

Simulation and investigation of environmentally friendly CIGS solar cell

Fatemeh Vahidian, Saeid Baghshahi*

Department of Materials Engineering, School of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Received: 10.10.2023 Final revised: 16.12.2023 Accepted: 29.01.2024

Doi: [10.22055/jrmb.2024.18900](https://doi.org/10.22055/jrmb.2024.18900)

In this study, a CIGS solar cell with a Mo/Cu(In_{0.7}Ga_{0.3})Se₂(CIGS)/CdS/ZnO/Al-doped ZnO (AZO) structure was simulated by Atlas silvaco-TCAD software. The photovoltaic characteristics of solar cells using CdS and ZnSe buffer layers were calculated and compared. Then, the photovoltaic characteristics were examined with different thicknesses of the ZnSe buffer layer. The 25 nm thickness was selected as the optimum thickness. After optimization of the ZnSe layer thickness, the photovoltaic characteristics of solar cells were evaluated by changing the conduction band offset (CBO). The highest CIGS solar cell conversion efficiency was obtained in the range from -0.5 eV to +0.5 eV for CBO. Finally, graphene was replaced with Al-doped ZnO (AZO) due to its high optical transparency, high carrier mobility, and proper mechanical properties. Graphene was used as a monolayer and multilayer as a transparent conductive oxide (TCO) layer. Simulations predicted the highest efficiency for solar cell structure based on Mo/CIGS/ZnSe/i-ZnO/monolayer graphene and the photovoltaic parameters were $J_{sc}=38.64$ mA/cm², $V_{oc}=0.67$ V, FF=79.33% and $\eta=20.71\%$.

Keywords: Silvaco, Thin-film Solar Cell, CIGS, Buffer Layer, ZnSe, Graphene

*Corresponding Author: baghshahi@eng.ikiu.ac.ir

شبیه‌سازی و بررسی سلول خورشیدی CIGS سازگار با محیط زیست

فاطمه وحیدیان، سعید باغشاهی*

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۸ ویرایش نهایی: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۹

Doi: [10.22055/jrmbms.2024.18900](https://doi.org/10.22055/jrmbms.2024.18900)

چکیده

در این مطالعه، سلول خورشیدی CIGS با ساختار Mo/CuIn_{0.7}Ga_{0.3}Se₂(CIGS) /CdS/ZnO/Al-Doped ZnO توسط نرم افزار Atlas silvaco-TCAD شبیه‌سازی شد. ویژگی‌های فتولتائیک سلول خورشیدی با استفاده از لایه‌های بافر ZnSe و CdS محاسبه و مقایسه شد. سپس ویژگی‌های فتولتائیک با ضخامت‌های مختلف لایه بافر ZnSe مورد بررسی قرار گرفت. ضخامت ۲۵ نانومتر به‌عنوان ضخامت بهینه انتخاب شد. پس از بهینه‌سازی ضخامت لایه ZnSe، ویژگی‌های فتولتائیک سلول خورشیدی با تغییر اختلاف نوار هدایت (CBO) مورد ارزیابی قرار گرفت. بالاترین راندمان تبدیل سلول خورشیدی CIGS در محدوده از -۰.۵eV تا +۰.۵eV برای CBO به‌دست آمد. در نهایت، به دلیل شفافیت نوری بالا، تحرک حامل بالا و خواص مکانیکی مناسب، گرافن با Al-doped ZnO (AZO) جایگزین شد. گرافن به‌صورت تک لایه و چند لایه به‌عنوان لایه اکسید رسانای شفاف (TCO) استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها بیشترین بازده را برای ساختار سلول خورشیدی بر اساس Mo/CIGS/ZnSe/i-ZnO/ single layer graphene و پارامترهای فتولتائیک $J_{sc}=38.64 \text{ mA/cm}^2$ ، $V_{oc}=0.67 \text{ V}$ ، $\eta=20.71\%$ و $FF=79.33\%$ درصد پیش بینی کردند.

کلیدواژگان: سیلوکو، سلول خورشیدی لایه نازک، CIGS، لایه بافر، ZnSe، گرافن

مقدمه

که با کاهش مقدار جاذب مورد نیاز در سلول خورشیدی می‌توان آن را در سطح وسیعی رسوب داد [۲].

CuIn_{0.7}Ga_{0.3}Se₂ یک جاذب در سلول‌های خورشیدی لایه نازک با پایداری بالا، راندمان تبدیل بالا، تولید اقتصادی و ضریب جذب بالا $\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ است [۳-۹].

راندمان تبدیل سلول خورشیدی CIGS تابعی از لایه بافر است و انطباق شبکه‌ای خوبی را بین لایه جاذب و لایه پنجره ایجاد می‌کند. CdS، ZnS، In₂Se₃، ZnSe معمولاً به‌عنوان لایه‌های بافر در سلول‌های خورشیدی CIGS استفاده می‌شوند [۱۰، ۱۱]. همچنین، نوع

با توجه به آلودگی‌های زیست محیطی، رشد مصرف انرژی و کمبود انرژی در دسترس، نیاز به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ضروری به‌نظر می‌رسد که یکی از مهمترین آنها انرژی خورشیدی است، به‌طوری که خورشید منبع عظیم و رایگان انرژی است و با استفاده از فناوری فتولتائیک می‌توان انرژی خورشیدی را به‌الکتریسته تبدیل کرد [۱].

در دهه‌های اخیر، به دلیل هزینه بالای تولید سلول‌های خورشیدی سیلیکونی مرسوم، تکنولوژی لایه نازک مورد توجه قرار گرفته است. همچنین این مزیت را دارد

* نویسنده مسئول: baghshahi@eng.ikiu.ac.ir

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

این مقاله تحت مجوز کپی‌رایت کامنز تخصصی ۴.۰ بین‌المللی می‌باشد.

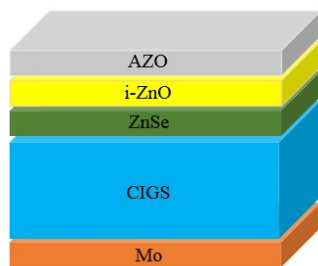


نتیجه پس از چندین روز قرار گرفتن در معرض هوا، راندمان تبدیل سلول خورشیدی کاهش زیادی را نشان خواهد داد [۳۰]. گرافن می‌تواند جایگزین خوبی برای AZO در سلول‌های خورشیدی باشد [۲۸]. دارای خاصیت انعطاف‌پذیری بالا، موپلیته حامل بالا، رسانایی و شفافیت بالا است و خواص انرژی شکاف نواری قابل تنظیم در سلول‌های خورشیدی به‌عنوان لایه شفاف رسانا مورد توجه است [۳۱-۳۳].

در این مقاله، سلول خورشیدی CIGS با استفاده از لایه بافر ZnSe و CdS به‌طور جداگانه شبیه‌سازی و نتایج با هم مقایسه شدند. سپس، ویژگی‌های فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی CIGS با تغییر ضخامت لایه بافر ZnSe و تغییرات ΔE_c (با استفاده از مقادیر مختلف الکترون‌خواهی) مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت گرافن با تعداد لایه‌های مختلف جایگزین لایه AZO به‌عنوان لایه رسانای شفاف شد و J_{sc} ، V_{oc} ، FF و η محاسبه شدند.

ساختار و پارامترهای مواد سلول خورشیدی

در این مطالعه سلول‌های خورشیدی CIGS با نرم افزار Silvaco-TCAD شبیه‌سازی شدند. ساختار دقیق Mo/CIGS/CdS/ZnO/AZO بود، و پیکربندی سلول خورشیدی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک ساختار سلول خورشیدی CIGS شبیه‌سازی شده در این مطالعه.

n با جاذب نوع p، اتصال p-n را در سلول خورشیدی ایجاد می‌کند [۱۲].

از آنجایی که CdS یک فلز سنگین سمی است که برای محیط زیست مضر است، مطالعات زیادی بر روی لایه‌های بافر بدون CdS انجام شده است [۱۷-۱۳]. ZnSe یک ماده غیر سمی است که به‌دلیل انطباق شبکه با لایه جاذب می‌تواند جایگزین مناسبی برای CdS باشد [۱۸-۲۰]. همچنین دارای انرژی شکاف نواری بیشتر از CdS و در حدود ۲٫۹eV است و فوتون‌های با انرژی بالاتر می‌توانند از آن عبور کنند [۲۱-۲۳]. در تحقیقات زیادی به جایگزینی لایه بافر CdS استفاده از مواد غیر سمی پرداخته شده است. نتایج نوع لایه بافر و بازدهی‌های به‌دست آمده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. نتایج بازدهی سلول خورشیدی CIGS با لایه‌های بافر غیر سمی.

بازدهی (%)	لایه بافر
۲۲٫۴۸ [۲۴]	Zn(O,S)
۲۵٫۵ [۲۵]	ZrS _x Se _{2x}
۲۶ [۲۶]	ZnS
۱۷٫۵۶ [۲۳]	ZnSe
۲۱٫۹۷ [۲۷]	In ₂ S ₃

خواص الکتریکی و نوری منحصر به‌فرد، AZO را به یک الکتروُد شفاف مناسب برای سلول‌های خورشیدی CIGS تبدیل می‌کند. با این حال، به‌دلیل جذب بالا در ناحیه طیف مادون قرمز و محدود کردن جریان نور تولید شده، لازم است از لایه‌های شفاف‌تر بالاتر از حدود ۸۰۰ نانومتر استفاده شود [۲۸،۲۹]. از سوی دیگر، AZO در برابر رطوبت عملکرد ضعیفی دارد. در

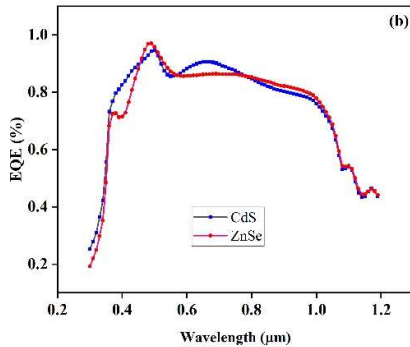
TCO با استفاده از ویژگی‌های فتولتائیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این ساختار تحت طیف خورشیدی AM1.5 با $P=1000 \text{ w/m}^2$ و در دمای $T=300 \text{ k}$ مورد مطالعه قرار گرفت.

در جدول ۲ پارامترهای نوری ZnO CdS, CIGS, AZO و ZnSe براساس [۳۴-۳۸] در شبیه‌سازی فهرست شده است. در حالی که پارامترهای جذب در پایگاه داده Sopra در نرم افزار Silvaco-Atlas موجود است.

عملکرد سلول خورشیدی بر اساس نوع لایه بافر، ضخامت لایه بافر، تغییرات CBO و در پایان اثر لایه

جدول ۲. پارامترهای مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی

Graphene	AZO	ZnO	ZnSe	CdS	CIGS	پارامترهای مواد
۴-۱ لایه	۰٫۱۵	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۲٫۳	ضخامت (μm)
۰ [۳۶]	۳٫۶ [۳۴]	۳٫۳ [۳۴]	۲٫۹ [۳۵]	۲٫۴ [۳۴]	۱٫۱۶ [۳۴]	شکاف نواری (eV)
۳٫۵ [۳۶]	۴٫۴	۴٫۴	۴٫۰۹ [۳۵]	۴٫۲۸ [۳۴]	۴٫۵ [۳۴]	الکترونیخواهی (eV)
۱۰ [۳۸]	۹ [۳۴]	۹ [۳۴]	۱۰	۱۰ [۳۴]	۱۳٫۶ [۳۴]	گذردهی الکتریک
2×10^{20} [۳۶]	$2,2 \times 10^{18}$ [۳۴]	$2,2 \times 10^{18}$ [۳۴]	$1,5 \times 10^{18}$ [۳۵]	$2,2 \times 10^{18}$ [۳۴]	$2,2 \times 10^{18}$ [۳۴]	چگالی حالت در CB (cm^{-3})
$1,8 \times 10^{20}$ [۳۶]	$1,8 \times 10^{19}$ [۳۴]	$1,8 \times 10^{19}$ [۳۴]	$1,8 \times 10^{18}$ [۳۵]	$1,8 \times 10^{19}$ [۳۴]	$1,8 \times 10^{19}$ [۳۴]	چگالی حالت در VB (cm^{-3})
1×10^4 [۳۶]	۱۰۰ [۳۴]	۱۰۰ [۳۴]	۵۰ [۳۵]	۱۰۰ [۳۴]	۱۰۰ [۳۴]	موبیلیته الکترون $\mu_e(\text{cm}^2/\text{vs})$
۱۰ [۳۶]	۲۵ [۳۴]	۲۵ [۳۴]	۲۰ [۳۵]	۲۵ [۳۴]	۲۵ [۳۴]	موبیلیته حفره $\mu_h(\text{cm}^2/\text{vs})$
1×10^{20} [۳۸]	10^{20} [۳۴]	$6,77 \times 10^{18}$ [۳۴]	$5,5 \times 10^{18}$ [۳۵]	۰	$7,6 \times 10^{16}$ [۳۴]	چگالی دهنده‌ها (cm^{-3})
-	۰ [۳۴]	۰ [۳۴]	۰ [۳۵]	$7,12 \times 10^{17}$ [۳۴]	۰ [۳۴]	چگالی پذیرنده‌ها (cm^{-3})
1×10^7 [۳۸]	1×10^7 [۳۴]	1×10^7 [۳۴]	1×10^7 [۳۴]	1×10^7 [۳۴]	10^7 [۳۴]	سرعت حرارتی الکترون (cm/s)
1×10^7 [۳۸]	1×10^7 [۳۴]	1×10^7 [۳۴]	1×10^7 [۳۴]	1×10^7 [۳۴]	10^7 [۳۴]	سرعت حرارتی حفره (cm/s)
-	1^4-10 [۳۴]	1^5-10 [۳۴]	1^5-10 [۳۷]	1^5-10 [۳۴]	4×10^{-10} [۳۴]	مقطع عرضی گرفتن الکترون σ_e
-	$3 \times 1^3-10$ [۳۴]	1^4-10 [۳۴]	1^5-10 [۳۷]	1^2-10 [۳۴]	$4 \times 1^3-10$ [۳۴]	مقطع عرضی گرفتن حفره σ_h
-	3×10^{16} [۳۴]	10^{15} [۳۴]	10^{13} [۳۷]	3×10^{14} [۳۴]	$7,5 \times 10^{13}$ [۳۴]	چگالی عیوب N_t



شکل ۲. (a) منحنی‌های مشخصه J-V و (b) منحنی EQE سلول

خورشیدی CIGS با لایه بافر ZnSe و CdS

جدول ۳. مشخصه‌های فتولتائیک J-V سلول خورشیدی CIGS با لایه بافر ZnSe و CdS

η (%)	FF (%)	V_{oc} (v)	J_{sc} (mA/cm ²)	
۱۹٫۶۸	۷۸٫۸	۰٫۶۷	۳۷٫۱۱	لایه بافر CdS
۱۹٫۸۴	۷۸٫۷	۰٫۶۷	۳۷٫۴۰	لایه بافر ZnSe

η سلول خورشیدی CIGS با استفاده از لایه بافر CdS، ۱۹٫۶۸٪ و با استفاده از لایه بافر ZnSe به دست ۱۹٫۸۴٪ به دست آمد. J_{sc} سلول‌های خورشیدی CIGS با استفاده از لایه‌های بافر CdS و ZnSe به ترتیب ۳۷٫۱۱ mA/cm² و ۳۷٫۴۰ به دست آمد. همچنین، V_{oc} سلول خورشیدی CIGS با استفاده از لایه‌های بافر CdS و ZnSe برابر بود. این نشان می‌دهد که لایه بافر ZnSe می‌تواند جایگزین مناسبی برای لایه بافر CdS باشد.

شکل ۲b، بازدهی کوانتومی خارجی (EQE) سلول خورشیدی CIGS با لایه بافر ZnSe و CdS را در محدوده طول موج ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲b، سلول خورشیدی CIGS با بافر ZnSe در محدوده ۴۶۰-۵۸۰ nm، EQE بیشتری

پارامترهای خاصی که سلول خورشیدی را توصیف می‌کنند عبارتند از J_{sc} (چگالی جریان کوتاه)، V_{oc} (ولتاژ مدار باز)، FF (ضریب پرشدگی) و η (بازده تبدیل). معادله ۱ و ۲ رابطه بین J_{sc} ، V_{oc} و FF را بیان می‌کند [۲۹].

$$FF = \frac{P_m}{J_{sc} \times V_{oc}} \quad ۱$$

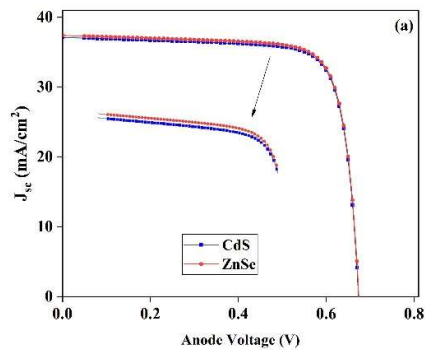
که در آن حداکثر توان P_m حاصل ضرب $J_m \times V_m$ حاصل از منحنی J-V است. η (بازده تبدیل) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۹]:

$$\eta = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_m} \quad ۲$$

نتایج و بحث

تأثیر نوع لایه بافر بر ویژگی‌های J-V

در این شبیه‌سازی از آنجایی که لایه ZnSe شکاف نواری بیشتری نسبت به CdS دارد و غیر سمی است، جایگزین CdS می‌شود. شکل ۲a منحنی‌های J-V برای سلول‌های خورشیدی CIGS با استفاده از لایه‌های بافر CdS و ZnSe را نشان می‌دهد. مشخصه‌های فتولتائیک سلول خورشیدی CIGS در جدول ۳ خلاصه شده است.



با افزایش ضخامت لایه بافر فوتون‌های بیشتری جذب شود و در نتیجه فوتون‌های کمتری به جاذب CIGS می‌رسد. همچنین با افزایش ضخامت لایه بافر، باز ترکیب افزایش می‌یابد که منجر به کاهش η می‌شود. افزایش جزئی FF، با توجه به رابطه ۱، به افزایش چند میلی ولتی V_{oc} نسبت داده می‌شود. از طرف دیگر، کاهش η به دلیل تأثیر ترکیبی J_{sc} ، V_{oc} و FF مطابق رابطه ۲ بر η است. بنابراین، با توجه به نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴ و جدول ۴، بیشترین بازدهی در ضخامت ۲۵ نانومتر به دست می‌آید، اما زمانی که ضخامت از ۵۰ نانومتر بیشتر شود، بازدهی به شدت کاهش می‌یابد. برای ضخامت ۲۵ نانومتر $V_{oc}=0.67V$ ، $J_{sc}=37.28 mA/cm^2$ ، $FF=79.7\%$ و $\eta=20.06\%$ به دست آمده است. شکل ۵ منحنی‌های مشخصه J-V سلول خورشیدی CIGS را با ضخامت‌های مختلف لایه بافر ZnSe نشان می‌دهد.

تأثیر CBO بر عملکرد سلول خورشیدی

CIGS

لازم به ذکر است که پارامتر CBO از اختلاف الکترون‌خواهی بین لایه بافر ZnSe و جاذب‌های CIGS به دست می‌آید [۴۰، ۴۱]. شکاف نوار ممنوعه لایه بافر ZnSe، $2.9 eV$ و ثابت در نظر گرفته شد و CBO با تغییر الکترون‌خواهی لایه ZnSe از 3.7 تا $5.1 eV$ ، با الکترون‌خواهی ثابت $4.5 eV$ CIGS مورد بررسی قرار گرفت (هدف بررسی تأثیر قله و پرتگاه روی پارامترهای فتوولتائیک است). تأثیر CBO بر پارامترهای فتوولتائیک سلول خورشیدی CIGS در شکل ۷ نشان داده شده است. CBO مثبت زمانی رخ می‌دهد که نوار هدایت (CB) لایه بافر ZnSe بالاتر از نوار هدایت (CB) جاذب CIGS باشد. همچنین، CBO منفی زمانی مشاهده می‌شود که نوار هدایت

نسبت به سلول خورشیدی CIGS با لایه بافر CdS دارد. ماکزیمم EQE سلول خورشیدی با لایه بافر ZnSe در طول موج $490 nm$ ، 97% و ماکزیمم EQE سلول خورشیدی CIGS در طول موج $510 nm$ ، 93% به دست آمد.

دیگرام نوار انرژی سلول خورشیدی CIGS با استفاده از لایه بافر ZnSe و CdS شبیه‌سازی شده و در شکل ۳a و شکل ۳b نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳b مشاهده می‌شود، E_c بالاتر لایه بافر نسبت به E_c جاذب CIGS باعث ایجاد قله انرژی در فصل مشترک CIGS/ZnSe می‌شود که مانعی برای جریان الکترون ایجاد می‌کند. بنابراین می‌تواند به عنوان سدی برای الکترون‌ها عمل کند. مقدار اختلاف باند هدایت بین لایه جاذب CIGS شامل لایه بافر ZnSe و CdS به ترتیب $+0.122 eV$ و $+0.085 eV$ بود.

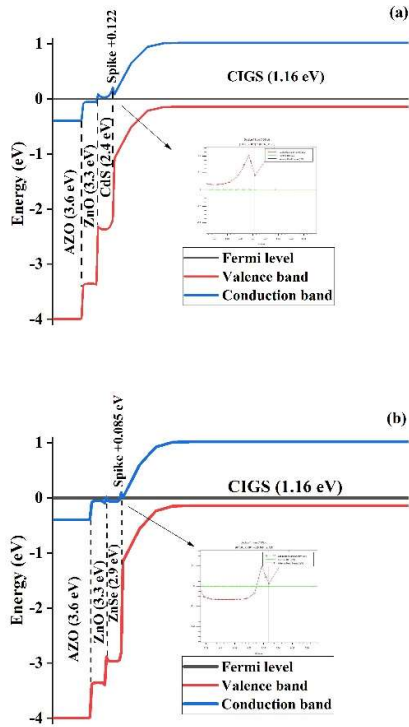
از آنجایی که CBO تشکیل شده در سدی بلندتر از ZnSe برای الکترون‌ها ایجاد می‌کند، الکترون‌های کمتری می‌توانند به تماس جلویی حرکت کنند. همچنین، وجود انرژی شکاف نواری بیشتر ZnSe از CdS، موجب می‌شود راندمان تبدیل سلول خورشیدی شامل لایه بافر ZnSe بیشتر از سلول خورشیدی شامل لایه بافر CdS شود.

