بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

بررسی عددی تأثیر پارامتر نسبت اضلاع در موج‌بر پلاسمونیکی با مقطع مستطیل بر حجم و میزان تقویت جهت تولید پالس‌های آتوثانیه

هانیه عالی‌نژاد، رضا مسعودی

دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده – تأثیر پارامتر نسبت اضلاع مستطیل در یک نانوموج‌بر پلسمونیکی هرمی شکل با قاعده‌ی مستطیلی، روی میزان تقویت میدان الکتریکی و حجم ناحیه‌ی تقویت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین این بررسی برای قطبش‌های مختلف پالس ورودی تکرار شده و تأثیر قطبش بر تعیین بهینه‌ی ابعاد موج‌بر و همین‌طور میزان تقویت بررسی شده است.

کلید واژه- نانوموج‌بر، پلسمونیک، هارمونیک‌های بالا، آتوثانیه

Numerical investigation of the effect of aspect ratio in plasmonic waveguide with rectangular cross-section on volume and degree of enhancement to Attesecond pulse generation

Hanieh Alinejad, Reza Massudi

Shahid Beheshti University, Laser and Plasma Research Institute

Abstract- Effect of the aspect ratio of rectangle sides in a pyramidal plasmonic nano-waveguide with rectangular cross-section, on electric field enhancement and volume of enhancement has been investigated. This study has also been repeated for different types of incident polarizations and effect of polarization on optimum size of the waveguide and on factor of enhancement has been examined.

Keywords: Nano-waveguide, Plasmonics, High harmonics generaion, Attosecond

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

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

۱- مقدمه

در فوتونیک مدرن، انتشار امواج پلسمونیکی در نانوساختارهای فلزی، شرایط متمرکز شدن نور به زیر حد پراش را فراهم کرده است که با انتخاب هندسه‌ی مناسب برای این ساختارها، میدان الکتریکی می‌تواند تا چند مرتبه بزرگی تقویت شود. تقویت میدان در این نانوساختارها می‌تواند به حدی زیاد باشد که منجر به فرآیندهای غیرخطی مختلفی چون تقویت سطحی رامان القایی (SERS[۱])، فوتولومینسانس دو فوتونی، گسیل چند فوتونی جایگزیده، تولید هارمونیک دوم، سوم و هارمونیک‌های مراتب بالا شود. هارمونیک‌های بالا منابعی مفید و همدوس در طول‌موج‌های XUV هستند که کاربردهای زیادی در اسپکتروسکوپی آتوثانیه و تصویربرداری با رزولوشن فضایی بسیار بالا دارند. این منابع همچنین می‌توانند در مقیاس زمانی آتوثانیه برای مشاهده‌ی دینامیک الکترون‌ها به منظور برخی کاربردها مورد استفاده قرار گیرند. در روش‌های مرسوم تولید هارمونیک‌های بالا، پالس‌های تقویت‌شده و توان بالای لیزرهای فمتوثانیه با گاز نجیب برهم‌کنش کرده و با یونیزه کردن آن‌ها منجر به گسیل فوتون‌های هارمونیک بالا می‌شوند. اما استفاده از تقویت میدان پلسمونیکی در نانوساختارهای فلزی به عنوان جایگزین رقابتی با روش‌های مرسوم، برای رسیدن به شدت لازم جهت آغاز فرآیند تولید هارمونیک، ارائه شد. در این روش، پالس‌های فمتوثانیه با انرژی nJ خروجی از نوسانگرهای تیتانیوم سفایر با نرخ تکرار مگاهرتز، برای تولید هارمونیک‌های بالا به کار گرفته می‌شوند.

در سال ۲۰۱۱، پارک و همکارانش توانستند با استفاده از یک نانوموج‌بر سه بعدی قیفی شکل به فاکتور تقویت ۳۵۰ رسیده و تا هارمونیک مرتبه‌ی ۴۳ام لیزر تیتانیوم سفایر را تولید کنند (۱). آن‌ها نشان دادند که بهبود طراحی هندسی این نانوموج‌برها می‌تواند منجر به بالا رفتن راندمان تولید هارمونیک‌ها شود. میزان تقویت میدان در ساختارهای پلسمونیکی بسیار وابسته به شکل هندسی ساختار است. علاوه بر این، حجم ناحیه‌ی لکه‌ی داغ که در آن میزان تقویت بالاست و برای تولید هارمونیک مناسب است، وابسته به هندسه‌ی ساختار است. زیرا با افزایش حجم ناحیه‌ی لکه‌ی داغ، تعداد اتم‌های گسیل‌کننده‌ی گاز نجیب هم در آن ناحیه بالا می‌رود و در نتیجه فوتون‌های هارمونیک بالای بیشتر و توان متوسط طیفی بالاتری خواهیم داشت.

ما قبلاً هندسه‌ی هرمی شکل با قاعده‌ی مربع را مورد بررسی قرار داده و دیدیم که این هندسه از نظر حجم و میزان تقویت برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به ساختار قیفی شکل دارد (۲و۳). با توجه به این‌که شبیه‌سازی‌های قبلی نشان داده که میزان تقویت در هندسه‌هایی با انحنا و تیزی بیش‌تر، نسبت به هندسه‌های کم انحنا، بیش‌تر است، انتظار می‌رود که هندسه‌ی هرمی شکل با قاعده‌ی مستطیل افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان دهد. در این مقاله به بررسی تأثیر فاکتور نسبت در اضلاع مستطیل و همچنین اثر قطبش ورودی روی نتایج مربوط به تقویت پرداخته‌ایم.

۲- تئوری

برای به دست آوردن توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در داخل ساختار باید معادلات ماکسول را همراه معادلات ساختمندی $D=\varepsilon E$ حل کرد. برای لحاظ کردن پاشندگی فلز از مدل اصلاح‌شده‌ی دبای برای توصیف تغییرات فرکانسی گذردهی الکتریکی استفاده کردیم (۴). طبق این مدل:

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_\infty+\frac{\varepsilon_S-\varepsilon_\infty}{1+i\omega\tau}+\frac{\sigma}{i\omega\varepsilon_0} \qquad (۱)$$

که ε_∞ و ε_s به ترتیب گذردهی الکتریکی در فرکانس بی‌نهایت و گذردهی استاتیک، τ زمان واهلش و σ رسانایی الکتریکی است.

برای حل معادلات ماکسول، از روش FDTD[۲] استاندارد بر پایه الگوریتم Yee استفاده شده است. همچنین با اعمال عکس تبدیل فوریه به معادله‌ی $D=\varepsilon E$ طبق روش ADE[۳] (۵) آن را تبدیل به معادله‌ی دیفرانسیل زیر می‌کنیم:

---

[۱] Surface Enhanced Raman Scattering

[۲] Finite difference time domain

[۳] Auxiliary differential equation

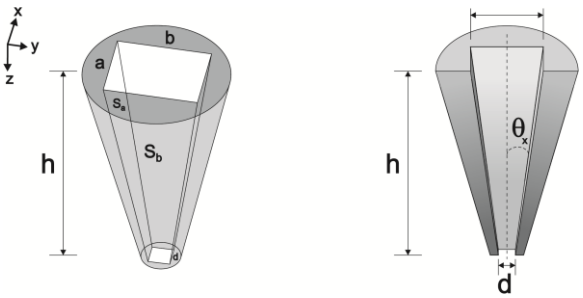
[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

$$\varepsilon_0 \frac{\partial D}{\partial t} + \tau\varepsilon_0 \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \tau\varepsilon_\infty \varepsilon_0^2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + (\varepsilon_s \varepsilon_0^2 + \tau\varepsilon_0\sigma)\frac{\partial E}{\partial t} + \varepsilon_0 \sigma E \qquad (۲)$$

حل هم‌زمان این معادله به همراه معادلات ماکسول، توزیع میدان الکتریکی و مغناطیسی در ساختار مورد نظر را به دست می‌دهد.

شکل ۱، نمای هندسی ساختار در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این هندسه با پنج پارامتر a (اندازه‌ی ضلع مستطیل در راستای محور x)، r (نسبت ضلع b به a)، h (طول ساختار)، θ (زاویه‌ی ساختار در راستای محور x) و d (اندازه‌ی دریچه‌ی خروجی ساختار در راستای x) مشخص می‌شود.

فرض می‌کنیم پالس لیزر با طول ۱۰ فمتوثانیه، طول موج ۸۰۰ نانومتر و شدت توسط یک عدسی روی دهانه‌ی ورودی ساختار مورد مطالعه متمرکز می‌شود. قسمت انتهایی ساختار را برش خورده در نظر می‌گیریم تا هارمونیک‌های بالایی که از برهم‌کنش میدان تقویت‌شده با گاز نجیب تولید خواهند شد، از آن بخش خارج شوند.



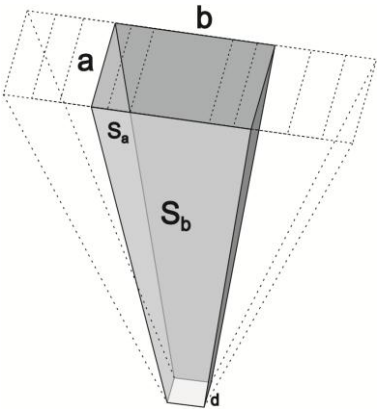
شکل ۱: شماتیک هندسه‌ی مورد بررسی، یک حفره‌ی هرمی شکل با قاعده‌ی مستطیل، در داخل فلز نقره

میدان الکتریکی فرودی در مرز بین فلز و دی‌الکتریک، امواج پلسمون-پلاریتون سطحی را روی دیواره‌ی داخلی ساختار تحریک و این امواج به سمت نوک تیز آن حرکت می‌کنند. این امواج پلسمونی از قسمتی نزدیک به انتهای ساختار بازتاب شده، با موج فرودی تداخل و یک لکه‌ی داغ[۴] در اثر تقویت شدید میدان الکتریکی ایجاد می‌کند.

۳- نتایج

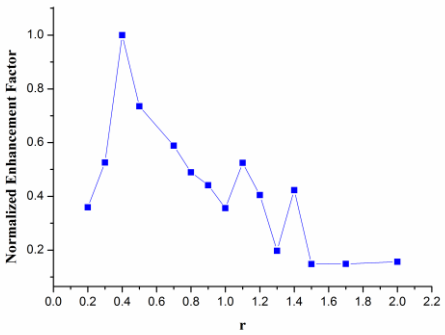
برای به دست آوردن ابعاد بهینه‌ی ساختار، به ساختار مربعی که قبلا بررسی شد رجوع می‌کنیم (۲و۳) و ابعادی را که در آن حجم ناحیه‌ی تقویت هم بزرگ باشد انتخاب می‌کنیم. یعنی: a= 5 µm، θ= 8°، h=35 µm و d=100 nm.

برای بررسی تفاوت هندسه‌ی مستطیلی نسبت به هندسه‌ی مربعی، اندازه‌ی ضلع b و یا به عبارتی مقدار r (نسبت ضلع b به a با ثابت در نظر گرفتن مقدار a) را تغییر می‌دهیم و برای هر مورد بیشینه‌ی تقویت شدت میدان را به دست می‌آوریم. قطبش میدان فرودی را در راستای محور x در نظر می‌گیریم. نحوه‌ی تغییرات هندسه در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲: شمای تغییرات هندسه‌ی مورد بررسی

تغییرات فاکتور تقویت میدان نسبت به r در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: تغییرات بیشینه‌ی تقویت شدت میدان به ازای مقادیر مختلف r برای قطبش ورودی x

همان‌طور که انتظار می‌رود، با توجه به انتخاب a=۵ µm، افزایش مقدار b به بیش از این مقدار منجر به کاهش تقویت می‌شود، زیرا در این حالت پرتوی ورودی با قطر ۵

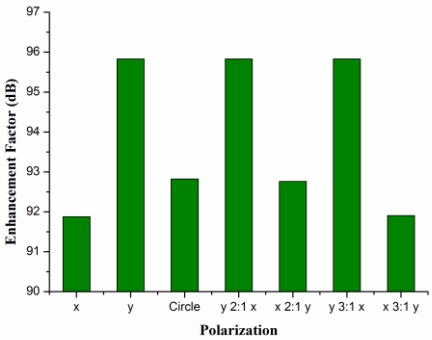
[۴] Hot spot

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]

میکرون دهانه‌ی ساختار را به طور کامل نمی‌پوشاند. از طرف دیگر همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، با تغییر r (a ثابت و b متغیر)، مقدار θ در راستای y تغییر می‌کند و در نتیجه مساحت دو صفحه‌ی ساختار که موازی محور x هستند (S_a) تقریباً ثابت مانده و مساحت دو صفحه‌ی دیگر (S_b) تغییر می‌کند. با افزایش مقدار r (b)، امواج پلسمونی تشکیل شده، باید روی سطوح بزرگ‌تری منتشر شوند که این مسأله منجر به افزایش تلفات آن‌ها می‌شود. بنابراین r (b)های کم‌تر، مطلوب‌تر هستند. اما از طرفی کاهش بیش از حد b نیز، منجر به نزدیک شدن زیاد دو دیواره‌ی در راستای x به هم می‌شود که در این صورت امواج پلسمونی تشکیل شده روی این دیواره‌ها، به سرعت به هم جفت می‌شوند و فرصت زیادی برای تقویت شدن، پیش از بازتاب آن‌ها وجود نخواهد داشت. به همین دلیل یک مقدار بهینه برای r (b) وجود خواهد داشت که مطابق شکل ۳، این مقدار برای حالتی که قطبش نور فرودی در راستای محور x است، برابر با r=۰.۴ خواهد بود.

محاسبات ما با در نظر گرفتن قطبش‌های متفاوت ورودی، در راستای محور x، y، قطبش دایروی و دو نوع قطبش بیضوی با درجه بیضویت متفاوت نشان داده است که نوع قطبش نور فرودی در تعیین میزان r بهینه تأثیری ندارد. این رفتار قابل پیش‌بینی بود، زیرا پس از وارد شدن نور به داخل ساختار، طبق معادلات ماکسول قطبش از حالت خطی بودن خارج می‌شود. بنابراین تغییر قطبش ورودی نور، فقط در ابتدای ساختار تغییر ایجاد می‌کند و پس از ورود به ساختار، تمام قطبش‌ها از بین می‌روند.

اما این تغییر در قطبش ورودی منجر به تفاوت در میزان تقویت می‌شود که نتایج آن در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۴: میزان تقویت میدان در ساختار برای قطبش‌های ورودی مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود برای قطبش‌هایی که بخش عمده‌ی میدان در راستای محور y است، مثل قطبش y یا قطبش y 2:1 x یا قطبش y 3:1 x، میزان تقویت بیش‌تر است، زیرا مطابق شکل ۱، اگر r=۰.۴ باشد، مساحت دو دیواره‌ی عمود به جهت y، S_a بیش‌تر از دو دیواره‌ی دیگر، S_b است (حدود ۲.۵ برابر)، و به همین دلیل امواج پلسمونی بیش‌تری روی این سطوح تشکیل می‌شوند و در فرآیند تقویت شرکت می‌کنند. با این قطبش‌ها و در r=۰.۴، فاکتور تقویت ۹۶ dB به دست آمد.

بنابراین، با داشتن ساختاری هرمی‌شکل با سطح مقطع مستطیل به ابعاد ۵ در ۲ میکرون و طول ۳۵میکرون و زاویه‌ی ۸ 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.

۴- نتایج

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

2. Design and optimization of a 3D pyramidal nano-waveguide with a square cross section for plasmonic field enhancement for high harmonic generation, *Hanieh Alinejad, Reza Massudi*, Plasmonics, 2014, **DOI 10.1007/s11468-014-9782-4**

۳. بررسی میزان تقویت میدان الکتریکی در نانوموج‌بر پلسمونیکی هرمی شکل با قاعده‌ی مربع، هانیه عالی‌نژاد، رضا مسعودی/ بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک، شیراز، بهمن ۱۳۹۲

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-29]