

# مدل سازی و تجزیه و تحلیل ساختار سلول خورشیدی دویوندی با شکاف انرژی مستقیم مبتنی بر الگوریتم مونت کارلو گروهی

شیرین درخشان نیا<sup>۱</sup> محسن شکیب<sup>۲</sup> مریم شکیب<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول- دزفول- ایران  
[sh.derakhshan@jsu.ac.ir](mailto:sh.derakhshan@jsu.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول- دزفول- ایران  
[m.shakiba@jsu.ac.ir](mailto:m.shakiba@jsu.ac.ir)

۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول- دزفول- ایران  
[shakiba@jsu.ac.ir](mailto:shakiba@jsu.ac.ir)

**چکیده:** در این تحقیق، هدف، طراحی و ارائه یک الگوریتم جهت مدل سازی و شبیه سازی مونت کارلو سلول های خورشیدی دویوندی و پیاده سازی نرم افزاری آن است. امروزه با توجه به اهمیت طراحی سلول های خورشیدی با بهترین راندمان، راهکار استفاده از سلول های خورشیدی چندپیوندی در طراحی و ساخت پنل های خورشیدی تبدیل به امری اجتناب ناپذیر شده است. گرچه نیل به این هدف، افزایش پیچیدگی ساختار سلول را به همراه خواهد داشت، لیکن، شبیه سازی این افزاره و تجزیه و تحلیل رفتار الکتریکی و الکترونیکی آن پیش از آغاز فرآیند ساخت، روند دستیابی به سلول بهینه را تسریع خواهد کرد. با توجه به ماهیت تصادفی حرکت الکترون ها و حفره ها در سلول خورشیدی و توانایی الگوریتم مونت کارلو در مدل سازی پدیده های تصادفی، استفاده از این روش اطلاعات دقیق تری از مشخصه های افزاره نسبت به روش های رانش-دیفیوژن و هیدرودینامیک فراهم خواهد نمود. در این تحقیق، به منظور انطباق بیشتر رفتار افزاره مدل سازی شده با نمونه واقعی، از روش مونت کارلو گروهی جهت شبیه سازی حرکت ذرات در سلول دویوندی استفاده شده است. از جمله مشخصه های الکتریکی و الکترونیکی مستخرج از سلول مورد مطالعه، عبارتند از: توزیع غلظت حامل های ذاتی و نوری در طول افزاره، توزیع انرژی حامل ها در طول افزاره، توزیع پتانسیل الکتریکی و منحنی جریان-ولتاژ سلول. در این تحقیق از نرم افزار متلب، نسخه R2018b(9.5.0)، به منظور شبیه سازی سلول خورشیدی دویوندی، مبتنی بر روش مونت کارلو گروهی استفاده شده است.

**واژه های کلیدی:** سلول خورشیدی دویوندی، مونت کارلو گروهی، فرآیندهای پراکندگی، توزیع انرژی ذرات، توزیع غلظت حامل های نوری، راندمان تبدیل

**نوع مقاله:** پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.2.139

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۱/۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۸

نام نویسنده ی مسئول: دکتر مریم شکیب

نشانی نویسنده ی مسئول : ایران- دزفول- روبه روی پایگاه چهارم شکاری دزفول- دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول- دانشکده ی مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

نظر به افزایش روند تولید گازهای گلخانه‌ای و کاهش منابع سوخت فسیلی، امروزه استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست از جمله مهمترین استراتژی کشورهای در حوزه انرژی است [۱-۴]. در این میان خورشید به عنوان یک رآکتور هسته‌ای طبیعی، پاک و مقرون به صرفه می‌تواند آینده‌ی انرژی و سوخت را متحول سازد. همچنین، از آنجا که سلول‌های خورشیدی مهمترین مؤلفه‌های تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی در یک مزرعه خورشیدی هستند، طراحی ساختار بهینه جهت دستیابی به راندمان بالا در این افزارها همواره مورد توجه محققین بوده است [۵-۷]. هدف اصلی تحقیقات انجام شده در این زمینه، تولید مقرون به صرفه این افزار با بازدهی بالا است [۸]. در این میان، ساخت این افزارهای نیمه‌هادی وقت گیر و هزینه بر بوده و تولید آن‌ها با مشخصات مطلوب، نیازمند مطالعات بسیار و در نظر گرفتن اثر عوامل مختلف بر عملکرد آن‌ها است. در این راستا، پیش از آغاز فرآیند ساخت، ابتدا ساختار افزار باید به روش مطلوب مدل سازی و شبیه سازی شده و پس از بررسی اثر عوامل مختلف بر عملکرد آن، مقدمات فرآیند ساخت مهیا گردد. در بسیاری از تحقیقات انجام شده تا کنون، مدل سازی و شبیه سازی سلول مبتنی بر معادلات دیفرانسیلی انجام شده است. در تحقیق انجام شده در سال ۲۰۰۵، اثر شکاف باند انرژی مواد نیمه‌هادی مختلف در عملکرد سلول‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت [۹]. در سال ۲۰۰۶ ساختار سلول خورشیدی دو پیوندی GaInP / GaAs بر روی بسترهای Si / SiGe با هدف دستیابی به ولتاژ مدار باز بالا بهینه شد [۱۰]. در سال ۲۰۰۹ با استفاده از شبیه سازی عددی، راندمان تبدیل سلول‌های خورشیدی با اتصال دوگانه InGaP / GaAs که شامل دیود تونلی نیز بودند، بهبود داده شد [۱۱]. در سال ۲۰۱۰ شبیه سازی عددی و مدل سازی سلول‌های خورشیدی چاه کوانتومی گالییم آرسناید انجام شد [۱۲]. در سال ۲۰۱۴ ساختار بهینه‌ای برای سلول‌های خورشیدی دو پیوندی AlGaAs/GaAs به کمک شبیه سازی عددی ارائه گردید [۱۳]. در سال ۲۰۱۷ طراحی و ارزیابی سلول‌های خورشیدی دو پیوندی InGaP/AlGaInP بدون لایه ARC با استفاده از نرم افزار سیلوکو شبیه سازی شد [۱۴و۱۵]. سپس در سال ۲۰۱۹ ساختار سلول‌های خورشیدی چند پیوندی مبتنی بر نیمه هادی GaSb بر روی بسترهای سیلیکونی مورد مطالعه قرار گرفتند [۱۶]. همچنین در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۳، مسیر عبور نور از درون افزارهای میکرو اپتوالکترونیکی بر اساس الگوریتم مونت کارلو بررسی شده است [۱۷و۱۸]. تولید انرژی فتوولتائیک در سلول خورشیدی شامل جذب نور، تولید زوج الکترون-حفره در ماده نیمه‌هادی و جداسازی حامل‌های بار در پیوند p-n برای تولید جریان الکتریکی است

[۱۹]. با توجه به ماهیت تصادفی حرکت الکترون‌ها و حفره‌ها در افزارهای نیمه‌هادی و نیز با توجه به توانایی الگوریتم مونت کارلو در مدل سازی و شبیه سازی پدیده‌های تصادفی، استفاده از این روش اطلاعات دقیق تری از مشخصه‌های سلول خورشیدی نسبت به روش‌های مدل سازی مبتنی بر معادلات دیفرانسیل مانند رانش-دیفیوژن و هیدرودینامیک فراهم خواهد نمود [۲۰-۲۳]. چراکه تمامی مشخصه‌های الکتریکی سلول از جمله توزیع پتانسیل و میدان الکتریکی و نمودار جریان-ولتاژ سلول وابسته به نحوه حرکت ذرات در آن است. علاوه براین، برخی مشخصه‌های الکترونیکی سلول از جمله سرعت تک تک ذرات و یا انرژی ذرات در افزار، به کمک روش‌های رانش-دیفیوژن و هیدرودینامیک قابل محاسبه و استخراج نیستند [۲۴-۲۶]. در این تحقیق، به کمک روش مونت کارلو گروهی، با استفاده از نرم افزار متلب، انواع فرآیندهای پراکندگی از جمله پراکندگی نوری و پراکندگی ناخالصی برای ذرات در حال حرکت در افزار، مدل سازی شده اند. در شکل ۱ روال اجرای الگوریتم مونت کارلو گروهی به‌طور عام نشان داده شده است [۲۷].



شکل (۱): الگوریتم مونت کارلو گروهی

بر اساس الگوریتم ارائه شده در شکل ۱، نخستین مرحله، پیکربندی ساختار و تخصیص مقادیر اولیه به متغیرها است. در زیرروال پیکربندی، پس از مشخص کردن نوع و تعداد لایه ها و

$$k = \frac{\sqrt{2m^* E_k}}{\hbar} \quad (5)$$

$$k_x = k \sin \theta \cos \phi \quad (6)$$

$$k_y = k \sin \theta \sin \phi$$

$$k_z = k \cos \theta$$

که در آن  $\theta$  و  $\phi$  با استفاده از اعداد تصادفی  $r_1$  و  $r_2$  طبق رابطه (۷) محاسبه می شوند:

$$\phi = 2\pi r_1$$

$$\cos \theta = 1 - 2r_2 \quad (7)$$

$$\sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta}$$

از آنجاییکه از ابرذرات به عنوان نماینده دسته ای از ذرات واقعی، برای شبیه سازی استفاده می شود، چگالی حامل ها بر اساس رابطه (۸) بدست می آید:

$$n(i) = N(i) \times \frac{N_{pp}}{\Delta x} \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $n(i)$  غلظت ذرات واقعی،  $N(i)$  غلظت ابر ذرات و  $N_{pp}$  تعداد ابر ذرات در یک گام مکانی  $\Delta x$  است [۲۸]. پس از پیکربندی ساختار و تعیین مقادیر اولیه، الگوریتم مونت کارلو در حلقه ای شامل چهار زیرروال اصلی رانش و برخورد تصادفی ذرات، به روز رسانی مقادیر متغیرها، تخصیص بار به گره ها و حل معادله پواسن تا رسیدن به شرایط پایدار، تکرار می گردد. در زیرروال رانش و برخورد تصادفی ذرات، ذرات همراه با رانش و پراکندگی-های پی درپی در طول سلول حرکت می کنند. در این تحقیق انواع فرایندهای پراکندگی از جمله پراکندگی ناخالصی<sup>۱</sup> و پراکندگی فونونی<sup>۲</sup> برای ذرات مدل سازی شده است. پس از مشخص شدن نوع فرآیند پراکندگی، جهت و اندازه بردار سرعت ذره و همچنین مدت زمان حرکت ذره پیش از وقوع برخورد بعدی (مدت زمان رانش ذره) به شکل تصادفی تعیین می گردد. در هر گام زمانی که بر اساس مشخصات قطعه معین می شود، احتمال وقوع یک یا چند فرآیند پراکندگی برای ذره وجود خواهد داشت. در زیرروال به روز رسانی مقادیر متغیرها، ذراتی که از الکتروادهای سلول بیرون رفته اند، ذراتی که با برخورد به دیواره های سلول بازتاب یافته اند و همچنین زوج الکترون-حفره هایی که بر اثر تابش تولید شده اند در هر گام زمانی مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. همچنین در زیرروال تخصیص بار به گره ها، در هر گام زمانی، با توجه به مکان ذرات در فضای مش بندی شده سلول، به هر مش، بارالکتریکی مشخصی تخصیص داده می شود و نهایتاً در زیرروال حل معادله پواسن، با استفاده از چگالی بار تخصیص یافته به تمامی مش های ساختار، معادله پواسن به منظور محاسبه توزیع پتانسیل در طول سلول حل می گردد. در این تحقیق، معادله دیفرانسیلی پواسن به کمک روش تفاضل محدود، گسسته شده و سپس با استفاده از روش عددی گام حل شده است. حرکت ذرات در طول سلول، مستلزم وجود میدان الکتریکی است. در این تحقیق میدان

ابعاد هر یک از آن ها، افزاره مش بندی می گردد. انتخاب گام زمانی مناسب در شبیه سازی گروه ذرات و همچنین اندازه مش ها از جمله پارامترهای کلیدی در همگرایی الگوریتم مونت کارلو محسوب می شوند. به منظور انتخاب مناسب گام زمانی ( $\Delta t$ ) و مکانی باید ملاحظات زیر را در نظر گرفت:

الف)  $\Delta t$  بسیار کوچکتر از معکوس فرکانس پلاسمایی سلول ( $\frac{1}{w_p}$ ) و مطابق رابطه (۱) در نظر گرفته شود:

$$w_p = \sqrt{\frac{e^2 n}{\epsilon_s m^*}} \quad (1)$$

که در آن،  $w_p$  فرکانس پلاسمایی،  $e$  اندازه بار الکتریکی،  $\epsilon_s$ ، ثابت دی الکتریک ماده،  $m^*$ ، جرم مؤثر و  $n$ ، چگالی ماده است. در این تحقیق با توجه به اینکه ماده بصورت دو ذره ای (الکترون و حفره) شبیه سازی شده، در رابطه (۱) کوچکترین جرم مؤثر که مربوط به الکترون هاست جایگذاری شده است.

ب) اندازه مش ها توسط تغییرات بار مشخص می شود. از این رو اندازه مش ها باید از کوچکترین طول موج تغییرات بار کوچکتر باشد. طبق رابطه (۲) کوچکترین طول موج تغییرات بار توسط طول دیبای ( $\lambda_D$ ) بدست می آید:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s k_B T}{e^2 n}} \quad (2)$$

در این رابطه،  $k_B$ ، ثابت بولتزمن،  $T$ ، دمای کلون،  $\epsilon_s$ ، ثابت دی الکتریک،  $n$ ، چگالی حامل و  $e$  اندازه بار الکتریکی است. بنابراین، اندازه مش ها و گام زمانی به صورت مستقل قابل محاسبه هستند. ذکر این نکته ضروری است که به منظور همگرایی الگوریتم، حداکثر فاصله ای که حامل ها می توانند در طول یک گام زمانی  $\Delta t$  انتشار یابند  $L_{max}$ ، باید کوچکتر از فاصله مش ها در نظر گرفته شود.

$$L_{max} = V_{max} \times \Delta t \quad (3)$$

که در آن  $V_{max}$  ماکزیمم سرعت حامل ها است. همچنین  $L_{max}$  حداکثر فاصله ای که حامل ها می توانند در طول یک گام زمانی  $\Delta t$  طی کنند. همچنین در روال مقادیر اولیه، مقادیر پارامترها از جمله انرژی اولیه ذرات، بردار موج و مکان اولیه ی هر ذره تعیین می گردد. انرژی اولیه ذرات  $E_k$  بر اساس رابطه (۴) و با فرض تعادل گرمایی تعیین می شود.

