

افزایش راندمان سلول خورشیدی $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ با بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری به روش پارامتریک

علیرضا صالحی^{۱*}، سعید زمانی^۲

^۱استاد دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

salehi@kntu.ac.ir

^۲کارشناسی ارشد دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

s.zamani@mail.kntu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، ابتدا مدل سلول خورشیدی تک پیوندی $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ در محیط اطلس نرم افزار سیلواکو (Silvaco) پیاده‌سازی شده، سپس با تمرکز بر پارامترهای ساختاری سلول شامل ضخامت و آلایش لایه‌های پنجره، نشردهنده و جاذب، اثر تغییر این پارامترها بر عملکرد سلول شبیه‌سازی شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، لایه جاذب بیشترین تأثیر را بر راندمان سلول داشته و لایه‌های نشردهنده و پنجره به ترتیب در جایگاه دوم و سوم قرار دارند. در ادامه، ضمن تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی به منظور بررسی اثرات متقابل پارامترهای مورد بحث و یافتن بهترین مقدار برای آنها، بهینه‌سازی انجام شد. با توجه به نتایج حاصل از بهینه‌سازی، مقدار بهینه برای ضخامت لایه‌های پنجره، نشردهنده و جاذب به ترتیب برابر $0.08 \mu m$ ، $0.07 \mu m$ و $1 \mu m$ و نیز مقدار بهینه آلایش لایه‌ها به ترتیب برابر $1 \times 10^{19} \text{ atm/cm}^3$ ، $7/7 \times 10^{18} \text{ atm/cm}^3$ و $7 \times 10^{17} \text{ atm/cm}^3$ به دست آمد. در نهایت، با شبیه‌سازی سلول به‌ازای مقادیر بهینه به دست آمده از بهینه‌سازی، راندمان سلول به رکورد $19/24\%$ افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ ، لایه جاذب، لایه پنجره، لایه نشردهنده، بهینه‌سازی، روش پارامتریک، راندمان.

۱. مقدمه

ویژه در سطح سلول^۴ (بیشتر در سلول‌های مبتنی بر سیلیکون) با افزایش شدت نور وارد شده به آن، منجر به افزایش بازدهی شده‌اند [۱۷-۱۹].

باتوجه به هزینه بالا و فناوری ساخت پیچیده این گونه سلول‌ها، بهترین راه شناخت و بررسی رفتار آن‌ها استفاده از شبیه‌سازی و آنالیز نتایج حاصل از آن است. در این حالت، با صرف کمترین هزینه و فارغ از محدودیت‌های گسترده پروسه ساخت می‌توان به ساختار بهینه سلول دست یافت. بنابراین استفاده از نتایج شبیه‌سازی در روند طراحی و ساخت افزاره، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در زمان و هزینه به ارمغان خواهد آورد. از جمله نرم‌افزارهای قدرتمند برای شبیه‌سازی ادوات نوری به‌ویژه سلول‌های خورشیدی می‌توان به نرم‌افزار سیلواکو^۵ [۲۰ و ۲۱]، امس^۶ [۲۲]، و متلب^۷ [۲۳] اشاره کرد. با مطالعه ادبیات موجود در این حوزه، باتوجه به اقبال بیشتر پژوهشگران در استفاده از نرم‌افزار سیلواکو و ویژگی‌های برجسته این نرم‌افزار از جمله دقت بالای شبیه‌سازی و امکان تعریف دقیق خواص مواد در آن، در این پژوهش از نرم‌افزار سیلواکو به‌عنوان شبیه‌ساز استفاده می‌شود. در این مقاله ضمن شبیه‌سازی ساختار سلول خورشیدی تک‌پیوندی ایندینوم گالیوم فسفاید، پارامترهای ساختاری سلول شامل ضخامت و آلایش^۸ لایه‌های پنجره، نشردهنده و جاذب^۹ را هدف قرار داده و تأثیر تغییرات آن‌ها بر عملکرد سلول بررسی خواهد شد. در ادامه باتوجه به نتایج شبیه‌سازی، ضمن یافتن مقادیر بهینه پارامترهای موردنظر، ساختار بهینه سلول با بهترین کارایی ارائه خواهد شد.

۲. ساختار سلول ایندینوم گالیوم فسفاید

ساختار سلول خورشیدی ایندینوم گالیوم فسفاید در شکل (۱) نشان داده شده است. این ساختار برگرفته از گزارش ارائه شده در [۴] به‌عنوان ساختار بهینه با راندمان ۱۷/۴٪ است. هدف از این پژوهش، افزایش راندمان سلول موجود به‌وسیله اصلاح پارامترهای ساختاری آن است. این ساختار شامل ۵ لایه روی زیرپایه‌ای از جنس گالیوم آرسناید است. لایه آلومینیوم ایندینوم فسفاید^{۱۰} به ضخامت ۳۰ nm به‌عنوان لایه پنجره به‌منظور به دام انداختن و جذب فوتون‌های بیشتر استفاده شده است. سپس لایه $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ n- به ضخامت ۵۰ nm به‌عنوان لایه نشردهنده به‌منظور جمع‌آوری حامل‌های اقلیت قرار

سلول‌های خورشیدی ایندینوم گالیوم فسفاید^۱ از فناوری‌های نسل دوم سلول‌های خورشیدی به‌حساب می‌آیند. باتوجه به ادبیات موجود در این زمینه، این سلول‌ها عمدتاً به‌صورت چندپیوندی با سایر سلول‌های خانواده III-V از جمله سلول گالیوم آرسناید^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۳]. از این رو کار پژوهشی روی سلول خورشیدی ایندینوم گالیوم فسفاید به فرم تک‌پیوندی به‌صورت محدود گزارش شده است [۴]. سلول ایندینوم گالیوم فسفاید با توجه به شکاف باند انرژی بزرگی که دارد (۱/۸۹ eV الکترون‌ولت) معمولاً به‌عنوان سلول بالایی در سلول‌های چندپیوندی استفاده می‌شود تا از این طریق، روند جذب فوتون‌های با انرژی بالاتر افزایش یابد [۵]. استفاده گسترده از این سلول در ساختار سلول‌های چندپیوندی و وابستگی بسیار زیاد راندمان آن‌ها به راندمان تک‌تک پیوندهای تشکیل‌دهنده آن‌ها، ضرورت پژوهش روی سلول‌های تک‌پیوندی از جمله سلول ایندینوم گالیوم فسفاید را افزایش می‌دهد.

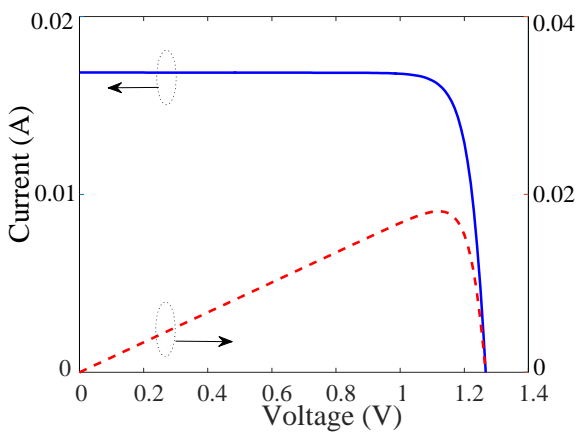
از جمله سلول‌های چندپیوندی شامل سلول ایندینوم گالیوم فسفاید می‌توان به سلول خورشیدی سه‌پیوندی ایندینوم گالیوم فسفاید/گالیوم آرسناید/ ایندینوم گالیوم آرسناید^۳ با بازدهی ۳۶/۴٪ تحت تابش یک خورشید در شرایط تابش AM1.5 و ۴۱٪ در شرایط تابش متمرکز نور اشاره کرد [۶ و ۷]. به‌علاوه اخیراً تحقیقات گسترده‌ای روی این گونه از سلول‌ها برای دستیابی به راندمانی نزدیک به ۶۰٪ در حال انجام است [۸]. در واقع در این گونه سلول‌ها با استفاده از مهندسی شکاف باند از طریق طراحی ساختارهایی به‌صورت زنجیره‌ای از پیوندها، امکان جذب محدوده وسیعی از فوتون‌های فرودی با انرژی‌های متفاوت فراهم می‌آید. بنابراین برای رسیدن به حداکثر راندمان (۶۰٪) نیازمند استفاده از مواد نیمه‌هادی با شکاف باند متوسط در حدود ۲ eV می‌باشد که از میان مواد مختلف، ماده ایندینوم گالیوم فسفاید با شکاف باند ۱/۸۹ eV ماده مناسبی است.

از کارهای تحقیقاتی انجام‌شده در راستای بهبود و افزایش راندمان سلول‌های خورشیدی می‌توان به نوآوری در طراحی ساختار سلول، استفاده از مواد جدید، بهبود کیفیت رشد لایه‌های هم‌بافته و بهبود خواص اپتیکی ساختار سلول اشاره کرد [۹-۱۲]. برخی محققان با استفاده از ایجاد نانوذر در ساختار سلول‌های خورشیدی، به افزایش راندمان دست یافته‌اند [۱۳-۱۶] و برخی دیگر از طریق ایجاد بافت‌های

4. Texturing
5. Silvaco
6. AMPS
7. Matlab
8. Doping
9. Base Layer
10. AlInP

1. $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$
2. GaAs
3. InGaAs

گرفته است. در ادامه، لایه $p\text{-In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ به ضخامت $1/5 \mu\text{m}$ به عنوان لایه جاذب به منظور جذب فوتون‌های تابیده شده استفاده شده است. پس از لایه بیس، لایه $p\text{-In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ به ضخامت $0/3 \mu\text{m}$ به عنوان BSF^1 به منظور کاهش بازترکیب در سطح پشتی سلول و در نهایت، لایه بافر به ضخامت $0/5 \mu\text{m}$ به منظور ایجاد تطبیق شبکه‌ای بهتر و نیز کاهش تلفات انتقال حامل‌ها به سمت اتصالات بیرونی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از لایه $n^+\text{-GaAs}$ با آرایش $2 \times 10^{19} \text{ atm/cm}^3$ به عنوان لایه‌ای با آرایش بالا برای اتصال مناسب سلول با الکتروود آند استفاده شده است. استفاده از این لایه، مقاومت اتصال را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و بازترکیب در محل اتصال را به حداقل ممکن می‌رساند.



