

## افزایش بازده سلول خورشیدی GaAs مبتنی بر ساختار p-i-n باند میانی توسط نقاط کوانتومی InAs در ناحیه ذاتی آن

کریم عباسیان<sup>۱</sup>، دانشیار؛ سید سالار حسینی<sup>۲</sup>، کارشناسی ارشد؛ هادی صوفی، استادیار<sup>۳</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران - k\_abbasian@tabrizu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران (آذربایجان شرقی) - تبریز - ایران - stu.salarhosseini@iaut.ac.ir

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تبریز، ایران

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران - h.soofi@tabrizu.ac.ir

**چکیده:** امروزه سلول خورشیدی باند میانی نقطه کوانتومی به عنوان یکی از مناسبترین گزینه‌ها برای دست‌یابی به حداکثر بازده در سلول‌های خورشیدی می‌باشد. در این مقاله دو مدل سلول خورشیدی طراحی شده که مدل اول دارای ساختار p-i-n با بستر GaAs بوده و مدل دوم شامل نقاط کوانتومی InAs کاشته شده در ناحیه ذاتی آن می‌باشند. با بهبود ساختار و استفاده از مواد مناسب در سلول مرجع p-i-n بازده تا حد ۳۴/۰۳٪ افزایش یافته است. سپس، در ساختار سلول خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی، از طریق کنترل اندازه نقاط کوانتومی و موقعیت قرارگیری آن‌ها در این سلول خورشیدی GaAs باند میانی نقطه کوانتومی، بهبود بازده تبدیل انرژی به مقدار ۲۱/۵۵٪ به دست آمده و بازده تبدیل انرژی تا مقدار ۵۵/۵۸٪ ارتقاء یافت. در حقیقت، با این سلول خورشیدی باند میانی مبتنی بر نقاط کوانتومی بازده تبدیل انرژی بالایی ارائه می‌شود که تاکنون گزارش نشده است.

**واژه‌های کلیدی:** سلول خورشیدی نقطه کوانتومی، باند انرژی میانی، ساختار p-i-n، نانو مواد InAs

## GaAs p-i-n structure Solar Cell efficiency enhancement with Intermediate Energy Band introducing by InAs Quantum Dots in the intrinsic region

K. Abbasian<sup>1</sup>, Associate Professor; S. S. Hosseini<sup>2</sup>, Master of Science; H. Soofi<sup>3</sup>, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: k\_abbasian@tabrizu.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Tehran Science and Research Branch (East Azarbaijan), Tabriz, Iran; Young Researchers and Elite Club, Tabriz Branch, Islamic Azad university, Tabriz, Iran. Email: stu.salarhosseini@iaut.ac.ir

3- Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: h.soofi@tabrizu.ac.ir

**Abstract:** Today, the intermediate band solar cell with quantum dots is one of the best options to achieve maximum solar energy conversion efficiency. In this paper, two solar cell models have been designed; the first reference model in with p-i-n structure, and the second model contains the InAs quantum dots implanted in the intrinsic region of the structure. By improving the structure and utilizing proper materials in the p-i-n reference cell, the efficiency increased by 34.03%. Then, in a quantum dot-based solar cell structure, 21.55% energy conversion efficiency improvement achieved and so that the obtained efficiency enhanced up to 55.58% by controlling the size and position of the quantum dots. In fact, the intermediate band solar cell provides a high energy conversion efficiency that have not been reported so far.

**Keywords:** solar cell, intermediate energy band, p-i-n structure, efficiency improvement, InAs Nanomaterials.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۸

نام نویسنده مسئول: کریم عباسیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی فناوریهای نوین

## ۱- مقدمه

با پارامترهایی چون دما، زمان واکنش و غیره تغییر داد؛ که این مورد یکی از بهترین ویژگی‌های آن‌ها به شمار می‌رود [۶].

مفهوم سلول‌های خورشیدی میان باندی اولین بار توسط لک و مارتی در سال ۱۹۹۷ پیشنهاد شد [۷]. در نسل جدید سلول‌های خورشیدی میان باندی از نانو ذرات نقطه کوانتومی برای ایجاد باند میانی و افزایش راندمان استفاده می‌کنند. حد بازده سلول‌های خورشیدی شکاف انرژی تک باند برابر با ۴۰٪ [۷] می‌باشد که لک و مارتی به صورت تئوری نشان دادند؛ درحالی‌که بیش‌ترین بازده سلول خورشیدی میان باندی تقریباً برابر با ۶۳،۲٪ به‌دست آمده است که محدودیت ذکرشده را شکسته می‌شود [۸]. دلیل اصلی غلبه بر این محدودیت، این است که سلول‌های خورشیدی باند میانی می‌توانند جریان سلول را افزایش دهند؛ درحالی‌که ولتاژ را ثابت نگه می‌دارد و از افت آن جلوگیری می‌کند [۵، ۶].

در سلول خورشیدی باند میانی که شکاف انرژی اصلی به دو شکاف کوچک‌تر تجزیه می‌شود، می‌تواند فوتون‌های با انرژی پایین‌تر از شکاف باند را نیز جذب کند. این نوع جذب فوتون‌های انرژی زیر شکاف باند، حرکتی دومرحله‌ای به‌صورت انتقال الکترون از باند ظرفیت به باند میانی، و از باند میانی به باند هدایت را انجام می‌دهد [۹]. برای وارد کردن باند میانی در سلول‌های خورشیدی دو رویکرد معمول وجود دارد، که مؤثرترین رویکرد بهره‌گیری از نقاط کوانتومی به‌منظور ایجاد باند میانی بالاتر از سطوح انرژی حبس‌شده<sup>۵</sup> الکترون توسط نقاط کوانتومی است [۱۰].

## ۲- ساختار و روابط سلول خورشیدی p-i-n حاوی نقطه کوانتومی

به‌دلیل احتمال زیاد باز ترکیب جفت الکترون-حفره<sup>۶</sup> در سلول‌های خورشیدی با ساختار p-n کاهش بازده را به دنبال دارد. از این‌رو مدل بعدی که شامل ناحیه تخلیه<sup>۷</sup> در میان پیوندگاه p-n در ساختار p-i-n می‌باشد، توسط برهام و دگان در سال ۱۹۹۰ استفاده شد [۱۱]. در سال ۱۹۹۳ پاکسمن و همکاران اولین ساختار p-i-n مواد GaAs/AlxGa1-xAs را ایجاد کردند. که افزایش چشم‌گیر جریان اتصال کوتاه را به‌همراه داشت [۱۲]. نرخ تولید اکسیتون (جفت الکترون-حفره) در این ساختار توسط معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$G_p(\lambda, z) = \alpha(\lambda)[1 - R(\lambda)]F(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)z] \quad (1)$$

$\alpha(\lambda)$  ضریب جذب نور ماده GaAs در ناحیه ذاتی،  $R(\lambda)$  ضریب بازتاب سطح،  $F(\lambda)$  شار نور برخوردی بر حسب طول موج هستند. نرخ جریان-نوری تولیدشده در حضور نقاط کوانتومی داخل ناحیه ذاتی i ماده GaAs توسط رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$G_D(\lambda, z) = F(\lambda)[1 - R(\lambda)]\alpha_D(\lambda) \times \exp[-\alpha_D(\lambda)(z - z_p)] \quad (2)$$

تقاضای روزافزون نیاز به انرژی از یک‌سو و مشکلات مربوط به سوخت‌های فسیلی ازسوی دیگر، انگیزه مضاعفی را برای مطالعه و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر ایجاد کرده است. انرژی‌های تجدیدپذیر با ابعاد کوچک محدود به مسائلی نظیر عملکرد در مکان خاص، آلودگی محیط زیست و صوتی، هزینه تولید زیاد و غیره هستند. در این میان، سلول خورشیدی روشی مستقیم برای تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته است که از نظر علمی از دیگر سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر کارآمدتر و کاربردی‌تر می‌باشد [۱].

سلول خورشیدی برپایه اثر فوتوالکتریک<sup>۱</sup> که در سال ۱۸۳۹ توسط بکرل کشف شد [۲]، زمینه ساخت و توسعه سلول‌های خورشیدی اولیه فراهم کرد. با گذشت زمان، سلول‌های خورشیدی نسل سوم شامل مواد ارگانیک، حساس به رنگ، نقاط کوانتومی، پلیمری و هیبریدی طراحی و عرضه شدند. برای تأمین رقابت‌پذیری از لحاظ قیمت تمام‌شده، طول عمر و فرآیند ساخت ساده‌تر ساخت سلول حاوی نقاط کوانتومی، که نوید بازده بالا و هزینه پائین را می‌دهد، به‌عنوان گزینه مناسب‌تر پیشنهاد و مورد تحقیق پژوهشگران می‌باشد [۳].

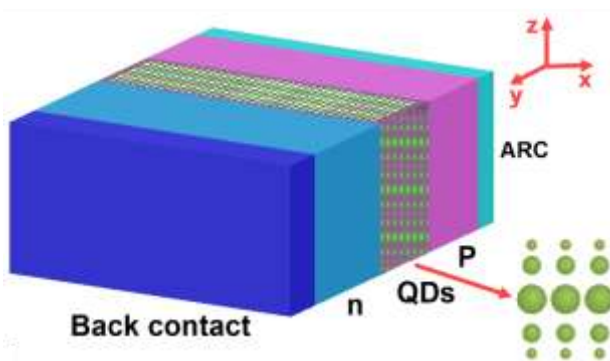
به‌کارگیری فناوری نانو، که یکی از آخرین دستاوردهای علمی است، دریچه امیدبخش و جدیدی را در دنیای امروز گشوده است. نقاط کوانتومی نیمه‌هادی نانوذراتی با خصوصیات نوری منحصربه‌فرد می‌باشند که امروزه بسیار مورد توجه با تنوع بالای کاربری می‌باشند. این نانوذرات، در واقع نانوکریستال‌های بسیار کوچکی هستند و خصوصیات یک نیمه‌هادی خود را حفظ می‌کنند. که قوانین مکانیک کوانتوم بر عملکرد آن‌ها حاکم است. این نانوذرات، به‌دلیل اندازه کوچکشان خصوصیات نوری و الکتریکی منحصربه‌فردی دارند که کوانتیزاسیون الکترون‌ها در پیدایش این خصوصیات، نقش کلیدی را ایفا می‌کنند [۴].

در نقاط کوانتومی الکترون‌ها، که به‌دلیل اندازه بسیار کوچک این نانوذرات، دارای ترازهای انرژی گسسته می‌باشند. در نتیجه، کاستن یا افزودن تعدادی‌اتم به نقاط کوانتومی، باعث تغییر در شکاف انرژی می‌شود. تغییر نحوه چیدمان، تنگیدگی و کیفیت رشد اتم‌ها در سطح نقاط کوانتومی هم باعث تغییر شکاف انرژی آن‌ها می‌شود. همیشه اندازه شکاف انرژی در نقاط کوانتومی نیمه‌هادی بزرگ‌تر از شکاف انرژی مربوط به قطعه حجیم آن نیمه‌هادی است [۵].

در سلول خورشیدی حساس به رنگ<sup>۳</sup>، نقاط کوانتومی امکان تنظیم بهینه محل پیوند حساس‌کننده‌ها و تغییر مناسب خواص جذبی و نیروهای محرکه برای انتقال الکترون را فراهم می‌کنند. هم‌چنین به‌دلیل دارا بودن ویژگی‌های خاصی، که مواد در حالت حجیم<sup>۲</sup> ندارند، نقاط کوانتومی اجازه می‌دهند که اتصال خوبی میان مواد دهنده و پذیرنده الکترون وجود داشته‌باشد، این ویژگی، به‌دست آوردن بازده بالا را در سلول خورشیدی حاوی نقاط کوانتومی تسهیل می‌کند. گاف انرژی<sup>۴</sup> را می‌توان با تغییر اندازه و شکل نقاط کوانتومی در جریان سنتز

ساختار می‌توان منحنی بازده ساختار را توسط بخش دیوایس مشاهده کرد.

تابش نور خورشید در جهت  $y$  بوده و اندازه مش در این راستا برابر با ۱ نانومتر در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی اتخاذ شده برای ساختار لایه با جذب عالی (PML) در جهت  $y$  برای افزایش دقت شبیه‌سازی یعنی تطابق شرایط شبیه‌سازی با واقعیت تجربی لحاظ شده است. همچنین، جذب نور بازتابیده از طرف پائین و نور انتقالی از مرزهای بالائی ساختار سلول خورشیدی p-i-n شبیه‌سازی شده به‌خوبی به دست می‌آیند.



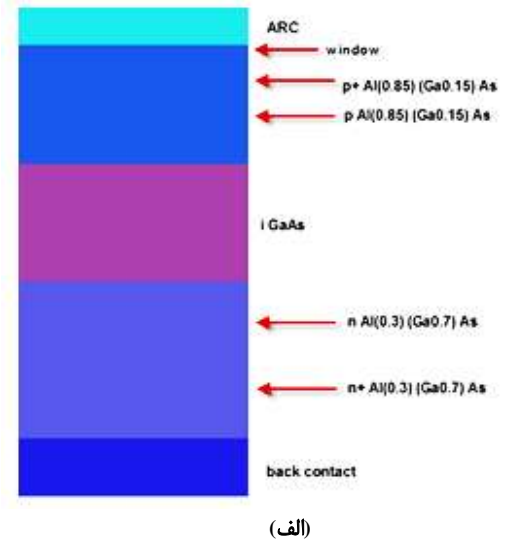
شکل ۲: نمایش سه‌بعدی سلول خورشیدی با آرایه نقاط کوانتومی بر پایه شیوه شبیه‌سازی توصیف شده در بالا، پارامترهایی نظیر توزیع نقاط کوانتومی در ناحیه ذاتی برای حداکثر ارتقا جذب بهبود یافته، همچنین در قسمت قبل توضیحات آن ارائه شده است. چنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، آرایه‌ای از نقاط کوانتومی با توزیع گوسین با اندازه‌های شعاع ۴، ۷، ۱۱، ۷، ۴ نانومتر وجود دارد. پارامترهای نقطه کوانتومی که در ارتفاع، و فاصله بین نانوذرات متفاوت است و در ادامه قسمت ۲-۴ مقادیر مربوطه ارائه می‌شود. در جدول ۱ به ارائه پارامتر استفاده شده در طراحی و شبیه‌سازی سلول خورشیدی مدنظر پرداخته شده است.

جدول ۱: پارامترهای استفاده شده در طراحی و شبیه‌سازی دو مدل سلول خورشیدی ارائه شده در این کار

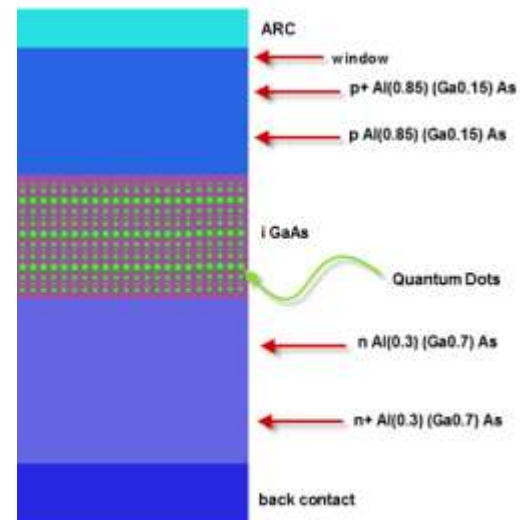
ماده	ضخامت (نانومتر)	لایه‌ها
ضریب شکست ۱٫۸	۵	ARC
$Al_{0.18}Ga_{0.72}As$	۹۵	Window
$Al_{0.85}Ga_{0.15}As$	۱۰۰	p+
$Al_{0.85}Ga_{0.15}As$	۲۰۰	p
Ga As	۳۰۰	i
In As	$3 \times (4-7-11-7-4)$	QDs
$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	۳۰۰	n
$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	۱۰۰	n+
Al	۱۵۰	Back contact

که در اینجا  $\alpha_D$  ضریب جذب نقاط کوانتومی هم برحسب طول موج می‌باشد [۶].

در شکل‌های الف-۱ و ب-۱، دو مدل سلول خورشیدی طراحی شده در این مقاله نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱: الف) سلول خورشیدی ساختار p-i-n؛ ب) سلول خورشیدی میان باندهی مبتنی بر نقطه کوانتومی

### ۳- نحوه شبیه‌سازی ساختار

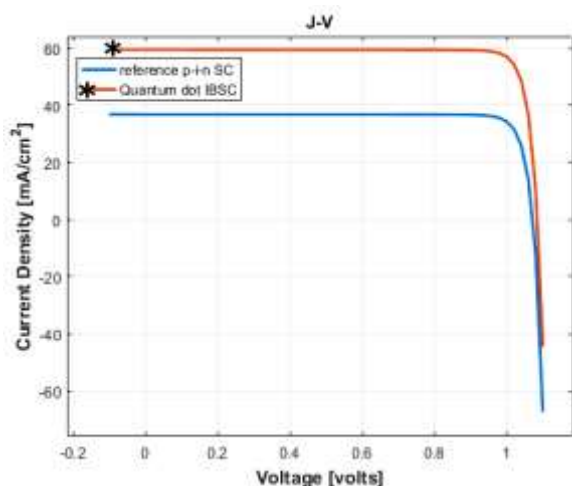
نمایش سه‌بعدی سلول خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی در شکل ۲ نشان داده شده است؛ که با استفاده از روش تفاضل‌های محدود در حوزه زمان (FDTD) شبیه‌سازی می‌شود. در مرحله اول شبیه‌سازی ساختار در محیط تحلیل‌گر نوری نرم‌افزار انجام شده و با تطبیق مناسب مواد لایه‌های ساختار، نتیجه شبیه‌سازی این مرحله منجر به نرخ تولید حامل‌های جریان می‌شود. که استخراج این نرخ تولید حامل‌های الکتریکی به‌عنوان خروجی این بخش FDTD برای بخش دیوایس نرم‌افزار ورودی می‌باشد. در مرحله تحلیل الکتریکی

برخوردی و افزایش تولید جفت الکترون-حفره شده و به این وسیله راندمان تبدیل انرژی افزایش می‌یابد. شکل الف-۴، در واقع بخش معکوس مشخصه ولتاژ - جریان یک دیود می‌باشد؛ که دو سر این مشخصه دو حد اتصال کوتاه‌شدن دیود و مداربازشدن دوسر دیود را نمایش می‌دهند. در حالی که سلول خورشیدی با این ساختار دیودی یک منبع انرژی الکتریکی بوده و معمولاً در هیچ‌کدام از این حالت‌ها مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. در واقع، در حالت اتصال کوتاه دوسر سلول اتصال کوتاه می‌شود و تمام جفت الکترون-حفره‌ها در جریان الکتریکی ایجاد شده شرکت می‌کنند؛ [۲۸] در حالی که در حالت مدارباز همه الکترون‌ها در یک سر و همه حفره‌ها در سر دیگر ساختار سلول جمع می‌شوند و بدین طریق اختلاف ولتاژ مدارباز در دوسر سلول ایجاد می‌شود.

#### ۴-۴ سلول خورشیدی میان باندی نقطه کوانتومی

مدل افزاره GaAs و باند میانی تخلیه‌شده به وسیله نقاط کوانتومی از جنس InAs استفاده می‌شود. افزایش عرض باند میانی و نیز تعداد نقاط کوانتومی برای جذب زیر طول موج سبب افزایش بازده کلی می‌شود [۱۳]. اما افزایش بازده قابل توجه به سبب افزایش چگالی جریان حاصل می‌شود که آن هم به سبب تولید حامل‌های اضافی است [۱۴].

شکل‌های الف-۳ و ب-۳ به ترتیب چگالی جریان و بازده را برای سلول خورشیدی میان باندی نقطه کوانتومی نشان می‌دهند.



شکل الف-۳: منحنی چگالی جریان بر حسب ولتاژ

#### ۴-مدل سلول مرجع با لایه تخلیه ذاتی (i)

مدل سلول خورشیدی p-i-n مرجع تک شکاف باند به ترتیب لایه‌ها به صورت: پوشش ضد بازتاب، پنجره، تزریق سنگین + p، تزریق p، تخلیه ذاتی i، تزریق n، تزریق سنگین + n با مدل سلول خورشیدی باند میانی ارائه شده است.

در این مقاله دو مدل شامل: ۱- سلول خورشیدی مرجع p-i-n و ۲- سلول خورشیدی میان باندی نقطه کوانتومی مبتنی بر ساختار مرجع؛ که باهم مقایسه و با آخرین بازده و چگالی جریان به دست آمده بررسی می‌شوند. مدل سلول خورشیدی باند میانی شامل لایه‌های مشابه سلول مرجع است، اما لایه ذاتی آن دارای باند انرژی میانی در محل شکاف باند است. در این مقاله برای تشکیل باند میانی از وارد کردن نقاط کوانتومی به لایه تخلیه ذاتی (i) استفاده می‌شود.

#### ۴-۴ سلول خورشیدی مرجع p-i-n

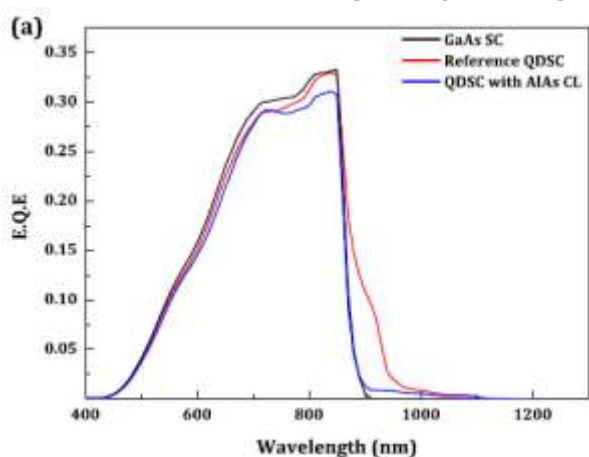
اتصال جلویی و پوشش ضد بازتاب این ساختار مرجع دارای حداقل تلفات بازتاب هستند. از لایه کلاه GaAs برای مقابله با اکسیدشدن لایه زیر آن استفاده شده که لایه پنجره<sup>۱</sup> AlGaAs با تزریق p+ با مرتبه غلظت ناخالصی  $1e+18$  می‌باشد و این لایه پنجره قابلیت اکسید شدن سریع دارد. شکاف باند بزرگ لایه پنجره باعث کاهش بازترکیب سطح جلویی می‌شود. تناوب اتم‌ها در سطح کریستال قطع می‌شود، و سطح به عنوان یک رابط بین نیمه‌هادی و مواد همسایه عمل می‌کند. در نتیجه نرخ بازترکیب در سطح تغییر کرده و معمولاً از نرخ بازترکیب در نیمه‌هادی حجیم بیش تر است. آن‌گاه بازترکیب سطح توسط لایه پنجره که باعث جلوگیری از رسیدن حامل‌های اقلیت به سطح می‌شود، کاهش می‌یابد. در گالیوم آرسناید سرعت بازترکیب سطح خیلی بالا است (در مرتبه  $10^6$  سانتی‌متر/ثانیه) ته نشین کردن لایه نازک مربوطه باعث کاهش سرعت بازترکیب تا حدود  $10^2-10^3$  سانتی‌متر/ثانیه می‌شود [۳۱].

در زیر لایه پنجره لایه با تزریق سنگین p+ در ترکیب  $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$  وجود دارد که به میزان زیادی بازترکیب سطح جلویی را کاهش می‌دهد. دو لایه p و n با لایه میانی ذاتی i بین آن‌ها ساندویچ می‌شود. زیر لایه n تزریق سنگین + n در  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  را داریم که به منظور کاهش بازترکیب سطح پشتی استفاده شده است. در پائین سلول زیر بنا را قرار گرفته که لایه‌های بالائی روی آن ته نشین شده و اتصال پشتی را تشکیل می‌دهد. شکل‌های الف-۴ و ب-۴ به ترتیب مشخصه‌های I-V و P-V سلول را نمایش می‌دهند. در شکل الف-۴، منحنی قرمز رنگ ستاره‌دار مربوط به سلول باند میانی نقطه کوانتومی با چگالی جریان اتصال کوتاه  $60 \text{ mA/cm}^2$  و ولتاژ مدارباز  $1.09$  ولت و منحنی آبی رنگ مربوط به سلول خورشیدی مرجع p-i-n با چگالی جریان اتصال کوتاه  $36 \text{ mA/cm}^2$  و ولتاژ مدارباز  $1.06$  ولت می‌باشند. با عنایت به مفهوم ضریب پرشدگی<sup>۱۱</sup>، واضح است که بازده تبدیل انرژی سلول باند میانی نقطه کوانتومی نسبت به سلول مرجع افزایش قابل توجهی یافته است. در واقع نقاط کوانتومی باعث جذب تعداد بیشتری از فوتون‌های

طول نفوذ الکترون از طرف p و طول نفوذ حفره از طرف n ساختار که نزدیک دو سطح سلول خورشیدی می‌باشند؛ بعد از تولید قبل از رسیدن به الکترونها بازترکیب شده و بنابراین نمی‌توانند در جریان الکتریکی شرکت کنند. بازده کوانتومی به صورت معادله (۴) نوشته می‌شود.

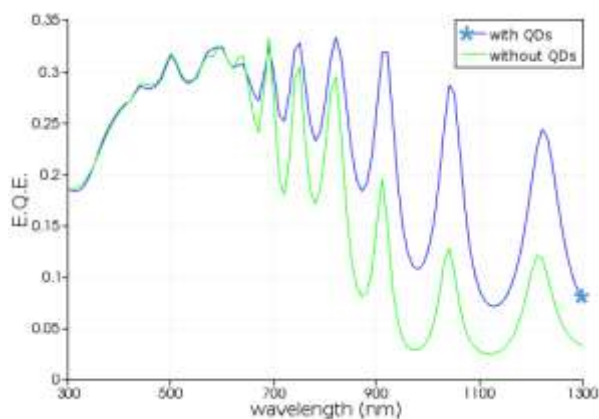
$$\eta \quad (4)$$

در این رابطه، R ضریب بازتاب نوری از صفحه جلویی سلول،  $\alpha$  ضریب جذب نور در ماده، d مسیر انتشار فوتون و  $\tau$  نرخ تولید الکترون-حفره می‌باشند؛ و این بازده برحسب درصد نیز قابل بیان می‌باشد [۲۰]. نمودار بازده کوانتومی ساختار در شکل ۴ نشان داده شده است، که دارای طیفی مشابه مرجع [۲۱] می‌باشد.

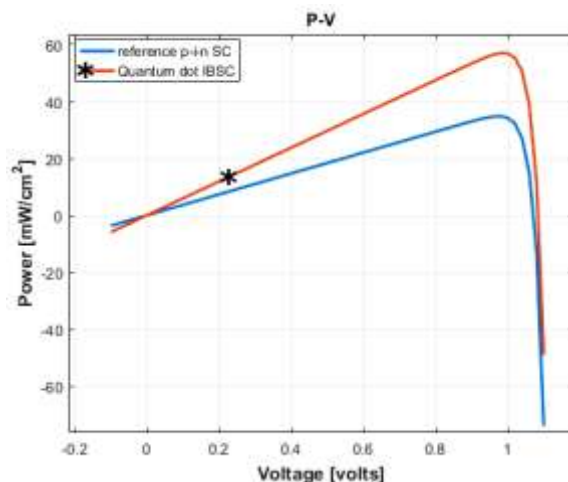


شکل ۴: بازده کوانتومی برحسب طول موج

باز طول موج کاری برای هر دو سلول خورشیدی از ۳۰۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر است. در شکل ۵ نمودار بازده کوانتومی در دو حالت بالک و در حضور نقاط کوانتومی ملاحظه می‌گردد که مقادیر حداکثر بازده برابر ۲۳ و ۳۸٫۹ درصد به ترتیب می‌باشند. این مقادیر در مقایسه با سلول خورشیدی نقطه کوانتومی InAs/GaAs مرجع [۲۱] که دارای ساختار مشابه می‌باشد بهبود قابل توجهی را دارد.



شکل ۵: بازده کوانتومی در حالت حجیم و با وجود نقاط کوانتومی



شکل ب-۳: منحنی توان برحسب ولتاژ

توسط منحنی جریان-ولتاژ بازده سلول خورشیدی محاسبه خواهد شد.

رابطه (۳) بازده کلی سلول:

$$\eta = \frac{J_{opt} \times V_{opt}}{P_0} \quad (3)$$

تحت میزان استاندارد تابش خورشید AM1.5، عبارت  $P_0$  برابر با  $100 \frac{mW}{cm^2}$  می‌باشد [۱۶].

در جدول ۲ پارامترهای چگالی جریان، ولتاژ و بازده چند مدل سلول خورشیدی مشابه کار شده در این مقاله باهم مقایسه شده است. اخیراً محققان با سازوکار متفاوت در مواد سه‌تایی دیگری به بازده ۶۳٪/۲ رسیده‌اند [۲۹].

جدول ۲: مقایسه بازده چند مدل سلول خورشیدی

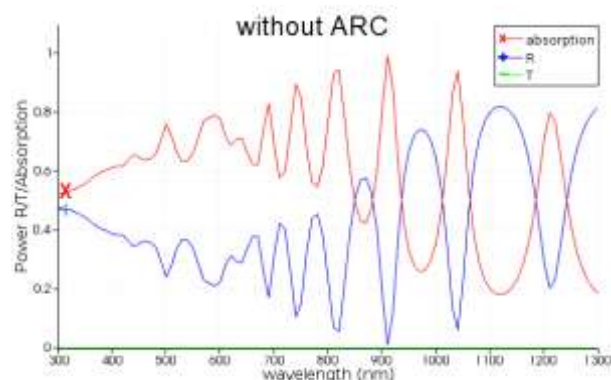
مدل	ولتاژ (ولت)	چگالی جریان (میلی آمپر بر سانتی متر مربع)	بازده
سلول خورشیدی میان بانده نقطه کوانتومی	۰/۹۸	۵۶/۷۱	۵۵/۵۸
سلول p-i-n خورشیدی مرجع [۱۹]	۰/۹۷	۳۵/۰۸	۳۴/۰۳
مرجع [۲۵]	۰/۹۷۵	۵۶/۵	۵۵
مرجع [۲۶]	۰/۸۸	۵/۷	۵/۰۱
مرجع [۲۷]	۴/۶۶ (برای مازول)	۲/۷	۱۲/۵۸

#### ۴-۴ - بازده کوانتومی

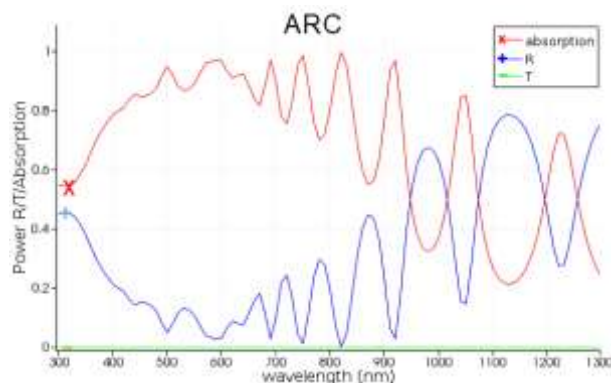
بازده کوانتومی با نماد  $\eta$  عبارت است از احتمال تولید جفت الکترون - حفره با برخورد یک فوتون بر ساختار می‌باشد که این جفت الکترون - حفره در جریان الکتریکی ساختار شرکت نکنند. در سلول‌های خورشیدی، به عنوان یک چالش اصلی، اغلب فوتون‌های برخوردی نور خورشید منجر به این فرآیند نشده و  $\eta$  مقدار کوچکی دارد و برای همه ساختارهای الکترونیک نوری نامساوی  $0 \leq \eta \leq 1$  برقرار می‌باشد. قابل توجه است که جفت الکترون - حفره‌های تولیدشده در خارج از

## ۵- انتقال و بازتابش

بعد از انجام شبیه‌سازی و محاسبه بازده می‌توان برخی محاسبات دیگر مانند انتقال و بازتابش را در سلول خورشیدی مربوطه محاسبه کرد. به این صورت که از داده‌های ذخیره‌شده مانیتور در بالا و پائین ساختار طبق روش محاسبه‌ای و شبیه‌سازی انجام‌گرفته در کارهای قبلی [۱۵] استفاده می‌شود. در شکل ۷ مقایسه دو پارامتر انتقال و بازتابش را با ساختار با پوشش ضدبازتاب و بدون پوشش ضدبازتاب انجام شده و می‌توان به این نتیجه منطقی رسید که در طراحی ساختار، پوشش ضد بازتاب<sup>۱۲</sup> به بهبود جذب کمک می‌کند. پرش موجود ناشی از تشدید اثر فبری-پرو<sup>۱۳</sup> است. مشاهده می‌شود که کیفیت بهتری در طول موج پائین وجود دارد آن‌هم به آن دلیل است که وقتی محاسبات تبدیل فوریه نتایج حوزه زمان انجام می‌شود، از فاصله‌گذاری فرکانسی غیر یک‌شکل استفاده می‌کند. در شکل الف-۶ و ب-۶ نتایج بازتاب، انتقال و جذب بدون/با پوشش ضد بازتابش سلول خورشیدی باند میانی نقطه کوانتومی ساختار p-i-n نشان داده شده‌است.



شکل ۶: الف) بازتاب، انتقال و جذب بدون پوشش ضدبازتابش



شکل ۶: ب) بازتاب، انتقال و جذب با پوشش ضدبازتابش

شبیه‌سازی آن‌ها را ملاحظه کرد. به‌منظور تعیین ضریب شکست بهینه -به‌ویژه در سلول خورشیدی- برای لایه پوشش ضد بازتاب از معادله (۵) استفاده می‌شود.

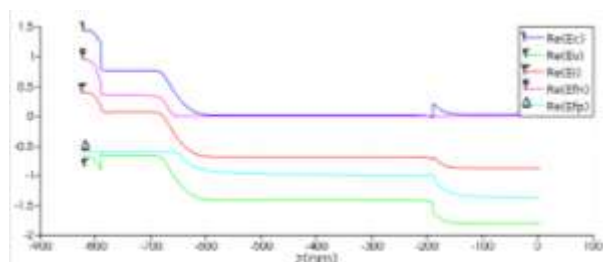
$$n \quad (5)$$

که  $n_1$  ضریب شکست بهینه،  $n_0$  ضریب شکست مواد اطراف،  $n_2 = 3.5$  و  $n_0 = 1$  بوده و  $n_1$  برابر ۱٫۸ محاسبه گردیده است. ماده مناسب برای لایه پوشش ضدبازتاب، طبق ضریب شکست ۱/۸ محاسبه شده، ماده  $Al_2O_3$  می‌باشد.

## ۶- سطوح انرژی و ساختار باند

به‌منظور فهم ساختار سطوح انرژی سلول خورشیدی لازم است اشاره‌ای به قواعد مربوط به شکل‌گیری ساختار باند انرژی شود؛ وقتی اتم‌ها یک مولکول را تشکیل می‌دهند، اوربیتال‌های جدید پیوندی و ضدپیوندی شکل می‌گیرند که دارای مقادیر انرژی متفاوت با اوربیتال‌های اتمی هستند. تشکیل اوربیتال‌های جدید باعث به‌وجودآمدن چندگانگی در سطوح انرژی می‌شود. با شکل‌گیری یک قطعه جامد و نزدیکی زیاده از حد اوربیتال‌ها، اوربیتال‌های پیوندی نوار ظرفیت راه، و اوربیتال‌های ضد پیوندی نوار رسانش را به‌وجود می‌آورند. این اوربیتال‌ها یا سطوح انرژی مجزا، در جامد تبدیل به یک نوار پیوسته می‌شوند که شامل N سطح انرژی است که N از مرتبه  $cm^{-3}$   $10^{23}$  است. مقدار انرژی تراز فرمی ذاتی در مرکز برابر با ۰/۶۸ الکترون‌ولت می‌باشد.

در شکل ۷ ساختار باند انرژی سلول خورشیدی نقطه کوانتومی باند میانی در شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. رسیدن به ساختار باند انرژی در شبیه‌سازی به‌منزله صحت تحلیل نوری و الکتریکی ساختار است؛ شکل ۷ را می‌توان با شکل ۱ مقایسه نمود که دقیقاً مفهوم سلول خورشیدی باند میانی را نشان می‌دهد.



شکل ۷: ساختار باند انرژی سلول خورشیدی نقطه کوانتومی باند میانی

## ۷- نتیجه‌گیری

هر دو سلول خورشیدی طراحی شده به‌صورت عددی انجام گرفته و در محیط نرم‌افزاری به روش تفاضل‌های محدود در حوزه زمان (FDTD) بررسی شده‌اند. برای سلول خورشیدی با ساختار p-i-n مبتنی بر GaAs بازده تبدیل انرژی گزارش شده توسط آدین و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۵ برابر با ۳۲/۸۷٪ است؛ مراجع [۲۰-۲۴] اخیراً ساختار

نتیجه نهایی این‌که در طول موج ۰/۳۵ تا ۰/۶۵ میکرومتر و ساختار با لایه پوشش ضدبازتاب جداسازی دو مؤلفه توان بازتابش و جذب زیاد بوده و پرش کمتری نیز دارد. تحقیقات زیادی مراجع [۱۶، ۱۷] بازتابش و تابع دی‌الکتریک گالیوم-آرسناید را بررسی کرده‌اند (در تابش معمولی) که می‌توان در مرجع [۱۷] به‌تفصیل تئوری و نحوه



- Conversion, Conference IEEE 4th World Conference on, p. 49-52, 2006.
- [10] K. W. J. Barnham and G. Duggan, J. Appl. Phys. 67, 3490 ~1990.
- [11] Y. Okada, I. N. J. Ekins, "Intermediate band solar cells: Recent progress and future directions", APPLIED PHYSICS REVIEWS 2, 021302, 2015.
- [12] M. Paxman et al., J. Appl. Phys. 74, 614 ~1993.
- [13] M. Y. Levy, C. Honsberg, A. Marti, and A. Luque, "Quantum Dot Intermediate Band Solar Cell Material Systems With Negligible Valence Band Offsets", Proceedings of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference \_IEEE, New Jersey pp.90-93. , 2005.
- [14] A. Das, M. M. Rahman, M. A. Matin, N. Amin, "Highly Efficient Quantum Dot Intermediate Band Solar Cell (QDIBSC) With GaAs", Mechanical Engineering Research Journal, 90-95, 2013.
- [15] Xiaoliang Zhang, Carl Hägglund, Erik M. J. Johansson, "Highly efficient, transparent and stable semitransparent colloidal quantum dot solar cells: a combined numerical modeling and experimental approach ". *Energy & Environmental Science, Issue 1, 2017*.
- [16] D. E. Aspnes and A. A. Studna, Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV. *Phys. Rev. B, 27: 985-1009, Jan 1983*.
- [17] H. R. Philipp and H. Ehrenreich. *Optical properties of semiconductors. Phys. Rev., 129:1550-1560, Feb 1963*.
- [18] A. Le Donne, A. Scaccabarozzi, S. Tombolato, S. Binetti, M. Acciarri, A. Abbotto, *Solar photovoltaics: a review, Reviews in Advanced Science and Engineering 2 (2), - IN PRESS, June 2013*.
- [19] Uddin, N., Md. Motiur Rahman, Ahmed, T., & Atiqulislam, "Performance Analysis of Quantum Dot Intermediate Band Solar Cell (QD IBSC)", Global Journal of Researches in Engineering Electrical and Electronics Engineerin Volume 15 Issue 1 USA, 2015.
- [20] M. B.E.A.Saleh, *Fundamentals of photonics.*, boston: Wiley, 2007.
- [21] F. K. Tutu, P. Lam, J. Wu, N. Miyashita, Y. Okada, K.-H. Lee, N. J. Ekins-Daukes, J. Wilson, and H. Liu, 'InAs/GaAs quantum dot solar cell with an AlAs cap layer', *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, no. 16, p. 163907, Apr. 2013.
- [22] D. Pandaa, A. Balgarkashia, S. Sardar, "Comparison of InAs/GaAs and InGaAs/GaAs Quantum Dot Solar Cells and Effect of Post-Growth Annealing on Their Optical properties", IEEE 2016.
- [23] Neil Scott Beattie, Patrick See, Guillaume Zoppi, "Quantum engineering of InAs/GaAs quantum dot based intermediate band solar cells", *ACS Photonics* 2017.
- [24] A. Creti, V. Tasco, A. Cola, "Role of charge separation on two-step two photon absorption in InAs/GaAs quantum dot intermediate band solar cells", *Appl. Phys. Lett.* 108, 2016.
- [25] Guodan Wei, Stephen R. Forrest, "Intermediate-Band Solar Cells Employing Quantum Dots Embedded in an Energy Fence Barrier", *NANO LETTERS* 2007.
- [26] YANG Xiao-Guang, YANG Tao, "Intermediate-Band Solar Cells Based on InAs/GaAs Quantum Dots", *CHIN. PHYS. LETT.* Vol. 28, No. 3, 2011.
- [27] Tomah Sogabe, Yasushi Shoji, "Intermediate-band dynamics of quantum dots solar cell in concentrator photovoltaic modules", *SCIENTIFIC REPORTS* 2014.
- مشابه کار شده در این مقاله را ساخته‌اند که در اینجا با تغییر ترکیب  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  در لایه‌های n و p به ترکیب  $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$  تبدیل انرژی به مقدار  $0.3/0.34$  رسیده است. این ترکیب از لحاظ ارتقاء قابلیت تحرک الکترون و کاهش سرعت بازترکیب سطحی عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. بنابراین، میزان جریان نوری تولید شده بیش تر شده و نقاط کوانتومی InAs نیز در افزایش بازده تبدیل انرژی نقش خوبی ایفا می‌کنند. در نتیجه، چگالی جریان اتصال کوتاه و بازده تبدیل انرژی برای این سلول خورشیدی باند میانی مبتنی بر نقطه کوانتومی به صورت قابل توجهی افزایش پیدا کردند؛ به طوری که حداکثر بازده تبدیل انرژی برای سیستم AlGaAs با نقاط کوانتومی InAs از مقدار  $51/59$ ٪ با ترکیب مشابه با تغییر اندازه و مکان قرارگیری نقاط کوانتومی به مقدار  $55/58$ ٪ رسیده است.

### سپاس‌گزاری

این مقاله در قالب طرح تحقیقاتی ملی با حمایت بنیاد ملی نخبگان وزارت دفاع (کد مجوز کسر خدمت ۱۳۹۸/۲/۱۹۹۸/۴۹۰/ج/۹۷= سیدسالار حسینی) انجام شد؛ به این وسیله از زحمات جناب سرگرد جواد مولائی کمال تشکر و قدردانی را دارد. بعد از اتمام فرآیند ساخت سلول خورشیدی مربوطه گزارش آزمایشگاهی و تجربی آن در مقالات بعدی ارائه خواهد شد.

### مراجع

- [۱] داودی، حسین؛ عباسیان، کریم؛ "طراحی سلول خورشیدی میان بانندی مبتنی بر نانوذرات نقطه کوانتومی"، پنجمین کنفرانس انرژیهای تجدیدپذیر، پاک و کارآمد، ۱۵ اسفند ۱۳۹۲
- [2] J. Chen, C. Li, D. W. Zhao, W. Lei, Y. Zhang, M. T. Cole, D. P. Chu, "A quantum dot sensitized solar cell based on vertically aligned carbon nanotube templated ZnO arrays", *Electrochem. Commun.* 12, 1432-1435, 2010.
- [3] A.E. Becquerel, *C. R. Acad. Sci.* 9 561, 1839.
- [4] Micha, Weiner, E., Jakomin, R., "InAs quantum dots on GaAs for intermediate band solar cells", IEEE, 2015.
- [5] Marti, Antonio, Luque, Antonio, "Intermediate band solar cells", *Opto Electronics and Communications Conference, 2009. OECC 2009. 14th*, p. 1-2, 2009.
- [6] K. Taretto, U. Rau, J. H. Werner, *Appl. Phys. A*, 77, 865-871 (2003) and K. Taretto, U. Rau, J. H. Werner, *Appl. Phys. A*, 86, 151, 2007.
- [7] V. Aroutiounian, S. Petrosyan, a) and A. Khachatryan, "Quantum dot solar cells", *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS VOLUME 89, NUMBER 4 15 FEBRUARY 2001*.
- [8] Luque, A. and Martí, A. "Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.78, No. 26, p.5014, 1997.
- [9] Luque, Antonio, Marti, A., "Recent Progress in Intermediate Band Solar Cells", *Photovoltaic Energy*

- [30] Hiroji Hosokawa, Ryo Tamaki, "Solution-processed intermediate-band solar cells with lead sulfide quantum dots and lead halide perovskites", nature 2019.
- [31] AR Tumpa, E Sarker, S Anjum, N Sultana, Analyze the effect of window layer (ALAs) for increasing the efficiency of GaAs based solar cell, *ajer* Volume-4, Issue-7, pp-304-315, 2015.
- [32] N. Matveev, Optics. Mir Publishers. Moscow, 1988.
- [28] Ali Imran, Jianliang Jiang, "Efficiency enhancement through flat intermediate band in quantum dot solar cell", science direct 2018.
- [29] Injamam Ui Islam Chowdhury, Jith sarker, "Performance analysis of high efficiency Inx Ga1-x N/GaN intermediate band quantum dot solar cell", science direct 2018.

## زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Photoelectric Effect
- <sup>2</sup> Dye Sensitized
- <sup>3</sup> bulk
- <sup>4</sup> Energy gap
- <sup>5</sup> Energy levels confined
- <sup>6</sup> Electron-hole pair
- <sup>7</sup> Depletion region
- <sup>8</sup> Finite difference time domain
- <sup>9</sup> perfectly matched layer
- <sup>10</sup> Window layer
- <sup>11</sup> Filling Factor
- <sup>12</sup> Anti-reflective coating
- <sup>13</sup> Fbry-Peru effect