

Design and simulation of high efficiency bifacial perovskite solar cell

Amirhossein Mohammadian Fard, Samiye Matloub, Reza Yadipour

Quantum Photonics Research Lab (QPRL), University of Tabriz, Tabriz 5166614761, Iran
E-mail: r-yadipour@tabrizu.ac.ir

Short Abstract

In this article, a full 3D structure of bifacial perovskite solar cell has been investigated using finite element method (FEM) to get accurate and complete results. Transparent conductive oxide (TCO) has been used instead of metal for back contact for absorbing photon both from front and rear of solar cell. First, several structures with different ETLs and HTLs have been investigated to get the best structure with the highest efficiency and stability and then, Absorber thickness, ETL thickness and HTL thickness have been swepted to find out the effect of thickness increment. The efficiency of cell increased to 18.009% for front irradiation and 17.227% for rear irradiation based on AM1.5G irradiation. At last, the I-V and P-V spectrums have been shown for different albedo constants.

Keywords

Perovskite, albedo, bifacial solar cell, TCO

1- Short Introduction (4-5 lines)

Among various renewable energy sources, solar energy stands out as a promising alternative to fossil fuel-based energy, offering the potential to reduce carbon dioxide emissions through the photoelectric effect. Notably, Perovskite solar cells (PSCs) represent the third generation of solar cells and have garnered significant research interest owing to their unique properties, including a tunable optical bandgap, high absorption, low exciton binding energy, long carrier life-time and remarkably low fabrication cost compared to earlier solar cells technologies such as silicon solar cell. Among the limitation of single junction solar cells, a bifacial perovskite solar cell has been designed that can absorb both front and rear irradiations. This can be cause higher electron-hole generation and higher efficiency.

2- Proposed Work and Methodology (including comprision, simulation/experimental results and discussion)

Optical and electrical simulations have been conducted under accurate boundary conditions. The main approach involved investigating the three-dimensional (3D) structure of the perovskite unit cell, characterized by dimensions a_x and a_y , which were replicated across the entire cell structure in both the x and y directions. For optical and electrical simulations, the Finite Element Method (FEM) has been employed. AM1.5G irradiation has been simulated once for front and then from rear irradiation and calculated the efficiency of both irradiations and from them, the bifacial constant can be calculated.

3- Conclusion (4-5 lines)

In this article, a complete structure of bifacial perovskite solar cell has been investigated. ITO has been used instead of metal for back contact and bifaciality has been utilized. Finite Element Method (FEM) was used for both electrical and optical simulations and important parameters of bifacial perovskite solar cell like absorption, transmission, reflection, generation and I-V and P-V spectrums for several albedo constants have been designed. To get better results, the thickness of cell layers have been changed and efficiency has been increased to 18.009%/17.227% and bifacial factor over 95%. Then albedo effect investigated in the solar cell and short circuit current increased to 27.24 mA/cm².

4- References (2-3 references)

- F. Fu *et al.*, "Low-temperature-processed efficient semi-transparent planar perovskite solar cells for bifacial and tandem applications," *Nature communications*, vol. 6, no. 1, p. 8932, 2015.
- Y. Xiao, G. Han, J. Wu, and J.-Y. Lin, "Efficient bifacial perovskite solar cell based on a highly transparent poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) as the p-type hole-transporting material," *Journal of Power Sources*, vol. 306, pp. 171-177, 2016.
- L. Fan *et al.*, "Delayed annealing treatment for high-quality CuSCN: Exploring its impact on bifacial semitransparent nip planar perovskite solar cells," *ACS Applied Energy Materials*, vol. 1, no. 4, pp. 1575-1584, 2018.
- Y. Li, J. Duan, Y. Zhao, and Q. Tang, "All-inorganic bifacial CsPbBr₃ perovskite solar cells with a 98.5%-bifacial factor," *Chemical communications*, vol. 54, no. 59, pp. 8237-8240, 2018.

طراحی و شبیه‌سازی سلول خورشیدی پروسکایتی دو وجهی با راندمان بالا

امیرحسین محمدیان فرد

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق-افزاره‌های میکرو و نانو الکترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

سامیه مطلوب

دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

رضا یدی پور

دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در بین منابع انرژی تجدیدپذیر، سلول‌های خورشیدی جایگاه خاصی به دلیل همگانی بودن انرژی خورشیدی و تولید انرژی با استفاده از صنایع فوتوولتائیک پیدا کرده‌اند. سلول‌های خورشیدی پروسکایتی نسل جدیدی از سلول‌های خورشیدی هستند که به دلیل راندمان بالا، طول عمر حامل بالا و هزینه ساخت پایین در دهه‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. سلول‌های خورشیدی دو وجهی پروسکایتی نسل جدیدی از سلول‌های پروسکایتی هستند که قابلیت جذب فوتون هم از سمت پشت و هم از سمت جلو را دارا هستند که این امر، امکان غلبه بر محدودیت‌های بازدهی برای سلول‌های تک‌وجهی را فراهم می‌سازد. در این مقاله، یک ساختار کامل سه‌بعدی سلول خورشیدی پروسکایتی دو وجهی با استفاده از روش المان محدود (FEM) برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر و شفاف‌تر مورد بررسی قرار گرفت و از الکتروود شفاف (ITO) به‌عنوان الکتروود پشتی استفاده شد. در ابتدا چند ساختار متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و از بین آن‌ها یک ساختار با راندمان و پایداری بالا و ضریب دو وجهی ۹۵/۳۴ درصد انتخاب گردید. سپس اثر تغییرات ضخامت لایه‌های مختلف بر روی پارامترهای مختلف سلول بررسی شد و راندمان این سلول تا ۱۸/۰۰۹ درصد برای تابش از سمت جلو و ۱۷/۲۲۷ از سمت پشت (برای $albedo = 1$ ، توجه داشته باشید که این رقم برای محیط‌های بازتاب مختلف متفاوت می‌باشد) بهبود یافت. سپس اثر انعکاس از سمت پشت بر روی نرخ تولید الکترون-حفره در لایه جاذب بررسی شد و مشاهده گردید که با دریافت نور از سمت پشت سلول، نرخ تولید الکترون حفره افزایش می‌یابد. سپس نمودارهای مربوط به پارامترهای الکتریکی سلول ارائه گردید و مشاهده شد که جریان اتصال کوتاه سلول در ضرایب $albedo$ بالاتر تا $27/24 \text{ mA/cm}^2$ افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی

سلول خورشیدی، پروسکایت، سلول دو وجهی.

نام نویسنده مسئول: دکتر رضا یدی پور

ایمیل نویسنده مسئول: r-yadipour@tabrizu.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸

تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

۱- مقدمه

یک سلول خورشیدی پروسکایت متال هالید شامل چندین لایه الکترون فلزی، لایه انتقال حفره، لایه جاذب پروسکایتی، لایه انتقال الکترون و اکسید رسانای شفاف^۲ مانند اکسید قلع فلوئور^۳ یا اکسید قلع ایندیم هست. تحت تابش نور خورشید، لایه جاذب نور پروسکایت فوتون‌ها را برای تولید اکسایتون‌ها جذب می‌کند و سپس اکسایتون‌ها از هم جدا می‌شوند تا جفت الکترون-حفره تولیدشده را تشکیل دهند. پس از آن، این الکترون‌ها و حفره‌های جداشده به ترتیب به لایه انتقال الکترون^۴ و لایه انتقال حفره^۵ منتقل می‌شوند و به صورت جداگانه در لایه‌های انتقال بار مربوطه منتقل می‌شوند. در نهایت، الکترون‌ها و حفره‌های تولیدشده به‌طور مستقل توسط الکترون‌دهنده رسانا جمع‌آوری می‌شوند و به مدار خارجی منتقل می‌شوند تا جریان نوری تولید کنند. به‌طور کلی، در ساختار یک سلول خورشیدی یک وجهی، از یک الکترون فلزی مات مانند نقره یا طلا استفاده می‌شود که مانع از آن می‌شود که انرژی خورشیدی منعکس شده وارد سلول‌های خورشیدی شود. پیش‌ازین، این مفهوم در انواع مختلف سلول‌های خورشیدی برای به حداکثر رساندن راندمان سلول استفاده شده است [۱۷-۱۹].

در سال‌های اخیر، راندمان سلول‌های خورشیدی تک اتصالی به تدریج به حد شاکلی - کوازیر^۶ نزدیک شده است [۲۰]. بنابراین باید ساختار جایگزین مناسبی برای ساختارهای قبلی معرفی شوند تا بر این مشکل غلبه گردد. در این بین استفاده از ساختار سلول خورشیدی دو وجهی می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی باشد. در ساختار سلول خورشیدی دو وجهی از دو رسانای شفاف به‌عنوان الکترون‌دهنده استفاده می‌شود که به نور کمک می‌کند تا به هر دو طرف جلو و پشت سلول وارد شود. راندمان تبدیل توان^۷ به‌طور مستقل از دو طرف جلو و عقب در شرایط AM1.5G نور خورشید محاسبه می‌شود.

سلول‌های خورشیدی دو وجهی انرژی خورشیدی را به‌طور هم‌زمان هم از سمت رو به خورشید و از سمت پشت، فوتون‌های منعکس شده از اطراف را دریافت می‌کنند که منجر به افزایش راندمان سلول خورشیدی می‌گردد. نسبت مقدار تابش منعکس شده از سطح زمین به مقدار کلی AM1.5G ضریب albedo نامیده می‌شود. علاوه بر آن، ساختار سلول‌های خورشیدی دو وجهی مزیت‌های دیگری نیز دارد. به‌عنوان مثال، ساختارهای الکترونی مبتنی بر اکسیدهای فلزی و کربن می‌توانند از مشکلات انتقال یونی الکترون‌های فلزی سنتی جلوگیری کنند. علاوه بر این، این مواد از نفوذ رطوبت به دستگاه‌های پروسکایت جلوگیری کرده و پایداری و دوام آن‌ها را افزایش می‌دهند [۲۱]. در حالت کلی راندمان جلویی سلول خورشیدی دو وجهی همواره از راندمان پشتی سلول بیشتر است زیرا قسمت اعظمی از نور خورشید از سمت جلو جذب می‌شود.



شکل ۱: عملکرد سلول خورشیدی دو وجهی

با توجه به اثر گلخانه‌ای و افزایش دمای سیاره زمین، افزایش روزافزون آلودگی هوا و کاهش سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین بسیار مناسبی برای سوخت‌های فسیلی می‌باشند که علاوه بر کاهش آلودگی هوا، نقش بسیار مهمی در کاهش آسیب‌های وارده به محیط‌زیست دارند. از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توان به تولید انرژی الکتریکی با استفاده از باد، جزر و مد، زمین‌گرایی، انرژی خورشیدی و... اشاره کرد [۱]. انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای منابع انرژی مبتنی بر سوخت فسیلی برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن با استفاده از اثر فوتوالکتریک شود. کشف سلول خورشیدی برای اولین بار توسط بکرل در سال ۱۸۳۹ صورت گرفت [۲]. در طول دهه‌های اخیر، سلول‌های خورشیدی Si هم از نظر هزینه تولید و هم از نظر کارایی پیشرفت فوق‌العاده‌ای داشته‌اند [۳، ۴]. در برخی از نقاط جهان، انرژی حاصل از سلول‌های خورشیدی با هزینه‌های رقابتی و قابل‌مقایسه با سوخت‌های فسیلی به شبکه برق تحویل داده می‌شود. این سلول‌ها از نسل‌های مختلفی از سلول‌های خورشیدی از جمله فناوری مبتنی بر لایه‌نازک مانند سیلیکون، مس-ایندیوم-گالیوم-سلنید، CdTe [۵، ۶]، سلول‌های خورشیدی آلی/غیرآلی، نیمه‌هادی‌های معدنی یا کامپوزیت‌های هیبریدی می‌باشند [۷-۱۲]. این نسل از سلول‌های خورشیدی به دلیل سهولت پردازش، کارایی، هزینه و پایداری منجر به در دسترس بودن محصولات تجاری از این خط سلول‌های خورشیدی برای انتخاب مصرف‌کنندگان در الکترونیک قدرت و کاربردهای کم‌مصرف در ساختمان‌ها شده‌اند. برای بازارهای بزرگ‌تر، هزینه هر وات باید به میزان قابل‌توجهی کاهش یابد تا با برق تولیدشده از سوخت‌های فسیلی قابل‌مقایسه باشد. افزایش کوانتومی در بهره‌وری و کاهش هزینه برای فناوری‌های انرژی تضمین شده است. پیشرفت‌های اخیر در مونتاژ سلول‌های خورشیدی سیلیکونی استاندارد، حضور انرژی فوتولتائیک را در جمع منابع انرژی جهانی تضمین کرده است، پیش‌بینی می‌شود که یک سوم تقاضای برق جهانی تا سال ۲۰۳۰ توسط فوتولتائیک تأمین شود. سلول‌های خورشیدی پروسکایتی نسل سوم سلول‌های خورشیدی هستند که به دلیل ویژگی‌هایی مانند شکاف نوری قابل تنظیم، جذب بالا، انرژی اتصال اکسایتون کم، طول عمر حامل طولانی و هزینه ساخت بسیار پایین در مقایسه با نسل‌های قبلی سلول‌های خورشیدی مانند سلول‌های خورشیدی سیلیکونی در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ویژگی‌ها سلول‌های خورشیدی پروسکایتی را به بهترین گزینه برای نسل بعدی سلول‌های خورشیدی تجاری تبدیل کرده است.

پروسکایت‌های هالید یک ساختار بلوره‌ای از نوع ABX_3 است که در آن A به‌طور کلی یک یون ترکیب آلی ($CH_3NH_3^+$, $CH(NH_2)_2^+$ و غیره)، یون معدنی (مانند Cs) یا هیبریدهای آلی-معدنی هست؛ B به کاتیون‌های فلزی مانند Pb^{2+} ، Sn^{2+} و... اشاره دارد؛ و X عناصر هالوژن است. این نسل از جاذب‌های نوری برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ در سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار گرفت [۱۳]. در سال ۲۰۱۲، پتانسیل بالای پروسکایت‌ها برای استفاده به‌عنوان جاذب در ساختار سلول‌های خورشیدی در سال ۲۰۱۲ با بازده ۹ درصد اثبات شد [۱۴]. پس از آن، راندمان سلول‌های خورشیدی مبتنی بر پروسکایت به سرعت به ۲۵٪ افزایش یافته است که از سلول‌های خورشیدی مبتنی بر Si با بازده ۲۷٪/۱۶ در حال سبقت هست [۱۵، ۱۶].

Hole Transport Layer^۵
Shockley-Queisser^۶
Photon conversion efficiency(PCE)^۷

CIGS^۲
Transparent Conductive Oxide^۳
Flourine Tin Oxide(FTO)^۴
Electron Transport Layer^۴

بررسی قرار می‌گیرد و از این میان بهترین ساختار را از نظر راندمان و ضریب دو وجهی انتخاب می‌گردد. بطوری که راندمان از سمت پشت خیلی نزدیک‌تر به راندمان از سمت جلو باشد. سپس برای به دست آوردن نتایج بهتر، دقیق‌تر و راندمان بالاتر، ضخامت لایه‌های جاذب فوتون، انتقال دهنده حفره و انتقال دهنده الکترون را تغییر می‌یابند تا اثر هر کدام بر روی راندمان و جریان خروجی سلول مشاهده شود. سپس یک ساختار کلی سلول خورشیدی تحت تابش هم از پشت و هم از جلو به‌طور هم‌زمان را مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش بعدی نمودار جریان-ولتاژ و توان ولتاژ را برای ضریب مختلف ارائه می‌شوند و بخش نهایی، بخش نتیجه‌گیری کل تحقیق خواهد بود.

