

## بهبود بازده سلول خورشیدی سیلیکونی ناهمگون با استفاده از لایه ذاتی GaP

نفسیه معماریان\*، میر کاظم عمرانی، مهران مین باشی

گروه فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۵ ویرایش نهائی: ۱۳۹۶/۰۱/۲۲ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۴

### چکیده

در این مقاله عملکرد سلول‌های خورشیدی سیلیکونی ناهمگون به صورت نظری بررسی شده است. ساختار مورد بررسی به صورت  $\text{TCO/a-SiC (P)/ GaP (i)/ a-Si (n)/a-Si (n+)/metal}$  می‌باشد. در این کار به جای ساختار مرسوم که از یک لایه سیلیکون آمورف ذاتی برای افزایش بازده استفاده می‌شود، از یک لایه GaP (گالیوم فسفات) به عنوان لایه ذاتی استفاده شده است. مدل‌های مختلفی از این ساختار سلول خورشیدی شبیه‌سازی شد. تأثیر پارامترهای مختلف در ساختار سلول خورشیدی نظیر تابع کار الکترودهای بالایی و پایینی، چگالی حامل لایه‌های امیتر و لایه سیلیکون آمورف نوع n، گاف انرژی لایه امیتر، ضخامت لایه بافر Gap، منحنی چگالی جریان-ولتاژ و بازده کوانتومی بررسی شد. بهینه مقدار کمیت‌های برای بالاترین بازده سلول خورشیدی براساس نتایج مطالعات حاضر معرفی شده است. همچنین ساختار نوار انرژی در حالت‌های مختلف رسم و مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از یک لایه ذاتی گالیوم فسفات با گاف انرژی ۲٫۲۶ eV و ضخامت ۱ میکرومتر منجر به بیشترین بازدهی در حدود ۲۱٫۱۳٪ با  $V_{oc}=1.52\text{ V}$ ،  $J_{sc}=16.58\text{ mA.cm}^{-2}$  و  $FF=84\%$  می‌شود.

**کلیدواژگان:** سلول خورشیدی سیلیکونی، بهینه سازی گاف انرژی، لایه ذاتی، بازده کوانتومی

### مقدمه

آمورف a-SiGe:H به مواد نیم‌رسانای بسیار مهمی برای استفاده در سلول‌های خورشیدی تبدیل شده‌اند [۱]. استفاده از ساختارها و اتصالات ناهمگون برای سیلیکون بلوری و آمورف باعث کارآمدتر شدن این نوع سلول‌های سیلیکونی شده است [۲].

روش‌های متنوعی به منظور افزایش بازدهی در این نسل از سلول‌های خورشیدی به کار برده می‌شود. از بین این روش‌ها می‌توان به اکسیداسیون حرارتی<sup>۱</sup> اشاره کرد که در آن با وارد کردن هیدروژن یا اکسیژن در سطح

سلول‌های خورشیدی یکی از انواع انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر می‌باشند که در حال حاضر در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی به دلیل بازدهی بالا، پایداری مطلوب و خواص مکانیکی مناسب، همچنان بیشترین میزان متقاضی را در بازار دارند. استفاده از فناوری لایه نازک برای ساخت سلول‌های خورشیدی موجب افزایش بازده و همچنین کاهش هزینه‌های تولید در مقایسه با انواع دیگر سلول‌های خورشیدی شده است. سیلیکون آمورف هیدروژنه (a-Si:H) و آلیاژهای آن نظیر کریبد سیلیکون آمورف a-SiC:H و سیلیکون ژرمانیوم

\* نویسنده مسئول: n.memarian@semnan.ac.ir

<sup>1</sup> thermal oxidation

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

جدید، به صورت نظری مطالعه و شبیه سازی کرده و پارامترهای بهینه جهت ساخت لایه های مختلف آن را به دست آورده ایم.

برای شبیه سازی ساختار و عملکرد سلول خورشیدی نرم افزارهای مختلفی از قبیل PC-1D, AMPS-1D, SCAPS, ASA, ADEPT-F, ASPIN, وجود دارد [۸]. بعضی از آنها تنها مختص شبیه سازی عملکرد سلول های خورشیدی سیلیکونی بوده و بعضی به صورت کلی همه ساختارهای مختلف را شبیه سازی می کنند. در این بین AMPS<sup>۵</sup> دارای یک محیط گرافیکی مناسب است که توانایی شبیه سازی انواع قطعات اپتوالکترونیکی را دارد [۹].

### مدل و روش محاسباتی

AMPS-1D یک کد شبیه سازی کامپیوتری برای طراحی و تحلیل ساختارهای دو پایانه است که می تواند ساختارهایی نظیر اتصالات p-n، p-i-n [۱۰] و اتصالات ناهمگون p-i-p و n-i-n [۱۱] را شبیه سازی کند. این ساختارها ممکن است بس بلور، آمورف، لایه های تک بلوری و یا ترکیبی از آنها باشند [۱۲]. این نرم افزار اجازه می دهد تا با استفاده از پارامترهای چگالی و توزیع انرژی، سطح مقطع به دام اندازی الکترون و حفره بتوان اثر نقص ساختار بلوری را برای یک یا چند لایه وارد نمود. برای چگالی حالات موضعی درون گاف انرژی سیلیکون آمورف دو حالت شبه گیرنده و شبه دهنده در نظر گرفته می شود. این حالت ها با مدل نمایی در دنباله نواری و حالت های میان گافی گاوسی نمایش داده می شود. سه معادله اصلی عبارتند از: معادله پواسون، معادله پیوستگی برای الکترون ها و معادله پیوستگی برای حفره ها. این معادلات اساسی باید با در نظر گرفتن شرایط مرزی

