

مقاله علمی-ترویجی

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

حمید دهقانی، گروه برق، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران، hamid01386@gmail.com

علیرضا کریمی<sup>\*</sup>، گروه برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، ar.karimi@iaushiraz.ac.ir

<sup>\*</sup>نویسنده مسوول

### چکیده

امروزه تحقیقات در زمینه پلاسمونیک، بر روی مجتمع سازی قطعات پلاسمونیک برای کاربردهای مخابرات نوری و تبادل داده متمرکز شده‌اند. ایجاد چنین زمینه ای، حاصل بررسی قطعات پلاسمونیک جدیدی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند. برخی از این قطعات؛ موجرها، 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 گذشتن از حد شکست نور در فشرده سازی 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  $\text{AlGaAs/GaAs/AlGaAs}$  مورد بررسی قرار گرفته که خود لایه  $\text{GaAs}$  به صورت چاه کوانتومی محیط بهره را ایجاد نموده است که با بهره‌گیری از ساختار منامتریال 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<sup>\*</sup>, Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, ar.karimi@iaushiraz.ac.ir

<sup>\*</sup>Corresponding author

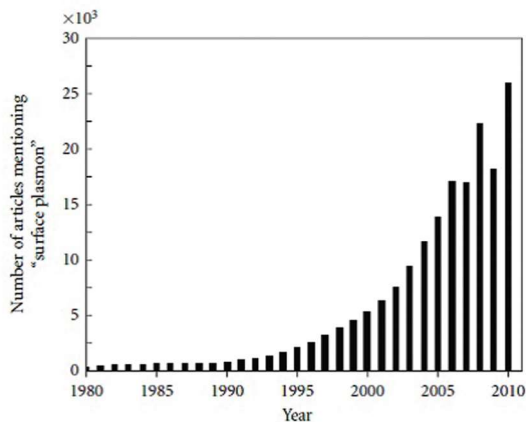
### Abstract

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  $\text{AlGaAs/GaAs/AlGaAs}$  structure is the  $\text{GaAs}$  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 می‌کند. از جمله حوزه‌هایی که نیاز به بررسی و عملی‌سازی ساختارهای پلاسمونیک دارد ساخت لیزرهای پلاسمونیک به منظور استفاده در مدارات مجتمع نوری است به طوری که زمینه ظهور پردازنده‌های تمام نوری مجتمع را فراهم آورد [۶].



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

نخستین مشاهدات پلاسمون‌های سطحی در آزمایش وود در سال ۱۹۰۲ بود که برای بررسی برخورد نور به پراشه انجام شد. در طیف بازتاب این آزمایش‌ها، 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 توجیحات، ناهنجاری‌های وود باید تنها در یک قطبش خاص (S) رخ می‌داد ولی نتایج آزمایش‌های بعدی نشان داد که این اثرات در قطبش مخالف (P) هم دیده می‌شود.

در سال ۱۹۴۱، فانو این اثرات را با تحریک موج‌های سطحی الکترومغناطیسی روی سطح فلزات توجیح کرد. که در سال ۱۹۵۷ پیش‌بینی در زمینه وجود نوسان‌های جمعی الکترون‌های سطح فلزات انجام شد که نقطه عطف نظریات پلاسمون‌های سطحی بود. در سال ۱۹۵۹ در پاره‌ای از آزمایشات وجود چنین تحریک‌هایی مشاهده شد. در سال ۱۹۶۰ واحد کوانتومی این نوسان‌های الکترونی به پلاسمون‌های سطحی معروف شد. در اثر تلاش‌های انجام شده تحریک پلاسمون‌های سطحی عملی شد و در عمل پلاسمون‌های سطحی وارد دنیا ساختارهای نوری پر سرعت شدند. در اواخر دهه ۱۹۶۰، علاوه بر فیزیکدانان، محققان رشته‌های دیگر به این پدیده علاقه‌مند 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 پلاسمون‌ها که نقطه عطفی در این زمینه را پدید آورد، مشاهده عبور قابل توجه نور از ورقه بسیار نازک طلا که حفره‌هایی با قطر ۱۵۰ نانومتر بود [۷].

در طی سال‌های متمادی از آغاز پیدایش نخستین لیزر تا به امروز همواره روندی برای کاهش بیشتر ابعاد لیزرها وجود داشته است. اختراع لیزرهای نیمه هادی به‌طور اساسی روند و چهارچوب کوچک شدن ابعاد را متحول کردند و توسعه فناوری‌های جدید مانند: مخابرات فیبر نوری، اسکن تصاویر، دیسک‌های فشرده، اسکنرهای بارکد، پرینترهای لیزری و سیستم‌های اندازه‌گیری دقیق را میسر نموده است.

امروزه تحقیقات در زمینه پلاسمونیک، بر روی مجتمع‌سازی قطعات پلاسمونیک برای کاربردهای مخابرات نوری و تبادل داده متمرکز شده‌اند. ایجاد چنین زمینه‌ای، حاصل بررسی قطعات پلاسمونیک جدیدی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند. برخی از این قطعات موجبرها، تزویج‌کننده‌ها، مدولاتورهای نوری، به همراه منابع نوری و آشکارسازهای نوری است. این عناصر مداری در مدارهای مجتمع نوری دارای جایگاه ویژه‌ای هستند. بنابراین با توجه به ویژگی اصلی علم پلاسمونیک که گذشتن از حد پراش نور در فشرده‌سازی عناصر و چیدمان آنها است، طراحی، شبیه‌سازی و ساخت عناصر پلاسمونیک برای محققان حوزه نور جذابیت‌های ویژه‌ای پیدا کرده است.

عامل محدود کننده‌ای که در این حوزه وجود دارد جذب نوری بالایی است که در فلزات مشاهده می‌شود. غلبه بر این فاکتور تلفاتی عامل محرکه 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 می‌دهند اما میزان تلفات در آنها کمتر است. همچنین در طی این تحقیقات ساختارهایی نیز معرفی شده‌اند که با استفاده از آنها می‌توان بر تلفات پلاسمونیک غلبه کرد که نتیجه آن ساخت ادواتی کارآمدتر است.

پلاسمونیک و کاربردهای رنج گسترده‌ای را در بر می‌گیرد که شامل مدارات مجتمع نوری و ادوات مرتبط با پردازش تمام نوری، تحقیقات پزشکی مرتبط با تشخیص و درمان بیماری‌ها، ساخت ادوات بسیار دقیق جهت انجام تحقیقات اتمی و مولکولی و مسایل بسیاری از این دست می‌باشد. در سال‌های اخیر انتشار پلاسمون‌ها و پلاسمون پلاریتون‌ها در صفحات فلزی ساختار نانو توجه بسیاری را به خود جلب کرده است، به‌خصوص به دلیل خواص پاشندگی و پراش غیرعادی در آنها قابل پیش‌بینی است که پلاسمون‌ها در زمینه نانو تکنولوژی بر مابقی ساختارهای مشابه چیره شوند، در جایی که مخابرات نوری احتیاج به ابعاد پایین‌تر از طول موج دارد. این قضیه ثابت شده است که ساختارهای فلزی نانو در تصویربرداری ابعاد پایین و در پشت محدودیت‌های پراش کلاسیک بسیار خوب عمل می‌کند. حتی نشان داده شده است که در محدوده فرکانس‌های تراهرتز می‌توان امواج پلاسمونی سطحی را به‌صورت محلی متمرکز کرد این عمل با ایجاد کردن شیاری در روی سطح فلزی ایجاد خواهد شد [۵-۱].

## ۱-۲- تاریخچه پلاسمونیک و لیزرهای پلاسمونیک

پلاسمون واحد کوانتومی موج‌های الکترومغناطیسی سطحی است که در مرز فلز و دی‌الکتریک ظاهر می‌شود و در راستای عمود بر فصل مشترک میرا است. این موج‌های الکترومغناطیسی سطحی در اثر انتقال میدان‌های الکترومغناطیسی به نوسان‌های پلاسمای الکترونی فلزات است. برخورد امواج به نحوه خاص به فلز منجر به تحریک پلاسمون‌ها می‌شود و در نتیجه نوری که از سطح فلز بازتاب می‌کند در فرکانس‌های خاص، کاهش قابل ملاحظه‌ای را خواهد داشت. پلاسمون‌ها می‌توانند با فوتون‌ها کوپل شده و ذرات مشابه به نام پلاسمون‌های پلاریتون را ایجاد کنند.

در شکل (۱) روند افزایش تعداد مقالات منتشر شده در حوزه تحقیقات پلاسمونیک و مربوط به پلاسمون‌های سطحی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود 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 موده های کمتر از طول موج وجود دارد [۸].

## ۲- لیزرهای پلاسمونیک

لیزر به عنوان منبع تولید نور تکفام یکی از تاثیرگذارترین اختراعات قرن بیستم است که بدون آن بسیاری از پیشرفت ها در حوزه های صنعتی و مخابراتی امکان پذیر نبود. مطالعه حوزه رو به رشد نانو فوتونیک نیازمند لیزرهایی است که بتوانند فراتر از حد پراکندگی نور، تابش لیزری تولید کنند طوری که شاهد بهره برداری از قابلیت های حوزه نانو و ساخت ادواتی با قابلیت های منحصر بفرد باشیم. لیزرهای پلاسمونیک کلید حل این مشکل هستند که مکانیسم عملکرد آنها بر پایه استفاده از پلاسمون-پلاریتون های سطحی است که امکان انتقال انرژی در ابعادی فراتر از حد پراکندگی را فراهم می کنند. لیزرهای پلاسمونیک در رنج تراهرتز کار کرده و برای مدارات مجتمع نوری می توانند نقش مهمی را بازی کنند به این صورت که نور تولیدی از این لیزرها به عنوان منبع سیگنال حامل برای مدولاسیون مورد استفاده قرار می گیرد. 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 می کند این است که اغلب این ساختارها با تحریک نوری کار می کنند و برای قرار گرفتن در یک مدار مجتمع نوع تحریک باید به صورت الکتریکی باشد تا امکان پیاده سازی عملی آن وجود داشته باشد اما اضافه نمودن کنتاکت برای تحریک الکتریکی مشکلات عمده ای را ایجاد می کند که مهم ترین آنها تحت تاثیر قرار گرفتن لیزر و مکانیسم انتشار آن در اثر اضافه شدن کنتاکت می باشد [۹].

یکی از ساختارهای مورد استفاده در انتشار امواج پلاسمونیک ساختار فلز-عایق-فلز است که دسته بندی های دیگری مانند ساختار فلز-عایق-نیمه هادی-عایق-فلز نیز جزو همین دسته از موجبرها به حساب می آیند. این نوع موجبرهای پلاسمونیک امکان محصورسازی نور را در یک بعد فراهم می کنند نمونه شماتیک و عملی چنین ساختاری در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل ساختار بخش موجبر به صورت  $\text{InP}/\text{InGaAs}/\text{InP}$  است. ساختارهای چاه کوانتومی نیز که از لایه های متناوب دو نیمه هادی تشکیل شده اند را میتوان در این طبقه بندی قرار داد. البته ساختارهای چاه کوانتومی که از لایه های متناوب نیمه هادی با گاف انرژی متفاوت تشکیل شده نقش محیط بهره را برای لیزر نیز بر عهده دارند [۱۰].

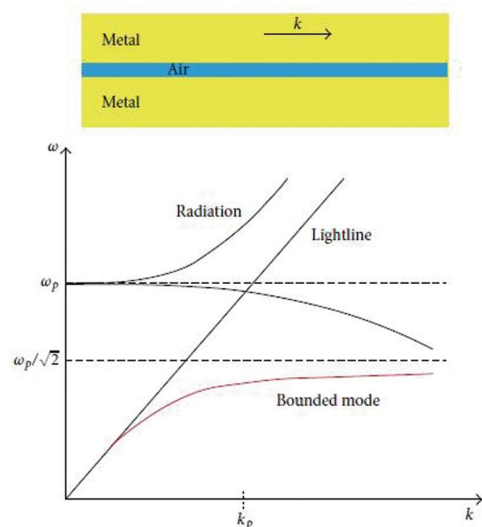
## ۲-۱- متامتریال

فراماده یا متامتریال به ماده مرکبی گفته می شود 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 می کنند. مواد الکترومغناطیس تشکیل دهنده آنها می تواند با دستکاری مختصر و دقیق ساختارشان تنظیم شود. خواص نامتعارف این مواد سبب شده است از آنها در زمینه های مختلف استفاده شود از جمله آنها در کاربرد در موجبرها، جبران پاشندگی و اثرات غیر خطی است. این مواد در طبیعت وجود نداشته و در واقع با تکرار متناوب

در سال های اخیر تحقیقات در این حوزه سبب ساخت ادوات جدیدی از جمله لیزر دارای انتشار سطحی با کاواک عمودی، لیزرهای میکروودیسک و لیزرهای فوتونیک کریستال شده که برخی از آنها به صورت تجاری در دسترس هستند. هر چند کوچک سازی ابعاد امکان کاربرد در حوزه های 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 کاربرهایی مانند چیپ های الکترونیک نوری و سنسورهای فوق حساس استفاده شود. یکی از شاخه های اساسی در این زمینه نانو سیم های نیمه هادی است. یک نیمه هادی شبه یک بعدی که همزمان نقش محیط بهره و کاواک را بازی می کند و در برخی موارد قابلیت ذاتی برای عملکرد لیزری را دارا می باشد. 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 سیستم های الکترونیک نوری مطرح کرده است. ایده های نوین از جمله استفاده از فرامواد در حوزه ی پلاسمونیک و یا طراحی و تولید نانو آنتن های نوری و لیزرهای بسیار باریک توجه بسیاری از پژوهشگران را به این زمینه جلب نموده است که می تواند دلیل گسترش در حوزه ی کاربردهای احتمالی در ساختارهای پر سرعت آینده باشد.

از موجبرهای پلاسمونیک می توان در مدارهای الکترونیک و نوری به گونه ای استفاده کرد که با انتشار هم زمان امواج الکتریکی و نوری، اختلالی در انتقال داده هر یک از امواج وارد نشود. این خود باعث می شود که ظرفیت ارسال اطلاعات در مدارهای مجتمع بالا رود. از طرفی با پایین آوردن حد پراش، مدارهای مجتمع ساخته شده در حوزه پلاسمونیک خیلی فشرده تر از مدارهای مجتمع نوری خواهد بود و سرعت انتقال و سوچ در این مدارها افزایش می یابد.

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 همان طور 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 می باشد که توسط لایه های

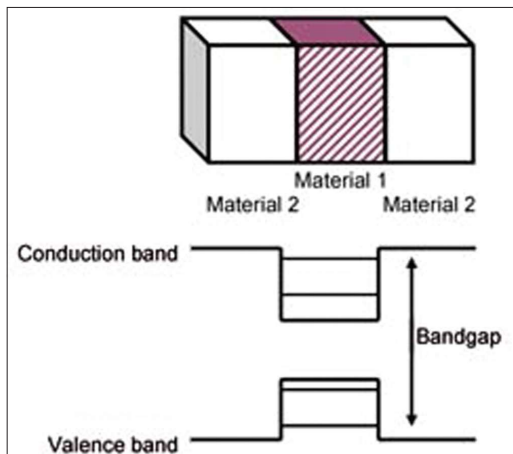


شکل ۲: شماتیک و منحنی های پاشندگی در ساختار فلز-عایق-فلز

نامیده می‌شود [۱۱].

## ۲-۲- ساختارهای چاه کوانتومی

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 پلاسماونیک مطرح شده ساختار چاه کوانتومی است. چاه کوانتومی 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 کوانتومی را مشاهده می‌کنید [۱۲].



شکل ۶: تصویر شماتیک از ساختار و باند انرژی چاه کوانتومی

به‌عنوان یکی از ساختارهای متداول برای محیط بهره به صورت چاه کوانتوم می‌توان از ترکیب  $\text{AlGaAs/GaAs/AlGaAs}$  نام برد که شماتیک آن را در شکل (۷) مشاهده می‌کنید. گاف انرژی مربوط به  $\text{GaAs}$  در حدود  $1.42 \text{ eV}$  و گاف مربوط به  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  به‌طور تقریبی  $1.8 \text{ eV}$  می‌باشد. این اختلاف گاف‌های انرژی که در واقع اختلاف بین ترازهای انرژی نوار هدایت و ظرفیت است مطابق شکل (۶) چاه پتانسیلی را ایجاد می‌کند که از آن به چاه کوانتوم یاد می‌کنیم.

## ۳- ساختار لیزر پلاسماونیک

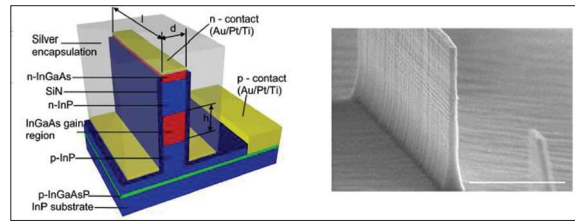
لیزر مورد بررسی دارای ساختاری به صورت شکل (۸) است [۱۳]. ضخامت لایه‌های مختلف به صورت جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱: ضخامت لایه‌های مختلف در ساختار لیزر چاه کوانتومی چند گانه

Au	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	GaAs QW	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	$\text{SiO}_2$
100nm	20nm	متغیر	20nm	100nm

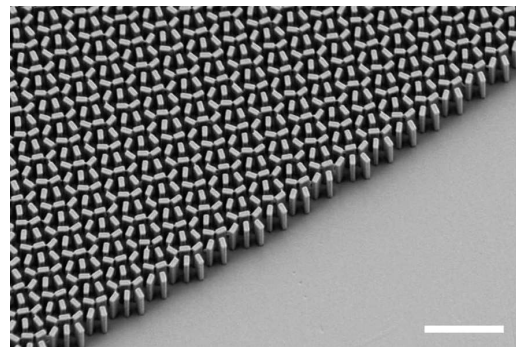
عرض ساختار متغیر بوده از  $100$  تا  $700$  نانومتر متغیر است. بخش چاه کوانتومی از لایه‌های متناوب  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  و  $\text{GaAs}$  به ترتیب با ضخامت‌های  $10$  و  $7$  نانومتر تشکیل شده است. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار کامسول استفاده می‌کنیم. با در نظر گرفتن ضریب شکست به‌صورت معادله (۱) که شامل دو بخش حقیقی و موهومی است و هر بخش تابع فرکانس است هر بخش مدل شده و در نهایت می‌توان رفتار ساختار را بررسی نمود.

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



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

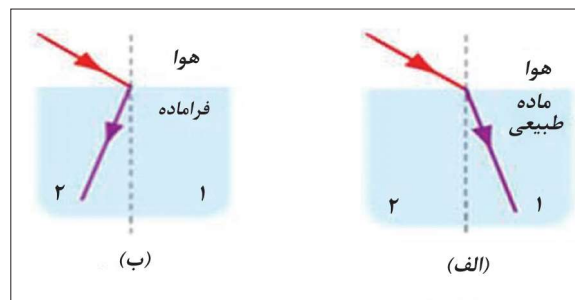
مواد ساخته می‌شوند. در واقع هنگامی که یک ماده با تناوبی در حد چند نانومتر تکرار می‌شود مانند این است که سلول‌های یک ماده مصنوعی را تشکیل می‌دهد که خواص جالبی را در مواجهه با امواج الکترومغناطیس از خود نشان می‌دهد. در شکل (۴) تصویر میکروسکوپی از یک متامتریال از جنس دی اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد که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



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

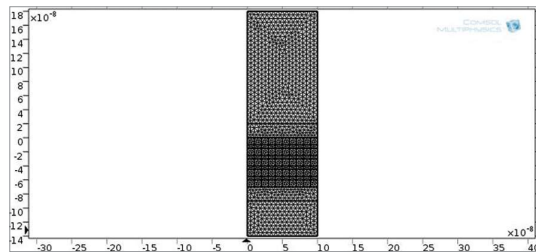
در شکل (۵) نحوه رفتار پرتو نوری پس از عبور از یک ماده طبیعی و عملکرد آن پس از عبور از یک متامتریال نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پرتو نور در متامتریال بر خلاف آنچه در مواد طبیعی مشاهده می‌کنیم به سمت داخل منحرف شده است در تمام موادی که در طبیعت یافت می‌شوند پرتوی وارد شده به محیط دوم از سطح مشترک، به‌گونه‌ای منحرف می‌شود که در نیم صفحه دوم قرار گیرد، که در شکل (۵-الف) نیز مشاهده می‌شود که این مورد توسط رابطه اسنل به سادگی قابل توجیه است و دلیل آن مثبت بودن ضرایب شکست محیط‌ها می‌باشد.

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 ضرایب شکست مثبت - (ب) شکست منفی در مرز فراماده با هوا.

نانومتر آن را چاه کوانتومی 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 تناوبی که بین تناوب اتمی و تناوب فتونیک کریستالی قرار می‌گیرد و همان‌طور که گفتیم در اصطلاح تمامتریال را شکل می‌دهد. در شکل (۱۰) ساختار مش‌بندی شده با کامسول نشان داده شده است.



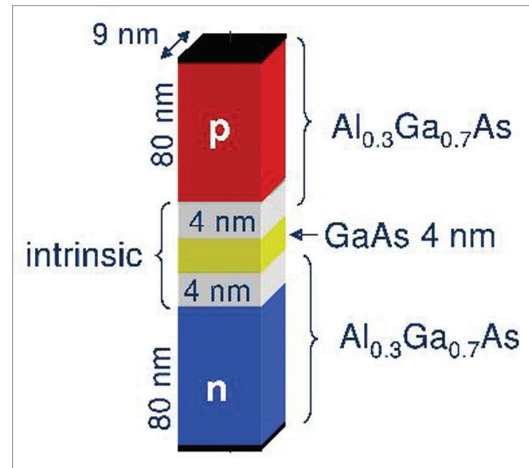
شکل ۱۰: ساختار مش‌بندی شده لیزر

در اینجا برای مقایسه توان انتشار یافته میزان انرژی منتشر شده از ساختار تمامتریال چاه کوانتومی شکل (۹) را با ساختار چاه کوانتومی پایه شکل (۸) مقایسه می‌کنیم. هر دو شکل به ازای عرض کل ۲۵۰ نانومتر رسم شده‌اند مشاهده می‌شود که در ساختار تمامتریالی 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 کوانتومی بدون تمامتریال است (۱۴۲ میکروژول در برابر ۲۴ میکروژول) [۱۴].

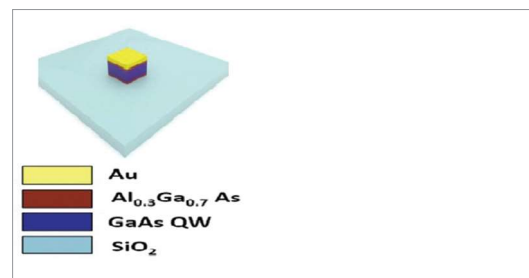
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله لیزر پلاسمونیک مبتنی بر چاه کوانتومی تمامتریال مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. ساختارهای پلاسمونیک با توجه به ابعاد بسیار ریز و توانایی محصورسازی نور در ابعاد کوچک‌تر از طول موج کاربردهای بالفعل و بالقوه متعددی را در حوزه‌های مختلف ایجاد نموده است. بررسی تئوری ساختارهای پلاسمونیک و شبیه‌سازی آنها در کنار آزمایش‌های عملی آنها اهمیت زیادی دارد زیرا می‌تواند راهکارهای نوینی را برای غلبه بر چالش‌های روی این شاخه از دانش در اختیار پژوهشگر قرار دهد. نرم‌افزار کامسول که یک نرم‌افزار مالتی‌فیزیک است جزو ابزارهای تحلیلی قدرتمندی است که در حوزه گسترده‌ای از مسایل از جمله ساختارهای پلاسمونیک و تمامتریال‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله ابتدا با توجه به نتایج یکی از مقالات در زمینه لیزرهای پلاسمونیک، که برای کاربرد در حوزه اپتیک و مدارات مجتمع نوری تمرکز نموده است که پس از اطمینان از درستی روند تحلیل و مدلسازی و بدست آوردن دید بهتر از روند عملکرد مطرح شده با ساختارهای تمامتریال پرداخته و با نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی نمودیم.

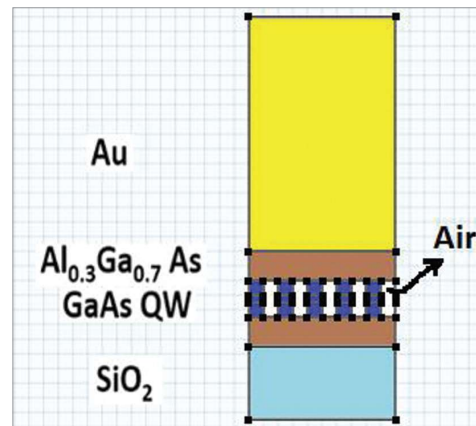
مدل‌سازی لایه‌های موجود بر پایه اطلاعاتی که از مراجع مختلف به‌دست آمده انجام شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که انرژی طیف تشعشعی لیزر پلاسمونیک در این حالت چندین برابر حالتی است که ساختار تمامتریالی وجود ندارد. با افزایش عرض کاواک طول موج رزونانسی منتشر شده از ساختار افزایش می‌یابد اما انرژی مربوط به طول موج رزونانس به‌طور تقریبی ثابت می‌ماند. همچنین با کاهش تعداد چاه‌هایی کوانتومی طول موج منتشر شده به‌طور تقریبی ثابت می‌ماند اما انرژی آن کاهش پیدا می‌کند. با ثابت نگه داشتن نسبت عرض کاواک به ارتفاع ضریب کیفیت با افزایش عرض کاواک افزایش



شکل ۷: تصویر شماتیک از ساختار چاه کوانتومی AlGaAs/GaAs/AlGaAs



شکل ۸: ساختار لیزر پلاسمونیک



شکل ۹: ساختار لیزر پلاسمونیک چند چاه کوانتومی تمامتریال

برای لحاظ کردن ضریب شکست به‌صورت رابطی بالا از مراجع مختلف اطلاعات هر یک از ترکیبات مورد نظر از جمله GaAs،  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  و  $SiO_2$  را به‌دست آورده و در مدل قرار می‌دهیم.

#### ۳-۱- لیزر پلاسمونیک چند چاه کوانتومی تمامتریال

با توجه به ویژگی‌های تمامتریال ترکیب ساختار چاه کوانتومی و تمامتریال را در نظر گرفته شده است. ساختار این به‌صورت شکل (۹) می‌باشد. در اینجا به‌جای استفاده از یک چاه کوانتومی چند تایی از تعدادی از این مجموعه چاه‌های کوانتومی در کنار هم استفاده شده به‌طوری که در کنار هم یک ساختار تمامتریال را تشکیل دهند. در واقع پایه اصلی تشکیل دهنده ساختار تمامتریال در اینجا لایه‌های چاه کوانتومی و هوا هستند که به صورت متناوب در کنار هم قرار گرفته‌اند. به‌عنوان نمونه در ساختار پایه شکل (۸) که عرض کاواک ۱۰۰ نانومتر بود در اینجا به ۵ لایه ۲۰ نانومتر تقسیم شده که ۱۰

## انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران - شاخه خراسان

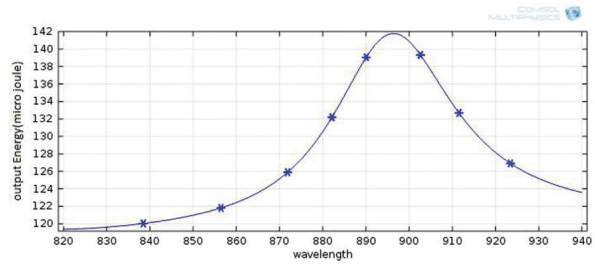
Khorasan Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers

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 موفقیت‌ها در ادامه راه باشد.

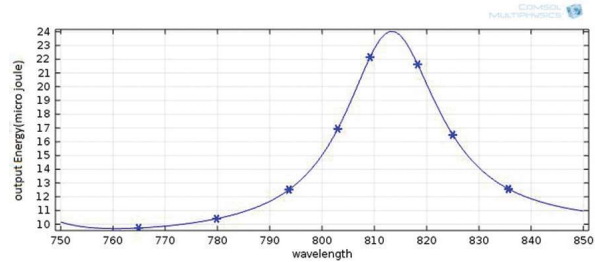
با احترام و امتنان  
شورای سردبیری

- ۱- دکتر حسین ایوب‌زایی زارچی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲- دکتر ایمان احدی اخلاقی؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۳- دکتر نجمه اقبال؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۴- دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۵- دکتر علیرضا اکبرزاده توتونچی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۶- دکتر امیرمسعود امینیان مدرس؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۷- دکتر رضا بخشی جعفرآبادی؛ شرکت دانش بنیان رھسان
- ۸- دکتر ناصر پریز؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۹- مهندس علی توانایی جبارزاده؛ صنعت
- ۱۰- دکتر محمد باقر توکلی؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
- ۱۱- دکتر مسعود تیموری؛ دانشگاه صنعتی ارومیه
- ۱۲- دکتر مهرداد حجت؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود
- ۱۳- دکتر سمیه حسن پور دربان؛ دانشگاه صنعتی سجاد
- ۱۴- مهندس مریم حسینی؛ دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۵- دکتر سید ابراهیم حسینی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۶- دکتر سید کمال حسینی ثانی؛ 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 بین‌المللی امام رضا (ع)
- ۲۱- مهندس وحید خوشدل؛ دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۲- دکتر مصطفی رجبی مشهدی؛ شرکت توانیر
- ۲۳- دکتر سید مجتبی روحانی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۴- دکتر جواد ساده؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲۵- مهندس تکتم 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 امیررضا عطاری؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳۳- دکتر مهدی علومی باگی؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۳۴- دکتر مصطفی عیدپانی؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۳۵- دکتر علی کارساز؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
- ۳۶- دکتر عبدالاله کامیاب؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۳۷- دکتر سید محمد سعید ماجدی؛ 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 میرمجتبی 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 نیک‌پور؛ دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی سهند
- ۴۶- دکتر قوشه عابد هدتنی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴۷- دکتر منیره هوشمند؛ دانشگاه بین‌المللی امام رضا (ع)
- ۴۸- مهندس داریوش یزدان‌پناه؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
- ۴۹- دکتر حمید یعقوبی؛ دانشگاه سمنان

\*\*\*



شکل ۱۱: منحنی انرژی تابشی بر حسب طول موج به ازای عرض کاواک ۲۵۰ نانومتر در ساختار متامتریالی



شکل ۱۲: منحنی انرژی تابشی بر حسب طول موج به ازای عرض کاواک ۲۵۰ نانومتر در ساختار پایه

پیدا می‌کند که معنی آن این است که طول موج رزونانس 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.

\*\*\*