ؾؖۅ۬ۿۺ **ڣي**ۯۑڮ

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲۰، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۹

افزایش جذب در سلولهای خورشیدی لایهٔ نازک با استفاده از هیبرید نانو ذرات پلاسمونی و شبکهٔ زاویهدار تناوبی

افسانه عسگرییان تبریزی'، علی پهلوان' و مهدی رادمهر"

۱. جهاد دانشگاهی واحد تبریز ۲. دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه آزاد ساری، ساری ۳. دانشکدهٔ فنی مهندسی، دانشگاه آزاد ساری، ساری

پست الكترونيكي asgariyan@acecr.ac.ir

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

چکیدہ

در این مقاله، یک ساختار دوبعدی از سلولهای خورشیدی سیلیکونی لایه، نازک با ترکیبی از آرایههای نانو ذرات نقره و شبکهٔ زاویـهدار تنـاوبی معرفی شده است. نانوذرات نقره با استفاده از اثر تشدید پلاسمون سطحی، ضریب انتقال نور به داخل را افزایش میدهند در نتیجـه بـا افـزایش در صد نور فرودی به درون لایهٔ فعال، احتمال جذب فوتون را بهبود میبخشد. برای ایجاد یک ساختار بازتابنده در سطح تحتانی، آرایـهای از شبکهٔ زاویهدار با هدف افزایش طول مسیر نوری در داخل سلول، به کار گرفته شده است. با استفاده از روش FDTG، ضریب انتقال و بازتاب نور در هر دو سطح فوقانی و تحتانی در گسترهٔ طول موج ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر بررسی شده و تأثیر پارامترهای ساختاری از جمله شـعاع، فاصـلهٔ نـانوذرات، زاویهٔ پراکنش و فاصلهٔ شبکه گزارش شده است. در نهایت، دو سطح را با هم ترکیب کرده و میانگین موزون فوتونهایی که به وسیلهٔ لایهٔ فعال در کل طولموجهای مورد مطالعه جذب شده، محاسبه شده است. نتایج نشان میدهند که بازدهی به دام اندازی نور با تعیر پارامترهای ساختاری از جمله مناع، لایهٔ فعال در پیدا می کند.

واژههای کلیدی: نانو ذرات نقره، اثر پلاسمون سطحی، سلول خورشیدی لایهٔ نازک، شبکهٔ زاویهدار تناوبی، پراکنش نوری

۱. مقدمه

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

آنها، جذب بسیار پایین در لبهٔ 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 تقسیمشدهاند: ۱: کاهش ضریب بازتاب نور در سطح فوقانی. ۲: افزایش طول مسیر پرتو نوری در داخل ناحیهٔ فعال سلول



شکل ۱. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) هندسهٔ ساختار شبیهسازی شدهٔ قسمت فوقانی سلول خورشیدی لایهٔ نازک به همراه نانوذرات نقـره و لایـهٔ ضد بازتاب ،N_{*}SiO_۲ / Si_۷ و نمای بالایی آن.

> [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 روکش های ضد بازتاب، ایجاد شبکههای پنجرهای، استفاده از بلورهای فوتونیک و استفاده از نانو ذرات فلزی بر پایهٔ پلاسـمون [۳–۶]. در میـان فناوری های مذکور، بیشتر تحقیقات بر پایه نانو ذرات پلاسمونی 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 داخـل سـلول نیـز پیشنهاد شده است. در بین این طرحها، ایجاد شبکهٔ تناوبی یک روش ساده و مهم برای افزایش مؤثر طول مسیر نوری است؛ زیرا برای افزایش جذب در بازهٔ طول موج گستردهتر، می توان آن را در هر دو سطح سلول قرار داد و گزارش ها متعددی مبنی بر استفاده از شبکهٔ تناوبی مستطیلی در طرفین سلول ارائه شده است [٧-٨]. به تازگی، ثابت شده است که ساختارهای شبکه تناوبی زاویهدار بازتابندههای بینقصیاند، زیرا میتوانند طول مسیر نوری را پس از تنظیم زاویهٔ پرتوهای پراکنش از زاویهٔ نرمال تا حد زیادی افزایش دهند [۱۱-۹]. در این مقاله، یک ساختار از سلول های خورشیدی سیلیکونی لایهٔ نازک با ترکیبی از آرایههای نانو ذرات نقره به عنوان لایهٔ ضد بازتاب و همچنین آرایشهای شبکهٔ زاویـهدار تناوبی معرفی شده است. نانو ذرات نقره با استفاده از اثر تشديد پلاسمون سطحي ضريب انتقال نور را افزايش میدهند، در نتیجه با افزایش در صد نور فرودی به درون لایهٔ فعال، احتمال جذب فوتون بهبود مىيابد. در سطح تحتاني،

