

بررسی تاثیر استفاده از خواص پلاسمونی نانو ذرات نقره در افزایش جذب نور سلول خورشیدی لایه نازک با شبیه سازی

سه بعدی

محمدرضا رخشانی^{۱*}، عطیه مهرگان^۲، محمدعلی منصورى بیرجندی^۲

^{۱*} استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل mrakshani@uoz.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۲ کارشناسی ارشد برق الکترونیک، موسسه آموزش عالی هانف

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

چکیده

در این مقاله به بررسی و شبیه سازی سلول خورشیدی سیلیکونی لایه نازک شامل نانوساختارهای فلزی با هدف بهبود عملکرد و جذب نور سلول پرداخته شده است. ابتدا سلول خورشیدی مسطح مطالعه شد و نمودار طیف جذب نور برای آن به دست آمد. سپس نانوذرات کروی و نانوساختارهای فلزی از جنس فلز نقره به صورت جاسازی شده در لایه جاذب سلول قرار داده شد. نتایج نشان می دهد که حضور نانوساختارها موجب متمرکز کردن نور برخوردی در سلول های خورشیدی طراحی شده، می شود. در این حالت تشدیدهای نوری بر اثر برهمکنش نور ورودی با نانو ساختارهای فلزی افزایش می یابد و باعث حرکت نور در سطح مشترک فلز و نیمه رسانا می شود که همان پدیده پلاسمون پلاریتون موضعی است. نتایج شبیه سازی که با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان به صورت سه بعدی انجام شده، بازده را تقریباً ۳۵ درصد، J_{sc} سلول خورشیدی را به مقدار $36/2 \text{ mA/cm}^2$ و ضریب انبساط را $42/6\%$ نشان می دهد.

کلیدواژه

سلول خورشیدی لایه نازک، افزایش بازده سلول خورشیدی، نانوساختارهای نقره.

مقدمه

از روش های به دام اندازی نور استفاده کرد. استفاده از نانوذرات و خواص پلاسمونی آن ها برای دام اندازی نور می تواند پیشنهاد بسیار خوبی باشد. در سال های اخیر سلول های خورشیدی شامل نانوساختارهای فلزی توجه زیادی به خود جلب کرده اند. نانوساختارها را می توان بر روی هر دو سطح بالا و پایین سلول و یا به صورت جاسازی شده^۱ در لایه فعال سلول استفاده کرد [۴-۶]. شواهد تجربی زیادی وجود دارد که از نانوساختارها به عنوان لایه ضد انعکاس به منظور کاهش بازتاب سطح نیز استفاده می شود [۷ و ۸]. روش مهم دیگری نیز وجود دارد که از منعکس کننده بافت یافته برای افزایش به دام اندازی نور استفاده می شود [۹ و ۱۰].

در سال های اخیر استفاده از نانوذرات برای بهبود خواص سلول های خورشیدی، توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. در مرجع شماره [۱۱]، با استفاده از آرایه نانوذرات کروی و نیم کروی نقره حدود ۲۶٪ افزایش جذب نوری داشته است. در مرجع [۱۲]، با استفاده از نانوذرات با اندازه های حدود ۴ تا

سلول های خورشیدی که انرژی خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند توانایی فراهم کردن یک منبع انرژی نامحدود تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست را دارند [۱]. از آنجا که هزینه فناوری های فتوولتایی فعلی در مقایسه با فناوری های سوخت فسیلی که امروزه انرژی مورد نیاز جامعه بشری را تامین می کند، بیشتر است، گرایش و توجه به سمت سلول های خورشیدی با لایه نازک با ضخامت های چند صد نانومتری است [۲]. در یک سلول خورشیدی سیلیکونی نور تابشی به سلول در طول موج های کوتاه به طور کامل در لایه سیلیکون جذب می شود اما در طول موج های بلند سیلیکون در مقابل نور تابشی به صورت شفاف بوده و بیشتر نور تابشی از ساختار عبور می کند [۳]. بنابراین جذب نور یکی از مشکلات اساسی در کارایی سلول است.

