



## تولید پلاسمونیک 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 بر پایه 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 پلاسمونیک میدان تولید می کند. ضریب افزایش شدت در حدود ۸۱۰۰ میباشد که می تواند هارمونیک مرتبه ۸۵ یک لیزر فمتوثانیه تیتانیوم سفایررا در گاز هیدروژن با شدت متوسط فرودی  $10^{11} \text{ Wcm}^{-2}$  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  $\sim 8100$ , allowing generation up to the 85th harmonic of a femtosecond Ti:sapphire laser in hydrogen gas, with a modest incident intensity of  $\sim 10^{11} \text{ Wcm}^{-2}$ .

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

## ۱-مقدمه

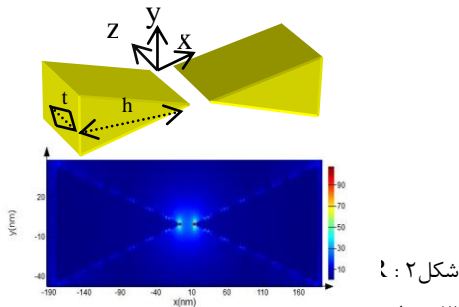
در برهم کنش میدان‌های قوی با اتمها، یعنی زمانی که میدان الکتریکی قابل قیاس با میدان کولن داخلی اتم باشد، عبارت‌های غیرخطی در قطبش مهم می‌شود. مراتب بالای قطبش در هارمونیک‌های مرتبه بالا HHG قابل رویت است. هارمونیک‌های مرتبه بالا یک پدیده ی غیر خطی شدید است. این پدیده زمانی صورت می‌گیرد که پالس لیزری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

آستانه شدت برای وقوع HHG، از مرتبه  $10^{13} \text{W/cm}^2$  می‌باشد. پالسهایی به بزرگی آستانه ی  $10^{13} \text{W/cm}^2$  با استفاده از خروجی یک نوسانگر فمتوثانیه در طول موج 800nm قابل دسترس نمی‌باشد و نیازمند چیدمان‌های تقویت پالس چند مرحله ای می‌باشد که خود باعث افزایش پیچیدگی سیستم، کاهش نرخ تکرار و افزایش هزینه‌ها 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 می‌شود و به دلیل افزایش شدید میدان پلاسمونی در محل نانوساختار، به طور ناگهانی چگالی میدان حدود ۲ تا ۳ مرتبه بزرگی افزایش می‌یابد. در

نتیجه شرط عبور از آستانه فراهم شده و هارمونیک مرتبه بالا تولید خواهد شد. تشدید پلاسمون سطحی را میتوان به عنوان نوسان تجمعی تشدید الکترونیهای ظرفیت در یک جامد تحریک شده با نور فرودی دانست. شرط تشدید هنگامی برقرار می‌شود که فرکانس و تکانه فوتونهای فرودی به فرکانس طبیعی و تکانه الکترونیهای 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 می‌دهند. این میدان به شدت در اطراف نانوذره جایگزیده بوده و با دور شدن از آن کاهش می‌یابد. در ذرات دو تایی فلزی، موقعیت باندهای LSP به جنس دو فلز وابسته است. فقط فلزاتی با الکترونیهای آزاد (Au, Cu و Ag) تشدید پلاسمونی در طیف مرئی از خود نشان می‌دهند و از این رو درخشنده اند. بعلاوه میزان میدان تشدید محلی در نانوساختارهای دوتایی افزایش چشمگیری نشان می‌دهد [۵]. تاکنون تولید هارمونیک‌های مرتبه بالا در نانوذرات فلزی با شکلهای هندسه‌های خاصی از قبیل دومتالی [۶]. کروی [۷]، بیضوی [۸] تحت بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق تولید هارمونیک‌های مرتبه بالا در حضور نانوساختار فلزی دو مثالی ارائه خواهد شد. با استفاده از پارامترهای 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 و ۷] افزایش چشمگیری مشاهده می‌شود. منبع نوری یک چشمه لیزری فوق کوتاه از مرتبه فمتوثانیه با چگالی توان حدود  $10^{11} \text{W/cm}^2$  و با قطبش خطی فرض می‌شود. 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 می‌شود. نانوساختار دوتایی مد نظر از جنس طلا بوده که توسط چشمه نوری قطبیده شده در راستای خط واصل دو ذره نور دهی می‌شود. این شبیه سازی نیازمند استفاده از دو نوع شبیه سازی مختلف می‌باشد. 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 پلاسمونیک محلی

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



شکل ۲:

### ۳- طیف هارمونیک های مرتبه ب ه

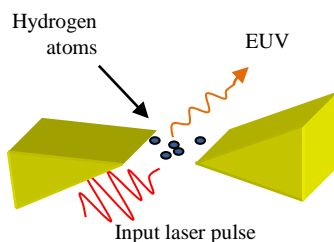
پس از استخراج توزیع میدان پلاسمونیک،  $g(x)$ ، در ناحیه گاف بین دو ذره بایستی آنرا در معادله وابسته به زمان شرودینگر یک بعدی قرار داده و با حل عددی آن، طیف هارمونیک با تبدیل فوریه شتاب بسته موج الکترونی بدست خواهد آمد. معادله شرودینگر وابسته به زمان یک بعدی به صورت رابطه (۱) می باشد:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left( -\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V_0(x) + V_L(x,t) \right) \psi \quad (1)$$

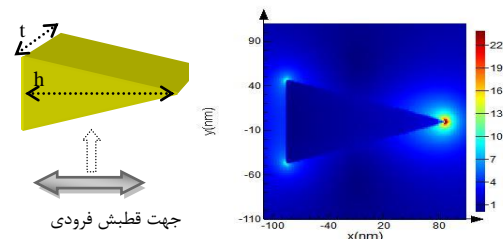
$$V_L(x,t) = xE(x,t)$$

$$E(x,t) = E(t)g(x)$$

می باشد. در این رابطه  $V_0(x) = \frac{-.775}{\sqrt{1+x^2}}$  پتانسیل کولنی اتم هیدروژن و  $E(x,t)$  میدان پلاسمونیک 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 اپتیک می باشد. با رسم داده های مربوط به میدان پلاسمونی افزایش یافته در ساختار دومثلثی با گاف ۲۰ nm، شکل ۴ بدست آمد. قله های بدست آمده در این شکل حاکی از افزایش شدید میدان در نزدیکی نقاط تیز نانوساختار می باشد.



برهم کنش میدان و نانوساختار با استفاده از حل 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  $t=50\text{nm}$ ، زاویه راس  $30^\circ = \theta$  و ارتفاع  $h=180\text{nm}$ ، 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.



شکل ۱: LSPR افزایش یافته در یک نانو مثلث تک

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 مثلی را بررسی می نمایم 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.

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.

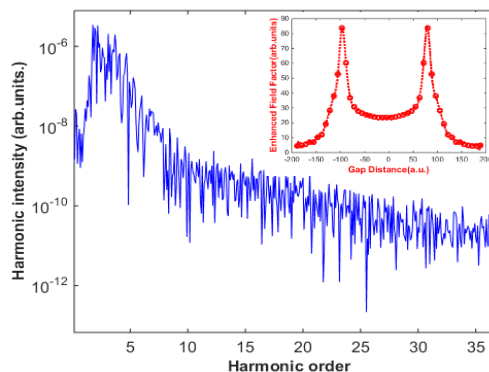
#### ۴- نتیجه گیری

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 ۲۰ nm، حدود ۲۵ و برای گاف ۱۰ nm، حدود ۸۵ می باشد. طول موج حاصل از هارمونیک مرتبه ۸۵ برای یک لیزر فوق کوتاه از مرتبه فمتوثانیه و طول موج ۸۰۰ nm، برابر ۹/۵ خواهد بود.

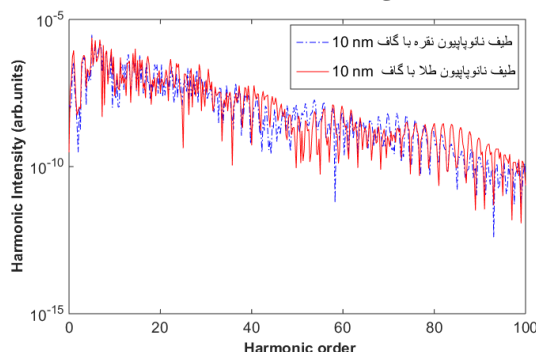
#### مرجع ها

- [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 nanostructures". Optics Express. 20, p 26261, 2012
- [7] T. Shaaran, M. F. Ciappina, R. Guichard, A. Zair. "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).

شکل ۳: چیدمان تولید هارمونیکهای بالا با استفاده از گاز هیدروژن و در مجاورت نانوساختارهای فلزی



شکل ۴: میدان پلاسمونی افزایش یافته (گوشه سمت راست) در نانوساختار دو مثلثی با گاف ۲۰ nm و طیف هارمونیک وابسته



شکل ۵: طیف هارمونیک گاز هیدروژن در حضور نانوساختار دو مثلثی با گاف ۱۰ nm (طیف آبی) با نقطه خط برای نانوپایون از جنس نقره و طیف دیگر مربوط به جنبش طلا میباشد).

شکل ۴ طیف هارمونیک بالای بدست آمده از چیدمان شکل ۳ نشان می دهد. در گوشه بالای سمت راست این شکل نحوه توزیع میدان الکتریکی بین دو نوک تیز نانوپایون نشان داده شده است. بالاترین مرتبه هارمونیک حدود ۳۵ می باشد که معادل طول موج ۲۳ nm میباشد. برای بررسی تاثیر گاف بین دو نانوذره مثلثی بر مرتبه هارمونیک، این بار گاف را تا ۱۰ nm کاهش میدهم. 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 ۹/۵ nm می باشد. برای مقایسه عملکرد تولید هارمونیک، نانوپایونی 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 شکل های ۴ و ۵ می توان نتیجه گیری نمود که هرچه گاف دو نانوذره کمتر باشد، مرتبه هارمونیک به علت افزایش بیشتر میدان الکتریکی،