

## افزایش جذب در سلول‌های خورشیدی لایه نازک با استفاده از هیبرید نانو ذرات پلاسمونی و شبکه زاویه‌دار تناوبی

افسانه عسگریان تیریزی<sup>۱</sup>، علی پهلوان<sup>۲</sup> و مهدی رادمهر<sup>۳</sup>

۱. جهاد دانشگاهی واحد تبریز

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه آزاد ساری، ساری

۳. دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد ساری، ساری

پست الکترونیکی: asgariyan@acecr.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹)

### چکیده

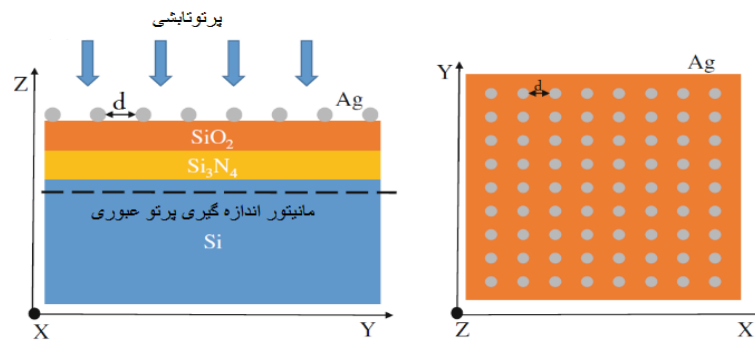
در این مقاله، یک ساختار دوبعدی از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی لایه نازک با ترکیبی از آرایه‌های نانو ذرات نقره و شبکه زاویه‌دار تناوبی معرفی شده است. نانوذرات نقره با استفاده از اثر تشدید پلاسمون سطحی، ضریب انتقال نور به داخل را افزایش می‌دهند در نتیجه با افزایش در صد نور فرودی به درون لایه فعال، احتمال جذب فوتون را بهبود می‌بخشد. برای ایجاد یک ساختار بازتابنده در سطح تحتانی، آرایه‌ای از شبکه زاویه‌دار با هدف افزایش طول مسیر نوری در داخل سلول، به کار گرفته شده است. با استفاده از روش FDTD، ضریب انتقال و بازتاب نور در هر دو سطح فوقانی و تحتانی در گستره طول موج ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر بررسی شده و تأثیر پارامترهای ساختاری از جمله شعاع، فاصله نانو ذرات، زاویه پراکنش و فاصله شبکه گزارش شده است. در نهایت، دو سطح را با هم ترکیب کرده و میانگین موزون فوتون‌هایی که به وسیله لایه فعال در کل طول موج‌های مورد مطالعه جذب شده، محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که بازدهی به دام اندازی نور با تغییر پارامترهای ساختاری ارتقا پیدا می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** نانو ذرات نقره، اثر پلاسمون سطحی، سلول خورشیدی لایه نازک، شبکه زاویه‌دار تناوبی، پراکنش نوری

### ۱. مقدمه

آنها، جذب بسیار پایین در لبه باند هدایت است [۱]. از این رو، طرح‌های پیشرفته برای بهبود جذب نور پیشنهاد شده‌اند. به طور کلی، روش‌های به دام اندازی نور به دو دسته تقسیم شده‌اند: ۱: کاهش ضریب بازتاب نور در سطح فوقانی. ۲: افزایش طول مسیر پرتو نوری در داخل ناحیه فعال سلول

در سال‌های اخیر، سلول‌های خورشیدی سیلیکونی لایه نازک به سبب قیمت پایین تولید توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند که بیشترین راندمان اندازه‌گیری شده برای سلول‌های لایه نازک ۲۰/۱ درصد گزارش شده است که مشکل اصلی



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) هندسه ساختار شبیه‌سازی شده قسمت فوقانی سلول خورشیدی لایه نازک به همراه نانوذرات نقره و لایه ضد بازتاب  $N_4SiO_4 / Si_3$  و نمای بالایی آن.

آرایشی از شبکه زاویه‌دار برای ارتقای جذب نور از طریق افزایش طول مسیر نوری در داخل سلول به کار گرفته شده است. [۱۲]. در این تحقیق، ضریب انتقال و بازتاب نور در هر دو سطح در گستره طول موج ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر با روش شبیه‌سازی عددی FDTD به وسیله گستره‌ای از پارامترهای ساختاری بررسی شده و نقطه بهینه معرفی شده است.

## ۲. روش شبیه‌سازی عددی

در این مقاله، برای محاسبه جذب نور از نرم‌افزار حل لومریکال<sup>۱</sup> استفاده شده است [۱۳]. ثابت‌های نوری برای کل محیط مورد مطالعه از داده‌های آزمایشگاهی پالیک گرفته شدند که در مرجع [۱۴] آمده است. در کلیه شبیه‌سازی‌ها، همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، نوری با موج مسطح در بازه ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر به طور عمودی بر سطح در راستای محور Z برخورد می‌کند. شرایط مرزی تناوبی در سطح x-y تعریف شده است. در جهت Z نیز، از شرایط مرزی لایه‌ای استفاده شده است [۱۵].

