

مقاله علمی- ترویجی

## لیزر پلاسمونیک با استفاده از ساختار فلز- عایق- فلز

Hamid Dehghani, گروه برق، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران، hamid01386@gmail.com

علیرضا کریمی\*، گروه برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، ar.karimi@iaushiraz.ac.ir  
\*تowisingdeh responsible

### چکیده

امروزه تحقیقات در زمینه پلاسمونیک، بر روی مجتمع سازی قطعات پلاسمونیک برای کاربردهای مخابرات نوری و تبادل داده متتمرکز شده‌اند. ایجاد چنین زمینه‌ای، حاصل بررسی قطعات پلاسمونیک جدیدی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند. برخی از این قطعات؛ موجبرها، تزویج کننده‌ها، مدولاتورهای نوری، به همراه منابع نوری (لیزرهای پلاسمونیک) و آشکارسازهای نوری هستند. این عناصر مداری در مدارهای مجتمع نوری دارای جایگاه ویژه‌ای می‌باشند. بنابراین با توجه به ویژگی اصلی علم پلاسمونیک که گذشتند از حد شکست نور در فشرده‌سازی عناصر و چیدمان آنها است، طراحی، شبیه سازی و ساخت عناصر پلاسمونیک برای محققان حوزه نور جذابیت‌های ویژه‌ای پیدا کرده است. در این مقاله ابتدا لیزر پلاسمونیک با ساختار AlGaAs/GaAs/AlGaAs مورد بررسی قرار گرفته که خود لایه GaAs به صورت چاه کوانتمومی محیط بهره را ایجاد نموده است که با بهره‌گیری از ساختار متماثریال لیزر پلاسمونیک را تحلیل کرده‌ایم.

**کلمات کلیدی:** پلاسمونیک، پلاسمون سطحی، فلز- عایق- فلز، لیزر

## Plasmonic Laser by Using Metal-Insulator-Metal Structure

Hamid Dehghani, Department of Electrical Engineering, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran, hamid01386@gmail.com

Alireza Karimi\*, Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, ar.karimi@iaushiraz.ac.ir

\*Corresponding author

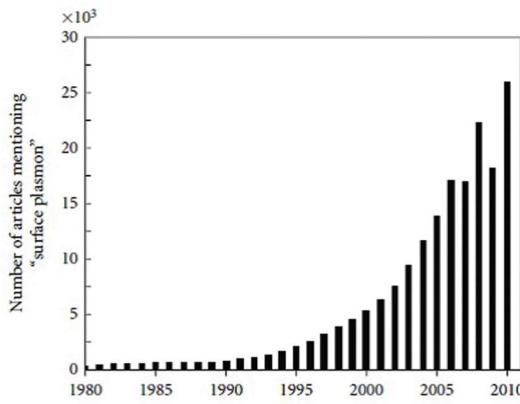
### Abstract

Today, studies in plasmonic is mainly focused on integrating the Plasmonic Parts for optical communication and data transfer. Making such field resulted in studying new Plasmonic parts that developed in recent years. Some these parts are waveguides, couplers, optical modulators, optical detectors and optical sources. These circuit elements have an important position in the optical integrated circuits. Therefore, based on the main figure of Plasmonic devices which is the is able to go beyond the diffraction limits, design, simulation and construction of such elements have a special attractiveness for the researchers. In this research first, a Plasmonic laser has studied by using AlGaAs/GaAs/AlGaAs structure is the GaAs layer that itself interest environment quantum well that analyzed by using the metamaterial Plasmonic layer.

**Keywords:** Plasmonic, surface Plasmon, metal-insulator-metal, Laser

## ۱- مقدمه

حفظ می کند. از جمله حوزه هایی که نیاز به بررسی و عملی سازی ساختارهای پلاسمونیک دارد ساخت لیزر های پلاسمونیک به منظور استفاده در مدارات مجتمع نوری است به طوری که زمینه ظهور پردازندگان تمام نوری مجتمع را فراهم آورد [۶].



شکل ۱: روند افزایش تعداد مقالات منتشر شده در زمینه پلاسمونیک سطحی

نخستین مشاهدات پلاسمون های سطحی در آزمایش وود در سال ۱۹۰۲ بود که برای بررسی بخورد نور به پراشه مشاهده شد. در طی بازتاب این آزمایش ها، باندهای باریکی مشاهده شد که آنها را ناهنجاری نامید. در سال ۱۹۰۷ با استفاده از اصل پراکندگی امواج الکترومغناطیسی برای این پدیده توجیحی پیدا شد، اما طبق این توجیهات، ناهنجاری های وود باید تنها در یک قطبش خاص (S) رخ می داد و لی نتایج آزمایش های بعدی نشان داد که این اثرات در قطبش مخالف (p) هم دیده می شود.

در سال ۱۹۴۱، فانو این اثرات را با تحریک موج های سطحی الکترومغناطیسی روی سطح فلزات توجیح کرد. که در سال ۱۹۵۷ پیش بینی در زمینه وجود نوسان های جمعی الکترون های سطح فلزات انجام شد که نقطه عطف نظریات پلاسمون های سطحی بود. در سال ۱۹۵۹ در پاره ای از آزمایشات وجود چنین تحریک هایی مشاهده شد. در سال ۱۹۶۰ واحد کوانتمومی این نوسان های الکترونی به پلاسمون های سطحی معروف شد. در اثر تلاش های انجام شده تحریک پلاسمون های سطحی عملی شد و در عمل پلاسمون های سطحی وارد دنیا ساختارهای نوری پر سرعت شدند. در اوخر دهه ۱۹۶۰، علاوه بر فیزیکدانان، محققان رشته های دیگر به این پدیده علاقه مند شدند و آن را وارد علوم دیگری چون حسگرهای زیستی مولکولی کردند. با دستیابی به فناوری تولید در ابعاد نانو جهش دیگری در اواسط دهه ۱۹۹۰ در این زمینه رخ داد. با توانایی برش در ابعاد نانو و کنترل این پدیده توسط شکل ظاهری ساختارها توجه گروههای زیادی به سمت این علم جلب شد. آخرین مورد مشاهدات مربوط به پلاسمون ها که نقطه عطفی در این زمینه را پدید آورد، مشاهده عبور قابل توجه نور از ورقه بسیار نازک طلا که حفره هایی با قطر ۱۵۰ نانومتر بود [۷].

در طی سال های متمادی از آغاز پیدایش نخستین لیزر تا به امروز همواره روندی برای کاهش بیشتر ابعاد لیزرها وجود داشته است. اختراع لیزر های نیمه هادی به طور اساسی روند و چهار چوب کوچک شدن ابعاد را متحول کردند و توسعه فناوری های جدید مانند: مخابرات فiber نوری، اسکن تصاویر، دیسک های فشرده، اسکنرهای بارکد، پرینترهای لیزری و سیستم های اندازه گیری دقیق را میسر نموده است.

امروزه تحقیقات در زمینه پلاسمونیک، بر روی مجتمع سازی قطعات پلاسمونیک برای کاربردهای مخابرات نوری و تبادل داده متمرکز شده اند. ایجاد چنین زمینه ای، حاصل بررسی قطعات پلاسمونیک جدیدی است که در سال های اخیر توسعه یافته اند. برخی از این قطعات موج براها، تزویج کننده ها، مدولاتورهای نوری، به همراه منابع نوری و آشکار سازهای نوری است. این عناصر مداری در مدارهای مجتمع نوری دارای جایگاه ویژه ای هستند. بنابراین با توجه به ویژگی اصلی علم پلاسمونیک که گذشتن از حد پراش نور در فشرده سازی عناصر و چیدمان آنها است، طراحی، شیوه سازی و ساخت عناصر پلاسمونیک برای محققان حوزه نور جذابیت های ویژه ای پیدا کرده است.

عامل محدود کننده ای که در این حوزه وجود دارد جذب نوری بالای است که در فلزات مشاهده می شود. غلبه بر این فاکتور تلفاتی عامل محركه بسیاری از تحقیقات این حوزه بوده است. برای غلبه بر این تلفات تحقیقات فراوانی صورت گرفته است که نتیجه آن افزایش درک رفتار فلزات و همچنین تولید موادی است که همانند فلزات رفتار پلاسمونیک از خود نشان می دهند اما میزان تلفات در آنها کمتر است. همچنین در طی این تحقیقات ساختارهایی نیز معرفی شده اند که با استفاده از آنها می توان بر تلفات پلاسمونیک غلبه کرد که نتیجه آن ساخت ادواتی کار آمدتر است.

پلاسمونیک و کاربردهای رنج گسترده ای را در بر می گیرد که شامل مدارات مجتمع نوری و ادوات مرتبط با پردازش تمام نوری، تحقیقات پژوهش کی مرتبه با تشخیص و درمان بیماری ها، ساخت ادوات بسیار دقیق جهت انجام تحقیقات اتمی و مولکولی و مسائل بسیاری از این دست می باشد. در سال های اخیر انتشار پلاسمون ها و پلاسمون پلاریتون ها در صفحات فلزی ساختار نانو توجه بسیاری را به خود جلب کرده است، به خصوص به دلیل خواص پاشندگی و پراش غیرعادی در آنها قابل پیش بینی است که پلاسمون ها در زمینه نانو تکنولوژی بر مباقی ساختارهای مشابه چیره شوند، در جایی که مخابرات نوری احتیاج به ابعاد پایین تر از طول موج دارد. این قضیه ثابت شده است که ساختارهای فلزی نانو در تصویربرداری ابعاد پایین و در پشت محدودیت های پراش کلاسیک بسیار خوب عمل می کند. حتی نشان داده شده است که در محدوده فرکانس های تراهنگز می توان امواج پلاسمونی سطحی را به صورت محلی تمرکز کرد این عمل با ایجاد کردن شیارهایی در روی سطح فلزی ایجاد خواهد شد [۱-۵].

## ۲- تاریخچه پلاسمونیک و لیزر های پلاسمونیک

پلاسمون واحد کوانتمومی موج های الکترومغناطیسی سطحی است که در مرز فلز و دی الکتریک ظاهر می شود و در راستای عمود بر فصل مشترک میرا است. این موج های الکترومغناطیسی سطحی در اثر انتقال میدان های الکترومغناطیسی به نوسان های پلاسمای الکترونی فلزات است. برخورد امواج به نحوه خاص به فلز منجر به تحریک پلاسمون های سطحی که از سطح فلز بازتاب می کند در فرکانس های خاص، کاهش قابل ملاحظه ای را خواهد داشت. پلاسمون های فوتون های کوپل شده و ذرات مشابه به نام پلاسمون های پلاریتون را ایجاد کنند. در شکل (۱) روند افزایش تعداد مقالات منتشر شده در حوزه تحقیقات پلاسمونیک و مربوط به پلاسمون های سطحی نشان داده شده است. مشاهده می شود که تعداد مقالات با رشدی صعودی در حال افزایش بوده و روندی که در مسیر نیاز به این دسته از ساختارهای کوچک مقیاس وجود دارد انگیزه لازم را برای تحقیقات در این حوزه را

فلزی در بر گرفته شده است. در سال های اخیر مطالعات تئوری دقیق و همچنین مطالعات عملی مربوط به این دسته از موجبرها انجام شده است. مطالعات متعدد نشان می دهد که در این نوع موجبر تضادی بین تلفات اپتیکی قابل قبول و اندازه مودهای کمتر از طول موج وجود دارد [۸].

## ۲- لیزرهای پلاسمونیک

لیزر به عنوان منبع تولید نور تکفام یکی از تاثیرگذارترین اختراقات قرن بیستم است که بدون آن بسیاری از پیشرفت‌ها در حوزه‌های صنعتی و مخابراتی امکان‌پذیر نبود. مطالعه حوزه روز به رشد نانو فوتونیک نیازمند لیزرهایی است که بتوانند فراتر از حد پراکندگی نور، تابش لیزری تولید کنند طوری که شاهد بهره‌برداری از قابلیت‌های حوزه نانو و ساخت ادواتی با قابلیت‌های منحصر بفرد باشیم. لیزرهای پلاسمونیک کلید حل این مشکل هستند که مکانیسم عملکرد آنها بر پایه استفاده از پلاسمون-پلاریتون‌های سطحی است که امکان انتقال انرژی در ابعادی فراتر از حد پراکندگی را فراهم می‌کنند. لیزرهای پلاسمونیک در رنج تراهنتر کارکرده و برای مدارات مجتمع نوری می‌توانند نقش مهمی را بازی کنند به این صورت که نور تولیدی از این لیزرهای به عنوان منبع سیگنال حامل برای مدولاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. داشتن ابعاد بسیار کوچک یکی از نکاتی است که محققان حوزه الکترونیک نوری را نسبت به تحقق ایده مدارات تمام نوری امیدوار نموده است. البته تا دستیابی به این هدف موانعی وجود دارد که باید برداشته شود. به عنوان نمونه یکی از مسایلی که کاربرد لیزرهای پلاسمونیک را با مشکل مواجه می‌کند این است که اغلب این ساختارها با تحریک نوری کار می‌کنند و برای قرار گرفتن در یک مدار مجتمع نوع تحریک باید به صورت الکتریکی باشد تا امکان پیاده‌سازی عملی آن وجود داشته باشد اما اضافه نمودن کنتاکت برای تحریک الکتریکی مشکلات عده‌های را ایجاد می‌کند که مهم‌ترین آنها تحت تاثیر قرار گرفتن لیزر و مکانیسم انتشار آن در اثر اضافه شدن کنتاکت می‌باشد [۹].

یکی از ساختارهای مورد استفاده در انتشار امواج پلاسمونیک ساختار فلز-عایق-فلز است که دسته‌بندی‌های دیگری مانند ساختار فلز-عایق-نیمه هادی-عایق-فلز نیز جزو همین دسته از موجبرها به حساب می‌آیند. این نوع موجبرهای پلاسمونیک امکان محصورسازی نور را در یک بعد فراهم می‌کنند نمونه شماتیک و عملی چنین ساختاری در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل ساختار بخش موجبر به صورت  $InP^1/InGaAs/InP$  است. ساختارهای چاه کوانتومی نیز که از لایه‌های متناوب دو نیمه هادی تشکیل شده‌اند را میتوان در این طبقه‌بندی قرار داد. البته ساختارهای چاه کوانتومی که از لایه‌های متناوب نیمه هادی با گاف انرژی متفاوت تشکیل شده نقش محیط بفره را برای لیزر نیز بر عهده دارند [۱۰].

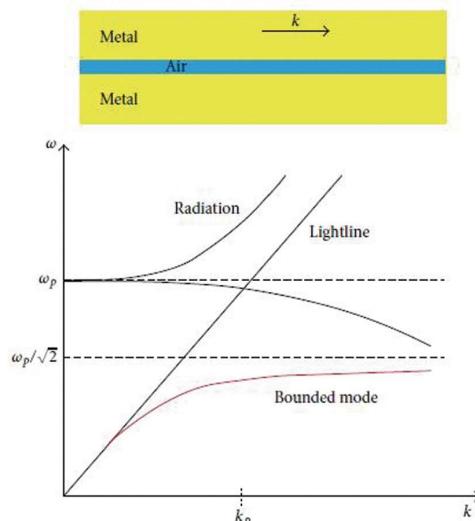
## ۱-۲- متامتریال

فراساده با متامتریال به ماده مرکبی گفته می‌شود که دارای خواص نامتعارف الکترومغناطیس در ساختار وجودی خود است. آنچه این مواد را غیر معمول کرده است، خاصیت ضریب شکست منفی نور در آنها است، به این معنا که این مواد نور را در جهت مخالف مواد عادی منکسر می‌کنند. مواد الکترومغناطیس تشکیل دهنده آنها می‌تواند با دستکاری مختصر و دقیق ساختارشان تنظیم شود. خواص نامتعارف این مواد سبب شده است از آنها در زمینه‌های مختلف استفاده شود از جمله آنها در کاربرد در موجبرها، جبران پاشندگی و اثرات غیرخطی است. این مواد در طبیعت وجود نداشته و در واقع با تکرار متناوب

در سال‌های اخیر تحقیقات در این حوزه سبب ساخت ادوات جدیدی از جمله لیزر دارای انتشار سطحی با کاواک عمودی، لیزرهای میکرودیسک و لیزرهای فوتونیک کریستال شده که برخی از آنها به صورت تجاری در دسترس هستند. هرچند کوچکسازی ابعاد امکان کاربرد در حوزه‌های متنوع کاربردی را ایجاد نموده اما هدف گذاری بعدی در این بخش این است که انقلابی در حوزه الکترونیک نوری ایجاد شود. در دهه گذشته سمت و سوی تحقیقات دانشگاهی به سمت توسعه لیزرهای نانو مقیاس قرار داشت با این هدف که بتوان از آنها در کاربرهای مانند چیپ‌های الکترونیک نوری و سنسورهای فوق حساس استفاده شود. یکی از شاخه‌های اساسی در این زمینه نانو سیم‌های نیمه‌هادی است. یک نیمه‌هادی شبیه یک بعدی که همزمان نقش محیط بهره و کاواک را بازی می‌کند و در برخی موارد قابلیت ذاتی برای عملکرد لیزری را دارا می‌باشد. این قابلیت در کنار توانایی تنظیم طول موج خروجی و همچنین امکان مجتمع سازی الکتریکی، لیزرهای نانو سیم را به عنوان کاندید برای استفاده در نسل آتی سیستم‌های الکترونیک نوری مطرح کرده است. ایده‌های نوین از جمله استفاده از فرامواد در حوزه‌ی پلاسمونیک یا طراحی و تولید نانو آنتن‌های نوری و لیزرهای بسیار باریک توجه بسیاری از پژوهشگران را به این زمینه جلب نموده است که می‌تواند دلیل گسترش در حوزه‌ی کاربردهای احتمالی در ساختارهای پر سرعت آینده باشد.

از موجبرهای پلاسمونیک می‌توان در مدارهای الکترونیکی و نوری به گونه‌ای استفاده کرد که با انتشار هم زمان امواج الکتریکی و نوری، اختلالی در انتقال داده هر یک از امواج وارد نشود. این خود باعث می‌شود که ظرفیت ارسال اطلاعات در مدارهای مجتمع بالا رود. از طرفی با پایین آوردن حد پراش، مدارهای مجتمع ساخته شده در حوزه پلاسمونیک خیلی فشرده‌تر از مدارهای مجتمع نوری خواهد بود و سرعت انتقال و سویچ در این مدارها افزایش می‌یابد.

یکی از ساختارهای ساده و در عین حال مهم برای موجبرهای پلاسمونیک ساختار فلز-عایق-فلز است که شکل شماتیک و منحنی پاشندگی آن در شکل (۲) رسم شده است. این ساختار همان‌طور که از نام آن مشخص است از دو لایه فلز و یک لایه دی الکتریک هوا یا غیر آن تشکیل شده است. دی الکتریک مربوطه به طور معمول دارای تلفات اپتیکی کم و ضریب شکست اندکی می‌باشد که توسط لایه‌های

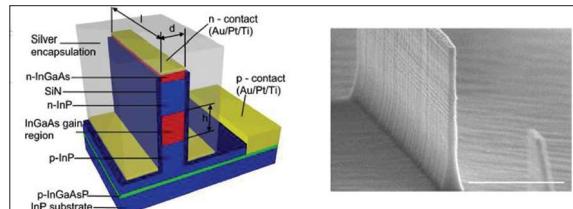


شکل ۲: شماتیک و منحنی‌های پاشندگی در ساختار فلز-عایق-فلز

نامیده می‌شود[۱۱].

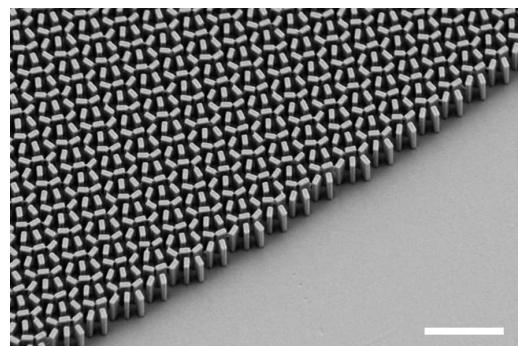
## ۲- ساختارهای چاه کوانتمومی

یکی از الزامات اساسی برای داشتن عملکرد لیزری داشتن محیط بهره است که مسیر فیدبک مثبت را نیز فراهم می‌کند و برای غلبه بر تلفات ساختار اساسی است. از جمله ساختارهایی که برای محیط بهره در لیزرهای پلاسمونیک مطرح شده ساختار چاه کوانتمومی است. چاه کوانتمومی در واقع یک چاه پتانسیل با سطوح انرژی منفصل است. در واقع این ساختارها امکان محصورسازی ذرات در این ساختارها وجود دارد زیرا تنها الکترون‌ها در ترازهای خاصی امکان حضور دارند و پیوستگی ترازهای انرژی وجود ندارد. در شکل (۶) نمونه‌ای از اتصال دو ماده نیمه هادی و تشکیل چاه کوانتمومی را مشاهده می‌کنید[۱۲].

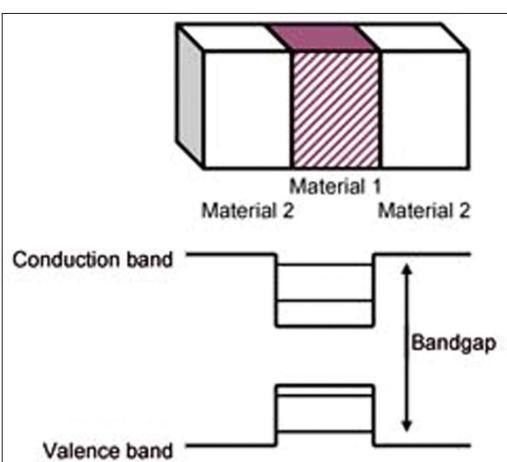


شکل ۳: تصویر شماتیک و تصویر میکروسکوپ الکترونی از یک لیزر پلاسمونیک با ساختار فلز-عایق فلز

مواد ساخته می‌شوند. در واقع هنگامی که یک ماده با تنابوی در حد چند نانومتر تکرار می‌شود مانند این است که سلول‌های یک ماده مصنوعی را تشکیل می‌دهد که خواص جالبی را در مواجه با امواج الکترومغناطیس از خود نشان می‌دهد. در شکل (۴) تصویر میکروسکوپی از یک متامتریال از جنس دی اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد که به عنوان لنز فوق نازک مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴: تصویر میکروسکوپی از یک متامتریال از جنس دی اکسید تیتانیوم



شکل ۵: تصویر شماتیک از ساختار و باند انرژی چاه کوانتمومی

به عنوان یکی از ساختارهای متداول برای محیط بهره به صورت چاه کوانتمومی می‌توان از ترکیب AlGaAs/GaAs/AlGaAs نام برد که شماتیک آن را در شکل (۷) مشاهده می‌کنید. گاف انرژی مربوط به GaAs در حدود ۱.۴۲ eV و گاف مربوط به Al0.3Ga0.7As به طور تقریبی ۱.۸ eV می‌باشد. این اختلاف گاف‌های انرژی که در واقع اختلاف بین ترازهای انرژی نوار هدایت و طرفیت است مطابق شکل (۶) چاه پتانسیلی را ایجاد می‌کند که از آن به چاه کوانتموم یاد می‌کنیم.

## ۲- ساختار لیزر پلاسمونیک

لیزر مورد بررسی دارای ساختاری به صورت شکل (۸) است[۱۳].

ضخامت لایه‌های مختلف به صورت جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱: ضخامت لایه‌های مختلف در ساختار لیزر چاه کوانتمومی چند کانه

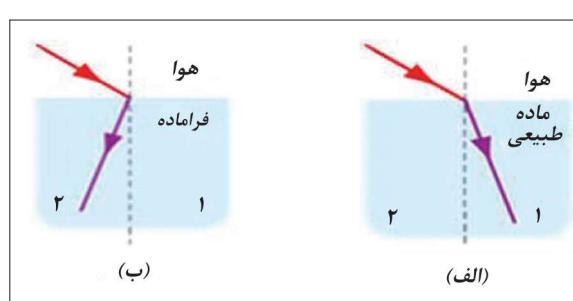
Au	Al0.3Ga0.7As	GaAs QW	Al0.3Ga0.7As	SiO2
100nm	20nm	متغیر	20nm	100nm

عرض ساختار متغیر بوده از ۱۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر متغیر است. بخش چاه کوانتمومی از لایه‌های متناوب Al0.3Ga0.7As و GaAs به ترتیب با ضخامت‌های ۱۰ و ۷ نانومتر تشکیل شده است.

برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار کامسول استفاده می‌کیم. با در نظر گرفتن ضریب شکست به صورت معادله (۱) که شامل دو بخش مدل حقیقی و موهومی است و هر بخش تابع فرکانس است هر بخش مدل شده و در نهایت می‌توان رفتار ساختار را بررسی نمود.

$$\bar{n} = n + k_i \quad (1)$$

هنگامی که نور از مرز یک ماده با ضریب شکست مثبت به متامتریال برخورد می‌نماید موج شکسته شده، در همان نیم صفحه و نسبت به خط عمود بر مرز دو محیط باقی می‌ماند، این حالت شکست منفی

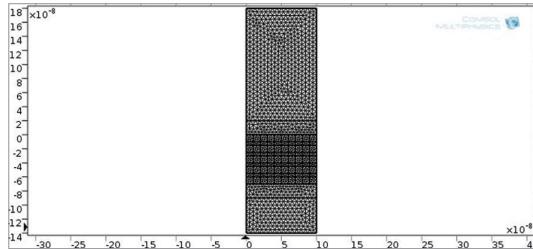


شکل ۵: شکست نور در مرز دو محیط: (الف) دو ماده با ضرائب شکست مثبت -

(ب) شکست منفی در مرز فراماده با هوا.

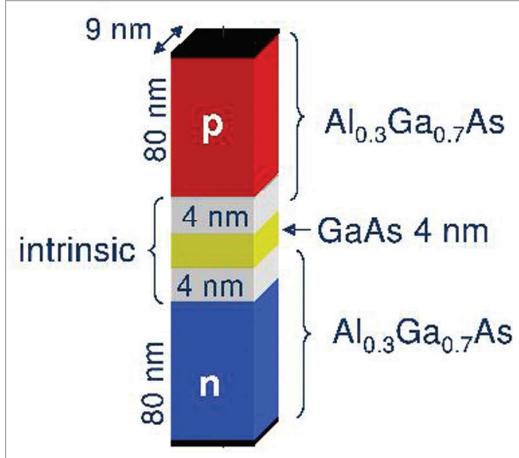
نانومتر آن را چاه کوانتمی چندگانه و ۱۰ نانومتر را هوا تشکیل می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابعاد بسیار کوچک‌تر از طول موج بوده و در عین حال بزرگ‌تر از ابعاد اتمی است یعنی همان تنابوی که بین تنابوب اتمی و تنابوب فوتونیک کریستالی قرار می‌گیرد و همان‌طور که گفتیم در اصطلاح متامتریال را شکل می‌دهد.

در شکل (۱۰) ساختار مش‌بندی شده با کامرسول نشان داده شده است.

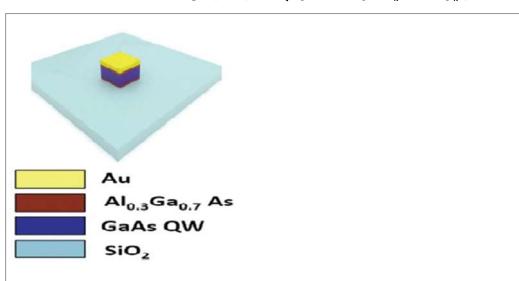


شکل ۱۰: ساختار مش‌بندی شده لیزر

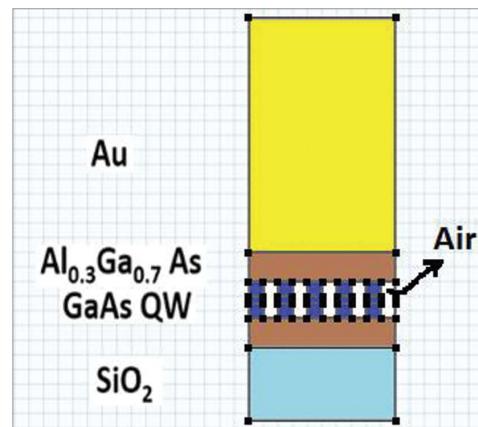
در اینجا برای مقایسه توان انتشار یافته میزان انرژی منتشر شده از ساختار متامتریال چاه کوانتمی شکل (۹) را با ساختار چاه کوانتمی پایه شکل (۸) مقایسه می‌کنیم. هر دو شکل به ازای عرض کل ۲۵۰ نانومتر رسم شده‌اند مشاهده می‌شود که در ساختار متامتریالی طول موج تشدید به سمت طول موج‌های بالاتر منتقل شده است (۸۹۷) نانومتر در برابر ۸۱۲ نانومتر ضمن اینکه انرژی در طول موج تشدید تقریباً شش برابر انرژی منتشر شده در حالت چاه کوانتمی بدون متامتریال است (۱۴۲) میکروزول در برابر ۲۴ میکروزول (۱۴).



شکل ۷: تصویر شماتیک از ساختار چاه کوانتمی



شکل ۸: ساختار لیزر پلاسمونیک



شکل ۹: ساختار لیزر پلاسمونیک چند چاه کوانتمی متامتریال

برای لحاظ کردن ضربی شکست به صورت رابطه‌ی بالا از مراجع مختلف اطلاعات هر یک از ترکیبات مورد نظر از جمله Al0.3Ga0.7As و SiO2 را به دست آورده و در مدل قرار می‌دهیم.

### ۱-۳ - لیزر پلاسمونیک چند چاه کوانتمی متامتریال

با توجه به ویژگی‌های متامتریال ترکیب ساختار چاه کوانتمی و متامتریال را در نظر گرفته شده است. ساختار این به صورت شکل (۹) می‌باشد. در اینجا به جای استفاده از یک چاه کوانتمی چند تایی از تعدادی از این مجموعه چاه‌های کوانتمی در کنار هم استفاده شده به طوری که در کنار هم یک ساختار متامتریال را تشکیل دهند. در واقع پایه اصلی تشکیل دهنده ساختار متامتریال در اینجا لایه‌های چاه کوانتمی و هوا هستند که به صورت متنابوب در کنار هم قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه در ساختار پایه شکل (۸) که عرض کاوک ۱۰۰ نانومتر بود در اینجا به ۵ لایه ۲۰ نانومتر تقسیم شده که

# انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران - شاخه خراسان

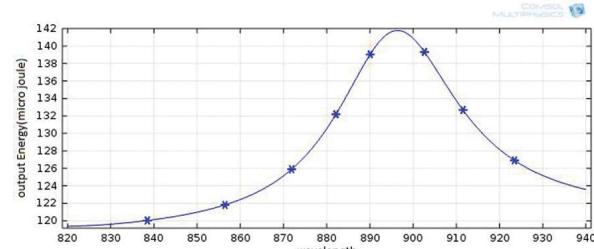
Khorasan Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers

همکاری علمی استادان گرامی و فرهیختگان ارجمند در داوری مقاله‌های نشریه علمی ترویجی عصر برق در سال ۱۳۹۹ که ثمره آن در غنای علمی و فنی مطالب منتشر شده بسیار موثر بوده است باعث خوشحالی و شایسته تقدیر است. امید است افتخار همراهی صاحب‌نظران و اندیشمندان گرامی باعث تداوم موققیت‌ها در ادامه راه باشد.

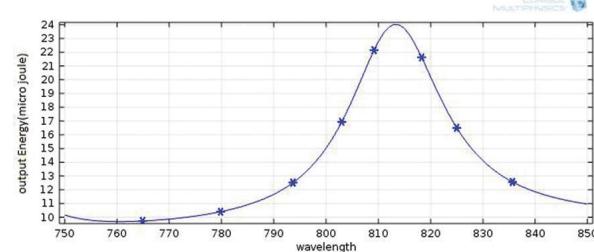
## با احترام و امتنان شورای سردبیری

- ۱- دکتر حسین ابوترابی زارچی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲- دکتر ایمان احمدی اخلاقی؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۳- دکتر نجمه اقبال؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۴- دکتر محمد رضا اکبرزاده توتونچی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۵- دکتر علیرضا اکبرزاده توتونچی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۶- دکتر امیر مسعود امینیان مدرس؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۷- دکتر رضا پخشی جعفر آبادی؛ شرکت دانش بنیان رهصان
- ۸- دکتر ناصر پیرز؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۹- مهندس علی توانایی چبارزاده؛ صنعت
- ۱۰- دکتر محمد باقر توکلی؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
- ۱۱- دکتر مسعود تمیوری؛ دانشگاه صنعتی ارومیه
- ۱۲- دکتر مهرداد حجت؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرورد
- ۱۳- دکتر سیمیه حسن پور دریان؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۱۴- مهندس مریم حسینی؛ دانشجوی دکترا دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۵- دکتر سید ابراهیم حسینی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۶- دکتر سید کمال حسینی تانی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۷- مهندس مهسا حمیدی؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۱۸- مهندس جواد حمیدی؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۱۹- دکتر جاوید خراسانی؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۲۰- دکتر محمود خطیبی؛ دانشگاه بین المللی امام رضا (ع)
- ۲۱- مهندس وحید خوشدل؛ دانشجوی دکترا دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۲- دکتر مصطفی رجی مشهدی؛ شرکت توانیر
- ۲۳- دکتر سید مجتبی روحانی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۴- دکتر جواد ساده؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۵- مهندس تکم شریفیان عطار؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۲۶- دکتر مهرداد شکوه صارمی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۷- مهندس حسن صادق پور مقدم؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۲۸- دکتر هادی صدوقی یزدی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۹- دکتر محمد طاهرزاده؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۰- دکتر محمد طلوع خیامی؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۳۱- دکتر منا عرب‌زاده؛ دانشگاه امیرکبیر
- ۳۲- دکتر امیر رضا عطاری؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۳- دکتر مهدی علومی بایگی؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۳۴- دکتر مصطفی عیدیانی؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۳۵- دکتر علی کارساز؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۳۶- دکتر عبدالله کامیاب؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۳۷- دکتر سید محمد سعید مجیدی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۸- دکتر هاشم مرتضوی؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۳۹- دکتر حامد ملا‌احمدیان؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۴۰- دکتر محمد منفرد؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴۱- دکتر میر مجتبی میرصالحی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴۲- مهندس حمیدرضا میریزدی؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۴۳- دکتر محسن نجفی؛ دانشگاه صنعتی اراک
- ۴۴- دکتر محمد حسن نشاطی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴۵- مهندس سیما نیک پیور؛ دانشجوی دکترا دانشگاه صنعتی سهند
- ۴۶- دکتر قوشہ عابد هدتی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴۷- دکتر منیره هوشمدد؛ دانشگاه بین المللی امام رضا (ع)
- ۴۸- مهندس داریوش بزدان‌پناه؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۴۹- دکتر حمید یعقوبی؛ دانشگاه سمنان

\*\*\*



شکل ۱۱: منحنی انرژی تابشی بر حسب طول موج به ازای عرض کاوک  
نانومتر در ساختار ماتماتریالی



شکل ۱۲: منحنی انرژی تابشی بر حسب طول موج به ازای عرض کاوک  
نانومتر در ساختار پایه

بیدامی کند که معنی آن این است که طول موج روزانه سهم بیشتری از انرژی کل خروجی را به خود اختصاص می‌دهد.

## مراجع

- [1] Smalley.J.S.T, Vallini.F, GU.Q, Fainman.Y, "Amplification and Lasing of Plasmonic Modes". Proceedings of the IEEE.Vol. 104, No. 12, pp. 1-12, 2016.
- [2] Filmetrics, Online. www.Filmetrics.com , 2017.
- [3] Young Joon Yoo, Sanghyun Ju, Sang Yoon Park, "Metamaterial Absorber for Electromagnetic Waves in Periodic Water Droplets", www.nature.com, pp. 1-7, 2015.
- [4] Yuchu He; George V. Eleftheriades, "Extreme-angle metamaterial-based anti-reflection layer", IEEE Microwave, pp. 1-6, 2017.
- [5] Romain Fleury, Francesco Monticone, "Invisibility and Cloaking: Origins, Present, and Future Perspectives", American Physical Society, pp. 037001-037020, 2015.
- [6] Z. Jacob, J.-Y. Kim, G. V. Naik, A. Boltasseva, E. E. Narimanov, and V. M. Shalaev, "Engineering photonic density of states using metamaterials", www.springer.com, Appl. Phys, pp. 215-218, 2010.
- [7] Smalley.J.S.T, Vallini.F, GU.Q, Fainman.Y, "Amplification and Lasing of Plasmonic Modes". Proceedings of the IEEE.Vol. 104, No. 12, 2016.
- [8] Alam.M.Z, Aitchison.J.S, Mojahedi.M, "A marriage of convenience: Hybridization of surface Plasmon and dielectric waveguide modes". onlinelibrary.wiley.com, Laser Photonics Rev, vol. 8, No. 3, pp. 394–408, 2014.
- [9] H.Ben salah, A.Hocini, M.N.Temmar, D.Khedrouche, "Design of mid infrared high sensitive metal-insulator-metal plasmonic sensor", Chinese Volume 61, pp. 86-97, 2019.
- [10] Mengyuan Zhang, Zhiguo Wang, "Analytical method for metal-insulator-metal surface plasmon polaritons waveguide networks", Optics Express, Vol. 27, Issue 1, pp. 303-321, 2019.
- [11] Mohammad Reza Ghasemi, Bayati, "Proposal for metal-insulator–metal plasmonic power splitter and demultiplexer suitable for implementation in optical switches", IET Optoelectron, pp. 1-7, 2021.
- [12] Lokendra Singh.Guo Zhu.G.Mohan Kumar, D.Revathi, Prakash Pareek , "Numerical simulation of all-optical logic functions at micrometer scale by using plasmonic Metal-Insulator-Metal (MIM) waveguides", science direct , Optics Volume, 135, pp. 1-9, 2021.
- [13] Shiva Khani.Mohammad Danaie, Pejman Rezaei, "Plasmonic all-optical metal–insulator–metal switches based on silver nano-rods, comprehensive theoretical analysis and design guidelines", springer journal of volume 20, pp. 442–457, 2021.

\*\*\*



فصل نامه

علمی