروود ITO است. برای مقایسه دانگ^۱ و همکاران [۳۹]، از سامانه سه لایه‌ای $\text{AZO}/\text{Au}/\text{AZO}$ به‌جای FTO در سلول خورشیدی پروسکایتی استفاده نمودند و بازده تبدیل توان ۹.۵٪ را گزارش نمودند که قابل مقایسه با نتیجه حاصل از این پژوهش است. همچنین لاکارلی^۲ و

² Giulia Lucarelli

¹ Tran-Van Dang

8 19 (2018) 125-138.
<https://doi.org/10.22055/jrmbms.2018.13963>

[2] A. Mohammadbeigi, S.M. Ghorashi, The Study of Different Electron Transporting Materials on the Optical Performance of the Perovskite Solar Cells, *Journal of Research on Many-body Systems* **10** 1 (2020) 77-86.
<https://doi.org/10.22055/jrmbms.2018.13893>

[3] F. He, H. You, X. Li, D. Chen, S. Pang, W. Zhu, H. Xi, J. Zhang, C. Zhang, Transparent Ultrathin Metal Electrode with Microcavity Configuration for Highly Efficient TCO-Free Perovskite Solar Cells, *Materials* **13** (2020) 2328:1-13.
<https://doi.org/10.3390/ma13102328>

[4] P. Basumatary, P. Agarwal, A short review on progress in perovskite solar cells, *Materials Research Bulletin* **149** (2022) 111700.
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111700>

[5] S.H. Lee, G. Kim, J. Lim, K. Lee, M. Kang, High-performance ZnO:Ga/Ag/ZnO:Ga multilayered transparent electrodes targeting large-scale perovskite solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **186** (2018) 378-384.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.07.010>

[6] M. Girtan, B. Negulescu, A review on oxide/metal/oxide thin films on flexible substrates as electrodes for organic and perovskite solar cells, *Optical Materials: X* **13** (2022) 100122.
<https://doi.org/10.1016/j.omx.2021.100122>

[7] X. Liu, X. Guo, Z. Gan, N. Zhang, X. Liu, Efficient Perovskite Solar Cells Based on Multilayer Transparent Electrodes Through Morphology Control, *The Journal of Physical Chemistry C* **120** (2016) 26703-26709.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b10288>

[8] Z. Li, Stable Perovskite Solar Cells Based on WO₃ Nanocrystals as Hole Transport Layer, *Chemistry Letters* **44** (2015) 1140-1141.
<https://doi.org/10.1246/cl.150445>

[9] I. Jeon, J. Yoon, N. Ahn, M. Atwa, C. Delacou, A. Anisimov, E. Kauppinen, M.G.

نظیر جذب در لایه پروسکایتی و همچنین چگالی جریان مدار کوتاه فرمول‌بندی و محاسبه شد و نشان داده شد که این ویژگی‌ها از تغییر ضخامت لایه دی الکتریک WO₃ بیشتر از تغییر ضخامت لایه دی الکتریک V₂O₅ متأثر می‌شوند. در پایان شبیه‌سازی بیشینه J_{sc} ۱۹,۳ mA/cm² برای ضخامت لایه اکسید وانادیوم ۴۰ نانومتر و ضخامت لایه اکسید تنگستن ۵۵ نانومتر به دست آمد که از مقدار J_{sc} محاسبه شده برای سلول خورشیدی پروسکایتی مبتنی بر الکتروود ITO با ساختار مشابه (۱۷,۲ mA/cm²) به اندازه ۱۲,۲٪ بیشتر است. در نهایت سلول خورشیدی پروسکایتی با الکتروود بهینه شده VAW ساخته شد و با سلول خورشیدی پروسکایتی با الکتروود ITO مقایسه شد. با استفاده از الکتروود بهینه شده VAW مقدار چگالی جریان مدار کوتاه و ضریب پرشدگی ارتقا یافت و مقدار بازده تبدیل توان سلول خورشیدی پروسکایتی ITO نسبت به سلول ساخته شده بر الکتروود ITO ۲,۵۷٪ افزایش داشت. در مجموع ساختار چند لایه‌ای V₂O₅/Ag/WO₃ می‌تواند به عنوان یک الکتروود مؤثر در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی جایگزین مناسبی برای الکتروود مرسوم ITO باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان و پژوهشکده نانو دانشگاه شهرکرد به خاطر حمایت‌هایشان صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مرجع‌ها

[1] M.J. Namvar, M.H. Abbaspour Fard, M.R. Roknabadi, A. Behjat, M. Mirzaei, investigating the effect of adding combined Rubidium-Cesium cations on the performance of FAMAPb(IBr)₃ mixed halide and cation perovskite solar cells, *Journal of Research on Many-body Systems*,

