



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) AlGa<sub>N</sub> بر مشخصه‌های سلول‌های خورشیدی چاه کوانتومی چندگانه InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>

علی نصیری<sup>۱</sup>، آزیتا زندی گوهرریزی<sup>۲</sup>، حسن صفری<sup>۱</sup>، و قاسم اله‌یاری‌زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

[Alina30ri0766@gmail.com](mailto:Alina30ri0766@gmail.com)

<sup>۲</sup> دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، پژوهشکده فوتونیک، گروه نیمه‌هادی‌ها، کرمان

<sup>۳</sup> دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، تهران

چکیده - در این مقاله جهت بررسی تأثیر لایه مسدودکننده الکترون (EBL) AlGa<sub>N</sub> بر مشخصه‌های سلول‌های خورشیدی چاه کوانتومی چندگانه InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>، ابتدا این ساختار بدون لایه EBL با استفاده از نرم‌افزار سیلوکو-اتلس شبیه‌سازی شد و مقدار بازده ۲۷/۸۰ درصد به دست آمد. سپس با افزودن لایه مسدودکننده الکترون p-Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N با ضخامت ۲۰ nm به ازای مقدار ناخالصی‌های مختلف، مشخصه‌های سلول مورد بررسی قرار گرفت و مقدار بهینه برای بازده، ۴۰/۰۵ درصد به ازای مقدار ناخالصی  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزودن لایه مسدودکننده الکترون p-AlGa<sub>N</sub> به ساختار سلول، انحراف باند رسانش را افزایش می‌دهد. این امر شارش الکترون‌ها به ناحیه p را مسدود خواهد کرد و در نتیجه به علت کاهش باز ترکیب 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 AlGa<sub>N</sub> electron blocking layer on the characteristics of InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MQW solar cells

Ali Nasiri<sup>1</sup>, Azita Zandi Goharrizi<sup>2</sup>, Hassan Safari<sup>1</sup> and Ghasem Alahyarizadeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Photonics, Graduate University of Advanced Technology, Kerman  
[Alina30ri0766@gmail.com](mailto:Alina30ri0766@gmail.com)

<sup>2</sup> Photonic Research Institute, Graduate University of Advanced Technology, Kerman

<sup>3</sup> Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran

**Abstract-** In this paper, to investigate the effect of AlGa<sub>N</sub> electron blocking layer (EBL) on the characteristics of InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 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<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N electron blocking layer the cell characteristics was evaluated for different doping values, and the optimal efficiency for  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  doping concentration was **obtained 40.05%**. **Simulation results show that inserting the p-AlGa<sub>N</sub> 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

گرفته‌اند. سپس با افزودن لایه p-AlGa<sub>N</sub> 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 ( $\eta$ ) افزایش خواهد یافت.

### معرفی پارامترهای شبیه‌سازی

شبیه‌سازی تحت شرایط استاندارد 1Sun، دمای ۳۰۰ کلوین و تابش  $AM1/5$  انجام شده است. شکاف انرژی و سایر پارامترهای فیزیکی مربوط به آلیاژهای سه‌تایی  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  و  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  که در شبیه‌سازی استفاده شده‌اند، با معادله‌های زیر بیان می‌شوند [۴]:

$$E_{g,\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = xE_{g,\text{InN}} + (1-x)E_{g,\text{GaN}} - 1.43x(1-x) \quad (1)$$

$$Q_{g,\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = xQ_{g,\text{InN}} + (1-x)Q_{g,\text{GaN}} \quad (2)$$

$$E_{g,\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = xE_{g,\text{AlN}} + (1-x)E_{g,\text{GaN}} - 0.7x(1-x) \quad (3)$$

$$Q_{g,\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = xQ_{g,\text{AlN}} + (1-x)Q_{g,\text{GaN}} \quad (4)$$

در این روابط، مقدار  $x$  به ترتیب کسر مولی ایندیوم و آلومینیوم را در ترکیب‌های InGa<sub>N</sub> و AlGa<sub>N</sub> بیان می‌کند.  $E_{g,\text{AlN}}$ ،  $E_{g,\text{GaN}}$  و  $E_{g,\text{InN}}$  به ترتیب شکاف انرژی مربوط به

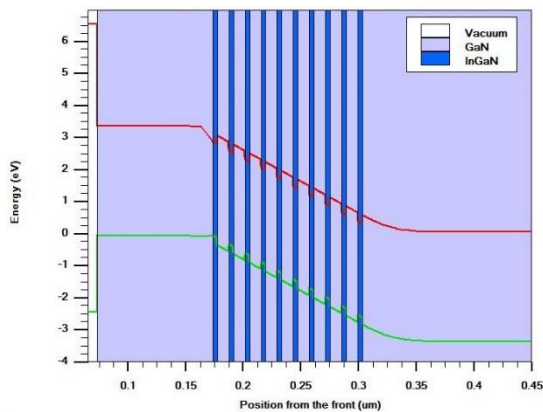
### مقدمه

آلیاژهای InGa<sub>N</sub> از ویژگی‌های امیدوارکننده بسیاری برای کاربردهای فوتولتائیک، از جمله شکاف انرژی مستقیم و قابل تنظیم از طیف مرئی تا فرابنفش، ضریب جذب بزرگ، تحرک پذیری 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  $(\text{AlGa})\text{As}/\text{GaAs}/(\text{InGa})\text{As}$ ، رسیدن به بازده‌های بیش از ۴۰ درصد را دست یافتنی می‌دانست [۲]. بعد از شناخت ویژگی‌های عالی مواد مبتنی بر نیتريد، تلاش برای ساخت سلول‌های خورشیدی ایندیوم گالیوم نیتريد (InGa<sub>N</sub>) از سال ۲۰۰۳ توسط تعدادی از گروه‌ها صورت گرفت [۳]. سلول‌های خورشیدی با ساختار ناهمگون InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 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 InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 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 InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MQW در نرم‌افزار سیلوکو-اتلس شبیه‌سازی شده است و پارامترهای آن مورد بررسی قرار

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

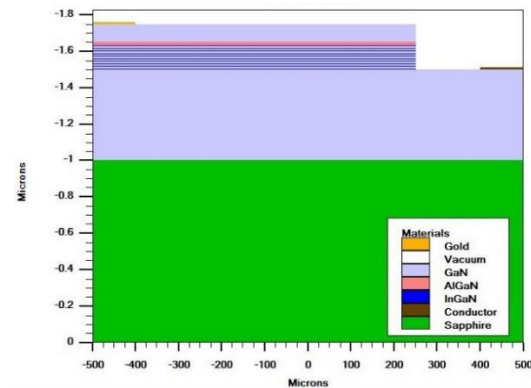
جدول ۲: پارامترهای سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده  
 InGaN/GaN MQW

$\eta$ (%)	FF(%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
۲۷/۸۰	۴۰	۲/۵۱	۲۷/۶۱



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

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



شکل ۳: ساختار سلول خورشیدی InGaN/GaN MQW شامل لایه  
 $p\text{-AlGaIn}$

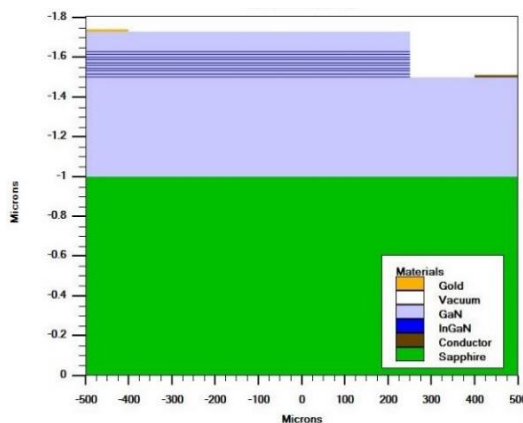
$\text{InN}$ ،  $\text{GaN}$  و  $\text{AlN}$  هستند. همچنین  $Q_{g,\text{InN}}$ ،  $Q_{g,\text{GaN}}$  و  $Q_{g,\text{AlN}}$  سایر پارامترهای فیزیکی مربوط به  $\text{GaN}$ ،  $\text{InN}$  و  $\text{AlN}$  می‌باشند که در جدول ۱ آورده شده‌اند.

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

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

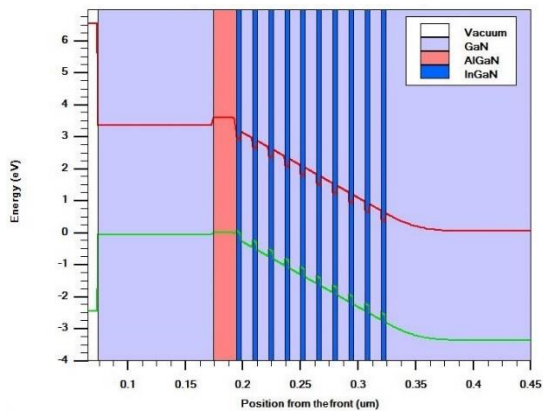
### طراحی ساختار و نتایج شبیه‌سازی

ساختار سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده در این مطالعه، در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار شامل ماده یاقوت به ضخامت  $1\ \mu\text{m}$  به عنوان زیرلایه، لایه بافر  $n\text{-GaIn}$  با ضخامت ۵۰۰ nm و میزان ناخالصی  $2 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ ، لایه ذاتی با ضخامت ۱۳۰ nm شامل ۱۰ چاه کوانتومی  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  با ضخامت ۴ nm و سدهای  $\text{GaIn}$  با ضخامت ۱۰ nm و همچنین ماده  $p\text{-GaIn}$  به عنوان لایه گسیلنده با ضخامت ۱۰۰ nm و مقدار ناخالصی  $2 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$  است.



شکل ۲: ساختار سلول شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار سیلوکو

به‌عنوان EBL با مسدود کردن شارش الکترون‌ها به ناحیه p، باز ترکیب 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-AlGaIn

### نتیجه‌گیری

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

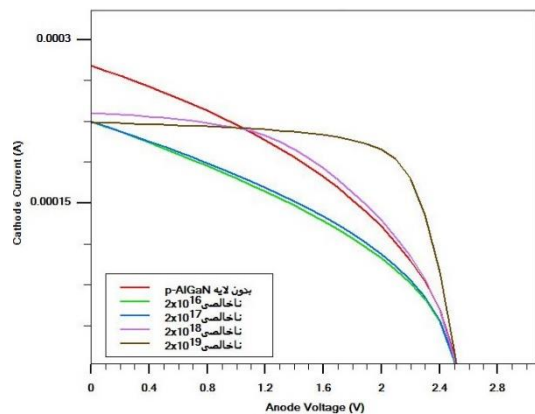
### مرجع

- [1] B. Chouchen, et al., "Numerical modeling of electronic and electrical characteristics of InGaIn/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., "InGaIn 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 InGaIn DQW laser diodes with AlInGaIn quaternary multi quantum barrier electron blocking layer", *Optik* **124**, 6765, 2013.

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

ناخالصی (cm <sup>-3</sup> )	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF(%)	η(%)
۲×۱۰ <sup>۱۶</sup>	۲۲/۵۰	۲/۵۱	۳۹/۰۴	۲۳/۴۶
۲×۱۰ <sup>۱۷</sup>	۲۲/۴۹	۲/۵۱	۳۹/۰۴	۲۲/۰۳
۲×۱۰ <sup>۱۸</sup>	۲۳/۲۷	۲/۵۱	۴۹/۸۰	۲۹/۱۲
۲×۱۰ <sup>۱۹</sup>	۲۲/۴۰	۲/۵۱	۷۱/۰۰	۴۰/۰۵

شکل ۴ نمودار ولتاژ-جریان مربوط به ساختار بدون لایه p-AlGaIn 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-AlGaIn به ساختار سلول تا مقدار ناخالصی ۲×۱۰<sup>۱۷</sup>، بازده کمتر از حالت بدون این لایه است. اما با افزایش ناخالصی تا مقدار ۲×۱۰<sup>۱۹</sup> بازده سلول خورشیدی تا مقدار ۴۰/۰۵ درصد افزایش می‌یابد.



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

همچنین نمودار باند انرژی مربوط به ساختار شامل لایه p-AlGaIn در شکل ۵ آورده شده است. با مقایسه نمودارهای شکل ۲ و ۵ می‌توان مشاهده کرد که افزودن لایه p-AlGaIn باعث افزایش انحراف باند رسانش شده است در حالیکه ارتفاع سد را در باند ظرفیت حفظ می‌کند. بنابراین لایه p-AlGaIn