ساختار سیلیکون آمورف، پیوندهای ناقص سطحی<sup>۱</sup> غیر فعال<sup>۲</sup> می شوند [۳]. یک روش متداول دیگر استفاده از یک لایه سیلیکون ذاتی<sup>۳</sup> بین لایه p و لایه n در ساختار سلول (ساختار p-i-n) می باشد که باعث کاهش چگالی نقص های سطحی و باز ترکیب حامل ها در فصل مشترک دو لایه می شود. این دسته با نام سلول های خورشیدی ناهمگون با لایه ذاتی<sup>۴</sup> (HIT) شناخته می شوند [۴]. ایده استفاده از لایه ذاتی در سلول های سیلیکونی باعث افزایش بازده در آنها شده است [۳ و ۱].

از سوی دیگر، محققان با مطالعات تئوری به این نکته دست یافتند که استفاده از کریید سیلیکون به جای سیلیکون آمورف به سلول هایی با بازدهی بالاتر در مقایسه با سیلیکون آمورف منجر می شود [۲، ۵، ۶]. والد و همکارانش نیز با مقایسه نتایج تجربی سلول های خورشیدی تهیه شده از دو نوع ماده همین یافته را تأیید کرده اند [۷]. با این حال استفاده از یک ماده دیگر به عنوان لایه ذاتی تا به حال در جایی گزارش نشده است.

در این مقاله از یک لایه گالیوم فسفات GaP به عنوان لایه ذاتی استفاده شده است. علت انتخاب گالیوم فسفات گاف نسبتاً بزرگ این ماده (در حدود ۱/۷۵ eV) در مقایسه با سیلیکون آمورف (۰/۲۶ eV) می باشد. همچنین به لحاظ موقعیت لبه نوار رسانش این ماده در تطابق با سیلیکون آمورف می باشد [۵].

با توجه به هزینه بالای مورد نیاز و سایر شرایط کارهای تجربی، شبیه سازی یک ساختار و به دست آوردن محدوده پارامترهای بهینه برای ساختار مورد نظر، می تواند باعث صرفه جویی در انرژی و زمان برای پژوهشگران باشد. از این رو در مقاله حاضر ساختار سلول خورشیدی سیلیکونی ناهمگون با یک ترکیب

<sup>4</sup> Heterojunction with intrinsic thin layer

<sup>5</sup> Analysis of Microelectronic and Photonic Structures

<sup>1</sup> surface dangling bonds

<sup>2</sup> passivated

<sup>3</sup> Intrinsic

آبکاری شده است. ضریب بازتاب برای الکتروود بالا  $0.1$  و سرعت بازترکیب الکترون و حفره  $10^7 \text{ cm/s}$  در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای مربوط به هر لایه در جدول ۱ آورده شده است. برای اندازه‌گیری بازده سلول‌های خورشیدی طیف استاندارد AM 1.5 با توان فرودی  $P_{IN} = 1000 \text{ W/m}^2$  به‌کار برده شده و در  $25^\circ\text{C}$  در نظر گرفته شده است [۱۴].

TCO $\phi = 6\text{eV}$
a-SiC:H(p) Thickness= 10nm
GaP (i) Thickness= 1 $\mu\text{m}$
a-Si:H(n) Thickness= 10nm
a-Si:H(n+) Thickness= 5nm
Ag $\phi = 4.26 \text{ eV}$

شکل ۱. نمای جانبی طرح‌وار سلول خورشیدی تک اتصاله با لایه ذاتی GaP.

برای تمام نقاط حل شود که برای حل آنها در این نرم‌افزار از روش نیوتون-رافسون استفاده می‌شود.

شکل ۱ نمای جانبی طرح‌وار از ساختار سلول خورشیدی تک اتصاله شبیه‌سازی شده در این کار را نشان می‌دهد. در این ساختار از یک لایه اکسید رسانای شفاف<sup>۱</sup> (TCO) به‌منظور دستیابی به مقاومت سری پایین در الکتروود بالایی سلول، همچنین از a-Si:H(p) به‌عنوان لایه امیتر و از a-Si:H(n) به‌عنوان لایه بیس استفاده شده است. گالیوم فسفات به‌عنوان لایه ذاتی و a-Si:H(n+) به‌عنوان لایه میدان الکتروود پایینی<sup>۲</sup> (BSF) در نظر گرفته شده است. حضور لایه BSF با چگالی حامل بالا احتمال بازترکیب سطحی حامل‌ها در الکتروود پایینی را کاهش داده و در نتیجه باعث استخراج بیشتر فوتوالکترون‌های تولید شده در سلول می‌شود. این لایه باید از نظر ساختاری با لایه‌های بالاتر خود تطابق داشته و ساختار نوار انرژی آن باید به‌گونه‌ای باشد که امکان انتقال حامل‌ها به الکتروود را فراهم کند [۱۳]. الکتروود پایینی به‌طور کامل توسط یک فلز

جدول ۱. پارامترهای مربوط به لایه‌های سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده.

