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 سلول خورشیدی InGaP/GaAs/Si با بازدهٔ کوانتومی بالا بر پایه نانوساختار

علی فرمانی، دکتر محمدحسین شیخی و دکتر سجاد دهقانی

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی الکترونیک و مخابرات

**چکیده - در این مقاله یک سلول خورشیدی نانو ساختار *InGaP/GaAs/Si* معرفی می‌گردد. برای افزایش بازدهٔ کوانتومی سلول خورشیدی پیشنهادی، از تکنیک‌های کاهش تلفات ناشی از بازترکیب‌های غیر تشعشعی و افزایش ضریب جذب استفاده‌شده است. نتایج شبیه‌سازی ساختار طراحی‌شده نشان می‌دهد، که با در نظر گرفتن تطبیق شبکه بین لایه‌ها علاوه بر رسیدن به بازدهٔ کوانتومی بالا، قسمت بیشتری از طیف نور خورشید را جذب می‌کند. سلول خورشیدی در نرم‌افزار سیلواکو ورژن ۳،۲۰،۲ شبیه‌سازی و بازدهٔ کوانتومی به ۶۵٪ رسیده است.**

کلیدواژه- نانو ساختار، سلول خورشیدی چاه کوانتومی، بازدهٔ کوانتومی

# A Design Of InGaP/GaAs/Si Solar Cells with High Quantum Efficiency Based on Nanostructures

Ali Farmani, Mohammad Hossein Sheikhi, and Sajad Dehghani

Shiraz University, Department of Electronic and Communication Engineering

Abstract- In this paper, a nanostructured solar cells InGaP/GaAs/Si is presented. Proposed to increase the quantum efficiency of solar cells, a technique to reduce losses of non-radiative recombination and increase of the absorption coefficient is used. Simulation results show that the designed structure, with regard to the lattice matching between layer in addition to achieving high quantum efficiency, absorbs more of the sun's light spectrum. Solar cell in software version 3.20.2 silvaco simulations and quantum efficiency of 65% is reached.

Keywords: Nanostructured, quantum wells solar cells, quantum efficiency.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30 ]



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

## ۱- مقدمه

اولین سلول خورشیدی چاه کوانتومی AlGaAs/GaAs در سال ۱۹۹۰ توسط بارنهام و دوگان و گروه تحقیقاتی آن‌ها در کالج لندن ساخته شد [۱]، و نشان دادند که این ساختار دارای بازده‌ٔ کوانتومی بالاتری نسبت به سلول‌های خورشیدی تک اتصال معمولی هستند [۲]. در ساختارهای تک اتصال حامل‌ها در یک محدوده‌ٔ انرژی گسترده، در باندهایی با یک چگالی نسبتاً کوچک در لبه‌های باند توزیع‌شده‌اند و بازده‌ٔ کوانتومی حداکثر ۳۱ درصد است[۳]، در ساختار چاه کوانتومی به دلیل ایجاد محدودیت در یک بعد، حرکت الکترون‌ها در فاصله چند ده آنگسترومی محدودشده و سبب بروز خواص کوانتومی می‌شود، در این حالت چگالی حالت‌ها در ریز باند به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد و الکترون‌ها در محدوده‌ٔ انرژی کوچک‌تری با چگالی نسبتاً بالا در لبه‌های باند توزیع‌شده‌اند و وارونگی جمعیت با تزریق کمتر چگالی حامل‌ها به دست می‌آید. ساختار تک چاه کوانتومی دارای جریان آستانه پایینی بودند، در سال ۱۹۹۳ کورکیش، ساختار چاه کوانتومی چندگانه را معرفی کرد که منجر به افزایش بازده کوانتومی سلول‌های خورشیدی شد [۴]. میکاپولوس برای اولین بار سلول‌های خورشیدی نانو ساختار چند اتصال InGaP/GaAs/Ge را در سال ۲۰۰۲ طراحی کرد، سپس طرح‌های دیگری بر پایه این ساختار معرفی شدند به بهترین آن‌ها دارای بازده کوانتومی ۳۶,۲۸ بود [۵]. سلول‌های خورشیدی نانو ساختار چند اتصال AlGaAs/GaAs/Si در سال ۲۰۰۷ معرفی شدند که دارای خواص اپتیکی بودند و طیف وسیعی از طول‌موج‌های خورشید را دریافت می‌کردند که علت آن تغییر خواص مواد و افزایش ضریب جذب، در اثر افزایش نسبت سطح به حجم مواد بود [۶]. در سال ۲۰۱۳ ساختار سلول خورشیدی InGaAs/GaAsP برای بهبود نانو ساختار InGaP/GaAs/Ge معرفی شد، که میزان بازده‌ٔ کوانتومی به ۶۰ درصد به‌صورت تئوری رسید [۸ -۷]. در ادامه، در بخش ۲ تکنیک‌های افزایش بازده‌ٔ کوانتومی بکار گرفته در ساختار سلول خورشیدی پیشنهادی را بررسی می‌کنیم، در بخش ۳ ساختار سلول خورشیدی پیشنهادی را توضیح می‌دهیم، در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی را نشان داده‌ایم و در بخش ۵ و ۶ مقایسه نتایج و نتیجه‌گیری را آورده‌ایم.

## ۲- تکنیک‌های افزایش بازده‌ٔ کوانتومی

ساختار سلول‌های خورشیدی چند اتصال، برای دریافت قسمت زیادی از طیف نور خورشید از نیمه‌هادی‌های مستقیم و غیرمستقیم تشکیل‌شده است. در نیمه‌هادی با توجه به شرایط دمایی هدایت قابل‌کنترل است، درواقع ناحیه بین باند هدایت و ظرفیت وابسته به دما تغییر می‌کند، همچنین با اعمال میدان خارجی توان الکتریکی تولید می‌شود که می‌تواند با جذب نور انرژی الکتریکی را تولید کند. بنابراین در این ساختارها دو پروسه ۱-جذب و ۲- بازترکیب، برای افزایش بازده کوانتومی باید موردبررسی قرار گیرد. در حالت کلی برای برقراری جریان الکترون باید لایه والانس را ترک کند و به باند هدایت برود. شرط جذب الکترون بزرگ‌تر بودن میزان انرژی آن نسبت به انرژی گاف است (E>Eg)، که با رابطه پلانک معادله انرژی به‌صورت رابطه (۱) است. بعد از مرحله جذب، الکترون آزاد به باند هدایت می‌رود که تحت میدان الکتریکی قرار دارد و یک حفره در لایه والانس ایجاد می‌شود، الکترون‌ها با از دست دادن انرژی طی فرایند نشر به لایه والانس بازمی‌گردند و با حفره بازترکیب می‌شوند [۱۱].

