

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

سیده شهرزاد سجادیه<sup>۱</sup>، نسرین دخت باطنی پور<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دماوند

<sup>۲</sup> 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 و سلول دو پیوندی GaAs-InGaP را شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه کردیم. با مقایسه پاسخ طیفی سلول‌های خورشیدی نشان دادیم سلول‌های 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 بهینه‌سازی 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 تقریباً 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<sup>1</sup>, Nasrindokht Batenipour<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran.

<sup>2</sup> 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.

## ۱- مقدمه

| 100 nm  | Top electrode<br>p-GaAs Contact | 1e20 |
|---------|---------------------------------|------|
| 30 nm   | p-AlAs Window                   | 2e18 |
| 500 nm  | p-InGaP Emitter                 | 2e18 |
| 1200 nm | n-InGaP                         | 2e17 |
| 100 nm  | n-InGaP Base                    | 2e20 |
| 25 nm   | n-GaAs Substrate                | 2e19 |
| 25 nm   | p-GaAs Substrate                | 2e19 |
| 40 nm   | p-InGaP Window                  | 3e18 |
| 500 nm  | p-GaAs Emitter                  | 2e18 |
| 50 nm   | i-GaAs                          |      |
| 2000 nm | n-GaAs Base                     | 2e17 |
| 50 nm   | n-InGaP BSF                     | 2e18 |
| 100nm   | n-GaAs Substrate                | 1e18 |

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 می کنیم. این سه معادله اصلی، معادله پواسون، معادله پیوستگی جریان حامل ها 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:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

که  $V$  توزیع پتانسیل درون ساختار سلول خورشیدی،  $\epsilon$  ضریب گذردهی الکتریکی نیم رسانا و  $\rho$  چگالی بار هستند. با حل این معادله و تعیین پتانسیل الکتریکی می توان میدان الکتریکی را به دست آورد [۷].

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

$$q \frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{J}_n - q(R_n - G_n) \quad (2)$$

$$q \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{J}_p - q(R_p - G_p) \quad (3)$$

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 باز ترکیب 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:

استفاده از سلول خورشیدی جهت تولید انرژی پاک به دلیل مزایای ویژه آن، بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تکنولوژی آن با سرعت چشمگیری رو به توسعه می باشد [۱-۳]. در ساختار این سلولها از یک نیمه هادی به عنوان لایه جاذب استفاده می شود که می تواند 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 می شوند. 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 می نامند [۴].

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

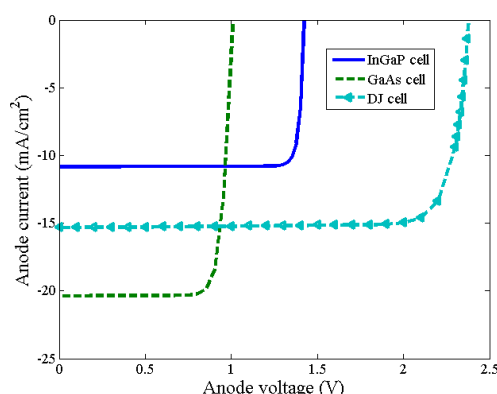
در این مقاله سلولهای خورشیدی تک پیوندی InGaP، تک پیوندی GaAs و دو پیوندی GaAs-InGaP شبیه سازی و مقایسه شده اند.

## ۲- ساختار سلول خورشیدی

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

پاسخ طیفی سلول دویبندی 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 به دلیل بازه جذبی وسیعتر جریان بیشتری را تولید می‌کند ولی سلول InGaP به دلیل 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 تأیید می‌کند ولی مورد دوم در این شکل صادق نیست. در توجیه این اتفاق می‌توان گفت که به دلیل 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 دویبندی 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 سلولها محدوده گسترده‌ای که حاصل همپوشانی هر دو طیف هست را دربر می‌گیرد.

مقایسه مشخصه I-V سلولهای خورشیدی نشان داد، ولتاژ

$$\bar{J}_n = -q\mu_n n \nabla V_n \quad (4)$$

$$\bar{J}_p = -q\mu_p p \nabla V_p \quad (5)$$

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

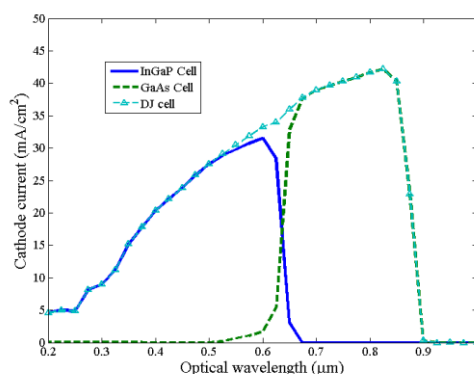
$$\eta = \frac{V_{MP} \times I_{MP}}{P_{Light}} \quad (6)$$

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 (شکل ۱) مقایسه می‌کنیم.

شکل ۲ پاسخ طیفی سلولهای خورشیدی را بیان می‌کند.



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

ملاحظه می‌گردد که سلول تک پیوندی InGaP به دلیل 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 دویبندی از سلول InGaP به عنوان سلول بالایی و سلول GaAs به عنوان زیر سلول پایینی استفاده می‌شود.

مدار باز سلول InGaP به دلیل داشتن شکاف باند انرژی بزرگ از ولتاژ مدار باز GaAs بیشتر است و ولتاژ مدار باز سلول دو پیوندی نیز تقریباً 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  $23/83$  و  $13/32$  درصد است. در حالیکه طراحی مناسب سلول دو پیوندی بازدهی آن را تا  $30/58$  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.*, "GaAs<sub>0.75</sub>P<sub>0.25</sub>/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. Yiyong, 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.