آرایشی از شبکهٔ 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 گسترهٔ طول موج ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر با روش شبیهسازی عددی FDTD به وسیلهٔ گسترهای از پارامترهای ساختاری بررسی شده و نقطهٔ بهینه معرفی شده است.

۲. روش شبیهسازی عددی

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

۳. مدلسازی

۱.۳. طراحي سطح فوقاني

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، نانوذرهٔ نقره در قسمت فوقانی لایهٔ Sir / N₄SiO₄ قرار داده شده است. قبلاً ثابت شده است که لایهٔ Sir / N₄SiO₄ در کاهش ضریب بازتاب نور در سطح فوقانی سلولها مؤثر است [۱۶]. در شکل ۱ آرایش نانو ذرات مجاور که فاصلهٔ آنها با نماد

^{1.} Lumerical FDTD solution



داخل و یه سیملون در ساختار ساختار استناع ۲۰ سناع کانو درات تقـره از تا ۹۰ نانومتر متغیر بوده و ثابت شبکه ۱۰۰ نانومتر است.

b نشان داده شده، مشاهده می شود. برای بررسی تأثیر مدل قرارگیری نانوذرهٔ نقره بر ضریب انتقال نور در سطح فوقانی، دو پارامتر ساختاری تغییر داده شده است. فاصلهٔ ذرهٔ b و شعاع ذرهٔ کروی نقره r. ابتدا شعاع ذره از ۱۵ به ۹۰ نانومتر تغییر داده شد، در حالی که فاصلظ ذرات در ۱۰۰ نانومتر ثابت بود و ضریب انتقال نور به صورت تابعی از طول موج نور فرودی شبیه سازی شد و نتایج در شکل ۲ نشان داده شده اند.

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 تشديد پلاسمون است كه به سبب نانو ذرات فلـزى ايجاد میشود؛ دوماً، مشخصات شبکه که مرتبط با آرایش نـانو ذرات نقره هستند بر آن تأثیر میگذارند. نتایج مشابهی در سایر تحقيقات به دست آمده است [١٧]. در مرحلهٔ دوم، فاصلهٔ ذرهٔ d از ۴۰ به ۱۶۰ نانومتر تغییر پیدا کرده، در حالی که شعاع ذرات در حد ۵۰ نانومتر ثابت مانده است که منحنی های انتقال حاصل در شکل ۳ مشاهده می شوند. همان طور که در شکل ۳ مشخص است که فاصلهٔ ذرهٔ d بزرگتر (۱۴۰ و ۱۶۰ نانومتر) به ضریب انتقال بیشتری میانجامد؛ یعنی قرارگیری نانو ذرات در فاصلهٔ بزرگتر، اجازه میدهد گسترهٔ وسیعتری از طول موجها عبور کنند. اشکال ۲ و ۳ نشان می دهند که در سطح فوقانی سلولها، ضریب انتقال نـور بـا اسـتفاده از آرایشهـای



نانوذرهٔ نقره با مقدار شعاع نـاچیز یـا فاصـلهٔ تفکیـک بزرگتـر قابلافزایش است.

