

تحلیل تأثیر اندازه، جنس، موقعیت و دوره تناوب نانوسیم فلزی بر عملکرد سلول خورشیدی لایه نازک

محمد اسکندری^۱ امیر حبیب‌زاده شریف^۲ بهنام محمدی^۳

۱- دانشجوی دکترا - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

mo_eskandari@sut.ac.ir

۲- دانشیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

sharif@sut.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

b.mohammadi@sut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، تأثیرات اندازه، جنس، موقعیت و دوره تناوب نانوسیم فلزی بر عملکرد سلول خورشیدی لایه نازک تحلیل شده‌اند. بدین منظور، از شبیه‌سازی‌های تمام‌موج سلول خورشیدی دارای نانوسیم‌های طلا، نقره و نیکل، به ازای مقادیر مختلف شعاع و تناوب نانوسیم‌ها و با در نظر گرفتن موقعیت‌های مختلف نانوسیم‌ها استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که بهترین عملکرد سلول خورشیدی لایه نازک در حالت قرارگیری نانوسیم طلا با شعاع ۷۰ نانومتر و با تناوب ۴۲۵ نانومتر بر روی سطح لایه فعال تحقق می‌یابد. بازده و چگالی جریان اتصال کوتاه محاسبه شده در حالت بهینه به ترتیب برابر با ۲۲/۲۲ درصد و $20/22 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$ هستند.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی لایه نازک، سیلیکون، جذب، بازده، نانوسیم، پلاسمونیک، پلاسمون‌های سطحی محلی.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.21.1.47

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸

نام نویسنده مسئول: دکتر امیر حبیب‌زاده شریف

نشانی نویسنده مسئول: ایران، تبریز، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

امروزه بشر با دو بحران اساسی تأمین انرژی و آلودگی محیط زیست مواجه است. انرژی تولیدی با استفاده از سوخت‌های فسیلی بیشترین سهم در میزان تأمین انرژی را به خود اختصاص داده و بدین دلیل، بیشترین حجم آلودگی محیط زیست نیز با استفاده از سوخت‌های فسیلی ایجاد می‌شود. راهکار برون رفت از دو بحران اشاره شده، تأمین انرژی با استفاده از روش‌های دیگر است. انرژی خورشیدی منبعی پاک، تجدیدپذیر و قابل دسترس بوده و به عنوان بهترین روش تأمین انرژی در اغلب نقاط جهان شناخته شده است [۱ و ۲]. تاکنون بیشترین سلول‌های خورشیدی عرضه شده مبتنی بر ویفر سیلیکونی با ضخامت بین ۱۸۰ تا ۳۰۰ میکرومتر هستند و بیشترین هزینه سلول‌های خورشیدی ناشی از هزینه‌های تهیه مواد اولیه و مراحل ساخت آن‌ها است [۳]. از این رو توجه زیادی به فناوری ساخت سلول‌های خورشیدی با ضخامت‌های خیلی کم معطوف شده و در این راستا از فناوری لایه نازک استفاده می‌شود. بهره‌برداری از این فناوری موجب کاهش ضخامت لایه فعال تا محدوده ۱ تا ۵ میکرومتر و در نتیجه، صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف مواد اولیه می‌شود [۴-۷]. این کاهش ضخامت، همواره مطلوب نبوده و معایبی همچون کاهش میزان جذب نور را به همراه دارد [۸]. به بیان دقیق‌تر، مشخصات عملکردی هر سلول خورشیدی از قبیل جذب و بازده، تحت تأثیر پارامترهای فیزیکی آن است. این پارامترهای فیزیکی شامل فناوری ساخت، مواد، ساختار سلول و ابعاد هندسی مربوطه هستند.

راهکارهای متنوعی برای افزایش میزان جذب نور در سلول‌های خورشیدی لایه نازک ارائه شده‌اند. استفاده از ساختار گریتینگ، نانوساختارهای پلاسمونی و نانوسیم‌ها از جمله روش‌های پیشنهادی هستند [۹-۱۱]. نانوساختارهای پلاسمونی از طریق تحریک پلاسمون‌های سطحی محلی به افزایش جذب کمک می‌کنند. مطابق پدیده پلاسمونیک، الکترون‌های باند هدایت هادی‌ها در مرز مشترک با عایق در اثر میدان الکتریکی نور تابشی تحریک شده و به صورت دسته‌جمعی نوسان می‌کنند [۱۲]. با توجه به اینکه نور خورشید در ناحیه مرئی، شدت بیشتری نسبت به بقیه نواحی طیف داشته و رزونانس پلاسمونی فلزاتی همچون طلا، نقره و نیکل نیز در این ناحیه قرار دارد، نشان داده شده است که استفاده از این نانوذرات هادی منجر به افزایش جذب نور می‌شود [۱۳-۱۵]. این نانوساختارها با پراکنده‌سازی نور باعث تغییر زاویه انتشار آن شده و از طریق به دام‌اندازی نور نیز موجب افزایش طول مسیر نور در ناحیه فعال می‌شوند [۱۶]. در نتیجه، احتمال تولید زوج الکترون-حفره در ناحیه فعال افزایش یافته و جذب نور نیز به تبع آن افزایش می‌یابد. همچنین، نانوساختارهای پلاسمونی از طریق رزونانس پلاسمون‌های سطحی

