

ارزیابی ضخامت فوتوالکتروسلول خورشیدی نانوساختار حساس شده با رنگ و ساخت ماژول خورشیدی با استفاده از ضخامت بهینه

نسترن ریاحی نوری، علی مهدیخانی

بخش مواد غیرفلزی، مرکز شیمی و مواد

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

amehdikhani@nri.ac.ir ، nriahi@nri.ac.ir

مهدی منتظری پور

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

دانشگاه تهران

تهران، ایران

montazerypor@ut.ac.ir

انرژی‌های مختلف در پی داشته است. در این راستا، سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگ (Dye Sensitized Solar Cells یا DSSC) معماری جدیدی از ساختارهای سلول خورشیدی لایه نازک هستند که در مقایسه با سلول‌های مرسوم با اتصال p-n، به دلیل داشتن بازدهی تبدیل انرژی قابل قبول و هزینه تولید کم کاندیدای مناسبی برای توسعه سلول‌های خورشیدی نسل آینده محسوب می‌شوند [۱]. بر خلاف دستگاه‌های فوتولتائیک سیلیکونی مرسوم با اتصال p-n که در آنها نیمه‌هادی هر دو عمل جذب نور و انتقال حامل بار الکتریکی را انجام می‌دهد، در اینجا این دو عملکرد از همدیگر جدا شده‌اند؛ یعنی نور به وسیله یک رنگ حساس‌کننده که بر سطح یک نیمه‌هادی اکسیدی (TiO_2) متصل است، جذب می‌شود. جدایش بار در فصل مشترک از طریق تزریق الکترون القاء شده با نور از رنگ به باند هدایت جامد نیمه‌هادی اتفاق می‌افتد. حامل‌ها در باند هدایت نیمه‌هادی به یک جمع‌کننده بار انتقال می‌یابند [۲].

به طور کلی اجزای سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگ (DSSC) شامل یک فوتوالکتروسلول آند متخلخل شامل لایه شفاف رسانا بر روی شیشه و اکسید متخلخل نانوکریستالی TiO_2 حساس شده با رنگ برای جذب نور و تولید الکترون، لایه‌ای از محلول آلی الکترولیت برای احیا کردن رنگ اکسید شده و یک کاتد شامل لایه شفاف رسانا بر روی شیشه و پوشش پلاتینی برای جمع‌آوری الکترون‌های مدار و به عنوان کاتالیزگر واکنش بازتولید و احیا شدن الکترولیت می‌باشد [۳].

چکیده — سلول‌های خورشیدی نانوساختار حساس شده با رنگ از طریق اعمال ضخامت‌های متفاوتی از لایه نازک TiO_2 در فوتوالکتروسلول (الکتروسلول) ساخته شدند و میزان ضخامت این لایه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. کارایی سلول‌های خورشیدی ساخته شده به وسیله بدست آوردن منحنی‌های مشخصه ولتاژ-دانشسته جریان با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای دانشسته جریان مدار کوتاه (J_{sc})، ولتاژ مدار باز (V_{oc})، فاکتور پرکنندگی (FF) و بازدهی تبدیل () سلول‌های خورشیدی ساخته شده مورد مقایسه قرار گرفتند و میزان بهینه ضخامت لایه فوتوالکتروسلول آند تعیین گردید. یک نمونه ماژول خورشیدی حاوی ۸ سلول سری از نوع Z با اعمال ضخامت بهینه لایه نیمه‌هادی TiO_2 بدست آمده ساخته شد.

