

بررسی تاثیر لایه بافر اکسید دوفلزی ZnGeO بر عملکرد سلول خورشیدی مبتنی بر اکسید مس به کمک شبیه سازی عددی

نجمه خضریان^۱، محمدهادی شاهرخ آبادی^{۲*}

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این مقاله تاثیر ترکیب اکسید دو فلزی روی ژرمانیوم ($Zn_{1-x}Ge_xO$) بعنوان لایه بافر در عملکرد و راندمان سلولهای خورشیدی با لایه جاذب اکسید مس (Cu_2O) بررسی می شود. پارامترهای فیزیکی مدل سلول خورشیدی منطبق بر داده های تجربی انتخاب و سپس لایه جدید بافر ZnGeO بر اساس پارامترهای درون یابی شده سطوح انرژی ساختار نوار از ترکیبات دوتایی ZnO و GeO_2 محاسبه شد تا امکان مطالعه عملکرد سلول خورشیدی در کل ترکیب ژرمانیوم را فراهم کند. ابتدا دقت مدل اولیه سلول خورشیدی با مقایسه مشخصات الکتریکی آن با مقادیر تجربی راستی آزمایی گردید. سپس ویژگیهای مدل اولیه با افزودن لایه بافر، تحلیل و مشخصه یابی شد. با بررسی بازدهی سلول در بازه تغییرات x بافر (۳۵٪ تا ۷۵٪ ژرمانیوم)، حداقل بازده ۵/۳۱٪ در ۰/۳۵ و حداکثر ۷/۰۲٪ در $x = ۰/۶۵$ بدست آمد. با ترکیب بافر $Zn_{0.35}Ge_{0.65}O$ جریان اتصال کوتاه سلول ۱۱/۱۵ میلی آمپر و ولتاژ مدارباز آن ۱/۰۸ ولت محاسبه گردید.</p>	<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹</p>
	<p>واژگان کلیدی: سلول خورشیدی، سلول فتوولتائیک، Cu_2O، ZnGeO اکسید دو فلزی، اکسید فلز.</p>

۱- مقدمه

فتوولتائیک اهمیت دارد، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. اکسید مس یک نیمه رسانای نوع p است که از ضریب جذب نوری بالا ($\alpha > 10^5 \text{ cm}^{-1}$) و ویژگیهای الکتریکی بالا (موبیلیتی هال بیش $100 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ در غلظت حامل $10^{13} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) برخوردار است [۴، ۵]. هرچند باند گپ ۲/۱ تا ۲/۶ الکترون ولتی، راندمان فتوولتائیک تئوری آن را به میزان ۲۰٪ محدود می کند (محدودیت شاکلی-کوئیسر) [۶].

در طول یک دهه گذشته، پژوهشهای زیادی بر روی بهینه سازی سلولهای فتوولتائیک مبتنی بر Cu_2O انجام شده است [۷-۱۰]. یکی از این موارد مربوط به بهینه سازی تراز باند انرژی افزاره با انتخاب بهینه مواد لایه بافر است. در واقع، یکی از محدودیت های به کارگیری Cu_2O به عنوان لایه جاذب، میل الکترون خواهی کم آن ($\chi = 2.1 \text{ eV}$) است

در بین مواد نوظهور، اکسیدهای فلزی نویدبخش بیشترین توسعه در نسلهای جدید سلولهای فتوولتائیک فیلم نازک هستند. ویژگیهای اصلی اکسیدهای فلزی را میتوان در فراوانی، حداقل هزینه تولید، سمی نبودن آنها و کاهش اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از بکارگیری آنها برشمرد [۱]. علاوه بر استفاده از اکسیدهای فلزی بعنوان الکتروود رسانای شفاف (TCO)، از این مواد میتوان در تولید کل ساختار سلول خورشیدی از لایه جاذب تا بافر و حتی لایه های ضدتابش (ARL) بهره برد [۲]. در حال حاضر تحقیقات روی موادی مانند $BiFeO_3$ ، Fe_2O_3 یا Co_3O_4 به عنوان لایه جاذب در حال انجام است [۲، ۳]. در بین اکسیدهای فلزی، اکسید مس (Cu_2O) در دهه گذشته بخاطر داشتن ویژگیهای منحصر به فردی که در کاربردهای