$$E_k = -k_B T \ln(r) \quad (4)$$

که در آن  $k_B$  ثابت بولتزمن،  $T$  دمای حامل و  $r$  یک عدد تصادفی است که بصورت یکنواخت بین صفر و یک قرار دارد. در مرحله بعد با استفاده از مقادیر انرژی ذرات ( $E_k$ )، اندازه بردار موج هر ذره ( $k$ ) و مؤلفه های ( $k_x$ ،  $k_y$  و  $k_z$ ) آن طبق روابط ۵ و ۶ محاسبه می گردند:

اتم‌ها در جهت مخالف هم لرزش می‌کنند. انرژی این پراکندگی در حد دمای محیط بوده و غیر الاستیک است. پراکندگی فونونی غیر قطبی می‌تواند باعث گذر بین دو دره<sup>۲</sup> شود، در ضمن چون ممنوع زیادی برای انتقال بین دو دره نیاز است، تنها فونون‌هایی با بردار موج نزدیک به مرز نواحی می‌توانند در انتقال بین دره‌ای شرکت کنند. انرژی این فونون‌ها کمی کمتر از انرژی آن ناحیه است. این انرژی برابر  $\hbar w_{ij}$  است [۳۵-۳۸].

در این نوع پراکندگی نیز  $\varphi$  و  $\cos \theta$  با تولید اعداد تصادفی تولید می‌شوند. برای این پراکندگی باید دو نوع نرخ گذر و نرخ پراکندگی تعریف شود، زیرا پراکندگی زمانی که باعث گذر بین دره‌ای<sup>۲</sup> می‌شود در مقایسه با زمانی که گذر بین دره‌ای رخ نمی‌دهد، حالت انرژی بسیار متفاوتی به ذره منتقل می‌کند. محاسبه نرخ گذر و نرخ پراکندگی برای حالتی که پراکندگی منجر به گذر بین دره‌ای نمی‌شود به ترتیب طبق روابط (۱۱) و (۱۲) انجام شده است:

$$S(k, k') = \frac{\pi D_0^2}{\rho w_0 \Omega} \left( n_0 + \frac{1}{2} \mp \frac{1}{2} \right) \delta \left( \frac{\hbar^2 q^2}{2m^*} \pm \frac{\hbar^2 k q \cos \theta'}{m^*} \mp \hbar w_0 \right) \quad (11)$$

$$W(k) = \frac{\pi D_0^2}{\rho w_0} \left( n_0 + \frac{1}{2} \mp \frac{1}{2} \right) N(E_k \pm \hbar w_0) \quad (12)$$

در رابطه (۱۱) و (۱۲)،  $D_0$ ، ثابت پتانسیل تجزیه نوری،  $w_0$ ، فرکانس زاویه‌ای،  $\rho$ ، چگالی جرم ماده،  $\Omega$ ، حجم کریستال،  $q$ ، بار الکتریکی،  $n$ ، غلظت الکترون،  $m^*$ ، جرم مؤثر و  $N$  چگالی حالت است. همچنین در شرایطی که گذر بین دره‌ای اتفاق می‌افتد، محاسبه نرخ گذر و نرخ پراکندگی به ترتیب طبق روابط (۱۳) و (۱۴) انجام شده است:

$$S(k, k') = \frac{\pi D_{ij}^2 Z_j}{\rho w_{ij} \Omega} \left[ n(w_{ij}) + \frac{1}{2} \mp \frac{1}{2} \right] \delta(E_{k'} - E_k \mp \hbar w_{ij} + \Delta E_{ij}) \quad (13)$$

$$W(k) = \frac{\pi D_{ij}^2 Z_j}{\rho w_{ij} \Omega} \left[ n(w_{ij}) + \frac{1}{2} \mp \frac{1}{2} \right] N(E_k \pm \hbar w_{ij} - \Delta E_{ij}) \quad (14)$$

که در آن‌ها ثابت  $D_{ij}$ ، انحراف پتانسیل و  $Z$ ، شماره دره نهایی موجود برای پراکندگی را نشان می‌دهد.

از سوی دیگر فرآیند پراکندگی فونونی نوری قطبی، در حالتی که لرزش اتم‌ها در خلاف جهت یکدیگر باعث ایجاد امواج الکترومغناطیسی شود، این امواج علاوه بر میدان ایجاد شده توسط یون‌ها روی حرکت الکترون‌ها تأثیر می‌گذارند و پراکندگی فونونی را به شکل قطبی تبدیل می‌کند [۲۸]. ساختار سلول دو پیوندی مدل سازی شده اعم از ضخامت لایه‌های  $p$  و  $n$ ، ضخامت نواحی تخلیه ( $SC^v$ ) و همچنین غلظت نواحی مختلف، در شکل ۲ نشان داده شده است. قابل ذکر است که در شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار متلب، نور خورشید به سلول Aias تابیده شده و بدین

الکتریکی هم با استفاده از تحریک خارجی و هم به کمک گرادیان غلظت حامل‌ها در درون افزاره بدست آمده است. به منظور محاسبه میدان الکتریکی، پس از تخصیص بار به نقاط مش در سرتاسر سلول و همچنین تعیین شرایط مرزی که از مهمترین آن‌ها پتانسیل خارجی اعمال شده به الکترودهای سلول است، معادله پواسن حل شده و پس از آن با محاسبه گرادیان پتانسیل، توزیع میدان الکتریکی بدست آمده است [۲۹-۳۲].

در بخش دوم تحقیق، فرآیندهای پراکندگی، روابط حاکم بر رانش-دیفیوژن ذرات و شرایط مرزی سلول در الگوریتم مونت کارلو گروهی ارائه شده است. در بخش سوم، شبیه‌سازی رفتار الکتریکی و الکترونیکی سلول اعم از توزیع انرژی و توزیع غلظت ذرات در شرایط تاریک و تابش، بررسی تأثیر دمای سلول بر غلظت حامل-های نوری و محاسبه و ترسیم منحنی جریان-ولتاژ سلول انجام شده است. در بخش چهارم تحقیق، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو سلول خورشیدی دو پیوندی ارائه شده است.