واژه‌های کلیدی — سلول خورشیدی نانوساختار؛ فوتوالکتروسلول؛ لایه نازک TiO_2 ؛ تولید برق؛ ماژول خورشیدی؛

۱. مقدمه

در طی دهه اخیر، نانومواد به عنوان سیستم‌هایی جدید برای جمع‌آوری فوتون‌ها و استفاده از انرژی نور مطرح شده‌اند. خواص کم‌نظیر الکتریکی، پایداری بالای الکتروشیمیایی و سطح ویژه بالایی که این گونه مواد ایجاد می‌کنند، انگیزه بسیاری از محققان را در به خدمت گرفتن آنها برای تبدیل

ساخت ماژول، یک لایه از خمیر نقره نیز به منظور برقراری اتصال الکتریکی سری بین سلولها بر روی صفحات شیشه‌ای FTO فوتوالکتروسلول به وسیله دستگاه چاپ توری پوشش داده شد.

در راستای آماده کردن الکتروسلول مقابل یا الکتروسلول کاتد سلول خورشیدی و به منظور وارد شدن الکتروسلول در مرحله همبندی اجزای سلول، در ابتدا یک حفره در شیشه FTO به وسیله دستگاه دریل ایجاد شد. به منظور پوشش دهی پلاتین بر روی الکتروسلول مقابل، یک لایه از خمیر تجاری Pt بر روی صفحات شیشه‌ای FTO به وسیله چاپ توری پوشش داده شد و سپس عملیات حرارتی لایه Pt در دمای 470°C برای ۱۵ دقیقه انجام گردید.

۲.۲. همبندی سلولها و ماژول خورشیدی

فوتوالکتروسلول متخلخل TiO_2 حساس شده با رنگ و الکتروسلول مقابل پلاتینی به شکل ساندویچی در کنار هم قرار می‌گیرند و به وسیله یک واشر درزگیر پلیمری از همدیگر جدا می‌شوند. با قرار دادن این ساختار ساندویچی بر روی هات‌پلیت و اعمال فشار ملایمی به مدت ۱۰ ثانیه بر روی آن عمل درزگیری سلول انجام پذیرفته و بدین ترتیب به دلیل اعمال گرما و فشار، واشر پلیمری به طور محکم به سطوح جانبی الکتروسلول متصل خواهد شد. سپس الکتروسلول از طریق حفره ایجاد شده در پشت الکتروسلول مقابل به داخل سلول تزریق می‌گردد. سرانجام حفره کاتد با استفاده از یک فیلم یونومر ذوب شونده در گرما درزگیری می‌شود.

۲.۴. ارزیابی ضخامت فوتوالکتروسلول

جهت بررسی ریزساختار، کیفیت و ضخامت پوشش‌های TiO_2 لایه‌نشانی شده بر روی فوتوالکتروسلولها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Camscan MV2300 استفاده گردید. جهت حصول کیفیت بهتر در تصاویر میکروسکوپی، سطح نمونه‌ها توسط دستگاه کندوپاشی با لایه نازکی از طلا پوشش‌دهی شد.

۲.۵. اندازه‌گیری‌های فوتولتائیک

ارزیابی کارایی سلولهای خورشیدی ساخته شده به وسیله بدست آوردن منحنی‌های مشخصه ولتاژ-دانشسته جریان با استفاده از یک شبیه‌ساز خورشیدی تجهیز یافته با یک لامپ زنون انجام پذیرفت. چهار کمیت الکتریکی J_{sc} ، V_{oc} ، FF و بدست آمده از این منحنی‌ها برای

ماده نیمه‌هادی TiO_2 دارای پهنای باند ممنوعه عریض ($E_g = 3.2 \text{ eV}$) و با انرژی تحریک الکترونی بالا یعنی نزدیک تابش UV می‌باشد [۴]. این ماده به دلیل داشتن جاهای خالی اکسیژنی در شبکه (با غلظت حامل بار 10^{16} cm^{-3}) از نوع نیمه‌هادی نوع n می‌باشد. ضخامت TiO_2 پارامتر مهمی است که بر روی امپدانس داخلی DSSC مربوط به انتقال الکترون تأثیر گذاشته و بدین ترتیب بر روی کارایی DSSC مؤثر می‌باشد؛ زیرا آن مستقیماً مرتبط با نفوذ و انتقال الکترونی است. بنابراین تغییر در ضخامت لایه نانوکریستالی TiO_2 یک فاکتور تعیین کننده در بهینه کردن عملکرد فوتولتائیک DSSC است [۵].

