

AREBS 2015

کتابچه مقالات

همایش ملی پژوهش های کاربردی در علوم مهندسی و پایه

۲۰ اسفندماه ۱۳۹۳

تهران - ایران

Conference home page: <http://www.iranhamayesh.ir>



## کاربرد نانوذرات پلاسمونیک عامل دار شده توسط پوسته در سلول های خورشیدی لایه نازک

ماندانا جلالی

دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، اپتیک و لیزر، دانشگاه شیراز  
و گروه مهندسی الکترونیک تئوری و عمومی، دانشگاه دويسبورگ-اسن  
Mandana.jalali@stud.uni-due.de

دانیل ارنی

استاد، گروه مهندسی الکترونیک تئوری و عمومی، دانشگاه دويسبورگ-اسن  
daniel.erni@uni-due.de

حمید نادگران

استاد، گروه فیزیک، اپتیک و لیزر، دانشگاه شیراز  
nadgaran@shirazu.ac.ir

### چکیده

حضور نانوذرات پلاسمونیک درون لایه فعال سلول های خورشیدی لایه نازک، جذب اپتیکی و در نتیجه بهره سلول را به میزان قابل توجهی بهبود می بخشد. اگرچه از آنجائیکه نانوذرات پلاسمونیک فعالیت شیمیایی بالایی دارند احتمال واکنش بین نانوذرات و لایه فعال بالا می باشد. همچنین حضور نانوذرات کانال های غیر تابشی دیگری در کنار تولید الکترون-حفره را ممکن می سازد، علاوه بر اینکه احتمال جذب الکترون های تولید شده به نانوذره وجود دارد. در نتیجه افزایش مشاهده شده در جریان مدار باز سلول به میزان افزایش جذب اپتیکی نخواهد بود. در این مقاله افزودن پوسته ای از جنس دی الکتریک و یا نیم رسانا به منظور خنثی سازی (Passivation) نانوذرات پیشنهاد می شود. افزودن پوسته نانوذره را از لحاظ شیمیایی خنثی ساخته بدون آنکه کاهش چشمگیری در جذب اپتیکی درون سلول مشاهده شود، در کنار اینکه الکترون های داغ تولید شده درون هسته پلاسمونیک می توانند مستقیماً به جریان نوری نیم رسانا کمک کنند. ساختارهای پوسته-هسته ی نقره-سیلیکا و نقره-دی اکسید تیتانیوم شبیه سازی شده و با بررسی و مقایسه طیف جذبی سیلیکون در حضور ساختار پوسته-هسته و نانوذره تنها پارامترهای موثر پوسته بهینه می شوند. دیده می شود که استفاده از پوسته دی الکتریک سیلیکا با ضخامت ۱۰ نانومتر بدون کاهش چشمگیر جذب اپتیکی خواص فتوولتائیک سلول را بهبود می بخشد و در نتیجه کارایی سلول را افزایش می دهد.

واژه های کلیدی: سلول خورشیدی، ساختار هسته-پوسته، خنثی سازی (Passivation)، واپاشی غیر تابشی، ترازهای فرمی.

## ۱- مقدمه

امروزه جهان با بحران انرژی روبرو است و در نتیجه محققان بسیاری به دنبال یافتن منبع انرژی جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی می‌باشند (Green 1998). سلول‌های خورشیدی با توجه به استفاده از نور خورشید برای تولید انرژی و عدم تولید محصولات جانبی مضر، می‌توانند گزینه مناسبی برای حل معضل انرژی و رهایی از معضلات زیست محیطی ناشی از استفاده سوخت‌های فسیلی باشند (Nakayama 2010). از این رو گروه‌های تحقیقاتی بسیاری بر روی طراحی و ساخت سلول‌های خورشیدی کارا و ارزان متمرکز شده‌اند (Kim 2013, Ball 2013, Shin 2013).

یکی از راهکارهای رسیدن به چنین سلولی کاهش ضخامت لایه فعال سلول خورشیدی است (Hallermann 2008). این کاهش ضخامت، هزینه ساخت سلول را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد، منجر به سبک‌تر شدن سلول می‌شود و قابلیت انعطاف پذیری مکانیکی به سلول اضافه می‌کند (Jalali 2014). از سوی دیگر یکی از معضلات سلول‌های خورشیدی سیلیکونی طول پخش ضعیف این ماده است. با کاهش ضخامت سلول طول پخش کاهش یافته و در نتیجه احتمال بازترکیب درون لایه فعال کم می‌شود (Prak 2009).