## ۲- مدل سازی فرآیندهای پراکندگی ذرات در الگوریتم مونت کارلو گروهی

در این تحقیق سلول خورشیدی دو پیوندی با ساختار p-n-p-n از جنس Aias / GaAs در شرایط تاریک و تابش با استفاده از الگوریتم مونت کارلو گروهی شبیه‌سازی شده است. در مدل سازی رانش و پراکندگی متوالی حامل‌ها در طول سلول، از فرآیندهای ناخالصی و فونونی استفاده شده است [۳۳، ۳۴]. در فرآیند پراکندگی ناخالصی، ذره با ذرات ناخالصی موجود در ماده برخورد می‌کند. در رابطه زیر،  $S(k, k')$  رابطه نرخ گذر بردار  $k$  ذره پس از پراکندگی به  $k'$  را نشان می‌دهد که طبق رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$S(k, k') = \frac{2\pi}{\hbar} | \langle k' | H' | k \rangle |^2 \delta(E_{k'} - E_k \pm \hbar w) \quad (9)$$

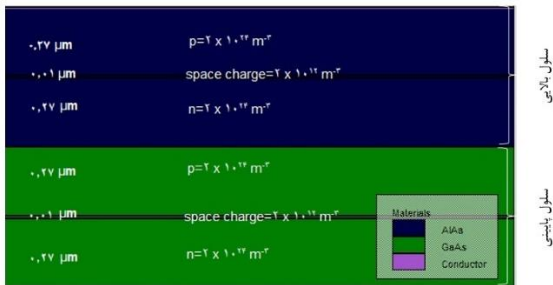
که در آن  $| \langle k' | H' | k \rangle |$  ماتریس تبدیل بردار  $k$  به  $k'$ ، براساس قانون همیلتن،  $\hbar$ ، ثابت کاهیده پلانک ( $\hbar / 2\pi$ )،  $E_{k'}$  و  $E_k$ ، انرژی ذرات،  $\delta$ ، تابع دلتای دیراک و  $W$  نرخ پراکندگی است. نرخ پراکندگی برحسب انرژی ذره با استفاده از احتمال پراکندگی طبق رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

$$W(k) = \frac{\Omega}{2\pi^3} \int S(k, k') dk' = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\infty S(k, k') dk' d\theta d\varphi \quad (10)$$

دیگر فرآیند پراکندگی که در این تحقیق برای مدل کردن حرکت حامل‌ها در سلول استفاده شده است، پراکندگی فونونی است. این پراکندگی شامل سه نوع فرآیند پراکندگی فونونی نوری غیر قطبی<sup>۲</sup>،

پراکندگی فونونی نوری قطبی<sup>۴</sup> و پراکندگی فونونی آکوستیکی<sup>۵</sup> است. پراکندگی فونونی نوری غیر قطبی، زمانی رخ می‌دهد که

که سد پتانسیل از نفوذ بیشتر حامل های اکثریت حفره نیمه هادی p، به سمت نیمه هادی نوع n و همچنین انتشار حامل های اکثریت الکترون نیمه هادی n، به سمت نیمه هادی نوع p در هر دو زیرسلول جلوگیری می نماید. این درحالی است که در شکل ۵، با کاهش سد پتانسیل پیوند در هر دو زیرسلول، در وضعیت تابش، الکترون ها و حفره ها انرژی کافی برای عبور از نواحی تخلیه ساختار را بدست می آورند. به طوری که در نواحی تخلیه حامل های پراثری بیشتری تولید شده و به این ترتیب حداکثر غلظت و انرژی این حامل ها در نیمه هادی های نوع n از شکل ۵ (الف) و نیمه هادی های



شکل (۲): ساختار سلول خورشیدی دو پیوندی p-n-p-n استفاده شده در این تحقیق

نوع p از شکل ۵ (ب) به مراتب بیشتر از مقادیر معادل در شکل ۴ است. همچنین، حداکثر غلظت و انرژی این حامل ها در نیمه هادی های نوع p از شکل ۵ (الف) و نیمه هادی های نوع n از شکل ۵ (ب) کمتر از مقادیر معادل در شکل ۴ هستند. این پدیده نشان دهنده توانایی بیشتر جمع آوری حامل های نوری تولید شده توسط میدان در سلول های خورشیدی p-n-p-n بوده که منجر به افزایش جریان در این ساختار شده است. با توجه به شبیه سازی مبتنی بر ذره (و نه مبتنی بر معادلات دیفرانسیلی) که در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است، محاسبه انرژی تک تک ذرات افزاره از ویژگی های منحصر به فرد روش مونت کارلو است که در این تحقیق با استفاده از نرم افزار متلب انجام شده است. در واقع روش های مبتنی بر معادلات دیفرانسیلی در شبیه سازی حرکت ذرات (دریفت-دیفیوژن و هیدرودینامیک) که در نرم افزار سیلوکو استفاده می شوند، در محاسبه انرژی و سرعت ذرات به شکل فردی، ناتوان عمل می کنند.

توزیع پتانسیل الکتریکی در سلول دو پیوندی p-n-p-n در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل، پتانسیل داخلی پیوند در فاصله حدود  $0.3 \times 10^{-6}$  در زیرسلول AlAs و در فاصله حدود

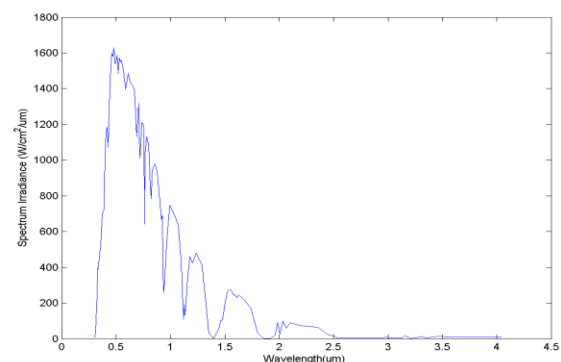
ترتیب نور از طریق نیمه هادی با شکاف انرژی بزرگتر، وارد سلول دو پیوندی شده است. در جداول ۱ و ۲ به برخی از شرایط اولیه استفاده شده در شبیه سازی اشاره شده است.

پارامترهای مورد نیاز برای AlAs و GaAs با توجه به روابط (۱)، (۲) و (۳) محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. با محاسبات انجام شده در جدول ۲ و مقایسه آن ها با شرایط روابط (۱)، (۲) و (۳) می توان نتیجه گرفت که انتخابی درست برای گام زمانی و گام مکانی در نظر گرفته شده است و میزان دقت و صحت آن در نتایج شبیه سازی آشکار است.

### ۳- شبیه سازی مونت کارلو سلول خورشیدی دو پیوندی AlAs/GaAs با ساختار p-n-p-n

طیف تابش نور خورشید تحت استاندارد AM1.5G بر حسب طول موج نور تابشی در نرم افزار متلب مطابق شکل ۳ شبیه سازی شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، نور خورشید از فوتون های با مقدار متغیری انرژی تشکیل شده است. وقتی فوتون ها به سلول خورشیدی برخورد می کنند، درصدی اندکی از آن ها منعکس شده، درصد اندکی نیز بدون جذب شدن از سلول عبور کرده و درصد عمده ای جذب می شوند. در این میان، فوتون های جذب شده، انرژی نوری را برای تولید جریان الکتریکی در سلول فراهم می کنند. در شبیه سازی های ارائه شده در این تحقیق از طیف تابشی AM1.5G استفاده شده است [۳۹]. در شکل ۳، طیف مذکور در نرم افزار متلب ترسیم شده است.

نمودار انرژی ذرات برای سلول خورشیدی دو پیوندی p-n-p-n به ترتیب در شرایط تاریک (عدم تابش نور) در شکل ۴ و انرژی حامل های الکترون و حفره نوری تولید شده در شرایط تابش نور در شکل ۵ نشان داده شده است.

