بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

طراحی و ساخت یک لیزر پلاسمونیک بر پایه‌ی تیغه بلور فوتونی فلزی

محسن نیکخواه، امیر حسین برادران قاسمی، حمید لطیفی

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده فیزیک، تهران، ایران

چکیده – در این مقاله به طراحی و ساخت یک لیزر پلاسمونیک که از یک تیغه بلور فوتونی فلزی بعنوان کاواک و محلول حاوی رودامین-6G بعنوان محیط فعال تشکیل شده است، پرداخته می‌شود. تیغه بلور فوتونیکی از یک شبکه هگزاگونال شامل نانو ذرات مثلثی طلا تشکیل شده است که توسط روش لیتوگرافی کلوئیدی ساخته می‌شود. دمش اپتیکی توسط یک لیزر حالت جامد سوئیچ-Q Nd:YAG هارمونیک دوم با پهنای زمانی ۱۲ns و نرخ تکرار پالس ۵Hz انجام می‌گیرد. شدت طیف گسیلی و پهنای طیفی تابشی در انرژی‌های مختلف لیزر دمش اندازه گیری شد. همچنین با استفاده از روش المان محدود عملکرد این لیزر با نتایج تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با اینکه اندازه نانو ذرات فلزی کوچک هستند ولی نتایج نشان می‌دهد که سطح مقطع جذب ساختار بلوری، قله‌ای درون بازه طیفی فوتولومینسانس رودامین-6G دارد که موجب تشدید پلاسمون‌های سطحی جایگزیده در نانو ذرات می‌شود و عملکرد لیزری را محقق می‌سازد.

کلید واژه- لیزر پلاسمونیک، نانوذرات فلزی، لیتوگرافی کلوئیدی، رودامین-6G، روش المان محدود

Design and construction of a Plasmonic laser based on Metallic Photonic Crystal Slab

Mohsen Nikkhah, Amir H. Baradaran Ghasemi, Hamid Latifi

Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract: In this paper, we set to report on design and construction of a plasmonic laser made of a metallic photonic crystal slab. Rhodamine 6G solution has been used as a gain medium. The photonic crystal slab consists of gold triangular nano-beads which are arranged in a hexagonal lattice using nano-sphere lithography. A Q-switched Nd:YAG second harmonic laser with 12ns pulsed width and 5Hz pulse repetition rate is used to optically pump the plasmonic laser. Emission spectrum and the spectral width as a function of pumping energy are measured through a UV-Vis spectrometer. Moreover, the physics behind the functional behavior of the structure is investigated through finite-element method. Even though the size of the nano-beads are small, the results show that there is an absorption cross section peak inside the PL spectrum of the gain medium which can excite localized surface plasmon resonances in the nano-beads leading to laser action.

Keywords: Plasmonic Laser, Plasmonic, Metal nanoparticles, Colloidal lithography, Rhodamine 6G, FEM

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-07]

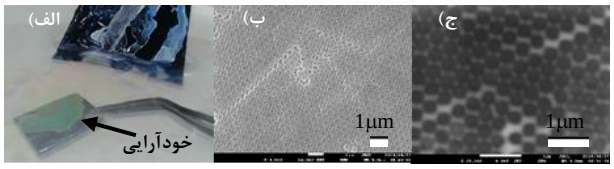
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

علم پلاسمونیک تحول شگرفی را در طراحی ادوات فوتونیکی با مشخصات منحصر بفرد باعث شده است. به عنوان مثال طراحی موجبرهای مینیاتوری زیر حد پراش، حسگرهای با حساسیت بالا، نانو آنتن‌های اپتیکی گوشه‌ای از کاربردهای این علم به حساب می‌آیند [۱]. پلاسمونیک حاصل نوسانات تجمعی الکترون‌های آزاد فلز هنگام برهمکنش با موج الکترومغناطیسی فرودی به سطح مقطع فلز-دی‌الکتریک می‌باشد. لذا این برهمکنش انرژی را از موج به فصل مشترک فلز-دی‌الکتریک منتقل کرده و چگالی میدان در اطراف فلز بسیار زیاد می‌گردد. در سال‌های اخیر از این خاصیت در طراحی و ساخت لیزرهای پلاسمونی توسط تحریک مدهای پلاسمون-پلاریتون جایگزیده LSPP استفاده شده است. به این ترتیب که با طراحی یک ساختار پلاسمونی و افزایش میدان‌های موضعی، شدت گذارهای فوتولومینسانس مواد رنگی را بعنوان یک محیط بهره افزایش می‌دهند و لذا فرایند لیزری بدون نیاز به آینه‌های بازتابان به وقوع می‌پیوندد [۲و۳]. در این مقاله به طراحی یک لیزر پلاسمونی شامل یک تیغه بلور فوتونی و ماده فعال رودامین ۶G پرداخته می‌شود. تیغه بلوری یک شبکه هگزاگونال از نانو مثلث‌های از جنس طلا با ابعاد کوچکتر از ۱۰۰nm می‌باشد که بوسیله لیتوگرافی کلوئیدی و با استفاده از تکنیک لانگمویربلاجت روی زیر لایه سیلیکونی ساخته می‌شود.

ساخت بلور فوتونیکی

ابتدا محلول ۱۰٪ وزنی اتانول/آب و ذرات هم‌اندازه پلی استایرن به قطر ۳۸۲ نانومتر به آرامی از طریق یک زیرلایه شیب دار روی سطح آب قرار داده می‌شود تا یک لایه منظم از ذرات به دلیل نیروی مویینگی و نیروی واندروالسی بین ذرات روی سطح آب تشکیل شود (شکل ۱ الف) سپس یک زیر لایه تمیز و آبدوست سیلیکون خیلی آرام وارد آب می‌شود، تا تک لایه آماده شده روی زیر لایه بنشیند سپس زیر لایه به آرامی بیرون کشیده می‌شود. و نانوذرات پلی استایرن بر روی زیر لایه به صورت یکدست و منظم در کنار هم خودآرایی می‌شوند (شکل ۱ ب). سپس ۵۰ نانومتر طلا به روش کندوپاش بر روی ماسک کلوئیدی لایه نشانی می‌گردد. بعد از لایه نشانی، به منظور حذف ماسک کلوئیدی نمونه توسط حلال مناسب در دستگاه آلتراسونیک برداشته می‌شود تا تنها ساختار مثلثی فلزی بلور فوتونیکی بر روی زیر لایه باقی بماند، (شکل ۱ج).



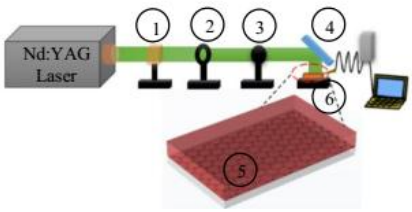
شکل ۱: الف) خودآرایی ذرات پلی استایرن به قطر ۳۸۲ نانومتر روی سطح آب ب)تصویر FE-SEM خودآرایی روی زیرلایه سیلیکون ج) ساخت بلور فوتونیکی فلزی با شبکه هگزاگونال

چیدمان آزمایش

شکل ۲ نمایش دهنده‌ی چیدمان آزمایش لیزر پلاسمونی می‌باشد. از چپ به راست چیدمان آزمایش شامل یک لیزر $Nd:YAG$ هارمونیک دوم پالسی با طول موج ۵۳۲nm و با نرخ تکرار ۵Hz و پهنای پالس ۱۲ns می‌باشد. ابتدا نور لیزر بعد از یک تضعیف کننده از یک دیافراگم عبور کرده (شماره ۱و۲) و توسط یک عدسی با فاصله کانونی ۱۲cm روی یک آینه تخت که تحت زاویه ۴۵ درجه قرار گرفته است متمرکز شده در نهایت روی نمونه فرود می‌آید، (شماره ۳و۴و۵). از یک جابجاگر سه بعدی به منظور تغییر مکان نمونه استفاده شده است (شماره ۶). قسمتی از تابش پراکنده شده، توسط یک فیبر نوری در زاویه حدود ۳۰ درجه از راستای تابش فرودی جمع آوری و سپس با انتقال به اسپکترومتر آشکار می‌گردد، و در نهایت توسط رایانه آنالیز می‌شود.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

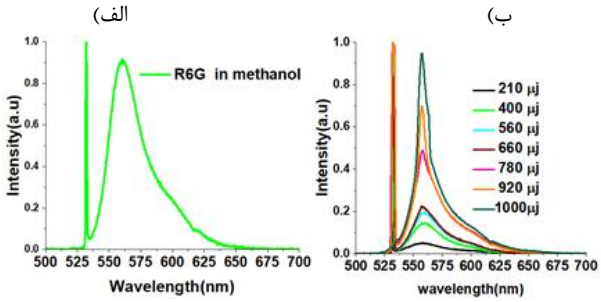
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-07]



شکل ۲: چیدمان آزمایش

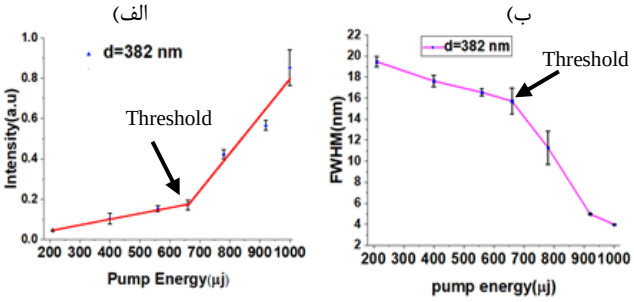
نتایج آزمایش

ابتدا محلول $1mM$ رودامین-۶G در متانول آماده شده و در برابر تابش لیزر قرار می‌گیرد. شکل ۳ الف) طیف فلئورسانس رودامین-۶G را نشان می‌دهد همان طوری که مشاهده می‌شود محلول رودامین-۶G در طول موج بلندتر و در ناحیه طول موج های زرد تابش می‌دهد و دارای یک قله بلند در طول موج ۵۶۸nm و پهنا در نصف بیشینه (FWHM) ۳۶nm می‌باشد. حال نمونه‌ی شامل تیغه بلور فوتونیکی را مورد آزمایش قرار می‌دهیم و اثر افزایش انرژی دمش را بر روی طیف تابشی آن بررسی می‌کنیم. ابتدا از انرژی‌های دمش خیلی کم شروع کرده سپس آزمایش را برای انرژی‌های دمش بیشتر انجام می‌دهیم.



شکل ۳: الف) طیف فلورسانس $1mM$ رودامین 6G در متانول روی زیر لایه سیلیکون ب) طیف گسیلی لیزر پلاسمونی برای انرژی‌های دمش مختلف برای بلور فوتونیکی ساخته شده از ذرات ۳۸۲ نانومتری پلی استایرن. خط تیز در ۵۳۲nm مربوط به پرتو لیزر دمش می‌باشد.

همان طوری که در شکل ۳ ب) مشاهده می‌کنیم در انرژی‌های دمش ضعیف، طیف تابشی بسیار پهن می‌باشد و با افزایش انرژی دمش، منحنی تابشی به طرف قله‌ی مرکزی رودامین-۶G جابه جا و همزمان باریک شده و گسیل خود به خودی تقویت شده اتفاق می‌افتد. هنگامی که انرژی دمش از یک مقدار آستانه‌ای بیشتر می‌شود، آنگاه یک قله‌ی تابشی با پهنای خیلی کم در طیف گسیلی ظاهر می‌شود که شدت آن با افزایش انرژی دمش، بیشتر می شود. پهنا در نصف بیشینه برابر با ۴nm می‌باشد.



شکل ۴: الف) منحنی شدت و ب) پهنا در نصف بیشینه بر حسب انرژی دمش برای بلور فوتونی ساخته شده از ذرات به قطر۳۸۲ نانومتر

همچنین نمودار شکل۴ نشان دهنده شدت بیشینه و پهنا بر حسب انرژی‌های دمش می‌باشند. همان طوری که مشاهده می‌شود با افزایش انرژی دمش، شدت تابشی نیز افزایش می‌یابد و از انرژی دمش حدود ۶۶۰µj به بعد، ناگهان شدت با شیب بیشتری افزایش می‌یابد و پهنای قله‌ی تابشی خیلی سریع کاهش می‌یابد. این انرژی دمش انرژی است که به ازای آن، بهره از اتلاف بیشتر شده و نوسان لیزری برای مد تشدیدی در این انرژی آستانه اتفاق می‌افتد. از آن جایی که دو مشخصه اصلی نوسان لیزری یعنی افزایش ناگهانی در شدت و افت سریع در پهنای قله-ی تابشی به دلیل وجود تیغه فلزی در این آزمایش مشاهده شده است لذا نوسان لیزری اتفاق افتاده است.

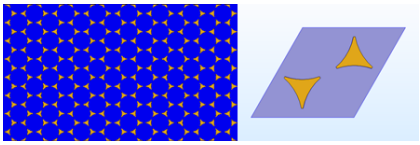
نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج تجربی را با نتایج شبیه سازی محاسبه شده در نرم افزار کامسول مقایسه می‌کنیم. شماتیک تیغه بلور فوتونی فلزی متشکل از المان‌های مثلثی طلا در یک شبکه هگزاگونال روی سیلیکون و همچنین یک سلول واحد شبکه در شکل۵ نمایش داده شده است. شرط مرزی استفاده شده برای بالا و پایین فضای محاسباتی محیط کاملا جاذب PML در نظر گرفته شده است. همچنین

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

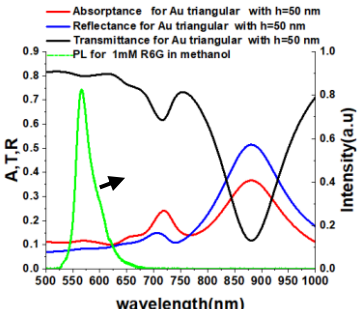
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-07]

چهار طرف ساختار از شرط مرزی تناوبی بلاخ استفاده شده است.



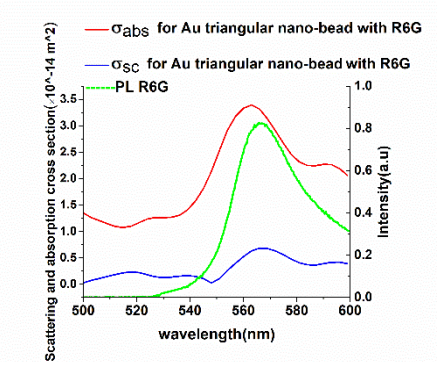
شکل۵ : ساختار پلاسمونیک الف) شامل تیغه بلور فوتونی متشکل از شبکه هگزاگونال از مثلث‌های طلا روی زیر لایه سیلیکون ب) سلول واحد ساختار شامل نانو ذرات با ارتفاع ۵۰ نانومتر.

شکل ۶ طیف جذب و تراگسیل و بازتاب برای بلور فوتونی ساخته شده از ذرات به قطر ۳۸۲nm همراه با طیف فلئورسانس رودامین را نشان می‌دهد. مطابق شکل همپوشانی بین طیف جذب نانوساختار و طیف گسیل محیط فعال در بازه طیفی حدود ۵۵۰nm تا ۶۲۵nm وجود دارد که عامل فرایند تقویت گسیل خودبخودی خواهد بود. به نحوی که نانو ذرات طلا پهنای جذبی در ناحیه مرئی از خود نشان می‌دهند. این پهنا به عنوان پهنای جذب پلاسمون سطحی شناخته می‌شود که ناشی از حرکت الکترون‌های رسانش ذرات در اثر میدان الکتریکی نور تابشی می‌باشد. این جذب به اندازه و شکل و محیط پیرامون آنها بستگی دارد.



شکل۶: منحنی طیف جذب (قرمز) و تراگسیل(سیاه) و بازتاب(آبی) برای بلور فوتونی و طیف فلوئورسانس رودامین- 6G (سبز).

همچنین گاف فوتونی در محدوده طیفی ۷۶۰nm تا ۱۰۰۰nm ایجاد می‌شود که کاملا خارج از طیف گسیل ماده فعال می‌باشد. لذا گاف فوتونی نقشی در فرایند لیزری توسط ساختار نخواهد داشت. با بررسی سطح مقطع جذب و پراکندگی ساختار که در شکل ۷ نمایش داده شده است مشخص می‌گردد که سطح مقطع جذب دارای قله‌ای است که با طیف PL ماده فعال همپوشانی می‌کند. همچنین بدلیل کوچک بودن نانو ذرات مثلثی سطح مقطع پراکندگی بسیار کوچک می‌باشد بطوریکه پراکندگی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در فرایند لیزری نخواهد داشت.



شکل۷: منحنی سطح مقطع پراکندگی(آبی) و جذب (قرمز) برای بلور فوتونیکی و طیف فلوئورسانس رودامین 6G (سبز)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به طراحی و ساخت یک لیزر پلاسمونی بر پایه یک تیغه بلور فوتونی در ناحیه اپتیکی پرداخته شد. با کوچک انتخاب کردن نانو کره‌های پلی‌استایرن جهت ساخت تیغه، اثر پراکندگی کاهش یافته و سطح مقطع جذب در مکانیسم برهمکنش اهمیت پیدا می‌کند. با اینکه نانو ذرات فلزی بسیار کوچک انتخاب شده‌اند ولی قرار دادن آنها در یک شبکه منظم، سبب بروز تشدیدهای پلاسمونی قوی می‌شود که عمل لیزری را میسر می‌سازد. خواص لیزری بستگی به میزان جفت‌شدگی مدهای براگ و LSPP دارد.

مراجع

[1] Z. Liu, A. Boltasseva, et. al.,"Plasmonic nanoantenna arrays for the visible," Metamaterials, Vol. 2, No. 1, (2008).

[2] W. Zhou, M. Dridi, J. Y. Suh, et. al., " Lasing action in strongly coupled plasmonic nanocavity arrays", Nature Nanotechnology vol. 8, (2013).

[3] M. Dridi and G. C. Schatz "Lasing action in periodic arrays of nanoparticles," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 32, No. 5, (2015).

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-07]