- [15] M. Nejadzangeneh, S.M. Ghorashi, M. Ghasemi Varnamkhashti, Simulation and optimization of green organic light emitting diode based on $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ multilayer electrode, *Optics & Laser Technology* **143** (2021)107290.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107290>
- [16] F. Liang, Y. Lin, Z. He, W. Chen, Y. Zhu, T. Chen, L. Liang, M. Suman, Y. Wu, Promising ITO-free Perovskite Solar Cells with $\text{WO}_3\text{-Ag-SnO}_2$ as Transparent Conductive Oxide, *Journal of Materials Chemistry A* **6** (2018).
<https://doi.org/10.1039/C8TA08287A>
- [17] X. Xie, C. Wu, S. Sun, X. Xu, W. Xu, G. Qin, L. Xiao, Semitransparent Perovskite Solar Cells with Dielectric /Metal/Dielectric Top Electrodes, *Energy Technology* **8** (2019) 1900868.
<https://doi.org/10.1002/ente.201900868>
- [18] T. Babeva, H. Awala, J. Grand, K. Lazarova, M. Vasileva, S. Mintova, Optical and sensing properties of sol-gel derived vanadium pentoxide thin films with porous and dense structures, *Journal of Physics: Conference Series* **992** (2018) 012038.
<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/992/1/012038>
- [19] P. Shangzheng, X. Li, H. Dong, D. Chen, W. Zhu, J. Chang, Z. Lin, H. Xi, J.F. Zhang, Efficient Bifacial Semitransparent Perovskite Solar Cells Using $\text{Ag}/\text{V}_2\text{O}_5$ as Transparent Anodes, *ACS Applied Materials & Interfaces* **10** (2018) 12731–12739.
<https://doi.org/10.1021/acsami.8b01611>
- [20] P. Gurudevi, P. Venkateswari, T. Sivakumar, C. Ramesh, P. Vanitha, Solution Processed WO_3 and PEDOT:PSS Composite for Hole Transport Layer in ITO-Free Organic Solar Cells, *Journal of Cluster Science* inpress (2022).
<https://doi.org/10.1007/s10876-022-02368-6>
- [21] R. Mewada, N. Bhagat, V. Saxena, S. Choudhury, A. Mahajan, A. Singh, K.P. Muthu, Low temperature processable crystalline WO_3 Langmuir-Blodgett ultrathin film as blocking layer in solar cells application, *AIP Conference Proceedings*, Choi, S. Maruyama, Y. Matsuo, Carbon Nanotubes Versus Graphene as Flexible Transparent Electrodes in Inverted Perovskite Solar Cells, *The Journal of Physical Chemistry Letters* **8** (2017) 5395–5401.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.7b02229>
- [10] Y. Zhou, R. Azumi, Carbon nanotube based transparent conductive films: progress, challenges, and perspectives, *Science and Technology of Advanced Materials* **17** (2016) 493-516.
<https://doi.org/10.1080/14686996.2016.1214526>
- [11] P.C. Kao, C.J. Hsu, Z.H. Chen, S.H. Chen, Highly transparent and conductive $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{MoO}_3$ multilayer films via air annealing of the MoO_3 layer for ITO-free organic solar cells, *Journal of Alloys and Compounds* **906** (2022) 164378.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164378>
- [12] R. Hernandez Castillo, D. Canto-Reyes, A. Borges Pool, J.A. Mendez-Gamboa, M. Acosta, Influence of top layer thickness on the performance of $\text{WO}_3/\text{Ag}/\text{WO}_3$ -transparent electrodes, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **32** (2021) 19063–19069.
<https://doi.org/10.1007/s10854-021-06422-3>
- [13] C. Park, J.W. Lim, J.H. Heo, S.H. Im, Color Implementation of High-Efficiency Perovskite Solar Cells by Using Transparent Multilayered Electrodes, Color Implementation of High-Efficiency Perovskite Solar Cells by Using Transparent Multilayered Electrodes. *ACS Appl. Energy Mater* **5** (2022) 12151–12157.
<https://doi.org/10.1021/acsaem.2c01658.s001>
- [14] H. Li, X. Li, W. Wang, J. Huang, J. Li, S. Huang, B. Fan, J. Fang, W. Song, Ultra flexible and biodegradable perovskite solar cells utilizing ultrathin cellophane paper substrates and $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ transparent electrodes, *Solar Energy* **188** (2019) 158–163.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.061>

- [30] C.W. Chen, S.Y. Hsiao, C.Y. Chen, H.W. Kang, Z.Y. Huang, H.W. Lin, Optical properties of organometal halide perovskite thin films and general device structure design rules for perovskite single and tandem solar cells, *Journal of Materials Chemistry A* **3** (2015) 9152-9159. <https://doi.org/10.1039/C4TA05237D>
- [31] F. Cheng, P.-H. Su, J. Choi, S. Gwo, X. Li, C.-K. Shih, Epitaxial growth of atomically smooth aluminum on silicon and its intrinsic optical properties, *ACS Nano* **10** (2016) 9852-9860. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05556>
- [32] Y. Jiang, S. Pillai, M.A. Green, Realistic Silver Optical Constants for Plasmonics, *Scientific Reports* **6** (2016) 30605. <https://doi.org/10.1038/srep30605>
- [33] M.G. Hutchins, O. Abu-Alkhair, M.M. El-Nahass, K. Abd El-Hady, Structural and optical characterisation of thermally evaporated tungsten trioxide (WO₃) thin films, *Materials Chemistry and Physics* **98** (2006) 401-405. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.09.052>
- [34] L. Boudaoud, B. Noureddine, R. Desfeux, B. Khelifa, C. Mathieu, Structural and optical properties Of WO₃ and V₂O₅ thin films prepared by Spray Pyrolysis, *Catalysis Today* **113** (2006) 230-234. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.11.072>
- [35] W. Sha, X. Ren, L. Chen, W. Choy, The Efficiency Limit of CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Solar Cells-Supplementary Information, *Applied Physics Letters* **106** (2015) 22104. <https://doi.org/10.1063/1.4922150>
- [36] D. Han, H. Kim, S. Lee, M. Seo, S. Yoo, Realization of efficient semitransparent organic photovoltaic cells with metallic top electrodes: Utilizing the tunable absorption asymmetry, *Optics express* **18** (2010) 513-521. <https://doi.org/10.1364/OE.18.00A513>
- [37] J.C. Ke, Y.H. Wang, K.L. Chen, C.J. uang, Microcavity Enhancing the Performance Using WO₃/Au/WO₃ as Transparent Electrode various power O₂ plasma treatments on the indium tin oxide substrate, *Journal of Colloid and Interface* **2265** (2020) 030299. <https://doi.org/10.1063/5.0016670>
- [22] M.A. Cherif, A. Labiod, D. Barakel, S. Touihri, P. Torchio, Tailored ZnS/Ag/TiO_x transparent and conductive electrode for organic solar cells, *EPJ Photovoltaics* **10** (2019) 1051. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2019004>
- [23] H.A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters*, (4th ed.) CRC Press, New York, (2010). <https://doi.org/10.1201/9781420073034>
- [24] M. Ghasemi Varnamkhashi, E. Shahriari, Influence of heat treatment on characteristics of In₂O₃/Ag/MoO₃ multilayer films as transparent anode for optoelectronic applications, *Journal of Applied Physics B* **120** (2015) 517-525. <https://doi.org/10.1007/s00340-015-6160-7>
- [25] G. Haacke, New figure of merit for transparent conductors, *Journal of Applied Physics*, **47** 9 (1976) 4086-4089. <https://doi.org/10.1063/1.323240>
- [26] L. Pettersson, L. Roman, O. Inganas, Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on organic thin films, *Journal of Applied Physics* **86** (1999) 487-496. <https://doi.org/10.1063/1.370757>
- [27] T. Bendib, H. Bencherif, M. Abdi, M. Faycal, L. Dehimi, M. Chahdi, Combined Optical-Electrical modeling of perovskite solar cell with an optimized design, *Optical Materials* **109** (2020) 110259. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110259>
- [28] S. Han, S. Lim, H. Kim, H. Cho, S. Yoo, Versatile Multilayer Transparent Electrodes for ITO-Free and Flexible Organic Solar Cells, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **16** (2011) 1656-1664. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2010.2041637>
- [29] M. Soldera, A. Koffman-Frischknecht, K. Taretto, Optical and electrical optimization of all-perovskite pin type junction tandem solar cells, *Journal of Physics D: Applied Physics* **53** (2020) 315104. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab8851>

Science **465** (2016) 311-315.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.12.002>

[38] P. Shen, L. Shen, Y. Long, G. Chen, Indium Tin Oxide-Free Polymer Solar Cells: Microcavity Enhancing the Performance Using $WO_3/Au/WO_3$ as Transparent Electrode, in *IEEE Electron Device Letters* **35** (2014) 1109-1111.
<https://doi.org/10.1109/LED.2014.2357712>

[39] V.D. Tran, S.V.N. Pammi, J. Choi, S.G. Yoon, Utilization of AZO/Au/AZO multilayer electrodes instead of FTO for perovskite solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **163** (2017) 58-65.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.01.008>

[40] G. Lucarelli, T. Brown, Development of Highly Bendable Transparent Window Electrodes Based on MoOx, SnO₂, and Au Dielectric/Metal/Dielectric Stacks: Application to Indium Tin Oxide (ITO)-Free Perovskite Solar Cells, *Frontiers in Materials* **6** (2019) 310.
<https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00310>