موجب ایجاد میدان‌های محلی و در نتیجه، افزایش جذب نور می‌شوند [۱۷]. از طرفی، نانوساختارهای پلاسمونی با هندسه گریتینگ در سطح پایینی لایه فعال، قابلیت کوپل نور خورشید به پلاسمون پلاریتون‌های سطحی در مرز مشترک فلز و دی‌الکتریک را فراهم کرده و از این طریق موجب افزایش جذب نور در ناحیه فعال می‌شوند [۱۸]. همچنین، اخیراً با استفاده از ترکیب نانوساختارهای متفاوت در سطح سلول‌های خورشیدی لایه نازک، افزایش جذب قابل توجهی در باند وسیعی از طیف نور خورشید حاصل شده است [۱۹]. در پژوهش‌هایی که به کاربرد نانوسیم‌های فلزی برای افزایش جذب نور در سلول خورشیدی لایه نازک مربوط می‌شوند، تأثیرات چهار پارامتر شعاع، جنس، موقعیت و دوره تناوب نانوسیم فلزی بر عملکرد جذبی سلول خورشیدی، یا به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند و یا تأثیرات فقط دو مورد از پارامترهای مذکور بررسی شده و بر اساس آن، حالت‌های بهینه سلول خورشیدی و مقادیر متناظر بازده و چگالی جریان اتصال کوتاه گزارش شده‌اند [۲۰-۲۲].

در این مقاله، تأثیرات تمامی پارامترهای مذکور بر عملکرد سلول خورشیدی لایه نازک تحلیل شده‌اند. در واقع، ابتدا تأثیرات اندازه و جنس نانوسیم، سپس تأثیر موقعیت آن و در نهایت، تأثیر تناوب نانوسیم بر میزان جذب سلول خورشیدی لایه نازک مورد بررسی و تحلیل مقایسه‌ای قرار گرفته‌اند. این تحلیل‌ها با استفاده از شبیه‌سازی‌های تمام‌موج مبتنی بر روش عددی المان محدود در بازه طیفی نور مرئی (۴۰۰ تا ۷۵۰ نانومتر) انجام شده‌اند. در نهایت، حالت بهینه اندازه، جنس، موقعیت و تناوب نانوسیم فلزی به منظور تحقق حداکثر میزان جذب نور، بازده و چگالی جریان اتصال کوتاه در سلول خورشیدی لایه نازک تعیین شده است.

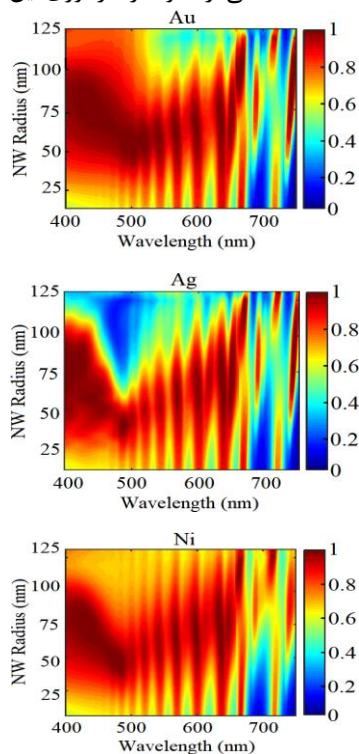
۲- ساختار و روابط حاکم بر مسأله

نمای دوبعدی سلول‌های واحد مربوط به سلول خورشیدی مرجع، سلول خورشیدی با نانوسیم قرارگرفته در لایه سیلیکا، سلول خورشیدی با نانوسیم قرارگرفته در مرکز لایه فعال سیلیکونی و سلول خورشیدی با نانوسیم قرارگرفته در سطح لایه فعال در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. لایه فعال از جنس سیلیکون با ضخامت ۱ میکرومتر در نظر گرفته شده است. جنس لایه بازتابی پایینی از نقره بوده و ضخامت آن ۲۵۰ نانومتر است. این لایه ضمن اینکه نقش بازتاب‌کننده نور به داخل ناحیه فعال به منظور ممانعت از عبور نور را ایفا می‌کند، برای برقراری اتصال الکتریکی نیز بکار می‌رود. برای بررسی تأثیر موقعیت نانوسیم در سطح پایینی سلول خورشیدی و به منظور ایزوله شدن آن از لایه فلزی، از یک لایه عایق سیلیکایی به ضخامت ۱۵۰ نانومتر استفاده شده است. دوره تناوب ساختار نیز ۵۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است.