هدف از تحقیق حاضر، تعیین میزان بهینه ضخامت لایه TiO_2 به کار رفته در فوتوالکتروسلولهای خورشیدی حساس شده با رنگ و سپس بررسی ساخت یک نمونه ماژول خورشیدی با اتصال سری با استفاده از پارامترهای بهینه تعیین شده می‌باشد.

۲. مواد و روش تحقیق

۲.۱. تهیه خمیر TiO_2

در ابتدا نانوپودر TiO_2 حاوی تک‌فاز آناتاز با روش هیدروترمال سنتز گردید [۴]. سپس خمیر TiO_2 با اضافه کردن اسید استیک، آب، اتانول، اتیل سلولز و تریپتئول به پودر و سپس مخلوط کردن با استفاده از آسیای ماهواره‌ای ساخته شد [۶].

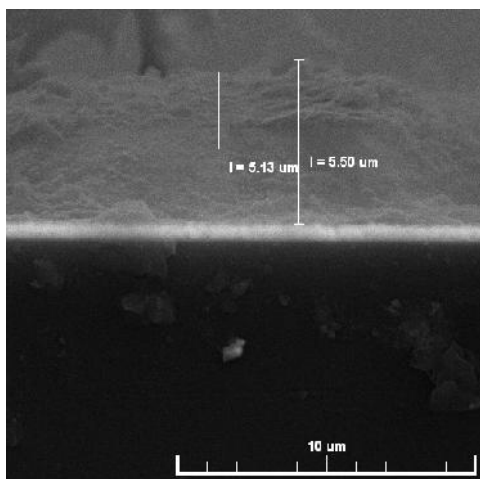
۲.۲. آماده سازی فوتوالکتروسلول و الکتروسلول مقابل

به منظور پوشش‌دهی فیلم‌های متخلخل TiO_2 ، یک لایه از خمیر ساخته شده بر روی صفحات شیشه‌ای FTO فوتوالکتروسلول به وسیله دستگاه چاپ توری پوشش داده شد و سپس شیشه پوشش داده شده با خمیر بر روی یک هات‌پلیت در 125°C برای ۶ min خشک گردید. مساحت لایه‌نشانی در فوتوالکتروسلولهای آنند مورد استفاده 0.25 cm^2 است. این فرآیند پوشش‌دهی چاپ توری با خمیر و خشک کردن تکرار گردید تا ضخامت مورد نظر برای فوتوالکتروسلول حاصل شود. الکتروسلول پوشش داده شده با خمیر TiO_2 تدریجاً تحت یک جریان هوا در 500°C برای ۱۵ min گرما داده شد. بعد از خنک شدن الکتروسلول TiO_2 از دمای 500°C تا حدود 80°C فوتوالکتروسلول به داخل یک محلول رنگ N-719 با غلظت 0.2 M در اتانول غوطه‌ور گردید و در دمای اتاق برای ۲۴ h نگهداشته شد. در راستای

مشخصه‌یابی و مقایسه کارایی سلول‌های خورشیدی ساخته شده استفاده شدند. این کمیت‌ها تحت شرایط استاندارد تابش نور به صورت طیف ۱/۵ جرم هوایی (یا ۱/۵ AM) ، شار نوری یا توان تابشی 100 mW/cm^2 و دمای 25°C اندازه‌گیری گردیدند.

