

طراحی سلول خورشیدی دو پیوندی $InGaP/GaAs$ بدون لایه ARC با بازده بالا

سبحان عباسیان^۱ رضا صباغی ندوشن^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی و شرکت توزیع برق اهواز

Sobhan_aba@yahoo.com

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

R_sabbaghi@iauctb.ac.ir

چکیده: در این کار ما با استفاده از نرم افزار *Silvaco Atlas Tcad* اثر اضافه کردن یک لایه اضافه همان BSF را بر عملکرد سلول خورشیدی دو پیوندی $InGaP / GaAs$ با پیوند تونلی ناهمگون $In_{0.49}Ga_{0.51}P - Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ بررسی نمودیم. این تحلیل ها نشان می دهد اضافه کردن یک لایه BSF به سلول پایین و افزایش ضخامت لایه BSF سلول بالا موجب کاهش بازترکیب و افزایش جریان اتصال کوتاه و در نتیجه افزایش راندمان می شود. ضخامت و غلظت بهینه لایه BSF اضافه شده بیشترین بازده سلول را به $56/83\%$ می رساند. در مرحله بعد برای به دست آوردن ولتاژ مدار باز بالاتر نیمه هادی های با پهنای باند بالا از گروه $v-III$ را مورد بررسی قرار دادیم و نیمه هادی $In_{0.5}(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}P$ را برای ساختن پیوند ناهمگون با $GaAs$ در سلول پایین یک سلول خورشیدی دو پیوندی $InGaP / GaAs$ انتخاب نمودیم. نتایج به دست آمده از بررسی میزان فوتون های تولید شده و واکنش طیفی نشان می دهد پیوند ناهمگون $GaAs-InAlGaP$ باعث انتقال بیشتر الکترون ها و حفره های تولید شده در سلول بالا و بازترکیب کمتر در سلول پایین می شود. برای این ساختار تحت تابش $AM1.5 (1sun)$ مقادیر بهینه $V_{OC} = 2/44 V$ ، $J_{sc} = 28/5 mA/cm^2$ ، $FF = 87/25\%$ و $\eta = 60/89\%$ به دست آمده و در نهایت سلول ارائه شده با مدل های دیگر مقایسه شد.

کلمات کلیدی: اتصال تونلی، سلول خورشیدی دو پیوندی، BSF

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۵/۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۵/۱۶

نام نویسنده ی مسئول: دکتر رضا صباغی ندوشن

نشانی نویسنده ی مسئول: تهران- بلوار آیت الله اشرفی اصفهانی- بالاتر از میدان پونک- بلوار امام حسن- مجتمع دانشگاهی آیت الله هاشمی

رفسنجانی

۱- مقدمه

رشد نیاز به انرژی و افزایش آلودگی‌های زیست محیطی، محرکی شده است که محققان و سرمایه‌گذاران در بخش انرژی به سمت تأمین انرژی از منابع تجدید پذیر جذب شوند. در فناوری فتوولتائیک پرتوهای خورشیدی توسط نیم‌رساناها با پهنای باند مختلف به الکتریسیته تبدیل می‌شود. سلول‌های خورشیدی چند پیوندی با دو یا چند سلول با پهنای باند مختلف فوتونهای با انرژی متفاوت را جذب میکنند. لایه بالایی این سلول‌ها موادی با شکاف انرژی زیاد است که نور خورشید با انرژی بالا را به خود جذب می‌کند. فوتون‌های کم انرژی تر نیز با عبور از این لایه به لایه بعدی که شکاف انرژی کمتری دارد، می‌رسد و جذب می‌شود [۱].

در سال ۱۹۸۵ Hutchby et al با ساخت سلول دو پیوندی AlGaAs/GaAs مطالعه بر روی این سلول‌ها را آغاز نمود. [۲] سپس در سال ۲۰۰۶ Lueck et al با طراحی یک سلول دو پیوندی InGaP/GaAs بازده 23.6% را به دست آوردند [۳]. Leem et al در سال ۲۰۰۹ با قرار دادن دیود تونلی در سلول دو پیوندی InGaP/GaAs به بازده 25.14% تحت تابش نور خورشید AM1.5G 1 sun رسیدند [۴] Singh et al در سال ۲۰۱۲ با تغییر در لایه BSF سلول پایین یک سلول دو پیوندی InGaP/GaAs به بازده 32.196% برای 1 sun و 36.678% برای 1000 sun تحت تابش AM1.5G دست یافتند [۵] در سال ۲۰۱۵ Nayak et al قرار دادن یک لایه BSF اضافه در سلول بالا به بازده 39.15% تحت تابش 1000 sun برای سلول دو پیوندی InGaP/GaAs رسیدند [۶]. در این کار ما با اضافه کردن یک لایه BSF اضافه در لایه پایین یک سلول خورشیدی دو پیوندی InGaP / GaAs و به دست آوردن ضخامت بهینه لایه BSF سلول بالا بازده سلول را بهبود داده و با جایگزین کردن پیوند $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$ در سلول پایین یک سلول خورشیدی دو پیوندی InGaP / GaAs با پیوند تونلی ناهمگون $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P} - \text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ ، حامل‌های بار تولیدشده در سلول بالا را با بازترکیب کمتر به سلول پایین رساندیم. مقادیر بهینه با استفاده از نرم‌افزار Silvaco Atlas Tcad به دست آمده و با کارهای قبل مقایسه شده است.

۲- ساختار سلول‌های چند پیوندی

سلول‌های چند پیوندی از چند سلول با پهنای باند متفاوت تشکیل شده است. هر سلول از لایه پنجره و پیوند p-n و لایه BSF تشکیل شده و

طول موج متناسب با نیمه‌هادی بکار رفته در پیوند p-n را جذب می‌کند. این سلول‌ها به وسیله پیوند تونلی به هم متصل شده‌اند. لایه پنجره با ماده دارای شکاف انرژی بزرگ تقریباً مانند یک ماده شفاف عمل میکند تا فوتون‌ها از آن عبور نمایند. پیوند p-n باعث جدا شدن حامل‌های بار تولیدشده بر اثر تابش نور خورشید می‌شود و لایه BSF با ایجاد میدان الکتریکی داخلی حامل اقلیت را منعکس می‌نماید که منجر به کاهش بازترکیب و افزایش جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی می‌شود [۵-۷].

۳- مدل سازی سلول پیشنهادی

۳-۱- انتخاب مواد برای لایه‌های مختلف

در جدول ۱ خواص مواد مختلف سلول دو پیوندی InGaP / GaAs نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نیمه‌هادی $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ با $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ و GaAs تطبیق شبکه دارد [۸-۱۲]. همچنین استفاده از نیمه‌هادی $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$ در سلول پایین ولتاژ مدار باز را افزایش می‌دهد. [۱۳] با بررسی میزان فوتون‌های تولید شده و واکنش طیفی در سلول پایین می‌توان نتیجه گرفت حامل‌های بار تولیدشده در سلول بالا در مسیر رسیدن به محل اتصال بیرونی با بازترکیب کمتر از سلول پایین عبور کرده و مانع از کاهش جریان اتصال کوتاه در کل سلول می‌شود.

همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد سلول پیشنهادی با پیوند تونلی $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P} - \text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ بازده بالاتری نسبت به پیوند تونلی GaAs دارد. در شکل ۱ ساختار پیشنهادی برای افزایش بازده در سلول دو پیوندی InGaP / GaAs نسبت به سلول پایه [۶] ارائه شده است.

شکل (۱): شمای سلول خورشیدی دو پیوندی پیشنهادی

جدول (۱): پارامترهای مهم نیمه‌هادی‌های $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P} - \text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ و

$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$ تطبیق داده شده با

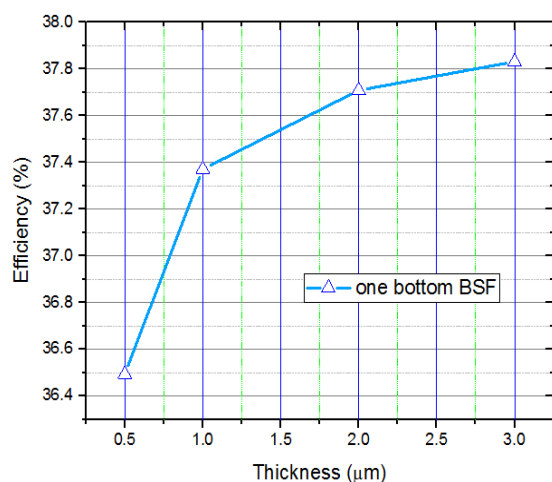
GaAs [9-12]

Material	GaAs	InGaP	InAlGaP	AlGaAs
Band gap E_g (eV) @300 K	1.42	1.9	2.3	1.8
Lattice constant a (Å)	5.65	5.65	5.65	5.64
Permittivity (es/eo)	13.1	11.6	11.7	11.0
Affinity (eV)	4.07	4.16	4.2	4.1
Heavy e- effective	0.063	3	2.85	2.4

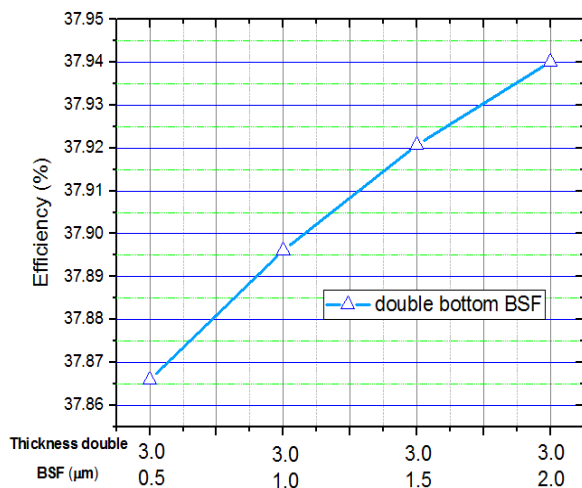
۴- نتایج و بحث

۴-۱- ضخامت و ناخالصی بهینه برای لایه BSF

در شکل ۴ و ۵ ضخامت و شکل ۶ و ۷ ناخالصی بهینه برای لایه‌های BSF نشان داده شده است. با استفاده از نتایج به دست آمده ضخامت $(2-3) \mu\text{m}$ و ناخالصی $(5 \times 10^{16} - 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$ در BSF سلول پایین و ضخامت $(0.3-0.7) \mu\text{m}$ و ناخالصی $(2 \times 10^{17} - 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$ در BSF سلول بالا بیشترین بازده را دارد.



شکل (۴): ضخامت بهینه یک لایه BSF در سلول پایین با غلظت ناخالصی $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

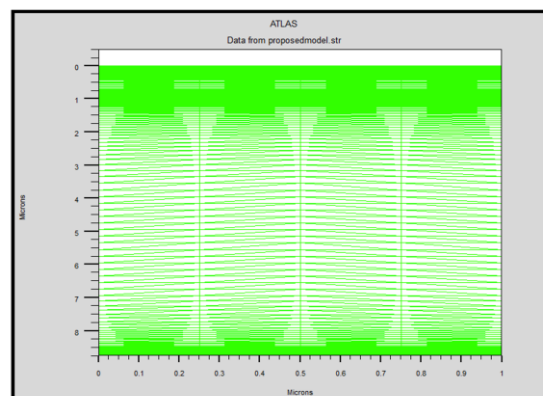


شکل (۵): ضخامت بهینه دو لایه BSF در سلول پایین با غلظت ناخالصی $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ برای هر دو لایه

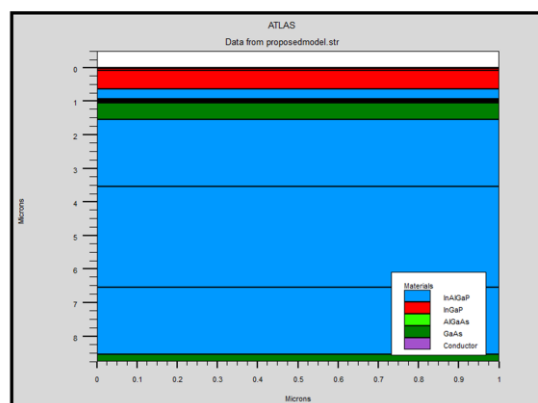
mass (m_e^*/m_0)				
Heavy h + effective mass (m_h^*/m_0)	0.5	0.64	0.64	0.62
e- mobility MUN ($\text{cm}^2/\text{V} \times \text{s}$)	8800	1945	2150	2000
h + mobility MUP ($\text{cm}^2/\text{V} \times \text{s}$)	400	141	141	138
e- density of states N_C (cm^{-3})	4.7e+17	1.30e+20	1.20e+20	4.35e+19
h + density of states N_V (cm^{-3})	7.0e+18	1.28e+19	1.28e+19	8.16e+18

