



Application of nanotechnology in single crystal silicon solar cell

Mojtaba Jamiati¹

1- Associate Professor, Department of Physics, Nar.C., **Islamic Azad University**, Naragh, Iran
P.O.B. 58719/37961 naragh, Iran, mjamiati@iau.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 12 December 2022
Accepted 21 December 2025
Available Online 09
January 2026

Keywords

Solar cells
single crystals
nanoparticles

ABSTRACT

Solar cells have attracted a great deal of attention due to ongoing climate debate and efforts to further implement green energy sources to reduce CO₂ emissions into the atmosphere. Single-crystalline silicon (c-Si) solar cells, with better long-term stability compared to other silicon-based solar cells, have a major position in the solar cell market. As new solar cell technology continues to evolve, the relatively high cost of electricity generated by the low efficiency of the cell becomes one. The most important issues concerning c-Si solar cells the aim of this dissertation is to evaluate the effectiveness of nanotechnologies, especially plasmonic metal nanoparticles (MNPs), black silicon nanostructures (b-Si) and horizontal growth silicon nanowires (SiNWs). Structures to increase the cellular efficiency of c-Si solar cells through numerical simulations and experimental representations. Due to the cost advantage of c-Si solar cells, nanotechnology makes it less costly than other types of solar cell technologies with the same efficiency increase. We investigate the optical and electrical properties of MNPs for c-Si solar cell applications based on the finite difference time domain method. Simulations are performed to optimize MNPs in terms of shape, size, surface coverage and dielectric environment. Silver nanocubes with silicon dioxide (SiO₂) substrate have been experimentally shown to increase cell efficiency by an average of 7%.

Please cite this article using:

Mojtaba Jamiati, Application of nanotechnology in single crystal silicon solar cell, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 16, No. 3, pp. 35-39, 2025 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



بررسی کاربرد فناوری نانو در سلول خورشیدی سیلیکونی تک کریستالی

مجتبی جمعیتی^۱

۱- دانشیار گروه فیزیک، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران

صندوق پستی ۳۷۹۶۱/۵۸۷۱۹ نراق، ایران، mjamati@iau.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۱ آذر ۱۴۰۱

پذیرش: ۳۰ آذر ۱۴۰۴

ارائه در سایت: ۱۹ دی ۱۴۰۴

کلیدواژگان

سلول های خورشیدی

تک کریستالی

نانوذرات

سلول های خورشیدی به دلیل بحث های جاری آب و هوا و تلاش برای پیاده سازی بیشتر منابع انرژی سبز برای کاهش انتشار CO₂ در جو توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. سلول های خورشیدی سیلیکونی تک کریستالی (c-Si) با پایداری بهتر در مدت زمان طولانی در مقایسه با سایر سلول های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون، جایگاه اصلی را در بازار سلول های خورشیدی به خود اختصاص داده اند. همانطور که فناوری سلول های خورشیدی جدید به طور مداوم توسعه می یابد، ضرر هزینه نسبتاً بالای برق تولید شده مربوط به راندمان پایین سلول یکی می شود. مهمترین مسائل مربوط به سلول های خورشیدی c-Si هدف از این مقاله بررسی اثربخشی فناوری های نانو، به ویژه نانوذرات فلز پلاسمونیک (MNPs)، نانوساختارهای سیلیکون سیاه (b-Si) و نانوسیم های سیلیکونی رشد افقی (SiNWs) است. ساختارها، برای افزایش بازده سلولی سلول های خورشیدی c-Si از طریق شبیه سازی عددی و نمایش های تجربی. با توجه به مزیت سلول های خورشیدی c-Si در هزینه مواد، فناوری نانو در مقایسه با سایر انواع فناوری های سلول خورشیدی با افزایش کارایی یکسان، هزینه کمتری را ممکن می کند. ما خواص نوری و الکتریکی MNP ها را برای کاربردهای سلول خورشیدی c-Si بر اساس روش دامنه زمانی تفاضل محدود بررسی می کنیم. شبیه سازی ها برای بهینه سازی MNP ها از نظر شکل، اندازه، پوشش سطح و محیط دی الکتریک انجام می شود. نانومکعب های نقره با زیرلایه دی اکسید سیلیکون (SiO₂) به طور تجربی نشان داده شده اند که به طور متوسط تا ۷ درصد بازده سلولی را افزایش می دهند.

