

تأثیر نانوساختارها برای مدیریت نور در ادوات الکترواپتیکی

سید جواد حسینی^۱، بابک عفاقی^{۱*}، بیژن غفاری^{۲*}

۱- آزمایشگاه فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- آزمایشگاه نانو فوتونیک، پژوهشکده علوم کاربردی، دانشگاه خوارزمی، تهران

چکیده

یکی از دغدغه‌های اصلی حوزه‌ی ادوات فوتونلتاییکی در سال‌های اخیر جذب فوتون بیشتر و افزایش راندمان است. اما با توجه به محدودیت‌های پیش‌رو برای رسیدن به این هدف باید از بعضی حدود عبور کرد و طراحی‌های جدیدی را ارائه داد. هدف از طراحی‌های جدید رسیدن به قطعاتی است که در آن‌ها فوتون در لایه‌ی جاذب قطعه حبس شود تا بتوانیم نحوه‌ی رفتار فوتون‌های حبس شده را به کنترل خود درآوریم و از این طریق به سیگنالی مطلوب برسیم. اما برای رفع محدودیت‌های پیش‌رو باید فیزیک حاکم بر رفتار نور در مواجهه با نانو ساختارهای مواد متفاوت را بدانیم. پیش نیاز دستیابی به این توانایی شناخت دقیق رفتار نور در حضور لایه‌های مختلف و یا المان‌هایی است که در طول فرآیند لایه‌نشانی از آنها استفاده می‌کنیم. از طرفی با توجه به ابعاد طول موجی نور که در محدوده چند صد نانومتر قرار دارد، ناگزیر به طراحی ساختارهایی با ابعاد نانو برای گیراندازی و مدیریت نور هستیم، چرا که وقتی از نانوساختارها برای هدایت نور استفاده می‌کنیم در برهمکنش نور با آنها بحث تشدید مطرح می‌شود. اما می‌توان از راه‌های دیگری نیز به گیراندازی نور پرداخت، مثلاً ایجاد شیار بر روی سطح قطعه. به مجموع این فعالیت‌ها برای کنترل رفتار نور، مدیریت نور گفته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آشکارساز، نانوساختار، تشدید، مدیریت نور، پلاسمونیک.

ایمیل نویسنده مسئول: ghafary@iust.ac.ir; babak.efafi@gmail.com

۱- مقدمه

هدف الکترونیک در چند دهه‌ی اخیر ساخت ادواتی با اندازه‌ی کوچکتر و سرعت بالاتر بود، اما در رسیدن به این اهداف محدودیت‌هایی وجود داشت. مهم‌ترین محدودیت، وجود میدان مغناطیسی ناشی از هر المان در طراحی‌های الکترونیکی است، به نحوی که اگر اندازه‌ی المان‌ها از حدی کمتر شود میدان مغناطیسی ناشی از هر المان بر میدان مغناطیسی ناشی از المان دیگر اثر می‌گذارد و در نهایت منجر به یک اختلال کلی در مدار مجتمع IC می‌شود.

برای رسیدن به هدف اصلی و از طرفی مرتفع شدن این محدودیت‌ها می‌توان از ترکیب مفاهیم اپتیکی و الکترونیکی استفاده کرد و به همین دلیل به بررسی ادوات الکترواپتیکی می‌پردازیم. این ادوات در واقع تشکیل یک سیستم مخابراتی بدون سیم را می‌دهند. همانطور که می‌دانیم در هر سیستم مخابراتی یکی از اجزای مهم، آشکارساز است، به همین دلیل به بررسی آشکارسازهای نوری در ادوات الکترواپتیکی می‌پردازیم.

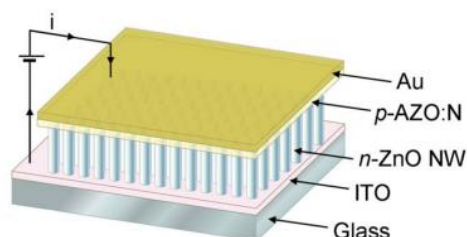
در حالت کلی به هر افزاره‌ای که بتواند شار فوتونی و یا توان اپتیکی نور تابیده شده به آن را با حفظ انرژی فوتون‌های جذب شده گزارش کند آشکارساز نوری می‌گوییم. برای آن‌که به یک آشکارساز نوری مناسب برسیم، باید ویژگی‌های آن را بررسی کنیم.

ویژگی‌های مهم برای یک آشکارساز ایده آل عبارتند از: بهره‌ی کوانتومی، پاسخ‌دهی و زمان پاسخ‌دهی.

در هر آشکارساز نوری نرخ تبدیل فوتون به زوج حامل الکترون - حفره بسیار اهمیت دارد. بهره‌ی کوانتومی عبارت است از نسبت تعداد فوتون‌هایی که به آشکارساز رسیده و تولید زوج الکترون-حفره می‌کنند، به تمام فوتون‌هایی که به آشکارساز می‌رسند. از همین تعریف این‌گونه استنباط می‌شود که الزاماً تمام فوتون‌های فرودی به آشکارساز قادر به تولید زوج حامل الکترون - حفره نیستند. اگر به دنبال علت این پدیده باشیم، می‌توان ریشه‌ی آن را در سه دسته‌ی کلی طبقه بندی کرد.

اولین دلیل این است که پدیده‌ی تابش فوتونی یک پدیده‌ی آماری است و از دست دادن بخشی از اطلاعات در هر پدیده‌ی آماری امری اجتناب ناپذیر است. دلیل دیگر این است که تمام فوتون‌ها به آشکارساز نمی‌رسند و بخشی از آن‌ها از سطح قطعه بازتاب می‌شوند. اما اگر فوتونی از سطح آشکارساز بازتاب نشود، آیا فوتون مطلوبی قلمداد شده و تولید زوج الکترون - حفره می‌کند؟ اگر این‌گونه بود، میزان جذب نور در قطعات الکترواپتیکی از مرتبه بسیار بالایی بود و دیگر مشکلی وجود نداشت؛ اما موضوع این است که این‌گونه نیست و صرفاً اگر فوتونی از سطح قطعه بازتاب نشود به معنای جذب آن نیست، بلکه به عمق نفوذ فوتون در قطعه بستگی دارد. اگر فوتون در قسمت کم‌عمقی نفوذ کند عملاً

کمتر می‌شود و می‌توان انتظار داشت که جذب بیشتری توسط لایه‌ی جاذب انجام شود. از طرفی به دلیل پراکندگی بالای نور توسط نانو سیم‌ها، طول راه اپتیکی در قطعات ساخته شده از این مواد به شدت افزایش می‌یابد و در نتیجه طول مدت زمان حضور فوتون‌ها در لایه‌ی جاذب بیشتر بوده که باعث افزایش احتمال جذب نور در لایه‌ی جاذب می‌شود [۲].



شکل ۱. یک ساختار هموجانکشن [۳]

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، از نانوساختارهای اکسیدی شفاف رسانای مشابهی به عنوان پیوندهای نوع p و n برای ساخت ناحیه‌ی فعال یک آشکارساز نوری استفاده می‌شود. اما در نقطه‌ی مقابل چنین ساختاری ساختارهای هتروجانکشن را داریم که در آنها مواد نوع p و n با یکدیگر متفاوت هستند. ناحیه‌ی بین دو ماده در ساختارهای هتروجانکشن یک میدان الکتریکی داخلی تشکیل می‌دهد که این میدان با افزایش طول عمر حامل‌های بدست آمده از فوتون‌ها باعث کاهش بازترکیب و در نتیجه افزایش پاسخ‌دهی نوری می‌شوند. پس ساختارهای هتروجانکشن در افزایش میزان جذب نور به مراتب بهتر از ساختارهای هموجانکشن عمل می‌کنند [۴].

اما در ساخت ساختارهای هتروجانکشن با یک مشکل روبه‌رو هستیم؛ اکسیدهای رسانای شفاف اغلب به صورت نوع n در طبیعت فراوان یافت می‌شوند، اما یافتن نوع p مرتبط با آنها اندکی سخت است [۲]. برای رفع این مشکل می‌توان یک ماده‌ی نوع n را که به ماده‌ی نوع n اصلی شبیه است انتخاب و با فلزات سختی همچون آهن [۵]، منگنز [۶] و کروم [۷] آلاش کنیم و به ماده‌ی نوع p مطلوب برسیم. ناحیه‌ی فعال ایجاد شده در ساختارهای هتروجانکشن مانند دسته‌ای از دیوده‌های موازی با ناحیه‌ی پیوندگاه بزرگ عمل می‌کنند و همین عامل باعث بهبود پارامترهای اساسی در بررسی این سلول‌ها نسبت به سلول‌های با فرآیند ساخت هموجانکشن است [۲].

تبدیل به زوج حامل نشده و در فرآیند بازترکیب شرکت می‌کند، پس فوتون مد نظر ما نبوده و باعث کاهش میزان بهره‌ی کوانتومی می‌شود [۱]. در نهایت باید به این نکته اشاره کرد صرفاً فوتون‌هایی در یک آشکارساز نوری می‌توانند تولید زوج الکترون - حفره انجام دهند که به ناحیه‌ی فعال آشکارساز برسند. در این ناحیه، عمق نفوذ مطلوب وجود دارد و فوتون‌ها در تولید زوج حامل مشارکت کرده و هرچه تعداد فوتون‌هایی که به این ناحیه می‌رسند بیشتر باشد، باعث افزایش بهره‌ی کوانتومی قطعه می‌شود.

ویژگی مهم دیگر در آشکارسازها پاسخ‌دهی آنها است. در تعریف این ویژگی باید گفت که نسبت جریان الکتریکی گذرا در قطعه به توان اپتیکی آن را پاسخ‌دهی آشکارساز می‌گویند.

$$R = \frac{\eta e}{h\nu} = \frac{\eta e \lambda}{hc} \quad (1)$$

در رابطه‌ی بالا، η بهره‌ی کوانتومی، e بار الکتریکی، h ثابت پلانک و ν بسامد فوتون تابشی است. در این رابطه hc و e مقادیر ثابت هستند و دو عامل طول موج و بهره‌ی کوانتومی (که وابسته به طول موج است) تعیین کننده‌ی پاسخ‌دهی قطعه هستند [۱].

ویژگی بعدی زمان پاسخ‌دهی قطعه است و این ویژگی صرفاً به نحوه‌ی لایه‌ی نشانی نانو ساختارهای سازنده‌ی قطعه وابسته است. بیان این نکته ضروری است که هر چه زمان پاسخ‌دهی کوتاه‌تر باشد، آن‌گاه افزاره ساخته شده باکیفیت تر است.

با این توضیحات می‌توان به این نتیجه رسید که ضخامت فیزیکی نباید به گونه‌ای باشد که حامل‌های تولید شده از فوتون‌ها، قبل از ایجاد جریان در فرآیند بازترکیب شرکت کرده و عملاً مورد استفاده‌ی مطلوب ما قرار نگیرند. از طرفی ماده‌ی فعال باید به اندازه‌ی کافی ضخیم باشد تا هر فوتون ورودی در نهایت منجر به تولید زوج الکترون - حفره شود، ولی مطابق با رابطه‌ی بیر-لامبرت (رابطه‌ی ۲)، هر چه میزان نفوذ فوتون (z) در لایه بیشتر باشد، سیگنال نهایی بصورت نمایی افت می‌کند و ضعیف‌تر می‌شود، به همین خاطر باید به دنبال یک حالت بهینه بین تمام این موارد باشیم.

$$I = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2)$$

راهکار ابتدایی برای رفع این مشکل استفاده از مواد خالص در لایه‌های جاذب است، اما استفاده از مواد خالص مقرون به صرفه نیست، به همین خاطر باید به دنبال گیراندازی نور در مساحت کمتر و با جذب بیشتر باشیم و به همین دلیل به سراغ نانو ساختارها برای ساخت ادوات الکترواپتیکی می‌رویم.

یک ایده برای افزایش جذب نور در ابعاد کمتر استفاده از نانوساختار اکسیدهای رسانای شفاف در قطعه است [۲]. اما دلیل این انتخاب چیست؟ با استفاده از این مواد، فضای ناحیه‌ی فعال پیوندگاه دو تا سه برابر افزایش می‌یابد پس امکان وقوع بازترکیب

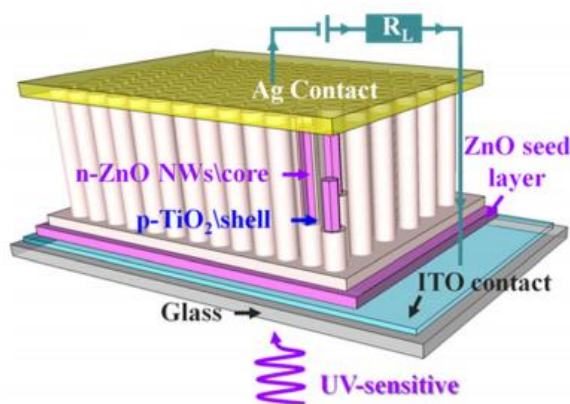
$$\alpha = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad (3)$$

پس با این اطلاعات اولیه می‌توان به دنبال ادوات الکترواپتیکی‌ای بود که با بهره‌گیری از نانوساختارها باعث جذب نور بیشتر در لایه‌ی جاذب شوند و ما را به مطلوب برسانند.

۲- مدیریت نور

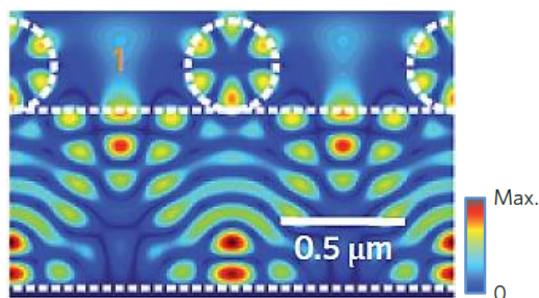
افزایش نرخ تبدیل فوتون به زوج حامل الکترون-حفره، افزایش میزان جذب فوتون توسط لایه‌ی فعال در آشکارساز و رسیدن به سیگنال خروجی مطلوب از دغدغه‌های اصلی در حوزه‌ی سلول‌های فوتوولتاییکی در دو دهه‌ی اخیر بوده و کارهای بسیاری نیز در این راستا انجام شده است. در آغاز، محققان راه رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب را تحلیل و بررسی در ترمودینامیک لایه‌ها اعلام کردند، چرا که در ابعاد معمولی روابط ترمودینامیکی حاکم تا حدود خوبی ما را به نحوه‌ی طراحی مناسب لایه‌ها برای گیراندازی نور سوق می‌دهد [۹]. اما در ادامه محققان به این نتیجه رسیدند که این عامل نقش بسزایی در میزان جذب فوتون ایفا نمی‌کند. پس باید به دنبال عامل اصلی برای رسیدن به حالت بهینه‌ی جذب فوتون توسط آشکارساز باشیم، همان‌طور که در مقدمه بیان شد برای رسیدن به میزان جذب بالاتر، لایه‌ی نشانی‌ها باید در ابعادی انجام شود که پاشندگی وجود دارد. برای آنکه تاثیر پدیده پاشندگی در این ادوات مشاهده شود طراحی ساختارها در ابعاد طول موج و زیر طول موج است، چرا که در این مقیاس تشدیدهای ناشی از برهمکنش نور با ماده را شاهد هستیم، درحالی که در طراحی‌های قبلی (ابعاد معمولی)، این تشدیدها نمود پیدا نمی‌کردند. طول موج نور مرئی در حدود ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و طول موج نور فرابنفش در حدود ۲۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر است. پس هنگامی که به دنبال طراحی ساختارها در ابعاد طول موج و زیر طول موج هستیم یعنی باید از نانوساختارها برای لایه‌نشانی استفاده کنیم، پس یکی از دلایل اصلی استفاده از نانو ساختارها برای رسیدن به لایه‌ی نشانی مطلوب و حبس‌کننده‌ی نور همین موضوع است. با بهره‌گیری از اپتیک آماری پرتوای می‌توان این‌گونه استنباط کرد که بیشینه میزان جذب فوتون توسط قطعه از حد یابلونوویچ تبعیت کرده و برابر با $4n^2$ درصد است که در آن n ضریب شکست لایه‌ی نیمه‌هادی می‌باشد [۱۰]. اما کار در ابعاد نانومقیاس، استفاده از نانو ساختارها در ساخت قطعه و تحلیل با اپتیک موجی می‌تواند این حد را بشکند و در نتیجه میزان جذب فوتون توسط قطعه به مراتب افزایش می‌یابد. در واقع هنگامی که در ابعاد نانوساختار کار می‌کنیم، عملاً فوتون‌ها را به عنوان مدهای الکترومغناطیسی در نظر می‌گیریم و اندرکنش آن‌ها با نانوسیم‌ها همان برهمکنش نور-ماده و پدید آورنده‌ی تشدید (کلید حل مشکل) است [۱۱].

منظور از واژه‌ی تشدید، جفت‌شدگی نور (مد الکترومغناطیسی) با ذرات تشکیل دهنده‌ی لایه‌های مختلف است. هنگامی که نور با لایه‌های متفاوت برخورد می‌کند، نتیجه‌ی آن جفت‌شدگی‌های



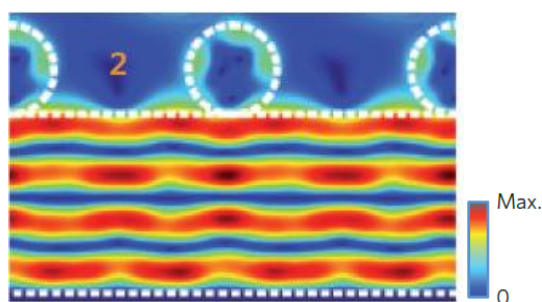
شکل ۲. نمایش یک ساختار هتروجانکشن [۲]

اما با استفاده از این ساختارهای مرسوم صرفاً می‌توانیم به سیگنال‌های محدودی برسیم. برای افزایش مقدار سیگنال باید از تکنیک جدیدی استفاده کنیم و این روش حبس نور در لایه‌ی فعال پس از رسیدن نور به آن است. برای یافتن فیزیک حاکم بر این روش شبیه‌ترین پدیده، نحوه‌ی کار فیبر نوری است. در فیبر نوری و بر اساس قانون اسنل یک زاویه‌ی بازتاب کلی وجود دارد که تحت آن زاویه نور بین هسته و غلاف محبوس شده و وجود گرادیان ضریب شکست اساس کار فیبر نوری است. با تطبیق فیزیک حاکم بر فیبر نوری در اینجا ما باید به دنبال موادی با تغییر تدریجی ضریب شکست و از طرفی ضخامت مطلوب باشیم. با دلایل مطرح شده در بالا ما به دنبال استفاده از نانوساختارها در ساخت آشکارساز نوری هستیم پس باید ضریب شکست نانوساختارها را نیز در اختیار داشته باشیم. اگر بخواهیم بحث را بنیادین دنبال کنیم باید گفت که چگونگی انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های مادی خطی به‌طور کامل با ثابت‌های اپتیکی ضریب شکست n و ضریب جذب k تعیین می‌شود. این ثوابت فقط به ثابت دی‌الکتریکی K و رسانندگی g ی ماده بستگی دارند. در حالت معمول این مقادیر را مفروض در نظر می‌گیرند اما در واقع این پارامترها در ابعاد میکروسکوپی بسیار متغیر و تاثیر گذار هستند و بررسی تغییرات آنها در اپتیک تحت عنوان پاشندگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر دو ثابت اپتیکی n و k با طول موج تغییر می‌کنند [۸]. پس باید به دنبال یک روش طیف سنجی باشیم که این تغییرات را در نانوساختارها بر حسب طول موج آشکار کند. رفتار نور در مسیر فعل و انفعالات آن با الکترون‌های یک محیط بسته با بسامد آن تغییر می‌کند. این اثر به پاشندگی اپتیکی مشهور است. انرژی نور به فرکانس وابسته است. هنگامی که نور به یک محیط وارد می‌شود الگوهای تداخلی به‌وجود می‌آید که باعث تغییر در سرعت ظاهری نور می‌شود. اگر بسامد تغییر کند، آنگاه انرژی دیگر پایسته نیست. پس طول موج تغییر می‌کند تا انرژی پایسته بماند و تغییرات رخ داده در سرعت نیز به تعادل برسد. با این اوصاف ضریب α در رابطه‌ی (۲)، بصورت زیر تعریف می‌شود.



