مقایسه مشخصه خروجی و بازدهی سلول‌های خورشیدی تک پیوندی و دوپیوندی بهینه‌شده مبتنی بر GaAs-InGaP

سیده شهرزاد سجادیه[۱]،نسرین دخت باطنی پور[۲]

[۱]کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دماوند

[۲]استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال،
batenipour_nd@srbiau.ac.ir،batenind@gmail.com.

چکیده - در این مقاله با حل همزمان معادلات پواسون، پیوستگی و انتقال حامل‌ها،سلول‌های خورشیدی تک پیوندی *GaAs* و *InGaP* وسلول دو پیوندی *GaAs-InGaP* را شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه کردیم. با مقایسه پاسخ طیفی سلول‌های خورشیدی نشان دادیم سلول-های خورشیدی *GaAs* و *InGaP* به ترتیب امواج کمتر از ۸۷۳ نانومتر و ۶۵۹ نانومتر را جذب می‌کنند. درحالیکه سلول دوپیوندی متشکل از این دو زیرسلول طیف وسیعی از امواج که حاصل همپوشانی این دو طیف است را جذب می‌کند. این امر راندمان سلول دوپیوندی را افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی راندمان سلول‌های *GaAs* و *InGaP* به ترتیب ۲۳/۸۳ و ۱۳/۳۲ درصد است، درحالیکه با بهینه سازی ساختار سلول *GaAs-InGaP* راندمان ۳۰/۵۸ درصد حاصل گردید. علاوه بر آن مشخصه *I-V* سلول‌ها نشان داد ولتاژ مدار باز برای سلول *GaAs* حدود ۱ ولت و برای سلول *InGaP* به دلیل داشتن شکاف باند بیشتر، حدود ۱/۴ ولت است. ولتاژ مدار باز برای سلول دوپیوندی تقریبا برابر با حاصل جمع مقادیر مربوط به سلول‌های تک پیوندی است که با طراحی مناسب آن‌را افزایش دادیم. با طراحی مناسب سلول دوپیوندی جریان اتصال کوتاه نیز بهبود یافت.

کلید واژه- سلول خورشیدی دوپیوندی، GaAs-InGaP، پاسخ طیفی، بازده تبدیل.

A Comparison of Output Characteristics and Efficiency of Optimized Single-junction and Double-junction GaAs-InGaP Based Solar Cells

Seyedeh Shahrzad Sajadieh [1], Nasrindokht Batenipour[2]

[1] Department of Electrical Engineering, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran.

[2] Department of Electrical and Computer Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, batenipour_nd@srbiau.ac.ir, batenind@gmail.com.

Abstract-In this paper, we have simulated and compared GaAs and InGaP single-junction (SJ) and GaAs-InGaP double-junction (DJ) solar cells, by solving Poisson, continuity and transport equations simultaneously. The comparison of solar cell spectral response proves that, GaAs and InGaP solar cells absorb wavelengths less than 873 nm and 659 nm respectively, while DJ solar cell absorbs wide range of wavelengths in the overlapped spectra. This improves the efficiency of DJ solar cell. Based on our simulation results, efficiency of GaAs solar cell and InGaP solar cell were 23.83% and 13.32% respectively; whereas, the efficiency of 30.58% was achieved by optimizing the structure of GaAs-InGaP solar cell. Furthermore, I-V characteristics of these cells showed that open circuit voltage for GaAs cell was 1 V and for InGaP cell, because of its higher band gap, was 1.4 V. This value for DJ solar cell was equal to the sum of corresponding SJ solar cell values, which was enhanced by proper design of DJ cell. By proper designing, the short circuit current was also enhanced.

Keywords: double junction solar cell, GaAs-InGaP, spectral response, conversion efficiency.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

۱- مقدمه

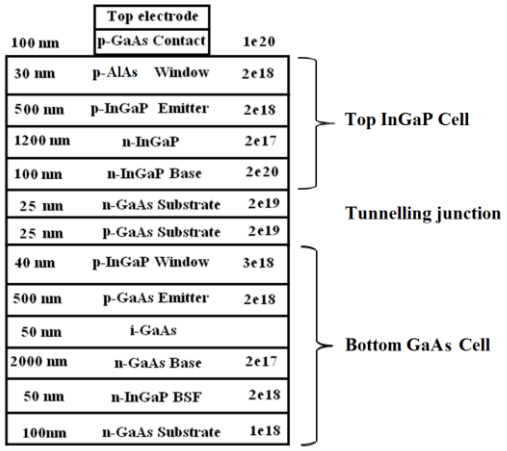
استفاده از سلول خورشیدی جهت تولید انرژی پاک به‌دلیل مزایای ویژه آن، بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تکنولوژی آن با سرعت چشمگیری رو به توسعه می‌باشد[۱-۳]. در ساختار این سلولها از یک نیمه‌هادی به عنوان لایه جاذب استفاده می‌شود که می‌تواند امواج نوری متناسب با شکاف باند (طول موج قطع) خود را جذب نماید. فوتونهای نوری که طول موج آنها کمتر از طول موج قطع نیمه هادی باشد، در این لایه جذب و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شوند. در صورتیکه در ساختار سلول از یک لایه جاذب استفاده شده باشد، آنرا تک پیوندی و اگر از چند لایه جاذب استفاده شده باشد، آن را چند پیوندی می‌نامند [۴].

در سلول خورشیدی چند پیوندی، اولین لایه جذب کننده دارای بیشترین انرژی شکاف باند (کمترین طول موج قطع) نسبت به لایه‌های زیرین است. در این لایه با توجه به ضریب جذبی که دارد، فوتون‌های نوری با انرژی بالا (طول موج پایین)جذب می‌شوند و فوتون‌های کم انرژی عبور می کنند. این فوتونهایی که عبور کرده و به لایه‌های جذب بعدی رسیده اند، می توانند در آن لایه ها که دارای شکاف انرژی کمتر هستندجذب شوند. بدین ترتیب طول موجهای پایین طیف نور خورشید در اولین لایه و طول موج‌های بالاتر به ترتیب در لایه‌های بعدی جذب می‌شوند [۵و۶]. لذا ساختار سلول خورشیدی چندپیوندی می‌تواند طیف وسیعی از نور خورشید را جذب کند که این امر موجب افزایش راندمان آن در مقایسه با سلول‌های تک پیوندی می‌شود.

دراین مقاله سلولهای خورشیدی تک پیوندی InGaP، تک پیوندی GaAs و دو پیوندی GaAs-InGaP شبیه سازی و مقایسه شده‌اند.

۲- ساختار سلول خورشیدی

در سلولهای چند پیوندی هر لایه جاذب را یک زیر سلول می‌نامند که در فاصله بین آنها از یک لایه پیوند تونلی استفاده می‌شود. شکل ۱ ساختار سلول دو پیوندی را نشان می‌دهد که از زیر سلول GaAs به عنوان سلول زیرین و زیرسلول InGaP به عنوان سلول بالایی تشکیل شده است. مقادیر ناخالصی و ضخامت لایه‌های مختلف در شکل بیان شده است.



شکل ۱: ساختار سلول خورشیدی دو پیوندی GaAs-InGaP.

۳- معادلات حاکم بر رفتار سلول خورشیدی

در این بخش معادلات حاکم بر رفتار سلولهای خورشیدی را که در شبیه سازی زیر سلولهای InGaP و GaAs و سلول دو پیوندی GaAs-InGaP مورد استفاده قرار گرفته اند را بیان می‌کنیم. این سه معادله اصلی، معادله پواسون، معادله پیوستگی جریان حامل‌ها و معادله انتقال الکترون و حفره هستند. که این معادلات بهم وابسته را به طور همزمان و در شرایط مختلف بایاس و تحت تابش های مختلف حل می-کنیم. در حل این معادلات وابستگی های حرارتی نیز در نظر گرفته شده است.

معادله پواسون بیانگر وابستگی توزیع پتانسیل به چگالی بار الکتریکی است:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \qquad (۱)$$

که V توزیع پتانسیل درون ساختار سلول خورشیدی، ε ضریب گذردهی الکتریکی نیمرسانا و ρ چگالی بار هستند. با حل این معادله و تعیین پتانسیل الکتریکی می‌توان میدان الکتریکی را به دست آورد [۷].

معادلات (۲) و (۳) به ترتیب معادلات پیوستگی الکترون و حفره هستند:

$$q\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla.\overrightarrow{J_n} - q(R_n - G_n) \qquad (۲)$$

$$q\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla.\overrightarrow{J_p} - q(R_p - G_p) \qquad (۳)$$

که n و p به ترتیب چگالی الکترون و حفره هستند. q بار الکترون، J_n و J_p به ترتیب چگالی جریان الکترون و حفره، R_n و R_p نرخ بازترکیب الکترون و حفره و G_n و G_p نرخ تولید الکترون و حفره هستند [۷].