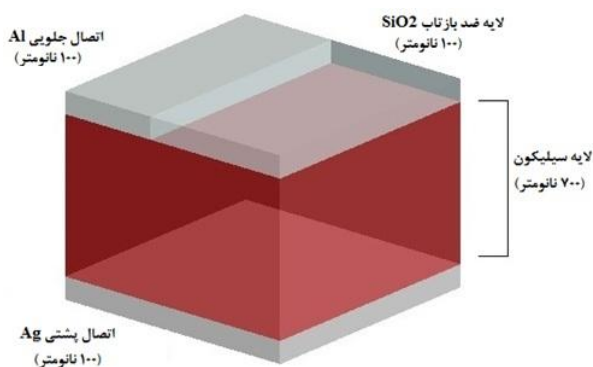
در سلول های خورشیدی لایه نازک به دلیل کم بودن ضخامت سیلیکون این مشکل اساسی تر از سایر انواع آن است. برای غلبه بر محدودیت ضخامت کم در دستیابی به جذب نور بالا، می توان

¹ Embedded

بهبودیافته‌ای برای سلول خورشیدی از قبیل افزایش قابل توجه جذب و بازدهی دست پیدا خواهیم کرد.

شبیه‌سازی سلول خورشیدی و نتایج حاصل از آن

شکل ۱ طرحواره سلول خورشیدی سیلیکونی ابتدایی مسطح را نشان می‌دهد. محاسبات نوری سلول با روش محاسباتی FDTD (تفاضل محدود در حوزه زمان) سه‌بعدی انجام شده است. منبع ورودی یک موج با قطبش TM و طول موج ۳۵۰ تا ۱۳۰۰ نانومتر برای طیف تابش AM1.5 و 100 mW/cm^2 در نظر گرفته شده است. ثابت‌های نوری مربوط به فلز نقره و نیمه‌هادی سیلیکون با توجه به نظریه‌های منابع مختلف در دسترس استخراج شده است [۱۵]. شرایط مرزی در جهت X و Y، متناوب و در جهت Z لایه‌های کاملاً انطباق یافته (PML)، در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱. ساختار اولیه سلول خورشیدی سیلیکونی لایه نازک

در این مقاله، تمامی ساختارهای سلول خورشیدی ارائه شده از لحاظ جنس مواد و تمام شرایط دیگر یکسان هستند و فقط از نظر ساختاری با یکدیگر فرق دارند. ابعاد فیلم سیلیکونی و پیوندها در تمامی ساختارهای ارائه شده یکسان می‌باشد. لازم به ذکر است که همه آنالیزهای اعمال شده نیز از لحاظ اندازه و مکان در تمامی ساختارها دقیقاً یکسان می‌باشد.

جذب نور کلی سلول از طریق عبارت زیر قابل محاسبه است:

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda) \quad (1)$$

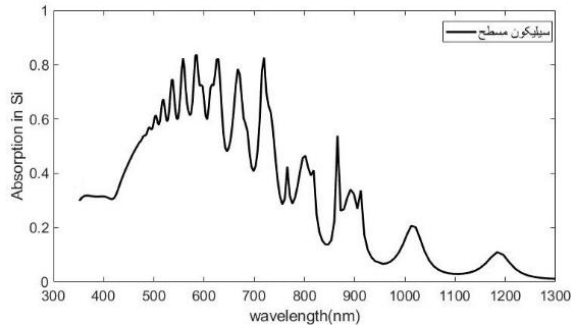
که در آن R و T به ترتیب پاسخ‌های طیفی بازتاب و عبور نور سلول خورشیدی مدل‌سازی شده، می‌باشند. $A(\lambda)$ شامل دو بخش است: جذب در لایه فعال سیلیکون و جذب در لایه اتصال پشتی نقره. آنچه باعث تولید جریان فوتونی می‌شود جذب در لایه سیلیکون است و جذب در لایه نقره باعث تلفات پارازیتی می‌شود. بنابراین باید جذب نور در هر لایه از طریق

۳۸ نانومتر به جریان اتصال کوتاه $8/12 \text{ mA/cm}^2$ و بازدهی ۴/۷۶٪ دست یافته‌اند.