۳-۲- شبیه سازی سلول پیشنهادی

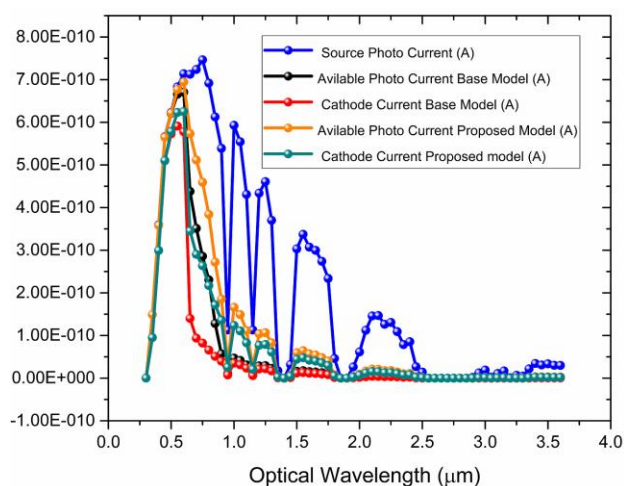
برای محاسبه دقیق در شبیه سازی سلول خورشیدی از مش بندی با تراکم های مختلف استفاده می شود. این تقسیم بندی در محل اتصال نیمه هادی ها بیشتر است. شکل ۲ مش بندی سلول پیشنهادی را نشان می دهد. در این مدل برای محاسبه جریان تونل زنی کوانتومی از QTY.MESH و QTX.MESH استفاده شده است. ساختار شبیه سازی شده تحت تابش استاندارد AM 1.5G (1sun) در شکل ۳ نشان داده شده است.



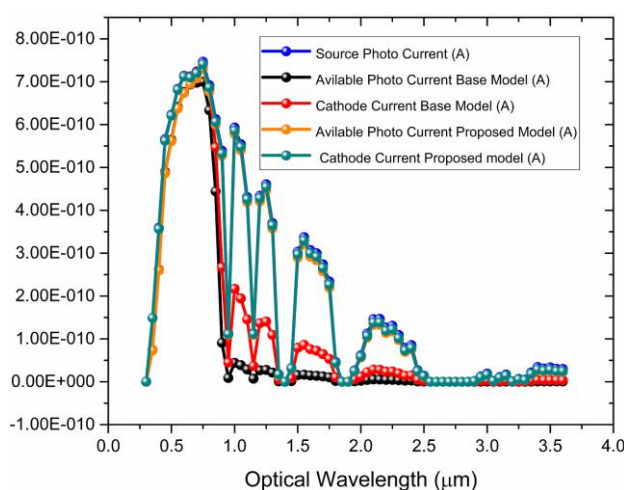
شکل (۲): مش بندی شبیه سازی شده در سلول خورشیدی پیشنهادی



شکل (۳): ساختار سلول خورشیدی پیشنهادی شبیه سازی شده



شکل (۸): واکنش طیفی در سلول InGaP



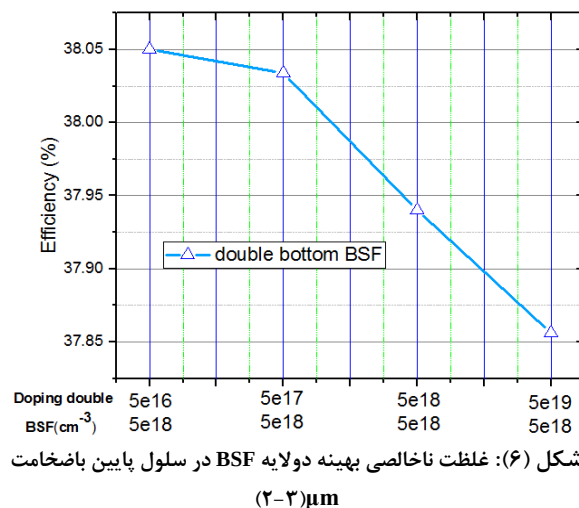
شکل (۹): واکنش طیفی در سلول GaAs-InAlGaP

۳-۴- فوتون‌های تولید شده

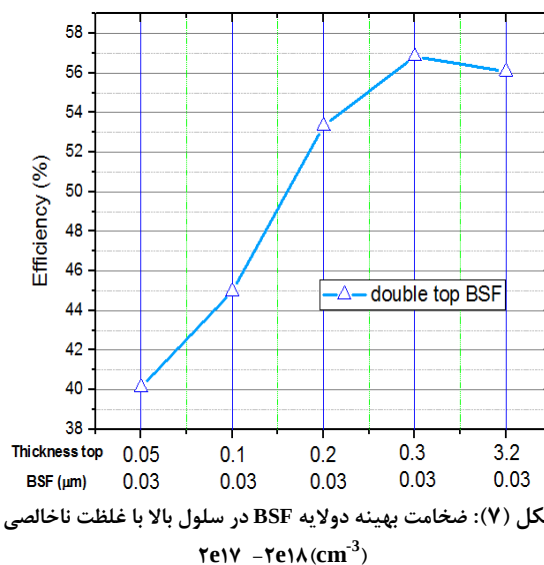
فوتون‌های تولیدشده بر اثر تابش نور در لایه‌های مختلف سلول خورشیدی از رابطه (۱) به دست می‌آید [۵].

$$G = \eta_0 \frac{P \lambda}{hc} \alpha e^{-\alpha y} \quad (1)$$

در این فرمول G سرعت تولید نور، η_0 بازده کوانتوم داخلی و P اثرات کلی انعکاس انتقال به خاطر جذب در هر مسیر اشعه، λ طول موج، h ثابت پلانک و C سرعت نور، α ضریب جذب و y فاصله نسبی است. با مقایسه فوتون‌های تولید شده سلول پایه و پیشنهادی در شکل ۱۰ و ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت میزان فوتون‌ها در لایه بیس سلول بالا و پایین مدل پیشنهادی افزایش یافته است.



شکل (۶): غلظت ناخالصی بهینه دولایه BSF در سلول پایین با ضخامت $(2-2) \mu m$



شکل (۷): ضخامت بهینه دولایه BSF در سلول بالا با غلظت ناخالصی $2e17 - 2e18 (cm^{-3})$

۴-۲- واکنش طیفی

واکنش طیفی شامل پارامترهای منبع نوری، نور جذب شده و جریان کاتد می‌باشد که مقدار آن بهره سلول خورشیدی را مشخص می‌کند. شکل ۸ فوتون‌های تولیدشده، فوتون‌های جذب شده و جریان کاتد را برای سلول بالا InGaP نشان می‌دهد. در شکل ۹ مشاهده می‌شود میزان فوتون‌های جذب شده و جریان کاتد در سلول $GaAs - In_{0.5}(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}P$ نسبت به سلول GaAs افزایش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت استفاده از $In_{0.5}(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}P - GaAs$ در سلول پایین یک سلول دو پیوندی InGaP/GaAs و بهینه کردن لایه BSF جذب فوتون‌های و جریان کاتد خروجی را افزایش می‌دهد.

داده شده است. با این افزایش بازده، استفاده مناسبتری از سیستم های توزیع انرژی میسر است [۱۶، ۱۷].

۵- مقایسه نتایج

در جدول ۲ مدل بهینه شده سلول پیشنهادی با مدل های دیگر مقایسه شده است. همان طور که دیده می شود ساختار سلول دو پیوندی پیشنهادی GaInP / AlGaInP - GaAs با پیوند تونلی-GaInP و AlGaAs و لایه BSF بهینه شده عملکرد بهتری نسبت به سلول دو پیوندی GaInP / GaAs ارائه شده در مقاله [۶] دارد.

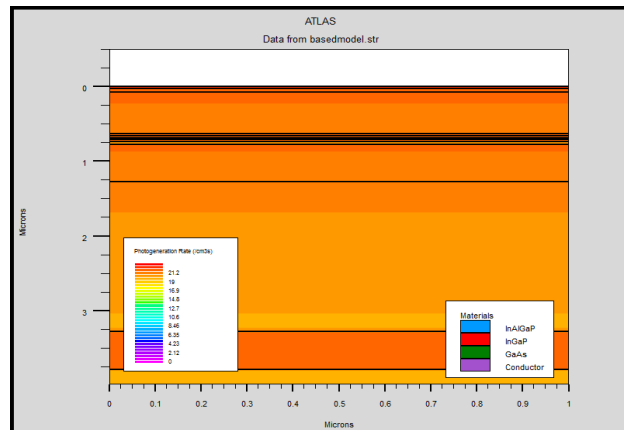
جدول (۲): مقایسه مدل پیشنهادی با سلول های خورشیدی دو پیوندی

Solar cells	Spectrum	Sun	Voc (V)	Jsc(mA/c m ²)	FF (%)	η (%)
Lueck et al [3]	AM1.5G	1.0	2.23	10.9	79.00	23.6
Leem et al [4]	AM1.5G	1.0	2.30	10.7	87.55	25.14
Singh et al [5]	AM1.5G	1.0	2.39	16.1	87.52	32.19
Nayak et al [6]	AM1.5G	1000	2.66	17.3	88.67	39.15
Dutta et al [15]	AM1.5G	1000	2.66	18.2	88.29	40.87
Sahoo et al [7]	AM1.5G	1000	2.70	18.9	88.88	43.60
This model	AM1.5G	1.0	2.44	28.5	87.25	60.89

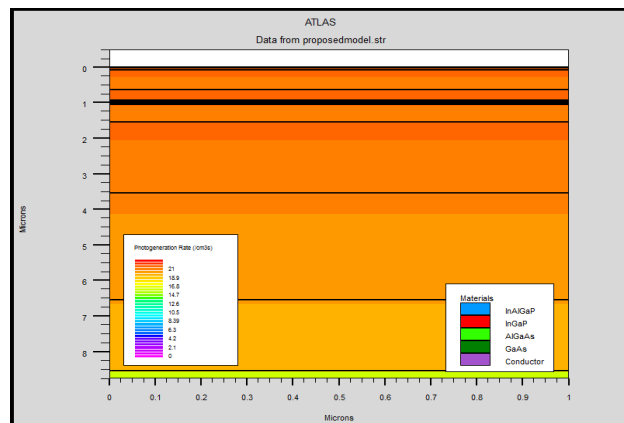
GalnP / GaAs ارائه شده در مدل های دیگر

۶- نتیجه گیری

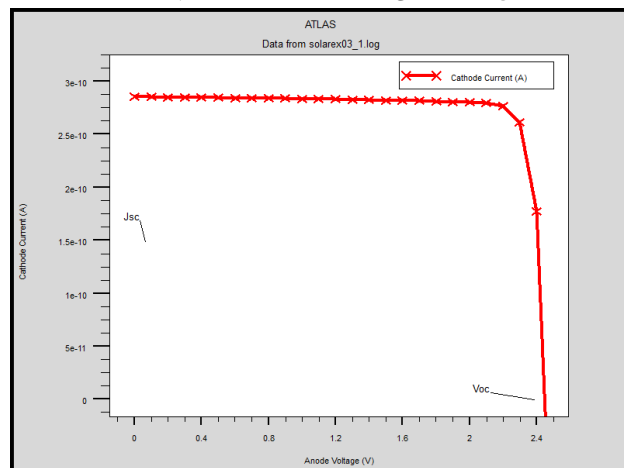
در این کار ما با قرار دادن دو لایه BSF در سلول پایین و تعیین ضخامت بهینه لایه دوم BSF سلول بالا در یک سلول دو پیوندی GaInP / GaAs باعث افزایش جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز سلول شدیم. نتایج نشان می دهد پیوند تونلی $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ - $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ نسبت به پیوند تونلی GaAs عملکرد سلول را با افزایش ضخامت لایه BSF سلول بالا بهبود می دهد. بازده سلول در این مرحله ۵۶/۸۳٪ گزارش شده است. همچنین با جایگذاری $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{P}$ با پهنای باند ۲/۳ eV در لایه امیتر سلول پایین بازده را ۴/۰۶٪ افزایش دادیم.



شکل (۱۰): فوتون های تولید شده در سلول پایه



شکل (۱۱): فوتون های تولید شده در سلول پیشنهادی



شکل (۱۲): منحنی I-V در سلول خورشیدی پیشنهادی

۴-۴- منحنی I-V

بازده یک سلول خورشیدی توسط رابطه (۲) به دست می آید [14].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{P_{in}} \quad (2)$$

که در آن V_m ولتاژ حداکثر و I_m جریان حداکثر و P_{in} توان ورودی سلول است. منحنی I-V سلول پیشنهادی در شکل ۱۲ نشان

[۱۷] محمدعلی یزدان پناه جهرمی، سید مسعود برکاتی، "دیدگاهی جدید در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های تجدیدپذیر تولید انرژی الکتریکی" مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره سوم، پائیز ۱۳۹۵

سلول بهینه‌سازی شده $V_{OC} = 2/44 \text{ V}$, $J_{SC} = 28/5 \text{ mA/cm}^2$, $\eta = 60.89\%$ و $FF = 87.25\%$ را تحت تابش (1 sun) فراهم می‌کند.

مراجع

- [1] J. Zeitouny, E. A. Katz, A. Dollet, A. Vossier, Band Gap Engineering of Multi-Junction Solar Cells: Effects of Series Resistances and Solar Concentration, Scientific Reports, 7 (2017) 1766.
- [2] J.A. Hutchby, R.J. Markunas, S.M. Bedair, Material aspects of the fabrication of multi junction solar cells, in: Proceedings of the 14th Critical Reviews of Technology Conference. Arlington, 1985, pp. 40-61.
- [3] M.R. Lueck, C.L. Andre, A.J. Pitera, M.L. Lee, E.A. Fitzgerald, S.A. Ringel, Dual junction GaInP/GaAs solar cells grown on metamorphic SiGe/Si substrates with high open circuit voltage, IEEE Electron Device Lett. 27 (2006) 142.
- [4] J.W. Leem, Y.T. Lee, J.S. Yu, Optimum design of InGaP/GaAs dual-junction solar cells with different tunnel diodes, Opt. Quantum Electron. 41 (2009) 605.
- [5] K.J. Singh, S.K. Sarkar, Highly efficient ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell numerical modeling using optimized InAlGaP BSF layers, Opt. Quantum Electron. 43 (2011) 1-21.
- [6] P.P. Nayak, J.P. Dutta, G.P. Mishra, Efficient InGaP/GaAs DJ solar cell with double back surface field layer, Eng. Sci. Technol. Int. J. 18 (2015) 325-335.
- [7] G.S. Sahoo, P.P. Nayak, G.P. Mishra, An ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell with hetero tunnel junction, Superlattices and Microstructures 95 (2016) 115-127.
- [8] S. adachi, *Physical Properties of III-V semiconductor compounds InP, InGaAsP*, 1st ed. USA: John Wiley & Sons, 1992.
- [9] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Rammohan, Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys, J. Appl. Phys. 89 (2001) 5815.
- [10] SILVACO Data Systems Inc, Silvaco ATLAS User's Manual, 2010.
- [11] H.Y. Lee, C.T. Lee, The investigation for various treatments of InAlGaP Schottky diodes, in: Proceedings of the 8th International Conference on Electronic Materials, IUMRS-ICEM 23, 2002, pp. 99-102.
- [12] Ching-Hwa Ho, Ji-Han Li, and Yu-Shyan Lin, Optical characterization of a GaAs/In0.5(AlxGa1-x)0.5P/GaAs heterostructure cavity by piezoreflectance spectroscopy
- [13] Xinyi Li, Wei Zhang, Jianqin Zhang, Hongbo Lu, Dayong Zhou, Lijie Sun, and Kaijian Chen, Study on 2.05 eV AlO.13GaInP sub-cell and its hetero-structure cells.
- [14] S. M. Sze, M. K. Lee, Semiconductor Devices Physics and Technology, Wiley 2010
- [15] J.P. Dutta, P.P. Nayak, G.P. Mishra, Design and evaluation of ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell with InGaP tunnel junction and optimized double top BSF layer, Optik 127 (2016) 4156-4161.

[۱۶] مهران صباحی، امین اشرف گندمی، سعید سعیدآبادی، "مبدل چند سطحی متصل به شبکه با ایمنی بالا با قابلیت اخذ بیشینه توان از سلول خورشیدی" مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره سوم، پائیز ۱۳۹۵