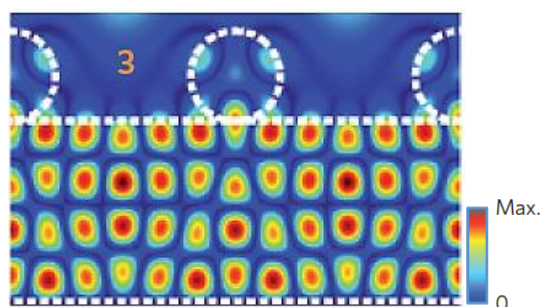
شکل ۴. نمایش شدت میدان الکتریکی حاصل از تشدید اپتیکی (Mie) در کل قطعه [۱۰].

پس عامل اصلی در تشدید حاصل از موج ایستاده فابری - پرو دو بازتاب، یکی در صفحه‌ی نیمه‌هادی - فلز و دیگری در صفحه‌ی دی‌الکتریک - نیمه‌هادی است که در قسمت‌های خاصی مطابق با شکل ۵ به هم می‌رسند و صرفاً در مدهای با مرتبه‌ی بالا توقع ایجاد این تشدید را داریم.



شکل ۵. نمایش شدت میدان الکتریکی حاصل از تشدید موج ایستاده‌ی فابری - پرو با Q فاکتور پایین [۱۰].

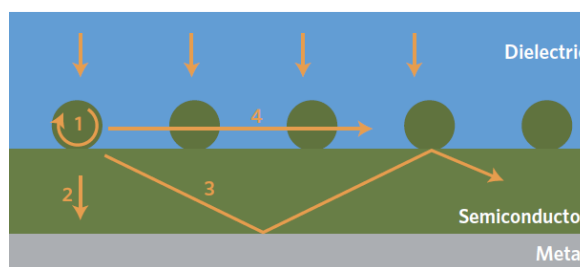
شکل ۶ نمایانگر یک تشدید هدایتی در لایه‌ی نیمه‌هادی است [۱۲]. علت وقوع این تشدید، آرایش تناوبی نانوسیم‌ها و ایفای نقش آنها به مثابه یک توری در بالای لایه‌ی نیمه‌هادی است که باعث ایجاد تطابق فاز در جفت‌شدگی جبهه‌ی موج تخت فرودی با یک مد هدایتی در لایه‌ی نانوساختار نیمه‌هادی می‌شود.



شکل ۶. نمایش شدت میدان الکتریکی حاصل از تشدید هدایتی در لایه‌ی نیمه‌هادی [۱۰].

مختلفی از مدهای الکترومغناطیسی با لایه‌ها است و این یعنی بروز تشدیدهای متفاوت. این تشدیدها با توجه به طول موج، نوع لایه‌ای که با نور برهمکنش می‌کنند و زاویه‌ای که تحت آن نور به قطعه تابیده می‌شود متفاوت خواهند بود. وجود این تفاوت‌ها و دانستن این نکته که منبع هر تشدید چه چیزی می‌باشد به ما این امکان را می‌دهد که بتوانیم تشدیدها را به دسته‌های مختلفی طبقه بندی کرده و به پیش بینی‌های دقیق‌تری قبل از انجام لایه نشانی درباره‌ی نتایج احتمالی حاصل برسیم [۱۲]. شکل ۳ چهار تشدیدی که احتمال وقوع آنها در لایه‌نشانی‌ها بیشتر است را نشان می‌دهد.

حال سوال این است که هر کدام از این چهار تشدید چگونه در جذب نور بیشتر در لایه‌ی نانوساختار نیمه‌هادی تاثیرگذار هستند؟ درباره‌ی تشدید ۱ در شکل ۳ می‌توان گفت که از برخورد نور با نانوسیم‌های قرار گرفته بر روی لایه‌ی نیمه‌هادی این تشدید ایجاد می‌شود.



شکل ۳. شماتیکی از تشدیدهای اپتیکی که باعث ایجاد جذب بیشتر نور در لایه‌ی نیمه‌هادی (ناحیه‌ی سبز) می‌شوند. شماره‌های ۱ تا ۴ چهار تشدید مهم در لایه نشانی‌های در ابعاد طول موج و زیر طول موج (نانوساختارها) به حساب می‌آیند [۱۰].

توزیع شدت میدان الکتریکی حاصل از این تشدید در کل قطعه را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد. آرایش میدان الکتریکی به این طریق نمایانگر تشدید ناشی از یک برانگیختگی اپتیکی (Mie) است، که علت آن ریشه در تقارن شش قطبی نانوسیم‌ها دارد [۱۰]. موضوع قابل توجه دیگر در اینجا، دو رگه بودن این تشدید با یک تشدید هدایتی در لایه‌ی زیرین است.

درباره‌ی تشدید ۲ در شکل ۳ می‌توان این‌گونه گفت که تصویر ۵ (نقش شدت میدان الکتریکی حاصل از این تشدید در کل قطعه)، نمایانگر یک تشدید موج ایستاده‌ی فابری - پرو با Q - فاکتور پایین است [۱۰]. این نحوه‌ی توزیع شدت میدان الکتریکی از محبوس شدن نور بین لایه‌ی دی‌الکتریک بالایی و لایه‌ی فلزی با بازتابندگی زیاد پایینی حاصل می‌شود.

ایده‌ی اصلی این نظریه محاسبه‌ی میزان افزایش پهنای باند کلی جذب ناشی از تمام مدها است. فرمول‌بندی این نظریه برای تئوری گیراندازی نور که تماماً بر اساس اپتیک موجی است از طبیعت فرآیند حبس نور الهام می‌گیرد [۱۴]. مطابق با طبیعت این پدیده، هر تشدید در ناحیه‌ای از طیف از حد جفت‌شدگی با تشدیدهای دیگر می‌گذرد و فراجفت‌شدگی رخ می‌دهد. فراجفت‌شدگی باعث کاهش میزان جذب نور در قله‌ی یک تشدید می‌شود اما پهنای طیف جذبی در آن تشدید افزایش می‌یابد [۱۵]. بدین صورت نتیجه‌ی اختصاصی مربوط به هر کدام از تک تشدیدها کم‌رنگ شده و در نهایت به یک طیف جذبی کلی برای قطعه (برگرفته از تمام تشدیدها) بر واحد یک بسامد یکتا می‌رسیم [۱۰]. از منظر تجربی این نظریه همچنین می‌تواند در بهینه‌سازی و رفع اختلال‌های موجود در لایه‌های حبس کننده‌ی نور مانند جذب/گسیل زاویه‌ای سلول‌های فوتوولتاییکی نیز کارایی داشته باشد [۱۶].

نظریه‌ی اپتیک موجی مستقیماً همان حد $4n^2$ را برای یک سلول در ابعاد معمولی می‌دهد [۱۱]. این نظریه همچنین برای یک سلول فیلم نازک و طراحی شده در ابعاد طول موج (نانو ساختار) نیز حدی قائل است که به حد کلاسیکی شباهت دارد [۱۷]. اما استفاده از ساختارهای نانوفوتونیکی باعث افزایش چگالی مدهای اپتیکی در طیف گسترده‌ای از طول‌موج‌ها می‌گردد و در این حالت است که پدیده‌ی گیراندازی نور، مقدار جذبی فراتر از حد موجود می‌دهد. حتی می‌توان این قابلیت را این‌گونه تعمیم داد که اگر میزان جذب یک لایه کاملاً مشخص باشد، با استفاده از تکنیک گیراندازی نور می‌توان به مقدار جذبی بیشتر از میزان مشخص شده رسید. باید به این نکته توجه کرد که نظریه‌ی اپتیک موجی استفاده شده برپایه‌ی چگالی موضعی حالت‌های اپتیکی، موضوع گیراندازی نور را بررسی می‌کند [۱۷].

۳- عوامل موثر در گیراندازی و جذب بیشتر نور

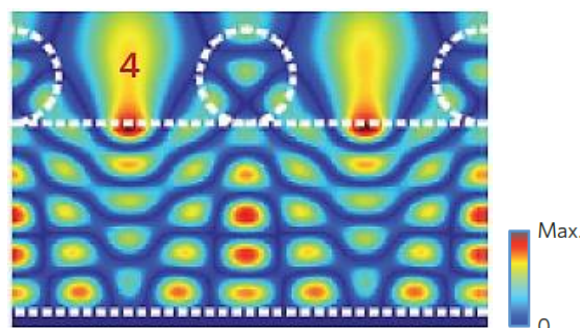
۳-۱- اثر پوشش‌های ضد بازتابی

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، یکی از عواملی که باعث عدم جذب بالای فوتون‌ها در قطعه می‌شود بازتاب فوتون‌ها از سطح آشکارساز است. از رابطه می‌دانیم که $A+R+T=1$ ؛ پس برای آن که جذب افزایش یابد باید میزان بازتاب کاهش یابد و برای کاهش آن می‌توان از پوشش‌های ضد بازتابی بر روی قطعه استفاده کرد. استفاده از پوشش‌های ضد بازتابی باعث می‌شود که احتمال نفوذ فوتون‌ها به درون قطعه و امکان آن‌که جذب لایه‌ی نانو ساختار نیمه‌هادی شوند بیشتر شود. پس با استفاده از پوشش‌های ضد بازتابی امکان جذب و محبوس سازی فوتون و در نهایت رسیدن به سیگنالی با کیفیت بالاتر، بیشتر فراهم می‌شود. با استناد به همین علت نیز اخیراً از لایه نشانی‌های فلز-دی‌الکتریک-فلز و فلز-نیمه‌هادی-فلز برای گیراندازی نور استفاده نمی‌کنند.

روش مرسوم در استفاده از پوشش‌های ضد بازتابی، استفاده از یک لایه‌ی ضد بازتابی با ضخامت ربع طول موج است که بخش حقیقی ضریب شکست آن میانگین هندسی ضریب شکست‌های

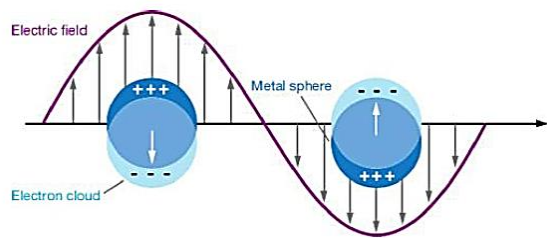
نقش توزیع میدان در شکل ۶ نمایانگر یک تغییر تناوبی در شدت میدان برای لایه‌ی نانو ساختار نیمه‌هادی است که این تناوب از خصیصه‌های مدهای هدایتی می‌باشد. از مقایسه‌ی شکل ۵ با شکل ۶ می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که نقش میدان ناشی از تشدید هدایتی متأثر از نقش میدان حاصل از تشدید موج ایستاده‌ی فابری - پرو است که وجود لایه‌ی دی‌الکتریک صرفاً یک فرکانس فضایی به آن تحمیل کرده است و باعث می‌شود تا در قسمت‌هایی میدان میرا و قطع شود، اما در بقیه قسمت‌ها میدان تناوبی داریم که این میدان ناشی از ایجاد تداخل سازنده در آن قسمت‌ها است. این موضوع مستقیماً با فاصله‌ی نانو سیم‌های قرار گرفته بر روی لایه‌ی نیمه‌هادی ارتباط دارد، به نحوی که هر چه نانو سیم‌ها به هم نزدیک‌تر باشند، قسمت‌هایی که فرکانس فضایی موضعی باعث قطع شدن میدان می‌شود از هم دورتر می‌شوند.

شکل ۷ نمایانگر دسته‌ی مهم دیگری از تشدیدها است که بر میزان جذب نور توسط لایه‌ی نانو ساختار نیمه‌هادی تأثیرگذار می‌باشند. بعضی از مدها هنگامی برانگیخته می‌شوند که نور فرودی در جهت مخالف صفحه‌ی لایه‌های حبس کننده‌ی نور منتقل شود (نور پراشیده شود)، این مدها بر خلاف جهت حرکت‌شان تأثیری بر نحوه‌ی توزیع میدان در لایه‌ی جذب کننده فوتون‌ها می‌گذارند و میزان جذب مفیدی را به لایه‌ی نیمه‌هادی القا می‌کنند [۱۰].



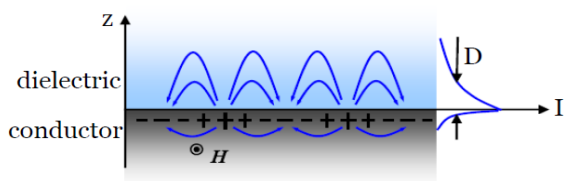
شکل ۷. نمایش شدت میدان الکتریکی حاصل از تشدید موج پراشیده شده [۱۰].

حال ما منبع ایجاد هر تشدید را یافته‌ایم، اما سوال بعدی این است که چگونه از این اطلاعات میزان جذب نور در لایه‌ی نیمه‌هادی را پیش بینی کنیم؟ برای پاسخ به این سوال باید گفت که هر تشدید یک پهنای خط دارد که این خط با زمان تابش/ تشدید نور در سلول پیش می‌آید [۱۰]. این زمان با هر دو عامل جذب در لایه‌ی نانو ساختار نیمه‌هادی و تابش اتلافی به محیط محدود می‌شود و عملاً طیف مربوط به تشدید از طیف تابشی منبع باریک‌تر می‌شود. به همین خاطر برای یافتن میزان جذب کلی به یک تحلیل طیفی از هر تشدید و در نهایت تحلیل طیفی ناشی از تمام تشدیدها نیاز داریم که این فرمول‌بندی تحت عنوان نظریه‌ی مد جفت شده‌ی آماری ناپایدار یو مطرح می‌شود [۱۰].



شکل ۹. بررسی اثر پلاسمون‌های سطحی در حضور میدان الکتریکی

اما پلاسمون‌های پلاریتون‌های سطحی ناشی از تحریک‌های الکترومغناطیسی هستند که به الکترون‌های آزاد جمع‌شونده و نوسان‌کننده سطحی در فلزات تزویج می‌شوند تا بتوانند به صورت طولی در سطح تقاطع فلز-دی الکتریک انتشار یابند.



Planar Plasmons

شکل ۱۰. شماتیکی از اثر پلاسمون‌های پلاریتون‌های سطحی

دلیل بروز اثر پلاسمونیک در تحلیل سازوکار آشکارساز وجود لایه نانو ساختار فلزی در قطعه است. با استدلالی که در بخش قبل به کار بردیم به این نتیجه رسیدیم که لایه بالایی باید ضد بازتابی باشد، اما به هر حال با در نظر گرفتن مزیت‌هایی که در این قسمت بیان شد بهتر است که از نانو ساختار فلزی در لایه نشانی استفاده کنیم. بروز پدیده تشدید سطحی پلاسمونی باعث رسیدن به سیگنال خروجی بهتری در آشکارساز می‌شود. اما چگونه؟ طول موج بلند نور (چند میکرومتر) مانع از توسعه الکترونیک نوری در مقیاس نانو می‌شود. یک راه ممکن برای غلبه بر این محدودیت‌ها تبدیل کردن نور به خواصی مانند پلاسما بود، چرا که پلاسما طول موج بسیار کوتاه‌تری نسبت به نور دارد و می‌تواند مانند یک سیگنال الکترونیکی منتشر شود. طول موج حامل‌های منتشر شده پلاریتونی در حد چند نانومتر است و عملاً موج عرضی را به موج طولی تبدیل می‌کند که در نهایت باعث ایجاد سیگنالی مناسب توسط آشکارساز می‌شود [۲۱]. مفاهیم بسیار متنوعی از پلاسمون‌ها پدید آمده است، اما کاربردهای آنها با توجه به طبیعت اتلافی فلزات دارای محدودیت‌های بسیاری است؛ مثلاً هنگامی که نور را با لایه‌های فلزی حبس می‌کنیم، همواره باید منتظر تولید گرما نیز باشیم [۲۲].

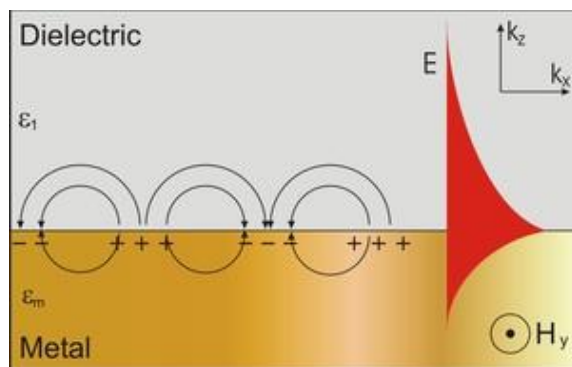
در تقسیم‌بندی کلی سه حالت را برای وقوع پدیده پلاسمونیک مطلوب، به منظور حبس نور در لایه نشانی قائل هستیم: در حالت اول (شکل ۱۱)، نانوذررات فلزی در بالای سلول قرار گرفته‌اند و می‌توانند طیف وسیعی از نور را پراکنده کنند. فایده پراکندگی نور، جفت شدگی و گیراندازی نور در صفحه‌ی

دو لایه بالایی و پایینی باشد [۱۸]. این پوشش‌های ضد بازتابی ساده صرفاً برای طیف محدودی از طول موج‌ها و زوایای تابشی که تحت آن‌ها موج بازتابیده از لایه پایینی کمینه حالت تداخل ویرانگر را تشکیل دهند جواب می‌دهد [۱۹]. برای رسیدن به قطعه‌ای که وابستگی زاویه‌ای کمتری داشته باشد و طیف وسیع‌تری از طول موج‌ها را فراگیرد باید یک چندلایه دارای گرادیان ضریب شکست بر روی لایه نشانی اصلی قرار دهیم که البته فرآیندی پیچیده و پرهزینه است [۲۰].

۳-۲- اثر پلاسمونیک

هنگامی که نور به نانو ساختارهای فلزی می‌تابد، خاصیت جدیدی از خود نشان می‌دهد که این موضوع را در حوزه اثر پلاسمونیک بررسی می‌کنند. پلاسمونیک علمی است که به مطالعه برهم کنش نور با ساختارهای فلزی می‌پردازد. نانو ساختارهای فلزی به دلیل خاصیت منحصر به فردشان، یعنی متمرکز سازی نور در ابعاد زیر طول موج مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته‌اند. این خاصیت بی‌همتای فلزات از رفتار اپتیکی آنها یعنی قابلیت ایجاد تجمع الکترون‌های برانگیخته ناشی می‌شود و به آنها پلاسمون‌های سطحی می‌گویند. این برهمکنش بین نور و ساختار فلزی طراحی شده در ابعاد طول موج باعث ایجاد نوسانات تجمعی الکترون‌های باند ظرفیت فلز می‌شود. پلاسمون‌ها، نوسانات جمعی الکترون‌های لایه رسانایی هستند که در اثر قرار گرفتن فلز در میدان خارجی به وجود آمده‌اند. بسامد این نوسانات منطبق بر بسامد پلاسمای ماده است. اثر تشدیدهای سطحی پلاسمونی را در حالت کلی به دو دسته تقسیم می‌کنیم: پلاسمون‌های سطحی موضعی و پلاسمون‌های پلاریتون‌های سطحی.

درباره اثر پلاسمون‌های سطحی باید گفت که پلاسمون‌های سطحی حاصل نوسانات همدوس الکترون‌های تراز هدایت سطح یک فلز هستند که با تحریک نور (پرتو الکترومغناطیسی) در سطح مشترک فلز- نیمه‌هادی ایجاد می‌شوند.

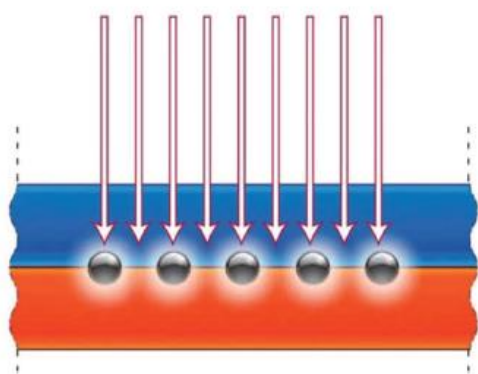


شکل ۸. شماتیکی از اثر پلاسمون‌های سطحی

لایه‌ی نیمه‌هادی جذب می‌شود و طول موج بلند پس از رسیدن به نانوذرات (که در پشت سلول قرار گرفته‌اند)، دچار پراکندگی شده و حبس می‌شوند. پس نکته‌ی مهم در اینجا رسیدن به طول راه اپتیکی بیشتر بود [۲۶].

در حالت دوم (شکل ۱۳)، می‌توان از نانوذرات فلزی جاساز شده به عنوان آنتن‌های اپتیکی در حد طول موج استفاده کرد [۲۴]. این آنتن‌ها باعث جفت شدگی پلاسمون‌های سطحی موضعی برانگیخته و لایه‌ی نیمه‌هادی می‌شوند. نتیجه‌ی این جفت‌شدگی افزایش میزان جذب نور است [۲۷].

علا می‌توان گفت آنچه که در این ساختار رخ می‌دهد، اثر میدان نزدیک نانو ذرات فلزی جاساز شده نام دارد [۲۸]. در این روش ما از تکنیک دیگری به گیراندازی نور می‌پردازیم و آن روش استفاده از میدان‌های محلی بسیار قوی ناشی از نانوذرات فلزی بسیار کوچک است [۲۴]. در این روش نانوذرات فلزی در ناحیه‌ی ماده‌ی فعال، ترکیب و یا جاساز می‌شوند و به همین دلیل ناحیه‌ی فعال محاصره شده بسته به چگالی حالت بالای فونون‌ها و استفاده از این حقیقت که نانوذرات مستقیماً می‌توانند حامل‌های بار را برانگیخته کنند، میزان جذب به مراتب بالاتری را به ارمغان می‌آورند. این روش در تکنیک‌های سنتز شیمیایی کارا است [۲۴].



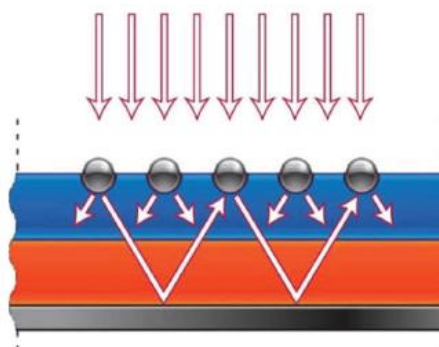
شکل ۱۳. اثر میدان نزدیک در نانوذرات فلزی جاساز شده
آبی: پوشش ضد بازتابی، نارنجی: لایه‌ی فعال، خاکستری: فلز [۲۳]

اثر میدان نزدیک در حضور ذرات با اندازه‌ی کوچک (نانو ذرات) و فاصله‌ی بین ذره‌ای اندک به مراتب افزایش می‌یابد. اما ذرات کوچک اثر پراکندگی قابل قبولی را به وجود نمی‌آورند [۲۹]. پس این مکانیزم صرفاً در مواردی مورد توجه است که طول مسیر حامل اقلیت اندک است و حامل‌های نوری فقط در نزدیکی مجموعه‌ی ناحیه‌ی پیوندگاه تولید می‌شوند. سرعت جذب در نیمه‌هادی باید از معکوس زمان واپاشی پلاسمون‌های فونون بزرگ‌تر باشد تا از اتلاف انرژی جذب شده و تبدیل آن به استهلاک (میرایی) اهمی در فلز جلوگیری شود [۲۴]. در این روش معمولاً ضخامت اپتیکی فیلم نازک طبیعی از طول مسیر انتقال حامل‌ها بزرگتر است. اما استفاده از نانو ذرات فلزی همواره باعث کاهش تحرک پذیری حامل‌ها می‌شود و عملاً سودمندی اثر میدان‌های نزدیک جلوه‌ی کمتری پیدا می‌کند.

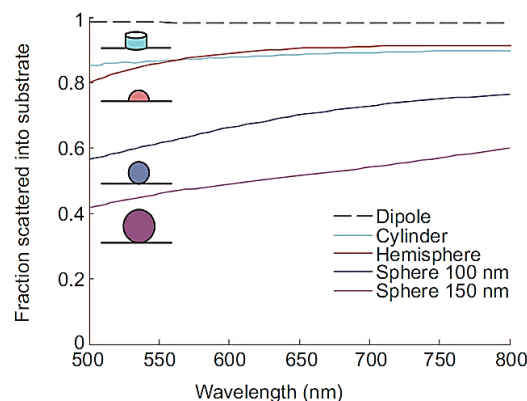
موج هدایت شونده با استفاده از خاصیت برگشت موج پس از رسیدن به لایه‌ی نازک جاذب است. در این نوع ساختار، دو عامل توزیع مجدد زاویه‌ای نور پراکنده شده و بازتاب از اتصال پشتی، طول راه نوری را افزایش می‌دهند و در نتیجه، باعث گیراندازی نور می‌شوند [۲۳].

پس عامل تاثیرگذار در اینجا شکل نانوذره است. معمولاً نانوذرات به شکل استوانه یا نیم‌کره باعث پراکندگی بیشتر نور می‌شوند (شکل ۱۲) و به همین خاطر راه نوری طولانی‌تری را نسبت به نانو ذرات کروی ایجاد می‌کنند [۲۴].

معمولاً ارتباط مستقیم نانوذرات با ناحیه‌ی فعال مرسوم نیست، چرا که باعث بروز مسئله‌ی بازترکیب می‌شود [۲۴]. از طرفی سطح مقطع پراکندگی موثر با افزایش فاصله‌ی نانوذرات از زیرلایه افزایش می‌یابد. این فاصله از ایجاد تداخل مخرب بین میدان فرودی و بازتابیده جلوگیری می‌کند. اما به هر حال نمی‌توان از بروز اثر جفت شدگی میدان نزدیک چشم‌پوشی کرد [۲۵].



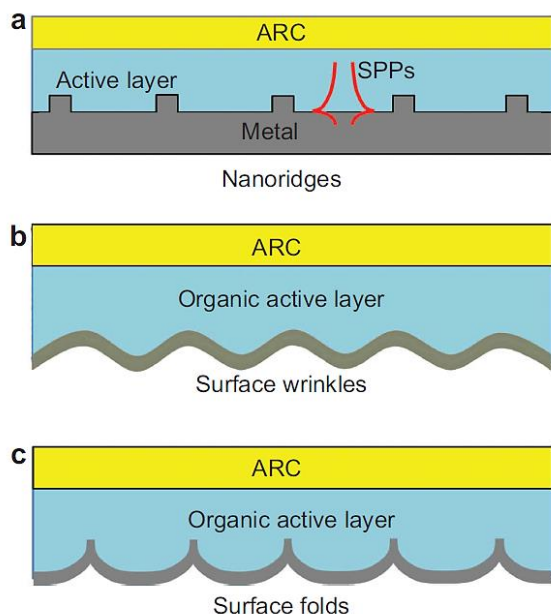
شکل ۱۱. اثر پراکندگی و توزیع مجدد زاویه‌ای نور پراکنده شده توسط نانوذرات فلزی در بالای سلول آبی: پوشش ضد بازتابی، نارنجی: لایه‌ی فعال، خاکستری: فلز [۲۳]



شکل ۱۲. تاثیر سایز و شکل نانو ساختارها بر پراکندگی نور [۲۳]

راه‌حل دیگر برای رفع مشکل تداخل مخرب استفاده از نانوذرات در پشت سلول است. در این روش نور با طول موج کوتاه در

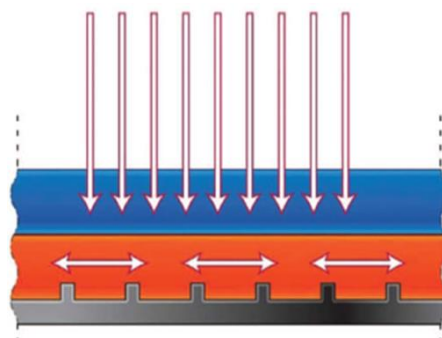
چرا که دارای ساختار تیزی می‌باشند. این تکنیک علاوه بر قیمت پایین‌تر، در ساختارهای میدان نزدیک باعث جذب بیشتر نور توسط لایه فعال نیز می‌شود [۲۹].



شکل ۱۵. نقش شیار، چین و چروک و شکست در لایه فلزی برای گیراندازی نور [۲۴].

۳-۳- اثر تشدیدهای ناشی از مد نشتی (مد تونل‌زنی)
محدودیت‌های موجود در مدیریت نور با لایه‌های فلزی را دریافتیم، اما در فرآیند اندرکنش نور با لایه‌های دی‌الکتریکی چه اتفاقی رخ می‌دهد؟ تشدیدگرهای دی‌الکتریکی، نور را به میزان قابل توجهی و با تلفات ایتیکی پایین حبس می‌کنند. اما اندازه‌ی آنها دارای محدودیتی در ابعاد طول موج (محدوده‌ی نانو ساختارها) و یا در مقیاس بزرگتر؛ محدود به قوانین بنیادین پراش است. به همین خاطر، اثرات حبس نور با لایه‌های دی‌الکتریکی صرفاً در میدان‌های دور نمود پیدا می‌کند یعنی در آزمایشاتی که منبع و آشکارساز در فواصل قابل توجهی قرار گرفته‌اند مانند پراکندگی الاستیک و یا اندازه‌گیری رامان کره‌های دی‌الکتریکی در ابعاد زیر طول موج و یا نانوسیم‌های نزدیک به بسامد طبیعی نوسانگرها [۲۱]. اما ما به دنبال بررسی نحوه‌ی مدیریت نور در میدان‌های نزدیک هستیم تا به وسیله‌ی آن بتوانیم از این پدیده به صورت کاربردی در ادوات الکتروپتیکی استفاده کنیم. پس نحوه‌ی گیراندازی نور توسط نانوساختارهای نیمه‌هادی را بررسی می‌کنیم. تشدیدهای حاصل از مد نشتی، عامل گیراندازی نور در ابعاد زیر طول موج با نانوساختارهای نیمه‌هادی همراه با ضریب شکست بالا بوده و بسیار مناسب برای مدیریت نور در این ناحیه حساس (از نظر اندازه) هستند. در اصل، تشدیدهای مد نشتی مخصوص تشدیدگرهای در ابعاد میکرو مقیاس می‌باشند، حال به دنبال آن هستیم که میزان تاثیر آنها را در مقیاس نانو نیز بسنجیم. می‌توان نانوسیم‌ها را به شکل تشدیدگرهای میکرواستوانه ای در نظر گرفت که توانایی حبس نور در حلقه‌های سیار با

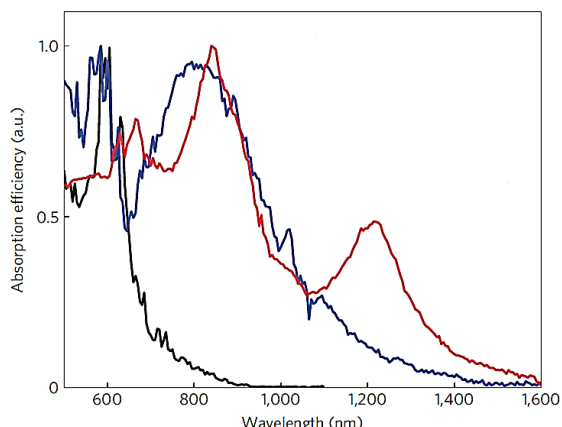
همواره در اثر پلاسمونیک ناشی از میدان نزدیک سه مشکل اساسی داریم: جذب فوتون در لایه فلزی، کاهش تحرک‌پذیری حامل‌ها و افزایش هزینه‌ی ساخت قطعه. پس در اثر میدان نزدیک باید به انتخاب مواد، اندازه‌ی نانوذرات فلزی، شکل هندسی و موقعیت مکانی آنها دقت فراوانی داشته باشیم تا به این اطمینان برسیم که میزان جذب در لایه فعال بر نتایج نامطلوب اثر میدان نزدیک رجحان دارد [۲۴].



شکل ۱۴. جفت شدگی نور در پلاسمون‌های پلاریتون‌های سطحی با نانو ساختارهای فلزی در اتصال پشتی آبی: پوشش ضد بازتابی، نارنجی: لایه فعال، خاکستری: فلز [۲۳]

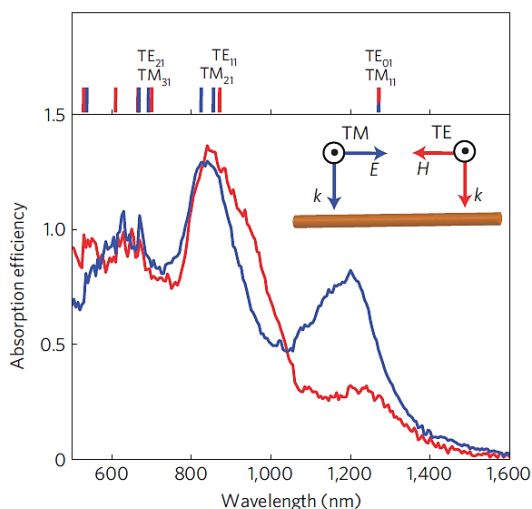
پلاسمون‌های پلاریتون‌های سطحی (شکل ۱۴)، مدهای پلاسمونی‌ای هستند که در ناحیه‌ی حد فاصل فلز-دی‌الکتریک منتشر می‌شوند. این پلاسمون‌ها در سطح مشترک فلز-دی‌الکتریک مسافت نسبتاً زیادی را طی می‌کنند، اما صرفاً در ابعاد طول موج و جهت عمودی توانایی حبس شدن دارند. نابودی این موج ناپایدار در فلزات سریع‌تر از مواد دی‌الکتریک رخ می‌دهد که این موضوع برای جذب نور در لایه‌ی فعال قطعه مفید است [۲۶]. ساختارهای با مدهای پلاسمون پلاریتون سطحی اغلب با ایجاد توری و یا شیارهایی در اتصال پشتی تولید می‌شوند و ناحیه‌ی فعال باید مستقیماً با نانوساختارهای فلزی در ارتباط باشد [۲۹]. میزان جذبی که از توری‌های دورگه‌ی فلز و زیرلایه بدست می‌آید حاصل تشدید فابری - پرو، تشدید پلاسمون پلاریتون‌های سطحی و جفت‌شدگی‌های صفحه‌ی هدایت‌کننده‌ی موج است [۳۰]. اما ایجاد شیار بر روی سطح قطعه با یک جدا کننده نیز روش دیگری است که در این روش می‌توان یک لایه‌ی دی‌الکتریک ضخیم بین توری فلزی و ناحیه‌ی فعال قرار داد. در این حالت نیز حبس نور رخ می‌دهد اما علت آن تشدید مدهای محلی و هدایتی هستند، نه پلاسمون پلاریتون‌های سطحی [۳۱].

در بخش ۳-۴ بصورت مجزا اثر شیار بر روی سطح قطعه را بررسی می‌کنیم، اما در اینجا و برای پایان بحث برهمکنش نور با فلز به بررسی تاثیر متفاوت چین‌وچروک‌ها و شکست‌ها در گیراندازی نور توسط لایه‌ی فلزی می‌پردازیم. هنگامی که یک لایه‌ی فلزی را بر روی ناحیه‌ی فعال لایه نشانی می‌کنیم بصورت طبیعی این چین‌وچروک‌ها و یا شکست‌ها ایجاد می‌شوند و عملاً نقش نانوساختارها در اتصالات پشتی با ناحیه‌ی فعال را ایفا می‌کنند [۳۲]. همواره شکست‌ها از چین‌وچروک‌ها موثرتر هستند،



شکل ۱۷. نمودار طیف جذبی برای نانوساختار ژرمانیم با شعاع‌های مختلف برای نانوسیم‌ها [۲۱].

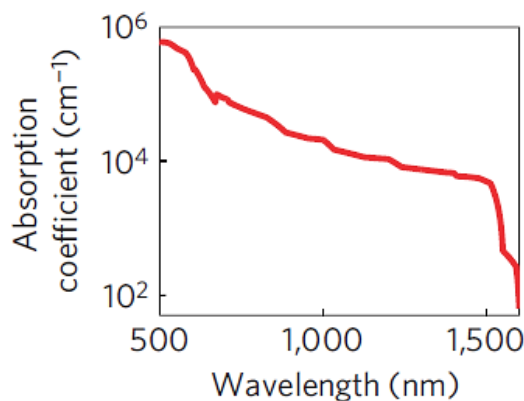
حال برای آنکه به اطمینان برسیم که این پیک‌ها صرفاً از برانگیختگی تشدیدهای مد نشتی ناشی می‌شود، در ادامه نمودار طیف جذبی تشدیدهای مد نشتی را برای نانوسیم با شعاع ۱۱۰ نانومتر تحت موج الکتریکی عرضی (نمودار قرمز) و موج مغناطیسی عرضی (نمودار آبی) آورده ایم. همان‌طور که در شکل مشخص است، هر دو طیف دارای پیک‌هایی در مکان‌های مشابه هستند. طول موج تمام تشدیدهای مد نشتی با در نظر گرفتن بخش حقیقی ضریب شکست نانو سیم بصورت عددی قابل محاسبه هستند. نکته‌ی مهم دیگر این است که با تغییر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، مدهای عرضی الکتریکی الزاماً بدون تغییر باقی می‌مانند. اگرچه ضریب شکست نانوسیم‌ها بسیار بالا است، اما تعداد مدهای وابسته به آنها متناسب با اندازه‌ی آنها بوده و اندک می‌باشد [۲۱].



شکل ۱۸. نمودار طیف جذبی نانوسیم ژرمانیم با شعاع ۱۱۰ نانومتر [۲۱].

بازتاب‌های داخلی چندگانه از محیط را دارا هستند [۲۱]. به دلیل سایز کوچک آنها، مدهای تشدید در نانوسیم‌ها نشت پیدا کرده و با عمل کردن بصورت یک آنتن به شکل موثری با دنیای خارج ارتباط برقرار می‌کنند [۲۱].

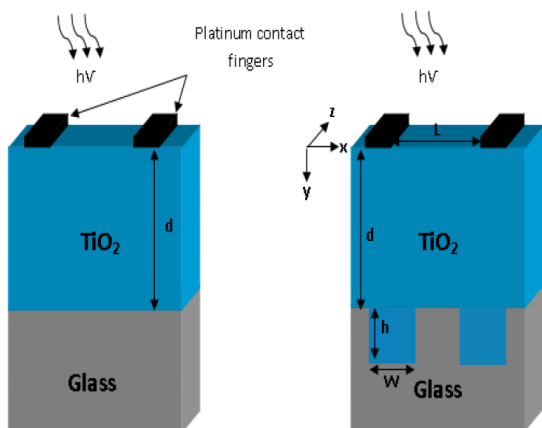
محبوس سازی فوتون‌ها در لایه‌های نانو ساختار نیمه هادی انقلابی در صنعت ساخت ادوات الکترواپتیکی ایجاد کرده است. این اثر فیزیکی بسیار توانمند تنها به سایز ساخت و به نحوه‌ی طراحی در ادوات وابسته است. با حل معادلات ماکسول در شرایط مرزی مناسب می‌توان مدهای نشتی که در طول یک استوانه به شعاع مفروضی (داخل نانوسیم‌ها) رخ می‌دهد را توصیف کرد. با حل معادله‌ی ماکسول می‌توان به این نتیجه رسید که نانو سیم‌ها صرفاً یک تعداد محدودی از تشدیدهای مد نشتی عرضی الکتریکی و مغناطیسی را در برمی‌گیرد و این تعداد با افزایش شعاع نانوسیم‌ها افزایش می‌یابد [۲۱]. در شکل ۱۶ نمودار طیف جذبی بر حسب طول موج را برای یک نمونه‌ی ژرمانیم در ابعاد معمولی می‌بینیم، همان‌طور که در شکل واضح است، میزان جذب با تغییر طول موج بصورت پیوسته و بدون شکست تغییر می‌کند. اما برای نانوسیم ژرمانیم همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. طیف جذبی به شعاع نانوسیم وابسته است. به نحوی که نمودار مشکی طیف جذبی برای نانوسیم با شعاع ۱۰ نانومتر، نمودار آبی طیف جذبی برای نانوسیم با شعاع ۲۵ نانومتر و نمودار قرمز طیف جذبی برای نانو سیم با شعاع ۱۱۰ نانومتر را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۶. نمودار طیف جذبی یک نمونه بالک ژرمانیم [۲۱].

برخلاف طیفی که از نمونه‌ی با ابعاد عادی بدست آمد، در نانوساختارها طیف جذبی دارای گسستگی‌هایی می‌باشد که تقریباً برای شعاع‌های مختلف پیک‌ها در یک حوالی بدست آمده است.

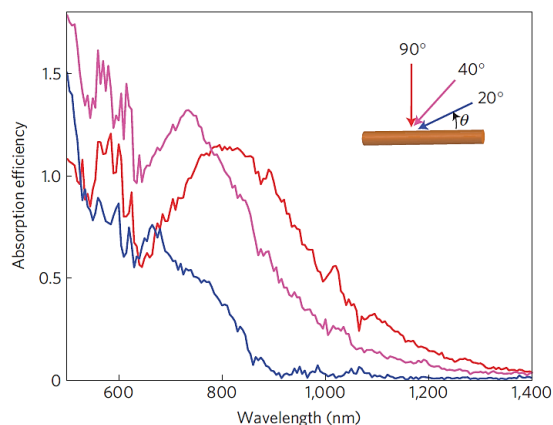
خواص نانو ساختارها استفاده می شود را شناختیم. اما مطلوب ما گیراندازی نور در لایه ی جاذب قطعه است. به همین خاطر، باید عوامل تاثیرگذار بر بهینه سازی گیراندازی نور را در دیگر قست های قطعه که شاید ارتباطی با خواص فیزیکی و اپتیکی لایه های نانو ساختاری تشکیل دهنده ی قطعه ندارد نیز بررسی کنیم، یکی از این قسمت ها شیشه ی جلوی قطعه است که می توان با اعمال تغییراتی در آن میزان گیراندازی نور و در نتیجه جذب را در ناحیه ی نانو ساختارهای لایه ی جذب افزایش داد. در بخش اثر پوشش های ضد بازتابی استدلال کردیم که ساختارهای فلز- دی الکتریک - فلز و فلز - نیمه هادی - فلز به دلیل بازتاب میزان قابل توجهی از فوتون ها، ساختارهای مطلوبی برای حبس نور نیستند. اما این ساختارها به دلیل آرایش ساده، قیمت ساخت پایین، زمان گذار بالا و جریان تاریک پایین بسیار مورد توجه هستند. از جمله معایب این ساختارها پاسخ دهی پایین، تاخیر در پاسخ دهی، جریان نوری پایین و توان اتلافی بالا است که تمامی این معایب به نحوی ریشه در همان میزان بازتاب بالا از سطح قطعه دارند [۳۳]. پس باید به دنبال چاره ای برای رفع این نواقص باشیم. ایجاد شیارهای فشرده بر روی سطح شیشه ی جلوی قطعه و در ابعاد چند نانو متر همزمان باعث ایجاد دو پدیده ی اساسی در آشکارساز نوری می شود. اول افزایش پراکندگی مستقیم نورو سپس کاهش بازتاب نور از سطح شیشه [۳۴]. کنترل هرچه بهتر این پدیده باعث افزایش محبوس سازی میدان الکتریکی و گیراندازی نور در لایه ی جاذب قطعه می شود. از طرفی ایجاد شیارهای فشرده، منظم و با اندازه های مطلوب بر روی قطعه به نحوی حالت توری های متناوب را نیز پدید می آورد و این اتفاق یکی از همان چهار حالت تحلیلی در بخش مدیریت نور را تداعی می کند.



شکل ۲۰. (سمت چپ) یک آشکارساز معمولی برای نور فرابنفش - (سمت راست) یک آشکارساز نور فرابنفش که دارای شیار روی سطح قطعه است [۳۴].

شکل ۲۰ مربوط به بررسی اثر شیار بر روی سطح قطعه با لایه ی جاذب اکسید تیتانیوم و به منظور حبس نور فرابنفش بوده است. نتیجه گزارش شده افزایش ۲۰ درصدی جذب نور پس از اعمال این شیارها بر سطح شیشه در قطعه بود [۳۴].

همچنین در بالای شکل ۱۸ محل وقوع تشدیدهای مختلف نشان داده شده است. همان طور که از شکل هویدا است، اغلب در محل پیک های طیف جذبی شاهد بروز تشدیدها هستیم. در این مکان ها یا شاهد تبهگنی کامل مد ها (مانند TE_{01} و TM_{11}) و یا تبهگنی تقریبی آن ها (مانند TE_{11} و TM_{21}) هستیم. برای طراحی ادوات الکترواپتیکی همواره توجه به نوع قطبش و زاویه ی تابش در کارایی قطعه اهمیت دارد، پس باید این دو عامل را در تبهگنی های مربوط به تشدیدهای مد نشستی بررسی کنیم. اولین موضوعی که از حل معادله ی ماکسول برای نانوسیم های نیمه هادی می توان پیش بینی کرد این است که حتی اگر کوچکترین حالت ممکن برای شعاع نانوسیم را در نظر بگیریم، حداقل یک تشدید مد نشستی بنیادین TM_{01} در آن شکل می گیرد. به همین خاطر انتظار ما این است که نانو سیم های با شعاع کمتر وابستگی شدیدی به قطبش داشته باشند، اما به دلیل وجود تبهگنی های سنگین در نانوسیم های با شعاع بیشتر میزان وابستگی این ساختارها به قطبش با افزایش شعاع کاهش می باید [۲۱]. از طرفی تغییر در زاویه ی تابش باعث تغییر در طیف جذبی حاصل از قطعه خواهد شد، چرا که برای تابش غیر عمودی به جای مدهای نشستی خالص عرضی الکتریکی و مغناطیسی، مدهای نشستی بصورت دورگه ی EH و HE نمود پیدا می کنند. در شکل زیر برای نانوسیم ژرمانیم با شعاع ۲۵ نانومتر که فقط مد نشستی TM_{01} را در برمی گیرد، وابستگی طیف جذبی ساختار به زاویه ی تابش را مشاهده می کنیم.



شکل ۱۹. نمودار وابستگی طیف جذبی به زاویه ی تابش برای نانوسیم ژرمانیم با شعاع ۲۵ نانومتر [۲۱].

پس میزان جذب نور در نانو ساختارها، صرفا تابعی از خواص ذاتی مواد اپتیکی مورد استفاده نیست بلکه با کنترل سایز، هندسه و نظم رشد نانو ساختارها می توان میزان جذب را مهندسی کرد.

۳-۴- اثر شیار بر روی سطح قطعه

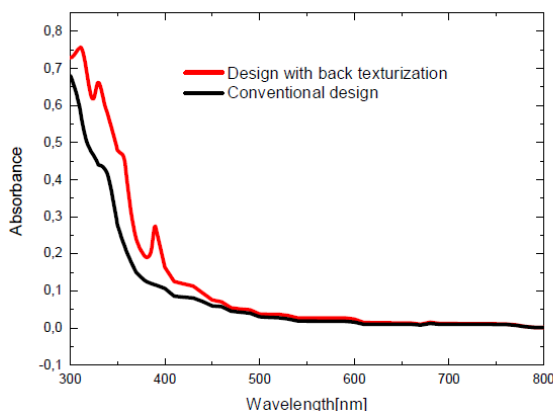
تا اینجا تاثیر استفاده از نانو ساختارها برای حبس نور، نحوه ی رفتار فوتون ها در برخورد با نانوسیم های از جنس مختلف و روش هایی که امروزه برای مدیریت نور با استفاده از شناخت

۴- نتیجه گیری

برای آنکه بتوانیم ادوات الکترواپتیکی را جایگزین ادوات الکترونیکی کنیم باید بر محدودیتهای موجود در این راه فائق شویم. دغدغهای اصلی در حوزههای مختلف استفاده از این ادوات اتلاف بالای فوتونها، عدم جذب کافی، نرسیدن به سیگنالهای مطلوب و در نتیجه بازدهی پایین در این قطعات می باشد. استفاده از نانو ساختارها تا حدودی این محدودیتها را رفع کرد. اما به دنبال روشهای کارآمدتری برای کار در این حوزه هستیم. روشی که امروزه بسیار مورد توجه است مدیریت نور نام دارد. مدیریت نور در واقع ایجاد حالتی (چه در موضوع برخورد نور با لایه های مختلف و مطالعه ی نحوه رفتار نور در برخورد با این نانوساختارها و تشدیدهای ایجاد شده از آنها، چه ایجاد عوامل تحریکی خارجی مانند ایجاد شیارهایی بر سطح قطعه و یا اعمال یک میدان مغناطیسی) برای قطعه تولید شده است که در نهایت باعث کاهش تلفات و بازتاب فوتونها از سطح قطعه، افزایش مدت زمان حضور فوتونها در لایه ی فعال و در نتیجه رسیدن به سیگنال بهتری از قطعه است. عوامل بسیاری در گیراندازی و مدیریت نور در سلولهای فوتوولتاییکی موثر هستند. از جمله ی این عوامل می توان به استفاده از یک منبع با بازه ی طول موجی مناسب (طول موج منطبق با خصوصیات لایه ها که باعث تخریب آنها نشود)، شناخت خواص ذاتی اپتیکی لایه ها، یافتن زاویه ی بهینه برای تاباندن نور به قطعه، کنترل سایز نانو ساختارها، کنترل جهت گیری نانوساختارها در هنگام رشد، یافتن ضخامت بهینه برای هر لایه و ایجاد لیتوگرافی مناسب بر روی قطعه به منظور اعمال شیارهای فشرده بر روی آن نام برد. در پایان باید به این نکته اشاره کرد که بحث مدیریت نور در ادوات الکترواپتیکی بدون استفاده از نانو ساختارها موضوعی عبث است و ما حتما باید از نانوساختارها استفاده کنیم تا بتوانیم به موضوع گیراندازی و مدیریت نور بپردازیم.

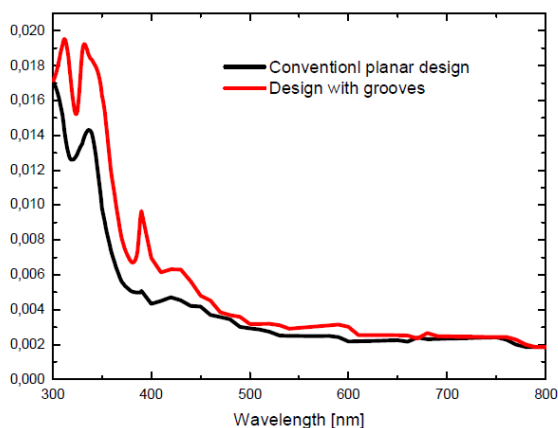
۵- منابع

1. Bahama-E.A.Saleh, Malvin carltech, John Wiley & sons, INC., 645 -690, (1994).
2. T. D. Dao, C. T. T. Dang, G. Han, C. V. Hoang, W. Yi, V. Narayanamurti, and T. Nagao, AIP Publishing, 193119, 101 - 103, (2013);
3. Y. H. Leung, Z. B. He, L. B. Luo, C. H. A. Tsang, N. B. Wong et al., AIP Publishing, 053102, 101 - 103, (2010);
4. C. Soci, A. Zhang, B. Xiang, S. A. Dayeh, D. P. R. Aplin, J. Park, X. Y. Bao, Y. H. Lo, and D. Wang, Nano Lett. 7, 1003 (2007).
5. A. R. Bally, E. N. Korobeinikova, P. E. Schmid, F. Levy, and F. Bussy, J. Phys. D 31, 1149 (1998).



شکل ۲۰. نمودار طیف جذبی بر حسب طول موج برای آشکارسازهای شکل ۲۰. نمودار مشکی برای آشکارساز معمولی و نمودار قرمز مربوط به آشکارساز با شیار می باشد [۳۴].

در شکل بالا نمودار مشکی میزان جذب را بر حسب طول موج برای نمونه ی عادی از نانوساختار اکسید تیتانیوم نشان می دهد و نمودار قرمز رنگ نمایانگر میزان جذب پس از اعمال شیار بر قطعه است. همچنین می توان میزان پاسخدهی بر حسب طول موج را نیز در دو حالت بدون شیار و با شیار در نمودار شکل زیر مشاهده کرد.



شکل ۲۲. پاسخدهی قطعه بر حسب طول موج برای دو حالت معمولی (نمودار مشکی) و با شیار (نمودار قرمز) [۳۴]

پس ایجاد شیار در جلوی شیشه ی قطعه باعث افزایش طول عمر فوتونها ی گیرافتاده در ناحیه ی لایه ی جذب کننده می شود. با توجه به مورفولوژی شیارهای تشکیل شده بر روی سطح (مانند آنچه که در شکل ۱۵ بررسی شد) می توان میزان بازتاب را به کمترین مقدار ممکن (حتی حدود ۰,۰۴۲) رساند [۳۴].



30. Ferry VE, Polman A, Atwater HA, ACS Nano, 5, 10055-10064, (2011).
31. Zhu J, Hsu CM, Yu Z, Fan S, Cui Y., Nano Lett, 10, 1979-1984, (2010).
32. Kim JB, Kim P, Pe'gard NC, Oh SJ, Kagan CR et al., Nature Photonics, 6, 327-333, (2012).
33. U. M. Nayefa, K. A. Hubeatirb, Z. J. Abdulkareemba, optik, 126, 2806 – 2810, (2016).
34. Hichem Ferhati and Fayçal Djeffal, IEEE sensors Journal, 1530, 1 – 5, (2016).
6. X. Li, S. Wu, P. Hu, X. Xing, Y. Liu, Y. Yu, M. Yang, J. Lu, S. Li, and W. Li, J. Appl. Phys. 106, 043913 (2009).
7. A. Ruiz, A. Cornet, G. Sakai, K. Shimanoe, J. R. Morante, and N. Yamazoe, Chem. Lett. 31, 892 (2002).
8. John David Jackson, John Wiley & Sons INC., third edition, 295 – 395, (2001).
9. Albert Polman and Harry A. Atwater, Nature materials, VOL 11, 174 – 175, (2012).
10. Mark L. Brongersma, Yi Cui, and Shanhui Fan, nature Materials, NMAT3921, 451 – 456, (2014).
11. Yu, Z., Raman, A. & Fan, S. Proc. Nature Acad. Sci. USA 107, 17491–17496, (2010).
12. Fan, S. & Joannopoulos, J., Phys. Rev. B 65, 1–8, (2002).
13. Yu, Z., Raman, A. & Fan, S. Proc. Nature Acad. Sci. USA 107, 17491–17496, (2010).
14. Yu, Z., Raman, A. & Fan, S. Opt. Express 401, 397–401, (2010).
15. Pala, R. A. et al. Nature Commun. 4, 2095, (2013).
16. Martins, E. R., Li, J., Liu, Y., Zhou, J. & Krauss, T. F. Phys. Rev. B 86, 041404(R), (2012).
17. Callahan, D. M., Munday, J. N. & Atwater, H. A. Nano Lett. 12, 214–218, (2012).
18. Zhao, J. & Green, M. A. IEEE Trans. Electron Dev. 38, 1925–1934, (1991).
19. Xi, J.-Q. et al. Nature Photon. 1, 176–179, (2007).
20. Oh, J., Yuan, H.-C. & Branz, H. M. Nature Nanotech. 7, 743–748 (2012).
21. Linyou coa, Justin S. White, Joon-Shik Park, Jon A. Schuller, Bruce M. Clemens, nature Materials, NMAT2477, 643 – 646, (2009).
22. Tang, L. et al., Nature Photon. 2, 226–229, (2008).
23. Atwater HA, Polman, nature material, 9, 205–213, (2010).
24. Chuan Fei Guo, Tianyi Sun, Feng Cao, Qian Liu and Zhifeng Ren, nature/isa, 2047-7538/14, 2 – 6, (2014).
25. Pillai S, Green, sol energy master, 94, 1481 – 1486, (2010).
26. Spinelli P, Ferry VE et al, J Opt, 14: 024002, (2012).
27. Brown MD, Suteewong T, Kumar RS, D'Innocenzo V, Petrozza A et al., Nano Lett, 11, 438 – 445, (2011).
28. Choi H, Chen WT, Kamat PV., ACS Nano, 6, 4418-4427, (2012).
29. Green MA, Pillai S., Nature Photonics, 6, 130-132, (2012).