۲- ساختار سلول

ساختار کلی سلول پروسکایتی دو وجهی ارائه شده با هفت لایه در شکل ۲ نشان داده شده است. اولین لایه سلول مورد بحث یک لایه بسیار نازک SiO_2 بر روی سلول خورشیدی هست که برای جلوگیری از هرگونه آلودگی محیط با ضخامت h_{ARI} استفاده شده است [۳۱]. برای جلوگیری از بازتاب دوباره نور و همچنین استفاده به‌عنوان الکتروود شفاف، رساناهای شفاف مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که از آن‌ها می‌توان به ITO و FTO اشاره کرد. در این ساختار از ITO به‌عنوان لایه ضد بازتاب^۲ و همچنین به‌عنوان الکتروود شفاف استفاده شده است که ضخامت آن برابر h_{AR2} خواهد بود. لایه انتقال دهنده الکترون نقش بسیار اساسی در راندمان، پایداری و همچنین هزینه نهایی ساخت سلول خورشیدی دارد. زیرا موجب تجمع الکترون‌ها و انسداد مسیر حرکت حفره‌ها در سطح تماس بین لایه جاذب پروسکایت و الکتروود شفاف ITO می‌گردد. در ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی به‌طور گسترده معمولاً از TiO_2 به‌عنوان لایه انتقال دهنده الکترون استفاده می‌شود [۳۲]. ولی استفاده از این ماده معایب بسیاری نیز به همراه دارد. اولاً موجب افزایش بی‌رویه هزینه نهایی ساخت سلول می‌گردد، همچنین برای لایه نشانی لایه مزو متخلخل TiO_2 دمای بسیار بالایی در حد ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد مورد نیاز است که این ماده را برای ساخت سلول‌های ارزان قیمت و منعطف نامناسب می‌سازد. ثانیاً، ماده TiO_2 یک اثر فوتوکاتالیستیک قوی بر روی لایه جاذب پروسکایت دارد که به‌مرور موجب تجزیه لایه پروسکایت گردیده و باعث کاهش پایداری سلول خورشیدی پروسکایتی در طولانی مدت می‌گردد. از دیگر معایب ماده TiO_2 می‌توان به موبیلیته پایین، چگالی بالای تله‌ها و ناپایداری این ماده هنگامی که در معرض تابش نور فرابنفش قرار می‌گیرد، می‌توان اشاره کرد [۳۱]. مواد مختلفی به‌عنوان لایه انتقال دهنده الکترون در ساختار سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مورد استفاده می‌گیرد، مانند C_{60} ، WS_2 ، ZnO ، PCBM ، Spiro-OMeTAD و... که طبق بررسی‌های انجام شده، ماده SnO_2 بهترین گزینه برای استفاده به‌عنوان لایه انتقال دهنده الکترون در ساختار سلول می‌باشد [۳۳]. ماده SnO_2 برای اولین بار در سال ۲۰۱۲ توسط دانگ و همکاران مورد استفاده قرار گرفت [۳۴]. این ماده دارای موبیلیته بالا (برابر $100 \text{ cm}_2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) شکاف باند گسترده و همچنین شفافیت بالا در بازه طول موج نور مرئی هست. همچنین SnO_2 یک مورد بسیار مناسب برای استفاده در سلول‌های چند پیوندی هست. در این گزارش از ماده SnO_2 به‌عنوان لایه انتقال دهنده الکترون با ضخامت h_{ETL} استفاده شده است [۳۳]. لایه بعدی لایه جاذب پروسکایت هست که از ماده MAPbI_3 در این لایه استفاده شده است که به‌طور گسترده در بیشتر تحقیقات مورد استفاده قرار می‌گیرد و دارای مزایای بسیاری مانند جذب نور قوی، انرژی اتصال کم، عمر حامل طولانی، انتقال شارژ دوقطبی و آماده‌سازی آسان

نصب ماژول‌های خورشیدی دو وجهی به‌سرعت در حال افزایش است و به دلیل افزایش قابل توجه تولید برق از ماژول خورشیدی دو وجهی، کاهش هزینه ساخت ماژول و راندمان بالا در عین هزینه ساخت و نصب پایین، سهم قابل توجهی از بازار سلول‌های خورشیدی را به خود اختصاص داده است. با توجه به استاندارد LCOE^۱ در مقایسه با بازار انرژی معمولی. تخمین زده می‌شود که بازار ماژول‌های PV دو وجهی در سال ۲۰۳۰ سه برابر شود. شکل ۱ عملکرد یک سلول خورشیدی دو وجهی را شرح می‌دهد.

مطالعات مختلفی بر روی ساختار سلول‌های خورشیدی دو وجهی انجام شده است. به‌عنوان مثال، در سال ۲۰۱۵، MoO_3 و $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ به‌عنوان الکتروود در ساختار سلول مورد استفاده قرار گرفت که راندمان سلول برای تابش از سمت جلو به $14/2$ درصد و از سمت پشت به $9/6$ درصد رسید که ضریب دو وجهی^۲ در این ساختار برابر $67/6$ به دست آمد این گزارش اولین مطالعه بر روی سلول‌های خورشیدی دو وجهی بود که در آن از پروسکایت به‌عنوان لایه جاذب نور استفاده شده بود [۲۲]. در سال ۲۰۱۶، یک ساختار بدون لایه انتقال دهنده حفره معرفی شد که در آن راندمان از سمت پشت برابر $167/$ درصد^۳، از سمت جلو برابر $8/27$ درصد گزارش شد [۲۳]. در سال ۲۰۱۸، از CuSeN به‌عنوان لایه انتقال دهنده حفره استفاده گردید که راندمان سلول برای تابش جلویی و پشتی به ترتیب به $12/47$ درصد و $8/74$ درصد رسید [۲۴]. در [۲۵]، از ساختار جاذب $\text{CsPbBr}_3/\text{carbon}/\text{CsPbBr}_3$ استفاده شد که راندمان سلول برابر $7/55$ درصد و $7/44$ درصد گزارش شد. در یک مطالعه دیگر، از $\text{MoO}_3/\text{Ag}/\text{WO}_x$ (MAW) به‌عنوان الکتروود پشتی استفاده گردید که راندمان سلول برابر $15/4$ درصد و $9/7$ درصد گزارش شد. در سال ۲۰۲۱، از Spiro-OMeTAD به‌عنوان لایه انتقال دهنده حفره استفاده گردید که راندمان سلول به 13 درصد و $7/6$ درصد رسید که ضریب دو وجهی برابر $58/46$ در گزارش شد [۲۶]. در [۲۷] از اکسید گرافن به‌عنوان لایه انتقال دهنده حفره در ساختار سلول خورشیدی دو وجهی مورد استفاده قرار گرفت که در این ساختار بازه سلول برای تابش جلو و پشتی به ترتیب برابر $12/48$ درصد و $11/45$ درصد و ضریب دو وجهی برابر $91/74$ به دست آمد. در سال ۲۰۲۲، یک سلول خورشیدی پروسکایتی با ساختار دو وجهی معرفی شد که در آن برای الکتروود از ITO استفاده گردید که در آن راندمان $17/68$ درصد و $16/01$ درصد و ضریب دو وجهی $90/55$ درصد گزارش شد [۲۸]. در همان سال، یک سلول با پایداری بالا و با مساحت 0.9 cm^2 معرفی گردید که دارای راندمان بالای $17/2$ درصد و $16/7$ درصد بود [۲۹]. در یک مطالعه دیگر، از ترکیب WS_2 و Spiro-OMeTAD به‌عنوان لایه انتقال دهنده حفره استفاده شد که به راندمان بالای $19/87$ درصد و $15/48$ درصد در دست یافت [۳۰].

لازم به ذکر است، در اکثر مطالعات بر روی سلول خورشیدی، از روش FDTD برای شبیه‌سازی اپتیکی و حل معادلات ماکسول استفاده می‌شود. همچنین برای بررسی و مطالعه ویژگی‌های الکتریکی سلول خورشیدی و حل معادلات پواسون و پیوستگی از شبیه‌سازی‌های یک‌بعدی مانند نرم‌افزار SCAPS-1D استفاده می‌شود که علاوه بر دقت پایین‌تر، ما را از مطالعه ویژگی‌های سلول در سه بعد محروم می‌سازد. برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر در حالت سه‌بعدی، در این مقاله، از روش المان محدود^۳ هم برای مطالعه اپتیکی و هم برای مطالعه ویژگی‌های الکتریکی سلول استفاده شده است که ما را در ارائه بهتر گزارش‌ها یاری می‌نماید.

در این گزارش، ویژگی‌های الکتریکی و اپتیکی ساختارهای مختلف سلول خورشیدی دو وجهی هفت لایه با مواد متفاوت را به روش المان محدود مورد

^۲ Finite element method (FEM)

^۳ Anti-reflection layer

^۱ Levelized Cost Of Electricity

^۲ Bifacial factor

است [۳۵]. لایه بعدی، لایه انتقال دهنده حفره هست که وظیفه تجمیع حفره و انسداد مسیر الکترون را به عهده دارد. در این لایه نیز مواد مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که از این بین، ماده MoO_3 دارای ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی بسیار مناسبی هست. ماده MoO_3 دارای پایداری بسیار بالایی در محیط بیرون هست که به پایداری کلی سلول پروسکایتی کمک می‌کند. همچنین دارای موبیلیته بالا و ویژگی‌های بسیار مناسبی در هنگام تماس با لایه‌های دیگر ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی هست. هزینه نهایی ساخت و استفاده این ماده در مقایسه با مواد دیگر به‌عنوان لایه انتقال‌دهنده حفره بسیار پایین‌تر بوده و به‌طور گسترده در ساخت قطعات نوری منعطف مورد استفاده قرار گرفته است [۳۶]. در سمت دیگر سلول نیز دو ماده ITO و SiO_2 به ترتیب به‌عنوان الکتروود شفاف و ماده ضد بازتاب و جهت جلوگیری از آلودگی مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است ساختارهای متفاوتی از جهت راندمان و پایداری مورد بررسی قرار گرفته‌اند که همه در جدول ۲ ذکر شده است و پس از بررسی، ساختار نهایی در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای محاسبه مقادیر اپتیکی ساختار سلول موردنظر مانند میزان جذب، نرخ بازتولید الکترون - حفره، میزان عبور، نرخ بازتاب و... بایستی معادلات مرسوم به معادلات ماکسول با استفاده از روش المان محدود در شرایط مرزی موردنظر محاسبه شوند. ابتدا چگالی توزیع میدان الکتریکی $|E(r, \lambda)|$ با محاسبه معادلات ماکسول محاسبه گردید. نرخ جذب لایه جاذب پروسکایت تحت شرایط تابش نور خورشید AM1.5G هم از سمت جلو و هم از سمت عقب بر اساس توزیع میدان الکتریکی با استفاده از معادله ۱ قابل محاسبه هست [۳۷]:

$$A(r, \omega) = \frac{1}{2} \frac{\omega \varepsilon_0 \text{Im}(\varepsilon(r, \omega)) |E(r, \lambda)|^2}{P_{in}} \quad (1)$$

