

طراحی سلول خورشیدی پیوند شاتکی مبتنی بر گرافن با استفاده از نانو ذرات نقره

یونس شیخی^۱، کریم عباسیان^۲ و رضا یدی پور^۲

^۱ کارشناس ارشد مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه تبریز، younes.sheikhi@yahoo.com

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، k_abbasian@tabrizu.ac.ir

چکیده - سلول‌های فتوولتاییک، با بازده تبدیل انرژی بالا و با قیمت تمام شده‌ی ارزان، گزینه‌ای مناسب برای تولید انرژی پاک هستند. از سوی دیگر، گرافن بعنوان اولین ماده دو بعدی فوق‌العاده، با ویژگی‌های الکتریکی، نوری و مکانیکی منحصر بفرد، یک موضوع داغ پژوهشی علم مواد در چند سال اخیر است. از این رو، بسیاری از زمینه‌های پژوهشی دنیای افزاره‌های انرژی الکتروشمیایی را تحت تاثیر قرار داده است. همچنین ساخت سلول‌های خورشیدی مبتنی بر پیوند شاتکی گرافن-سیلیکون بعلاوه فراوانی C و Si، با ساختار ساده و فرآیند تولید نه چندان پیچیده، ارزان خواهد بود. مطابق بررسی آثار، در راستای بهبود عملکرد چنین افزاره‌ای با استفاده از تاثیر پراکندگی ناشی از نانو ذرات Ag و افزایش جذب نور بر خوردی، جریان الکتریکی با کاهش ارتفاع سد کنتاکت بهبود یافته است. در ساختار پیشنهادی، کارایی ضعیف نانو ذرات Ag در طول موج‌های کوتاه بوسیله نشانندن لایه‌ای نازک از Si بر روی لایه ذرات Ag بهبود یافته است. مشخصات نهایی بدست آمده با $PCE=9.06\%$ برای سلول مرجع و $PCE=12.7\%$ برای سلول پیشنهادی، نمایانگر افزایش ۴۰٪ در بازده تبدیل توان برای این سلول می‌باشد.

کلید واژه- سلول خورشیدی پلاسمونیک، گرافن-سیلیکون، نانو ذرات فلزی، پراکندگی نور خورشید.

جذب افزایش یابد.

سلول خورشیدی فیلم نازکی^۲ که مورد مطالعه قرار گرفته است، دارای ساختار پیوند شاتکی مبتنی بر گرافن^۱ بوده و Si و C (گرافن) به عنوان مواد فراوان در لایه‌های فعال استفاده شده‌اند. برای ساخت افزاره‌ای بهتر و متمایز، تلاش شده تا با ارائه ساختاری جدید، بازده و دیگر مشخصات این افزاره‌ها، از جمله جریان و ولتاژ خروجی افزایش یابند.

۱-۱- مدل‌سازی سلول خورشیدی پیشنهادی

گرافن با یک ساختار کریستالی دو بعدی، شکل یافته از شش ضلعی‌های پی‌درپی، یک زمینه انقلابی در پژوهش‌ها و آزمایش‌های مربوط به افزاره‌های الکترونیکی و فوتونیک است. ویژگی‌های تحسین برانگیزش همچون شکاف انرژی صفر [۲]، قابلیت تحرک بسیار زیاد حامل در دمای اتاق ($\sim 20000 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)، شفافیت نوری بالا (تنها ۲٪ از نور برخوردی در گستره طول موج از مادون قرمز تا بنفش جذب می‌شود)، پایداری بالای شیمیایی/حرارتی، بالاترین ضریب

۱- مقدمه

در حال حاضر تلاش‌های بسیاری در زمینه انرژی، به سامانه‌های مقرون به صرفه جهت تبدیل و ذخیره سازی انرژی و اهمیت محیط زیست اختصاص یافته است [۱]. برای افزایش سهم انرژی خورشیدی از مصرف جهانی انرژی و کاهش تقاضای انرژی‌های فسیلی، سلول‌های خورشیدی کارآمد و مقرون به صرفه بسیار مهم هستند [۱۸]. نوع و مقدار مواد مصرفی و تکنولوژی‌های به کار رفته در ساخت، از مهمترین فاکتورهای موثر در تولید سلول‌های خورشیدی مقرون به صرفه می‌باشند. طبیعت شکاف انرژی غیرمستقیم Si، به عنوان ضعف بنیادی این ماده، باعث کاهش قابل ملاحظه جذب نوری می‌شود. با این حال، این ضعف را می‌توان با روش‌های مختلفی که باعث افزایش جذب نور در سطح یا تاثیر پراکندگی نور در زیر سطح حجیم می‌شوند، اصلاح کرد. در این مقاله از تاثیرات پراکندگی ناشی از نانو ذرات فلزی در c-Si استفاده شده است. پدیده پراکندگی^۱ در بالک باعث می‌شود نور در داخل ویفر مسیر نوری طولانی‌تری را طی کرده و احتمال