شکل (۲): منحنی جریان - ولتاژ سلول خورشیدی $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$

۱.۳. اثر تغییر ضخامت و آرایش پنجره

لایه آلومینیوم ایندنیوم فسفاید به عنوان لایه پنجره در سلول مورد نظر استفاده شده است. آلومینیوم ایندنیوم فسفاید دارای شکاف باند بزرگی است که آن را برای کاربردهای نوری از جمله استفاده به عنوان لایه پنجره یا لایه ضد بازتاب در سلول‌های چندپیوندی بسیار مناسب می‌سازد [۲۴ و ۲۵]. هنگامی که کسر مولی آلومینیوم در حدود $0/52$ باشد، ترکیب $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ می‌تواند تطبیق شبکه‌ای با زیرپایه‌ای از گالیوم آرسناید داشته باشد. در بسیاری از مراجع، خواص نوری آلومینیوم ایندنیوم فسفاید با روش‌های مختلفی از جمله طیف‌سنجی رامان [۲۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین طیف تابشی و جذب آلومینیوم ایندنیوم فسفاید در برخی مراجع گزارش شده [۲۶ و ۲۷] که در این مقاله برای افزایش دقت شبیه‌سازی از این داده‌ها در تعریف این ماده استفاده شده است.

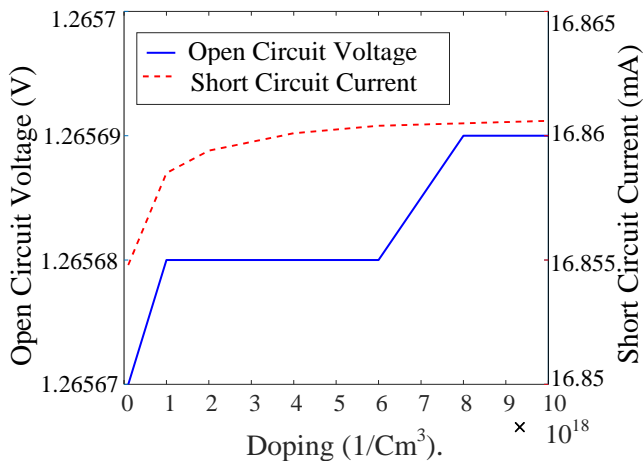
گرفته است. در ادامه، لایه $p\text{-In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ به ضخامت $1/5 \mu\text{m}$ به عنوان لایه جاذب به منظور جذب فوتون‌های تابیده شده استفاده شده است. پس از لایه بیس، لایه $p\text{-In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ به ضخامت $0/3 \mu\text{m}$ به عنوان BSF^1 به منظور کاهش بازترکیب در سطح پشتی سلول و در نهایت، لایه بافر به ضخامت $0/5 \mu\text{m}$ به منظور ایجاد تطبیق شبکه‌ای بهتر و نیز کاهش تلفات انتقال حامل‌ها به سمت اتصالات بیرونی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از لایه $n^+\text{-GaAs}$ با آرایش $2 \times 10^{19} \text{ atm/cm}^3$ به عنوان لایه‌ای با آرایش بالا برای اتصال مناسب سلول با الکتروود آند استفاده شده است. استفاده از این لایه، مقاومت اتصال را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و بازترکیب در محل اتصال را به حداقل ممکن می‌رساند.

Anode			
n-GaAs			
0.3um			
AllnP	2e18	0.02um	Window layer
n-InGaP	3e18	0.05um	Emitter layer
Base layer			
1.5e17		1.5um	
p-InGaP			
p-InGaP	3e18	0.3um	BSF layer
p-GaAs	3e18	0.5um	Buffer layer
Substrate			
p-GaAs			
1e19			
Cathode			

شکل (۱): ساختار سلول خورشیدی $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ [۴]

۳. شبیه‌سازی

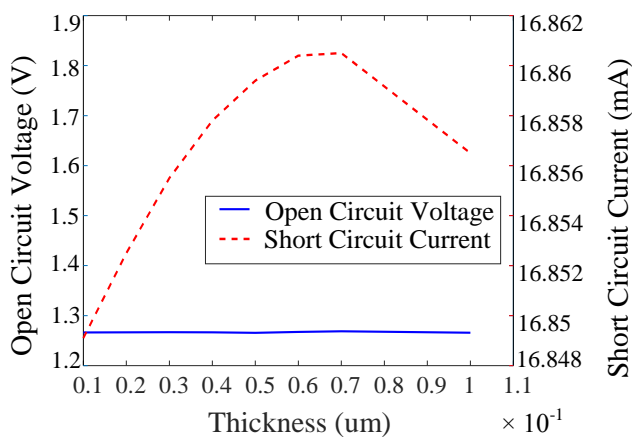
ساختار نشان داده شده در شکل (۱) را در محیط اطللس نرم‌افزار سیلواکو پیاده‌سازی کرده و ضمن انتخاب مدل‌های فیزیکی متناسب با ساختار و اعمال بایاس مناسب، کار شبیه‌سازی تحت تابش یک خورشید در شرایط تابش استاندارد AM1.5 انجام شد. مساحت سلول شبیه‌سازی شده ۱ سانتی‌متر مربع، براساس استاندارد صنعت برای تست آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. منحنی جریان - ولتاژ سلول شبیه‌سازی شده در شکل (۲) نمایش داده شده است. باتوجه به شکل (۲)، مقدار جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز سلول به ترتیب برابر



شکل (۴): منحنی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدارباز به‌ازای تغییر آلایش لایه پنجره

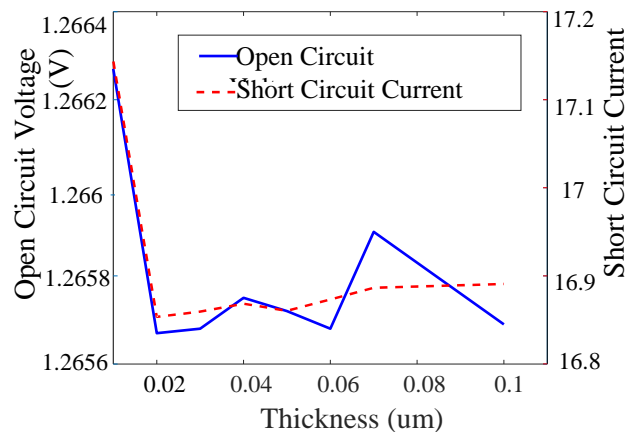
۲.۳. اثر تغییر ضخامت و آلایش لایه نشردهنده

لایه n-InGaP به‌عنوان لایه نشردهنده در سلول موردنظر استفاده شده است. در این قسمت، ضخامت لایه نشردهنده به‌عنوان متغیر و سایر پارامترهای سلول ثابت و برابر مقادیر گزارش شده در بخش ۲ در نظر گرفته شده است (مطابق شکل ۱). نتایج شبیه‌سازی به‌ازای تغییر ضخامت لایه نشردهنده از $0.1 \mu\text{m}$ تا $1 \mu\text{m}$ در شکل (۵) نمایش داده شده است. باتوجه به شکل (۵)، با افزایش ضخامت لایه نشردهنده، جریان اتصال کوتاه سیر صعودی داشته، درحالی‌که ولتاژ مدارباز تغییر قابل‌ملاحظه‌ای ندارد. از طرفی، افزایش ضخامت لایه منجر به افزایش طول مسیر حامل‌ها شده و کاهش راندمان جمع‌آوری حامل‌ها را به‌همراه خواهد داشت. بنابراین در ضخامت‌های بالا راندمان سلول افت خواهد کرد. در این وضعیت، بازدهی سلول از 18.1% به‌ازای ضخامت $1 \mu\text{m}$ $0.1 \mu\text{m}$ به 17.9% به‌ازای ضخامت $0.1 \mu\text{m}$ کاهش می‌یابد.



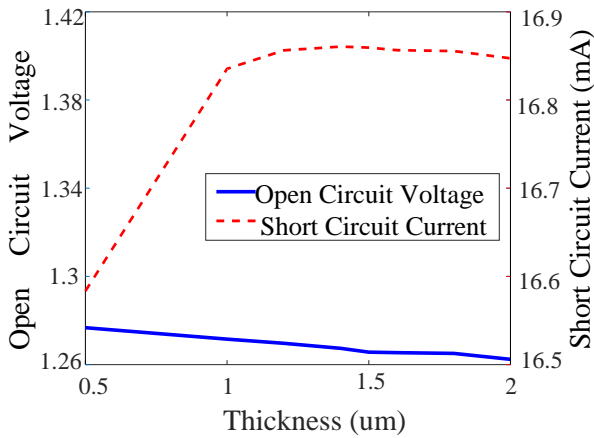
شکل (۵): منحنی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدارباز به‌ازای تغییر ضخامت لایه نشردهنده

در این قسمت، ضخامت لایه پنجره به‌عنوان متغیر و سایر پارامترهای سلول ثابت و برابر مقادیر گزارش شده در بخش (۲) در نظر گرفته شده است (مطابق شکل ۱). نتایج شبیه‌سازی به‌ازای تغییر ضخامت لایه پنجره از $0.1 \mu\text{m}$ تا $1 \mu\text{m}$ در شکل (۳) نمایش داده شده است. باتوجه به شکل (۳)، با افزایش ضخامت لایه پنجره، ولتاژ و جریان، هر دو سیر نزولی دارند که البته دربارۀ ولتاژ میزان تغییرات بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر است. با افزایش جذب نور در لایه پنجره ناشی از افزایش ضخامت، تعداد فوتون‌های کمتری به لایه جذب خواهند رسید و در نتیجه، حامل‌های تولیدشده و جریان سلول کاهش خواهد یافت و بنابراین راندمان سلول روند نزولی خواهد داشت. در این وضعیت، بازدهی سلول از 18.5% به‌ازای ضخامت $1 \mu\text{m}$ $0.1 \mu\text{m}$ به 18.2% به‌ازای ضخامت $0.1 \mu\text{m}$ کاهش می‌یابد.



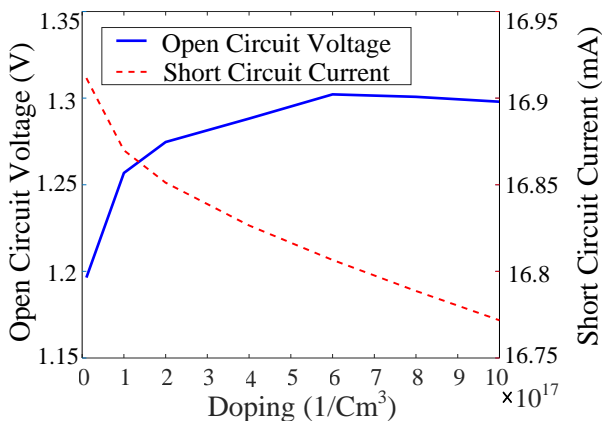
شکل (۳): منحنی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدارباز به‌ازای تغییر ضخامت لایه پنجره

در ادامه، آلایش لایه پنجره به‌عنوان متغیر فرض شده، درحالی‌که سایر پارامترهای سلول مطابق شکل (۱) ثابت در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی به‌ازای تغییر آلایش لایه پنجره از $1 \times 10^{17} \text{ atm/cm}^3$ تا $1 \times 10^{19} \text{ atm/cm}^3$ در شکل (۴) نمایش داده شده است. باتوجه به شکل (۴)، با افزایش آلایش لایه پنجره، ولتاژ و جریان، هر دو روند افزایشی دارند که البته میزان تغییرات هر دو پارامتر بسیار ناچیز است و تأثیر اندکی بر راندمان سلول خواهد داشت. در این وضعیت بازدهی سلول از 18.18% به‌ازای آلایش $1 \times 10^{17} \text{ atm/cm}^3$ به 18.20% به‌ازای آلایش $1 \times 10^{19} \text{ atm/cm}^3$ افزایش می‌یابد.



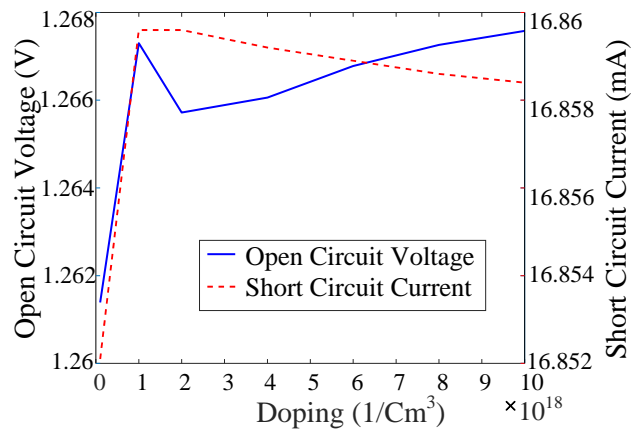
شکل (۷): منحنی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدارباز به‌ازای تغییر ضخامت لایه جاذب

در ادامه، تراکم ناخالصی لایه جاذب به‌عنوان متغیر و سایر پارامترهای سلول ثابت و برابر مقادیر گزارش شده در بخش ۲ در نظر گرفته شده است. در نهایت، شبیه‌سازی به‌ازای تغییر آرایش در محدوده 1×10^{16} atm/cm^3 تا 1×10^{18} atm/cm^3 برای ۲۰ آرایش مختلف به‌گونه‌ای که تمامی بازه طراحی را پوشش دهد، انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۸) نشان داده شده است. باتوجه به شکل (۸)، با افزایش آرایش، به‌دلیل اثر باریک شدن شکاف باند، ولتاژ روند افزایشی دارد درحالی‌که جریان سلول به‌دلیل افزایش باز ترکیب در لایه جاذب ناشی از افزایش برخوردها کاهش یافته است. در این وضعیت، محدوده تغییرات بازدهی سلول از ۱۶/۵٪ به‌ازای تراکم ناخالصی 1×10^{16} atm/cm^3 تا ۱۷/۶٪ به‌ازای تراکم ناخالصی 1×10^{18} atm/cm^3 است.



شکل (۸): منحنی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدارباز به‌ازای تغییر تراکم ناخالصی لایه جاذب

در این مرحله، آرایش لایه نشردهنده به‌عنوان متغیر فرض شده درحالی‌که سایر پارامترهای سلول مطابق شکل (۱) ثابت در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی به‌ازای تغییر آرایش لایه نشردهنده از 1×10^{17} atm/cm^3 تا 1×10^{19} atm/cm^3 در شکل (۶) نمایش داده شده است. باتوجه به شکل (۶)، با افزایش آرایش لایه نشردهنده، ولتاژ و جریان هر دو سیر صعودی دارند. در این وضعیت، بازدهی سلول از ۱۷/۸٪ به‌ازای آرایش 1×10^{17} atm/cm^3 به ۱۸/۲۵٪ به‌ازای آرایش 1×10^{19} atm/cm^3 افزایش می‌یابد. افزایش راندمان سلول را می‌توان ناشی از کاهش مقاومت سری در اثر افزایش آرایش لایه نشردهنده دانست که احتمال عبور فوتون‌ها و رسیدن به لایه جاذب را افزایش داده و بنابراین حامل‌های بیشتری در تولید جریان نقش خواهند داشت.



شکل (۶): منحنی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدارباز به‌ازای تغییر آرایش لایه نشردهنده

۳.۳. اثر تغییر ضخامت و آرایش لایه جاذب

باتوجه به شکل (۱)، لایه جاذب به‌کاررفته در ساختار سلول، لایه $\text{p-In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ است. در این قسمت، ضخامت لایه جاذب به‌عنوان متغیر و سایر پارامترهای سلول ثابت و برابر مقادیر گزارش شده در بخش ۲ در نظر گرفته شده است. در نهایت، شبیه‌سازی به‌ازای تغییر ضخامت در محدوده 0.5 um تا 2 um برای ۱۵ ضخامت مختلف به‌گونه‌ای که تمامی بازه طراحی را پوشش دهد، انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۷) نشان داده شده است. باتوجه به شکل (۷)، علی‌رغم افت ناچیز ولتاژ، جریان سلول افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته که این در نتیجه افزایش جذب فوتون‌ها در ضخامت‌های بیشتر است. در این وضعیت، بازدهی سلول از ۱۷/۹٪ به‌ازای ضخامت 0.5 um به ۱۸/۲٪ به‌ازای ضخامت 2 um افزایش می‌یابد. البته این روند خطی نیست و در ضخامت‌های بیشتر به‌دلیل افزایش تلفات حامل‌های ناشی از باز ترکیب، جریان سلول کاهش یافته و در نتیجه، بازده سلول افت خواهد کرد.

۴. بهینه‌سازی

روش‌های بهینه‌سازی زیادی با عناوین متفاوت مانند الگوریتم ژنتیک، روش‌های گرادیانی^۱ و روش‌های پارامتریک^۲ موجودند که هرکدام مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند [۲۸-۳۰]. آنچه در این مبحث مورد استفاده قرار خواهد گرفت، روش پارامتریک است. روش پارامتریک بر مبنای تعداد مشخصی نقطه در فضای طراحی پایه‌ریزی شده است. در واقع در این روش، طی سه مرحله شامل «تعیین موقعیت و تعداد نقاط ورودی»، «تعیین نوع سطح پاسخ و ارائه آن به روش ریاضی» و «یافتن نقطه بهینه^۳»، می‌توان به نقطه بهینه دست یافت. این روش در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، خودروسازی، الکترونیک و هوافضا مورد استفاده قرار گرفته و نتایج موفقیت‌آمیزی در پی داشته است.

در این قسمت، اطلاعات به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در بخش‌های ۱، ۳، ۲ و ۳ به‌عنوان داده‌های ورودی در فرایند بهینه‌سازی استفاده می‌شود. پارامترهای طراحی که به‌عنوان ورودی در بهینه‌سازی استفاده شده‌اند، شامل ضخامت و تراکم ناخالصی لایه‌های پنجره، نشردهنده و جاذب از سلول خورشیدی ایندنیوم گالیوم فسفاید هستند. از جمله مزایای روش پارامتریک، امکان بررسی اثر تغییرات هر دو پارامتر (ضخامت و تراکم ناخالصی لایه‌ها) به‌طور هم‌زمان بر عملکرد سلول است. بنابراین در این حالت، اثرات متقابل پارامترها نیز مورد توجه قرار گرفته و بهترین مقادیر برای دستیابی به بالاترین راندمان به‌دست می‌آید. از جمله پارامترهای خروجی مورد نظر برای بهینه‌سازی می‌توان به بازدهی (E_{ff})، ضریب پرکنندگی (FF)، ولتاژ مدارباز (V_{oc})، جریان اتصال کوتاه (I_{sc})، مقاومت سری (R_s) و مقاومت موازی (R_{sh}) اشاره کرد. در واقع، هدف در بهینه‌سازی افزایش مقادیر تمامی پارامترها به‌جز مقاومت سری است که باید حداقل مقدار را داشته باشد. در این کار برای افزایش دقت، تعداد ۱۰۰۰ نمونه در فضای طراحی انتخاب شده و به‌ازای ۱۰۰۰ بار تکرار مقدار مطلوب به‌دست آمد. مقادیر به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی برای ضخامت و آلایش لایه‌های پنجره، نشردهنده و جاذب در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سلول خورشیدی ایندنیوم گالیوم فسفاید پس از بهینه‌سازی پارامترهای لایه پنجره، نشردهنده و جاذب در جدول (۲) گزارش شده است. با توجه به جدول (۲)، بازدهی سلول خورشیدی از ۱۸/۱۸٪ به ۱۹/۲۴٪ افزایش یافته است.

جدول (۱): مقادیر ضخامت و آلایش لایه‌های پنجره، نشردهنده و جاذب به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی

$\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ cell AM1.5	Thickness(um)	Doping(atm/cm ³)
Window layer	۰/۰۸	1×10^{19}
Emitter layer	۰/۰۷	$7/7 \times 10^{18}$
Base layer	۱/۱	7×10^{17}

جدول (۲): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی سلول خورشیدی $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ قبل و بعد از بهینه‌سازی پارامترهای لایه پنجره، نشردهنده و جاذب

$\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ cell AM1.5	Before optimization	After optimization
$E_{ff}(\%)$	۱۸/۱۸	۱۹/۲۴
$I_{sc}(mA/cm^2)$	۱۶/۸۶	۱۸/۵۱
$V_{oc}(V)$	۱/۲۶	۱/۳۰
FF	۸۵/۲۶	۸۷/۵۵

نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله، قابل مقایسه با نتایج گزارش شده در ادبیات از جمله [۴] است. در مرجع [۴] سلول ایندنیوم گالیوم فسفاید تک‌پیوندی ساخته شده و بازده ۱۷/۴٪ برای این سلول گزارش شده است. در این مقاله، ضمن افزایش این مقدار به ۱۸/۱۸٪ در شبیه‌سازی، با بهینه‌سازی پارامترهای لایه پنجره، نشردهنده و جاذب به رکورد ۱۹/۲۴٪ دست پیدا کرده‌اند. بنابراین می‌توان اظهار کرد که نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیقات نسبت به نتایج ارائه‌شده در ادبیات، از جمله مرجع فوق‌الذکر بهینه‌شده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، سلول خورشیدی تک‌پیوندی ایندنیوم گالیوم فسفاید مورد شبیه‌سازی و بهینه‌سازی قرار گرفت. در این تحقیقات، اثر تغییر پارامترهای لایه پنجره، نشردهنده و جاذب بر عملکرد سلول خورشیدی ایندنیوم گالیوم فسفاید بررسی شد. سپس با انجام بهینه‌سازی، مقدار بهینه برای پارامترهای لایه جاذب به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، لایه جاذب بیشترین تأثیر را بر راندمان سلول دارد و لایه‌های نشردهنده و پنجره به‌ترتیب، در جایگاه دوم و سوم قرار دارند. همچنین، با افزایش ضخامت لایه جاذب راندمان سلول افزایش یافت که می‌توان آن را به افزایش تعداد فوتون‌های جذب‌شده و در نتیجه جریان سلول نسبت داد. از سوی دیگر، با

1. Gradient Methods
2. Parametric Methods
3. Optimal Point

بهبود ساختاری پارامتریک، برای نخستین بار در زمینه بهینه‌سازی ساختاری سلول‌های خورشیدی از این روش استفاده شد و نتایج قابل قبولی به دست آمد. این روش در عین سادگی، بسیار دقیق بوده و امکان بهینه‌سازی چندین پارامتر را به‌طور هم‌زمان فراهم می‌آورد که از این جهت در مبحث سلول‌های خورشیدی بسیار کارآمد است.

فهرست علائم

I_{SC}	جریان اتصال کوتاه سلول (mA/cm^2)
V_{OC}	ولتاژ مدارباز سلول (V)
FF	ضریب پرکنندگی
$Eff (\%)$	بازدهی سلول

افزایش تراکم ناخالصی این لایه، بازده سلول با افزایش همراه است که می‌توان آن را ناشی از بهبود روند جداسازی و انتقال حامل‌ها به سمت اتصالات خارجی دانست. از آنجایی که دستیابی به بهترین ساختار با بالاترین راندمان، مستلزم توجه به اثر تغییرات هر دو پارامتر به‌طور هم‌زمان بر عملکرد سلول است، با انجام بهینه‌سازی به روش پارامتریک، این امکان فراهم شد. با توجه به نتایج بهینه‌سازی، مقدار بهینه برای ضخامت لایه‌های پنجره، نشردهنده و جاذب به ترتیب برابر $0.08 \mu\text{m}$ ، $0.07 \mu\text{m}$ و $1/1 \mu\text{m}$ و نیز مقدار بهینه آرایش لایه‌ها به ترتیب برابر $1 \times 10^{19} \text{ atm}/\text{cm}^3$ ، $7 \times 10^{18} \text{ atm}/\text{cm}^3$ و $7 \times 10^{17} \text{ atm}/\text{cm}^3$ به دست آمد. در نهایت با شبیه‌سازی سلول مورد نظر به ازای مقادیر بهینه حاصل از بهینه‌سازی، راندمان سلول به مقدار 19.24% افزایش یافت. از سوی دیگر، در این مقاله ضمن معرفی روش

مراجع

- [1] Yamaguchi, M., "III-V Compound Multi-Junction Solar Cells: Present and Future," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 75, No. 1, pp. 261-269, 2003.
- [2] Takamoto, T., Kaneiwa, M., Imaizumi, M., Yamaguchi, M., "InGaP/GaAs-Based Multijunction Solar Cells," Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 13, No. 6, pp. 495-511, 2005.
- [3] Takamoto, T., Agui, T., Ikeda, E., Kurita, H., "High-Efficiency InGaP/In_{0.01}Ga_{0.99} as Tandem Solar Cells Lattice-Matched to Ge Substrates", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 66, No. 1, pp. 511-516, 2001.
- [4] Takamoto, T., et al. "Structural Optimization for Single Junction InGaP Solar Cells", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 35, pp. 25-31, 1994.
- [5] N. Dharmarasu and et al, "Effects of Proton Irradiation on n+ p InGaP Solar Cells", Journal of Applied Physics, Vol. 91, pp. 3306-3311, 2002.
- [6] Sugaya, Takeyoshi, et al. "Ultra-High Stacks of InGaAs/GaAs Quantum Dots for High Efficiency Solar Cells", Energy & Environmental Science, Vol. 5, No. 3, pp. 6233-6237, 2012.
- [7] Sugaya, T., et al. "Tunnel Current Through a Miniband in InGaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, No. 10, pp. 2920-2923, 2011.
- [8] Nishioka, Kensuke, et al. "Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell and Optimization of Solar Cell's Structure Focusing on Series Resistance for High-Efficiency Concentrator Photovoltaic Systems", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, No. 9, pp. 1308-1321, 2006.
- [9] Takamoto, Tatsuya, et al. "Two-Terminal Monolithic In_{0.5}Ga_{0.5}P/GaAs Tandem Solar Cells with a High Conversion Efficiency of Over 30%", Japanese journal of Applied Physics, vol. 36, no. 10, pp. 6215, 1997.
- [10] Bett, A. W., Dimroth, F., Stollwerck, G., Sulima, O. V., "III-V Compounds for Solar Cell Applications", Applied Physics, Vol. 69, No. 2, pp. 119-129, 1999.
- [11] Yamaguchi, Masafumi, et al. "Novel Materials for High-Efficiency III-V Multi-Junction Solar Cells", Solar Energy, Vol. 82, No. 2, pp. 173-180, 2008.
- [12] Yang, M. D., et al. "Improvement of Conversion Efficiency for Multi-Junction Solar Cells by Incorporation of Au Nanoclusters", Optics Express, Vol. 16, No. 20, pp. 15754-15758, 2008.
- [13] Rockstuhl, C., et al. "Local Versus Global Absorption in Thin-film Solar Cells with Randomly Textured Surfaces", Applied physics letters, Vol. 93, No. 6, pp. 061105, 2008.
- [14] Tao, M., Zhou, W., Yang, H., Chen, L., "Surface Texturing by Solution Deposition for Omnidirectional Antireflection", Applied Physics Letters, Vol. 91, No. 8, pp. 081118, 2007.
- [15] Nakayama, K., Tanabe, K., Atwater, H. A., "Plasmonic Nanoparticle Enhanced Light Absorption in GaAs Solar Cells", Applied Physics Letters, Vol. 93, No. 12, PP. 121904, 2008.
- [16] Matheu, P., et al. "Metal and Dielectric Nanoparticle Scattering for Improved Optical Absorption in Photovoltaic Devices", Applied Physics Letters, Vol. 93, No. 11, pp. 113108, 2008.
- [17] Huang, M. J., Yang, C. R., Chiou, Y. C., Lee, R. T., "Fabrication of Nanoporous Antireflection Surfaces on

- Silicon*", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 92, No. 11, pp. 1352-1357, 2008.
- [18] Yerokhov, V. Y., et al. "Cost-Effective Methods of Texturing for Silicon Solar Cells", Solar Energy Materials and solar cells, Vol. 72, No.1, pp. 291-298, 2002.
- [19] Zhao, J., Wang, A., Green, M. A., Ferrazza, F., "19.8% Efficient "Honeycomb" Textured Multicrystalline and 24.4% Monocrystalline Silicon Solar Cells", Applied Physics Letters, Vol. 73, No. 14, pp. 1991-1993, 1998.
- [20] Michael, S., Michalopoulos, P., "A New Technique for the Development of State-of-the-Art Photovoltaic Devices Using Silvaco Software", Proceedings of the 6th WSEAS International Multiconference on Circuits, Systems, Communications and Computers, pp. 4121-4125, 2002.
- [21] Michael, S., Bates, A. D., Green, M. S., "Silvaco ATLAS as a Solar Cell Modeling Tool", Proceedings of the 31th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 719-721, 2005.
- [22] Elbar, M., Tobbeche, S., Merazga, A., "Effect of Top-Cell CGS Thickness on the Performance of CGS/CIGS Tandem Solar Cell", Solar Energy, Vol. 122, pp. 104-112, 2015.
- [23] Ahmad, T., Sobhan, S., Arif, S., "MATLAB Simulation Based Efficiency Study for Two Diode Model of Photovoltaic Solar Cell", International Journal of Engineering and Technology, vol. 6, No.1, 2016.
- [24] Takamoto, T., Ikeda, E., Kurita, H., Ohmori, M., "Over 30% Efficient InGaP/GaAs Tandem Solar Cells", Applied Physics Letters, Vol. 70, No. 3, pp. 381-383, 1997.
- [25] Li, W., et al. "GaInP/AlInP Tunnel Junction for GaInP/GaAs Tandem Solar Cells", Electronics Letters, Vol. 34, No. 4, pp. 406-407, 1998.
- [26] Bour, D. P., Shealy, J. R., Wicks, G. W., Schaff, W. J., "Optical Properties of $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ Grown by Organometallic Vapor Phase Epitaxy", Applied Physics Letters, Vol. 50, No. 10, pp. 615-617, 1987.
- [27] Najda, S. P., Kean, A. H., Dawson, M. D., Duggan, G., "Optical Measurements of Electronic Bandstructure in AlGaInP Alloys Grown by Gas Source Molecular Beam Epitaxy", Journal of applied physics, Vol. 77, No. 7, pp. 3412-3415, 1995.
- [28] Chellaswamy, C., Ramesh, R., "Parameter Extraction of Solar Cell Models Based on Adaptive Differential Evolution Algorithm", Renewable Energy, Vol. 97, pp. 823-837, 2016.
- [29] Ayala, Helon Vicente Hultmann, et al. "An Improved Free Search Differential Evolution Algorithm: A Case Study on Parameters Identification of one Diode Equivalent Circuit of a Solar Cell Module", Energy, Vol. 93, pp. 1515-1522, 2015.
- [30] Zamani, H., Moghiman, M., Kianifar, A., "Optimization of the Parabolic Mirror Position in a Solar Cooker Using the Response Surface Method (RSM) ", Renewable Energy, Vol. 81, pp. 753-759, 2015.