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mhshahrokh@hsu.ac.ir

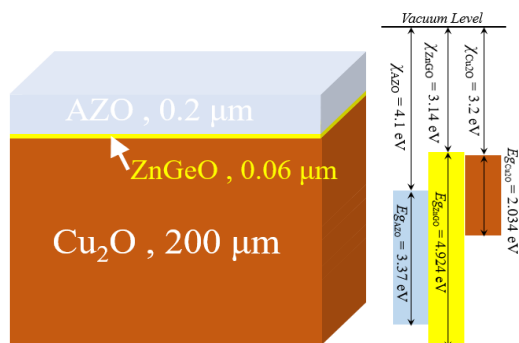
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

است. مدل‌های ارائه شده قبلی، سلولهای خورشیدی مبتنی بر اکسید مس، اهمیت نقش نقص‌های کریستالی (Trap Defects) در محل اتصال لایه جاذب و بافر به واسطه حضور سایر فازهای اکسید مس ناخواسته (مانند CuO و Cu₂O₃) را نشان داده است [۱۹-۲۰]. در این مقاله نیز از مدل توزیع نقص کریستالی مشابهی با معرفی یک لایه نقص در محل اتصال بصورت مدل بازترکیب شاکلی-رید-هال (SRH) با توزیع گاوسی، مراکز نقص در انرژی‌های حدود 0.1 eV در لایه رابط در نظر گرفته شده است. پارامترهای استفاده شده در این مدل، در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

۳- شبیه‌سازی سلول

ساختار سلول خورشیدی و همچنین دیاگرام نوارهای انرژی لایه‌ها در شکل (۱) ارائه شده‌اند.



شکل ۱- ساختار فیزیکی و دیاگرام نوارهای انرژی سلول خورشیدی مبتنی بر لایه جاذب Cu₂O، بافر Zn_{0.4}Ge_{0.6}O و پنجره AZO بدون پوشش فیلم ضد انعکاس. از آنجائیکه تمرکز ما در این مدل بر تاثیر لایه بافر و ترکیب ZnO و Ge₂O₃ می‌باشد (Zn_{1-x}Ge_xO)، در نتیجه با تقریب بسیار نزدیک میتوان پارامترهای الکتریکی ترکیب را به صورت زیر توصیف نمود [۲۱-۲۲]:

$$\begin{aligned} \epsilon_r^{ZnGeO} &= (1-x)\epsilon_r^{ZnO} + x\epsilon_r^{Ge_2O_3} \\ E_g^{ZnGeO} &= (1-x)E_g^{ZnO} + xE_g^{Ge_2O_3} \\ \chi^{ZnGeO} &= (1-x)\chi^{ZnO} + x\chi^{Ge_2O_3} \end{aligned} \quad (1)$$

برای بدست آوردن پارامترهای مذکور در شبیه‌سازی، x از ۰/۳۵ تا ۰/۷۵ با گام ۰/۰۵ تغییر داده شده است. پارامترهای الکتریکی ZnO و Ge₂O₃ در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در نتیجه بعنوان مثال در $x = 0.6$ ثابت دی الکتریک، انرژی گاف، و میل الکترونخواهی Zn_{0.4}Ge_{0.6}O به ترتیب 6.264 eV، 4.924 eV و 3.14 eV خواهند شد.

که در کنار لایه بافری که معمولاً از جنس اکسید روی ($\chi = 4.4$ eV) یا اکسید تیتانیوم ($\chi = 4.1$ eV) آفست نوار هدایت را ایجاد می‌کند [۱۱،۱۲]. نتایج مطالعات عددی نشان می‌دهند که کاهش میل الکترونخواهی لایه بافر به 3.2 eV بازدهی سلول را به طرز چشمگیری افزایش خواهد داد [۱۳-۱۵]. بنابراین، به منظور کاهش آفست باند هدایت سلولهای خورشیدی Cu₂O، ترکیب اکسید ژرمانیوم روی به‌عنوان لایه بافر توسط مینامی [۱۶] در کنار لایه جاذب اکسید مس معرفی شد تا با استفاده از میل الکترونخواهی کم اکسید ژرمانیوم، بازدهی سلول به حدود ۸/۱ درصد افزایش یابد.