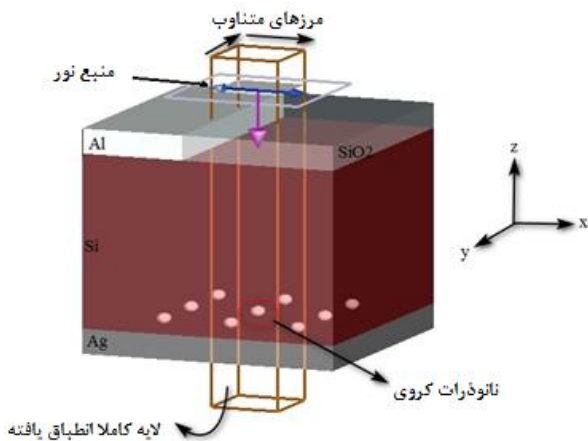
برای فرکانس‌هایی تا طیف مرئی، فلزات بشدت بازتابنده‌اند و اجازه نمی‌دهند امواج الکترومغناطیسی درون آن‌ها منتشر شوند. معمولاً فلزات به‌عنوان روکش برای موج‌برها و تشدیدکننده‌ها برای تابش الکترومغناطیس در فرکانس‌های میکروویو و مادون‌قرمز کار می‌کنند و فقط یک مقدار جزئی از امواج الکترومغناطیسی به فلز نفوذ می‌کند. در فرکانس‌های بالاتر از مادون‌قرمز و فرکانس‌های از طیف نور قابل مشاهده، نفوذ میدان به طرز قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و منجر به افزایش اتلاف و پراکندگی می‌شود. در فرکانس‌های فرابنفش فلز رفتار دی‌الکتریک از خود نشان می‌دهد و اجازه انتشار امواج را می‌دهد. فلزات قلیایی مثل سدیم در فرکانس‌های فرابنفش شفاف هستند و فلزات نجیب مثل طلا و نقره به دلیل انتقال بین نوارهای الکترونی جذب شدید نور را دارند و در این ناحیه اتلاف زیادی را از خود نشان می‌دهند [۱۳].

در میان فلزات مورد استفاده در نانو ساختارها، طلا و نقره محبوب‌تر هستند زیرا ویژگی‌های زیر را دارند [۱۴]: در ابعاد کوچک داری تراکم زیاد الکترون‌های آزاد هستند، می‌توانند تشدید در محدوده مرئی و ناحیه مادون‌قرمز را حمایت کنند (که برای بسیاری از انواع سلول‌های خورشیدی مناسب هستند) و همچنین هردو فلز کمترین تلفات در انتقال بین نوری دارند و نسبتاً پایدارند.

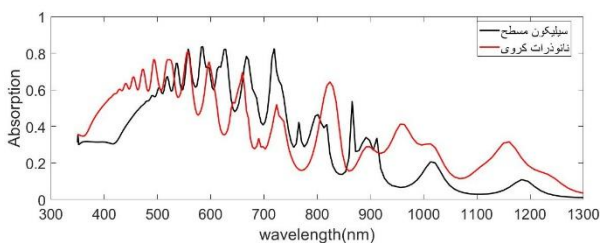
در این مقاله افزایش جذب نور با استفاده از نانو ساختارهای مکعبی وجوه مرکز پر با استفاده از روش FDTD سه بعدی که امکان مشاهده تغییرات میدان‌های وابسته الکتریکی و مغناطیسی را به‌طور جداگانه فراهم می‌کند، بررسی می‌شود. ابتدا معمول‌ترین و رایج‌ترین سلول خورشیدی سیلیکونی لایه نازک بررسی شده است تا با آگاهی از مشکلات آن بتوان راه‌حل‌ها و طراحی‌هایی در جهت بهبود مشخصات سلول‌های خورشیدی ارائه داد. سپس ساختارهای جدیدی برای رفع مشکلات آن پیشنهاد و شبیه‌سازی شده است. ساختار پیشنهادی برای افزایش جذب نور سلول شامل نانوذرات فلزی شکل‌دهی شده است. در این ساختار نانوذرات کروی نقره با شعاع ۲۰ نانومتر به صورت ساختار مکعبی وجوه مرکز پر در کنار یکدیگر قرار گرفته و با دوره تناوب معین در لایه فعال سلول جاسازی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد در سلول‌های خورشیدی شامل این نانو ساختارها، شدت میدان در سیلیکون در مقایسه با سلول مسطح افزایش می‌یابد و به مشخصه‌های