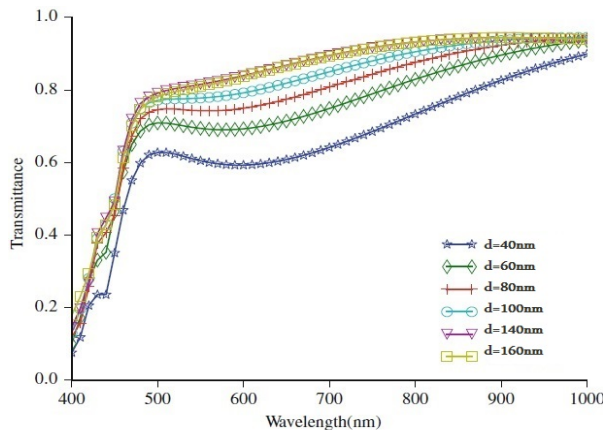
## ۳. مدل‌سازی

### ۱.۳. طراحی سطح فوقانی

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، نانوذره نقره در قسمت فوقانی لایه  $N_4SiO_4 / Si_3$  قرار داده شده است. قبلاً ثابت شده است که لایه  $N_4SiO_4 / Si_3$  در کاهش ضریب بازتاب نور در سطح فوقانی سلول‌ها مؤثر است [۱۶]. در شکل ۱ آرایش نانو ذرات مجاور که فاصله آنها با نماد

[۲]. تاکنون، فناوری‌های مختلف برای کاهش ضریب بازتاب نور در سطح سلول مورد بررسی قرار گرفته است از جمله زبر و ناهموار کردن سطح، استفاده از روکش‌های ضد بازتاب، ایجاد شبکه‌های پنجره‌ای، استفاده از بلورهای فوتونیک و استفاده از نانو ذرات فلزی بر پایه پلاسما [۳-۶]. در میان فناوری‌های مذکور، بیشتر تحقیقات بر پایه نانو ذرات پلاسما تمرکز داشته‌اند. بررسی نتایج استفاده از نانو ذرات فلزی در سطح فوقانی سلول نشان از افزایش قابل توجهی در جذب نور و متمرکزسازی آن دارد [۳]. همچنین، ساختارهای متنوع باهدف افزایش طول مسیر نوری در داخل سلول نیز پیشنهاد شده است. در بین این طرح‌ها، ایجاد شبکه تناوبی یک روش ساده و مهم برای افزایش مؤثر طول مسیر نوری است؛ زیرا برای افزایش جذب در بازه طول موج گسترده‌تر، می‌توان آن را در هر دو سطح سلول قرار داد و گزارش‌ها متعددی مبنی بر استفاده از شبکه تناوبی مستطیلی در طرفین سلول ارائه شده است [۷-۸]. به تازگی، ثابت شده است که ساختارهای شبکه تناوبی زاویه‌دار بازتابنده‌های بی‌نقصی‌اند، زیرا می‌توانند طول مسیر نوری را پس از تنظیم زاویه پرتوهای پراکنش از زاویه نرمال تا حد زیادی افزایش دهند [۹-۱۱]. در این مقاله، یک ساختار از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی لایه نازک با ترکیبی از آرایه‌های نانو ذرات نقره به عنوان لایه ضد بازتاب و همچنین آرایش‌های شبکه زاویه‌دار تناوبی معرفی شده است. نانو ذرات نقره با استفاده از اثر تشدید پلاسما سطحی ضریب انتقال نور را افزایش می‌دهند، در نتیجه با افزایش در صد نور فرودی به درون لایه فعال، احتمال جذب فوتون بهبود می‌یابد. در سطح تحتانی،

۱. Lumerical FDTD solution



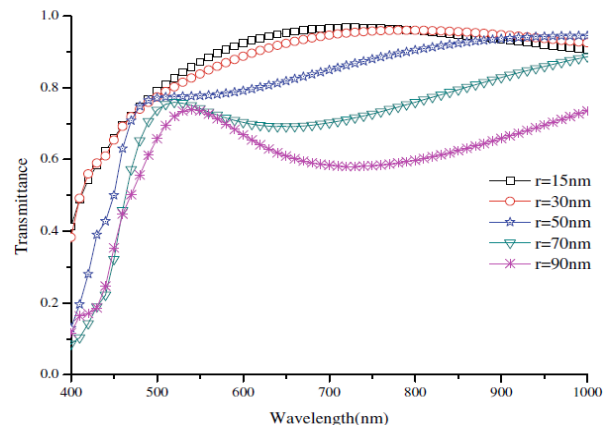
شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی ضریب انتقال نور به داخل لایه Si در ساختار شکل ۱. شعاع نانو ذرات نقره ۵۰ نانومتر و ثابت شبکه از ۴۰ تا ۱۶۰ نانومتر متغیر است.