۳. نتایج و بحث

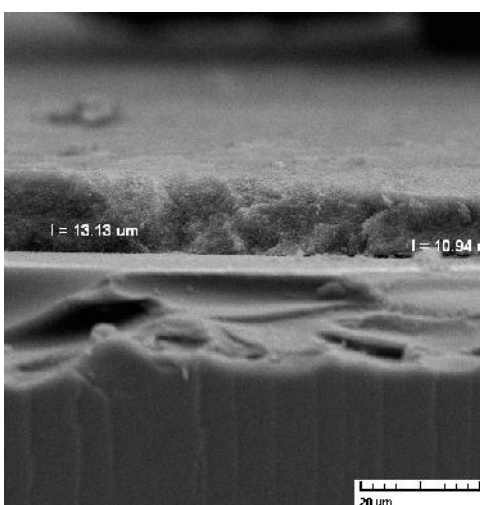
(الف)



شکل ۱ (الف) تصویر SEM از سطح مقطع فیلم بدست آمده پس از یک بار اعمال چاپ توری خمیر TiO_2 را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، پس از یک بار اعمال خمیر، سطح نمونه ضخامت تقریباً یکنواختی دارد و ضخامت متوسط فیلم حدود $5.31 \mu\text{m}$ است.

تصویر SEM از سطح مقطع فیلم بدست آمده بعد از دو بار اعمال چاپ توری خمیر TiO_2 در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، ضخامت متوسط فیلم در حدود $12.03 \mu\text{m}$ می‌باشد.

(ب)

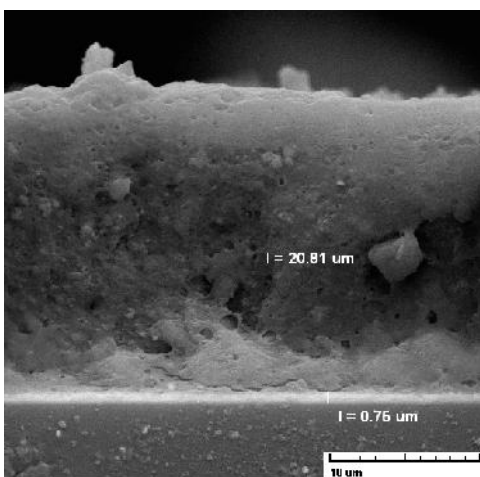


شکل ۱ (ج) تصویر SEM از سطح مقطع فیلم بدست آمده بعد از سه مرتبه اعمال چاپ توری خمیر TiO_2 را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ضخامت فیلم به حدود $20.81 \mu\text{m}$ رسیده است.

شکل ۲ مشخصه‌های J-V سلول‌های خورشیدی هم‌بندی شده با استفاده از فوتوالکترودهای با ضخامت متفاوت و الکترود کاتد با ضخامت 188 nm را مقایسه نموده است. بازدهی تبدیل نور خورشید به توان الکتریکی در یک سلول خورشیدی به صورت دانسیته توان خروجی تقسیم بر دانسیته توان تابشی تعریف می‌شود. اگر نور تابیده شده دارای دانسیته توان P_s باشد، بازدهی سلول () از طریق رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$y = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

(ج)



به طوریکه V_{oc} ولتاژ مدار باز، J_{sc} دانسیته جریان مدار کوتاه و FF فاکتور پرکنندگی سلول می‌باشد. به دلیل آنکه جریان مدار کوتاه (I_{sc}) به طور تقریبی وابسته به مساحت سلول خورشیدی می‌باشد، اغلب از کمیت دانسیته جریان مدار کوتاه یعنی J_{sc} برای مقایسه سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شود.

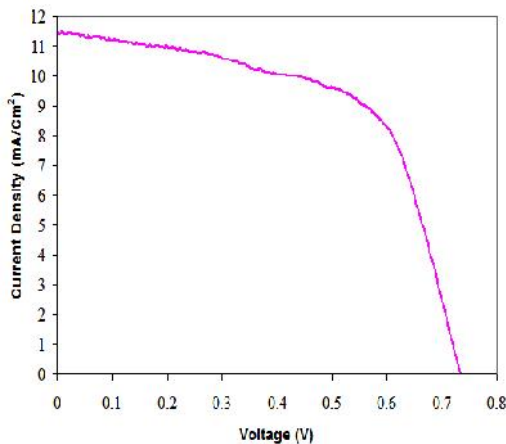
شکل ۲ (الف) مشخصه J-V سلول خورشیدی هم‌بندی شده با استفاده از فوتوالکترود به ضخامت متوسط $5.31 \mu\text{m}$ را نشان می‌دهد.

شکل ۱: تصاویر SEM از سطح مقطع فیلم بدست آمده پس از الف) یک مرتبه ، ب) دو مرتبه و ج) سه مرتبه اعمال چاپ توری خمیر TiO_2

همانطور که مشاهده می‌گردد، ولتاژ مدار باز (V_{oc}) این سلول 0.73 V، دانسیته جریان مدار کوتاه (J_{sc}) آن 11.4 mA/cm² و مقدار فاکتور پرکنندگی (FF) برابر با 0.61 می‌باشد که با استفاده از رابطه (۱)، بازده 5.08% را به صورت محاسبه شده در زیر بدست می‌دهد:

$$y_1 = \frac{0.73 \times 11.4 \times 0.61}{100} \times 100 = \% 5.08 \quad (2)$$

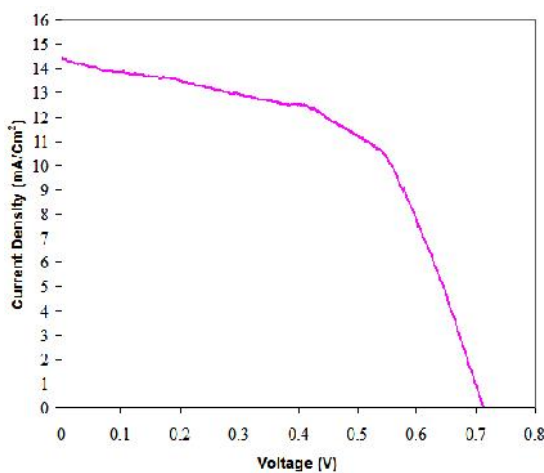
(الف)



شکل ۲ (ب) مشخصه J-V سلول خورشیدی ساخته شده با استفاده از فوتوالکتروسلول به ضخامت $12/0.3$ μm را نشان می‌دهد. V_{oc} این سلول 0.71 V، J_{sc} آن 14.3 mA/cm² و FF برابر با 0.58 می‌باشد که بازده 6.09% را بدست می‌دهد:

$$y_2 = \frac{0.71 \times 14.3 \times 0.58}{100} \times 100 = \% 6.09 \quad (3)$$

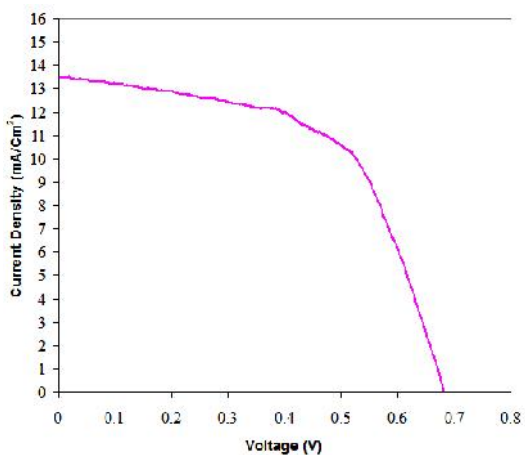
(ب)



شکل ۲ (ج) مشخصه J-V سلول خورشیدی هم‌بندی شده با استفاده از الکتروسلول آند به ضخامت $20/0.8$ μm را نمایش می‌دهد. V_{oc} این سلول 0.68 V، J_{sc} آن 13.5 mA/cm² و FF برابر با 0.58 می‌باشد که بازده 5.32% را بدست می‌دهد:

$$y_3 = \frac{0.68 \times 13.5 \times 0.58}{100} \times 100 = \% 5.32 \quad (4)$$

(ج)

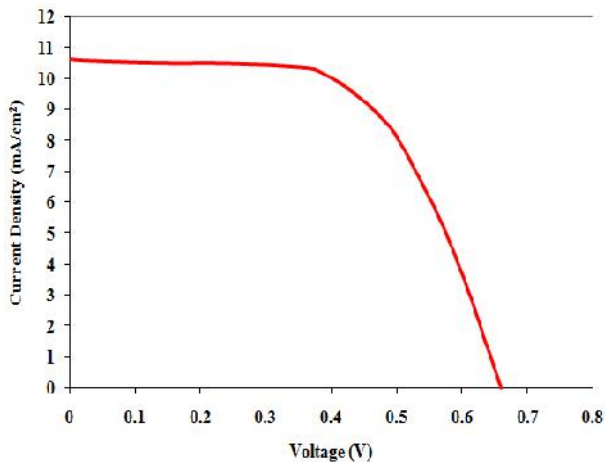


همانطور که دیده می‌شود، J_{sc} و V_{oc} با افزایش ضخامت فیلم TiO_2 از $5/31$ μm تا $12/0.3$ μm افزایش می‌یابد ولیکن J_{sc} و V_{oc} سلول خورشیدی با ضخامت فیلم $20/0.8$ μm ($J_{sc}=13.5$ mA/cm²، $V_{oc}=0.68$ V) کوچکتر از سلول با ضخامت فیلم $12/0.3$ μm ($J_{sc}=14.3$ mA/cm²، $V_{oc}=0.71$ V) هستند. بنابراین بیشترین بازده سلول (۲) با استفاده از فیلم با ضخامت $12/0.3$ μm بدست آمده است.

یکی از استراتژی‌ها برای بهبود بازدهی تبدیل، افزایش بازدهی بهره‌برداری از نور به وسیله افزایش مقدار رنگ در الکترودها با استفاده از فیلم‌های TiO_2 ضخیم می‌تواند باشد. با این وجود، یک فیلم نانوکریستالی ضخیم می‌تواند بازترکیب بار را در بین الکترون‌های تزریق شده و عوامل فعال الکتریکی افزایش دهد که ناشی از تحرک رانشی کم الکترون‌ها در فیلم (10^{-4} - 10^{-5} cm/Vs) است که بازدهی تبدیل را محدود می‌کند [۵].

تغییرات دانسیته جریان مدار کوتاه (J_{sc}) در سلول‌های خورشیدی ساخته شده می‌تواند به مقدار الکترون تولید شده با نور نسبت داده شود. برای یک فوتوالکتروسلول TiO_2 ، افزایش ضخامت الکتروسلول زیاد شدن مساحت سطحی داخلی و بنابراین افزایش مقدار جذب رنگ را در پی خواهد داشت.

شکل ۲: مشخصه‌های J-V سلول‌های خورشیدی ساخته شده با استفاده از فوتوالکترودهای با ضخامت متفاوت فیلم بدست آمده پس از الف) یک مرتبه، ب) دو مرتبه و ج) سه مرتبه اعمال چاپ توری خمیر TiO_2



شکل ۴: مشخصه J-V ماژول خورشیدی ساخته شده با استفاده از فوتوالکتروسلول با ضخامت بهینه

همانطور که دیده می‌شود بازدهی ماژول خورشیدی ساخته شده در مقایسه با سلول کاهش یافته است؛ زیرا چنانچه مساحت فعال سلول با هدف افزایش توان الکتریکی خروجی افزایش یابد، کارایی کلی در مساحت بالا محدود خواهد شد و این به دلیل آن است که مقاومت سطحی بالای اکسید رسانای شفاف (TCO) باعث افزایش مقاومت سری داخلی می‌گردد [۹].

منابع

- [1] B. O'Regan and M. Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films," *Nature*, vol. 353, pp. 737-739, 1991.
- [2] M. Grätzel, "Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dye-sensitized solar cells," *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, vol. 164, pp. 3-14, 2004.
- [3] T. Soga, *Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion*, Elsevier Inc., 2007.
- [4] M. Montazeri-Pour, N. Riahi-Noori, and A. Mehdikhani, "Synthesis of single-phase anatase TiO₂ nanoparticles by hydrothermal treatment with application potential for photoanode electrodes of dye sensitized solar cells," *J. Ceram. Process. Res.*, vol. 14, No. 5, pp. 595-600, 2013.
- [5] I. Shin, H. Seo, M.-K. Son, J.-K. Kim, K. Prabakar, and H.-J. Kim, "Analysis of TiO₂ thickness effect on characteristic of a dye-sensitized solar cell by using electrochemical impedance spectroscopy," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 10, pp. S422-S424, 2010.
- [6] S. Ito, P. Chen, P. Comte, M. K. Nazeeruddin, P. Liska, P. Pechy, and M. Grätzel, "Fabrication of screen-printing pastes from TiO₂ powders for dye-sensitized solar cells," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 15, pp. 603-612, 2007.
- [7] C.-Y. Kuo, S.-Y. Lien, Z.-S. Wu, F.-S. Shieu, and C.-F. Chen, "Fabrication and Characterization of NP-TiO₂ Thin Films for High Efficiency Dye-Sensitized Solar Cell Application," *Nanosci. Nanotechnol. Lett.*, vol. 3, pp. 195-199, 2011.
- [8] Y. Dai, J. Wang, J. Li, and Q. Shi, "The Effects of the TiO₂ Films Thickness on the Performance of Quasi-Solid Dye-Sensitized Solar Cells," *Adv. Mater. Res.*, vols. 152-153, pp. 739-742, 2011.
- [9] W.J. Lee, E. Ramasamy, D.Y. Lee, and J.S. Song, "Dye-sensitized solar cells: Scale up and current-voltage characterization," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, pp. 1676-1680, 2007.

فوتوالکتروسلول ضخیمتر می‌تواند فوتون‌های بیشتری را جذب نموده که منجر به J_{sc} بالاتر می‌شود. با این وجود، اگر ضخامت الکتروسلول بیشتر از عمق نفوذ نور باشد، تعداد فوتون‌های قابل استفاده برای تولید الکترون محدود خواهد شد و بدین ترتیب J_{sc} افزایش بیشتری نخواهد داشت و در عوض آن، افزایش ضخامت به بیشتر از عمق نفوذ نور، مراکز بازترکیب بارالکتریکی را افزایش داده که باعث کاهش J_{sc} خواهد شد [۷].

از طرفی دیگر، V_{oc} با افزایش ضخامت الکتروسلول کاهش می‌یابد. این پدیده می‌تواند به وسیله اثر ترقیق الکترون توضیح داده شود. هنگامی که نور به داخل عمق یک الکتروسلول منتقل می‌شود، شدت آن به تدریج کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش ضخامت، دانسیته الکترون اضافی کمتر شده و V_{oc} کاهش می‌یابد. مقاومت سری بیشتر الکتروسلول‌های ضخیمتر نیز در کاهش فوتولتاژ سهم می‌باشد. همانطور که دیده می‌شود، فاکتور پرکنندگی با افزایش ضخامت فوتوالکتروسلول کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش در مقاومت داخلی DSSC است [۸].

با استفاده از فوتوالکتروسلول با ضخامت بهینه، یک نمونه ماژول خورشیدی حاوی ۸ سلول سری از نوع Z و مساحت روزنه (Aperture Area) برابر با 92 cm^2 ساخته شد که تصویر آن در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳: ماژول خورشیدی ساخته شده با اعمال ضخامت بهینه فوتوالکتروسلول

مشخصه J-V ماژول ساخته شده با اعمال ضخامت بهینه لایه نیمه‌هادی TiO₂ در شکل ۴ نشان داده شده است. ولتاژ مدار باز این ماژول 0.66 V ، دانسیته جریان مدار کوتاه آن 10.6 mA/cm^2 و مقدار فاکتور پرکنندگی برابر 0.56 می‌باشد که بازدهی تبدیل کلی 3.92% را بدست می‌دهد.