بهبود عملکرد سلول خورشیدی پلاسمونی

فاطمه دهیادگاری، مریم پورمحی‌آبادی

گروه برق، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده - ذرات پلاسمونی ویژگی‌های نوری منحصر به فردی دارند که قرار دادن آن‌ها در سلول‌های خورشیدی، موجب افزایش جذب می‌شوند. استفاده از آینه‌های براگ در سلول‌های خورشیدی به نوبه‌ی خود موجب افزایش جذب نور می‌شوند. در این مقاله، افزایش جذب نور در سلول خورشیدی با لایه‌ی جاذب نازک بررسی می‌شود. برای این منظور از نانوذرات نقره و آلومینیوم، آرایه‌ای از نانواستوانه-های سیلیکونی و آینه‌ی براگ استفاده می‌شود. تاثیر آینه‌ی براگ، آرایه‌ی سیلیکونی و اندازه ذرات پلاسمونی با استفاده از روش *FDTD* بررسی می‌شود. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده می‌شود که جذب نور به علت تشدید پلاسمون سطحی محلی نانوذرات افزایش می‌یابد. آینه براگ قرار گرفته در زیر لایه‌ی جاذب، به‌علت بازتاب نور انتقالی از سیلیکون، موجب افزایش جذب می‌شوند. نانواستوانه‌های سیلیکونی، موجب به‌دام‌اندازی نور ورودی و افزایش جذب آن می‌شوند. مقادیر چگالی جریان اتصال کوتاه و بازدهی این ساختار پیشنهادی به‌ترتیب برابر ۳۷/۳۸ mA/cm^2 و ۱۸/۳۵٪ به‌دست‌آمد.

کلید واژه- سلول خورشیدی پلاسمونی، تشدید پلاسمون سطحی محلی، آینه‌ی براگ، نانواستوانه‌ی سیلیکون

Improvement of Plasmonic Solar Cell Performance

Fatemeh Dehyadegari, Maryam Pourmahyabadi

Shahid Bahonar University of Kerman

Abstract- Plasmonic particles have unique optical properties which can make an increasing of the absorption coefficient in solar cells. Also, the absorption coefficient increases by using Bragg mirrors in solar cells. In this article, in order to increase the light absorption of thin film solar cell, a novel structure in which silver and aluminum nanoparticles, a silicon nano-cylinder array and Bragg mirrors are used, is presented. The influences of Bragg mirror, silicon nano-cylinder array and the size of plasmonic particles are investigated by finite difference time domain (FDTD) method. The results show the significant increasing in the light absorption due to the formation of the local surface plasmon nanoparticles. The transmitting light is reflected to the silicon layer and thus the light absorption will be increased. Also, silicon nano-cylinder array traps the incident light and improves the light absorption. The amount of short circuit current density and the efficiency for the proposed structure are achieved 37.38mA/cm^2 and %18.37, respectively. So, the results revealed that the proposed structure exhibits significantly better performance in compared with the other existing structures.

Keywords: Bragg Mirror, Local Surface Plasmon Resonance, Plasmonic Solar Cell, Silicon Nano-cylinder Array.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

سلول‌های خورشیدی توده‌ای هزینه‌ی ساخت بالایی دارند [۱]. یک روش برای کاهش هزینه ساخت سلول خورشیدی، استفاده از لایه‌ی جاذب نازک است. کاهش ضخامت لایه جاذب، موجب کاهش جذب نور در سلول می‌شود. برای کاهش این تلفات، از روش به‌دام‌اندازی نور جهت افزایش مسیر نوری داخل سلول استفاده می‌شود [۲]. یکی از روش‌های متداول به‌دام‌اندازی نور در سلول-های خورشیدی فیلم نازک، استفاده از نانوساختارهای پلاسمونی است [۳]. نانوذرات فلزی به دلیل تحریک پلاسمون‌های سطحی ویژگی‌های نوری واحدی مانند پراکندگی شدید نور دارند [۴]. تشدید پلاسمون سطحی ذرات، میدان نزدیک اطراف آن‌ها را افزایش می‌دهد [۵]. تعامل بین فوتون‌ها و ذرات فلزی از نظر فرکانس تشدید پلاسمونی بررسی شده است [۶-۷]. این فرکانس به اندازه، شکل و جنس ذرات بستگی دارد. تشدید پلاسمون سطحی فلزات نجیب مانند طلا و نقره در محدوده‌ی طول‌موج مرئی تا مادون‌قرمز قرار می‌گیرد که آن‌ها را برای کاربردهای فوتوولتاییک مناسب می‌سازد [۸-۹]. در این مقاله، طرح جدیدی از سلول نوری ارائه شده است که در آن از ذرات نقره در بالا، دیسک‌های آلومینیوم در پشت سلول و آرایه‌ای از نانواستوانه‌های سیلیکونی استفاده شده است. همچنین تأثیر اندازه ذرات نقره و دیسک‌های آلومینیوم و آرایه‌ی سیلیکونی در افزایش جذب نور سلول-خورشیدی بررسی شده است.