۲.۳. طراحی سطح تحتانی

سلول های لایهٔ نازک در مقایسه با سلول های نسل اول سیلیکونی ضعف بزرگی دارند، به عبارتی، نور فرودی میتواند به راحتی از لایهٔ نازک سیلیکون بدون هیچ گونه استفادهٔ مؤثری عبور کند [18]. برای حل این مشکل، در قسمت تحتانی لایهٔ سیلیکون، آرایش شبکهٔ زاویهدار از مادهٔ SiO_r 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 می توانند با ایجاد باز تابش های متوالی، طول مسیر نوری را پس از تنظیم زاویهٔ پرتوهای پراکنش تا حد زیادی افزایش دهند. طرحوارهای از ساختار سطح تحتانی در شکل ۴ مشاهده میشود. در ایـن شبیهسـازیها، منبـع نـور در داخل لایهٔ سیلیکون تعبیه شده است و نمایشگر مسطحی (Transmittance monitor) که ضریب انتقال نور (در صفحه x-y) را اندازه گیری می کند در خارج از لایـهٔ سـیلیکونی و در فاصلهٔ 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 قرارگرفتـه اسـت: ۱) زاویـهٔ پـراکنش (بـا نمـاد α بـین ۱۵-



سکل ۱. (ریکی در نسخه الکتروییکی) طرحوارهای از ساختار سطح تحتانی. منبع نور در داخل لایهٔ سیلیکون قرار داده شده و نمایشگر مسطحی که ضریب انتقال نور (در صفحهٔ x-y) را اندازه گیری میکند در خارج از لایهٔ سیلیکونی و در فاصلهٔ ۱۰۰ نانومتر از سطح تحتانی جای داده شده است.



سکل ۲. (رندی در نسخه انگرونیکی) منحنی صریب انتقال نور ار Si در ساختار شکل ۴. زاویهٔ پراکنش α =۳۵ درجـه ثابـت اسـت. تابت شبکهٔ w از ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ متغیر فرض شده است.

۴۵ درجه و ۲) ثابت شبکه (با نماد ۳ بین ۴۰۰-۱۰۰۰ نانومتر). ابتدا برای سطح تحتانی، اثر زاویهٔ پراکنش بر ضریب انتقال نور با ثابت شبکهٔ 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 درجهٔ، انتقال بسیار کمتری در اغلب طول موجهای مورد مطالعه نتیجه دادهاند. ملاحظه می شود که علاوه بر سطح فوقانی، مقادیر اندک ضریب انتقال تا سطح تحتانی ادامه دارد. نمودارهای شکل ۵ ثابت میکند که زاویهٔ پراکنش نمی تواند



شکل ۵. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) منحنی ضریب انتقال نـور از Si در ساختار شکل ۴. زاویهٔ تـابش *α* از ۱۵ تـا ۴۵ درجـه متغیـر است. ثابت شبکه ۶۰۰ نانومتر است.

خیلی کوچک یا خیلی بزرگ باشد و فقط زوایای مشخصی می توانند ضریب انتقال بهینه ای را تولید کنند. در مرحلهٔ دوم، نمودارهای انتقال نور با تغییر ثابت شبکه در شرایط زاویهٔ پراکنش ثابت (۳۵ درجه) شبیه سازی شده است و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل مشخص است که کمترین منحنی انتقال زمانی ظاهر می شود که ثابت شبکه ۰۶۰ نانومتر باشد.

 $\mathsf{Y}m\lambda > w (n_{\alpha} | \sin \alpha | + n_{\beta}),$ *** $m = \cdot, +, +, +, \dots$

همان طور که از شکل ۵ نیز مشخص است برای زاویه های ۱۵–۲۰–۲۰ 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 درجهٔ 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 تفضیل ۵ و ۶ دریافتیم که پارامترهای ساختاری در آرایش شبکهٔ تناوبی می بایستی در سطح تحتانی نیز بهینه شود. مقدار بهینهٔ این پارامترها در این تحقیق، ۳۵= α و ۵۰۰=۳ نانومتر است که منحنی انتقال کمتری را نشان می دهد.