نانوذره نقره با مقدار شعاع ناچیز یا فاصله تفکیک بزرگ‌تر قابل افزایش است.

### ۲.۳. طراحی سطح تحتانی

سلول‌های لایه نازک در مقایسه با سلول‌های نسل اول سیلیکونی ضعف بزرگی دارند، به عبارتی، نور فرودی می‌تواند به راحتی از لایه نازک سیلیکون بدون هیچ گونه استفاده مؤثری عبور کند [۱۶]. برای حل این مشکل، در قسمت تحتانی لایه سیلیکون، آرایش شبکه زاویه‌دار از ماده  $SiO_2$  تعبیه شده است تا ضریب انتقال نور در سطح تحتانی کاهش یابد. در مطالعات قبلی ثابت شده است استفاده از شبکه‌های زاویه دار در سطح تحتانی انتخاب مناسبی برای افزایش جذب نور در محیط فعال هستند، زیرا می‌توانند با ایجاد بازتابش‌های متوالی، طول مسیر نوری را پس از تنظیم زاویه پرتوهای پراکنش تا حد زیادی افزایش دهند. طرحواره‌ای از ساختار سطح تحتانی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در این شبیه‌سازی‌ها، منبع نور در داخل لایه سیلیکون تعبیه شده است و نمایشگر مسطحی (Transmittance monitor) که ضریب انتقال نور (در صفحه  $x-y$ ) را اندازه‌گیری می‌کند در خارج از لایه سیلیکونی و در فاصله ۱۰۰ نانومتر از سطح تحتانی جای داده شد که در شکل ۴ نشان داده شده است.

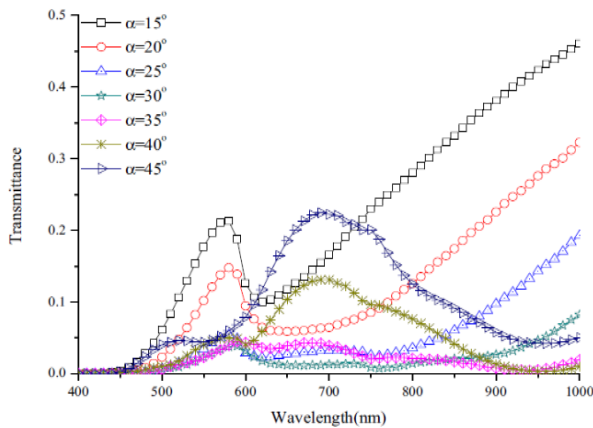
دو پارامتر ساختاری برای شبکه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است: (۱) زاویه پراکنش (با نماد  $\alpha$  بین ۱۵-



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی ضریب انتقال نور به داخل لایه سیلیکون در ساختار شکل ۱. شعاع نانو ذرات نقره از ۱۵ تا ۹۰ نانومتر متغیر بوده و ثابت شبکه ۱۰۰ نانومتر است.

$d$  نشان داده شده، مشاهده می‌شود. برای بررسی تأثیر مدل قرارگیری نانوذره نقره بر ضریب انتقال نور در سطح فوقانی، دو پارامتر ساختاری تغییر داده شده است. فاصله ذره  $d$  و شعاع ذره  $r$  نقره. ابتدا شعاع ذره از ۱۵ به ۹۰ نانومتر تغییر داده شد، در حالی که فاصلات ذرات در ۱۰۰ نانومتر ثابت بود و ضریب انتقال نور به صورت تابعی از طول موج نور فرودی شبیه‌سازی شد و نتایج در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

شکل ۲ نشان می‌دهد که ضریب انتقال نور در این طرح در یک باند وسیع رخ می‌دهد و آرایش‌های با نانو ذرات کوچک‌تر (با شعاع ۱۵ و ۳۰ نانومتر) ضریب انتقال بیشتری در اغلب طول موج‌های مورد مطالعه به وجود آورده است. دلیل این امر اولاً، اثر تشدید پلاسمون است که به سبب نانو ذرات فلزی ایجاد می‌شود؛ دوماً، مشخصات شبکه که مرتبط با آرایش نانو ذرات نقره هستند بر آن تأثیر می‌گذارند. نتایج مشابهی در سایر تحقیقات به دست آمده است [۱۷]. در مرحله دوم، فاصله ذره  $d$  از ۴۰ به ۱۶۰ نانومتر تغییر پیدا کرده، در حالی که شعاع ذرات در حد ۵۰ نانومتر ثابت مانده است که منحنی‌های انتقال حاصل در شکل ۳ مشاهده می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است که فاصله ذره  $d$  بزرگ‌تر (۱۴۰ و ۱۶۰ نانومتر) به ضریب انتقال بیشتری می‌انجامد؛ یعنی قرارگیری نانو ذرات در فاصله بزرگ‌تر، اجازه می‌دهد گستره وسیع‌تری از طول موج‌ها عبور کنند. اشکال ۲ و ۳ نشان می‌دهند که در سطح فوقانی سلول‌ها، ضریب انتقال نور با استفاده از آرایش‌های



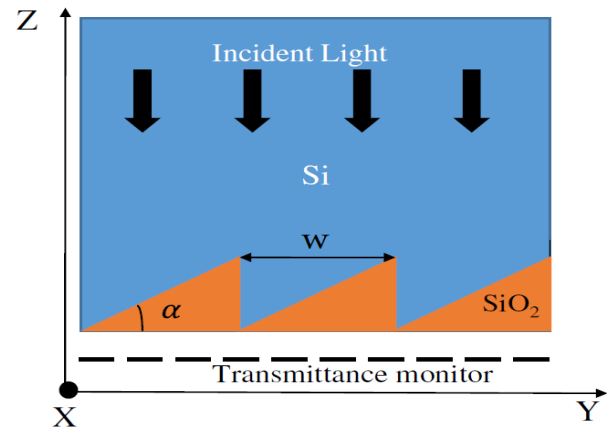
شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی ضریب انتقال نور از Si در ساختار شکل ۴. زاویه تابش  $\alpha$  از ۱۵ تا ۴۵ درجه متغیر است. ثابت شبکه ۶۰۰ نانومتر است.

خیلی کوچک یا خیلی بزرگ باشد و فقط زوایای مشخصی می‌توانند ضریب انتقال بهینه‌ای را تولید کنند. در مرحله دوم، نمودارهای انتقال نور با تغییر ثابت شبکه در شرایط زاویه پراکنش ثابت (۳۵ درجه) شبیه‌سازی شده است و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل مشخص است که کمترین منحنی انتقال زمانی ظاهر می‌شود که ثابت شبکه ۶۰۰ نانومتر باشد.

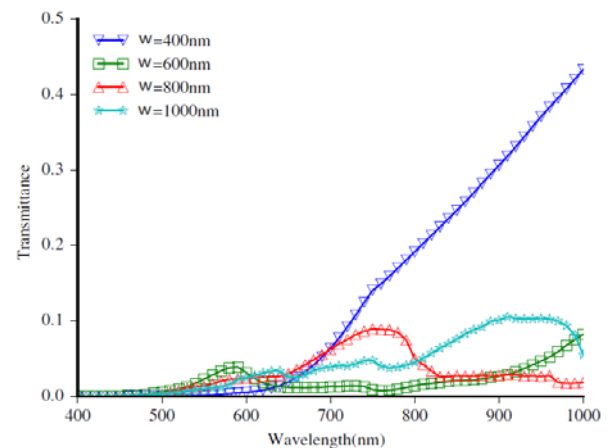
$$2m\lambda_i > w(n_\alpha |\sin \alpha| + n_\beta),$$

$$***m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

همان طور که از شکل ۵ نیز مشخص است برای زاویه‌های ۱۵-۲۰-۲۵ و همچنین در شکل ۶ ثابت شبکه ۴۰۰ نانومتر در اغلب طول موج‌ها نتوانسته‌اند شرط براگ (\*\*\*) را تأمین کرده و این امر سبب شده است میزان بیشتری از نور را از خود عبور دهند و لذا درجه انتقال بسیار بیشتری در اغلب طول موج‌های مورد مطالعه نتیجه داده‌اند. روابط ریاضی حاکم بر معادلات ذکر شده [۱۸ و ۱۹] برای مراتب بالاتر به تفصیل در مقالات [۲۰ و ۲۱] ارائه شده است. با توجه به نمودارهای ۵ و ۶ دریافتیم که پارامترهای ساختاری در آرایش شبکه تناوبی می‌بایستی در سطح تحتانی نیز بهینه شود. مقدار بهینه این پارامترها در این تحقیق،  $\alpha = 35^\circ$  و  $w = 600$  نانومتر است که منحنی انتقال کمتری را نشان می‌دهد.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرحواره‌ای از ساختار سطح تحتانی. منبع نور در داخل لایه سیلیکون قرار داده شده و نمایشگر مسطحی که ضریب انتقال نور (در صفحه x-y) را اندازه‌گیری می‌کند در خارج از لایه سیلیکونی و در فاصله ۱۰۰ نانومتر از سطح تحتانی جای داده شده است.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی ضریب انتقال نور از Si در ساختار شکل ۴. زاویه پراکنش  $\alpha = 35^\circ$  درجه ثابت است. ثابت شبکه  $w$  از ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ متغیر فرض شده است.