۲- ساختار سلول خورشیدی پیشنهادی

در این ساختار، ذرات نقره و لایه‌های دی‌الکتریک به-ترتیب برای افزایش جذب نور در لایه‌ی فعال سلول و بازتاب نور انتقالی از سیلیکون استفاده می‌شوند. بازدهی کوانتومی سلول طبق رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

$$QE(\lambda)=\frac{P_{abs}(\lambda)}{p_{in}(\lambda)} \qquad (۱)$$

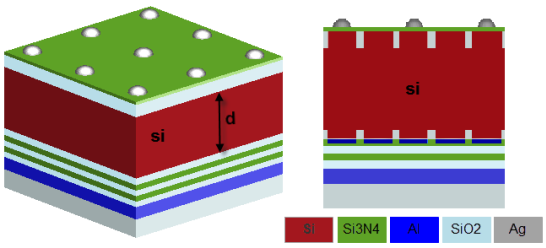
به طوری که $P_{abs}(\lambda)$ و $p_{in}(\lambda)$ به ترتیب توان جذب شده داخل سیلیکون و توان ورودی هستند. برای بررسی مقدار افزایش جذب داخل سیلیکون فاکتور، $g(\lambda)$ به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$g(\lambda)=\frac{QE_{structure}(\lambda)}{QE_{bare}(\lambda)} \qquad (۲)$$

با این فرض که همه نور جذب شده تبدیل به زوج الکترون-حفره شده و سپس در مدار خارجی جمع آوری شوند، بازدهی کوانتومی خارجی (EQE)، برابر جذب داخل سیلیکون است. چگالی جریان اتصال کوتاه سلول طبق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$J_{sc}=\int \frac{q\lambda}{hc}EQE(\lambda)I_{AM\,1.5}(\lambda)d\lambda \qquad (۳)$$

به طوری که q بار اولیه، λ طول موج، h ثابت پلانک و c سرعت نور است. ساختار پیشنهادی شامل لایه جاذب سیلیکونی با ضخامت $d=\mu 1m$، نانوذرات نقره و نانواستوانه‌های سیلیکونی در بالا و پایین لایه‌ی فعال است. یک بازتاب‌کننده در پشت سلول قرار گرفته که این بازتابنده شامل دیسک آلومینیومی و لایه‌های متناوب دی‌الکتریک از جنس Si_3N_4 و SiO_2 است که در شکل ۱(الف- ب) نشان داده شده است.



(الف) (ب)

شکل ۱ : (الف)، نمای سه بعدی (ب)، نمای دوبعدی سلول خورشیدی پیشنهادی

از نرم افزار FDTD (روش تفاضل محدود در حوزه زمان) برای تحلیل جذب نور در لایه فعال سلول خورشیدی استفاده می‌شود. از نتایج حاصل از شبیه سازی، فاکتور افزایش جذب، G و مقدار جریان اتصال کوتاه سلول، J_{sc} در محدوده طول موج ۱۲۰۰-۳۰۰nm محاسبه می‌شود. ثابت‌های نوری مواد از مدل پالیک به-دست آمده است [۱۰]. در شبیه سازی FDTD، شرایط مرزی در جهت x و y، periodic و در جهت z، PML در نظر گرفته می‌شود.