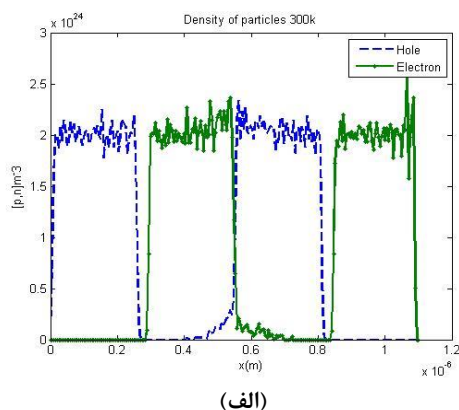


شکل (۳): طیف نور خورشید در استاندارد AM1.5G در متلب

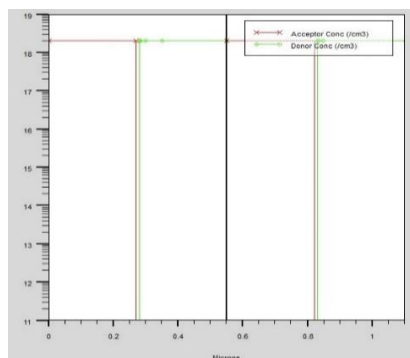
همان طور که در شکل ۴ مشاهده می گردد، در شرایط تاریک، وجود میدان داخلی پیوند مانع از دیفیوژن بیشتر حامل های اکثریت به سمت غلظت های کمتر شده و بواسطه سد پتانسیل پیوند، الکترون ها و حفره ها از محل پیوند رانده می شوند. به طوری



توزیع غلظت حامل های ذاتی در سلول دویپوندی مورد نظر در این تحقیق، در شکل ۷(الف) مبتنی بر مونت کارلو در نرم افزار متلب و در شکل ۷(ب) مبتنی بر روش دریفیت-دیفیوژن در نرم افزار سیلواکو شبیه سازی شده است. با توجه به انطباق نتایج بدست آمده صحت نتایج حاصل از مونت کارلو قابل استنباط است. لازم به ذکر است که در شکل ۷(الف) یکای غلظت برحسب یک بر مترمکعب و در شکل ۷(ب) یکای غلظت بر حسب یک بر سانتی متر مکعب است. در الگوریتم مونت کارلو، پس از هر گام زمانی، مکان ذرات به روزرسانی شده و بر اساس فاصله هر ذره از نقاط مش در ساختار مش بندی شده، به هر یک از نقاط مش میزان بار الکتریکی معینی تخصیص داده می شود. با محاسبه برآیند بار تخصیص یافته به هر یک از نقاط مش، غلظت الکترون ها و حفره ها محاسبه می گردد. از سوی دیگر، محاسبه توزیع حامل های نوری در طول قطعه که فقط در روش مونت کارلو قابل استخراج است، با چالش های متعددی همراه بود.



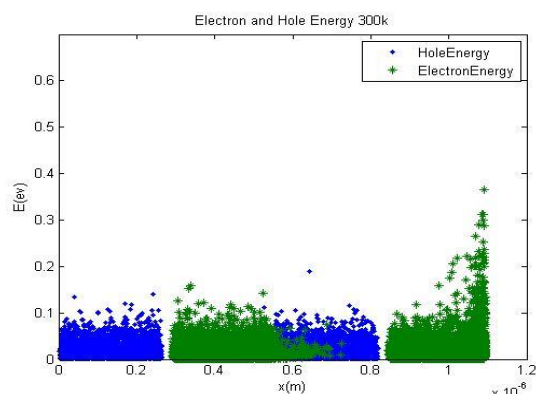
(الف)



(ب)

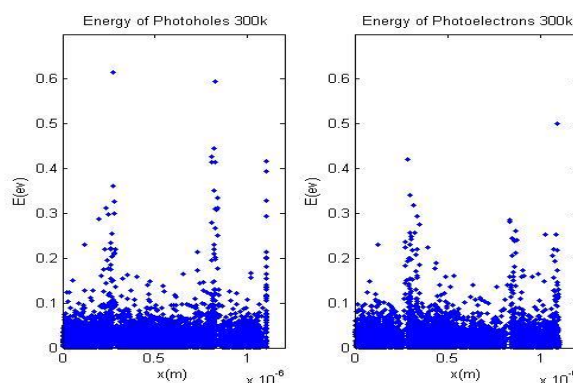
شکل ۷(الف): توزیع الکترون ها و حفره های ذاتی در شرایط تاریک (الف) مبتنی بر مونت کارلو در متلب و (ب) مبتنی بر دریفیت-دیفیوژن در سیلواکو

زیرا فرآیندهای تولید، رانش و بازترکیب، به شکل همزمان، توزیع این ذرات را تحت تأثیر قرار می دهد. توزیع این ذرات در شکل ۸ به ترتیب برای الکترون های نوری (الف) و حفره های نوری (ب)، تحت تأثیر دمای سلول، محاسبه و رسم شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی اثر دما بر غلظت حامل های نوری، اعم از الکترون ها و



شکل ۴(ب): انرژی ذرات الکترون و حفره در شرایط تاریک مبتنی بر مونت کارلو در متلب

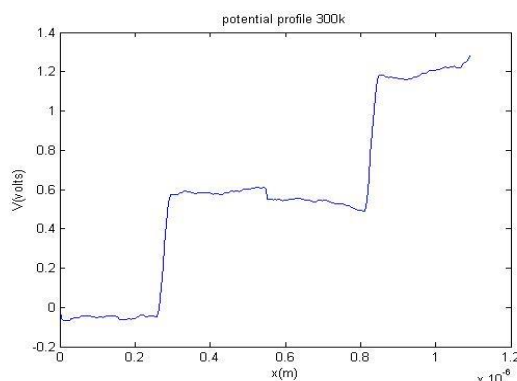
$0.9 \times 10^{-6}$  در زیرسلول GaAs افزایشی حدود  $0.6$  ولت داشته اند. توزیع پتانسیل در طول سلول، پس از گسسته سازی رابطه پواسن به روش تفاسل محدود و حل عددی آن به روش گامل محاسبه و رسم شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۵(الف): توزیع انرژی ذرات مبتنی بر مونت کارلو در متلب (الف) انرژی ذرات الکترون تولید شده در سلول در شرایط تابش و (ب) انرژی ذرات حفره تولید شده در سلول در شرایط تابش



شکل ۶(ب): پتانسیل سلول AlAs/GaAs مبتنی بر مونت- کارلو در متلب

از سوی دیگر مطابق شکل ۸، با تولید حامل های نوری در نواحی تخلیه و به فاصله یک طول دیبای از مرزهای آن در دو طرف، حامل ها تحت تأثیر میدان الکتریکی قوی این ناحیه تمایل دارند که به عنوان حامل اکثریت به سرعت وارد نواحی نوع n یا p شوند. در این میان با برخورد این حامل های نوری با یون های ساکن و نیز کاهش شدید میدان درست در مرز نواحی تخلیه، انباشتگی آن ها در نواحی مذکور قابل مشاهده است. ضمناً دیده می شود که در شکل ۸ الف ناحیه های p از سلول اول و دوم و در شکل ۸ ب ناحیه های n سلول اول و دوم چگالی حامل نوری کمتری نسبت به سمت مقابل خود یعنی ناحیه های n از سلول اول و دوم شکل ۸ الف و ناحیه های p از سلول اول و دوم شکل ۸ ب دارند. دلیل این امر باز ترکیب حامل های اقلیت تولید شده در آن نواحی است.

