بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

# تولید پلاسمونیکی نور همدوس در محدوده ی طیفی اشعه ایکس نرم با استفاده از اتم هیدروژن

حسن عبادیان، مسعود محبی

گروه فیزیک. دانشکده علوم. دانشگاه ولیعصر(عج) رفسنجان

**چکیده - تولید هارمونیک های مرتبه بالا یک فرایند مرسوم برای تولید پالس های همدوس در محدوده ی طیفی اشعه ایکس نرم برپایه ی تبدیل فرکانسی مستقیم از پالس مادون قرمز نزدیک فمتوثانیه ای می باشد. در این تحقیق ما نشان می دهیم که یک نانوعنصر فلزی پاپیونی شکل از جنس طلا، پالس فرابنفش دوری با استفاده از افزایش پلاسمونیکی میدان تولید می کند. ضریب افزایش شدت در حدود ۸۱۰۰ میباشد که می تواند هارمونیک مرتبه ۸۵ یک لیزر فمتوثانیه تیتانیوم سفایررا در گازهیدروژن با شدت متوسط فرودی $10^{11}$ $Wcm^{-2}$ تولید نماید.**

کلید واژه- اشعه ایکس نرم، پلاسمونیک، تابش فمتوثانیه، هارمونیک های مرتبه بالا

# Plasmonic generation of coherent light in the soft-x-ray range by hydrogen atom

Ebadian Hasan, Mohebbi Masoud

Department of science, Vali-e-Asr University, rafsanjan.iran

Abstract- High-order harmonic generation is a well-established process for producing coherent pulses in the soft-x-ray range by direct frequency conversion of femtosecond near-infrared pulses. Here, we show that a metallic bowtie-shaped gold nanoelement generates the extreme-ultraviolet pulses by means of plasmonic field enhancement. The intensity enhancement factor reaches a peak of ~8100, allowing generation up to the 85th harmonic of a femtosecond Ti:sapphire laser in hydrogen gas, with a modest incident intensity of ~$10^{11}$ $Wcm^{-2}$.

Keywords: soft x-ray, plasmonics, femtosecond radiation , high order harmonics,

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13 ]



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

## ۱-مقدمه

در برهم کنش میدان‌های قوی با اتمها، یعنی زمانی که میدان الکتریکی قابل قیاس با میدان کولن داخلی اتم باشد، عبارت های غیرخطی در قطبش مهم می‌شود. مراتب بالای قطبش در هارمونیک های مرتبه بالا HHG قابل رویت است. هارمونیک های مرتبه بالا یک پدیده ی غیر خطی شدید است. این پدیده زمانی صورت می گیرد که پالس لیزری قوی با اتم یا مولکول برهمکنش کند. یک هارمونیک مرتبه پایین متداول لیزری، هارمونیک دوم لیزر Nd:YAG می باشد. هارمونیک های مرتبه بالا، منبع خیلی مفیدی برای تولید تابش اشعه X خیلی کوتاه و نیز پالس های آتوثانیه می باشد [۱]. مکانیسم HHG می تواند با استفاده از مدل نیمه کلاسیک توصیف شود [۲]. زمانی که پالس لیزری کانونی شده با یک ماده، مثلا گاز نجیب برهمکنش می کند، مقدار بیشینه ی میدان الکتریکی، نزدیک به اندازه میدان کولن می شود در این صورت خارجی ترین الکترون، به علت سد پتانسیل ایجاد شده، ممکن است با احتمالی از قیدهسته آزاد شود. الکترون آزاد شده توسط میدان الکتریکی شتاب می گیرد بطوریکه الکترون از یون والد دور می شود و سپس با تغییر جهت میدان، به سمت یون والد برمی گردد. با احتمالی الکترون ممکن است با یون والدش بارترکیب شود و انرژی اضافی خود را به شکل یک فوتون بسیار پر انرژی تواند در ناحیه ماورای بنفش دور در محدوده ۲۰-۱۰۰nm آزاد کند. چنین منابع تابشی جدیدی، در حال حاضر میتواند در ابزار لیتوگرافی به کار رود.

آستانه شدت برای وقوع HHG، از مرتبه $10^{13}W/cm^2$ می باشد. پالسهایی به بزرگی آستانه ی $10^{13}W/cm^2$ با استفاده از خروجی یک نوسانگر فمتوثانیه در طول موج 800nm قابل دسترس نمی باشد و نیازمند چیدمان های تقویت پالس چند مرحله ای می باشد که خود باعث افزایش پیچیدگی سیستم، کاهش نرخ تکرار و افزایش هزینه ها خواهد شد [۳]. این مشکلات را میتوان با استفاده از فرایند افزایش القایی میدان تشدید پلاسمونی سطحی محلی (LSPR) در یک نانوساختار فلزی برطرف نمود [۴]. به طوری که ابتدا یک میدان ضعیف لیزری به نانو ساختار تابیده می شود و به دلیل افزایش شدید میدان پلاسمونی در محل نانوساختار، به طور ناگهانی چگالی میدان حدود ۲ تا ۳ مرتبه بزرگی افزایش می یابد. در نتیجه شرط عبور از آستانه فراهم شده و هارمونیک مرتبه بالا تولید خواهد شد. تشدید پلاسمون سطحی را میتوان به عنوان نوسان تجمعی تشدیدی الکترونهای ظرفیت در یک جامد تحریک شده با نور فرودی دانست. شرط تشدید هنگامی برقرار می شود که فرکانس و تکانه فوتونهای فرودی به فرکانس طبیعی و تکانه الکترونهای نوسان کننده سطحی منطبق شود. اگر سطح ذره در ابعاد نانو مد نظر باشد، تشدید پلاسمون سطحی محلی نامیده میشود. میدان LSPR در طول موج تشدید یک دامنه میدان-نزدیک افزایش یافته از خود نشان می دهند. این میدان به شدت در اطراف نانوذره جایگزیده بوده و با دور شدن از آن کاهش می یابد. در ذرات دو تایی فلزی، موقعیت باندهای LSP به جنس دو فلز وابسته است. فقط فلزاتی با الکترونهای آزاد (Au، Cu و Ag) تشدید پلاسمونی در طیف مرئی از خود نشان می دهند و از این رو درخشنده اند. بعلاوه میزان میدان تشدیدی محلی درنانوساختارهای دوتایی افزایش چشمگیری نشان می دهد [۵]. تاکنون تولید هارمونیک های مرتبه بالا در نانوذرات فلزی با شکلها و هندسه های خاصی از قبیل دومثلثی [۶]، کروی [۷]، بیضوی [۸] تحت بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق تولید هارمونیک های مرتبه بالا در حضور نانوساختار فلزی دو مثلثی ارایه خواهد شد. با استفاده از پارامتر های بهینه ی هندسی انتخاب شده، حداکثر میدان افزایش یافته در گاف فضایی نانوساختار در نظر گرفته شده نسبت به نانوساختار ذکر شده در مرجع [۴ و۷] افزایش چشمگیری مشاهده می شود. منبع نوری یک چشمه لیزری فوق کوتاه از مرتبه فمتوثانیه با چگالی توان حدود $10^{11}W/cm^2$ و با قطبش خطی فرض می شود. در این مقاله ابتدا میزان میدان پلاسمون سطحی افزایش یافته یک نانو مثلث بررسی خواهد شد و در ادامه میدان الکتریکی افزایش یافته نانو ساختار مثلثی دوتایی بررسی می شود. نانوساختار دوتایی مد نظر از جنس طلا بوده که توسط چشمه نوری قطبیده شده در راستای خط واصل دو ذره نور دهی می شود. این شبیه سازی نیازمند استفاده از دو نوع شبیه سازی مختلف می باشد. در ابتدا حل عددی معادلات ماکسول برای تعیین میزان تقویت میدان در محل نانوذره و سپس حل عددی معادله وابسته به زمان شرودینگر.