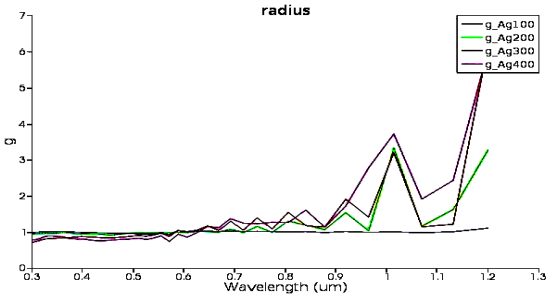
۳- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی تأثیر نانوذرات نقره در افزایش جذب، ابتدا ساختار را بدون در نظر گرفتن آرایه سیلیکونی و آینه‌ی براگ شبیه‌سازی می‌کنیم. شکل (۲) مقدار افزایش جذب سیلیکون (g) را برای ساختاری با لایه‌ی ضد بازتاب از جنس Si_3N_4 و با ضخامت ۵۰nm و فاصله بین ذرات

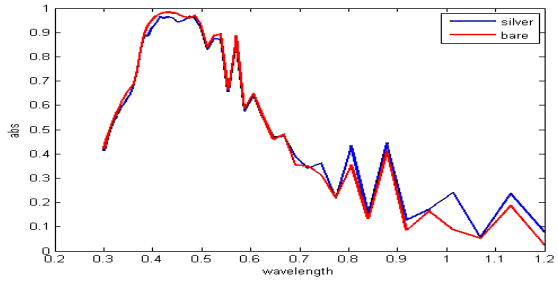
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

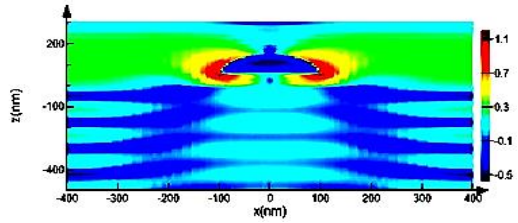
برابر ۸۰۰ nm ، به ازای ذرات از جنس نقره با شعاع متغیر از ۵۰-۱۵۰nm در محدوده طول موج شبیه سازی نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش شعاع، قله افزایش جذب به سمت طول موج‌های مادون قرمز انتقال می‌یابد. به ازای ذرات با شعاع کوچکتر، مقدار افزایش جذب سلول در طول موج‌های بلند چندان قابل مشاهده نیست؛ اگرچه در طول موج‌های کوتاه عملکرد بهتری نسبت به ذرات با شعاع بزرگتر نشان می‌دهند. ذرات با شعاع بزرگتر به دلیل جذب پارازیتی، در طول‌موج‌های کوتاه که سیلیکون جذب خوبی دارد، موجب کاهش جذب سلول می‌شوند. شعاع بهینه ذرات به گونه‌ای انتخاب می‌شود که هم در طول موج‌های کوتاه جذب پارازیتی کاهش یابد و هم در طول موج‌های بلند افزایش جذب قابل مشاهده باشد. بنابراین شعاع ۱۰۰nmبه‌عنوان شعاع بهینه در نظر گرفته‌می‌شود. قرار دادن نانوذرات در ساختار به دلیل پلاریتون پلاسمون سطحی، موجب انتشار نور در سطح مشترک بین ذرات نقره و لایه Si_3N_4 شده و در نتیجه مقدار بازتاب نور از سطح کاهش می‌یابد. این ذرات همچنین موجب افزایش میدان در اطراف خود شده و در نتیجه مقدار جذب را افزایش می‌دهند. نور تابشی به ذرات نقره با زاویه‌های مختلفی پراکنده می‌شود که این امر موجب افزایش طول مسیر نوری در لایه جاذب و افزایش جذب نور می‌شود. شکل ۳ نمودار جذب را برای ساختار پایه و ساختار با ذرات به شعاع ۱۰۰ nm نشان می‌دهد. شکل۴ (الف و ب) پروفایل شدت میدان را برای ساختار فقط با ذرات پلاسمونی و ساختار بدون ذرات در طول موج ۹۵۴nm نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشخص است، شدت میدان برای ساختار با ذرات نقره به شعاع ۱۰۰nm، در نزدیکی ذرات افزایش یافته است. برای افزایش جذب سلول می‌توان از آرایه‌ای از نانواستوانه‌های سیلیکونی در بالا و پایین سلول با شعاع ۱۶۰nm، دوره تناوب ۴۰۰nm استفاده کرد، بین این نانواستوانه‌ها با SiO_2 پرشده است. ارتفاع نانواستوانه‌های قرار گرفته در بالا و پایین لایه‌ی فعال به‌ترتیب برابر ۲۰۰nm و ۱۰۰nm است. وجود این نانواستوانه‌ها موجب به‌دام‌اندازی نور و افزایش جذب نور می‌شوند. ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک بازتابنده برابر ۹۰nm و شعاع و ارتفاع دیسک‌های آلومینیومی در این بازتابنده به ترتیب برابر ۱۶۰nm و ۶۰ nm است. بین این ذرات و نانواستوانه‌ها یک لایه‌ی جداکننده از جنس SiO_2 و با ضخامت ۱۰nm قرار گرفته است. شکل ۵ نمودار جذب را برای سلول با آرایه‌ی سیلیکونی و سلول پیشنهادی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که لایه‌های متناوب دی‌الکتریک با ضریب شکست متفاوت، مانند آینه‌ی براگ عمل کرده و بازتاب نور را افزایش می‌دهند. همچنین دیسک‌های آلومینیوم قرار گرفته در زیر نانواستوانه‌های سیلیکونی به دلیل پلاسمون سطحی موجب بازتاب و پراکندگی نور انتقالی و در نتیجه افزایش جذب می‌شوند.



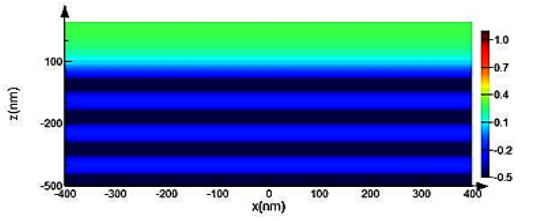
شکل ۲: مشخصه افزایش جذب ذرات نقره به ازاء شعاع‌های مختلف



شکل۳: مشخصه جذب سیلیکون برای ساختار پایه و ساختار با ذرات نقره



(الف)



(ب)

شکل ۴: (الف)، پروفایل شدت میدان برای ساختار با ذرات نقره (ب)، ساختار بدون ذرات

مشخصات ولتاژ-جریان و توان بر حسب تابعی از طول موج برای ساختار پیشنهادی در شکل ۶ به‌دست آمده

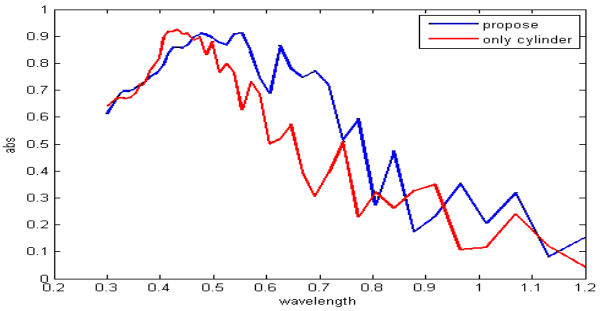
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

است. با توجه به نمودارها مشخص می‌شود که چگالی جریان اتصال کوتاه ساختار پیشنهادی برابر $Jsc=۳۷/۳۸mA/cm^2$ است. ویژگیهای مربوط به ۶ نوع سلول نوری در جدول (۱) قیاس شده‌است.

جدول۱: قیاس ویژگیهای انواع سلولهای نوری

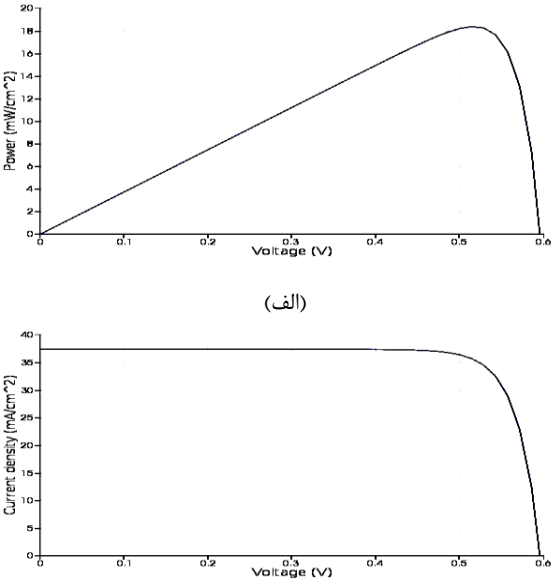
ساختار	Jsc	η	d
سلول خورشیدی با نیم‌کره‌های نقره در بازتابنده‌ی زیرین[۲]	۱۱/۵۱ (mA/cm²)	۴٪/۹۹	۰/۳ mμ
سلول خورشیدی با صفحه‌های دایره‌ای نقره در بازتابنده‌ی زیرین[۱]	۱۰/۲۸ (mA/cm²)	۴٪/۶۶	۰/۴ mμ
سلول خورشیدی با استوانه‌های نقره در بازتابنده‌ی زیرین[۶]	۲۳/۱ (mA/cm²)	----	۱ mμ
سلول خورشیدی با صفحه‌های دایره‌ای آلومینیوم در بازتابنده-ی زیرین[۵]	۲۷/۸ (mA/cm²)	----	۱ mμ
سلول خورشیدی با ۴لایه پلاسمونی در روی آن[۴]	۳۵/۰۸ (mA/cm²)	۱۴٪/۳۶	۱۲ mμ
ساختار پیشنهادی	۳۷/۳۸ (mA/cm²)	۱۸٪/۳۵	۱ mμ



شکل ۵: طیف جذب برای ساختار فقط با نانواستوانه‌های سیلیکونی و طیف جذب ساختار پیشنهادی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طرحی جهت افزایش جذب در سلول های خورشیدی پلاسمونی ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات فلزی نقره همزمان با آرایه‌ی سیلیکونی و آینه‌ی براگ در سلول های خورشیدی فیلم نازک موجب افزایش جذب نور می‌شود. با استفاده از ساختار پیشنهادی مقدار جریان اتصال کوتاه سلول حدود ۵۰٪ افزایش می‌یابد.



(الف)

(ب)

شکل ۶: (الف) نمودار ولتاژ- توان (ب)، نمودار ولتاژ- جریان برای سلول خورشیدی پیشنهادی

مراجع

[1] P. R. Mohanta, J. Patel, J. Bhuva, and M. Gandhi. “A Review on Solar Photovoltaics and Roof Top Application of It.” *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, pp. 2394-2444, 2015.

[2] L. J. Crudgington., T. Rahman, and S. A. Boden."Development of amorphous silicon solar cells with plasmonic light scattering." *Vacuum 139*, pp. 164-172, 2016.

[3] Hungerford, Chanse D., and Philippe M. Fauchet. "Design of a plasmonic back reflector using Ag nanoparticles with a mirror support for an a-Si: H solar cell." *AIP Advances*,Vol. 7, No. 7, p. 075004 , 2017.

[4] M. A. Garcia, “Surface plasmons in metallic nanoparticles: fundamentals and applications,” J. Phys. D: Appl.Phys. Vol. 44, No. 28, p.283001, 2011.

[5] D. H. Lee, J. Y. Kwon, S. Maldonado, A. Tuteja, and A. Boukai."Extreme light absorption by multiple plasmonic layers on upgraded metallurgical grade silicon solar cells." *Nano letters*, Vol. 14, No. 4, pp. 1961-1967, 2014.

[6] D. Zhang, Y. Kuang, X. Hong, Y. Liu, and X. Yang."Plasmon enhancement of optical absorption in ultra-thin film solar cells by rear located aluminum nanodisk arrays." *Optical and Quantum Electronics*,Vol 49, No. 4, p.161, 2017.

[7] V. E. Ferry, M. A. Verschuuren, H. B. Li, E. Verhagen, R. J. Walters, R. E. Schropp, H. A. Atwater, and A. Polman. "Plasmonic light trapping for thin film A-SI: H solar cells." In Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 000760-000765. IEEE, 2010.

[8] Y. Li, S. Dunham, S. Pillai, Z. Ouyang, A. Barnett, A. Lochtefeld, and A. Lennon. "Design of anodic aluminum oxide rear surface plasmonic heterostructures for light trapping in thin silicon solar cells." *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 4, No. 5, pp. 1212-1219, 2014.

[9] N. Alemu, and F. Chen. "Plasmon-enhanced light absorption of thin-film solar cells using hemispherical nanoparticles." *physica status solidi (a)*,Vol. 211, No. 1, pp. 213-218, 2014.

[10] ED Palik - Handbook of optical constants of solids, 1985.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]