بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هشتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۶ تا ۸ بهمن ماه ۱۳۹۴، دانشگاه یزد

تاثیرات میدان پلاسمونیکی بر نقطه ی قطع و پالس آتوثانیه ای

سعید باطبی[۱] ، فروغ حسین زاده[۱] و مصطفی قدیری صوفی[۲]

[۱]دانشکده فیزیک دانشگاه گیلان ،رشت،ایران

[۲]دانشکده ی فیزیک دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده - در این مقاله تولید هارمونیک های مرتبه ی بالا در گازهای نادر ، با استفاده از میدان های پلاسمونیکی را مورد مطالعه قرار دادیم. زمانی که نانو ساختارهای فلزی تحت تابش لیزر قرار میگیرند،میدان های پلاسمونیکی تولید می شوند. این میدان ها علاوه بر وابستگی زمانی، به مکان نیز وابسته هستند و این وابستگی، به شکل هندسی نانوساختارها مربوط میشود. میدان غیر همگن خطی، به طور قابل ملاحظه ای طیف هارمونیک های مرتبه ی بالا را افزایش میدهد و میدان غیر همگن غیر خطی، تاثیر بیشتری نسبت به میدان غیر همگن خطی دارد. برای بررسی طیف هارمونیک های مرتبه ی بالا و همچنین تولید تک پالس آتو ثانیه ای، به حل معادله ی شرودینگر وابسته به زمان تک بعدی برای اتم هیدروژن پرداختیم.

کلید واژه- تک پالس آتوثانیه ای، میدان های پلاسمونیکی، نانو ساختارهای فلزی، هارمونیک های مرتبه ی بالا

Influences of plasmonic Field on the Cut Off Order and Attosecond Pulses

[1]Saeed Batebi, [1]Forouq Hosseinzadeh and [2]Mostafa Qadiri Soofi

[1]Department of Physics, University of Guilan, Rasht

[2]Department of Physics, Shahid Beheshti University,Tehran

In this article, the theoretical studies of high harmonic generation with the use of plasmonic field is presented. This kind of field appears when plasmonic nanostructures are illuminated by an intense few-cycle laser and have a particular spatial dependency, depending on the geometrical shape of the nanostructures. It is significantly shown that the linear nonhomogeneous character of the laser enhanced field plays an important role in expanding the HHG spectrum and the nonlinear inhomogeneity of the laser field expands it more. The 1D time dependent Schrodinger equation (TDSE) is solved numerically for Hydrogen atom to investigate the harmonic spectrum and generate single attosecond pulse.

Key words: High harmonic generation ,Nanostructures ,Plasmonic field ,Single attosecond pulse

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

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

۱-مقدمه

یکی از برجسته ترین نمود های رفتار غیر خطی لیزر در حضور ماده، تولید هارمونیک های مرتبه ی بالاست[1]. پروسه ی تولید هارمونیک های مرتبه ی بالا، با دو مدل شبه کلاسیکی و کوانتومی توضیح داده می شود[2]. در مدل شبه کلاسیکی، فرآیند تولید هارمونیک های مرتبه ی بالا در سه مرحله انجام می شوند[3]. مرحله ی اول، مرحله ی یونیزاسیون نام دارد. وقتیکه میدان لیزر قوی، در ناحیه ی فروسرخ نزدیک، به گازهای نادر تابانده می شود، میدان لیزر، پتانسیل کولنی اتم را خم کرده و الکترون در اثر میدان، به ناچار تونل زده و بدون هیچ سرعتی، از قید اتم خارج می شود. این مرحله از فرآیند تولید هارمونیک های مرتبه ی بالا، مرحله ی حرکت پس از آزادی نامیده میشود. در مرحله ی بعد، الکترون آزاد شده در میدان لیزر شروع به حرکت میکند و ضمن این حرکت، انرژی جنبشی کسب می کند. و در نهایت، در مرحله ی سوم، الکترون آزاد شده، به همان نقطه ای که از اتم خارج شده بود، باز می گردد[3,4]. به این مرحله، مرحله ی بازترکیب گفته میشود. در مرحله ی بازترکیب، یک فوتون با انرژی بالا تولید می شود. هارمونیک هایی که طی این سه مرحله تولید میشوند، پس از یک فرو افت در چند هارمونیک ابتدایی، یک ناحیه ی تخت از هارمونیک های با شدت های نسبتا یکسان، و در نهایت یک فرو افت ناگهانی را نشان میدهند. ناحیه ی تخت به عنوان ناحیه ی پلاتیو و نقطه ی قطع، به عنوان نقطه ی کات آف معرفی می شوند[3]. انرژی نقطه ی قطع، توسط رابطه ی $E_{cutoff} = I_p + 3.17U_p$محاسبه می شود که در آن I_p پتانسیل یونیزاسیون و U_p انرژی پاندرماتیو نامیده می شوند و برابرست با : $U_p = \frac{e^2 E^2}{4 m_e \omega_c^2}$. با برهم نهی چندید مرتبه از هارمونیک ها، تپ آتوثانیه ای بدست می آید. روش دیگر برای تولید هارمونیک های مراتب بالا، استفاده از میدان های تقویت کننده ی نور هارمونیک است که از نانوساختارهای فلزی به وجود می آیند[4].و از آنها به عنوان تقویت کننده ی نور لیزر استفاده می کنند.این نانو ساختار ها قادرند با استفاده از نوسانات پلاسمون های سطحی و بدون نیاز به کاواک و یا پمپاژ، میدان لیزر را در حدود 20 dB و یا بیشتر تقویت کنند. مقدار دسی بل یک کمیت، ده برابر لگاریتم در پایه ی ده نسبت به مقدار واقعی آن کمیت است . اخیرا، استفاده از میدان های پلاسمونیکی مورد توجه نویسندگان زیادی قرار گرفته است. به عنوان مثال، در[5]، مولفین موفق شدند با توزیع یک میدان دورنگی در نانوساختار پاپیونی طلا، با در نظر گرفتن دو نوع ناهمگنی خطی متقارن و غیرخطی، تولید پالس های به ترتیب 66 as و 64 as را پیشبینی کنند. همچنین، نویسندگان [6]، تولید پالس 35as ، را به کمک میدان الکتریکی سه رنگی با ناهمگنی غیرخطی از مرتبه ی ۴، در اندازه های گپ 18nmو14nm و پالس 40as را در اندازه ی گپ 16nm پیشبینی کردند. همچنین کارهای مشابهی در [7] نیز صورت گرفته است. در [8]، ثابت شد که اندازه ی غیرهمگنی و همچنین جذب الکترون توسط سطح فلز نقش مهمی را در پروسه ی تولید هارمونیک های مرتبه ی بالا و افزایش دادن مرتبه ی هارمونیک قطع ایفا میکند.

2-تئوری

۲-۱-نانوساختار

در اینجا،از نانوساختار پاپیونی طلا به جهت تقویت میدان استفاده میکنیم. نانوساختار شامل دو پد مثلثی طلاست که با یک گپ هوا(g) از هم جدا شده اند. با توزیع میدان الکتریکی درون گپ، میدان الکتریکی وابسته به زمان، نسبت به مکان نیز محدود میشود. میدان الکتریکی ناهمگن، به صورت زیر تعریف میشود:

$$E(x,t) = E_0 \left(1 + h(x)\right) \sin(\omega t)\, f(t) \qquad (1)$$

که در آن، h(x)، تابع غیرهمگنی نامتقارن و f(t)، شکل پالس لیزر را تعیین میکند. E_0 و ω به ترتیب دامنه، و فرکانس میدان لیزر هستند. فرکانس میدان لیزر را 0.057 a.u. و شکل پالس لیزر را سینوس مربع در نظر گرفتیم.

$$f(t) = \sin^2\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right) \qquad (2)$$

$$h(x) = \sum_{i=1}^{N} b_i\, x^i \qquad (3)$$

که b_i و i=1,2,3,… پارامتر غیرهمگنی ست و با توزیع

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

میدان الکتریکی درهندسه ی واقعی نانوساختار بدست می آید. به ازای i=1 غیر همگنی خطی و به ازای i>1 غیر همگنی غیر خطی را شاهد خواهیم بود.همچنین اندازه ی گپ با پارامتر غیرهمگنی رابطه ی عکس دارد[5]

$$E_{linear,N.H}(t,x) = E_0(1+bx)\sin(\omega t)\sin^2\left(\frac{2\pi}{\tau}t+\varphi\right) \quad (8)$$

مکانیزم فیزیکی تولید هارمونیک های مرتبه ی بالا، به این صورت است که پالس لیزر با مدت تپش چند فمتوثانیه، با مد پلاسمون جفت شده و نوسان جمعی الکترون های آزاد درون فلز را سبب می شوند. این کار، باعث تشدید میدان در درون و در مجاورت نانوساختار ها می شود. این افزایش بیشتر از مقدار آستانه برای تولید هارمونیک هاست. با تزریق کردن گازهای نادر این هارمونیک ها تولید می شوند.

$$E_{nonlinear,N.H}(t,x) = E_0(1+b_1x+b_2x^2)\sin(\omega t)\sin^2\left(\frac{2\pi}{\tau}t+\varphi\right) \quad (9)$$

۲-۲-محاسبات

محاسبات ما بر اساس حل عددی معادله ی شرودینگر وابسته به زمان تک بعدی و با تقریب تک الکترون فعال در حضور میدان پلاسمونیکی خطی و غیر خطی است. کلیه ی محاسبات انجام شده در این مقاله بر اساس تقریبات واحد اتمی ست. معادله ی شرودینگر را به صورت زیر داریم:

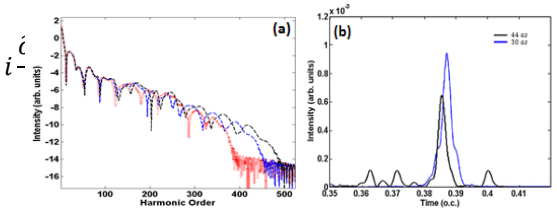
$$i\frac{\partial}{\partial t}\psi(x,t) = \left[-\frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V_{atom}(x) + V_{laser}(x,t)\right]\psi(x,t)$$

که در آن، V_{atom} پتانسیل اتمی و V_{laser} پتانسیل ناشی از اعمال میدان لیزری است. میدان لیزر، پتانسیل اتمی و پتانسیل ناشی از میدان لیزر را بشکل زیر در نظر میگیریم.

a پارامتر هموار سازی پتانسیل کولنی ست و برابرست با ۱.۱۸ . حال، به بررسی و مقایسه ی سه میدان همگن، غیر همگن خطی، و غیر همگن غیرخطی می پردازیم.میدان ها را به ترتیب، به اشکال زیر نشان می دهیم.

$$E_{homogen}(t) = E_0\sin(\omega t)\sin^2\left(\frac{2\pi}{\tau}t+\varphi\right) \quad (7)$$

معادلات ۷ و ۸ و ۹ به ترتیب میدان های لیزر در حالت همگن،غیر همگن خطی، و ناهمگن غیرخطی را نشان می دهند. در هر سه میدان ، مدت تپش میدان لیزر$\tau = 5fs$ ، $I = 2\times10^{14}\ {}^{W}/_{cm^2}$ و دامنه ی میدان لیزر توسط رابطه ی $E_0 = \sqrt{\frac{8\pi I}{c}}$بدست می آید.در اینجا گپ ۱۰ نانومتر، ضرایب $b = b_1 = \frac{1}{g(10\,nm)=200au} =$ 0.005 در نظر گرفته شده اند و ضریب $b_2 = \frac{b_1}{2}$ و اختلاف فاز $\varphi = \pi/2$ می باشد.



شکل ۱.(a) طیف هارمونیک های تولید شده توسط میدان های همگن (طیف قرمز) ، ناهمگن خطی (آبی) ، و ناهمگن غیرخطی (مشکی).(b) نیم رخ تپ آتوثانیه ای تولید شده، توسط برهم نهی هارمونیک های میدان لیزری ناهمگن خطی(مشکی) و غیر خطی(آبی)

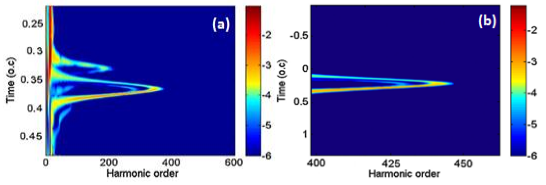
$$V_{atomic}(x) = -\frac{1}{\sqrt{x^2+a^2}} \quad (5)$$

$$V_{laser}(x,t) = E(x,t)\ x \quad (6)$$

شکل 1،(a) طیف هارمونیک های تولید شده توسط این میدان ها را نشان می دهد. طیف قرمز رنگ مربوط به میدان لیزری همگن، طیف آبی رنگ مربوط به میدان لیزری ناهمگن خطی و طیف مشکی، مربوط به میدان

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

لیزر ناهمگن غیرخطی ست. همانطور که در این تصویر دیده می شود، میدان پلاسمونیک غیر خطی، در مقایسه با دو میدان دیگر، کات آف را در هارمونیک بالاتری نشان می دهد. با بر هم نهی چندین هارمونیک ، میتوانیم تپ آتوثانیه ای کوتاهی را تولید کنیم. معمولا این هارمونیک ها را از بین هارمونیک های نزدیک به ناحیه ی قطع انتخاب می کنیم چرا که در این ناحیه جفت شدگی فازی روی میدهد. با توجه به شکل1،(b) ، ملاحظه می کنیم که برای میدان پلاسمونیک خطی، تپ آتوثانیه ای ۴۴ آتوثانیه ای تولید شد، ولی برای میدان پلاسمونیک غیر خطی، تپ کوتاه تر ۳۰ آتوثانیه را ایجاد کرده است.



شکل ۲. (a) نمودار توزیع زمان-فرکانس برای میدان لیزر ناهمگن خطی.(b) نمودار توزیع زمان-فرکانس برای میدان لیزر ناهمگن غیرخطی

حال، برای فهم بهتر موضوع، نمودار انرژی برای این دو میدان غیر همگن را رسم می کنیم . در شکل های ۲،(a) و (b)، این نمودار ها را به ترتیب، برای میدان ناهمگن خطی و میدان ناهمگن غیر خطی ملاحظه میکنید.. در شکل ۲ (a) دو پیک را در هارمونیک های ۱۹۵ و ۳۹۵ مشاهده کردیم که بیانگر بازترکیبهای کوتاه و بلند هستند. اتم های مسیر بلند زودتر یونیزه شده و دیرتر بازترکیب میشوند.بنابراین، در مسیر بلند الکترون ها مدت زمان بیشتری در میدان نوسان کرده و قادرند انرژی بیشتری تولید کنند. حال آنکه الکترون های مسیر کوتاه دیرتر یونیزه شده و زودتر بازترکیب می شوند. در شکل ۲ (b) ، شاهد بازترکیب در هارمونیک ۴۴۰ هستیم. در این شکل مشهود است که سهم مسیر بلند، غالب بوده و الکترون ها مسیر کوانتومی بلند را ترجیح میدهند. در [5]، مولفین مسیر کوانتومی کوتاه را برای الکترون هایی که تحت میدان لیزر تک رنگ یونیزه و بازترکیب میشوند پیشبینی کردند. برای ادامه ی کار میتوانیم تاثیر شکل هندسی نانوساختارهای مختلف را بر مرتبه ی هارمونیک های تولید شده ، شدت هارمونیک های ناحیه ی پلاتیو و همچنین پالس آتوثانیه ی حاصل از این هارمونیک ها را بررسی کنیم. که در اینجا به علت محدودیت فضا قادر به توضیح و تحلیل این موضوع نیستیم. اما ،نویسندگان [9]، پروسه ی تولید هارمونیک های مرتبه ی بالا را در حضور نانوذرات کروی دنبال کرده اند و حالت بهینه ی تولید این هارمونیک ها را در حضور این نوع از نانوساختارها پیشبینی کرده اند .

۳-نتیجه‌گیری

به طور کلی در این مقاله، هدف ما مطالعه ی اثرات نوع میدان لیزری اعمالی بر روی طیف هارمونیک ها و تپ آتوثانیه ای حاصل از آنهاست. در این مقاله طی بررسی های عددی و شبیه سازی هایی که انجام دادیم متوجه شدیم که الکترون، تحت تابش میدان لیزری تک رنگ مستقل از مکان (همگن) با پوش سینوس مربع، تقریبا در هارمونیک ۳۷۰ام، با اتم مادر بازترکیب میشود. سپس، با در نظر گرفتن میدان پلاسمونیکی و در نظر گرفتن جمله ی ناهمگنی از مرتبه ی یک، شاهد آن بودیم که بازترکیب الکترون با یون مادر، تقریبا در هارمونیک ۳۹۵ ام صورت گرفته. و در مرحله ی بعد، با اضافه کردن جمله ی غیر همگن از مرتبه ی دوم، یعنی با در نظر گرفتن میدان پلاسمونیک غیرخطی، کات آف را در هارمونیک ۴۴۰ام مشاهده کردیم و نتیجه گرفتیم که با وابسته کردن میدان الکتریکی لیزر به مکان، تپ آتوثانیه ای کوتاهتر و یا به عبارتی، انرژی بیشتری خواهیم داشت.

۴-مراجع

[1] ''*High order harmonic generation in nobel gases using plasmonic field enhancement*'' Ann. Phys. (Berlin), 1–10 (2012) / DOI 10.1002/andp.201200190

[2] Zenghu Chang;"*Fundamentals of Attosecond Optics*" 1st edition;Taylor and Francis group (2011), chapter 1 and 4.

[3] M. Lewenstein et al, *''Theory of high harmonic generation by low frequency laser fields*'', Phys. Rev.A**49**,2117 (1994).

[4] M.F. Ciappina,et al.*''Enhancement of high harmonic generation by confining electron motion in plasmonic nanostructure''*, Optical Society of America (OSA) Vol.**20**, No.24,Optics express 26261(2012)

[5] Huiying Zhong et al.*''Comparation of high harmonic generation and attosecond pulse from 3D hydrogen atom in three kinds of inhomogeneous fields*'', Physics Letters A,Vol **380**, Issue1-2, pages 188-193 (2015)

[6] Xue Shan et.al,*''Generation of isolated attosecond pulses in Bowtie-shaped nanostructure with three-color spatially inhomogeneous fields''*, Chin.Phys.B, Vol. **24**, No. 5 (2015) 054210

[7] H.Hekmatara et al., *''Extension of high harmonic generation cutoff via control of chirped laser pulses in the vicinity of metal nanostructure media''*, The Royal Society of Chemistry, Vol.**4** , Issue 103 , DOI: 10.1039/C4RA08052A(2014)

[8] A. Husakou. et.al, *''Theory of plasmon-enhanced high-harmonic generation in the vicinity of metal nanostructures in nobel gases''*,Phys.Rev.A **83**, 043839(2011)

[9] Ying-Ying Yang et.al, *''High harmonic and single attosecond pulse generation using plasmonic field enhancement in ordered arrays of gold nanoparticles with chirped laser pulses''*, Optics Express Vol. 21, Issue 2, pp. 2195-2205,DOI: 10.1364/OE.21.002195 (2013)

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