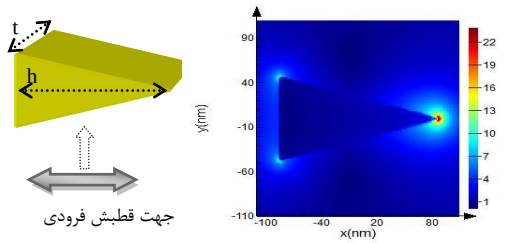
## ۲- میدان افزایش یافته پلاسمونیکی محلی



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13 ]

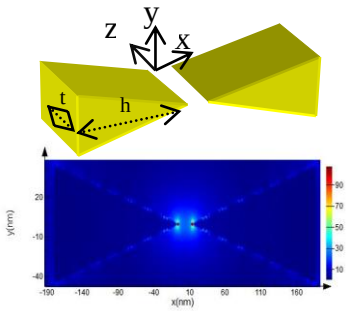
برهم کنش میدان و نانوساختار با استفاده ازحل عددی معادلات ماکسول و مدل اتمی درود بیان می شود[۴، ۹]. مقدار میدان الکتریکی افزایش یافته و توزیع آن در فضای اطراف نانوساختار با استفاده از حل عددی معادلات ماکسول با روش FDTD استخراج می شود. در شکل ۱ یک تک نانو مثلث از جنس طلا با ضخامت t =50nm، زاویه راس $\theta$ =$30^0$ و ارتفاع h=180nm، در معرض نوردهی توسط چشمه نوری یاد شده قرار گرفته است. همانطور که در شکل مشاهده می شود بیشترین مقدار افزایش میدان در محل راس های نانومثلث فلزی روی داده است. این پدیده ی افزایش میدان در نقاط نوک تیز تحت عنوان اثر جرقه زنی شناخته می شود. بیشترین میدان افزایش یافته پلاسمونیکی حدود ۲۲ برابر میدان فرودی می باشد.




شکل۱: LSPR افزایش یافته در یک نانو مثلث تکی

اما برای تقویت میدان به منظور تولید هارمونیک های بالا به مقدار بیشتری تقویت پلاسمونیکی نیاز داریم. همانگونه که گفته شد ساختار دوتایی میدان افزایش یافته بیشتری را تولید می نماید. لذا ساختار دو مثلثی را بررسی می نماییم تا عبور از شدت آستانه تامین شود. این نانوساختار در شکل ۲ مشاهده می شود. پالس فرودی در جهت محور x قطبیده بوده و راستای انتشار جهت z می باشد. مقدار میدان افزایش یافته در این چیدمان به مقدار زیادی به گاف موجود بین دو ذره وابسته می باشد. در این شکل گاف بین دو ذره حدود 20nm می باشد. در اینجا میدان افزایش یافته پلاسمونیکی حدود ۹۰ برابر میدان فرودی می باشد. همانگونه که توزیع میدان در شکل مشاهده می شود مقدار میدان افزایش یافته پلاسمونیکی حدود ۹۰ برابر میدان فرودی می باشد. این مقدار میدان معادل شدت $|E|^2 = 8100$ می باشد که ۸۱۰۰ برابر از میدان اولیه بالاتر است در نتیجه شرط تولید هارمونیک بالا فراهم شده است. به منظور تولید طیف هارمونیک بالا در مجاورت نانوذرات فلزی از چیدمانی مانند شکل ۳ استفاده می شود.

پالس فوق کوتاه لیزری به نانوساختار و اتمهای گاز هیدروژن تابیده و در نتیجه باعث تحریک پلاسمون سطحی و تقویت میدان اولیه خواهد شد. این میدان افزایش یافته باعث تولیدهارمونیک های بالا و در نتیجه گسیل پیوسته تابش ماورای بنفش دور EUV خواهد شد.



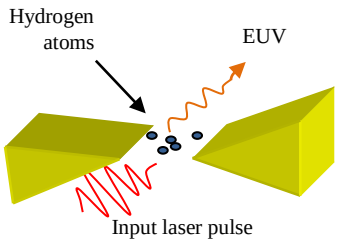

شکل۲ : ٤

## ۳- طیف هارمونیک های مرتبه بالا

پس ازاستخراج توزیع میدان پلاسمونیکی، g(x)، در ناحیه گاف بین دو ذره بایستی آنرا در معادله وابسته به زمان شرودینگر یک بعدی قرار داده وبا حل عددی آن، طیف هارمونیک با تبدیل فوریه شتاب بسته موج الکترونی بدست خواهد آمد. معادله شرودینگر وابسته به زمان یک بعدی به صورت رابطه (۱) می باشد:

$$\begin{aligned} & i\frac{\partial\psi}{\partial t} = (-\frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V_0(x) + V_L(x,t))\psi \\ & V_L(x,t) = xE(x,t) \\ & E(x,t) = E(t)g(x) \end{aligned} \qquad (۱)$$

می باشد. در این رابطه $V_0(x) = \frac{-.775}{\sqrt{1+x^2}}$ پتانسیل کولنی اتم هیدروژن و $E(x,t)$ میدان پلاسمونیکی افزایش یافته ناهمگن میباشد. توزیع زمانی پالس لیزری فرودی E(t) به کار رفته در این شبیه سازی به صورت $\cos^2$ با تعداد ۴ چرخه ی اپتیکی می باشد. با رسم داده های مربوط به میدان پلاسمونی افزایش یافته در ساختار دومثلثی با گاف۲۰nm، شکل ۴ بدست آمد. قله های بدست آمده در این شکل حاکی از افزایش شدید میدان در نزدیکی نقاط تیز نانوساختار می باشد.

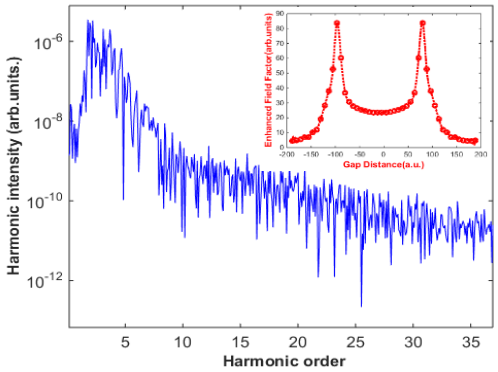




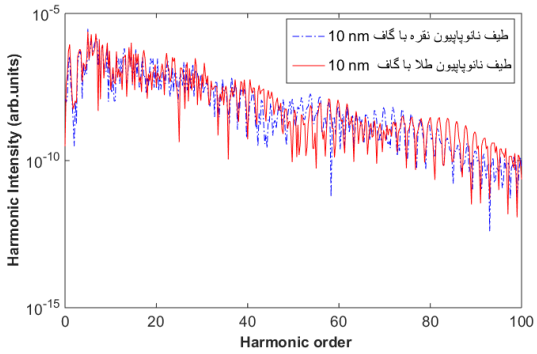

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13 ]

شکل۳: چیدمان تولید هارمونیکهای بالا با استفاده از گاز هیدروژن و در مجاورت نانوساختارهای فلزی




شکل۴: میدان پلاسمونی افزایش یافته (گوشه سمت راست ) در نانوساختار دو مثلثی با گاف ۲۰nm و طیف هارمونیک وابسته




شکل۵ : طیف هارمونیک گاز هیدروژن در حضور نانوساختار دو مثلثی با گاف ۱۰nmای(طیف آبی با نقطه خط برای نانوپاپیون از جنس نقره و طیف دیگر مربوط به جنس طلا میباشد).

شکل ۴ طیف هارمونیک بالای بدست آمده از چیدمان شکل ۳ رانشان می دهد. در گوشه بالای سمت راست این شکل نحوه توزیع میدان الکتریکی بین دو نوک تیز نانوپاپیون نشان داده شده است. بالاترین مرتبه هارمونیک حدود ۳۵ می باشد که معادل طول موج ۲۳nm میباشد. برای بررسی تاثیر گاف بین دو نانوذره مثلثی بر مرتبه هارمونیک، این بار گاف را تا ۱۰nm کاهش میدهیم. نتیجه این کاهش گاف، که در شکل ۵ نشان داده شده، این است که مرتبه طیف هارمونیک تا بیش از ۸۵ افزایش یافته است که معادل طول موج ۹/۵nm می باشد . برای مقایسه عملکرد تولید هارمونیک، نانوپاپیونی از جنس نقره نیز مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی می توان دید که تفاوت چشمگیری در طیف هارمونیک آنها مشاهده نمی شود و با نتایج [۴] در توافق کامل می باشد. با مقایسه شکلهای ۴ و۵ می توان نتیجه گیری نمود که هرچه گاف دو نانوذره کمتر باشد، مرتبه هارمونیک به علت افزایش بیشتر میدان الکتریکی، افزایش خواهد یافت. به این ترتیب یک منبع لیزری پیوسته در توان متوسط پایین، می تواند به واسطه حضور نانوساختار فلزی، هارمونیک بالا را تولید نماید. به تازگی از چنین طیفی در ابزارهای لیتوگرافی، طیف سنجی و انجام تصویربرداریهای بسیار دقیق از بافتهای آسیب دیده بهره برداری می نمایند.

## ۴- نتیجه گیری

تولید هارمونیک های مرتبه بالا در حضور نانوساختارهای فلزی از جنس طلا و هندسه دو مثلثی با استفاده از گاز هیدروژن بررسی و شبیه سازی شد. میدان پلاسمونیک سطحی افزایش یافته، پالس لیزری فرودی را تا ۳ مرتبه بزرگی افزایش داد. بالاترین مرتبه تولید شده برای گاف nm ۲۰، حدود ۳۵ و برای گافnm ۱۰، حدود ۸۵ می باشد. طول موج حاصل از هارمونیک مرتبه ۸۵ برای یک لیزر فوق کوتاه از مرتبه فمتوثانیه و طول موج ۸۰۰nm، برابرnm ۹/۵ خواهد بود.

## مرجع‌ها

[1] J. Seres, “Source of coherent kilo electron volt X-rays”. Nature. 433, p.596, 2005
[2] P. B. Corkum , Phys. Rev. Lett. 71 p.1994, 1993
[3] I. Park, Y. S. Kim, J. Choi, D. H. Lee, Y. J. Kim, M. F. Kling, M. I. Stockman, and S. W. Kim. “Generation of ultrashort Plasmonic extreme ultraviolet light pulses”. Nature. Photon 5, p 677, 2011
[4] S. Kim, J. Jin, Y. Kim, I.Y. Park, Y. Kim and S. W. Kim, ” High-harmonic generation by resonant plasmon field enhancement”, nature lett . 453, p 757, 2008
[5] E. Hao and G. C. Schatz, “Electromagnetic fields around silver nano particles and dimers”, Journal of Chemical Physics 120, p 357, 2004
[6] M. F. Ciappina, S. Srdjan, T. Shaaran, J. Biegert, R. Quidant, and M. Lewenstein. “ Enhancement of high harmonic generation by conf-ing electron motion in plasmonic nanostrutures”. Optics Express. 20, p 26261, 2012
[7] T.Shaaran, M. F. Ciappina, R. Guichard, A. Zaır. “High-order-Harmonic generation by enhanced plasmonic near-fields in metal nanoparticles”. Physical Rev. A .87. p 041402, 2013 [8] Y. Yang, L. Q. Guang, H. Juan and L. Xue-Chun. “The generation of MHz isolated XUVattosecond pulses by plasmonic enhancement in a tailored symmetric Ag cross nanoantenna with a few-cycle laser”, Laser Phys. Vol. 23, pp.045301, 2013
[9] A. Taflove, Advances in FDTD Computational Electrodynamics Photonics and Nanotechnology, Artech House (2013).



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13 ]