پارامتر	a-SiC:H (p)	GaP (i)	a-Si:H (n)	a-Si:H (n <sup>+</sup> )
ضخامت (nm)	۱۰	۰-۱۴۰۰	۱۰	۵
الکترون خواهی (eV)	۳.۷	۳.۸	۳.۸	۳.۸
گاف انرژی (eV)	۲.۱-۲.۶	۲.۲۶	۱.۷۵	۱.۷۲
چگالی حالات در لبه نوار هدایت ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.5 \times 10^{20}$	$1.9 \times 10^{19}$	$2.5 \times 10^{20}$	$2.5 \times 10^{20}$
چگالی حالات در لبه نوار ظرفیت ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.5 \times 10^{20}$	$1.2 \times 10^{19}$	$2.5 \times 10^{20}$	$2.5 \times 10^{20}$
تحرک الکترون ( $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )	۱۰	۱۱۰	۲۰	۲۰
تحرک حفره ( $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )	۱	۷۵	۲	۲
چگالی ناخالصی پذیرنده ( $\text{cm}^{-3}$ )	$3 \times 10^{13} - 3 \times 10^{19}$	۰	۰	۰
چگالی ناخالصی دهنده ( $\text{cm}^{-3}$ )	۰	۰	$8 \times 10^{13} - 8 \times 10^{20}$	$8 \times 10^{21}$
چگالی حالت نقص‌ها در دنباله نوری ( $\text{cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ )	$1 \times 10^{21}$	$2 \times 10^{21}$	$1 \times 10^{21}$	$1 \times 10^{21}$
انرژی مشخصه دهنده، پذیرنده (eV)	۰.۱، ۰.۰۰۵	۰.۰۶، ۰.۰۳	۰.۰۶، ۰.۰۳	۰.۰۶، ۰.۰۳
سطح مقطع به دام اندازه‌ی $e, h$ ( $\text{cm}^2$ )	$1 \times 10^{-10}, 1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-10}, 1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-10}, 1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-10}, 1 \times 10^{-17}$
چگالی حالت نقص‌ها گوسین ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{16}$
قله انرژی گوسین برای دهنده‌ها، پذیرنده‌ها (eV)	۱.۲۷، ۱.۱۷	۱.۲۶، ۱.۲۶	۱.۲، ۱.۲۴	۱.۲، ۱.۲۴

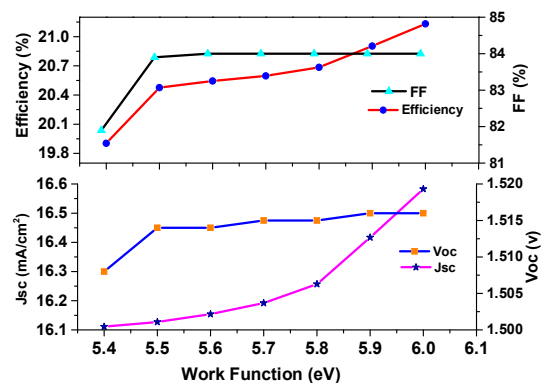
<sup>2</sup> Back surface Field

<sup>1</sup> Transparent Conductive Oxide

## بحث و بررسی

## بررسی تابع کار الکتروود بالایی

به کار بردن یک لایه شفاف و رسانا (TCO) مناسب برای دستیابی به بیشینه راهیابی نور خورشید به درون سلول و در عین حال اتصالی با کمترین میزان مقاومت سری یکی از پارامترهای مهم در طراحی سلول خورشیدی می باشد. تابع کار TCOها از ۴ تا ۶ الکترون ولت تغییر می کند [۱۵]. نتایج مربوط به شبیه سازی پارامترهای کارکردی سلول خورشیدی با تغییر تابع کار الکتروود بالایی سلول در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش تابع کار الکتروود بالایی سلول، بازده افزایش می یابد. از تابع کار ۵/۵ eV به بعد ولتاژ مدار باز (Voc) ثابت شده و به مقدار ثابت ۰/۸۷۷ V می رسد و ضریب پرشدگی (FF) نیز به مقدار ۰/۸۴۲ می رسد. با این حال چگالی جریان (Jsc) افزایش می یابد که این امر سبب افزایش بازدهی سلول خورشیدی می شود. به طور کلی علت این افزایش در بازدهی به دلیل افزایش تابع کار لایه TCO و در نتیجه سهولت انتقال فوتوالکترون های تولید شده و استخراج هر چه بیشتر آنها در مرز فصل مشترک TCO/P-SiC نسبت داده می شود.



شکل ۲. بررسی اثر تابع کار الکتروود بالایی سلول خورشیدی ناهمگون.

## بررسی تابع کار الکتروود پایینی

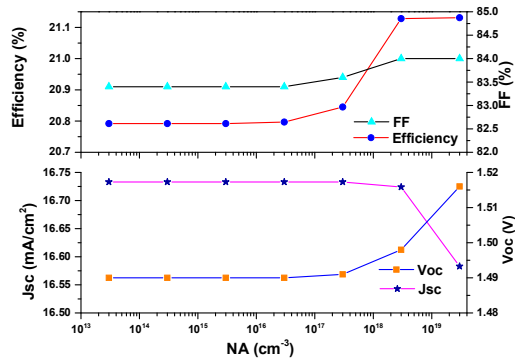
در شکل ۳ اثر تغییر تابع کار الکتروود پایینی بر پارامترهای کارکردی سلول خورشیدی ناهمگون، برای پنج ماده مختلف که در جدول ۲ آمده اند، بررسی شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی در شکل ۳ درمی یابیم که در ابتدا با افزایش تابع کار الکتروود پایینی سلول، بازده افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد. با وجود اینکه تابع کار Ag بیشتر از Al و ZnO:B است، ولی باید تأثیر ضریب بازتاب نیز باید در نظر گرفته شود. چون ضریب بازتاب Ag بیشتر است به همین دلیل Ag بیشترین بازده را داراست. همچنین بازده Al به خاطر ضریب بازتابش بالاتر آن بیشتر از بازده ZnO:B است. دلیل این امر را می توان از رابطه ۱ استنتاج کرد.