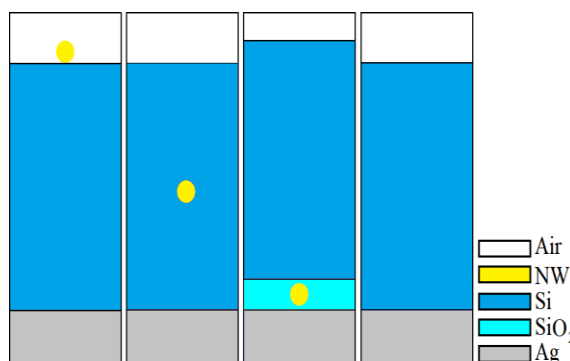
به ازای مقادیر مختلف شعاع نانوسیم‌های طلا، نقره و نیکل قرار گرفته در سطح بالایی لایه فعال نشان داده شده‌اند. نواحی قرمز رنگ، که بیانگر بیشترین میزان جذب (نزدیک ۱۰۰٪) هستند، در بخش عمده‌ای از بازه طول‌موج‌های نور مرئی مشاهده می‌شوند. نکته قابل توجه دیگر این است که در اکثر طول‌موج‌های این ناحیه، حداکثر میزان جذب به ازای شعاع نانوسیم ۵۵ تا ۸۵ نانومتر حاصل شده است؛ بنابراین، انتخاب نانوسیم بهینه با شعاع مناسب امکان‌پذیر است.

۳-۱- تحلیل تأثیر اندازه و جنس نانوسیم

در شکل ۳، منحنی‌های بازده جذب کلی سلول خورشیدی لایه نازک با حضور نانوسیم فلزی با جنس‌های مختلف در سطح بالایی لایه فعال نشان داده شده‌اند. با افزایش شعاع نانوسیم از ۲۵ نانومتر، مقدار بازده جذب کلی افزایش یافته و به مقدار بیشینه می‌رسد؛ سپس، با ادامه روند افزایش شعاع، بازده جذب کلی کاهش می‌یابد. بیشترین بازده جذب کلی، با در نظر گرفتن فلز طلا با شعاع ۷۰ نانومتر به میزان ۸۵٪ تحقق یافته است. در حالت در نظر گرفتن فلز نقره با شعاع ۶۰ نانومتر نیز مقدار بیشینه حدود ۷۵٪ برای بازده جذب کلی حاصل شده است. همچنین مقادیر بازده جذب کلی در شعاع‌های کمتر از ۵۵ نانومتر به ازای هر سه فلز تقریباً یکسان بوده و در شعاع‌های بزرگتر از ۱۰۰ نانومتر، مقادیر این کمیت به ازای نیکل و طلا بسیار نزدیک هم بوده و این مقادیر اختلاف قابل توجهی با بازده جذب کلی در حالت استفاده از نقره دارند. این اختلاف‌ها ناشی از تفاوت رفتار نوری این مواد هستند.



شکل (۲): طیف‌های جذب سلول خورشیدی بر حسب شعاع نانوسیم‌های طلا، نقره و نیکل قرار گرفته در سطح بالایی لایه فعال



شکل (۱): نمای دوبعدی سلول‌های واحد، به ترتیب از راست به چپ مربوط به سلول خورشیدی مرجع، سلول خورشیدی با نانوسیم قرار گرفته در لایه سیلیکا، سلول خورشیدی با نانوسیم قرار گرفته در مرکز لایه فعال سیلیکونی و سلول خورشیدی با نانوسیم قرار گرفته در سطح لایه فعال

به منظور بررسی عملکرد سلول خورشیدی از نقطه‌نظر تبدیل انرژی، از دو کمیت مهم بازده و چگالی جریان اتصال کوتاه استفاده می‌شود که با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه هستند [۲۳]:

$$\eta = \frac{\int_{310nm}^{\lambda_g} I(\lambda) A(\lambda) \frac{\lambda}{\lambda_g} d\lambda}{\int_{310nm}^{4000nm} I(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

$$J_{SC} = \int_{310nm}^{\lambda_g} I(\lambda) A(\lambda) \frac{e\lambda}{hc} d\lambda \quad (2)$$

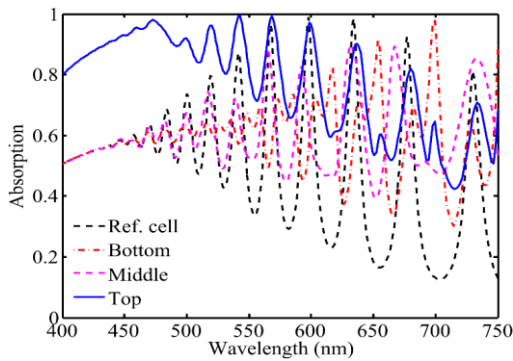
که در آن‌ها، $A(\lambda)$ و $I(\lambda)$ به ترتیب بیانگر میزان جذب نور در ناحیه فعال سلول خورشیدی و طیف تابشی خورشید بوده و λ_g نیز طول‌موج متناظر با گاف انرژی سیلیکون، یعنی ۱۱۲۷ نانومتر است. با توجه به اینکه بازه طیفی بررسی شده در این مقاله، طیف نور مرئی، یعنی ۴۰۰ تا ۷۵۰ نانومتر است، لذا این محدوده طول‌موجی در محاسبات مربوط به روابط (۱) و (۲) لحاظ شده است. پارامترهای h ، e و c در رابطه (۲) نیز به ترتیب بیانگر بار الکترون، ثابت پلانک و سرعت نور در خلأ هستند. برای ارزیابی بهبود بازده جذب، می‌بایست کمیت بازده جذب کلی مطابق رابطه زیر محاسبه شود [۲۳]:

$$IAE = \frac{\int_{400nm}^{750nm} I(\lambda) A(\lambda) d\lambda}{\int_{400nm}^{750nm} I(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

