

واژه‌های کلیدی:

ناوذرات طلا و نقره
سلول خورشیدی پلیمری
رزونانس پلاسمون سطحی

استفاده از نانو ذرات پلاسمونی در سلول‌های خورشیدی پلیمری لایه نازک

فرامرز افشارطرمی^{*}، بهاره رضایی^۲

۱ تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، گروه مهندسی پلیمر

۲ تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، گروه مستقل شیمی

چکیده ...

در این تحقیق با معرفی پلیمرهای رسانای متداول در سلول‌های خورشیدی پلیمری و استفاده از نانو ذرات دارای رزونانس پلاسمون سطحی (LSPR, Localized Surface Plasmon Resonance) مانند طلا و نقره، بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی بررسی می‌شود. استفاده از نانو ذرات طلا و نقره در لایه‌های مختلف سلول خورشیدی پلیمری مورد بررسی قرار می‌گیرد. و در نهایت تاثیر ساختار نانو ذرات بر روی کارایی سلول بیان می‌شود.

^{*}پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
afshar@aut.ac.ir

۱ مقدمه

که به صورت شیمیایی با نانوذرات در ارتباط است، مانند مولکول‌های جذب شده یا مواد نیمه‌هادی. روند تحریک الکترونی معمولاً در فلز انجام شده و محیط شیمیایی اطراف تأثیر زیادی بر آن ندارد. پلاسمون (ارتباط فوتون و نانوذرات پلاسمونی) بعد از چند فمتو ثانیه بر اثر تولید جفت الکترون و حفره پرنرژی در فلز از بین می‌رود. این حامل‌های بار پرنرژی در اثر برخورد با دیگر الکترون‌های سطح، خنک می‌شوند؛ بیشتر بودن توزیع بار نسبت به از بین رفتن آن در اثر برخورد با سایر الکترون‌ها منجر به تولید حرارت در نانوذرات و برانگیخته شدن آن‌ها می‌شود. در این زمان حامل‌های بار از الکترون‌های برانگیخته جدا شده به محیط متصل به آن انتقال می‌یابند. بیشتر حامل‌ها به دلیل نداشتن انرژی کافی برای انتقال بر اثر برخورد با الکترون و فونون در نانوذرات از بین می‌روند. وجود مولکول‌های جذب شده یا مواد با دی‌الکتریک متفاوت بر روی نانوذرات پلاسمونی منجر به از بین رفتن سریع‌تر LSPR نسبت به نانوذرات آزاد می‌شود و علت آن از بین رفتن انرژی در سطح شیمیایی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در اثر تماس نانوذرات با نیمه‌هادی که به صورت شیمیایی با نانوذرات در ارتباط است پایداری به صورت مستقیم و کارآمد از طریق انتقال الکترون و حفره به نیمه‌هادی انجام می‌پذیرد.

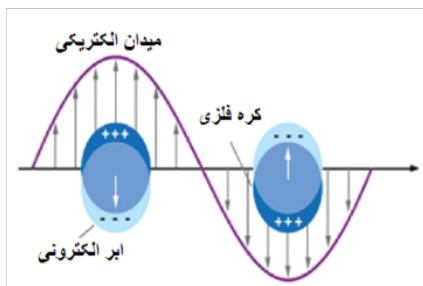
انتقال تعداد زیادی از حامل‌های بار از طریق پیوند نانوذرات با نیمه‌هادی امکان‌پذیر است. با مهندسی سطح و قرار دادن الکترون‌دهنده و الکترون‌گیرنده بر آن درمیزان انرژی مشخص و در میدان الکتریکی قوی که باعث انتقال در انرژی خاص می‌شوند می‌توان سرعت انتقال حامل‌های بار را افزایش داد. در این سامانه‌ها حامل‌های بار در حالت گذار هستند؛ زیرا تنها برای چند فمتو ثانیه در حالت هیبریدی هستند و بعد از آن به

