بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

بررسی تأثیر لایه مسدودکننده الکترون (EBL) AlGaN بر مشخصه‌های سلول‌های خورشیدی چاه کوانتومی چندگانه InGaN/GaN

علی نصیری[۱]، آزیتا زندی گوهرریزی[۲]، حسن صفری[۱]، و قاسم الهیاری‌زاده[۳]

[۱] گروه فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته،کرمان
Alina30ri0766@gmail.com

[۲] دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، پژوهشکده فوتونیک، گروه نیمه‌هادی‌ها، کرمان

[۳] دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، تهران

چکیده – در این مقاله جهت بررسی تأثیر لایه مسدودکننده الکترون AlGaN (EBL) بر مشخصه‌های سلول‌های خورشیدی چاه کوانتومی چندگانه InGaN/GaN، ابتدا این ساختار بدون لایه EBL با استفاده از نرم‌افزار سیلواکو-اطلس شبیه سازی شد و مقدار بازده ۲۷/۸۰ درصد به‌دست آمد. سپس با افزودن لایه مسدودکننده الکترون p-$Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ با ضخامت ۲۰nm به ازای مقدار ناخالصی‌های مختلف، مشخصه‌های سلول مورد بررسی قرار گرفت و مقدار بهینه برای بازده، ۴۰/۰۵ در صد به ازای مقدار ناخالصی 2×10^{19} cm^{-3} به‌دست آمد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزودن لایه مسدودکننده الکترون p-AlGaN به ساختار سلول، انحراف باند رسانش را افزایش می‌دهد. این امر شارش الکترون‌ها به ناحیه p را مسدود خواهد کرد و درنتیجه به علت کاهش بازترکیب و بهبود جمع‌آوری حفره‌ها، بازده سلول خورشیدی افزایش خواهد یافت.

کلید واژه- بازده، چاه کوانتومی چندگانه، سلول خورشیدی، شبیه‌سازی، لایه مسدودکننده الکترون

Study of the effect of AlGaN **electron** blocking layer on the characteristics of InGaN/GaN MQW solar cells

Ali Nasiri[1], Azita Zandi **Goharrizi**[2], **Hassan Safari**[1] and Ghasem Alahyarizadeh[3]

[1] Department of Photonics, Graduate University of Advanced Technology, Kerman
Alina30ri0766@gmail.com

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

[2] Photonic Research Institute, Graduate University of Advanced Technology, Kerman

[3] Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract- In this paper, to investigate the effect of AlGaN electron blocking layer (EBL) on the characteristics of InGaN/GaN multi-quantum-well solar cells, at first this structure without EBL layer was simulated using Silvaco-atlas software and efficiency of 27.80% was achieved. Then by inserting a 20nm p-$Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ electron blocking layer the cell characteristics was evaluated for different doping values, and the optimal efficiency for 2×10^{19} cm^{-3} doping concentration was **obtained** 40.05%. **Simulation results show that inserting the p-AlGaN EBL layer to the cell structure increased the conduction band offset. This will block the flow of electrons to the p-region, consequently the solar cell efficiency will be increased due to the reducing of recombination and improving the hole collection.**

Keywords: Efficiency, Multi-quantum-well, Solar cell, Simulation, Electron blocking layer

مقدمه

آلیاژهای InGaN از ویژگی‌های امیدوارکننده بسیاری برای کاربردهای فوتوولتائیک، از جمله شکاف انرژی مستقیم و قابل تنظیم از طیف مرئی تا فرابنفش، ضریب جذب بزرگ، تحرک‌پذیری زیاد و مقاومت گرمایی/تابشی عالی برخوردار هستند [۱]. نخستین بار در سال ۱۹۹۰ استفاده از ساختار چاه کوانتومی چندگانه (MQW) به عنوان جاذب در سلول خورشیدی پیشنهاد شد، که با ارائه ساختار (AlGa)As/GaAs/(InGa)As، رسیدن به بازده‌های بیش از ۴۰ درصد را دست یافتنی می‌دانست [۲]. بعد از شناخت ویژگی‌های عالی مواد مبتنی بر نیترید، تلاش برای ساخت سلول‌های خورشیدی ایندیوم گالیوم نیترید (InGaN) از سال ۲۰۰۳ توسط تعدادی از گروه‌ها صورت گرفت [۳]. سلول‌های خورشیدی با ساختار ناهمگون InGaN/GaN MQW به علت بازده بالایی که دارند، به وفور با تنوع پارامترهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۱۹ به منظور آنالیز مشخصه‌های الکتریکی و الکترونیکی سلول‌های خورشیدی InGaN/GaN MQW تحت تأثیر دما، تعداد چاه‌ها و درصد مولی ایندیوم در ترکیب، از یک مدل عددی استفاده شد و به بازده ۳۱ درصد رسیدند [۱]. در مقاله حاضر، ابتدا ساختار یک سلول خورشیدی InGaN/GaN MQW در نرم‌افزار سیلواکو-اطلس شبیه‌سازی شده است و پارامترهای آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس با افزودن لایه p-AlGaN به عنوان لایه مسدودکننده الکترون، به علت افزایش انحراف باند رسانش، شارش الکترون‌ها به ناحیه p مسدود می‌شود و در نتیجه با کاهش بازترکیب در این ناحیه، جمع‌آوری حفره‌ها بهبود یافته و بازده سلول خورشیدی (η) افزایش خواهد یافت.

معرفی پارامترهای شبیه‌سازی

شبیه‌سازی تحت شرایط استاندارد ۱Sun، دمای ۳۰۰ کلوین و تابش AM۱/۵ انجام شده است. شکاف انرژی و سایر پارامترهای فیزیکی مربوط به آلیاژهای سه‌تایی $In_xGa_{1-x}N$ و $Al_xGa_{1-x}N$ که در شبیه‌سازی استفاده شده‌اند، با معادله‌های زیر بیان می‌شوند [۴]:

$$E_{g,In_xGa_{1-x}N} = xE_{g,InN} + (1-x)E_{g,GaN} - 1.43x(1-x) \quad (۱)$$

$$Q_{g,In_xGa_{1-x}N} = xQ_{g,InN} + (1-x)Q_{g,GaN} \quad (۲)$$

$$E_{g,Al_xGa_{1-x}N} = xE_{g,AlN} + (1-x)E_{g,GaN} - 0.7x(1-x) \quad (۳)$$

$$Q_{g,Al_xGa_{1-x}N} = xQ_{g,AlN} + (1-x)Q_{g,GaN} \quad (۴)$$

در این روابط، مقدار x به‌ترتیب کسر مولی ایندیوم و آلومینیوم را در ترکیب‌های InGaN و AlGaN بیان می‌کند. $E_{g,InN}$، $E_{g,GaN}$ و $E_{g,AlN}$ به‌ترتیب شکاف انرژی مربوط به

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

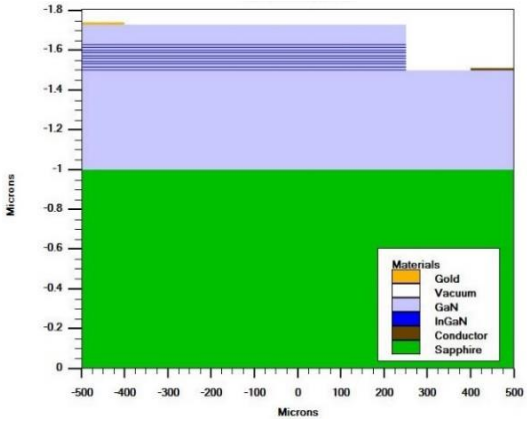
InN، GaN و AlN هستند. همچنین $Q_{g,InN}$، $Q_{g,GaN}$ و $Q_{g,AlN}$ سایر پارامترهای فیزیکی مربوط به InN، GaN و AlN می‌باشند که در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول ۱: ویژگی‌های مواد تری‌نیترید در دمای اتاق [4].

پارامتر	GaN	InN	AlN
شکاف انرژی Eg(eV)	۳/۴۷	۶/۲۸	۰/۸
ضریب وابستگی الکترون χ(eV)	۴/۱	۱/۹	۵/۸
ثابت شبکه (Å)	۳/۱۸۹	۳/۱۱۲	۳/۵۴۵
ضریب شکست نزدیک شکاف انرژی	۲/۵۰۶	۲/۰۳۵	۲/۹
جرم مؤثر الکترون	$۰/۲۲m_e$	$۰/۲۶۱m_e$	$۰/۱۵۷m_e$