اگرچه باید در نظر داشت با کاهش ضخامت لایه فعال در سلول، طول مسیر اپتیکی فوتون کاهش یافته و در نتیجه جذب اپتیکی سلول افت قابل توجهی خواهد داشت. از این رو استفاده از تکنیک‌های مدیریت رفتار فوتون درون لایه فعال ضروری به نظر می‌رسد (Gombert 2008). یکی از تکنیک‌های موثر مدیریت رفتار فوتون با افزایش طول مسیر نوری درون لایه فعال، استفاده از نانوذرات پلاسمونیک مانند نقره، طلا و آلومینیوم است (Tsai 2010, Atwater 2010). این نانوذرات سطح مقطع پراکندگی بالا و میدان نزدیک قوی دارند و در نتیجه موجب گیراندازی فوتون درون لایه فعال می‌شوند (Tsai 2010).

حضور نانوذرات پلاسمونیک با وجود افزایش جذب اپتیکی لایه فعال، معایبی نیز دارد. از آنجائیکه این نانوذرات فعالیت شیمیایی بالایی دارند، با لایه فعال واکنش نشان می‌دهند. همچنین حضور این نانوذرات کانال‌های واپاشی غیر تابشی جدیدی مانند انتقال انرژی الکترون به سطح فلز در کنار تولید الکترون-حفره را ممکن می‌سازند (Jalali 2011). میدان نزدیک قوی نانوذرات و پلاسمون‌های تشدید برانگیخته در کنار انتقال انرژی الکترون به سطح فلز، دمای نانوذره و همسایگی آن را بالا می‌برد. این اثر که در گرمادرمانی و حسگرها کاربرد فراوانی دارد (Haris 2015)، کارایی سلول خورشیدی را کاهش می‌دهد. با افزودن پوسته‌ای از جنس دی‌اکتیک و یا نیم رسانا می‌توان معایب حضور نانوذره پلاسمونیک درون لایه فعال را برطرف کرد بدون آنکه تاثیر نانوذره بر روی جذب اپتیکی لایه فعال را کاهش داد. پوسته احتمال بازترکیب الکترون و حفره و همچنین جذب الکترون‌های تولید شده توسط نانوذره پلاسمونیک را کاهش می‌دهد (Liu 2013). در کنار این اثرات حضور پوسته موجب خواهد شد الکترون‌های داغ تولید شده درون هسته تشدید پلاسمونی مستقیماً در جریان نوری مشارکت داشته باشند (Knight 2011). هسته فلزی به تعادل باری با نیم رسانای

اطراف می‌رسد و در نتیجه ترازهای فرمی را تغییر داده و پتانسیل سلول را بهبود می‌بخشد (Choi 2012). البته از آنجائیکه ضخامت پوسته خواص اپتیکی آن را به میزان قابل توجهی تغییر می‌دهد، باید جنس و ضخامت پوسته به دقت تعیین شود تا حضور پوسته بدون کاهش جذب اپتیکی خواص فوتوولتائیک سلول را بهبود بخشد.

در این مقاله تاثیر افزودن پوسته به نانوذرات پلاسمونیک و قرار دادن آنها درون لایه فعال سلول خورشیدی بررسی شده است. تلاش شده با توجه به اثر پوسته بر روی طیف جذبی لایه فعال، پارامترهای پوسته مانند جنس و ضخامت به دقت تعیین شوند. پوسته‌های سیلیکا و دی اکسید تیتانیم با ضخامت‌های ۵ و ۱۰ نانومتر بر روی هسته ۵۰ نانومتری نقره قرار داده شده‌اند. نانو ساختار معرفی شده، درون لایه فعال سلول خورشیدی سیلیکون بلوری با دروه ۲۰۰ نانومتر قرار داده شده است. لایه سیلیکون بلوری ۲۰۰ نانومتر ضخامت دارد و در بالای آن یک لایه ۵۵ نانومتری از  $\text{Si}_3\text{N}_4$  بعنوان پوشش ضد بازتاب وجود دارد.

ساختار با استفاده از روش تفاضل المان‌های متناهی بر اساس سکوی شبیه سازی COMSOL Multiphysics<sup>TM</sup> شبیه سازی شده و طیف جذبی سیلیکون در حضور ساختار پوسته-هسته و در غیاب پوسته بررسی شده است. چیدمان مقاله بصورت زیر می‌باشد. در بخش دوم مقاله علل افزودن نانوذرات پلاسمونیک به لایه فعال مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم تاثیر حضور این ذرات بر واپاشی اتم-های برانگیخته بررسی شده است. در بخش چهارم با اضافه کردن پوسته‌های دی اکسید تیتانیم و سیلیکا طیف جذبی سیلیکون بلوری بررسی شده و پارامترهای پوسته با توجه به این بررسی انتخاب شده‌اند. در بخش پنجم نتایج حاصل از این بررسی به اختصار توضیح داده شده است.