در ضخامت لایه فعال در سلول‌های خورشیدی پلیمری با میزان بهینه ۱۰۰ نانومتر یا کمتر، میزان جذب نور خورشید به شدت کاهش می‌یابد [۱]. می‌توان با افزایش ضخامت لایه فعال میزان جذب نور را بالا برد؛ ولی با افزایش ضخامت لایه فعال میزان تحرک بار در پلیمرهای رسانا کاهش می‌یابد؛ در نتیجه جریان تولیدی کم می‌شود. این فرایند باعث ایجاد رقابتی بین ضخامت لایه فعال و انتقال بار در سلول خورشیدی می‌شود. بر همین اساس مطالعات زیادی بر روی نانوذرات فلزی مانند طلا (Au) و نقره (Ag) به‌عنوان راه‌حلی برای افزایش جذب در لایه‌های نازک سلول خورشیدی، انجام گرفته است. در این مقاله تلاش می‌شود تأثیر این نوع نانوذرات بر کارایی و سازوکار سلول مورد بررسی قرار گیرد.

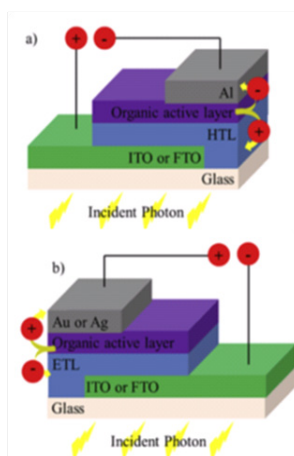
۲ خواص فیزیکی رزونانس پلاسمون سطحی

نانوذرات فلزی پلاسمونی می‌توانند به‌صورتی کارآمد انرژی موجود در فوتون‌ها را به انرژی حامل‌های بار در نانوذرات تبدیل کنند. انرژی حامل‌های بار به مولکول یا مواد نیمه‌هادی متصل به نانوذرات منتقل شده، موجب تغییرات نوری شیمیایی می‌شود. اما اکثر حامل‌های پرنرژی پیش از انتقال به مواد نیمه‌هادی در نانوذرات از بین می‌روند؛ از این رو بازده این روش پایین است. جذب در سطح نانوذرات پلاسمونی، جریان در سامانه‌های برانگیخته شده را تغییر می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بازده انتقال الکترون‌های داغ یا حفره‌ها از نانوذرات پلاسمونی بسیار بیشتر از سلول‌های خورشیدی معمولی است.

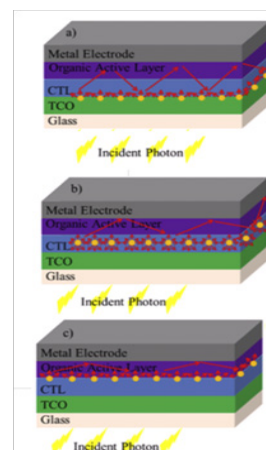
نانوذرات پلاسمونی در فناوری‌های مختلف از جمله انرژی خورشیدی، تبدیل انرژی، شناسایی مولکولی، عکس‌برداری، هدف قرار دادن بافت سرطانی و ... استفاده می‌شوند. در این روش، تشدید پلاسمون سطحی موضعی از طریق تعامل رزونانس فوتون با حرکت جمعی حامل‌های بار آزاد در نانوذرات فلز رخ می‌دهد. تشدید پلاسمون سطحی موضعی از طریق ذخیره نور تابشی با ضریب فرکانس رزونانس مشخص به صورت انرژی الکترومغناطیسی در سطح نانوذرات است [۲] (شکل ۱). مفهوم تولید بار، خروج الکترون از فلز در اثر تابش و انتقال به خلأ نیست؛ بلکه در واقع انتقال بار از نانوذرات به محیطی است



شکل ۱ رزونانس پلاسمون سطحی (LSPR) بر روی سطح نانوذرات [۲].



شکل ۳ ساختار قدیمی و ساختار معکوس سلول خورشیدی پلیمری [۳].