^۲ Graphene based Schottky junction

^۱ Scattering

^۲ Thin film solar cell

$$E_F(n) = \hbar|v_F|\sqrt{n\pi} \quad (1)$$

پس افزایش n_h به خاطر طبیعت پذیرندگی پلیمر TFSA منتج به افزایش $E_{Fgraphene}$ و افزایش $W_{graphene}$ به مقدار تقریبی 0.7eV می شود [۹].

ضریب جذب با ابعاد حجیم مهمترین پارامتر تعیین جذب نوری مواد است. هنگام انتشار موج الکترومغناطیسی درون ماده، جذب فوتون‌ها را می توان با تعریف ضریب شدت جذب، α ، و از طریق رابطه زیر مشخص کرد.

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

که در آن، I_0 شدت نور برخوردی و $I(x)$ شدت نور منتشر شده در ماده پس از طی فاصله x است. و α ثابت افت شدت، با بردار موج k مطابق معادله زیر مرتبط است [۱۰].

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3)$$

که در آن λ طول موج میدان منتشره است. می توان استنباط کرد که ماده حجیم، با فوتون‌های دارای انرژی‌های متفاوت برهم کنش متفاوتی را نشان می دهد. برای افزایش مقدار فوتون‌های جذب شده حتی در طول موج‌های بالاتر (حد پایین مادون قرمز)، یا باید ماده را مهندسی کرد یا ساختاری جهت جداسازی بیشتر جفت الکترون-حفره‌های تولید شده، معرفی کرد.

یک اثر فیزیکی شناسایی شده که به نانو ذرات نقره با تلفات کم اجازه می دهد شرایط را برای بهبود زیاد جذب نور و انرژی از دست رفته، در ناحیه حد پایین مادون قرمز، مهیا سازد [۱۱]. پرتو نور برخوردی در گستره طول موج تشدید ذرات می تواند به شدت پراکنده یا جذب شود، که به اندازه این ذرات وابسته است. بدین معنا که میدان الکترومغناطیسی (بازتابیده به مسیر دیگر یا تبدیل شده به فوتون‌های کم انرژی)، شانس جذب فوتون‌های کم انرژی و پر انرژی را بصورت هم زمان فراهم می کند. مطابق معادله زیر، نرخ انرژی از دست رفته ذرات به صورت مجموع نرخ‌های جذب و پراکندگی تعریف شده است.

$$W_{ext} = W_a + W_s \quad (4)$$

که سطح مقطع‌های تقریبی جذب و پراکندگی C_a و C_s ذرات به صورت زیر ارائه شده است [۱۱].

$$C_a = \frac{W_a}{I_i} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}[\alpha] \quad (5)$$

$$C_s = \frac{W_s}{I_i} = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 |\alpha|^2 \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{3\epsilon_0 \epsilon_h f}{N} \frac{\epsilon_1 - \epsilon_h}{\epsilon_1 - 2\epsilon_h} \quad (7)$$

که در آن، ذره‌ای کروی و کوچکتر از طول موج کاری، مدفون در ماده، فرض شده است که ضرایب گذردهی مربوطه به ترتیب ϵ_1 و ϵ_h می باشند. عبارت α به عنوان قطبش میکروسکوپی حاصل از ذرات تعریف شده است، (f/N) حجم اشغال شده توسط ذره در سلول شبکه،

یانگ و به ویژه انعطاف پذیری زیاد و هزینه پایین، گرافن را به انتخاب و جایگزینی مناسب برای مواد قبلی (همچون ITO) در افزاره‌های حال و آینده مبدل می سازد [۳]. ماده بسیار باکیفیت ITO علی‌رغم گران بودن از شکنندگی، حساسیت به اسیدها و فرآیند ساخت، رنج می برد [۱].

مطابق دانش ما، هرچه انحنا ساختار باند انرژی بیشتر باشد نوید بخش جرم موثر کمتر و ضریب تحرک بیشتر برای همه الکترون‌ها و حفره‌های این ماده می باشد. از سوی دیگر، یکی از ویژگی‌های متمایز گرافن رابطه خطی انرژی الکترون و حفره با بردار موج متناظرشان در نزدیکی رئوس بریلیون زون شش ضلعی است، یعنی حامل‌های آن همانند فوتون رفتار می کنند [۵، ۱۹]. گرافن به عنوان یک طرف پیوند شاتکی باید ارتفاع سد پیوند را فراهم سازد که از طریق دوپینگ امکان اصلاح تابع کار گرافن و مهندسی ارتفاع سد وجود دارد.

برای کاهش مقاومت شیت گرافن با تنظیم تابع کار در راستای ایجاد ارتفاع سد شاتکی مناسب، روش‌های مختلفی همچون تزریق اتم‌های بورون و نیتروژن [۵]، اثر میدان الکتریکی [۶] و دوپینگ شیمیایی [۷] ارائه شده است. طبق بررسی‌های به عمل آمده، آخرین مورد آسان، موثر و ارزان‌ترین روش است که به راحتی می تواند طی فرآیندهای لایه نشانی دورانی یا غوطه‌وری محقق شود. به علت دو بعدی بودن گرافن، مولکول‌های جذب شده بر سطح آن براحتی تمام ویژگی‌های مادی گرافن را تحت تاثیر قرار می دهد [۴].

در حالیکه تزریق متداول نوع p AuCl_3 ، دارای عیب‌هایی همچون تشکیل توده‌های Au ، ضعف در گذردهی نوری و هزینه بالا، می باشد [۸]. از طرف دیگر، TFSA می تواند به روشی مشابه با برتری‌هایی مانند توانایی جذب موثر الکترون، گذر دهی نوری بالا، پایداری و عدم ایجاد تغییر در سطح صاف و صیقلی میزبان، رسانایی را بهبود بخشد [۹]. با دوپینگ TFSA، مقاومت شیت نمونه کاهش و تابع کار افزایش یافته، در حالی که گذردهی گرافن به ازای اضافه نمودن هر لایه حدوداً $2/3 - 2/2$ کاهش می یابد. از سوی دیگر، مقاومت شیت، با افزایش غلظت TFSA تا 15 mM ، به میزان 65% کاهش می یابد. لذا بعنوان نمونه، برای گرافن 5 لایه مقاومت شیت $90 \Omega/\text{sq}$ می باشد و افزایش بیشتر غلظت TFSA روی آن تاثیری ندارد. تابع کار گرافن ذاتی و گرافن تزریق شده با غلظت 15 mM به ترتیب 4 eV و $5/1 \text{ eV}$ می باشد [۷].

با استفاده از مدل درود برای رسانایی گرافن، می توان نتیجه گرفت که افزایش چگالی حامل باعث کاهش ضریب تحرک حامل می شود. بعلاوه، چون تراز انرژی فرمی گرافن مطابق معادله زیر تغییر می کند.

بنابراین، از مزایای نانو ذرات Ag استفاده و ساختار جذب را مانند یک واسط چند لایه مهندسی کرده و نقاط ضعف را به حداقل رسانده ایم. در مورد یک کنتاکت شاتکی، منظور از سد یعنی اختلاف انرژی بین فلز و ماده فوتوکتیو در طرف دیگر پیوند، که باید برای بهینه سازی انتقال بار الکتریکی کاهش یابد. ارتفاع سد می‌تواند با استفاده از روش‌هایی همچون دوپینگ شدید، نفوذ دادن ذرات فلزی و یا میله‌های فلزی در پیوندگاه فلز - نیمه‌هادی محقق شود.

فاکتور اصلی در ایجاد سد، در پیوندگاه فلز - نیمه‌هادی، عدم تطابق تابع کار (Wf) و الکترون پذیری نیمه‌هادی (χ) است. ارتفاع سد با رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\phi_{SBH} = Wf_m - \chi_{semi} \quad (9)$$

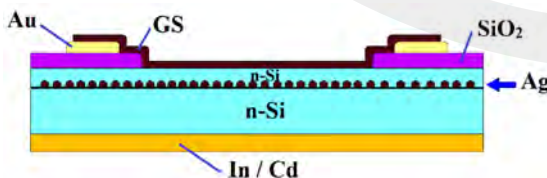
که در مورد ساختار کریستالی ساده، $\chi(\text{Si}) \approx 4.05 \text{ eV}$ است. برای ساخت کنتاکت اهمی معمولاً از Al و Ag و همچنین دیگر فلزات و شبه فلزات استفاده می‌شود. بنابراین، با جایگزین سازی آنها با فلزاتی که دارای $Wf \approx 4.05 \text{ eV}$ باشند و با لحاظ کردن فراوانی و ارزان بودن مواد، می‌توان به این هدف نائل شد.

پس از بررسی توابع کار برای مواد مختلف، ایندیوم (In) و کادمیوم (Cd) به ترتیب با $Wf \approx 4.09 \pm 0.01 \text{ eV}$ و $Wf \approx 4.08 \pm 0.02 \text{ eV}$ انتخاب شدند. ارتفاع سد در حدود 0.105 eV محاسبه شده که در مقایسه با مواد سنتی همچون Al و Ag به ترتیب با توابع کار $Wf \approx 4.24 \pm 0.02 \text{ eV}$ و $Wf \approx 4.74 \text{ eV}$ ، به قدر کافی کوچک است [۱۵]. در کل، مهمترین پارامترهای توصیف‌گر عملکرد سلول‌های خورشیدی، فاکتور پرشدگی (FF) و راندمان تبدیل توان است که این مقاله به بررسی و طراحی ساختاری بهینه بر اساس این پارامترها متمرکز شده است.

راندمان تبدیل توان با نماد PCE یا η توسط رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_s} \quad (10)$$

که در آن، به ترتیب FF و Ps، فاکتور پرشدگی سلول خورشیدی و توان تابشی جاری بر سطح سلول می‌باشند.



شکل ۱: ساختار جدید سلول خورشیدی پیوند شاتکی مبتنی بر گرافن

و ϵ_0 گذردهی الکتریکی خلا هستند [۱۱].

همان طور که می‌دانیم نرخ پراکندگی و جذب به اندازه ذرات بستگی دارد. ذرات فلزی خیلی کوچکتر از طول موج نور تمایل به جذب بیشتری دارند؛ و از این رو در این ذرات، جذب بیشتر از انرژی تلفاتی است. اگر اندازه ذرات افزایش یابد، پراکندگی بر انرژی از دست رفته غالب خواهد شد؛ و می‌توان از فواید این ویژگی در این مورد بهره‌مند شد.

راندمان پراکندگی Q_{rad} ذره به صورت زیر قابل تعریف است.

$$Q_{rad} = C_s / (C_s + C_a) \quad (8)$$

برای کوپل موثر فوتون‌های پراکنده به طیف جذب ماده، باید Q_{rad} تا جای ممکن به عدد صفر نزدیک باشد که جزئی از انرژی از دست رفته را نشان می‌دهد؛ که بازتابیده شده است. در آزمایشات، Q_{rad} برای سه ماده قابل توجه ارائه شده است، که در بین آنها Ag برتری متمایز خود را نسبت به Au و Cu نشان می‌دهد. این ماده در طیف نوری، نسبت به سایرین، اتلاف کمتری دارد. معمولاً ذرات بزرگتر می‌توانند قطبیت بیشتری ایجاد کنند، که منتج به نرخ تابش بیشتری می‌شود. این در حالی است که اندازه ذرات نمی‌تواند بدون محدودیت افزایش یابد. برای تامین شرایط غلبه پراکندگی و همچنین الزامات مدل‌سازی الکترواستاتیک که در بالا ذکر شد، باید در مورد انتخاب اندازه ذرات فلز، ارزیابی مناسب کرد. معمولاً اندازه ذرات فلز استفاده شده کوچکتر از طول موج نوری است [۱۱].

۲-۱- ساختار پیشنهادی سلول خورشیدی

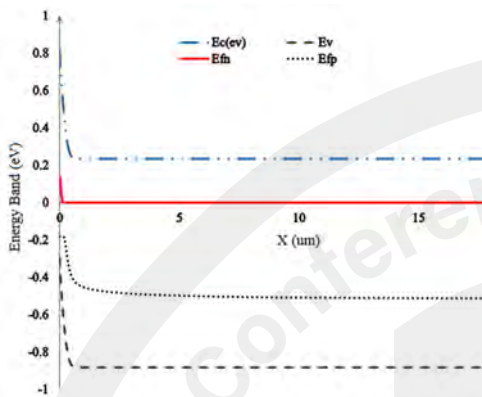
در سلول خورشیدی پیوند شاتکی، مبتنی بر گرافن با سطح ناخالصی مناسب TFSA، ارتفاع سد شاتکی (SBH) و رسانایی الکتروود توسط میاوو و همکارانش بهینه شده بود [۱۲]. اما، نرخ جذب پایین فوتون در Si و کنتاکت اهمی تاثیر بزرگی بر عملکرد این افزاره دارد. در ساختار پیشنهادی، لایه‌ای نازک از نانو ذرات Ag بر سطح Si لایه-نشانی شده تا نور را در داخل ماده حجیم پراکنده ساخته و عملکرد سلول خورشیدی را بهبود بخشد.

اثر پراکندگی نانو ذرات باعث افزایش جریان نوری در تمامی طول موج‌های بزرگتر از ۵۰۰ نانومتر می‌شود. با این وجود، در طول موج‌هایی در نزدیکی ۳۵۰ نانومتر، یعنی مهمترین بخش جذب فوتون در Si، جریان نوری کاهش می‌یابد [۱۳].

مطابق شکل ۱، برای حل مشکل کاهش جریان نوری لایه‌ای نازک از Si بر روی لایه نانو ذرات Ag نشانده شده است. طبق ضرایب جذب مرجع [۱۴]، فوتون‌های پر انرژی در لایه‌های اولیه شبکه جذب خواهند شد و بقیه به عمق منتشر خواهند شد تا بتوانند جذب شوند؛ و در این قسمت توسط ذرات Ag به داخل بالک پراکنده خواهند شد.

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی و مباحثه

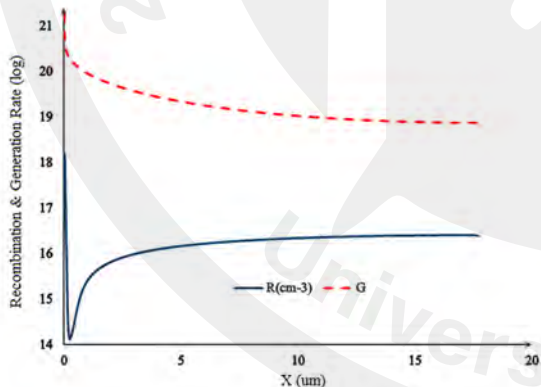
عدم تعادل عمل می‌کند. پس چنان‌که در شکل ۳ دیده می‌شود، در سلول، ترازهای شبه-فرمی متفاوتی برای الکترون‌ها و حفره‌ها دیده می‌شود.



شکل ۳: لبه باند هدایت و ظرفیت، ترازهای شبه-فرمی الکترون و حفره‌ها به ترتیب با E_c ، E_v ، E_{fn} و E_{fp} نسبت به میزان عمق از الکتروود پیشانی سلول خورشیدی

می‌توان مشاهده کرد که لبه‌های باند انرژی و همچنین ترازهای شبه-فرمی، در همسایگی پیوند شاتکی در سمت نیمه‌هادی، جایی که الکترون‌ها تخلیه و حفره‌ها انباشته شده‌اند، به سمت بالا خم می‌شوند. نوع نیمه‌هادی نه تنها از نوع n به نوع ذاتی تغییر می‌کند بلکه تحت تابش شدید خورشیدی می‌تواند به نوع p تغییر یابد.

شکل ۴ نرخ تولید و باز ترکیب جفت الکترون-حفره‌ها را در سلول خورشیدی تحت تابش خورشیدی، نشان می‌دهد.

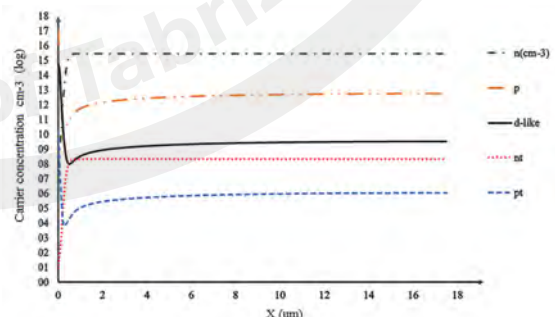


شکل ۴: نرخ تولید و باز ترکیب جفت‌های الکترون-حفره در سلول خورشیدی

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در سراسر نیمه‌هادی، تولید و باز ترکیب جفت‌های الکترون-حفره رخ می‌دهد. اما، در همسایگی پیوند در مقایسه با ناحیه خنثی نیمه‌هادی تفاوت قابل ملاحظه‌ای خواهد بود. مطابق شکل ۴ در سراسر افزاره فرآیند تولید غالب بر باز ترکیب است. پس منتج به جاری شدن حامل‌های بار به سوی کنتاکت‌ها می‌شود، که نشانگر طبیعت تبدیل توان نوری

برای شبیه‌سازی افزاره، از نرم‌افزار wxAMPS استفاده شده است [۱۶-۱۷]. در فرآیند شبیه‌سازی، دقت نتایج بدست آمده، طی مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، بررسی و ارزیابی شده‌اند. سپس، مسائل و مشکلات عملی که می‌توانند در ویژگی‌های فیزیکی، نوری و الکتریکی افزاره تاثیر بگذارند، لحاظ شده‌اند. همچنین ویژگی‌های نوری سیلیکون [۱۴] بروزرسانی شده، که به صحت نتایج بدست آمده با استفاده از ضرایب جذب جدید اطمینان بخشید. چنان‌که می‌دانیم نقصان‌ها، دوپینگ‌ها و ناخالصی‌های تزریق شده در پیوندگاه‌ها و لایه‌های افزاره می‌توانند همچون فاکتوری محدود ساز یا عاملی مخرب در عملکرد نوری و الکتریکی افزاره تاثیر بگذارند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در wxAMPS، تاثیرات نقصان‌ها و ناخالصی‌ها با چگالی حامل‌های مربوطه بیان شده است.

شکل ۲ موارد زیر را نشان می‌دهد؛ حامل‌های تولید شده در ساختار سلول خورشیدی در ترازهای انرژی طبیعی (ذاتی) c -Si، ترازهای انرژی وابسته به ناخالصی‌های فسفور بخشنده و ترازهای انرژی وابسته به نقصان‌های تله کننده حامل، که بصورت ترازهای انرژی بخشنده و پذیرنده عمل می‌کنند. در مجاورت پیوند گرافن، حامل‌ها تخلیه یا جمع شده‌اند. در حالی که در نواحی دور از پیوندگاه، پراکندگی یکنواخت حامل‌ها مشهود است، زیرا با تشکیل و برقراری پیوند شاتکی، میدان الکتریکی داخلی روی پیوند ایجاد می‌شود؛ که موجب ایجاد سدی باریک و محدود است. میدان الکتریکی داخلی تمامی حامل‌ها را از پیوند به سوی فلز و نیمه‌هادی جاروب می‌کند، که حاصل آن ایجاد ناحیه تخلیه است. در نتیجه SBH بزرگتر و محدودیت میدان داخلی بر روی پیوند، به دور از ناحیه تخلیه پراکندگی حامل یکنواخت است.



شکل ۲: چگالی حامل‌های الکترون و حفره آزاد، حامل‌های تولید شده توسط ناخالصی‌های بخشنده و نقصان‌های تله کننده، نسبت به میزان عمق از الکتروود پیشانی سلول خورشیدی

سلول خورشیدی همانند سایر افزاره‌های الکترونیکی در حالت

محدوده گاف انرژی غیر مستقیم سیلیکون، انتخاب شده‌اند. شکل ۲ راندمان PCE به مقدار ۱۲٪ را برای این افزاره نشان می‌دهد، که با مقادیر پارامترهای $V_{oc}=0.60$ V، $I_{sc}=30.7$ mA/cm² و $FF=0.68$ مطابق است؛ و با بیشترین راندمان تبدیل انرژی متمایزی است که تاکنون برای افزاره‌ای با ساختاری مشابه گزارش شده است.

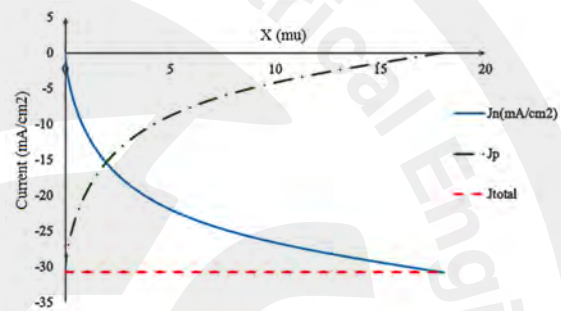
۲- نتیجه‌گیری

گرافن به عنوان یک ماده‌ی دوبعدی جدید، این نوید را می‌دهد که فناوری و پژوهش در زمینه سلول‌های خورشیدی همچون سایر زمینه‌های پژوهشی نانو فناوری و فوتونیک، از طریق مهندسی مواد شاهد بهینه‌سازی‌های قابل ملاحظه‌ای بشود. این ماده نو ظهور، به علت ساختار خلاقانه با مشخصاتی مطلوب برای استفاده در فرایندهای تولید افزاره‌های مقرون به صرفه، توجه پژوهشگران عرصه سلول‌های خورشیدی را به خود جلب کرده است. در این مقاله، ساختاری جدید از سلول خورشیدی پیوند شاتکی مبتنی بر گرافن ارائه شده است؛ که حاوی نانو ذرات نقره در بین زیرلایه و لایه بسیار نازک کریستال سیلیکون، می‌باشد. مقادیر پارامترهای اصلی برای سلول مرجع بدون نانو ذرات نقره $J_{sc}=24.81$ mA/cm²، $V_{oc}=0.577$ V، $FF=0.63$ و $PCE=9.06\%$ و برای ساختار پیشنهادی حاوی نانو ذرات نقره $J_{sc}=30.7$ mA/cm²، $V_{oc}=0.60$ V، $FF=0.68$ و $PCE=12.7\%$ بدست آمده‌اند که مشخصات بهینه‌نهایی نشانگر ۴۰٪ بهبود در راندمان تبدیل انرژی می‌باشد.

مراجع

- [1] Y. Wang, et al., "Interface Engineering of Layer-by-Layer Stacked Graphene Anodes for High-Performance Organic Solar Cells", *Adv. Mater.*, 23, pp.1514-1518, 2011.
- [2] M. Freitag, "Graphene: Nanoelectronics goes flat out", *nature nanotechnology*, 3, pp. 455-457, 2008.
- [3] Z. Yin, et al., "Graphene-Based Materials for Solar Cell Applications", *Advanced Energy Material*, 4, pp. 1300574, 2014.
- [4] A. K. Geim, "Graphene: Status and Prospects", *Science*, 324, pp. 1530-1538, 2009.
- [5] L. S. Panchakarla, et al., "Synthesis, Structure, and Properties of Boron- and Nitrogen-Doped Graphene", *Adv. Mater.*, 21, pp. 4726-4730, 2009.
- [6] Y. J. Yu, et al., "Tuning the graphene work function by electric field effect", *Nano Lett.*, 9, pp. 3430-3434, 2009.
- [7] D. Kim, et al., "Work-Function Engineering of Graphene Anode by Bis(trifluoromethanesulfonyl)amide Doping for Efficient Polymer Light-Emitting Diodes", *Advanced Functional Materials*, 23, pp. 5049-5055, 2013.
- [8] S. M. Kim, et al., "Transparent Organic P-Dopant in Carbon Nanotubes: Bis(trifluoromethanesulfonyl)imide", *ACS Nano*, 4, pp. 6998-7004, 2010.
- [9] S. Tongay, et al., "Stable hole doping of graphene for low electrical resistance and high optical transparency", *Nanotechnology*, 22, pp. 425701-425707, 2011.
- [10] A. Kulkarni, D. Guney, A. Vora, "Optical Absorption in Nano-Structures: Classical and Quantum Models", *ISRN Nanomaterials*, Volume 2013, pp. 1-7, 2013.
- [11] H. R. Stuart, D. G. Hall, "Island size effects in nanoparticle-enhanced

به الکتریکی در سلول خورشیدی است. نرخ تولید و باز ترکیب، به ترتیب به مقادیر حداکثر و حداقل خود در ناحیه تخلیه سلول خورشیدی می‌رسد. چون الکترون-حفره‌های تولید شده توسط فوتون‌ها در این ناحیه، تحت تاثیر میدان الکتریکی بزرگ این ناحیه قرار می‌گیرند؛ که برای جداسازی و تسریع آنها به سمت متناظرشان در پیوند کافی است. خاصیت تخلیه در این ناحیه مانع از باز ترکیب حامل‌ها می‌شود، که با چگالی حامل‌ها و شیب جریان در این ناحیه می‌توان به آن پی برد؛ و منحنی‌های مربوطه به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۵ نشان داده شده است.

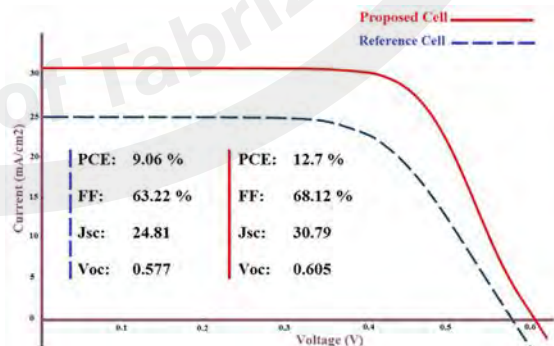


شکل ۵: جریان کل و منفرد حامل‌ها

بهترین نمونه گزارش شده از سلول خورشیدی پیوند شاتکی مبتنی بر گرافن [۱۲] دارای PCE به میزان ۸/۶٪ $AM1.5$ تحت تابش $(I_{sc}=25.3$ mA/cm²، $V_{oc}=0.54$ V، $FF=0.63$) در 100 mW/cm² است.

همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده، افزاره‌ی شبیه سازی شده به راندمان تبدیل توان ۹/۰۶٪ دست یافته است.

ساختار نهایی پیشنهادی، بر پایه لایه‌ای از کریستال سیلیکون به ضخامت ۱۸ میکرومتر تزریق شده با فسفر (ناخالصی نوع n با چگالی 3×10^{15} cm⁻³) و با لایه بسیار نازک پوشاننده‌ی سیلیکون ($10-15$ nm) بر روی نانو ذرات، تشکیل شده است.



شکل ۶: مشخصه I-V ساختار ارائه شده سلول خورشیدی در مقایسه با

آخرین سلول خورشیدی پیوند شاتکی مبتنی بر گرافن

طبق نتایج آزمایشگاهی، نانو ذرات نقره با اندازه ۱۲ نانومتر برای رسیدن به اهدافی همچون بهبود جذب فوتون‌هایی با میزان انرژی در

- photodetectors”, Applied Physics Letters, 73, pp. 3815-3817, 1998.
- [12] X. Miao, et al., “High Efficiency Graphene Solar Cells by Chemical Doping”, Nano letters, 12, 2745-2750, 2012.
- [13] S. Pillai, et al., “Surface plasmon enhanced silicon solar cells”, Journal of Applied Physics, 101, pp. 093105-093113, 2007.
- [14] M.A. Green, “Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients”, Solar Energy Materials & Solar Cells, 92, 1305-1310, 2008.
- [15] J. Hozl, F. K. Schulte, H. Wagner, Solid Surface Physics, Springer, Berlin, pp. 81-95, 1979.
- [16] Y. Liu, D. Heinze, A. Rockett, “A New Solar Cell Simulator: wxAMPS”, in Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE, 002753-002756, 2011.
- [17] Y. Liu, Y. Sun, A. Rockett, “A new simulation software of solar cells-wxAMPS”, Elsevier Solar Energy Materials & Solar Cells, 98, 124-128, 2012.
- [18] K. Abbasian; S. S. Hosseini; H. Soofi, “GaAs p-i-n structure Solar Cell efficiency enhancement with Intermediate Energy Band introducing by InAs Quantum Dots in the intrinsic region”, Tabriz journal of Electrical Engineering, Articles in Press, Available Online from 28 October 2019.
- [19] Malik AbdulRehman, et.al, “Influence of an Al₂O₃ interlayer in a directly grown graphene-silicon Schottky junction solar cell”, Elsevier Carbon, 132, pp. 157-164, 2018.