بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

بررسی افزایش جذب در سلول‌های خورشیدی پلاسمونی با نانوذرات نقره

مرتضی صفری پاسکه، صابر فرجامی شایسته

گیلان، رشت، دانشکده علوم پایه دانشگاه گیلان

چکیده - نانوساختارهای پلاسمونی برای بهبود جذب نور در سلول های خورشیدی مورد علاقه اند. تعامل قوی نانوساختارهای فلزی کوچک با نور اجازه کنترل بر انتشار نور در مقیاس نانو و در نتیجه طراحی سلول‌های خورشیدی نازک که در آن نور در لایه فعال به دام افتاده و بطور موثر جذب می‌شود، را می‌دهد. افزایش جذب لایه ی سیلیکونی در سلول های خورشیدی سیلیکونی با نانوذرات نقره که شامل نانوکره می باشد با روش FDTD مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که جذب نور از سیلیکون با توجه به تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده بهبود یافته است.

کلید واژه- پلاسمون سطحی، سلول خورشیدی سیلیکونی، نانوذرات نقره .

Investigation of absorption enhancement in plasmonic solar cells with silver nanoparticles

Morteza Safari Paskeh, Saber Farjami Shayesteh

Guilan, Rasht, Namjoo Street, University of Guilan

Abstract- Plasmonic nanostructures have been recently investigated as a possible way to improve absorption of light in solar cells. The strong interaction of small metal nanostructures with light allows control over the propagation of light at the nanoscale and thus the design of ultrathin solar cells in which light is trapped in the active layer and efficiently absorbed. Absorption enhancement in the silicon layer in silicon solar cells containing silver nanoparticles studies by FDTD method. The results indicate that light absorption in silicon optimized due to localized surface plasmon resonance.

Keywords: Surface plasmon, Silicon solar cell, Silver nanoparticle

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

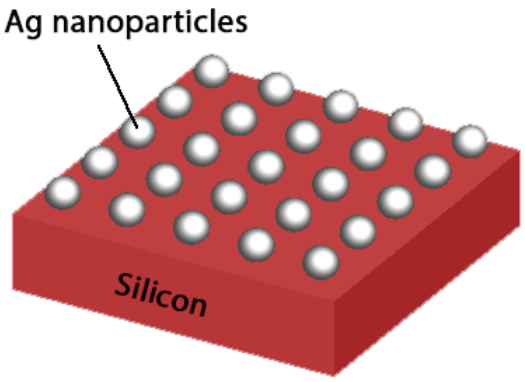
۱- مقدمه

در حال حاضر، برخی از روش‌های بهبود جذب و افزایش بهره‌وری از سلول‌های خورشیدی فیلم نازک همچون بافت سطحی که برای افزایش به دام انداختن نور مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱ و ۲]، و آرایه‌های نانوسیم سیلیکونی که به عنوان یک فیلم ضد انعکاس به منظور کاهش بازتاب سطح قرار می‌گیرد، ارائه شده است[۳ و ۴]. راه مهم دیگری نیز وجود دارد که از منعکس کننده بافت یافته برای افزایش به‌دام اندازی نور استفاده می‌شود[۵ و ۶]. اما سلول‌های خورشیدی با بازتابنده پشتی ممکن است از اتلاف نوترکیبی سطح پشتی رنج ببرند. علاوه‌براین، از یک نانو ساختاری که بر روی سطح یک سلول خورشیدی نهشت یافته نیز استفاده می‌شود[۷ - ۹].مجموعه‌ای از تشدیدهای پلاسمون که توسط نوسانات جمعی بارهای سطحی ایجاد می‌شود به عنوان پلاسمون سطحی شناخته می‌شوند، که بر اساس نوع فلز و هندسه‌ی ساختار، تشدیدهای پلاسمون سطحی می‌تواند در بخش‌های مختلف طیف قرار گیرد. تعامل قوی نانوساختارهای فلزی کوچک با نور اجازه کنترل بر انتشار نور در مقیاس نانو و در نتیجه طراحی سلول‌های خورشیدی نازک که در آن نور در لایه فعال به دام افتاده و بطور موثر جذب می‌شود، را می‌دهد.

ما در این مقاله نانوکره‌های فلزی Ag را در نظر می‌گیریم، چون به عنوان ماده‌ای برای اثرات پلاسمون‌های سطحی جایگزیده (LSP) و جذب کم نور مورد استفاده قرار می‌گیرد، از اینرو کاربرد گسترده‌ای برای سلول‌های خورشیدی سیلیکون تک بلوری دارد.

