# بهینه سازی یک لیزر سه رنگی به منظور تولید پالس کوتاه تر آتو ثانیه

فروغ حسین زاده، سعید باطبی

دانشکده فیزیک دانشگاه گیلان ، خیابان نامجو،رشت

**چکیده - به منظور بدست آوردن پالس کوتاه ترآتو ثانیه ای، به حل معادله ی تک بعدی وابسته به زمان شرودینگربرای اتم هیدروژن پرداختیم و با بدست آوردن تبدیل فوریه ی شتاب دو قطبی القایی برای یک لیزر با پارامترهای اولیه، طیف هارمونیک های مرتبه ی بالا را رسم کردیم. با بر هم نهی چندین مرتبه از هارمونیک های نزدیک به نقطه ی قطع، تک پالس آتوثانیه ای لیزر تابشی سه رنگی را تولید کردیم.سپس سعی کردیم که با تغییر دادن پارامترهای لیزر، از جمله طول موج میدان های اصلی و کنترلی اول و دوم، پوش لیزر تابشی، و همچنین اختلاف فاز، به یک حالت بهینه برای تولید پالس کوتاه تر آتوثانیه ای برسیم.**

کلید واژه- تک پالس آتو ثانیه، میدان لیزر سه رنگی، هارمونیک های مرتبه ی بالا.

# Optimization of a three color laser field in order to achieve a shorter isolated attosecond pulse

Forouq Hosseinzadeh , Saeed Batebi

Department of Physics, University of Guilan, Rasht

**Abstract- In order to achieve a shorter attosecond pulse , we solved the time dependant 1D schrodinger equation for single Hydrogen atom. Applying the Fourier transformation to the dipole acceleration, we succeed to depict high order harmonics for a laser field with the first parameters. By superposing several harmonics in cut off vicinity, the isolated attosecond pulse is generated. Then we tried changing laser parameters, such as, varying the wavelength of the fundamental and the two controlling fields, using different pulse envelopes and at last, increasing the carrier-envelope phase, in order to achieve a shorter pulse.**

**Keywords : Carrier-envelope phase , cut off , Fundamental and controlling fields, Isolated attosecond pulse**

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

## ۱-مقدمه

بیشترین عمر سپری شده، تا کنون عمر جهان است که در حدود ۱۴ بیلیون سال یا $4 \times 10^{17}$ ثانیه است. با ظهور علم آتو ثانیه($1\ as = 10^{-18}\ s$) در قرن ۲۱، امکان مشاهده ی پدیده هایی که در بازه های زمانی بسیار کوچک اتفاق می افتند میسر شده است. برای اینکه بتوانیم درک درستی از کوتاهی $1\ as$ داشته باشیم، میتوانیم عمر تمام هستی را با $1\ s$ مقایسه کنیم. اپتیک آتوثانیه، شاخه ای از اپتیک فوق سریع و فیزیک میدان قوی است(۱). پالس های آتوثانیه کوتاه ترین انفجار نوری هستند که تا به امروزه مشاهده شده اند(۲). پروسه ی تولید هارمونیک های مرتبه ی بالا(۲)، امکان تولید چنین پالس هایی را فراهم میکند. با حل معادله ی شرودینگر وابسته به زمان تک بعدی، می توانیم تولید چنین پالس هایی را شبیه سازی کنیم.

## ۲-تئوری

محاسبات ما بر مبنای حل معادله ی شرودینگر وابسته به زمان تک بعدی، و بر اساس تقریب تک الکترون فعال است. در این تقریب تنها یک الکترون شتاب دار می شود و فوتون ساطع میکند. در محاسبات، از پتانسیل کولونی هموار شده استفاده میکنیم.همچنین، میدان لیزری که در نظر گرفتیم، لیزری سه رنگی(3,4) به صورت زیر است:

$$E(t) = \sum_{i=1}^{3} E_{0i}\, f_i(t)\, \cos(\mathrm{w_i t} + \varphi_\mathrm{i}) \qquad (2)$$

$$f_\mathrm{i}(\mathrm{t}) = 2\ln 2\left(\left(\frac{\mathrm{t}}{\tau_\mathrm{i}}\right)^2\right) \quad ;\ \mathrm{i} = 1,2,3$$

که در اینجا $E_{0i}$، $\omega_i$، $\varphi_\mathrm{i}$ ، $f_\mathrm{i}(\mathrm{t})$ ، $\tau_\mathrm{i}$ و (i=1,2,3) به ترتیب دامنه ، فرکانس، فاز، پوش، و مدت تپش میدان لیزری (تمام پهنا در نیم بیشینه) برای میدان اصلی، میدان کنترلی اول و میدان کنترلی دوم هستند. با حل معادله ی شرودینگر و رسیدن به تابع موج $\psi(x,t)$، قادر خواهیم بود که شتاب دو قطبی القایی را به شکل زیر بدست آوریم.

$$d(t) = \left\langle \psi \middle| -\frac{dV}{dt} + \varepsilon(t) \middle| \psi \right\rangle \qquad (3)$$

طیف HHG نیز از تبدیل فوریه ی شتاب دو قطبی القایی وابسته به زمان به دست می آید.

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

و در نهایت تپ آتو ثانیه ای با برهم نهی چندین مرتبه از هارمونیک ها بدست می آید.

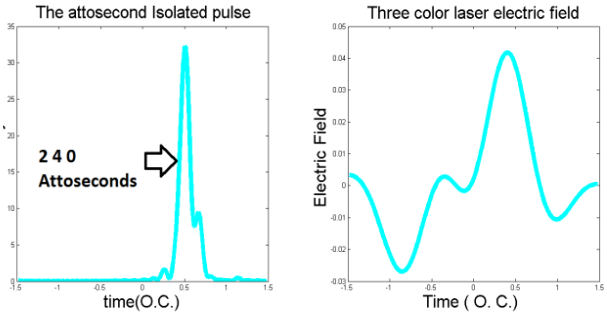
$$I(t) = \left| \sum_q d_q e^{-iq\omega t} dt \right|^2$$

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

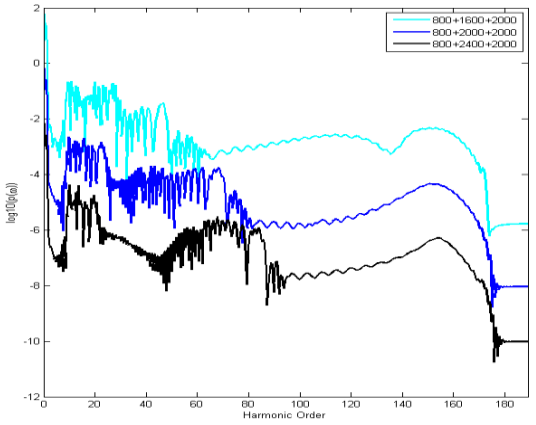
از آنجاییکه در هماهنگ های نزدیک بسامد قطع، جفت شدگی فازی روی میدهد، q از این هماهنگ ها انتخاب می شود.

## ۳-تحلیل نتایج

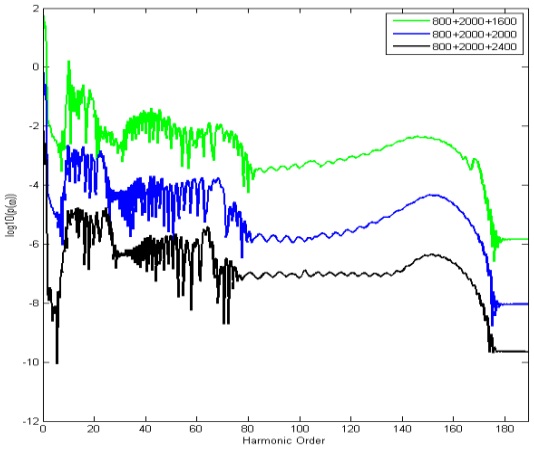
در شکل یک، یک لیزر سه رنگی، با پارامترهای اولیه در نظر گرفتیم، طیف هارمونیک های حاصل از این میدان،با رنگ آبی کمرنگ در شکل ۲ نشان داده شده است. با برهم نهی هارمونیک های۱۰۰ام تا ۱۳۰ام از این طیف، تک پالس آتوثانیه ای این لیزر را محاسبه کردیم که در حدود ۲۴۰ آتوثانیه می باشد. در حالیکه واحد اتمی زمان، ۲۴ آتو ثانیه میباشد. بنابراین تک پالس تولید شده توسط لیزر فعلی، چندان مطلوب نبوده و لازم است که با تغییر پارامترهای لیزر، شرایط را برای تولید تک پالس آتوثانیه ای کوتاه تر محیا کنیم. در مرحله ی اول از کار، قصد داریم که تاثیر تغییرات طول موج میدان کنترلی اول را مورد بررسی قرار دهیم. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه میشود، با افزایش طول موج میدان کنترلی اول نوسانات طیف هارمونیک ها هموار تر شده و طیف مطلوب تری را ارائه میکند. حال، تاثیرات افزایش طول موج میدان کنترلی دوم را بررسی میکنیم. برای انجام این کار، طول موج میدان اصلی و میدان کنترلی اول را ثابت در نظر گرفته و طول موج میدان کنترلی دوم را تغییر میدهیم. شکل ۳ اثرات این تغییرات را نشان می دهد. همانطور که در شکل سه قابل ملاحظه است، با افزایش طول موج میدان کنترلی دوم، نوسانات طیف هارمونیک ها بیشتر می شود، و در واقع، هر چه طول موج میدان کنترلی دوم



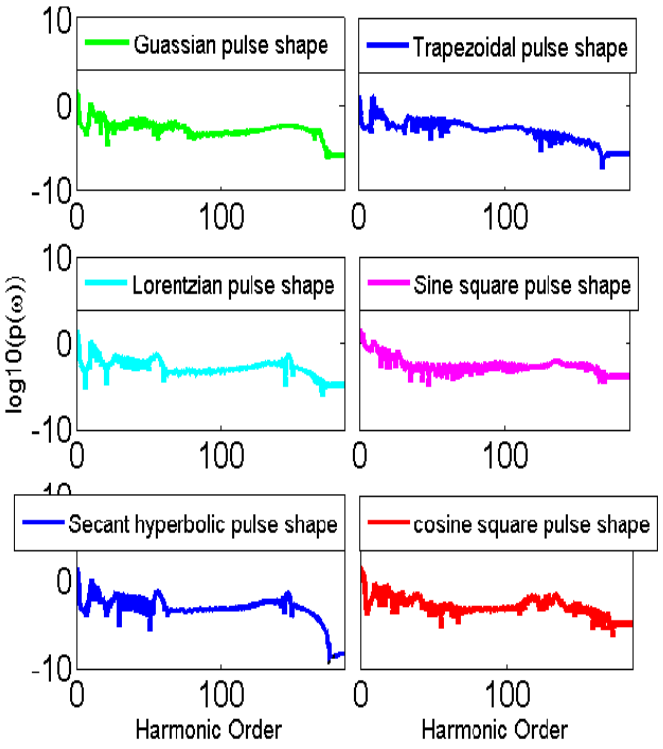

شکل ۱: میدان سه رنگی با پارامترهای اولیه به صورت:( $I_1 = 1 \times 10^{14} \frac{w}{cm^2}$و $I_2 = 1.2 \times 10^{14} \frac{w}{cm^2}$و $I_3 = 1.5 \times 10^{14}$ $\lambda_1 = 800$ و $\lambda_2 = 1600$ و $\lambda_3 = 2000$ $\tau_1 = \tau_2 = \tau_2 = 3\ fs$ و $\varphi_1 = \pi, \varphi_2 = 0, \varphi_3 = -\frac{\pi}{2}$)




شکل ۲: .طیف های حاصل از تغییرات طول موج میدان کنترلی اول، سایر پارامترهای لیزر مطابق با شکل ۱ است.

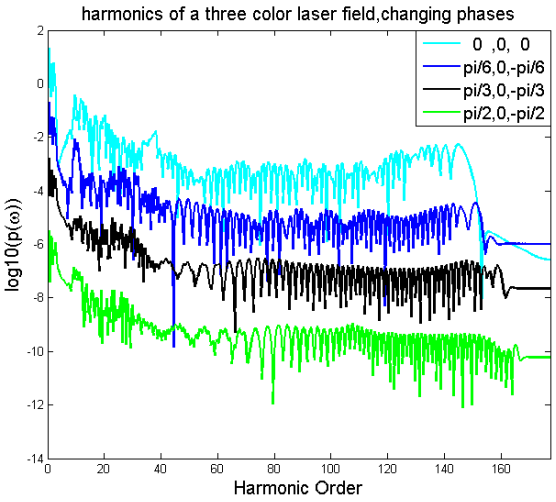



شکل ۳:طیف های حاصل از تغییرات طول موج میدان کنترلی دوم. سایر پارامترها، مطابق با شکل یک است.

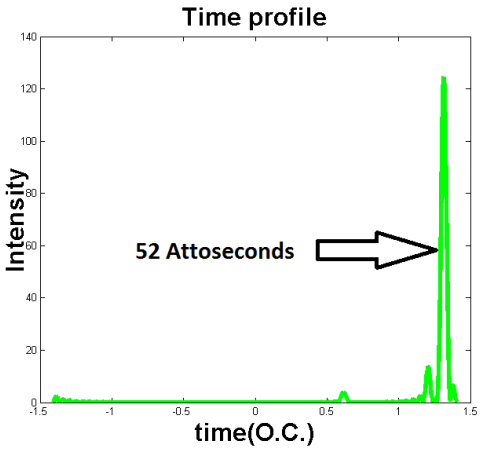



شکل ۴: طیف هارمونیک ها با پوش های متفاوت. طیف سبز رنگ پوش گاوسی، طیف آبی کمرنگ پوش لورنتسی، طیف مشکی پوش سکانت هایپربولیک، طیف آبی پر رنگ پوش ذوزنقه ای، طیف صورتی پوش سینوس مربع، و طیف قرمز رنگ پوش کسینوس مربع را نشان میدهد.

. کمتر باشد، طیف مطلوبتری خواهیم داشت. همچنین ملاحظه میشود که در طیف سبز رنگ، در مقایسه با طیف آبی و مشکی، قطع در هارمونیک بالاتری اتفاق افتاده است. با استفاده از نتایجی که از شکل های ۲ و ۳ گرفتیم، ملاحظه میکنیم که طول موج های استفاده شده در طیف سبز رنگ، طیف بهتری را ارائه میکند. از آنجاییکه به دنبال حالت بهینه برای تولید پالس کوتاه آتو ثانیه هستیم، میتوانیم تاثیر تغییرات پارامترهای مختلف را مورد بررسی قرار دهیم. در شکل های ۲ و ۳ تاثیرات حاصل از تغییر طول موج های میدان لیزر گاوسی شکل را ملاحظه کردیم. در قدم بعد قصد داریم تاثیر پوش های مختلف بر نقطهی قطع را بررسی کنیم. در شکل۴، به ترتیب پوش های گاوسی، لورنتسی، سکانت هایپربولیک، ذوزنقه ای، سینوس مربع، و کسینوس مربع را در نظر گرفتیم. ملاحظه می شود که شکل پالس سینوس مربع،




شکل ۵:طیف پالس سینوس مربع، با تغییرات فاز میدان کنترلی اول




شکل۶:تک پالس آتو ثانیه ای بسیار کوتاه، با استفاده از پارامترهای جدید

قطع را در هارمونیک بالاتری نسبت به سایر پالس ها نشان می دهد. حال، با انتخاب پوش سینوس مربع، به بررسی اثرات تغییر فاز نسبی میدان ها می پردازیم. همانطور که در شکل دیده می شود با افزایش دادن فاز نسبی میدان اصلی و میدان کنترلی دوم، ناحیه ی تخت پهن تر خواهیم داشت و در نتیجه نقطه ی قطع در مرتبه ی بالاتری به وقوع میپیوندد. با توجه به شکل ۵، ملاحظه می شود که طیف سبز رنگ، قطع را تقریبا در هارمونیک ۱۶۸ام نشان می دهد. شکل ۶، تپ آتوثانیه ی تولید شده توسط پارامترهای جدید را نشان میدهد . در این شکل با برهم نهی ۶۰ هارمونیک، (هارمونیک های ۱۰۰ تا ۱۶۰) موفق شدیم که پالسی در حدود ۵۲ آتوثانیه تولید کنیم.

## ۴-نتیجه گیری

به طور خلاصه هدف ما در این مقاله، پی بردن به چگونگی تاثیر فاکتورهای کنترلی میدان لیزری بر طیف هارمونیک های مرتبه ی بالا، و تولید تپ آتوثانیه تحت میدان تابشی سه رنگی است. در این مقاله، با بررسی تاثیر تغییرات طول موج میدان های کنترلی به این نتیجه رسیدیم که افزایش طول موج میدان کنترلی اول باعث هموار تر شدن طیف هارمونیک ها میشود اما افزایش طول موج میدان کنترلی دوم، نتیجه ی عکس دارد. همچنین با مقایسه ی پوش های مختلف، شکل پالس سینوس مربع را به عنوان بهینه ترین پالس لیزر انتخاب کردیم و در آخر، با تغییر اختلاف فاز میدان های اصلی و کنترلی، نقطه ی قطع بالاتری را مشاهده کردیم. بنابراین، در این مقاله موفق شدیم که با انتخاب صحیح پارامترهای لیزر، پهنای پالس آتوثانیه ی تولید شده را حدود ۴.۵ مرتبه کاهش دهیم و به پالس کوتاه 52 as برسیم.

## مراجع


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

[2] William T.Rhodes;''Attosecond Physics'';  1st edition;Springer series

[3] Peng-Cheng Li, I-Lin Liu, Shih-I Chu, "Optimization of three-color laser field for the generation of single ultrashort attosecond pulse'', Optical Society of America-(2011)

[4] Chaojin Zhang, Jinping Yao, Jielei Ni, Guihua Li, Ya Cheng, Zhizhan Xu, , Optical Society of America-(2012)