



ساخت و بررسی نمودار ضریب شکست موثر بهینه نانو سیم های سیلیکونی برای بهبود کارایی سلول های خورشیدی

حمید مظفری*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده: در ساختار سلول خورشیدی، لایه های نازک سیلیکونی به صورت ساختار نانوسیم در دو لایه پایه اصلی قرار دارند. این لایه های نانوساختار باعث افزایش جذب نور در سلول های خورشیدی می شوند و انرژی نور را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. نمودار ضریب شکست موثر نانوسیم های سیلیکونی به عنوان یک ویژگی مهم در سلول های خورشیدی استفاده می شود که می تواند به طور قابل توجهی تغییر کند. تغییرات پروفایل ضریب شکست موثر ممکن است به دلیل تغییر در ساختار نانوساختار، اندازه، شکل و همچنین، تغییر در تراکم ذرات نانوسیم های سیلیکونی باشد که منجر به بهبود یا کاهش جذب نور و عملکرد سلول خورشیدی شود. در این پژوهش، اندازه، شکل و تراکم نانوسیم های سیلیکونی در زمان های متفاوت و با استفاده از کاتالیست طلا و روش های لایه نشانی بخار شیمیایی و تکنیک بخار-مایع-جامد (VLS) سنتز و کنترل شدند. خواص ساختاری نانوسیم های سیلیکونی سنتز شده، با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مشخصه یابی شدند. تغییرات ضریب شکست موثر بهینه بر اساس طول و تراکم نانوسیم های سیلیکونی کنترل شده، بررسی شد. نتایج نشان می دهد که بیشترین بازده و جذب سلول خورشیدی در طول $2 \mu\text{m}$ و نسبت تراکم 36% نانوسیم های سیلیکونی اتفاق می افتد. بازده سلول خورشیدی در این شرایط برابر با $9/6\%$ ، ضریب پرتشنگی $466/46\%$ ، چگالی جریان اتصال کوتاه در این نمونه $28/53 \text{ mA.cm}^{-2}$ و ولتاژ 520 mV بدست آمده است.

واژگان کلیدی: سلول خورشیدی، ضریب شکست موثر، نانوسیم، ضریب پرتشنگی

*mozafari.h@pnu.ac.ir

۱- مقدمه

سلول خورشیدی، یک دستگاه الکترونیکی است که توانایی تبدیل انرژی نوری خورشید به انرژی الکتریکی را دارد و به دلیل عدم تولید آلاینده های محیطی و کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی، به عنوان یک راهکار پایدار در تولید انرژی مورد توجه قرار گرفته اند [۱]. این سلول ها از مواد نیمه رسانا تشکیل شده اند که قادر به جذب فوتون های نور خورشید هستند و این فوتون ها را به الکترون ها و جایگزین های مثبت آنها تبدیل می کنند [۲].

سلول های خورشیدی به طور عمده از پنج بخش کاند، لایه انتقال دهنده الکترون، لایه انتقال دهنده حفره، لایه فعال و فتوآند تشکیل شده اند [۳]. در این بین حضور لایه های انتقال دهنده الکترون و حفره، باعث کاهش بازترکیبی و افزایش کارایی سلول های خورشیدی می شوند و به این دلیل از اهمیت ویژه ای در ساختار سلول خورشیدی برخوردار هستند [۴].

یکی از روش های موفق تر برای بهره برداری از نور خورشید، استفاده از ساختارهای نانومتری (نانوساختارها) است [۷-۵]. با استفاده از نانوذرات فلزی [۱۰-۸]، نانوساختارهای هسته-

پوسته [۱۱-۱۳] و ذرات کوانتومی [۱۴-۱۵] درون سلول خورشیدی مقدار جذب نور خورشید افزایش می‌یابد.

نانوسیم‌های سیلیکونی، نانو ساختارهای تک بعدی و نیمه رسانایی هستند که در سالهای اخیر به دلیل کاربردهای فراوانی که در زمینه‌های مختلف از قبیل باتری‌ها، حسگرها، قطعات الکترونیکی و سلول‌های خورشیدی دارند، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۶-۱۸]. بررسی‌ها نشان داده شده است که نانوذرات طلا می‌تواند به عنوان یک کاتالیست مطلوب در طول سنتز به روش بخار-مایع-جامد (VLS) مورد استفاده قرار گیرند [۱۹]. در روش لایه نشانی بخار شیمیایی ابتدا پیش ماده‌ها تبخیر شده، سپس مولکولهای پیش ماده در گستره‌ی دمای معینی جذب زیر لایه‌ها یا بستر می‌شوند. مولکول‌های جذب شده در اثر حرارت تجزیه شده و با گازها و بخارهای دیگر واکنش داده و فیلم جامدی روی زیر لایه یا بستر شکل می‌دهند [۲۰].

نمودار ضریب شکست موثر نانوسیم‌های سیلیکونی می‌تواند بهبود کارایی سلولهای خورشیدی را ارتقاء دهد. نانوسیم‌ها ساختاری هستند که در ابعاد نانومتری ساخته می‌شوند و به دلیل ویژگی‌های خاص خود می‌توانند بهره‌برداری از نور خورشید را بهبود بخشند [۲۱]. ضریب شکست موثر نانوسیم‌های سیلیکونی به معنای تغییر در ضریب شکست ماده است که می‌تواند باعث افزایش جذب نور و کاهش انعکاس آن شود. با افزایش جذب نور، مقدار انرژی الکترون‌ها و حفره‌ها در سلول‌های خورشیدی افزایش می‌یابد و در نتیجه کارایی سلول خورشیدی بهبود می‌یابد. برای بهبود نمودار ضریب شکست موثر نانوسیم‌های سیلیکونی، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. یکی از روش‌ها استفاده از ساختارهای متراکم نانومتری است که باعث تغییر در ضریب شکست ماده می‌شود. به عنوان مثال، می‌توان ساختارهای هموزن نانومتری را با استفاده از روش‌های ریخته‌گری نانوذرات ساخت و آنها را به سطح سلول خورشیدی افزود. این ساختارها می‌توانند جذب نور را افزایش دهند و در نتیجه کارایی سلول خورشیدی را بهبود بخشند [۲۲]. افزون بر این، می‌توان از روش‌های دیگری نیز برای بهبود نمودار ضریب شکست موثر نانوسیم‌های سیلیکونی استفاده کرد. به عنوان مثال، می‌توان از روش‌های پوشش‌دهی سطحی مانند روش آب‌گریز کردن سطح

نانوسیم‌ها استفاده کرد. این روش‌ها می‌تواند باعث کاهش انعکاس نور و افزایش جذب آن شوند [۲۳].

در این مقاله، در ابتدا نانوسیم‌های سیلیکونی با روش‌های لایه نشانی بخار شیمیایی و روش بخار-مایع-جامد (VLS) و با استفاده از کاتالیست طلا سنتز شدند. در زمانهای متفاوت، اندازه طول، شکل و تراکم نانوسیم‌های سیلیکونی کنترل شدند و ضریب شکست موثر بهینه نانوسیم‌های سیلیکونی بدست آمده که باعث بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی شدند.

۲- فعالیت تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

در این پژوهش، نانوذرات و نانوسیم‌های سیلیکونی در یک محفظه خلأ دستگاه با روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی (CVD) سنتز شدند. دستگاه‌های استفاده شده جهت آنالیز، شامل یک منبع تغذیه فرکانس بالا چند موج (Bandelin MS 73)، مجهز به مبدل/مبدل و نوسان ساز تیتانیم، که در ۲۰ KHz کار می‌کند و حداکثر توان خروجی آن ۱۵۰ W است برای تابش اولتراسونیک استفاده شده است، پراش پرتو ایکس (مدل Philips PW1730- Holland) برای تشخیص ساختار و ترکیب فازی نمونه‌های تهیه شده با تابش $CuK\alpha$ و در محدوده زوایای استفاده شده، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با استفاده از دستگاه LEO مدل VP ۱۴۵۵ جهت بررسی شکل و اندازه ذرات استفاده شده است که قبل از گرفتن عکس‌ها، نمونه‌ها توسط یک لایه نازک پلاتین پوشانده شدند تا سطح نمونه‌ها از تجمع بار جلوگیری شود و داری کیفیت بهتری باشند. تصویربرداری TEM به وسیله میکروسکوپ الکترونی (مدل Philips، EM208) با ولتاژ شتاب دهنده‌ی ۱۰۰ الی ۲۰۰ کیلوولت انجام گرفت. برای اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز برای تعیین بازده سلول با استفاده از دستگاه شبیه ساز سلول خورشیدی شریف سولار (SIM-1000) با شدت نور استاندارد GAM ۱/۵ و دستگاه پتانسیواستات (Keithley 2400) مشخصه‌یابی شد. برای بررسی نمودار ضریب شکست موثر نانوسیم‌های سیلیکونی و طیف جذب لایه‌ها با دستگاه طیف‌سنجی (UV-Vis)

شد. (Analytik Jena AG مدل SPECORD 250) اندازه‌گیری

۲-۲- روش سنتز و رشد نانوسیم‌های سیلیکونی

در این پژوهش، از روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی برای سنتز نانوسیم‌های سیلیکونی استفاده شد. در ابتدا، زیر لایه‌های سیلیکون را با اندازه‌های $1 \times 1 \text{ cm}^2$ آماده کرده و سپس این قطعات سیلیکونی را جهت رفع آلودگی‌های متفاوت با مخلوط آب مقطر و اتانول در حمام فراصوت به مدت ۱۵ دقیقه شستشو داده و خشک شدند. سپس، ضخامت نازکی از طلا حدود 10 nm برای لایه‌نشانی روی قطعات با روش کند و پاش انجام گرفت. پیش از این مرحله، قطعات سیلیکونی لایه‌نشانی شده با لایه طلا را داخل کوره قرار گرفت. هوای کوره را با روشن کردن سیستم خلا متصل به کوره، تخلیه شد، تا فشار آن به $5 \times 10^{-2} \text{ torr}$ برسد. بدین ترتیب تمام لایه‌های طلا به‌عنوان کاتالیست رشد به جزیره‌های نانومتری طلا تبدیل می‌شوند. دمای کوره را در دمای 1200°C ثابت نگه داشته که دمای رشد نانوسیم‌های سیلیکونی می‌باشد و گاز آرگون را با جریان 200 sccm وارد کوره شد. استفاده از گاز آرگون در فرآیند سنتز نانوسیم‌های سیلیکونی به روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی، به منظور بهبود کیفیت و خواص نانوسیم‌های سیلیکونی است. گاز بی اثر آرگون به عنوان یک گاز حامل در فرآیند استفاده می‌شود تا از تاثیر گازهای دیگر روی خواص نانوسیم‌های سیلیکونی جلوگیری شود. برای کنترل طول، شکل، اندازه قطر و تراکم نانوسیم‌های سیلیکونی، برای هر چهار آزمایش، سه نمونه از نانوسیم‌های سیلیکونی در زمان‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه برای بررسی خطا در نظر گرفته شد و رشد نانوسیم‌های سیلیکونی در زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۳- فرایند بررسی نمودار ضریب شکست موثر

نمودار ضریب شکست موثر یک مقدار فیزیکی است که نشان‌دهنده توانایی یک ماده در جذب نور و تبدیل آن به انرژی الکتریکی است. در سلول‌های خورشیدی، نانوسیم‌های سیلیکونی به‌عنوان یکی از مواد موثر استفاده می‌شوند. برای بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی، لازم است نمودار ضریب شکست

نانوسیم‌های سیلیکونی بهینه شود. برای بررسی نمودار ضریب شکست موثر نانوسیم‌های سیلیکونی، ابتدا نمونه‌های مختلفی از این نانوسیم‌ها در دماهای متفاوت تهیه شدند، سپس مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوسیم‌ها بررسی و نمودار ضریب شکست موثر آن‌ها تعیین می‌شود.

همچنین، نمودار ضریب شکست موثر بر اساس پارامترهای هندسی نمونه‌های نانوسیم‌های سیلیکونی تهیه شده در دماهای مختلف، طبق نظریه نانوسیم‌های سیلیکونی نامنظم خطی (دایره) و غیرخطی (مخلوطی) به ترتیب بر اساس معادله‌های (۱) و (۲) مدل سازی شدند [۲۴-۲۵].

$$n_{eff} = n_{air} + (n_{si} - n_{air}) * \frac{z}{l}; \quad 0 \leq z \leq L \quad (1)$$

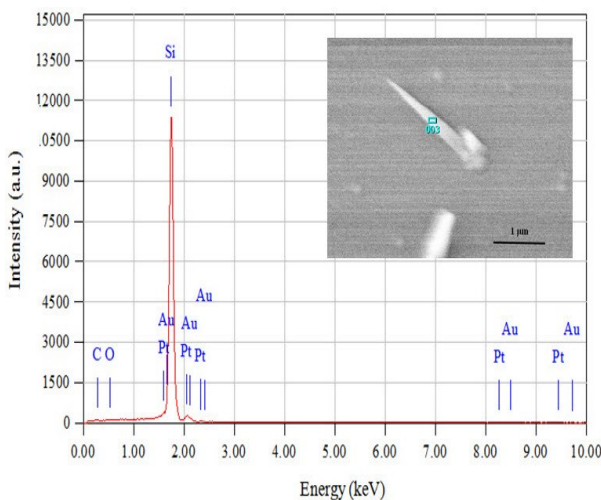
$$n_{eff} = n_{air} + (n_{si} - n_{air}) * (10\left(\frac{z}{l}\right)^3 - 15\left(\frac{z}{l}\right)^4 + 6\left(\frac{z}{l}\right)^5); \quad 0 \leq z \leq L \quad (2)$$

در این رابطه‌ها، n_{eff} نمودار ضریب شکست موثر بهینه، n_{air} و n_{si} به ترتیب ضریب شکست هوا و ضریب شکست زیر لایه سیلیکون می‌باشند. نوک نانوسیم‌های سیلیکونی در $z = 0$ و پایه نانوسیم‌ها در $z = L$ است. طول نرمالیزه شده نانوسیم‌های سیلیکونی بین صفر تا یک متغیر هستند. نمودار ضریب شکست موثر وابسته به طول موج در سراسر طول نانوسیم‌های سیلیکونی اندازه‌گیری شدند.

۳- نتایج و بحث

بر اساس آنالیزهای انجام شده بر مواد سنتز شده نانوسیم‌های سیلیکونی، ساز و کار رشد نمونه‌ها مبتنی بر روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی با فرایند بخار-مایع-گاز (VLS) انجام گرفت. در این روش قطعه سیلیکونی لایه‌نشانی شده با طلا، داخل کوره قرار گرفت. گاز آرگون با جریان 200 sccm وارد کوره شد و دمای کوره را در 1200°C ثابت نگه داشته و کوره از هوا تخلیه شد تا فشار به $5 \times 10^{-2} \text{ torr}$ برسد تا نانوذرات سیلیکون شروع به رشد کنند. همانطور که در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده می‌شود، با افزایش زمان سنتز طول نانوسیم‌های سیلیکونی افزایش می‌یابد و از طرفی تراکم نانوسیم‌های سیلیکونی کاهش می‌یابد. در شکل ۱ (الف، ب، ج و د) متوسط

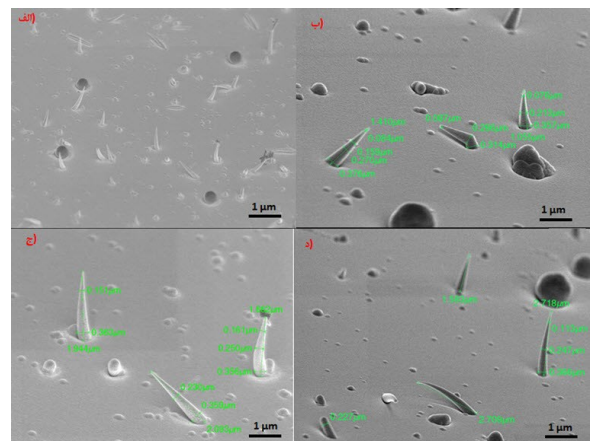
در شکل ۳، آنالیز EDX نانوسیم‌های سیلیکونی سنتز شده در زمان ۶۰ دقیقه را نشان می‌دهد که همانطور در تصویر مشاهده می‌گردد قله سیلیکون با شدت بالا و حضور طلا و اکسیژن که با شدت پایین‌تر است. همچنین حضور ضعیف اکسیژن، نشان‌دهنده حضور اکسیژن و سیلیکون در نمونه‌ها است و حضور قله‌های طلا در شکل ۳، نشان‌دهنده آماده‌سازی نمونه‌ها با کاتالیست طلا برای رشد نانوسیم‌های سیلیکونی است.



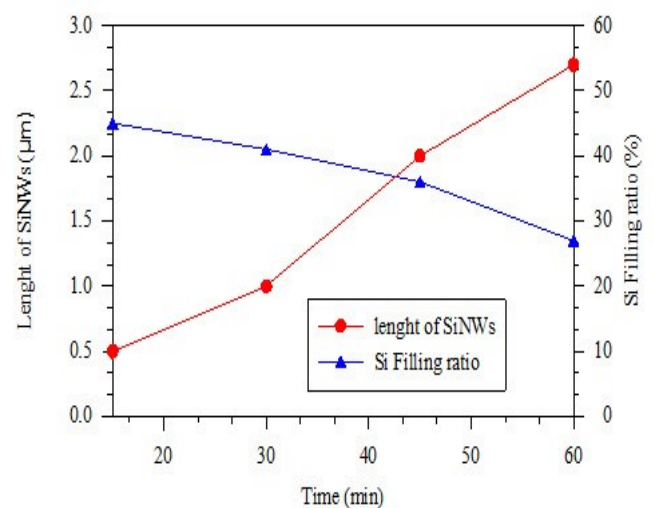
شکل ۳: طیف EDX حاصل از نانوسیم‌های سیلیکونی سنتز شده در زمان ۶۰ دقیقه

مشخصه‌یابی نمونه‌های تولید شده از جمله بررسی بلوری بودن، شناسایی ساختار نانوذرات و اندازه بلورک‌ها از آنالیز پراش پرتو ایکس، در مقیاس 2θ ، در محدوده ۱۰ تا ۶۰ درجه و با تاباندن $\text{CuK}\alpha$ با طول موج بر حسب آنگستروم 1.54056 \AA و برحسب نانومتر 0.154 nm انجام شده است. شکل ۴ طیف پرتو ایکس حاصل از نانوسیم‌های سیلیکونی سنتز شده در دمای 1200°C و در زمان ۶۰ دقیقه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، شدت قله سیلیکونی را در زاویه 28° و قله‌های ضعیف اکسید سیلیکون در زوایای پراش 22° و 53° و قله طلا به‌عنوان کاتالیست رشد نانوسیم‌ها در زاویه پراش 39° نشان می‌دهد که شباهت بسیاری با نتایج طیف EDX نانوسیم‌های سیلیکونی سنتز شده دارد. به همین ترتیب حضور قله‌ی تیز سیلیکون با شدت بالا نشان از سنتز خوب نمونه و همچنین، کیفیت بلوری مطلوب نانوسیم‌های سیلیکونی دارد.

طول نانوسیم‌های سیلیکونی $0.5 \mu\text{m}$ تا $2/7 \mu\text{m}$ تغییر می‌کند، همچنین، نوک و پایه نانوسیم‌های سیلیکونی بین ۲۰ نانومتر تا ۸۰ نانومتر رشد کردند. تراکم نانوسیم‌های سیلیکونی در مدت زمان‌های مختلف، از ۴۵٪ تا ۲۷٪ کاهش یافتند. تاثیر مدت زمان سنتز بر طول و تراکم نانوسیم‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است. به وضوح رشد همگن نانوذرات سیلیکون در زمان‌های متفاوت قابل مشاهده است. هسته نانوذرات طی یک سری از واکنش‌های تجزیه‌ای متفاوت از فاز بخار اکسید سیلیکون بدست آمده‌اند و این پوسته‌های بی‌شکل از واکنش تجزیه‌ای اکسید سیلیکون بدست می‌آیند.

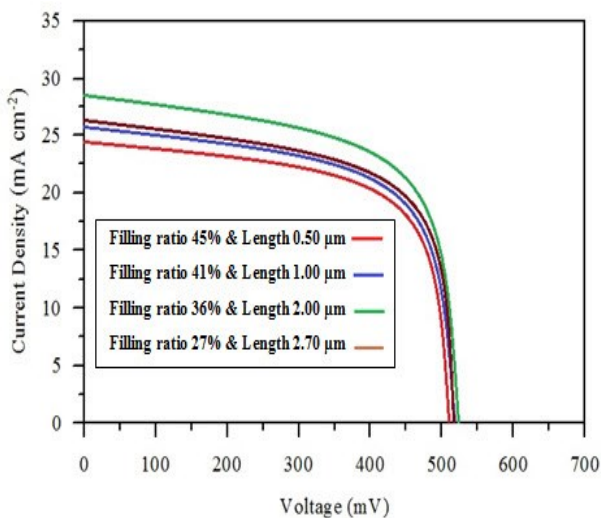


شکل ۱: تصاویر حاصل از تحلیل SEM نانوسیم‌های سیلیکونی سنتز شده در زمان‌های الف) ۱۵ دقیقه، ب) ۳۰ دقیقه، ج) ۴۵ دقیقه، د) ۶۰ دقیقه



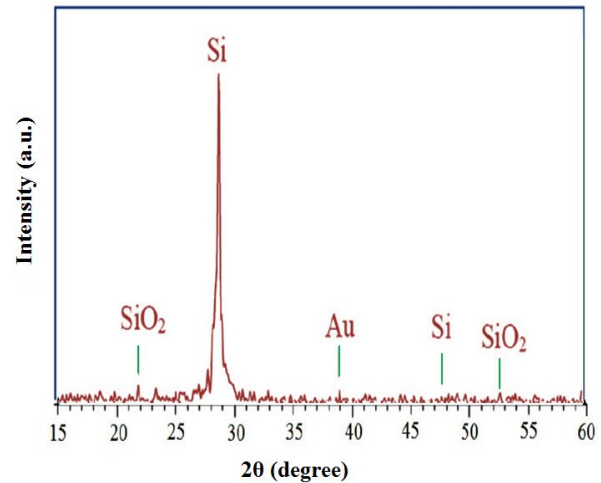
شکل ۲: نمودار تاثیر مدت زمان سنتز شده بر طول و نسبت تراکم نانوسیم‌های سیلیکون

۱ مشاهده کرد. همانطور در شکل ۶ و جدول ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین بازده، چگالی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مربوط به نمونه‌های نانوسیلیکونی سنتز شده‌ای است که با طول $2 \mu\text{m}$ و نسبت تراکم ۳۶ درصد ساخته شده است، که چگالی جریان اتصال کوتاه در این نمونه $28/53 \text{ mA.cm}^{-2}$ ، ولتاژ 520 mV ، ضریب پرشوندگی $66/4\%$ و بازده آن $9/6\%$ است. با افزایش طول نانوسیم‌های سیلیکونی توانست به افزایش کارایی آنها در سلول‌های خورشیدی منجر شود. با افزایش طول نانوسیم‌ها، سطح آنها نیز افزایش می‌یابد که باعث بالا رفتن جذب نور و افزایش جریان الکتریکی در سلول‌های خورشیدی شود. اما برای رسیدن به بهترین کارایی، لازم است تعادلی بین طول، قطر و تراکم نانوسیم‌ها حفظ شود. در واقع این نتایج نشان می‌دهد، برای افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی، نه تنها طول بلکه قطر و تراکم نانوسیم‌ها نیز بسیار مهم است. اگر قطر و تراکم نانوسیم‌ها بزرگ نباشد، کارایی آن کاهش می‌یابد که نمونه سنتز شده در مدت زمان ۶۰ دقیقه که طول نانوسیم سیلیکونی ساخته شده $2/7 \mu\text{m}$ نسبت تراکم ۲۷ درصد می‌باشد، چگالی جریان اتصال کوتاه در این نمونه به $26/44 \text{ mA.cm}^{-2}$ ، ولتاژ 518 mV ، ضریب پرشوندگی $65/8\%$ و بازده آن به $8/9\%$ کاهش می‌یابد. بنابراین، برای دستیابی به بهترین کارایی در سلول‌های خورشیدی، لازم است هم طول و هم قطر و هم تراکم نانوسیم‌های سیلیکونی بهینه شود.

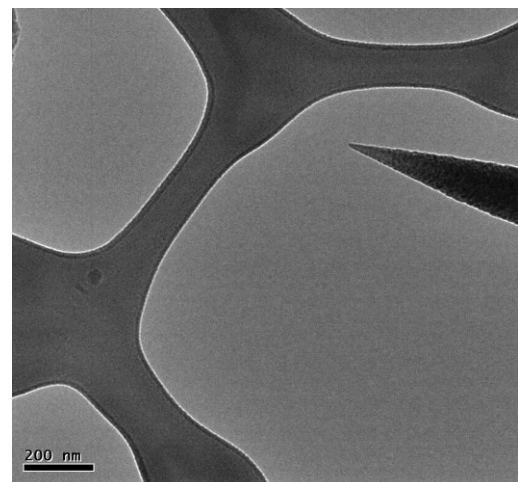


شکل ۶: نمودارهای جریان-ولتاژ نمونه‌های ساخته شده با طول و تراکم نانوسیم‌های سیلیکونی متفاوت

برای برآورد ریخت شناسی و اندازه نانوسیم محصولات از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد. شکل ظاهری قله که به طور تقریبی به صورت متقارن و باریک است، نشان دهنده این است که نانوسیم‌های سنتز شده دارای ساختار بلوری است.

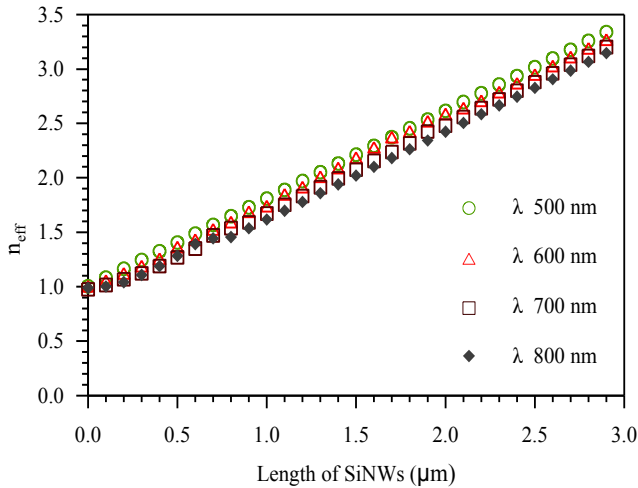


شکل ۴: طیف XRD حاصل از نانوسیم‌های سیلیکونی سنتز شده در زمان ۶۰ دقیقه



شکل ۵: تصویر TEM نانوسیم‌های رشد یافته بر روی بستر سیلیکونی

نمودارهای جریان-ولتاژ یکی از مشخصه یابی های مهم جهت بررسی عملکرد سلول‌های خورشیدی است. شکل ۶ نمودارهای جریان ولتاژ نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc})، ولتاژ مدار باز (V_{oc})، ضریب پرشوندگی (FF) و بازده (CE) سلول خورشیدی در نمونه‌های رشد یافته نانوسیم‌های سیلیکونی در زمان‌های متفاوت را می‌توان در جدول



شکل ۸: نمودار ضریب شکست موثر در طول نانوسیم‌های سیلیکونی سنتز شده در طول موج‌های متفاوت

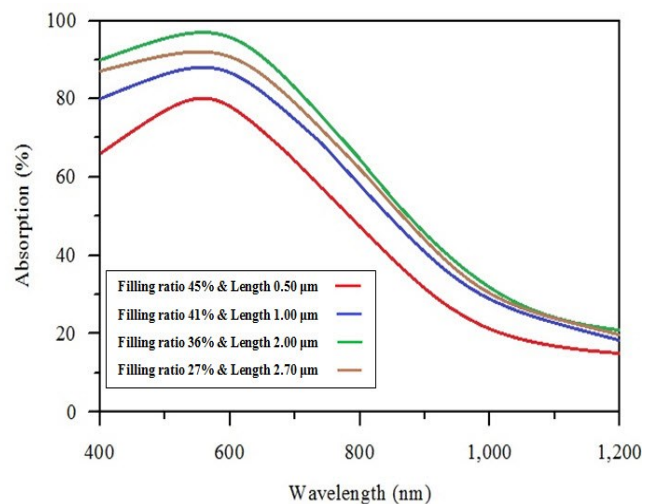
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، نانوسیم‌های سیلیکونی در مدت زمان‌های متفاوت برای کنترل رشد نانوسیم‌ها با کاتالیت طلا ساخته شدند. رشد متوسط طول نانوسیم‌ها از $0.5 \mu\text{m}$ تا $2.7 \mu\text{m}$ متغیر بود، همچنین نوک و پایه نانوسیم‌های سیلیکونی بین ۲۰ نانومتر تا ۸۰ نانومتر رشد داشتند. تراکم نانوسیم‌های سیلیکونی در مدت زمان‌های متفاوت سنتز نمونه‌ها از ۴۵٪ تا ۲۷٪ کاهش یافتند. سپس، نمودار ضریب شکست موثر سیلیکونی به عنوان یک ویژگی مهم در سلول‌های خورشیدی که ممکن است به دلیل تغییر در ساختار نانو ساختار، اندازه، شکل و همچنین تغییر در تراکم ذرات نانوسیم‌های سیلیکونی باشد، برای بهبود کارایی سلول خورشیدی بررسی شد. بهترین عملکرد سلول‌های خورشیدی در نمونه‌های سنتز شده مربوط به طول $2 \mu\text{m}$ و نسبت تراکم ۳۶ درصد نانوسیم‌های سیلیکونی بود، که چگالی جریان اتصال کوتاه در این نمونه $28.53 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ، ولتاژ 519 mV ، ضریب پرشوندگی 66.4% و بازده آن 9.6% بدست آمد. ضعیف ترین عملکرد نیز مربوط به طول $0.5 \mu\text{m}$ و نسبت تراکم ۴۵ درصد نانوسیم‌های سیلیکونی بود، که چگالی جریان اتصال کوتاه در این نمونه $24.72 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ، ولتاژ 514 mV ، ضریب پرشوندگی 63.8% و بازده آن 7.2% بدست آمد. بهینه‌سازی طول، قطر و تراکم نانوسیم‌های سیلیکونی می‌تواند بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی را به دنبال داشته باشد.

جدول ۱: پارامترهای فتولتاییک سلول نمونه‌های ساخته شده در زمان‌های مختلف

Time (min)	Size (μm)	Fill Ratio (%)	J_{sc} ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)	V_{oc} (mV)	FF (%)	CE (%)
15	0.5	45	24.72	514	63.8	7.2
30	1	41	25.31	519	64.5	8.5
45	2	36	28.53	520	66.4	9.6
60	2.7	27	26.44	518	65.8	8.9

شکل ۷، طیف جذب نور چهار نمونه ساخته شده با طول و نسبت تراکم‌های متفاوت نانوسیم‌های سیلیکونی را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودارها مشاهده می‌شود، شدت جذب نمونه ساخته شده با طول نانوسیم‌های سیلیکونی $2 \mu\text{m}$ و نسبت تراکم ۳۶٪ بیشتر است که دلیل افزایش مسیریابی فوتون‌ها و همچنین افزایش سطح جذب نور باعث می‌شود بیشترین تعداد فوتون‌ها با مواد جذب کننده تداخل داشته باشند و بیش از ۹۵ درصد جذب نور خورشید را دارد. همچنین، که در تصاویر نمودارها قابل مشاهده است نمونه‌های ساخته شده در محدود طیف مرئی نور خورشید یعنی طول موج 400 nm تا 800 nm دارای جذب عالی هستند و قله نمونه‌ها در 580 nm بیشترین مقدار جذب را برای هر کدام از نمونه‌ها را دارند. شکل ۸ ضریب شکست موثر نسبت به طول نانوسیم‌های سیلیکونی سنتز شده در طول موج‌های متفاوت را نشان می‌دهد. نمودار ضریب شکست موثر بهینه در $2/6$ بین طول موج‌های 500 nm تا 600 nm بدست آمده که در این محدوده بالاترین جذب و بازده بدست آمده است. در مقادیر ضریب شکست‌های بالاتر از $2/6$ نسبت به افزایش طول نانوسیم‌های سیلیکونی مقدار جذب کاهش یافته است.



شکل ۷: طیف جذب نور نمونه‌های ساخته شده با طول و نسبت تراکم‌های متفاوت نانوسیم‌های سیلیکونی

cells with silver nano-rod back electrodes,” *Current Applied Physics*, 2014,14, 637–640,.

[10] P. Nasehi, B. Mahmoudi, S. F. Abbaspour, M. S. Moghaddam, “Cadmium adsorption using novel $MnFe_2O_4$ - TiO_2 -UIO-66 magnetic nanoparticles and condition optimization using a response surface methodology,” *Royal Society of Chemistry Advances*, 2019,9, 20087–20099.

[11] S. Liu, R. Jiang, P. You, X. Zhu, J. Wang, F. Yan, “Au/Ag core-shell nano-cuboids for high-efficiency organic solar cells with broadband plasmonic enhancement,” *Energy & Environmental Science*. 2016,9, 898-905.

[12] Y. Di, T. Qin, “Plasmonic ZrN/TiO_2 core-shell nanostructure enhancing photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells,” *Optical Materials*, 132, 112813-112819, 2022.

[13] N. Rajamanickam, K. Ramachandran, “Empowering dye-sensitized solar cells with Cr-doped $SrTiO_3$ nano system: a promising approach to tackle carrier leakage and boost efficiency,” *Optical Materials*, 2023, 138, 113730-113736,.

[14] H. Latif, S. H. Raza, A. W. Muggo, M. S. Rafique, “A novel SiO_2 - ZnS - Am - TiO_2/PbS - CdS/ZnO -NRs/FTO photo-anode based quantum dots sensitized solar cell,” *Optical Materials*, 2023,142, 113982-113988,.

[15] H. Yan, M. Chen, W. Liu, “ Ti_3C_2 MXene quantum dots decorated mesoporous TiO_2/Nb_2O_5 functional photoanode for dye-sensitized solar cells,” *Optical Materials*, 2023,140, 113902-113908.

[16] A.Hayati, H. Hamidinezhad, “Synthesis and structural properties of silicon nanoparticles

مراجع

[1] P. K. Nayak, S. Mahesh, H. J. Snaith, D. Cahen, “Photovoltaic solar cell technologies: analyzing the state of the art,” *Nature Review Materials*, 2019,4, 269–285.

[2] A. Lenert, D. M. Bierman, Y. Nam, W. R. Chan, I. Celanovic, M. Soljacic, E. N. Wang, “A nano-phonic solar thermo-photovoltaic device,” *Nature nanotechnology*, 2014,9, 2, 126-130.

[3] S. Lattante, “Electron and hole transport layers: their use in inverted bulk heterojunction polymer solar cells,” *Electronics*, 2014,3, 132-164.

[4] H. T. Chien, “Effects of hole-transport layer homogeneity in organic solar cells: a multi-length scale study,” *Surfaces and Interfaces*, 2017,6, 72-80.

[5] F. Taghian, V. Ahmadi, L. Yousefi, “Enhanced thin solar cells using optical nano-antenna induced hybrid plasmonic travelling-wave,” *Journal of Light Wave Technology*, 2016,34, 1267-1273.

[6] D. M. Nguyen, D. Lee, J. Rho, “Control of light absorbance using plasmonic grating based perfect absorber at visible and near-infrared wavelengths,” *Scientific Reports*, 2017,7, 2611-2618.

[7] M. Yuan, M. Liu, E. H. Sargent, “Colloidal quantum dot solids for solution-processed solar cells,” *Nature Energy*, 2016,1, 16016-16022.

[8] Y. A. Akimov, W. S. Koh, S. Y. Sian, S. Ren, “Nanoparticle-enhanced thin film solar cells: metallic or dielectric nanoparticle,” *Applied Physics Letters*, 2010,96, 73111-73118.

[9] J. Jang, M. Kim, Y. Kim, K. Kim, S. J. Baik, H. Lee, J. C. Lee, “Three dimensional a thin-film solar

- [24] W. H. Southwell, "Gradient-index antireflection coatings," *Optics Letter*, 1983,8, 584-589,.
- [25] T. H. Pei, S. Thiyagu, Z. Pei, "Ultra high-density silicon nanowires for extremely low reflection invisible regime," *Applied Physics Letter*, 2011, 99, 153108-153112,.
- derived from nanoparticles in a vapor-liquid-solid mechanism," *Nanomegnyas*, 7, 55-59, 2020.
- [17] L.T. Cong, N. T. N. Lam, D. V. Thuong, "Decisive role of dopants in the optical properties of vertically aligned silicon nanowires prepared by metal-assist chemical etching," *Optical Materials*, 121, 111632-111639, 2021.
- [18] M. Bacha, A. Saadoune, I. Yousef ,O. Terghini, "Design and numerical investigation of Perovskite/Silicon tandem solar cell," *Optical Materials*, 2022,131, 112671-112678.
- [19] H. Hamidinezhad, H. Mozafari, R. S. Naseri, "Study of grass shoot-shape silicon nanowires grown by thermal chemical vapor deposition," *Silicon*, 2022,14, 177-182.
- [20] J. L. Zang, Y. P. Zhao, "Silicon nanowire reinforced by single-walled carbon nanotube and its applications to anti-pulverization electrode in lithium ion battery," *Composites Part B: Engineering*, 2012,43, 76-82,.
- [21] S, K. Saini, R. V. Nair, "Probing the optimal refractive index profile of disordered silicon nanowires for photon management applications," *Optical Materials*, 2020,109, 110241-110247.
- [22] L. A. Woldering, R. W. Tjerkstra, H. V. Jansen, I. D. Setija, W. L. Vos, "Periodic arrays of deep nanopores made in silicon with reactive ion etching and deep UV lithography," *Nanotechnology*, 2008,19, 145304-145309.
- [23] B. Fodor, T. Defforge, E. Agocs, M. Fried, G. Gautier, P. Petrik, "Spectroscopic ellipsometry of columnar porous Si thin films and Si nanowires," *Applied Surface Science*, 2017,421, 397-404.



Fabrication and Investigation of Optimal Refractive Index Profile of Silicon Nanowires to Improve the Efficiency of Solar Cells

H. Mozafari*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

Abstract: In the structure of the solar cell, thin silicon layers are located in the main bilayer in the form of a nanowire structure. These nanostructures enhance light absorption and convert it into electrical energy. The effective refractive index profile of silicon nanowires is used as an important property in solar cells, which can be significantly changed. These changes may be due to the change in the structure of the nanostructure, size, shape, as well as the change in the concentration of silicon nanowire particles, which leads to the improvement or reduction of light absorption and solar cell performance. In this research, the size, shape and concentration of silicon nanowires were synthesized and controlled at different times using gold catalyst and chemical vapor deposition and vapor-liquid-solid (VLS) techniques. The structural properties of the synthesized silicon nanowires were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy (TEM). The optimal effective refractive index was found to be dependent on the length and density of the nanowires. The results show that the maximum efficiency and absorption of the solar cell occurs in the length of 2 μm and the density ratio of 36% of silicon nanowires. The efficiency of the solar cell in this condition is equal to 9.6%, the filling factor is 66.4%, the short circuit current density in this sample is 28.253 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ and the voltage is 520 mV.

Keywords: Solar Cell, Effective Refractive Index, Nanowire, Filling Factor