



بهبود عملکرد سلول خورشیدی لایه نازک سیلیکون کریستالی به کمک لنز فرا سطوح عبوری

محمد علی شاملی | لیلا یوسفی*

گروه مخابرات، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده: در این پژوهش، روش جدیدی برای بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی لایه نازک سیلیکونی کریستالی معرفی شده است. برای این منظور، با افزودن لنز فرا سطوح عبوری درون سلول خورشیدی، نور وارد شده را به دام انداخته و درون لایه فعال سلول متمرکز می‌کنیم. طراحی لنز فرا سطوح بر اساس قانون اسنل تعمیم یافته و آنالیز ساختار به کمک نرم‌افزار شبیه سازی CST انجام می‌گیرد. سلول خورشیدی معرفی شده در طول موج‌های و زوایای نور متفاوت در دو پلاریزاسیون TM و TE بررسی می‌شود. نتایج عددی حاصل از نرم افزار شبیه ساز نشان می‌دهد که لنز فرا سطوح در پهنای باند وسیع فرکانسی در دو پلاریزاسیون TM و TE، مقدار جذب ساختار را افزایش داده و موجب بالا رفتن جریان اتصال کوتاه به ترتیب با اندازه‌های ۳۹٪ و ۳۲٪ در پلاریزاسیون‌های TM و TE شده است.

واژگان کلیدی: سلول‌های خورشیدی لایه نازک، به دام اندازی نور، لنز مسطح، فرا سطوح دی الکتریک، قانون اسنل تعمیم یافته

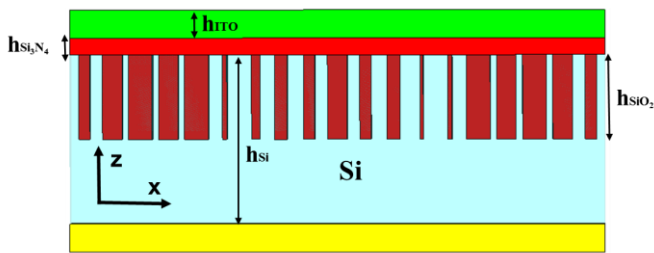
*lyousefi@ut.ac.ir

خورشیدی با وجود بهبود قیمت، مقدار جذب ساختار پایین می‌آید [۱-۶]. به منظور برطرف کردن این مشکل، در سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای به دام اندازی نور در لایه فعال سلول خورشیدی ارائه شده است [۷-۲۰]. یکی از موفقیت آمیزترین روش‌ها به منظور به دام اندازی نور خورشید، استفاده از ساختارها با مقیاس نانو (نانوساختارها) است [۷-۲۰]. نشان داده شده است که با استفاده از نانوذره‌ها (شامل نانو ذرات فلزی و دی الکتریکی [۲، ۶، ۱۳، ۲۰]، ساختارهای هسته-پوسته [۳، ۱۰، ۱۲] و ذرات کوانتومی [۸، ۹]) درون سلول خورشیدی و یا بر ساختار، مقدار جذب افزایش پیدا می‌کند. در کارهای دیگر استفاده از ساختارهای گریتینگ و یا نانواتن‌ها

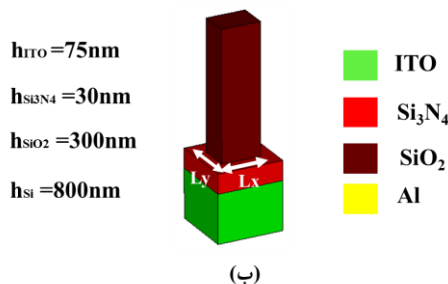
۱- مقدمه

تجدیدپذیر و در دسترس بودن در تمام نقاط زمین انرژی خورشیدی را بهترین گزینه برای رفع مشکل بحران انرژی در جهان قرار داده است. استفاده از کریستال سیلیکونی در لایه فعال سلول خورشیدی که انرژی خورشیدی را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند، موجب بالا رفتن قیمت ساخت سلول‌های خورشیدی و عدم امکان رقابت با سوخت‌های فسیلی شده است. همین عامل موجب روی آوردن پژوهشگران به سلول‌های خورشیدی لایه نازک با قیمت پایین‌تر شده است. در این نوع سلول‌های

نانومتر قرار داده شده است که به دلیل بیشینه بودن انرژی تابشی خورشید در این طول موج انتخاب شده است [۲۴]. با توجه به ضریب شکست ۱/۸ لایه ضد بازتاب در این طول موج ضخامت لایه ITO برابر ۷۵ نانومتر خواهد بود.



(الف)



(ب)

شکل ۱: ساختار ارائه شده، الف) نمای جانبی لنز فرا سطوح بر روی سلول الف) سلول واحد لنز فرا سطوح.

لنز عبوری استفاده شده در این سلول خورشیدی یک لنز مسطح است که بر اساس ساختار فرا سطوح طراحی شده و رزوناتور سلول واحد آن به شکل مکعب مستطیل و از جنس دی الکتریک است (شکل ۱). فرا سطوح نسخه‌ی دو بعدی مواد هستند [۲۵-۳۰] که قادرند ناپیوستگی فاز را در مرز بین دو محیط فراهم کنند. فرا سطوح از سلول‌های واحد با اندازه‌های زیر طول موج تشکیل می‌شوند که می‌توانند پروفایل فازی مورد نظر را تامین کنند [۲۵-۲۸]. این ساختارها که برای اولین بار در مرجع [۲۶] معرفی و بررسی شد، دارای کاربردهای متنوعی از جمله در طراحی لنزها [۳۲-۳۴، ۲۴]، سیستم‌های تصویربرداری زیر طول موج [۳۵، ۳۳]، جاذب‌ها [۱۶، ۱۷]، وسایل شکل دهنده بیم [۳۱، ۳۶، ۳۷]، پلاریزرها [۳۸، ۳۹] و مدولاتورها [۴۰] هستند. برای مدل سازی ناپیوستگی فاز توسط لنز فرا سطوح، از قانون اسنل تعمیم یافته برای موج شکست در داخل سلول خورشیدی استفاده می‌کنیم [۲۷، ۲۶]:

درون سلول خورشیدی، نور را به دام می‌اندازد [۷، ۱۱]. فرا سطوح‌ها [۲۱، ۲۲] نیز می‌توانند درون سلول خورشیدی به عنوان لنز [۱۴، ۱۵]، جاذب [۱۶، ۱۷] و شکل دهنده‌ی بیم [۱۸، ۱۹] مورد استفاده قرار گیرند و جذب ساختار را بالا برند. با وجود روش‌های ذکر شده در افزایش جذب سلول‌های خورشیدی، وجود محدودیت‌هایی مانند تلفات پلاسمونیک [۶، ۱۴، ۱۷، ۱۹]، وابستگی به پلاریزاسیون و زاویه تابش [۱۴، ۱۸] و پهنای باند پایین [۲۰]، بازدهی ساختار را پایین می‌آورد.

در این مطالعه، یک سلول خورشیدی لایه نازک جدید معرفی می‌شود که در آن لنز فرا سطوح عبوری امکان تمرکز نور خورشید در لایه فعال سلول را فراهم کرده و مقدار جذب ساختار را بالا می‌برد. استفاده از این نانوساختارها در مقاله موجب می‌شود تا نور خورشید در سلولی با ضخامت لایه فعال نازک‌تر نسبت به سلول‌های مرسوم به دام بیفتد. به بیان دیگر لنز فرا سطوح در ابعاد نانو، نور خورشید را درون لایه فعال متمرکز کرد و این ویژگی، به کمک قرار گرفتن رزوناتورها در ابعاد نانو در کنار یکدیگر محقق گردید. از امتیازات مهم این ساختار، بهبود جذب نه تنها در طول موج‌های بزرگ بلکه در طول موج‌های کوچک‌تر است که به ندرت در سلول‌های خورشیدی لایه نازک اتفاق می‌افتد [۱۹-۶]. افزون‌بر این، وابستگی پایین ساختار نسبت به پلاریزاسیون و زاویه تابش نسبت به پژوهش‌های گذشته قابل توجه است [۲۰-۶].

۲- ساختار لنز

ساختار لنز فرا سطوح عبوری در شکل ۱ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌کنید، لنز فرا سطوح عبوری بر روی سلول خورشیدی قرار گرفته و نور را درون ساختار متمرکز می‌کند و باعث به دام افتادن آن در لایه فعال سلول شده و جذب را افزایش می‌دهد.

لایه ضد بازتاب از جنس (Indium Thin Oxide) ITO بر روی لایه فعال سلول خورشیدی قرار گرفته و انعکاس از سطح آن را کاهش می‌دهد. ضخامت این لایه برابر یک ربع طول موج انتشاری در این لایه است که باعث کمینه شدن انعکاس از سطح آن می‌شود [۲۳]. همچنین طول موج مرکزی طراحی، ۵۵۰

جدول ۱: ابعاد رزوناتورهای مکعب مستطیلی استفاده شده در لنز فرا سطوح به همراه فاز و اندازه موج شکست.

Resonator	Lx (nm)	Ly (nm)	Phase (Deg)	Transmission Amplitude
N0	70	70	0	0.85
N1	40	90	20	0.87
N2	45	95	80	0.89
N3	10	50	176	0.82
N4	15	80	303	0.84
N5	85	80	95	0.89
N6	70	50	268	0.85
N7	85	80	97	0.89
N8	70	40	300	0.83
N9	40	10	152	0.81

فاز و اندازه موج شکست برای رزوناتورهای مکعب مستطیل که در جدول ۱ گزارش شده که بر اساس محاسبات عددی نرم افزار شبیه ساز تمام موج CST بدست آمده است. در این شبیه سازی شرایط مرزی به صورت تناوبی قرار داده شده و موج صفحه‌ای ساختار را تحریک می‌کند. همچنین، ضریب گذردهی آلومینیوم و سیلیکون مورد استفاده در سلول خورشیدی از مراجع [۴۲، ۴۳] استخراج شده‌اند که وابستگی فرکانسی و تلفات را لحاظ می‌کنند.

۳- بررسی پارامترهای سلول

در این قسمت عملکرد سلول خورشیدی ارائه شده به صورت عددی توسط نرم افزار شبیه ساز تمام موج CST بررسی می‌گردد. شرایط مرزی به صورت تناوبی قرار داده شده و موج صفحه‌ای ساختار را تحریک می‌کند. ساختار کلی شامل ۱۹ رزوناتور است که به صورت متقارن اطراف N_0 قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل‌های ۲ تا ۶ گزارش شده است.

شکل‌های ۲ و ۳ اندازه میدان الکتریکی را در سلول خورشیدی ارائه شده در طول موج ۵۵۰ نانومتر به ترتیب برای پلاریزاسیون-های TE و TM به نمایش گذاشته و آن‌ها را با یک سلول خورشیدی ساده (بدون لنز) مقایسه کرده‌اند. همان گونه که در این شکل‌ها قابل مشاهده است، نور خورشید درون لایه فعال سلول متمرکز شده و اندازه میدان الکتریکی در سلول خورشیدی ارائه شده نسبت به ساده افزایش یافته است.

$$n_i \sin \theta_i - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi(x)}{dx}$$

که در آن $\Phi(x)$ ناپیوستگی فاز ایجاد شده توسط لنز، λ_0 طول موج نور در خلاء، n_i ضریب شکست محیط تابشی، n_i ضریب شکست محیط شکست و θ_i و θ_i به ترتیب زوایای نور تابشی و شکست هستند.

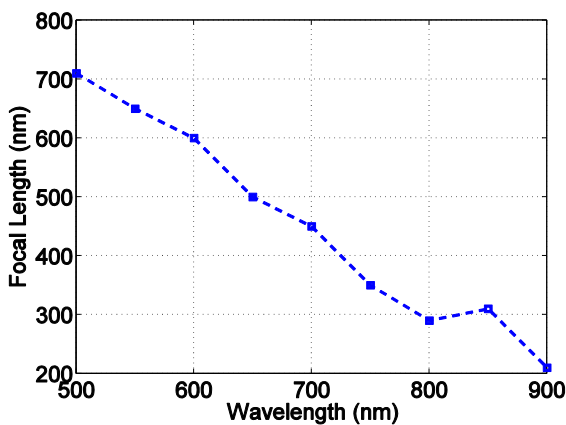
برای آن که فرا سطوح مانند لنز عبوری عمل کند باید پروفایل فازی مورد نیاز، به منظور تداخل سازنده پرتوهای نور در فاصله کانونی درون لایه فعال سلول خورشیدی، تامین شود [۴۱]:

$$\varphi_L(x) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + f^2} - f)$$

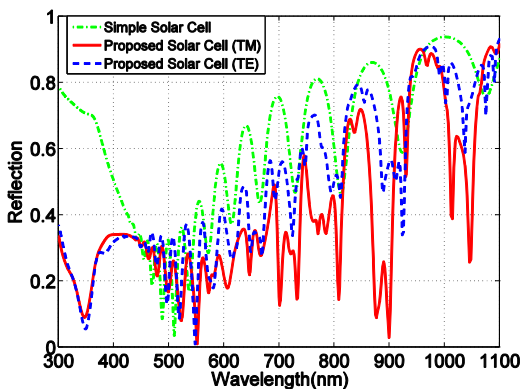
که در آن f فاصله کانونی لنز است که ۶۵۰ نانومتر قرار داده شده و λ طول موج نور در محیط است.

به منظور تامین پروفایل فازی از رزوناتورهای مکعب مستطیل در سلول واحد فرا سطوح استفاده می‌شود (شکل ۱ب). همان گونه که در شکل ۱ب قابل مشاهده است، سلول واحد از سه لایه تشکیل می‌شود که در آن رزوناتور از جنس SiO_2 با ضریب شکست ۱/۴۵ و ضخامت ۳۰۰ نانومتر، لایه میانی از جنس Si_3N_4 با ضریب شکست ۲/۶۴ و ضخامت ۳۰ نانومتر و لایه ITO با ضریب شکست ۱/۸ و ضخامت ۷۵ نانومتر قرار دارند. طول تناوبی سلول واحد برابر ۱۰۰ نانومتر است و تامین فاز مورد نظر بر اساس معادله (۲) به کمک تغییر ابعاد جانبی رزوناتورها (Lx, Ly) در شکل ۱ب) انجام می‌شود. در این ساختار برای تامین پروفایل فازی از ۱۰ رزوناتور استفاده می‌شود که ابعاد آن‌ها در جدول ۱ گزارش شده است. ابعاد انتخابی برای رزوناتورها به صورتی هستند که افزون بر تامین فاز مطلوب، دارای اندازه مناسبی برای موج شکست باشند.

شکل ۵، نشان دهنده انعکاس از سطح سلول خورشیدی ارائه شده در پلاریزاسیون‌های TM و TE در مقایسه با سلول خورشیدی ساده بدون لنز فرا سطوح است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، انعکاس ساختار ارائه شده برای هر دو پلاریزاسیون کاهش قابل توجهی پیدا کرده است. این کاهش در طول موج‌های کوتاه و بلند، درستی طراحی سلول خورشیدی جدید را تایید می‌کند.



شکل ۴: تغییرات فاصله کانونی لنز فرا سطوح در طول موج‌های متفاوت.



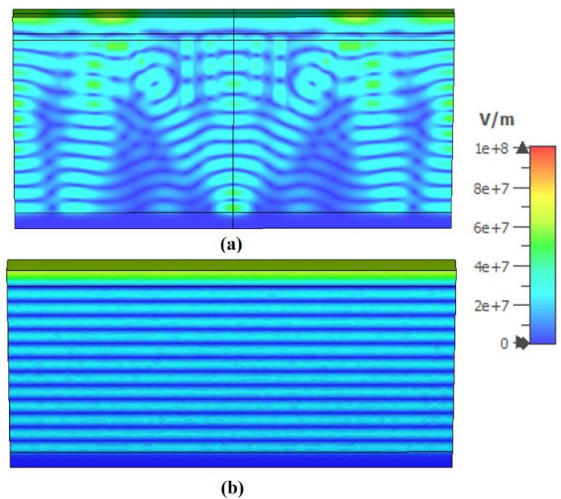
شکل ۵: انعکاس از سطح سلول خورشیدی ساده (سبز) و سلول خورشیدی ارائه شده در پلاریزاسیون‌های TM (قرمز) و TE (آبی).

به منظور بررسی کلی‌تر عملکرد سلول خورشیدی، مقدار جذب نور را در این ساختار محاسبه می‌کنیم [۴۴]:

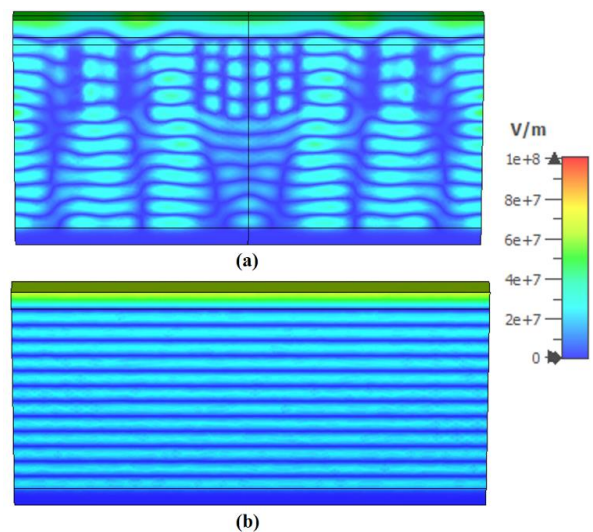
$$A(\omega) = \frac{1}{2} \omega \text{Im}(\epsilon(\omega)) \int_v |\mathbf{E}|^2 dv \quad (3)$$

که در آن $\text{Im}(\epsilon(\omega))$ قسمت موهومی ضریب گذردهی سیلیکون، ω فرکانس زاویه‌ای و $|\mathbf{E}|$ شدت میدان الکتریکی است. همچنین،

به منظور بررسی عملکرد سلول خورشیدی در پهنای باند مورد نظر، ساختار ارائه شده به صورت عددی بین طول موج‌های ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر شبیه‌سازی و نتایج در شکل‌های ۴ تا ۶ به نمایش گذاشته شده است. نتایج نشان می‌دهد که لنز فرا سطوح قادر است نور را در پهنای باند گسترده‌ای درون سلول خورشیدی متمرکز کند. با این وجود، با تغییر طول موج، اندازه‌ی فاصله کانونی نیز کاهش خواهد یافت (شکل ۴). این ویژگی باعث می‌شود سلول خورشیدی در طول موج‌های بلند نسبت به سلول ساده عملکرد مناسب‌تری داشته باشد و نور از لایه فعال آن خارج نگردد.



شکل ۲: اندازه میدان الکتریکی در پلاریزاسیون TM برای (a) سلول خورشیدی ارائه شده و (b) سلول خورشیدی ساده.



شکل ۳: اندازه میدان الکتریکی در پلاریزاسیون TE برای (a) سلول خورشیدی ارائه شده و (b) سلول خورشیدی ساده.

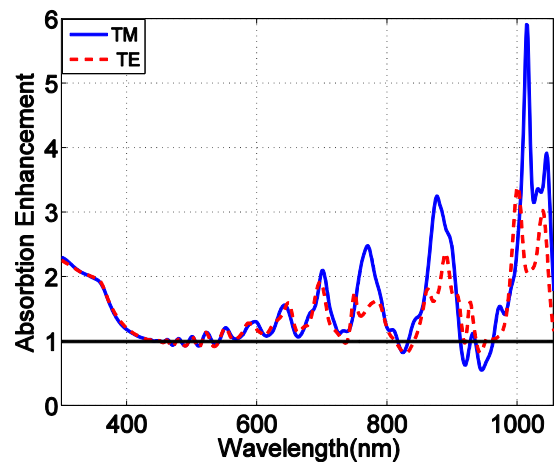
TM و TE به ترتیب برابر $20/54 \text{ mA/cm}^2$ و $19/81 \text{ mA/cm}^2$ است. این پارامتر برای سلول خورشیدی ساده برابر با $16/01 \text{ mA/cm}^2$ است. به این ترتیب همان گونه که از نتایج مشخص می‌شود، جریان اتصال کوتاه برای پلاریزاسیون‌های TM و TE به ترتیب ۲۹٪ و ۲۴٪ افزایش پیدا می‌کند. جدول ۲ بهبود چگالی جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی ارائه شده در مقایسه با کارها گذشته را به نمایش گذاشته است. یکی از ویژگی‌های مهم سلول خورشیدی ارائه شده، استفاده از رزوناتورهای غیر فلزی بود که تلفات اهمی را کاهش داد و در مقایسه با مرجع [۱۴] چگالی جریان اتصال کوتاه بالاتری در اختیار ما قرار داد.

جدول ۲: مقایسه بهبود چگالی جریان اتصال کوتاه.

Ref	Current Enhancement (TM)	Current Enhancement (TE)	Current Enhancement (total)
This paper	1.24	1.29	1.265
[11]	1.32	1.30	1.31
[14]	1.22	1.15	1.185
[19]	1.06	1.08	1.07

برای داشتن بررسی کلی‌تر از سلول خورشیدی باید عملکرد آن در زوایای تابشی متفاوت بررسی شود. به این منظور جریان اتصال کوتاه را برای سلول خورشیدی ارائه شده و ساده در زوایای تابشی متفاوت بدست می‌آوریم و بهبود این پارامتر را محاسبه می‌کنیم (شکل ۷). همان گونه که از شکل ۷ قابل مشاهده است، این پارامتر در زوایای متفاوت تغییرات جزئی داشته و به نسبت کارهای پیش و ابستگی کمتری به زاویه تابشی پیدا کرده است [۱۴، ۱۵، ۱۹].

انتگرال گیری در لایه فعال (لایه سیلیکون) سلول خورشیدی انجام می‌گیرد. با استفاده از معادله (۳) جذب سلول خورشیدی ارائه شده و سلول خورشیدی ساده محاسبه و مقدار بهبود جذب در دو پلاریزاسیون TM و TE بدست می‌آید که در شکل ۶ به نمایش گذاشته شده است. همان گونه که از شکل ۶ قابل مشاهده است، جذب ساختار ارائه شده در بیشتر طول موج‌ها نسبت به سلول خورشیدی ساده افزایش پیدا کرده و این مقدار بهبودی در بعضی طول موج‌ها به عدد ۶ رسیده است.



شکل ۶: بهبود جذب سلول خورشیدی ارائه شده در طول موج‌های کاری برای پلاریزاسیون‌های TM (آبی) و TE (قرمز).

برای داشتن یک بررسی دقیق از سلول خورشیدی ارائه شده، چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) را برای ساختار مذکور و سلول خورشیدی بدون لنز (ساده) بدست می‌آوریم و با هم مقایسه می‌کنیم [۴۵]

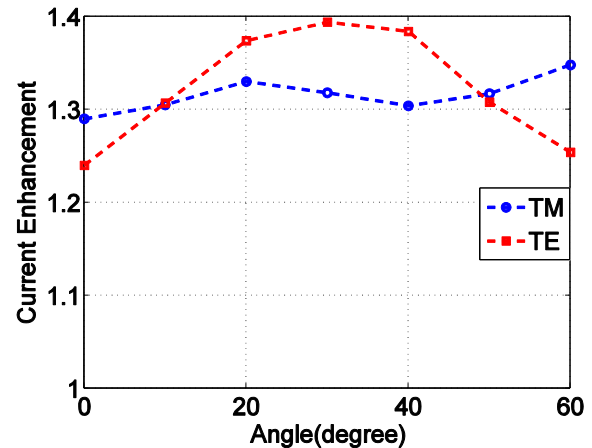
$$J_{sc} = \frac{e}{hc} \int \eta_c S(\lambda) A_{Si}(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (4)$$

که در آن e بار الکترون، $A_{Si}(\lambda)$ ضریب جذب لایه سیلیکون (معادله (۳))، $S(\lambda)$ توان تابشی خورشیدی در سطح زمین [۲۴]، η_c بازدهی تجمعی، h ثابت پلانک و c سرعت نور در خلاء است. همچنین در این رابطه $\eta_c = 1$ فرض می‌شود، به این معنی که با جذب شدن هر فوتون در لایه فعال یک الکترون حفره آزاد می‌شود.

در نهایت به کمک رابطه (۴)، جریان اتصال کوتاه برای سلول خورشیدی مذکور محاسبه می‌شود که برای پلاریزاسیون‌های

¹ Short circuit current density.

- nanoparticles on dye-sensitized solar cell," *Optical Materials Express*. 7, 2069-2083, 2017.
- [3] P. Yu, Y. Yao, J. Wu, X. Niu, A. L. Rogach, Z. Wang, "Effects of plasmonic metal core-dielectric shell nanoparticles on the broadband light absorption enhancement in thin film solar cells," *Scientific reports*. 7, 7696, 2017.
- [4] Y. C. Chau, C. M. Lim, C.Y. Chiang, N.Y. Voo, N. S. M. Idris, S.U. Chai, "Tunable silver-shell dielectric core nano-beads array for thin-film solar cell application," *Journal of Nanoparticle Research*. 18, 88, 2018.
- [5] D. H. Lee, J. Y. Kwon, S. Maldonado, A. Tuteja, A. Boukai, "Extreme light absorption by multiple plasmonic layers on upgraded metallurgical grade silicon solar cells," *Nano letters*. 14, 1961-1967, 2014.
- [6] H. Atwater, A. Polman, "Plasmonics for improved photovoltaic devices," *Nature materials*. 9, 205, 2010.
- [7] D. M. Nguyen, D. Lee, J. Rho, "Control of light absorbance using plasmonic grating based perfect absorber at visible and near-infrared wavelengths," *Scientific reports*. 7, 2611, 2017.
- [8] M. Yuan, M. Liu, E. H. Sargent, "Colloidal quantum dot solids for solution-processed solar cells," *Nature Energy*. 1, 16016, 2016.
- [9] A. R. Kirmani, A. Kiani, M. M. Said, O. Voznyy, N. Wehbe, G. Walters, S. Barlow, E. H. Sargent, S. R. Marder, A. Amassian, "Remote molecular doping of colloidal quantum dot photovoltaics," *ACS Energy Letters*. 1 (2016) 922-930.
- [10] M. D. Brown, T. Suteewong, R. S. S. Kumar, V. D'Innocenzo, A. Petrozza, M. M. Lee, U. Wiesner, H. J. Snaith, "Plasmonic dye-sensitized solar cells using core-shell metal-insulator nanoparticles," *Nano letters*. 11 (2010) 438-445.
- [11] F. Taghian, V. Ahmadi, L. Yousefi, "Enhanced thin solar cells using optical nano-antenna induced hybrid plasmonic travelling-wave," *Journal of Lightwave Technology*. 34, 1267-1273, 2016.
- [12] S. Liu, R. Jiang, P. You, X. Zhu, J. Wang, F. Yan, "Au/Ag core-shell nanocuboids for high-efficiency organic solar cells with broadband plasmonic enhancement,"



شکل ۷: بهبود جریان اتصال کوتاه برای سلول خورشیدی ارائه شده با تغییرات زاویه تابش در پلاریزاسیون‌های TM (آبی) و TE (قرمز).

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای بهبود عملکرد سلول خورشیدی لایه نازک ارائه شد. در این روش یک لنز فرا سطوح عبوری بر روی سلول خورشیدی قرار گرفت و نور خورشید را در لایه فعال سلول متمرکز و به دام انداخت. این لنز براساس قانون اسنل تعمیم یافته طراحی و به کمک رزوناتورهای مکعب مستطیل از جنس دی الکتریک محقق گردید. همچنین عملکرد ساختار ارائه شده در پهنای باند فرکانسی گسترده و زوایا و پلاریزاسیون‌های متفاوت به صورت عددی با نرم افزار CST بررسی گشت. نتایج عددی نشان داد که جذب ساختار ارائه شده در تمامی طول موج‌های بین ۳۰۰ نانومتر تا ۱۱۰۰ نانومتر بهبود یافت و البته افزایش جذب در طول موج‌های کوتاه (دارای انرژی بیشتر) ساختار را نسبت به کارهای گذشته منحصر به فرد کرد. در نهایت بهبود جریان اتصال کوتاه برای بازه وسیعی از زوایای تابشی محاسبه شده که به ازای زاویه ۳۰ درجه، مقدار ۱/۳۹ و ۱/۳۲ به ترتیب برای پلاریزاسیون‌های TM و TE محاسبه شد.

مراجع

- [1] W. Ye, R. Long, H. Huang, "Y. Xiong, Plasmonic nanostructures in solar energy conversion," *Journal of Materials Chemistry*. C, 5, 1008-1021, 2017.
- [2] S. Shah, I. M. Noor, J. Pitawala, I. Albinson, T. M. W. J. Bandara, B. E. Mellander, A. K. Arof, "Plasmonic effects of quantum size metal

- [22] T. Mohamadi, L. Yousefi, "Metamaterial-Based Energy Harvesting for Detectivity Enhanced Infrared Detectors," *Plasmonics*. 14, 815-822, 2019.
- [23] C. Bauer, H. Giessen, "Light harvesting enhancement in solar cells with quasicrystalline plasmonic structures," *Optics express*. 21, A363-A371, 2013.
- [24] Society for Testing Materials (ASTM) International Terrestrial reference spectra for photovoltaic performance evaluation ASTM, G-173-03, 2012.
- [25] A. Monti, A. Alù, A. Toscano, F. Bilotti, "Surface Impedance Modeling of All-dielectric Metasurface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (2019).
- [26] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J. P. Tetienne, F. Capasso, Z. Gaburro, "Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction," *Science*. 334, 333–337, 2011.
- [27] S. Sun, Q. He, S. Xiao, Q. Xu, X. Li, L. Zhou, "Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves," *Nat. Mater.* 11, 426–431, 2012.
- [28] M. Veysi, C. Guclu, O. Boyraz, F. Capolino, "Thin anisotropic metasurfaces for simultaneous light focusing and polarization manipulation," *JOSA B*. 32, 318-323, 2015.
- [29] P. Abdipour, Amir N. Askarpour, and A. Alù, "Metasurface Modeling for the Manipulation of Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov Shifts," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 68, 1523-1532, 2019.
- [30] M. Yazdi, M. Albooyeh, R. Alaee, V. Asadchy, N. Komjani, C. Rockstuhl, C. R. Simovski, and S. Tretyakov, "A bianisotropic metasurface with resonant asymmetric absorption," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 63, 3004-3015, 2015.
- [31] B. Groever, W. T. Chen, F. Capasso, "Meta-lens doublet in the visible region," *Nano Lett.* 17, 4902–4907, 2017.
- [32] A. Pors, M. G. Nielsen, R. L. Eriksen, S. I. Bozhevolnyi, "Broadband focusing flat Energy& Environmental Science. 9, 898-905, 2016.
- [13] Y. A. Akimov, W. S. Koh, S. Y. Sian, S. Ren, "Nanoparticle-enhanced thin film solar cells: Metallic or dielectric nanoparticle" *Applied Physics Letters*, 96, 073111, 2010.
- [14] M. A. Shameli, L. Yousefi, "Absorption enhancement in thin-film solar cells using an integrated metasurface lens," *JOSA B*. 35, 223-230, 2018.
- [15] M. A. Shameli, L. Yousefi, "Polarization-Independent Dielectric Metasurface Lens for Absorption Enhancement in Thin Solar Cells," In *Optical Sensors*, Optical Society of America, JTU5A-9, 2018.
- [16] R. A. Pala, S. Butun, K. Aydin, H. A. Atwater, "Omnidirectional and broadband absorption enhancement from trapezoidal Mie resonators in semiconductor metasurfaces," *Scientific reports*. 6, 31451, 2016.
- [17] A. K. Azad, W. J. Kort-Kamp, M. Sykora, N. R. Weisse-Bernstein, T. S. Luk, A. J. Taylor, D. A. Dalvit, H. T. Chen, "Metasurface broadband solar absorber," *Scientific reports*. 6, 20347, 2016.
- [18] M. R. Khan, X. Wang, P. Bermel, M. A. Alam, "Enhanced light trapping in solar cells with a meta-mirror following generalized Snell's law," *Optics express*. 22, A973-A985, 2014.
- [19] M. A. Shameli, P. Salami, L. Yousefi, "Light trapping in thin film solar cells using a polarization independent phase gradient metasurface," *Journal of Optics*. 20, 125004, 2018.
- [20] J. Jang, M. Kim, Y. Kim, K. Kim, S. J. Baik, H. Lee, J. C. Lee, "Three dimensional a-Si:H thin-film solar cells with silver nano-rod back electrodes," *Current Applied Physics*. 14, 637–640, 2014.
- [21] M. Honari-Latifpour, L. Yousefi, "Topological plasmonic edge states in a planar array of metallic nanoparticles," *Nanophotonics*. 8, 799-806, 2019.

- modulators," *Nano letters*. 14, 6526-6532, 2014.
- [41] H. T. Chen, A. J. Taylor, N. Yu, "A review of metasurfaces: physics and applications," *Reports on progress in physics*. 79, 076401, 2016.
- [42] A. D. Rakić, "Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films: application to aluminium," *Appl. Opt.* 34, 4755-4767, 1995.
- [43] D. E. Aspnes, A. A. Studna, "Dielectric functions and optical parameters of si, ge, gap, gaas, gasb, inp, inas, and insb from 1.5 to 6.0 ev," *Physical review. B*. 27, 985, 1983.
- [44] V. E. Ferry, A. Polman, H. A. Atwater, "Modeling light trapping in nanostructured solar cells," *ACS. Nano*. 5, 10055-10064, 2011.
- [45] W. Bai, Q. Gan, F. Bartoli, J. Zhang, L. Cai, Y. Huang, G. Song, "Design of plasmonic back structures for efficiency enhancement of thin-film amorphous Si solar cells," *Opt. Lett.* 34, 3725-3727, 2009.
- mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces," *Nano Lett.* 13, 829-834, 2013.
- [33] F. Aieta, P. Genevet, M. A. Kats, N. Yu, R. Blanchard, Z. Gaburro, F. Capasso, "Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces," *Nano letters*. 12, 4932-4936, 2012.
- [34] E. Arbabi, A. Arbabi, S. M. Kamali, Y. Horie, A. Faraon, "Multiwavelength polarization-insensitive lenses based on dielectric metasurfaces with meta-molecules," *Optica*. 3, 628-633, 2016.
- [35] P. Salami, L. Yousefi, "Far-Field Subwavelength Imaging Using Phase Gradient Metasurfaces," *Journal of Lightwave Technology*. 37, 2317-2323, 2019.
- [36] A. Arbabi, Y. Horie, M. Bagheri, A. Faraon, "Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission," *Nature nanotechnology*. 10, 937, 2015.
- [37] Q. T. Li, F. Dong, B. Wang, F. Gan, J. Chen, Z. Song, L. Xu, W. Chu, Y. F. Xiao, Q. Gong, Y. Li, "Polarization-independent and high-efficiency dielectric metasurfaces for visible light," *Optics express*, 16309-16319, 2016.
- [38] Y. Yang, W. Wang, P. Moitra, I. I. Kravchenko, D. P. Briggs, J. Valentine, "Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation," *Nano letters*. 14, 1394-1399, 2014.
- [39] H. Cheng, X. Wei, P. Yu, Z. Li, Z. Liu, J. Li, S. Chen, J. Tian, "Integrating polarization conversion and nearly perfect absorption with multifunctional metasurfaces," *Applied Physics Letters*. 110, 171903, 2017.
- [40] Y. Yao, R. Shankar, M. A. Kats, Y. Song, J. Kong, M. Loncar, F. Capasso, "Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical



Improvement of thin crystalline silicon solar cell using a transmissive metasurface lens

M.A. Shameli , L. Yousefi

Department of Telecommunications, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract: In this paper, a transmissive metasurface flat lens is proposed for silicon thin film in solar cells to focus and trap light in the active layer of the cell. Designing metasurface lens is based on the generalized Snell's law, and analyzed using CST simulation. The structure is investigated at the interested wavelengths of solar spectrum and for a wide range of angles of incidence at both TM and TE polarizations. The numerical results show that the transmissive lens increases the absorption in a wide large of wavelengths for both TE and TM polarizations of the incident light, resulting in a short circuit current enhancement of 39% and 32% for TM and TE polarizations, respectively.

Keywords: Thin film solar cells, Light trapping, Transmissive lens, Dielectric metasurfaces, Generalized Snell's law