۴۵ درجه و ۲) ثابت شبکه (با نماد  $w$  بین ۴۰۰-۱۰۰۰ نانومتر). ابتدا برای سطح تحتانی، اثر زاویه پراکنش بر ضریب انتقال نور با ثابت شبکه تثبیت شده ۶۰۰ نانومتر بررسی شده و نتایج آن در شکل ۵ آمده است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود آرایش‌های شبکه با زوایای پراکنش ۳۰ تا ۳۵ درجه، انتقال بسیار کمتری در اغلب طول موج‌های مورد مطالعه نتیجه داده‌اند. ملاحظه می‌شود که علاوه بر سطح فوقانی، مقادیر اندک ضریب انتقال تا سطح تحتانی ادامه دارد. نمودارهای شکل ۵ ثابت می‌کند که زاویه پراکنش نمی‌تواند

۱۰۰ نانومتری از قسمت فوقانی و قسمت تحتانی سلول تعبیه شده است. در ابتدا بازتاب نور فرودی در طول موج  $\lambda$  از سطح فوقانی سلول (با نماد  $R(\lambda)$ ) و ضریب انتقال نور در سطح تحتانی (با نماد  $T(\lambda)$ ) محاسبه و در نهایت با استفاده از معادله ۱، ضریب جذب نور به وسیله Si (که با نماد  $A(\lambda)$  مشخص شده) برای گستره‌ای از پارامترهای ساختاری محاسبه شده است.

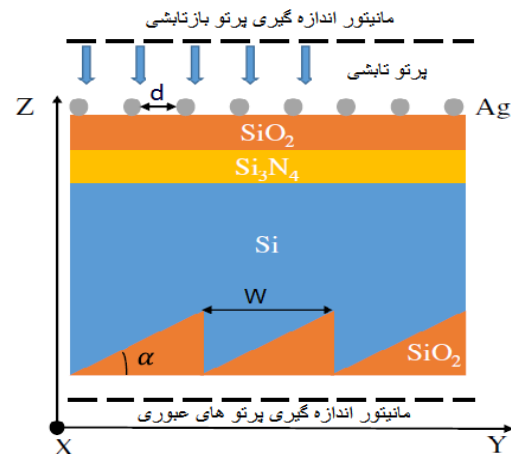
$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda), \quad (1)$$

شکل ۸ منحنی جذب برای ساختار نهایی با تغییر زاویه پراکنش بین ۱۵ تا ۴۵ را نمایش می‌دهد، در حالی که سایر پارامترهای ساختاری ( $d=100$ ،  $r=15$  و  $w=600$  نانومتر) ثابت هستند. با بررسی شکل ۸، مشاهده می‌شود که زوایای پراکنش ۳۰ و ۳۵ درجه در طول موج‌های پایین تر از ۸۰۰ نانومتر، کمی بهتر از سایر زوایا هستند، در حالی که منحنی‌های جذب در طول موج‌های بالاتر از ۸۰۰ نانومتر به شدت نوسانی شده‌اند و تعیین این که کدام یک بهتر است بسیار دشوار است. از طرفی هنگامی که سایر پارامترهای ساختاری نیز ( $w$ )،  $r$  و  $d$  تغییر می‌کنند، منحنی‌های جذب رفتارهای نوسانی مشابهی نشان می‌دهند؛ بنابراین، برای تعیین بازدهی تله اندازی نوری در سلول‌ها، به جز روش مذکور، استفاده از میانگین موزون فوتون‌های جذب شده توسط سیلیکون در کل طول موج‌ها (که در ادامه با نماد  $\mu$ ) نشان داده شده است) مناسب‌تر است که از فرمول (۲) تعیین می‌شود:

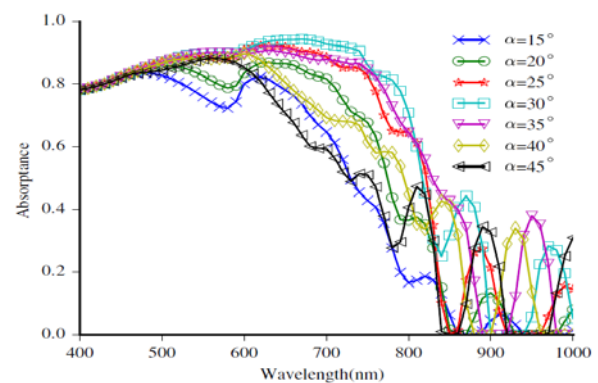
$$\mu = \frac{\int_{400}^{1000} A(\lambda) GAM_{1/5}(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{1000} GAM_{1/5}(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

$GAM_{1/5}(\lambda)$  طیف خورشید است که توزیع ارقام فوتون‌ها را به صورت تابعی از طول موج (تحت شرایط آزمایش استاندارد) نشان می‌دهد و توسط معادله (۳) با استفاده از تابش طیف خورشیدی مرجع  $w(\lambda)$  محاسبه می‌شود.  $w(\lambda)$  تابش طیف خورشیدی نظیر در طول موج  $\lambda$  است.  $E(\lambda)$  انرژی فوتون در طول موج  $\lambda$ ،  $h$  ثابت پلانک و  $c$  سرعت نور است [۱۸].