صورت کسر رابطه (۳) بیانگر میزان بازده جذب در ناحیه نور مرئی بوده و مخرج آن نیز بیانگر میزان طیف تابشی نور مرئی در سطح سلول خورشیدی است. بنابراین، کمیت بازده جذب کلی بیانگر میزان نور جذب شده نسبت به نور ورودی سلول است.

۳- نتایج شبیه‌سازی‌ها و بحث

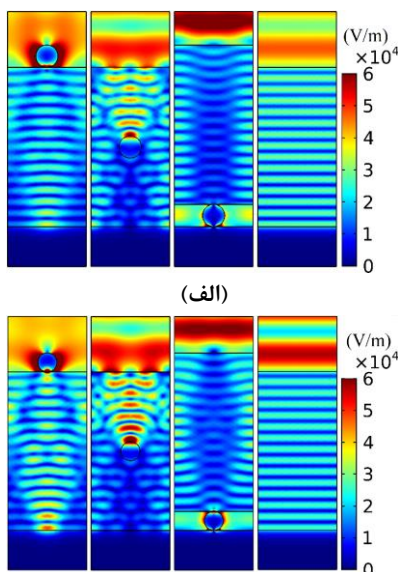
در این بخش، از طریق ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مبتنی بر روش المان محدود و تحلیل آن‌ها به بررسی تأثیر اندازه، جنس، موقعیت و دوره تناوب نانوسیم فلزی بر میزان جذب سلول خورشیدی لایه نازک می‌پردازیم. در شکل ۲، طیف‌های جذب سلول خورشیدی



(ج)

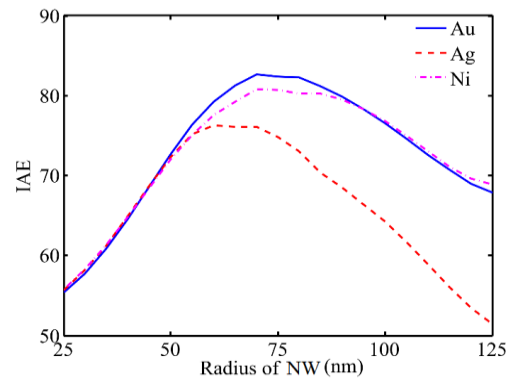
شکل (۴): طیف‌های جذب سلول خورشیدی به ازای موقعیت‌های مختلف نانوسیم؛ (الف) طلا با شعاع ۷۰ نانومتر، (ب) نقره با شعاع ۶۰ نانومتر و (ج) نیکل با شعاع ۷۰ نانومتر

به منظور تحلیل دقیق‌تر این موضوع، در شکل ۵ پروفایل‌های توزیع شدت میدان الکتریکی سلول خورشیدی مرجع و سلول‌های خورشیدی با حضور نانوسیم فلزی در سه موقعیت مذکور نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نانوسیم‌ها از طریق قابلیت متمرکزسازی نور در اطراف خود و ترویج مدهای پلاسمونی به نور ورودی، منجر به افزایش میزان جذب در ناحیه فعال شده‌اند. به منظور مقایسه بهتر تأثیر جنس نانوسیم در میزان افزایش جذب، شکل ۶ ارائه شده است. مطابق شکل ۶ (الف)، میزان جذب سلول با حضور نانوسیم طلا با شعاع ۷۰ نانومتر در مجموع در مقایسه با جذب سلول با حضور نانوسیم‌های نقره با شعاع ۶۰ نانومتر و نیکل با شعاع ۷۰ نانومتر بهتر است. این نتیجه با نتایج ارائه شده در شکل ۳ برای بازده جذب کلی در توافق است. از طرفی، مطابق شکل ۶ (ب)، پروفایل توزیع شدت میدان الکتریکی در طول موج ۷۰۰ نانومتر به منظور درک بهتر افزایش میدان در داخل لایه فعال نشان داده است. مشاهده می‌شود که وجود نانوسیم باعث افزایش میدان در داخل لایه فعال سلول شده و از طرفی به دلیل وابستگی جذب به میدان الکتریکی، میزان جذب نیز افزایش یافته است.



(الف)

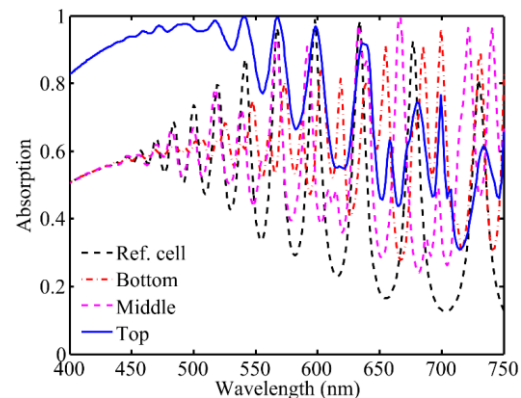
(ب)



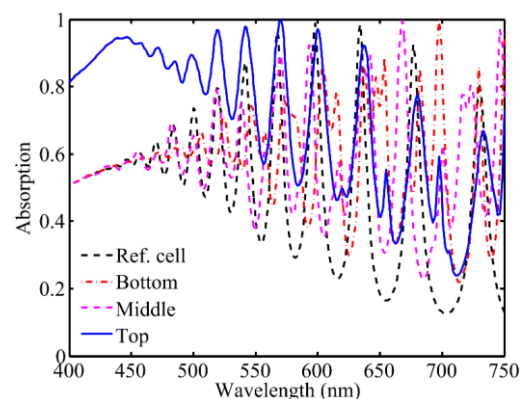
شکل (۳): بازده جذب کلی برحسب شعاع نانوسیم‌های طلا، نقره و نیکل در موقعیت سطح بالایی لایه فعال

۲-۳- تحلیل تأثیر جنس و موقعیت نانوسیم

طیف‌های جذب سلول خورشیدی به ازای موقعیت‌های مختلف نانوسیم‌های طلا و نیکل با شعاع ۷۰ نانومتر و نانوسیم نقره با شعاع ۶۰ نانومتر در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. تمامی این منحنی‌ها با منحنی جذب سلول مرجع مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که جذب سلول‌های دارای نانوسیم‌ها در مقایسه با جذب سلول مرجع افزایش یافته است و بیشترین افزایش جذب نیز مربوط به حالتی است که نانوسیم در سطح بالایی لایه فعال قرار دارد. دلایل افزایش قابل توجه جذب، توانایی متمرکزسازی نور توسط نانوسیم، کاهش میزان بازتاب از سطح سلول و افزایش میزان پراکندگی به داخل لایه فعال هستند.



(الف)

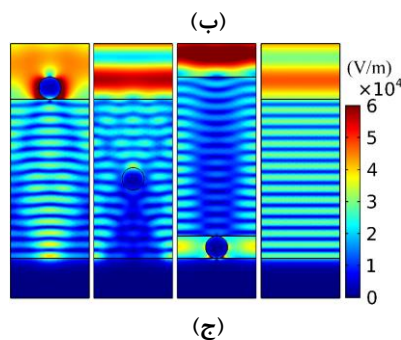
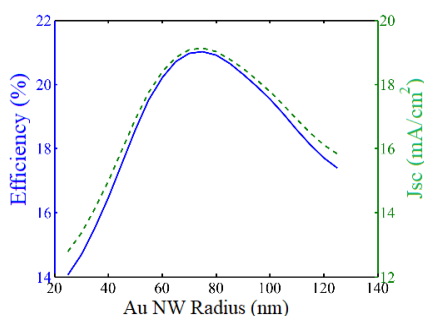


طرفی، حداکثر مقادیر بازده و چگالی جریان اتصال کوتاه در هر حالت، به ازای یک مقدار یکسان برای شعاع نانوسیم‌ها حاصل شده‌اند؛ این مقادیر شعاع‌ها همان مقادیر بهینه حاصل از نتایج ارائه شده در شکل ۲ هستند که به ازای آن‌ها حداکثر میزان جذب تحقق یافته است.

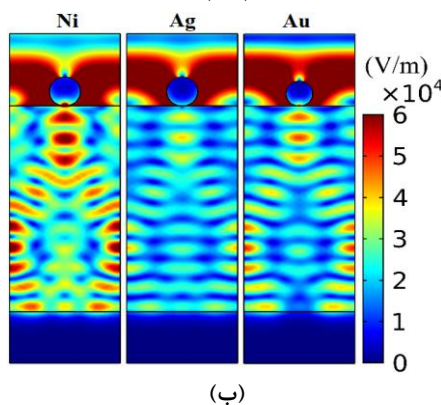
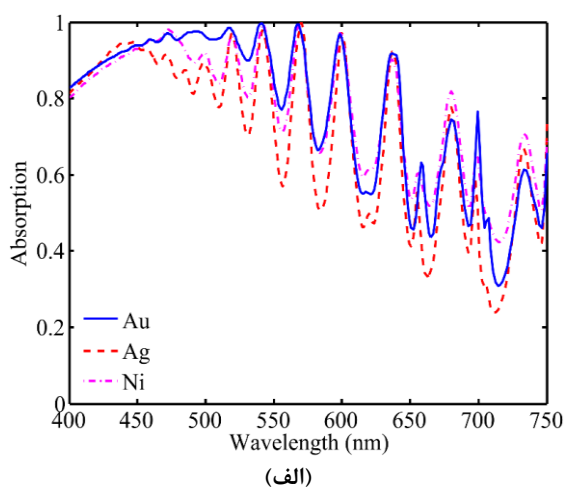
در جدول ۱ نتایج محاسبات مربوط به مقادیر چگالی جریان اتصال کوتاه و بازده در تمامی حالت‌های نشان داده شده در شکل ۱ به ازای دوره تناوب ۵۰۰ نانومتر، شعاع ۷۰ نانومتر برای نانوسیم‌های طلا و نیکل و شعاع ۶۰ نانومتر برای نانوسیم نقره ارائه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با حضور نانوسیم طلا در سطح بالایی لایه فعال، افزایش بیش از ۷ درصدی در بازده و افزایش (7 mA/cm^2) در جریان اتصال کوتاه نسبت به سلول مرجع حاصل شده‌اند. با مقایسه مقادیر ارائه شده در جدول ۱، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به ازای دوره تناوب ۵۰۰ نانومتر، سلول خورشیدی دارای نانوسیم طلا با شعاع ۷۰ نانومتر در سطح بالایی لایه فعال دارای بیشترین میزان چگالی جریان اتصال کوتاه و بازده است.

۳-۳- تحلیل تأثیر دوره تناوب

در ادامه، با در نظر گرفتن نانوسیم طلا با شعاع ۷۰ نانومتر در سطح بالایی لایه فعال به بررسی تأثیر دوره تناوب سلول خورشیدی بر عملکرد آن می‌پردازیم. مطابق شکل ۸، منحنی بازده جذب کلی بر حسب دوره تناوب سلول خورشیدی منتخب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با قرارگیری نانوسیم‌ها در نزدیک همدیگر (دوره تناوب کوچک‌تر) میزان نور بازتابی از سطح افزایش یافته و از ورود نور به لایه فعال کاسته شده و در نتیجه، بازده جذب کلی به طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. از طرفی، با قرارگیری نانوسیم‌ها در فواصل زیاد از همدیگر (دوره تناوب بزرگ‌تر) سهم سطح بدون نانوسیم لایه فعال افزایش یافته و در نتیجه، میزان تأثیرگذاری نانوسیم‌ها بر افزایش جذب کاهش می‌یابد. بنابراین، فاصله نانوسیم‌ها (دوره تناوب سلول خورشیدی) تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد جذبی سلول خورشیدی داشته و مقدار بهینه آن می‌بایست تعیین شود.

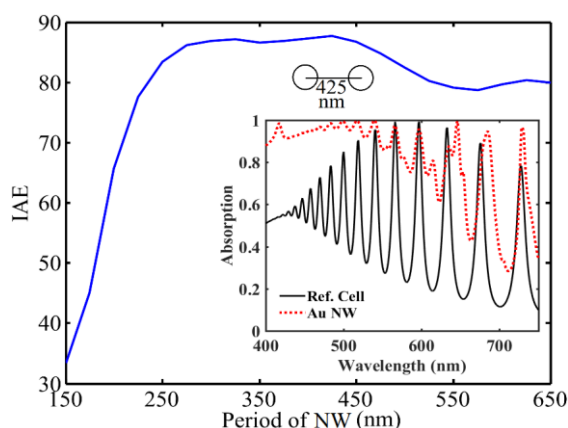


شکل (۵): پروفایل‌های توزیع شدت میدان الکتریکی سلول خورشیدی مرجع در طول موج ۵۷۰ نانومتر و سلول‌های خورشیدی با نانوسیم؛ (الف) طلا در طول موج ۵۷۰ نانومتر، (ب) نقره در طول موج ۵۶۸ نانومتر و (ج) نیکل در طول موج ۵۷۰ نانومتر



شکل (۶): (الف) طیف‌های جذب سلول خورشیدی با در نظر گرفتن نانوسیم طلا، نقره و نیکل در سطح بالایی ناحیه فعال؛ (ب) پروفایل‌های توزیع شدت میدان الکتریکی به ازای طول موج ۷۰۰ نانومتر به ترتیب با در نظر گرفتن نانوسیم‌های طلا، نقره و نیکل

در شکل ۷ منحنی‌های بازده و چگالی جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی با در نظر گرفتن نانوسیم در سطح بالایی لایه فعال نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سلول‌های خورشیدی با نانوذرات طلا و نیکل، بازده به بیش از ۲۰ درصد رسیده است. از

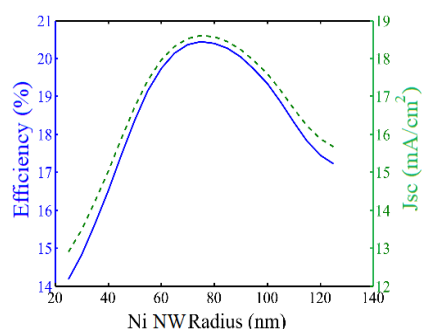
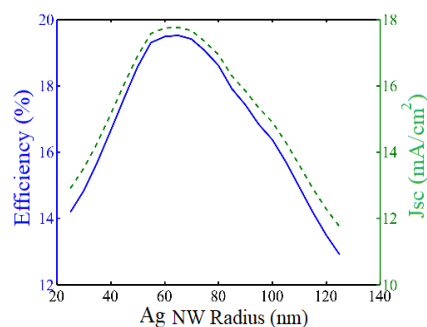


شکل (۸): بازده جذب کلی بر حسب دوره تناوب با در نظر گرفتن نانوسیم طلا با شعاع ۷۰ نانومتر در سطح بالایی لایه فعال. طیف جذب این سلول خورشیدی به ازای دوره تناوب ۴۲۵ نانومتر به همراه طیف جذب سلول مرجع در داخل شکل نشان داده شده‌اند

مطابق شکل ۸، دوره تناوب بهینه سلول خورشیدی که به ازای آن، بیشترین بازده جذب کلی حاصل شده، ۴۲۵ نانومتر است. طیف جذب سلول خورشیدی به ازای دوره تناوب بهینه در داخل شکل ۸ نشان داده شده است که حاکی از افزایش قابل توجه جذب نسبت به جذب سلول مرجع است. بدین ترتیب، در این حالت مقادیر میانگین جذب، چگالی جریان اتصال کوتاه و بازده به ترتیب مساوی ۸۷/۵۳ درصد، $20/22$ (mA/cm^2) و $22/22$ درصد بدست آمده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیرات چهار پارامتر مستقل نانوسیم فلزی، یعنی شعاع، جنس، موقعیت و دوره تناوب بر بهبود عملکرد سلول خورشیدی لایه نازک بررسی و تحلیل شدند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیل‌های ارائه شده، مشاهده شد که نانوسیم‌های فلزی از طریق افزایش میدان‌های محلی در اثر تحریک پلاسمون‌های سطحی و همچنین با کاهش میزان بازتاب به دلیل قرارگیری در سطح بالایی سلول، موجب افزایش جذب نور در سلول خورشیدی لایه نازک می‌شوند. همچنین، افزایش قابل توجهی در جذب سلول خورشیدی با نانوسیم‌های طلا و نیکل دارای شعاع ۷۰ نانومتر و نانوسیم نقره دارای شعاع ۶۰ نانومتر در حالت قرارگیری نانوسیم در سطح بالایی ناحیه فعال سلول حاصل شد. از طرفی، دوره تناوب بهینه ۴۲۵ نانومتر برای سلول خورشیدی دارای نانوسیم طلا با شعاع ۷۰ نانومتر در سطح بالایی لایه فعال به دست آمد. در حالت کلی، بیشترین مقدار چگالی جریان اتصال کوتاه ($20/22$ (mA/cm^2)) و بیشترین بازده سلول خورشیدی ($22/22$ درصد)، متعلق به حالتی است که از نانوسیم طلا با شعاع ۷۰ نانومتر در سطح بالایی سلول خورشیدی با تناوب ۴۲۵ نانومتر استفاده شده باشد.



شکل (۷): منحنی‌های بازده و چگالی جریان اتصال کوتاه سلول‌های خورشیدی دارای نانوسیم‌های طلا، نقره و نیکل بر روی سطح بالایی لایه فعال بر حسب شعاع نانوسیم‌ها

جدول (۱): مقادیر چگالی جریان اتصال کوتاه و بازده ساختارهای مختلف به ازای دوره تناوب ۵۰۰ نانومتر، شعاع ۷۰ نانومتر برای نانوسیم‌های طلا و نیکل و شعاع ۶۰ نانومتر برای نانوسیم نقره

نوع سلول	جنس نانوسیم	چگالی جریان اتصال کوتاه (mA/cm^2)	بازده (%)
سلول مرجع	-	۱۲/۱۲	۱۳/۲۱
سلول با نانوسیم در لایه سیلیکا	طلا	۱۳/۳۳	۱۴/۶۵
	نقره	۱۳/۱۷	۱۴/۴۸
	نیکل	۱۳/۳۵	۱۴/۶۷
سلول با نانوسیم در مرکز لایه فعال سیلیکونی	طلا	۱۲/۹۵	۱۴/۲۴
	نقره	۱۳/۰۴	۱۴/۳۳
	نیکل	۱۳/۴۰	۱۴/۷۳
سلول با نانوسیم در سطح بالایی لایه فعال	طلا	۱۹/۰۷	۲۰/۹۶
	نقره	۱۷/۷۳	۱۹/۴۸
	نیکل	۱۸/۷۹	۲۰/۶۵

