



## تولید هارمونیک مرتبه بالا با استفاده از پالس‌های ۸۰۰ و ۱۶۰۰ نانومتر در حضور

### نانوساختار فلزی پاپیونی شکل

عسکری، سمانه؛ محبی، مسعود  
 دانشکده علوم پایه دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان

**چکیده** - ما نتایج حاصل از برهم کنش گاز هیدروژن با پلاسمون‌های سطحی موضعی برای تولید هارمونیک مرتبه بالا را بصورت سیستماتیکی نشان می‌دهیم. این میدان‌های نزدیک پلاسمونیک هنگامی که یک نانوساختار فلزی پاپیونی شکل در معرض پالس لیزری پر شدت دورنگ قرار می‌گیرند تولید می‌شوند. با تغییر فاز نسبی و شدت نسبی، فرکانس قطع در طیف هارمونیک مرتبه بالا کنترل می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه پالس فرکانس قطع با استفاده از یک پالس کنترلی نیم هارمونیک با قدرت نسبی یکسان و تغییر فاز  $\frac{\pi}{2}$  نسبت به پالس اصلی مشاهده می‌شود.

کلیدواژه- تولید هارمونیک مرتبه بالا، میدان لیزری دورنگی، نانوساختار پاپیونی شکل

## High-order harmonic generation by 800 and 1600nm pulse in a bow-tie-shaped metal nanostructure

Askari, Samaneh; Mohebbi, Masoud

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

**Abstract-** We demonstrate systematic investigations of high-order-harmonic generation resulting from the interaction of hydrogen gases with localized surface plasmons. These plasmonic near-fields are produced when a bow-tie-shaped metal nanostructure is subject to an intense two-color laser pulse. By changing the relative phase and relative intensities, cut-off frequency will be controlled in high-order harmonic spectrum. The results show that the maximum cutoff frequency pulse can be observed by using a half-harmonic control pulse with a same relative strength and  $\frac{\pi}{2}$  phase shift relative to the fundamental pulse.

**Keywords:** High Harmonic generation (HHG), two color laser field, bow-tie-shaped metal nanostructure

۱- مقدمه

$$V_c(z) = -\frac{0.775}{\sqrt{1+z^2}} \quad (2)$$

و  $E$  میدان الکتریکی تقویت یافته در حضور نانو ساختار فلزی در راستای محور  $z$  است

$$E(z,t) = E_L(t)(1 + \beta z)z \quad (3)$$

که در آن  $\beta$  پارامتر ناهمگنی میدان می باشد [۹]. بازه تغییرات  $Z$  بین مقادیر  $+10\text{nm} < z < -10\text{nm}$  انتخاب شده است تا شرایط تجربی مربوط به بیشینه مسافت طی شده توسط الکترون ایجاد شود [۲].  $E_L(t)$  میدان لیزری دو رنگ بصورت:

$$E_L(t) = E_0 \{ \exp[-4 \ln(2)t^2/\tau_0^2] \cos(\omega_0 t) + \sqrt{R} \exp[-4 \ln(2)(t + \Delta t)^2/\tau_1^2] \cos[\omega_1(t + \Delta t)] \} \quad (4)$$

در نظر گرفته می شود که در آن  $\omega_i$  فرکانس میدان  $i = 0, 1$ ،  $\Delta t$  زمان تاخیر،  $E_0$  دامنه میدان پالس اول،  $\tau_1$  و  $\tau_2$  به ترتیب مدت تپش پالس اول و دوم می باشد [۷]. توجه داشته باشید که  $R$  را بصورت

$$\sqrt{R} = \frac{E_1}{E_0} = \sqrt{\frac{I_1}{I_0}} \quad (5)$$

تعریف می کنیم که نسبت شدت میدان دوم  $I_1$  به اول  $I_0$  است ( $E_1$  دامنه میدان پالس دوم می باشد) [۸]. با حل عددی معادله شرودینگر با استفاده از روش تفاضل محدود تابع موج وابسته به زمان  $\psi(z,t)$  بدست می آید که با استفاده از آن می توان چشمداشتی شتاب دو قطبی:

$$\langle \ddot{z} \rangle = \left\langle \psi(z,t) \left| -\frac{\partial}{\partial z} (V_c(z) - E(z,t)) \right| \psi(z,t) \right\rangle \quad (6)$$

را محاسبه کرد. شدت هارمونیک متناسب با اندازه چشمداشتی شتاب دو قطبی است.

۳- بررسی

برای شروع، ابتدا تاثیر نانو ساختار (ناهمگنی میدان) بر طیف بدست آمده از یک پالس با طول موج  $\lambda_0 = 800\text{nm}$  و

شدت  $I = 1 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$  و مدت تپش  $\tau_0 = 6\text{fs}$  را در

شکل ۱ بررسی می کنیم. نیم رخ میدان بصورت

$$E = E_0 \exp[-4 \ln(2)t^2/\tau_0^2] \cos(\omega_0 t) \quad (7)$$

می باشد که در داخل شکل ۱ نشان داده شده است.

سپس تاثیر نانو ساختار بر طیف ناشی از یک پالس با طول موج  $\lambda_1 = 1600\text{nm}$  و شدت  $I = 1 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$  و مدت تپش

$\tau_1 = 12\text{fs}$  را در شکل ۲ بررسی می شود.

نیم رخ این میدان بصورت

$$E = E_0 \sqrt{R} \exp[-4 \ln(2)(t + \Delta t)^2/\tau_1^2] \cos[\omega_1(t + \Delta t)] \quad (8)$$

منابع نوری پر توان موجب بسیاری از پدیده های میدان قوی از جمله تولید هارمونیک مرتبه بالا می شود. تولید هارمونیک مرتبه بالا یک پدیده غیرخطی شدیدی است که توجه زیادی را در سال های اخیر به علت کاربردش در تولید اشعه ایکس نرم و تولید پالس های آتوانیه به خود جلب کرده است [۱-۲]. فرآیند تولید هارمونیک مرتبه بالا می تواند در مدل نیمه کلاسیکی در سه مرحله یونیزاسیون، شتاب گیری و باز ترکیب در میدان لیزری خارجی شرح داده شود [۳]. از لحاظ ساختار طیفی، شدت هارمونیک ها ابتدا یک ناحیه افت را نشان می دهند با افزایش مرتبه ی هارمونیک، هارمونیک هایی که دارای شدت نسبتا یکسانی هستند یک ناحیه تخت را ایجاد می کنند و در نهایت یک افت شدت ناگهانی در محل فرکانس قطع خواهیم داشت. آستانه شدت پالس فرودی برای تولید هارمونیک مرتبه بالا از مرتبه  $10^{13} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$  می باشد. می توان از نانو ساختار فلزی برای کاهش آستانه شدت پالس فرودی استفاده کرد. به عنوان مثال نانو ساختار پایونی که از دو مثلث مقابل به هم از جنس طلا ساخته شده است با استفاده از نوسانات پلاسمون های سطحی میدان لیزری را در گاف فضایی تشکیل شده بین دو نوک مثلث (که به فاصله ۲۰ نانومتر از همدیگر قرار گرفته اند)، حدود ۲۰ دسی بل یا بیشتر تقویت می کند. بنابراین نیازی به کاواک های تقویت کننده نور لیزر جهت افزایش شدت پالس فرودی نیست [۴]. تلاش هایی در جهت افزایش فرکانس قطع با استفاده از این نانو ساختار انجام شده است [۵-۶]. نیز در این مقاله با استفاده از پالس های لیزری ۸۰۰ و ۱۶۰۰ نانومتری، فرکانس قطع را افزایش می دهیم.

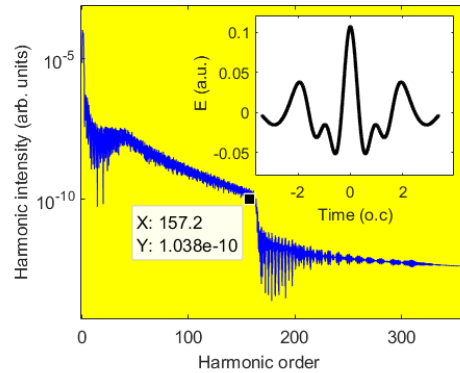
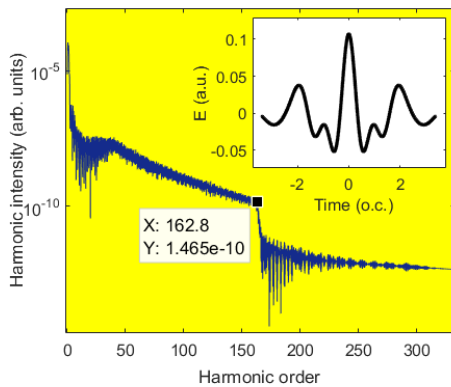
۲- تئوری

با استفاده از حل یک بعدی معادله شرودینگر وابسته به زمان (در واحد اتمی):

$$i \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = \left[ -\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + V_c(z) - zE(z,t) \right] |\psi(z,t)\rangle \quad (1)$$

برهمکنش بین اتم هیدروژن و میدان لیزری تقویت شده در اثر حضور نانو ساختار بررسی می شود. در این معادله  $z$  بردار مکان الکترون و  $V_c$  پتانسیل کولنی نرم برای اتم هیدروژن:

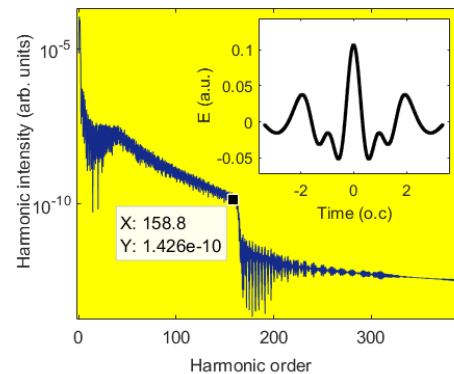
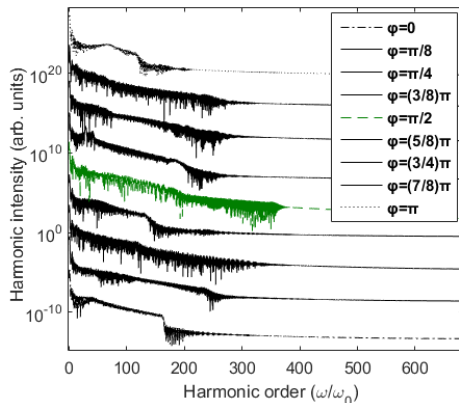
می باشد. برای این کار همانطور که در طیف شکل ۴ نشان داده شده است مقدار فاز مطابق با رابطه ی



(شکل ۱) طیف هارمونیک برای میدان (درون شکل) با

$$\tau_0 = 6fs \text{ و مدت تپش } I = 1 \times 10^{14} W/cm^2, \lambda_0 = 800nm$$

(شکل ۳) طیف هارمونیک برای میدان ترکیبی (درون شکل) با  
 $I = 1 \times 10^{14} W/cm^2, R = 1, \lambda_1 = 1600nm, \lambda_0 = 800nm$   
 مدت تپش  $\tau_1 = 12fs, \tau_0 = 6fs$



(شکل ۲) طیف هارمونیک برای میدان (درون شکل) با

$$\tau_1 = 12fs \text{ و مدت تپش } I = 1 \times 10^{14} W/cm^2, \lambda_1 = 1600nm$$

(شکل ۴) طیف هارمونیک برای فاز های مختلف با توجه به ثابت بودن

$$\beta = 0.005 \text{ و } R = 1, \lambda_1 = 1600nm, \lambda_0 = 800nm$$

$$phase = 2\pi \frac{\Delta t}{T_1} = \omega_1 \Delta t \quad (9)$$

با گام  $\frac{\pi}{8}$  تغییر می کند. همانطور که مشخص است بدون ملاحظه ی شدت، فرکانس قطع در فاز  $\phi = \frac{\pi}{2}$  بیشترین مقدار (۳۶۴/۲) را دارد که در شکل با رنگ سبز بصورت خط چین (-) مشخص شده است.

مطابق با شکل ۴، طیف مربوط به حالت  $\phi = \frac{\pi}{2}$  با فرکانس قطع ۳۶۰ نسبت به حالت  $\phi = 0$  با فرکانس قطع (موثر دوم) ۵۵۰، شدت بیشتری دارد. مطابق شکل ۵ این فرکانس ها برای حالت فاز  $\phi = 0$  و  $\phi = \frac{\pi}{2}$  به ترتیب مربوط به رویداد تولد الکترون در لحظه صفر (ابتدای پیکان خط تیره سیاه رنگ) و بازترکیب در لحظه ۱/۳ چرخه ی اپتیکی (انتهای پیکان خط تیره سیاه رنگ) و تولد الکترون در لحظه

با مقایسه این دو طیف مشاهده می شود با افزایش طول موج از ۸۰۰ نانومتر به ۱۶۰۰ نانومتر مقدار فرکانس قطع افزایش می یابد. بر مبنای تحلیل نیمه کلاسیکی کرکوم، حضور ناهمگنی باعث می شود که الکترون در حین برگشت به یون مادر، میدان قوی تری را درک کند. این منجر به افزایش انرژی جنبشی برخوردی و در نتیجه افزایش فوتون گسیلی می شود [۱۱-۱۰-۳]. در نهایت طیف ناشی از میدان فرودی دو رنگی که از ترکیب پالس های اول و دوم تشکیل شده است (رابطه (۴)) برای ضریب ناهمگنی  $\beta = 0.005$  در شکل ۳ بررسی می شود. در اینجا  $I = I_0 + I_1 = 10^{14} W/cm^2$  و  $R = 1$  و  $\Delta t = 0$  است.

در قیاس با دو حالت قبل می بینیم که مقدار فرکانس قطع در اینجا افزایش یافته است. در ادامه تاثیر پارامتر  $\Delta t$  بر مکان فرکانس قطع در طیف مورد بررسی قرار می گیرد.

#### ۴- نتیجه گیری

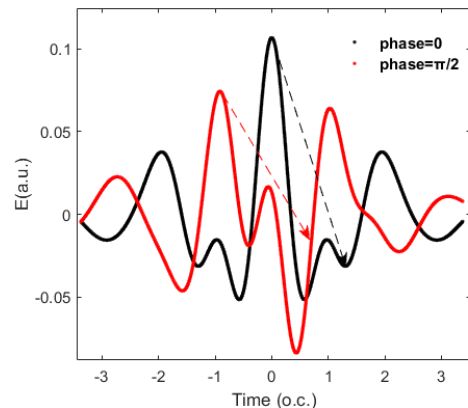
در نتیجه ما بصورت روش مند تولید پالس هارمونیک با فرکانس قطع بهینه را در یک میدان لیزری دو رنگ با پارامترهای لیزری متفاوت در حضور نانو ساختار را بررسی کردیم. شبیه سازی نشان می دهد که با ترکیب دو پالس با طول موج های مرکزی ۸۰۰ و ۱۶۰۰ نانومتر فرکانس قطع افزایش می یابد. همچنین به ازای فازنسبی بهینه  $\phi = \frac{\pi}{2}$  و  $R=1$  فرکانس قطع بیشترین افزایش را نسبت به حالت  $R=1$  و  $\phi=0$  نشان می دهد. در ادامه تاثیر تغییرات نسبت شدت های پالس های فرودی  $R$  بر روی ساختار طیف برای فاز بهینه ثابت بررسی شد. به ازای همان  $R=1$  بیشترین مرتبه فرکانس قطع مشاهده می گردد.

#### مراجع

- [1] F. Krausz, M. Ivanov, "Attosecond physics", Rev. Mod. Phys, vol. 81, pp. 163, 2009.
- [2] L. Pengfei, L. Peixiang, C. Wei, W. Xinlin, Y. Guang, "Phase-locked high-order-harmonic and sub-100-as pulse generation from stretched molecules", Phys. Rev. vol. A, No. 74, pp. 063411, 2006.
- [3] Corkum, P. B., "Plasma perspective on strong field multiphoton ionization", Phys. Rev. Lett. No. 71, pp. 1994-1997, 1993.
- [4] Kim S1, Jin J, Kim YJ, Park IY, Kim Y, Kim SW, "High-harmonic generation by resonant plasmon field enhancement", Nature, No. 453, pp. 757, 2008.
- [5] A. Husakou, S.-J. Im, J. Herrmann, "Theory of plasmon-enhanced high-order harmonic generation in the vicinity of metal nanostructures in noble gases", Phys. Rev, vol. A 83, No. 043839, 2011.
- [6] B. Feti, K. Kalajdzi, D. B. Milosevi, "High-order harmonic generation by a spatially inhomogeneous field", Ann. Phys, No. 525, pp. 107, 2013.
- [7] I-Lin Liu, Peng-Cheng Li, Shih-I Chu, "Coherent control of the electron quantum paths for the generation of single ultrashort attosecond laser pulse", physical review, vol. A 84, No. 033414, 2011.
- [8] T. Shao, G. Zhao, B. Wen, H. Yang, "Theoretical exploration of laser-parameter effects on the generation of an isolated attosecond pulse from two-color high-order harmonic generation", Physical Review, vol. A 82, No. 063838, 2010.
- [9] B. Feti, K. Kalajdzi, Dejan B. Milosevi, "Highorder harmonic generation by a spatially inhomogeneous field", Ann. Phys, vol. 525, No. 1-2, pp. 107-117, 2013.
- [10] M. Mohebbi, S. Nazarpour Malaei, "Electron path control of high-order harmonic generation by a spatially inhomogeneous field", Journal of Modern Optics, Vol. 63, No. 7, pp. 643-652, 2015.

[۱۱] عسکری سمانه، محبی مسعود، "تولید هارمونیک مرتبه بالا در میدان افزایشی با استفاده از پالس های ۸۰۰ و ۱۰۶۴ نانومتر در حضور نانو ساختار فلزی پاپیونی شکل"، کنفرانس فیزیک ایران ۱۳۹۵، دانشگاه شیراز، شماره ۸۸۱.

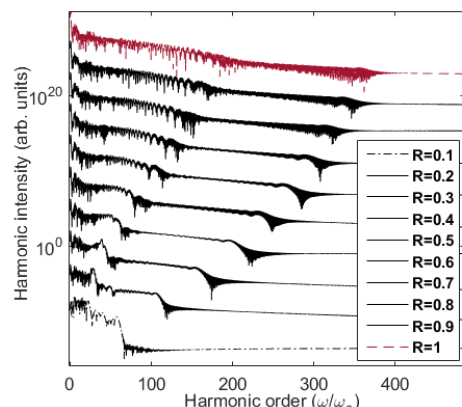
۰/۹- چرخه ی اپتیکی (ابتدای پیکان خط تیره قرمز رنگ) و باز ترکیب در لحظه ۰/۶۹ چرخه ی اپتیکی (انتهای پیکان خط تیره قرمز رنگ) می باشد. بنابراین علت افزایش قطع تحت حالت  $\phi = \frac{\pi}{2}$  نسبت به حالت  $\phi = 0$  در قوی تر بودن میدان در موقع برگشت الکترون به یون مادر می باشد (یعنی میدان الکتریکی در لحظاتی که با نوک پیکان ها مشخص شده است).



(شکل ۵) میدان برای حالت های  $\phi = 0, \frac{\pi}{2}$  و طول موج های

$$R = 1 \text{ با } \lambda_1 = 1600 \text{ nm و } \lambda_0 = 800 \text{ nm}$$

اکنون به ازای فاز بهینه مشخص شده ( $\phi = \frac{\pi}{2}$ )، طیف هارمونیک ها را برای مقادیر مختلف  $R$  (از ۰/۱ تا ۱ با گام ۰/۱) حساب کردیم که در شکل ۶ قابل مشاهده است. مطابق شکل مشاهده می شود که با افزایش  $R$  از مقدار ۰/۱ تا ۱ فرکانس قطع افزایش می یابد (بر مبنای بحث نیمه کلاسیکی) [۱۰-۳].



(شکل ۶) طیف هارمونیک بر حسب  $R$  به ازای  $\phi = \frac{\pi}{2}$