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

تولید پلاسمونیکی نور لیزری با طول‌موج کوتاه با استفاده از نانوساختارپاپیونی شکل طلای روکش‌دار مستقر روی زیر لایه

محمد سلیمانی، مسعود محبی، محمدرضا فروزش فرد

گروه فیزیک، دانشگاه ولی‌عصر، رفسنجان
m.mohebbi@vru.ac.ir

چکیده – ما تولید هارمونیک مرتبه بالا ناشی از برهم‌کنش گاز هیدروژن با میدان الکتریکی تقویت‌شده به وسیله‌ی پلاسمون سطحی موضعی را بررسی می‌کنیم. این میدان‌ها زمانی که یک نانوساختار پاپیونی شکل طلای روکش‌دار که روی یک زیرلایه از جنس YAG قرار دارد در معرض یک موج تخت کوتاه مدت با طول‌موج بلند قرار می‌گیرد تولید می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با به کار بردن هم‌زمان پوشش عایق نازک اطراف نانو ساختار و زیر لایه، تقویت میدان در گاف نانوساختار به حدی است که می‌توان به تولید هارمونیک مرتبه بالاتر دست یافت. با این پیشنهاد، از تخریب نانوساختار جلوگیری می‌شود و درنتیجه می‌توان از ساختار، برای دفعات زیاد جهت تولید هارمونیک استفاده کرد.

کلید واژه- هارمونیک مرتبه بالا، میدان الکتریکی تقویت‌شده، نانوساختار، پلاسمون سطحی موضعی

Plasmonic Production of Short-wavelength Laser Light Using a Coated-Gold Bow-tie Nanostructure placed on Substrate

Soleimani Mohammad, Mohebbi Masoud, Forouzeshfard Mohammad Reza

Department of Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan

Abstract- We investigate high-order harmonic generation resulting from the interaction of Hydrogen gases with Enhanced electric field based on Localized surface plasmon. These fields produced when a coated-gold bow-tie nanostructure on a sublayer is illuminated by a short planner wave of long wavelength. The simulation results show that by simultaneously applying a thin insulated coating around the nanostructure and substrate, the field strength in the nanostructure gap is such that the higher order harmonic generation can be achieved. By this offer can be prevented nanostructure from destruction, and results that one can be apply to produce harmonics for many times.

Keywords: High-order Harmonic, Enhanced electric field, Nanostructure, Localized surface plasmon

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

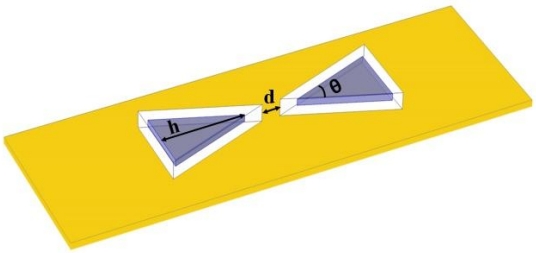
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

مقدمه

تولید هارمونیک مرتبه بالا زمانی رخ می‌دهد که اتم‌ها و مولکول‌های گاز و یا جامدات کریستالی تحت تابش پالس لیزری شدیدی قرار گیرند. این فرآیند غیرخطی باعث تولید تابش فرابنفش دور (XUV) و اشعه X نرم از پالس لیزری فمتوثانیه با طول‌موجی در محدوده طیف مرئی و یا مادون‌قرمز می‌شود. پالس لیزری مورد استفاده در فرآیند تولید هارمونیک مرتبه بالا باید دارای شدتی از مرتبه $10\ TW\ cm^{-2}$ باشد. بنابراین یک تقویت پالس بر مبنای چرپ[۱] برای بالا بردن قله توان پالس فمتوثانیه لازم می‌باشد. اخیرا با استفاده از تشدید پلاسمون سطحی در نانو ساختار پاپیونی شکل فلزی، میدان الکتریکی فرودی تا بیش از 20 dB تقویت می‌شود[۲] درنتیجه شدت پالس لیزری از آستانه موردنیاز برای تولید هارمونیک مرتبه بالا تجاوز کرده البته نرخ تکرار پالس ثابت باقی می‌ماند و دیگر نیازی به فرآیند تقویت لیزری نیست. نیم‌رخ طیفی هارمونیک‌های مرتبه بالای تولیدشده توسط میدان پلاسمونیکی تقویت‌شده تعیین می‌شود. لذا پژوهش‌های زیادی برای بهبود کنترل طیف هارمونیک‌های تولیدی انجام شده است [۳-۵]. تاکنون نانو ساختارهای استفاده شده در این فرآیند دارای دو ضعف اصلی می‌باشند اول مقاومت کم در برابر آسیب‌های حرارتی ناشی از پالس لیزری (که با تغییر شکل و یا تبخیر نانو ساختار) باعث کاهش طول عمر نانو ساختار می‌شود[۶]. ضعف دوم نانو ساختارها نقاط داغ (ناحیه فضایی که شدت میدان الکتریکی به بیشترین مقدار خود می‌رسد) به‌شدت باریک و محدود هستند[۷]. در این مقاله برای حل این مشکل، استفاده از یک لایه‌ی عایق نازک حول نانو ساختار پیشنهاد داده می‌شود که نه‌تنها از تخریب نانو ساختار جلوگیری می‌کند بلکه باعث کاهش میدان تقویت‌شده درون گاف نانوساختار به مقدار زیادی نمی‌شود. در نتیجه در قیاس با تولید باریکه لیزری با کوتاه‌ترین طول‌موجی که کیم و همکارانش [۲] به صورت تئوری و تجربی به آن دست یافته بودند، با این پیشنهاد که در این مقاله ارایه می‌دهیم می‌توان به تولید باریکه لیزری با طول‌موج کوتاه‌تر نیز دست یافت. هم‌چنین در این مقاله، به‌منظور عینیت بخشیدن به استفاده از چنین ساختاری در آزمایشگاه، یک زیر لایه در زیر نانو ساختار با روکش عایق قرار داده شد. در ادامه بر پایه شبیه‌سازی عددی، به بررسی تأثیر قرار دادن این زیر لایه بر تقویت میدان و طیف هارمونیک تولیدی پرداخته می‌شود.

شبیه‌سازی

در این قسمت مطابق شکل (۱) با استفاده از نرم‌افزار کامسول یک نانوذره پاپیونی شکل از جنس طلا با زاویه رأس $\theta = 10^\circ$، ارتفاع $h = 275nm$، ضخامت $t = 25nm$، گاف $d = 10nm$ و با روکش عایق به ضریب شکست ۱,۴۶ و ضخامت ۲ نانومتر که بر روی یک زیر لایه به ضریب شکست ۱,۸۳ و ضخامت ۲۵ نانومتر درون یک مکعب مستطیل از جنس هوا قرار دارد شبیه‌سازی می‌کنیم.



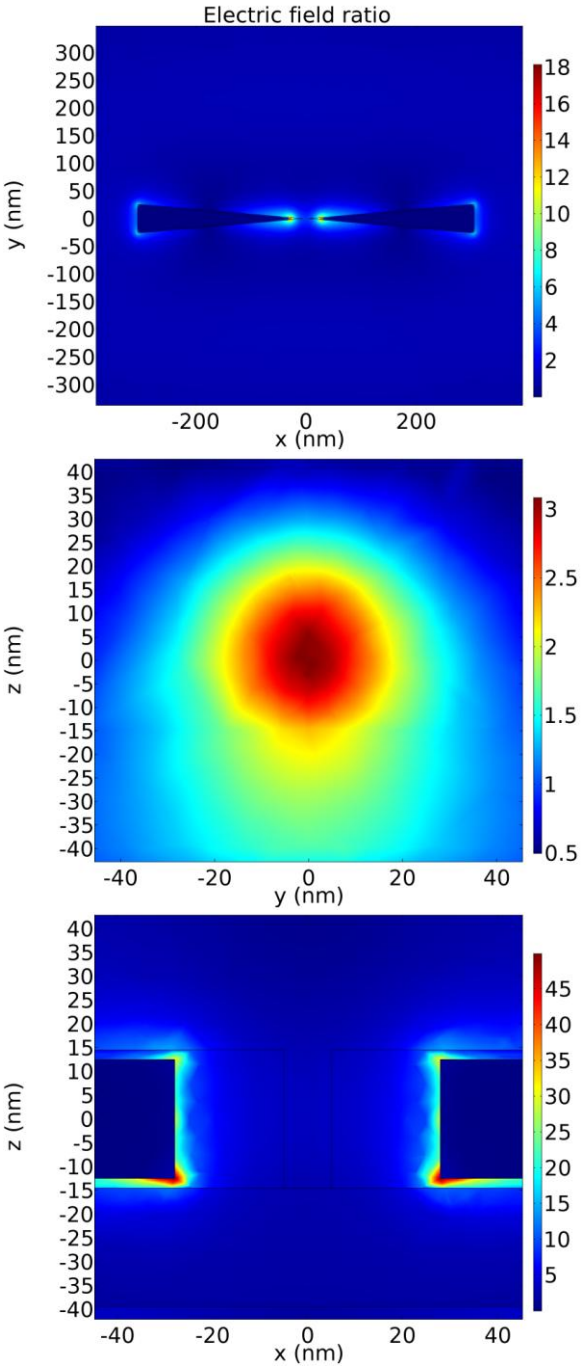
شکل ۱: شکل سه‌بعدی نانو ساختار متشکل از دو مثلث از جنس طلا (رنگ بنفش) با روکش عایق (رنگ سفید) روی یک زیر لایه از جنس YAG (رنگ زرد).

لازم به ذکر است که مشخصات هندسی نانوذره تحت بررسی، بعد از بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار کامسول به دست‌آمده‌اند که در ازای این مقادیر بهینه از پارامترهای هندسی (مقادیری که در بالا اشاره شد) بیشترین تقویت میدان الکتریکی درون گاف نانو ساختار به دست می‌آیند. یک موج الکتریکی تخت از سطح بالایی مکعب، با طول‌موج ۸۰۰nm و با قطبش الکتریکی در راستای محور

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

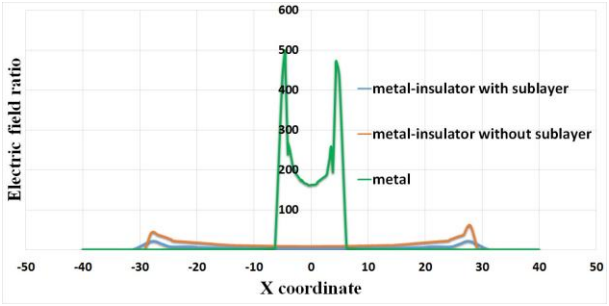
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

x که در راستای z منتشر می‌شود به نانو ساختار تابیده می‌شود و توزیع ضریب میدان الکتریکی پراکنده‌شده (نسبت اندازه میدان الکتریکی پراکنده‌شده به‌اندازه میدان فرودی) برای حالت نانو ساختار با روکش عایق و زیر لایه در شکل (۲) گزارش‌شده است.



شکل ۲: توزیع دوبعدی میدان الکتریکی تقویت‌شده در اطراف نانو ساختاری از جنس طلا با روکش عایق و روی زیر لایه از جنس YAG در صفحه‌های yz، xz و xy که از مرکز گاف نانو ساختار عبور می‌کنند.

با مقایسه مقدار تقویت میدان الکتریکی در صفحه‌های xy، xz و yz درمی‌یابیم بیشترین تقویت در ناحیه فضای خالی بین نوک مثلث‌ها (گاف نانو ساختار) اتفاق می‌افتد. بنابراین در گام بعد توزیع یک‌بعدی میدان الکتریکی تقویت‌شده روی خط واصل بین دو رأس نانو ساختار را مطابق با شکل (۳) برای تمامی حالت‌های نانو ساختار بدون روکش عایق، با روکش عایق، با روکش عایق و زیر لایه نشان داده می‌شود. مطابق شکل بیشترین تقویت میدان فرودی برای حالت نانوساختار طلای بدون روکش طلا و زیر لایه برابر با مقدار تقریبی ۴۸۰ برابر بر روی نوک مثلث‌ها و ۱۸۰ برابر در وسط گاف (x=y=z=0) می‌باشد. با اضافه کردن فقط لایه‌ی روکش مقدار تقویت به مقدار تقریبی ۱۰ برابر بر روی نوک مثلث‌ها و مقدار تقریبی ۳ برابر در وسط گاف کاهش می‌یابد. با اضافه کردن یک زیر لایه به نانوساختار طلای روکش‌دار، مقدار تقویت به مقدار تقریبی و ثابت ۳ برابر در سرتاسر گاف کاهش می‌یابد.



شکل ۳: توزیع یک‌بعدی میدان الکتریکی تقویت‌شده روی خط واصل بین دو رأس نانو ساختار (z=0) برای حالت‌های نانو ساختار بدون روکش عایق، با روکش عایق، با روکش عایق و زیر لایه

تولید هارمونیک مرتبه بالا

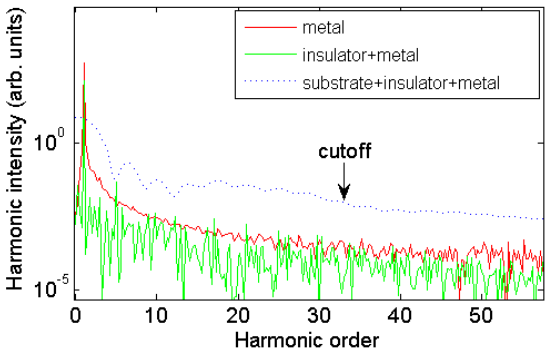
درنهایت با قرار دادن یک اتم هیدروژن در وسط گاف (به‌عنوان مثال بر روی وسط خط واصل بین دو رأس) نانو ساختار می‌توان به بررسی پاسخ غیرخطی این اتم به میدان تقویت‌شده پرداخت [۸, ۹]. دینامیک حرکت یک الکترون که در یک میدان الکتریکی با قطبش خطی (درون گاف بر روی خط z=0) مطابق با شکل (۳) حرکت می‌کند را می‌توان با تقریب خوبی از حل معادله شرودینگر

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

وابسته به زمان یک‌بعدی به دست آورد. بر این مبنا می‌توان شدت هارمونیک‌های مرتبه بالای گسیل‌شده را محاسبه کرد [۱۰].

در شکل (۴) طیف هارمونیک‌های مرتبه بالا برای موردهای فقط نانو ساختار طلا، نانو ساختار طلا با روکش عایق و نانوساختار طلا با روکش عایق مستقر بر زیر لایه نشان داده شده است. شدت میدان فرودی $5\times10^{11}\,\mathrm{W/cm^2}$ و مدت تپش $10\,fs$ در نظر گرفته‌شده است.



شکل ۴: طیف هارمونیک‌های مرتبه بالا برای موردهای فقط نانو ساختار طلا (قرمز)، نانو ساختار طلا با روکش عایق (سبز) و نانوساختار طلا با روکش عایق مستقر بر زیر لایه (آبی نقطه‌چین).

مرتبه فرکانس قطع برای حالت نانوساختار طلا با روکش عایق مستقر بر زیر لایه که قابلیت پیاده کردن آزمایشگاهی دارد حدود ۳۴ می‌باشد. در دو حالت دیگر فرکانس قطعی به علت تقویت زیاد (که منجر به تخریب ساختار در واقعیت می‌شود) مشاهده نمی‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی طیف هارمونیک ناشی از اتم هیدروژن درون گاف نانوساختار پاپیونی شکل از جنس طلا و با روکش عایق که روی زیر لایه از جنس YAG قرار دارد پرداخته شد تا امکان واقعی تولید هارمونیک مرتبه بالا در آزمایشگاه میسر شود. وجود لایه عایق از تخریب نانوساختار جلوگیری می‌کند و با این چیدمان می‌توان یک منبع لیزری طول‌موج کوتاه و با قابلیت استفاده طولانی در اختیار داشت.

مرجع‌ها

[1] J. Seres, E. Seres, A. J. Verhoef, G. Tempea, C. Streli, P. Wobrauschek, V. Yakovlev, A. Scrinzi, C. Spielmann, F. J. N. Krausz, “Laser technology: source of coherent kiloelectronvolt X-rays”, Nature, Vol.433, pp. 596, 2005.
[2] S. Kim, J. Jin, Y.J. Kim, I.Y. Park, Y. Kim, S.W. J. N. Kim, “High-harmonic generation by resonant plasmon field enhancement”, Nature, Vol.453, pp. 757, 2008.
[3] H. Ebadian, M. Mohebbi, “Plasmonic nanostructure assisted HHG in NIR spectrum and thermal analysis”, Appl. Phys., Vol.51, pp.8, 2018.
[4] H. Ebadian, M. Mohebbi, “Strong electric field enhancements in asymmetric metallic nanostructures and high-order harmonic generation”, Appl. Opt., Vol.55, 2016.
[5] Pfullmann, N. et al, “Nano-antennae assisted emission of extreme ultraviolet radiation,” Annalen der Physik, Vol.526, 2014.
[6] I. Y. Park, J. Choi, D. H. Lee, S. Han, S. Kim, S. W. J. A. d. P. Kim, “Generation of EUV radiation by plasmonic field enhancement using nano-structured bowties and funnel-waveguides”, Ann. Phys., Vol.525, pp. 87-96, 2012.
[7] M. Sivis, M. Duwe, B. Abel, C. J. N. P. Ropers, “Extreme-ultraviolet light generation in plasmonic nanostructures”, Nature, Vol.9, pp. 304, 2013.
[8] C. Winterfeldt, “Generation and control of high-harmonic radiation”, Würzburg university, 2006.
[9] M. F. Ciappina, J. Pérez-Hernández, L. Roso, A. Zaïr, M. Lewenstein, “High-order harmonic generation driven by plasmonic fields: a new route towards the generation of UV and XUV photons”, in Journal of Physics: Conference Series (IOP Publishing), pp. 012001, 2015.
[10] Masoud Mohebbi and Sakineh Nazarpoor Malaei, “Electron path control of high-order harmonic generation by a spatially inhomogeneous field”, Modern Optics, Vol. 63, No. 7, pp. 643–652, 2016.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

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