$$GAM_{1/5}(\lambda) = \frac{w(\lambda)}{E(\lambda)} = \frac{w(\lambda)\lambda}{hc}, \quad (3)$$



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) هندسه کامل ساختار شبیه‌سازی شده که در قسمت فوقانی سلول خورشیدی لایه نازک به همراه ذرات نانو نقره و لایه ضد بازتاب  $SiO_2/Si_3N_4$  و سطح تحتانی که شبکه پنجره‌ای زاویه‌دار از ماده  $SiO_2$  در آن تعبیه شده است و مکان قرارگیری نمایشگرها در آن نشان داده شده است.



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی جذب  $A(\lambda)$  برای ساختار نهایی نشان داده شده در شکل ۷. زاویه پراکنش  $\alpha$  از ۱۵ تا ۴۵ درجه متغیر است. ثابت شبکه ( $w=600$ )، شعاع ذرات نقره ۱۵، فاصله ذرات ۱۰۰ نانومتر می‌باشد.

### ۳.۳ ساختار سلول خورشیدی پیشنهادی

پس از بررسی جداگانه سطوح فوقانی و تحتانی سلول، طرح‌های ساختاری مذکور را در هر دو سطح ترکیب کرده و ضریب جذب نور سلول لایه نازک تعیین شده و الگوی ترکیبی در شکل ۷ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی‌ها، ضخامت لایه سیلیکون نازک ۱ میکرومتر فرض شده است.

همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، دو مانیتور مسطح که ضریب انتقال نور را اندازه‌گیری می‌کند در فاصله

جدول ۱. مقادیر  $\mu$  به ترتیب با تغییر شعاع ذرات، در سطح فوقانی و تغییر زاویه پراکنش در سطح تحتانی را نشان می‌دهد؛  $d = 100 \text{ nm}$  و  $w = 600 \text{ nm}$  ثابت فرض شده است.

$\alpha/r$	$r=15$	$r=30$	$r=50$	$r=70$	$r=90$
$\alpha=150$	۰/۵۶۶۸	۰/۵۶۵۳	۰/۵۳۲۳	۰/۴۶۵۳	۰/۴۴۷۷
$\alpha=200$	۰/۶۴۰۷	۰/۶۳۷	۰/۵۸۸۴	۰/۵۰۲۳	۰/۴۷۴۶
$\alpha=250$	۰/۷۰۹۶	۰/۷۰۶	۰/۶۴۳۱	۰/۵۳۷۴	۰/۴۹۹۸
$\alpha=300$	۰/۷۴۶۷	۰/۷۴۶۲	۰/۶۷۵۳	۰/۵۵۴۶	۰/۵۱۰۳
$\alpha=350$	۰/۷۲۸۴	۰/۷۲۸۷	۰/۶۶۲۷	۰/۵۴۵۳	۰/۵۰۴
$\alpha=400$	۰/۶۶۲۷	۰/۶۶۳۳	۰/۶۱۴۸	۰/۵۱۷۹	۰/۴۸۵۸
$\alpha=450$	۰/۶۱۱	۰/۶۱۲۵	۰/۵۷۸۲	۰/۴۹۷۹	۰/۴۷۱

جدول ۲. مقادیر  $\mu$  را به ترتیب با تغییر فاصل  $Z$  بین ذرات  $d$  در سطح فوقانی و تغییر زاویه پراکنش  $\alpha$  در سطح تحتانی نشان می‌دهد، در حالی که سایر پارامترها ثابت هستند ( $r = 50 \text{ nm}$  و  $w = 600 \text{ nm}$ ).

$\alpha/d$	$d=60$	$d=80$	$d=100$	$d=140$	$d=160$
$\alpha=150$	۰/۴۷۰۱	۰/۵۰۵۹	۰/۵۳۲۳	۰/۵۵۷۲	۰/۵۵۱۴
$\alpha=200$	۰/۵۱۲۶	۰/۵۵۵۹	۰/۵۸۸۴	۰/۶۲۰۳	۰/۶۱۴۱
$\alpha=250$	۰/۵۵۴۱	۰/۶۰۴۸	۰/۶۴۳۱	۰/۶۸۱۵	۰/۶۷۴۹
$\alpha=300$	۰/۵۷۷۴	۰/۶۳۳۲	۰/۶۷۵۳	۰/۷۱۷۵	۰/۷۱۰۶
$\alpha=350$	۰/۵۶۷۴	۰/۶۲۱۹	۰/۶۶۲۷	۰/۷۰۳	۰/۶۹۶۱
$\alpha=400$	۰/۵۳۳۳	۰/۵۸۰۳	۰/۶۱۴۸	۰/۶۴۷۶	۰/۶۴۱۲
$\alpha=450$	۰/۵۰۹۲	۰/۵۴۹۴	۰/۵۷۸۲	۰/۶۰۴۵	۰/۵۹۸۴

