



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



طراحی و شبیه سازی سلول های خورشیدی نانو سیم بر مبنای InP

حامد بهرامی^۱ و سعید گل محمدی^۲

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات آذربایجان شرقی- گروه مهندسی برق- الکترونیک- تبریز

۲- دانشکده مهندسی فناوری های نوین- دانشگاه تبریز

چکیده - در این مقاله عوامل موثر بر بازده، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در سلول های خورشیدی نانو سیم مبتنی بر InP ساختارهای شعاعی و محوری و آرایه از سلول های خورشیدی مبتنی بر InP ساختار شعاعی بررسی و شبیه سازی شده است. نتایج کلی از مطالعات بیانگر آنست که افزایش طول و شعاع به همراه ساختار مناسب p-i-n با ضخامت و ناحیه ذاتی مناسب و افزایش آلایش نواحی در بازده سلول دارای نقش مثبتی بوده که نتایج شبیه سازی بصورت نمودارها و جداول آورده شده است که بررسی دقیق و کلی این نتایج منتج به کاهش هزینه های ساخت و طراحی دقیق تر ساختار خواهد شد.

کلید واژه- نانوسیم InP، آرایه نانو سیم، سلول خورشیدی

Design and simulation of nanowire solar cells based on InP

Hamed Bahrami¹ and Saeed Golmohammadi²

1-Department of Electronics Engineering, East Azarbaijan Science and Research Branch, Tabriz, Iran.

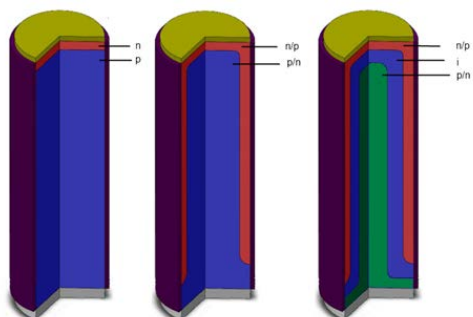
2- School of Engineering-Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract- In this article effective factors on efficiency, short-circuit current and open-circuit voltage in nanowire solar cells based on InP material in radial and axial structures are investigated and simulated. General consequences of this studies demonstrate that increasing length and radius of a p-i-n structure with defined and suitable i-regions and increasing of doping levels improve different output characteristics of the device. Results of simulation are shown as diagram and table, accurate survey of these results will reduce costs of production and more precision design stages.

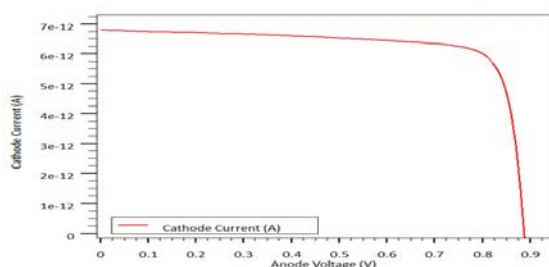
Keywords: InP nanowire, Solar cell, Nanowire array

۱- مقدمه

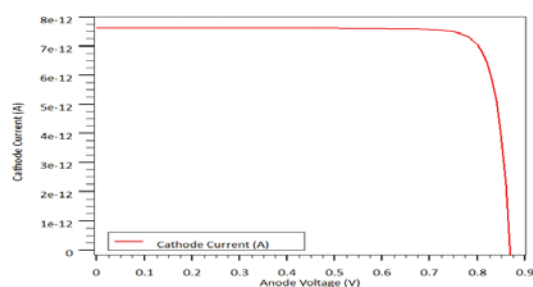
جریان اتصال کوتاه با ساختار شعاعی بیشتر از ساختار محوری بوده، ولی ولتاژ مدار باز کمتر است. دلیل افزایش جریان جداسازی بهتر حامل‌ها به دلیل وجود میدان الکتریکی در ناحیه تخلیه pn در سراسر سلول می‌باشد که منجر به ایجاد جریان بیشتری می‌شود، شکل ۴ نمودار توزیع میدان الکتریکی در دو ساختار را نشان می‌دهد.



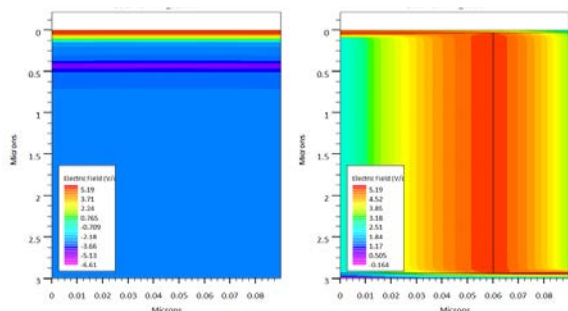
شکل ۱: ساختار محوری (شکل سمت چپ)، ساختار شعاعی p-n (شکل وسط) و ساختار شعاعی p-i-n (شکل سمت راست)



شکل ۲: نمودار جریان - ولتاژ سلول ساختار سلول نانوسیم محوری



شکل ۳: نمودار جریان - ولتاژ سلول ساختار نانوسیم شعاعی



شکل ۴ توزیع میدان الکتریکی در دو ساختار محوری (سمت چپ) و شعاعی (سمت راست)

نیمه‌هادی‌های گروه III-V انتخاب خوبی برای ساخت سلول‌های خورشیدی نانوسیم می‌باشند. بازده این سلول‌ها به بیش از ۴۰٪ می‌رسد [۱و۲]. روش‌های متفاوتی برای ساخت این سلول‌ها وجود دارد که عبارتند از: روش اول سنتز با استفاده از کاتالیزور است [۳]، روش دوم رشد بدون استفاده از کاتالیزور از VLS با استفاده از عملیات کاتالیزور خود عناصر گروه III مورد استفاده [۴]، روش رشد با کمک اکسید [۵]، روش سوم رشد نانوسیم به صورت هسته و پوسته است که خواص خوبی را از نظر جداسازی حامل‌ها و همچنین کرنش لایه‌ها ایجاد می‌کند [۶]. InP در این گروه بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. سلول‌های نانوسیم InP نیز به دلیل عرض باند مناسب‌تر نسبت به سیلیکن برای ساخت نانوسیم‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است. در [۷] شبیه‌سازی الکترواپتیکی سلول‌های InP با ساختار محوری و شعاعی انجام شده‌است. در شبیه‌سازی این سلول‌ها بسیاری از پارامترها به صورت کامل بررسی نشده است، بنابراین شبیه‌سازی و بهینه‌سازی این سلول‌ها با تغییر پارامترهای مختلف در این مقاله به آنها می‌پردازیم. برای شبیه‌سازی از ATLAS زیرمجموعه‌ی Silvaco TCAD، استفاده کرده‌ایم.

۲- ساختار سلول خورشیدی نانوسیم InP

برای شبیه‌سازی دو ساختار مختلف شعاعی و یک ساختار محوری مطابق با شکل ۱ تعریف می‌شود. ابعاد هر دو ساختار به صورت، طول ۳ میکرومتر و شعاع ۹۰ نانومتر که ضخامت ناحیه n در سطح سلول ۳۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. میزان آرایش ناخالصی‌ها بر حسب عدد بر سانتی متر مکعب در هر دو ناحیه n و p برابر $10^{17} \times 5$ در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نمودار جریان - ولتاژ این سلول را نشان می‌دهد. برای این ساختار جریان اتصال کوتاه ۶/۸۰۵ پیکوآمپر، ولتاژ مدار باز ۰/۸۸۷ ولت و بازده مقدار ۱۸/۹۲ به دست آمده است.

برای ساختار نانوسیم شعاعی شکل ۳ نمودار جریان ولتاژ را نشان می‌دهد. برای این ساختار جریان اتصال کوتاه ۷/۶۳۵ پیکو آمپر، ولتاژ مدار باز ۰/۸۶۹ ولت و بازده مقدار ۲۲/۴۶ به دست آمده است. مشاهده می‌شود، بازده و

افزایش شعاع بازده بیشتر می‌شود ولی در شعاع‌های حدود ۸۰ تا ۹۰ نانومتر مقدار آن تقریباً ثابت می‌شود و کمی کاهش می‌یابد. ولتاژ مدار باز با افزایش شعاع مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، اما نکته قابل توجه بالاتر بودن ولتاژ در ساختار p-i-n در شعاع‌های کمتر و کمتر بودن ولتاژ در شعاع‌های بزرگتر است.

۲-۳- بررسی اثر ضخامت نواحی مختلف سلول

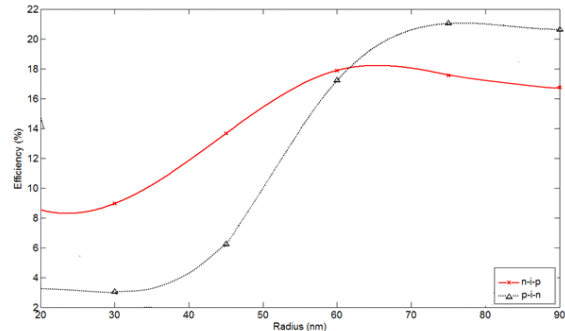
در این بخش سلول در چهار حالت ضخامت ناحیه ذاتی (i) و در ضخامت‌های مختلف ناحیه n و p شبیه‌سازی شده است. سلول با شعاع ۹۰ نانومتر در چهار حالت بدون ناحیه ذاتی و ناحیه ذاتی با ضخامت‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نانومتر و با چگالی ناخالصی 5×10^{17} برای نواحی n و p در ضخامت‌های مختلف ناحیه n و p شبیه‌سازی شده است. شکل ۶ بازده سلول را در حالت‌های فوق نشان می‌دهد که بر حسب نسبت ضخامت هسته به ضخامت هسته و پوسته رسم شده است. افزایش ضخامت ناحیه ذاتی در ضخامت‌های کم هسته بازده را کاهش و در ضخامت‌های بیشتر هسته بازده را افزایش می‌دهد.

۲-۳- بررسی اثر میزان آرایش نواحی n و p

در این بخش اثر میزان آرایش نواحی پوسته و هسته برای یک سلول p-i-n در بازده بررسی می‌شود بنابراین با فرض سلول نانوسیم با شعاع ۹۰ نانومتر و ضخامت ۵۰، ۲۰ و ۲۰ نانومتر به ترتیب برای نواحی هسته، ناحیه ذاتی و پوسته به بررسی اثر میزان آرایش در هر یک پرداخته می‌شود. برای این منظور میزان آرایش نواحی n، p را از مقدار 10^{16} تا 10^{19} تغییر می‌دهیم و بازده را بررسی شکل ۷ نمودار تغییر بازده با تغییر آرایش هسته و پوسته را نشان می‌دهد. در آرایش‌های مختلف پوسته بازده با افزایش آرایش هسته، زیاد می‌شود اما در برخی آرایش‌های کم پوسته، روند کاملاً صعودی نیست و دچار اندکی افت شده و مجدداً افزایش می‌یابد. بررسی نمودار ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه با تغییر آرایش‌های هسته و پوسته بیانگر این نتیجه می‌باشد.

جدول ۱: مقادیر بازده، ولتاژ باز و جریان اتصال کوتاه در ۵ طول مختلف

طول (μm)	1	2	3	4	5
بازده (%)	16.54	17.27	17.44	17.54	17.61
ولتاژ مدار باز (V)	0.89	0.89	0.89	0.87	0.89
جریان اتصال کوتاه (pA)	4.17	4.34	4.38	4.41	4.45



شکل ۵: نمودار بازده سلول‌ها با تغییر شعاع در دو حالت p-i-n و n-i-p

۲-۱- بررسی اثر طول سلول نانوسیم

در ادامه ساختار شعاعی با شعاع ۸۰ نانومتر در ۵ طول مختلف ۱ تا ۵ میکرومتر شبیه‌سازی شده است. در این ساختار ناحیه n به ضخامت ۳۰ نانومتر سطح خارجی سلول را تشکیل داده است. میزان آرایش ناحیه n برابر 5×10^{18} و ناحیه p برابر 10^{18} در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مقادیر بازده، ولتاژ باز و جریان اتصال کوتاه را برای ۵ حالت نشان می‌دهد. لازم بذکر است که فاکتور پرشدگی یا FF که یکی از عوامل تعیین کننده بازده می‌باشد برای طول‌های ۱ تا ۵ میکرومتر به ترتیب برابر با ۰.۸۹۶، ۰.۹۱۶، ۰.۸۹۵، ۰.۸۹۶، ۰.۸۹۷ است.

۲-۲- بررسی اثر شعاع سلول نانوسیم

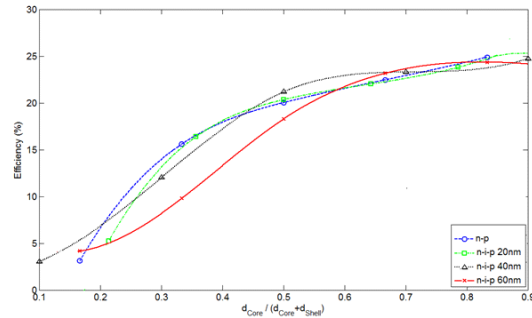
برای بررسی تأثیر تغییر شعاع سلول بر کارکرد آن شبیه‌سازی به صورت ساختارهایی با وجود لایه ناحیه ذاتی n-i-p و p-i-n در چند شعاع مختلف انجام شده است ضخامت نواحی با هم برابر و آرایش ناحیه n و p نیز برابر و مقدار 5×10^{17} باشند. با تغییر شعاع بازده سلول‌ها بررسی شده است. شکل ۵ نمودار بازده سلول‌ها را با تغییر شعاع نشان می‌دهد.

بازده ساختار p-i-n در شعاع‌های کمتر از ۶۰ نانومتر از مقدار بازده ساختار n-i-p کمتر است اما در شعاع‌های بیشتر مقدار آن افزایش می‌یابد. در هر دو حالت با

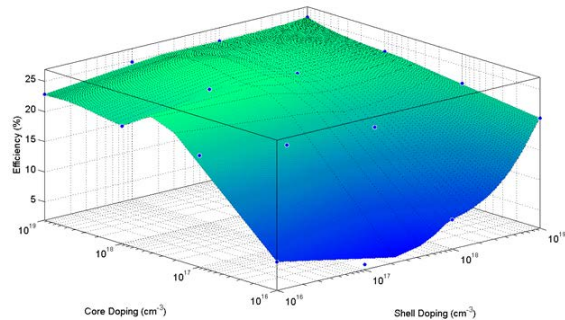
می‌یابد. اما در مجموع می‌توان دید که با افزایش آلایش بازده افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه آرایه‌ای از نانوسیم-ها بر روی بستر به عنوان سلول کاربردی مطرح می‌باشند،

مراجع

- [1] J. F. Geisz et al, "40.8% efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, pp. 123505-3, 2008.
- [2] W. Guter, et al, "Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency un-der concentrated sunlight," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, pp. 223504-3, 2009.
- [3] A. M. Morales and C. M. Lieber, "A laser ablation method for the synthesis of crystalline semiconductor nanowires," *Science*, vol. 279, pp. 208–211, 1998.
- [4] C. Colombo et al, "Ga-assisted catalyst-free growth mechanism of GaAs nanowires by molecular beam epitaxy," *Phys. Rev. B: Condens. Matter*, vol. 77, pp. 155326-5, 2008.
- [5] B. Mandl et al, "Au-free epitaxial growth of InAs nanowires," *Nano Lett.*, vol. 6, pp. 1817–1821, 2006.
- [6] P. Mohan, J. Motohisa, and T. Fukui, "Fabrication of InP/InAs/InP core-multishell heterostructure nanowires by selective area metalorganic vapor phase epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, pp. 133105-3, 2006.
- [7] Kupec, J., & Witzigmann, B., "Electro-optical modeling of InP nanowire solar cells: Core-shell vs. axial structure," *Numerical Simulation of Optoelectronic Devices*, 57–58, 2010.



شکل ۶: بازده سلول در چهار حالت بدون ناحیه ذاتی و ناحیه ذاتی با ضخامت‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ نانومتر



شکل ۷: تغییر بازده با تغییر آلایش هسته و پوسته

۳- نتیجه گیری

در سلول‌های خورشیدی نانوسیم مورد بحث بازده سلول با ساختار شعاعی بیشتر از ساختار محوری است. در ساختار شعاعی جریان اتصال کوتاه بیشتر ولی ولتاژ مدار باز کاهش یافته است. افزایش طول موجب افزایش بازده سلول می‌گردد. افزایش طول باعث می‌شود که حامل‌های بیشتری تولید و جذب شود. البته افزایش بیشتر، تنها مقدار کمی بازده را افزایش می‌دهد اما با افزایش بیشتر طول، مقدار این افزایش کمتر خواهد بود. ولتاژ مدار باز با افزایش طول مقدار بسیار کمی کاهش می‌یابد و در نهایت با غالب بودن اثر افزایش جریان موجب می‌شود که بازده افزایش یابد. بازده سلول p-i-n نسبت به pn در تمامی شعاع‌ها بیشتر می‌باشد. با افزایش شعاع نیز در هر دو حالت ابتدا بازده افزایش می‌یابد. اما سرعت این افزایش کم شده و در شعاع‌های حدود ۱۵۰ نانومتر بازده تقریباً تخت می‌شود. افزایش ضخامت ناحیه هسته در حالتی که ناحیه ذاتی ضخامت ثابتی دارد بازده نیز زیاد می‌شود. در آلایش 10^{19} هسته، با افزایش میزان آلایش پوسته بازده ابتدا افزایش یافته ولی روند افزایشی بازده با افزایش آلایش پوسته کندتر می‌شود. در آلایش 10^{19} پوسته، بازده با افزایش آلایش هسته زیاد می‌شود اما روند کاملاً صعودی نیست و دچار یک افت می‌شود و سپس افزایش