مراجع

- ultrathin photovoltaics", RSC advances, Vol. 6, pp. 26216-26226, 2016.
- [17] Rahimi, H., Karimi, M. J., & Ghajarpour-Nobandegani, S., "Chromium nanostructures for enhancing light trapping in a thin-film solar cell", Optical Materials, Vol. 121, pp. 111548, 2021.
- [18] Mandal, P., "Application of Plasmonics in solar cell efficiency improvement: a brief review on recent progress", Plasmonics, pp. 1-21, 2022.
- [19] Li, P., Jiang, X., Huang, S., Liu, Y., & Fu, N., "Plasmonic perovskite solar cells: An overview from metal particle structure to device design", Surfaces and Interfaces, Vol. 25, pp. 101287, 2021.
- [20] Juan, F., Wu, Y., Shi, B., Wang, M., Wang, M., Xu, F., Cao, N., "Plasmonic Au Nano octahedrons enhance light harvesting and photocarrier extraction in perovskite solar cell", ACS Applied Energy Materials, Vol. 4, pp. 3201-3209, 2021.
- [21] Heidarzadeh, H., "Effect of parasitic absorption of the plasmonic cubic nanoparticles on the performance of a plasmonic assisted halide thin-film perovskite solar cell", Solar Energy, Vol. 223, pp. 293-301, 2021.
- [22] Hamed, M. S., Ike, J. N., Mola, G. T., "Plasmonic nanoparticles mediated energy harvesting in thin-film organic solar cells", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 55, pp. 15102, 2021.
- [23] Ren, R., & Zhong, Z., "Enhanced light absorption of silicon solar cells with dielectric nanostructured back reflector", Optics Communications, Vol. 417, pp. 110-114, 2018.
- [۱] عباسیان سبحان و صباغی ندوشن رضا، "طراحی سلول خورشیدی دویپوندی InGaP/GaAs بدون لایه ARC با بازده بالا"، مجله انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران، دوره ۱۶، شماره ۲، صفحات ۸۷-۹۲، تابستان ۱۳۹۸.
- [۲] درخشان‌نیا شیرین، شکيبا محسن و شکيبا مریم، "مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل ساختار سلول خورشیدی دویپوندی با شکاف انرژی مستقیم مبتنی بر الگوریتم مونت‌کارلو گروهی"، مجله انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران، دوره ۱۹، شماره ۲، صفحات ۱۳۹-۱۴۸، تابستان ۱۴۰۱.
- [3] Nayak, P. K., Mahesh, S., Snaith, H. J., & Cahen, D., "Photovoltaic solar cell technologies: analyzing the state of the art", Nature Reviews Materials, Vol. 4, pp. 269-285, 2019.
- [4] Lee, T. D., & Ebong, A. U., "A review of thin film solar cell technologies and challenges", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 70, 1286-1297, 2017.
- [5] Hussin, M. Z., Shaari, S., Omar, A. M., & Zain, Z. M., "Amorphous silicon thin-film: behaviour of light-induced degradation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 43, pp. 388-402, 2015.
- [6] Lee, T. D., & Ebong, A. U., "A review of thin film solar cell technologies and challenges", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 70, pp. 1286-1297, 2017.
- [7] Dharmadasa, I. M., Advances in thin-film solar cells. Jenny Stanford Publishing, 2018.
- [8] Meillaud, F., Boccard, M., Bugnon, G., Despeisse, M., Hänni, S., Haug, F. J., Ballif, C., "Recent advances and remaining challenges in thin-film silicon photovoltaic technology", Materials today, Vol. 18, pp. 378-384, 2015.
- [9] Iqbal, T., Ijaz, M., Javaid, M., Rafique, M., Riaz, K. N., Tahir, M. B., Afsheen, S., "An optimal Au grating structure for light absorption in amorphous silicon thin film solar cell", Plasmonics, Vol. 14, pp. 147-154, 2019.
- [10] Zhang, Y., & Liu, H., "Nanowires for high-efficiency, low-cost solar photovoltaics", Crystals, Vol. 9, P. 87, 2019.
- [11] Erwin, W. R., Zarick, H. F., Talbert, E. M., & Bardhan, R., "Light trapping in mesoporous solar cells with plasmonic nanostructures", Energy & Environmental Science, Vol. 9, pp. 1577-1601, 2016.
- [12] Zhang, Z., Fang, Y., Wang, W., Chen, L., & Sun, M., "Propagating surface plasmon polaritons: towards applications for remote-excitation surface catalytic reactions", Advanced Science, Vol. 3, p. 1500215, 2016.
- [13] Weick, G., & Mariani, E., "Tunable plasmon polaritons in arrays of interacting metallic nanoparticles", The European Physical Journal B, Vol. 88, pp. 1-8, 2015.
- [14] Zhang, C., Luo, Q., Shi, J., Yue, L., Wang, Z., Chen, X., & Huang, S., "Efficient perovskite solar cells by combination use of Au nanoparticles and insulating metal oxide", Nanoscale, Vol. 9, 2852-2864, 2017.
- [15] Luo, Q., Zhang, C., Deng, X., Zhu, H., Li, Z., Wang, Z., ... & Huang, S., "Plasmonic effects of metallic nanoparticles on enhancing performance of perovskite solar cells", ACS applied materials & interfaces, Vol. 9, pp. 34821-34832, 2016.
- [16] Garg, V., Sengar, B. S., Awasthi, V., Sharma, P., Mukherjee, C., Kumar, S., Mukherjee, S., "Localized surface plasmon resonance on Au nanoparticles: tuning and exploitation for performance enhancement in