۲- جذب در سلول خورشیدی سیلیکونی

ما نرم افزار تجاری FDTD (روش تفاضل محدود در حوزه زمان) برای شبیه سازی مورد استفاده قرار داده‌ایم. منبع تابش یک موج با قطبش TM با طول موج در محدوده‌ی ۴۰۰ نانومتر تا ۱۱۰۰ نانومتر، و میدان الکتریکی در راستای محور x قطبیده شده است. شرایط مرزی جذب، لایه‌های کاملاً انطباق یافته (PML) مرزهای دامنه‌ی محاسباتی را مشخص می‌کند، شکل (۱).



شکل ۱: آرایه‌ی نانوکره‌های فلزی Ag بر روی لایه‌ی سیلیکون در محیط هوا

به منظور ارزیابی بازده‌ی سلول خورشیدی، بازده‌ی کوانتمی $QE(\lambda)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که $P_{in}(\lambda)$ و $P_{abs}(\lambda)$ به ترتیب توان نور تابشی و نور جذب شده در طول موج λ در سلول خورشیدی سیلیکونی می‌باشد. بازده ی کوانتمی کل IQE به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$IQE=\frac{\int \frac{\lambda}{hc}\, QE(\lambda)\, I_{AM\,1.5}(\lambda)d\lambda}{\int \frac{\lambda}{hc}\, I_{AM\,1.5}(\lambda)d\lambda} \qquad (۲)$$

که h ثابت پلانک و c سرعت نور در خلاء است و $I_{AM\,1.5}$ طیف خورشیدی AM 1.5 می باشد. در معادله (۲) صورت کسر برابر با تعداد فوتون های جذب شده توسط سلول خورشیدی و مخرج کسر به معنی تعداد فوتون‌هایی است که بر روی سلول خورشیدی سقوط می‌کند. برای ارزیابی بهبود جذب نور سلول خورشیدی با ذرات فلزی ضریب افزایش جذب G به صورت زیر معرفی می‌شود:

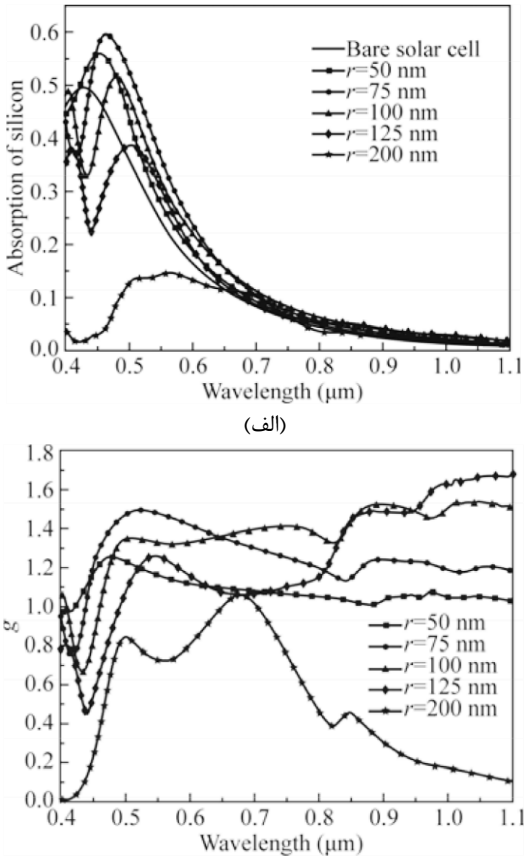
$$g(\lambda)=\frac{QE_{particle}(\lambda)}{QE_{bare}(\lambda)}=\frac{P_{np}(\lambda)}{P_{bare}(\lambda)} \qquad (۳)$$

$$G=\frac{IQE_{particle}}{IQE_{bare}}=\frac{\int \lambda\, P_{np}(\lambda)\, I_{AM\,1.5}(\lambda)d\lambda}{\int \lambda\, P_{bare}(\lambda)\, I_{AM\,1.5}(\lambda)d\lambda} \qquad (۴)$$

که $P_{np}(\lambda)$ و P_{bare} به ترتیب مربوط به مقدار توان جذب نور لایه‌ی سیلیکونی در سلول خورشیدی لایه نازک، با و بدون نانوذره می‌باشد. $IQE_{particle}$ و IQE_{bare} به ترتیب

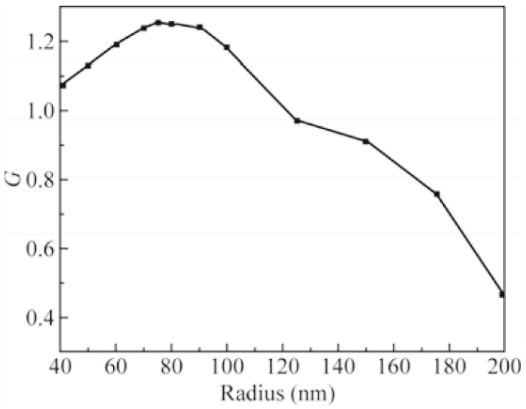
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

مقادیر توان کل جذب شده توسط سیلیکون با و بدون نانوذرات Ag هستند. شکل (۲) طیف جذبی سیلیکون را در سلول‌های خورشیدی با نانوذرات Ag نشان می‌دهد. در شکل (۲) الف، می‌توان دید که موقعیت طول موج قله‌ی جذب و مقدار قله، هر دو با شعاع تغییر می‌کند. قله‌ی بزرگتر مقدار ۰/۵۹ را در طول موج ۴۶۵ نانومتر و شعاع ۷۵ نانومتر بدست می‌دهد. در همین حال، قله‌ی جذب وقتی که شعاع از ۵۰ نانومتر به ۱۲۵ نانومتر افزایش یافته به سمت فروسرخ انتقال می‌یابد، در حالیکه مقدار قله‌ی جذب بعد از اولین رشد شعاع از ۵۰ نانومتر به ۷۵ نانومتر، کاهش یافته است. اگرچه، وقتی شعاع ۲۰۰ نانومتر بود، جذب نور بسیار کمتر از آن در سیلیکون بدون نانوذره است.



شکل ۲: (الف) طیف جذب و (ب) افزایش جذب $g(\lambda)$ سیلیکون در سلول‌های خورشیدی با نانوذرات کروی Ag، که دوره برابر ۴۰۰ نانومتر و ضخامت لایه‌ی سیلیکونی ۵۰۰ نانومتر است.

پس وقتی که قطر کره برابر با دوره باشد، نانوذرات Ag به هم نزدیک می‌شوند که به‌صورت یک فیلم انعکاسی می‌شود و مقدار زیادی از نور تابشی را بازتاب می‌کند و بخش بزرگ دیگری توسط خود Ag جذب می‌شود. شکل (۲) ب افزایش طیف جذبی $g(\lambda)$ را با شعاع های متفاوت نشان می‌دهد. یک بهبود قابل توجهی از جذب در ناحیه‌ی نزدیک به فروسرخ با افزایش پراکندگی روبه جلو به علت تشدید پلاسمون های سطحی جایگزیده وجود دارد. بنابراین وقتی طول موج کوتاه‌تر از یک طول موج خاصی (۴۰۰ نانومتر تا ۵۰۰ نانومتر) است $g(\lambda)$ کمتر از ۱ است. برای مثال، وقتی که شعاع ۷۵ نانومتر و طول موج کوتاه‌تر از ۴۶۷ نانومتر باشد. به دو نکته اشاره می‌شود: اول، نانوذرات Ag جذب نور را در این محدوده‌ی طول موج به علت طبیعت و جذب باند d دارد. دوم، جذب سیلیکون متناسب با مربع میدان الکتریکی است، و میدان کل در سیلیکون می‌تواند به عنوان لایه‌ی بالایی میدان انتقالی بکار رود و میدان را پراکنده کند. وقتی طول موج کمتر از طول موج تشدید پلاسمون است، یک انتقال فاز بین میدان عبوری و میدان پراکنده شده ظهور پیدا می‌کند.

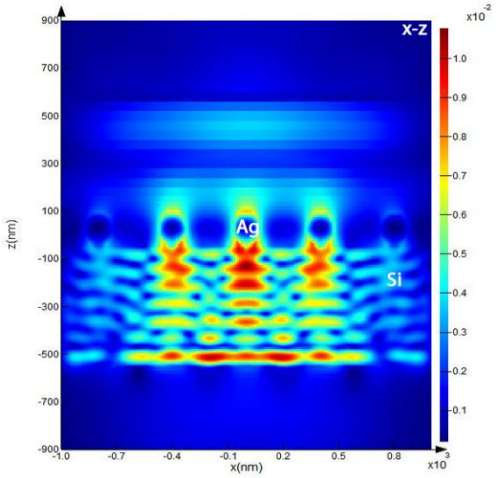


شکل ۳: نسبت فاکتور افزایش جذب و شعاع نانوکره ی Ag وقتی که دوره برابر ۴۰۰ نانومتر و ضخامت لایه‌ی سیلیکونی ۵۰۰ نانومتر است.

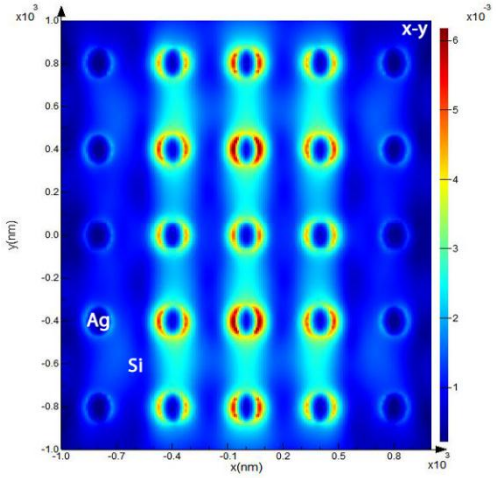
۳- افزایش ضریب G

شکل (۳) نسبت افزایش G و شعاع نانوکره‌ی Ag را نشان می‌دهد. افزایش G با افزایش شعاع متناسب است تا اینکه G به یک بیشینه برسد سپس از آن شروع به کاهش تدریجی می‌کند، که بیشینه‌ی G=1.25 در شعاع ۷۵ نانومتر است. شکل (۴) و (۵) پروفایل میدان مغناطیسی را برای یک آرایه‌ای از نانوذرات Ag نشان می‌دهد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]



شکل ۴: پروفایل میدان مغناطیسی برای نانوذرات Ag به شعاع ۷۵ نانومتر در صفحه *x-z* با استفاده از نرم افزار FDTD.



شکل ۵: پروفایل میدان مغناطیسی برای نانوذرات Ag به شعاع ۷۵ نانومتر در صفحه *x-y* با استفاده از نرم افزار FDTD.

شکل بالا نشان می‌دهد که قسمتی از تابش جذب لایه‌ی سیلیکونی و قسمتی دیگر توسط نانوذرات به سمت اطراف بازتاب می‌کند. لایه‌ی فعال سیلیکونی بسیار حساس به تشدید پلاسمون سطحی است. نواحی قرمز رنگ عمق شدت میدان را نشان می‌دهند. می‌توان مشاهده نمود که شدت میدان‌ها در بین نانوذرات بدلیل به دام اندازی نور بسیار بیشتر از نواحی دیگر است.

۴- نتیجه‌گیری

وجود نانوذرات فلزی در سلول های خورشیدی سیلیکونی لایه نازک می تواند به دلیل تشدید پلاسمون سطحی اعث افزایش جذب نور سیلیکون گردد. ما در این از روش FDTD استفاده نمودیم که در مقایسه با کارهای مشابه روش کارآمدتری است، زیرا می توان تغییرات میدان های الکتریکی و مغناطیسی را که به هم وابسته هستند در گام های زمانی مشاهده نمود و میزان جذب در لایه ی جاذب سیلیکونی را به راحتی بررسی نمود. برای طراحی سلول‌های خورشیدی پلاسمونی سودمند است که جهت بهینه‌سازی فاصله‌ی دوره نانوذرات از شعاع نانوذره‌ی کروی بیشتر باشد تا از انعکاس جلوگیری شود و باعث بهبود جذب در لایه فعال سیلیکونی گردد. بنابراین برای مطالعه‌ی بیشتر نظری و طراحی سلول‌های خورشیدی پلاسمونی فیلم نازک استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان مفید است.

مراجع

[1] Rui Xu, Xiaodong Wang, Liang Song, Wen Liu, An Ji, Fuhua Yang and Jinmin Li, **Opt. Express** 20, 5061(2012).

[2] Chuanhao Li, Liangping Xia, Hongtao Gao, Ruiying Shi, Chen Sun, Haofei Shi and Chunlei Du, **Opt. Express** 20, A589 (2012).

[3] Vladislav Jovanov, Ujwol Palanchoke, Philipp Magnus, Helmut Stiebig, Jürgen Hüpkes, Porponth Sichanugrist, Makoto Konagai, Samuel Wiesendanger, Carsten Rockstuhl and Dietmar Knipp, **Opt. Express** 21, A595 (2013).

[4] LIN Xiao-yuan, HUANG Qian, ZHANG De-kun, MU Cun, ZHAO Ying, ZHANG Cun-shan and ZHANG Xiao-dan, **Journal of Optoelectronics Laser** 24, 523 (2012). (in Chinese)

[5] Wiesendanger S., Zilk M., Pertsch T., Rockstuhl C. and Lederer F., **Opt. Express** 21, A450 (2013).

[6] Song B. S., Yamada S., Asano T. and Noda S., **Opt.**

[7] P. Spinelli, V. E. Ferry, J. van de Groep, M. van Lare, M. A. Verschuuren, R. E. I. Schropp, H. A. Atwater and A. Polman, **Journal of Optics** 14, 024002 (2012).

[8] Richard S. Kim, Jinfeng Zhu, Jeung Hun Park, Lu Li, Zhibin Yu, Huajun Shen, Mei Xue, Kang L. Wang, Gyechoon Park, Timothy J. Anderson and Qibing Pei, **Opt. Express** 20, 12649 (2012).

[9] Jonathan A. Scholl, Ai Leen Koh and Jennifer A. Dionne, **Nature** 483, 421 (2012).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]