شکل ۲ حضور نانوذرات در لایه‌های مختلف سلول خورشیدی [۳].

الکترون-حفره) داخل لایه فعال اتفاق می‌افتد و حفره‌ها به سمت TCO می‌روند که معمولاً ITO (ایندیوم قلع اکسید) است. در حالی که الکترون‌ها در الکتروود با تابع کار پایین مانند آلومینیوم (Al) جمع‌آوری می‌شوند. با اضافه کردن لایه انتقال‌دهنده الکترون بین TCO و لایه فعال و با استفاده از الکتروود با تابع کار بالا مانند طلا و نقره می‌توان حفره‌ها را از قسمت بالای سلول خورشیدی و الکترون‌ها را از قسمت پایین سلول خورشیدی جمع‌آوری کرد [۴]. در حال حاضر، بیشتر نوع سلول‌های خورشیدی پلیمری از پلیمرهای نیمه‌رسانا مانند P3HT (Poly(3-hexylthio-phenene-2,5-diyl PCBM (methyl ester [6,6]- Phenyl C60 butyric acid) به عنوان الکترون‌گیرنده تشکیل شده است. P3HT به دلیل درجه بالای بلورینگی، سرعت انتقال حفره بالا (بیشتر از $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) (سانتی متر مربع بر ولت ثانیه)، جذب در طول موج 650 nm و تراز انرژی مناسب برای انتقال بار به عنوان ماده مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کنار P3HT، از PCBM به عنوان الکترون‌گیرنده استفاده می‌شود و این به دلیل سرعت انتقال بالای الکترون در PCBM است (شکل ۴).

۵ استفاده از نانوذرات در لایه فعال سلول خورشیدی

در شکل ۵ حضور نانوذرات در لایه فعال (P3HT,PCBM) نشان داده شده است. به صورت تجربی، نانوذرات در لایه فعال می‌توانند باعث افزایش جذب نوری شوند. نانوذرات بزرگ به وسیله انعکاس نور ورودی و نانوذرات

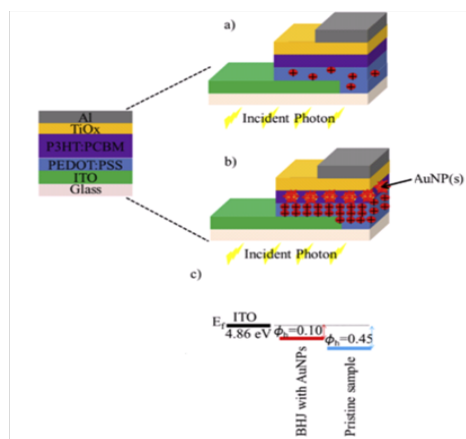
نانو ذره فلزی باز می‌گردند. برای بهبود این سامانه‌ها از مواد نیمه‌هادی در تماس مستقیم با نانوذرات می‌توان استفاده کرد.

۳ پخش نور در سلول خورشیدی

نانوذرات فلزی زمانی که نور به سطح آن‌ها برخورد می‌کند به صورت هم‌زمان نور را جذب و دوباره بازتاب می‌دهند. نانوذرات می‌توانند در خارج از لایه فعال قرار داشته باشند (۱) بین لایه اکسید شفاف هادی Trans-Parent Conductive Oxide (TCO) / لایه انتقال‌دهنده بار (Charge Transport Layer, CTL) (۲) در داخل لایه انتقال‌دهنده بار (۳) بین لایه انتقال‌دهنده بار / لایه فعال. در فضای بین لایه‌های مختلف، نانوذرات میزان نور با نفوذ بیشتری را منعکس می‌کنند. نور تابیده شده با زاویه مشخص، طول جریان نوری را بر اثر افزایش بازتاب بهبود می‌دهد. اگر سلول خورشیدی دارای الکتروود منعکس‌کننده نور باشد، نور، بازتاب داده می‌شود و دوباره با سازوکاری مشابه به نانوذرات برخورد می‌کند. این ویژگی باعث افزایش کارایی سلول خورشیدی نسبت به حالتی می‌شود که از نانوذرات استفاده نشده است [۳] (شکل ۲).

۴ ساختارهای متداول و معکوس و پلیمرهای پرکاربرد در سلول خورشیدی پلیمری

در ساختارهای ابتدایی از سلول‌های خورشیدی پلیمری، لایه فعال بین لایه انتقال‌دهنده حفره و الکتروود با تابع کار پایین قرار می‌گرفت. جدایی اکسایتون (جفت



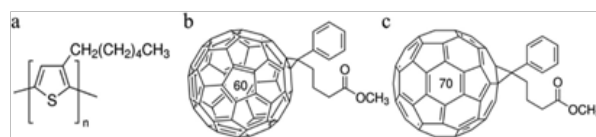
شکل ۵ ساختار و عملکرد سلول بدون نانوذرات طلا (a) و همراه با نانوذرات طلا (b) [۳].

توقف فرایند اکسایش نوری می شود.

۷ تأثیر غلظت نانوذرات بر کارایی سلول خورشیدی

با افزایش غلظت نانوذرات میزان کارایی سلول کاهش می یابد و این به دلیل جدایی فازی نانوذرات از فاز آلی بر اثر افزایش غلظت است. در نتیجه، میزان بیشتری از حامل های بار از فاز آلی خارج شده و وارد نانوذرات تجمع یافته می شوند. در نتیجه بر اثر افزایش باز ترکیب ایجاد شده روی سطح نانوذرات، میزان کارایی سلول کاهش می یابد [۶] (شکل ۷).

بر همین اساس برای حل این مشکل از پوشش های مختلف برای نانوذرات استفاده کردند. یکی از این پوشش ها اکسیدسیلیکون (SiO_2) است.

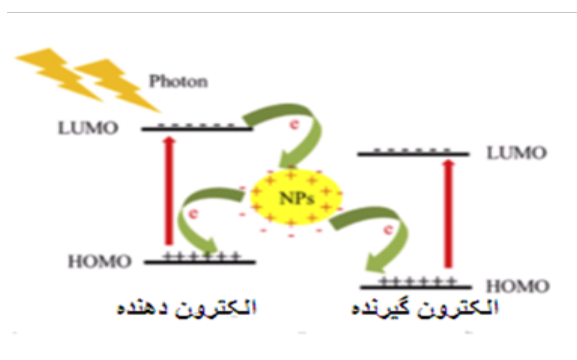


شکل ۴ ساختار شیمیایی PCBM (a)، P3HT (b)، PCBM (c) و PC70BM [۴].

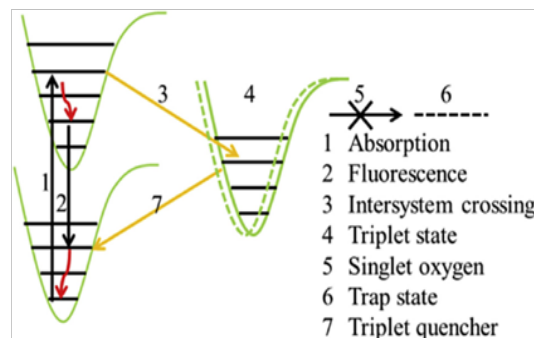
کوچک به وسیله رزونانس پلاسمون سطحی این فرایند را انجام می دهند. زمانی که الکترون های قرار گرفته بر روی نانوذرات، تحریک می شوند، می توانند به صورت مستقیم به لایه فعال منتقل شوند. به همین دلیل ایجاد طراحی مناسب در سلول های خورشیدی در هنگام استفاده از این نوع نانوذرات بسیار حائز اهمیت است [۵].

۶ افزایش پایداری سلول با استفاده از نانوذرات

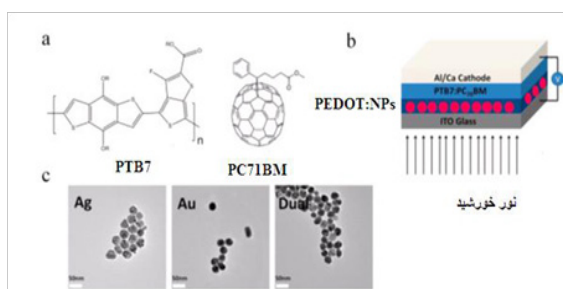
فرایند اکسایش در پلیمرهای نیمه رسانا با تشکیل تک اتم اکسیژن با انتقال انرژی از اکسایتون های سه تایی اتفاق می افتد. بر اثر واکنش پلیمرهای نیمه رسانا با اکسیژن، مراکز برای به دام اندازی بارها ایجاد می شود. در نتیجه، مسیر جدیدی برای نشر غیرنوری تک اکسایتون پلیمر ایجاد می شود که باعث کاهش شدت تابناکی پلیمر می شود (شکل ۶). نتایج جدید نشان می دهند، حضور نانوذرات با مسدود کردن اکسید شدن پلیمرها می تواند باعث افزایش پایداری سلول شود. دانشمندان به این نتیجه رسیدند، حضور نانوذرات در ترکیب های پلیمری، نقش از بین برنده اکسایتون های سه تایی را دارد و باعث



شکل ۷ کاهش کارایی سلول بر اثر افزایش غلظت نانوذرات [۳].



شکل ۶ کاهش اکسایش نوری به وسیله نانوذرات [۳].



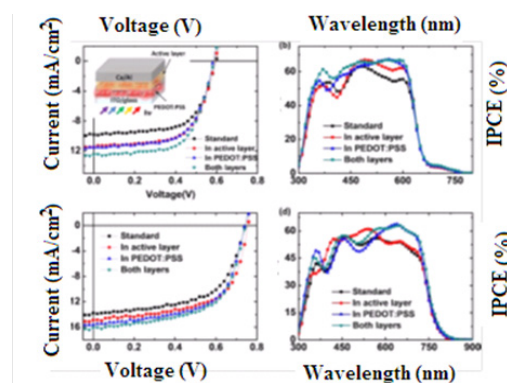
شکل ۹ (a) ساختار مولکولی PTB7 و PC₇₁BM (b) ساختار سلول خورشیدی پلیمری ساخته شده. (c) تصاویر TEM نانوذرات طلا و نقره [۸].
افزایش بیشتر کارایی سلول می‌شود [۷].

۹ سلول خورشیدی پلیمری ساخته شده از نانوذرات طلا و نقره

در شکل ۹ ساختار مولکولی Poly[(4,8-bis-(2-ethyl)-hexyloxy)-benzo(1,2-b:4,5-b')dithiophene)-2,6-diyl-alt-(4-(2-ethylhexanoyl)-thieno[3,4-b]thiophene)-2,6-diyl)]PTB7، PC₇₁BM ([6,6]-Phenyl C71 butyric acid methyl ester) ، ساختار سلول و نیز تصاویر TEM نانوذرات طلا و نقره، نشان داده شده است. تصاویر TEM نشان می‌دهند اندازه نانوذرات طلا و نقره در حدود ۴۰-۵۰ nm است که قابل مقایسه با ضخامت لایه Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Polystyrene Sulfon-) PEDOT:PSS با ضخامت ۶۰ nm است. بررسی‌های انجام شده با AFM نشان می‌دهند میزان میانگین اندازه برجستگی‌های سطحی در دو حالت PEDOT:PSS و در حالتی که نانوذرات وارد این لایه شده‌اند، تقریباً حدود ۱۰۲ nm است.

برای نشان دادن میزان تأثیر استفاده هم‌زمان از نانوذرات نقره و طلا سلول خورشیدی بدون نانوذرات طلا و نقره، با نانوذرات طلا، با نانوذرات نقره و در حالت نهایی با استفاده از نانوذرات طلا و نانوذرات نقره ساخته شدند و تحت تابش ۱/۵ AM G قرار گرفتند. در جدول ۱، متغیرهای فتوولتایی آن‌ها خلاصه شده است [۸].

برای بررسی میزان جذب سلول‌های خورشیدی ساخته شده کارایی کوانتومی خارجی (EQE, External Quantum Efficiency) آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۰).



شکل ۸ (a) نمودار جریان-ولتاژ سلول‌های طراحی شده با پلیمر دهنده P3HT. (b) میزان درصد تبدیل نور به جریان الکتریکی در سلول‌های مختلف با P3HT. (c) نمودار جریان-ولتاژ سلول‌های طراحی شده بر پایه پلیمر دهنده PBDTTT-C. (d) میزان درصد تبدیل نور به الکتریسیته در سلول‌های PBDTTT-C [۷]

۸ سلول خورشیدی ساخته شده از نانوذرات طلا و گرافن

گرافن و مشتقات آن، مانند اکسیدگرافن، مواد پایه‌ای برای بسیاری از کامپوزیت‌ها هستند. قرار گرفتن نانوذرات فلزی بر روی این صفحات دوبعدی، عملکرد بهتری را در فرایندپذیری نانومواد، افزایش خواص کاتالیزوری، زیست‌پزشکی و سامانه‌های نوری-الکتریکی ایجاد می‌کند. در ساختار اکسیدگرافن، حضور گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن، باعث می‌شود بتوان به راحتی گروه‌های عاملی آن را تغییر داد.

برای بررسی میزان تأثیر رزونانس پلاسماون سطحی، از نانوکامپوزیت اکسیدگرافن و نانوذرات طلا در دو لایه بافر و لایه فعال استفاده شد. مکان قرارگیری نانوذرات می‌تواند در میزان کارایی سلول خورشیدی بسیار موثر باشد. در شکل ۸ ساختار و لایه‌های سلول خورشیدی تهیه شده نشان داده شده است. نمودار جریان-ولتاژ این سلول‌ها بر اثر تابش ۱۰۰ mW/cm² و ۱/۵ AM (Air Mass) گزارش شده است [۷].

نتایج نشان می‌دهند استفاده هم‌زمان از نانوکامپوزیت گرافن و نانوذرات طلا در دو لایه بافر و فعال، باعث

جدول ۱ متغیرهای فتوولتایی سلول‌های خورشیدی با نانوذرات مختلف و تحت تابش AM ۱/۵ G و با قدرت 100 mW/cm^2

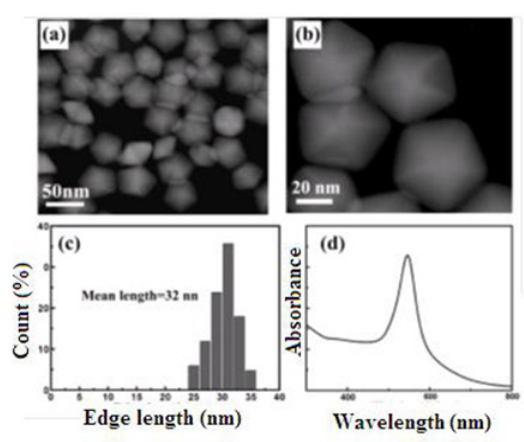
نانوذرات	جریان مدار کوتاه (mA/cm ²)	ولتاژ مدار باز (V)	فاکتور پرشدگی (%)	کارایی (%)
-	۱۵/۰	۰/۷۲	۶۷/۱	۷/۲۵
نقره	۱۶/۴	۰/۷۱	۶۸/۸	۸/۰۱
طلا	۱۶/۷	۰/۷۱	۶۸/۸	۸/۱۶
هر دو	۱۷/۷	۰/۷۱	۶۹/۰	۸/۶۷