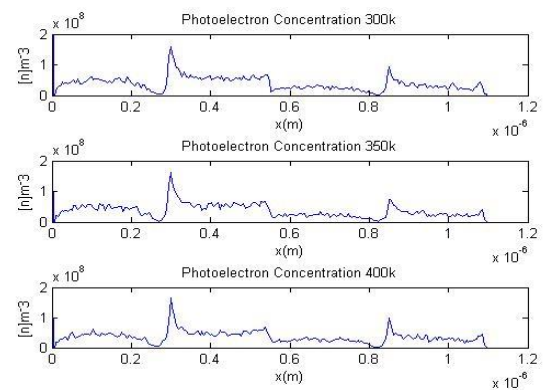
در شکل ۹، نمودار جریان-ولتاژ سلول خورشیدی دویپوندی با ساختار p-n-p-n و زیرسلول های تشکیل دهنده آن محاسبه و ترسیم شده است. مطابق این شکل، ولتاژ مدار باز سلول تک-پیوندی GaAs و AlAs به ترتیب برابر با ۱٫۴ و ۱٫۹ ولت و ولتاژ مدار باز سلول دویپوندی AlAs/GaAs برابر با ۳٫۸ ولت محاسبه شده است. افزایش شکاف انرژی، افزایش ولتاژ مدار باز را به همراه خواهد داشت. طبق این محاسبات، ولتاژ مدار باز AlAs حدود ۰٫۵ ولت بزرگتر از GaAs است. همچنین، ولتاژ مدار باز سلول دویپوندی اندکی بیش از مجموع ولتاژ مدار باز زیرسلول های تشکیل دهنده آن است. از سوی دیگر، با توجه به اینکه هر سلول فوتون های با انرژی بزرگتر از شکاف انرژی خود را جذب می کند، لذا افزایش شکاف انرژی، نرخ تولید نوری را کاهش داده و در نتیجه جریان اتصال کوتاه سلول با افزایش شکاف انرژی، کاهش می یابد. نتایج بدست آمده در این تحقیق نیز بر این ساز و کار صحت گذاشته است. با توجه به جدول ۳، چگالی جریان اتصال کوتاه AlAs حدود ۰٫۷۵ میلی آمپر کمتر از جریان اتصال کوتاه GaAs است. از سوی دیگر، محاسبه نشان داد که جریان اتصال کوتاه سلول دویپوندی محدود به جریان سلول AlAs است. محاسبه دیگر پارامترهای سلول اعم از ضریب پراکندگی و راندمان تبدیل طبق روابط (۱۵) و (۱۶)، در جدول ۴ ارائه شده اند. مطابق نتایج بدست آمده در این جدول، راندمان تبدیل سلول دو پیوندی نسبت به سلول GaAs، ۱۵٫۰۹٪، نسبت به سلول AlAs، ۱۴٫۱۹٪ و نسبت به مجموع بازده سلول های تک پیوندی GaAs و AlAs ۸٫۶۹٪ افزایش داشته است.

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \quad (15)$$

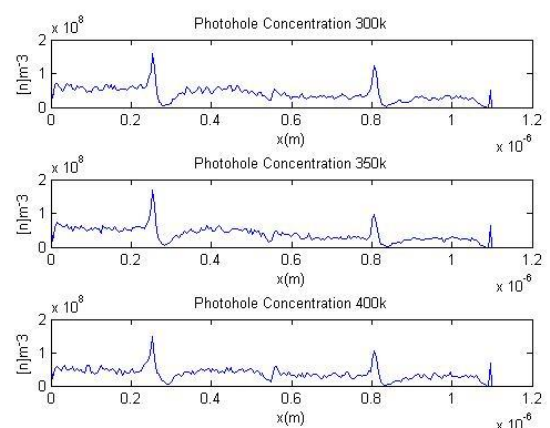
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{incident}} = \frac{V_m I_m}{P_{incident}} = \frac{FF \times V_{OC} I_{SC}}{P_{incident}} \quad (16)$$

قابل ذکر است که نتایج بدست آمده برای ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه سلول های مدل سازی شده، منطبق بر کتب مرجع بوده

حفره ها، روند کاهش غلظت این حامل ها با افزایش دما را نشان می دهد. با توجه به تأثیر مستقیم غلظت حامل های نوری بر جریان نوری در سلول، انتظار می رود افزایش دما، راندمان سلول خورشیدی را کاهش دهد. در این میان، نتایج عملی نیز کاهش راندمان سلول های خورشیدی با افزایش دمای سلول را نشان می دهد [۴۱، ۴۰]. میانگین غلظت الکترون ها و حفره های نوری در سه دمای ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ درجه کلوین محاسبه و در جدول ۳ و ارائه شده است. علاوه بر این، مطابق این شکل مشاهده می شود که غلظت حامل ها در نزدیکی الکترودها نسبت به دیگر مکان های سلول کمتر است. در واقع، حامل های نوری تولید شده در نزدیکی الکترودها در صورتی که هم نوع با حامل های اکثریت آن ناحیه باشند، با توجه به جهت میدان الکتریکی حاکم بر ساختار، از الکترودها مجاور خارج می شوند و در غیر این صورت اگر هم نوع با حامل های اقلیت آن ناحیه باشند، به سمت مخالف الکترودها مجاور خود حرکت خواهند کرد و بدین ترتیب، تحت هر دو سناریو، کاهش غلظت حامل های نوری از نواحی مذکور قابل انتظار است.



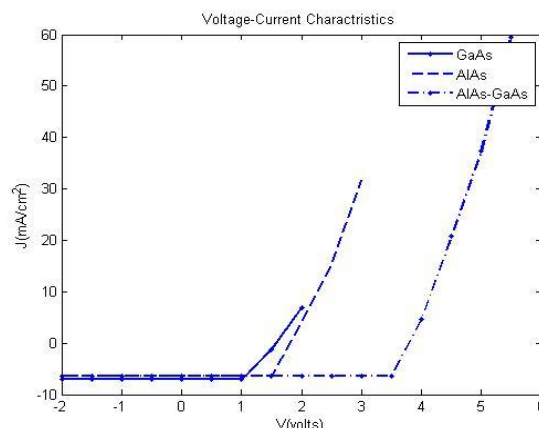
(الف)



(ب)

شکل (۸): توزیع غلظت حامل های نوری مبتنی بر مونت کارلو در متلب در دماهای مختلف (الف) غلظت الکترون های نوری تولید شده در سلول (ب) غلظت حفره های نوری تولید شده در سلول

و صحت مدل سازی مونت کارلو انجام شده در این تحقیق را تأیید می کنند.



شکل (۹): مشخصه جریان-ولتاژ سلول خورشیدی با ساختار p-n-p-n و زیرسلول های تشکیل دهنده آن

اساس، ولتاژ مدار باز سلول دویپوندی اندکی بیش از مجموع ولتاژ مدار باز زیرسلول های تشکیل دهنده آن است. قابل ذکر است که نتایج بدست آمده برای ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه سلول های مدل سازی شده، منطبق بر کتب مرجع بوده و صحت مدل سازی مونت کارلو انجام شده در این تحقیق را

تأیید می کنند. محاسبه جریان اتصال کوتاه سلول های مذکور نشان می دهد که چگالی جریان اتصال کوتاه سلول دویپوندی محدود به جریان سلول AlAs با شکاف انرژی بزرگتر و برابر با ۶,۴۳ میلی آمپر است. همچنین نتایج بدست آمده، راندمان تبدیل سلول دو پیوندی نسبت به سلول GaAs، ۱۵,۰۹٪، نسبت به سلول AlAs، ۱۴,۱۹٪ و نسبت به مجموع بازده سلول های تک پیوندی GaAs و AlAs ۸,۶۹٪ افزایش داشته است.

## مراجع

- [1] Wurfel, P., Physics of Solar Cells: from Principle to New Concepts, 1st ed., Germany, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
- [2] Rolland, A., Pedesseau, L., Kepenekian, M., Katan, C., Huang, Y., Wang, S., Cornet, C., Durand, O., Even, J., "Computational analysis of hybrid perovskite on silicon 2-T tandem solar cells based on a Si tunnel junction", Optic Quant Electron, 50, 2018.
- [3] J.A. Hutchby, R.J. Markunas, S.M. Bedair, "Material aspects of the fabrication of multi junction solar cells", Proceedings of the 14th Critical Reviews of Technology Conference. Arlington, pp. 40-61, 1985.
- [4] R. Aguinaldo, Modeling Soluion and Simulation for Advanced III-V Photovoltaics Based on Nanostructures, M.S. thesis, Dept. Material Science & Engineering, Rochester Institute of Technology, New York, United States, 2008.
- [5] Bahrami, A., Mohammadnejad, Sh., Soleimaninezhad, S., "Photovoltaic cells technology principles and recent developments", Optical and Quantum Electronics, Vol.45, no. 2, Pages 161-197, 2013.
- [6] Nozik, A.J., "multiplication and relaxation dynamics in quantum dots: applications to ultra-high efficiency solar photon conversion", IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, Waikoloa, HI, USA, 2016.
- [7] Sahoo, S., G., P.Nayak, P., Mishra, G., "An ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell with hetero tunnel junction", Superlattices and Microstructures, Vol. 95, Pages. 115-127, 2016.
- [8] Sharma, Sh., K. Jain, K., Sharma, A., "Solar Cells: In Research and Applications\_A Review", Materials Sciences and Applications, Vol. 6, no. 12, Pages. 1145-1155, 2016.
- [9] Zdanowicz, T., Rodziewicz, T., Zabkowska-Waclawek, M., "Theoretical analysis of the optimum energy band gap of semiconductors for fabrication of solar cells for applications in higher latitudes locations", Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol.87, pp. 757-769, 2015.
- [10] Lueck, M.R., Andre, C.L., Pitera, A.J., Lee, M.L., Fitzgerald, E.A., Ringel, S.A., "Dual junction GaInP/GaAs solar cells grown on metamorphic

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل سازی و شبیه سازی مونت کارلو سلول خورشیدی دو پیوندی، با هدف طراحی یک نرم افزار در متلب جهت کاهش چالش های فرآیند ساخت، انجام شده است. طراحی این نرم افزار به نحوی است که به آسانی قابل بسط به مدل سازی سلول های چندپیوندی شامل پیوندهای تونلی، لایه های بازتاب کننده نور و کانکت های شفاف نیمه هادی می باشد. در این نرم افزار به منظور مدل سازی رانش-دیفیوژن حامل ها در الگوریتم مونت کارلو، فرآیندهای پراکندگی ناخالصی و فونونی (فونونی آکوستیکی، فونونی نوری غیرقطبی و فونونی نوری قطبی) استفاده شده اند. همچنین معادله پواسن با استفاده از روش تفاضل محدود گسسته سازی و پس از آن به روش عددی گامل حل شده است. با استفاده از این نرم افزار طراحی شده در محیط متلب، مشخصه های الکترونیکی مبتنی بر ذره، مانند توزیع انرژی ذرات، توزیع سرعت ذرات و توزیع غلظت حامل های نوری که در نرم افزارهای مرجعی مانند سیلواکو و کامسول امکان استخراج آن ها امکان پذیر نیست (بواسطه مدل سازی مبتنی بر معادلات دیفرانسیلی در این نرم افزارها)، محاسبه و تحلیل شده اند. نتایج حاصل از شبیه سازی اثر دما بر غلظت حامل های نوری، اعم از الکترون ها و حفره ها، روند کاهشی غلظت این حامل ها و در نتیجه کاهش جریان نوری سلول با افزایش دما را نشان داد. همچنین مشخصات الکتریکی سلول دویپوندی AlAs/GaAs با ساختار p-n-p-n و زیرسلول های تشکیل دهنده آن، اعم از ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ضریب پرکنندگی و راندمان تبدیل محاسبه و مقایسه شده اند. طبق نتایج بدست آمده، ولتاژ مدار باز سلول تک پیوندی GaAs و AlAs به ترتیب برابر با ۱,۴ و ۱,۹ ولت و ولتاژ مدار باز سلول دویپوندی AlAs/GaAs برابر با ۳,۸ ولت محاسبه شده است که بر این



[۱۵] عباسیان سیحان، صباغی ندوشن رضا، "طراحی سلول

خورشیدی دو پیوندی InGaP/GaAs بدون لایه ARC با بازده

بالا"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران (انجمن مهندسين

برق و الکترونیک ایران)، دوره ۱۶، صفحه ۸۷-۹۲، ۱۳۹۸

[16] Tourneta, J., Parolaa, S., Vauthelina, A., Montesdeoca Cardenesb, D., Soresic, S., Martineza, F., Lub, Q., Cuminala, Y., Carringtond, P.J. , Decobertc, J., Krierb, A., Rouillarda, Y. , Tournie, E., "GaSb-based solar cells for multi-junction integration on Si substrates", Solar Energy Materials and Solar Cell, Vol. 191, pp. 444-450, 2019.

[17] Demers, H., P.Demers, N., Couture, A. R., Joly, D., Guilmain, M., Jonge, N. and Drouin, D. "Three-Dimensional Electron Microscopy Simulation with the CASINO Monte Carlo Software". Vol. 33, pp. 135-146, 2011.

SiGe/Si substrates with high open circuit voltage", IEEE Electron Device Lett. 27, 142-144, 2006.

[11] Leem, J.W., Lee, Y.T., Yu, J.S., "Optimum design of InGaP/GaAs dual-junction solar cells with different tunnel diodes", Opt. Quant. Electron. Vol. 41, pp. 605-612. 2009.

[12] Kailuweit, P., Kellenbenz, R., Philipps, S. P., Guter, W., Bett, A. W., Dimroth, F., "Numerical simulation and modeling of GaAs quantum-well solar cells". Journal of Applied Physics , Vol. 107, Issue 6, 2010.

[13] Jouyandehn, N., Bahrami, A., Mohammadnejad, S., "Optimized structure of AlGaAs/ GaAs double junction solar cells", Journal of Modern Optics, Vol. 61, pp. 568-575, 2010.

[14] Abbasian, s., Sabbaghi, R., (2017). "Design and evaluation of ARC less InGaP/AlGaInP DJ solar cell", J. Light Electron Opt. Vol. 136, pp. 487-496, 2017.

