بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین
کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

تولید هارمونیک مرتبه بالا به وسیله نانوذرات هسته/پوسته فلزی بیضوی شکل جفت شده

زینب آمیز، مسعود محبی

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، zeinab.amiz17@gmail.com

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، m.mohebbi@vru.ac.ir

چکیده- ما تولید هارمونیک مرتبه بالا ناشی از برهم‌کنش گاز آرگون با میدان الکتریکی تقویت‌شده‌ی ناهمگن ناشی از پلاسمون سطحی جایگزیده را بررسی می‌کنیم. این میدان‌ها زمانی که یک نانوذره جفت شده‌ی طلا با روکش نقره در معرض تابش یک پالس لیزری کوتاه مدت قرار می‌گیرد تولید می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که با به‌کار بردن پوشش نازک نقره اطراف نانو ساختار، تقویت میدان در گاف نانوساختار به حدی است که می‌توان به تولید هارمونیک مرتبه بالاتر دست یافت. هم چنین تقویت میدان قابل توجه در اطراف نانوذره‌ی فلزی به ما اجازه‌ی استفاده از شدت‌های فرودی پایین تر از آزمایش‌های معمول HHG را می‌دهد. درنتیجه از تخریب گرمایی نانوذره‌ها می‌تواند جلوگیری شود. بنابراین می‌توان از این طرح برای تولید پالس‌های XUV فوق کوتاه با آهنگ تکرار MHz برای دفعات زیاد استفاده کرد.

کلید واژه: تولید هارمونیک مرتبه بالا، نانوذرات بیضوی شکل، میدان الکتریکی تقویت یافته

High order harmonic generation using a coupled metal ellipsoidal core/shell nanoparticles

Zeinab Amiz, Masoud Mohebbi
Vali-e-Asr University of Rafsanjan, zeinab.amiz17@gmail.com
Vali-e-Asr University of Rafsanjan, m.mohebbi@vru.ac.ir

Abstract- We investigate high-order harmonic generation (HHG) resulting from the interaction of argon gases with enhanced inhomogeneous electric field based on localized surface plasmon. These fields produced when an Ag coated around Au coupled ellipsoidal nanoparticles are illuminated by a short laser pulse. The results show that by applying a thin Ag coating around the nanoparticles, the field strength in the nanoparticles gap is such that the higher order harmonic generation can be achieved. Also, the significant field enhancement in argon in the vicinity of metal nanoparticles allows us to use much lower incident intensities than in typical HHG experiments. As a result it can be prevented nanoparticles from thermal destruction. Thus one can be apply this scheme to produce ultrashort XUV pulses with MHz repetition rates for many times.
Keywords: High-order Harmonic Generation, Ellipsoidal Nanoparticles, Enhanced electric field

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

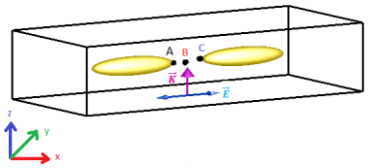
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

مقدمه

تولید هارمونیک‌های مرتبه بالا پدیده‌ای غیرخطی می‌باشد که در نتیجه‌ی برهم‌کنش یک پالس لیزری پرشدت با یک سیستمی از اتم‌های گازی یا مولکول‌ها در فاز گازی و یا جامد حاصل می‌شود. تابش حاصل از این برهم‌کنش از لحاظ طیفی شامل مولفه‌های فرکانسی می‌باشد که مضربی از فرکانس باریکه‌ی لیزری فرودی می‌باشد [۱و۲]. باریکه گسیلی این منبع لیزری، محدوده‌ی وسیعی از تابش، از مادون قرمز تا فرابنفش دور (حتی اشعه X نرم) را در بر می‌گیرد. از طرف دیگر به علت خاصیت تقویت کنندگی نانوساختارهای فلزی[۳]، مطالعات زیادی در مورد تولید هارمونیک‌های مرتبه بالا با استفاده از باریکه‌های لیزری کم شدت شده است [۴-۷]. از جمله‌ی این پژوهش‌ها استفاده از کامپوزیتی که از نانوساختارهای بیضوی شکل و اتم‌های آرگون تشکیل شده است که گروه یانگ [۶] و هوساکو [۷] به بررسی آن پرداخته‌اند. گروه یانگ موفق شدند با استفاده از جفت نانوبیضوی که تحت تابش پالس لیزری با قله شدت 10^{11}Wcm^{-2} قرار گرفته بود، به تولید هارمونیک‌های مرتبه بالا با مرتبه‌ی فرکانس قطع ۵۰ دست یابند. گروه هوساکو با استفاده از نانوساختارهای بیضوی شکل منفرد با توزیع فضایی متناوب توانستند به تولید هارمونیک‌های مرتبه بالا با مرتبه‌ی فرکانس قطع ۵۸ برسند. در این جا بر مبنای کارهای انجام شده در این زمینه [۴-۷] قصد داریم از نانوذرات بیضوی شکل که روکشی بر روی آن قرار داده شده است استفاده کنیم. استفاده از روکش فلزی به‌عنوان پارامتری برای کنترل بیشتر خواص اپتیکی نانوبیضوی‌ها می‌باشد. با متمرکز شدن باریکه یک لیزر تجاری با قله شدت 10^{11} Wcm^{-2} بر روی این نانوساختار گاز اتمی آرگون به این نانوساختار وارد می‌شود. افزایش نانوپلاسمونیکی در ناحیه‌ی شکاف بین بیضوی‌های متحرک موجب می‌شود که حداقل شدت میدان به‌طور محلی از $8/5\times10^{14}$ Wcm^{-2} تجاوز کند. در نتیجه هارمونیک‌های مرتبه بالای پرانرژی‌تری نسبت به کار یانگ و هوکاتسو می‌تواند به‌وسیله این اتم‌ها تولید شود. اگرچه انتظار می‌رود که افزایش نانوپلاسمونیکی برای نانوساختارهای بیضوی بیشتر از نانوساختارهای پاپیونی باشد [۴]، اما دلیل انتخاب نانوساختارهای بیضوی در این کار در مقایسه با نانوساختارهای پاپیونی این است که بیضوی‌ها را می‌توان با استفاده از سنتز شیمیایی در مقادیر زیاد و همچنین می‌توان آن‌ها را نیز در آرایه‌های بزرگتر بر روی سطوح تولید کرد.

فرض‌های شبیه سازی

نانوساختار مورد بررسی از دو بیضوی با سطح مقطع دایره‌ای از جنس طلا که با روکش از جنس نقره تشکیل شده است. فاصله‌ی بین نوک دو بیضوی (گاف) ۱۰ نانومتر می‌باشد. این نانوساختار درون جعبه‌ای با ابعاد ۷۵×۱۰۰×۳۰۰ نانومتر از جنس خلأ قرار دارند (مطابق شکل ۱). میدان الکتریکی فرودی در تمام مراحل شبیه‌سازی از یک پالس فرودی قطبیده شده خطی در راستای محور x تشکیل شده است با مدت تپش ۱۰ فمتوثانیه (بازه‌ی طول موجی ۷۵۰ تا ۸۵۰ نانومتر) بر ساختار اعمال می‌گردد. کلیه شبیه سازی‌های انجام شده بر مبنای حل عددی معادلات ماکسول با استفاده



شکل ۱: طرحواره سه بعدی از ساختار متشکل از دو نانوبیضوی طلا که تحت تابش پالس فرودی در جهت عمودی z با قطبش خطی در امتداد محور x قرار گرفته است.

از روش تفاضل محدود در حوزه زمان می‌باشد [۸]. دقت مش در تمام مراحل شبیه سازی ۰/۵ نانومتر می‌باشد. اگر مشابه با آزمایش کیم [۴] گاز آرگون را به فضای خالی بین دو نانوبیضوی پمپ نماییم می‌توان به علت تقویت زیاد میدان در فضای گاف به بررسی پاسخ غیرخطی این اتم یعنی تولید هارمونیک مرتبه بالا پرداخت. دینامیک حرکت یک الکترون که در یک میدان الکتریکی (تقویت شده درون

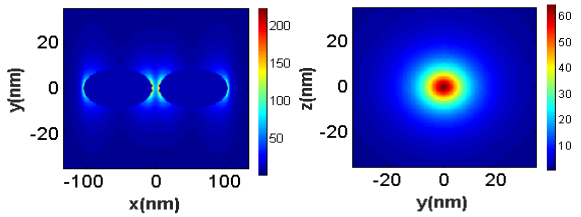
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

گاف بر روی خط مرکز تا مرکز دو نانو بیضوی) با قطبش خطی حرکت می‌کند را می‌توان با تقریب خوبی از حل معادله شرودینگر وابسته به زمان یک بعدی به دست آورد. بر این مبنا می‌توان شدت هارمونیک‌های مرتبه بالای گسیل شده را محاسبه کرد [۵ و۶].

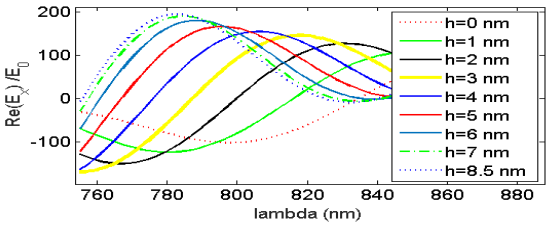
تقویت میدان در نانوساختار روکش‌دار

ابتدا به بررسی پاسخ نوری نانوساختار به میدان لیزری می‌پردازیم. این نانوبیضوی‌های منفرد از جنس طلا به ترتیب با شعاع اصلی و فرعی ۵۰ و ۸٫۵ نانومتر انتخاب شده است. در شکل ۲ توزیع دوبعدی اندازه میدان الکتریکی پراکنده شده بهنجار (نسبت اندازه میدان الکتریکی پراکنده شده به قله میدان فرودی) در اطراف نانوساختار طلا (بدون روکش نقره) در صفحه‌های xy (z=0) و yz (x=0) که از مرکز گاف نانوساختار عبور می‌کنند نشان داده شده است. توزیع دوبعدی میدان به علت سطح مقطع دایروی در صفحه xy(z=0) و xz(y=0) یکسان می‌باشد. مطابق شکل ۲ بیشترین مقدار میدان پراکنده شده (تقویت ۲۲۰ برابری) در سطح نانوبیضوی طلا به ویژه نقاطی که در راستای محور x قرار دارند مشاهده می‌شود (یعنی نوک بیضوی). هم چنین حداقل تقویت در وسط گاف حدود ۶۵ برابر می‌باشد. مکانیسم تقویت در نانوساختار بیضوی بر اساس تشدید پلاسمونیکی می‌تواند توضیح داده شود [۴و۹]. در گام بعدی اقدام به اضافه کردن پوسته‌ای از جنس نقره به ضخامت h حول هسته طلا با شعاع اصلی و فرعی (50-h) و (8.5-h) نانومتر می‌نماییم. در شکل ۳ مولفه‌ی x طیفی میدان پراکنده شده بهنجار در محل نقطه A (یک نانومتر بیرون از نوک بیضوی نشان داده شده در شکل ۱ برای ضخامت پوسته‌ی ۰ تا ۸٫۵ نانومتر نشان داده شده است. طبق شکل بیشترین تقویت میدان پراکنده شده با مقدار ۱۹۶ در طول موج ۷۸۴ نانومتر در ضخامت ۸٫۵ نانومتر می‌باشد. هم چنین بیشترین تقویت میدان پراکنده شده با مقدار ۱۶۰در حوالی طول موج ۸۰۰ نانومتر در ضخامت ۵ نانومتر می‌باشد.



شکل ۲: توزیع دوبعدی اندازه‌ی میدان الکتریکی تقویت شده اطراف نانوساختار جنس طلا (بدون روکش) در صفحه‌های xy و yz که از مرکز گاف نانوساختار عبور می‌کنند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت پوسته، طول موج تشدید پلاسمونی به سمت مقادیر کوتاه‌تر جابه‌جا



شکل ۳: تقویت مولفه ی x میدان الکتریکی برای نانوساختار بیضوی طلا با ضخامت‌های متفاوت روکش نقره از ۰ تا ۸٫۵ نانومتر در بازه طول موجی ۷۵۰-۸۵۰ نانومتر در نقطه A.

می‌شود. این به علت ایجاد بارهای الکتریکی در بیرون و داخل پوسته (روکش نقره) و هسته است که با یکدیگر با انرژی بالاتر (به علت عدم تقارن توزیع بار ایجاد شده) برهم‌کنش می‌کنند. مقدار تقویت نیز می‌تواند تابعی از چگالی بارهای متناظر باشد.

تولید هارمونیک مرتبه بالا با استفاده از تزریق گاز آرگون در گاف نانوساختار

سرانجام با قرار دادن اتم آرگون در وسط گاف بر روی وسط خط واصل بین دو نوک نانوساختار می‌توان به بررسی پاسخ غیرخطی این اتم به میدان تقویت شده پرداخت. اگر شدت میدان فرودی مشابه با آزمایش کیم [۴] 10^{11} Wcm^{-2} در

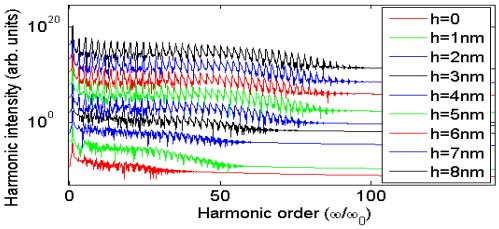
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

نظر بگیریم در این‌صورت حداقل شدت میدان در وسط گاف Wcm^{-2} ۸٫۵ ×۱۰^{۱۴} خواهد بود که از شدت آستانه برای تولید هارمونیک مرتبه بالا عبور خواهد کرد. اگر اتم آرگون را مستقیماً تحت تابش پالسی با شدت Wcm^{-2} ۱۰^{۱۱} قرار می‌دادیم، هیچ هارمونیک مرتبه‌ی بالایی تولید نمی‌شد. طیف هارمونیک‌های مرتبه بالای گسیلی با استفاده از نانوساختار در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای مورد بدون پوسته مرتبه تقریبی هارمونیک قطع مقدار ۳۵ می‌باشد. برای مورد نانوساختار روکش‌دار با افزایش ضخامت پوسته از مقدار ۱-۵ نانومتر، مرتبه تقریبی هارمونیک قطع تا مقدار ۷۵ افزایش می‌یابد. برای ضخامت پوسته ی ۵-۸٫۵ نانومتر طیف‌های هارمونیک برای هر سه ضخامت تقریباً یکسان و مرتبه تقریبی هارمونیک قطع برای آن‌ها تقریباً ثابت باقی می‌باشد. می‌توان علت افزایش مرتبه‌ی فرکانس قطع با افزایش ضخامت پوسته از مقدار ۵-۱ نانومتر را در افزایش انرژی پاندرماتیو کسب شده در طول حرکت الکترون در میدان تقویت شده‌ی ناهمگن دانست. همچنین علت تغییر نکردن مرتبه‌ی فرکانس قطع تقریبی ۷۵ با افزایش ضخامت پوسته از مقدار ۵-۸٫۵ نانومتر را در وابستگی شدید و غیرخطی مسیرهای الکترونی به ناهمگنی فضایی و زمانی میدان پراکنده و تقویت شده در محدوده‌ی گاف ۱۰نانومتری دانست.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تولید هارمونیک مرتبه بالا با استفاده از نانوساختار بیضوی شکل پرداخته شد. این نانوساختار متشکل از یک جفت بیضوی دوار با هسته طلا با روکش از جنس نقره می‌باشد، که شعاع هسته طلا در حالت بدون روکش به ترتیب شعاع اصلی ۵۰ و شعاع‌های فرعی ۸٫۵ نانومتر می‌باشند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی تقویت میدان الکتریکی برای نانوساختار با ضخامت پوسته‌ی بیشتر و معین، افزایش بیشتری یافته است. در نتیجه مرتبه هارمونیک‌های گسیلی برای حالت بهینه در حدود ۷۵ می‌باشد که نسبت به آزمایش یانگ [۶] که در حدود ۴۰ می‌باشد برتری چشمگیری دارد. بنابراین با این چیدمان می‌توان منبع لیزری طول موج کوتاه با قابلیت استفاده طولانی مدت و پایدار در اختیار داشت.



شکل ۴: طیف هارمونیک نانوساختاری با ضخامت‌های پوسته‌ی مختلف.

مرجع‌ها

[1] P. Corkum, K. Ferenc, "Attosecond science", Nat. phys., Vol. 3, No. 6, pp. 381, 2007.

[2] M. Lewenstein, et al, "Theory of high-harmonic generation by low-frequency laser fields", Phys. Rev. A., Vol. 49, No. 3, pp. 2117, 1994.

[3] M. Alsawafta, W. Mamoun, "Plasmonic modes and optical properties of gold and silver ellipsoidal nanoparticles by the discrete dipole approximation", J. Nano, Vol. 2012, pp. 33, 2012.

[4] S. Kim, et al. "High-harmonic generation by resonant plasmon field enhancement", Nat., Vol. 453, No. 7196, pp. 757, 2008.

[5] M. Mohebbi, S. Nazarpoor Malaei,"Electron path control of high-order harmonic generation gy a spatiaiiy inhomogeneous field", J. Mod. Opt. Vol. 63, No. 7, pp. 643-652, 2016.

[6] Y .Y. Yang, et al. "The generation of MHz isolated XUV attosecond pulses by plasmonic enhancement in a tailored symmetric Ag cross nanoantenna with a few-cycle laser", Laser. Phys., Vol. 23, No. 4, pp. 045301, 2013.

[7] A. Husakou, J. Herrmann, "Quasi-phase-matched high-harmonic generation in composites of metal nanoparticles and a noble gas", Phys. Rev. A., Vol. 90, No. 2, pp. 023831, 2014.

[8] P. Biagioni, et al. "Cross resonant optical antenna", Phys. Rev. lett., Vol. 102, No. 25, pp. 256801, 2009.

[9] C. Noguez, "Surface plasmons on metal nanoparticles: the influence of shape and physical environment", J. Phys. Chem. C., Vol. 111, No. 10, pp. 3806-3819, 2007.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]