زاویه پراکنش  $30$  یا  $35$  درجه باشد. این نتیجه با نتایج قبلی مطابقت دارد که هر چه فاصله بین ذرات بزرگ‌تر باشد میزان انتقال نور در سطح فوقانی بیشتر می‌شود که نمودار شکل ۳ نیز این را نشان می‌دهد. برای بهینه‌سازی بیشتر ساختار پیشنهادی، مقادیر  $\mu$  تحت دو حالت زیر نیز محاسبه شده‌اند: حالت اول  $r$  و  $w$  متغیر در حالی که  $d$  و  $\alpha$  ثابت هستند که مقادیر نظیر  $\mu$  در جدول ۳ آمده‌اند. حالت دوم  $w$  و  $d$  متغیر در حالی که  $r$  و  $\alpha$  ثابت هستند که نتایج در جدول ۴ آمده است. با توجه به جدول ۳، دو مقدار بزرگ‌تر  $\mu$  در حالت اول برای  $r=15 \text{ nm}$  و  $w=600 \text{ nm}$  برابر  $0.7647$ ، برای  $r=30$  و  $w=600 \text{ nm}$  برابر  $0.7642$  اندازه‌گیری شده‌اند. از جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که بزرگ‌ترین مقادیر  $\mu$  در حالت دوم برای  $d=140 \text{ nm}$  و  $w=600 \text{ nm}$  برابر  $0.7175$  و برای  $d=160 \text{ nm}$  و  $w=600 \text{ nm}$  برابر  $0.7106$  است. نتایجی

با استفاده از معادله (۲) میانگین موزون فوتون‌های جذب شده توسط سیلیکون در کل طول موج‌ها ( $\mu$ ) را تحت ترکیب پارامترهای مختلف ساختاری ( $d$  و  $r$ ) برای آرایش‌های نانوذره نقره در سطح فوقانی و در سطح تحتانی ( $\alpha$  و  $w$ ) محاسبه کردیم. نتایج مربوطه به ترتیب در جداول ۱ تا ۴ آمده است. جدول ۱ مقادیر میانگین موزون فوتون‌هایی که به وسیله سیلیکون جذب شده است را نشان می‌دهد ( $d$  و  $w$  ثابت فرض شده‌اند). از جدول ۱ مشخص است که در شعاع  $15$  نانومتر و زاویه  $30$  درجه، بیشترین مقدار  $0.7467$  حاصل شده است و این نتیجه ترکیبی از انتقال نور بالا در سطح فوقانی با اندازه کوچک نانوذره نقره و ضریب انتقال کم از سطح تحتانی با زاویه  $30$  یا  $35$  درجه است. به طور مشابه، از جدول ۲ مشخص است که مقدار بهینه  $\mu$  زمانی حاصل می‌شود که فاصله بین ذرات  $160 \text{ nm}$  یا  $140 \text{ nm}$  بوده و نیز

جدول ۳. مقادیر  $\mu$  را به ترتیب با تغییر شعاع نانو ذرات  $r$  در سطح فوقانی و تغییر ثابت شبکه  $w$  در سطح تحتانی نشان می‌دهد، در حالی که سایر پارامترها ثابت هستند  $\alpha = 30^\circ$  و  $d = 100 \text{ nm}$ .

w/r	r=15	r=30	r=50	r=70	r=90
w=400	۰٫۶۵۸۳	۰٫۶۵۳۳	۰٫۶۰۶۵	۰٫۵۲۳۶	۰٫۴۹۶۸
w=600	۰٫۷۴۶۷	۰٫۷۴۶۲	۰٫۶۷۵۳	۰٫۵۵۴۶	۰٫۵۱۰۳
w=800	۰٫۷۰۳۹	۰٫۷۰۳۳	۰٫۶۴۴۷	۰٫۵۳۷۹	۰٫۵۰۰۸
w=1000	۰٫۷۰۲۴	۰٫۶۹۸۳	۰٫۶۳۷۱	۰٫۵۳۴۸	۰٫۴۹۹۷

جدول ۴. مقادیر  $\mu$  را به ترتیب با تغییر فاصله بین ذرات،  $(d)$  در سطح فوقانی و تغییر ثابت شبکه  $w$  در سطح تحتانی نشان می‌دهد، در حالی که سایر پارامترها ثابت هستند  $\alpha = 30^\circ$  و  $r = 50 \text{ nm}$ .

w/d	d=60	d=80	d=100	d=140	d=160
w=400	۰٫۵۳۰۹	۰٫۵۷۴۲	۰٫۶۰۶۵	۰٫۶۳۸	۰٫۶۳۱۷
w=600	۰٫۵۷۷۴	۰٫۶۳۳۲	۰٫۶۷۵۳	۰٫۷۱۷۵	۰٫۷۱۰۶
w=800	۰٫۵۵۵۷	۰٫۶۰۶۷	۰٫۶۴۴۷	۰٫۶۸۱۹	۰٫۶۷۵۲
w=1000	۰٫۵۴۹۵	۰٫۵۹۹۴	۰٫۶۳۷۱	۰٫۶۷۴۹	۰٫۶۶۸۲

می‌شود استفاده شود. در سطح تحتانی سلول‌ها، آرایش‌های شبکه زاویه‌دار برای کاهش انتقال نور استفاده شد. در نهایت، دو سطح را با هم ترکیب کرده و میانگین موزون فوتون‌هایی که به وسیله سیلیکون در کل طول موج‌های مورد مطالعه جذب شده بود محاسبه کردیم. نتایج نشان می‌دهند که بازدهی به دام اندازی نور می‌تواند تحت ترکیب‌های خاصی از پارامترهای ساختاری بهینه شود. به طور مثال، میانگین موزون  $\mu = 0.7467$  زمانی قابل حصول است که پارامترهای  $w=600$ ،  $d=100$  و  $\alpha = 30^\circ$  را داشته باشیم. طرح ساختاری که در این مقاله پیشنهاد شده است می‌تواند در عمل برای ارتقای بازدهی‌های به دام اندازی نور سلول‌های خورشیدی سیلیکونی لایه نازک پیاده‌سازی شود.

که در جداول ۳ و ۴ مشاهده شدند نشان می‌دهند که ضریب به دام اندازی نور زمانی بهینه می‌شود که ثابت شبکه زاویه‌دار در لایه تحتانی  $600$  نانومتر باشد که با نتایج به دست آمده در نمودار شکل ۶ مطابقت دارد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

بر اساس مدل‌های مختلف قرارگیری نانو ذرات نقره و شبکه زاویه‌دار تناوبی، ساختارهای سلول‌های خورشیدی لایه نازک را در هر دو سطح فوقانی و تحتانی طراحی کردیم. در طراحی سطح فوقانی سلول، آرایش‌های نانو ذرات نقره برای افزایش انتقال نور به داخل ناحیه فعال در بالا تعیین شدند تا از اثر تشدید پلاسمون سطحی که در اثر نانو ذرات فلزی ایجاد

#### مراجع

1. A Goetzberger, C Hebling and H W Schock, *Materials science and engineering: R: Reports* **40** (2003) 1.
2. F Enrichi, A Quandt and G C Righini, *Renewable and sustainable energy reviews* **82** (2018) 2433.
3. P Mandal and S Sharma. *Renewable and sustainable energy reviews* **65** (2016) 537.
4. A Tamang, A Hongsingthong, V Jovanov, P Sihanugrist, B Khan, A Dewan and D Knipp, *Scientific reports* **6** (2016) 1.
5. K L Kelly, E Coronado, L L Zhao and G C Schatz, "The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment" *Kelly optical* (2003).
6. E Manea, E Budianu, M Purica, D Cristea, I Cernica, R Muller and V M Poladian, *Solar energy materials and solar cells* **87** (2005) 423.
7. Y MSong, J S Yu and Y T Lee, *Optics letters* **35**

- Academic (1985).
15. S Zhang, M Liu, W Liu, Y Liu, Z Li, , X Wang and F Yang, *Journal of Physics Communications* **2** (2018) 055032.
  16. R S Dubey, K Jhansirani and S Singh, *Results in Physics* **7** (2017) 77.
  17. A A Tabrizi and A Pahlavan, *Optics communications* **454** (2020) 124437.
  18. S Mokkaapati and K R Catchpole, *Journal of applied physics* **112** (2012) 101101.
  19. E Battal, T A Yogurt, L E Aygun and A KOkyay, *Optics express* **20** (2012) 9458.
  20. W Zhang, G Zheng, L Jiang and X Li, *Optics communications* **298** (2013) 250.
  21. J Gjessing, E. S Marstein and A Sudbø, *Optics express* **18** (2010) 5481.
  - (2010) 276.
  8. W Bai, Q Gan, F Bartoli, J Zhang, L Cai, Y Huang, and G Song. *Optics letters* **34** (2009) 3725.
  9. G Zheng, W Zhang, L Xu, Y Chen and Y Liu, *Infrared physics & technology* **67** (2014) 52.
  10. A modeling method to enhance the conversion efficiency by optimizing light trapping structure in thin-film solar cells. *Solar Energy*, **120** (2005) 505.
  11. L J Lin and Y P Chiou, *Solar energy* **86** (2012) 1485.
  12. K L Kelly, E Coronado, L L Zhao and G C Schatz, "The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment" ACS Publications (2003).
  13. Inc, [Online]. Available: <http://www.lumerical.com>.
  14. D P Edward and I J H O O C O S Palik, "Handbook of optical constants of solids", Orlando, Florida: