نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۶، شماره۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه ۵۷-۶۸

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

رضا کیانی[۱] ، مجید فولادیان[۲] ، محمد جلال رستگار فاطمی[۳]

تاریخ دریافت:
۱۵ / ۰۶ / ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش:
۱۴ / ۰۸ / ۱۴۰۲

کلمات کلیدی:
سلول‌های خورشیدی
CIGS
درجه‌بندی شکاف نواری
راندمان سلول‌های خورشیدی
ضخامت لایه جاذب

چکیده

در این پژوهش، ما به شبیه سازی دقیق سلول‌های خور شیدی CIGS با استفاده از درجه‌بندی شکاف نواری band-gap می‌پردازیم. هدف اصلی ما این است که خواص الکتریکی و نوری این سلول‌ها را بهبود بخشیم. به منظور بررسی عملکرد، تغییر ضخامت لایه جاذب را نیز به عنوان یک عامل کلیدی مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. به ویژه، ما به تحلیل تأثیر این تغییرات بر راندمان و ضریب پر شدگی سلول‌ها می‌پردازیم. در سلول‌های خورشیدی معمولی CIGS، راندمان حدود ٪۲۰,۸ است که تا به حال دست‌یافته‌ایم. اما با بهره‌گیری از درجه‌بندی شکاف نواری بر روی لایه جاذب و با بهره‌گیری از تکنیک‌های مهند سی در لایه‌های جاذب و بافر، ما به تحسین‌برانگیزترین راندمان تا به حال برابر با ٪۳۳,۷ دست یافته‌ایم. این افزایش نتیجه‌ی دستاوردهای موفق در بهینه‌سازی ساختار و خواص سلول‌ها ا ست. به طور خلا صه، مقادیر پارامترهای مهم خروجی برای این سلول‌های پیشرفته شامل بازده ٪۳۳,۷، ضریب پر شدگی ٪۷۹، ولتاژ مدار باز ۱ میلی‌ولت و جریان کوتاه مدار ۴۰,۹۶ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع می‌باشد.

۱. دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه rezak1290@yahoo.com
۲. استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه
۳. استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۶، شماره۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه ۵۷-۶۸

۱ 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 می‌شود. این کاهش در ضخامت لایه جاذب به دلیل خاصیت شکاف نواری مستقیم CIGS رخ می‌دهد.

۱-۱ پیشینه تحقیق

برای د ستیابی به کاهش هزینه بی‌شتر، افزایش راندمان تبدیل توان (PCE[۲]) به عنوان یک راهکار مؤثر شناخته شده ا ست. تاکنون، PCE برای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی کریستالی تک پیوندی (c-Si) و همچنین لایه‌نازک‌های مانند Cu (In, Ga)Se2 (CIGS) و CdTe به ترتیب به میزان حدود ۲۷٪ و ۲۳٪ ر سیده ا ست [۱]. نیمه هادی‌های مرکب III-V دارای شکاف‌های باند قابل تنظیم هستند و راندمان بسیار بالایی را در سلول‌های خورشیدی چند اتصالی ارائه می‌دهند. با این حال، هزینه‌های بالای ساخت مانع از کاربرد گسترده آن‌ها می‌شود [۲]. با بهره‌گیری از دانش روز تا کنون، راندمان ثبت شده برای سلول‌های خورشیدی CIGS خالص ۲۰,۳ ± ۰,۶ درصد است [۳]. از طرفی ، ایزوپروپانول دوپینگ شده از نوع n و نانوکریستال کالکوپیریت $CuIn_{0.4}Ga_{0.6}Se_2$ از نوع p به عنوان ماده سلول خورشیدی فیلم نازک، در نظر گرفته شده و امیدوارکننده ا ست که بازدهی آن به ۴۰ در صد می‌ر سد. [۴]. سلولCIGS ترکیبی از نیمه هادی I-III-VI چهارتایی با ساختار کریستالی کالکوپیریت است. این ماده به دلیل عیوب طبیعی اش به عنوان CIGS نوع P در نظر گرفته می شود که معمولاً در شرایط In-rich و Se-rich ر شد می‌کند [۵]. برخی مزایای مواد CIGS به عنوان یک لایه جاذب برای یک سلول خور شیدی لایه در [۶] آمده است که به شرح زیر می‌باشد:

۱- شکاف باند CIGS را می‌توان 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 می‌کند. به طور تجربی مشاهده شد که نمودار شکاف انرژی Eg نیمه هادی Cu (In 1-x,Gax)Se2 به ازای نسبت اتمی ((x=Ga/(Ga+In)) رفتاری خم شدگی دارد [۷]، از نظر ریاضی شکاف انرژی را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$E_g(x) = (1-x)E_g(CIS) + xE_g(CGS) - bx(1-x) \qquad (۱)$$

b ضریب انحنا ست با مقادیری بین ۰,۱۱ و ۰,۲۴ که برای ضریب خمش نوری گزارش شده ا ست [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 وجوددارد کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد این احتمال با شکاف باند، نسبت معکوس دارد [۹]. دوم اینکه یک میدان الکتریکی اضافی، A_ξ، به وجود می‌آید و می‌توان آن را با رابطه (۲) توصیف کرد[۱۰]:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

$$\xi_A = \frac{d\Delta E_g}{dx} \quad (۲)$$

برای افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی هم از طریق آزمایشی و هم شبیه‌سازی، 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 [۱۱]. تا سال ۲۰۱۲، سلول‌های خورشیدی CIGS ساخته شده توسط 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 خورشیدی لایه نازک CIGS را از طریق شبیه سازی به روش‌های مختلف از جمله تغییرمیزان x.comp، تاثیر تغییرات در طول عمر حامل‌های اقلیت، دما، غلظت دوپینگ و آلایندگی، ضخامت لایه جاذب، ضخامت لایه بافر، بهبود ببخشند. اخیرا در [۱۳] که در سال ۲۰۲۲ به ثبت رسیده است شبیه سازی جدیدی از سلول خورشیدی Cu(In,Ga)Se2 با استفاده از شبیه سازد ستگاه دو بعدی Silvaco-Atlas تحت تابش نورAM1.5 برروی مواد لایه بافر و درجه‌بندی باند گپ صورت گرفته است که نتایج به‌دست آمده نشان داد با افزودن لایه میدان سطح پشتی BSF [۳] بر پایه لایه سیلیکونی میکروکریستالی هیدروژنه (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 µc-Si:H(p) (BSF) 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 خورشیدی CIGS بر اساس TGB حدود ۲۳/۳۵% شبیه سازی شده است. گرادیان باند جدید پیشنهاد شده در این کار را می‌توان 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 می‌شود:

۱. افزایش سطح نوار هدایت به سمت سطح پشتی جاذب که به آن درجه‌بندی برگشتی می‌گویند[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 خورشیدی 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 (Voc) را بهبود می‌بخشد [۱۵]. اما برخی تحقیقات [۱۳] نشان می‌دهند که هیچ افزایش قابل‌توجهی در Voc 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

شـکاف باند کارآمد در این مقاله حدود 1.2 eV اسـت در حالی که برخی از محققان شـکاف باند بهینه دیگری (1.4-1.5 eV) را گزارش کرده‌اند. ممکن است این موضوع به دلیل عدم گنجاندن برخی مدل‌ها در شبیه‌سازی‌ها مانند وجود یک لایه وارونگی بین CdS و CIGS باشد که منجر به شکاف باند کوچکتر می‌شود.

۱-۲ خلاء مطالعاتی

با توجه به مواردی که بیان شد، مطالعات متعددی در زمینه سلول‌های خورشیدی 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 نسـبت اجزاء مختلف (Ga و In) در CIGS، می‌توان شـکاف باند را تغییر داد و جذب نور بهینه را در محدوده طول موج مورد نظر داشت.

۲. افزایش کارایی با استفاده از پتاسیم: تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که افزودن پتاسیم 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. شـیب‌بندی باند گپ: مطالعات نشـان می‌دهد که شـیب‌بندی باند گپ (TGB) می‌تواند بهبود چشـم‌گیری در کارایی سـلول‌های 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 اسـت. 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 سـاخت نمونه‌ها: علاوه بر مدل‌سـازی، مطالعات تجربی و سـاخت نمونه‌های واقعی از سـلول‌های CIGS نیز انجام می‌شود. تحقیقات در زمینه‌ی مواد جدید، فرآیندهای بهبودیافته تولید و بهینه‌سازی ساختارهای لایه‌نازک برای افزایش بازده سلول‌ها انجام می‌شود.