در معادلات پیوستگی چگالی جریان حاملها دخیل است، لذا به منظور محاسبه آن باید از معادلات انتقال حامل استفاده نمود:

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

$$\overrightarrow{J_n} = -q\mu_n n \nabla V_n \quad (۴)$$

$$\overrightarrow{J_p} = -q\mu_p p \nabla V_p \quad (۵)$$

همانگونه که در روابط (۴) و (۵) ملاحظه می‌گردد، چگالی جریان حاملها به پتانسیل الکتریکی (معادله پواسون) وابسته است. لذا سه معادله اصلی نامبرده را بایستی به طور همزمان حل نمود.

بازده تبدیل سلول خورشیدی (η) یکی از مهمترین پارامترهای سنجش عملکرد سلول است که طبق تعریف، نسبت بین حداکثر توان الکتریسیته تولیدی و توان نور تابیده شده است [۷]:

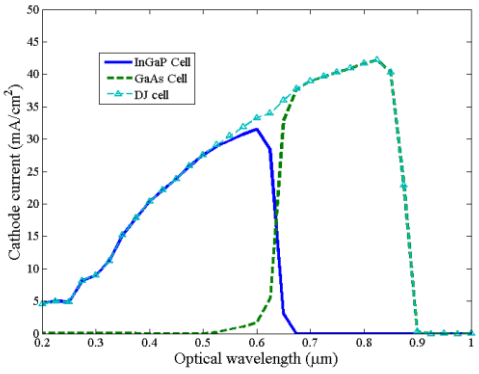
$$\eta = \frac{V_{MP} \times I_{MP}}{P_{Light}} \quad (۶)$$

در این رابطه، P_{Light} بیانگر بیشینه توان نور تابیده شده به سلول خورشیدی و V_{MP} و I_{MP} به ترتیب ولتاژ و جریان توان ماکزیمم هستند.

۴- نتایج شبیه سازی و مشخصه I-V سلول خورشیدی

با استفاده از معادلات بیان شده، ساختار زیر سلول‌های تک پیوندی GaAs و InGaP را به طور مجزا شبیه سازی کرده و با ساختار سلول خورشیدی دو پیوندی (شکل۱) مقایسه می‌کنیم.

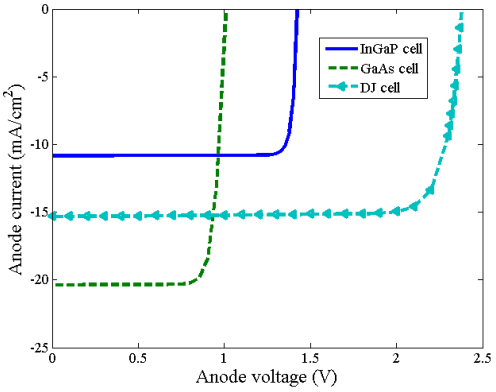
شکل ۲ پاسخ طیفی سلول‌های خورشیدی را بیان می‌کند.



شکل ۲. پاسخ طیفی سلول‌های خورشیدی تک پیوندی و دوپیوندی GaAs-InGaP.

ملاحظه می‌گردد که سلول تک پیوندی InGaP به‌دلیل داشتن شکاف انرژی بیشتر، طول موج‌های کمتر از ۶۵۹ نانومتر و سلول تک پیوندی GaAs طول موج‌های کمتر از ۸۷۳ نانومتر را جذب می‌کند. به همین دلیل است که در ساختار دوپیوندی از سلول InGaP به عنوان سلول بالایی و سلول GaAs به عنوان زیر سلول پایینی استفاده می‌شود. پاسخ طیفی سلول دوپیوندی برابر با مجموع دو سلول تک پیوندی تشکیل دهنده آن است. لذا سلول دو پیوندی توانایی جذب طیف وسیعی از نور خورشید را دارد.

شکل ۳ منحنی مشخصه جریان-ولتاژ سلول‌های خورشیدی را با یکدیگر مقایسه می‌نماید. سلول GaAs به‌دلیل بازه جذبی وسیعتر جریان بیشتری را تولید می‌کند ولی سلول InGaP به‌دلیل شکاف انرژی بیشتر ولتاژ مدار باز بیشتری تولید می‌کند. بر اساس تئوری سلول‌های چند پیوندی، ولتاژ مدار باز سلول چند پیوندی برابر با مجموع ولتاژهای مدار باز سلول‌های تک پیوندی و جریان اتصال کوتاه آن برابر با مینیمم جریان اتصال کوتاه سلول‌های تک پیوندی است. شکل ۴ مورد اول را تائید می‌کند ولی مورد دوم در این شکل صادق نیست. در توجیه این اتفاق می‌توان گفت که به‌دلیل حضور پیوند تونلی در زیر سلول خورشیدی InGaP، توزیع میدان در سلول خورشیدی InGaP بهبود یافته و جریان اتصال کوتاه آن و در نتیجه جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی دو پیوندی افزایش یافته‌اند.



شکل ۳. منحنی مشخصه جریان-ولتاژ سلول خورشیدی تک پیوندی GaAs، تک پیوندی InGaP و دوپیوندی GaAs-InGaP.

۵- نتیجه‌گیری

سلول‌های تک پیوندی GaAs و InGaP و سلول دو پیوندی GaAs-InGaP با حل همزمان معادلات پواسون، پیوستگی و انتقال حامل‌ها و با استفاده از نرم افزار سیلواکو شبیه‌سازی شدند و پاسخ طیفی آنها استخراج گردید. نشان داده شد که سلول تک پیوندی InGaP طیف امواج کمتر از ۶۵۹ نانومتر و سلول تک پیوندی GaAs طول موج‌های کمتر از ۸۷۳ نانومتر را جذب می‌کند. پاسخ طیفی سلول دو پیوندی متشکل از این زیر سلولهامحدوده گسترده‌ای که حاصل همپوشانی هر دو طیف هست را دربر می‌گیرد.

مقایسه مشخصه I-V سلول‌های خورشیدی نشان داد، ولتاژ

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مدار باز سلول InGaP به‌دلیل داشتن شکاف باند انرژی بزرگ از ولتاژ مدار باز GaAs بیشتر است و ولتاژ مدار باز سلول دو پیوندی نیز تقریبا برابر با حاصل جمع این دو است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد با طراحی مناسب پیوند تونلی ولتاژ مدار باز بهبود می‌یابد و از حاصل جمع ولتاژ مربوط به زیر سلول‌ها بیشتر می‌شود. همچنین با طراحی مناسب پیوند تونلی می‌توان جریان اتصال کوتاه سلول دو پیوندی را به مقداری بیشتر از مینیمم جریان زیر سلول‌ها که مربوط به InGaP است رسانید.

محاسبات مربوط به راندمان نشان می‌دهد راندمان سلول‌های GaAs و InGaP به ترتیب حدود ۲۳/۸۳ و ۱۳/۳۲ درصد است. در حالیکه طراحی مناسب سلول دو پیوندی بازدهی آن را تا ۳۰/۵۸ درصد افزایش می‌دهد.

مراجع

[1] A. Bahrami, S. Mohammadnejad, and N. J. Abkenar, "Optimized structure of AlGaAs/GaAs double junction solar cells," Journal of Modern Optics, vol. 61, no. 7, pp. 568-575, 2014.

[2] P.P. Nayak, J.P. Dutta, and G.P. Mishra, "Efficient InGaP/GaAs DJ solar cell with double back surface field layer," Eng. Sci. Technol., Int. J., vol. 18, no. 3, pp. 325-335, 2015.

[3] T. J. Grassman *et al.*, "GaAs0.75 P0.25/Si Dual-Junction Solar Cells Grown by MBE and MOCVD," IEEE J. Photovoltaics, Int. J., vol. 6, no. 1, pp. 326-331, 2016.

[4] M. Muramoto, T. Hayakawa, "Multi-junction solar cell," U.S. Patent No. 6,459,034, 2002.

[5] H. Jianmin, W. Yiyoung , X. Jingdong, Y. Dezhuang , and Z. Zhongwei, "Degradation behaviors of lectrical properties of GaInP/GaAS/Ge solar cells under < 200 keV proton irradiation, " Solar Energy Materials & Solar cells, vol. 92, no. 12, pp. 1652-1656, 2008.

[6] T. Takamoto, M. Kaneiwa, M. Imaizumi, and M. Yamaguchi. "InGaP/GaAs-based multijunction solar cells." Progress in Photovoltaics: Research and Applications 13, no. 6 (2005): 495-511.

[7] S. M. Sze, "Semiconductor Devices," Physics and Technology, 1985.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد