

بررسی کمی تاثیر نانو تخلخل های سطحی سیلیکون و دما بر چگالی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در سلول های خورشیدی

نسرین صالحی^{۱*}، مجتبی واحدی^۲ و محمد مهدی حسینی^۲

۱- دانشکده علوم پایه، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

۲- دانشکده فنی و مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۵/۲۱

چکیده

در این مقاله به بررسی رفتار دمایی چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) و ولتاژ مدار باز (V_{oc}) (در بازه دمایی $120-25$ °C) در دو نمونه سلول خورشیدی یکی با لایه دارای نانو تخلخل های سطحی سیلیکون و دیگری بدون تخلخل پرداخته شد. نتیجه محاسبات حاکی از آن است که تغییرات دمایی گاف نواری عامل اصلی در توجیه رفتار کاهش ولتاژ مدار باز (در حدود $2/5$ mV/°C) و رفتار افزایشی جریان اتصال کوتاه (در حدود $0/02$ mV/°C) در این نمونه ها به ترتیب ناشی از افزایش جریان اشباع معکوس دیودی، $J_s(T)$ و گسترش جذب طیف خورشید در ناحیه فروسرخ می باشد. همچنین بزرگتر بودن جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز و افزایش بازده در قطعه متخلخل در مقایسه با نمونه بدون تخلخل ناشی از افت بازتابندگی سطحی در نمونه دارای نانو تخلخل های سطحی می باشد. محاسبات نظری ما نشانگر افزایش مقاومت متوالی و کاهش ضریب پرکنندگی قطعه متخلخل نسبت به نمونه عادی است که می تواند ناشی از ساختار هندسی اتصال اهمی و حضور ستون های سیلیکونی در سطح قطعه، در نقش مانع برای حرکت افقی حامل های نوری باشد.

واژه های کلیدی: چگالی جریان اتصال کوتاه، سلول خورشیدی، نانو تخلخل سیلیکون، وابستگی دمایی، ولتاژ مدار باز.

۱- مقدمه

استحصال انرژی خورشیدی استفاده از سلول های خورشیدی می باشد که به منظور تبدیل مستقیم انرژی خورشید به جریان الکتریسته طراحی شده اند. پدیده تولید ولتاژ و جریان با این روش، پدیده فتولتائیک نامیده می شود. در واقع وقتی که نور خورشید به سطح سلول برخورد می کند، فوتون ها توسط اتم های نیمه هادی، الکترون های آزاد لایه منفی، جذب می شوند. این الکترون های آزاد از طریق مدار خارجی مسیر

امروزه با بالا رفتن هزینه سوخت های فسیلی، تجدیدناپذیری آن ها و اثرات زیست محیطی نامطلوب شان، بهره گیری از منابع طبیعی امری اجتناب ناپذیر است. انرژی خورشیدی یکی از مهمترین منابع انرژی پاک است که در طی ۲۰ سال اخیر مورد توجه انسان ها قرار گرفته است. یکی از روش های

* **عهده دار مکاتبات:** نسرین صالحی

نشانی: شاهرود، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، دانشکده علوم پایه

تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۲۸۳، دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۲۸۳، پست الکترونیکی: salehi9002@gmail.com

آن ($I_n + I_p$) صورت گیرد، زوج الکترون-حفره‌های تولید شده تحت تاثیر میدان داخلی در تهی لایه از یکدیگر جدا شده و یک جریان الکتریکی را بوجود می‌آورند. در یک سلول خورشیدی واقعی دو عامل مقاومتی، مقاومت متوالی (R_s) و مقاومت موازی (R_{sh}) بروز می‌کند. با توجه به گزارش یانگ وجود مقاومت موازی تاثیر ناچیزی بر مشخصه عملکردی سلول‌های خورشیدی دارد و در اغلب موارد قابل چشم‌پوشی است، لکن حضور مقاومت‌های متوالی ناشی از عواملی همچون باز ترکیب‌های سطحی و طول مسیر پیمایش حامل‌ها تا پایانه‌های خروجی می‌توانند نقش مهمی بر مشخصه الکتریکی سلول و کاهش بازدهی آن داشته باشند [۱۲]. همچنین در یک سلول خورشیدی پارامترهایی نظیر چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc})، ولتاژ مدار باز (V_{oc}) و ضریب پرکنندگی ($F.F. = V_m I_m / V_{oc} I_{sc}$) در بازدهی داخلی قطعه ($\eta = V_{oc} I_{sc} F.F. / P_{in}$) از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (در رابطه فوق P_{in} شدت تابش نور فرودی بر قطعه است).

رابطه کلی برای جریان خالص عبوری در یک سلول خورشیدی از رابطه زیر حاصل می‌آید [۱۳]:

$$I = I_L - I_S \left[\exp\left(\frac{q(V + R_S I)}{nk_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (1)$$

که در آن I_L جریان نوری، I_S جریان اشباع دیود، q بار الکتریکی الکترون، T دمای مطلق، k_B ثابت بولتزمن و n ضریب ایده‌آلی است. با توجه به کوچکی تاثیر R_{sh} در مشخصه الکتریکی یک سلول فتوولتایی رابطه ۱، را می‌توان به صورت ساده زیر نوشت [۱۴]:

$$I = I_L - I_S \left[\exp\left(\frac{q(V - R_S I)}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

چگالی جریان اتصال کوتاه در یک سلول خورشیدی واقعی از رابطه زیر قابل حصول است [۱۵]:

خود را به سمت لایه مثبت پیدا کرده و در نتیجه جریان الکتریکی از لایه مثبت به منفی جاری می‌شود. فناوری‌های فتوولتائیک تجاری موجود و در حال توسعه را می‌توان در گروه‌های مختلفی مانند سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون کریستالی [۱،۲]، سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون لایه نازک غیر کریستالی (آمورف)، سلول‌های خورشیدی لایه نازک GaAs، سلول‌های خورشیدی پلیمری [۳،۴]، سلول‌های خورشیدی مبتنی بر کریستال‌های مایع [۵،۶]، سلول‌های خورشیدی مبتنی بر نقاط کوانتومی [۷،۸]، سلول‌های خورشیدی ارگانیک [۲] و غیره دسته‌بندی کرد که از لحاظ راندمان جذب نور، راندمان تبدیل انرژی، تکنولوژی ساخت و هزینه‌های تولید باهم متفاوت هستند. از نظر تاریخی Si به علت فراوانی در پوسته زمین و غیرسمی بودن آن نخستین ماده نیم‌رسانایی است که در ساخت قطعات اپتوالکترونیکی، نظیر سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته است، لکن به علت پایین بودن بازدهی آن، تلاش زیادی جهت بالا بردن بهره تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتریکی در این قطعات انجام گرفته است [۹].

سیلیکون متخلخل (Porous Silicon: PS)، که از خوردگی الکتروشیمیایی ویفرهای سیلیکون در محلول هیدروفلوئوریک اسید ساخته می‌شود، از جمله موادی است که به علت خواص اپتوالکترونیکی منحصر بفرد مانند پهن‌شدگی گاف نواری و افت بازتاب سطحی [۱۰]، قابلیت رسانندگی نوری [۱۱] و سادگی تکنولوژی ساخت، برای کاربردهای فتوولتایی بسیار مطلوب است.

۲- فعالیت‌های تجربی

اساس عملکردی برخی سلول‌های خورشیدی مبتنی بر وجود پیوندگاه p-n است. هنگامی که این پیوندگاه تحت تابش نوری با انرژی بزرگتر از گاف نواری نیم‌رسانا قرار گیرد، فوتون‌ها می‌توانند در نیم‌رسانا جذب شوند [۱۲]. هرگاه بخش عمده جذب در ناحیه فعال قطعه، شامل ضخامت تهی لایه (W) به انضمام فاصله طول‌های پخش حامل‌های اقلیتی تا

روابط ۵ و ۶ آمده است [۱۴].

$$n_i(T) = \sqrt{N_c N_v} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (7)$$

N_c چگالی موثر حالت‌ها در نوار رسانش و N_v چگالی موثر حالت‌ها در نوار ظرفیت می‌باشد.

$$E_g(T) = 1.17 - \frac{(4.73 \times 10^{-4})T^2}{(T+636)} \quad (8)$$

هدف ما در این مقاله بررسی کمی تاثیر نانوتخلخل های سطحی لایه سیلیکون بر کاهش مقاومت متوالی در سلول خورشیدی و نیز بررسی کمی تاثیر دما و حضور نانوتخلخل های سطحی بر چگالی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در سلول های خورشیدی سیلیکونی می‌باشد.

به منظور مطالعه تاثیر دما و لایه سیلیکون متخلخل بر بزرگی J_{sc} و V_{oc} ، نمونه‌هایی را که توسط ویتانوف و همکاران [۱۰] گزارش شده‌اند مورد بررسی نظری قرار داده‌ایم. سلول خورشیدی عادی n⁺/p-Si به مساحت ۱ cm² شامل یک لایه n⁺ با آلایش اتم‌های بخشنده p و مقاومت سطحی ۱۳ اهم بر واحد سطح است که بر روی ویفر Si نوع p با آلایش اتم‌های پذیرنده boron، مقاومت ویژه ۸-۱۰ Ωcm و ضخامت ۵۲۵ نانومتر رشد یافته است. نمونه متخلخل PS/n⁺/p-Si دارای ساختاری مشابه بوده لکن در سطح لایه بالایی به روش خوردگی شیمیایی پوسته متخلخلی به ضخامت ۷۲ nm تشکیل شده است.

۳- نتایج و بحث

شکل ۱، مشخصه جریان-ولتاژ نمونه متخلخل را در شرایطی که تحت تابشی با توان فرودی 100P_i=mW.cm⁻² می‌باشد، به صورت داده‌های مربعی و مشخصه جریان-ولتاژ مربوط به سلول خورشیدی کاملاً متناظر، لکن بدون نانوتخلخل های سطحی را با داده‌های مثلثی نشان می‌دهد. از مقایسه این داده‌ها می‌توان دریافت که مقدار I_{sc} در نمونه با سطح متخلخل

$$J_{sc}(T) = q \sum_{\lambda_0}^{\lambda_g} n_0(\lambda) f(\lambda, x) (1 - R) \Delta\lambda \Delta x \quad (3)$$

که در آن $n_0(\lambda)$ شار فوتون‌های فرودی با طول موج λ ، $f(\lambda, x)$ کسر فوتون‌های جذب شده با طول موج λ در مقطع x از سطح نمونه واقع در محدوده Δx و در گستره $\Delta\lambda$ در ناحیه فعال قطعه، $(1 - R_\lambda)$ کسر فوتون‌های بازتاب نشده از سطح نمونه و $\lambda_0 = 400$ nm و $\lambda_g = 1107$ nm به ترتیب حد پایینی و بالایی طول موج‌های قابل جذب در سلول‌های خورشیدی سیلیکونی در دمای اتاق می‌باشند. ولتاژ مدار باز نیز در یک سلول خورشیدی از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۲]:

$$V_{oc}(T) = \frac{nkT}{q} \ln\left(1 + \frac{J_{sc}}{J_s}\right) \quad (4)$$

که در آن n ضریب ایده‌آلی سلول، k ثابت بولتزمن، T دما بر حسب کلونین، q بار الکتریکی الکترون و J_s چگالی جریان اشباع معکوس قطعه می‌باشد. J_s در یک سلول خورشیدی با ساختار p-n، با رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۴]:

$$J_s(T) = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \quad (5)$$

در رابط فوق D_p و D_n به ترتیب پخش ویژه حفره‌ها و الکترون‌ها، p_{n0} چگالی الکترون‌ها در نیم‌رسانای نوع p در تعادل گرمایی و n_{p0} چگالی حفره‌ها در نیم‌رسانای نوع n در شرایط تعادل گرمایی می‌باشد. رابطه فوق برای سلولی با ساختار n⁺-p به شکل رابطه (۴) درمی‌آید [۱۴]:

$$J_s(T) \cong \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \approx n_i^2 \approx \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (6)$$

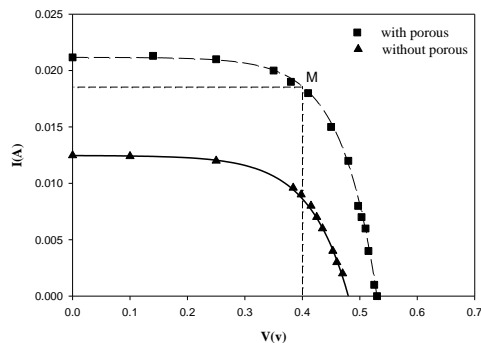
که در آن n_i چگالی حامل‌های ذاتی و E_g گاف نواری نیم‌رسانا می‌باشد. وابستگی دمایی n_i و $E_g(\text{Si})$ به ترتیب در

جدول ۱: پارامترهای محاسبه شده برای نمونه دارای نانوتخلخل‌های سطحی و غیرمتخلخل.

پارامترها	I_m (mA)	V_m (V)	F.F.	η (%)
نمونه غیرمتخلخل	۱۱/۳۵	۰/۳۲	۰/۶۰۷	۳/۶۳
نمونه متخلخل	۱۸/۳۴	۰/۴۰	۰/۶۵۳	۷/۳۳

(۱) نانوتخلخل‌های لایه بالایی n^+ وجود کاواک‌های تشکیل شده می‌تواند سبب افزایش سطح موثر به دام‌اندازی فوتون‌های فرودی و در نتیجه کاهش بازتاب فوتون‌های نوری از سطح شود. (۲) تفاوت در بزرگی گاف نواری: بزرگتر بودن گاف نواری سیلیکون متخلخل (۱/۸ eV) [۱۶] در مقایسه با Si غیرمتخلخل (۱/۱ eV) سبب می‌شود، آستانه انرژی فوتون‌های قابل جذب بالا رفته و فوتون‌هایی که انرژی‌شان در گستره ۱/۱ تا ۱/۸ الکترون ولت هستند می‌توانند در فواصلی نزدیکتر به پیوندگاه جذب شوند. (۳) تفاوت در ضریب جذب: پایین‌تر بودن ضریب جذب Si متخلخل در طول موج ۷۰۰ nm حدود ۲۵ برابر و در طول موج ۴۵۰ nm در حدود ۳ برابر کوچکتر از Si غیرمتخلخل است [۱۷]. همین امر سبب می‌شود که لایه متخلخل همانند یک لایه پنجره‌ای در محدوده نور مرئی خورشید عمل کرده و کسر بزرگتری از فوتون‌ها را به نزدیکی ناحیه فعال برساند. (۴) مقاومت متوالی قطعه: همان‌طور که گفته شد، مقدار R_s می‌تواند بر بزرگی سطح زیر منحنی مشخصه جریان-ولتاژ قطعه تاثیر بگذارد. برای تعیین R_s در این نمونه‌ها از برازش معادله ۲ در داده‌های تجربی وابسته به هر کدام از قطعات استفاده کرده‌ایم. بررسی ما در قطعه متخلخل در محدوده صفر تا ۴ Ω و در نمونه غیرمتخلخل در بازه صفر تا ۸ اهم با توالی ۰/۱ اهم انجام شد. برخی از این نتایج در شکل‌های ۲ (الف) و ۲ (ب) نشان داده شده‌اند. چنانچه پیداست مدل نظری جریان-ولتاژ (معادله ۲) به ازای $R_s=2/5 \Omega$ در نمونه متخلخل و $R_s=5/5 \Omega$ در نمونه غیرمتخلخل دارای بهترین انطباق با داده‌های تجربی و کمترین خطاست. تصویر الصاقی

به میزان ۵۰ درصد نسبت به نمونه دومی افزایش یافته است در حالی که تغییرات ولتاژ مدار باز تنها در حدود ۵ درصد می‌باشد.



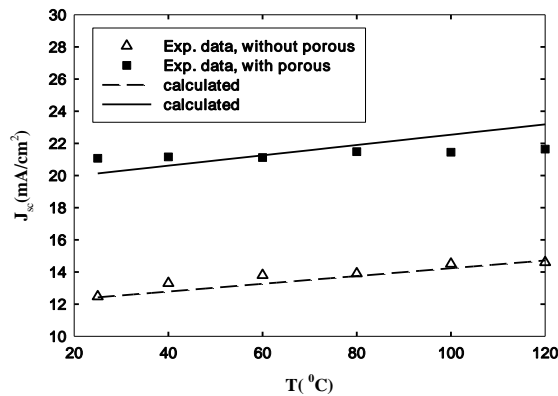
شکل ۱: مشخصه I-V دو نمونه سلول خورشیدی یکی با لایه متخلخل (داده‌های مربعی) و دیگری بدون تخلخل (داده‌های مثلثی) که هر دو تحت تابش AM 1/5 قرار گرفته‌اند [۱۰]. نقطه M در این نمودار وابسته به مختصات I_m و V_m است (نمودارهای منطبق شده در داده‌ها حاصل محاسبات نظری کار حاضر است).

مقادیر I_{sc} و V_{oc} می‌توانند بر بزرگی سطح زیر منحنی مشخصه I-V سلول که حاکی از بازدهی داخلی قطعه (η) است تاثیر بگذارند. به منظور تعیین F.F. از مدل نظری ارائه شده توسط احمد و همکاران [۱۵] برای پیدا کردن مقادیر V_m و I_m استفاده کردیم:

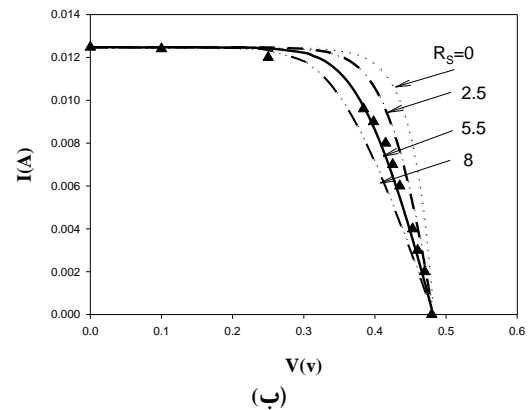
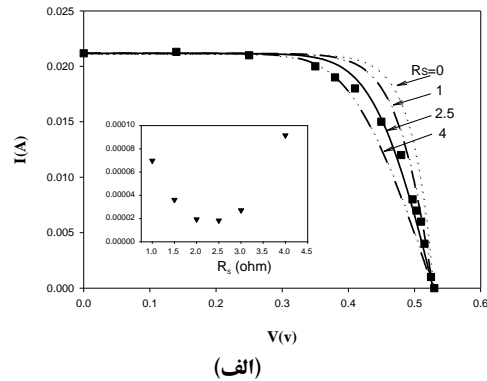
$$I = I_{sc} \left[1 - \exp\left(\frac{-(V_{oc} - V)}{C}\right) \right] \quad (9)$$

به طوری که: $C = (V_{oc} - V_m) / \ln(I_{sc} / (I_{sc} - I_m))$ با انجام برازش داده‌ها به روش کمینه‌سازی مجموع مربعات این مقادیر را بدست آوردیم. نتیجه این محاسبات در جدول ۱ آمده است. خطوط انطباق یافته در داده‌های شکل ۱، حاصل به کارگیری معادله ۹، با در نظر گرفتن مقادیر V_m و I_m محاسبه شده است. چنانچه پیداست بازدهی تبدیل انرژی (η) در قطعه متخلخل حدود ۲ برابر بیش از قطعه غیرمتخلخل می‌باشد. از علل این تغییرات می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

به شکل ۲ الف) نشانگر تغییرات میزان خطا بر حسب R_s است.



شکل ۳: داده‌های تجربی J_{sc} بر حسب دما برای نمونه غیرمتخلخل (داده‌های مثلثی) و نمونه متخلخل (داده‌های مربعی) [۱۰]. خطوط خط چین و پر به ترتیب حاصل محاسبات نظری ما برای نمونه عادی و متخلخل می‌باشد (به متن مراجع شود).

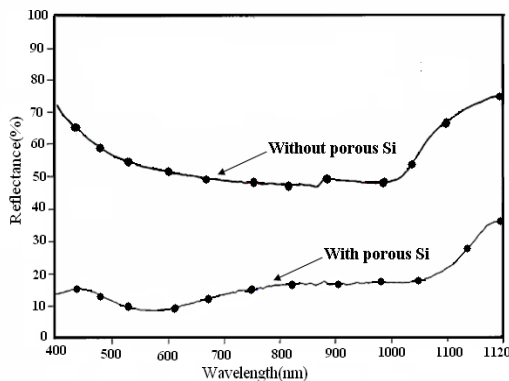


شکل ۲: مشخصه جریان-ولتاژ سلول‌های خورشیدی مورد بحث، الف) نمونه با لایه Si متخلخل و ب) نمونه بدون لایه متخلخل. هر یک از منحنی‌ها در این شکل‌ها رفتار انتظاری (معادله ۲) قطعه را در R_s نشان داده شده در شکل بر حسب اهم نشان می‌دهد. نمودارهای وابسته به $R_s=0$ وضعیت حالت ایده‌آل را نشان می‌دهد. تصویر ضمیمه شده به شکل الف) نشانگر تغییرات مجموع اختلاف مربعات مقادیر نظری و تجربی به ازای مقادیر مختلف R_s است.

داده‌های تجربی J_{sc} وابسته به دما برای نمونه غیرمتخلخل (داده‌های مثلثی) و نمونه متخلخل (داده‌های مربعی) در شکل ۳ نشان داده شده است.

داده‌های تجربی حاکی از آن است که در هر دمایی مقادیر J_{sc} در نمونه متخلخل همواره بزرگتر از نمونه عادی است و نیز این پارامتر با افزایش دما در هر دو نمونه افزایش می‌یابد. مورد نخست می‌تواند به سبب کاهش مقاومت متوالی [۱۵] و افت بازتابندگی سطحی در نمونه متخلخل باشد.

به منظور بررسی کمی تاثیر دما و بازتابندگی سطحی بر J_{sc} از جمع‌بندی رابطه (۱) استفاده کرده‌ایم. برای انجام محاسبات علاوه بر اطلاع از بازتابندگی R مربوط به نمونه عادی و متخلخل (شکل ۴)، لازم است مقادیر مربوط به عمق ناحیه فعال، $f(\lambda, x)$ و n_0 را بیابیم:



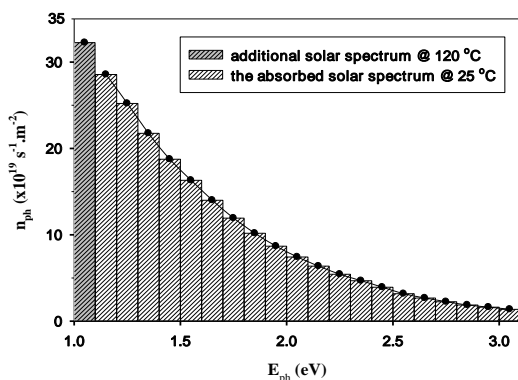
شکل ۴: بازتابندگی سطحی R برای نمونه عادی و متخلخل [۱۰].

۳-۱- تعیین عمق ناحیه فعال

محاسبات ما، مبتنی بر معادلات اصولی که در مراجع مختلف [۱۴] می‌توان یافت، برای این دو نمونه با تراکم‌های گزارش شده نشان می‌دهد بزرگی طول پخش حامل‌های اقلیتی در نواحی با تراکم پایین، بالا و تهی لایه به ترتیب در حدود ۸۵، ۵۰ و ۰/۱ میکرون است. با توجه به این مقادیر و ضخامت

دانست [۱۴]. همچنین سطح زیر منحنی و $\lambda + \Delta\lambda$ نشانگر شار فوتون‌های موجود در این گستره خواهد بود. با اطلاع از این نسبت همراه با انرژی کل دریافتی در واحد زمان در واحد سطح و نیز انرژی میانگین فوتون‌ها در این بازه می‌توان n_0 را بر حسب انرژی فوتون‌ها بدست آورد. شکل ۶ نتایج حاصل از این محاسبات را نشان می‌دهد. بخش اضافه شده به شکل ۴ از این محاسبات (gray dashed area) نشانگر آن است که با افزایش دما گستره طیف قابل جذب خورشید برای قطعه، افزایش می‌یابد. در توجیه بخش اضافه شده با تغییرات دما از ۲۵ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد (شکل ۳)، می‌توان به کاهش گاف نواری نیم‌رسانا از ۱/۱۲ تا ۱/۰۹۱ الکترون ولت اشاره داشت (بر اساس رابطه ۸). بدین ترتیب تعداد فوتون‌های بیشتری قابلیت جذب در قطعه را خواهند یافت و منجر به تولید زوج‌های الکترون-حفره بیشتر و نهایتاً جریان نوری بزرگتری خواهند شد.

خطوط خط چین و پر در شکل ۳ به ترتیب حاصل محاسبات نظری ما برای نمونه عادی و متخلخل است. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تئوری بکار گرفته شده: اولاً مقادیر بزرگتر J_{sc} را در نمونه متخلخل نسبت به نمونه عادی به خوبی پیش‌بینی می‌کند؛ که این امر می‌تواند به سبب تاثیر پوسته متخلخل بر کاهش بازتابندگی سطحی در نمونه متخلخل باشد. ثانیاً در نمونه عادی بخوبی با مقادیر تجربی سازگار بوده و در مورد نمونه متخلخل ملاحظه می‌شود که محاسبات تئوری در حدود ۱۰ درصد با داده‌های تجربی متفاوت است؛

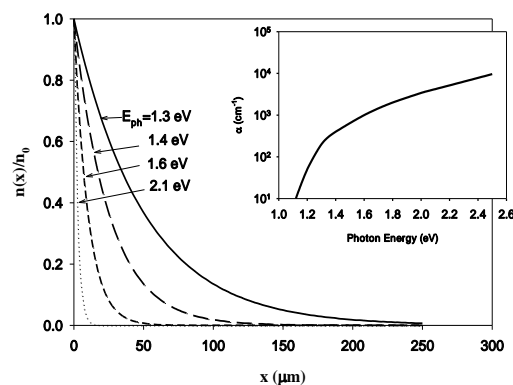


شکل ۶: طیف قابل جذب توسط سلول خورشیدی سیلیکونی در دمای اتاق (white dashed area) و افزایش گستره طیف قابل جذب به سبب افزایش دما تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد (gray dashed area).

ناچیز لایه بالایی (در حدود ۲/۲ میکرون) در مقایسه با طول پخش حامل در آن لایه واضح است که بخش عمده جذب نور در ناحیه طول پخش وابسته به لایه با آلایش پایین در عمقی حدود ۹۰ میکرومتر تا سطح قطعه رخ می‌دهد.

۳-۲- تعیین $f(\lambda, x)$

با استفاده از معادله $n(x)/n_0 = \exp(-ax)$ که در آن a ضریب جذب ماده (در اینجا سیلیکون) بوده و در حالت کلی تابعی از انرژی فوتون‌های فرودی است (تصویر الصافی شکل ۵ [۱۸])، می‌توان کسر فوتون‌های رسیده به مقطع x تا سطح نمونه را یافت. شکل ۵ نشانگر این نسبت بر حسب تابعی از فاصله تا عمق ۲۵۰ میکرون (ضخامت نوعی ویفرهای Si در سلول‌های خورشیدی) است. بدیهی است $F=1-n(x)/n_0$ خواهد بود. چنانچه از این شکل پیداست برای فوتون‌های با انرژی‌های بزرگتر از ۱/۴ eV تقریباً همگی و در انرژی‌های کمتر در حدود ۸۵٪ آن‌ها جذب می‌شوند.



شکل ۵: تغییرات نسبت شار فوتون‌ها در مقطع x به شار در سطح نمونه بر حسب تابعی از فاصله برای فوتون‌های با انرژی ۱/۳، ۱/۴، ۱/۶ و ۲/۱ الکترون ولت. تصویر الصافی نشانگر تغییرات ضریب جذب سیلیکون بر حسب تابعی از انرژی فوتون‌هاست.

۳-۳- تعیین η_0

برای یافتن تعداد فوتون‌ها در واحد بازه طول موج تابش خورشیدی می‌توان طیف گسیلی از خورشید در شرایط AM1/5 (معادل شدت ۸۴/۴ mW/cm²) را در ناحیه طول موجی ۴۰۰ تا ۱۰۷۸ نانومتر با تقریب خوبی به طیف گسیلی از یک تابشگر جسم سیاه در دمای ۵۸۰۰ کلوین نزدیک

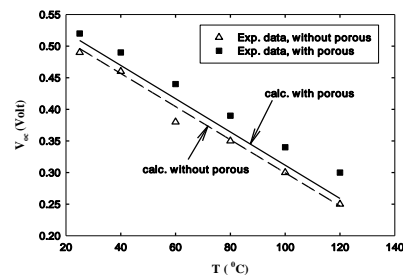
۴- نتیجه گیری

با توجه به تحلیل‌های بکار گرفته شده در تفسیر داده‌های مربوط به مشخصه الکتریکی سلول‌های خورشیدی عادی و متخلخل در دماهای گوناگون دریافتیم که به ازای یک دمای مشخص همواره مقادیر J_{sc} و V_{oc} در نمونه متخلخل بزرگتر از نمونه عادی است؛ که علت اصلی آن کاهش بازتابندگی سطحی در نمونه متخلخل می‌باشد. همچنین با افزایش دما (از ۲۵ تا ۱۲۰ °C): الف- J_{sc} در هر دو نمونه رفتاری افزایشی داشته که علت اصلی آن کاهش گاف نواری نیم‌رسانا و گسترش طیف قابل جذب خورشید در ناحیه فرورسرخ در نمونه‌ها می‌باشد. ب- V_{oc} در هر دو نمونه کاهش می‌یابد که می‌تواند به سبب کاهش گاف نواری نیم‌رسانا و افزایش چگالی جریان اشباع معکوس در قطعات باشد.

مراجع

- [1] P.K. Basua, H. Dhasmanab, N. Udayakumarc, Firoz Khand, D. K. Thakur, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **94**, 2010, 6.
- [2] J. Yuan, Y Zhang, L Zhou, G Zhang, *Joule*, **3**, 2019, 4.
- [3] W. Gao, T. Liu, C. Zhong, G. Zhang, Y Zhang, *ACS Energy Letters*, **3**, 2018, 7.
- [4] F.A. Roghabadi, F.A. Roghabadi, N. Ahmadi, V. Ahmadi, A. Di-Carlo, *Solar Energy*, **173**, 2018, 273.
- [5] M. Kumar, S. Kumar, *Polymer Journal*, **49**, 2017, 85.
- [6] M.A. Kamarudin, A.A. Khan, C. Williams, G. Rughoobur, *Electrochimica Acta*, **222**, 2016, 195.
- [7] E.H.M. Sakho, O.S. Oluwafemi, *Nanomaterials for Solar Cell Applications*, **57**, 2019, 377.
- [8] V. Malgras, A. Nattestad, J.H. Kim, S.X. Dou, *Science and Technology of Advanced Materials*, **15**, 2017, 379.
- [9] A. Goetzberger, *Solar Energy Materials & Solar Cell*, **74**, 2002, 1.
- [10] P. Vitanov, M. Kamenova, N. Tyutyundzhiev, M. Delibasheva, E. Goranova, M. Peneva, *Thin Solid Films*, **297**, 1997, 299.
- [11] N. Koshida, H. Koyama, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, **256**, 1992, 219.
- [12] S. Yang, *Fundamental of Semiconductor Devices*, McGraw-Hill, 1978.
- [13] M. Scholz, D. Peros, M. Wagner, M. Bohm, *2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Wien, 1998.
- [14] S.M. Sze, *Semiconductor Devices, Physics and Technology*, Wiley, 1985.
- [15] G.E. Ahmad, H.M.S. Hussein, H.H. El-Ghetany, *Renewable Energy*, **28**, 2003, 1159.
- [16] H. Koyama, M. Araki, Y. Yamamoto, N. Koshida, *Applied Physics A*, **30**, 1991, 3606.
- [17] V.Y. Yerokhov, I.I. Melnyk, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **3**, 1999, 291.
- [18] J. Singh, *Semiconductor Optoelectronics*, McGraw-Hill, 1995.474.

که این امر می‌تواند ناشی از عوامل وابسته به حضور نانوتخلخل‌های سطحی در داخل سیلیکون (همچون ایجاد میدان‌های قوی در نقاط نوک تیز) باشد. داده‌های تجربی V_{oc} وابسته به دما برای نمونه عادی (داده‌های مثلی) و متخلخل (مربعی) در شکل ۷ مشاهده می‌شوند.



شکل ۷: داده‌های تجربی V_{oc} بر حسب دما برای نمونه عادی (داده‌های مثلی) و متخلخل (داده‌های مربعی) [۱۰]. خطوط خط‌چین و پر به ترتیب حاصل محاسبات نظری ما برای نمونه عادی و متخلخل می‌باشد (به متن مراجع شود).

نتایج تجربی نشان می‌دهد که به ازای هر دمای مشخص، V_{oc} در نمونه متخلخل بزرگتر از نمونه عادی بوده و این پارامتر در هر دو نمونه با افزایش دما کاهش می‌یابد. به منظور بررسی کمی تاثیر دما و حضور نانوتخلخل‌های سطحی بر ولتاژ مدار باز، با استفاده از روابط (۶)، (۷) و (۸) به برآزش داده‌های تجربی مربوط به این قطعات در رابطه (۴) پرداخته‌ایم. خطوط خط‌چین و پر در شکل ۷ به ترتیب حاصل محاسبات نظری ما برای نمونه عادی و متخلخل است. همانگونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود که: الف- محاسبات تئوری مقادیر V_{oc} بزرگتری را در نمونه متخلخل نسبت به نمونه عادی پیش‌بینی می‌کند که می‌تواند به سبب کاهش بازتابندگی سطحی و در نتیجه افزایش چگالی جریان اتصال کوتاه (رابطه ۳) در قطعه متخلخل باشد. ب- تئوری به کار گرفته شده در نمونه غیرمتخلخل با داده‌های تجربی سازگاری داشته و رفتار کاهش ولتاژ مدار باز با افزایش دما را در هر دو نمونه پیش‌بینی می‌کند، لکن در نمونه متخلخل اندکی با نتایج تجربی متفاوت است. در مورد علت کاهش V_{oc} با افزایش دما می‌توان به کاهش گاف نواری نیم‌رسانا و افزایش چگالی جریان اشباع معکوس قطعه اشاره داشت.