در کل، این مقاله با تمرکز بر روی دو موضـوع کلیدی یعنی تغییرات درجه‌بندی شـکاف نواری و تغییر ضـخامت لایه جاذب، به پر کردن شـکاف‌های مطالعاتی موجود در تحقیقات اخیر در زمینه سـلول‌های خورشـیدی 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 خورشیدی CIGS قرار دارد. سلول‌های خورشیدی CIGS به دلیل خواص خوب الکتریکی و نوری که دارند، به عنوان یکی از فرصت‌های اساسی در حوزه انرژی خورشیدی شناخته می‌شوند. با این حال، هزینه‌های تولید بالا می‌توانند به مانع از بهره‌برداری بهینه از این تکنولوژی برای تولید انرژی در مقیاس گسـترده شـوند. مهمترین هدف این تحقیق ارتقاء بازده تبدیل توان (PCE^{Δ}) سلول‌های CIGS است. افزایش PCE در سلول‌های خورشیدی به معنای بهره‌برداری بهتر از انرژی نور خورشید 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 توسـعه انرژی‌های تجدیدپذیر و پایدار کمک کند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

به علاوه، با پیشرفت در تحقیقات و اعمال نتایج به شیوه‌های تولید صنعتی، می‌توان بازار سلول‌های خورشیدی 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 نواری[۶]: یکی از نوآوری‌های اصلی این تحقیق در بررسی 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 خصوصیات 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 اصلی دیگر این تحقیق در تجزیه و تحلیل تاثیر تغییرات در ضخامت لایه جاذب بر روی عملکرد سلول‌های خورشیدی CIGS قرار دارد. این تحقیق به ارزیابی میزان افزایش راندمان و خصوصیات 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 می‌بخشند 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.

۱-۵ سازماندهی مقاله

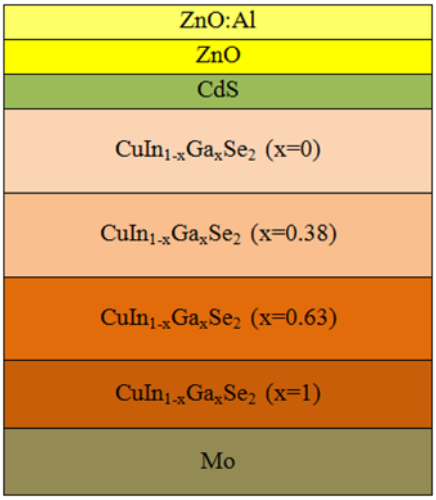
در بخش دوم به مواد و ساختار پیشنهادی می پردازیم و سپس خواص الکتریکی و نوری سلول خورشیدی CIGS پیشنهادی ارائه خواهد شد. در بخش سوم نتایج شبیه سازی ارائه و تجزیه و تحلیل می شود و در بخش چهارم نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده ذکر خواهد شد.

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 جمع‌آوری 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) لایه پنجره از ZnO .
۳) یک لایه بافر CdS نوع n که پیوند ناهمگن را کامل می‌کند
۴) چهار لایه فعال CIGS نوع p .
۵) سطح پشتی مولیبدینیوم ($Mo^{۷}$).

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل ۱: ساختارسلول خورشیدی پیشنهادی شبیه سازی شدهCIGS

چهار لایه CIGS در نسبت‌های x=Ga/(Ga+In) متفاوت هستند و مقدار x از ۰ تا 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 شبیه‌سازی عملکرد سلول خورشیدی، سلول را با طیف خورشیدی استاندارد AM 1.5 روشن کرده‌ایم. محدوده طول موج مورد استفاده در شبیه سازی 0.3 μm≤λ≤1.7 μm است. مرز و محدوده جذب برای مواد CIGS تقریباً از ۰/۷ میکرومتر برای CGS تا ۱/۳۷ 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 می‌شود 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].

$$E_g(x) = (1-x)E_g(CIS) + xE_g(CGS) - bx(1-x) \quad (۳)$$

$$x(\text{CIGS}) = x(\text{CIS}) - [E_g(\text{CIGS}) - E_g(\text{CIS})] \quad (۴)$$

لایه ZnO:Al با دوپینگ یکنواخت Al با غلظت $1e20cm^{-3}$ 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 خورشیدی CIGS با لایه جاذب شکاف نواری یکنواخت eV ۱/۱۶ را در نظر می‌گیریم. نتایج شبیه سازی در جدول (۲) نشان داده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

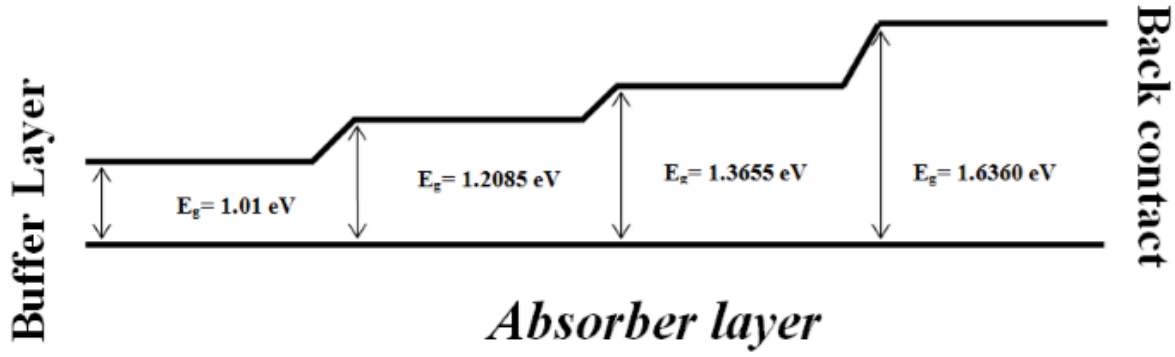
جدول ۱: پارامترهای الکتریکی سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده

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	۱۰۰	۲۵	۰	۵e۱۷	۲,۲e۱۸	۱,۸e۱۹	۳,۳	۴	۵۵
CdS	۱۰۰	۲۵	۰	۵e۱۷	۲,۲e۱۸	۱,۸e۱۹	۲,۴	۴,۲	۵۵
CIGS X=0	۱۰۰	۲۵	۲e۱۶	۱۰۱۷*۵	۱۰۱۸*۲,۲	۱۰۱۹*۱,۸	۱,۰۱	۴,۲۰۷۰	۳۰۰-۲۳۰۰
CIGS X=0.38	۱۰۰	۲۵	۲e۱۶	۱۰۱۷*۵	۱۰۱۸*۲,۲	۱۰۱۸*۲,۲	۱,۲۰۸۵	۴,۰۰۸۴	۳۰۰-۲۳۰۰
CIGS X=0.63	۱۰۰	۲۵	۲e۱۶	۱۰۱۷*۵	۱۰۱۸*۲,۲	۱۰۱۸*۲,۲	۱,۳۶۵۵	۳,۸۵۱۵	۳۰۰-۲۳۰۰
CIGS X=1	۱۰۰	۲۵	۲e۱۶	۱۰۱۷*۵	۱۰۱۸*۲,۲	۱۰۱۸*۲,۲	۱,۶۳۶۰	۳,۵۸۰۹	۳۰۰-۲۳۰۰
Mo	-	-	-	-	-	-	-	-	۴۰۰

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	۰/۳	۱/۱۶	۲۲/۸۱	۸۳/۴۴	۰/۷۲۱	۳۶/۴۳

سپس، مطالعه شبیه سازی را با تأثیر میدان سطح پ شتی (BSF) آغاز می‌کنیم. در حالت BSF فا صله باند به طور خطی (به عبارت دیگر درجه بندی برگ شتی)به سمت تماس پ شتی 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.



شکل ۲: پروفیل‌های باند شکاف جاذب سلول خورشیدیCIGS

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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

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 پایین‌تر می‌چرخد که به معنای رفتن به سمت ناحیه بار فضایی است. بنابراین از ترکیب مجدد در سطح پشتی به طور بالقوه اجتناب می شود و جریان توسط حامل‌های اقلیت در سلول خورشیدی افزایش می‌یابد.

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.

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی شده برای پارامترهای خروجی سلول خورشیدی CIGS با درجه بندی باند شکاف

سلول پیشنهادی	x	Eg(eV)	Eff(%)	FF(%)	VOC (V)	ISC (mA/cm2)
CIGS	متغیر	متغیر	۳۳/۷	۷۹	۱	۴۰/۹۶

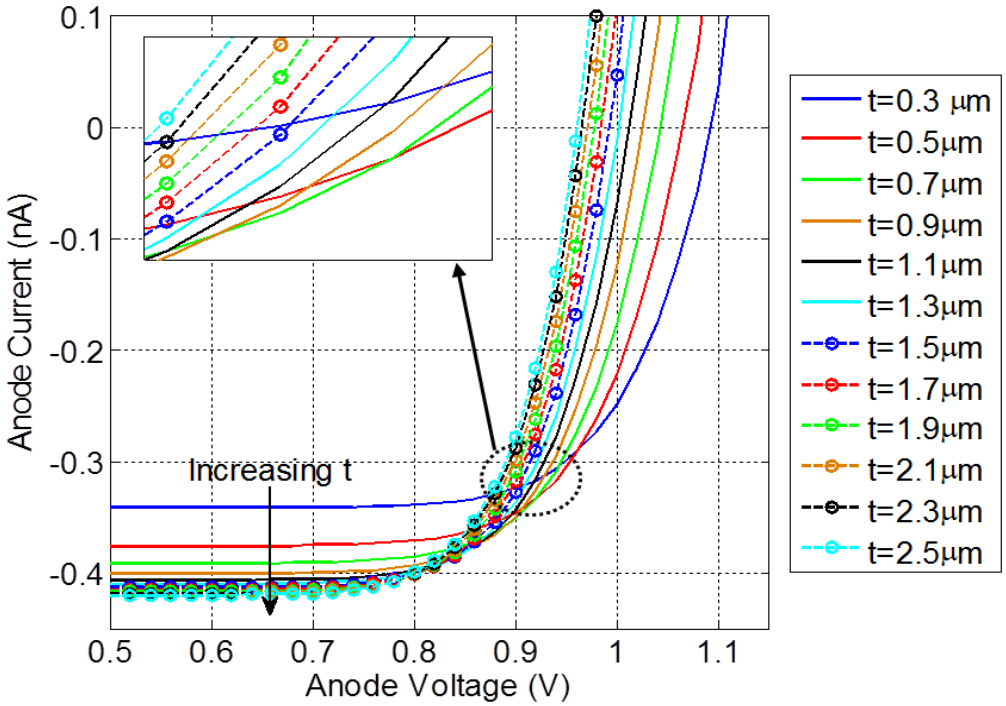
نتایج سلول تحقیقی یا شبیه‌سازی شده با سلول مبنا (یک سلول خورشیدی CIGS معمولی) که در جدول (۲) نشان داده شده است قابل مقایسه است و در جدول (۴) نشان داده شده است.

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

	x	Eg (eV)	Eff (%)	FF (%)	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA/cm2)	سلول خورشیدیCIGS
CIGS	۰/۳	۱/۱۶	۲۲/۸۱	۸۳/۴۴	۰/۷۲۱	۳۶/۴۳	معمولی
CIGS	متغیر	متغیر	۳۳/۷	۷۹	۱	۴۰/۹۶	با 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 شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ضخامت لایه CIGS ≈ ۱/۳ میکرومتر، برای سازه پیشنهادی، از نظر بازده و ضریب پر شدگی بهترین است. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت لایه‌های جاذب، حداکثر توان سلول افزایش می‌یابد و این افزایش در ضخامت ۱/۳ میکرومتر به حداکثر مقدار می‌رسد. این امر منجر به افزایش ضریب پر شدن سلول و رسیدن به مقدار بهینه برای آن در ضخامت ۱/۳ میکرومتر می‌شود.

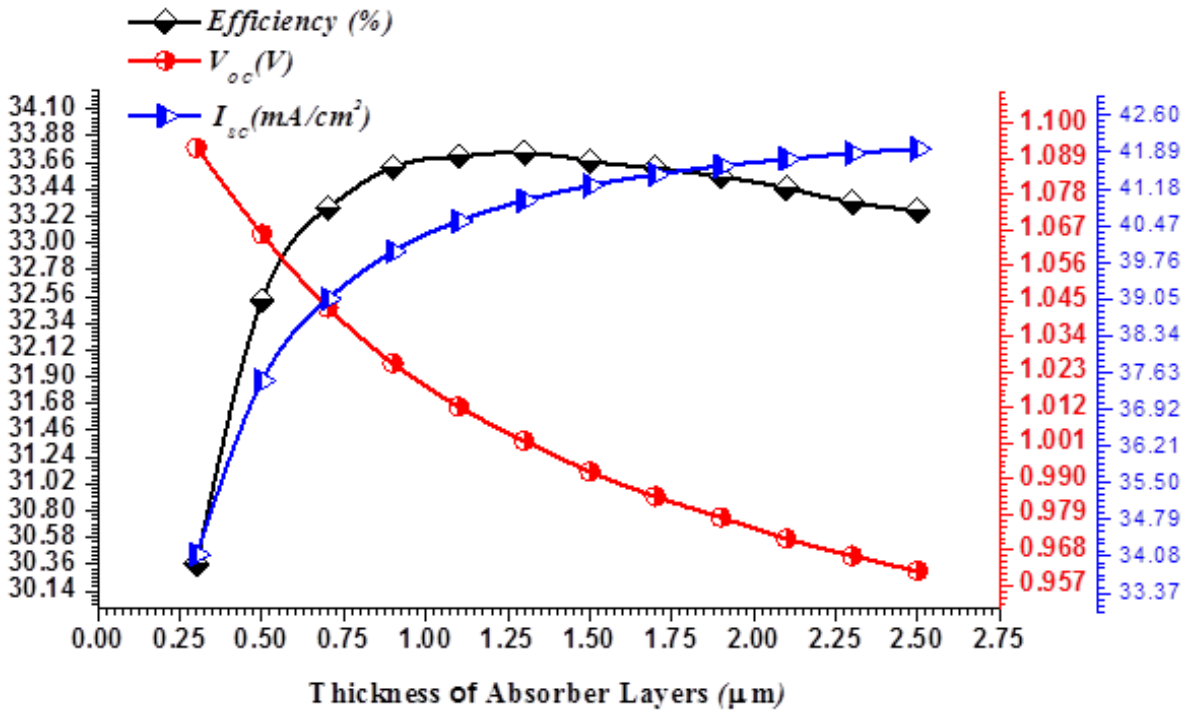
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



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، V_{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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شکل۴: راندمان، Voc و Isc به ازای افزایش ضخامت لایه‌های جاذب

٤. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، شبیه‌سازی 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 می‌شود. در این مقاله به بازدهی بالاتر از راندمان سلول خورشیدی معمولی دست یافته‌ایم. مقادیر پارامترهای خروجی سلول خورشیدی CIGS شبیه‌سازی شده ما عبارتند از:

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

چندین پیشنهاد برای ادامه‌ی این تحقیق به شرح زیر مطرح می‌شود:

۱. بر رسی 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 خورشید) 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 می‌تواند با تجربیات عملی ترکیب شود تا نتایج شبیه سازی با داده‌های واقعی مقایسه شوند. این کار می‌تواند صحت و قابلیت انتقال نتایج شبیه‌سازی را تأیید کند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

۴. مقایسه با سایر تکنولوژی‌ها: می‌توان مقایسه‌ای میان سلول‌های CIGS و تکنولوژی‌های سلول‌های 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 ا ستفاده از داده‌های تجربی و نتایج این تحقیق می‌تواند به دقت و قدرت پیش‌بینی این تکنولوژی‌ها کمک کند.

۶. تحقیق در زمینه افزایش د سترسی به مواد و فناوری‌های تولید: تحقیق در زمینه بهینه‌سازی 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 عملی‌تر سلول‌های CIGS را مورد ارزیابی قرار داد.

منابع

[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.
[3] W. Zhang, et al., Isopropanol-treated PEDOT:PSS 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

[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
[۳] Back Surface Field
[۴] tetra-gradient bandgap
[5] Power Conversion Efficiency
[6] band-gap grading
[7] Molybdenum

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]