

مدل سازی و بهینه سازی ساختار سلول خورشیدی لایه نازک CIGS به منظور افزایش بازدهی

معراج رجایی

استادیار، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و حرفه‌ای شریعتی، دانشگاه فنی حرفه‌ای، تهران، ایران

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۲

چکیده

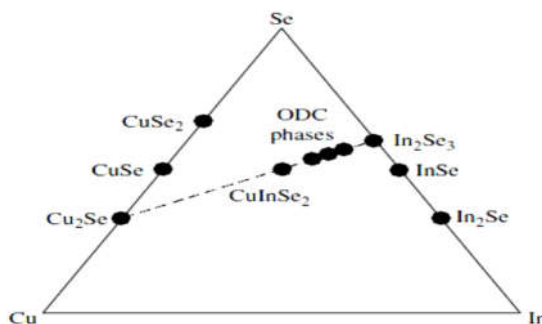
سلول خورشیدی فیلم نازک CIGS از بهترین انتخاب‌ها برای تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته است. سلول‌های خورشیدی لایه نازک CIGS، به دلیل بازدهی زیاد و قیمت کم در ساخت، توجه محققان را جلب کرده‌اند. در این پژوهش به بررسی عملکرد و عوامل مؤثر بر بازدهی سلول‌های خورشیدی پرداخته شده است. پارامترهای مختلف ساختار با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی سیلواکو (اتلس) بهبود یافت تا بیشترین بازده ممکن برای ساختار فراهم شود. تغییر ضخامت لایه‌ها و مقادیر مختلف نسبت مولی گالیوم دو عامل مؤثر در افزایش بازده‌اند. با تغییرات مولی به کار گرفته شده به منظور دستیابی به تطبیق حداکثری با استفاده از روابط ذکر شده به مقادیر بهینه‌ی این ساختارها دست یافته شد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روابط تئوری و همچنین به صورت فیزیکی تحلیل و بررسی شدند. بازدهی نهایی در مقایسه با مدل اولیه‌ی سلول در حدود ۵/۹ درصد افزایش پیدا کرد. در پایان منحنی ولتاژ - جریان سلول پایه ترسیم و به صورت عددی و گرافیکی با مراجع مقایسه شد. نزدیکی نتایج شبیه‌سازی با نتایج عملی، و همچنین مقایسه‌ی آنها با مقادیر تئوری، صحت شبیه‌سازی ساختار را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی

بازدهی، سلول خورشید CIGS، شبیه‌ساز سیلواکو، منحنی ولتاژ - جریان.

۱. مقدمه

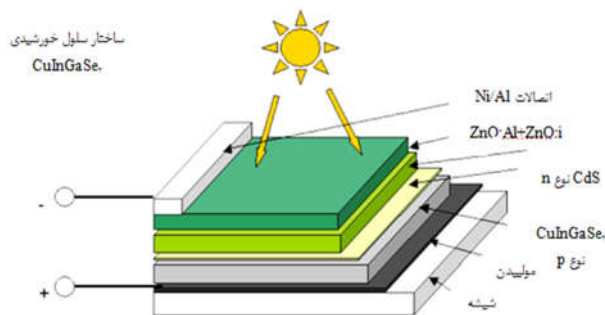
سلول CIGS شامل ترکیبات نیم‌رسانا از گروه VI-III-I است. این ترکیبات چهارگانه به صورت ABC₂ هستند که در آن A مس (Cu)، B گالیوم (Ga) یا ایندیم (In)، C گوگرد (S) سلینیوم (Se) یا تریوم (Te) است. این ترکیبات انعطاف زیادی در خواص ساختاری و الکتریکی دارند و به همین دلیل جایگاه وسیعی در ساخت سلول‌های خورشیدی دارند. بخش فعال آنها، شامل دو آلیاژ سه‌تایی، CIS و CGS است که هر دو ساختار مشابهی دارند (Karki et al., 2012; Green, 2003; Çaldiran et al., 2017). با این تفاوت که عناصر گروه دو جدول تناوبی، با عناصر گروه یک، مثل مس و عناصر گروه سه مثل ایندیم یا گالیوم جایگزین شده است. هر اتم مس و ایندیم با دو اتم سلینیوم، دو پیوند کووالانسی برقرار می‌کند و هر اتم سلینیوم با یک اتم مس و یک اتم ایندیم، دو پیوند برقرار می‌کند. پیوند بین اتم‌ها، با این حقیقت مشخص می‌شود که اتم، با دریافت یا ارائه‌ی تعداد مورد نیاز الکترون، به میانگین چهار الکترون ظرفیت دست یابد. فازهای ممکن سیستم CIS، مشخص شده در دیاگرام فاز سه‌گانه در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. نمودار فاز سه‌تایی سیستم CIS

اشکال بزرگ سلول‌های CIS ولتاژ مدار باز اندک آنهاست؛ در نتیجه به علت داشتن گاف انرژی ۰.۲/۱ الکترون ولت عملکردشان محدود می‌شوند. سلول CIGS دارای گاف انرژی‌ای است که با افزودن درصد گالیوم به نسبت ترکیب Ga/In+Ga، یا با افزودن مقدار x در فرمول شیمیایی $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ، افزایش می‌یابد. این نسبت یا مقدار x ممکن است در مس ایندیم سلینید (CIS) خالص، متفاوت با یک باشد و در مس گالیوم سلینید (CGS) خالص به صفر نزدیک باشد. برخلاف سلول‌های سیلیکونی، سلول‌های CdTe و $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ نه تنها در برابر تابش نور خورشید تخریب نمی‌شوند، بلکه تحقیقات نشان می‌دهد در صورت قرار

گرفتن در شرایط ایده آل تابش نور، عملکرد بهتری خواهند داشت. از دیگر مزیت های این سلول ها می توان به وجود گاف نواری مستقیم اشاره کرد که سبب می شود این مواد در مقایسه با سیلیکون، نور بیشتری جذب کنند. سلول های CdTe دارای گاف نواری $1/4$ الکترون ولت هستند و بیشترین بازدهی ثبت شده برای این سلول ها $16/5$ درصد بوده است. با استفاده از مواد مشابه و تغییر در مقدار (نسبت) گالیوم در سلول های CIGS، با تنظیم گاف انرژی سلول، طیف منطقه ی خاصی مدیریت می شود. یکی از خواص CIGS این است که به راحتی توسط عوامل خارجی تحت اعوجاج قرار نمی گیرد. در مقابل، اعوجاج با نقص های ذاتی مواد، کنترل می شود. اگر مواد، مقدار ناچیزی مس داشته باشند و در فشار زیاد بخار سلینیوم گرم شوند، نمونه های نوع p تولید می شوند؛ در حالی که مواد با مس اضافه و سلینیوم بیضی شکل تمایل به نوع n شدن دارند. در سلول های فتوولتائیک کالکوپریت برای رابط، اغلب از اصل اتصال ناهمگن استفاده می شود که بین دو لایه یا ناحیه هایی از نیم رساناهای بلوری ناهمسان اتفاق می افتد. برای دقت بیشتر، نیم رسانای نوع n، گاف نواری بیشتری از نیم رسانای نوع p دارد. یک سلول فتوولتائیک معمولی براساس فیلم های چند بلوری کالکوپریت چهارگانه است که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. طرح نمونه از یک سلول فتوولتائیک براساس CIGS

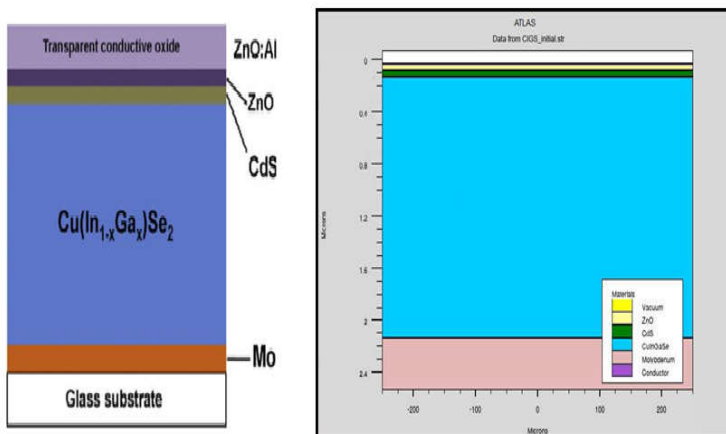
لایه ی ZnO با گاف انرژی $3/3$ الکترون ولت به طور معمول به عنوان نیم رسانای نوع n استفاده می شود و لایه ی پنجره ی شفاف برای این است که عبور تابش خورشیدی از طریق سلول آسان شود. جذب تابش خورشیدی و ایجاد جفت های الکترون - حفره در نیم رسانای نوع p اتفاق می افتد، یعنی کالکوپریت به عنوان جذب کننده مشخص می شود. ضرایب جذب زیاد، استفاده از لایه های نازک به ضخامت چند میکرون با غلظت ناخالصی زیاد و نقص های ذاتی را امکان پذیر می کند. از سوی دیگر در طول تشکیل اتصال ناهمگن،

لایه‌های داخلی تولید شده درصد نقص زیادی دارند و احتمال بازترکیب حامل‌ها در لایه‌ی داخلی بسیار زیاد است. اتصال ناهمگن CIGS/ZnO مناسب برای انتقال حامل‌ها به حساب نمی‌آید، زیرا یون‌های ایجاد شده در طول آماده‌سازی ZnO، بازترکیب جفت الکترون — حفره‌ها را در لایه‌ی داخلی تقویت می‌کنند و ممکن است به سطح جذب‌کننده آسیب برسانند. به همین دلیل، یک لایه‌ی بسیار نازک CdS با گاف انرژی ۲/۴ الکترون ولت بین ZnO و لایه‌ی جذب‌کننده استفاده شده که به‌طور معمول با روش لایه‌نشانی حمام شیمیایی فراهم می‌شود. با استفاده از یک لایه بافر، به تنظیم گاف انرژی بهتر بین پنجره و لایه‌ی جذب می‌توان دست یافت. افزایش گاف انرژی لایه‌ی جذب، سبب افزایش غلظت گالیوم، $x=Ga/(In+Ga)$ و به‌تبع آن، افزایش نسبی ولتاژ مدار باز می‌شود. افزایش گاف انرژی سبب افزایش خمش نواری و افزایش ولتاژ مدار باز می‌شود و عامل پرکنندگی بزرگ‌تری با سلول‌های کمتر مورد نیاز در هر آرایه‌ی فتوولتاییک ایجاد می‌کند. کاهش عملکرد با افزایش نسبت گالیوم ممکن است با این حقیقت توجیه شود که گاف انرژی وسیع‌تر برای لایه‌ی جذب، سهم کمتر فوتون‌ها و نفوذ عمیق‌تر، برای تولید جریان نوری را موجب می‌شود. صرف‌نظر از رابطه‌ی بالا، تحقیقات و آزمایش‌ها نشان می‌دهند افزودن گالیوم، از طریق تطابق بهتر با طیف خورشیدی، برای عملکرد و بازده سلول سودمند است. پارامتر مهم در اتصال ناهمگن، الگوی تنظیم باندهای ظرفیت و هدایت در هر دو طرف لایه‌های اتصال است؛ زیرا تأثیری قوی بر انتقال جریان در سراسر اتصال ناهمگن و عملکرد سلول‌های خورشیدی دارد.

۲. ساختار لایه‌های CIGS

متداول‌ترین روش ساخت سلول‌های CIGS به ساختارهای Substrate معروف است و بیشترین بازده مربوط به این روش است. در این ساختار، ابتدا بستر قرار می‌گیرد که به‌طور معمول از جنس شیشه است. بر روی شیشه، الکتروود زیرین لایه‌نشانی می‌شود که مولیبدن (Mo)، بهترین گزینه است. بعد از آن لایه‌ی CIGS از نوع p، سپس لایه‌ی بافر (CdS) از نوع n، ZnO به‌عنوان لایه‌ی شفاف نوع n و در آخر هم الکتروود رویی که به‌طور معمول از جنس ZnO:Al است لایه‌نشانی می‌شود. تطبیق باند ظرفیت در اتصال ناهمگن CIGS/CdS تقریباً مستقل از نرخ غلظت گالیوم بوده و در حدود ۱ الکترون ولت است. ایجاد مقادیر مثبت یا منفی، به اندازه‌ی گاف انرژی جذب بستگی دارد. تنظیم مطلوب بین باندهای هدایت در لایه‌ی درونی CIGS/CdS با اختلاف انرژی بزرگ‌تر از صفر در نظر گرفته می‌شود که هم‌ترازی (تنظیم) باند نامیده می‌شوند. یکی از اهداف اصلی پژوهش‌های امروزی درباره‌ی فتوولتاییک‌ها و توسعه‌ی آنها،

ساخت سلول‌های نازک‌تر با استفاده از مواد نیم‌رسانای کمتر به منظور کاهش زمان تولید و کاهش هزینه به دلیل افزایش قیمت ایندیم و هزینه‌های عناصر مرکب است. ضخامت یک سلول خورشیدی پارامتر بسیار مهمی است و انتخاب ضخامت بهینه، اغلب تابعی از عوامل متضاد متعدد است. اگر بتوان ضخامت استاندارد لایه‌ی جاذب CIGS در سلول‌های خورشیدی فیلم نازک CIGS را به مقدار بسیار جزئی کاهش داد، عملکرد سلول‌های فتوولتاییک مؤثرتر است و به افزایش بازده منجر می‌شود. ساخت لایه‌ی جاذب نازک‌تر، به علت کوچک‌تر شدن دانه‌ها و بزرگ‌تر شدن مرزدانه‌ها، با تلفات بازترکیب همراه شده است. همچنین با احتمال زیاد بازترکیب اتصال پشتی به علت تولید حامل نزدیک به اتصال پشتی و افزایش بازترکیب تونلی نزدیک به واسط، همراه شده است. تلاش‌های اخیر، بر ساخت فیلم‌های بسیار نازک‌تر، بدون افت کارایی و کاهش بهره‌وری سلول، متمرکز شده‌اند. ساختار و تصویر گرافیکی سلول خورشیدی CIGS مطابق شکل ۳ به طور معمول روی لایه‌های مختلف فلز و نیم‌رسانا و بستری مناسب از لایه‌های زیر تشکیل شده است.



شکل ۳. ساختار گرافیکی CIGS

لایه‌ی ۱) آلومینیوم ناخالص شده با زینک اکسید (ZnO:Al) که کار آن، هدایت فوتون دریافت شده است. لایه‌ی ۲) لایه‌ی زینک اکسید (ZnO:i) که به عنوان لایه‌ی TCO استفاده می‌شود. لایه‌ی TCO باید دارای گاف انرژی بزرگ، برای اطمینان از جذب حداکثر نور خورشید باشد. این لایه باید شفاف نیز باشد تا حداکثر فوتون‌ها را جذب کند.

لایه‌ی ۳) لایه‌ی n_cds (سولفید کادمیوم)، که نیم‌رسانایی از نوع n است و به‌عنوان لایه‌ی بافر بین لایه‌های TCO و CIGS عمل می‌کند. این لایه سبب عملکرد بهتر سلول خورشیدی می‌شود. لایه‌ی ۴) لایه‌ی جاذب CIGS که لایه‌ی اصلی و فعال سلول خورشیدی و نوعی نیم‌رسانای چندبلوری از نوع p است. این لایه دارای گاف انرژی مستقیم است و با لایه‌ی بافر، یک پیوند $p-n$ را تشکیل می‌دهد. لایه‌ی ۵) لایه‌ی مولیبدن (Mo) که فلز دیرگداز است و به‌عنوان اتصال عقب استفاده می‌شود و نقش جمع کردن حامل‌ها از لایه‌ی جذب و ارائه‌ی آن به یک بار خارجی را دارد؛ بنابراین باید دارای مقاومت کم باشد. لایه‌ی ۶) زیرلایه‌ی سلول خورشیدی، که از جنس نوعی شیشه (soda) یا پلاستیک است. این ماده، مقاومت زیادی در برابر خوردگی دارد و قیمت آن مناسب است.

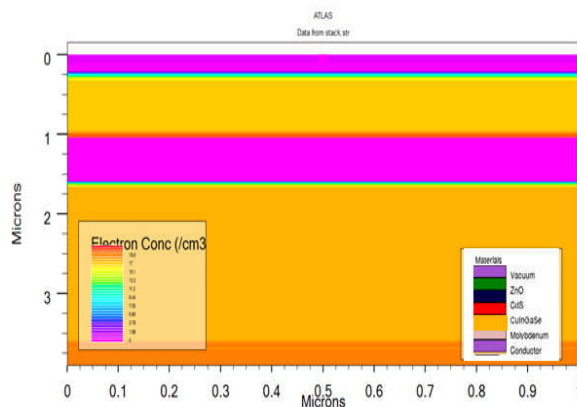
این مقاله با در نظر گرفتن دو نوع از مهم‌ترین بازترکیب‌های ممکن شامل بازترکیب اوژه و بازترکیب شاکلی = رید = حال بررسی شده است. بدین منظور با محاسبه‌ی نرخ تولید و بازترکیب خالص ساختار سلول خورشیدی با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته، مقدار بهینه‌ی ضخامت محاسبه شده و نشان داده شده که با بهینه‌سازی ضخامت، کارایی سلول افزایش و هزینه‌ی تولید کاهش می‌یابد.

۳. شبیه‌سازی یک نمونه سلول خورشیدی CIGS

تحقیقاتی در سال‌های اخیر (Coutts, 1999, 77-184; Gjessing et al., 2010; Wang et al., 2012; Feldman et al., 2014) درباره‌ی ساختار سلول خورشیدی فیلم نازک CIGS برای رسیدن به بازده زیاد انجام گرفته است. مدل و شبیه‌سازی‌ها براساس داده‌های واقعی از سلول‌های CIGS تجربی گزارش شده، در نظر گرفته شده است. پارامترهایی که در این تحقیق برای شبیه‌سازی یک سلول خورشیدی CIGS استفاده شده‌اند، عبارت‌اند از: گذردهی نسبی ϵ_r ، الکترون‌گاتیوی χ_e ، تحرک‌پذیری باند الکترون μ_n ، تحرک‌پذیری باند حفره μ_p ، غلظت پذیرنده N_A ، غلظت اهداکننده N_D ، چگالی مؤثر حالت در باند هدایت N_C ، چگالی مؤثر حالت در باند ظرفیت N_V ، گاف انرژی‌ها E_g ، ضخامت لایه‌های ZnO و CdS. لایه‌های این ساختار ZnO/CdS/CIGS/Mo هستند. میدان الکتریکی سلول در شکل ۴ و پارامترهای مورد نیاز این برنامه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. پارامترهای مهم شبیه‌سازی سلول CIGS

•/۵	ZnO	CdS	CIGS
ϵ_r	۹	۱۰	۱۳/۶
$\chi^{(eV)}$	۴	۳/۷۵	۳/۸۹
μ_n (cm ² /Vs)	۵۰	۱۰	۳۰۰
μ_p (cm ² /Vs)	۵	۱	۳۰
NA (1/cm ³)	۰	۰	8×10^{-17}
ND (1/cm ³)	5×10^{-17}	5×10^{-17}	5×10^{-17}
NC (1/cm ³)	$2/2 \times 10^{-18}$	$2/2 \times 10^{-18}$	$2/2 \times 10^{-18}$
NV (1/cm ³)	$1/8 \times 10^{-19}$	$1/8 \times 10^{-19}$	$1/8 \times 10^{-19}$
Eg (eV)	۳/۳	۲/۴	۱/۲
Thickness (nm)	۵۵	۵۰	۲۰۰۰

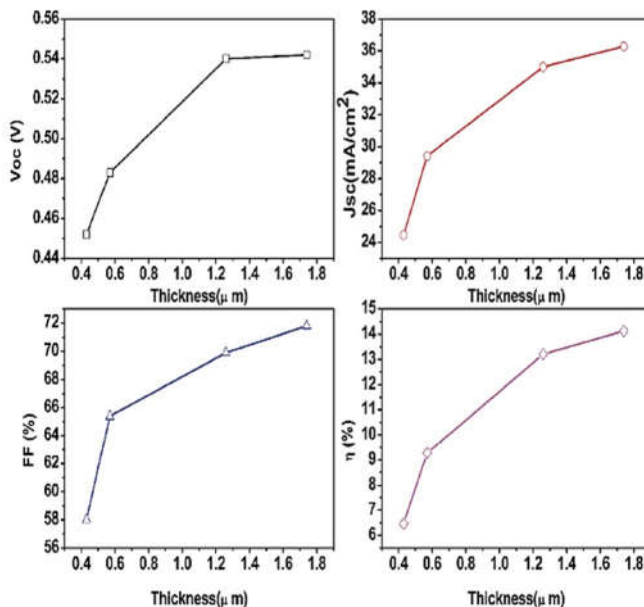


شکل ۴. ساختار گرافیکی سلول خورشیدی CIGS

۴. تغییر ضخامت لایه‌ی جاذب CIGS

در این بخش تغییر ضخامت لایه‌ی جاذب CIGS که لایه‌ی اصلی و فعال در سلول خورشیدی است، با توجه به تحقیقات اشاره شده و بازه‌ی تغییرات ضخامت لایه‌ی جاذب CIGS از ۰/۴ تا ۱/۸ میکرومتر بررسی و شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل ۵ به ترتیب، نتایج خروجی سلول و نمودار تغییرات جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز، فاکتور پرکنندگی و بازده برحسب تغییرات ضخامت نشان داده شده است، همه‌ی پارامترها با افزایش ضخامت لایه‌ی جاذب CIGS افزایش می‌یابند؛ زیرا با افزایش ضخامت لایه‌ی

جاذب، فوتون‌های بیشتری جذب این لایه می‌شوند و به تولید الکترون - حفره کمک می‌کنند. نکته‌ی دیگر این است که برای مقادیر کمتر از ۱ میکرومتر، همه‌ی پارامترها با شدت بیشتری تضعیف می‌شوند.



شکل ۵. نمودار تغییرات جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز، فاکتور پرکنندگی و بازده بر حسب تغییرات ضخامت

درجه‌ی توزیع عناصر در لایه‌ی CIGS یک میدان الکتریکی اضافی در لایه‌ی جاذب تولید می‌کند. مسلم است نسبت مولی گالیوم در لایه‌ی جاذب دارای تأثیر مهمی در عملکرد سلول CIGS است. در ادامه به بررسی توزیع یکنواخت گالیوم در لایه‌ی جاذب و مقایسه با داده‌های واقعی از سلول CIGS پرداخته شده است.

جدول ۲ پارامترهای یک سلول CIGS تجربی ساخته شده در (Shockley & Queisser, 1961) در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. این تفاوت‌ها به علت مقادیر مختلف پارامترهای پایه‌ای، ضخامت جذب‌کننده و نواحی مختلف قطعه است. علت تفاوت در جریان اتصال کوتاه این است که این نرم‌افزار از تمام سطح لایه‌ی بالایی به عنوان یک اتصال استفاده می‌کند، اما در حالت واقعی به صورت شبکه‌ای اتصالات سلول بالایی را با لایه‌های بعدی مرتبط می‌کند.

جدول ۲. مشخصات و پارامترهای سلول CIGS

ضخامت لایه جذب کننده $2\mu\text{m}=\text{CIGS}$					
۱	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰	Ga/(Ga+In)
۰/۹۹۴	۰/۸۲۵	۰/۷۳۰	۰/۶۹۷	۰/۵۶۸	ولتاژ مدار باز (V)
۲۰/۸	۲۷/۳	۳۱/۳	۳۵/۶	۳۶/۲	جریان اتصال کوتاه (mA/cm ²)
۵۰/۸	۶۸/۱	۷۵/۱	۸۰/۷	۷۶/۵	ضریب پرکنندگی
۱۰/۱۵	۱۵/۳۵	۱۷/۱۵	۲۰/۰۵	۱۵/۷	بازده تبدیل (%)

۵. تغییر نسبت مولی گالیوم لایه‌ی جاذب CIGS

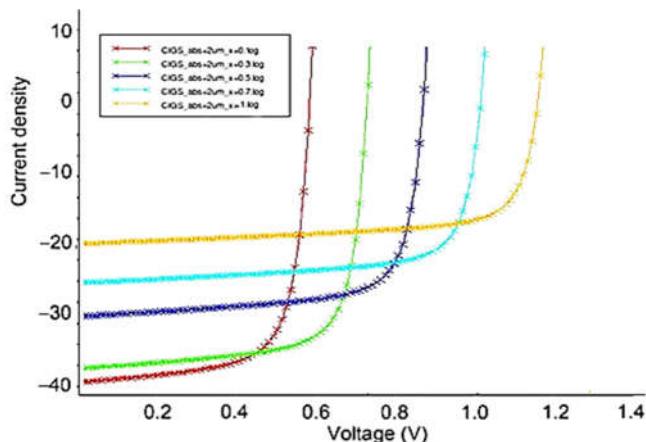
دستیابی به رفتار فتوولتاییک و رسیدن به بازدهی بهینه در سلول‌های CIGS به رعایت نسبت‌های مشخص بین این عناصر وابسته است. بدیهی است ضخامت لایه‌ها بر نسبت‌های مورد نظر تأثیر زیادی دارد. در تحقیقات مختلف، رابطه‌ی حاکم بر گاف انرژی به غلظت گالیوم به صورت تجربی معرفی شده است. با توجه به اهمیت حضور گالیوم در ساختار، X طبق رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود.

$$\frac{\text{Ga}}{\text{Ga} + \text{In}} = x \quad (۱)$$

همچنین ارتباط تجربی گاف نواری برحسب پارامتر X مطابق با رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود.

$$E_g (\text{eV}) = 1.011 + 0.664x + 0.249x(1 - x) \quad (۲)$$

با توجه به تغییرات X از صفر (نبود گالیوم) تا یک (نبود ایندیم)، محدوده‌ی گاف نواری از ۱/۰۲ تا ۱/۷ تغییر می‌کند. رابطه‌ی ۲ نیز نشان می‌دهد که با توجه به افزایش حضور گالیوم در ساختار سبب افزایش گاف نواری می‌شود. حداکثر بازده سلول خورشیدی فتوولتاییک CIGS تجربی به دست آمده تا امروز، مربوط به زمانی است که نسبت مولی گالیوم حدود ۰/۳ در باند انرژی حدود ۱/۱ الکترون ولت است. شبیه‌سازی نتایج تجربی اندازه‌گیری شده در مقالات، این مسئله را تأیید می‌کند (Feldman et al., 2014; Shockley & Queisser, 1961) و نشان می‌دهد که نسبت $\text{Ga}/\text{Ga}+\text{In}$ برابر ۰/۳ بیشترین بازده را تولید می‌کند. شکل ۶ نمودار مشخصه‌های ولتاژ - جریان سلول CIGS در مقادیر مختلف گالیوم در لایه‌ی جاذب را نشان می‌دهد.



شکل ۶. منحنی مشخصه‌های ولتاژ - جریان سلول CIGS با لایه‌ی جذب کننده ۲ میکرومتر به ازای مقادیر مختلف نسبت مولی گالیوم

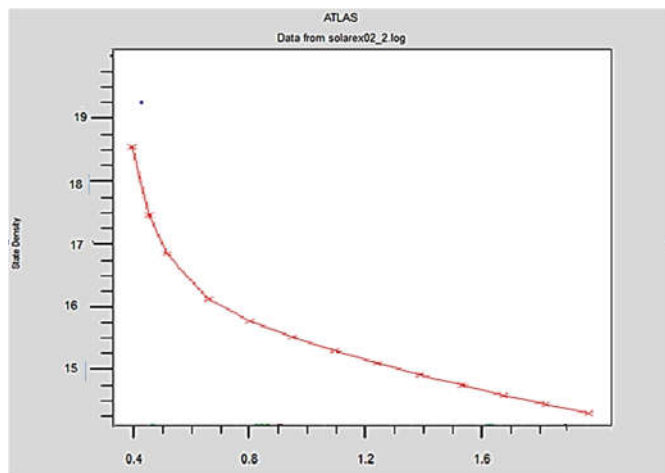
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت گالیوم، شکاف باند لایه‌ی جذب افزایش می‌یابد، ترم بازترکیب کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه ولتاژ مدار باز سلول رو به بهبود می‌رود. اما به دلیل کاهش ثابت‌های جذب نوری در سلول و جذب نشدن نور در طول موج‌های بلند طیف، جریان اتصال کوتاه رو به کاهش است. در غلظت‌های زیاد گالیوم، افزایش چگالی تله‌ها سبب می‌شود جریان اتصال کوتاه به شدت افت کند، به طوری که اثر کاهش جریان بر افزایش ولتاژ غالب می‌شود و بازده شروع به کاهش می‌کند. نتیجه‌ی شبیه‌سازی نشان می‌دهد بیشترین بازده سلول به‌ازای نسبت مولی گالیوم حدود ۰/۳ در باند انرژی حدود ۱/۱ الکترون ولت است. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات و پارامترهای سلول CIGS با لایه‌ی جذب کننده‌ی ۲ میکرومتر با مقادیر مختلف نسبت مولی گالیوم

ضخامت لایه جذب کننده CIGS=2μm					
			۰/۳	۰	Ga/(Ga+In)
۰/۹۹۴	۰/۸۳۵	۰/۷۳۰	۰/۶۹۷	۰/۵۶۸	ولتاژ مدار باز (V)
۲۰/۸	۲۷/۳	۳۱/۳	۳۵/۶	۳۶/۲	جریان اتصال کوتاه (mA/cm ²)
۵۰/۸	۶۸/۱	۷۵/۱	۸۰/۷	۷۶/۵	ضریب پرنندگی
۱۰/۱۵	۱۵/۳۵	۱۷/۱۵	۲۰/۰۵	۱۵/۷	بازده تبدیل (%)

۶. تغییر ضخامت لایه ZnO

در این قسمت ساختار سلول با تغییر ضخامت لایه‌ی شفاف ZnO بررسی می‌شود. تأثیر این تغییر ضخامت بر عملکرد کلی سلول ارزیابی شده و با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی بازده بهینه تعیین گردیده است. با توجه به اینکه در نتایج تجربی که در مرجع (Kokate et al., 2018) اشاره شده است، ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی ZnO از ۰/۴ میکرومتر تا ۱/۸ میکرومتر است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، کاهش ضخامت لایه‌ی شفاف در افزایش بازده سلول مؤثر خواهد بود؛ زیرا با کاهش ضخامت لایه‌ی شفاف، نور کمتری منعکس می‌شود و فوتون‌های بیشتری به لایه‌ی جاذب GIGS می‌رسد.

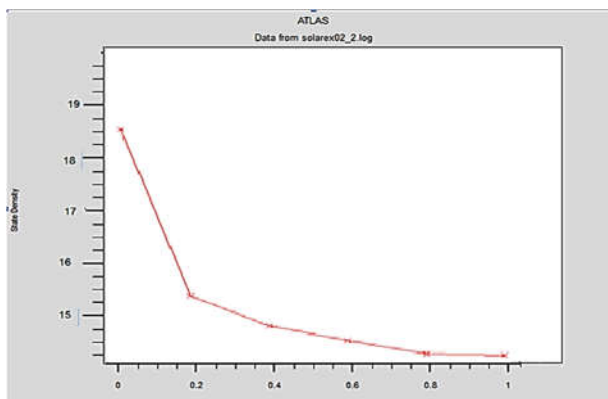


شکل ۷. نمودار تغییرات بازده با تغییر ضخامت لایه‌ی شفاف ZnO

۷. تغییر ضخامت لایه CdS

با قرار دادن لایه‌ی نازک CdS نوع n بر لایه‌ی جاذب نوع pCIGS به‌عنوان لایه‌ی بافر بین لایه‌های TCO و لایه‌ی جاذب CIGS یک پیوند p-n تشکیل می‌شود، زیرا با اتصال سه لایه به یکدیگر، به‌علت اختلاف در غلظت الکترون و حفره‌ی لایه‌ها، الکترون‌ها از لایه‌های پنجره و بافر نوع n به لایه‌ی جاذب نوع P انتشار می‌یابند. در نتیجه بخشی از لایه‌های پنجره و بافر، دارای بار مثبت می‌شوند، در حالی که بخشی از لایه‌ی جاذب SGIC دارای بار منفی است. بدین ترتیب یک ناحیه‌ی تخلیه و یک پتانسیل داخلی در پیوند ایجاد می‌شود. وقتی نور از سمت لایه‌ی پنجره به سطح سلول تابانده شود، پیش از رسیدن به لایه‌ی جاذب، باید از لایه‌های پنجره و بافر عبور کند. فوتون‌هایی با انرژی کمتر از ۳/۳ الکترون‌ولت از لایه‌ی

ZnO عبور خواهند کرد. بعضی از فوتون‌های با انرژی بیشتر از $2/4$ الکترون ولت و کمتر از $3/3$ الکترون ولت در لایه‌ی CdS جذب خواهند شد. در این میان، درصد زیادی از فوتون‌ها به لایه‌ی جاذب می‌رسند. فوتون‌هایی که انرژی بیشتری دارند جذب لایه‌ی جاذب شده و سبب برانگیختگی الکترون‌ها از باند ظرفیت به باند هدایت می‌شوند و بدین ترتیب حفره‌هایی در باند ظرفیت ایجاد خواهد شد. الکترون‌های تولید شده به طرف ناحیه‌ی تخلیه انتشار می‌یابند و سرانجام در اثر پتانسیل داخلی پیوند به سمت لایه‌های بافر و پنجره رانده می‌شوند و بدین ترتیب در تولید جریان الکتریکی بیرونی مشارکت می‌کنند. در نتایج تجربی (Feng et al., 2014) ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی CdS از $0/03$ میکرومتر تا $0/7$ میکرومتر ذکر شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، کاهش ضخامت لایه‌ی CdS سبب افزایش بازده سلول در مقایسه با حالت اولیه می‌شود.



شکل ۸. نمودار تغییرات بازده با تغییر ضخامت لایه‌ی شفاف CdS

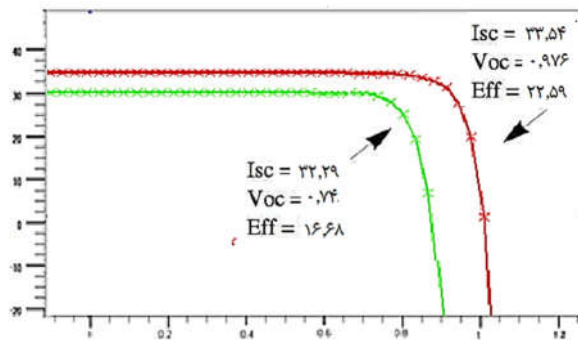
۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عملکرد و عوامل مؤثر بر پارامترهای خروجی سلول خورشیدی فیلم نازک CIGS با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز SILVACO که قابلیت زیادی در شبیه‌سازی ادوات نیمه‌هادی دارد، پرداخته شد. پس از بررسی شرایط گوناگون از جمله تغییرات ضخامت لایه‌ها، جاذب CIGS، لایه‌ی شفاف ZnO، لایه‌ی CdS و بررسی حالت بهینه‌ی مقدار غلظت گالیوم عملکرد سلول تحلیل شده و مطابق با نتایج شبیه‌سازی یک حالت بهینه معرفی می‌شود. در حالت بهینه، نسبت $Ga/Ga+In$ برابر $0/3$ ، ضخامت لایه‌ی جاذب CIGS 2 میکرومتر، ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی ZnO $0/4$ میکرومتر، و ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی CdS $0/03$ میکرومتر

در نظر گرفته شده است. برای این سلول، چگالی جریان اتصال کوتاه برابر با ۳۳/۵۵ میلی آمپر و ولتاژ مدار باز ۰/۹۷۶ ولت به دست آمده است. بازده و فاکتور پرکنندگی این سلول به ترتیب ۲۲/۵۸ و ۷۹/۷۷ درصد است. با توجه به نتایج جدول ۴ و شکل ۹ - نشان دهنده‌ی نمودار جریان - ولتاژ سلول است - بازده نهایی در مقایسه با مدل اولیه‌ی سلول در حدود ۵/۹ درصد افزایش پیدا می کند.

جدول ۴. مقایسه‌ی پارامترهای اولیه و بهبود یافته

ضریب پرکنندگی (%)	بازده تبدیل (%)	ولتاژ مدار باز (V)	جریان اتصال کوتاه (mA/cm ²)	
۷۹/۹۱	۱۶/۶۷	-۰/۷۴	۳۲/۲۹	مدل اولیه CIGS
۷۹/۷۷	۲۲/۵۸	-۰/۹۸	۳۳/۵۴	مدل بهبود یافته CIGS



شکل ۹. نمودار جریان - ولتاژ سلول CIGS اولیه و بهبود یافته

منابع

1. Çaldıran, Z.; Biber, M.; Metin, O. & Aydoğın, Ş. (2017), "Improving the performance of the organic solar cell and improving the performance of the organic solar cell and the inorganic heterojunction devices using monodisperse Fe₃O₄ nanoparticles", *Optik, International journal for light and electron optics* 142.
2. Coutts, T. J. (1999), "A review of progress in thermo photovoltaic generation of electricity", *Renewable and sustainable energy reviews* 3.2-3, pp. 77-184.
3. Feldman, F.; Simon, M.; Bivour, M.; Reichel, C.; Hermle, M. & Glunz, S.W. (2014), "Efficient carrier-selective p-and n-contacts for Si solar cells", *Solar energy materials and solar cells* 131, pp. 100-104.
4. Feng, S.W.; Lai, C.M.; Tsai, C.Y. & Tu, L.W. (2014), "Numerical simulations of the current-matching effect and operation mechanisms on the performance of InGaN/Si tandem cells", *Nanoscale Res Lett.*, 9(1):652.
5. Gjessing, J.; Marstein, E.S. & Sudbø, A. (2010), "2D back-side diffraction grating for improved light trapping in thin silicon solar cells", *Opt express*, 18 (6):5481-5495.
6. Green, M.A. (2003), "General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modeling," *In progress in photovoltaics: Research and applications*, pp. 333-340.
7. Karki, P.; Adhikary, B. & Sherpa, K.N. (2012), "Comparative study of grid-tied photovoltaic (PV) system in Kathmandu and Berlin using PV system, in sustainable energy technologies (ICSET), IEEE third international conference on.
8. Kokate, S.K.; Jagtap, C.; Baviskar, P.K. & Mohite, K. (2018), "CdS sensitized cadmium doped ZnO solar cell: Fabrication and characterizations", *Optik international journal for light and electron optics* 157, pp. 628-634.
9. Shockley, W. & Queisser, H.J. (1961), "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells", *Journal of applied physics* 32, pp. 510-519.
10. Wang, K.X.; Yu, Z.; Liu, V.; Cui, Y. & Fan, S. (2012), "Absorption enhancement in ultrathin crystalline silicon solar cells with antireflection and light-trapping nanocone gratings", *Nano letters* 12.3, pp. 1616-1619.