۱-مقدمه

ترکیبی از فتوولتائیک خورشیدی (PV)، باد، در میان دیگران، به یک موضوع جالب در سراسر جهان تبدیل شده است، زیرا احتراق سوخت های فسیلی باعث ایجاد گازهای گلخانه ای می شود [۱].

انتشار گازها که دلیل اصلی گرم شدن کره زمین تایید شده است. بنابراین، توسعه و تقویت منابع انرژی تجدیدپذیر برای جایگزینی مصرف سوخت های فسیلی در اسرع وقت مورد نیاز است.

استفاده از یک منبع مضر و کمیاب برای طبقه بندی نیازهای انرژی جمعیت در حال افزایش توجه جهانی را به خود جلب کرده است و باعث افزایش فرصت های تحقیقاتی در زمینه انرژی های تجدیدپذیر شده است. انرژی های تجدیدپذیر شامل منابع

منابع انرژی از مهمترین عوامل و عناصر توسعه پایدار است. داشتن انرژی مناسب عمده ترین عامل اقتصادی جوامع صنعتی پس از نیروی انسانی است چرا که انرژی یک نیاز اساسی برای استمرار توسعه اقتصادی، رفاه اجتماعی، بهبود کیفیت زندگی و امنیت جامعه است. اگر انرژی به نحوی تولید و مصرف شود که توسعه انسانی را در بلندمدت در تمام ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی تامین کند، مفهوم انرژی پایدار تحقق خواهد یافت، براین اساس می توان گفت تامین انرژی پایدار ضرورت توسعه پایدار است. اعتقاد بر این است که انرژی های تجدیدپذیر بیشترین نرخ رشد علاوه بر این، انرژی های تجدیدپذیر به عنوان

قابل پیش بینی و یکنواخت بهتری نسبت به سایر سلول های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون در طول آزمایش نشان می دهد، که به آن اجازه می دهد تا با اکثر پیشرفت های نظری و تکنیکی مورد نیاز در زمینه فتوولتائیک مطابقت داشته باشد. ثانیاً، با توجه به شرایط استاندارد که از سیلیکون با بالاترین خلوص ساخته شده اند، بالاترین میزان بازده را در تمام سلول های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون دارد. ثالثاً، سلول خورشیدی c-Si به دلیل سطح خلوص بالا، طولانی ترین طول عمر را نسبت به سایر سلول های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون دارد.

با توجه به مزایای سلول های خورشیدی c-Si، سال هاست که در تأسیسات تحقیقاتی برای تحقیقات سلول های خورشیدی با کارایی بالا مورد استفاده قرار می گیرند. با این حال، هزینه سلول های خورشیدی c-Si بالاتر از سایر سلول های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون است، حتی اگر بالاترین بازده سلولی ثبت شده را داشته باشد. افزایش بازده سلولی برای سال ها چالشی برای طراحان سلول های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون بوده و هنوز هم مورد توجه است.

ضریب جذب نور سلول خورشیدی c-Si نشان می دهد که سلول خورشیدی مبتنی بر سیلیکون باید ضخامت بیشتری از ۱ سانتی متر داشته باشد تا بتواند فوتون ها را در طول موج ۱۰۰۰ نانومتر جذب کند.

ضخامت سلول های خورشیدی تأثیر عمده ای بر کارایی سلول خورشیدی دارد زیرا ضخامت تعیین می کند که چه تعداد فوتون می تواند توسط سلول خورشیدی برای تولید الکتروسیته جذب شود. به دلیل وجود رزونانس های پلاسمونیک سطحی بر روی نانو ذرات فلزی (MNP) ۱، می توانند بیش از یک راه برای افزایش خواص الکتریکی سلول های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون دارند.

بسته به موقعیت MNP ها، حداقل سه راه برای افزایش طول مسیر نور در ساختار سلول های خورشیدی و در عین حال ثابت نگه داشتن ضخامت فیزیکی آنها وجود دارد.

۲- سلول خورشیدی نانوسیم سیلیکونی

رشد افقی نانوسیم های سیلیکونی^۲ (SiNWs) روی سلول های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون با استفاده از روش اپیتاکسی پرتو

انرژی مختلفی است که از جمله آنها می توان به انرژی آبی، بادی و خورشیدی اشاره کرد.