جدول (۱): پارامترهای در نظر گرفته شده در طراحی سلول دو پیوندی

تعداد تکرارها	گام مکانی $A^\circ$	گام زمانی $fs$	غلظت ناحیه i $m^{-3}$	غلظت نواحی p و n در هر دو زیرسلول $m^{-3}$	طول افزاره $\mu m$	دما در طول ساختار	سلول دو پیوندی
۵۰۰	۵۰	۲	$3 \times 10^{12}$	$3 \times 10^{22}$	$2 \times 0.55$	یکنواخت	AlAs/GaAs

جدول (۲): پارامترهای محاسبه شده برای طراحی

$L_{max} ) m ($	$\omega_p ) \frac{rad}{s} ($	$\lambda_D ( A^\circ )$	زیر سلول های ساختار دو پیوندی
$2 \times 10^{-9}$	$8.56 \times 10^{12}$	$\approx 30$	GaAs
$2 \times 10^{-9}$	$7.55 \times 10^{12}$	$\approx 26$	AlAs

جدول (۳): میانگین غلظت الکترون ها و حفره هوری تولید شده تحت تأثیر دمای سلول

میانگین غلظت الکترون های نوری تولید شده ( $m^{-3}$ )	میانگین غلظت حفره های نوری تولید شده ( $m^{-3}$ )	دمای سلول (درجه کلوین)
$4.0203 \times 10^7$	$4.0207 \times 10^7$	۳۰۰
$3.8198 \times 10^7$	$3.8203 \times 10^7$	۳۵۰
$3.6797 \times 10^7$	$3.6802 \times 10^7$	۴۰۰

جدول (۴): محاسبه ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ضریب پرکنندگی و راندمان تبدیل سلول دو پیوندی و زیر سلول های تشکیل دهنده آن

$\eta$	FF	$I_m$	$V_m$	$I_{sc}$	$V_{oc}$	ساختار پیوند	نوع ماده
۵۵.۵٪	۰.۵۴	۵	۱.۱	۷.۱۷	۱.۴	p-n	GaAs
۶.۴٪	۰.۵۲	۴	۱.۶	۶.۴۲	۱.۹	p-n	AlAs
۲۰.۵۹٪	۰.۸۴	۵.۸	۳.۵۵	۶.۴۳	۳.۸	p-n-p-n	AlAs/GaAs

[۳۶] علیرضا شیخی فینی، محسن پارسا مقدم، محمد کاظم شیخ الاسلامی، "برنامهریزی توسعه منابع انرژی گسترده با بهره گیری از شبیه سازی مونت کارلو در فضای نظریه بازی ها با اطلاعات ناقص"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۲، شماره ۱، ۱۳۹۴.

[۳۷] محسن شکیبا، مریم شکیبا "مدل سازی ریاضی و شبیه سازی فرآیند لایه نشانی اکسید روی در پلاسمای Ar/O<sub>2</sub>"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۸، شماره ۴، ۱۳۹۹.

[۳۸] جمیله شهیدی راد، مهدی نیرومند، رحمت اله هوشمند، "محاسبه نرخ خرابی و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم فتوولتائیک به روش مونت کارلو با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۸، شماره ۳، صفحه ۱۲۱۵-۱۲۲۵، ۱۳۹۷.

[39] Green, M. A., "solar cells: Operating Principles, Technology and System Applications", New Jersey: Prentice-Hall, 1982.

[40] Friederike Kersten et al, "Degradation of multicrystalline silicon solar cells and modules after illumination at elevated temperature", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 142, pp. 83-86, 2015.

[41] Jeanette Lindroos, Hele Savin, "Review of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 147, pp. 115-126, 2016.

[18] D. Bronstein, N., Li, L., Xu, L., Yao, Y., E. Ferry, V., Alivisatos, A. P. and Nuzzo, R. G., "Luminescent Solar Concentration with Semiconductor Nanorods and Transfer-Printed Micro-Silicon Solar Cells". Vol. 8. No. 1, pp. 44-53, 2013.

[19] Luque, A. and Hegedus, S., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. England: John Wiley & Sons Ltd. 2013.

[20] Mogilestue, C. Monte carlo Simulation of Semicouductor devices. Chapman & Hall, 1993.

[21] Jacoboni, C., Lugli, P., "The Monte Carlo Method For Semiconductor Device Simulation", Wien: Springer-Verlog, 1989.

[22] Jacoboni, C., Reggiani, L., "The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials". Rev. Mod. Phys. Vol. 55. No. 3, 1983

[23] Akarsu, M., Ozbas, O., "Monte Carlo Simulation for Electron Dynamics in Semiconductor Devices. Mathematical and Computational Applications", Vol. 10, No. 1, pp. 19-26, 2005.

[24] Ozbas, O., Akarsu, M "Monte Carlo simulation of electron transport in InSb", Turkish journal of physics, 26, (4), 283-287, 2002.

[25] Kosina, H., Nedjalkov, M., "The Monte Carlo method for semi-classical charge transport in semiconductor devices", Mathematics and Computers in Simulations, Vol. 55, 93-102, 2001.

[26] Fawcett W., Boardmann A.D. and Swain S., "Monte Carlo determination of electron transport properties in gallium arsenide", Journal of Physical Chemistry of Solids, Vol. 31, pp. 1963-1990, 1970.

[27] Vasileksa, D., Goodnick, S.M, Klimeck, G., Computational Electronics and Semiclassical Quantum Modeling and Simulation. CRC Press., 2010.

[28] Tomizawa, K., "Numerical Simulation of Submicron Semiconductor Device". Artech House Boston, London, 1993.

[29] Ortega, J. M., Rheinboldt, W. C., Iteration solution of nonlinear equation in several variables, New York, Academic Press, 1970

[30] Deuffhard, P., "A Modified Newton Method for the Solution of Ill-Conditioned Systems of Nonlinear Equations with Application to Multiple Shooting". Numer. Mat, Vol. 22, pp. 289-315, 1974.

[31] Bank, R. E., Rose, D. J., "Global Approximate Newton Methods". Numer. Mat, Vol. 37, pp. 279-295, 1981.

[32] Bunch, J. R. and hopcroft, J. E., "Triangular Factorization and Inversion by Fast Matrix Multiplication", Math. Comput. Vol. 28, pp. 231-236, 1974.

[۳۳] هما زارع بیدکی، رحیم فائز، "طراحی و شبیه سازی سلول خورشیدی سه پیوندی بر مبنای چاه کوانتومی"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۳، شماره ۴، ۱۳۹۵.

[۳۴] کریم عباسیان، سیدسالار حسینی، هادی صوفی، "افزایش بازده سلول خورشیدی GaAs مبتنی بر ساختار p-i-n باند میانی توسط نقاط کوانتومی InAs در ناحیه ذاتی آن"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۹، شماره ۳، صفحه ۱۱۷۴-۱۱۶۷، ۱۳۹۸.

[۳۵] رضا شریعتی نسب، پویا تدین رودی، "تخمین عملکرد خطوط و ریسک عایقی ناشی از ضربات مستقیم صاعقه با استفاده از روش ترکیبی جدید مبتنی بر روش مونت کارلو"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۳، شماره ۱، ۱۳۹۵.

<sup>1</sup> Impurity scattering

<sup>2</sup> phonon scattering

<sup>3</sup> Non-polar optical phonon scattering

<sup>4</sup> Polar optical phonon scattering

<sup>5</sup> Acoustic phonon scattering

<sup>6</sup> Intervalley Transfer

<sup>7</sup> Space charge

