



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_{0.1}N بر مشخصه‌های سلول‌های خورشیدی چاه کوانتومی چندگانه InGa_{0.1}N/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 (EBL) AlGa_{0.1}N بر مشخصه‌های سلول‌های خورشیدی چاه کوانتومی چندگانه InGa_{0.1}N/GaN، ابتدا این ساختار بدون لایه EBL با استفاده از نرم‌افزار سیلوآکو-اتلس شبیه‌سازی شد و مقدار بازده ۲۷/۸۰ درصد به دست آمد. سپس با افزودن لایه مسدودکننده الکترون p-Al_{0.1}Ga_{0.9}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_{0.1}N 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_{0.1}N electron blocking layer on the characteristics of InGa_{0.1}N/GaN MQW solar cells

Ali Nasiri¹, Azita Zandi Goharrizi², Hassan Safari¹ and Ghasem Alahyarizadeh³

¹ Department of Photonics, Graduate University of Advanced Technology, Kerman

Alina30ri0766@gmail.com

Abstract- In this paper, to investigate the effect of AlGa_N electron blocking layer (EBL) on the characteristics of InGa_N/Ga_N 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 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ doping concentration was **obtained 40.05%.** **Simulation results show that inserting the p-AlGa_N 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 InGa_N از ویژگی‌های امیدوارکننده بسیاری برای کاربردهای فوتوولتائیک، 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 (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 نیتريد، تلاش برای ساخت سلول‌های خورشیدی ایندیوم گالیوم نیتريد (InGa_N) از سال ۲۰۰۳ توسط تعدادی از گروه‌ها صورت گرفت [۳]. سلول‌های خورشیدی با ساختار ناهمگون InGa_N/Ga_N 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_N/Ga_N 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_N/Ga_N MQW در نرم‌افزار سیلوکو-اتلس شبیه‌سازی شده است و پارامترهای آن مورد بررسی قرار

گرفته‌اند. سپس با افزودن لایه p-AlGa_N 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]:

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

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

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

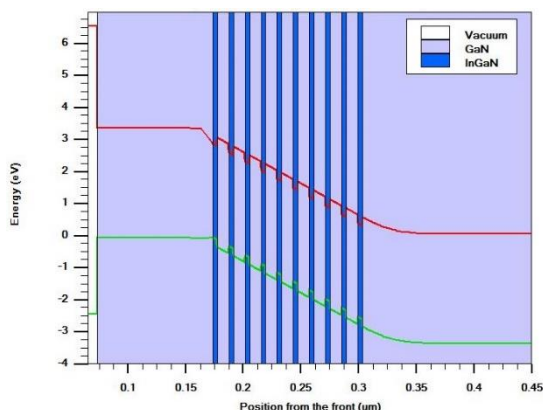
$$Q_{g, \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} = xQ_{g, \text{AlN}} + (1-x)Q_{g, \text{GaN}} \quad (4)$$

در این روابط، مقدار x به ترتیب کسر مولی ایندیوم و آلومینیوم را در ترکیب‌های InGa_N و AlGa_N بیان می‌کند. $E_{g, \text{AlN}}$ ، $E_{g, \text{GaN}}$ و $E_{g, \text{InN}}$ به ترتیب شکاف انرژی مربوط به

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

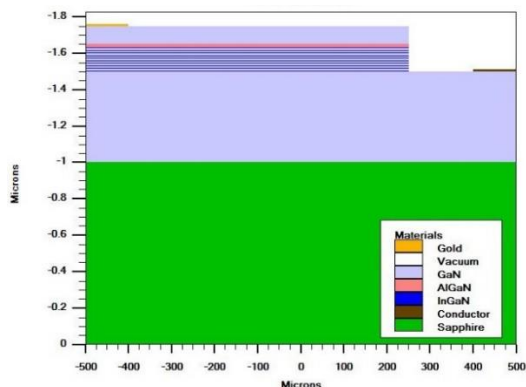
جدول ۲: پارامترهای سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده
InGaN/GaN MQW

$\eta(\%)$	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 $p-Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ 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 InGaIn/GaN MQW شامل لایه
 $p-AlGaIn$

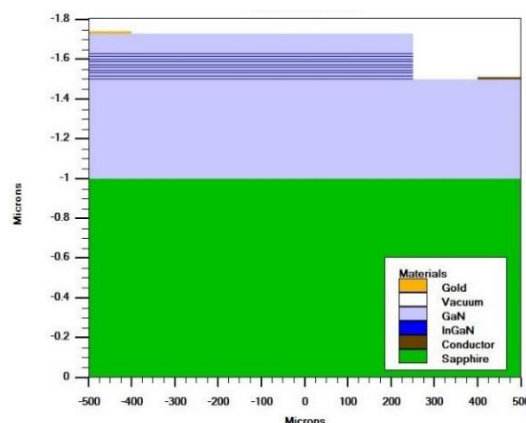
InN، GaN و AlN هستند. همچنین $Q_{g,GaN}$ ، $Q_{g,InN}$ و $Q_{g,AlN}$ سایر پارامترهای فیزیکی مربوط به GaN، InN و AlN می‌باشند که در جدول ۱ آورده شده‌اند.

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

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

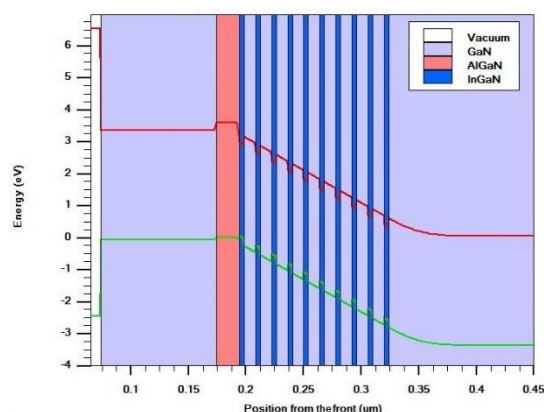
طراحی ساختار و نتایج شبیه‌سازی

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



شکل ۴: ساختار سلول شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار سیلوکو

به عنوان EBL با مسدود کردن شارش الکترون ها به ناحیه p،
باز ترکیب الکترون و حفره را در این ناحیه کاهش و بازده
سلول خورشیدی را افزایش می دهد.



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

نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا ساختار یک سلول خورشیدی
InGaIn/GaN MQW با استفاده از نرم افزار سیلوکو-اتلس
شبیه سازی شد که بازده آن برابر با ۲۷/۸۰ درصد بود. سپس
افزودن لایه p-AlGaIn به عنوان لایه EBL با مقدار ناخالصی
زیاد، به علت مسدود کردن شارش الکترون ها به ناحیه p و
کاهش باز ترکیب الکترون و حفره در این ناحیه، بازده سلول
خورشیدی را تا مقدار ۴۰/۰۵ درصد افزایش داد.

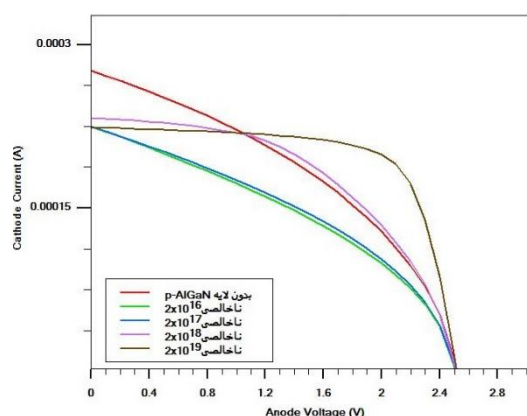
مرجع

- [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 شبیه سازی ساختار InGaIn/GaN
MQW شامل لایه p-AlGaIn به ازای مقدار ناخالصی های مختلف

ناخالصی (cm ⁻³)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF(%)	η(%)
۳×۱۰ ^{۱۶}	۲۲/۵۰	۲/۵۱	۳۹/۰۴	۲۳/۴۶
۳×۱۰ ^{۱۷}	۲۲/۴۹	۲/۵۱	۳۹/۰۴	۲۲/۰۳
۳×۱۰ ^{۱۸}	۲۳/۲۷	۲/۵۱	۴۹/۸۰	۲۹/۱۲
۳×۱۰ ^{۱۹}	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
می کند. با توجه به شکل ۴ و مقایسه جدول ۲ و جدول ۳
ملاحظه می شود که با افزودن لایه p-AlGaIn به ساختار
سلول تا مقدار ناخالصی ۳×۱۰^{۱۷}، بازده کمتر از حالت بدون
این لایه است. اما با افزایش ناخالصی تا مقدار ۳×۱۰^{۱۹} بازده
سلول خورشیدی تا مقدار ۴۰/۰۵ درصد افزایش می یابد.



شکل ۴: مقایسه نمودار ولتاژ-جریان مربوط به ساختار بدون لایه
p-AlGaIn و ساختارهای شامل این لایه با ناخالصی های 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 می توان مشاهده کرد که افزودن لایه p-AlGaIn
باعث افزایش انحراف باند رسانش شده است در حالیکه ارتفاع
سد را در باند ظرفیت حفظ می کند. بنابراین لایه p-AlGaIn