در اینجا ذکر این نکته ضروریست که سلولهای فتوولتائیک بر پایه Cu₂O توسط فرآیند اکسیداسیون حرارتی خشک (O₂) فویل‌های مسی نازک به دست می‌آیند که روشی مطمئن برای رشد اکسید مس با کیفیت بالاست [۱۷]. هرچند مصرف انرژی زیاد اکسیداسیون حرارتی خشک در دمای بالا (< ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد)، در مدت بیش از ۱۰ ساعت و در فلوی اکسیژن حدود 100 mL.min⁻¹ (به دلیل کنترل آهنگ رشد و افزایش کیفیت لایه اکسید)، کاربرد آن را در تولید کم هزینه و در مقیاس صنعتی سلولهای خورشیدی Cu₂O محدود کرده است [۱۸].

در این مقاله، ابتدا به کمک پارامترهای فیزیکی کار مینامی [۱۶]، مدل اتصال ناهمگون AZO/Zn_{1-x}Ge_xO/Cu₂O ارائه میشود. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در محیط سیلواکو-اتلس با نتایج تجربی کار مرجع مقایسه شده و آنگاه با تغییر مقدار x شرایط بهینه تراز آفست باند هدایت ساختار فراهم شده است.

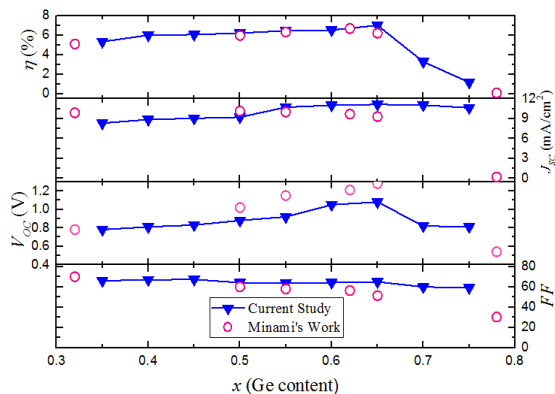
۲- اتصال ناهمگون AZO/Zn_{1-x}Ge_xO/Cu₂O

مدل سلول خورشیدی به کمک نتایج تجربی از ساختاری مبتنی بر اکسید روی آلومینیوم به ضخامت ۲۰۰ نانومتر (AZO) و یک بافر ۶۰ نانومتری Zn_{1-x}Ge_xO که به روش لایه نشانی پالس لیزری (PLD) توسط مینامی و همکاران [۱۶] روی یک ورقه مسی (Cu₂O) به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر به عنوان لایه جاذب و بدون پوشش فیلم ضد انعکاس ارائه شده است. شبیه‌سازی عددی با کمک نرم‌افزار Silvaco ATLAS به منظور استخراج ویژگی‌های سلول خورشیدی شامل: جریان اتصال کوتاه J_{sc} ، ولتاژ مدار باز V_{oc} ، ضریب پرشدگی FF ، و راندمان سلول η صورت گرفته

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی اتصال ناهمگون AZO/Zn_{1-x}Ge_xO/Cu₂O [۲۲، ۲۰، ۱۶]

Cu ₂ O	Zn _{1-x} Ge _x O	AZO	پارامتر
۲۰۰	۰/۰۶	۰/۲	ضخامت (μm)
۷/۶	۵/۶۰۳ - ۷/۳۶۷	۸/۹۱	ϵ_r
۲/۰۳۴	۴/۲۷۷ - ۵/۳۱۳	۳/۳۷	انرژی گاف E_g (eV)
۳/۲	۲/۹ - ۳/۵۴	۴/۱	میل الکترون خواهی χ (eV)
۲۰۰	۱۰	۳۰	موبیلیتی الکترونها μ_e (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)
۱۰۰	۵	۳	موبیلیتی حفره ها μ_p (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)
$۲/۲۵ \times 10^{19}$	$۳/۷۱۸ \times 10^{18}$	$۸/۰۹ \times 10^{18}$	چگالی موثر تراز هدایت N_C (cm ⁻³)
$۱/۰۵ \times 10^{19}$	$۱/۳۷ \times 10^{19}$	$۹/۴۲ \times 10^{19}$	چگالی موثر تراز ظرفیت N_V (cm ⁻³)
۱۰^{14}	۱۰^{20}	۸×10^{20}	تراکم ناخالصی (cm ⁻³)
۱۰^{13}	۱۰^{18}	۱۰^{18}	چگالی نقص گوسی N_{DG} (cm ⁻³)
۱۰^{-11}	۱۰^{-10}	$۱/۶ \times 10^{-10}$	ضریب باز ترکیب β (cm ⁻³)
۱۰^{-7}	۱۰^{-9}	۱۰^{-9}	طول عمر الکترونها τ_e (s)
۱۰^{-7}	۱۰^{-9}	۱۰^{-9}	طول عمر حفرهها τ_p (s)

