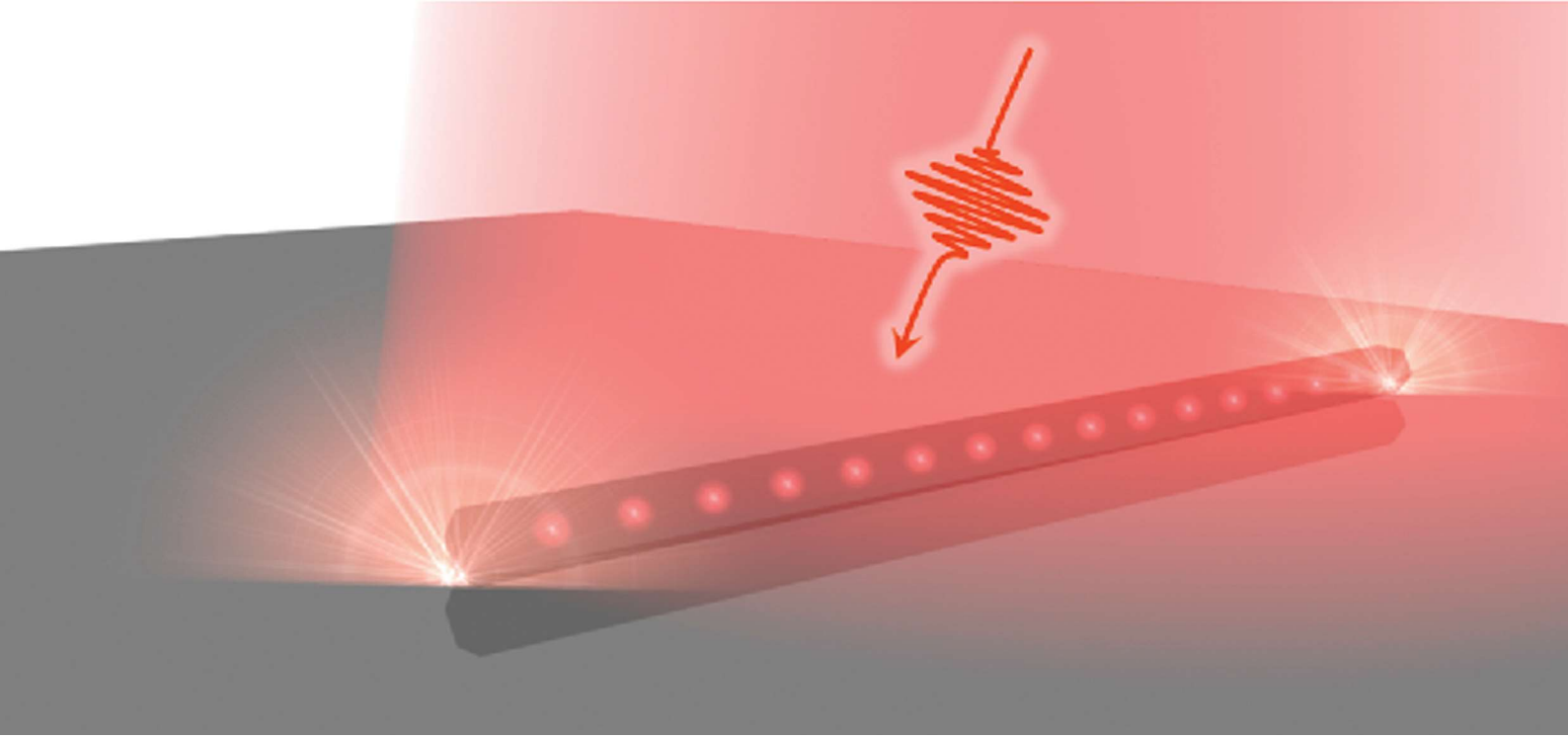


مقاله علمی-ترویجی

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*، گروه برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، ar.karimi@iaushiraz.ac.ir

*نویسنده مسوول

چکیده

امروزه تحقیقات در زمینه پلاسمونیک، بر روی مجتمع‌سازی 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؛ 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 گذشتن 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 کوانتومی محیط بهره را ایجاد نموده است که با بهره‌گیری از ساختار متامتریال 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 layser.

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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-09]

۱- مقدمه

امروزه تحقیقات در زمینه پلاسمونیک، برروی 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.

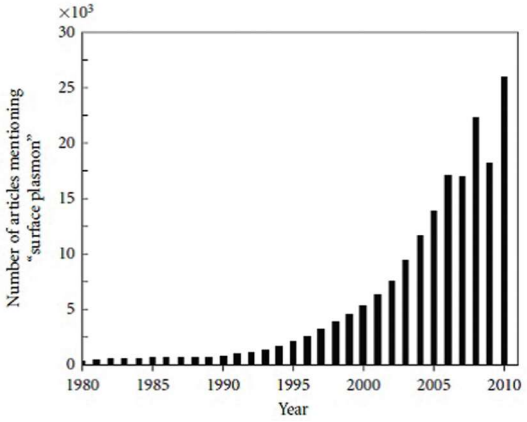
عامل محدود کننده‌ای که در این حوزه وجود دارد جذب نوری بالایی است که در فلزات مشاهده می‌شود. غلبه بر این فاکتور تلفاتی عامل محرکه بسیاری از تحقیقات این حوزه بوده است. برای غلبه بر این تلفات تحقیقات فراوانی صورت گرفته است که نتیجه آن افزایش درک رفتار فلزات و همچنین تولید موادی است که همانند فلزات رفتار 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 کار آمدتر 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 شیارهایی در روی سطح فلزی ایجاد خواهد شد[۵-۱].

۱-۲- تاریخچه پلاسمونیک و لیزرهای پلاسمونیک

پلاسمون واحد کوانتومی موج‌های الکترومغناطیس 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 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 طوری‌که 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 توجیهات، 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 سال۱۹۵۷ 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].

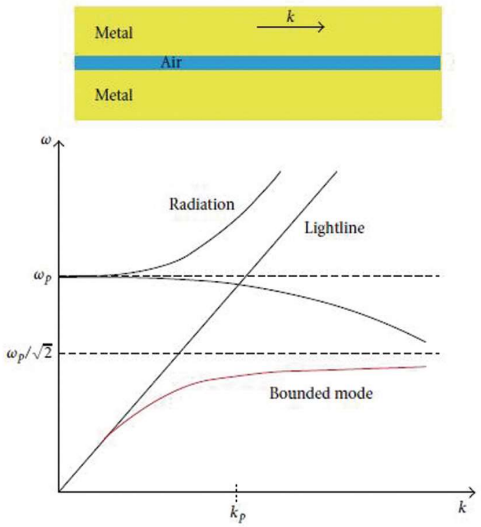
در طی سال‌های متمادی از آغاز پیدایش نخستین لیزر تا به امروز همواره روندی برای کاهش بیشتر ابعاد لیزرها وجود داشته است. اختراع لیزرهای نیمه هادی به‌طور اساسی روند و چهارچوب کوچک شدن ابعاد را متحول کردند و توسعه فناوری‌های جدید مانند: مخابرات فیبر نوری، اسکن تصاویر، دیسک‌های فشرده، اسکنرهای بارکد، پرینترهای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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-09]

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 هدف‌گذاری 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 کاربردهایی مانند چیپ‌های الکترونیک نوری و سنسورهای فوق حساس استفاده شود. یکی از شاخه‌های اساسی در این زمینه نانو سیم‌های نیمه‌هادی است. یک نیمه‌هادی شبه 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 مجتمع‌سازی الکتریکی، لیزرهای نانو سیم را به‌عنوان کاندید برای استفاده در نسل آتی سیستم های الکترونیک نوری مطرح کرده است. ایده‌های نوین از جمله استفاده از فراماده در حوزه ی پلاسمونیک و 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 حوزه ی کاربردهای احتمالی در ساختارهای پر سرعت آینده باشد.

از موجبرهای پلاسمونیک می‌توان در مدارهای الکترونیکی و نوری به‌گونه‌ای 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 همان‌طورکه از نام آن مشخص است از دو لایه فلز و یک لایه دی الکتریک هوا یا غیر آن تشکیل شده است. دی الکتریک مربوطه به‌طور معمول دارای تلفات اپتیکی کم و ضریب شکست اندکی می‌باشد که توسط لایه‌های



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

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 می‌دهد که در این نوع موجبر تضادی بین تلفات اپتیکی قابل قبول و اندازه مودهای کمتر از طول موج وجود دارد[۸].

۲- لیزرهای پلاسمونیک

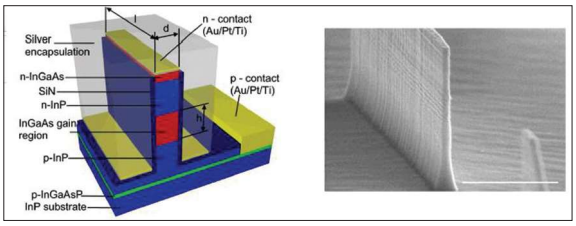
لیزر به‌عنوان منبع تولید نور تکفام یکی از تاثیرگذارترین اختراعات قرن بیستم است که بدون آن بسیاری از پیشرفت‌ها در حوزه‌های صنعتی و مخابراتی امکان‌پذیر نبود. مطالعه حوزه رو به رشد نانو فوتونیک نیازمند لیزرهایی است که بتوانند فراتر از حد پراکندگی نور، تابش لیزری تولید کنند طوری که شاهد بهره‌برداری از قابلیت‌های 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 تراهرتز کارکرده و برای مدارات مجتمع نوری می‌توانند نقش مهمی را بازی کنند به این صورت که نور تولیدی از این لیزرها به‌عنوان 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. به‌عنوان 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 عمده‌ای 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 بهره را برای لیزر نیز بر عهده دارند[۱۰].

۲-۱- متامتریال

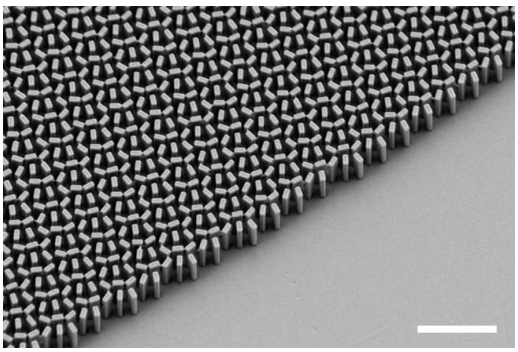
فراماده یا متامتریال به ماده مرکبی گفته می‌شود که دارای خواص نامتعارف الکترومغناطیس در ساختار وجودی خود است. آنچه این مواد را غیر معمول کرده است، خاصیت ضریب شکست منفی نور در آنها است، به این معنا که این مواد نور را در جهت مخالف مواد عادی منکسر می‌کنند. مواد الکترومغناطیس تشکیل دهنده آنها می‌تواند با 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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-09]



شکل۳: تصویر شماتیک و تصویر میکروسکوپ الکترونی از یک لیزر پلاسمونیک با ساختار فلز-عایق فلز

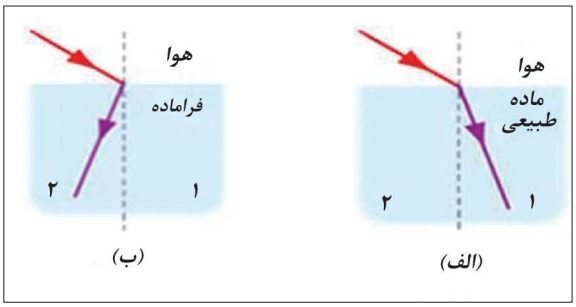
مواد ساخته می‌شوند. در واقع هنگامی که یک ماده با تناوبی در حد چند نانومتر تکرار می‌شود مانند این است که سلول‌های یک ماده مصنوعی را تشکیل می‌دهد که خواص جالبی را در مواجه با امواج الکترومغناطیس از خود نشان می‌دهد. در شکل (۴) تصویر میکروسکوپی از یک متامتریال از جنس دی اکسید تیتانیوم را نشان می‌دهد که به‌عنوان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



شکل۴: 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. همان‌طورکه 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.

هنگامی‌که 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

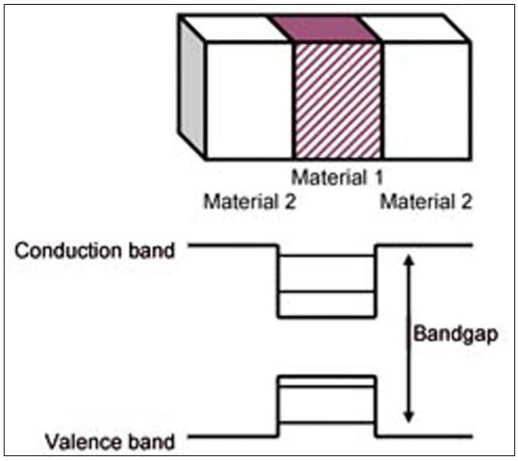


شکل ۵: شکست نور در مرز دو محیط: (الف) دو ماده با ضرائب شکست مثبت - ب) شکست منفی در مرز فرامادہ با هوا.

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 پلاسمونیک 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].



شکل۶: تصویر شماتیک از ساختار و باند انرژی چاه کوانتومی

به‌عنوان یکی از ساختارهای متداول برای محیط بهره به صورت چاه کوانتوم می‌توان از ترکیب AlGaAs/GaAs/AlGaAs نام برد که شماتیک آن را در شکل (۷) مشاهده می‌کنید. گاف انرژی مربوط به GaAs در حدود 1.42 ev و گاف مربوط به Al0.3Ga0.7As به‌طور تقریبی 1.8ev 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 پلاسمونیک

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

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

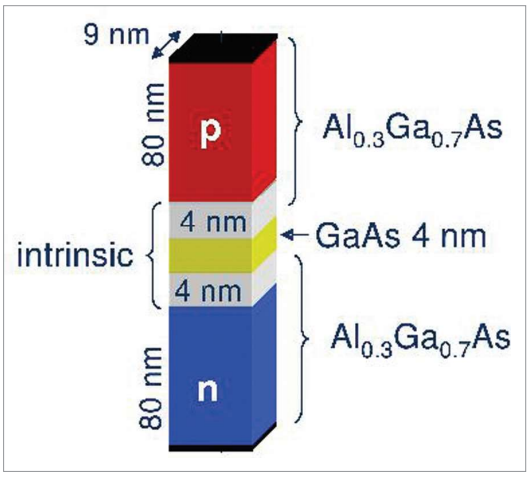
Au	Al0.3Ga0.7As	GaAs QW	Al0.3Ga0.7As	SiO2
100nm	20nm	متغیر	20nm	100nm

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

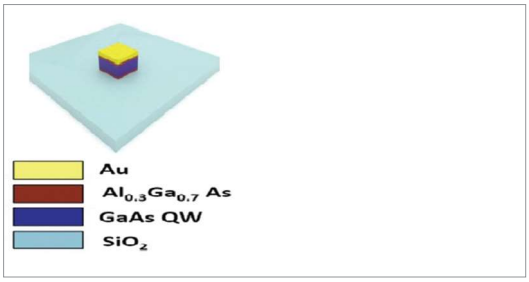
برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار کامسول استفاده می‌کنیم. با در نظر گرفتن ضریب شکست به‌صورت معادله (۱) که شامل دو بخش حقیقی و موهومی است و هر بخش تابع فرکانس است هر بخش مدل شده و در نهایت می‌توان رفتار ساختار را بررسی نمود.

$$\bar{n}=n+\kappa i \qquad (۱)$$

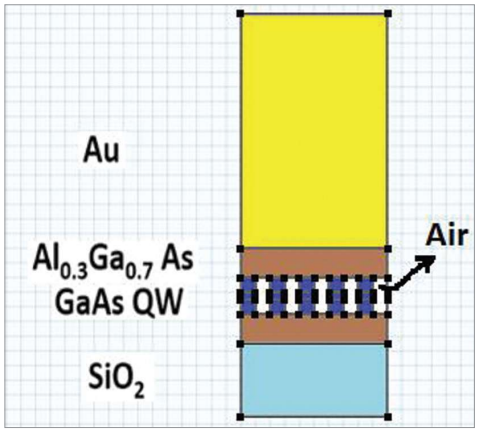
[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-09]



شکل۷ : تصویر شماتیک از ساختار چاه کوانتومی AlGaAs/GaAs/AlGaAs



شکل ۸: ساختار لیزر پلاسمونیک

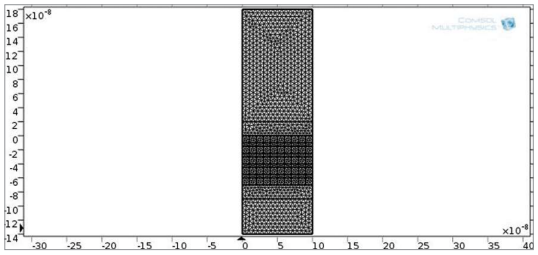


شکل ۹: ساختار لیزر پلاسمونیک چند چاه کوانتومی متامتریال

برای لحاظ کردن ضریب شکست به‌صورت رابطه‌ی بالا از مراجع مختلف اطلاعات هر یک از ترکیبات مورد نظر از جمله GaAs، Al0.3Ga0.7As و SiO2 را به‌دست آورده و در مدل قرار می‌دهیم.

۳-۱ - لیزر پلاسمونیک چند چاه کوانتومی متامتریال

با توجه به ویژگی‌های متامتریال ترکیب ساختار چاه کوانتومی و متامتریال 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 متامتریال را تشکیل دهند. در واقع پایه اصلی تشکیل دهنده ساختار متامتریال 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 نانومتر آن را چاه کوانتومی چندگانه و ۱۰ نانومتر را هوا تشکیل می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود ابعاد بسیار کوچک‌تر از طول موج بوده و درعین 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 متامتریال را شکل می‌دهد.
در شکل(۱۰) ساختار مش‌بندی شده با کامسول نشان داده شده است.



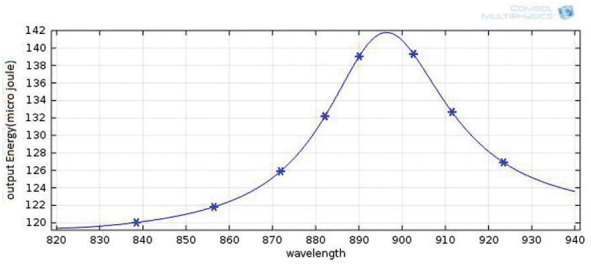
شکل ۱۰: ساختار مش بندی شده لیزر

در اینجا برای مقایسه توان انتشار یافته میزان انرژی منتشر شده از ساختار متامتریال 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 متامتریالی طول موج تشدید به سمت طول موج های بالاتر منتقل شده است (۸۹۷ نانومتر در برابر ۸۱۲ نانومتر) ضمن اینکه انرژی در طول موج تشدید تقریبا شش برابر انرژی منتشر شده در حالت چاه کوانتومی بدون متامتریال است (۱۴۲ میکروژول در برابر ۲۴ میکروژول)[۱۴].

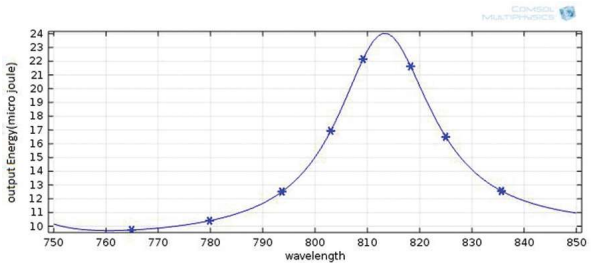
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله لیزر پلاسمونیک مبتنی بر چاه کوانتومی متامتریال 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 متامتریال‌ها 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 متامتریال 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 متامتریالی وجود ندارد. با افزایش عرض کاواک طول موج رزونانسی منتشر شده از ساختار افزایش می یابد اما انرژی مربوط به طول موج رزونانس به‌طور تقریبی ثابت می‌ماند. همچنین با کاهش تعداد چاه‌هایی کوانتومی طول موج منتشر شده به طور 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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-09]



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

پیـدا می‌کنـد که معنی آن این اسـت که طول موج رزونانس سـهم 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 Opotelectron, 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.

***

فصل‌نامه عصر برق ASR-E-BARQ

علمی

انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران–شاخه خراسان

۹۲ سال هشتم/شماره۱۵/ تابستان ۱۴۰۰

انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران – شاخه خراسان

Khorasan Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers

همـکاری علمی اسـتادان گرامـی و فرهیختگان ارجمنـد در داوری مقاله‌های نشـریه علمـی ترویجی عصر برق در سـال ۱۳۹۹ که ثمره آن در غنای علمی و فنی مطالب منتشـر شده بسیار موثر بوده است باعث خوشـحالی و شایسته تقدیر اسـت. امید است افتخار همراهی صاحب‌نظران و اندیشـمندان گرامی باعث تداوم موفقیت‌ها در ادامه راه باشد.

با احترام و امتنان
شورای سردبیری

۱- دکتر حسین ابوترابی 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 رهصان
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 حسنی؛ دانشجوی دکترای 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 دکترای 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 صادق‌پور مقدم؛ شرکت برق منطقه ای خراسان
۲۸- دکتر هادی صدوقی یزدی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
۲۹- دکترمحمد 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 بایگی؛ شرکت برق منطقه ای خراسان
۳۴- دکتر مصطفی عیدیانی؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
۳۵- دکتر علی کارساز؛ موسسه غیر انتفاعی خراسان
۳۶- دکتر عباداله کامیاب؛شرکت برق منطقه ای 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 منطقه ای خراسان
۴۳- دکتر محسن نجفی؛ دانشگاه صنعتی اراک
۴۴- دکتر محمد حسن نشاطی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
۴۵- مهندس سیما نیک‌پرور؛ دانشجوی دکترای دانشگاه صنعتی سهند
۴۶- دکتر قوشه عابد هدتنی؛ دانشگاه فردوسی مشهد
۴۷- دکتر منیره هوشمند؛ دانشگاه بین المللی امام رضا (ع)
۴۸- مهندس داریوش یزدان‌پناه؛ شرکت برق منطقه‌ای خراسان
۴۹- دکتر حمید یعقوبی؛ دانشگاه سمنان

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-09]