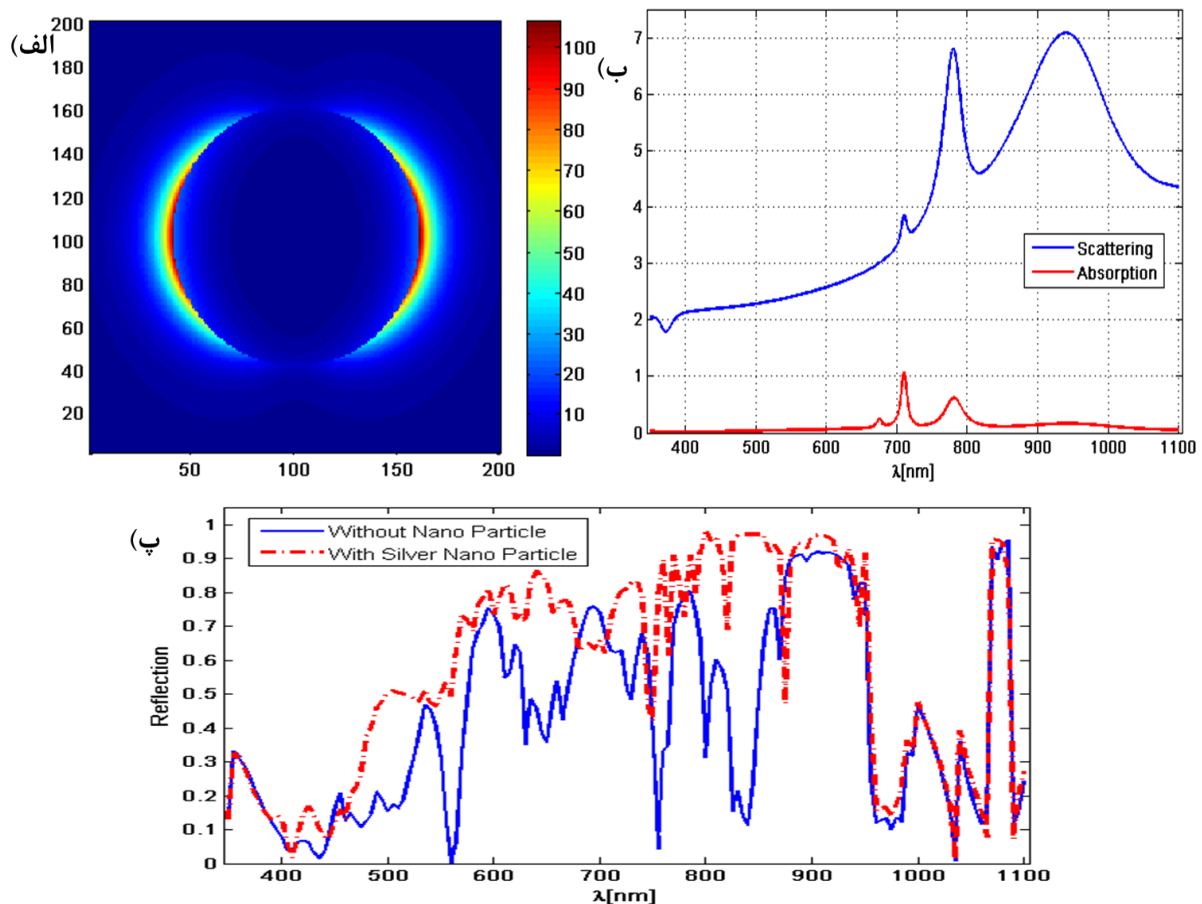
## ۲- افزودن نانو ذره به لایه فعال سلول خورشیدی

حضور نانوذرات پلاسمونیک درون لایه فعال سلول خورشیدی به سه طریق جذب اپتیکی درون لایه فعال را افزایش می‌دهد. نور ورودی به لایه فعال توسط نانوذره پراکنده می‌شود. این پراکندگی طول مسیر نوری فوتون را افزایش داده و در نتیجه احتمال گیراندازی فوتون بالا می‌رود. عامل تاثیر گذار دیگر، برانگیختگی پلاسمون‌های تشدیدی جایگزیده در نانوذره است که موجب ایجاد میدان نزدیک قوی در اطراف نانوذره می‌شود. از آنجائیکه جذب با توان دوم میدان الکتریکی متناسب است، افزایش میدان موجب افزایش جذب خواهد شد. عامل دیگر کاهش انعکاس از سطح سلول بعلت وجود نانوذره است. حضور نانوذره موجب می‌شود نور فرودی جفت شدگی بهتری با لایه فعال داشته باشد و در نتیجه انعکاس از سطح کاهش یابد.

در شکل ۱ هر سه این فرآیندها رسم شده‌اند. شکل الف) پراکندگی و جذب از سطح نانوذره نقره ۶۰ نانومتری را درون سیلیکون بلوری نشان می‌دهد. دیده می‌شود که سطح مقطع پراکندگی نانوذره بزرگ و جذب آن ناچیز است. از آنجائیکه این خواص همان مورد نظر برای استفاده در سلول خورشیدی هستند، استفاده از نانوذرات نقره با شعاع ۶۰ نانومتر بهترین گزینه برای استفاده در سلول خورشیدی به نظر می‌رسد.

در شکل (ب) میدان الکتریکی اطراف نانوذره نقره در طول موج ۷۸۰ نانومتر رسم شده است. افزایش میدان الکتریکی در اطراف نانوذره تا ۱۰۰ برابر به خوبی مشهود است. این افزایش جذب را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد، اگرچه موجب گرم شدن نانوذره و محیط اطراف آن می‌شود.

در شکل (پ) انعکاس از سطح سلول برای حالت‌های در حضور نانوذره و بدون نانوذره رسم شده است. مشاهده می‌شود که حضور نانوذره انعکاس را به میزان قابل توجهی کاهش داده است. تمامی این عوامل منجر به افزایش ۱۴/۴٪ در جذب اپتیکی و ۱۸/۲٪ در نرخ تولید حامل‌های بار در لایه فعال نسبت به حالتی که نانوذره درون سلول قرار ندارد، می‌شوند.



شکل ۱: الف) میدان الکتریکی اطراف نانوذره نقره ۶۰ نانومتری قرار گرفته درون سیلیکون بلوری در طول موج ۷۸۰ نانومتر. ب) پراکندگی و جذب از نانوذره نقره ۶۰ نانومتری قرار گرفته درون سیلیکون بلوری بر حسب طول موج. پ) انعکاس از سطح سلول خورشیدی در حضور و عدم حضور نانوذره نقره.

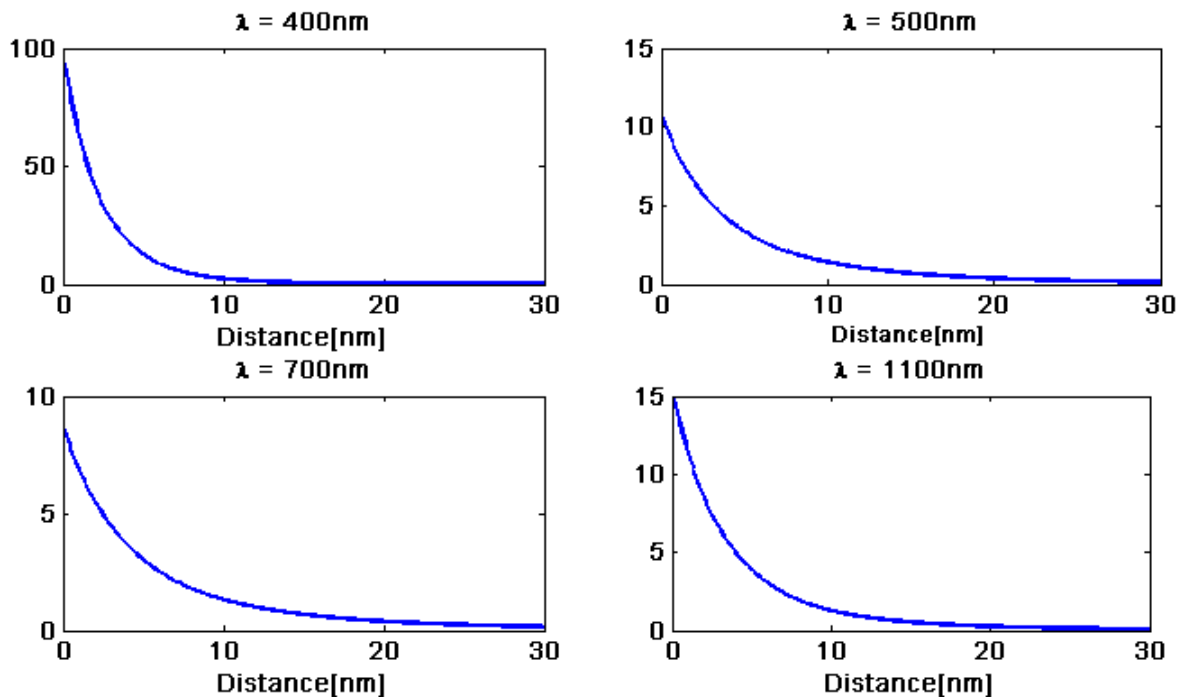
### ۳- واپاشی غیر تابشی در حضور نانوذرات پلاسمونیک

فرآیند فوتولتائیک در سلول‌های خورشیدی به این صورت است که اتم‌های ماده فعال با جذب فوتون به حالت برانگیخته درآمده و سپس با گسیل الکترون-حفره خاموش می‌شوند. حضور نانوذرات پلاسمونیک تاثیر بسزایی بر روی واپاشی اتم‌های برانگیخته دارد (Mohammadi 2009). حضور این نانوذرات مدهای تابشی

محیط را بگونه‌ای تغییر می‌دهد که احتمال گسیل تابشی و غیر تابشی افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. در نتیجه احتمال گسیل غیر تابشی از کانال‌های دیگر مانند انتقال انرژی الکترون به سطح فلز، افزایش یافته و تولید الکترون-حفره‌ها کم می‌شود.

در شکل ۱ نرخ واپاشی غیر تابشی برای اتم در همسایگی نانوذره ۶۰ نانومتری نقره در طول موج‌های مختلف بر حسب فاصله از سطح نانوذره رسم شده است. نرخ واپاشی تابشی در تمام طول موج‌های موثر در سلول‌های خورشیدی حداقل ۱۰ برابر افزایش یافته است. در نتیجه چنین افزایشی انرژی برانگیختگی اتم در کانال‌های دیگر غیر تابشی مانند انتقال انرژی به سطح نانوذره مصرف می‌شود و نرخ تولید الکترون-حفره کاهش می‌یابد.

نانو ذرات دی الکتریک و یا نیم رسانا به دلیل نداشتن جذب و یا کوچک بودن جذب نمی‌توانند چنین اثری بر روی نرخ گسیل غیر تابشی از اتم‌ها داشته باشند. در نتیجه با افزودن پوسته‌ای از جنس دی الکتریک و یا نیم رسانا می‌توان این اثر را کاهش داد. در این صورت درصد بیشتری از اتم‌های برانگیخته الکترون-حفره تولید کرده و در جریان مدار باز شرکت می‌کنند.



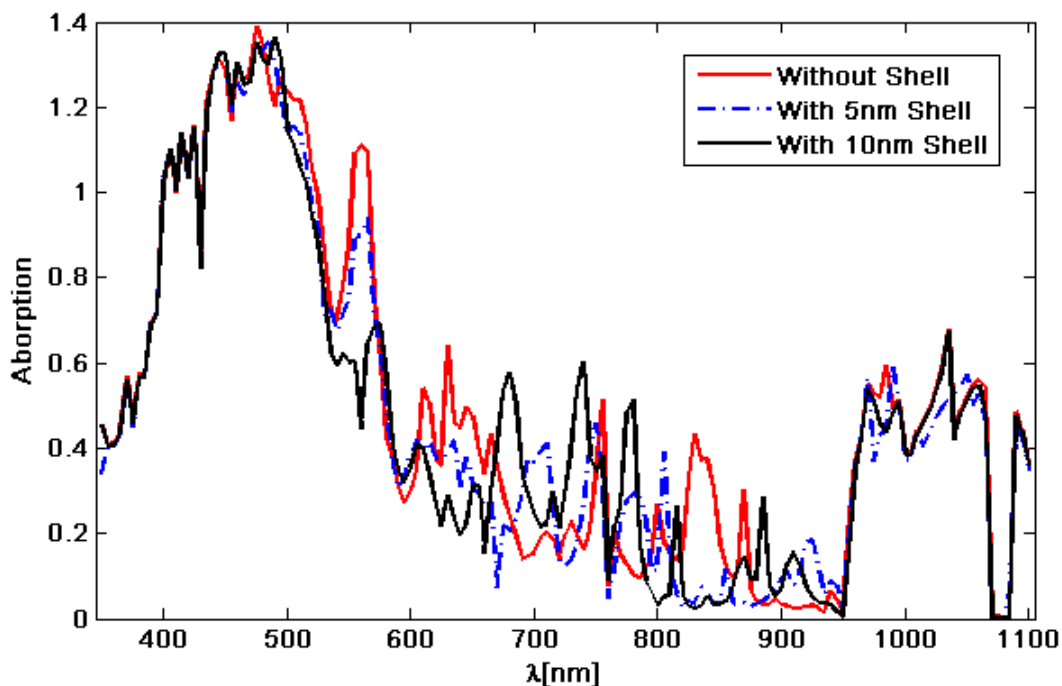
شکل ۲: نرخ واپاشی غیر تابشی اتم در همسایگی نانوذره ۶۰ نانومتری نقره در طول موج‌های مختلف.

#### ۴- اثر پوسته بر طیف جذبی سیلیکون

در بخش ۲ نشان داده شد که قرار دادن نانوذرات پلاسمونیک درون لایه فعال کارایی سلول را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. اگرچه افزودن این نانوذرات معایبی که در قسمت مقدمه توضیح داده شده‌اند را نیز

وجود می‌آورد. عامل دار کردن نانوذرات با استفاده از پوسته‌های نیم رسانا و دی الکتریک می‌تواند این معایب را تا حدودی زیادی بهبود بخشد، بدون آنکه اثر تخریبی چندانی بر روی افزایش جذب اپتیکی ناشی از حضور نانوذره پلاسمونیک بگذارد. برای یافتن پوسته‌ای بهینه که در کنار خنثی ساختن نانوذره، جذب اپتیکی لایه فعال را نیز کاهش ندهد، پوسته‌هایی از جنس سیلیکا و دی اکسید تیتانیم با ضخامت‌های ۵ و ۱۰ نانومتر بر روی هسته ۵۰ نانومتری نقره قرار داده‌ایم.

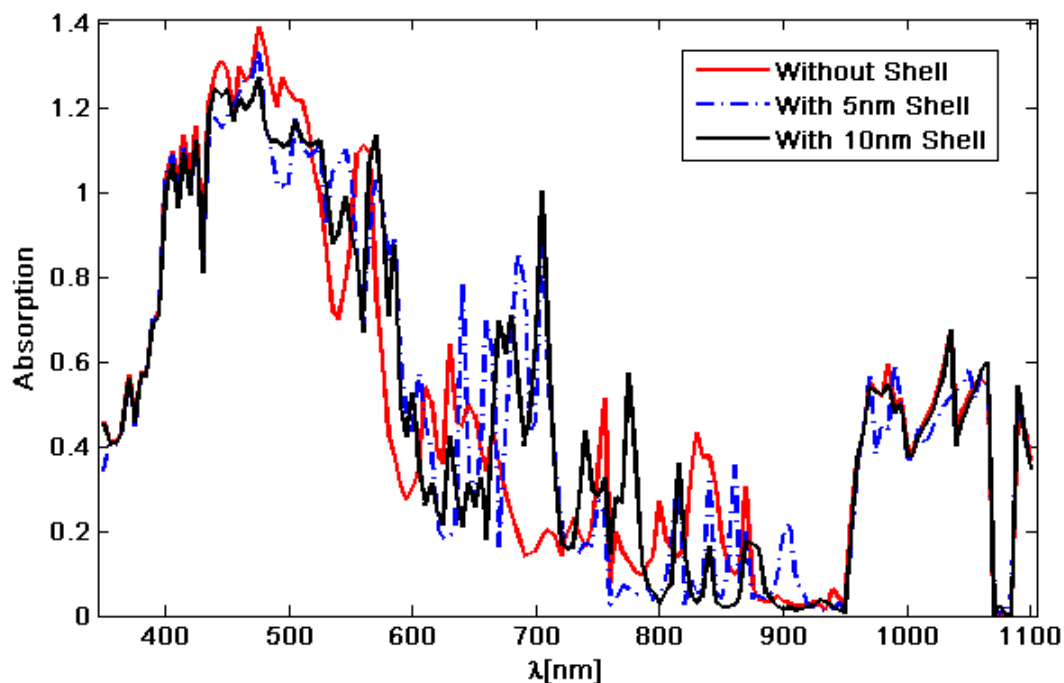
در شکل ۳ طیف جذبی بهنجار شده سیلیکون در حضور نانوذره نقره، با پوسته دی اکسید تیتانیم و با شعاع‌های ۵ و ۱۰ نانومتر رسم شده است. منظور از بهنجار در اینجا بهنجار شده متناسب با توان تابشی خورشید بر حسب AM1.5 می‌باشد. مشاهده می‌شود که حضور پوسته در طول موج‌های کوتاه تاثیری بر روی طیف جذبی نداشته است، اگرچه در محدوده ۵۰۰ تا ۶۵۰ نانومتر موجب کاهش جذب شده است. علت این امر آنست که در این ناحیه پلاسمون‌های سطحی جایگزیده برانگیخته شده در نانوذره موجب افزایش جذب اپتیکی می‌شوند و حضور پوسته موجب کاهش تشدید پلاسمونی شده است. در دیگر طول موج‌ها جذب اپتیکی تغییر چندانی نداشته و تنها محل پیک‌ها جا به جا شده است. حضور پوسته با ضخامت ۱۰ نانومتر تنها ۴/۷٪ جذب اپتیکی کل را کاهش داده است.



شکل ۳: طیف جذبی سیلیکون در حضور نانوذره نقره، نانوذره نقره با پوسته دی اکسید تیتانیم ۵ نانومتری و نانوذره نقره با پوسته دی اکسید تیتانیم ۱۰ نانومتری بر حسب طول موج.

در شکل ۴ طیف جذبی بهنجار شده سیلیکون در حضور نانوذره نقره، با پوسته سیلیکا و با شعاع‌های ۵ و ۱۰ نانومتر رسم شده است. مشاهده می‌شود که حضور پوسته در طول موج‌های کوتاه موجب تضعیف جذب و

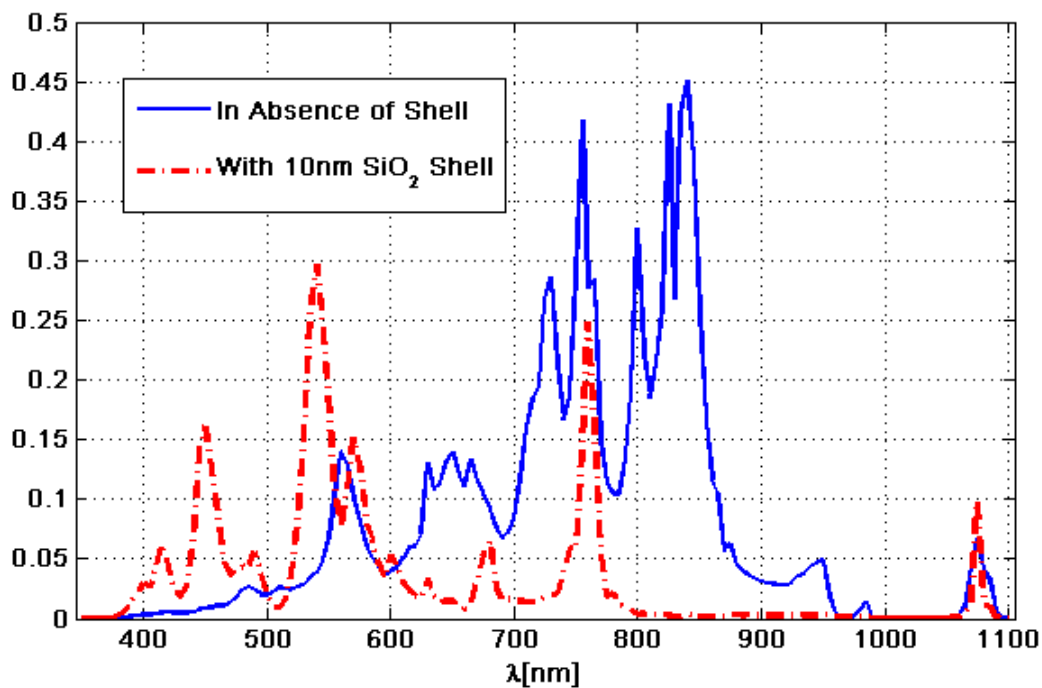
جابه جایی پیک‌ها به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر می‌شود. در محدوده بین ۶۵۰ تا ۹۷۰ نانومتر حضور پوسته موجب می‌شود که جذب درون نانوذره کم شود. از این رو با حضور پوسته در این محدوده جذب اپتیکی بهبود پیدا می‌کند. به منظور بررسی علل این افزایش در شکل ۵ جذب درون نانوذره نقره در حضور و عدم حضور پوسته سیلیکا با ضخامت ۱۰ نانومتر رسم شده است. همان طور که دیده می‌شود حضور پوسته نانوذره را خنثی ساخته و جذب آن را کاهش می‌دهد و از این رو جذب اپتیکی بهبود پیدا می‌کند. در نتیجه قرار دادن پوسته سیلیکا با ضخامت ۱۰ نانومتر نه تنها خواص فوتولتائیکی سلول را بهبود می‌بخشد و نانوذره را خنثی می‌سازد، بلکه اثر تخریبی بر روی جذب اپتیکی ندارد. حضور پوسته در کنار کاهش جذب درون نانوذره، نانوذره را از لحاظ شیمیایی خنثی می‌سازد، رسانایی الکتریکی را بهبود می‌بخشد و احتمال بازترکیب الکترون و حفره را کاهش می‌دهد. در جدول ۱ میزان جذب و نرخ تولید حامل‌های بار برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است. دیده می‌شود که نانوذره نقره با شعاع ۵۰ نانومتر و پوسته دی‌الکتریک سیلیکا ۱۰ نانومتری موجب افزایش ۲۰٪ در نرخ تولید حامل‌های بار می‌شود.



شکل ۴: طیف جذبی سیلیکون در حضور نانوذره نقره، نانوذره نقره با پوسته سیلیکا ۵ نانومتری و نانوذره نقره با پوسته سیلیکا ۱۰ نانومتری بر حسب طول موج.

جدول ۱: میزان جذب اپتیکی کل و درصد افزایش نرخ تولید حامل‌های بار در ساختارهای مختلف

	نانوذره با پوسته ۱۰ نانومتری دی اکسید تیتانیوم	نانوذره با پوسته ۵ نانومتری دی اکسید تیتانیوم	نانوذره با پوسته ۱۰ نانومتری سیلیکا	نانوذره با پوسته ۵ نانومتری سیلیکا	نانوذره ۶۰ نانومتری نقره
جذب کل درون سیلیکون	۶۷/۰۷	۶۶/۷۱	۷۰/۳۴	۶۹/۴۰	۷۰/۰۳
درصد افزایش نرخ تولید حامل‌ها	٪۱۲/۷	٪۱۲/۵	٪۲۰	٪۱۹/۷	٪۱۸/۲



شکل ۵: جذب درون نانوذره نقره در حضور و عدم حضور پوسته سیلیکا با ضخامت ۱۰ نانومتر بر حسب طول موج.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شده می‌توان با افزودن یک پوسته دی الکتریک از جنس سیلیکا نانوذره پلاسمونیک قرار داده شده درون لایه فعال را خنثی ساخت. خنثی ساختن نانوذره پلاسمونیک معایب حضور نانوذره درون لایه فعال مانند واکنش پذیری شیمیایی بالا، جذب الکترون‌های تولید شده به نانوذره و افزایش احتمال کانال‌های دیگر تابش را تا حدودی زیادی از بین می‌برد. اگرچه باید توجه داشت که افزودن پوسته پراکندگی از سطح و میدان نزدیک نانوذره را کاهش داده و در نتیجه جذب اپتیکی کاهش پیدا خواهد کرد. در اینجا نشان دادیم با طراحی دقیق پوسته می‌توان با ثابت نگه داشتن میزان جذب اپتیکی خواص دیگر سلول را بهبود بخشید. پوسته‌هایی از جنس سیلیکا و دی اکسید تیتانیوم بررسی شده‌اند. نشان داده شده که پوسته



۱۰ نانومتری سیلیکا با توجه به کاهش دادن قابل توجه جذب درون نانوذره نقره بهترین گزینه برای استفاده در سلول‌های خورشیدی لایه نازک سیلیکونی می‌باشد.

## منابع

- Atwater, H. A., & Polman, A. (2010). Plasmonic for improved photovoltaic devices. *Nature materials*, 9(3) 205-213.
- Ball, J. M., Lee, M. M., Hey, A., & Snaith, H. J. (2013). Low-temperature processed meso-structured thin-film perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 6(6), 1739-1743.
- Choi, H., Chen, W. T., & Kamat, P. V. (2012). Know thy nano neighbor. Plasmonic versus electron charging effects of metal nanoparticles in dye-sensitized solar cells. *ACS nano*, 6(5), 4418-4427.
- Green, M. A. (1998) *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*.
- Gombert, A., & Luque, A. (2008). Photonics in photovoltaic systems. *Phys. Stat. sol. (a)*, 205(12) 2757-2765.
- Hallermann, F., Rochstuhl, C., Fahr, S., Seifert, G., Wackerow, S., Graener, H., Plessen, G. v., & Lederer, F., (2008). On the use of localized polaritons in solar cells. *phys. Stat. sol. (a)*, 205(208) 2844-2861.
- Harris, T. J., & Chen Kim, A. A. (2015). U.S. Patent No. 20,150,005,691. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Jalali, Mandana; Mohammadi, Ahmad; Zebarjad, Mohammad, "Increasing effective quantum efficiency using plasmonic nanoparticles". The 10th conference on condense matter (2011).
- Jalali, Mandana; Nadgaran, Hamid, "Photon Management of Silicon Photovoltaics through Scattering and Near Field Effect of Nanoparticles". 5th International Conference on Nanostructures (2014).
- Kim, H. S., Lee, J. W., Yantara, N., Boix, P. P., Kulkarni, S. A., Mhaisalkar, S., ... & Park, N. G. (2013). High efficiency solid-state sensitized solar cell-based on submicrometer rutile TiO<sub>2</sub> nanorod and CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite sensitizer. *Nano letters*, 13(6), 2412-2417.
- Knight, M. W., Sobhani, H., Nordlander, P., & Halas, N. J. (2011). Photodetection with active optical antennas. *Science*, 332(6030), 702-704.
- Liu, W. L., Lin, F. C., Yang, Y. C., Huang, C. H., Gwo, S., Huang, M. H., & Huang, J. S. (2013). The influence of shell thickness of Au@ TiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticles on the plasmonic enhancement effect in dye-sensitized solar cells. *Nanoscale*, 5(17), 7953-7962.
- Mohammadi, A., Kaminski, F., Sandoghdar, V., & Agio, M. (2009). Spheroidal nanoparticles as nanoantennas for fluorescence enhancement. *International Journal of Nanotechnology*, 6(10), 902-914.
- Nakayama, K., Tanabe, K., & Atwater, H. A., (2010) Plasmonic nanoparticle enhanced light absorption in GaAs solar cell. *Appl. Phys. Lett.*, 93(12) 121904.

Park, S. H., Roy, A., Beaupre, S., Cho, S., Coates, N., Moon, J. S., ... & Heeger, A. J. (2009). Bulk heterojunction solar cells with internal quantum efficiency approaching 100&percent. *Nature photonics*, 3(5), 297-302.

Shin, B., Gunawan, O., Zhu, Y., Bojarczuk, N. A., Chey, S. J., & Guha, S. (2013). Thin film solar cell with 8.4% power conversion efficiency using an earth-abundant  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  absorber. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 72-76.

Tsai, F. J., Wang, J. Y., Huang, J. J., Kiang, Y. W., & Yang, C. C., (2010). Absorption enhancement of an amorphous Si solar cell through surface plasmon-induced scattering with metal nanoparticles. *Opt. Exp*, 18(102) A207-A220.