پاسخ شبیه سازی (شکل (۲)) مطابقت بسیار نزدیکی با مرجع [۱۶] را نشان می دهد. همچنین نشان می دهد که لایه بافر تاثیر زیادی در بهبود مشخصه IV افزاره داشته است. برای بررسی دقیقتر، درصد ژرمانیوم را در ترکیب بافر از ۳۵ تا ۷۵ در گامهای ۵ درصدی تغییر میدهیم و اثر آن را روی ضرایب شایستگی سلول بررسی می کنیم. شکل (۳) این نمودار تغییرات راندمان، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز، و ضریب پرشدگی سلول خورشیدی را در برابر تغییرات درصد ژرمانیوم در ترکیب ZnGeO و در مقایسه با مرجع [۱۶] نشان میدهد. لازم به ذکر است که مینامی و همکاران تنها از ۳۲، ۵۰، ۵۵، ۶۲، ۶۵، و ۷۸ درصد ژرمانیوم در ترکیب استفاده نموده اند.



شکل ۳- ضرایب شایستگی سلول خورشیدی در برابر تغییرات درصد ژرمانیوم. به ترتیب از بالا به پایین: راندمان، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز، و ضریب پرشدگی.

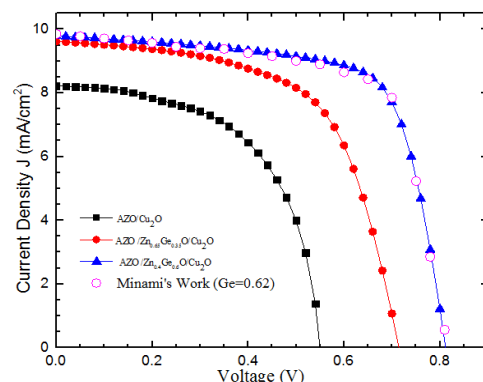
جدول ۲- پارامترهای الکتریکی ZnO و Ge₂O₃

Ge ₂ O ₃	ZnO	پارامتر
۴/۵	۸/۹۱	ϵ_r
۵/۹۶	۳/۳۷	انرژی گاف E_g (eV)
۲/۵	۴/۱	میل الکترون خواهی χ (eV)

سایر پارامترهای ارائه شده در جدول ۱ از ساختار رومبوی Zn₂GeO₄ استنتاج و ارائه شده اند [۲۳].

۴- نتایج و بحث

عملکرد سلول خورشیدی بدون لایه بافر و با افزودن یک لایه ۶۰ نانومتری Zn_{0.65}Ge_{0.35}O با مرجع [۱۶] راستی آزمایی شد. شکل (۲) پاسخ چگالی جریان افزاره را در برابر ولتاژ نشان می دهد.

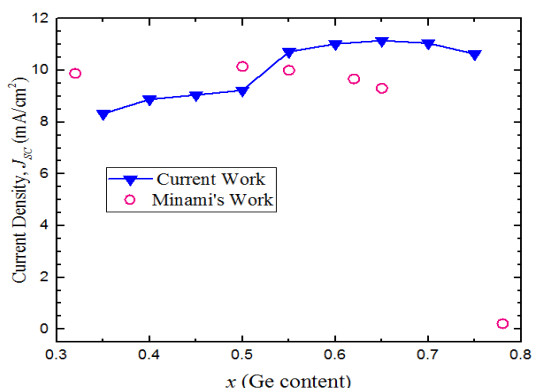


شکل ۲- مشخصه جریان/ولتاژ سلول خورشیدی

که در آن ولتاژ حرارتی و J_S جریان اشباع تاریکی سلول است که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$J_S = qN_C N_V \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (3)$$

