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 پالس کوتاه آتوثانیه با مدیریت فاز

سعید باطبی ،فاطمه عقیلی،سپیده فاضلی نسب، فروغ حسین زاده

مسئول و طراح علمی مقاله، متن، جمع آوری و ویرایش، شبیه سازی و نمودار

دانشکده فیزیک دانشگاه گیلان- خیابان نامجو- رشت

چکیده – در این مقاله تولید هماهنگ های مرتبه بالا و پالس آتو ثانیه در میدان های تک رنگ،دو رنگ و سه رنگ بررسی شده است و با محاسبه ی نرخ یونیزاسیون و احتمال یونیزاسیون که از فاکتورهای اصلی در تولید هماهنگ های مرتبه بالا می باشند ، سه میدان را با هم مقایسه کرده و نشان می دهیم که میدان سه رنگ از دو میدان دیگر بهتر است و در ادامه با افزایش فاز میدان اصلی و مشاهده تاثیر آن روی طیف هماهنگ های مرتبه بالا ، شرایط بهینه برای تولید پالس آتو ثانیه را بررسی می کنیم.

کلید واژه-پالس آتوثانیه، هارمونیک های مرتبه بالا ، یونیزاسیون

Synthesis of an intense attosecond pulse with phase manipulation

saeed batebi,fatemeh aghili,sepideh fazeli nasab, Forough hosseinzadeh

Department of Physics, University of Guilan, Rasht, Namjoo

Abstract – in this paper high harmonic generation and attosecond pulse, in a one color, two color and three color laser field have been investigated . and by calculating the ionization rate and ionization probability which are the main factors in high harmonic generation we compare these three fields with each other and show that the three color laser field is better than the others and latter by increasing the phase of main field and seeing its effect on high harmonic generation , we investigate the optimal conditions for generation the attosecond pulse.

Keyword-attosecond pulse, high-order harmonics, ionization

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]

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

۱- مقدمه

تولید هماهنگ مرتبه بالا (HHG) زمانی ایجاد میگردد که یک پالس لیزر به گاز نجیب اعمال گردد.HHG یکی از بهترین راه ها برای تولید انتشار پالس های آتو ثانیه میباشد که کاربرد فراوانی در فیزیک ، شیمی ، زیست و بیو شیمی دارد [1]

تولید هماهنگ برای اولین بارتوسط فرنکن کشف شد[2]که اندکی بعد از کشف لیزر توسط میمن در سال 1960 بود.در سال 1967 هماهنگ های مرتبه پایین (دوم تا پنجم) مورد مطالعه قرار گرفتند و در سال 1987 با اندرکنش لیزر اگزایمر و گاز نئون هارمونیک مرتبه هفدهم نیز کشف شد [1] و بعد از آن محققان تلاش میکردند که به بالاترین مرتبه هماهنگ ممکن با بازده بالا برسند سرانجام با گسترش علم اپتیک غیر خطی ، موفق شدند به HHGدست یابند که پدیده ای به شدت غیرخطی است. برای تولید هارمونیک های مرتبه بالا نیاز به یک شدت بالا داریم طیف HHG یک مشخصه عمومی دارد در واقع شدت این طیف در تعداد کمی از هماهنگ های اول کاهش می یابد سپس ناحیه ای هموار از هارمونیک هایی با شدت های نسبتا یکسان تشکیل می دهد و در نهایت به یک افت سریع شدت که بسامد قطع (cut off) نام دارد ختم میگردد . طبق نظریه کلاسیکی سه مرحله ای : روند HHG در سه مرحله صورت میگیرد[3] که ابتدا الکترون از سد پتانسیل تونلزنی می کند سپس در میدان لیزری شتاب میگیرد و در آخر با بازگشت به یون مادر باز ترکیب شده و فوتونی با بیشینه انرژی E_{cutoff} تولید میکند که در آن I_p پتانسیل یونیزاسیون و U_p انرژی پاندرماتیو الکترون آزاد در میدان لیزری می باشد و تنها به پارامترهای میدان لیزر وابسته است. در HHG عوامل میکروسکوپی و ماکروسکوپی روی هم اثر متقابل دارند و مکمل یکدیگرند. از جمله عوامل میکروسکوپی می توان به اندرکنش لیزر با اتم و برای ماکروسکوپی جفت شدگی فاز نام برد.[4] بنابراین یونیزاسیون و نرخ احتمال یونیزاسیون که در اندرکنش لیزر و اتم صورت می گیرد حائز اهمیت است و نقش بسزایی در طیف HHGدارد.

۲-تئوری

محاسبات ما بر مبنای حل معادله شرودینگر وابسته به زمان تک بعدی برای یون هلیوم می باشد.در محاسبات از پتانسیل مدل[6] استفاده شده است. میدان لیزری که در نظر گرفتیم به صورت رابطه (۱) می باشدکه در آن E_{0i}، ωi، φi، fi(t)، τi و(i=1,2,3) به ترتیب دامنه، فرکانس، فاز، پوش و مدت تپش میدان لیزری (تمام پهنا در نصف بیشینه)برای میدان اصلی و میدان کنترلی اول و میدان کنترلی دوم می باشند.و مقدار همه پارامترها همانند مقاله[6] می باشد.

با حل معادله شرودینگر و رسیدن به تابع موج وابسته به زمان Ψ (x,t) قادر خواهیم بود شتاب دو قطبی القایی را به شکل رابطه(۲) بدست آوریم. طیف HHG را با استفاده از تبدیل فوریه شتاب دوقطبی به صورت رابطه(۳) بنویسیم و در نهایت با برهم نهی چندین مرتبه از هارمونیک ها، پالس آتو ثانیه را طبق رابطه (۴) بدست می آوریم dq ، تبدیل فوریه شتاب دوقطبی القایی وابسته به زمان می باشدو به صورت رابطه (۵) تعریف می شود. در ادامه نرخ یونیزاسیون (ADK) را به صورت رابطه (۶) بدست می آوریم[5] واحتمال یونیزاسیون را به صورت رابطه(۷)محاسبه میکنیم.

$$\mathrm{E}(t)=\sum_{i=1}^{3}\mathrm{E}_{0i}\, f_i(t)\cos(\omega_i t+\varphi_i) \quad (۱)$$

$$f_i(t)=2\ln 2\left(\left(\frac{t}{\tau_i}\right)^2\right) \qquad ;i=1,2,3$$

$$d(t)=\langle\Psi|-\frac{dV}{dt}+\varepsilon(t)|\Psi\rangle \quad (۲)$$

$$p_q(\omega)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^T d(t)e^{-i\omega t} \quad (۳)$$

$$I(t)=\left|\sum_q d_q e^{-iq\omega t}dt\right|^2 \quad (۴)$$

$$d_q=\int d(t)e^{-iq\omega t}dt \quad (۵)$$

$$W_{ADK}(z,t)=\frac{2.4}{|E(z,t)|}\exp\left\{\frac{2.4}{3|E(z,t)|}\right\} \quad (۶)$$

$$\mathbf{p}=1-\langle\psi(t)|\psi(0)\rangle \quad (۷)$$

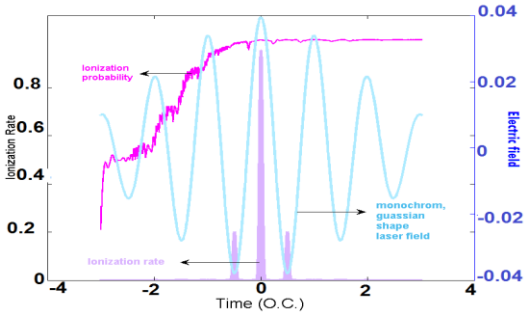
۳-تحلیل نتایج

در این مقاله، ابتدا میدان لیزر را تک رنگ با طول موج

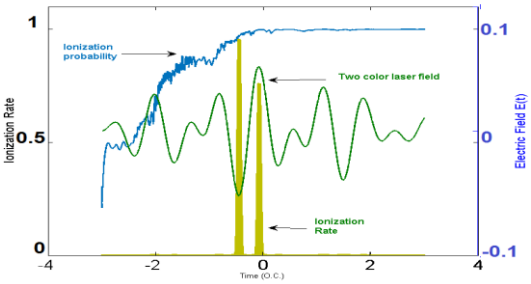
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]

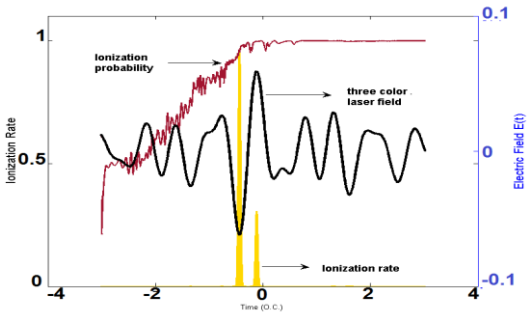
$1600(nm)$ و شدت $3\times10^{14}(W/cm^2)$ در نظر گرفتیم. شکل (۱) نمودار این میدان را نشان میدهد. با استفاده از رابطه ی شماره ی ۶ ، نرخ یونیزاسیون مربوط به این میدان ملاحظه می شود. نرخ یونیزاسیون نشان میدهد که یونیزاسیون در پیک های میدان لیزر غالب است. می دانیم که در غیاب نیروی خارجی، الکترون با تابع موج وابسته به مکان حول هسته گردش میکند. اما زمانیکه میدان لیزر به اتم وارد میشود، در اثر نیروی اعمال شده به الکترون، تابع موج دستخوش تغییراتی می شود. یعنی الکترون ها در طی مدت تپش میدان لیزر از حالت پایه (که صرفا وابسته به مکان بود) به حالت جدید (تابع موج وابسته به زمان که توسط حل معادله ی شرودینگر بدست آمد) وارد می شوند. معادله ی(۷) این تغییرات جمعیت را نشان می دهد. در شکل (۱)، مبرهن است که در لحظه ی تپش میدان لیزر الکترون ها از حالت پایه شروع به انتقال به حالت جدید می کنند و در نقاطی که یونیزاسیون بیشینه می شود، تقریبا تمام جمعیت در تراز جدید حضور پیدا میکنند. در مرحله ی بعد، با اضافه کردن میدان کنترلی $1032(nm)$ به میدان لیزری اول و با در نظر گرفتن شدت کل $3\times10^{14}(W/cm^2)$ این بار نمودار های میدان ،نرخ و احتمال یونیزاسیون را برای میدان لیزری دورنگ در شکل (۲)نشان می دهیم و در ادامه با افزودن میدان کنترلی اول $1168(nm)$ومیدان کنترلی دوم $792(nm)$ به میدان $1600(nm)$ و با در نظر گرفتن شدت کل $3\times10^{14}(W/cm^2)$ ، این نمودارها را برای میدان لیزری سه رنگ بدست می آوریم و در شکل (۳)نمایش میدهیم. با تحلیلی مشابه با میدان تک رنگ، مشاهده میکنیم که تغییرات جمعیت در نقطه ی پیک میدان و به تبع آن در اولین نرخ یونیزاسیون روی حالت جدید متمرکز می شود. از طرفی طبق مدل نیمه کلاسیک (HHG)بازده ناحیه تخت متناسب با نرخ یونیزاسیون است[7] . هارمونیک های بسامد قطع روی نقطه پیک میدان تولید می گردد[6] در واقع الکترون در



شکل(۱):نمودار میدان،نرخ یونیزاسون و احتمال یونیزاسیون میدان لیزری تک رنگ.



شکل(۲):نمودار میدان،نرخ یونیزاسون و احتمال یونیزاسیون میدان لیزری دو رنگ.



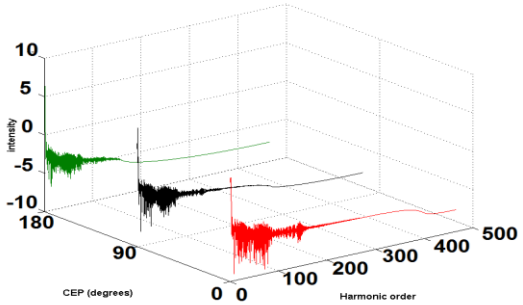
شکل(۳):نمودار میدان،نرخ یونیزاسون و احتمال یونیزاسیون میدان لیزری سه رنگ.

نقطه پیک اول، میدان یونیزه شده سپس شتاب میگیرد و در نقطه پیک دوم، بازترکیب میشود و هارمونیک بسامد قطع در آن نقطه به وجود می آید. لذا با مقایسه میدان ها مشاهده میکنیم که در میدان سه رنگ شدت پیک ها افزایش می یابد بنابراین این سه فرآیند در چرخه اپتیکی بیشتری صورت میگیرد و الکترون انرژی جنبشی بیشتری بدست می آورد[8].و همچنین مطابق با نتایج[6] شدت هماهنگ های مرتبه بالای میدان سه رنگی صد مرتبه بالاتر از دو میدان دیگر است. بنابراین ما میدان لیزری سه رنگی را به عنوان

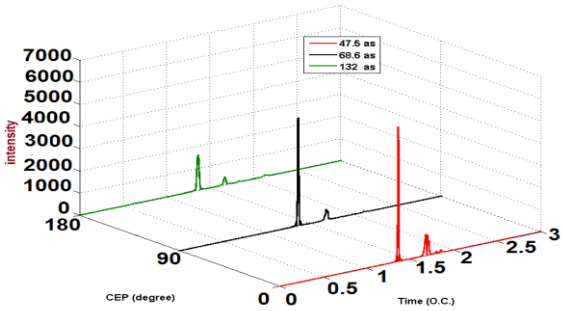
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]

بهترین میدان انتخاب کرده و در گام بعد از آن استفاده میکنیم. در ادامه کار می خواهیم تاثیر افزایش فاز را روی میدان اصلی بررسی کنیم. بنابراین فاز اصلی را از صفر تا۱۸۰ درجه،با انتخاب فاز (0، $\pi/2$ و π) تغییر می دهیم و ضمن بدست آوردن طیف های هماهنگ های مرتبه بالای هرکدام از آنها(شکل۴)پالس آتوثانیه شان را بدست می آوریم(شکل۵)و مشاهده می کنیم که افزایش فاز میدان اصلی تاثیر خوبی روی نقطه قطع نداشته و هر چه که فاز بیشتر می شود طیف توان ناحیه تخت کوتاهتری را نشان می دهد ،در نتیجه پالس آتوی پهن تر و با شدت کمتری حاصل میگردد بنابراین در اینجا مقدار بهینه فاز اصلی صفر میباشد،که در این حالت پالس (47.5) آتوثانیه تولید میگردد.البته لازم به ذکر است که این نتیجه با توجه به میدان و پارامترهای مختلفی که انتخاب میکنیم میتواند متفاوت باشد.[6]



شکل(۴):طیف های هماهنگ های مرتبه بالا برای فازهای اصلی $(0, \pi/2, \pi)$.



شکل(۵):پالس های آتوثانیه برای سه فاز اصلی($0, \pi/2, \pi$).

۴-نتیجه گیری

اضافه کردن میدان های کنترلی یکی از راه های موثر و مهم برای تولید هماهنگ های مرتبه بالا با بازده خوب و تولید پالس آتو ثانیه می باشد بنابراین با استفاده از نمودارهای میدان لیزر ، نرخ یونیزاسیون و احتمال یونیزاسیون و مقایسه آن ها، میدان لیزری سه رنگ را به عنوان بهترین میدان لیزری بدست آوردیم و با افزایش فاز میدان اصلی میدان لیزری سه رنگ،از صفر تا ۱۸۰ درجه مشاهده کردیم که افزایش فاز تاثیر مطلوبی روی طیف هماهنگ و پالس آتو ثانیه ندارد ومنجر به کوتاهی ناحیه تخت و کم شدن هماهنگ بسامد قطع و در نتیجه بزرگ شدن پالس آتو ثانیه میگردد بنابراین با استفاده از میدان لیزری سه رنگی با فاز اصلی صفر توانستیم به پالس 47.5 آتو ثانیه دست یابیم.

۵-مراجع

[1] DINH BA KHUONG.DAO VAN LAP"phase-matched high order harmonic generation and application"

[2] T. Nemati Aram, S. Batebi, and M. Mohebbi, IJOP. Vol. 6, No. 1, Winter-Spring, 2012.

[3] P. B. Corkum, Phys. Rev. Lett. 71, 1994 (1993).

[4] Mette B Gaarde andKenneth J Schafer" Understanding attosecond pulse generation beyond the single-atom level"

[5] Zenghu chang, “Fundamentals of attosecond optics”, 1st addition, Taylor and Francis group, 2011

[6] Li Fei , Wang Guo-Li , Zhao Song-Feng and Zhou Xiao-Xin , “*Synthesis of multi-color, long laser pulses for strong attosecond pulse generation*”, Chinese Physics Letters, Vol. **32**(1), 2015

[7] M. mohebbi**,** S. Batebi. Opt. Commum**.** (2013). Vol. 296, pp. 113-123, 2012

[8]Peng-Cheng Li, I-Lin Liu, Shih-I Chu"Optimization of three-color laser field for the generation of single ultrashort attosecond pulse"

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]