تأثیر ضخامت لایه بافر بر عملکرد سلول

خورشیدی CIGS

تأثیر ضخامت لایه بافر ZnSe بر عملکرد سلول خورشیدی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شکل ۴ تأثیر ضخامت لایه بافر ZnSe را بر پارامترهای فتوولتائیک نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، با افزایش ضخامت، J_{sc} و η کاهش یافته و V_{oc} در حد چند میلی ولت افزایش یافته است. در واقع

جریان تاریکی یا اشباع (J_0) را کاهش خواهد داد. بنابراین، V_{oc} افزایش خواهد یافت.



شکل ۳. دیاگرام نوار انرژی سلول خورشیدی CIGS با (a) لایه بافر CdS و (b) لایه بافر ZnSe

(CB) لایه بافر ZnSe پایین‌تر از نوار هدایت (CB) جذاب CIGS باشد. با این حال، هنگامی که CBO مثبت است، یک قله در فصل مشترک CIGS/ZnSe ظاهر می‌شود، که مانعی برای جریان الکترون ایجاد می‌کند (شکل ۶a). مطابق شکل ۷a و ۷b، در محدوده CBO از -۰/۵ تا ۰/۵، V_{oc} تقریباً ثابت هستند. اما با افزایش مقدار CBO به مقادیر بیشتر از ۰/۵ eV، J_{sc} ناگهان از ۳۷/۲۷ به ۸/۵۱ mA/cm^2 کاهش می‌یابد که به سد بزرگتر در فصل مشترک CIGS/ZnSe و مسدود شدن الکترون‌های تولید شده توسط نور نسبت داده می‌شود. با این حال، V_{oc} افزایش می‌یابد.

در محدوده ۰/۵-۰ CBO، V_{oc} تقریباً ثابت است که در آن سد بزرگ موجب می‌شود بازترکیب بین حاملان اکثریت اتفاق نیفتد. افزایش V_{oc} با افزایش بیشتر CBO با روابط ۳-۶ [۴۲] توضیح داده شده است.

با استفاده از مدل Shockly-read-hall، سرعت بازترکیب سطحی با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود:

$$R = \frac{np - n_i^2}{S_p^{-1}(n + n_i^*) + S_n^{-1}(P + P^*)} \quad ۳$$

$$R = S_p P \quad ۴$$

$$J_0 \alpha \frac{qn_i W}{\tau_n} \quad ۵$$

$$V_{oc} = \frac{AKT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) \quad ۶$$

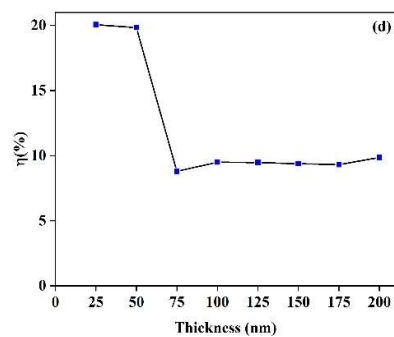
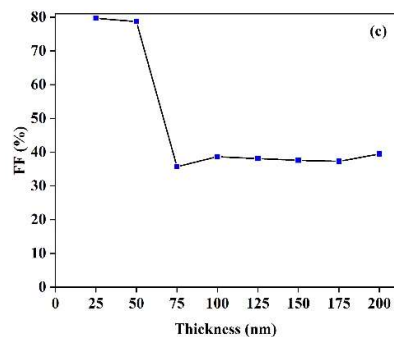
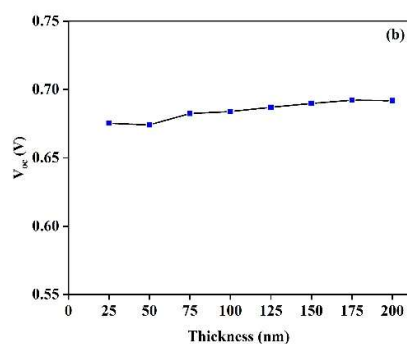
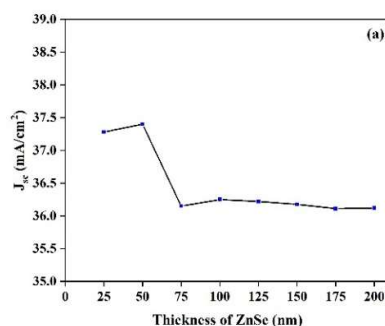
در معادله ۳، R سرعت بازترکیب سطحی، S_p سرعت بازترکیب سطحی برای حفرات، P غلظت غیرتعادلی حفرات، S_n سرعت بازترکیب سطحی برای الکترون‌ها، n غلظت غیرتعادلی الکترون‌ها است. معادله ۴، ساده شده معادله ۳ است [۴۲].

قابل ذکر است خمش نواری با افزایش CBO افزایش می‌یابد. بنابراین P، کاهش خواهد یافت و سرعت بازترکیب سطحی با افزایش CBO، کاهش می‌یابد. کاهش سرعت بازترکیب سطحی به معنی طول عمر بیشتر حامل برای الکترون‌ها و حفره‌ها است که دانسیته

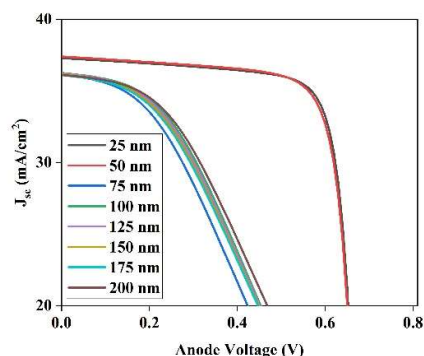
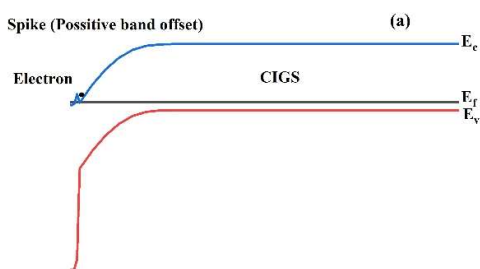
هنگامی که مقدار CBO منفی است، یک پرتگاه^۱ در فصل مشترک CIGS/ZnSe ایجاد می‌شود (شکل ۶b). پرتگاه از جریان الکترون‌های تولید شده توسط نور به سمت اتصال جلویی جلوگیری نمی‌کند و بازترکیب را در فصل مشترک CIGS/ZnSe افزایش می‌دهد. بنابراین، برای CBO در محدوده ۰ تا -۰/۵ J_{sc} و V_{oc} تقریباً ثابت هستند و در CBO کمتر از -۰/۶ به دلیل افزایش بازترکیب، J_{sc} و FF کاهش می‌یابد (شکل ۷a و شکل ۷c). با این حال، V_{oc} تقریباً ثابت است (شکل ۷b). در این حالت، η نیز کاهش یافت (شکل ۷d). بنابراین مقدار مجاز CBO باید در محدوده -۰/۵ تا -۰/۵eV باشد. بنابراین، نتیجه‌گیری می‌شود که CBO یک عامل حیاتی در افزایش جریان و η است.

جدول ۴. مشخصه‌های فتولتائیک سلول خورشیدی CIGS با ضخامت‌های مختلف لایه بافر ZnSe

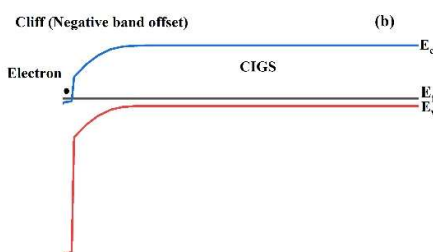
ضخامت (nm)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	η (%)
۲۵	۳۷,۲۸	۰,۶۷	۷۹,۷	۲۰,۰۶
۵۰	۳۷,۴	۰,۶۷۴	۷۸,۷	۱۹,۸۴
۷۵	۳۶,۱۵	۰,۶۸۲	۳۵,۷۲	۸,۸
۱۰۰	۳۶,۲۵	۰,۶۸۳	۲۸,۶۶	۹,۵
۱۲۵	۳۶,۲۲	۰,۶۸۷	۳۸,۱	۹,۴۷
۱۵۰	۳۶,۱۷	۰,۶۸۹	۳۷,۶۲	۹,۳۸
۱۷۵	۳۶,۱۱	۰,۶۹۲	۳۷,۲۷	۹,۳۱
۲۰۰	۳۶,۱۲	۰,۶۹۲	۳۹,۴۹	۹,۸۶



شکل ۴. تأثیر ضخامت لایه بافر ZnSe بر مشخصه‌های فتولتائیک سلول خورشیدی CIGS (a) J_{sc} , (b) V_{oc} , (c) FF و (d) η .



شکل ۵. منحنی‌های مشخصه J-V سلول خورشیدی CIGS با ضخامت‌های مختلف لایه بافر ZnSe



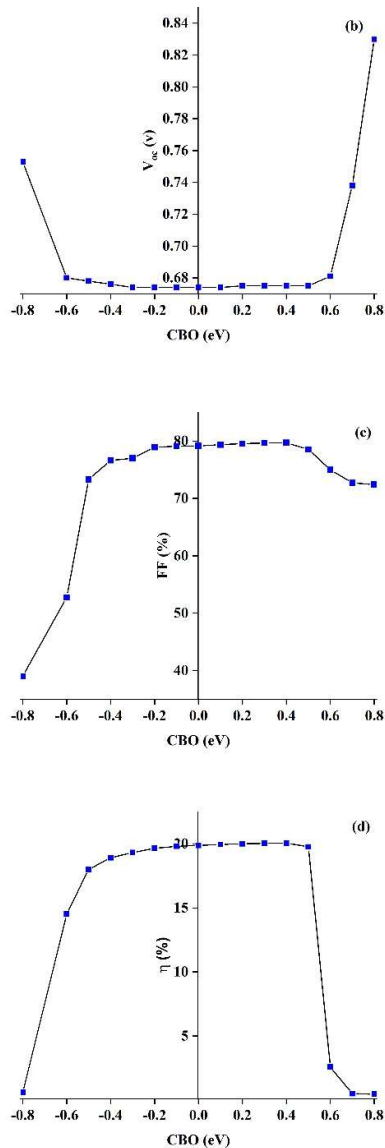
شکل ۶. دیگرام نوار انرژی سلول خورشیدی CIGS با مقادیر (a) منفی (eV) -0.4 و (b) مثبت (eV) 0.26 CBO فصل مشترک بافر/جاذب.

از آنجایی که $2/3$ درصد نور توسط هر لایه گرافن جذب می‌شود، جذب نور به‌همین نسبت در گرافن چند لایه افزایش می‌یابد ($2/3$ درصد برابر تعداد لایه‌ها). در نتیجه، با افزایش تعداد لایه‌های گرافن، J_{sc} کاهش یافت. همچنین با افزایش تعداد لایه‌های گرافن، بازده سلول خورشیدی کاهش می‌یابد. بنابراین، سلول خورشیدی CIGS با گرافن تک لایه بالاترین بازده را به‌دست آورد و پارامترهای فتوولتائیک $J_{sc}=38.64\%$ ، $V_{oc}=0.67V$ ، $FF=79.33\%$ و $\eta=20.71\%$ بودند.

همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود، η سلول خورشیدی CIGS با گرافن (20.71%) بیشتر از η سلول خورشیدی CIGS با AZO (20.06%) است. با وجود ضخامت بسیار کم گرافن تک لایه (0.335 nm)

تأثیر گرافن به‌عنوان لایه TCO

در ادامه، عملکرد سلول خورشیدی CIGS با استفاده از گرافن به‌عنوان لایه TCO مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ویژگی‌های فتوولتائیک سلول خورشیدی با استفاده از تعداد لایه‌های گرافن مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۹ منحنی‌های مشخصه J-V سلول‌های خورشیدی CIGS را با تعداد لایه‌های گرافن نشان می‌دهد. نتایج در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که J_{sc} و V_{oc} گرافن چند لایه در مقایسه با گرافن تک لایه کاهش یافت. هر چند، V_{oc} ثابت بود.



شکل ۷. تغییر پارامترهای فتوولتائیک با مقادیر مختلف CBO (a) J_{sc} ، (b) V_{oc} ، (c) FF و (d) η .

نسبت به AZO (150 nm) در ساختار سلول خورشیدی، انتظار می‌رفت راندمان افزایش بیشتری داشته باشد. این می‌تواند به دلیل تفاوت بین ضریب جذب و ضریب شکست گرافن و AZO باشد. در ادامه به بررسی تأثیر ضریب جذب و ضریب شکست گرافن و AZO در سلول خورشیدی CIGS پرداخته شده است. ضریب جذب و ضریب شکست گرافن، AZO، ZnO، ZnSe و CIGS برگرفته از مراجع [۴۳-۴۷] در شکل ۱۰a,b نشان داده شده است. برای این منظور، عبور در هر دو سلول خورشیدی CIGS با گرافن و AZO به عنوان TCO محاسبه و مقایسه شد (شکل ۱). از فرمول‌های زیر برای محاسبه نرخ عبور استفاده شد [۴۸, ۴۹]. ضریب انعکاس R بین هر دو لایه مختلف با ضریب شکست متفاوت n_1 و n_2 را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۵۰]:

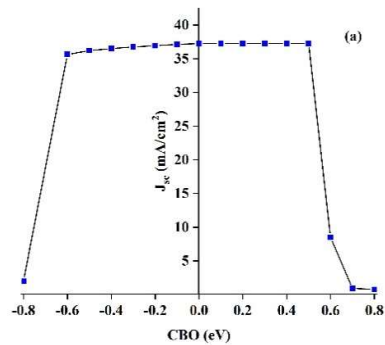
$$R^* = \frac{|n_1^* - n_2^*|^2}{|n_1^* + n_2^*|^2} = \frac{(n_1 - n_2)^2 + (k_1 - k_2)^2}{(n_1 + n_2)^2 + (k_1 + k_2)^2} \quad \gamma$$

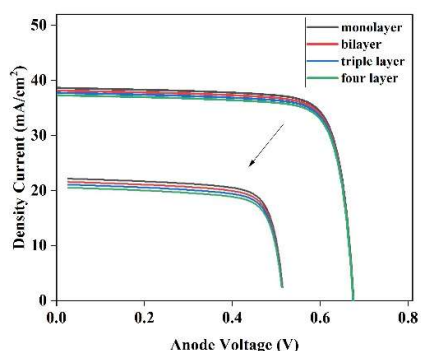
نرخ عبور با معادله ۸ به دست می‌آید [۴۸]

$$T(\lambda) = 1 - R(\lambda) \quad \delta$$

بنابراین، $T(\lambda)$ پیکربندی /graphene /air /ZnSe /ZnO (شکل ۱۱) توسط [۳۵] برآورد می‌شود.

$$T_{CIGS}(\lambda) = (1 - R_{12})(1 - R_{23})(1 - R_{34})(1 - R_{45}) \exp(-\alpha_{ZnO} d_{ZnO}) \exp(-\alpha_{ZnSe} d_{ZnSe}) \quad \epsilon$$





شکل ۹. منحنی‌های مشخصه J-V سلول خورشیدی CIGS با تعداد لایه‌های گرافن.

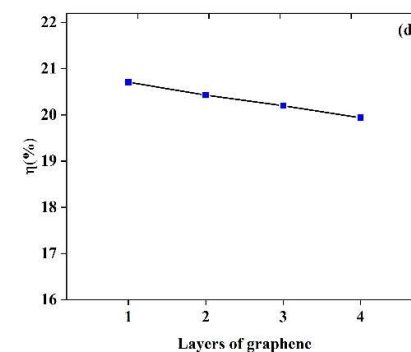
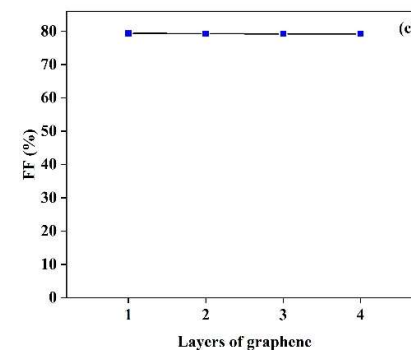
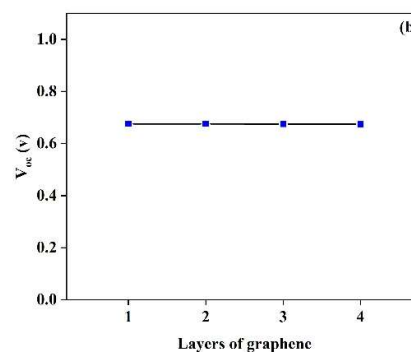
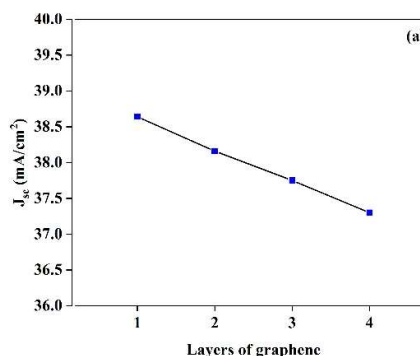
جدول ۵. مشخصه‌های فتوولتائیک سلول خورشیدی CIGS با تعداد لایه‌های گرافن

η (%)	FF (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	
۲۰٫۷۱	۷۹٫۳۳	۰٫۶۷۵۸	۳۸٫۶۴	تک لایه
۲۰٫۴۳	۷۹٫۳	۰٫۶۷۵۴	۳۸٫۱۶	دو لایه
۲۰٫۲	۷۹٫۲۷	۰٫۶۷۵	۳۷٫۷۵	سه لایه
۱۹٫۹۴	۷۹٫۲۵	۰٫۶۷۴	۳۷٫۳	چهار لایه

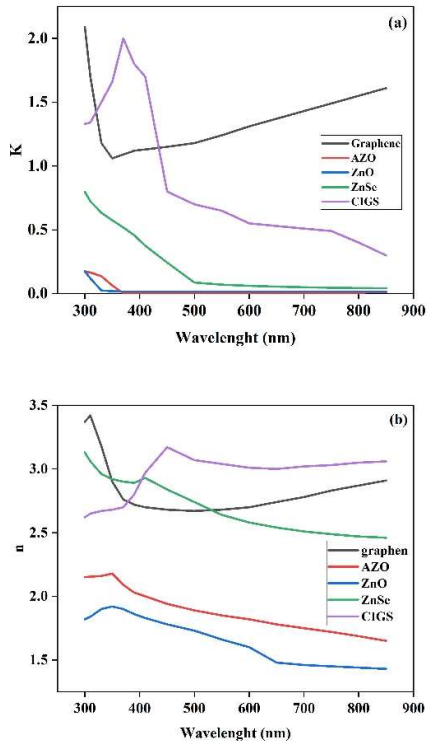
که در آن R_{12} , R_{23} , R_{34} , R_{45} ، α و d به ترتیب ضریب انعکاس در فصل مشترک graphene/air، ضریب انعکاس در فصل مشترک ZnO/graphene، ضریب انعکاس در فصل مشترک ZnO/ZnSe، ضریب انعکاس در فصل مشترک ZnSe/CIGS، ضریب جذب و ضخامت لایه هستند. توجه داشته باشید که جذب در گرافن به دلیل ضخامت بسیار کم گرافن نادیده گرفته شد و فقط جذب در لایه‌های ZnO و CdS در نظر گرفته شد. ضریب جذب، α ، را می‌توان با رابطه ۱۰ تعیین کرد [۲۶،۴۷]

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda} K(\lambda)$$

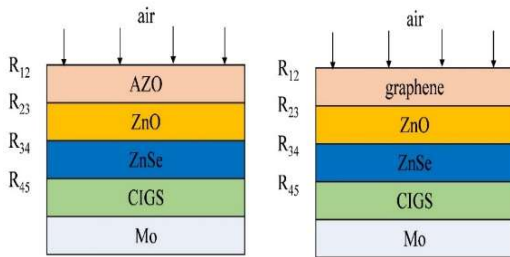
۱۰



شکل ۸. تأثیر تعداد لایه‌های گرافن بر مشخصه‌های فتوولتائیک سلول خورشیدی CIGS (a) J_{sc} (b) V_{oc} (c) FF و (d) η .



شکل ۱۰. (a) ضریب انعکاس و (b) ضریب جذب اجزای سلول خورشیدی CIGS در محدوده طول‌موج‌های $\lambda=300-850$ nm



شکل ۱۱. شماتیک ساختار سلول خورشیدی CIGS.

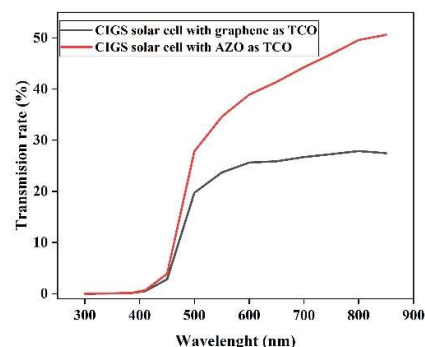
که در آن K ضریب جذب و λ طول موج است [۴۷]، [۵۱]

$$J_{sc} = q \sum_i T(\lambda_i) \frac{\phi_i(\lambda_i)}{h\nu_i} \Delta\lambda_i \quad (11)$$

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که سرعت عبور سلول خورشیدی CIGS با گرافن کمتر از سلول خورشیدی با AZO در تمام محدوده طول‌موج‌های $300 < \lambda < 850$ نانومتر است که به نرخ انعکاس بیشتر گرافن نسبت داده می‌شود. در نتیجه به دلیل وابستگی J_{sc} به T (رابطه ۱۱)، با کاهش T، J_{sc} نیز کاهش می‌یابد و با توجه به رابطه ۲، بازده نیز کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

سلول خورشیدی CIGS با لایه بافر CdS شبیه‌سازی شد. سپس لایه CdS با لایه ZnSe جایگزین شد. نتایج نشان داد که سلول خورشیدی بازده تبدیل مطلوبی را در حضور لایه بافر ZnSe به دست آورد (۱۹٫۸۴٪). هر چند، سلول خورشیدی CIGS با استفاده از لایه بافر CdS به بازدهی ۱۹٫۶۸٪ دست یافت. این نتایج نشان می‌دهد که ZnSe یک لایه بافر مناسب است و می‌تواند به جای CdS سمی در سلول‌های خورشیدی CIGS استفاده شود. سپس ضخامت‌های مختلف لایه بافر ZnSe بررسی شد و ضخامت بهینه لایه بافر ۲۵ نانومتر به دست آمد. همچنین پارامترهای فتوولتائیک سلول خورشیدی با تغییرات CBO بررسی شد و بیشترین بازده برای CBO در محدوده ۰٫۵- تا ۰٫۵ در فصل مشترک CIGS/ZnSe به دست آمد. در نهایت، گرافن تک لایه و چند لایه به عنوان لایه‌های رسانای شفاف در سلول خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفت. بیشترین η ۲۰٫۷۱ درصد برای گرافن تک لایه به دست آمد. این امر تأیید می‌کند که گرافن به دلیل خواص نوری می‌تواند به عنوان جایگزینی برای AZO به عنوان لایه TCO در سلول‌های خورشیدی استفاده شود.



شکل ۱۲. عبور $T(\lambda)$ محاسبه شده از سلول خورشیدی CIGS با گرافن و AZO.

[6] H. Heriche, Z. Rouabah, N. Bouarissa, High-efficiency CIGS solar cells with optimization of layers thickness and doping, *Optik*, 127 (2016) 11751-11757.

<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.09.071>.

[7] J.C. Park, M. Al-Jassim, S.W. Shin, J.H. Kim, T.W. Kim, Comprehensive characterization of CIGS absorber layers grown by one-step sputtering process, *Ceramics International*, 45 (2019) 4424-4430.

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.120>.

[8] K.-B. Kim, M. Kim, H.-C. Lee, S.-W. Park, C.-W. Jeon, Copper indium gallium selenide (CIGS) solar cell devices on steel substrates coated with thick SiO₂-based insulating material, *Materials Research Bulletin*, 85 (2017) 168-175.

<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.09.018>.

[9] S. Tobbeche, S. Kalache, M. Elbar, M.N. Kateb, M.R. Serdouk, Improvement of the CIGS solar cell performance: structure based on a ZnS buffer layer, *Optical and Quantum Electronics*, 51 (2019) 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-2000-z>.

[10] K. Kacha, F. Djeflal, H. Ferhati, L. Foughali, A. Bendjerad, A. Benhaya, A. Saidi, Efficiency improvement of CIGS solar cells using RF sputtered TCO/Ag/TCO thin-film as prospective buffer layer, *Ceramics international*, 48 (2022) 20194-20200. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.298>.

[11] S. Lee, E.S. Lee, T.Y. Kim, J.S. Cho, Y.J. Eo, J.H. Yun, A. Cho, Effect of annealing

مرجع‌ها

[1] V. Tyagi, N.A. Rahim, N. Rahim, JA/L. Selvaraj, Progress in solar PV technology: Research and achievement, *Renew. Sustain. Energy Rev*, 20 (2013) 443-461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.028>.

[2] P. Reinhard, A. Chirilă, P. Blösch, F. Pianezzi, S. Nishiwaki, S. Buechelers, A.N. Tiwari, Review of progress toward 20% efficiency flexible CIGS solar cells and manufacturing issues of solar modules, 2012 IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) PART 2, (2012) 1-9. <https://doi.org/10.1109/PVSC-Vol2.2012.6656789>.

[3] C.-H. Chen, W.-C. Shih, C.-Y. Chien, C.-H. Hsu, Y.-H. Wu, C.-H. Lai, A promising sputtering route for one-step fabrication of chalcopyrite phase Cu (In, Ga) Se₂ absorbers without extra Se supply, *Solar energy materials and solar cells*, 103 (2012) 25-29. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.04.008>.

[4] N. Khoshshirat, N.A.M. Yunus, M.N. Hamidon, S. Shafie, N. Amin, Analysis of absorber layer properties effect on CIGS solar cell performance using SCAPS, *Optik*, 126 (2015) 681-686. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.02.037>.

[5] B. Farhadi, M. Naseri, Structural and physical characteristics optimization of a dual junction CGS/CIGS solar cell: A numerical simulation, *Optik*, 127 (2016) 10232-10237. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.08.029>.

- xSnxOy buffer layers for CIGS solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159 (2017) 272-281.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.09.023>.
- [20] O. Toma, L. Ion, S. Iftimie, V. Antohe, A. Radu, A. Raduta, D. Manica, S. Antohe, Physical properties of rf-sputtered ZnS and ZnSe thin films used for double-heterojunction ZnS/ZnSe/CdTe photovoltaic structures, *Applied Surface Science*, 478 (2019) 831-839.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.032>.
- [21] M.K. Hossain, D. Samajdar, R.C. Das, A. Arnab, M.F. Rahman, M. Rubel, M.R. Islam, H. Bencherif, R. Pandey, J. Madan, Design and simulation of Cs2BiAgI6 double perovskite solar cells with different electron transport layers for efficiency enhancement, *Energy & Fuels*, 37 (2023) 3957-3979.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00181>.
- [22] M.H. Yousuf, F. Saeed, H.A. Tauqeer, Numerical Investigation of Cu2O as Hole transport layer for High-Efficiency CIGS solar cell, (2022).
<https://doi.org/10.20944/preprints202110.0326.v2>.
- [23] M.M.A. Moon, S.R.I. Biplab, M.H. Ali, M.F. Rahman, M.S. Rana, A. Kuddus, Computational investigation of Zn-based single buffer layers toward Cd-free high-efficiency CIGS thin film solar cells, *Journal of Applied Science and Engineering*, 26 (2023) 1799-1808.
[http://dx.doi.org/10.6180/jase.202312_26\(12\).0012](http://dx.doi.org/10.6180/jase.202312_26(12).0012).
- [24] F. Elhady, T.M. Abdolkader, M. Fedawy, Simulation of new thin film Zn (O, S)/CIGS solar cell with bandgap grading, *Engineering Research Express*, 5 (2023) 025027.
<https://doi.org/10.1088/2631-8695/acff60>.
- [25] M. Moustafa, T. Al Zoubi, S. Yasin, Optoelectronics Simulation of CIGS-Based Solar Cells Using a Cd-Free Nontoxic ZrS x Se2- x as a Novel Buffer Layer, *Brazilian Journal of Physics*, 52 (2022) 141.
<https://doi.org/10.1007/s13538-022-01146-z>.
- [26] A. Sylla, S. Touré, J.-P. Vilcot, Numerical modeling and simulation of CIGS-based solar cells with ZnS buffer layer, *Open Journal of Modelling and Simulation*, 5 (2017) 218.
<https://doi.org/10.4236/ojmsi.2017.54016>.
- treatment on CdS/CIGS thin film solar cells depending on different CdS deposition temperatures, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 141 (2015) 299-308.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.052>.
- [12] F.R. Ahmad, A. Yakimov, R.J. Davis, J.-H. Her, J.R. Cournoyer, N.M. Ayensu, Effect of thermal annealing on the properties of cadmium sulfide deposited via chemical bath deposition, *Thin Solid Films*, 535 (2013) 166-170.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.10.085>.
- [13] S. Tripathi, P. Lohia, D. Dwivedi, Contribution to sustainable and environmental friendly non-toxic CZTS solar cell with an innovative hybrid buffer layer, *Solar Energy*, 204 (2020) 748-760.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.033>.
- [14] T.R. Rana, S. Kim, J. Kim, K. Kim, J.H. Yun, A Cd-reduced hybrid buffer layer of CdS/Zn (O, S) for environmentally friendly CIGS solar cells, *Sustainable Energy & Fuels*, 1 (2017) 1981-1990.
<https://doi.org/10.1039/C7SE00348J>.
- [15] V.B. Chu, D. Siopa, A. Debot, D. Adeleye, M. Sood, A. Lomuscio, M. Melchiorre, J. Guillot, N. Valle, B. El Adib, Waste- and Cd-free inkjet-printed Zn (O, S) buffer for Cu (In, Ga)(S, Se) 2 thin-film solar cells, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13 (2021) 13009-13021.
<https://doi.org/10.1021/acsami.0c16860>.
- [16] B. Lin, Q. Sun, C. Zhang, H. Deng, W. Xie, J. Tang, Q. Zheng, J. Wu, H. Zhou, S. Cheng, 9.3% Efficient Flexible Cu2ZnSn (S, Se) 4 Solar Cells with High-Quality Interfaces via Ultrathin CdS and Zn0.8Sn0.2O Buffer Layers, *Energy Technology*, 10 (2022) 2200571.
<https://doi.org/10.1002/ente.202200571>.
- [17] S. Ouédraogo, M.B. Kébré, A.T. Ngoupo, D. Oubda, F. Zougmore, Comprehensive Analysis of CuIn1-xGaxSe2 Based Solar Cells with Zn1-yMgyO Buffer Layer, *Materials Sciences and Applications*, 11 (2020) 880-892.
<https://doi.org/10.4236/msa.2020.1112058>.
- [18] M. Moradi, R. Teimouri, M. Saadat, M. Zahedifar, Buffer layer replacement: a method for increasing the conversion efficiency of CIGS thin film solar cells, *Optik*, 136 (2017) 222-227.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.02.037>.
- [19] P. Salomé, J. Keller, T. Törndahl, J. Teixeira, N. Nicoara, R.-R. Andrade, D. Stroppa, J. González, M. Edoff, J. Leitão, CdS and Zn1-

- Proceedings, 43 (2021) 3735-3739. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.986>.
- [36] A. Daraie, A. Fattah, Performance improvement of perovskite heterojunction solar cell using graphene, *Optical Materials*, 109 (2020) 110254. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110254>.
- [37] R. Kumari, M. Mamta, R. Kumar, Y. Singh, V.N. Singh, 24% Efficient, Simple ZnSe/Sb₂Se₃ Heterojunction Solar Cell: An Analysis of PV Characteristics and Defects, *ACS omega*, 8 (2022) 1632-1642. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07211>.
- [38] K. Patel, P.K. Tyagi, Multilayer graphene as a transparent conducting electrode in silicon heterojunction solar cells, *AIP advances*, 5 (2015). <https://doi.org/10.1063/1.4927545>.
- [39] A. Mohamed, H. Mohamed, Modelling of high-efficiency substrate CIGS solar cells with ultra-thin absorber layer, *Indian Journal of Physics*, 94 (2020) 1725-1732. <https://doi.org/10.1007/s12648-019-01626-0>.
- [40] S. Bechlaghem, B. Zebentout, Z. Benamara, The major influence of the conduction-band-offset on Zn (O, S)/CuIn_{0.7}Ga_{0.3}Se₂ solar cells, *Results in Physics*, 10 (2018) 650-654. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.07.006>.
- [41] A. Bahfir, M. Boumaour, Z. Chaieb, H. Labeche, Improved performance of Silicon solar cells by ZnMgO front layer, *Nanomaterials Science & Engineering*, 2 (2020) 148-153. <https://doi.org/10.34624/nmse.v2i4.19557>.
- [42] Y. Chen, X. Tan, S. Peng, C. Xin, A.E. Delahoy, K.K. Chin, C. Zhang, The influence of conduction band offset on CdTe solar cells, *Journal of Electronic Materials*, 47 (2018) 1201-1207. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5850-9>.
- [43] J. Weber, V. Calado, M. Van De Sanden, Optical constants of graphene measured by spectroscopic ellipsometry, *Applied physics letters*, 97 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3475393>.
- [44] R. Treharne, K. Hutchings, D. Lamb, S. Irvine, D. Lane, K. Durose, Combinatorial optimization of Al-doped ZnO films for thin-film photovoltaics, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45 (2012) 335102. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/33/335102>.
- [27] M. Saadat, A Modeling Study on Utilizing In₂S₃ as the Buffer Layer of Cu (In, Ga) Se₂ Based Solar Cell, (2021). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-650485/v1>.
- [28] L. Yin, K. Zhang, H. Luo, G. Cheng, X. Ma, Z. Xiong, X. Xiao, Highly efficient graphene-based Cu (In, Ga) Se₂ solar cells with large active area, *Nanoscale*, 6 (2014) 10879-10886. <http://dx.doi.org/10.1039/C4NR02988G>.
- [29] S. Tasch, A. Niko, G. Leising, U. Scherf, Highly efficient electroluminescence of new wide band gap ladder-type poly (paraphenylenes), *Applied physics letters*, 68 (1996) 1090-1092. <https://doi.org/10.1063/1.115722>.
- [30] X. Shen, M. Yang, C. Zhang, Z. Qiao, H. Wang, C. Tang, Utilizing magnetron sputtered AZO-ITO bilayer structure as transparent conducting oxide for improving the performance of flexible CIGS solar cell, *Superlattices and Microstructures*, 123 (2018) 251-256. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.09.001>.
- [31] S. Kasap, H. Khaksaran, S. Çelik, H. Özkaya, C. Yanık, I.I. Kaya, Controlled growth of large area multilayer graphene on copper by chemical vapour deposition, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17 (2015) 23081-23087. <https://doi.org/10.1039/C5CP01436K>.
- [32] L. Lancellotti, E. Bobeico, M. Della Noce, L.V. Mercaldo, I. Usatii, P.D. Veneri, G.V. Bianco, A. Sacchetti, G. Bruno, Graphene as non conventional transparent conductive electrode in silicon heterojunction solar cells, *Applied Surface Science*, 525 (2020) 146443. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146443>.
- [33] Z. Shi, A.H. Jayatissa, The impact of graphene on the fabrication of thin film solar cells: Current status and future prospects, *Materials*, 11 (2017) 36. <https://doi.org/10.3390/ma11010036>.
- [34] S.R. Fatemi Shariat Panahi, A. Abbasi, V. Ghods, M. Amirahmadi, Analysis and improvement of CIGS solar cell efficiency using multiple absorber substances simultaneously, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31 (2020) 11527-11537. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03700-4>.
- [35] A. Srivastava, P. Dua, T. Lenka, S. Tripathy, Numerical simulations on CZTS/CZTSe based solar cell with ZnSe as an alternative buffer layer using SCAPS-1D, *Materials Today*:

[45] Q.M. Al-Bataineh, M. Telfah, A.A. Ahmad, A.M. Alsaad, I.A. Qattan, H. Baaziz, Z. Charifi, A. Telfah, Synthesis, crystallography, microstructure, crystal defects, optical and optoelectronic properties of ZnO: CeO₂ mixed oxide thin films, *Photonics*, 7 (2020) 112. <https://doi.org/10.3390/photonics7040112>.

[46] S. Adachi, T. Taguchi, Optical properties of ZnSe, *Physical review B*, 43 (1991) 9569. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.43.9569>.

[47] L.A. Kosyachenko, X. Mathew, P. Paulson, V.Y. Lytvynenko, O. Maslyanchuk, Optical and recombination losses in thin-film Cu (In, Ga) Se₂ solar cells, *Solar energy materials and solar cells*, 130 (2014) 291-302. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.07.019>.

[48] M. Houshmand, M.H. Zandi, N.E. Gorji, Modeling of optical losses in graphene contacted thin film solar cells, *Materials Letters*, 164 (2016) 493-497. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.11.050>.

[49] H. Mohamed, M.R. Ahmed, S.S. Ali, W. Mohamed, Theoretical Studies of Thin-Film Solar Cells based on CdTe with different Window-Layers, *Int. J. Thin. Fil. Sci. Tec*, 9 (2020) 175-183.

<http://dx.doi.org/10.18576/ijfst/090304>.

[50] H. Mohamed, Dependence of efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cell on optical and recombination losses, *Journal of applied Physics*, 113 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4794201>.

[51] H. Mohamed, A. Mohamed, H. Ali, Theoretical study of ZnS/CdS bi-layer for thin-film CdTe solar cell, *Materials Research Express*, 5 (2018) 056411. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aac5ae>.