از آنجائیکه چگالی نقصهای لایه بافر و جاذب ثابت و در تقریباً در مرکز انرژی گاف در نظر گرفته شده‌اند، لذا تغییری در تراکم ناخالصی‌های دهنده ایجاد نخواهد شد. در نتیجه، تغییرات جریان اتصال کوتاه سلول طبق رابطه ۲ به تغییرات ولتاژ مدار باز مربوط خواهد شد. دامنه تغییرات ولتاژ مدار باز در بازه ۳۰ تا ۷۰ درصدی ژرمانیوم در لایه بافر کمتر از ۳۵۰ میلی‌ولت است و این امر منجر به تغییرات نسبتاً جزئی جمله \ln در رابطه ۲ میگردد (حداقل ۳/۴۳ و حداکثر ۳/۷۳) که در نتیجه تغییر چندانی در جریان اتصال کوتاه ایجاد نخواهد کرد. شکل (۵) منحنی تغییرات جریان اتصال کوتاه شبیه‌سازی شده را نسبت به تغییرات x نشان میدهد.



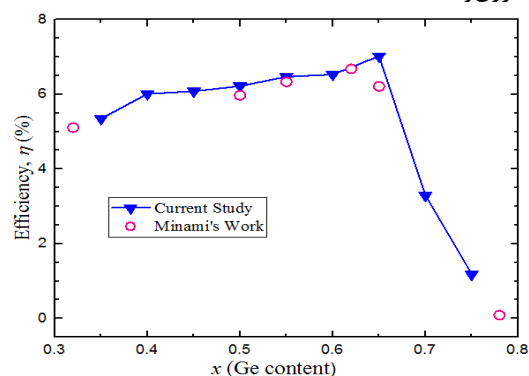
شکل ۵- منحنی تغییرات جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی نسبت به تغییرات میزان ژرمانیوم در لایه بافر. ولتاژ مدار باز سلولهای خورشیدی ناهمگن توسط باز ترکیب در سطح واسط محدود می‌شود و با رابطه ۴ بیان می‌گردد:

$$V_{OC} = \frac{1}{q} \left[\phi_B^{Cu_2O} - AkT \ln \left(\frac{qN_V S_{it}}{J_{sc}} \right) \right] \quad (4)$$

در این رابطه $\phi_B^{Cu_2O}$ ارتفاع موثر سد در Cu_2O ، S_{it} سرعت باز ترکیب در سطح واسط، N_V چگالی حالات موثر نوار ظرفیت، kT انرژی حرارتی، A ضریب ایده‌آلی دیود، J_{sc} چگالی جریان اتصال کوتاه و q بار الکترون است. از آنجائیکه در سلولهای خورشیدی جدایی سطوح شبه فرمی حفره‌ها و الکترونها بستگی به آفست باندهای ظرفیت و هدایت دارد،

افزودن چگالی نقص کریستالی به ساختار سلول منجر به تطابق بهتر مشخصه سلول با مقادیر عملی می‌شود. اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و ویژگی‌های تجربی سلول خورشیدی را می‌توان به تقریب‌های انجام شده برای تخمین چگالی نقص گوسی در مدل و همچنین به تفاوت‌های احتمالی در تغییرات نقص سطحی در محل پیوندهای سلول مرتبط دانست. بخشی از این نقصها در افزاره بصورت چگالی سطوح تله متحرک عمل می‌کنند که بازایی آنها در مدل شبیه سازی تقریباً ناممکن است.

نتایج بدست آمده از بازدهی سلول خورشیدی (شکل (۴)) راندمان بهینه سلول با ۶۵٪ ژرمانیوم در لایه بافر را نشان میدهد که به حدود ۷/۰۲ درصد میرسد. میزان آفست باند هدایت بین لایه بافر و لایه جاذب در این شرایط ۰/۱۴ الکترون‌ولت است.

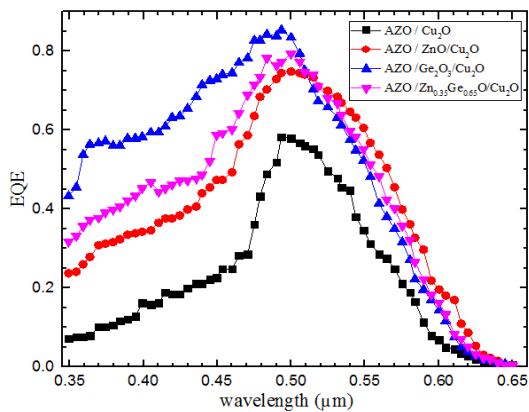


شکل ۴- مقایسه بازدهی سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده با مقادیر تجربی.

بعلاوه، همانگونه که از شکل (۴) مشاهده میشود، راندمان سلول خورشیدی به آفست باند هدایت بین لایه بافر و لایه جاذب بستگی دارد، بطوریکه در مقادیر زیادتر میل الکترونخواهی بافر (درصدهای ۴۰ تا ۶۰ ژرمانیوم در ترکیب)، بازدهی سلول خورشیدی تغییر چندانی نمی‌کند. علت این تغییر مشخصات سلول بهبود در وضعیت سطح واسط لایه بافر و لایه جاذب اکسید مس است. هنگامیکه میل الکترونخواهی لایه بافر کاهش می‌یابد، ناپیوستگی نوار هدایت بین دو لایه کاهش می‌یابد که خود منجر به کاهش باز ترکیب حاملها و در نتیجه بهبود راندمان سلول می‌شود. جریان اتصال کوتاه سلول با رابطه (۲) و به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$J_{SC} = J_S \ln \left(\frac{V_{OC}}{V_T} \right) \quad (2)$$

نشان می‌دهد که در محدوده ۴۷۵ تا ۵۵۰ نانومتر، بیش از ۶۰ درصد است. به عبارت دیگر، بیش از ۶۰ درصد فوتون‌ها در این محدوده از طول موج به زوج‌های الکترون-حفره تبدیل می‌شوند. به‌واسطه افزایش درصد ژرمانیوم، آفست باند هدایت اصلاح می‌شود و در نتیجه فوتون‌های با انرژی بالاتر می‌توانند راحت‌تر به لایه جاذب رسیده و جذب آن شوند.



شکل ۶- نمودار تغییرات EQE با طول موج تابشی در سلول مبتنی بر AZO/Cu₂O بدون لایه بافر (سیاه)، با لایه بافر اکسیدروی (قرمز)، با لایه بافر اکسید ژرمانیومی، و با بافر Zn_{0.33}Ge_{0.65}O

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل سلول خورشیدی مبتنی بر AZO/ZnGeO/Cu₂O ارائه گردید. شبیه‌سازی مدل ارائه شده به کمک نرم‌افزار سیلوکو صورت پذیرفت. شبیه‌سازی افزاره این اجازه را به طراح می‌دهد تا تکامل تجربی عملکرد افزاره به عنوان تابعی از ترکیب لایه بافر را بازتولید و بررسی کند. همچنین، این مدل اهمیت بهینه‌سازی آفست باند هدایت در این ساختار را تأیید می‌کند تا بتوان با مهندسی باند انرژی، آنرا بهبود بخشید. علی‌رغم نتایج قابل قبول به‌دست‌آمده از این مدل، انتقال نتایج و پارامترها به حوزه ساخت ممکن است بسیار چالش‌برانگیز باشد. از طرف دیگر، فرآیند ساخت نیاز به مصرف انرژی بالا در عملیات حرارتی دمای بالا (بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در طول چند ساعت) و چالش هزینه مواد مصرفی و نیروی کار را به دنبال دارد. در نتیجه امکان مدلسازی افزاره با سایر مواد به عنوان بافر و افزودن لایه‌های ضد تابشی در ضخامتهای دلخواه، به سادگی این امکان را فراهم می‌سازد تا پیش از تولید در مقیاس بزرگ با هزینه کم و اثرات زیست محیطی کم، به بهینه‌سازی و پیش‌بینی رفتار سلول

در نتیجه، تغییرات میل الکترونخواهی لایه بافر منجر به تغییر در ولتاژ مدار باز سلول خواهد شد.

همانطوریکه میدانیم، در یک سلول خورشیدی تمامی زوج الکترون-حفره‌های تولید شده از طریق جذب نور در اتصال‌های اهمی جمع نمی‌شوند. مادامیکه جریان القا شده در یک سلول خورشیدی با تعداد فوتونهای جذب شده در محدوده شکاف نوار ماده برابر است، برخی از حاملهای بار القا شده پیش از رسیدن به اتصالات سلول بازترکیب می‌شوند. این مسئله تا حدود زیادی به میزان تابش فوتونها به سلول و ایجاد جریان وابسته است. در عمل، بازده تابشی فوتون به جریان، حاصلضرب جذب کوانتومی و بازده کوانتومی جمع‌آوری جریان است. این کمیت برای یک سلول خورشیدی با رابطه (۵) توصیف می‌شود:

$$\eta_q = a(e) \times \eta_c \quad (5)$$

بازده تابشی فوتون به جریان، همچنین IPCE (Incident Photo Current Efficiency External) EQE کوانتومی خارجی (Quantum Efficiency) است. در عمل بازده کوانتومی از اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه در یک طول موج مشخص و با لحاظ کردن توان تابشی ورودی از رابطه (۶) بدست می‌آید:

$$\eta_q = IPCE(\%) = \frac{1239 \times J_\lambda \left[\frac{\mu A}{cm^2} \right]}{\lambda [nm] \times P_\lambda \left[\frac{W}{m^2} \right]} \quad (6)$$

شکل (۶) منحنی بازده کوانتومی خارجی EQE را برحسب تغییرات طول موج پرتو نور و برای چهار حالت متفاوت سلول نشان می‌دهد. در نواحی با طول موجهای کمتر از ۴۵۰ نانومتر، به علت بازترکیب سطحی ناحیه جلوی سلول و در نواحی با طول موجهای بیشتر از ۵۵۰ نانومتر به دلیل بازترکیب سطحی اتصال پشتی سلول، کاهش ضریب جذب در طول موجهای بلندتر و طول نفوذهای کوتاهتر، مقدار EQE ناچیز است. کاهش EQE در حالت کلی به دلیل بازتابش و کاهش طول نفوذ می‌باشد.

افزایش محتوی ژرمانیوم در ترکیب، منجر به افزایش بازده کوانتوم خارجی سلول میشود. بعلاوه، حداکثر EQE در طول موجهای کوتاهتر اتفاق می‌افتد، هرچند این اختلاف اندک است. ویژگی‌های نوری بررسی شده در شکل (۶)

تقدیر و تشکر

اینکار بر اساس برخی از نتایج بدست آمده از رساله جناب آقای دکتر مجید طغیانی تدوین شده است. از ایشان تشکر ویژه میکنیم.

بپردازیم. تحقیقات در توسعه سلولهای خورشیدی اکسید فلزی فیلم نازک بر اساس فرآیند توسعه سازگار با استانداردهای صنعتی هنوز در ابتدای راه است و هر دو جنبه شبیهسازی و ساخت نیاز به توسعه جدی دارند.

مراجع

- [1] I. Sullivan, B. Zoellner, and P. A. Maggard, "Copper(I)-based p-type oxides for photoelectro-chemical and photovoltaic solar energy conversion", *Chemistry of Materials*, Vol. 28, August 2016, pp. 5999 – 6016.
- [2] J. Kaur, O. Bethge, R.A. Wibowo, N. Bansal, M. Bauch, R. Hamid, E. Bertagnolli, T. Dimopoulos, "All-oxide solar cells based on electrodeposited Cu₂O absorber and atomic layer deposited ZnMgO on precious-metal-free electrode", *Solar Energy Mater Solar Cells*, Vol. 161, March 2017, pp. 449 – 459.
- [3] T. Minami, T. Miyata, Y. Nishi, "Cu₂O-based heterojunction solar cells with an Al-doped ZnO/oxide semiconductor/thermally oxidized Cu₂O sheet structure", *Solar Energy*, Vol. 105, July 2014, pp. 206 – 217.
- [4] M. Tadatsugu, N. Yuki, M. Toshihiro, "Cu₂O-based solar cells using oxide semiconductors", *Journal of Semiconductors*, Vol. 37, NO. 1, January 2016, pp. 014002 – 014007.
- [5] M. Tadatsugu, N. Yuki, M. Toshihiro, "Heterojunction solar cell with 6% efficiency based on an n-type aluminum–gallium–oxide thin film and p-type sodium-doped Cu₂O sheet", *Applied Physics Express*, Vol. 8, NO. 2, January 2015, pp. 022301 – 022305.
- [6] T. Minami, T. Miyata, Y. Nishi, "Relationship between the electrical properties of the n-oxide and p-Cu₂O layers and the photovoltaic properties of Cu₂O-based heterojunction solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 147, April 2016, pp. 85 – 93.
- [7] T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, "Impact of incorporating sodium into polycrystalline p-type Cu₂O for heterojunction solar cell applications", *Applied Physics Letters*, Vol. 105, NO. 21, November 2014, pp. 212104 – 212107.
- [8] Y.S. Lee, J. Heo, M.T. Winkler, S.C. Siah, S.B. Kim, R.G. Gordon, T. Buonassisi, "Nitrogen-doped cuprous oxide as a p-type hole-transporting layer in thin-film solar cells", *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 1, NO. 48, October 2013, pp. 15416 – 15422.
- [9] S. Hussain, C. Cao, G. Nabi, W.S. Khan, M. Tahir, M. Tanveer, I. Aslam, "Optical and electrical characterization of ZnO/CuO heterojunction solar cells", *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. Vol. 130, February 2017, pp. 372 – 377.
- [10] Y. Ievskaya, R. Hoyer, A. Sadhanala, K. Musselman, J.M.M. Driscoll, "Fabrication of ZnO/Cu₂O heterojunctions in atmospheric conditions: improved interface quality and solar cell performance", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 135, April 2015, pp. 43 – 48.
- [11] F. Meillaud, A. Shah, C. Droz, E. Vallat-Sauvain, C. Miazza, "Efficiency limits for single-junction and tandem solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 90, NO. 18–19, November 2006, pp. 2952 – 2959.
- [12] O. M. Bordun, I.Y. Kukharsky, B.O. Bordun, V.B. Lushchanets, "Dispersion of Refractive Index of β -Ga₂O₃ Thin Films", *Journal of Applied Spectroscopy*, Vol. 81, November 2014, pp. 771–775.
- [13] T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, "Effect of the thin Ga₂O₃ layer in n⁺-ZnO/n-Ga₂O₃/p-Cu₂O heterojunction solar cells", *Thin Solid Films*, Vol. 549, December 2013, pp. 65 – 69.
- [14] T. Yuki, M. Shinsuke, "Device simulation of cuprous oxide heterojunction solar cells", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, NO. 11, October 2015, pp. 112303 – 112307.
- [15] C. Dumitru, V.F. Muscurel, Ø. Nordseth, L. Fara, P. Sterian "Electrical modeling of the buffer layer for A Cu₂O/ZnO solar cell using Silvaco Atlas", *UPB scientific bulletin, Series B: Chemistry and materials science*, Vol. 79, NO. 2, January 2017, pp. 173 – 178
- [16] T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, "Efficiency enhancement using a Zn_{1-x}Ge_xO thin film as an n-type window layer in Cu₂O-based heterojunction solar cells", *Applied Physics Express*, Vol. 9, NO. 5, April 2016, pp. 052301 – 052306.

- [17] T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, "High-efficiency Cu_2O -based heterojunction solar cells fabricated using a Ga_2O_3 thin film as n-type layer", *Applied Physics Express*, Vol. 6, March 2013, pp. 044101 – 044105.
- [18] C. Malerba, F. Biccari, C.L.A. Ricardo, M. D'Incau, P. Scardi, A. Mittiga, "Absorption coefficient of bulk and thin film Cu_2O ", *Sol Energy Mater Sol Cells*, Vo. 95, NO. 10, October 2011, pp. 2848 – 2854.
- [19] M. Rizi, M.H. Shahrokh Abadi, M. Ghaneii, "Two dimensional modeling of Cu_2O heterojunction solar cells based-on - Ga_2O_3 buffer", *Optik*, Vol. 155, February 2018, pp. 121 – 132
- [20] P. Marie, X. Portier, J. Cardin, "Growth and characterization of gallium oxide thin films by radiofrequency magnetron sputtering", *Wiley Physica status solidi (a)*, Vol. 205, NO. 8, August 2008, pp.1943 – 1946
- [21] R. David Prabu, S. Valanarasu, V. Ganesh, M. Shkir, S. AlFaify, A. Kathalingam, "Investigation of molar concentration effect on structural, optical, electrical, and photovoltaic properties of spray-coated Cu_2O thin films", *Surface Interface Analytical Wiley Analytical Science*, Vol. 50, January 2018, pp. 346 – 351.
- [22] N. Plankensteiner, W. Kautek, T. Dimopoulos, *Aqueous Spray Pyrolysis of Cu_2O Films: Influence of Reducing Agent and Acetic Acid Addition*, *Wiley Journal of Chemistry of Nanomaterials for Energy, Biology, and More*, Vol. 6, NO. 4, April 2020, pp. 663-671.