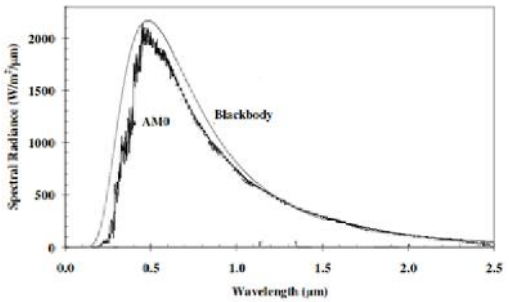
$$E = h\nu \quad (۱)$$

در هنگام بازترکیب الکترون و حفره در سلول خورشیدی سه نوع تلفات ناشی از بازترکیب رخ می‌دهد که برای افزایش بازده کوانتومی باید آن‌ها را کاهش داد، این تلفات عبارت‌اند از: ۱- شاکلی ۲-سطحی ۳- اوژه. بازترکیب شاکلی در درون نیمه‌هادی، در سطح آن و بین اتصالات صورت می‌گیرد. معمولاً این بازترکیب به علت وجود نقص کریستالی در هنگام پروسه رشد ایجاد می‌شود، که یک روش کاهش آن، کم کردن زمان ماندن حامل‌ها درون سلول است. بازترکیب سطحی به علت وجود نقص در سطح نیمه‌هادی است، که یک روش کاهش آن اضافه کردن یک‌لایه با گاف انرژی زیاد، به‌عنوان لایه پنجره در سطح بالایی سلول خورشیدی است. تکنیک دوم با شانه‌ای قرار دادن اتصالات بالا و پایین سلول خورشیدی میزان بازترکیب سطحی را کاهش می‌دهیم. برای تعیین بازده‌ٔ کوانتومی طیف تابشی سلول خورشیدی را



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30 ]

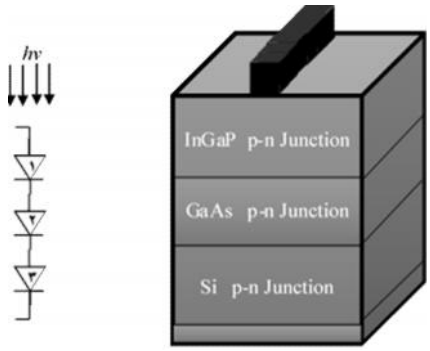
به‌صورت شکل (۱) نشان می‌دهیم. دو حالت که در بسیاری از مقالات مدنظر قرار می‌گیرد ۱- معادل کردن سلول خورشیدی به‌صورت یک جسم سیاه است که توسط پلانک آزمایش آن انجام‌شده است. ۲- استاندارد وزن صفر هوا، که در سال ۲۰۰۰ معرفی شد و نشان داده‌شده که نور خورشید در مسیر رسیدن به سطح زمین دچار تضعیف و پراکندگی می‌شود.




شکل ۱: محدوده‌ٔ طیف تابشی نور خورشید

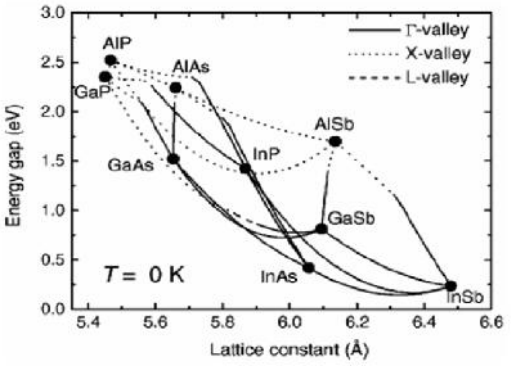
## ۲-۱- ساختار سلول خورشیدی پیشنهادی

سلول خورشیدی ۳ اتصال پیشنهادی از اتصال سه سلول خورشیدی مجزا تشکیل‌شده است که دارای گاف انرژی متفاوت هستند، این ساختار باعث می‌شود طول‌موج‌های بیشتری از طیف نور خورشید جذب شوند. برای افزایش جذب و بالا بردن بازده کوانتومی علاوه بر تکنیک‌های گفته‌شده در بخش (۲)، سلول با گاف انرژی بالا را در سطح بالا قرار می‌دهیم تا برای طول‌موج‌های پایین به‌عنوان پنجره عمل کند و سلول‌های دیگر را به همین ترتیب قرار می‌دهیم، همچنین لایه زیر هر سلول نیمه‌هادی نوع p را قرار می‌دهیم زیرا در این ناحیه الکترون‌ها حامل‌های اقلیت هستند و در لایه n موبلیته الکترون‌ها بیشتر از حفره‌ها است بنابراین جریان سریع‌تر تولید می‌شود. در شکل (۲) ساختار سلول خورشیدی پیشنهادی را نشان داده‌ایم. ساختار پیشنهادی را با در نظر گرفتن تطبیق شبکه طراحی کرده‌ایم و باعث شده بازده‌ٔ کوانتومی افزایش یابد و علت آن این است که سطح بالایی که دارای گاف انرژی بالاتر است پرتوهای بیشتری را جذب کند و پرتوهایی که انرژی آن‌ها کمتر از گاف انرژی لایه بالایی است از این لایه عبور می‌کند و جذب لایه پایینی می‌شوند.




شکل ۲: ساختار سلول خورشیدی پیشنهادی

همچنین با توجه به شکل (۳) برای برقراری تطبیق شبکه بین سلول‌ها فیلترهای عبوری نازک قرار داده‌ایم و آستانه بازتاب برای هر سلول برابر با گاف انرژی سلول بالایی است.




شکل ۳: برقراری تطبیق شبکه با در نظر گرفتن گاف انرژی هر ماده

در ساختار طراحی‌شده با توجه به اینکه Si, GaAs دارای تطبیق شبکه نسبی هستند به‌عنوان لایه زیر و میانی برای دریافت قسمت بسیاری از طول‌موج‌های خورشید انتخاب‌شده‌اند. با توجه به شکل (۳) و استفاده از رابطه (۲) نسبت مولی لایه InGaP برای تطبیق شبکه با لایه GaAs به دست آورده‌ایم.

(۲)

$$\sim_{GaAs} = \sim_{GaP} \times x + \sim_{InP} \times (1-x) \leftrightarrow x = \frac{\sim_{GaAs} - \sim_{InP}}{\sim_{GaP} - \sim_{InP}}$$

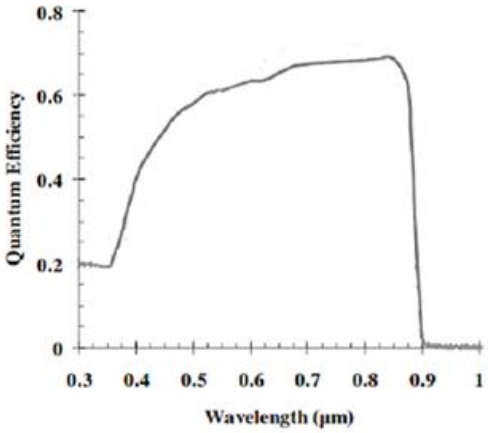
## ۲-۲- نتایج شبیه‌سازی سلول خورشیدی

در ساختار طراحی‌شده لایه بالا، با لایه AlInP پوشش داده شد که دارای گاف انرژی بالایی است و به‌عنوان



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30 ]

پنجره عمل می‌کند و از بازترکیب سطحی جلوگیری می‌کند. در این طرح برای رسیدن به حداکثر راندمان هرکدام از سلول‌ها به‌صورت مجزا طراحی و نتایج ثبت شد، سپس اختلاف جریان سلول‌ها اندازه‌گیری شد و سپس با ترکیب سلول‌ها با در نظر گرفتن فیلترهای بین آن‌ها نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که علاوه برافزایش بازدهٔ کوانتومی قسمت بیشتری از طیف نور خورشید جذب شد. در شکل (۴) نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار سیلو اکو نشان داده است. نتایج به‌دست‌آمده با در نظر گرفتن طیف استاندارد AM0 به‌عنوان طیف نور خورشید، و روش مسافت محدود برای حل دقیق معادلات عددی با در نظر گرفتن معادلات الکترومغناطیسی انتشار نور هست.




شکل ۴: نتایج شبیه‌سازی بازدهٔ کوانتومی

## ۲-۳- مقایسه نتایج

برای شبیه‌سازی سلول خورشیدی پیشنهادی از نرم‌افزار سیلواکو ورژن ۳,۲۰,۲ استفاده‌شده است و در جدول (۱) نتیجه شبیه‌سازی سلول خورشیدی پیشنهادی با مقالات دیگر مقایسه شده است. نتایج ساختار طراحی‌شده نشان می‌دهد، که علاوه بر بازدهٔ کوانتومی بالا قسمت بیشتری از طیف نور خورشید را جذب می‌کند و همچنین در این ساختار تلفات ناشی از بازترکیب‌های غیر تشعشعی نیز در نظر گرفته‌شده است و با تکنیک‌های افزایش بازدهٔ کوانتومی این اثرات را کاهش داده‌ایم.

جدول ۱: مقایسه نتایج مقالات با سلول خورشیدی پیشنهادی

| Implementation | $J_{SC}$(mA/cm$^2$) | $V_{OC}$(V) | Efficiency(%) |
|---|---|---|---|
| Yu Wen[8] | -- | -- | 60 |
| Yu Wen[9] | 20.25 | 0.88 | 14.2 |
| Wei-Chih[10] | 0.48 | 2.02 | 46 |
| **Proposed Our Solar Cell** | 50 | 1.2 | 65 |

## ۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک نانو ساختار سلول خورشیدی چند اتصال InGaP/GaAs/Si معرفی‌شده است که در این ساختار برای افزایش بازده کوانتومی از تکنیک‌های کاهش تلفات بازترکیب‌های غیر تشعشعی و افزایش ضریب جذب استفاده‌شده است.

## مراجع


[1] K. W. J. Barnham and C. Duggan, J. Appl. Phys. 67, 3490 (1990). J. Nelson, M. Paxman, K. W. J. Barnham, J. S. Roberts, and C. Button, **IEEE J. Quantum Electron**. 29, 1460 (1993).

[2] J. G. J. Adams, B. C. Browne, I. M. Ballard, J. P. Connolly, N. L. A. Chan, A. Ioannides, W. Elder, P. N. Stavrinou, K. W. J. Barnham, and N. J.Ekins-Daukes, "*Recent results for single-junction and tandem quantum well solar cells*," presented at the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition, Valencia, Spain, 2010.

[3] W. Shockley and H. J. Queisser, "*Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells*," **J. Appl. Phys**., vol. 32, pp. 510–519, 1961.

*[4]* R. Corkish, M. Green, Proceedings of the 23rd Photovoltaic Specialists Conference, Louisville, 1993, p. 675.

[5] *P. Michalopoulous, "A novel approach for the development and optimization of state-of-the-art photovoltaic devices using Silvaco*," Master's thesis, Naval Postgraduate School, 2002.

[6] Baldomero Garcia, Jr., *Indium Gallium Nitride Multijunction Solar Cell Simulation Using Silvaco Atlas*, Master Of Thesis, Naval Postgraduate School Monterey, California, USA,2007.

[7] M. Jo,Y. Ding,T. Noda,T. Mano,Y. Sakuma,K. Sakoda,L. Han,and H. Sakaki," *Impacts of ambipolar carrier escape on current-voltage characteristics in a type-I quantum-well solar cell*," **J. Appl. Phys**, 103, 061118 (2013).

[8] Yu Wen,Yunpeng Wang, and Yoshiaki Nakano, "*Suppressed indium diffusion and enhanced absorption in InGaAs/GaAsP stepped quantum well solar cell*," **J. Appl. Phys**,100, 053902 (2012).

[9] Yu Wen, Yunpeng Wang, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama, and Yoshiaki Nakano, "*Enhanced Carrier Escape in MSQW Solar Cell and Its Impact on Photovoltaics Performance*,"**IEEE Journal Of Photovoltaics**, Vol. 2, No. 2, April 2012.

[10] Wei-Chih Lai, Ya-Yu Yang, and Ray-Hua Horng, " *Efficiency Improvement of Short-Period InGaN/GaN Multiple-Quantum Well Solar Cells With H2 in the GaN Cap Layer*," **Journal Of Display Technology**, Vol. 9, No. 12, December 2013.




[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30 ]