در این معادله، r برابر مکان موردنظر در ساختار سلول، ω فرکانس زاویه‌ای، ε_0 ثابت دی‌الکتریک و ε ضریب گذردهی الکتریکی محیط است. توان تابشی نور خورشید با پارامتر P_{in} اعمال گردیده که طبق استاندارد AM1.5G برابر 1000 Wm^{-2} هست. برای محاسبه نرخ کلی جذب در لایه جاذب پروسکایت و سپس محاسبه میزان تولید الکترون حفره در لایه جاذب بایستی از معادله ۱ انتگرال گرفته شود. بر همین اساس نرخ کلی جذب در لایه جاذب پروسکایت برابر با معادله ۲ خواهد بود [۳۷]:

$$A_{total} = \int_{h_{bc}+h_{HTL}}^{h_{bc}+h_{HTL}+h_{Abs}} \int_{\frac{a_x}{2}}^{\frac{a_x}{2}} \int_{\frac{a_y}{2}}^{\frac{a_y}{2}} A(x, y, z, \lambda) dx dy dz \quad (2)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان جذب در لایه پروسکایت وابسته به نرخ توزیع میدان الکتریکی در لایه جاذب نور هست. بر همین اساس، برای به دست آوردن جذب بهتر بایستی نرخ توزیع میدان الکتریکی در لایه جاذب سلول بهتر گردد. برای محاسبه میزان تولید الکترون - حفره از نرخ جذب از معادله ۳ استفاده می‌گردد [۳۷]:

$$G(x, y, z, \omega) = \frac{1}{\hbar \omega} A(x, y, z, \omega) \quad (3)$$

نرخ تولید الکترون حفره در لایه پروسکایت وابسته به نرخ جذب لایه جاذب نور هست. برای افزایش میزان تولید الکترون حفره بایستی نرخ جذب در لایه جاذب سلول افزایش یابد تا بر همین اساس میزان جریان الکتریکی افزایش یابد. نرخ کلی جذب الکترون حفره در بازه طول موج 300 نانومتر تا 800 نانومتر با استفاده از معادله ۴ محاسبه می‌گردد [۳۷]:

$$G_{tot} = \int_{300nm}^{800nm} G(x, y, z, \lambda) d\lambda \quad (4)$$

از نتیجه معادله ۴ برای محاسبات الکتریکی سلول خورشیدی پروسکایتی دو وجهی و جهت استفاده گردید. لازم به ذکر است که میزان تولید الکترون حفره بر اساس تابش از سمت جلو و از سمت پشت به‌صورت جدا خواهد بود و برای تابش از

Direct Sunlight

Refracted Light

Reflected Light

شکل ۲- ساختار کلی سلول خورشیدی دو وجهی
جدول ۱- لیست پارامترهای مورد استفاده در هندسه سلول خورشیدی پروسکایتی دو وجهی

مقادیر	توضیحات	نوع ماده	ضخامت (nm)
h_{AR1}	ضخامت لایه ضد آلودگی	SiO_2	۲۰
h_{AR2}	ضخامت لایه ضد بازتاب و الکتروود شفاف	ITO	۶۵
h_{ETL}	ضخامت لایه انتقال دهنده الکترون	SnO_2	$350 \leq h_{ETL} \leq 1000$
h_{Abs}	ضخامت لایه جاذب پروسکایتی	MAPbI_3	$600 \leq h_{Abs} \leq 2000$
h_{HTL}	ضخامت لایه انتقال دهنده حفره	MoO_3	$400 \leq h_{HTL} \leq 1500$
w_h	طول و عرض سلول واحد	-	۲۰۰

۳- مدل‌سازی و روش‌های شبیه‌سازی

برای آنالیز و بررسی عملکرد، راندمان و پایداری سلول پروسکایتی دو وجهی باید یک‌بار شبیه‌سازی اپتیکی و بار دیگر شبیه‌سازی الکتریکی با دقت بالا صورت گیرد تا نتایج به‌طور صحیح و با جزئیات بیشتر به دست آیند. برای این کار، یک ساختار سه‌بعدی واحد و پیرویدیک از یک سلول خورشیدی پروسکایتی دو وجهی با طول و عرض w_h هم از نظر اپتیکی و هم از نظر الکتریکی با استفاده

$$a(\lambda) = \frac{RHI(\lambda)}{GHI(\lambda)} \quad (16)$$

که در آن $a(\lambda)$ برابر ضریب $RHI(\lambda)$ ، $albedo$ برابر میزان شدت تابش منعکس شده از سطح محیط بوده و $GHI(\lambda)$ برابر مقدار کل شدت تابش $AM1.5G$ می‌باشد که بر همین اساس شدت تابش دریافتی سلول از سمت پشت بر اثر انعکاس از سطح محیط به مقدار کل شدت تابش دریافتی سلول اضافه می‌گردد. برای محاسبه راندمان و ضریب پرشدگی سلول از معادلات ۱۷ و ۱۸ استفاده می‌شود [۴۱]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_m} = \frac{FF \times V_{OC} \times J_{SC}}{P_{AM1.5G}} \quad (17)$$

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \times J_{SC}} \quad (18)$$

در این معادلات P_{max} برابر حداکثر توان ورودی به سلول در اثر تابش نور خورشید طبق استاندارد $AM1.5G$ بوده که برابر 1000 Wm^{-2} و نهایتاً V_{OC} و J_{SC} به ترتیب ولتاژ مدار-باز و جریان-اتصال کوتاه سلول هست. یکی از فاکتورهای مهم در محاسبه سلول خورشیدی دو وجهی، ضریب دو وجهی است که نسبت بازدهی سلول تحت تابش پشت به بازدهی سلول تحت تابش جلو است بر همین اساس ضریب دو وجهی به صورت معادله ۱۹ تعریف می‌گردد [۲۹]:

$$\phi = \frac{\eta_{rear}}{\eta_{front}} \times 100 \quad (19)$$

۴- بررسی نتایج

همان‌طور که ذکر شد، یک ساختار سه‌بعدی پربودیک از یک سلول خورشیدی پروسکایتی دو وجهی مورد بررسی قرار گرفت. در این شبیه‌سازی، تابش نور خورشید طبق استاندارد $AM1.5G$ ابتدا از سمت جلو و سپس از سمت پشت به ساختار سلول مورد نظر اعمال گردید و در هر کدام از بررسی‌ها راندمان خروجی سلول محاسبه گردید. در ابتدا چند نمونه از ساختارهای متفاوت برای بررسی اینکه کدام ساختار از راندمان و پایداری بهتری برخوردار است بررسی شد که در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید هنگامی که SnO_2 به‌عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون و ماده MoO_3 به‌عنوان لایه انتقال‌دهنده حفره به کار گرفته می‌شود، عملکرد بسیار بهتری نسبت به بقیه ساختارها ارائه می‌دهد. همچنین استفاده از این دو ماده در ساختار سلول خورشیدی امکان ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی دو طرفه منعطف را فراهم می‌سازد و هزینه نهایی ساخت سلول را تا حدی کاهش می‌دهد. پایداری ساختار نهایی سلول نیز نسبت به بقیه ساختارها که از موادی مانند TiO_2 ساخته می‌شوند به مراتب بیشتر است.

عملکرد سلول خورشیدی از نظر اپتیکی مانند توزیع میدان الکتریکی، جذب، نرخ عبور، نرخ انعکاس و میزان تولید الکترون-حفره نقش بسیار مهمی در راندمان سلول دارد. به همین جهت یک موج مسطح با توان 1000 Wm^{-2} از سمت جلو و یکبار از سمت پشت به سلول اعمال گردیده است که در شکل ۳ ارائه می‌گردد. در شکل ۳، تصویر الف نشانگر نرخ تولید الکترون-حفره در لایه جاذب پروسکایت بوده و تصویر ب، نرخ توزیع میدان الکتریکی در داخل سلول را نشان می‌دهد. بار دیگر یک موج مسطح با توان $AM1.5G$ به جهت شبیه‌سازی تابش از سمت پشت به سلول اعمال گردیده است. در شکل ۳ تصویر ج، نرخ تولید الکترون-حفره در لایه جاذب پروسکایت در ساختار سلول بر اثر تابش نور از سمت پشت و در تصویر د، نرخ توزیع میدان الکتریکی در داخل سلول بر اثر تابش نور از سمت پشت نشان داده شده است. بر همین اساس طیف جذب، نرخ عبور، میزان انعکاس و میزان تولید الکترون حفره در تابش از سمت جلو در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در مشاهده می‌شود، میزان

سمت پشت، با ضرایب $albedo$ مختلف محاسبه می‌گردد. پس از محاسبه ویژگی‌های اپتیکی ساختار، برای محاسبات الکتریکی سلول هنگامی که در معرض تابش نور خورشید قرار می‌گیرد، بایستی معادلات پواسون حل شوند تا مقادیری مانند نمودار جریان-ولتاژ و توان ولتاژ و راندمان به دست آیند. بر همین اساس معادلات ۵ و ۶ به این صورت تعریف می‌شوند [۳۸]:

$$\nabla \cdot (-\epsilon_0 \epsilon_r \nabla V) = \rho \quad (5)$$

$$\rho = q(p - n + N_D - N_A) \quad (6)$$

در این معادلات V پتانسیل الکترواستاتیک، گذردهی نسبی ϵ_r و ϵ_0 $F \cdot m^{-1} \times 10^{-12} \times 8/85$ هست. همچنین بایستی معادلات پیوستگی حامل‌ها برای الکترون و حفره‌ها حل گردند پس معادلات ۷ و ۸ به این صورت خواهند بود [۳۸]:

$$\nabla \cdot J_n + G - R = 0 \quad (7)$$

$$-\nabla \cdot J_p + G - R = 0 \quad (8)$$

J_n برابر چگالی جریان الکترون‌ها و J_p برابر چگالی جریان حفره‌ها هست. G میزان نرخ تولید الکترون حفره در اثر تابش نور خورشید هست و همچنین پارامتر R برابر جمع نرخ بازترکیب الکترون و حفره‌ها هست. معادلات رانش و نفوذ نیز با استفاده از مجموعه معادلات ۹ الی ۱۲ محاسبه می‌گردند [۳۸]:

$$D_n = \mu_n K_B T \quad (9)$$

$$D_p = \mu_p K_B T \quad (10)$$

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \nabla n \quad (11)$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \nabla p \quad (12)$$

در این معادلات، q برابر واحد بار هست که مقدار آن برابر $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ هست. μ_p و μ_n به ترتیب موبیلیته‌های مربوط به الکترون و حفره‌ها می‌باشند و D_n و D_p به ترتیب ضرایب نفوذ مربوط به الکترون‌ها و حفره‌ها می‌باشند. K_B نیز برابر ثابت بولتزمن بوده و T دمای محیط هست. پروسه بازترکیب در داخل سلول‌های خورشیدی می‌تواند به صورت مختلفی صورت پذیرد. انواع بازترکیب در سلول‌های خورشیدی عبارت‌اند از: بازترکیب اوژه^۱، بازترکیب تابشی^۲ و بازترکیب غیرتابشی^۳ و یا بازترکیب بر اثر تله‌ها^۴. بازترکیب اوژه زمانی رخ می‌دهد که حامل به هنگام بازترکیب انرژی خود را به حامل دیگری انتقال می‌دهد. احتمال وقوع بازترکیب از نوع اوژه با افزایش چگالی حامل‌ها افزایش می‌یابد. بازترکیب غیرتابشی موجب گسیل فوتون نمی‌گردد. این نوع از بازترکیب به دلیل وجود ناخالصی و یا انواع ناراستی‌ها در داخل ماده بوده و خروجی آن به صورت گرما و کاهش بازدهی کلی سلول خواهد بود. بنابراین یک مانع در افزایش بازدهی سلول هست. بازترکیب تابشی در هنگام بازترکیب الکترون با حفره‌ها خواهد بود و این نوع از بازترکیب موجب گسیل فوتون می‌گردد. بازترکیب توسط تله‌ها به دلیل برانگیخته شدن الکترون‌ها در تله‌ها و کاهش طول عمر الکترون‌ها رخ می‌دهد. برای بررسی و آنالیز انواع بازترکیب‌ها در داخل ساختار مورد نظر، معادلات ۱۳، ۱۴ و ۱۵ بکار گرفته می‌شوند [۳۹]:

$$R_{rad} = C_{opt}(np - n_i^2)\rho \quad (13)$$

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_i) + \tau_n(p + p_i)} \quad (14)$$

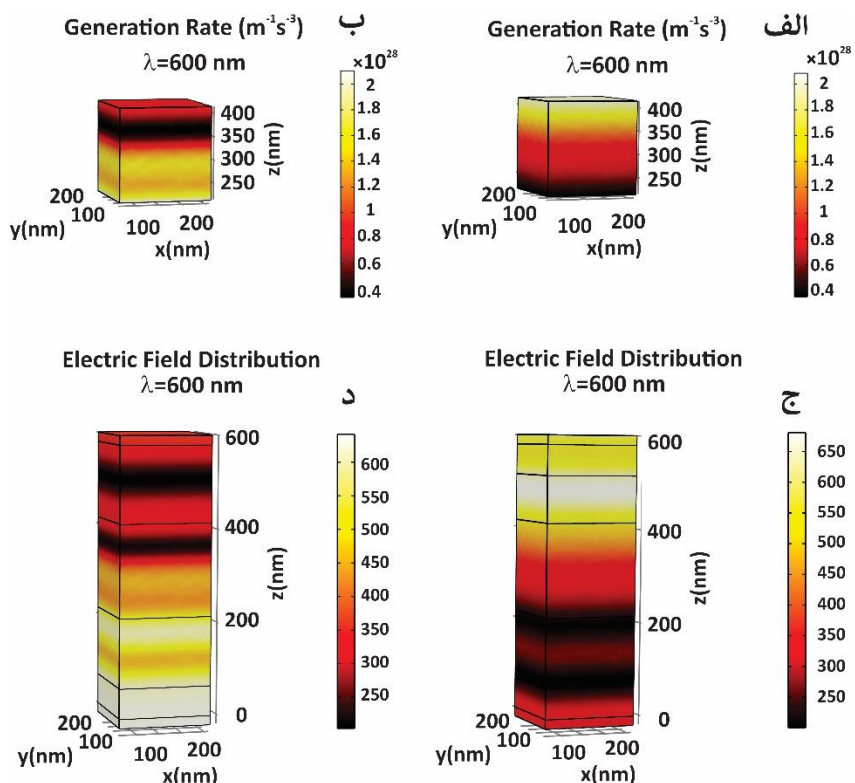
$$R_{Auger} = C_n(pn^2 - nn_i^2) + C_p(np^2 - pn_i^2) \quad (15)$$

τ_n برابر طول عمر الکترون و τ_p برابر طول عمر حفره‌ها هست. n_i و p_i برابر چگالی الکترون‌ها و حفره‌های تله شده می‌باشند. همچنین ضریب $albedo$ برای محاسبه درصد انعکاس تابش از سطح خورشید به صورت معادله ۱۶ تعریف می‌گردد [۴۰]:

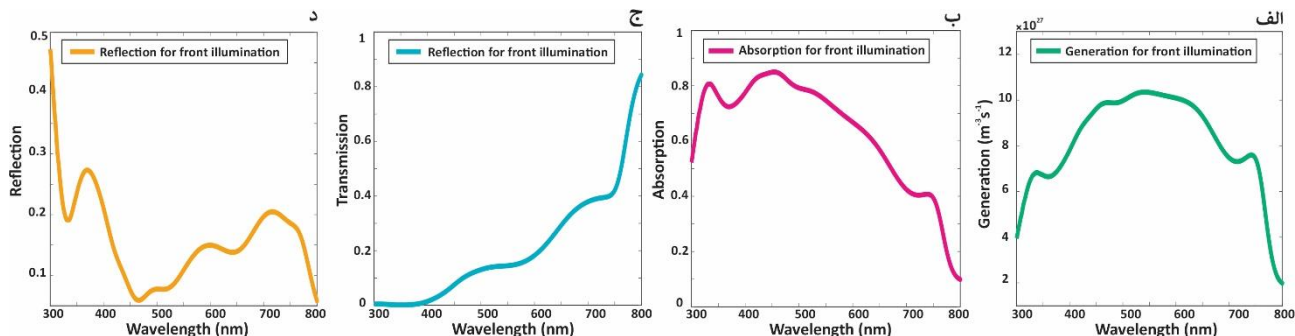
جدول ۲- مقایسه چند ساختار متفاوت سلول خورشیدی دو وجهی

ETL	HTL	PCE (front)	PCE (rear)	Bifactoriality factor
SnO ₂	Spiro-OMeTAD	۱۴/۰۳۶	۷/۵۷۳۴	۵۳/۹۵
TiO ₂	CuScN	۱۴/۷۶۵	۱۳/۸۷۶	۹۳/۹۷
TiO ₂	MO ₃	۱۴/۹۵۱	۱۳/۲۴۷	۸۸/۶۰۲
ZnO	Spiro-OMeTAD	۱۲/۵۴۹	۷/۷۰۷۱	۶۱/۴۱
TiO ₂	Spiro-OMeTAD	۱۳/۷۲۴	۶/۹۰۳۸	۵۰/۳۰
SnO ₂	MoO ₃	۱۴/۶۴۵	۱۳/۹۶۳	۹۵/۳۴

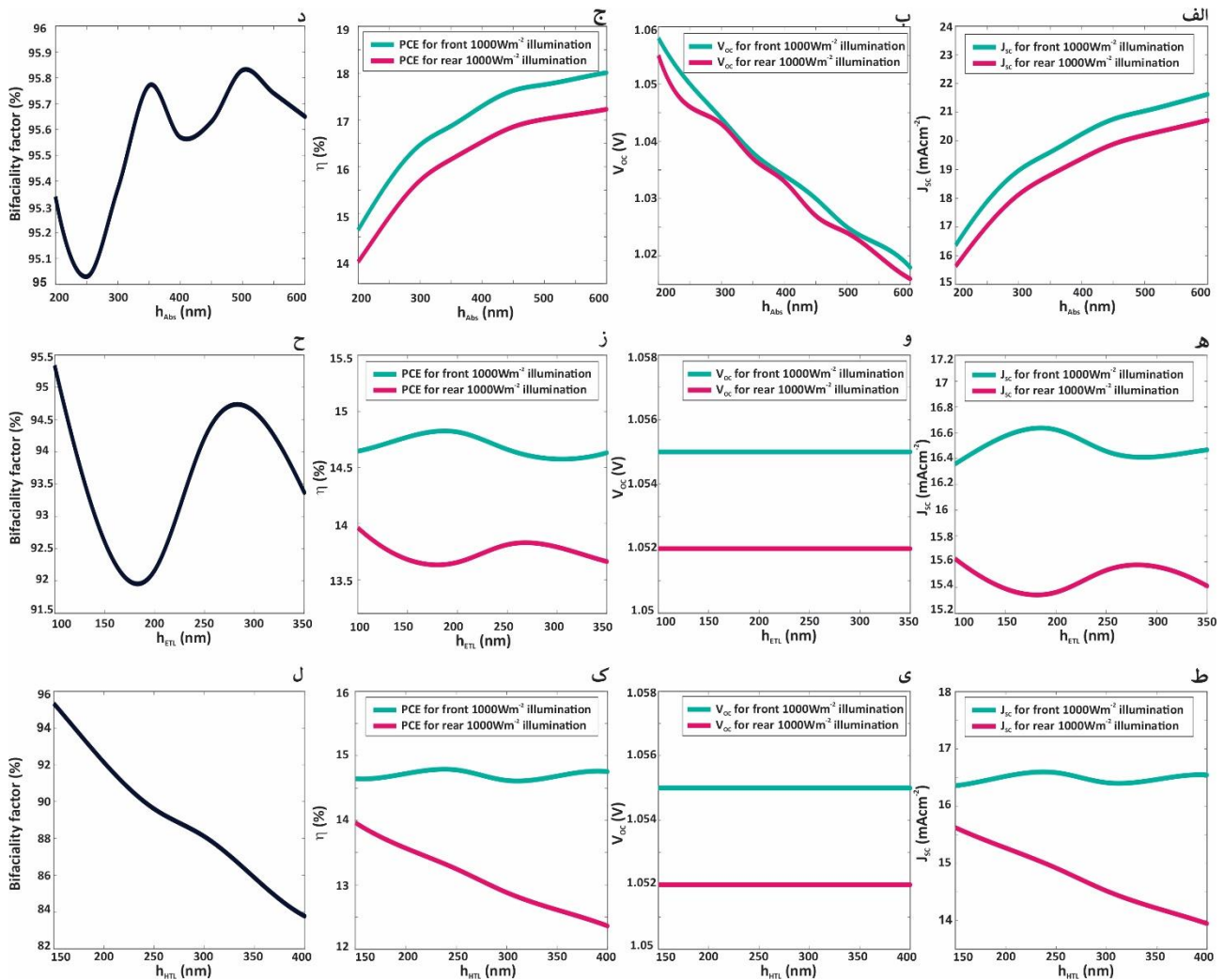
جذب سلول در طول موج ۴۰۰ الی ۵۰۰ نانومتر در حداکثر مقدار خود بوده و همچنین میزان تولید الکترون حفره نیز در طول موج ۵۰۰ تا ۵۵۰ در حداکثر مقدار خود هست. البته در ساختار سلول‌های یک وجهی از یک الکترون فلزی مانند طلا یا نقره استفاده می‌گردد که موجب بازتاب دوباره نور عبور شده از لایه پروسکایت می‌شود و این امر موجب بیشتر بودن بازدهی سلول یک وجهی می‌گردد. ولی در سلول‌های دو وجهی چون ورود نور به لایه جذب پروسکایت از دو سمت هست، این امر باعث می‌گردد که میزان تولید الکترون حفره بیشتر در سلول‌های پروسکایتی دو وجهی می‌گردد و بر همین اساس سلول‌های دو وجهی به مراتب بازدهی بهتری نسبت به سلول‌های یک وجهی ارائه می‌دهد. همچنین در نوع خاصی از سلول‌های دو وجهی موسوم به سلول‌های نیمه شفاف میزان ضریب عبور از لایه‌های سلول بیشتر بوده و این امر موجب نیمه شفاف بودن سلول در عین راندمان مناسب سلول می‌گردد.



شکل ۳- الف) شبیه سازی نرخ تولید الکترون حفره تحت تابش AM1.5G به سلول پروسکایتی دو وجهی از سمت جلو در طول موج ۶۰۰ نانومتر. ب) شبیه سازی توزیع میدان الکتریکی تحت تابش AM1.5G به سلول پروسکایتی دو وجهی از سمت جلو در طول موج ۶۰۰ نانومتر. ج) شبیه سازی نرخ تولید الکترون حفره تحت تابش AM1.5G به سلول پروسکایتی دو وجهی از سمت پشت در طول موج ۶۰۰ نانومتر. د) شبیه سازی توزیع میدان الکتریکی تحت تابش AM1.5G به سلول پروسکایتی دو وجهی از سمت پشت در طول موج ۶۰۰ نانومتر.



شکل ۴- طیف مربوط به تابش از سمت روبرو به سلول خورشیدی پروسکایتی دو وجهی (الف) طیف مربوط به نرخ تولید الکترون حفره از سمت روبرو به سلول خورشیدی پروسکایتی دو وجهی (ب) طیف مربوط به نرخ جذب (ج) طیف مربوط به نرخ عبور نور از لایه پروسکایت. د) طیف نرخ بازتاب



شکل ۵- الف) میزان تغییرات جریان اتصال کوتاه برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه جاذب پروسکایت. ب) میزان تغییرات ولتاژ مدار باز سلول برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه جاذب پروسکایت ج) میزان تغییرات راندمان سلول برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه جاذب پروسکایت. د) میزان تغییرات ضریب دو وجهی برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه جاذب پروسکایت. ه) میزان تغییرات جریان اتصال کوتاه برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال دهنده الکترون. و) میزان تغییرات ولتاژ مدار باز سلول برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال دهنده الکترون. ز) میزان تغییرات راندمان سلول برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال دهنده الکترون. ح) میزان تغییرات ضریب دو وجهی برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال دهنده الکترون. ط) میزان تغییرات جریان اتصال کوتاه برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال دهنده حفره. ی) میزان تغییرات ولتاژ مدار باز سلول برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال دهنده حفره. ک) میزان تغییرات راندمان سلول برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال دهنده حفره. ل) میزان تغییرات ضریب دو وجهی برای تابش از سمت پشت و جلو به صورت جداگانه بر اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال دهنده حفره

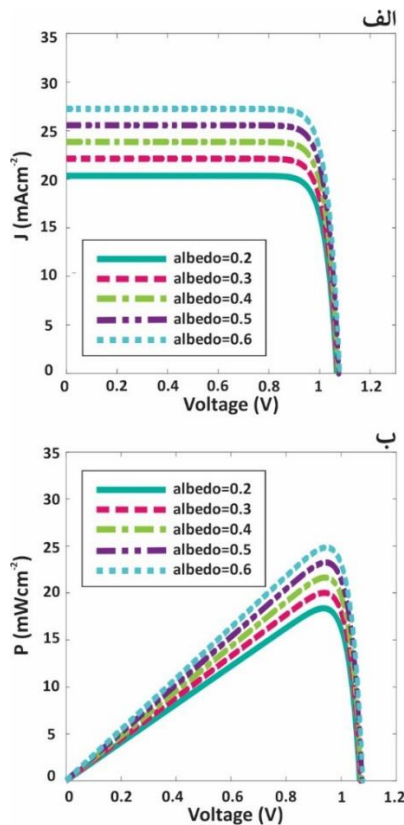
به مرور کاهش می‌یابد و نشانگر این است که ضخامت‌های بالاتر افزایش ضخامت تأثیر بسیار کمی در بازدهی کلی سلول هم در تابش از سمت پشت و از سمت جلو خواهد داشت. این روال برای نمودار تغییرات ولتاژ مدار-باز این روال به‌طور برعکس همین‌طور هست؛ اما در نمودار تغییرات ولتاژ مدار-باز این روال به‌طور برعکس بوده و با افزایش ضخامت لایه جاذب، کاهش محسوسی در ولتاژ مدار-باز سلول برای تابش از هر دو سمت مشاهده می‌شود. برای مشاهده تأثیر افزایش ضخامت لایه انتقال دهنده الکترون بر روی پارامترهای راندمان، ضریب دو وجهی و جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار-باز، ضخامت لایه انتقال دهنده الکترون افزایش داده شد که در شکل ۵ قسمت هـ الی ح نشان داده شده است.

پس از شبیه‌سازی الکترومغناطیسی سلول، اقدام به شبیه‌سازی الکترونیکی سلول گردید و راندمان سلول، ضریب دو وجهی، ولتاژ مدار-باز و جریان اتصال کوتاه در ضخامت‌های مختلف برای لایه‌های، لایه جاذب پروسکایت و لایه انتقال دهنده حفره محاسبه می‌گردید. شکل ۵ میزان تغییرات پارامترهای مختلف سلول در اثر تغییرات ضخامت لایه جاذب پروسکایت، ضخامت لایه انتقال دهنده الکترون و لایه انتقال دهنده حفره را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌کنید، نرخ ضریب دو وجهی در ضخامت ۵۲۰ نانومتر لایه جاذب پروسکایت به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین شیب خط نمودار تغییرات بازدهی در اثر تغییرات ضخامت لایه جاذب

را بر اثر تغییرات محیطی در بر گیرد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، با افزایش ضریب albedo نرخ تولید الکترون-حفره افزایش می‌یابد.

جدول ۳ - چند نمونه از سطوح بازتاب مختلف به همراه مقدار albedo [۴۲]

مقدار albedo	سطح بازتاب
۰.۲۵ الی ۰.۳	چمن
۰.۳ الی ۰.۵	یخ
۰.۲ الی ۰.۵	آسفالت
۰.۱ الی ۰.۵	اقیانوس



شکل ۷- الف) تغییرات نمودار جریان-ولتاژ و با افزایش ضریب albedo از ۰/۲ تا ۰/۶. ب) تغییرات نمودار توان-ولتاژ و با افزایش ضریب albedo از ۰/۲ تا ۰/۶

جدول ۴-مقایسه ساختار ارائه شده با مراجع

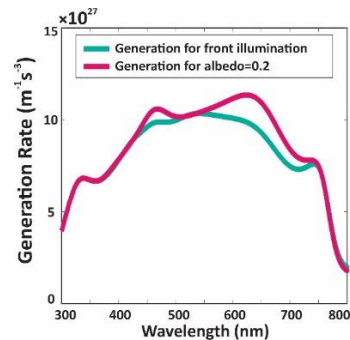
Bifactoriality factor	η_{front}	η_{rear}	ساختار
90.55	17.68	16.01	مرجع [26]
97.09	17.68	16.7	مرجع [27]
77.9	19.87	15.48	مرجع [28]
95.65	18.01	17.227	ساختار ارائه شده

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک ساختار کامل سلول پروسکایتی دو وجهی مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله بجای الکترون فلزی مانند طلا یا نقره، از یک الکترون شفاف ITO به‌عنوان الکترون پشته استفاده گردید. ابتدا با استفاده از روش المان محدود، شبیه‌سازی ایتیکی برای بررسی پارامترهای ایتیکی سلول مانند جذب و ... انجام گرفت و سپس برای محاسبه راندمان معادلات پواسون و پیوستگی حامل‌ها برای ساختار موردنظر محاسبه گردید و راندمان سلول به دست آمد. همچنین برای بررسی اثر تغییرات ضخامت لایه‌های مختلف، ضخامت هر کدام از بخش‌های مختلف سلول به‌طور جداگانه تغییر یافت و در نمودارهای مختلف ارائه گردید؛ و راندمان این سلول تا ۱۸/۰۰۹ درصد برای تابش از سمت جلو و

همان‌طور که در این بخش نشان داده شده است نرخ ضریب دو وجهی در ضخامت ۱۰۰ نانومتر در حداکثر مقدار خود هست همچنان شیب خط نمودار تغییرات بازدهی در اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال‌دهنده الکترون به‌صورت نوسانی بوده هست. این تغییرات برای بازده تابش از سمت پشت نیز به همین قرار است. این روال برای نمودار تغییرات جریان اتصال کوتاه نیز همین‌طور هست؛ اما در نمودار تغییرات ولتاژ مدار-باز برای هر دو تابش از سمت جلو و پشت در اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال‌دهنده الکترون ثابت بوده و تغییری در ولتاژ مدار-باز سلول مشاهده نمی‌شود. این بار اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال‌دهنده حفره در پارامترهای الکتریکی سلول مورد بررسی قرار گرفته است و برای این کار ضخامت لایه انتقال‌دهنده حفره به‌مرور از ضخامت ۱۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر افزایش یافته است. نتایج تغییرات ضخامت لایه انتقال‌دهنده حفره در شکل ۵ در بخش‌های ط الی ل ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ بخش ل نشان داده شده است نرخ ضریب دو وجهی در ضخامت ۱۵۰ نانومتر برای لایه انتقال‌دهنده حفره در حداکثر مقدار خود هست همچنان شیب خط نمودار تغییرات بازدهی در اثر تغییرات ضخامت لایه جذب به‌صورت نوسانی بوده هست. این تغییرات برای بازده تابش از سمت پشت به‌صورت نزولی هست و به‌مرور کاهش می‌یابد. این روال برای نمودار تغییرات جریان اتصال کوتاه نیز همین‌طور هست؛ اما در نمودار تغییرات ولتاژ مدار-باز برای هر دو تابش از سمت جلو و پشت در اثر تغییرات ضخامت لایه انتقال‌دهنده حفره ثابت بوده و تغییری در ولتاژ مدار-باز سلول مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که می‌دانیم، محیط‌های مختلف مانند محیط آبی، برف، چمن و... دارای albedo متفاوتی می‌باشند در جدول ۳ چند مثال از محیط‌های مختلف با مقدار albedo آورده شده است. [۴۲] که این امر بر راندمان کلی سلول هنگامی که در محیط بیرون قرار می‌گیرد تأثیر می‌گذارد. برای بررسی این امر هنگام تابش نور خورشید از سمت جلو طبق استاندارد AM1.5G، یک تابش از سمت پشت با ضریب $albedo=0.2$ به سلول دو وجهی اعمال گردیده است و تأثیر آن بر روی میزان تولید الکترون حفره در طول موج‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- تأثیر تابش از سمت پشت با ضریب $albedo=0.2$ بر روی میزان تولید الکترون-حفره در طول موج‌های مختلف

در شکل ۶، همان‌طور که مشاهده می‌شود با تابش از سمت پشت، میزان نرخ تولید الکترون-حفره در بازه طول موج ۴۵۰ نانومتر تا ۷۵۰ نانومتر به‌صورت محسوس افزایش می‌یابد. این امر موجب افزایش راندمان سلول در حالت کلی می‌گردد و سلول‌های دو وجهی را از سایر ساختارها متمایز می‌کند.

نهایتاً نمودار جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ برای ضرایب مختلف برای ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی دو وجهی با ضخامت ۲۰۰ نانومتر برای لایه جذب نور پروسکایت، ۱۰۰ نانومتر برای لایه انتقال‌دهنده الکترون و ۱۵۰ نانومتر برای لایه انتقال‌دهنده حفره در نمودار شماره ۷-الف آورده شده است. در شکل ۷، تغییرات نمودار جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ با افزایش ضریب albedo از ۰/۲ تا ۰/۶ نشان داده شده است تا تغییرات مشخصه‌های الکتریکی سلول

- [21] S. Gan, H. Sun, C. Li, D. Dou, and L. Li, "Bifacial perovskite solar cells: a universal component that goes beyond albedo utilization," *Science Bulletin*, 2023.
- [22] F. Fu *et al.*, "Low-temperature-processed efficient semi-transparent planar perovskite solar cells for bifacial and tandem applications," *Nature communications*, vol. 6, no. 1, p. 8932, 2015.
- [23] Y. Xiao, G. Han, J. Wu, and J.-Y. Lin, "Efficient bifacial perovskite solar cell based on a highly transparent poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) as the p-type hole-transporting material," *Journal of Power Sources*, vol. 306, pp. 171-177, 2016.
- [24] L. Fan *et al.*, "Delayed annealing treatment for high-quality CuSCN: Exploring its impact on bifacial semitransparent nip planar perovskite solar cells," *ACS Applied Energy Materials*, vol. 1, no. 4, pp. 1575-1584, 2018.
- [25] Y. Li, J. Duan, Y. Zhao, and Q. Tang, "All-inorganic bifacial CsPbBr₃ perovskite solar cells with a 98.5%-bifacial factor," *Chemical communications*, vol. 54, no. 59, pp. 8237-8240, 2018.
- [26] M. A. Truong *et al.*, "Near-ultraviolet transparent organic hole-transporting materials containing partially oxygen-bridged triphenylamine skeletons for efficient perovskite solar cells," *ACS Applied Energy Materials*, vol. 4, no. 2, pp. 1484-1495, 2021.
- [27] M.-A. Park *et al.*, "Bifunctional graphene oxide hole-transporting and barrier layers for transparent bifacial flexible perovskite solar cells," *ACS Applied Energy Materials*, vol. 4, no. 9, pp. 8824-8831, 2021.
- [28] J. Heo *et al.*, "Highly Efficient Bifacial Color-Tunable Perovskite Solar Cells," *Advanced Optical Materials*, vol. 10, no. 2, p. 2101696, 2022.
- [29] M. Najafi *et al.*, "Light-Soak Stable Semitransparent and Bifacial Perovskite Solar Cells for Single-Junction and Tandem Architectures," *Solar RRL*, vol. 6, no. 4, p. 2100621, 2022.
- [30] L. Fan *et al.*, "Enhanced photovoltaic output of bifacial perovskite solar cells via tailoring photoelectric balance in rear window layers with 1T-WS₂ nanosheet engineering," *Materials Chemistry Frontiers*, vol. 6, no. 15, pp. 2061-2071, 2022.
- [31] A. Ali, J. H. Kang, J. H. Seo, and B. Walker, "Effect of plasmonic Ag nanoparticles on the performance of inverted perovskite solar cells," *Advanced Engineering Materials*, vol. 22, no. 3, p. 1900976, 2020.
- [32] H. Zhu *et al.*, "Preparation of TiO₂ electron transport layer by magnetron sputtering and its effect on the properties of perovskite solar cells," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 3166-3175, 2022.
- [33] M. K. Hossain *et al.*, "Photovoltaic performance investigation of Cs₃Bi₂I₉-based perovskite solar cells with various charge transport channels using DFT and SCAPS-1D frameworks," *Energy & Fuels*, vol. 37, no. 10, pp. 7380-7400, 2023.
- [34] Q. Dong *et al.*, "Insight into perovskite solar cells based on SnO₂ compact electron-selective layer," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 119, no. 19, pp. 10212-10217, 2015.
- [35] Y. Zhang, Z. Jiang, W. Zhang, L. Yan, C. Lu, and C. Ni, "Pre-crystallisation applied in sequential deposition approaches to improve the photovoltaic performance of perovskite solar cells," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 832, p. 153616, 2020.
- [36] Y. Gong, Y. Dong, B. Zhao, R. Yu, S. Hu, and Z. a. Tan, "Diverse applications of MoO₃ for high performance organic photovoltaics: fundamentals, processes and optimization strategies," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 8, no. 3, pp. 978-1009, 2020.
- [37] A. Jangjoo and S. Matloub, "Theoretical study of Ag and Au triple core-shell spherical plasmonic nanoparticles in ultra-thin film perovskite solar cells," *Optics Express*, vol. 31, no. 12, pp. 19102-19115, 2023.
- [38] P. K. Patel, "Device simulation of highly efficient eco-friendly CH₃NH₃SnI₃ perovskite solar cell," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 3082, 2021.
- [39] N. Jaiswal, V. P. Singh, D. Kumari, and S. K. Pandey, "Performance Analysis of Triple-Cation Mixed-Halide Bifacial Perovskite Solar Cell with 17% Rear and 25% Front Efficiency," *Energy Technology*, vol. 12, no. 2, p. 2300639, 2024.
- [40] A. Garrod and A. Ghosh, "A review of bifacial solar photovoltaic applications," *Frontiers in Energy*, vol. 17, no. 6, pp. 704-726, 2023.
- [41] D. Du, C. Gao, H. Wang, and W. Shen, "Photovoltaic performance of bifacial perovskite/c-Si tandem solar cells," *Journal of Power Sources*, vol. 540, p. 231622, 2022.
- [42] A. H. Duhis, M. Aljanabi, and M. S. S. Al-Kafaji, "Increasing photovoltaic system power output with white paint albedo—a scenario in Al-Mausaib City using PVSyst. software," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 14, no. 2, pp. 1149-1159, 2023.
- ۱۷/۲۲۷ درصد) برای حالت $\text{albedo} = 1$ توجه داشته باشید که این عدد برای محیط های مختلف متفاوت می باشد و این رقم برای حالت ایده آل صرفاً جهت محاسبه ضریب دو وجهی آورده شده است) از سمت پشت بهبود یافت. مقایسه نرخ بازدهی ساختار ارائه شده با مراجع بررسی شده در جدول ۴ آورده شده است. سپس اثر انعکاس از سمت پشت بر روی نرخ تولید الکترون-حفره در لایه جاذب بررسی شد و مشاهده کردیم که با دریافت نور از سمت پشت سلول، نرخ تولید الکترون حفره افزایش می‌یابد. سپس نمودارهای مربوط به پارامترهای الکتریکی سلول ارائه گردید و مشاهده شد که جریان اتصال کوتاه سلول در ضرایب بالاتر تا $27/24 \text{ mA/cm}^2$ افزایش می‌یابد.
- ### مراجع
- [1] ع. کتابی، "استفاده از میدل چند سطحی ماژولار با استفاده از روش کنترل پیش‌بین در سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه،" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، ۱۳۹۷.
- [2] ک. عباسیان، "افزایش بازده سلول خورشیدی GaAs مبتنی بر ساختار p-n باند میانی توسط نقاط کوانتومی InAs در ناحیه ذاتی آن،" ۱۳۹۸.
- [3] M. A. Green, A. Ho-Baillie, and H. J. Snaith, "The emergence of perovskite solar cells," *Nature photonics*, vol. 8, no. 7, pp. 506-514, 2014.
- [4] G. Hodes and D. Cahen, "Perovskite cells roll forward," *Nature Photonics*, vol. 8, no. 2, pp. 87-88, 2014.
- [5] J. Britt and C. Ferekides, "Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency," *Applied physics letters*, vol. 62, no. 22, pp. 2851-2852, 1993.
- [6] I. Repins *et al.*, "19.9%-efficient ZnO/CdS/CuInGaSe₂ solar cell with 81.2% fill factor," *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, vol. 16, no. 3, pp. 235-239, 2008.
- [7] M. Graetzel, R. A. Janssen, D. B. Mitzi, and E. H. Sargent, "Materials interface engineering for solution-processed photovoltaics," *Nature*, vol. 488, no. 7411, pp. 304-312, 2012.
- [8] J. Halls *et al.*, "Efficient photodiodes from interpenetrating polymer networks," *Nature*, vol. 376, no. 6540, pp. 498-500, 1995.
- [9] B. O'regan and M. Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films," *nature*, vol. 353, no. 6346, pp. 737-740, 1991.
- [10] C. W. Tang, "Two-layer organic photovoltaic cell," *Applied physics letters*, vol. 48, no. 2, pp. 183-185, 1986.
- [11] T. K. Todorov, K. B. Reuter, and D. B. Mitzi, "High-efficiency solar cell with earth-abundant liquid-processed absorber," *Advanced materials*, vol. 22, no. 20, pp. E156-E159, 2010.
- [12] G. Li *et al.*, "High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends," *Nature materials*, vol. 4, no. 11, pp. 864-868, 2005.
- [13] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells," *Journal of the american chemical society*, vol. 131, no. 17, pp. 6050-6051, 2009.
- [14] H.-S. Kim *et al.*, "Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%," *Scientific reports*, vol. 2, no. 1, p. 591, 2012.
- [15] R. Siavash Moakhar *et al.*, "Recent advances in plasmonic perovskite solar cells," *Advanced science*, vol. 7, no. 13, p. 1902448, 2020.
- [16] C. Hu, M. Li, J. Qiu, and Y.-P. Sun, "Design and fabrication of carbon dots for energy conversion and storage," *Chemical Society Reviews*, vol. 48, no. 8, pp. 2315-2337, 2019.
- [17] L. Janßen, H. Windgassen, D. Bätzner, B. Bitnar, and H. Neuhaus, "Silicon nitride passivated bifacial Cz-silicon solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 8, pp. 1435-1439, 2009.
- [18] A. Romeo, G. Khrypunov, S. Galassini, H. Zogg, and A. Tiwari, "Bifacial configurations for CdTe solar cells," *Solar energy materials and solar cells*, vol. 91, no. 15-16, pp. 1388-1391, 2007.
- [19] J. Pang *et al.*, "Preparation and characteristics of MoSe₂ interlayer in bifacial Cu (In, Ga) Se₂ solar cells," *Physics Procedia*, vol. 32, pp. 372-378, 2012.
- [20] J. Park *et al.*, "Controlled growth of perovskite layers with volatile alkylammonium chlorides," *Nature*, vol. 616, no. 7958, pp. 724-730, 2023.