

## شبیه سازی و بررسی سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید و بهبود عملکرد آن با ایجاد یک میدان الکتریکی

### در سطح پسین

محمد دانایی<sup>۱</sup>، عبدالله عباسی<sup>۲</sup>، محمد باویر<sup>۳</sup>، محسن وحدانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران danaie@semnan.ac.ir

<sup>۲</sup>استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران a\_abbasi@semnan.ac.ir

<sup>۳</sup>دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران m.bavir@semnan.ac.ir

<sup>۴</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران mvahdani@semnan.ac.ir

### چکیده

در این مقاله سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید (CdTe) با استفاده از نرم افزار SCAPS مورد شبیه سازی و بررسی قرار گرفته است و روشی برای بهبود بازده این نوع سلول خورشیدی ارائه شده است. ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید شامل لایه های n-ZnO-Al و CdS، CdTe، Ni می باشد. با تابش نور خورشید به محل اتصال CdTe/CdS الکترون های این ناحیه برانگیخته شده و قبل از اینکه این الکترون ها با حفره ها بازترکیب شوند تحت تاثیر میدان الکتریکی حاصل از اتصال CdTe/CdS در خلاف جهت میدان حرکت کرده و موجب ایجاد جریان در سلول می شوند. این فرآیند در حالی صورت می گیرد که در انتهای سلول به دلیل ضعیف بودن این میدان الکترون های برانگیخته شده با حفره ها بازترکیب می شوند. در روش پیشنهاد شده، با اضافه کردن یک لایه قلع سولفاید به ضخامت  $0.4 \mu\text{m}$  به لایه جاذب (CdTe)، یک میدان الکتریکی پشتی کمکی در جهت میدان اصلی ایجاد می شود که این میدان باعث کاهش بازترکیب حامل های تولید شده در طول موج های بلند در انتهای سلول شده و منجر به بهبود و افزایش بازدهی سلول نسبت به ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید از مقادیر اولیه بازده کوانتمی  $\eta = 19.9\%$ ، ضریب پرتلاطمی  $FF = 85/14\%$ ، جریان اتصال کوتاه  $J_{sc} = 25.7 \text{ mA/cm}^2$ ، و ولتاژ مدار باز  $V_{oc} = 0.877 \text{ V}$  به ترتیب به مقادیر  $22/98\%$ ،  $85/99\%$ ،  $32/51 \text{ mA/cm}^2$  و  $0.827 \text{ V}$  می گردد.

### کلیدواژه

سلول خورشیدی، لایه جاذب، لایه بافر، میدان الکتریکی سطح پشتی، شکاف نوار

### مقدمه

امروزه محققان به دنبال توسعه فناوری برای ادغام و کنترل منابع تجدیدپذیر به عنوان گزینه اصلی جایگزین منابع انرژی می باشند، زیرا حجم بسیار بالای تولید آلودگی در هنگام استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر خطرات زیادی را برای محیط زیست ایجاد کرده است [۱ و ۲]. از طرفی انرژی خورشیدی به عنوان اصلی ترین منبع انرژی تجدیدپذیر بر روی کره زمین به طور مستقیم و غیر مستقیم قابل استفاده می باشد از اینرو توسعه صنعت سلول های خورشیدی فتوولتائیک به یک ضرورت تبدیل شده است. در میان نسل های مختلف سلول های خورشیدی، سلول های خورشیدی لایه نازک با بازده تبدیل انرژی بسیار عالی نقش مهمی را در تامین انرژی جهان ایفا می کنند. این نوع سلول ها در مقایسه با سلول های خورشیدی رایج دارای هزینه ساخت بسیار پایین، پایداری و انعطاف پذیری بالاتری هستند و به مواد کمتری برای ساخت احتیاج دارند [۳ و ۴]. سلول های خورشیدی لایه نازک به دسته دوم سلول های خورشیدی تعلق دارند و به چهار گروه a-Si، CdS/Cu<sub>2</sub>S، CdTe و CIGS تقسیم می شوند. در میان این چهار گروه، سلول های خورشیدی CdTe و CIGS بیشتر مورد

توجه قرار گرفته اند، لذا تحقیقات بسیاری برای بهبود بازده این نوع سلول ها انجام شده است [۵ و ۶]. در تحقیقات انجام شده بر روی سلول های خورشیدی CIGS مشخص شده است که علاوه بر بازدهی بسیار عالی، این نوع سلول ها دارای مقاومت خوبی در برابر تابش های شدید نور خورشید می باشند [۷]. گزارش ها در سال های اخیر نشان می دهد که بیشترین بازده بدست آمده برای سلول خورشیدی CIGS در حدود  $22/9\%$  بوده است [۸]. از طرفی پژوهش های انجام شده بر روی سلول های خورشیدی کادمیوم تلوراید نشان می دهد که در ۷ سال گذشته بازده این سلول ها از  $16\%$  به  $21\%$  درصد رسیده است [۹]. سلول های خورشیدی کادمیوم تلوراید ضریب جذب نوری وسیعی دارند و در این نوع سلول ها تنها ضخامتی بین ۲ تا ۸ میکرون از مادهی کادمیوم تلوراید به عنوان لایه جاذب نیاز است. علاوه بر این، شکاف نوار CdTe کاملاً مطابق با طیف خورشیدی بوده بطوریکه این شکاف نواری بیشترین بازدهی تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی را دارد [۱۰]. سلول های خورشیدی کادمیوم تلوراید ثبات عملکرد بلند مدت بهتری دارند و به خوبی برای تولید با حجم بالا مناسب هستند.

نشان داده شد که باز ترکیب حامل‌ها در طول موج‌های بلند کاهش پیدا کرده و همین امر باعث بهبود بازده سلول خورشیدی شده است.

### ساختار سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید

#### اکسید رسانای شفاف (TCO)

از اکسید رسانای شفاف به دلیل شفافیت بسیار بالا و رسانایی بسیار عالی می‌توان در طیف وسیعی از کاربردهای اپتوالکترونیکی استفاده کرد. این لایه به عنوان اتصال جلویی در سطح سلول و به منظور انتقال حامل‌های تولید شده در سلول خورشیدی استفاده می‌شود. از اکسید روی به طور معمول در قطعات نوری مثل ال ای دی‌ها و لیزرها استفاده می‌شود و در صورتی که به اکسید روی فلز آلومینیوم اضافه گردد می‌توان از این ماده به عنوان اتصال جلویی در سلول‌های خورشیدی استفاده کرد. از جمله ویژگی‌هایی که باید اتصال دهنده‌های جلویی داشته باشد این است که مقاومت نوری آنها بسیار کم باشد. به عبارت دیگر باید شفاف باشند تا بتوانند کل نور را به داخل سلول خورشیدی انتقال دهند. همچنین با ایجاد یک اتصال اهمی، رسانایی بالایی به منظور انتقال حامل‌ها به خروجی داشته باشند. با توجه به ویژگی‌های مورد نیاز گفته شده برای اتصال جلویی در یک سلول خورشیدی، اکسید روی-آلومینیوم می‌تواند گزینه‌ی مناسبی باشد [۱۵ و ۱۶].

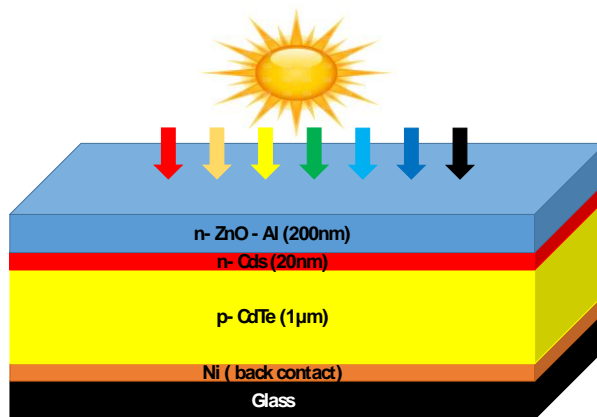
#### لایه پنجره کادمیوم سولفاید

با توجه به شکاف نوار کادمیوم سولفاید، طول موج‌های ۵۰۰ nm تا ۵۴۰ nm به راحتی قابل عبور از این ماده می‌باشند. لذا در این حالت لایه جاذب می‌تواند فوتون‌های بیشتری در این رنج طول موج جذب کرده و جفت الکترون-حفره بیشتری تولید کند. به همین دلیل به این لایه، لایه پنجره گفته می‌شود. از طرفی، با در نظر گرفتن این نکته که در نیمه هادی نوع n قابلیت تحرک الکترون‌ها نسبت به تحرک حفره‌ها در نیمه هادی نوع p بیشتر است، لایه نوع n کادمیوم سولفاید بر روی لایه جاذب نوع p کادمیوم تلوراید قرار می‌گیرد. همچنین این لایه وظیفه ایجاد یک میدان الکتریکی به منظور جداسازی و جلوگیری از باز ترکیب حامل‌ها را دارد. این لایه باید شفاف و نازک و فاقد مقاومت نوری باشد تا نور به راحتی وارد ساختار سلول خورشیدی شود. آرایش این لایه باید در حد معمول در نظر گرفته شود، چرا که زیاد بودن آرایش آن باعث باز ترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها شده و در صورت کم بودن مقدار آرایش، از رسانایی این لایه کاسته و باعث افزایش مقاومت الکتریکی آن می‌گردد. بطور معمول آرایش آن  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  و ضخامت آن حدود ۲۰ nm در نظر گرفته می‌شود [۱۷ و ۱۸].

#### لایه جاذب (CdTe)

یکی از مهمترین لایه‌ها در المان‌های فوتولتائیک لایه جاذب می‌باشد. وظیفه‌ی اصلی این لایه جذب فوتون‌های نور خورشید با انرژی بیش از

با در نظر گرفتن همه‌ی این فاکتورها، سلول‌های خورشیدی کادمیوم تلوراید ترکیب منحصر به فردی از مزایای اقتصادی و زیست محیطی نسبت به سایر فناوری‌های فوتولتائیک می‌دهند [۱۱]. ماده‌ی کادمیوم تلوراید یک ترکیب بلوری بسیار پایدار است. سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید از چند لایه نیمه هادی و فلز تشکیل شده است بطوریکه بخش فعال آن شامل یک پیوند ناهمگون بین لایه‌های n-CdS و p-CdTe می‌باشد. کادمیوم در گروه ۲ جدول تناوبی و تلوریم در گروه ۴ جدول تناوبی قرار دارند. ترکیب این دو ماده تشکیل کادمیوم تلوراید می‌دهد که دارای یک شکاف نوار انرژی مستقیم نزدیک ۱/۵ eV و از نوع P می‌باشد و در ساختار سلول خورشیدی به عنوان لایه جاذب به کار می‌رود. لذا برای فعال سازی سلول از یک لایه n-CdS به عنوان لایه بافر (پنجره) با شکاف نوار ۲/۴۲ eV در اتصال با لایه جاذب استفاده می‌شود [۱۲]. شکل ۱ ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید به همراه ضخامت‌های هر لایه.

یکی از مشکلات سلول‌های خورشیدی کادمیوم تلوراید این است که الکترون‌ها و حفره‌های تولید شده در انتهای سلول به دلیل دور بودن از میدان اصلی به سرعت باز ترکیب شده و نقشی در جریان دهی سلول ندارند. از اینرو تحقیقات زیادی برای برطرف کردن این مسئله انجام شده است. یکی از این روش‌ها ایجاد میدان الکتریکی کمکی در انتهای کانال برای جلوگیری از باز ترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها می‌باشد. در تحقیقات انجام شده در مرجع [۱۳] نشان داده است که با اضافه کردن تلورید روی (ZnTe) به لایه جاذب (نسبت به ساختار پایه مد نظر)، میزان بازده از ۱۵٪ به ۱۶/۴٪ افزایش یافته است. در مرجع [۱۴] نیز با اضافه کردن لایه CZTS به لایه جاذب، میزان بازده نسبت به ساختار پایه از ۸/۴٪ به ۱۴/۴٪ افزایش پیدا کرده است.

در این مقاله ابتدا به بررسی مواد مورد استفاده در لایه‌های مختلف سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید پرداخته شد و ساختار پایه این سلول توسط نرم افزار SCAPS مورد شبیه سازی و بررسی قرار گرفت. در ادامه با اضافه کردن یک لایه اکسید قلع به لایه جاذب (CdTe) و ایجاد یک میدان الکتریکی کمکی در سطح پشتی با استفاده از شبیه‌سازی

مقاومت کند و همچنین لایه‌های دیگر را آلوده نکند. بستر باید بسیار شفاف باشد تا نور خورشید بتواند به طور کامل به لایه‌های CdTe/CdS برسد زیرا هرگونه جذب در لایه بستر بازدهی سلول را کاهش می‌دهد. با توجه موارد گفته شده، معمولاً از شیشه به دلیل شفافیت، ارزان بودن و مقاومت حرارتی مناسب به عنوان بستر استفاده می‌شود [۲۳]. برای بررسی دقیق‌تر سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید ابتدا به معرفی پارامترهای اصلی خروجی از قبیل جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و ضریب پرشدگی سلول خورشیدی پرداخته شد.

### جریان اتصال کوتاه

حداکثر جریانی که سلول خورشیدی می‌تواند از خود تولید کند، جریان اتصال کوتاه نامیده می‌شود. از عوامل موثر بر جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی عبارتند از:

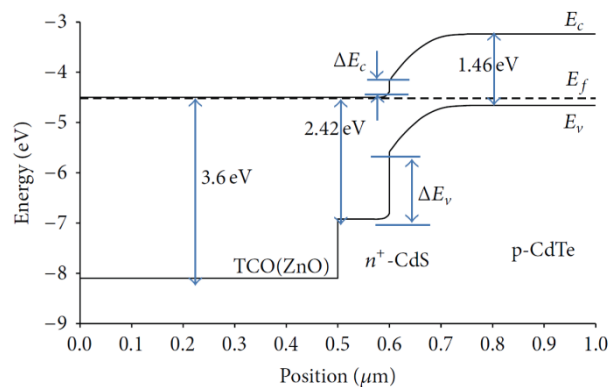
۱- افزایش مساحت و ضخامت: هر چه این دو عامل بزرگتر باشند نور یا فوتون بیشتری دریافت شده و به مراتب تولید حامل‌های الکترون-حفره بیشتر می‌شود، در نتیجه جریان سلول افزایش پیدا می‌کند. از طرفی افزایش مساحت و ضخامت هزینه ساخت و استفاده زیاد از مواد اولیه را به همراه خواهد داشت. در سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید معمولاً افزایش مساحت و ضخامت فقط در لایه جذب (CdTe) برای افزایش میزان جذب فوتون‌ها صورت می‌گیرد که این امر می‌تواند عملکرد سلول را بهبود بخشد. در این مقاله ضخامت بهینه برای لایه جذب  $1\mu\text{m}$  در نظر گرفته شده است. افزایش مساحت و ضخامت سایر لایه‌ها همچون لایه بافر (CdS) باعث ایجاد مقاومت نوری شده و از ورود نور به داخل ساختار جلوگیری می‌کند. بنابراین، ضخامت بهینه شده این لایه  $20\text{nm}$  در نظر گرفته شده است. در ادامه نحوه‌ی بدست آوردن ضخامت بهینه توضیح داده خواهد شد.

۲- متمرکز کردن نور با استفاده از لنز: که این باعث افزایش شدت نور دریافتی و در نتیجه تولید حامل‌های الکترون و حفره بیشتر و نهایتاً جریان بیشتر خواهد شد. از جمله معایب این روش گرم شدن سلول و کاهش ولتاژ مدار باز است. از آنجاکه توان سلول خورشیدی از حاصلضرب جریان اتصال کوتاه در ولتاژ مدار باز به دست می‌آید، این روش ممکن است باعث کاهش توان سلول شود.

۳- طیف نوری یا زاویه تابش (AM): هرچه مقدار این طیف برای مثال از AM0 به AM1 به AM1.5 بیشتر شود، جریان اتصال کوتاه بیشتر خواهد شد. برای مقایسه بازدهی سلول‌های خورشیدی نسبت به هم از طیف استاندارد AM1.5 استفاده می‌کنند. در این مقاله از طیف نوری AM1.5 در شبیه‌سازها استفاده شد.

۴- میزان بازتابش: هرچه این عامل کمتر باشد نور بیشتری وارد سلول شده و باعث افزایش جریان اتصال کوتاه می‌شود. در این مطالعه از یک لایه شفاف و صاف به نام زینک اکسید آلومینیوم (n-ZnO-Al) با ضخامت  $200\text{nm}$  جهت کاهش بازتابش نور خورشید استفاده شد.

شکاف نوار انرژی و تبدیل آنها به حامل‌های الکترون و حفره است. در مواد لایه نازک، در صورتیکه یک ماده دارای ضریب جذب پایین باشد، می‌توان آن ماده را یک ماده‌ی شفاف در نظر گرفت. لذا در ضخامت‌های کم، ضریب جذب بالا یک پارامتر ضروری برای لایه جذب بشمار می‌آید. با توجه به ضریب جذب بسیار عالی کادمیوم تلوراید تقریباً همه‌ی فوتون‌هایی که انرژی بیش از شکاف انرژی کادمیوم تلوراید دارند جذب می‌شوند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در طراحی سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید باید لایه‌های بالاتر از لایه جذب ضریب جذب کمتری (شکاف نوار بیشتر) داشته باشند تا از مقدار فوتون‌های ورودی به لایه جذب کاسته نشود (در لایه‌های بالایی جذب نشوند) و بیشترین تولید حامل در این لایه صورت گیرد. دلیل این امر از آنجا ناشی می‌شود که اگر در سطح سلول جذب نور رخ دهد و حامل‌های الکترون و حفره تولید شوند، به دلیل دور بودن از میدان الکتریکی بازترکیب خواهند شد. به همین منظور شکاف نوار لایه‌های بالاتر از لایه جذب به مراتب بیشتر انتخاب می‌شود و هرچه شکاف نوار ماده بیشتر شود ضریب جذب ماده کمتر می‌شود [۱۹ و ۲۰].



شکل ۲. دیاگرام نوار انرژی سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید [۲۱].

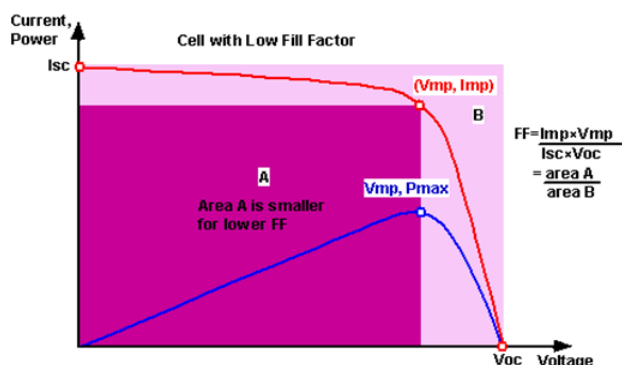
### اتصال پشتی

از لایه اتصال پشتی برای انتقال حامل‌ها از لایه جذب به بار بیرونی استفاده می‌شود. فلز لایه نشانی شده در این لایه باید با CdTe اتصال اهمی داشته باشد. با توجه به تابع کار p-CdTe برای اتصال اهمی نیاز است که تابع کار فلز از نیمه هادی بیشتر باشد. نیکل از جمله موادیست که از تابع کار مناسب برای ایجاد اتصال اهمی و رسانایی بالا برای انتقال حامل‌ها برخوردار است. از دیگر مزایایی نیکل ایجاد پیوند خوب با لایه جذب، کم بودن مراکز بازترکیب در مرز پیوند و ارزان بودن این عنصر است. گفتنی است که به دلیل ورود نور خورشید از اتصال جلویی، نیازی به کاملاً شفاف بودن ماده‌ی مورد استفاده در اتصال پشتی نیست [۲۱ و ۲۲].

### لایه بستر

با توجه به اینکه سلول‌های خورشیدی لایه نازک بر روی یک بستر رشد داده می‌شوند، از اینرو انتخاب لایه بستر مناسب بسیار مهم است. یک لایه بستر مناسب باید در برابر دماهای فرآیند ساخت سلول

فوتون های ورودی به سلول، چه تعداد از آنها موفق به برانگیختن الکترون ها شده اند. در سلول های خورشیدی لایه نازک برای بررسی دقیق تر، میزان این بازده در هر لایه باید مشخص گردد.



شکل ۳. نحوه محاسبه ضریب پرشدگی (FF) سلول خورشیدی بر اساس نمودار جریان ولتاژ سلول.

## شبیه سازی و بررسی ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم

### تلوراید

در این مقاله، ابتدا ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید بدون استفاده از لایه قلع سولفاید با زاویه تابش استاندارد  $AM=1.5$  و با طول موج هایی در بازه  $300\text{ nm}$  تا  $1200\text{ nm}$  و با مشخصه های فیزیکی هر لایه بر طبق جدول ۱، با استفاده از نرم افزار SCAPS مورد شبیه سازی و بررسی قرار گرفت.

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در شبیه سازی ساختار پایه کادمیوم تلوراید

n- ZnO-Al	n-CdS	P-CdTe	پارامترها
۳/۳	۲/۴	۱/۵	شکاف نوار انرژی (eV)
۴/۶	۴/۴	۴/۲۸	میزان الکترون خواهی (eV)
۹	۱۰	۹/۴	ضریب گذر دهی
$2/2 \times 10^{18}$	$2/2 \times 10^{18}$	$7/5 \times 10^{17}$	چگالی حالت های موثر در لایه نوار هدایت ( $\text{cm}^{-3}$ )
$1/8 \times 10^{19}$	$1/8 \times 10^{19}$	$1/8 \times 10^{18}$	چگالی حالت های موثر در لایه نوار ظرفیت ( $\text{cm}^{-3}$ )
۱۰۰	۱۰۰	۳۲۰	میزان تحرک پذیری الکترون ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )
۲۵	۲۵	۴۰	میزان تحرک پذیری حفره ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )
$10^{19}$	$10^{19}$	$1/1 \times 10^{14}$	میزان آلابش الکترون حفره ( $\text{cm}^{-3}$ )

۵- کم کردن باز ترکیب سطحی و باز ترکیب بین پیوند دو لایه: باز ترکیب سطحی را با منفعل سازی (passivation) و باز ترکیب بین پیوندی را با انتخاب صحیح مواد با ثابت شبکه یکسان در فرآیند ساخت می توان کاهش داد.

### ولتاژ مدار باز

پارامتر دیگری که در بازدهی سلول خورشیدی موثر است. ولتاژ مدار باز است. این پارامتر به صورت حداکثر ولتاژی که می توان از سلول خورشیدی دریافت کرد، تعریف می شود. از عواملی که بر ولتاژ مدار باز موثر است، عبارتند از:

چگالی ناخالصی پذیرنده و دهنده در لایه جاذب (CdTe): هر چه چگالی ناخالصی لایه جاذب بیشتر شود ولتاژ اتصال باز نیز زیادتر خواهد شد. به عبارت دیگر این دو با هم ارتباط مستقیم و با جریان رابطه عکس دارند زیرا افزایش چگالی ناخالصی باعث کم شدن عرض ناحیه تخلیه و در نتیجه کاهش جریان می شود.

### شکاف نوار انرژی

شکاف نوار انرژی در یک نیمه هادی بیانگر اختلاف بالاترین تراز انرژی در نوار ظرفیت با پایین ترین تراز انرژی در نوار هدایت است. در یک نیمه هادی با نوار انرژی مستقیم، در صورتی که انرژی فوتون از شکاف انرژی نیمه هادی بیشتر باشد، می تواند باعث برانگیخته شدن الکترون ها از تراز ظرفیت به تراز هدایت شود و تولید جفت الکترون-حفره نماید. می توان گفت که هر چقدر شکاف نوار انرژی کمتر باشد میزان فوتون هایی که می توانند تولید جفت الکترون حفره کنند بیشتر می شوند. این شرایط می تواند بدین معنی باشد که تعداد حامل ها افزایش یافته و به تعبیری جریان سلول افزایش می یابد.

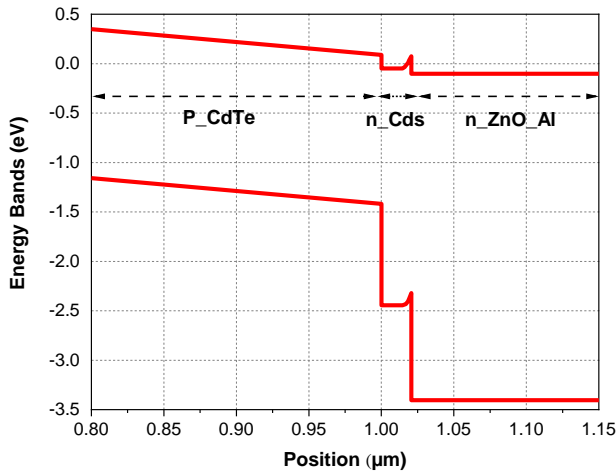
### ضریب پرشدگی

این پارامتر علاوه بر اینکه میزان قدرت یک سلول خورشیدی را نشان می دهد، کیفیت سلول را نیز نشان می دهد. هر چه مقدار آن به عدد یک نزدیک تر باشد بهتر است. به تعریف دیگر طبق شکل ۳، جایی که جریان اتصال کوتاه بیشینه است ولتاژ اتصال کوتاه صفر است. در کنار منحنی جریان-ولتاژ، منحنی توان نیز محاسبه می شود. با در نظر گرفتن ماکزیمم توان، بزرگ ترین مستطیلی که می تواند در زیر منحنی جریان ولتاژ قرار بگیرد همان ضریب پرشدگی یا FF است. میزان ضریب پرشدگی به میزان جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز و همچنین میزان باز ترکیب حامل ها در سلول خورشیدی بستگی دارد.

### بازده کوانتومی

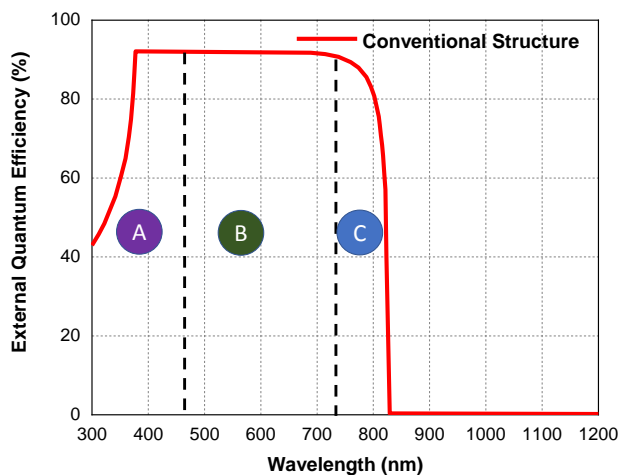
نسبت تعداد حامل های تولید شده به مقدار نور یا فوتون های که در طول موج خاص به سلول خورشید وارد می شود را بازدهی کوانتومی می گویند. به عبارت دیگر این پارامتر بیانگر این است که از مجموع

کند. این مطلب در بازدهی کوانتومی هر لایه در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵. دیاگرام نوار انرژی ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید.

شکل ۶ منحنی بازدهی کوانتومی ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مساحت زیر منحنی بیانگر میزان جریان می‌باشد. در حالت ایده‌آل میزان این بازدهی یک می‌باشد، ولی بخاطر تلفات مقدار آن کم شده است. قسمت A پاسخ بازدهی به طول موج‌های کوتاه و پرنانژی مانند طول موج‌های فرابنفش تا آبی در سطح سلول است که به دلیل بازترکیب سطحی مقدار آن کم شده است. قسمت B پاسخ بازدهی به طول موج‌های متوسط مانند طول موج‌های سبز و زرد در وسط سلول است. میزان دامنه بازده کوانتومی در قسمت B به دلیل میدان قوی بین لایه جاذب ولایه بافر از قسمت A بیشتر است. قسمت C پاسخ بازدهی کوانتومی به طول موج‌های بلند (انرژی پایین) مانند طول موج‌های نارنجی تا قرمز است. کاهش دامنه در این قسمت به دلیل بازترکیب حامل‌ها در انتهای سلول و دور بودن آن از میدان اصلی است.

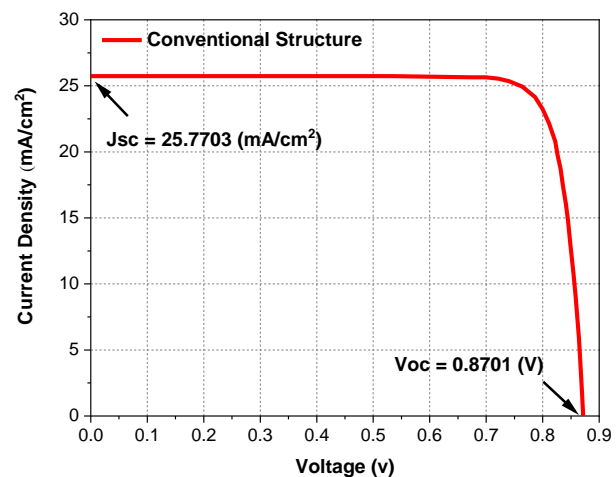


شکل ۱ ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید را نشان می‌دهد. در ساختار پایه میزان چگالی ناخالصی در کادمیوم تلوراید و بهینه شده میزان آن به ترتیب برابر با  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  و  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  در نظر گرفته شد. برای بهینه‌سازی ضخامت کادمیوم سولفاید از سه ضخامت  $20 \text{ nm}$ ،  $30 \text{ nm}$  و  $40 \text{ nm}$  استفاده شد که جریان اتصال کوتاه به ترتیب برای هر ضخامت  $25/77 \text{ mA/cm}^2$ ،  $25/2 \text{ mA/cm}^2$  و  $24/9 \text{ mA/cm}^2$  بدست آمد. لذا ضخامت  $20 \text{ nm}$  به عنوان ضخامت بهینه برای لایه بافر کادمیوم سولفاید در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید.

نتایج شبیه‌سازی	مقدار نتایج
$\eta\%$	۱۹/۰۹
FF (%)	۸۵/۱۴
$J_{sc} (\text{mA/cm}^2)$	۲۵/۷۷
$V_{oc} (\text{V})$	۰/۸۷۰۱
$J_{Max} (\text{mA/Cm}^2)$	۲۴/۴۶۴۹
$V_{Max} (\text{V})$	۰/۷۷۸۹۷

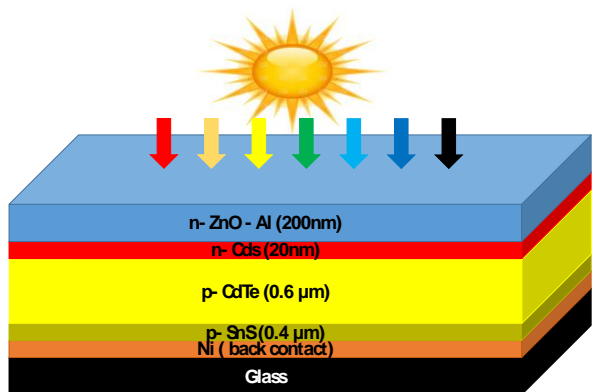
با توجه به جدول ۲ مقدار جریان اتصال  $25/77 \text{ mA/cm}^2$ ، ولتاژ مدار باز  $0/8701 \text{ V}$ ، ضریب پرشدگی  $85/14\%$  و مقدار بازده  $19/09\%$  برای ساختار پایه بدست آمد. شکل ۴ منحنی جریان-ولتاژ بدست آمده از ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید را نشان می‌دهد.



شکل ۴. منحنی جریان و ولتاژ ساختار ابتدایی سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید.

با توجه به اهمیت شکاف نوار انرژی در نحوه‌ی قرارگیری لایه‌ها، همچنین نحوه‌ی جذب فوتون‌ها و انتقال الکترون‌ها دیاگرام نوار انرژی برای ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید بدست آمد. شکل ۵ دیاگرام نوار انرژی ساختار پایه کادمیوم تلوراید را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل لایه کادمیوم تلوراید نسبت به لایه کادمیوم سولفاید دارای شکاف نوار کمتری است، لذا این لایه می‌تواند طیف مناسب و وسیعی از طول موج‌های مختلف با انرژی بیشتر از شکاف نوار را جذب

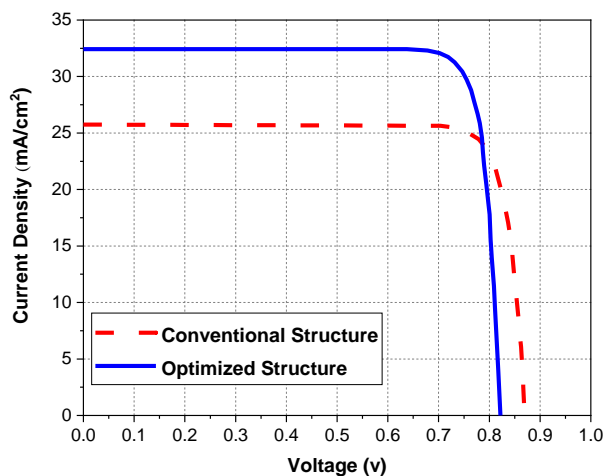
یافته در کنار منحنی جریان-ولتاژ ساختار پایه را نشان می‌دهند. با توجه به این شکل واضح است که جریان اتصال کوتاه در سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید بهبود یافته نسبت به ساختار پایه افزایش و ولتاژ مدار باز کاهش یافته است. نتایج حاصل از شبیه سازی ساختار بهبود یافته در جدول ۴ بیان شده است. با توجه به جدول ۴ مقدار جریان اتصال کوتاه  $32/5144 \text{ mA/cm}^2$ ، ولتاژ مدار باز  $0/8220 \text{ V}$ ، ضریب پرشدگی  $85/99\%$  و مقدار بازده  $22/98\%$  برای ساختار بهبود یافته بدست آمد.



شکل ۷. ساختار بهبود یافته سلول خورشیدی CdTe با اضافه کردن لایه قلع سولفاید. جدول ۴. جدول مقایسه نتایج سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید ابتدایی با سلول

خورشیدی کادمیوم تلوراید بهبود یافته با قلع سولفاید

نتایج شبیه سازی	ساختار بهبود یافت سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید
$\eta\%$	۲۲/۹۸
FF(%)	۸۵/۹۹
$J_{sc} (\text{mA/Cm}^2)$	۳۲/۵۱۴۴
Voc (V)	۰/۸۲۲۰
$J_{Max} (\text{mA/Cm}^2)$	۳۱/۲۵۴۲
$V_{Max} (\text{V})$	۰/۷۳۱۷۶



شکل ۸. منحنی جریان-ولتاژ برای ساختار بهبود یافته سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید با لایه قلع سولفاید در مقایسه با ساختار پایه.

شکل ۶. منحنی بازدهی کوانتومی سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید از شبیه سازی (ناحیه A مربوط به طول موج‌های کوتاه، ناحیه B مربوط به طول موج‌های متوسط و ناحیه C مربوط به طول موج‌های بلند).

## بهبود بازده کوانتومی در طول موج‌های بلند با استفاده از یک لایه قلع سولفاید

نور خورشید شامل طول موج‌های کم با انرژی زیاد از بازه‌ی نور فرابنفش تا آبی و همچنین طول موج‌های بلند با انرژی کم از بازه‌ی نور نارنجی تا قرمز است. هدف از این مطالعه افزایش بازدهی سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید در طول موج‌های بلند مانند نور قرمز می‌باشد. با در نظر گرفتن این موضوع که طول موج‌های بلند در انتهای سلول جذب می‌شوند و تولید الکترون و حفره می‌کنند و با توجه به دور بودن از میدان اصلی بین لایه جاذب و لایه بافر، این حفره‌ها و الکترون‌ها فرصت بازترکیب را پیدا می‌کنند که این امر موجب کم شدن حامل‌ها و در نهایت کاهش بازدهی سلول می‌شود. برای جلوگیری از کاهش این بازترکیب به یک میدان کمکی در انتهای سلول خورشیدی بین اتصال پشتی و لایه جاذب نیاز می‌باشد که این میدان طبق شکل ۷، توسط یک لایه قلع سولفاید ایجاد می‌شود. مشخصات فیزیکی لایه قلع سولفاید در جدول ۳ بیان شده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی استفاده شده برای لایه قلع سولفاید در شبیه سازی.

شکاف نوار انرژی (eV)	مقدار الکترون خواهی (eV)	ضریب گذر دهی	چگالی حالت‌های موثر در لبه نوار هدایت ( $\text{cm}^{-3}$ )
۱/۲۵	۴/۲	۱۲/۵	$10^{19}$
چگالی حالت‌های موثر در لبه نوار ظرفیت ( $\text{cm}^{-3}$ )	میزان تحرک پذیری الکترون ( $\text{cm}^2/\text{VS}$ )	میزان تحرک پذیری حفره ( $\text{cm}^2/\text{VS}$ )	میزان آلاینش الکترون حفره ( $\text{cm}^{-3}$ )
$4/1 \times 10^{19}$	۲۵	۱۰۰	$1/8 \times 10^{18}$

شکل ۷ ساختار بهبود یافته سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید با اضافه کردن یک لایه قلع سولفاید را نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد در این مقاله ضخامت لایه جاذب  $1 \mu\text{m}$  در نظر گرفته شد، لذا در ساختار بهبود یافته اتصال SnS/CdTe به عنوان لایه جاذب در نظر گرفته شده است در حالیکه در ساختار پایه CdTe به تنهایی لایه جاذب را تشکیل می‌دهد.

در ادامه، ساختار بهبود یافته سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید با لایه قلع سولفاید تحت تابش طیف AM1.5 با طول موج‌های در بازه  $300 \text{ nm}$  تا  $1200 \text{ nm}$  نانومتر با نرم افزار SCAPS مورد شبیه سازی و بررسی قرار گرفت. شکل ۸ نمودار جریان-ولتاژ برای ساختار بهبود

بهبود یافته نسبت به ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید افزایش پیدا کرده و در نتیجه در این حالت ولتاژ مدار باز کاهش پیدا می‌کند.

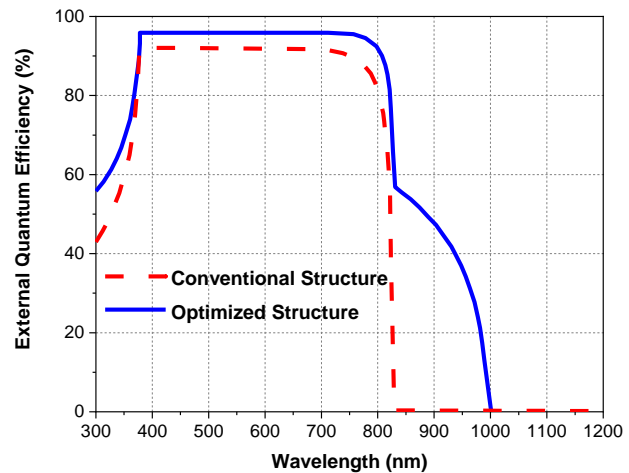
### نتیجه‌گیری

در این مقاله در ابتدا ساختار پایه سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید مورد شبیه‌سازی و بررسی قرار گرفت. با توجه به مکانیزم عملکرد سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید، الکترون‌هایی که توسط فوتون‌ها برانگیخته می‌شوند در صورتی که در محدوده‌ی میدان الکتریکی اصلی حاصل از اتصال CdTe/CdS قرار داشته باشند قبل از بازترکیب با حفره‌ها در خلاف جهت این میدان حرکت کرده و باعث ایجاد جریان در سلول می‌شوند. بررسی‌ها نشان داد که با وجود جذب طیف مناسبی از طول موج‌های نور خورشید در این ساختار، همچنان میزان ایجاد حامل‌ها در انتهای سلول و در طیف‌های با طول موج بلند بسیار کم است و این امر می‌تواند ناشی از بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها در انتهای ساختار به دلیل دور بودن از میدان الکتریکی اصلی باشد. لذا برای کاهش میزان بازترکیب حامل‌ها در انتهای ساختار و در طول موج‌های بلند به کمک یک لایه قلع سولفاید به ضخامت  $0.4 \mu\text{m}$  یک میدان کمکی در جهت میدان اصلی ایجاد شد. با توجه به کم بودن شکاف نوار قلع سولفاید نسبت به کادمیوم تلوراید، فوتون‌ها با طول موج بیشتر (انرژی کمتر) در این ناحیه جذب شده و به دلیل ایجاد میدان الکتریکی کمکی حاصل از اتصال CdTe/SnS در انتهای ساختار در این حالت میزان بازدهی کوانتومی در طول موج‌های بلند افزایش پیدا کرده است. در نتیجه عملکرد سلول بهتر شده و بازده سلول از  $19.09\%$  به  $22.98\%$  و ضریب پرشدگی از  $85/14\%$  به  $85/99\%$  افزایش یافت.

### مراجع

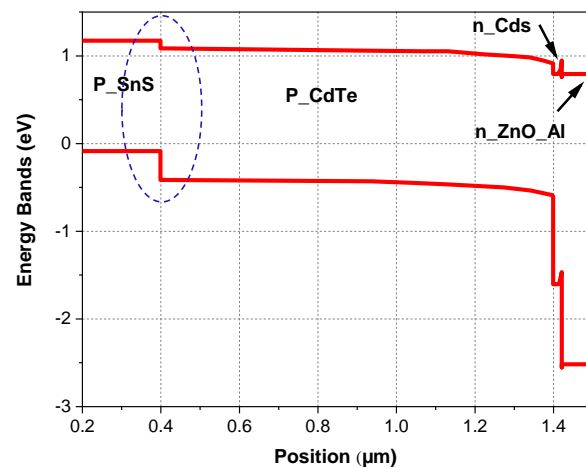
- [1] B. Azarm, "Different Generations Of Solar Cells and Mechanisms of Their Performance", *journal of selected topics in energy*, Vol. 1, PP. 1-11, 2018.
- [2] M. Shirkavand, M. Bavir, A. Fattah, HR. Alaei, and MH. Tayarani Najaran, "Influence of TiO<sub>2</sub> layer thickness as photoanode in Dye Sensitized Solar Cells", *AUT Journal of Electrical Engineering*, Vol. 51, PP. 111-120, 2019.
- [3] FMT. Enam, et al., "Design prospects of cadmium telluride/silicon (CdTe/Si) tandem solar cells from numerical simulation.", *Optik*, Vol. 139, PP. 397-406, 2017.
- [4] SAA. Kazmi, et al., "Efficient materials for thin-film CdTe solar cell based on back surface field and distributed Bragg reflector", *Applied Physics A*, Vol. 126, PP. 1-8, 2020.
- [5] JY. Muhammad, et al., "Recent Progressive Status of Materials for Solar Photovoltaic Cell: A Comprehensive Review", *Science*, Vol. 7, PP. 77-89, 2019.

شکل ۹ منحنی بازدهی کوانتومی برای ساختار بهبود یافته در کنار ساختار پایه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که دامنه‌ی بازدهی کوانتومی در انتهای سلول و در طول موج‌های بلند افزایش یافته است. در واقع با ایجاد یک میدان در نقطه‌ی اتصال قلع سولفاید با کادمیوم سولفاید، حامل‌هایی که در این ناحیه تولید می‌شوند، تحت میدان ایجاد شده فرصت بازترکیب پیدا نمی‌کنند.



شکل ۹. منحنی بازدهی کوانتومی برای ساختار بهبود یافته سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید با لایه قلع سولفاید و ساختار پایه.

شکل ۱۰ شکاف نوار انرژی برای ساختار بهبود یافته سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. دیاگرام نوار انرژی برای ساختار بهبود یافته سلول خورشیدی کادمیوم تلوراید با لایه قلع سولفاید.

با توجه به سد ایجاد شده در نقطه‌ی اتصال لایه قلع اکسید با لایه کادمیوم سولفاید (در شکل ۱۰ با دایره خط چین مشخص شده است)، میدان پشتی در این قسمت جهت جلوگیری از بازترکیب حفره‌ها و الکترون‌ها ایجاد می‌شود. از این رو جریان سلول افزایش پیدا می‌کند. نکته‌ی دیگری که در اینجا وجود دارد این است که با توجه به سد ایجاد‌ی در اتصال پشتی و سد ایجاد‌ی حاصل از اتصال اصلی پیوند p-CdTe/n-Cds می‌توان گفت که در مجموع ناحیه تخلیه در ساختار

- offset in Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> solar cell", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57, P. 08RC05, 2018.
- [15] DA. Duncan, and et al., "A New Look at the Electronic Structure of Transparent Conductive Oxides—A Case Study of the Interface between Zinc Magnesium Oxide and Cadmium Telluride", *Advanced Materials Interfaces*, Vol. 3, PP. 1600418, 2016.
- [16] JH. Kim, et al., "Al/Au ohmic contact to n-ZnO by dc sputtering", *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 165, PP. 77-79, 2009.
- [17] C. Schwartz, and et al., "Electronic structure study of the CdS buffer layer in CIGS solar cells by X-ray absorption spectroscopy: Experiment and theory", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 149, PP. 275-283, 2016.
- [18] R. Treharne, "RF Magnetron Sputtering of Transparent Conducting Oxides and CdTe/CdS Solar Cells", *Doctoral dissertatioz, Durham University*, 2011.
- [19] E. Płaczek-Popko, "Top PV market solar cells 2016" *Opto-Electronics Review*, Vol. 25, PP. 55-64, 2017.
- [20] H. Fardi, F. Buny, "Characterization and modeling of CdS/CdTe heterojunction thin-film solar cell for high efficiency performance", *International Journal of Photoenergy*, PP. 1-6, 2013.
- [21] SJC. Irvine, V. Barrioz, "Fundamentals of Thin Film PV Cells. Materials Challenges Energy and Environment Series", *Royal Society of Chemistry*, Vol.1, PP. 27-52, 2014.
- [22] SH. Demtsu, JR. Sites, "Effect of back-contact barrier on thin-film CdTe solar cells", *Thin Solid Films*, Vol. 510, PP. 320-324, 2006.
- [23] B.M. Basol, B. Mccandless, "Brief review of cadmium telluride-based photovoltaic technologies", *Journal of Photonics for Energy*, Vol. 4, PP. 040996, 2014.
- [6] M. Moon, M. Alam, M. Rahman, J. Hoessain, ABM. Ismail, "Comparative Study of the Second Generation a-Si: H, CdTe, and CIGS Thin-Film Solar Cells", *Advanced Materials Research*, Vol. 1154. PP. 102-111, 2019.
- [7] S. khaksari, A. raeisi, N. Shams, D. Fadaei, "Simulation of CIGS solar cell and optimization of ZnO:Al layer to increase efficiency", *Iranian Journal of Energy*, Vol. 19, PP. 143-154, 2016.
- [8] T. Kato, JL. Wu, Y. Hirai, H. Sugimoto, V. Bermudez, "Record efficiency for thin-film polycrystalline solar cells up to 22.9% achieved by Cs-treated Cu (In, Ga)(Se, S) 2", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 9, PP. 325-330, 2018.
- [9] TAM. Fiducia, et al., "Understanding the role of selenium in defect passivation for highly efficient selenium-alloyed cadmium telluride solar cells", *Nature Energy*, Vol. 4, PP. 504, 2019.
- [10] M. Tao., "Roadblocks to Terawatt Solar Photovoltaics", *Terawatt Solar Photovoltaics*, PP. 61-79, 2014.
- [11] F. Enam, et al., "Design prospects of cadmium telluride/silicon (CdTe/Si) tandem solar cells from numerical simulation", *Optik*, Vol. 139, PP. 397-406, 2017.
- [12] MH. Ali, MMA. Moon, MF. Rahman, "Study of ultra-thin CdTe/CdS heterostructure solar cell purveying open-circuit voltage~ 1.2 V", *Materials Research Express*, Vol. 6, P. 095515, 2019.
- [13] S. Khosroabadi, SH. Keshmiri, "Design of a high efficiency ultrathin CdS/CdTe solar cell using back surface field and backside distributed Bragg reflector", *Optics express*, Vol. 22, PP. A921-A929, 2014.
- [14] A. Kumar, AD. Thakur, "Role of contact work function, back surface field, and conduction band