$$\eta = \frac{J_{sc}(\lambda)}{q\phi_0(1-R)} \times 100\% \quad 1$$

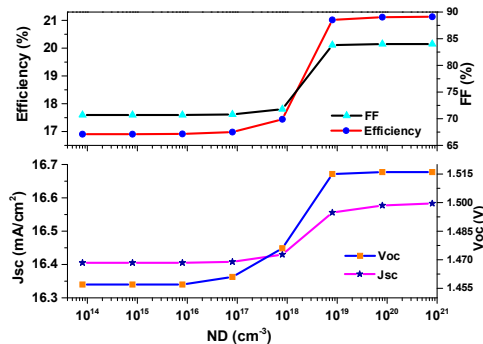
که در آن  $J_{sc}(\lambda)$  چگالی جریان در طول موج معین  $\lambda$  و  $\phi_0$  چگالی شار فوتونی و  $R$  ضریب بازتاب است [۱۶]. از رابطه ۱ مشاهده می شود که به ازای افزایش  $R$ ، بازده ( $\eta$ ) افزایش می یابد.

نکته قابل توجه دیگر ثابت ماندن ولتاژ مدار باز سلول است. تغییر تابع کار سلول خورشیدی تأثیری بر روی ولتاژ مدار باز سلول ندارد و اثر خود را بر روی جریان اتصال کوتاه سلول نشان می دهد که بیانگر این امر است که تغییر تابع کار الکتروود پایینی بیشتر بر روی جمع آوری فوتوالکترون های تولید شده و نحوه ترابرد و میزان باز ترکیب آنها در فصل مشترک n+-Si/ metal تأثیر دارد.

بارها دانست که سبب کاهش جریان نوری خارج شده از سلول می‌شود.



شکل ۴. بررسی اثر چگالی حامل‌های لایه امیتر در سلول خورشیدی.

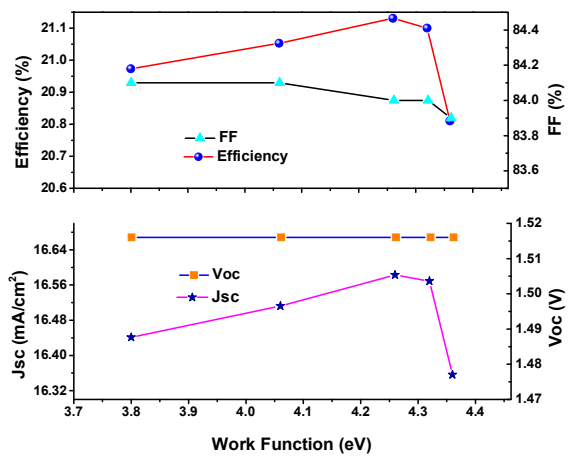


شکل ۵. بررسی اثر چگالی حامل‌های لایه بیس در سلول خورشیدی.

با توجه به شکل ۵ افزایش چگالی الکترون‌های آزاد در لایه سیلیکون آمورف باعث افزایش جریان و ولتاژ مدار باز سلول می‌شود. این افزایش برای تغییر چگالی الکترونی از  $10^{18}$  به  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  مشهود می‌باشد. این محدوده از چگالی حامل‌ها، محدوده‌ای است که یک نیم‌رسانا به حالت تبهگن در می‌آید و پس از آن افزایش بیشتر چگالی حامل‌ها به دلیل افزایش پراکندگی آنها تأثیر مشهودی بر روی عملکرد سلول خورشیدی نخواهد داشت.

جدول ۲. تابع کار و ضریب بازتاب مواد استفاده شده در الکتروپایینی.

ماده	تابع کار (eV)	ضریب بازتاب
ZnO:B	۳٫۸ [۱۷]	۰٫۸۶ [۱۷]
Al	۴٫۰۶ [۱۸]	۰٫۹۳ [۱۹]
Ag	۴٫۲۶ [۱۸]	۰٫۹۶ [۱۹]
Mo	۴٫۳ [۱۸]	۰٫۸ [۱۹]
W	۴٫۳۶ [۱۸]	۰٫۹ [۱۹]



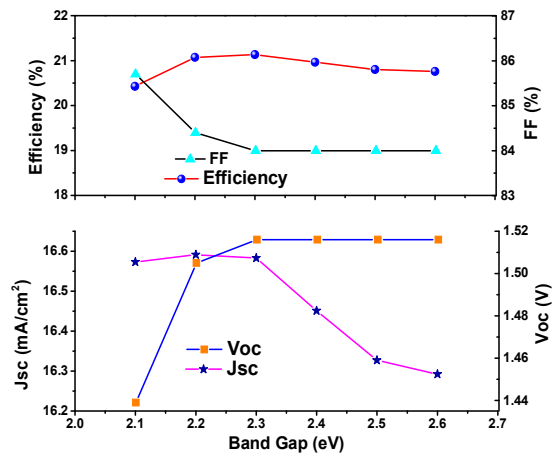
شکل ۳. بررسی اثر تابع کار الکتروپایینی سلول خورشیدی ناهمگون.

### بررسی چگالی حامل‌های لایه‌های امیتر و بیس

در ادامه به بررسی اثر چگالی حامل‌های لایه‌های امیتر (کربید سیلیکون آمورف نوع p) و بیس (سیلیکون آمورف نوع n) می‌پردازیم. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود برای لایه امیتر با افزایش چگالی حفره‌ها از  $3 \times 10^{13}$  تا  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  تغییر مشهودی در ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه سلول مشاهده نمی‌شود. اما با افزایش بیشتر چگالی حفره‌ها، ولتاژ مدار باز افزایش یافته و از ۱٫۴۸ به حدود ۱٫۵۲ ولت می‌رسد. با این حال برای چگالی حفره‌های بالاتر به دلیل افت جریان مدار باز، بازده افزایش پیدا نمی‌کند. این افت چگالی جریان را می‌توان به گیر افتادن حامل‌های آزاد درون تله‌ها و نقص‌ها و همچنین ناشی از پراکندگی

## اثر تغییرات گاف نواری امیتر

در این ساختار مورد بررسی اتصال ناهمگون لایه کریبید سیلیکون SiC نوع n با سیلیکون نوع p در نظر گرفته شده است. یکی از مزایای استفاده از کریبید سیلیکون به جای سیلیکون آمورف، باند گاف نسبتاً پهن تر آن می باشد. این گاف بزرگتر باعث می شود که تمام ناحیه مرئی و بخشی از ناحیه ماورابنفش طیف فرودی به سطح سلول خورشیدی درون سلول وارد شود و به ناحیه پیوندگاه برخورد کند. در شکل ۶ به بررسی تأثیر میزان گاف نواری لایه امیتر بر روی عملکرد سلول خورشیدی پرداخته ایم. همان طور که مشاهده می شود با افزایش میزان گاف انرژی چگالی جریان مدار باز سلول در ابتدا ثابت بوده و برای گاف انرژی بزرگتر از  $2.3 \text{ eV}$  کاهش می یابد. علت این امر را می توان به کم شدن تعداد فوتوالکترون هایی که توانایی مقابله با این گاف را داشته و خود را به اتصالات لایه ای سلول می رسانند، نسبت داد.



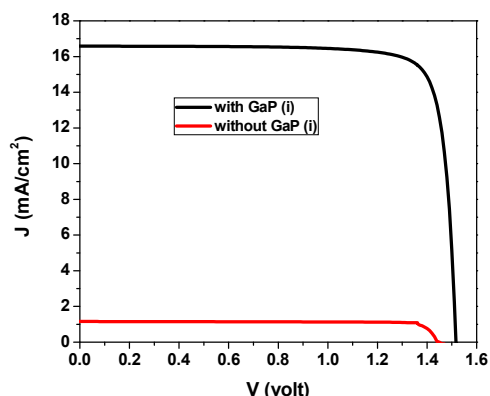
شکل ۶. بررسی اثر گاف نواری لایه امیتر در سلول خورشیدی.

با این حال با افزایش گاف انرژی لایه امیتر میزان ولتاژ مدار باز سلول بیشتر شده و باعث افزایش بازدهی می شود. هرچند که افزایش بیشتر گاف انرژی باعث افزایش ولتاژ نمی شود و ولتاژ مدار باز برای گاف های بزرگتر از  $2.3 \text{ eV}$  تقریباً ثابت باقی می ماند که به دلیل

کاهش همزمان چگالی جریان، کاهش بازدهی را به دنبال خواهد داشت.

## بررسی اثر ضخامت لایه ذاتی GaP

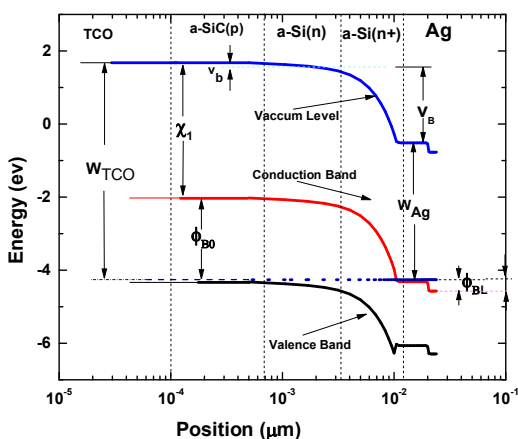
به منظور کم کردن آثار فصل مشترک و بازترکیب حامل ها در فصل مشترک از یک لایه ذاتی استفاده می شود. عموماً در کارهای پیش از این یک لایه ذاتی سیلیکون به عنوان لایه بافر ذاتی استفاده می شد. در این کار از یک لایه گالیوم فسفات ذاتی با مشخصات درج شده در جدول ۱ استفاده شده است و با تغییر ضخامت این لایه ذاتی به شبیه سازی عملکرد سلول خورشیدی پرداختیم. علت انتخاب این ماده گاف بزرگ آن در مقایسه با سیلیکون می باشد. همچنین لایه های نوار ظرفیت و رسانش این ماده در تطابق نسبی با سیلیکون بوده و میزان عدم تطابق در ثابت شبکه این مواد اندک می باشد. این مزایا باعث می شود که گالیوم فسفات یک جایگزین مناسب برای سیلیکون آمورف ذاتی باشد. نتایج حاصل در شکل ۷ نمایش داده شده است. مشاهده می شود که در ابتدا با وارد کردن لایه ذاتی به ضخامت  $5 \text{ nm}$  به ساختار سلول تمام پارامترهای کارکردی سلول خورشیدی نظیر ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ضریب پر شدگی و در نتیجه بازدهی سلول افزایش قابل ملاحظه ای یافته است. برای چگالی جریان مدار باز این افزایش تا ضخامت  $200 \text{ nm}$  با شیب بیشتری بوده و پس از آن افزایش جریان با آهنگ کندتر و به صورت تدریجی است. در مورد ولتاژ مدار باز وارد کردن لایه ذاتی GaP در ابتدا باعث افزایش این کمیت شده ولی برای لایه های ذاتی با ضخامت بیشتر از  $100 \text{ nm}$  با افت اندک ولتاژ مدار باز روبرو هستیم. در نهایت با ترسیم نمودارهای ضریب پر شدگی FF و بازدهی سلول خورشیدی مشاهده می شود که به صورت کلی بازدهی افزایش یافته و برای ضخامت های بالای لایه ذاتی به مقدار ثابتی می رسد. اما با توجه به افت نسبی ضریب پر شدگی در ضخامت های بالای لایه بافر، بهینه



شکل ۸. منحنی ولتاژ-جریان سلول خورشیدی تک اتصاله در حالت‌های بدون لایه ذاتی و با لایه ذاتی GaP به ضخامت بهینه.

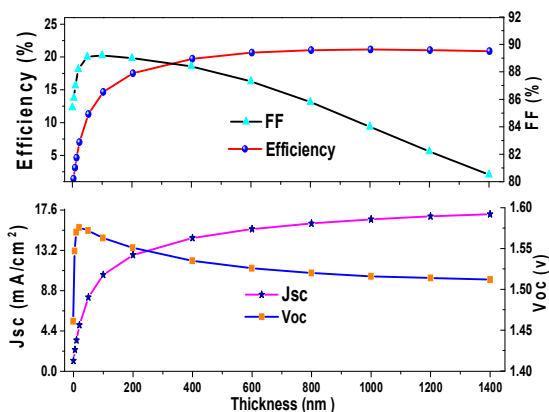
### بررسی نمودار ساختار نوار انرژی

در شکل ۹ نوارهای انرژی سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده بدون در نظر گرفتن لایه ذاتی و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب برای حالت‌های با حضور لایه ذاتی به ضخامت ۵ nm و یک میکرومتر ترسیم شده است. لبه نوارهای ظرفیت و رسانش نسبت به تراز خلأ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که در حضور لایه ذاتی GaP لبه نوار رسانش و ظرفیت یک خمیدگی به سمت بالا پیدا می‌کنند. این امر باعث تسهیل در حرکت حامل‌ها و جدایش بهتر حامل‌ها در فصل مشترک و در نتیجه باعث افزایش بازدهی می‌شود.



شکل ۹. ساختار نوار انرژی سلول خورشیدی بدون لایه ذاتی.

ضخامت برای لایه ذاتی را برابر ۱۰۰۰ نانومتر در نظر گرفته شد. تاکنون بهترین نتیجه گزارش شده برای یک سلول خورشیدی با ساختار مشابه و با لایه ذاتی سیلیکون آمورف به مقدار  $17.66 \text{ eV}$  بوده است که در مقایسه نتایج با استفاده از گالیوم فسفات بهبود قابل توجهی یافته است [۲۰].

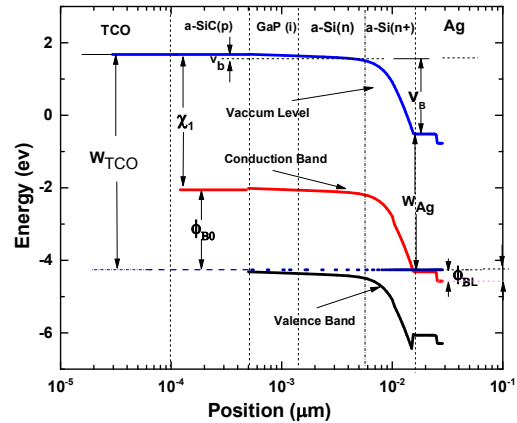


شکل ۷. بررسی اثر ضخامت لایه ذاتی GaP در سلول خورشیدی.

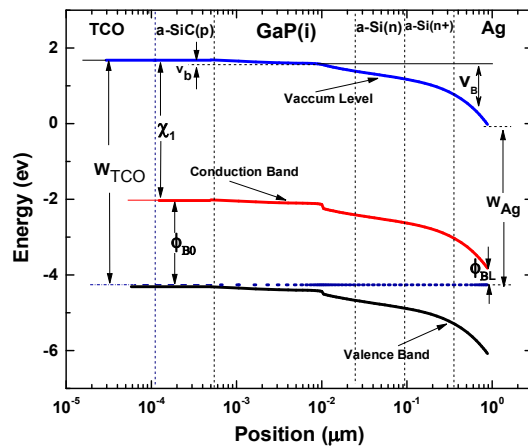
همچنین منحنی چگالی جریان-ولتاژ برای حالت‌های بدون لایه ذاتی و با در نظر گرفتن بهینه پارامترها در شکل ۸ ترسیم شده است. با توجه به شکل ۸ تأثیر عمده حضور لایه بافر ذاتی در افزایش چشمگیر جریان اتصال کوتاه سلول می‌باشد. حضور این لایه باعث افزایش نسبی ولتاژ مدار باز نیز شده است، اما عمده‌ترین تأثیر آن افزایش جریان اتصال کوتاه مدار می‌باشد. نمودار نوار انرژی سلول ترسیم شد تا نحوه حرکت حامل‌های تولید شده درون ساختار سلول و استخراج آنها از الکترود بالایی و پایینی سلول خورشیدی بررسی شود.

## بررسی منحنی بازدهی کوانتومی برای حالت‌های مختلف

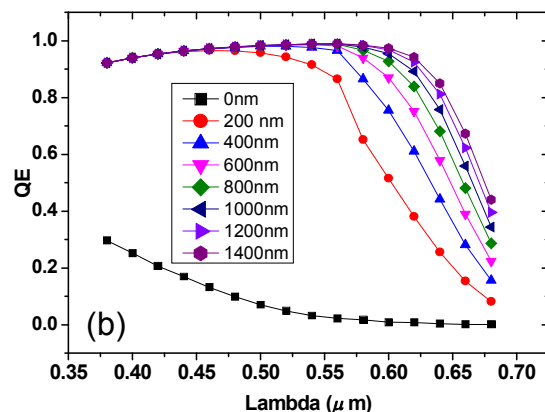
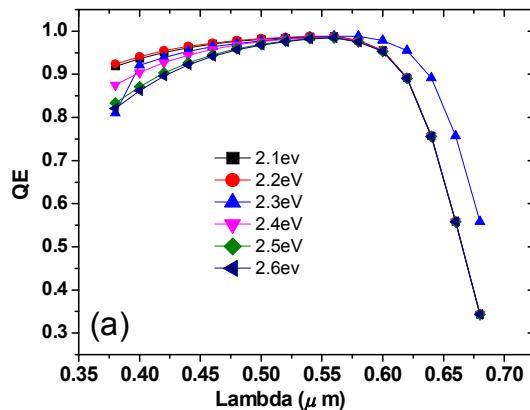
در انتها برای بررسی پاسخ طیفی سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده و بررسی اثر پارامترهای مختلف، نمودارهای بازده کوانتومی ترسیم شد. در شکل ۱۲ منحنی‌های بازده کوانتومی با تغییر گاف نواری آمیتر و ضخامت لایه ذاتی گالیوم فسفات برحسب طول‌موج‌های فرودی رسم شده است. منحنی‌های رسم شده نشان‌دهنده پاسخ طیفی مناسب سلول در بازه ۳۷۰-۷۰۰ نانومتر می‌باشد که منطبق بر ناحیه مرئی است. از شکل ۱۲ (a) مشاهده می‌شود که بیشترین بازدهی برای گاف نواری لایه آمیتر با اندازه ۲٫۳ eV به دست می‌آید که منطبق بر بیشترین بازدهی است. تغییرات گاف نواری لایه کربید سیلیکون در پاسخ طول موج‌های بلند سلول تأثیر عمده نشان می‌دهد. شکل ۱۲ (b) نشان می‌دهد که با افزودن لایه ذاتی GaP، بازده کوانتومی افزایش چشمگیری داشته است و افزایش جریان اتصال کوتاه سلول در پاسخ کل طیف تأثیر گذاشته است.



شکل ۱۰. ساختار نوار انرژی برای سلول با لایه ذاتی GaP با ضخامت ۵ nm.



شکل ۱۱. ساختار نوار انرژی برای سلول با لایه ذاتی GaP با ضخامت ۱۰۰۰ nm.



شکل ۱۲. بررسی بازده کوانتومی در سلول خورشیدی تک اتصاله شبیه‌سازی شده با تغییرات (a) گاف نواری آمیتر، (b) ضخامت لایه ذاتی GaP.



*Photovoltaic Solar Energy Conference*, Milan, Italy, 3–7 September (2007).

[4] L. Zhao, H.L. Li, C.L. Zhou, H.W. Dao, W.J. Wang; Optimized resistivity of p-type Si substrate for HIT solar cell with Al back surface field by computer simulation, *Solar Energy* **83** (2009) 812-816.

[5] Y. Liu, Y. Sun, W. Liua, J. Yao, Novel high-efficiency crystalline-silicon-based compound heterojunction solar cells: HCT (heterojunction with compound thin-layer), *Physical Chemistry Chemical Physics* **16** (2014) 15400-15410.

[6] S. Qing-Yi, C. A-Qing, Z. Kai-Gui, Z. Juan, Numerical Simulation of a P<sup>+</sup> a-SiC:H/N<sup>+</sup> Poly-Si Solar Cell with High Efficiency and Fill Factor, *Chinese Physics Letters* **29** (2012) 087302.

[7] C. Walder, M. Kellermann, E. Wendler, J. Rensberg, K. von Maydell, C. Agert, Comparison of silicon oxide and silicon carbide absorber materials in silicon thin-film solar cells, *European Physical Journal Photovoltaics* **6** (2015) 65302.

[8] M. Burgelman, J. Verschraegen, S. Degrave, P. Nollet, Modeling thin film PV devices, *Progress in Photovoltaics, Research and Applications* **12** (2004) 143-153.

[9] S.J. Fonash, A manual for One-Dimensional Device Simulation Program for the Analysis of Microelectronic and Photonic Structures (AMPS-1D), (The Center for Nanotechnology Education and Utilization, The Pennsylvania State University).

[10] M. Barrera, F. Rubinelli, I. Rey-Stolle, J. Pla, Numerical simulation of Ge solar cells using D-AMPS-1D code, *Physica B* **407** (2012) 3282–3284.

[11] A. Eray, G. Nobile, AMPS-1D Modeling of a-Si:H n<sup>+</sup>-i-n<sup>+</sup> Structure: The Validity of Space Charge Limited Current Analysis, *TURKISH JOURNAL OF PHYSICS* **28** (2004) 31 - 39.

[12] L. Zhao, C.L. Zhou, H.L. Li, H.W. Diao, W.J. Wang, Design optimization of bifacial HIT solar cells on p-type silicon substrates by simulation, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **92** (2008) 673–681.

[13] J.M. Olson, D.J. Friendman, S. Kurtz; *Handbook of photovoltaic Science and Engineering*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, (2003).

[14] J.S. Fonash, *Solar Cell Device Physics*, Second Edition, USA, Elsevier Inc., (2010).

## نتیجه‌گیری

با شبیه‌سازی یک سلول خورشیدی ناهمگون با ساختار TCO/ a-SiC (P)/ GaP (i)/ a-Si (n)/a-Si (n+)/metal نقش پارامترهای مختلف در عملکرد سلول بررسی شد. طبق نتایج به‌دست آمده با استفاده از یک لایه شفاف رسانا با تابع کار بالا به‌عنوان الکتروود بالایی و یک فلز با ضریب بازتاب بالا، مانند نقره، به‌عنوان الکتروود پایینی به سلولی با بازدهی بالاتر و عملکرد بهتر رسیدیم. بهینه مقدار چگالی حامل‌ها برای لایه‌های کریید سیلیکون نوع p و سیلیکون آمورف نوع n محاسبه شد. از نتایج شبیه‌سازی گاف انرژی کریید سیلیکون بهترین بازدهی و کارایی سلول خورشیدی برای لایه‌ای با گاف ۲٫۳ eV به‌دست آمد. در نهایت بیشینه بازدهی به‌دست آمده ۲۱٫۱۳ درصد و برای لایه ذاتی با ضخامت ۱ میکرومتر می‌باشد که با توجه به اینکه تاکنون از لایه ذاتی گالیوم فسفات در چنین ساختاری استفاده نشده است، نسبت به ساختار مشابه با سیلیکون آمورف نتایج بهتری به‌دست می‌آید.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان از پروفسور فوناش (S.J. Fonash) از دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا به‌جهت در اختیار قرار دادن نرم‌افزار تشکر می‌کنند.

## مرجع‌ها

[1] N. Hernandez-Como, A. Morales-Acevedo, Simulation of hetero-junction silicon solar cells with AMPS-1D, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **94** (2010) 62–67.

[2] A. Bensmain, H. Tayoub, B. Zebntout, Z. Benamara, Investigation of Performance Silicon Heterojunction Solar Cells Using a-Si: H or a-SiC: H at Emitter Layer Through AMPS-1D Simulations, *Sensors & Transducers*, **27** (2014) 82-86.

[3] S. Taira, Y. Yoshimine, T. Baba, M. Taguchi, H. Kanno, T. Kinoshita, H. Sakata, E. Maruyama, M. Tanaka, Our approaches for achieving HIT solar cells with more than 23% efficiency, *Proceedings of the 22nd European*

[15] C. Song, H. Chen, Y. Fan, J. Luo, X. Guo, X. Liu, High-Work-Function Transparent Conductive Oxides with Multilayer Films, *Applied Physics Express* **5** (2012) 041102.

[16] S.L. Sheng, *Semiconductor Physical Electronics*, First Edition, Plenum Press, (1993).

[17] P. Prunici, F.U. Hamelmann, W. Beyer, H. Kurz, H. Stiebig, Modeling of infrared optical constants for polycrystalline low pressure chemical vapour deposition ZnO:B films, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* **113** (2013) 123104.

[18] *CRC Handbook of Chemistry and Physics* version (2008).

[19] <http://refractiveindex.info/>

[20] M.I. Kabir, N. Amin, A. Zahrim, K. Sopian, Proceedings of the 8th WSEAS Int. Conf. on NON-LINEAR ANALYSIS, NON-LINEAR SYSTEMS AND CHAOS, (2010) 334- 337.

# Improving the heterojunction silicon solar cell efficiency by using GaP intrinsic layer

Nafiseh Memarian\*, Mir Kazem Omrani, Mehran Minbashi

Faculty of Physics, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 04.06.2016    Final revised: 11.04.2017    Accepted: 24.04.2017

## Abstract

In this article, the operations of heterojunction silicon solar cells were investigated theoretically. The studied structure is TCO/ a-SiC (P)/ GaP (i)/ a-Si (n)/ a-Si (n<sup>+</sup>)/ metal. In this study instead of using conventional structure, which uses an amorphous intrinsic layer, a GaP (Gallium Phosphate) layer is used as intrinsic buffer layer. Different models of this solar cell structure were simulated. The effect of various parameters such as work functions of front and back contacts, emitter and n-type amorous silicon layer carrier densities, emitter band gap, GaP buffer layer thickness, current- voltage curves and quantum efficiency has been studied. The optimum values for above mentioned quantities are presented based on the study results. Moreover, the band structure of different cases is plotted. The results show that using a GaP intrinsic layer with 2.26 eV band gap and 1 micrometer thick, leads to the highest efficiency around 21.13% with Voc=1.52 V, Jsc=16.58 mA.cm<sup>-2</sup> and FF= 84 %.

**Keywords:** Silicon solar cell; band gap energy optimization; intrinsic layer; quantum efficiency

---

\* Corresponding Author: n.memarian@semnan.ac.ir