شکل ۷. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) هندسهٔ کامل ساختار شبیهسازی شده که در قسمت فوقانی سلول خورشیدی لایهٔ نازک به همراه نانو ذرات نقره و لایهٔ ضد بازتاب siO₁/Si₇N_۶ و سطح تحتانی که شبکهٔ پنجرهای زاویهدار از مادهٔ siO₁ در آن تعبیه شده است و مکان قرارگیری نمایشگرها در آن نشان داده شده است.



شکل ۸ (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) منحنی جذب (A(λ برای ساختار نهایی نشان داده شده در شکل ۷. زاویهٔ پراکنش α از ۱۵ تا ۴۵ درجه متغیر است. تابت شبکه (۶۰۰۳)، شعاع نانو ذرات نقره ۱۵. فاصلهٔ ذرات ۱۰۰ نانومتر می باشد.

۳.۳. ساختار سلول خورشيدي پيشنهادي

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

همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود، دو مانیتور مسطح که ضریب انتقال نور را اندازه گیری میکند در فاصلهٔ

۱۰۰ نانومتری از قسمت فوقانی و قسمت تحتانی سلول تعبیه شده است. در ابتدا بازتاب نور فرودی در طول موج λ از سطح فوقانی سلول (با نماد (λ)) و ضریب انتقال نور در سطح تحتانی (با نماد (λ)) محاسبه و در نهایت با استفاده از معادلهٔ ۱، ضریب جذب نور به وسیلهٔ Si (که با نماد (λ)) مشخص شده) برای گستره ای از پارامترهای ساختاری محاسبه شده است.

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

شکل ۸ منحنی جذب برای ساختار نهایی با تغییر زاویهٔ پراکنش بین ۱۵ تا ۴۵ را نمایش می دهد، در حالی که سایر پارامترهای ساختاری (۴۰۰ها ا و ۴۰۰ عنانومتر) ثابت هستند. با بررسی شکل ۸ مشاهده می شود که زوایای پراکنش ۳۰ و ۳۵ درجه در طول موجهای پایین تراز ۴۰۰ نانومتر، کمی بهتر از سایر زوایا هستند، در حالی که منحنی های جذب در طول موجهای بالاتر از ۴۰۰ نانومتر به شدت نوسانی شدهاند و تعیین این که کدام یک بهتر است بسیار دشوار است. از طرفی هنگامی که سایر پارامترهای ساختاری نیز (۳۰ مشابهی نشان می دهند؛ بنابراین، برای تعیین بازدهی تله اندازی نوری در سلولها، به جز روش مذکور، استفاده از میانگین موزون فوتونهای جذب شده توسط سیلیکون در کل ماست راست که از فرمول (۲) تعیین می شود:

$$\mu = \frac{\int_{\xi...}^{1...} A(\lambda) GAM \gamma(\lambda) d\lambda}{\int_{\xi...}^{1...} GAM \gamma(\lambda) d\lambda},$$
(Y)

GAM طیف خورشید است که توزیع ارقام فوتونها GAM (λ) را به صورت تابعی از طول موج (تحت شرایط آزمایش استاندارد) نشان میدهد و توسط معادلهٔ (۳) با استفاده از تابش طیف خورشیدی مرجع (λ) w، محاسبه می شود. (λ) w تابش طیف خورشیدی نظیر در طول موج λ است. (λ) w تابش رو در طول موج λ ، h ثابت پلانک و c مرعت نور است [Λ].

$$GAM_{1/0}(\lambda) = \frac{w(\lambda)}{E(\lambda)} = \frac{w(\lambda)\lambda}{hc}, \qquad (r)$$

α/r	r=۱۵	۰ ۲ ۳	r=∆∘	r=V∘	r=٩。
$\alpha = 1 \Delta^{\circ}$	°/۵۶۶∧	°/۵۶۵۳	۰/۵۳۲۳	•/4903	•/ * *VV
$\alpha = 7 \circ \circ$	0/94°V	۰/۶۳V	•/۵۸۸۴	۰/۵۰۲۳	°/4749
$\alpha = Y \Delta \circ$	۰/۷۰۹۶	۰/۷۰۶	°/8471	°/03774	•/۴۹۹۸
$\alpha = \mathfrak{r} \circ \circ$	۰/ ۷۴ ۶۷	•/V * ۶۲	•/9444	°/DD49	٥/۵۱۰۳
$\alpha = r \Delta \circ$	•/VY/Y	•/VYAV	•/۶۶۲V	•/۵۴۵۳	۰/۵۰۴
$\alpha = * \circ \circ$	0/88TV	°/8934	۰/۶۱۴۸	°/01V9	•/۴۸۵۸
$\alpha = 40^{\circ}$	۰/۶۱۱	۰/۶۱۲۵	۰/۵V۸۲	۰/۴۹۷۹	۰/۴V۱

جدول ۱. مقادیر µ به ترتیب با تغییر شعاع ذرات، در سطح فوقانی و تغییر زاویهٔ پراکنش در سطح تحت انی را نشان میدهد؛ *d* = ۱۰۰ *nm و* w=۶۰۰ nm ثابت فرض شده است.

جدول ۲. مقادیر µ را به ترتیب با تغییر فاصلZ بین ذرات b در سطح فوقانی و تغییر زاویZ پراکنش α در سطح تحتانی نشان میدهد، در حالی که سایر پارامترها ثابت هستند (r =۵۰ m و r =۵۰ m).

α/d	$d = \mathfrak{S} \circ$	$d = \land \circ$	$d = i \circ \circ$	d = 1	$d = 1 $ \circ
$\alpha = 1 \Delta^{\circ}$	۰/۴۷۰۱	۰/۵°۵۹	0/AMTM	°/00V7	°/0014
$\alpha = 7 \circ \circ$	°/0179	°/۵۵۵۹	۰/۵۸۸۴	0/97°T	0/8141
<i>α</i> =۲∆∘	°/DD41	۰/۶۰۴۸	0/SFT1	۰/۶۸۱۵	۰/۶V۴٩
$\alpha = r \circ \circ$	۰/۵۷۷۴	o/8447	0/8VQM	۰/۷۱۷۵	۰/۷۱۰۶
$\alpha = r \circ$	°/08V4	°/8719	0/88TV	۰٫٧۰٣	۰/۶ ٩ ۶١
$\alpha = * \circ \circ$	°/2777	°/01 ° m	۰/۶۱۴۸	0/94V9	°/8417
$\alpha = 40^{\circ}$	۰/۵۰۹۲	°/0494	 \UNAY 	۰/۶۰۴۵	°/2914

با استفاده از معادلهٔ (۲) میانگین موزون فوتونهای جذب شده توسط سیلیکون در کل طول موجها (μ) را تحت ترکیب پارامترهای مختلف ساختاری ($b \ e \ r$) برای آرایش های نانوذرهٔ نقره در سطح فوقانی و در سطح تحتانی ($\alpha \ e \ w$) محاسبه کردیم. نتایج مربوطه به ترتیب در جداول ۱ تا ۴ آمده است. جدول ۱ مقادیر میانگین موزون فوتون هایی که به وسیلهٔ میلیکون جذب شده است را نشان میدهد ($b \ e \ w$ ثابت نانومتر و زاویهٔ ۳۰ درجه، بیشترین مقدار ۷۴۶۷، حاصل شده است و این نتیجه ترکیبی از انتقال نور بالا در سطح فوقانی با اندازهٔ کوچک نانوذرهٔ نقره و ضریب انتقال کم از سطح تحتانی با زاویهٔ ۳۰ یا ۵۳ درجه است. به طور مشابه، از جدول ۲ مشخص است که مقدار بهینظ μ زمانی حاصل می شود که فاصلهٔ بین ذرات ۲۰۰ یا ۱۶۰ یا ۱۶۰ ما

۵	۵
~	-

w/r	r=۱۵	۰ ۲=۲	r =∆ ∘	r =V∘	۰ ۹= ۲
$W = k \circ \circ$	°/8013	0/8077	۰ <i>/۶</i> ۰۶۵	°/6739	•/۴۹۶۸
$W= \mathfrak{S} \circ \circ$	۰/Y۴۶V	o/VF97	•/9224	°/DD49	۰/۵۱۰۳
W=A••	৽/V৽۳ঀ	۰/۷۰۳۳	0/944V	°/23774	۰/۵ • ۸
W=۱۰۰۰	•/V•Y4	°/۶۹۸۳	0/8TV1	0/0°FA	۰٬۴۹۹۷

جدول ۳. مقادیر μ را به ترتیب با تغییر شعاع نانو ذرات r در سطح فوقانی و تغییر ثابت شبکهٔ w در سطح تحتانی نشان میدهـد، در حـالی کـه سایر یارامترها ثابت هستند °α =۳۰ و d = ۱۰۰ nm).

جدول ۴. مقادیر μ را به ترتیب با تغییر فاصلهٔ بین ذرات، (d) در سطح فوقانی و تغییر ثابت شـبکهٔ w در سطح تحتـانی نشـان میدهـد، در حـالی کـه سـایر یارامتر ها ثابت هستند ۳۰= α و r=۵۰nm.

w/d	d =9 •	$d = \land \circ$	$d = i \circ \circ$	d = 1	$d = 1 \mathcal{S} \circ$
w=¥•••	۰/۵۳۰۹	°/0V47	۰/۶۰۶۵	•/۶۳۸	°/971V
$W = \mathfrak{S} \circ \circ$	۰/۵۷۷۴	°/9377	•/82033	۰/۷۱V۵	۰/۷۱۰۶
W=A••	∘/۵۵۵V	۰ <i>/</i> ۶۰۶۷	0/844V	۰/۶۸۱۹	°/8V2Y
$W = \mathfrak{l} \circ \circ \circ$	°/۵۴۹۵	°/0994	0/8TV1	۰ <i>/</i> ۶۷۴۹	۰ <i>/</i> ۶۶۸۲

که در جداول ۳ و ۴ مشاهده شدند نشان میدهند که ضریب به دام اندازی نور زمانی بهینه می شود که ثابت شبکهٔ زاویهدار در لایهٔ تحتانی ۶۰۰ نانومتر باشد که با نتایج به دست آمده در نمودار شکل ۶ مطابقت دارد.

۴. نتیجه گیری

بر اساس مدلهای مختلف قرارگیری نانو ذرات نقره و شبکهٔ زاویهدار تناوبی، ساختارهای سلولهای خورشیدی لایهٔ 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 ناحیهٔ فعال در بالا تعبیه شدند تا از اثر تشدید پلاسمون سطحی که در اثر نانو ذرات فلزی ایجاد

مراجع

Scientific reports 6 (2016) 1.

 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).

می شود استفاده شود. در سطح تحتانی سلولها، آرایش های

شبکهٔ زاویهدار برای کاهش انتقال نور استفاده شد. در نهایت،

دو سطح را با هم ترکیب کرده و میانگین موزون فوتون هایی که به وسیلهٔ 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

μ = ۰٫۷۴۶۷ نی قابل حصول است که پارامترهـای ۲۵ =r،

w=۶۰۰، d=۱۰۰ و ۳۰ = α را داشته باشیم. طرح ساختاری

که در این مقاله پیشنهاد شده است می تواند در عمل برای

ارتقای بازدهی های به دام اندازی نور سلول های خورشیدی

سيليكوني لاية نازك ييادهسازي شود.

- 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
- 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 Sichanugrist, B Khan, A Dewan and D Knipp,

Academic (1985).

- 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 Mokkapati 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: