



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۱۱-۹ بهمن ۱۳۹۷



ایجاد پالس فوق کوتاه آتو ثانیه در حضور میدان استاتیک

مریم سادات فتاحی، شهاب رحیمی، فروغ حسین زاده، سعید باتبی

دانشکده فیزیک دانشگاه گیلان، خیابان نامجو، رشت

Maryam.fattahi1994@gmail.com

Eng.rahimi91@gmail.com

Forouq.hosseinzadeh@gmail.com

S_batebi@yahoo.com

چکیده-در راستای تولید پالس آتو ثانیه، معادله ی شرودینگر وابسته به زمان را به صورت یک بعدی برای اتم هیدروژن حل نموده ایم و سپس با محاسبه تبدیل فوریه ی شتاب دوقطبی القایی تشکیل شده، طیف هماهنگ های مرتبه بالا را برای دو حالت میدان لیزر تک رنگ و میدان لیزر دو رنگ در حضور و عدم حضور میدان الکترواستاتیک رسم نموده ایم. تولید پالس آتو ثانیه از برهم نهی تعدادی از هماهنگ های مرتبه بالا در ناحیه قطع را برای دو حالت فوق مقایسه کرده ایم. در نتیجه پالس تولید شده از میدان لیزر تک رنگ که با پهنای ۱۵۸ آتو ثانیه بوده است در حضور میدان استاتیک به مقدار پهنای ۱۰۵ آتو ثانیه کاهش یافته است. در حالت میدان لیزر دو رنگ، پالسی به پهنای ۶۶ آتو ثانیه تولید شده است که در حضور میدان استاتیک، پهنای آن تا مقدار ۵۲ آتو ثانیه کوتاه تر شده است.

کلیدواژه- پالس آتو ثانیه، میدان الکترواستاتیک، هماهنگ های مرتبه بالا.

Ultra short attosecond pulse generation in the presence of static field

Maryam Sadat Fattahi, Shahab Rahimi, Forouq Hosseinzadeh, Saeed Batebi

Department of Physics, University of Guilan

Maryam.fattahi1994@gmail.com

Eng.rahimi91@gmail.com

Forouq.hosseinzadeh@gmail.com

S_batebi@yahoo.com

Abstract-In order to generate attosecond pulse, we've solved the time dependent Schrodinger equation in 1 dimensional case for Hydrogen atom. Thus, by calculating the Fourier transformation of the induced dipole acceleration, we've depicted the high harmonics spectra for both one color and two color laser fields with and without the presence of a static field. We've also compared generated attosecond pulses by superposing some of the harmonics for the above two cases. As a result, the generated pulse for the monochromatic field, which was 158 attosecond wide, shortens to 105 attosecond in the presence of a static field. in bichromatic laser field case, a 66 attosecond pulse is generated. In presence of a static field, its width shrinks to 52 attosecond.

Keywords: Attosecond pulse, High harmonic, Static field

در رابطه (۳) $f_i(t)$ ، ω ، E_L ، E_S ، $E(t)$ به ترتیب میدان فرودی، میدان استاتیک، دامنه میدان لیزر، فرکانس لیزر و پوش می باشند. با حل معادله شرودینگر وابسته به زمان یک بعدی مقدار تابع موج به دست می آید، رابطه (۴).

$$i \frac{\partial}{\partial t} \psi(x, t) = \left[-\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) - exE(t) \right] \psi(x, t) \quad (4)$$

$$d(t) = \langle \psi(x, t) | V(x) - exE(t) | \psi(x, t) \rangle \quad (5)$$

برای محاسبه شتاب دو قطبی القایی از رابطه (۵) استفاده می کنیم. با محاسبه تبدیل فوریه شتاب دو قطبی القایی می توان طیف هماهنگ های مرتبه بالا به دست آورد، رابطه (۶).

$$P_R(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\tau} d(t) e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

در روابط (۶)، (۷)، (۸) مرتبه هماهنگ ها است. در پایان از برهم نهی چندین مرتبه از هماهنگ های مرتبه بالا یک پالس آتوئانیه منفرد حاصل می شود، نکته مهم در چگونگی انتخاب مرتبه هماهنگ جفت شدگی فازی است که در نزدیکی فرکانس قطع رخ می دهد، رابطه (۷) و (۸).

$$I(t) = \left| \sum_R D_R e^{-iR\omega t} \right|^2 \quad (7)$$

$$D_R = \int dt d(t) e^{-iR\omega t} \quad (8)$$

تحلیل نتایج

طیف هماهنگ های حاصل از این دو میدان را می توان در شکل ۱ مشاهده نمود که منحنی ۱ مربوط به لیزر تک رنگ و منحنی ۲ مربوط به لیزر دو رنگ است. پارامترهای میدان لیزر تک رنگ و میدان لیزر دو رنگ در جدول ۱ نمایش داده شده اند [1].

مقدمه

برای شبیه سازی هماهنگ های مرتبه بالا به روش نیمه کلاسیک، میدان لیزر فرودی را به صورت کلاسیک و محیط مادی را به صورت کوانتومی در نظر می گیریم [1]، می توان از حل معادله شرودینگر وابسته به زمان یک بعدی استفاده نمود. در این مقاله به مقایسه و شبیه سازی تولید هماهنگ مرتبه بالا به دو حالت (حالت اول: تولید هماهنگ مرتبه بالا با استفاده از میدان لیزر تک رنگ و دو رنگ، حالت دوم: تولید هماهنگ مرتبه بالا با استفاده از میدان لیزر تک رنگ و دو رنگ در حضور میدان استاتیک) می پردازیم.

روش های محاسباتی

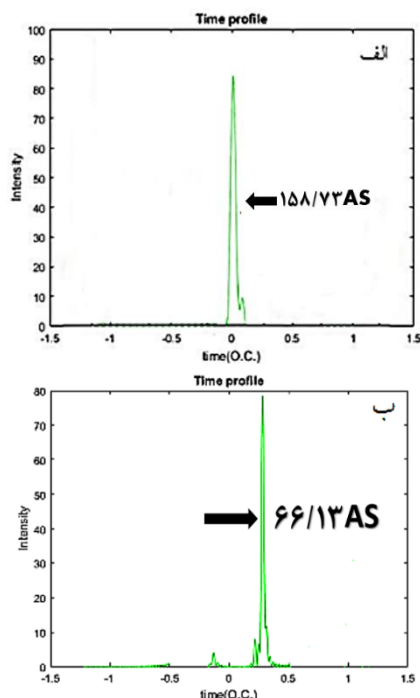
مبنای کار ما محاسبه معادله شرودینگر وابسته به زمان یک بعدی است و از تقریب تک الکترون فعال استفاده نموده ایم. بر اساس مدل سه مرحله ای تک الکترون از چاه پتانسیل کولنی که توسط میدان لیزر فرودی تغییر شکل می دهد، تونل زنی می کند، سپس در میدان لیزر شتاب می گیرد و با تغییر جهت میدان به سمت هسته والد بازمی گردد و در تقریب دو قطبی القایی با گسیل فوتون تابش می کند که این تابش می تواند در مقیاس آتو ثانیه باشد [2]. میدان فرودی در حالت اول به صورت میدان لیزر تک رنگ و میدان لیزر دو رنگ است.

$$E(t) = \sum_{i=1}^2 E_i f_i(t) \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

$$f_i(t) = \text{sech}^2 \frac{t}{\tau} \quad (2)$$

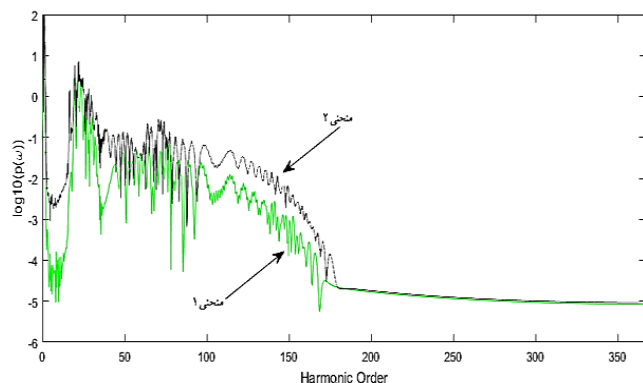
در روابط (۱) و (۲) τ_i ، φ_i ، ω_i ، $f_i(t)$ ، E_i به ترتیب دامنه، پوش [3]، فرکانس، فاز، مدت تپش میدان لیزری برای میدان لیزر اصلی (پایه) و میدان لیزر کنترلی می باشند. میدان فرودی در حالت دوم به صورت مجموع میدان لیزر (تک رنگ یا دو رنگ) و میدان استاتیک است که دامنه آن حدود ۲٪ دامنه میدان لیزر می باشد [5,4]:

$$E(t) = E_S + f_i(t) E_L \cos \omega t \quad (3)$$



شکل ۲: (الف) - تک پالس آتو ثانیه بسیار کوتاه حاصل از میدان لیزر تک رنگ
(ب) - تک پالس آتو ثانیه بسیار کوتاه حاصل از میدان لیزر دو رنگ

در مرحله بعد با اعمال یک میدان استاتیک، تاثیرات این میدان را بررسی خواهیم نمود. در شکل ۳ منحنی ۱ مربوط به میدان لیزر تک رنگ و منحنی ۲ مربوط به میدان لیزر تک رنگ در حضور میدان استاتیک می باشد، در شکل ۴ منحنی ۱ مربوط به



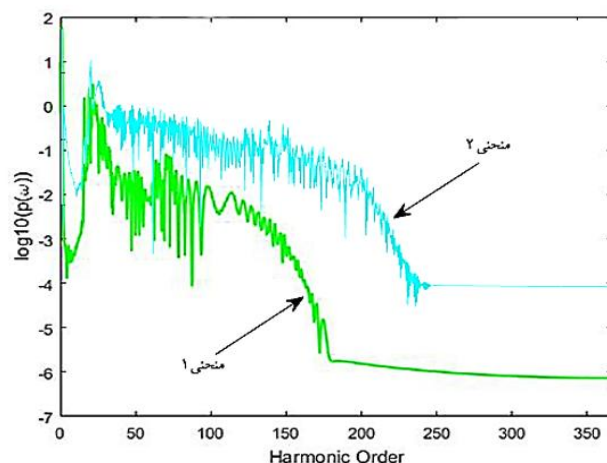
شکل ۳: طیف هماهنگ‌ها حاصل از میدان لیزر تک رنگ در حضور میدان استاتیک

میدان لیزر دو رنگ و منحنی ۲ مربوط به میدان لیزر دو رنگ در حضور میدان استاتیک است. در شکل ۴ در هارمونیک حدود ۱۰۰ دو ناحیه تخت از هم جدا شده اند. از بررسی طیف هارمونیک در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می شود که حضور میدان استاتیک نرخ تولید هماهنگ‌های مرتبه بالا را در سمت راست ناحیه تخت و در نزدیکی نقطه قطع افزایش داده است.

جدول ۱: پارامترهای میدان لیزر

I	λ_i nm	I_i W/cm ²	ϕ_i
1	800	1×10^{14}	$\frac{\pi}{2}$
2	1600	2×10^{14}	$-\frac{\pi}{8}$

نمودار طیف هماهنگ‌ها در حالتی که میدان لیزر دو رنگ است (یک میدان پایه به همراه یک میدان کنترلی) دارای طول ناحیه تخت بیشتری می باشد و نسبت به طیف میدان لیزر تک رنگ هموارتر است. در شکل ۱ منحنی ۱ در واقع دو ناحیه تخت داریم که با افت و خیزی که در هارمونیک حدود ۱۰۰ اتفاق افتاده این دو ناحیه از هم تفکیک شده اند. همچنین در منحنی ۲ در هارمونیک حدود ۱۵۰ این اتفاق رخ داده است.



شکل ۱: طیف هماهنگ‌ها حاصل از میدان لیزر تک رنگ و دو رنگ

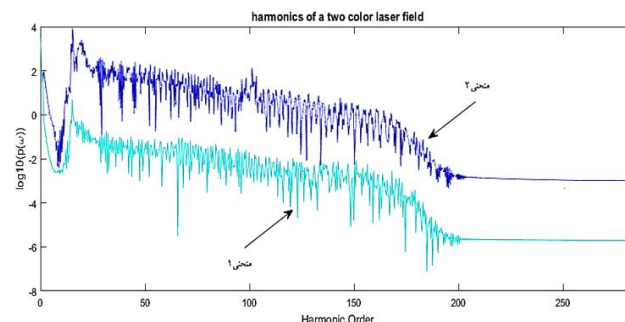
در شکل ۲ پالس تولید شده از برهم نهی حدود ۴۰ هماهنگ در نزدیکی نقطه قطع (هارمونیک ۱۰۰ ام تا ۱۴۰ ام) را نمایش داده ایم، که در آن‌ها جفت‌شدگی فازی رخ داده است، (برای دستیابی به پالس آتو ثانیه منفرد نیاز به برقراری شرط جفت‌شدگی فازی است. به همین دلیل تعدادی از هماهنگ‌ها که در این شرط صدق می کنند جمع می شوند و سایر هماهنگ‌ها که باعث ایجاد نویز و یا کاهش شدت پالس می شوند، با اعمال فیلتر حذف شده و در محاسبات منظور نمی شوند)، در حالت میدان لیزر تک رنگ (شکل ۲- الف) موفق به ایجاد پالس با پهنای ۱۵۸ آتو ثانیه شدیم که در حالت دوم با اعمال میدان کنترلی (میدان لیزر دو رنگ) توانستیم پهنای پالس را تا مرتبه ۶۶ آتو ثانیه کاهش دهیم (شکل ۲- ب)

نتیجه گیری

هدف ما در این مقاله، بررسی اثر حضور میدان استاتیک در تولید هماهنگ‌های مرتبه بالا و تولید تک پالس فوق کوتاه آتو ثانیه بوده است. با بررسی تاثیرات میدان استاتیک به این نتیجه رسیدیم که با اعمال میدان استاتیک تابع موج الکترون فعال قطبیده می‌شود بنابراین دامنه دو قطبی القایی را افزایش می‌دهد، این امر باعث افزایش احتمال بازترکیب الکترون خواهد شد. از این رو نرخ تولید هماهنگ‌های مرتبه بالا در ناحیه تخت طیف هماهنگ‌ها افزایش می‌یابد و این امر برای دامنه میدان استاتیک که حدود ۲٪ دامنه میدان لیزر پایه می‌باشد به خوبی قابل مشاهده است. از طرفی میدان استاتیک کمک شایانی در کاهش پهنای پالس منفرد فوق کوتاه آتو ثانیه می‌کند که منجر به دستیابی پالسی با پهنای ۵۲ آتو ثانیه شده است. به طور کل میدان استاتیک ابزار حساسی برای کنترل تولید هماهنگ‌های مرتبه بالا است که به صورت ویژه بر نرخ انتشار هماهنگ‌ها اثر می‌گذارد که به دنبال آن می‌توان به پالس‌های فوق کوتاه آتو ثانیه دست یافت.

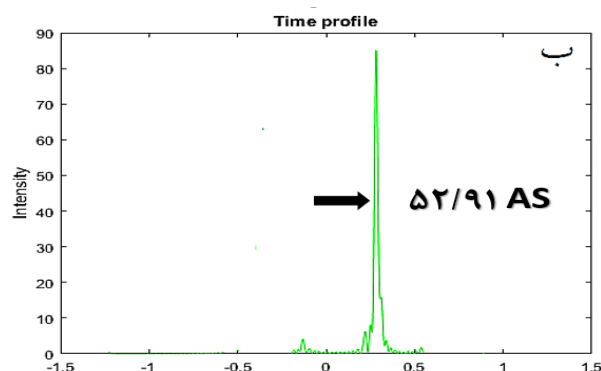
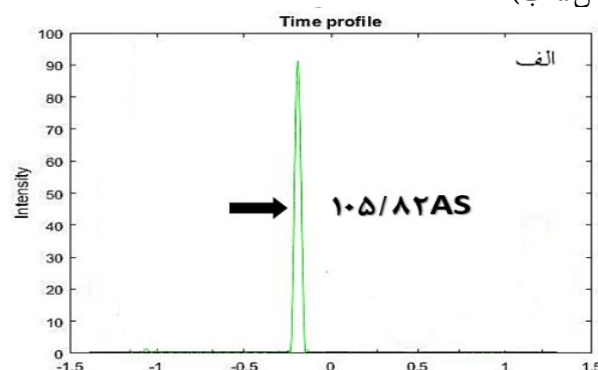
مرجع‌ها

- [1] V. V. Strelkov, M. A. Khokhlova, and N. Yu Shubin A. M. Prokhorov General physics Institute, University, Mosco, Russia Scientific Research Institute for System Studies, RAS, Mosco, Russia (2014)
- [2] Zenghu Chang; "Fundamentals of Attosecond Optics"; 1st edition; Taylor and Francis group (2011), chapter 1.
- [3] J. C. Diels W. Rudolph "Ultrashort Laser Pulse Phenomena" Academic Press is an imprint of Elsevier 30 Corporate Drive, Suite 400 USA (2006)
- [4] Min-Qi Bao and Anthony F. Starace Institute for Theoretical Atomic And Molecular Physics, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street MS-14
- [5] G. Zhao, X. Guo, T. Shao and K. Xue, "Attosecond pulse generation by applying a weak static electric field to a few-cycle pulse" School of Physics, Northeast Normal University, Changchun People's Republic of China (2011)
- [6] 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)



شکل ۴: طیف هماهنگ‌ها حاصل از میدان لیزر دو رنگ در حضور و عدم حضور میدان استاتیک.

در شکل ۵ پالس تولید شده از برهم نهی حدود ۴۰ هماهنگ در نزدیکی نقطه قطع که جفت شدگی فازی در آن‌ها رخ داده است را نمایش می‌دهد، در حالت میدان لیزر تک‌رنگ در حضور میدان استاتیک (شکل ۵-الف) موفق به ایجاد پالس با پهنای زمانی ۱۰۵ آتو ثانیه شدیم که در حالت دوم با اعمال میدان کنترلی (میدان لیزر به صورت دو رنگ) و در حضور میدان استاتیک توانستیم پهنای پالس را تا ۵۲ آتو ثانیه کاهش دهیم (شکل ۵-ب).



شکل ۵: (الف) - تک پالس‌های آتو ثانیه بسیار کوتاه حاصل از میدان لیزر تک‌رنگ در حضور میدان استاتیک (ب) تک پالس‌های آتو ثانیه بسیار کوتاه حاصل از میدان لیزر دو رنگ در حضور میدان استاتیک.