شکل ۲. نمودار جذب نور سلول خورشیدی مسطح



شکل ۳. سلول خورشیدی شامل نانوکوره‌های فلزی



شکل ۴. نمودار مقایسه‌ای جذب نور در سلول‌های خورشیدی ابتدایی و شامل نانوکوره‌های نقره

روش‌های ساخت این ساختارها عبارتند از فوتولیتوگرافی برای ساخت الگوهای الکترودها، لیتوگرافی کلوییدی hole-mask و لایه نشانی فیلم نازک برای ساخت نانوذرات. فوتولیتوگرافی روشی است که به طور گسترده برای انتقال الگوهای هندسی از ماسک به زیرلایه (بستر) به کار می‌رود. در این روش از یک فتورزیست که ماده پلیمری آلی است استفاده می‌شود و خواص آن هنگامیکه تحت تابش فرابنفش قرار می‌گیرد تغییر می‌کند. مراحل فوتولیتوگرافی عبارتند از تمیزکردن ویفر، لایه نشانی فتورزیست، پیش پخت، تنظیم ماسک، نوردی و ایجاد الگو.

توزیع میدان الکتریکی محاسبه شود. پس می‌توان $A(\lambda)$ را از طریق رابطه زیر به دست آورد:

$$A(\lambda) = \frac{1}{2P_{in}(\lambda)} \int_v \omega(\lambda) |E(\lambda)|^2 \epsilon(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

که در آن λ طول موج، $\omega(\lambda)$ فرکانس زاویه‌ای نور برخوردی، $\epsilon(\lambda)$ قسمت موهمی ثابت گذرده‌ی، $E(\lambda)$ میدان الکتریکی و P_{in} توان کل تابشی می‌باشد.

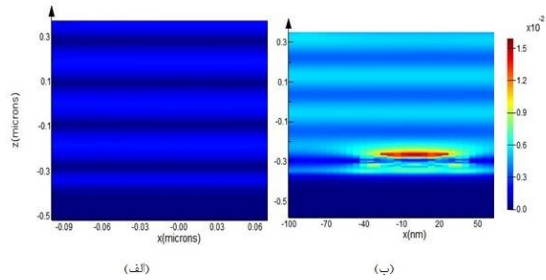
نمودار جذب نور حاصل از سلول اولیه در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان جذب و یا در واقع پهنای باند جذب این سلول پایین است. برای غلبه بر این مشکل نانوساختارهای کروی با شعاع ۲۰ نانومتر از جنس فلز نقره با دوره تناوب معین مطابق شکل ۳ در سطح پایین لایه فعال سیلیکون به صورت جاسازی شده قرار دادیم. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، با مقایسه نمودارهای جذب نور این سلول‌ها افزایش جذب نور و پهنای باند جذب نور در سلول به وضوح دیده می‌شود. هنگامی که نور به سطح نانوذرات فلزی برخورد می‌کند هم‌زمان نور را جذب و دوباره بازتاب می‌دهد. طول جریان نوری بر اثر افزایش بازتاب بهبود می‌یابد و این ویژگی باعث افزایش کارایی سلول خورشیدی نسبت به حالتی می‌شود که از نانوذرات استفاده نشده است [۱۶]. زمانی که از نانوذرات به صورت جاسازی شده استفاده می‌شود تغییرات میدان در اطراف نانوذرات تاثیر بیشتری در افزایش جذب نور در سلول دارد.

میدان مغناطیسی نوسانی نور، نوسانات جمعی منسجم چگالی گاز الکترون را در سطوح نانوساختارهای فلزی تحریک می‌کند. تشدیدهای این تحریک‌های جمعی پلاریتون‌های پلاسمون سطحی موضعی (LSPR) نام دارند. بسته به شکل و اندازه نانوذرات فلزی و دی‌الکتریک محیط، فرکانس‌های خاصی از فوتون برانگیخته شده و میدان‌های نزدیک به ذره را افزایش می‌دهد و در نتیجه آن جذب نور افزایش می‌یابد [۱۷]. جذب نور در این ساختارها متناسب با شدت میدان است. هرچه میدان قوی‌تر باشد جذب نور بیش‌تر است.

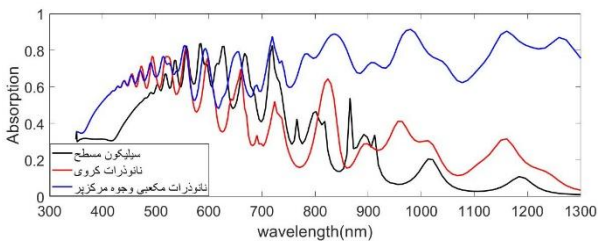
ساختار پیشنهادی دیگر برای افزایش جذب نور سلول شامل نانوذرات فلزی شکل‌دهی شده است. در این ساختار نانوذرات کروی نقره با شعاع ۲۰ نانومتر به صورت ساختار مکعبی و جوه مرکز پر در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. این نانوساختارها مانند شکل ۵ با دوره تناوب معین در لایه فعال سلول به صورت جاسازی شده‌اند. در سلول‌های خورشیدی شامل نانوساختارها افزایش شدت میدان در سیلیکون در مقایسه با سلول مسطح دیده می‌شود (شکل ۶).

نوری، کاهش تلفات پراکندگی و در نتیجه افزایش جذب نور نسبت به نانو ساختار تک نانوذره می‌شود.

با تغییر مکان نانو ساختارهای فلزی جاسازی شده از سطح پایین لایه سیلیکون به سطح بالای آن جذب نور در سلول‌های پیشنهادی به صورت شکل ۸ تغییر می‌یابد.



شکل ۶. پروفایل میدان مغناطیسی سلول‌های خورشیدی (الف) مسطح و (ب) شامل نانو ساختارهای فلزی



شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای در سلول‌های خورشیدی

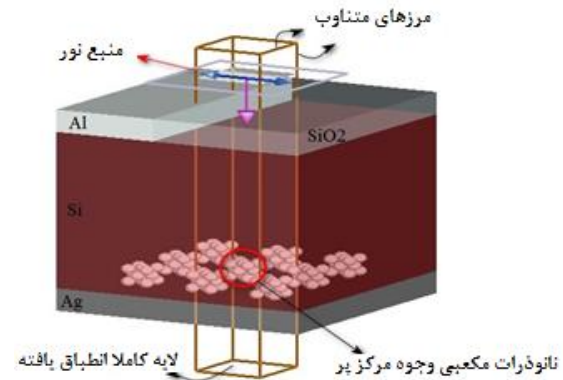
برای تجزیه و تحلیل کمی توانایی جذب نور در هر مدل چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$J_{sc} = \frac{q}{hc} \int_0^{\lambda_g} \omega(\lambda) \times I(\lambda) \times A(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

که در آن q بار الکتریکی یک الکترون، h ثابت پلانک، $I(\lambda)$ چگالی انرژی طیف تابشی خورشید در شرایط AM1.5، $A(\lambda)$ طیف جذبی در هر لایه و λ_g طول موج متنظر با شکاف نوار سیلیکون می‌باشد. نتایج حاصل از محاسبه J_{sc} در جدول ۱ آورده شده است.

مقادیر J_{sc} نشان می‌دهند که مدل‌های دارای نانو ساختارهای فلزی نسبت به مدل مسطح مقدار J_{sc} بیشتری دارند. در میان مدل‌های شامل نانو ساختارهای فلزی سلول خورشیدی دارای نانو ساختارهای مکعبی و جوه مرکز پر دارای J_{sc} بیشتری نسبت به مدل نانو ساختارهای مکعبی مرکز پر دارد. با توجه به نمودارهای جذب نور و مقادیر چگالی جریان اتصال کوتاه می‌توان نتیجه گرفت که سلول خورشیدی دارای نانو ساختارهای مکعبی و جوه مرکز پر عملکرد بهتری نسبت

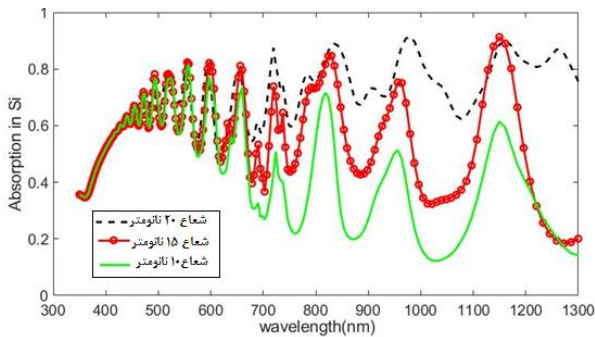
برای ساخت ذرات با اشکال مختلف می‌توان به راحتی از روش لیتوگرافی کلوییدی hole-mask استفاده کرد. لیتوگرافی کلوییدی hole-mask روش جدیدی است که از یک لایه از نانوکوره‌های کلوییدی به عنوان ماسک استفاده می‌کند. ساخت با فرایند لایه نشانی چرخشی یک لایه نازک پلیمر شروع می‌شود. سپس نمونه با یک محلول پلی‌الکترولیت لایه نشانی می‌شود. پس از آن یک امولسیون پلی‌استیرن (PS) از ذرات کلوییدی در آب به نمونه اضافه می‌شود و بعد از یک دقیقه شست‌وشو داده می‌شود. ذرات پلی‌استیرن بار سطحی مخالف با بار پلی‌الکترولیت دارد. در نتیجه جذب الکترواستاتیک بین ذرات و سطح منجر به تشکیل یک آرایش از ذرات می‌شود. پس از تشکیل آرایش از نانوذرات PS یک فیلم نازک فلزی بر روی نمونه تبخیر می‌شود. ذرات PS سپس با یک نوار که سطح آن را با یک فیلم حفره‌دار می‌پوشانند، جدا می‌شوند. این فیلم متعاقباً به عنوان یک ماسک عمل می‌کند. فیلم پلیمری فقط در محل‌هایی که توسط فیلم فلزی محافظت نمی‌شود زوده می‌شود. سپس ماده مورد نظر بر روی نمونه تبخیر می‌شود و فیلم پلیمری در یک حلال مناسب حل می‌شود. بنابراین نتیجه به دست آمده دارای یک الگو از نانوذرات فلزی با قطر نانوکوره‌های PS و ارتفاع مطابق با ضخامت فلز تبخیر شده است [۱۸].



شکل ۵. سلول خورشیدی شامل نانو ساختارهای مکعبی و جوه مرکز پر

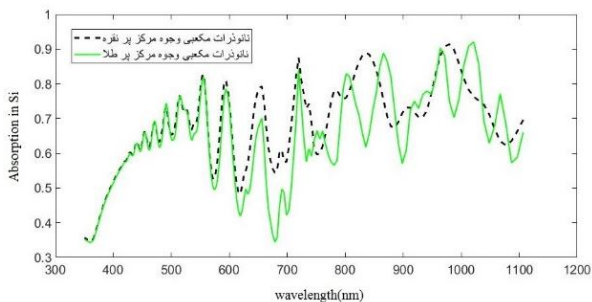
نمودار مقایسه‌ای شکل ۷ نشان می‌دهد با افزودن نانو ساختارهای فلزی به سلول افزایش قابل توجهی در میزان جذب نور به ویژه در طول موج‌های بلند به وجود آمده است و پهنای باند جذب افزایش داشته است. می‌دانیم تشدید نانوذرات شدیداً وابسته به شکل و اندازه آنهاست. با افزایش شعاع نانوذرات می‌توان جذب بالایی در طول موج‌های مرئی داشت. اما برای جذب بیشتر در محدوده فروسرخ باید از پیکربندی جدیدی از نانوذرات استفاده کرد. قرار دادن نانوذرات بصورت نانو ساختار مکعبی و جوه مرکز پر، باعث افزایش طول مسیر

شعاع نانوذرات تاثیر مهمی در مقدار جذب و بازه طول موجی جذب دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش شعاع، افزایش جذب به سمت طول‌موج‌های مادون قرمز بیشتر است. به ازای ذرات با شعاع کوچکتر، مقدار افزایش جذب سلول در طول‌موج‌های بلند چندان قابل مشاهده نیست؛ اگرچه در طول‌موج‌های 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 طول‌موج‌های کوتاه جذب پارازیتی کاهش یابد و هم در طول‌موج‌های بلند افزایش جذب قابل مشاهده باشد. بنابراین شعاع ۲۰ nm به عنوان شعاع بهینه در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۹. مقایسه تغییرات جذب نور با تغییر شعاع نانوکوره‌های به کار رفته در ساختار مکعبی وجوه مرکز پر

طبق شکل ۱۰، با تغییر فلز به کار رفته به طلا و مقایسه طیف جذب نور علاوه بر دلایل ذکر شده، فلز نقره به دلیل نتیجه بهتر در فرایند جذب نور به عنوان فلز مورد استفاده در نانوساختارهای مکعبی مرکز پر انتخاب شده است.

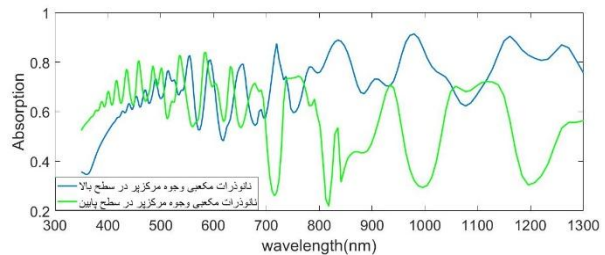


شکل ۱۰. مقایسه تغییرات جذب نور با جنس فلز مختلف برای ساختار مکعبی وجوه مرکز پر

نتیجه گیری

وجود نانوساختارهای فلزی در سلول‌های سیلیکونی لایه نازک به دلیل تشدید پلاریتون‌های پلاسمون سطحی موضعی باعث افزایش جذب نور در لایه سیلیکون می‌شود. در این مقاله

سلول‌های دیگر طراحی شده دارد. J_{sc} سلول خورشیدی به مقدار $36/2 \text{ mA/cm}^2$ افزایش یافته است که نسبت به سلول ابتدایی تقریباً $2/5$ برابر شده و نسبت به نانوساختارهای مکعبی مرکز پر $9/4\%$ بیشتر است. در جدول ۲ تغییرات متغیرهای فتوولتایی سلول‌های خورشیدی شامل جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و ضریب انباشت خلاصه شده است. برای بررسی میزان جذب سلول‌های خورشیدی، کارایی کوانتومی خارجی (EQE) آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بیشترین میزان EQE با استفاده از نانوساختارهای مکعبی وجوه مرکز پر از جنس فلز نقره $7/7\%$ درصد به دست آمده است که نشان‌دهنده افزایش تقریباً 35% درصدی بازده سلول خورشیدی است.



شکل ۸. نمودار مقایسه جذب نور در سلول شامل نانوساختارهای فلزی در سطح پایین و بالا لایه فعال

جدول ۱. مقادیر چگالی جریان اتصال کوتاه سلول‌های خورشیدی

سلول خورشیدی	$J_{sc} (\text{A/m}^2)$
مسطح	۱۳۹/۸
شامل نانوذرات کروی	۱۹۱/۳
شامل نانوساختار مکعبی وجوه مرکز پر	۳۶۲/۲

به منظور بهبود سلول خورشیدی شامل ساختارهای فلزی مکعبی وجوه مرکز پر، پارامتر شعاع نانوکوره‌های به کار رفته بهینه شده و طیف جذب نور آن‌ها در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد که نانوساختارهای مکعبی مرکز پر تشکیل شده از نانوکوره‌های با شعاع ۲۰ نانومتر از جنس فلز نقره عملکرد بهتری در جذب نور دارند.

جدول ۲. تغییرات متغیرهای سلول‌های خورشیدی

سلول خورشیدی	$V_{oc} (\text{mV})$	$J_{sc} (\text{mA/cm}^2)$	FF(%)	EQE(%)
مسطح	۰/۵	۱۳/۹	۳۱/۲	۵/۷
نانوساختارهای مکعبی وجوه مرکز پر	۰/۶۲	۳۶/۲	۴۲/۶	۷/۷

[8] P. H. Wang, M. Theuring, M. Vehse, V. Steenhoff, C. Agert, & A. G. Brolo, "Light trapping in a-Si: H thin film solar cells using silver nanostructures," *AIP Advances*, vol.7, no. 1, pp. 015019, 2017.

[9] J. Dey, & H. K. Rouf, "Absorption Enhancement in Thin-Film Silicon Solar Cell using Plasmonic Nanoparticles," In *IEEE International Conference on Computer, Communication, Chemical, Material and Electronic Engineering (IC4ME2)*, pp. 1-4, 2018.

[10] S. Foroutan, G. Rostami, M. Dolatyari, & A. Rostami, "Improvement of the conversion efficiency and power of thin film silicon solar cells by embedding metallic nanostructures in depletion region," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 127, no. 20, pp. 8988-8994, 2016.