طراحی ساختار و نتایج شبیه‌سازی

ساختار سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده در این مطالعه، در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار شامل ماده یاقوت به ضخامت ۱μm به عنوان زیرلایه، لایه بافر n-GaN با ضخامت ۵۰۰nm و میزان ناخالصی $۲\times۱۰^{۱۸}\ cm^{-۳}$، لایه ذاتی با ضخامت ۱۳۰nm شامل ۱۰ چاه کوانتومی $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ با ضخامت ۴nm و سدهای GaN با ضخامت ۱۰nm و همچنین ماده p-GaN به عنوان لایه گسیلنده با ضخامت ۱۰۰nm و مقدار ناخالصی $۲\times۱۰^{۱۷}\ cm^{-۳}$ است.

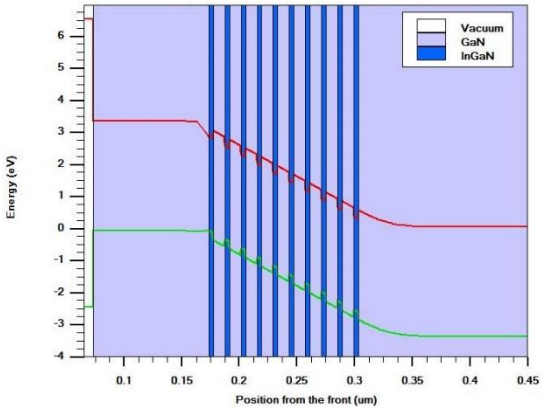


شکل ۲: ساختار سلول شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار سیلواکو

پارامترهای حاصل از شبیه‌سازی این ساختار از جمله چگالی جریان اتصال-کوتاه (J_{SC})، ولتاژ مدار-باز (V_{OC})، ضریب پرشدگی(FF) و بازده (η) در جدول ۲ مشخص شده است. نمودار باند انرژی مربوط به این ساختار در شکل ۲ نشان داده شده است.

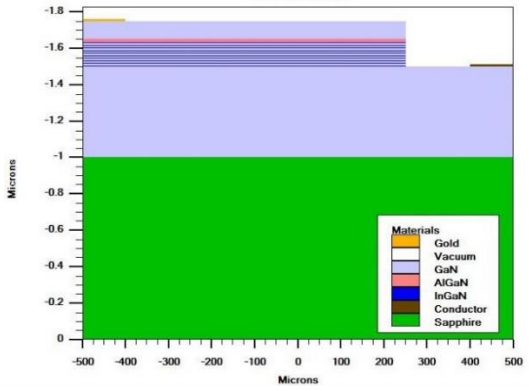
جدول ۲: پارامترهای سلول خورشیدی شبیه‌سازی‌شده InGaN/GaN MQW

η(٪)	FF(٪)	V_{OC}(V)	J_{SC} (mA/cm^2)
۲۷/۸۰	۴۰	۲/۵۱	۲۷/۶۱



شکل ۲: نمودار باند انرژی مربوط به ساختار سلول خورشیدی InGaN/GaN MQW

سپس با افزودن لایه $p\text{-}Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ با ضخامت ۲۰nm به ازای مقدار ناخالصی‌های مختلف آن، عملکرد سلول خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفت (جدول۳). ساختار حاصل در شکل ۳ به‌نمایش گذاشته شده است.



شکل ۳: ساختار سلول خورشیدی InGaN/GaN MQW شامل لایه p-AlGaN

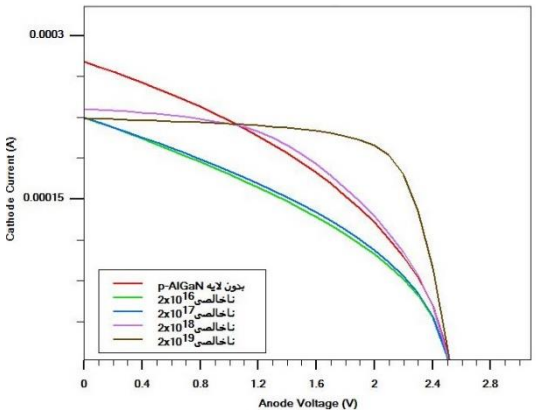
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

جدول ۳: پارامترهای حاصل از شبیه‌سازی ساختار InGaN/GaN MQW شامل لایه p-AlGaN به‌ازای مقدار ناخالصی‌های مختلف

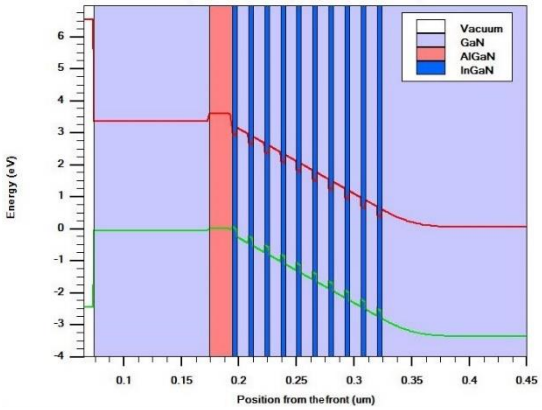
ناخالصی (cm^{-3})	J_{SC} (mA/cm^2)	V_{OC}(V)	FF(٪)	η(٪)
۲×۱۰^{۱۶}	۲۲/۵۰	۲/۵۱	۳۹/۰۴	۲۳/۴۶
۲×۱۰^{۱۷}	۲۲/۴۹	۲/۵۱	۳۹/۰۴	۲۲/۰۳
۲×۱۰^{۱۸}	۲۳/۲۷	۲/۵۱	۴۹/۸۰	۲۹/۱۲
۲×۱۰^{۱۹}	۲۲/۴۰	۲/۵۱	۷۱/۰۰	۴۰/۰۵

شکل ۴ نمودار ولتاژ-جریان مربوط به ساختار بدون لایه p-AlGaN و ساختارهای جدول ۳ را با یکدیگر مقایسه می‌کند. با توجه به شکل ۴ و مقایسه جدول ۲ و جدول ۳ ملاحظه می‌شود که با افزودن لایه p-AlGaN به ساختار سلول تا مقدار ناخالصی ۲×۱۰^{۱۷}، بازده کمتر از حالت بدون این لایه است. اما با افزایش ناخالصی تا مقدار ۲×۱۰^{۱۹} بازده سلول خورشیدی تا مقدار ۴۰/۰۵ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۴: مقایسه نمودار ولتاژ-جریان مربوط به ساختار بدون لایه p-AlGaN و ساختارهای شامل این لایه با ناخالصی‌های مختلف

همچنین نمودار باند انرژی مربوط به ساختار شامل لایه p-AlGaN در شکل ۵ آورده شده است. با مقایسه نمودارهای شکل۲ و ۵ می‌توان مشاهده کرد که افزودن لایه p-AlGaN، باعث افزایش انحراف باند رسانش شده است درحالیکه ارتفاع سد را در باند ظرفیت حفظ می‌کند. بنابراین لایه p-AlGaN به‌عنوان EBL با مسدودکردن شارش الکترون‌ها به ناحیه p، بازترکیب الکترون و حفره را در این ناحیه کاهش و بازده سلول خورشیدی را افزایش می‌دهد.



شکل ۵: نمودار باند انرژی مربوط به ساختار شامل لایه p-AlGaN

نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا ساختار یک سلول خورشیدی InGaN/GaN MQW با استفاده از نرم‌افزار سیلواکو-اطلس شبیه‌سازی شد که بازده آن برابر با ۲۷/۸۰ درصد بود. سپس افزودن لایه p-AlGaN به‌عنوان لایه EBL با مقدار ناخالصی زیاد، به‌علت مسدودکردن شارش الکترون‌ها به ناحیه p و کاهش بازترکیب الکترون و حفره در این ناحیه، بازده سلول خورشیدی را تا مقدار ۴۰/۰۵ درصد افزایش داد.

مرجع

[1] B. Chouchen, et al., "Numerical modeling of electronic and electrical characteristics of InGaN/GaN-MQW solar cell", *Materials* **8**, 1241, 2019.

[2] K. W. J. Barnham, et al., "A new approach to high-efficiency multi-band-gap solar cells", *J. Appl. Phys.* **67**, 3490, 1990.

[3] A. G. Bhuiyan, et al., "InGaN solar cells: present state of the art and important challenges", *IEEE Journal of photovoltaics* **2**, 276, 2012.

[4] G. Alahyarizadeh, et al., "Numerical study of performance characteristics of deep violet InGaN DQW laser diodes with AlInGaN quaternary multi quantum barrier electron blocking layer", *Optik* **124**, 6765, 2013.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]