



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 موج بر پلاسمونیک 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 نانوموج بر پلاسمونیک 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 موج بر و همین‌طور میزان تقویت بررسی شده است.

کلید واژه - نانوموج بر، پلاسمونیک، 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 Attosecond 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

۱- مقدمه

در فوتونیک مدرن، انتشار امواج پلسمونیک در نانو ساختارهای فلزی، شرایط متمرکز شدن نور به زیر حد پراش را فراهم کرده است که با انتخاب هندسه مناسب برای این ساختارها، میدان الکتریکی می تواند تا چند مرتبه بزرگی تقویت شود. تقویت میدان در این نانو ساختارها می تواند به حدی زیاد باشد که منجر به فرآیندهای غیرخطی مختلفی چون تقویت سطحی رامان القایی^(۱) (SERS)، فوتولومینسانس دو فوتونی، گسیل چند فوتونی جایگزیده، تولید هارمونیک دوم، سوم و هارمونیک های مراتب بالا شود. هارمونیک های بالا منابعی مفید و همدوس در طول موج های XUV هستند که کاربردهای زیادی در اسپکتروسکوپی آتوئانه و تصویربرداری با رزولوشن فضایی بسیار بالا دارند. این منابع همچنین می توانند در مقیاس زمانی آتوئانه برای مشاهده دینامیک الکترون ها به منظور برخی کاربردها مورد استفاده قرار گیرند. در روش های مرسوم تولید هارمونیک های بالا، پالس های تقویت شده و توان بالای لیزرهای فمتوئانه با گاز نجیب برهم کنش کرده و با یونیزه کردن آن ها منجر به گسیل فوتون های هارمونیک بالا می شوند. اما استفاده از تقویت میدان پلسمونیک در نانو ساختارهای فلزی به عنوان جایگزین رقابتی با روش های مرسوم، برای رسیدن به شدت لازم جهت آغاز فرآیند تولید هارمونیک، ارائه شد. در این روش، پالس های فمتوئانه با انرژی nJ خروجی از نوسانگرهای تیتانیوم سفایر با نرخ تکرار مگاهرتز، برای تولید هارمونیک های بالا به کار گرفته می شوند.

در سال ۲۰۱۱، پارک و همکارانش توانستند با استفاده از یک نانوموج بر سه بعدی کیفی شکل به فاکتور تقویت ۳۵۰ رسیده و تا هارمونیک مرتبه ی ۴۳م لیزر تیتانیوم سفایر را تولید کنند (۱). آن ها نشان دادند که بهبود طراحی هندسی این نانوموج برها می تواند منجر به بالا رفتن راندمان تولید هارمونیک ها شود. میزان تقویت میدان در ساختارهای پلسمونیک بسیار وابسته به شکل هندسی ساختار است. علاوه بر این، حجم ناحیه ی لکه ی داغ که در آن میزان تقویت بالاست و برای تولید

هارمونیک مناسب است، وابسته به هندسه ی ساختار است. زیرا با افزایش حجم ناحیه ی لکه ی داغ، تعداد اتم های گسیل کننده ی گاز نجیب هم در آن ناحیه بالا می رود و در نتیجه فوتون های هارمونیک بالای بیشتر و توان متوسط طیفی بالاتری خواهیم داشت.

ما قبلاً هندسه ی هرمی شکل با قاعده ی مربع را مورد بررسی قرار داده و دیدیم که این هندسه از نظر حجم و میزان تقویت برتری قابل ملاحظه ای نسبت به ساختار کیفی شکل دارد (۲و۳). با توجه به این که شبیه سازی های قبلی نشان داده که میزان تقویت در هندسه هایی با انحنا و تیزی بیش تر، نسبت به هندسه های کم انحنا، بیش تر است، انتظار می رود که هندسه ی هرمی شکل با قاعده ی مستطیل افزایش قابل ملاحظه ای را نشان دهد. در این مقاله به بررسی تأثیر فاکتور نسبت در اضلاع مستطیل و همچنین اثر قطبش ورودی روی نتایج مربوط به تقویت پرداخته ایم.

۲- تئوری

برای به دست آوردن توزیع میدان های الکتریکی و مغناطیسی در داخل ساختار باید معادلات ماکسول را همراه معادلات ساختمندی $D = \epsilon E$ حل کرد. برای لحاظ کردن پاشندگی فلز از مدل اصلاح شده ی دبی برای توصیف تغییرات فرکانسی گذردهی الکتریکی استفاده کردیم (۴). طبق این مدل:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} + \frac{\sigma}{i\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

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

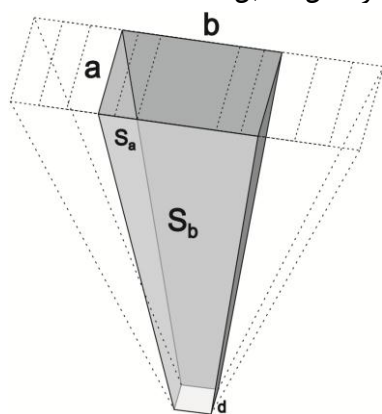
برای حل معادلات ماکسول، از روش FDTD^۲ استاندارد بر پایه الگوریتم Yee استفاده شده است. همچنین با اعمال عکس تبدیل فوری به معادله ی $D = \epsilon E$ طبق روش ADE^۳ (۵) آن را تبدیل به معادله ی دیفرانسیل زیر می کنیم:

^۲ Finite difference time domain
^۳ Auxiliary differential equation

۳- نتایج

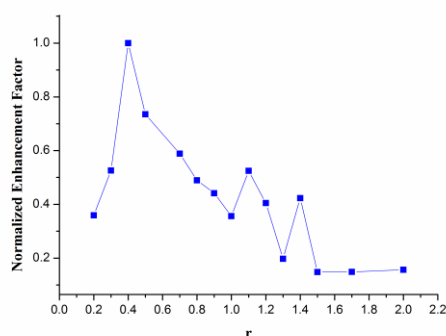
برای به دست آوردن ابعاد بهینه‌ی ساختار، به ساختار مربعی که قبلاً بررسی شد رجوع می‌کنیم (۳ و ۲) و ابعادی را که در آن حجم ناحیه‌ی تقویت هم بزرگ باشد انتخاب می‌کنیم. یعنی: $a = 5 \mu\text{m}$ ، $\theta = 8^\circ$ ، $h = 35 \mu\text{m}$ و $d = 100 \text{ nm}$.

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 $a = 5 \mu\text{m}$ افزایش مقدار b به بیش از این مقدار منجر به کاهش تقویت می‌شود، زیرا در این حالت پرتوی ورودی با قطر ۵

$$\epsilon_0 \frac{\partial D}{\partial t} + \tau \epsilon_0 \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \tau \epsilon_\infty \epsilon_0^2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} +$$

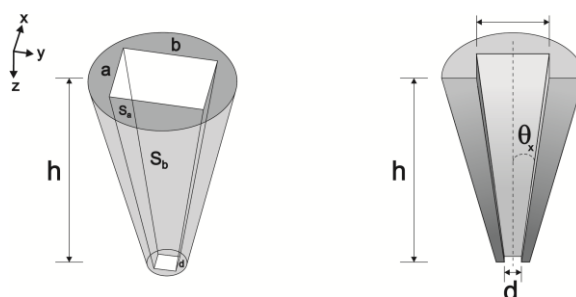
(۲)

$$(\epsilon_s \epsilon_0^2 + \tau \epsilon_0 \sigma) \frac{\partial E}{\partial t} + \epsilon_0 \sigma E$$

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 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 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.

^۴ Hot spot

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 x یا $2:1 y$ یا قطبش x یا $3:1 y$ ، میزان تقویت بیش‌تر است، زیرا مطابق شکل ۱، اگر $r=0.4$ 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 $r=0.4$ ، فاکتور تقویت ۹۶ dB به دست آمد.

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

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 $r=0.4$ 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.

