

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.05.017

# 不同啁啾调制对光谱连续区的影响

刘航<sup>1</sup>, 杨大佐<sup>2</sup>, 冯立强<sup>1,3</sup>

(1. 辽宁工业大学 化学与环境工程学院, 锦州 121001;

2. 大连海洋大学 水产与生命学院, 大连 116023; 3. 辽宁工业大学 理学院, 锦州 121001)

**摘要:** 利用啁啾场调控激光波形, 理论研究了不同啁啾场对高次谐波光谱的影响. 结果表明: 当采用对称中间啁啾调制时, 谐波截止能量的延伸及光谱连续区来自于激光中间区域; 当采用不对称负向啁啾调制时, 谐波截止能量的延伸及光谱连续区来自于激光下降区域. 虽然谐波截止能量在不同啁啾调制下都可以得到延伸, 但是不对称负向啁啾场下光谱连续区的强度要比对称中间啁啾场下光谱连续区强度高 2 个数量级. 最后, 通过叠加光谱连续区上的谐波可以获得 2 个脉宽在 38 as 的单个阿秒脉冲. 负向啁啾场下获得脉冲强度要比对称中间啁啾场下获得脉冲强度高 2 个数量级.

**关键词:** 高次谐波; 啁啾激光场; 光谱连续区; 阿秒脉冲

**中图分类号:** O562.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2020)05-0936-05

## Effects of different chirps on spectral continuum

LIU Hang<sup>1</sup>, YANG Da-Zuo<sup>2</sup>, FENG Li-Qiang<sup>1,3</sup>

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

2. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

3. College of Science, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:** The effects of high-order harmonic generation on different chirps have been investigated using the laser waveform control modulated by chirped pulse. The results show that when using the symmetric-mid-chirped pulse, the extension of harmonic cutoff and spectral continuum come from the middle part of the laser field. However, when using the asymmetric-down-chirped pulse, the extension of harmonic cutoff and spectral continuum stem from the falling part of the laser field. Although the harmonic cutoffs from different chirped pulses can be extended, the intensity of spectral continuum from asymmetric-down-chirped pulse is two orders of magnitude higher than that from the symmetric-mid-chirped pulse. With the superposition of harmonics on the spectral continuum, two single attosecond pulses with a pulse width of 38 as can be obtained. Moreover, the intensity of attosecond pulse obtained from the asymmetric-down-chirped pulse is two orders of magnitude higher than that from the symmetric-mid-chirped pulse.

**Keywords:** High-order harmonic generation; Chirped pulse; Spectral continuum; Attosecond pulse

收稿日期: 2019-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(11504151); 辽宁省自然科学基金(2019-MS-167); 辽宁省教育厅基础科研项目(JJL201915405); 横向课题(2017004)

作者简介: 刘航(1985-), 女, 辽宁锦州人, 博士, 副教授, 主要从事激光场研究. E-mail: liuhang20@126.com

通讯作者: 冯立强. E-mail: lqfeng1101@126.com

## 1 引言

阿秒量级的极紫外光或者 X 射线光源具有许多潜在的应用价值. 目前, 有许多种方法可以获得这样的光源, 高次谐波作为其中最成功的方法已经被广泛研究<sup>[1-5]</sup>.

高次谐波首先在 1987 年由 McPherson 等<sup>[3]</sup>利用激光驱动 Ne 原子发现的一种非线性光学现象. 目前, 高次谐波不仅可以发生在激光驱动原子体系中, 还可以发生在激光驱动分子和固体中<sup>[4]</sup>.

当体系采用原子或分子时, 高次谐波的产生可由半经典的三步模型<sup>[5]</sup>来解释. 第一步: 电子在激光场作用下发生隧道电离; 第二步: 被电离的电子在激光驱动下加速并获得能量; 第三步: 当激光反向驱动时, 加速电子与母核发生碰撞并辐射高能光子. 最后, 通过叠加谐波平台区谐波可以获得超短的阿秒脉冲.

基于三步模型, 谐波截止能量发生在  $I_p + 3.17U_p$  处, 这里  $I_p$  是电离能与选取的体系有关;  $U_p$  叫做自由电子有质动力势, 其与激光光强成正比, 还与激光频率的平方成反比, 即  $U_p \sim I/\omega^2$ . 基于此点, 研究人员提出了许多方案来延伸谐波截止能量进而获得阿秒量级的极紫外光或者 X 射线光源. 例如: 利用光强较高的单周期激光场<sup>[6]</sup>; 单色或者双色极化门方案<sup>[7-8]</sup>; 多色线偏振组合场方案<sup>[9]</sup>及非均匀场调控方案<sup>[10-11]</sup>.

由于谐波截止能量与激光频率的平方成反比, 因此利用啁啾调频技术是一种非常有效的延伸谐波截止能量的方法. 例如: Lara-Astiaso 等<sup>[12]</sup>发现利用负向啁啾场驱动  $H_2^+$  分子时, 谐波辐射效率有明显增强. Feng 等<sup>[13]</sup>和 Li 等<sup>[14]</sup>通过引入啁啾调频方案, 成功获得了超宽的连续平台区, 并且通过叠加平台区谐波获得了 40 as 以下的超短脉冲. Wang 等<sup>[15]</sup>和 Li 等<sup>[16]</sup>研究表明通过双色啁啾调制, 谐波平台区可以得到展宽, 并且谐波平台区的强度和某一单阶谐波的强度可以得到增强.

由此可见, 利用啁啾调频激光场延伸谐波截止能量是行之有效的办法. 但是啁啾调频方式有很多种, 讨论它们之间的区别的研究还未见报道. 因此, 本文通过研究不同啁啾调频下谐波发射的特点, 给出了负向啁啾场及对称中间啁啾场下高次谐波及获得阿秒脉冲的区别.

## 2 计算方法

He 原子在激光场下的动力学行为可由薛定

谔方程来描述<sup>[17]</sup>,

$$i \frac{\partial \psi(r, t)}{\partial t} = H(t) \psi(r, t) = \left[ -\frac{1}{2} \nabla^2 + V(r) + zE(t) \right] \psi(r, t) \quad (1)$$

其中,  $V(r) = -1.353/r$  为 He 原子的库仑势能. 组合驱动场可以描述为,

$$E(t) = E \exp[-2 \ln(2)t^2/\tau^2] \cos(\omega_1 t + \delta) \quad (2)$$

这里,  $E$ 、 $\omega_1$  和  $\tau$  分别表示激光场的振幅、频率和脉宽.  $\delta$  为啁啾形式, 在结果部分具体给出其形式.

高次谐波光谱可表示为:

$$S(\omega) \sim \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int a(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 \quad (3)$$

其中,  $\omega$  表示谐波频率,  $a(t) = -\langle \psi(r, t) | [H(t), [H(t), z]] | \psi(r, t) \rangle$  为偶极加速度.

## 3 结果与讨论

图 1 给出在对称中间啁啾调制下, He 原子辐射高次谐波光谱的特点. 激光场为 15 fs-1600 nm,  $I = 3.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ . 啁啾形式为  $\delta = \beta \tanh(t/400)$ , 其中  $\beta$  为啁啾参数. 由图可知, 在无啁啾调制下, 谐波截止能量在经典预言值  $I_p + 3.17U_p$  处. 随着对称啁啾场的加入, 谐波截止能量发生变化. 具体来说, 当  $\beta$  为正数时 (例如  $\beta = 4$ ), 谐波截止能量被压缩; 而当  $\beta$  为负数时 (例如  $\beta = -4$ ), 谐波截止能量可以得到有效延伸. 但是, 谐波光谱高能区的强度却很低.

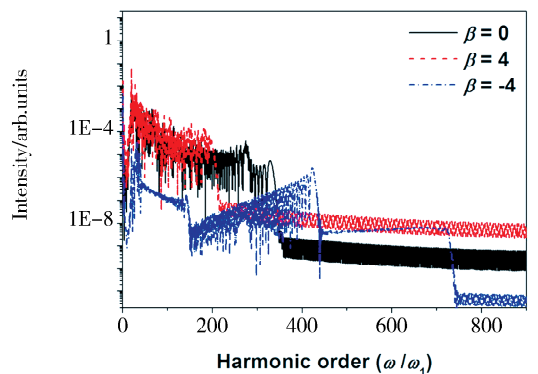


图 1 对称中间啁啾调制下, He 原子辐射高次谐波光谱的特点

Fig. 1 The high-order harmonic generation (HHG) spectra from He atom driven by the symmetric-mid-chirped pulse

图 2 给出了 He 原子在无啁啾调制和啁啾调制下谐波辐射的时频分析图<sup>[18]</sup>. 基于三步模型理论可知, 在无啁啾调制下, 电子电离发生在 IA, IB 和 IC 处附近; 随后, 自由电子在激光场驱动下加

速,并在 RA, RB 和 RC 处附近与原母核发生碰撞,进而辐射处能量峰 PA, PB 和 PC,如图 2(a)和图 2(b)所示. 当引入正向啁啾参数时,激光场中间频率增大;而当引入负向啁啾参数时,激光场中间频率减小,如图 2(a)所示. 根据三步模型理论,谐波截止能量与激光频率的平方成反比. 因此,减小的激光频率导致谐波辐射能量峰的增大,如图 2(c)所示. 这是啁啾参数为负数时谐波截止能量延伸的原因. 同理,增大的激光频率导致谐波辐射能量峰减小,如图 2(d)所示. 这是啁啾参数为正数时谐波截止能量减小的原因. 分析图 2(c)可见,在  $\beta = -4$  的情况下,当谐波能量大于  $500 \omega_1$  时,光谱连续区只由单一的能量峰 PB' 贡献产生,这有利于单个阿秒脉冲的产生. 并且,谐波截止能量的延伸及光谱连续区来自于激光中间区域. 但是, IB' 点的激光强度要小于 IB 点的激光强度,因此, IB' 点附近的电离几率要小于 IB 点附近的电离几率. 这是光谱连续区强度减低的原因.

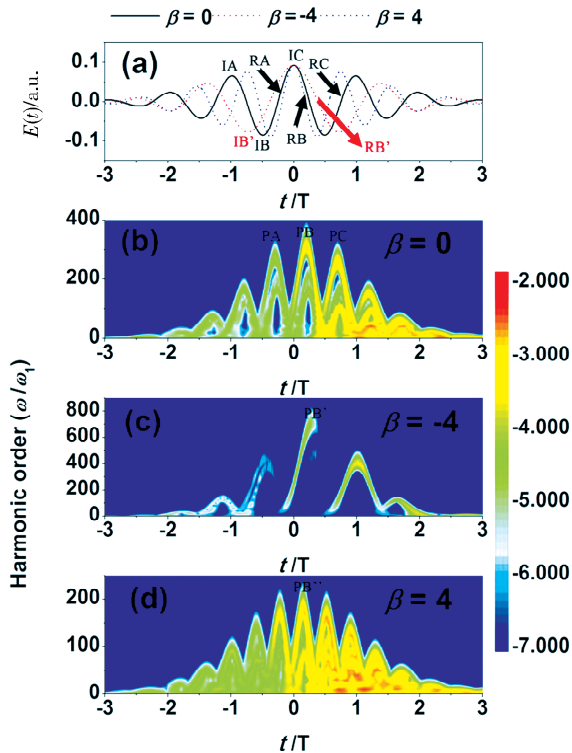


图 2 (a) 激光波形图; 谐波辐射时频分析图: (b)  $\beta=0$ ; (c)  $\beta=-4$ ; (d)  $\beta=4$   
Fig. 2 (a) The laser profiles; the time-frequency analyses of harmonics for the cases of (b)  $\beta=0$ ; (c)  $\beta=-4$  and (d)  $\beta=4$

图 3 给出在不对称啁啾调制下, He 原子辐射高次谐波光谱的特点. 激光场为依然  $15 \text{ fs}-1600 \text{ nm}$ ,  $I = 3.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ . 啁啾形式为  $\delta = c\omega_1 t^2$ ,

其中  $c$  为啁啾参数. 这里  $c > 0$  或者  $c < 0$  分别代表正向和负向啁啾场. 由图可知, 在正向啁啾调制下 ( $c=0.002$ ), 谐波截止能量无明显变化. 但是在负向啁啾调制下 ( $c = -0.002$ ), 谐波截止能量得到有效延伸. 并且, 谐波连续区强度比对称啁啾场 ( $\beta = -4$ ) 下获得的光谱连续区强度高 2 个数量级.

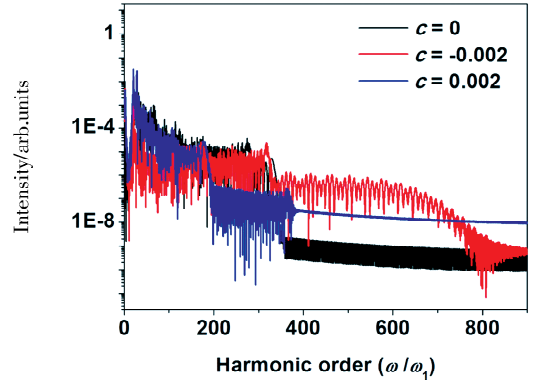


图 3 不对称负向啁啾调制下, He 原子辐射高次谐波光谱的特点  
Fig. 3 The HHG spectra from He atom driven by the asymmetric-down-chirped pulse

图 4 给出了 He 原子在不对称啁啾调制下的激光波形图和谐波辐射的时频分析图. 由图 4 可知, 在引入正向和负向啁啾调制时, 激光上升区域和下降区域的频率分别被减小了, 如图 4(a) 和图 4(c) 所示. 因此, 基于三步模型可知, 激光上升区域的谐波辐射能量峰在正向啁啾调制下可以被延伸, 如图 4(b) 中能量峰 PA 所示. 但是, 由于 IA 点激光振幅很弱, 因此其电离几率不强, 这导致 PA 的强度与其它能量峰相比很弱. 因此, 其在谐波光谱中的贡献非常小可以近似忽略, 这是导致谐波截止能量无明显变化的原因. 在负向啁啾调制下, 激光下降区域的谐波辐射能量峰得到延伸, 如图 4(d) 中 PC 所示. 并且, 由于 IC 点激光振幅强度非常强, 因此电子在此处电离几率很大. 这导致随后的能量峰 PC 强度较强. 这是负向啁啾调制下光谱连续区强度要比对称啁啾调制下的光谱连续区强度大的原因. 分析图 4(d) 可见, 在  $c = -0.002$  的情况下, 当谐波能量大于  $500 \omega_1$  时, 光谱连续区只由单一的能量峰 PC 贡献产生. 并且, 谐波截止能量的延伸及光谱连续区来自于激光下降区域.

由上述分析可知, 当分别采用对称和不对称啁啾激光场时, 谐波截止能量的延伸分别来自于激光中间区域和激光下降区域. 并且, 光谱连续区都由单一能量峰贡献产生, 这有利于单个阿秒脉冲的产

生. 因此,通过叠加傅里叶变换后的光谱连续区的谐波可以产生超短的阿秒脉冲. 具体来说,当叠加谐波光谱的 500 阶到 700 阶谐波后可获得脉宽在 38 as 的单个阿秒脉冲,如图 5(a)和图 5(b)所示. 但是,由于对称啁啾场下( $\beta=-4$ )光谱连续区强度要比不对称负向啁啾场下( $c=-0.002$ )光谱连续区强度低,因此,对称啁啾场下获得的阿秒脉冲强度也要比不对称负向啁啾场下获得的脉冲强度低 2 个数量级.

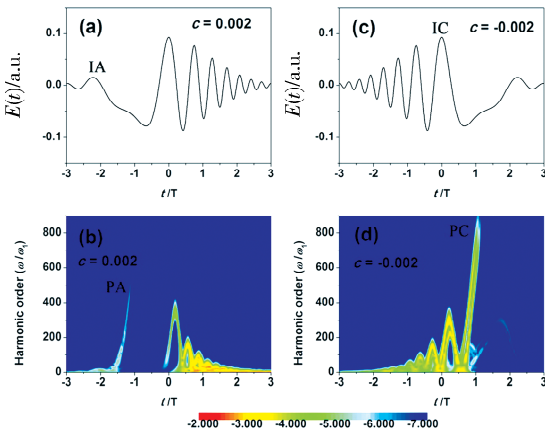


图 4 不对称啁啾场激光波形和谐波辐射时频分析图:(a)~(b)  $c=0.002$ ; (c)~(d)  $c=-0.002$

Fig. 4 The laser profiles and the time-frequency analyses of harmonics for the cases of asymmetric chirped pulse: (a)~(b)  $c=0.002$  and (c)~(d)  $c=-0.002$

## 4 结论

本文通过研究不同啁啾调频下谐波发射的特点,给出了负向啁啾场及对称中间啁啾场下辐射高次谐波及获得阿秒脉冲的区别. 具体来说,在采用对称中间啁啾和不对称负向啁啾激光场时,谐波截止能量的延伸分别来自于激光中间区域和激光下降区域. 并且,光谱连续区都由单一能量峰贡献产生. 随后,通过叠加连续区谐波可获得脉宽在 38 as 的单个脉冲.

## 参考文献:

- [1] Krausz F, Ivanov M. Attosecond physics [J]. Rev Mod Phys, 2009, 81: 163.
- [2] 冯立强.  $H_2^+$  分子双 H 核对高次谐波辐射的贡献 [J]. 原子与分子物理学报, 2018, 41: 467.
- [3] Mcpherson A, Gibson G, Jara H, *et al.* Studies of multiphoton production of vacuum-ultraviolet radiation in the rare gases [J]. J Opt Soc Am B, 1987, 4: 595.
- [4] Yu C, Jiang S C, Lu R F. High order harmonic generation in solids; a review on recent numerical methods [J]. Adv Phys X, 2018, 4: 1562982.
- [5] Corkum P B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization [J]. Phys Rev Lett, 1993, 71: 1994.
- [6] Goulielmakis E, Schultze M, Hofstetter M, *et al.* Single-cycle nonlinear optics [J]. Science, 2008, 320: 1614.
- [7] 冯立强, 李义, 刘辉. 改进型多周期极化门产生高强度的阿秒脉冲 [J]. 激光技术, 2018, 42: 451.
- [8] 刘航, 刘辉, 孟凡顺, 等. 双色线偏振激光场驱动  $H_2^+$  分子产生椭圆偏振阿秒脉冲 [J]. 原子与分子物理学报, 2017, 34: 899.
- [9] 冯立强, 刘航. 利用蝴蝶型纳米结构下的极化门方案输出单个阿秒脉冲 [J]. 原子与分子物理学报, 2019, 36: 82.
- [10] Feng L Q, Li Y, Feng A Y. Nano-plasmonic-pump-probe effect on the intensity enhancement of attosecond pulse from hydrogen molecular ion [J]. Laser Phys Lett, 2018, 15: 115301.
- [11] Feng L Q. Molecular harmonic extension and enhancement from  $H_2^+$  ions in the presence of spatially inhomogeneous fields [J]. Phys Rev A, 2015, 92: 053832.
- [12] Lara-Astiaso M, Silva R E F, Gubaydullin A, *et al.* Enhancing high-order harmonic generation in

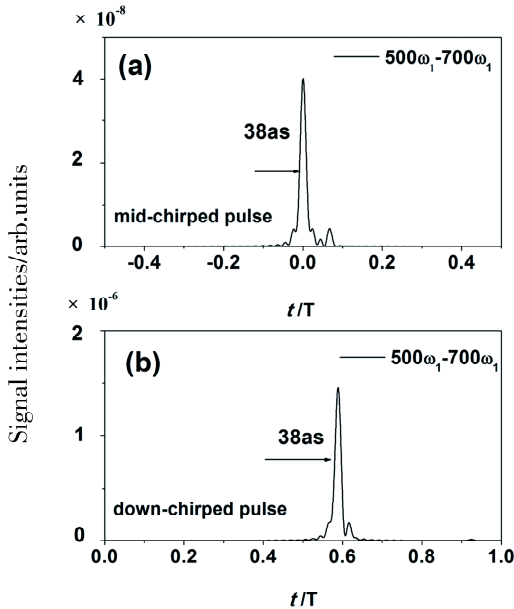


图 5 阿秒脉冲包络曲线:(a)对称中间啁啾场;(b)不对称负向啁啾场

Fig. 5 The time profiles of attosecond pulses from (a) symmetric mid-chirped pulse and (b) asymmetric down-chirped pulse

- light molecules by using chirped pulses [J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 093003.
- [13] Feng L Q, Chu T S. Generation of an isolated sub-40-as pulse using two-color laser pulses: combined chirp effects [J]. *Phys Rev A*, 2011, 84: 053853.
- [14] Li Y, Feng L Q, Qiao Y. Selective enhancement of single-order and two-order harmonics from He atom via two-color and three-color laser fields [J]. *Chem Phys*, 2019, 527: 110497.
- [15] Wang X, Jing C, Lin C D. Coherent control of high-harmonic generation using waveform-synthesized chirped laser fields [J]. *Phys Rev A*, 2014, 90: 023416.
- [16] Li Y, Feng L Q, Qiao Y. Improvement of high-order harmonic generation via controlling multiple acceleration-recombination process [J]. *Z Naturforsch A*, 2019, 74: 561.
- [17] 刘航, 冯立强. 交叉型纳米结构下气体位置对阿秒脉冲的影响 [J]. *原子与分子物理学报*, 2019, 36: 459.
- [18] Antoine P, Piraux B, Maquet A. Time profile of harmonics generated by a single atom in a strong electromagnetic field [J]. *Phys Rev A*, 1995, 51: R1750.

**引用本文格式:**

中文: 刘航, 杨大佐, 冯立强. 不同啁啾调制对光谱连续区的影响 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2020, 57: 936.

英文: Liu H, Yang D Z, Feng L Q. Effects of different chirps on spectral continuum [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2020, 57: 936.