اگر چه انرژی خورشیدی در صدر فهرست نیست، اما شروع به ایفای نقش اساسی در بازار تولید برق در کشورهای پیشرفته کرده است. در حال حاضر، انرژی PV خورشیدی به عنوان پاک ترین و فراوان ترین منبع انرژی روی زمین در نظر گرفته می شود. توانایی استفاده از این انرژی تا حد امکان به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و کاهش خطرات تغییرات آب و هوایی کمک می کند.

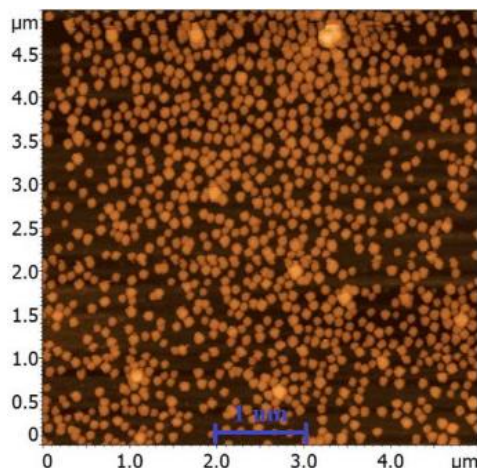
پیش بینی می شود که ظرفیت PV خورشیدی به افزایش خود ادامه دهد. این تحقیق بر روی فناوری PV خورشیدی مبتنی بر سلول های خورشیدی سیلیکونی تمرکز دارد.

سلول خورشیدی سیلیکونی تک کریستالی (sc-Si) به دلیل راندمان تبدیل فوتوالکتریک بالا و عملکرد جامع، مدت هاست که بر بازار سلول های خورشیدی تسلط داشته است [۲]. با این حال، مزیت کیفیت جامع نسبت به سایر سلول های خورشیدی سیلیکونی کریستالی و غیر کریستالی به تدریج کاهش یافته است، به دلیل توسعه سریع تکنیک اره سیم الماس، تکنیک غیرفعال سازی پیشرفته، و انواع دیگر سلول های خورشیدی [۳]. همانطور که در تولید عملی گزارش شده است، ویفرهای خورشیدی sc-Si با ساختار هرمی عمودی ساخته شده در تولیدات گیاهی دارای انعکاس متوسط ۱۰-۱۲٪ هستند که تقریباً به محدودیت تکنیک بافت شیمیایی قلیایی یک مرحله ای رسیده است [۴]. تکنیک سیلیکون سیاه را می توان برای اصلاح سطح با بازتاب بسیار کم و جذب نور زیاد استفاده کرد. سلول خورشیدی سیلیکونی سیاه به دلیل بازتاب بسیار کم (نزدیک به ۰.۳٪) در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک فرابنفش که به بهبود کارایی کمک می کند، به جهت بسیار امیدوارکننده ای برای سلول خورشیدی معمولی sc-Si تبدیل شده است. بنابراین، راندمان تبدیل سلول خورشیدی sc-Si را می توان از دیدگاه سیلیکون سیاه بیشتر بهبود بخشید [۵].

سلول خورشیدی (PV) سیلیکونی تک بلوری حجیم (c-Si) یکی از سلول های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون است. سلول خورشیدی c-Si دارای یک ساختار کریستالی منظم است که هر اتم به طور ایده آل در یک موقعیت از پیش تعیین شده قرار می گیرد. در این پایان نامه سلول خورشیدی c-Si بستری است که با توجه به مزایای فراوانی که دارد برای کاربردهای فناوری نانو استفاده خواهد شد. اول از همه، سلول خورشیدی c-Si رفتار

¹ . Metal nanoparticles

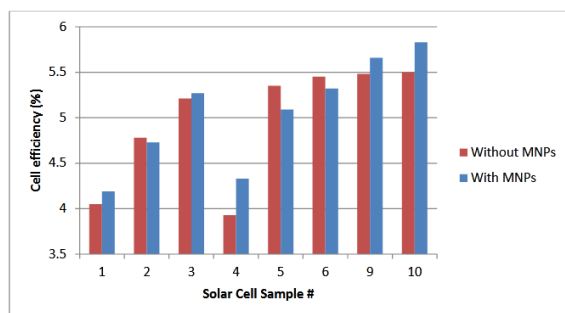
² . Silicon nanowires



شکل ۱ تصویر AFM از MNP های نقره مکعبی با طول لبه ۷۵ نانومتر که روی سلول خورشیدی c-Si قرار گرفته است.

شکل ۱ در بالا تصویر AFM از MNP های نقره مکعبی با طول لبه ۷۵ نانومتر را نشان می دهد که روی سلول خورشیدی c-Si نهشته شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی، MNP های نقره مکعبی بزرگ نور فرودی پراکنده بهتری دارند. از نتایج شبیه سازی، سلول خورشیدی c-Si با MNP های نقره مکعبی با طول لبه ۴۰ نانومتر و پوشش سطحی ۱۰ درصد دارای بازده ۳.۸۵ درصد است، در حالی که سلول خورشیدی با MNP های نقره مکعبی بزرگ، طول لبه ۸۰ نانومتر، دارای بازده ۳.۹۹ درصد است.

MNP های نقره مکعبی بزرگتر می توانند بازده سلولی کاهش یافته را به دلیل اثرات سایه کاهش دهند. شکل زیر تصویر AFM از MNP های نقره مکعبی را نشان می دهد که روی سطح جلوی سلول خورشیدی خالص c-Si قرار گرفته اند. اندازه نانوذرات نقره مکعبی در طول لبه تقریباً ۷۵ نانومتر بود. شکل ۲ نتایج تجربی سلول خورشیدی c-Si را با MNP های نقره مکعبی که در سطح جلویی رسوب کرده اند نشان می دهد.



شکل (۲): نتایج تجربی سلول خورشیدی c-Si با و بدون MNP های نقره مکعبی اندازه ۷۵ نانومتر

مولکولی ۱ (MBE) توسط گریس روپینگ در دانشگاه غربی انتاریو ساخته شد. تکه های ویفر سیلیکونی تک کریستالی (p-Si) صیقل شده تک طرفه با جهت گیری $\langle 100 \rangle$ به اندازه 12×10 میلی متر به عنوان بستر برای رشد نانوسیم سیلیکونی استفاده شد. و بسترها توسط فرآیند انتشار فسفر در دمای ۸۷۵ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه با استفاده از مخلوط نیتروژن (N_2) و اکسیژن (O_2) دوپ شده اند.

آزمایش های SiNWs با رشد افقی در یک محفظه MBE با خلاء فوق العاده ۲ (UHV)، حاوی دو منبع با سیلیکون (Si) و طلا (Au) که از بوته های گرافیتی خنک شده با آب با استفاده از گرمایش پرتو الکترونی تبخیر شدند، انجام شد. نرخ رسوب با استفاده از نمایشگرهای کریستال کوارتز که با استفاده از اندازه گیری های پراکندگی عقب رادرفورد مستقل کالیبره شده بودند، کنترل شد. زیرلایه ها توسط گرمکن پرتو الکترونی گرم شده و دمای آنها توسط ترموکوپل های نوع K کنترل می شود.

بستر متعاقباً بر روی یک نگهدارنده نمونه استاندارد با استفاده از ایندیوم (In) به عنوان یک چسب نصب شد و سپس از طریق یک محفظه قفل بار به محفظه UHV MBE منتقل شد [۶].

۳- نتایج تجربی

با توجه به روش ساخت و رسوب، MNP های نقره مکعبی واقعی که روی سلول خورشیدی c-Si رسوب می کنند با سلول خورشیدی ساخته شده در شبیه ساز متفاوت است. در ابتدا، اندازه ساخت MNP های نقره مکعبی همیشه با اندازه بهینه طراحی شده در شبیه سازی ها برابر نبود. همانطور که در بخش قبل توضیح دادیم، نانوذرات نقره مکعبی در آزمایشگاه از محلول مخلوط نقره سنتز شدند. با کنترل دقیق زمان واکنش، MNP های نقره مکعبی با جمع آوری بسیاری از مولکول های Ag در اطراف یک دانه نقره سنتز شدند. فرآیند سنتز نانوذرات نقره مکعبی سریع و همزمان با بسیاری از نانوذرات نقره مکعبی واکنش نشان داد. بسته به توزیع مولکول های Ag در محلول واکنش، سرعت سنتز شده برای MNP های نقره مکعبی مختلف می تواند متفاوت باشد. بخش دشوار این فرآیند ساخت، کنترل سرعت سنتز شده برای هر یک از آنها در طول واکنش بود. بر اساس سیستم سنتز شده ای که در آزمایشگاه وجود داشت، خطای ساخت در طول لبه ۵ نانومتر برآورد شد.

۱. Molecular beam epitaxy

۲. Ultra high vacuum

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

در مقایسه با نتایج تجربی سلول خورشیدی با MNP های نقره مکعبی با اندازه ۴۵ نانومتر، MNP های نقره مکعبی با اندازه ۷۵ نانومتر که روی سلول های خورشیدی c-Si سپرده شده اند، کارایی کمتری نسبت به سلول های بدون MNP نشان دادند. نتایج تجربی با مفهوم MNP از بخش قبل مطابقت داشت، که در آن به نظر می رسد MNP های بزرگ دارای بازده بالاتری هستند. توانایی پراکندگی با توجه به نتایج تجربی برای سلول های خورشیدی با MNP های نقره مکعبی اندازه ۷۵ نانومتر، MNP های نقره مکعبی رسوب شده در پنج نمونه (سلول خورشیدی ۱، ۳، ۴، ۹ و ۱۰ در شکل ۲) افزایش نشان دادند. راندمان سلول در مقایسه با سلول خورشیدی اصلی. میانگین افزایش کارایی سلولی از این پنج نمونه ۴۸٪ بود. با افزایش اندازه نانوذرات نقره مکعبی، توانایی پراکندگی افزایش یافت که افزایش کارایی سلولی را از MNP های نقره مکعبی افزایش داد. افزایش اندازه MNP ها باعث افزایش جابجایی قرمز طول موج تشدید می شود. هنگامی که بازده سلولی افزایش یافته توسط توانایی پراکندگی بیشتر از کاهش بازده سلولی توسط تلفات سایه بود، سلول خورشیدی پس از رسوب MNPs مکعبی Ag بازده سلولی بالاتری نسبت به سلول خورشیدی قبل از رسوب داشت. یکی دیگر از دلایل افزایش کارایی سلول مربوط به پوشش سطحی نانوذرات نقره مکعبی است. از آنجایی که MNP های نقره مکعبی به طور غیریکنواخت در قسمت جلویی سلول خورشیدی توزیع شده بودند، پوشش سطحی MNP های نقره مکعبی از یک سلول به سلول دیگر متفاوت بود.

۵- نتیجه گیری

از روش دامنه زمانی تفاضل محدود (FDTD) برای انجام تمامی شبیه سازی های نوری و فیزیکی خواص MNP استفاده شد. از این پلتفرم، بهینه سازی های گسترده ای برای تعیین بهترین پیکربندی برای افزایش کارایی سلول در ۱۲۸ شرایط شکل ذرات، اندازه، مواد، پوشش سطح و ضخامت زیرلایه انجام شد. افزایش کارایی سلول تا ۸ درصد برای MNP های نقره مکعبی با اندازه ۸۰ نانومتر در زیر لایه SiO₂ با ضخامت ۲۵ نانومتر در مقایسه با ۲ درصد برای MNP های نقره نیمکره ای نشان داده شد.

۶- مراجع

- [1] C. Zhang, L. Chen, Y. Zhu, Z. Guan, Fabrication of 20.19% Efficient Single-Crystalline Silicon Solar Cell with Inverted Pyramid Microstructure, *Nanoscale Res Lett.*, Vol. 13, 2018.
- [2] P. Wang, S. Xiao, R. Jia, H. Sun, X. Dai, G. Su, K. Tao, 18.88%-efficient multi-crystalline silicon solar cells by combining Cu-catalyzed chemical etching and post-treatment process, *Sol Energy*, Vol. 169, pp. 153-158, 2018.
- [3] M. Jamiati, B. Khoshnevisan, M. Mohammadi, Effect of Se doping on the structural and electronic properties, charge redistribution and efficiency of the Cu₂ZnSnS₄ solar cells, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 39, pp. 2181-2186, 2017.
- [4] E. Vazsonyi, K.D. Clercq, R. Einhaus, et al., Improved anisotropic etching process for industrial texturing of silicon solar cells, *Sol Energy Mater Sol Cells*, Vol. 57, pp. 179-188, 1999.
- [5] M. Jamiati. Fabrication of solar cells based on CZTSSe films with optimized chemical composition. *Journal of Quantum Chemistry and Spectroscopy | Publons*, Vol. 11, No. 35, pp. 23-30, 2021.
- [6] H. Park, J. S. Lee, H. J. Lim, D. Kim, The effect of tertiary-butyl alcohol on the texturing of crystalline silicon solar cells, *J. Korean Phys Soc.*, Vol. 55, NO. 5, pp. 1767-1771, 2009.

۱-