



بررسی کاربرد الکترودهای نقره مبتنی بر نانوحفره‌های پلاسمونیک در سلول‌های خورشیدی ارگانیک بدون ITO

فاطمه فولادی ماهانی^۱ | آرش مختاری^{*۱}

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

چکیده: امروزه، سلول‌های خورشیدی ارگانیک به علت ویژگی‌هایی مانند انعطاف‌پذیری، وزن سبک و قیمت ارزان مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. با این وجود، هنوز هم بازدهی این سلول‌ها برای بسیاری از کاربردهای عملی نیازمند بهبود است. ایندم تین‌اکساید (ITO) ماده رایج به‌عنوان الکترودهای خورشیدی ارگانیک است که از قابلیت انعطاف و استحکام مکانیکی پایینی برخوردار است. همچنین، ذخایر محدود ایندیم، تولید انبوه این الکترودها را با مشکل مواجه می‌سازد. در اینجا از آرایه‌ای از نانوحفره‌های متناوب پلاسمونیک بر یک ورق نقره به‌عنوان الکترودهای خورشیدی ارگانیک بدون ITO استفاده شده است. سلول خورشیدی به‌دست آمده با استفاده از شبیه‌سازی‌های مبتنی بر روش تفاضل محدود در حوزه زمان به منظور افزایش جذب لایه فوتواکتیو تا حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد در گستره طول موجی ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر طراحی شده است. همچنین، استفاده از نقره در این طرح منجر به کاهش هزینه ساختار و مناسب سازی آن برای سامانه‌های برداشت انرژی منعطف در مقیاس گسترده خواهد شد.

واژگان کلیدی: الکترودهای نانوساختار نقره، سلول‌های خورشیدی ارگانیک، نانوحفره‌های پلاسمونیک، بدون ITO.

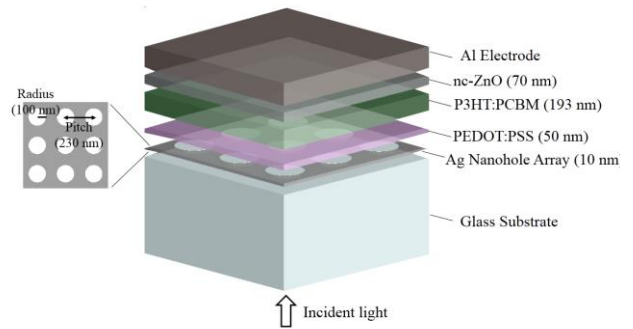
amokhtari@uk..ac.ir

متفاوت، امکان کنترل و مهندسی رفتار نور و حتی دستیابی به مشخصه‌های نوری انتخابگر (به عنوان مثال در کاربردهای فیلتر رنگی و حسگرها) را برای پژوهشگران فراهم می‌سازد [۵-۹]. به همین دلیل، امروزه استفاده از چنین ساختارهایی برای بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [۴ و ۱۰-۱۴]. یک روش کارآمد برای افزایش مقدار جذب سلول، به کارگیری نانوذره‌های طلا و نقره در لایه‌های متفاوت سلول خورشیدی ارگانیک است [۱۵-۱۸]. در حقیقت، تشکیل پلاسمون‌های سطحی به علت حضور نانو ذرات مذکور، منجر به تقویت میدان‌های راه نزدیک در اطراف آن‌ها خواهد شد. در نتیجه این امر، نور بیشتری در ساختار به دام افتاده و بر مقدار جذب سلول خورشیدی افزوده می‌شود [۱۵]. همچنین، استفاده از نانوذرات

۱- مقدمه

سلول‌های خورشیدی ارگانیک بهترین نامزد برای سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی دارای قابلیت انعطاف بالا و وزن سبک هستند. این ویژگی‌ها، سلول‌های ارگانیک را برای کاربردهای مقیاس گسترده در آینده نیز بسیار مناسب می‌سازد [۱]. نکته حائز اهمیت در مورد این نوع از سلول‌های خورشیدی، مصالحه میان افزایش ضخامت لایه فعال برای جذب بیشتر نور و جلوگیری از بازترکیب حامل‌های بار (الکترون‌ها و حفره‌ها) است؛ بنابراین، افزایش مقدار جذب لایه فعال و در نتیجه بازدهی سلول، نکته مهمی است که طراحی سلول‌های خورشیدی ارگانیک را با محدودیت مواجه می‌سازد [۲-۴]. از طرفی، نشان داده شده است که استفاده از نانوساختارها و نانوذرات

۲- مدلسازی



شکل ۱: طرح‌واره کلی سلول خورشیدی ارگانیک پیشنهادی با به کارگیری نانوحفره‌های نقره به عنوان الکتروود

طرح‌واره کلی ساختار طراحی شده در این مقاله در شکل ۱ قابل مشاهده است. در این طرح از P3HT:PCBM به عنوان لایه فوتو فعال و از نانوکریستال‌های روی اکسید (nc-ZnO) به عنوان فاصله دهنده نوری [۲۶] بهره گرفته شده است. هدف این مقاله، طراحی یک الکتروود شفاف مبتنی بر نانوساختارهای پلاسمونیک است، با این که فلز از رسانایی الکتریکی خوبی برخوردار است، اما به دلیل انعکاس بالا و تلفات نوری زیاد، به تنهایی قابلیت استفاده به عنوان یک الکتروود شفاف را ندارد [۲۷ و ۲۸]. برای رفع این مشکل، می‌توان از ورق‌های فلزی فوق‌العاده نازک الگوداده شده به منظور دسترسی به شفافیت مناسب بهره گرفت [۲۳، ۲۹ و ۳۰]. ساختار طراحی شده، متشکل از ۱۰ نانومتر ورق نقره با الگوهای متناوب از حفره‌های هوا به قطر ۲۰۰ نانومتر و گام آرایه (فاصله مرکز تا مرکز حفره‌های متوالی) ۲۳۰ نانومتر است. ضخامت انتخاب شده برای فلز و همچنین، ابعاد ذکر شده برای نانوحفره‌های متناوب با توجه به مقالات مشابه [۲۳ و ۲۹-۳۱] و با هدف دستیابی به یک مشخصه جذب لایه فعال مناسب (با کمک ابزار جاروب و الگوریتم بهینه‌سازی PSO تعبیه شده در نرم‌افزار Lumerical) طراحی شده است.

افزایش ضخامت فلز استفاده شده منجر به کاهش شفافیت و افت عملکرد سلول می‌شود. کاهش بیش از حد ضخامت نیز فرایند ساخت الکتروود گفته شده را با محدودیت مواجه می‌سازد. به منظور بررسی امکان ایجاد این ساختار به لحاظ تجربی، شایان ذکر است که پیش از این نانوحفره‌های فلزی با ابعادی در این حدود به صورت تجربی ساخته شده است. به عنوان مثال، نانوحفره‌های طلا با ضخامت ۲۵ نانومتر و قطر و گام آرایه به ترتیب ۱۷۵ و ۲۲۵ نانومتر [۲۳] و همچنین، نانوحفره‌های آلومینیومی با ضخامت ۱۵ تا ۱۰۰ نانومتر و قطر ۷۰/۵ تا ۲۴۱/۵ نانومتر و با گام آرایه ۲۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر الگودهی و ساخته شده‌اند [۲۹].

مدلسازی رفتار این ساختار، بر پایه شبیه‌سازی‌های مبتنی بر روش تفاضل محدود در حوزه زمان انجام شده است. برای نرسیدن به این هدف، از نرم‌افزار FDTD Solutions شرکت Lumerical استفاده شده است.

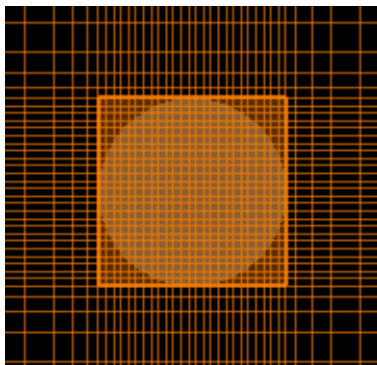
پلاسمونیک، استفاده از نانو شبکه‌های یک بعدی فلزی در طراحی سلول خورشیدی نیز راهکار دیگری برای کاهش مقدار بازتاب و در نتیجه افزایش جذب لایه فعال خواهد بود [۱۹-۲۱]. با این وجود، این گونه نانوساختارها به علت ذات یک بعدی خود، به تغییر پلاریزاسیون نور ورودی حساس هستند که این امر کاربردهای عملی آن‌ها را با محدودیت مواجه می‌کند [۲۲].

نانوساختارهای پلاسمونیک متقارن (دو بعدی) گزینه بسیار مناسبی برای افزایش مقدار جذب لایه فعال در عین عدم وابستگی به پلاریزاسیون هستند. در بیشتر کارهای پیشین، از ادغام این نانوساختارهای پلاسمونیک با سلول خورشیدی ارگانیک دارای ITO (ایندیم تین اکساید) بهره گرفته شده است. این در حالی است که استفاده از این گونه نانوساختارها به عنوان یک الکتروود برای جایگزینی ITO، امکان دستیابی به الکتروودهایی ارزان قیمت، انعطاف‌پذیر و مستحکم را نیز فراهم می‌سازد. در برخی از مقالات پیشین، از آرایه‌ای متناوب از نانوحفره‌های طلا برای این منظور استفاده شده است [۲۳-۲۵]. با این وجود، سلول‌های خورشیدی ارگانیک بدون ITO با الکتروودهای پلاسمونیک تا به حال مورد مطالعه زیادی قرار نگرفته است.

در این مقاله، برای نخستین بار از آرایه‌ای از نانوحفره‌های متناوب بر روی یک ورق نقره به عنوان الکتروود در سلول خورشیدی ارگانیک بدون ITO بهره گرفته شده و اثر استفاده از الکتروود نانو ساختار فوق به منظور افزایش مقدار جذب لایه فعال و همچنین کاهش بازتاب ساختار، بررسی شده است. این طرح، همچنین ایده بسیار مناسبی برای جایگزینی ITO با یک الکتروود ارزان قیمت، انعطاف‌پذیر و دارای استحکام مکانیکی مناسب است.

در این ساختار، به منظور بررسی رفتار نوری (مشخصه‌های عبور، بازتاب و جذب نور) از یک منبع نوری پهن‌بند در گستره نور مرئی (۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر) بهره گرفته شده است. برای حل معادلات ماکسول در فضای مسئله، به یک موتور شبیه‌ساز (با ابعادی متناسب با گام آرایه) نیاز است؛ همچنین، برای تعیین ذات تناوبی نانوحفره‌های نقره، شرایط مرزی در راستای طولی و عرضی (x و y) به صورت متناوب تعریف شده است. برای کاهش زمان شبیه‌سازی با توجه به تقارن مسئله، شبیه‌سازی‌های بالا فقط برای نیمی از فضای حل انجام گرفته است.

شرایط مرزی در راستای عمودی (z)، به صورت لایه‌های با جذب کامل تعیین می‌شود؛ شرایط مرزی مذکور با ایجاد یک لایه تطبیق امپدانس کامل، امواج رسیده به دیواره‌های موتور شبیه‌ساز را جذب کرده و از انعکاس آن‌ها به درون ساختار و در نتیجه تداخل امواج برگشتی با پرتوهای منبع جلوگیری می‌کند. در نهایت، به منظور بررسی رفتار نوری فیلتر و استخراج مشخصه‌های عبور، بازتاب و جذب نور، از مانیتورها و تحلیل‌گرهای تعبیه شده در محیط نرم‌افزار بهره گرفته شده است.



شکل ۲: نمونه‌ای از مش‌بندی فضای حل برای بررسی رفتار یک نانو ذره [۳۴]

۳- نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های مبتنی بر روش تفاضل محدود در حوزه زمان برای بررسی رفتار عبور و بازتاب ورق نقره هموار و متشکل از نانوحفره‌های متناوب در شکل ۳ قابل مشاهده است. همان‌طور که در قسمت‌های (ج) و (د) مشاهده می‌شود، مشخصه نوری نانوساختار طراحی شده مقدار عبور خوب و همچنین، بازتاب بسیار کمی از خود نشان می‌دهد که رفتار بسیار مطلوبی به عنوان

روش تفاضل محدود، یکی از روشهای عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل است. در این روش، مشتق توابع با تفاضلات معادل آنها تقریب زده می‌شود. در واقع اساس این روش برای حل معادلات، استفاده از تقریب تابع با روش تیلور است. روش تفاضل محدود در حوزه زمان یکی از مؤثرترین روش‌ها برای حل معادلات ماکسول در هندسه‌های پیچیده است. این روش که نخستین بار توسط Yee در سال ۱۹۶۶ ارائه شد، دید فوق‌العاده برای حل انواع مسائل کاربردی الکترومغناطیس و فوتونیک ارائه کرده است [۳۲]. روش گفته شده، یک روش پیمایش زمانی است که معادلات ماکسول را برای یک ساختار و یا فضای حل، در مش‌های بسیار کوچکی که به آن‌ها سلول‌های (Yee) گفته می‌شود، گسسته‌سازی کرده و سپس، به صورت مستقیم (بدون نیاز به پتانسیل‌های کمکی) به تحلیل آن‌ها می‌پردازد [۳۳]. رابطه ۱ نمونه‌ای از گسسته‌سازی معادلات ماکسول با استفاده از روش تفاضل محدود را برای موجی با قطبش TE (transverse electric) نشان می‌دهد. این معادلات برای قطبش TM (transverse magnetic) نیز به طور مشابه قابل نوشتن هستند [۳۲].

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}\right)=H_z^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}\right)-\frac{1}{z}\frac{\Delta\tau}{\Delta x}\left[E_y^n\left(i+1,j+\frac{1}{2}\right)-E_y^n\left(i,j+\frac{1}{2}\right)\right]+\frac{1}{z}\frac{\Delta\tau}{\Delta y}\left[E_x^n\left(i+\frac{1}{2},j+1\right)-E_x^n\left(i+\frac{1}{2},j\right)\right] \quad (1)$$

شکل ۲ نمونه‌ای از مش‌بندی فضای حل برای بررسی رفتار یک نانوذره با این روش را نشان می‌دهد. هرچه گسسته‌سازی ساختار به صورت ریزتری انجام شده و ابعاد سلول‌های یی کوچک‌تر در نظر گرفته شود، جواب دقیق‌تری از حل معادلات ماکسول بدست خواهد آمد. البته توجه به این نکته ضروری است که در صورتی که مش‌بندی‌ها به صورت غیرمنطقی کوچک در نظر گرفته شود، ممکن است منجر به واگرایی الگوریتم عددی شود [۳۲].

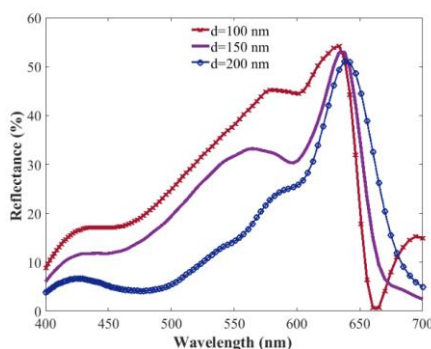
یک الکتروود شفاف است.

حفره‌ها قابل توجه خواهد بود. با این وجود، برای طراحی‌های متفاوت نانو حفره‌ها، رفتار رزونانسی پلاسمون‌ها و در نتیجه مشخصه نوری ساختار، متفاوت خواهد شد. مشخصه جذب لایه فوتوفعال نیز به ازای ابعاد متفاوت نانو حفره‌ها در شکل ۵ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشخص است، برای حفره‌های با قطر ۲۰۰ نانومتر، بیشترین مقدار جذب را در طیف وسیعی از طول موج در ناحیه مرئی خواهیم داشت. پارامتر تأثیرگذار دیگر در رفتار این نانوساختارها، گام آرایه است که با توجه به شکل ۶، بیشترین مقدار جذب را برای گام آرایه کوچکتر (۲۳۰ نانومتر) داریم. به علت مشاهدات ساخت، گام آرایه از این مقدار کوچکتر گرفته نشده است. پارامترهای انتخاب شده برای طراحی الکتروود نانوساختار در این مقاله، در جدول ۱ خلاصه شده است.

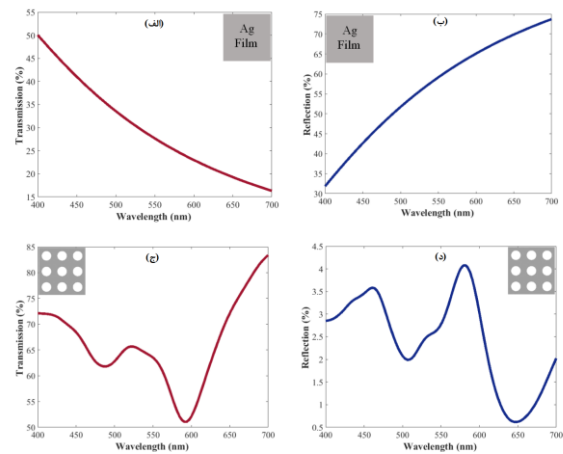
همانگونه که مشاهده می‌شود، به ازای ابعاد بهینه انتخاب شده برای طراحی الکتروود شفاف در این مقاله، جذب ناحیه فعال حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد در گستره طول موجی ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر بدست آمده است؛ این در حالی است که برای الکتروود شفاف مبتنی بر طلا در مقاله با طراحی سلول خورشیدی مشابه، مقدار جذب در بازه طول موجی ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر حدود ۴۰ تا ۶۵ درصد بدست آمده است [۲۵]. این مسئله بیانگر بهبود طراحی انجام شده در این مقاله نسبت به طرح مشابه براساس طلا است. همچنین، استفاده از نقره به جای طلا در این طراحی باعث کاهش هزینه تمام شده سلول خورشیدی و مناسب سازی آن برای کاربردهای مقیاس گسترده خواهد شد.

جدول ۱: پارامترهای انتخاب شده برای طراحی الکتروود نقره مبتنی بر نانو حفره‌های پلاسمونیک

ضخامت ورق نقره (نانومتر)	شعاع حفره‌ها (نانومتر)	گام آرایه (نانومتر)
۱۰	۱۰۰	۲۳۰



شکل ۴: نتایج شبیه‌سازی بازتاب سلول؛ گام آرایه ۲۳۰ نانومتر و قطر حفره‌ها تغییر داده شده است.



شکل ۳: نتایج شبیه‌سازی (الف) مشخصه عبور، (ب) بازتاب برای ۱۰ نانومتر ورق نقره هموار، و (ج) مشخصه عبور و (د) بازتاب برای نانو ساختار متناوب پیشنهادی

همچنین، در مشخصه عبور نانوساختار در شکل (ج)، یک که با توجه به شکل گیری پلاسمون پلاریتون‌های سطحی کوتاه برد به علت ضخامت بسیار کم ورق نقره (در مقایسه با عمق پوستی) قابل توجه است. در حقیقت، ذات متناوب الکتروود طراحی شده موجب تشدید دسته جمعی الکترون‌های آزاد فلز در سطح و در نتیجه، برانگیزش پلاسمون‌ها و رفتار نوسانی مشخصه عبور می‌شود [۲۳]؛ این در حالی است که مشخصه نوری ورق هموار نقره در شکل ۳ بخش‌های (الف) و (ب)، به علت تلفات ژول بالای فلزات در گستره نور مرئی [۳۵]، مقدار عبور کم و بازتاب بالایی را از خود نشان می‌دهد. چنین رفتاری برای پیاده‌سازی یک الکتروود شفاف مطلوب نیست. رفتار نوسانی مشخصه‌های نوری در هنگام استفاده از لایه نازکی از فلز با نانو حفره‌های متناوب را می‌توان با توجه به این نکته توجه کرد که هر حفره مانند یک منبع تولید تشدید عمل کرده و تشدیدهای ایجاد شده درون حفره‌ها از یکدیگر مستقل نیستند. برای ابعاد در نظر گرفته شده در هنگام طراحی الکتروود شفاف این مقاله، بین تشدید حفره‌های مجاور برهم‌کنش ویرانگر اتفاق افتاده و بنابراین، در حوالی طول موج تشدید پلاسمون‌ها شاهد کاهش چشمگیری در مشخصه عبور هستیم [۳۶].

شکل ۴ مقدار بازتاب نور از سلول ارگانیک را به ازای تغییر قطر حفره‌های نانوساختار نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ابعاد حفره‌ها منجر به کاهش مقدار بازتاب سلول خواهد شد. این امر با توجه به مقدار کمتر فلز به کار گرفته شده برای ابعاد بزرگتر

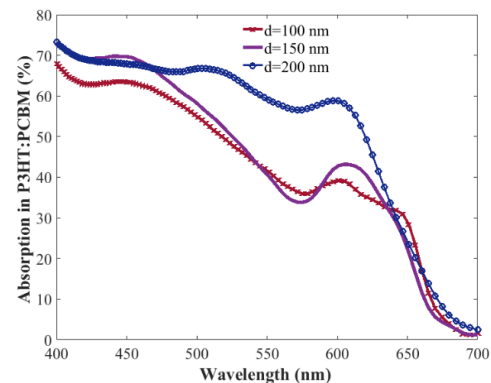
در هندسه و نحوه چینش، نسبت به تغییر پلاریزاسیون نور ورودی حساس نبوده و برای کاربردهای عملی که در آن‌ها با نور غیرپلاریزه و یا با پلاریزاسیون خاص سر و کار داریم، مناسب هستند. همچنین، تأثیر پارامترهای متفاوت هنگام طراحی الکترومبتنی بر نانوحفره برای دستیابی به یک ساختار بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شد که بیشینه مشخصه جذب برای حفره‌های با قطر ۲۰۰ نانومتر و گام آرایه ۲۳۰ نانومتر اتفاق می‌افتد.

تشکر و قدردانی

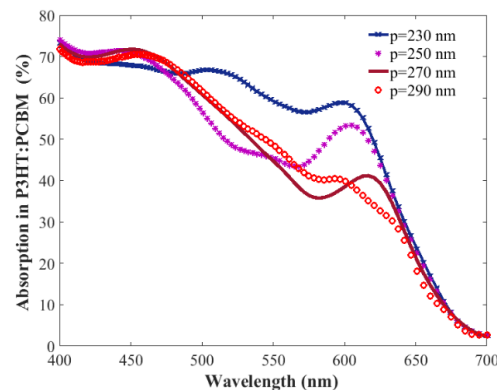
نویسندگان از حمایت‌های ستاد ویژه توسعه فناوری نانو و انجمن نانو فناوری ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] M. Dusza, W. Streck, and F. Granek, "Significance of light-soaking effect in proper analysis of degradation dynamics of organic solar cells," *Journal of Photonics for Energy*, 6, 035503-035503, 2016.
- [2] B. Paci, G. Kakavelakis, A. Generosi, J. Wright, C. Ferrero, E. Stratakis, et al., "Improving stability of organic devices: a time/space resolved structural monitoring approach applied to plasmonic photovoltaics," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 617-624, 2017.
- [3] P.T. Dang, T.K. Nguyen, and K.Q. Le, "Revisited design optimization of metallic gratings for plasmonic light-trapping enhancement in thin organic solar cells," *Optics Communications*, 382, 241-245, 2017.
- [4] F.F. Mahani and A. Mokhtari, "TiO₂ circular nano-gratings as anti-reflective coatings and potential color filters for efficient organic solar cells," *Journal of nanoelectronics and optoelectronics*, 13, 1-6, 2018.
- [5] F. F. Mahani, A. Mokhtari, and M. Mehran, "Design and development of aluminum nanoring arrays for realization of dual-mode operation



شکل ۵: نتایج شبیه‌سازی مشخصه جذب لایه فوتو فعال؛ گام آرایه ۲۳۰ نانومتر و قطر حفره‌ها تغییر داده شده است.



شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی مشخصه جذب لایه فوتو فعال؛ قطر حفره‌ها ۲۰۰ نانومتر و گام آرایه تغییر داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، در این مقاله برای نخستین بار از یک الکترومبتنی بر نانوحفره‌های پلاسمونیک نقره برای طراحی سلول خورشیدی ارگانیک بدون ITO استفاده شده است. ساختار پیشنهادی با هدف افزایش جذب لایه فعال و همچنین، کاهش مقدار بازتاب سلول، طراحی شده است. همین‌طور، جایگزینی ITO با الکترومبتنی نانوساختار نقره، از مزایای بسیار مهمی برخوردار است؛ چرا که ITO به دلیل محدودیت ذخایر ایندیم، گران قیمت بوده و برای کاربردهای مقیاس گسترده مناسب نیست. همچنین، این الکترومبتنی دارای قابلیت انعطاف‌پذیری کمی بوده و استحکام مکانیکی پایینی دارد. این مشکلات با به‌کارگیری الکترومبتنی بر نانوحفره‌های نقره برطرف خواهد شد.

همچنین، نانوحفره‌های طراحی شده، به علت برخورداری از تقارن

aluminum-titanium nitride nanosquare arrays,” *Optical Materials*, 84, 651-657, 2018.

[14] F.F. Mahani and A. Mokhtari, “Polarization-tuned chromatic electrodes using hybrid design of graphene-aluminum nanocross arrays for efficient organic solar cells,” *Optical Materials*, 84, 158-165, 2018.

[15] E. Stratakis and E. Kymakis, “Nanoparticle-based plasmonic organic photovoltaic devices,” *Materials Today*, 16, 133-146, 2013.

[16] X. Li, W. C. H. Choy, H. Lu, W. E. Sha, and A. H. P. Ho, “Efficiency Enhancement of Organic Solar Cells by Using Shape-Dependent Broadband Plasmonic Absorption in Metallic Nanoparticles,” *Advanced Functional Materials*, 23, 2728-2735, 2013.

[17] S.W. Baek, G. Park, J. Noh, C. Cho, C.H. Lee, M.-K. Seo, et al., “Au@ Ag core-shell nanocubes for efficient plasmonic light scattering effect in low bandgap organic solar cells,” *ACS nano*, 8, 3302-3312, 2014.

[18] E. Kymakis, G.D. Spyropoulos, R. Fernandes, G. Kakavelakis, A. G. Kanaras, and E. Stratakis, “Plasmonic bulk heterojunction solar cells: the role of nanoparticle ligand coating,” *ACS Photonics*, 2, 714-723, 2015.

[19] J. You, X. Li, F. X. Xie, W.E. Sha, J.H. Kwong, G. Li, et al., “Surface Plasmon and Scattering-Enhanced Low-Bandgap Polymer Solar Cell by a Metal Grating Back Electrode,” *Advanced Energy Materials*, 2, 1203-1207, 2012.

[20] X. Li, W.C. Choy, L. Huo, F. Xie, W.E. Sha, B. Ding, et al., “Dual plasmonic nanostructures for high performance inverted organic solar cells,” *Advanced Materials*, 24, 3046-3052, 2012.

plasmonic color filters,” *Journal of the Optical Society of America B*, 35, 1764-1771, 2018.

[6] F. F. Mahani, A. Mokhtari, and M. Mehran, “Dual mode operation, highly selective nanohole array-based plasmonic colour filters,” *Nanotechnology*, 28, 385203, 2017.

[7] F.F. Mahani, A. Mahanipour, and A. Mokhtari, "Optimization of plasmonic color filters for CMOS image sensors by genetic algorithm," *The 2nd Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC)*, 12-15, 2017.

[8] F.F. Mahani and A. Mokhtari, “Performance enhancement of nanohole array-based plasmonic color filters for CMOS image sensors,” *The 23 rd Iranian Conference on Optics and Photonics (ICOP 2017)*, and the *9th Iranian Conference on Photonics Engineering and Technology (ICPET 2017)*, 2017.

[9] S. Lal, S. Link, and N.J. Halas, “Nano-optics from sensing to waveguiding,” *Nature photonics*, 1, 641-648, 2007.

[10] Z. Khezripour, F.F. Mahani, and A. Mokhtari, “Double-sided TiO₂ nano-gratings for broadband performance enhancement of organic solar cells.” *Journal of the Optical Society of America B*, 35(10), 2478-2483, 2018.

[11] Z. Khezripour, F. F. Mahani, and A. Mokhtari, "Optimized design of silicon-based moth eye nanostructures for thin film solar cells," *The 3rd Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC)*, 2018.

[12] F.F. Mahani, and A. Mokhtari, “Performance improvement of organic solar cells using a hybrid color filter electrode of graphene-aluminum nanorings,” *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 13, 1-6, 2018.

[13] Z. Khezripour, F.F. Mahani, and A. Mokhtari, “Performance improvement of ultrathin organic solar cells utilizing light-trapping

using self-assembled nanoparticles,” *Applied physics express*, 4, 025201-025210, 2011.

[30] Q. G. Du, W. Yue, Z. Wang, W.T. Lau, H. Ren, and E.-P. Li, “High optical transmittance of aluminum ultrathin film with hexagonal nanohole arrays as transparent electrode,” *Optics express*, 24, 4680-4688, 2016.

[31] G. D’Aguanno, N. Mattiucci, A. Alu, and M. Bloemer, “Quenched optical transmission in ultrathin subwavelength plasmonic gratings,” *Physical Review B*, 83, 035426—035432, 2011.

[32] K. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media,” *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 14, 302-307, 1966.

[33] D.M. Sullivan, *Electromagnetic simulation using the FDTD method*: John Wiley & Sons, 2013.

[34] https://apps.lumerical.com/sp_common_simulation_consideratio.html (retrieved 18.01.2019)

[35] B. Zeng, Y. Gao, and F. Bartoli, "Ultrathin nanostructured metals for highly transmissive plasmonic subtractive color filters," in *CLEO: Science and Innovations*, 2014, STu1M. 6.

[36] S.A. Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications*: Springer US, 2007.

[21] M.Y. Lin, Y.L. Kang, Y.C. Chen, TH. Tsai, S.C. Lin, Y.H. Huang, et al., “Plasmonic ITO-free polymer solar cell,” *Optics express*, 22, A438-A445, 2014.

[22] Q. Gan, F.J. Bartoli, and Z.H. Kafafi, “Plasmonic - enhanced organic photovoltaics: Breaking the 10% efficiency barrier,” *Advanced materials*, 25, 2385-2396, 2013.

[23] J.R. Beau, Z. Leize, and Y. Qiuming, “Design and development of plasmonic nanostructured electrodes for ITO-free organic photovoltaic cells on rigid and highly flexible substrates,” *Nanotechnology*, 28, 165401-165412, 2017.

[24] S.Y. Chou and W. Ding, “Ultrathin, high-efficiency, broad-band, omni-acceptance, organic solar cells enhanced by plasmonic cavity with subwavelength hole array,” *Optics express*, 21, A60-A76, 2013.

[25] F.F. Mahani and A. Mokhtari, "Enhancement of ITO-free organic solar cells utilizing plasmonic nanohole electrodes," *ICN-2017: 7th International Conference on Nanotechnology*, 2017.

[26] J. Gilot, M.M. Wienk, and R. A. Janssen, “Double and triple junction polymer solar cells processed from solution,” *Applied Physics Letters*, 90, 143512-143520, 2007.

[27] C. Genet and T. Ebbesen, “Light in tiny holes,” *Nature*, 445, 39-46, 2007.

[28] F.J. Garcia-Vidal, L. Martin-Moreno, T. Ebbesen, and L. Kuipers, “Light passing through subwavelength apertures,” *Reviews of Modern Physics*, 82, 729-738, 2010.

[29] T. Nakanishi, E. Tsutsumi, K. Masunaga, A. Fujimoto, and K. Asakawa, “Transparent aluminum nanomesh electrode fabricated by nanopatterning



Investigating the Usage of Nanohole Array-Based Plasmonic Silver Electrodes in ITO-Free Organic Solar Cells

F. Fouladi Mahani, A. Mokhtari*

Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman

Abstract: Nowadays, Organic solar cells (OSCs) have attracted great interest due to their low cost, light weight, and flexibility. However, their efficiencies still need to be improved for many practical applications. The most conventional electrode for OSCs is indium tin oxide (ITO) which does not present high flexibility and robust mechanical properties. Additionally, this material is not appropriate for mass production due to the limited indium reserves. Here, we have proposed nanohole array-based plasmonic silver electrodes in order to design ITO-free OSCs. Numerical simulations based on finite-difference time-domain (FDTD) method have been employed to minimize the reflectance of the OSC while increasing the photoactive layer absorption. The designed nanostructure is a great potential to realize large-area and flexible energy harvesting.

Keywords: Silver nanostructured electrode, Organic solar cells, Plasmonic nanohole array, ITO-free