روش‌ها به دام‌اندازی نور در داخل سلول خورشیدی پلیمری است. بر همین اساس روش‌های زیادی از جمله اضافه کردن ساختار انعکاس دهنده در سلول، لایه نشانی لایه فعال روی زیرلایه منشوری یا روی زیرلایه بلورهای فوتونی، طراحی سلول‌های V شکل و ... مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این روش‌ها بسیار پیچیده هستند که در نتیجه هزینه بالایی خواهند داشت و مناسب تولید تعداد بالا نخواهند بود. استفاده از نانوذرات طلا و نقره می‌تواند گزینه مناسبی برای افزایش جذب سلول باشد. برخورد بین نور و الکترون‌های آزاد روی سطح این نانوذرات، باعث ایجاد رزونانس الکترون‌های آزاد شده، در نتیجه میدان الکترومغناطیسی اطراف نانوذرات تقویت می‌شود. اوج رزونانس نانوذرات فلزی بسیار وابسته به ساختار، اندازه، مواد تشکیل دهنده و ویژگی‌های دی‌الکتریکی

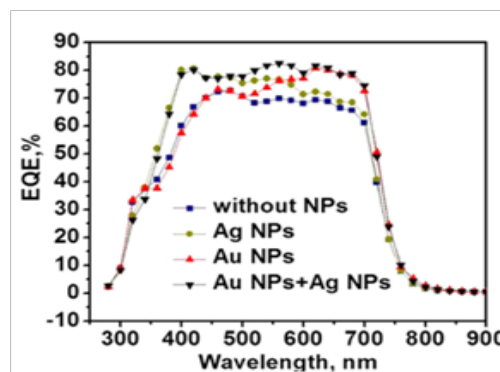
میزان جذب سلول‌های خورشیدی ساخته شده با هر دو نوع از نانوذرات، در بازه $350-750 \text{ nm}$ افزایش پیدا کرده است. زمانی که از نانوذرات نقره به تنهایی استفاده شد، میزان جذب در بازه $350-600 \text{ nm}$ افزایش یافت. در حالتی که تنها از نانوذرات طلا در ساختار سلول استفاده شد، میزان جذب در بازه $500-750 \text{ nm}$ افزایش یافت. بیشترین میزان EQE با استفاده از نانوذرات نقره، طلا و توآمان نقره و طلا به ترتیب ۸۱، ۸۰ و ۸۲٪ به دست آمد.

۱۰ استفاده از ساختار ده وجهی نانوذرات طلا در سلول خورشیدی پلیمری

به دلیل طول نفوذ کم بارهای الکتریکی در سلول‌های خورشیدی پلیمری و طول عمر کوتاه بارهای الکتریکی نیاز به روشی است که بتوان بدون افزایش ضخامت لایه فعال، میزان جذب نور را افزایش داد. یکی از



شکل ۱۱ ساختار ده وجهی نانوذرات طلا و اندازه آن‌ها [۹].

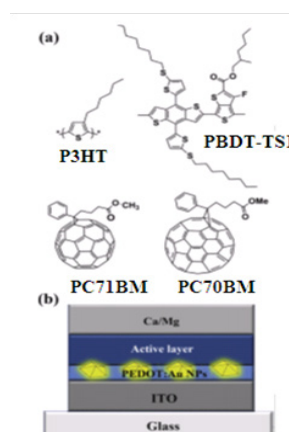


شکل ۱۰ EQE سلول‌های خورشیدی ساخته شده [۸].

نتایج تحقیقات نشان داد استفاده کردن از ساختار ده وجهی باعث افزایش جذب نور و نیز پخش بهتر آن می‌شود. افزایش جذب نور در نهایت موجب افزایش جریان الکتریکی تولیدی می‌شود. با بهینه کردن میزان غلظت نانوذرات، کارایی سلول‌های خورشیدی بر پایه P3HT:PCBM از ۳/۶% به ۴/۱۴% و سلول خورشیدی با لایه فعال PBDD-TS1:PC₇₀BM از ۸/۰۴% به ۱۰/۲۹% افزایش یافت (شکل ۱۱) [۹].

۱۱ نتیجه‌گیری

نانوذرات نقره و طلا به دلیل داشتن خاصیت رزونانس مغناطیس هسته می‌توانند باعث جذب بیشتر نور خورشید شده، در نتیجه کارایی سلول خورشیدی را افزایش دهند. استفاده از نانوذرات نقره و طلا با گرافن و پلیمرهای رسانا می‌تواند انتقال الکترونی را تسهیل کند. علاوه بر این، طراحی نانوذرات با ساختارهای چند وجهی می‌تواند باعث پخش نور شده، در نتیجه تولید اکسایتون را افزایش دهد. بر همین اساس، تحقیقات زیادی روی استفاده از نانوذرات با خاصیت پلاسمون سطحی به‌عنوان جایگزین افزایش ضخامت لایه فعال، در حال انجام است. نتایج نشان می‌دهند این نانوذرات می‌توانند برای افزایش جذب و کارایی سلول بسیار کارآمد باشند.



شکل ۱۱ (a) ساختار مولکولی مواد دهنده و گیرنده الکترون در سلول خورشیدی پلیمری (b) ساختار سلول خورشیدی پلیمری [۹].

مواد اطراف آن‌ها است. در میان این ویژگی‌ها ساختار نانوذرات برای رزونانس پلاسمون سطحی و نیز پخش نور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحقیقات نشان داده‌اند ویژگی‌های نوری نانوذرات بسیار وابسته به ساختار آن‌ها است و با افزایش گوشه‌های این ذرات به دلیل تجمع الکترون‌ها در این مناطق، رزونانس آن‌ها افزایش می‌یابد. با استفاده از ساختار ده وجهی تلاش شده است تا میزان پخش نور در سلول‌های خورشیدی پلیمری افزایش پیدا کند (شکل ۱۱).

مراجع

1. Chen D., Nakahara A., Dongguang Wei D., Nordlund D., Thomas P., Russell, P3HT/PCBM Bulk Heterojunction Organic Photovoltaics: Correlating Efficiency and Morphology, *Journal American Chemical Society*, 11, 561-567, **2011**.
2. Sabine S., Spadavecchia J., Boukherroub R., Surface Plasmon Resonance: Signal Amplification Using Colloidal Gold Nanoparticles for Enhanced Sensitivity, *Reviews in Analytical Chemistry*, 33, 153-164, **2014**.
3. Eng Liang L., Chin Yap C., Teridi M.A.M., Teh C.H., Mohd Yusoff A.R., Hj Jumali M.H., A Review of Recent Plasmonic Nanoparticles Incorporated P3HT: PCBM Organic Thin Film Solar Cells, *Organic Electronics*, 36, 12-28, **2016**.
4. Yang L., Zhou H., Price S.C., You W., Parallel-like Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells, *Journal American Chemical Society*, 134, 5432-5435, **2012**.
5. Atwater H.A., Polman A., Plasmonics for Improved Photovoltaic Devices, *National Library of Medicine*, 9, 205-213, **2010**.
6. Zhang Y., Pluchery O., Caillard L., Lamic-Humblot A., Casale S., Chabal Y.J., Salmeron M., Sensing the Charge State of Single Gold Nanoparticles via WorkFunction Measurements, *Journal American Chemical Society*, 15, 51-55, **2014**.
7. Chuang M.K., Chen F.C., Synergistic Plasmonic Effects of Metal Nanoparticle-Decorated PEGylated Graphene Oxides in Polymer Solar Cells, *Journal American Chemical Society*, 7, 7397-7405, **2015**.
8. Lu L., Luo Z., Tao Xu, Yu L., Cooperative Plasmonic Effect of Ag and Au Nanoparticles on Enhancing Performance of Polymer Solar Cells, *Journal American Chemical Society*, 13, 59-64, **2012**.
9. Li Q., Wang F., Bai Y., Xu L., Decahedral-Shaped Au Nanoparticles as Plasmonic Centers for High Performance Polymer Solar Cells, *Organic Electronics*, 43, 33-40, **2017**.