بررسی تاثیر درجهبندی شکاف نواری و ضخامت لایه جاذب بر خواص الکتریکی و نوری در سلولهای خورشیدی CIGS

رضا کیانی '، مجید فولادیان '، محمد جلال رستگار فاطمی '

چکیدہ	
	تاريخ دريافت:
در این پروهس، ما به کسبیه ساری دقیق کشولهای خور سیدی ۲۰۵۶ با	15.57 .27 / 10
استفاده از درجهبندی شکاف نواری band-gap میپردازیم. هدف اصلی ما	تاريخ بذريش:
این است که خواص الکتریکی و نوری این سلول ها را بهبود بخشیم. به	۱۴۰۲ / ۸۰ / ۱۴
منظور بررسیی عملکرد، تغییر ضــخامت لایه جاذب را نیز به عنوان یک	
عامل کلیدی مورد ارزیابی قرار میدهیم. به ویژه، ما به تحلیل تأثیر این	کلمات کلیدی: سلما های خورشیدی
تغییرات بر راندمان و ضریب پر شدگی سلولها میپردازیم. در سلولهای	CIGS
خورشــیدی معمولی CIGS، راندمان حدود ۲۰٫۸٪ اســت که تا به حال	درجەبندی شکاف نواری راندمان سلولھای خورشیدی
دســتیافتهایم. اما با بهرهگیری از درجهبندی شــکاف نواری بر روی لایه	ضخامت لايه جاذب
جاذب و با بهره گیری از تکنیکهای مهند سی در لایههای جاذب و بافر، ما	
به تحسـینبرانگیزترین راندمان تا به حال برابر با ٪۳۳٫۷ دسـت یافتهایم.	
این افزایش نتیجهی دستاوردهای موفق در بهینهسازی ساختار و خواص	
سلولها ا ست. به طور خلا صه، مقادیر پارامترهای مهم خروجی برای این	
سلول های پیشرفته شامل بازده ٪۲۳٫۷، ضریب پر شدگی ٪۷۹، ولتاژ مدار	
باز ۱ میلیولت و جریان کوتاه مدار ۴۰٫۹۶ میلیآمپر بر ســانتیمتر مربع	
میباشد.	

rezak1290@yahoo.com

دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

ا مقدمه

سلولهای خور شیدی (CIGS)^۱ از جمله نمونههای واعده در د ستگاههای فتوولتائیک لایه نازک به شمار میروند. در فناوری سلولهای خور شیدی فیلم نازک، تمرکز بر جذب بالای نور در ماده فعال به منظور کاهش ضخامت لایه فعال انجام می شود. ضخامت لایه جاذب در سلولهای CIGS (۱تا ۳ میکرومتر)، دو برابر کوچکتر از سلولهای سیلیکون کریستالی تک بلوری و چند بلوری است. این کاهش ضخامت منجر به کاهش هزینه کلی سلول می شود. این کاهش در ضخامت لایه جاذب به دلیل خاصیت شکاف نواری مستقیم CIGS رخ می دهد.

1-1 پیشینه تحقیق

برای دستیابی به کاهش هزینه بیشتر، افزایش راندمان تبدیل توان (PCE^{*}) به عنوان یک راهکار مؤثر شناخته شده است. تاکنون، PCE و Cd (In, Ga)Se2 (CIGS) می سلولهای خورشیدی سیلیکونی کریستالی تک پیوندی (c-Si) و همچنین لایهناز کهای مانند (CGS) (CIGS) و Cu (In, Ga)Se2 (CIGS) و محتفظ لایهناز کهای مانند (CdS) و XT رسیده است [۱]. نیمه هادیهای مرکب V-III دارای شکافهای باند قابل تنظیم هستند و راندمان بسیار بالایی را در سلولهای خورشیدی چند اتصالی ارائه می دهند. با این حال، هزینههای بالای ساخت مانع از کاربرد گسترده آنها می می و راندمان می مرکب V-III دارای شکافهای باند قابل تنظیم هستند و راندمان می می و الایی را در سلولهای خورشیدی چند اتصالی ارائه می دهند. با این حال، هزینههای بالای ساخت مانع از کاربرد گسترده آنها می شود [۲]. با بهره گیری از دانش روز تا کنون، راندمان ثبت شده برای سلولهای خورشیدی CdGS خاص ۳۰،۳ ± عرد درصد است [۳]. از طرفی ، ایزوپروپانول دوپینگ شده از نوع n و نانو کریستال کالکوپیریت CuIo.Ga. کورشیدی CGS خاص ۳۰،۳ ± عرد درصد است [۳]. از طرفی ، ایزوپروپانول دوپینگ شده از نوع n و نانو کریستال کالکوپیریت CuIo.Ga کنون از نوع n و نانو کریستال کالکوپیریت CuIo.Ga کنون کار نوع و به عنوان ماده سلول خورشیدی فیلم می فرشیده یا از طرفی ، ایزوپروپانول دوپینگ شده از نوع n و نانو کریستال کالکوپیریت CuIo.4Ga کور سد. [۴]. سلول کار ترکیبی از نیمه هادی II-III-II خور شیدی فیلم ناز ک، در نظر گرفته شده و امیدوارکننده است که بازدهی آن به ۴۰ در صد می سد. [۴]. سلول CIGS تو کیبی از نیمه هادی II-III-II خور شیدی چهارتایی با ساختار کریستالی کالکوپیریت است. این ماده به دلیل عیوب طبیعی اش به عنوان CIGS نوع P در نظر گرفته می شود که میمولاً در شرایط II-III کر کیستالی کالکوپیریت است. این ماده به دلیل عیوب طبیعی اش به عنوان یک لایه جان کردند ای که می شده دان کرد کردی کریه جاذب برای یک به ماد برای یک ساول خور شیدی خور شیدی کریه جاذب برای یک ساول خور شیدی کرده می ترد (IGS) آمده است که به شرح زیر می باشد:

- ۱۰ شکاف باند CIGS را می توان از ۱٬۰۱ eV تا ۱٬۶۸ eV با تغییر میزان Ga تغییر داد تا band-gap مورد نیاز حاصل شود تا
 حداکثر جذب را در محدوده طول موج نوری مورد نظر داشته باشد.
- ۲- ماده نیمه هادی CIGS دارای شکاف نواری band gap مستقیم است، یعنی اینکه برای فوتونی با انرژی بالاتر از انرژی شکاف
 نواری، احتمال بسیار بالایی جهت ایجاد یک جفت الکترون حفره، حتی برای لایه های بسیار نازک دارد.
 - ۳- ضریب جذب CIGS بسیار بالا است.

لایه جاذب CIGS با ضخامت بسیار کمتری در مقایسه با سیلیکون تک کریستالی نوررا جذب می کند. به طور تجربی مشاهده شد که نمودار شـکاف انرژی Eg نیمه هادی Cu (In 1-x,Gax)Se2 به ازای نسـبت اتمی ((x=Ga/(Ga+In)) رفتاری خم شـدگی دارد [۷]، از نظر ریاضی شکاف انرژی را میتوان به صورت زیر توصیف کرد:

$$E_{g}(x) = (1 - x)E_{g}(CIS) + xE_{g}(CGS) - bx(1 - x)$$
(1)

b ضریب انحناست با مقادیری بین ۰٫۱۱ و ۰٫۲۴ که برای ضریب خمش نوری گزارش شده است [۸]. شکاف نواری افزایش یافته محلی، دو اثر بر روی الکترونهای تولید شده توسط نور دارد. اول، احتمال نوترکیبی کل در مناطقی که افزایش شکاف باند وجودارد کاهش مییابد که نشان میدهد این احتمال با شاکاف باند، نسابت معکوس دارد [۹]. دوم اینکه یک میدان الکتریکی اضافی، A_گ، به وجود میآید و میتوان آن را با رابطه (۲) توصیف کرد[۱۰]:

$$\xi_A = \frac{d\Delta E_g}{dx} \tag{(7)}$$

برای افزایش کارایی سلولهای خورشیدی هم از طریق آزمایشی و هم شبیه سازی، تحقیقاتی انجام شده است. در اواسط دهه ۸۰، بوئینگ روش تبخیر همزمان دو مرحلهای را برای ساخت فیلمهای CIS پلی کریستالی با راندمان بیش از ۱۰ درصد در سلولهای خورشیدی یکپارچه معرفی کرد [11]. تا سال ۲۰۱۲، سلولهای خور شیدی CIGS ساخته شده تو سط فرآیند تبخیر همزمان سه مرحلهای، دارای ۲۰ درصد راندمان تبدیل انرژی هستند که بالاترین رکورد برای سلولهای خورشیدی پلی کریستالی لایه نازک میباشد. پس از مدتی، با استفاده از فناوری سلولهای خورشیدی سیلیکونی برای سلولهای خورشیدی لایه نازکCIGS، راندمان ۲۰٫۸ درصد گزارش شده است. در مطالعه پیشنهادی از دوپینگ (تزریق) پتاسیم پس از بهبود ، برای افزایش کارایی سلول لایه نازک CIGS استفاده شد و استفاده از پتاسیم به عنوان یک ماده ناخالص برای اولین بار درسال 2014 اثری مثبت بر کارایی سلول خورشیدی CIGS داشته است[۱۲]. بسیاری از محققین سعی کرده اند کارایی سلولهای خور شیدی لایه نازک CIGS را از طریق شبیه سازی به روشهای مختلف از جمله تغییرمیزان x.comp، تاثیر تغییرات در طول عمر حامل های اقلیت، دما، غلظت دوپینگ و آلایندگی، ضخامت لایه جاذب، ضخامت لایه بافر، بهبود ببخ شند. اخیرا در [۱۳] که در سال ۲۰۲۲ به ثبت رسیده است شبیه سازی جدیدی از سلول خور شیدی Cu(In,Ga)Se2 با استفاده از شبیه سازد ستگاه دو بعدی Silvaco-Atlas تحت تابش نور AM1.5 برروی مواد لایه بافر و درجهبندی باند گپ صورت گرفته ا ست که نتايج بهد ست أمده نشان داد با افزودن لايه ميدان سطح پشتي BSF " بر پايه لايه سيليكوني ميكروكريستالي هيدروژنه (+µc-Si:H(p)، راندمان سلولهای خورشیدی CIGS را با ایجاد لایه جاذبی به ضخامت ۱/۵ میکرومتر و یک لایه پشتی با ضخامت ۱۰ نانومتر حداکثر به مقدار /۲۳/۴۲ افزایش داده است. میدان سطح پشتی (BSF) µc-Si:H(p) بین سطح تماس پشتی (Mo) و لایه جاذب CIGS قرار دارد. علاوه بر این، در مقاله [۱۴] نوع جدیدی از شیببندی باند گپCIGS ،بنام باند گپ تترا گرادیان^۴(TGB)، پیشنهاد شده است. حداکثر بازده سلولهای خور شیدی CIGS بر ا ساس TGB حدود ۲۳/۳۵% شبیه سازی شده ا ست. گرادیان باند جدید پیشنهاد شده در این کار را می توان به صورت تجربی با تنظیم گرادیان (نسبت) Ga به دست آورد. در این مقاله سعی شده است با استفاده از درجه بندی شکاف نواری لایه جاذب، کارایی سلول خورشیدیCIGS افزایش یابد. معمولاً سه نوع کار پژوهشی بر روی سلولهای خورشیدی مبتنی بر CIGS انجام مىشود:

- افزایش سطح نوار هدایت به سمت سطح پشتی جاذب که به آن درجهبندی برگشتی می گویند[۱۵].
 - ۲. درجهبندی جلو، جهت افزایش سطح باند هدایت جاذب در نزدیکی محل اتصال [۱۶].

۳. درجهبندی مضاعف، ترکیبی از روش ۱ و ۲ میباشد که منجر به افزایش فاصله باند به دو سمت سطح پشتی و جلو میشود. بسیاری از فعالیتها تأثیر مفید درجهبندی لایه جاذب را بر عملکرد سلولهای خور شیدی تائید میکنند. با این حال، اثر درجهبندی Ga بر روی پارامترهای الکتریکی و نوری سلول خورشیدی به خوبی درک نشده است. با نگاه به چندین پروفایل درجهبندی برگشتی، نتیجه گرفتهاند که درجهبندی برگشتی، هم چگالی جریان اتصال کوتاه (Jsc) و هم ولتاژ مدار باز (OV) را بهبود میبخشد [۱۵]. اما برخی تحقیقات [۱۳] نشان میدهند که هیچ افزایش قابل توجهی در کoل برای دستگاههایی با لایه استاندارد CIGS ضخیم (۲–۱٫۵ میکرومتر) به دست نمیآید. قابل توجه است که بازده گزارش شده از نتایج شبیه سازی، بالاتر از مقادیر تجربی است و دلیلش شرایط موجود در شبیه سازی هاست که سطح ایده آلی دارند. همچنین عواملی خارج از دایره دسترسی و تاثیر انسان در مدلهای تجربی سلولها دخیل هستند که در مدلهای شبیهسازی وجود ندارند. شـ کاف باند کارآمد در این مقاله حدود eV 1.2 اسـت در حالی که برخی از محققان شـ کاف باند بهینه دیگری (CIGS و CIGS و CIGS کردهاند. ممکن است این موضوع به دلیل عدم گنجاندن برخی مدل ها در شبیه سازی ها مانند وجود یک لایه وارونگی بین CdS و CIGS باشد که منجر به شکاف باند کوچکتر می شود.

1-2 خلاء مطالعاتي

با توجه به مواردی که بیان شد، مطالعات متعددی در زمینه سلولهای خور شیدی CIGS صورت گرفته است که به بهبود و بهرهبرداری از خواص این نوع سلولها در راستای افزایش کارایی و کاهش هزینهها اشاره دارند.

۱. تغییر درجهبندی شکاف باند: یکی از راهکارهای مورد مطالعه برای بهبود کارایی سلولهای CIGS، تغییر درجهبندی شکاف باند میباشد. این مطالعات تاکید دارند که با تغییر نسبت اجزاء مختلف (Ga و In) در CIGS، میتوان شکاف باند را تغییر داد و جذب نور بهینه را در محدوده طول موج مورد نظر داشت.

۲. افزایش کارایی با ا ستفاده از پتا سیم: تحقیقات اخیر ن شان میدهد که افزودن پتا سیم به ساختار CIGS میتواند بهبود قابل توجهی در کارایی سلولهای خورشیدی ایجاد کند. این مواد اغلب به عنوان ناخالصی در دستگاههای سلولهای خورشیدی به کار میروند و اثر مثبتی بر راندمان دارند.

۳. شیببندی باند گپ: مطالعات نشان میدهد که شیببندی باند گپ (TGB) میتواند بهبود چشم گیری در کارایی سلولهای CIGS ایجاد کند. این شیببندی با تغییر نسبت اجزاء مختلف در ساختار CIGS ایجاد می شود و منجر به کاهش شکاف باند و افزایش جذب نور میشود.

۴. مدلسازی و شبیهسازی: استفاده از شبیهسازیها و مدلسازیها جهت تجزیه و تحلیل رفتار سلولهای CIGS نیز مورد توجه قرار گرفته است. این روشها به ما امکان میدهند تا تأثیر تغییرات در پارامترهای مختلف مانند ضـخامت لایهها، ترکیب اجزاء و... را روی کارایی سلولها بررسی کنیم.

۵. مطالعات تجربی و ساخت نمونهها: علاوه بر مدلسازی، مطالعات تجربی و ساخت نمونههای واقعی از سلولهای CIGS نیز انجام می شود. تحقیقات در زمینهی مواد جدید، فرآیندهای بهبودیافته تولید و بهینه سازی ساختارهای لایهنازک برای افزایش بازده سلولها انجام می شود.

در کل، این مقاله با تمرکز بر روی دو موضوع کلیدی یعنی تغییرات درجهبندی شکاف نواری و تغییر ضخامت لایه جاذب، به پر کردن شکافهای مطالعاتی موجود در تحقیقات اخیر در زمینه سلولهای خورشیدی CIGS پرداخته و تلاش میکند تا بهبودهای جدیدی را در عملکرد این سلولها ارائه دهد.

۱-۳ انگیزه اصلی تحقیق

انگیزه اصلی این تحقیق در جهت بهبود کارایی و کاهش هزینههای سلولهای خور شیدی CIGS قرار دارد. سلولهای خور شیدی CIGS به دلیل خواص خوب الکتریکی و نوری که دارند، به عنوان یکی از فر صتهای اساسی در حوزه انرژی خور شیدی شناخته می شوند. با این حال، هزینههای تولید بالا میتوانند به مانع از بهرهبرداری بهینه از این تکنولوژی برای تولید انرژی در مقیاس گسترده شوند. مهمترین هدف این تحقیق ارتقاء بازده تبدیل توان (PCE^A) سلولهای CIGS است. افزایش PCE در سلولهای خور شیدی به معنای بهرهبرداری بهتر از انرژی نور خور شید و تبدیل آن به برق با بازدهی بالاتر است. افزایش PCE بهمنظور افزایش تولید انرژی و کاهش هزینههای تولید اهمیت بسیاری دارد و به عنوان هدف اساسی در تحقیقات سلولهای خورشیدی مطرح میشود. با توجه به پتانسیل این سلولها و امکاناتی که ارائه میدهند، تحقیقات در جهت بهبود کارایی و کاهش هزینه تولید آنها میتواند به توسعه انرژیهای تجدیدپذیر و پایدار کمک کند. به علاوه، با پیشرفت در تحقیقات و اعمال نتایج به شیوههای تولید صنعتی، میتوان بازار سلولهای خور شیدی CIGS را گسترش داده و انرژیهای تجدیدپذیر را بهطور موثرتر در جوامع مختلف مورد استفاده قرار داد. به این ترتیب، اصلیترین انگیزه این تحقیق در بهبود کارایی و کاهش هزینههای سلولهای خورشیدی CIGS قرار دارد تا از این پتانسیلها بهرهبرداری بهتری صورت گیرد و از انرژیهای نیروی خورشید به شکلی کارآمد و اقتصادی استفاده شود.

۱-٤ نوآوری تحقیق

نوآوری و مشارکت اصلی این تحقیق در دو زمینه مهم به شرح زیر میباشد:

۱. تغییرات درجهبندی شکاف نواری⁵؛ یکی از نوآوریهای اصلی این تحقیق در برر سی و ارزیابی تاثیرات تغییرات درجهبندی شکاف نواری بر روی خواص سلولهای خورشیدی CIGS است. این تحقیق بهبودها و محدودیتهای این روش را بهطور دقیق بررسی میکند و تاثیرات آن را بر راندمان و خصو صیات الکتریکی و نوری سلولها ارزیابی میکند. این نوآوری به افزایش دقت در طراحی و بهینه سازی سلولهای CIGS و بهبود عملکرد آنها کمک میکند.

۲. تغییر ضخامت لایه جاذب: مشارکت ا صلی دیگر این تحقیق در تجزیه و تحلیل تاثیر تغییرات در ضخامت لایه جاذب بر روی عملکرد سلولهای خور شیدی CIGS قرار دارد. این تحقیق به ارزیابی میزان افزایش راندمان و خصو صیات دیگر سلولها با تغییر ضخامت لایه جاذب میپردازد و این امکان را فراهم میکند تا بهینهترین ضخامت لایه جاذب برای کسب حداکثر بازده را شناسایی کند. در کل، این دو نوآوری به تحقیقات اخیر در زمینه سلولهای خورشیدی CIGS ارتقاء می بخشند و به مهندسان و پژوهشگران این امکان را

میدهند که با بهبود طراحی و عملکرد این سلولها، به دستاوردهای بزرگتر در زمینه تولید انرژی خورشیدی برسند.

۱-0 سازماندهی مقاله

در بخش دوم به مواد و ساختار پیشنهادی می پردازیم و سپس خواص الکتریکی و نوری سلول خور شیدی CIGS پیشنهادی ارائه خواهد شد. در بخش سوم نتایج شبیه سازی ارائه و تجزیه و تحلیل می شود و در بخش چهارم نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای پژوهشهای آینده ذکر خواهد شد.

۲. مواد و سازه سلول خورشیدی پیشنهادی

سلول خورشیدی پیشنهادی شبیهسازی شده CIGS شامل چندین لایه است که در شکل (۱) نشان داده شده است.

- ۱) یک لایه اکسید رسانای شفاف ZnO آلائیده یا دوپ شده با آلومینیوم به عنوان اکسید رسانای شفاف برای جمع آوری و حرکت
 الکترونها از سلول عمل میکند و در عین حال کمترین نور ممکن را جذب میکند و بیشترین نور را از خود عبور میدهد.
 - ۲) لايه پنجره از ZnO.
 - ۳) یک لایه بافر CdS نوع n که پیوند ناهمگن را کامل می کند
 - ۴) چهار لايه فعال CIGS نوعp .
 - ۵) سطح پشتی مولیبدینیوم (Mo').



شکل ۱: ساختارسلول خورشیدی پیشنهادی شبیه سازی شده CIGS

چهار لایه CIGS در نسبتهای x=Ga/(Ga+In) در نسبتهای در مقاوت هستند و مقدار x از ۲۰ ا ۱ از لایه بالایی تا پایینی متفاوت است. پیکربندی لایهها به این صورت است که لایهای با قرابت بیشتر (نزدیکی، پیوستگی و وابستگی) به لایه بافر CdS در بالا قرار دارد و میل ترکیبی از لایه بالایی به لایه پایینی کاهش مییابد تا مشکل ناپیوستگیهای باند گپ برطرف شود و قرابتها هم تراز شوند.

برای شبیه سازی عملکرد سلول خورشیدی، سلول را با طیف خورشیدی استاندارد AM 1.5 روشن کردهایم. محدوده طول موج مورد استفاده در شبیه سازی μm 1.7 کمک μm 0.3 است. مرز و محدوده جذب برای مواد CIGS تقریباً از ۰/۷ میکرومتر برای CGS تا ۷۳۷ میکرومتر بطور تقریبی برای CIS متغیر است. گنجاندن این واقعیت با آرایش ۴ لایه به کار رفته در سازه منجر به افزایش قابل توجهی در کارایی سلول می شود که طبق دانش ما، ساختار پیشنهادی را به کارآمدترین سلول خورشیدی CIGS تاکنون تبدیل کرده است. پارامترهای الکتریکی لازم برای شبیه سازی ساختار سلول خورشیدی در (جدول ۱) درج شده است. شکاف باند و میل ترکیبی لایه CIGS با x متفاوت است. معادله ۳ و ۴ وابستگی Eg و χ را به x نشان می دهد [۵].

$$E_g(x) = (1 - x)E_g(CIS) + xE_g(CGS) - bx(1 - x)$$

$$x(CIGS) = x(CIS) - [E_g(CIGS) - E_g(CIS)]$$
(*)

لایه ZnO:Al با دوپینگ یکنواخت Al با غلظت ³ 1e20cm⁻³ در یک لایه ZnO به ضخامت ۱۰۰ نانومتر شکل میگیرد. یک پارامتر مهم در شبیه سازی نوری، ضریب شکست مواد است.

۳. نتایج شبیهسازی

به منظور دستیابی به مقایسههای بهتر با یک مبنا و مرجع ، ابتدا یک سلول خور شیدی CIGS با لایه جاذب شکاف نواری یکنواخت eV ۱/۱۶ را در نظر می گیریم. نتایج شبیه سازی در جدول (۲) نشان داده شده است.

properties materials	μn (cm2/Vs)	μp (cm2/Vs)	NA (1/cm3)	ND (1/cm3)	NC (1/cm3)	NV (1/cm3)	Eg (eV)	χ	Thickness (nm)
ZnO	١	۲۵	•	۵е۱۷	r,re11	۱,۸е۱۹	۳,۳	۴	۵۵
CdS	۱	۲۵	•	۵е۱۲	r,re11	۱,۸e۱۹	۲,۴	4,1	۵۵
CIGS X=0	۱	۲۵	7618	۱۰۱۷۵۵	۱۰۱۸*۲,۲	۱۰۱۹*۱٫۸	١,•١	۴,T•Y •	۳۰۰-۲۳۰۰
CIGS X=0.38)	۲۵	7e18	۱۰۱۷۵۵	۱۰۱۸*۲,۲	۱۰۱ ۸ «۲,۲	۱,۲۰۸۵	4, 4	۳۰۰-۲۳۰۰
CIGS X=0.63)	۲۵	reis	۱۰۱۷۵۵	۱۰۱۸ «۲ ,۲	۱۰۱۸*۲,۲	1,8800	۳٫۸۵۱ ۵	۳۰۰-۲۳۰۰
CIGS X=1)	۲۵	7618	۱۰۱۷۵۵	۱۰۱۸*۲,۲	۱۰۱۸*۲,۲	1,888.	۳,۵۸۰ ۹	۳۰۰-۲۳۰۰
Мо	-	-	-	-	-	-	-	-	۴

جدول ۱: پارامترهای الکتریکی سلول خورشیدی شبیهسازی شده

جدول ۲: نتایج شبیهسازی شده برای پارامترهای خروجی سلول خورشیدی CIGS با نمایه شکاف باند جاذب یکنواخت

سلول مبنا	X	Eg (eV)	Eff (%)	FF (%)	$V_{OC}(V)$	I _{SC} (mA/cm2)
CIGS	۰/٣	١/١۶	22/21	۸۳/۴۴	•/٧٢١	78/47

سپس، مطالعه شبیه سازی را با تأثیر میدان سطح پشتی (BSF) آغاز میکنیم. در حالت BSF فا صله باند به طور خطی (به عبارت دیگر درجه بندی برگشتی)به سمت تماس پشتی افزایش می یابد. ما تأثیر BSF را بر پارامترهای خروجی سلول خور شیدی کالکوپیریت Cu In1-x,Gax)Se2) مورد بحث قرار دادهایم. این نوع پروفیل درجه بندی باند شکاف در شکل (۲) نشان داده شده است.



Absorber layer

شکل ۲: پروفیل های باند شکاف جاذب سلول خورشیدی CIGS

چنین ترتیبی از لایههای جاذب نتایج زیر را دربرداشت:

- کاهش پدیده نوترکیبی در سطح پشت منجر به افزایش ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه می شود. بنابراین بازده سلول خورشیدی شبیهسازی شده افزایش مییابد.
- کاهش در نوترکیب سطح پشتی و افزایش طول انتشار اقلیت حامل، منجر به جمع آوری حامل موثر در سلول خورشیدی CIGS می شود.

همانطور که در بخش قبلی گفته شد، افزایش فاصله باند لایه جاذب با افزایش تدریجی محتوای Ga در نزدیکی سطح پشتی سلول خورشیدی CIGS یک میدان شبه الکتریکی ایجاد می کند که با معادله (۲) توضیح داده شده است.

الکترون برانگیخته شده از باند ظرفیت به نوار رسانایی (هدایت) به سمت لبه یا مرز با پتانسیل پایین تر می چرخد که به معنای رفتن به سمت ناحیه بار فضایی ا ست. بنابراین از ترکیب مجدد در سطح پشتی به طور بالقوه اجتناب می شود و جریان تو سط حامل های اقلیت در سلول خورشیدی افزایش می یابد.

توجه شود که میدان سطح پشتی (BSF) به دلیل درجهبندی Ga به آرامی جریان اشباع معکوس را کاهش میدهد. این اتفاقات در کنار هم منجر به افزایش کارایی سلول می شود. نتیجه این بخش از بررسی در جدول (۳) نشان داده شده است.

رشیدی CIGS با درجه بندی باند شکاف	خروجی سلول خو	شده برای پارامترهای	جدول ۳: نتایج شبیهسازی ،
-----------------------------------	---------------	---------------------	--------------------------

سلول پیشنهادی	Х	Eg(eV)	Eff(%)	FF(%)	VOC (V)	ISC (mA/cm2)
CIGS	متغير	متغير	۳۳/۷	۲ ۹	١	4./95

نتایج سلول تحقیقی یا شبیه سازی شده با سلول مبنا (یک سلول خور شیدی CIGS معمولی) که در جدول (۲) نشان داده شده است قابل مقایسه است و در جدول (۴) نشان داده شده است.

	X	Eg (eV)	Eff (%)	FF (%)	V _{OC} (V)	I _{SC} (mA/cm2)	سلول خورشیدیCIGS
CIGS	۰/۳	١/١۶	77/81	۸۳/۴۴	•/٧٢١	78/47	معمولى
CIGS	متغير	متغير	۳۳/۷	Y ٩	١	۴٠/٩۶	با درجه بندی باند شکاف

جدول ۴: نتایج سلول خورشیدی CIGS معمولی و درجه بندی باند شکاف

با تغییر ضخامت چهار لایه جاذب نشان داده شده در شکل (۱)، به ضخامت بهینه دست یافتیم. مطابق شکل (۳) و (۴)، نتایج شبیه سازی نشان میدهد که ضخامت لایه ۱/۳ ≈ CIGS میکرومتر، برای سازه پیشنهادی، از نظر بازده و ضریب پر شدگی بهترین است. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می شود، با افزایش ضخامت لایه های جاذب، حداکثر توان سلول افزایش می یابد و این افزایش در ضخامت ۱/۳ میکرومتر به حداکثر مقدار می رسد. این امر منجر به افزایش ضریب پر شدن سلول و رسیدن به مقدار بهینه برای آن در ضخامت ۱/۳ میکرومتر می شود.



شکل ۳: ضخامتهای مختلف لایه های جاذب درجه بندی شکاف نواری (قسمت Pmax در نمودار بزرگنمایی شده است) همانطور که در شکل (۴) مشاهده می شود، با افزایش ضخامت لایه های جاذب، _{OC}در حال کاهش است، به نظر می رسد که این امر به دلیل افزایش نرخ نوترکیبی با افزایش ضخامت باشد که بر جریان اشباع تاریک تاثیر گذاشته و باعث افت ولتاژ مدار باز سلول شده است . همچنین با افزایش ضخامت لایه های جاذب، سرعت تولید در لایه های جاذب افزایش می یابد و منجر به افزایش جریان اشباع اتصال کوتاه سلول می شود (همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است) . همه این اتفاقات که در سلول رخ می دهد همراه با دلایل افزایش ضریب پر شدگی سلول منجر به افزایش کارایی سلول گردیده و در ۱/۳ میکرومتر به مقدار بهینه رسیده است



٤. نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله، شبیه سازی سلولهای خورشیدی CIGS با درجهبندی باندگپ برای بررسی خواص الکتریکی و نوری انجام شده است. علاوه بر این، تأثیر تغییر ضخامت لایه جاذب بر این پارامترها و به ویژه بر بازده و ضریب پر شدگی سلول مورد بررسی قرار گرفته است. در سلولهای خورشیدی معمولی CIGS، راندمان۲۲/۸۱ درصد است که با افزایش ضخامت لایههای جاذب، سرعت تولید در لایههای جاذب افزایش یافته و منجر به افزایش جریان اشباع کوتاه سلول می شود. در این مقاله به بازدهی بالاتر از راندمان سلول خورشیدی معمولی دست یافتهایم. مقادیر پارامترهای خروجی سلول خورشیدی CIGS شبیه سازی شده ما عبارتند از:

Efficiency = 33.7%, Fill Factor = 79%, V \neg OC = 1 mV and ISC = 40.96 mA/cm2

چندین پیشنهاد برای ادامهی این تحقیق به شرح زیر مطرح می شود:

۱. برر سی تاثیرات طیف گستردهتر نور: برای بهبود دقت شبیه سازی و تعیین دقیقتر عملکرد سلولهای خور شیدی CIGS، میتوان این تحقیق را به طیف گستردهتری از نور (مانند طیف نور خور شید) گسترش داد. این تغییر میتواند تاثیرات تغییرات درجهبندی شکاف نواری را در دامنه وسیعتری از طول موجها بررسی کند و نتایج دقیقتری ارائه دهد.

۲. تاثیر متغیرهای دیگر بر عملکرد سلولها: برر سی تاثیر متغیرهای دیگر مانند دما، غلظت دوپینگ، و ویژگیهای لایههای بافر بر راندمان و خصوصیات سلولهای CIGS میتواند اطلاعاتی ارزشمندتر ارائه دهد و به بهبود عملکرد سلولها کمک کند.

۳. تجربیات عملی و تطابق با نتایج شبیه سازی: این تحقیق می تواند با تجربیات عملی ترکیب شود تا نتایج شبیه سازی با دادههای واقعی مقایسه شوند. این کار می تواند صحت و قابلیت انتقال نتایج شبیه سازی را تأیید کند.

۴. مقایسه با سایر تکنولوژیها: می توان مقایسه ای میان سلول های CIGS و تکنولوژی های سلول های خور شیدی دیگر مانند سیلیکون کریستالی انجام داد. این مقایسه میتواند مزایا و معایب هر تکنولوژی را به و ضوح نمایش دهد و به مهند سان در انتخاب منا سبترین راه حل کمک کند.

۵. بهبود مدلهای شبیه سازی: تو سعه و بهبود مدلهای شبیه سازی با استفاده از دادههای تجربی و نتایج این تحقیق میتواند به دقت و قدرت پيش بيني اين تکنولوژيها کمک کند.

۶. تحقیق در زمینه افزایش دسترسی به مواد و فناوریهای تولید: تحقیق در زمینه بهینه سازی تولید مواد مورد نیاز برای ساخت سلولهای CIGS و همچنین تحقیق در زمینه بهبود روشهای تولید و فرآیندهای اجرایی میتواند به افزایش کارایی و کاهش هزینههای تولید کمک کند.

۷. کاربردهای عملی تر و انتقال به صنعت: میتوان با تو سعه کاربردهای عملیتر از این تحقیق و انجام آزمایشهای واقعی به سمت انتقال تکنولوژی به صنعت پیش رفت و اثربخشی اقتصادی و عملکرد عملی تر سلول های CIGS را مورد ارزیابی قرار داد.

- [1] NREL Best Research-Cell Efficiency Chart, https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html, Accessed September 2020.
- [2] Leijtens T, Bush KA, Prasanna R, et al. Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskite semiconductors. Nat Energy 2018; 3: 828-838.
- al., Isopropanol-treated Zhang, et PEDOT:PSS [3] W. as electron transport layer in polymer solar cells, Org. Electron. 15 (12) (2014) 3445-3451.
- [4] Sami, M., S. Elkun, Mohsen Ghali, M. M. Mosaad, and M. R. Eraky. "Hybrid solar cell made of an electron transport layer of n-PEDOT: PSS and p-CuInGaSe2 nanocrystals film." Materials Letters 300 (2021): 130155.
- [5] Raghuwanshi, Mohit, Manjusha Chugh, Giovanna Sozzi, Ana Kanevce, Thomas D. Kühne, Hossein Mirhosseini, Roland Wuerz, and Oana Cojocaru-Mirédin. "Fingerprints Indicating Superior Properties of Internal Interfaces in Cu (In, Ga) Se2 Thin-Film Solar Cells." Advanced Materials 34, no. 37 (2022): 2203954.
- [6] Kong, Hui, Zhufeng Yu, Jun Zhang, Yijie Han, Lin Wu, Hongsheng Wang, and Jian Wang. "Perspective of CIGS-BIPV's product competitiveness in china." International Journal of Photoenergy 2020 (2020): 1-10.
- [7] Li, Jia, Zhengguo Jin, Tong Liu, Jian Wang, Dalong Wang, Junyun Lai, Haiyan Du, and Lan Cui. "Ternary and quaternary chalcopyrite Cu (In 1-x Ga x) Se 2 nanocrystals: Organoalkali-assisted diethylene glycol solution synthesis and band-gap tuning." CrystEngComm 15, no. 36 (2013): 7327-7338.
- [8] Lundberg, Olle, Marika Edoff, and Lars Stolt. "The effect of Ga-grading in CIGS thin film solar cells." Thin Solid Films 480 (2005): 520-525.
- [9] M.A. Green, Solar Cells; Operating Principles, Technology and System Applications, The University of New South Wales, Kensing- ton, 1992, p. 50 (142).
- [10] O. Lundberg, Ph.D. thesis, Uppsala University, (2003),ISBN 91-544-5790-8, http://publications.uu.se/thesis/abstract.xsql?dbid=3757.
- [11] Chen, Wen S., and Reid A. Mickelsen. "Thin-film CdS/CuInSe2 heterojunction solar cell." In Role of electro-optics in photovoltaic energy conversion, vol. 248, pp. 62-69. SPIE, 1980.
- [12] Jackson, Philip, Dimitrios Hariskos, Roland Wuerz, Wiltraud Wischmann, and Michael Powalla. "Compositional investigation of potassium doped Cu (In, Ga) Se2 solar cells with efficiencies up to 20.8%." physica status solidi (RRL)-Rapid Research Letters 8, no. 3 (2014): 219-222.
- [13] Zouache, Rafik, Idris Bouchama, Okba Saidani, Layachi Djedoui, and Elyazid Zaidi. "Numerical study of high-efficiency CIGS solar cells by inserting a BSF µc-Si: H layer." Journal of Computational Electronics 21, no. 6 (2022): 1386-1395.
- [14] Liu, Wu, Haotian Li, Bo Qiao, Suling Zhao, Zheng Xu, and Dandan Song. "Highly efficient CIGS solar cells based on a new CIGS bandgap gradient design characterized by numerical simulation." Solar Energy 233 (2022): 337-344.

دوره ۲۶، شماره۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه ۵۷–۶۸

- [15] Ouedraogo, Soumaila, Raguilignaba Sam, François Ouedraogo, Marcel Bawindsom Kebre, François Zougmore, and Jean-Marie Ndjaka. "Optimization of Copper Indium Gallium Di-Selenide (CIGS) based solar cells by back grading." In 2013 Africon, pp. 1-6. IEEE, 2013.10.1016/j.opelre.2019.02.001
- [16] Bothwell, Alexandra M., Siming Li, Rouin Farshchi, Michael F. Miller, Jake Wands, Craig L. Perkins, Angus Rockett, Aaron R. Arehart, and Darius Kuciauskas. "Large-Area (Ag, Cu)(In, Ga) Se2 Thin-Film Solar Cells with Increased Bandgap and Reduced Voltage Losses Realized with Bulk Defect Reduction and Front-Grading of the Absorber Bandgap." Solar RRL 6, no. 8 (2022): 2200230.
- [17] Lafuente-Sampietro, Alban, Katsuhisa Yoshida, Shenghao Wang, Shogo Ishizuka, Hajime Shibata, Nobuyuki Sano, Katsuhiro Akimoto, and Takeaki Sakurai. "Effect of the double grading on the internal electric field and on the carrier collection in CIGS solar cells." Solar Energy Materials and Solar Cells 223 (2021): 110948.
- ¹ CuIn1-xGaxSe2
- ² Power Conversion Efficiency
- Back Surface Field
- 'tetra-gradient bandgap
- ⁵ Power Conversion Efficiency
- 6 band-gap grading
- ⁷ Molybdenum