بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

بررسی میزان تقویت میدان الکتریکی در نانوموج‌بر پلسمونیکی هرمی شکل با قاعده‌ی مربع

هانیه عالی‌نژاد و رضا مسعودی

دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده‌ی لیزر و پلاسما

چکیده – بهینه‌ی ابعاد یک نانوموج‌بر پلسمونیکی به شکل هرمی با قاعده‌ی مربع که به صورت حفره‌ای در داخل فلز نقره است به دست آمده تا بیشینه‌ی تقویت میدان الکتریکی را داشته باشیم. رابطه‌ی بین ابعاد قاعده و طول و زاویه‌ی این هندسه با میزان تقویت بررسی شده و همچنین توزیع میدان الکتریکی در داخل ساختار به دست آمده است. شکل تیز ساختار منجر به متمرکز کردن نور به زیر حد پراش می‌شود.

کلید واژه- نانوموج‌بر، پلسمونیک، حد پراش

Evaluation of electric field enhancement in a pyramid plasmonic nano-waveguide with a square cross section

Hanieh Alinejad, Reza Massudi

Shahid Beheshti University, Laser and Plasma Research Institute

Abstract- We optimized the best dimensions for a pyramid plasmonic nano-waveguide with a square cross section, as a hole in silver, to get the maximum electric field enhancement. We examine the relationship between the cross section size, height and angle of this geometry and enhancement factor. Electric field distribution inside this structure is obtained. Taper shape of this structure results in focusing of light below the diffraction limit.

Keywords: Nano-waveguide, plasmonic, diffraction limit

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

با جفت شدن فوتون‌های نور به پلسمون-پلاریتون‌های سطحی مرز یک دی‌الکتریک- فلز، امواج SPP[1] تشکیل می‌شوند که می‌توانند با دنبال کردن شکل هندسی یک موجبر تا حد زیادی جایگزیده شوند، زیرا این امواج به طور مجانبی در نوک تیز یک ساختار باریک‌شونده متوقف می‌شوند که ابعاد سطح مقطع این نوک می‌تواند بسیار کوچک‌تر از حد پراش باشد و بنابراین شدت نور در آن ناحیه بسیار بالا رود. افزایش شدت نور، در نانوساختارهای پلسمونیکی در حدی است که می‌تواند منجر به ایجاد فرآیندهای غیرخطی از جمله تقویت سطحی رامان القایی (SERS[2]) و تولید هارمونیک‌های نور فرودی شود. میزان تقویت میدان بسیار وابسته به شکل هندسی نانوساختار است. بررسی‌های زیادی روی شکل‌های مختلف ذرات، میله‌ها و رئوس نوک‌تیز انجام شده است. تا هارمونیک مرتبه‌ی ۱۷ام لیزر تیتانیوم سفایر با طول موج ۸۰۰ نانومتر، با استفاده از تقویت میدان در آرایه‌ای از نانوساختارهای فلزی طلا به شکل پاپیونی روی زیرلایه‌ی سفایر به دست آمده است [۱]. با استفاده از نانوموج‌بر سه بعدی برای متمرکز کردن نور پالس‌های NIR روی لکه‌ی زیر حد طول موج توانسته‌اند به فاکتور تقویت ۳۵۰ برسند و تا هارمونیک مرتبه‌ی ۴۳ام لیزر تیتانیوم سفایر را تولید کنند [۲]. به این ترتیب با استفاده از یک نانوساختار فلزی سه بعدی می‌توان هارمونیک‌های مراتب بالا تولید کرد که نیاز حیاتی برای تولید پالس‌های آتوثانیه در طول‌موج‌های EUV هستند. در چنین ساختاری در مقایسه با ساختارهای پاپیونی و نانومیله‌ها، حجمی که ماکزیمم میزان تقویت میدان را دارد تقریباً سه مرتبه بزرگی بیشتر از یک المان پاپیونی یا یک نانومیله است. با توجه به این‌که فقط یک هندسه برای نانوموج‌برهای سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته [۲]، ما هندسه‌ی جدیدی را در نظر گرفته و تقویت میدان در آن را با هندسه‌ی قبلی مقایسه خواهیم کرد.

۲- تئوری

برای به دست آوردن توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی داخل هر ساختاری باید معادلات ماکسول را حل کرد:

$$\nabla \times \mathrm{E} = -\frac{\partial \mathrm{B}}{\partial \mathrm{t}} \qquad (۱)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \qquad (۲)$$

از آن‌جایی که ثابت دی‌الکتریک فلزات، موهومی و تابع پیچیده‌ای از فرکانس است، باید در محاسبات مربوط به ساختارهای پلسمونیکی، پاشندگی فلز را هم در معادلات لحاظ کرد. ما به دلیل وجود داده‌های دقیق‌تر در مورد فلزاتی نظیر طلا، نقره، مس و ... برای یک محدوده‌ی گسترده‌ی طول‌موجی از مدل اصلاح‌شده‌ی دبای استفاده کردیم [۳]. طبق این مدل:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} + \frac{\sigma}{i\omega\varepsilon_0} \qquad (۳)$$

که در آن ε_i و ε_∞ ثابت دی‌الکتریک در فرکانس صفر و فرکانس بی‌نهایت هستند، σ رسانندگی فلز و τ زمان واهلش است.

برای حل معادلات ماکسول از روش FDTD استاندارد بر پایه‌ی الگوریتم Yee [۴] استفاده کردیم و برای اعمال پاشندگی فرکانسی ثابت دی‌الکتریک روش ADE[3] را به کار گرفتیم [۵]. طبق این روش بعد از استفاده از رابطه‌ی $D=\varepsilon(\omega)E$ و اعمال عکس تبدیل فوریه، به معادله‌ی دیفرانسیل زیر می‌رسیم:

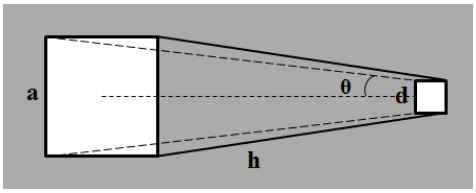
$$\varepsilon_0 \frac{\partial D}{\partial t} + \tau\varepsilon_0 \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \tau\varepsilon_\infty\varepsilon_0^2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + (\varepsilon_s\varepsilon_0^2 + \tau\varepsilon_0\sigma)\frac{\partial E}{\partial t} + \varepsilon_0\sigma E \qquad (۴)$$

هندسه‌ی مورد بررسی ما در شکل ۱ نشان داده شده است. یک ساختار هرمی شکل با سطح مقطع مربعی که در داخل فلز نقره حفر شده است. میدان فرودی به این ساختار پالس با پروفایل زمانی گاوسی و طول موج ۸۰۰ نانومتر و شدت متوسط است که توسط یک عدسی روی دهانه‌ی ورودی ساختار متمرکز شده‌است. طول پالس

[1] Surface plasmon polariton
[2] Surface enhanced Raman scattering
[3] Auxiliary differential equation

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

فرودی ۱۰ فمتوثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: شماتیک هندسه‌ی مورد بررسی، یک حفره‌ی هرمی شکل با قاعده‌ی مربع، در داخل فلز نقره

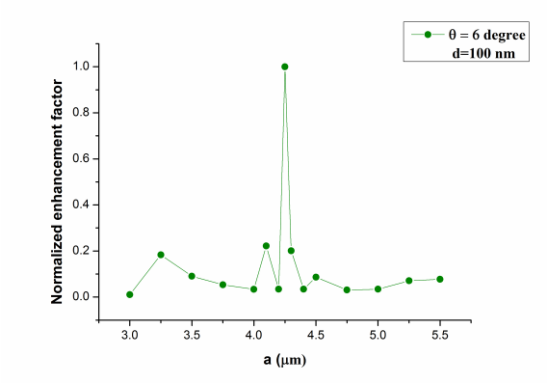
با منتشر شدن پالس‌های NIR به سمت نوک تیز ساختار، میدان الکتریکی در داخل آن افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند که مربوط به امواج SPP تحریک شده توسط آن است. تقویت میدان در نزدیک سوراخ خروجی به بیشینه‌ی خود می‌رسد. اگر داخل ساختار اتم‌های گاز نجیب تزریق شوند، هارمونیک‌های بالاتر میدان فرودی در محدوده‌ی EUV می‌توانند تولید شده و از سوراخ انتهایی خارج شوند. از این هارمونیک‌های بالاتر می‌توان برای تولید پالس‌های آتوثانیه نیز استفاده کرد.

هندسه‌ی مورد بررسی با چهار پارامتر، مشخصه‌یابی می‌شود: ابعاد دهانه‌ی ورودی (a)، طول ساختار (h) و ابعاد دهانه‌ی خروجی (d) و زاویه اضلاع هرم با محور مرکزی (θ). با توجه به شکل، h و d و θ به هم وابسته‌اند.

به دست آوردن ابعادی که در آن، فاکتور تقویت میدان به بیش‌ترین حالت خود برسد، به دلیل وجود چهار پارامتر ممکن نیست. اما می‌توان با ثابت نگه داشتن سه پارامتر، بهترین حالت را برای پارامتر دیگر به دست آورد و در محاسبات بعدی آن مقدار را برای پارامتر مورد نظر قرار داد.

۳- نتایج

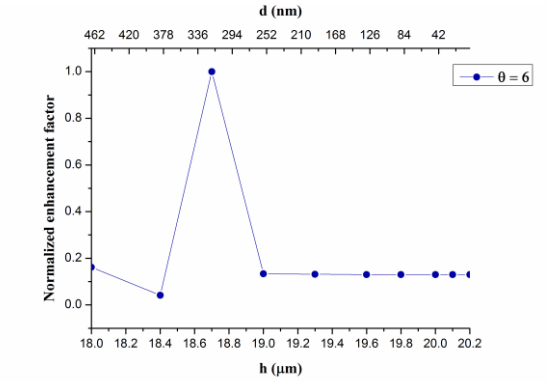
شکل ۲، فاکتور تقویت را برای ابعاد مختلف دهانه‌ی ورودی مقایسه می‌کند.



شکل ۲: فاکتور تقویت میدان الکتریکی بر حسب ابعاد دهانه‌ی ورودی ساختار

همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد، در صورتی که سطح مقطع مربعی هرم، ابعاد ۴.۲۵ در ۴.۲۵ میکرون داشته باشد، بیش‌ترین میزان تقویت را خواهیم داشت. با توجه به این‌که قطر پرتوی ورودی ۵ میکرون در نظر گرفته شده و این پرتو پروفایل گاوسی دارد، این عدد دور از انتظار نیست. قطر دهانه‌ی ساختار باید به اندازه‌ای باشد که دو موج پلسمونیکی منتشر شونده، در ورودی با هم جفت نشوند، یعنی ابعاد دهانه باید به طور قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر از عمق نفوذ پلسمون‌های سطحی باشد. از طرف دیگر، افزایش بیش از اندازه‌ی ابعاد دهانه‌ی ورودی هم به دلیل شکل و قطر پرتوی فرودی باعث کاهش تقویت می‌شود.

شکل ۳، فاکتور تقویت میدان الکتریکی را برای طول‌های مختلف ساختار نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی طول و ابعاد دهانه‌ی خروجی که در آن بیش‌ترین مقدار تقویت میدان را داریم، اندازه‌ی دهانه‌ی ورودی را ۴.۲۵ میکرون، یعنی مقدار بهینه‌ای که از نمودار قبل به دست آمد و θ را مقدار ثابت ۶ درجه انتخاب می‌کنیم.



شکل ۳: فاکتور تقویت میدان الکتریکی بر حسب طول ساختار

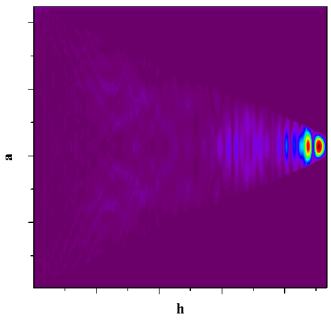
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

همان‌طور که مشاهده می‌شود در صورتی که ساختار طول ۱۸.۷ میکرون یا دهانه‌ی خروجی به ابعاد ۳۱۹ نانومتر داشته باشد، فاکتور تقویت بیشینه است. همچنین با توجه به شکل ۱ می‌دانیم که اگر طول کل هرم، یعنی بدون برش انتهایی را L بگیریم، داریم:

$$\tan(2\theta) = \frac{d}{L-h} = \frac{a}{L} \qquad (۵)$$

بنابراین با انتخاب a، d و h در واقع مقدار θ مشخص می‌شود. اگر زاویه ساختار از یک مقدار بحرانی بیش‌تر باشد، [۶] امواج پلسمونیکی تشکیل شده از دیواره‌ها بازتاب می‌کنند و با هم و با موج فرودی تداخل کرده و موج ایستاده تشکیل می‌شود و تقویت میدان داریم. در غیر این صورت امواج پلسمونیکی در دیواره‌های فلزی جذب می‌شوند. از طرف دیگر با زیاد شدن زاویه، فاصله‌ای که پلسمون‌ها باید طی کنند تا همان کاهش قطر را ببینند کم می‌شود، تلفات پراکندگی هم کاسته می‌شود. ولی اگر زاویه ساختار بیش از اندازه زیاد شود، مکان تشکیل لکه‌ی بیشینه‌ی تقویت بسیار به نوک تیز ساختار نزدیک می‌شود و حجم مفید تقویت را کم می‌کند.

شکل ۴، توزیع میدان الکتریکی را در برشی عرضی از ساختاری که اندازه‌های آن با توجه به نمودارهای شکل ۲ و۳ تعیین شده، نشان می‌دهد.



شکل ۴: توزیع میدان الکتریکی در لحظه‌ای که بیشینه‌ی تقویت را داریم.

به این ترتیب، توانستیم ابعاد بهینه برای این‌که یک نانوساختار با بیشینه‌ی تقویت میدان الکتریکی فرودی داشته باشیم را به دست آوریم و مشاهده کردیم که نور در ناحیه‌ای به زیر حد طول موج متمرکز شده و شدت آن در آن ناحیه بسیار بالا رفته است.

بنابراین، با داشتن ساختاری هرمی‌شکل با سطح مقطع مربعی به ابعاد ۴.۲۵ میکرون و طول ۱۸.۷ میکرون و زاویه‌ی ۱۲ درجه، بیشینه‌ی تقویت میدان الکتریکی را داریم. این میزان تقویت به حدی است که برای فرآیند تولید هارمونیک‌های مراتب بالای طول موج فرودی مناسب است.

مراجع

1 .High harmonic generation by resonant plasmon field enhancement. Kim, S. et al. 2008, Nature, Vol. 453, pp. 757–760.

2 .Plasmonic generation of ultrashort extreme-ultraviolet light pulses. Park, I.-Y. et al. 2011, Nature photon, Vol. 5, pp. 677–681.

3 .Modified Debye model parameters of metals applicable for broadband calculations. Gai, H., Wang, J. & Tian, Q. 2007, Appl. Opt., Vol. 46, pp. 2229–2233.

4 .Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. Yee, K. 1966, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 14, pp. 302 - 307.

5 .An FDTD method for the simulation of dispersive metallic structures. w. h. p. pernice, f. p. payne, d. f. g . gallagher. 2006, Optical and Quantum Electronics, Vol. 38, pp. 843–856.

6 .Adiabatic nanofocusing of plasmons by sharp metallic grooves: Geometrical optics approach. Gramotnev, D. K. 2005, J. Appl. Phys., Vol. 98, p. 104302.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]