[11] Z. Duan, M. Li, T. Mwenya, Y. Li, and D. Song, "Morphology optimization of silver nanoparticles used to improve the light absorption in thin-film silicon solar cells," *Plasmonics*, vol. 13, no. 2, pp.555-561, 2018.

[12] C. Photiphitak, P. Rakkwamsuk, P. Muthitamongkol, C. Sae-Kung, and C. Thanachayanont, "Effect of silver nanoparticle size on efficiency enhancement of dye-sensitized solar cells," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2011, 2011, <https://doi.org/10.1155/2011/258635>.

[13] S. A. Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media, 2007.

[14] Y. Liu, *Plasmonic metal nanoparticle films for solar cells with ultra- thin absorber layers (Doctoral dissertation, Freie Universität Berlin)*, 2017.

[15] J. Barth, R. L. Johnson, M. Cardona, & E. D. Palik, *Handbook of optical constants of solids II. Academic Press, New York*, 1991.

[16] E. L. Lim, C. C. Yap, M. A. M. Teridi, C. H. Teh, A. R. bin Mohd Yusoff, & M. H. H. Jumali, "A review of recent plasmonic nanoparticles incorporated P3HT: PCBM organic thin film solar cells," *Organic Electronics*, vol. 36, no. 18, pp. 12-28, 2016.

[17] R. Ren, & Z. Zhong, "Enhanced light absorption of silicon solar cells with dielectric nanostructured back reflector," *Optics Communications*, vol. 417, no. 23, pp. 110-114, 2018.

افزایش جذب نور با استفاده از نانوساختارهای مکعبی وجوه مرکز پر با استفاده از روش FDTD که امکان مشاهده تغییرات میدان‌های وابسته الکتریکی و مغناطیسی را به‌طور جداگانه فراهم می‌کند، بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که این نانوساختارها می‌توانند برای افزایش جذب و کارایی سلول بسیار کارآمد باشند.

سپاسگزاری

این مقاله تحت حمایت دانشگاه زابل به کد پژوهانه UOZ-GR-6230 قرار دارد.

مراجع

[1] W. Bai, Q. Gan, G. Song, L. Chen, Z. Kafafi, & F. Bartoli, "Broadband short-range surface plasmon structures for absorption enhancement in organic photovoltaics," *Optics Express*, vol. 18, no. 104, pp. A620-A630, 2010.

[2] O. Inganäs, *Organic photovoltaics over three decades. Advanced Materials*, vol. 30, no. 35, pp. 1800388, 2018.

[3] O. Isabella, R. Vismara, D. N. P. Linssen, K. X. Wang, S. Fan, and M. Zeman, "Advanced light trapping scheme in decoupled front and rear textured thin-film silicon solar cells," *Solar energy*, vol. 162, pp. 344-356, 2018.

[4] M. F. Nezhad, N. Shahtahmassebi, & M. Behdani, "Improvement efficiency of thin-film solar cell by plasmonic properties of silver," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 127, no. 20, pp. 8419-8422, 2016.

[5] S. Abdellatif, K. Kirah, R. Ghannam, A. S. G. Khalil, & W. Anis, "Comprehensive study of various light trapping techniques used for sandwiched thin film solar cell structures," In *Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices VII*, vol. 10527, pp. 1052715, International Society for Optics and Photonics, 2018.

[6] F. Enrichi, A. Quandt, & G. C. Righini, "Plasmonic enhanced solar cells: Summary of possible strategies and recent results," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no. 6, pp. 2433-2439, 2018.

[7] C. S. Solanki, & H. K. Singh, "Plasmonic-Based Light Trapping for c-Si Solar Cell Applications," In *Anti-reflection and Light Trapping in c-Si Solar Cells*, pp. 157-176, Springer, Singapore, 2017.

cells,” Journal of applied physics, vol. 32, no. 3, pp. 510-519, 1961.

[18] H. Fredriksson, Y. Alaverdyan, A. Dmitriev, C. Langhammer, D.S. Sutherland, M. Zäch, and B. Kasemo, “Hole-mask colloidal lithography. Advanced Materials,” vol. 19, no. 23, pp. 4297-4302, 2007.

[19] W. Shockley, & H. J. Queisser, “Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar