

بررسی اثر نانوهرم‌های پلاسمونیکی نقره بر جذب نوری سلول‌های فوتوولتائیک آلی پلاسمونیکی

مهدی حیدری، محمد صبائیان*، نرگس عجم‌گرد

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

چکیده

در این کار ارتقاء جذب نوری سلول‌های خورشیدی آلی P3HT:PCBM با حضور نانوهرم‌های نقره به‌روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) مورد بررسی قرار گرفته است. طول قاعده نانوهرم‌ها از ۴۰ تا ۱۶۰ نانومتر تغییر داده شد. نتایج نشان می‌دهد که نانوهرم‌هایی با طول ضلع قائده ۱۰۰ نانومتر، موده‌های پلاسمون پلاریتون سطحی و پراکندگی به‌طور مؤثری پراکنده می‌شوند و می‌توانند به‌طور قابل توجهی در ارتقاء خواص نوری والکتريکی سلول خورشیدی شرکت داشته باشند. میدان در لایه جذب را افزایش می‌دهند و به‌طور مؤثری منجر به افزایش جذب در سلول خورشیدی ارگانیک می‌شوند. به‌دلیل متمرکز بهتر نور در لایه جذب توسط نانوهرم‌های مدفون زیر لایه ITO، این طراحی تأثیر بهتری در خواص نوری والکتريکی سلول دارد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش طول قاعده نانوهرم‌ها تا ۱۰۰ نانومتر، بزرگترین جریان اتصال کوتاه به‌وجود می‌آید.

کلیدواژگان: سلول فوتوولتائیک ارگانیک، نانو ذرات نقره همی، تفاضل محدود در حوزه زمان، پلاسمونیک

مقدمه

فوتون در سلول‌های ارگانیک انجام شده است. در حقیقت، به‌دلیل تحرک‌پذیری کم حامل‌های بار و طول عمر کم اکسیتون‌ها، ضخامت لایه فعال این سلول‌ها غالباً به چند صد نانومتر محدود می‌شود [۵]. این کاهش ضخامت منجر به کاهش تعداد فوتون جذب شده و در نتیجه، کاهش بازدهی کلی سلول می‌گردد [۶]. در پژوهش‌های اخیر نشان داده شده است که با افزایش طول راه مؤثر نوری در لایه فعال، بازده تبدیل توان به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای به دام اندازی نور درون لایه جذب استفاده از خواص نانوذرات فلزی می‌باشد. این نانوساختارها با سه سازوکار کلی شامل برانگیختگی پلاسمون سطحی جایگزیده، برانگیختگی پلاسمون پلاریتون سطحی و پراکندگی مؤثر میدان، قادر به

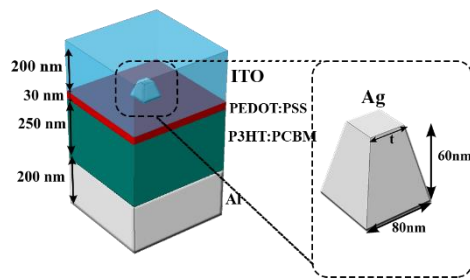
سلول‌های فوتوولتائیک بر اساس نوع مواد به کار رفته در آنها به دو دسته سلول‌های با ماده جذب معدنی نظیر Si و GaAs و سلول‌های ارگانیک تقسیم می‌شوند. مواد ارگانیک با توجه به خواصی نظیر وزن کم، انعطاف‌پذیری بالا، ساخت آسان و قیمت تمام شده پایین‌تر، نسبت به مواد معدنی، پتانسیل قابل توجهی برای تولید سلول‌های خورشیدی با قیمت پایین‌تر دارند، به‌همین دلیل در سالهای اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه ساخت سلول‌های ارگانیک صورت گرفته است [۱-۴]. یکی از چالش‌های اصلی برای استفاده از این سلول‌ها ایجاد توازن بین ضخامت بهینه لایه فعال و میزان جذب نوری در این سلول‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای بهبود جذب

ارگانیک، کاواک‌های پلاسمونیکي مستقل از زاویه تابش و با باند جذب پهن ایجاد کردند [۱۸]. لی^{۱۲} و همکارانش، گزارشی از اثر ایجاد حفره در نانونوارهای فلزی واقع بر الکتروود پستی بر بازدهی سلول‌های ارگانیک ارائه دادند [۱۹]. اثر وابستگی پلاسمون‌ها به هندسه در نانوذرات واقع در سلول‌های ارگانیک بر عملکرد سلول، توسط لی^{۱۳} و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۲۰]. بایک^{۱۴} و همکارانش اثر به کارگیری هسته-پوسته طلا-نقره را در سلول‌های ارگانیک بررسی کردند [۲۱]. خواص نوری و الکتريکی لایه نازک PEDOT:PSS آلائیده با نانوذرات منشوری نقره مورد توسط چاو^{۱۵} و همکارانش بررسی شد [۲۲]. محدودیت ارتقاء پلاسمونیکي بازدهی سلول‌های خورشیدی فوتولتائیک توسط کاراتی^{۱۶} و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت [۲۳]. لیو^{۱۷} و همکارانش از نانوذرات مس در افزایش بازدهی سلول‌های فوتولتائیک ارگانیک استفاده کردند [۲۴]. لانگ^{۱۸} و همکارانش با بهره‌گیری از نانونوارهای نقره به‌عنوان الکتروود موفق به افزایش جذب نوری سلول‌های ارگانیک به‌طور همزمان در هر دو قطبش TE و TM شدند [۵]. اثر خوشه‌های نانوذرات پلاسمونیکي جفت‌شده بر عملکرد سلول‌های پلاسمونیکي ارگانیک توسط پارک^{۱۹} و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۲۵]. وروشیلوو^{۲۰} و همکارانش از نانواتن‌های پلاسمونیکي برای افزایش بازدهی سلول‌های ارگانیک

افزایش بازده جذب نوری سلول‌های خورشیدی می‌باشند [۷, ۸]. تاکنون نانو ساختارهای متفاوتی نظیر نانوکره‌ها [۹]، نانومیله‌ها [۱۰]، نانونوارها [۱۱] و غیره برای افزایش بازده سلول‌های خورشیدی بررسی شده‌اند. برای اولین بار ماپل^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۷، حساسیت بالای سلول‌های فوتولتائیک ارگانیک را به امواج پلاریتون پلاسمون سطحی نشان دادند [۱۲]. در همان سال پان^۲ و رودبرگ^۳، اثر حضور ورقه نازک نقره را در سلول‌های فوتولتائیک پشته‌ای پنتاسین/C60 بررسی کردند و ارتقاء بازدهی سلول از ۰/۳۲ درصد به ۱/۱ درصد را گزارش دادند [۱۳]. کیم^۴ و همکارانش با استفاده از روش لایه نشانی جریان پالسی^۵ نانوذراتی به ضخامت تقریبی ۱۳ نانومتر را در لایه انتقال حفره PEDOT:PSS قرار داده افزایش بازده سلول ارگانیک با جاذب P3HT:PCBM را نشان دادند [۱۴]. اثر حضور نانوذرات کروی نقره در مرز مشترک زیرلایه سیلیکونی و جاذب ارگانیک MEH-PPV:PCBM را داچ^۶ و همکارانش بررسی کردند [۱۵]. در سال ۲۰۱۳، بایک^۷ و همکارانش گزارشی مفصلي از اثرات پراکنندگی نانوذراتی با اندازه کنترل شده بر عملکرد سلول‌های فوتولتائیک ارائه دادند [۱۶]. بیسواس^۸ و تیمونز^۹، از تکنیک‌های نانوفوتونیکي به دام اندازی نور در طراحی سلول‌های فوتولتائیک ارگانیک استفاده کردند [۱۷]. چو^{۱۰} و دینگ^{۱۱}، با استفاده نانو حفره‌هایی با ابعاد زیر طول موج در سلول‌های فوتولتائیک

Ding^{۱۱}
Lee^{۱۲}
Li^{۱۳}
Baek^{۱۴}
Cho^{۱۵}
Karatay^{۱۶}
Liu^{۱۷}
Lang^{۱۸}
Park^{۱۹}
Voroshilov^{۲۰}

mapel^۱
Pan^۲
Rothburg^۳
Kim^۴
Pulse current electrodeposition^۵
Duche^۶
Baek^۷
Biswas^۸
Timmons^۹
Cho^{۱۰}



شکل ۱. تصویر نمادینی از سلول خورشیدی با نانوهرم از جنس نقره.

ابتدا با حل معادلات ماکسول (معادلات ۱-۳)، به روش تفاضل متناهی وابسته در حوزه زمان (FDTD) در سه بعد و در بسته محاسباتی لومریکال، توزیع میدان الکتریکی و مغناطیسی درون سلول به دست می‌آید [۱۱]:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \nabla \times H \quad ۱$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times E \quad ۲$$

$$D(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega) E(\omega) \quad ۳$$

که در آن ε_r ضریب گذردهی نسبی محیط و ε_0 ضریب گذردهی خلأ می‌باشد. سپس از واگرایی بردار پوینتینگ، جذب نوری در لایه‌های مختلف سلول استفاده می‌شود.

$$A(\lambda) = \int \omega \cdot \text{Im}(\varepsilon) \cdot |E|^2 dv \quad ۴$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای نور فرودی و ε گذردهی ماده می‌باشد. برای نشان دادن بهتر میزان بهبود در جذب نوری سلول، کمیتی به نام ارتقاء جذب نوری، به صورت نسبت جذب نوری در سلول با نانوهرم‌ها، به جذب نوری در سلول‌های بدون نانوهرم تعریف می‌شود.

چگالی جریان ایجاد شده در سلول هنگامی که اختلاف پتانسیل بین دو الکترود صفر باشد، یکی از کمیت‌های مهم در مطالعات مربوط به سلول‌های خورشیدی

شفاف استفاده کردند [۲۶]. رودریگز^{۲۱} و همکارانش برای اولین بار در سال ۲۰۱۴ به بررسی رفتار پراکندگی نانوهرم‌های آلومینیوم پرداخته و پتانسیل به کارگیری نانوهرم‌های آلومینیوم را برای کاربردهایی نظیر به دام اندازی نور گزارش کردند [۲۷].

اگرچه پژوهش‌های بسیاری از سال ۲۰۰۷ تا کنون در زمینه بکارگیری نانوذرات فلزی با هندسه‌ها و سازوکارهای متفاوت جهت افزایش بازدهی سلول‌های فوتوولتائیک انجام گردیده است با توجه به مطالعات فعلی ما، تا کنون گزارشی در مورد استفاده از نانوهرم‌های نقره جهت افزایش بازده سلول‌های فوتوولتائیک آلی ارائه نشده است. در این کار ما به بررسی اثر حضور نانوهرم‌های نقره در سلول‌های فوتوولتائیک ارگانیک پرداخته و علاوه بر تحلیل مکان بهینه نانوهرم‌ها، نشان می‌دهیم حضور نانوهرم‌ها باعث افزایش قابل توجه جذب نوری در طول موج‌های بلند می‌شود.

تئوری

شکل ۱، تصویر نمادینی از سلول خورشیدی با ضخامت لایه جذب ۲۵۰ نانومتر از جنس P3HT:PCBM و لایه ۳۰ نانومتری از جنس PEDOT:PSS در نقش عامل انتقال دهنده حفره، که روی آن قرار دارد را نشان می‌دهد. در این کار ضخامت الکترود آلومینیومی پشت ۲۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است [۲۸، ۶، ۲]. سطح مقطع زیرین و بالایی نانوهرم به ترتیب، مربع‌هایی با طول ضلع ۸۰ نانومتر و ۴۰ نانومتر می‌باشند. در این پژوهش ارتفاع نانوهرم‌ها ثابت و برابر با ۲۰ نانومتر در نظر گرفته شده است.

شکل ۲. (a) نمودار ارتقاء جذب در لایه P3HT:PCBM برحسب طول موج برای نانو ذره نقره با ارتفاع ۶۰ نانومتر، عرض قاعده پایین ۸۰ نانومتر و قاعده بالا ۴۰ نانومتر، در دو حالت بالای لایه ITO و حالت قرارگرفته زیر لایه ITO (b,c) تصویر نمادینی از محل قرار گیری نانوذرات.

برای حالت نانوذره در بالای لایه ITO، نمودار ارتقاء جذب یک قله نسبتاً پهن به ارتفاع بیشینه ۱٫۶ در طول موج ۷۵۲ نشان می‌دهد که ناشی از پراکندگی میدان فرودی از نانوهرم می‌باشد. افت قابل توجه جذب در طول موج ۵۵۸ نانومتر، ناشی از بازتاب شدید میدان از سطح بالای نانوهرم می‌باشد. در حالت نانوذره مدفون شده زیر لایه ITO، نمودار جذب علاوه بر قله پهن ناشی از پراکندگی، دو قله بهبود جذب به ترتیب در طول موج‌های ۶۹۹ و ۷۹۲ نانومتر به ترتیب با ارتفاع‌های ۴/۴ و ۲/۸ نشان می‌دهد که به ترتیب به دلیل پراکندگی مؤثر نور فرودی درون لایه جاذب و برانگیختگی مود پلاسمون پلاریتون سطحی می‌باشند. لازم به ذکر است که در حالت اول (نانوهرم بالای لایه ITO) پراکندگی رو به جلو و همچنین موده‌های پلاسمونیک جایگزیده در اطراف نانوهرم نیز بوجود می‌آیند ولی به دلیل فاصله ۲۰۰ نانومتری نانوذره از لایه جاذب، و ماهیت میدان نزدیک موده‌های پلاسمونیک جایگزیده، شدت میدان بیشتر در لایه ITO افزایش یافته و قادر به افزایش چشمگیر جذب در لایه جاذب نمی‌باشد. در نتیجه به اینک نانوذرات واقع در بالای لایه ITO قادر به برانگیختگی مؤثر موده‌های پلاسمونیک و تقویت میدان در لایه جاذب نمی‌باشند، در ادامه به بررسی اثر ابعاد نانوهرم در ساختار سلول‌هایی پرداخته خواهد شد که در آنها نانوذرات پلاسمونیک در مرز مشترک الکتروود ITO و لایه نازک PEDOT:PSS قرار گرفته‌اند (شکل ۲(c)).

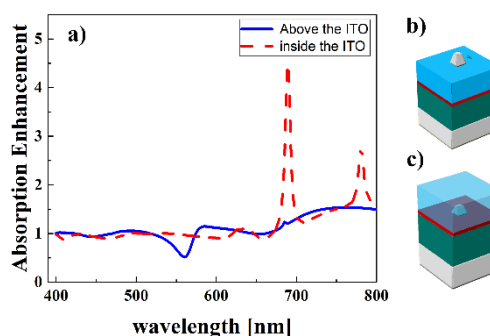
می‌باشد. این کمیت چگالی جریان اتصال کوتاه نامیده شده و از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$J_{sc} = \frac{q}{hc} \int_{400nm}^{800nm} A(\lambda) \cdot I(\lambda) \lambda d\lambda \quad ۵$$

شرایط مرزی به کار رفته برای مرزهای بالا و پایین در مسئله، به منظور جلوگیری از ایجاد بازتاب‌های غیرواقعی از مرزها، شرط مرزی لایه انطباق کامل^{۲۲} (PML) می‌باشد. با توجه به متناوب بودن ساختار و با هدف کاهش توان محاسباتی مورد نیاز از کل مجموعه، سلول واحدی از ساختار در نظر گرفته شد و با انتخاب شرط مرزی تناوبی (PBC) برای مرزهای طرفین، اثر حضور سلول‌های مجاور نیز اعمال شده است. مش‌بندی با استفاده از ای سل‌ها انجام گرفته، محل چشمه در بالای سلول در فاصله ۴۰۰ نانومتری و تابش به صورت عمودی اتفاق می‌افتد. از آنجایی که ساختار متقارن است، نتایج قطبش TE و TM با یکدیگر یکسان می‌شوند.

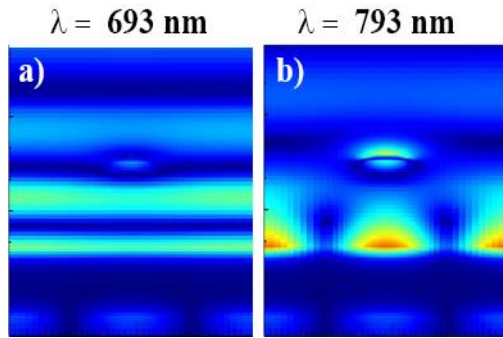
نتایج

شکل نمودار ارتقاء جذب در لایه جاذب P3HT:PCBM سلول خورشیدی را برحسب طول موج برای دو حالت نانوذره بالای لایه ITO (خط آبی رنگ) و نانوذره مدفون شده زیر لایه ITO (خط چین قرمز) نشان می‌دهد.



^{۲۲} Perfect Match Layer

پلاسمون پلاریتون سطحی اتفاق می‌افتد که میزان جذب نور در طول موج ۷۹۰ نانومتر به نزدیک ۵ برابر حالت بدون نانوهرم می‌رسد.

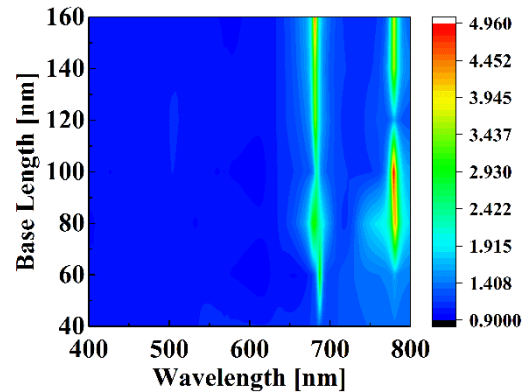


شکل ۴. توزیع میدان مغناطیسی نرمال شده در سطح مقطع سلول با نانوهرم به ارتفاع ۲۰ نانومتر و ضلع قائده ۱۰۰ نانومتر برای طول موج‌های (a) ۶۹۳ نانومتر پراکندگی مؤثر نور درون لایه جذب (b) ۷۹۳ نانومتر و برانگیختگی پلاسمون پلاریتون سطحی.

مطابق شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش طول ضلع قائده نانوهرم‌ها تا ۱۰۰ نانومتر، علاوه بر پهن‌شدگی نسبی در مود پلاریتون پلاسمون‌های سطحی، میزان پراکندگی از نانوهرم‌ها نیز در بازه پهن‌تر طول موجی در محدوده ۷۰۰ الی ۸۰۰ نانومتر اتفاق می‌افتد، از آنجایی که جذب نوری سلول‌های لایه نازک در بخش طول موج‌های بلند نسبت به طول موج‌های کوتاه‌تر کمتر است انتظار می‌رود که این مود پلاسمونیکی باعث افزایش چگالی جریان اتصال کوتاه شود.

شکل نمودار ارتقاء چگالی جریان اتصال کوتاه را برحسب طول قاعده هرم نشان می‌دهد. برای رسم این شکل از هفت مقدار برای طول قاعده از ۴۰ تا ۱۶۰ نانومتر استفاده کرده‌ایم.

شکل ۳ نمودار ارتقاء جذب را برحسب طول موج، برای نانوهرم‌هایی قرارگرفته زیر لایه ITO، با ارتفاع ۲۰ نانومتر و طول قاعده ۴۰ الی ۱۶۰ نانومتر نشان می‌دهد.



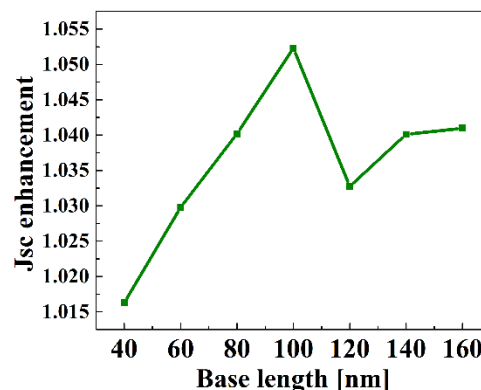
شکل ۵. نمودار ارتقاء جذب برحسب طول موج برای نانوهرم‌های با تغییر طول ضلع قاعده هرم از ۴۰ تا ۱۶۰ نانومتر.

برای نانوهرم‌هایی با ضلع قائده ۴۰ نانومتر، به دلیل کوچک بودن سطح مقطع پراکندگی، تغییر چشمگیری در میزان جذب نوری در لایه جذب ایجاد نمی‌گردد. با افزایش طول ضلع قاعده، دو قله با مرکزیت طول موج ۶۹۰ نانومتر و ۷۹۰ نانومتر مشاهده می‌شود که به ترتیب ناشی از پراکندگی مؤثر نور فرودی از نانوهرم‌ها (حالت تشدید-خاموش، شکل (a) ۴)، و حالت برانگیختگی پلاسمون پلاریتون‌های سطحی منتشر شده در سطح مشترک الکتروود و لایه جذب (b) ۴) می‌باشند. برای طول قاعده‌های ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ هر دو پدیده به‌خوبی در نمودار جذب قابل مشاهده می‌باشند. در طول قاعده ۱۲۰ نانومتر با توجه به ماهیت گسسته مودهای موجبری و خروج سیستم از حالت تشدید پلاسمونیک، پلاسمون‌های سطحی امکان برانگیختگی برای این ساختار را ندارند. در ادامه با افزایش طول ضلع قاعده، امکان برانگیختگی مجدد مودهای پلاسمونیکی ایجاد می‌گردد. بیشترین میزان ارتقا جذب در طول قاعده ۱۰۰ نانومتر برای مود

قاعده و محل قرار گیری نانوهرم‌ها بررسی شد. با توجه به تقارن ساختار، نتایج برای هر دو قطبش یکسان می‌باشند. به دلیل متمرکز سازی بهتر نور در لایه ITO جاذب توسط نانوهرم‌های مدفون زیر لایه ITO به عنوان ساختار با عملکرد بهتر انتخاب گردید و برانگیختگی موده‌های پلاسمونیک نانوهرم‌ها در طول موج ۷۹۳ مشاهده گردید. افزایش طول ضلع قاعده تا ۱۰۰ نانومتر باعث برانگیخته شدن بهتر موده‌های پلاسمونیک و در نتیجه چگالی جریان اتصال کوتاه بیشتری می‌گردد. با افزایش طول ضلع قاعده، به دلیل افزایش میزان بازتاب از سطح نانوهرم‌ها و اتلاف انرژی فرودی، چگالی جریان کمتری نسبت به سلول با نانوهرم ۱۰۰ نانومتری داریم. اگرچه در پژوهش‌های دیگر با استفاده از نانوذرات دیگر نظیر نانوهرسته-پوسته [۴] امکان ارتقا چگالی جریان تا ۹ درصد فراهم گردیده است، این کار از جنبه بررسی اثرات نانوهرم‌ها برای اولین بار حایز اهمیت می‌باشد.

مراجع

- [1] M. Notarianni, K. Vernon, A. Chou, J. Liu, N. Motta, Plasmonic effect of annealed gold islands for improving efficiency of organic solar cells, *Advanced Device Materials 1* (2015) 27-32.
- [2] M. Xu, J. Feng, Y.-S. Liu, Y. Jin, H.-Y. Wang, H.-B. Sun, Effective and tunable light trapping in bulk heterojunction organic solar cells by employing Au-Ag alloy nanoparticles, *Applied Physics Letters* 105 (2014) 153303.
- [3] Z. Xia, T. Song, J. Sun, S.-T. Lee, B. Sun, Plasmonic enhancement in hybrid organic/Si heterojunction solar cells enabled by embedded gold nanoparticles, *Applied Physics Letters* 105 (2014) 241110.
- [4] Se-Woong Baek, Garam Park, Jonghyeon Noh, Changsoon Cho, Chun-Ho



شکل ۵. نمودار ارتقاء چگالی جریان اتصال کوتاه برحسب طول قاعده.

با افزایش طول ضلع قاعده نانوهرم‌ها تا طول ضلع ۱۰۰ نانومتر، به دلیل برانگیختگی بهتر مدهای پلاسمون پلاریتون سطحی و پراکندگی مؤثر نور به درون لایه جاذب در طول موج‌های بلند، جذب نوری افزایش یافته و در نتیجه میزان چگالی جریان اتصال کوتاه نیز افزایش می‌یابد. برای نانوهرم‌ها با طول ضلع قاعده ۱۰۰ نانومتر چگالی جریان ۵٫۲ درصد افزایش یافته است. به ازاء طول ضلع ۱۲۰ نانومتر، شرایط برانگیختگی پلاسمون پلاریتون سطحی فراهم نشده و میزان جذب نوری به شدت کاهش می‌یابد. در نتیجه میزان ارتقاء چگالی جریان تا نزدیک به ۳ درصد کاهش می‌یابد. به ازاء طول ضلع‌های بزرگتر از ۱۲۰ نانومتر، اگر چه موده‌های پلاسمونیک برانگیخته می‌شوند، ولی به دلیل افزایش میزان بازتاب نانوذرات و اتلاف انرژی فرودی در نانوذرات، مقدار چگالی جریان، نسبت به نانوهرم‌ها با طول ضلع ۱۰۰ نانومتر، کمتر می‌باشد.

نتیجه گیری

در این کار جذب نوری سلول‌های فوتوولتائیک نازک در حضور نانوهرم‌های نقره به روش تفاضل محدود وابسته به زمان در بازه طول موجی ۴۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر بررسی گردید. همین‌طور اثر طول ضلع

- efficiency in tandem cells of pentacene/C60, in *Proc. of SPIE*, (2007) 664109-1.
- [14] S.-S. Kim, S.-I. Na, J. Jo, D.-Y. Kim, Y.-C. Nah, Plasmon enhanced performance of organic solar cells using electrodeposited Ag nanoparticles, *Applied Physics Letters*, 93, (2008) 073307.
- [15] D. Duche, P. Torchio, L. Escoubas, F. Monestier, J.-J. Simon, F. Flory, *et al.*, Improving light absorption in organic solar cells by plasmonic contribution, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93, (2009) 1377-1382.
- [16] S.-W. Baek, J. Noh, C.-H. Lee, B. Kim, M.-K. Seo, J.-Y. Lee, Plasmonic Forward Scattering Effect in Organic Solar Cells: A Powerful Optical Engineering Method, *Scientific Reports* 3 (2013) 1726.
- [17] R. Biswas and E. Timmons, Nanophotonic light trapping near the Lambertian limit in organic solar cell architectures, *Optics Express*, 21 (2013) A841-A846.
- [18] S.Y. Chou, W. Ding, Ultrathin, high-efficiency, broad-band, omni-acceptance, organic solar cells enhanced by plasmonic cavity with subwavelength hole array, *Optics Express*, 21 (2013) A60-A76.
- [19] S. Lee, S. In, D.R. Mason, N. Park, Incorporation of nanovoids into metallic gratings for broadband plasmonic organic solar cells, *Optics express*, 21 (2013) 4055-4060.
- [20] X. Li, W.C.H. Choy, H. Lu, W.E.I. Sha, A.H.P. Ho, Efficiency Enhancement of Organic Solar Cells by Using Shape-Dependent Broadband Plasmonic Absorption in Metallic Nanoparticles, *Advanced Functional Materials*, 23 (2013) 2728-2735.
- [21] 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 (2014) 3302-3312.
- Lee, Min-Kyo Seo, *et al.*, Au@Ag Core-Shell Nanocubes for Efficient Plasmonic Light Scattering Effect in Low Bandgap Organic Solar Cells, *ACS Nano* (2014).
- [5] Y. Long, Y. Li, R. Su, Simultaneously improving optical absorption of both transverse-electric polarized and transverse-magnetic polarized light for organic solar cells with Ag grating used as transparent electrode, *AIP Advances* 4 (2014) 087143.
- [6] D. Rourke, S. Ahn, A. M. Nardes, J. van de Lagemaat, N. Kopidakis, W. Park, Integrated optical and electrical modeling of plasmon-enhanced thin film photovoltaics: A case-study on organic devices, *Journal of Applied Physics*, 116, (2014) 114510.
- [7] K. Catchpole, A. Polman, Plasmonic solar cells, *Optics Express* 16 (2008) 21793-21800.
- [8] H.A. Atwater, A. Polman, Plasmonics for improved photovoltaic devices, *Nature materials* 9 (2010) 205-213.
- [9] T. Gao, E. Stevens, J.K. Lee, P.W. Leu, Designing metal hemispheres on silicon ultrathin film solar cells for plasmonic light trapping, *Optics Letters* 39, (2014) 4647-50.
- [10] P.R. Pudasaini, A.A. Ayon, High efficiency nanotextured silicon solar cells, *Optics Communications*, (2012) 4211-14.
- [11] M. Sabaieian, M. Heydari, N. Ajamgard, Plasmonic excitation-assisted optical and electric enhancement in ultrathin solar cells: the influence of nano-strip cross section, *AIP Advances* 5 (2015) 087126.
- [12] J. Mapel, M. Singh, M. Baldo, and K. Celebi, Plasmonic excitation of organic double heterostructure solar cells, *Applied physics letters* 90 (2007) 121102-121102-3.
- [13] S. Pan, L.J. Rothberg, Plasmon enhancement of organic photovoltaic

- [22] Z. Cao, Z. Chen, L. Escoubas, Optical, structural, and electrical properties of PEDOT: PSS thin films doped with silver nanoprisms, *Optical Materials Express*, 4 (2014) 2525-2534.
- [23] D.U. Karatay, M. Salvador, K. Yao, A.K.-Y. Jen, D.S. Ginger, Performance limits of plasmon-enhanced organic photovoltaics, *Applied Physics Letters*, 105, (2014) 033304.
- [24] Z. Liu, S.Y. Lee, E.-C. Lee, Copper nanoparticle incorporated plasmonic organic bulk-heterojunction solar cells, *Applied Physics Letters*, 105 (2014) 223306.
- [25] H.I. Park, S. Lee, J.M. Lee, S.A. Nam, T. Jeon, S. W. Han, *et al.*, High Performance Organic Photovoltaics with Plasmonic-Coupled Metal Nanoparticle Clusters, *ACS Nano*, 8 (2014) 10305-10312.
- [26] P.M. Voroshilov, C.R. Simovski, P.A. Belov, Nanoantennas for enhanced light trapping in transparent organic solar cells, *Journal of Modern Optics*, 61 (2014) 1743-1748.
- [27] S.R.K. Rodriguez, F.B. Arango, T.P. Steinbusch, M.A. Verschuuren, A.F. Koenderink, J.G. Rivas, Breaking the Symmetry of Forward-Backward Light Emission with Localized and Collective Magnetoelectric Resonances in Arrays of Pyramid-Shaped Aluminum Nanoparticles, *Physical Review Letters*, 113 (2014) 247401.
- [28] D.W. Chenguang, J.C. Martin, Efficiency improvement in organic solar cells with nano-structured ITO electrodes, *Journal of Optics*, 17 (2015) 065901.

The influence of silver nanopyramids on the optical absorption in the plasmonic organic photovoltaic cells

Mehdi Heydari, Mohammad Sabaieian*, Narges Ajamgard

Department of Physics, Faculty of Science, University of Shahid Chamran, Ahvaz, Iran

Abstract

In this study, the optical absorption enhancement of the organic (P3HT:PCBM) solar cells in the presence of silver nanopyramids was investigated with a finite-difference time-domain method. The nanopyramids' base lengths were changed from 40 to 160 nm. The results show that nanopyramids with a base length of 100 nm, the surface plasmon polariton as well as the effective forward scattering modes are excited effectively, which significantly contributes to enhancement of optical and electrical properties of organic solar cells. Due to the better light concentration in the absorption layer by nanopyramids, which are located under the ITO layer, this design is showed to be more influential in increasing the optical and electrical properties of the cells. The results show that for nanopyramids with a base length of 100 nm, the highest short-circuit current density enhancements are achieved.

Keywords: organic photovoltaic cells, Nanopyramid, FDTD, Plasmonics

* Corresponding Author: sabaieian@gmail.com