

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.02.017

激光波形调控实现单阶谐波的增强

刘辉¹, 冯立强^{1,2}

(1. 辽宁工业大学 理学院, 锦州 121001;

2. 中国科学院大连化学物理研究所 分子反应动力学国家重点实验室, 大连 116023)

摘要: 通过对双色场激光波形的调控, 理论上获得了单阶谐波的选择增强. 理论分析表明, 单阶谐波的选择增强来源于‘W’波形下谐波辐射的折叠区域. 而且, 第二束调控场的脉宽对‘W’波形下所形成的谐波辐射折叠区域有较大影响. 该研究为获得单阶谐波脉冲提供了一种新的方案, 对激光光源的发展有帮助.

关键词: 高次谐波; 激光波形优化; 单阶谐波增强

中图分类号: O562.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2020)02-0311-04

Enhancement of a single-order harmonic via laser waveform control

LIU Hui¹, FENG Li-Qiang^{1,2}

(1. College of Science, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

2. State Key Laboratory of Molecular Reaction Dynamics, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

Abstract: Through controlling the laser waveform of the two-color field, the selective enhancement of single-order harmonic is obtained theoretically. The theoretical analyses show that the selective enhancement of single-order harmonic is attributed to the folded region of the harmonic emission process in a specific ‘W’ waveform. Moreover, the folded region in the ‘W’ waveform structure is very sensitive to the pulse duration of the second controlling pulse. The present investigation provides a new method to obtain the single-order harmonic, which is helpful to the development of the laser source.

Keywords: High-order harmonic generation; Optimization of laser waveform; Single-order harmonic enhancement

1 引言

高次谐波作为强场物理以及非线性光学领域的重要现象被广泛研究近三十年^[1-3]. 其主要用途体现在探测原子、分子或固体结构中电子的运动, 以及产生能量范围在 XUV 或者 X-射线范围内的超快光源. 其中, 利用高次谐波获得阿秒量级的孤立脉冲更是得到了广泛关注^[4-6].

目前, 激光驱动原子或分子辐射高次谐波的过程可由半经典的三步模型^[7]来解释. 具体来说: 首先, 电子在激光驱动下由隧道电离进入连续态; 其次, 自由电子在后续激光驱动下加速并获得能量; 随后, 在激光反向驱动下, 电子有几率与原母核发生碰撞, 进而辐射出光子能量为基频场倍数的高阶谐波. 基于三步模型, 人们提出了许多方案来获得阿秒量级的孤立脉冲, 例如: 多色组合场方案^[8-9];

收稿日期: 2019-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(11504151)

作者简介: 刘辉 (1986-), 男, 辽宁锦州人, 硕士, 讲师, 主要从事激光技术研究.

通讯作者: 冯立强. E-mail: lqfeng1101@126.com

极化门方案^[10];啁啾调制方案^[11];抽运-探测激光下的共振增强电离机制^[12];以及非均匀场调控方案^[13]等.

除了利用高次谐波获得孤立的阿秒脉冲,还可以在光谱连续区获得光子能量固定的单阶谐波.这一应用对于获得自由电子激光器的种子光源是非常有帮助的.鉴于这一原因,研究人员利用多色场激光波形调制来实现谐波相位匹配,进而获得单阶谐波的选择增强^[14-16].但是,在激光波形的调控中,多数研究都是采用多色场或者啁啾场来实现的.实验上调控多色场或者啁啾场是非常复杂的.因此,本文理论提出一种双色场激光调控方案,并且获得了一种特殊的‘W’波形结构.在该‘W’波形结构下,谐波辐射会呈现折叠区域.当折叠区域仅为单阶谐波时,该阶谐波会比其它谐波强度有明显增强,进而实现单阶谐波的选择增强.

2 计算方法

激光场驱动 He 原子的动力学行为可由求解三维含时薛定谔方程来描述^[2],

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

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,

$$E(z, t) = \sum_i E_i f_i(t) \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (2)$$

$$f_i(t) = \exp[-2 \ln(2) t^2 / \tau_i^2] \quad (3)$$

其中, $E_i, \omega_i, \tau_i, \varphi_i (i = 1, 2)$ 分别表示双色组合场中各分量场的振幅、频率、脉宽和相位.

高次谐波光谱可表示为:

$$S(\omega) \sim \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int a(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 \quad (4)$$

其中, ω 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 给出振动 He 在单色和双色激光驱动下辐射谐波的谱图.其中,单色场为 10 fs-1600 nm, $I_1 = 1.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, $\varphi_1 = 0$. 双色场为上述 10 fs-1600 nm 场与 10 fs-800 nm, $I_2 = 1.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 激光场的组合场.双色场中激光相位为 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ 以及 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1.5\pi$. 由图可知,单色场驱动下 He 原子辐射谐波强度较低.在双色场情况下,谐波辐射强度有明显增强.并且当 $\varphi_1 = \varphi_2 =$

0 时,谐波连续区的 56 阶谐波到 62 阶谐波与其两端谐波比较有少许增强.当 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1.5\pi$ 时,谐波连续区的 61 阶谐波比其它谐波强度增强 10 倍.进而实现了单阶谐波的选择增强.这里需要强调,本文对不同组合下的激光相位都做了研究,但是只有在 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1.5\pi$ 情况下,谐波光谱才呈现单阶谐波的选择增强.

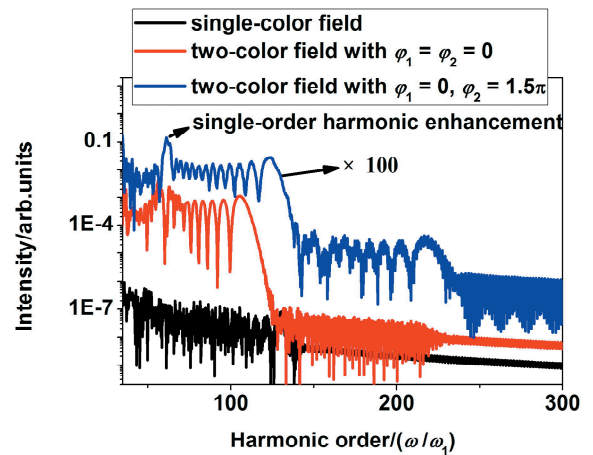


图 1 单色和双色场下的谐波光谱图

Fig. 1 Harmonic spectra from single-color and two-color laser pulses

为了解释谐波辐射强度的变化,图 2 中给出了上述激光包络图以及谐波辐射的时频分析图^[17].基于三步模型分析可知,在单色场情况下[见图 2(a)和 2(b)],电子首先在 A 点附近发生电离;随后,电子在激光驱动下进行加速;最后在激光反向时,后电离的电子首先在 B 点与母核发生回碰,进而呈现出谐波辐射能量峰 P 的短量子路径(左路径);先电离的电子在 C 点与母核发生回碰,进而形成谐波辐射能量峰 P 的长量子路径(右路径).在双色场 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ 情况下[见图 2(a)和 2(c)],电子在 A' 点电离后,分别在 B' 和 C' 点与母核发生回碰,进而辐射出能量 P 的短、长量子路径.但是在 $t = 0.25 \sim 0.75 T$ 之间(T 为 1600 nm 光学周期),激光波形呈现出一个反向的波包,进而形成一个‘W’结构的波形.电子在这一特殊结构下会首先减速然后在加速,这导致谐波辐射能量峰 P 的短量子路径中呈现了一个折叠区域[图 2(c)中黑色圆圈所示].这一折叠区域的范围在 56 阶谐波到 62 阶谐波,因此这一波段的谐波强度要大于其它波段的谐波强度,这是谐波光谱中这一波段谐波增强的原因.在双色场 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1.5\pi$ 情况下[见图 2(a)和 2(d)],‘W’激光波形依然可以观测

到,但是 $t = 0.9 T$ 附近的激光振幅明显减弱,这导致谐波辐射能量峰 P 的折叠区域有所减小. 具体来说,在该波形下,折叠区域仅为 61 阶谐波附近 [图 2(d)中黑色圆圈所示]. 这是导致谐波光谱中单独的 61 阶谐波被选择增强的原因.

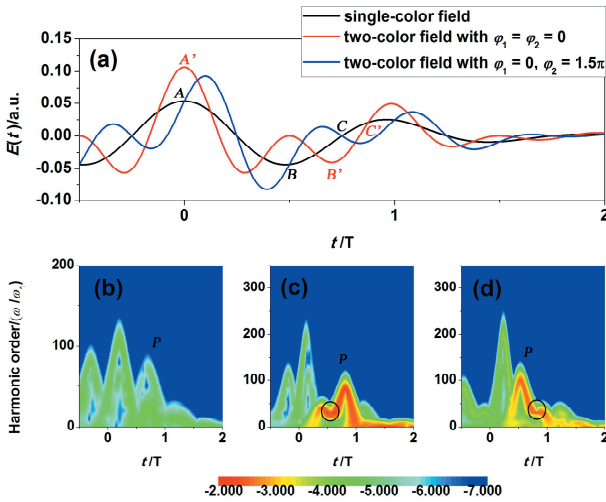


图 2 (a) 激光包络图;以及谐波辐射时频分析图 (b) 单色场; (c) 双色场 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$; (d) 双色场 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1.5\pi$.

Fig. 2 (a) The laser profiles and the time-frequency analyses of the harmonics driven by (b) single-color field; (c) two-color field with $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$; (d) two-color field with $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1.5\pi$.

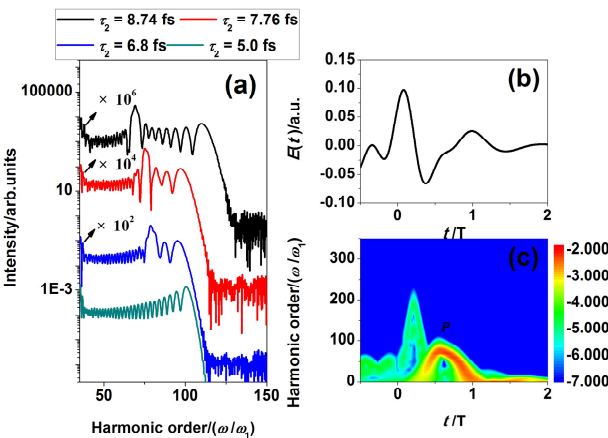


图 3 (a) 不同 τ_2 下谐波光谱; (b) $\tau_2 = 5.0$ fs 时双色场激光波形; (c) $\tau_2 = 5.0$ fs 时谐波辐射时频分析图

Fig. 3 (a) Harmonic spectra from different τ_2 ; (b) the laser profile of two-color field when $\tau_2 = 5.0$ fs; (c) the time-frequency analyses of the harmonics when $\tau_2 = 5.0$ fs

图 3(a)给出了不同 τ_2 下双色场驱动 He 原子辐射高次谐波的特点. 具体来说,当(1) $\tau_2 = 8.74$ fs, $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1.6\pi$; (2) $\tau_2 = 7.76$ fs, $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1.7\pi$; (3) $\tau_2 = 6.8$ fs, $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1.7\pi$ 时谐波光

谱中的 69 阶, 75 阶以及 77 阶谐波可以被单独选择增强. 但是当(4) $\tau_2 = 5.0$ fs, $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 1.7\pi$ 时,谐波光谱不会呈现单阶谐波的选择增强. 对于前三种情况其谐波辐射过程基本与图 2(a)和 2(d)分析一致(这里没给出具体数据),因此其谐波光谱会呈现单阶谐波增强的现象. 图 3(b)和 3(c)给出了 $\tau_2 = 5.0$ fs 时双色场激光波形以及谐波辐射时频分析图. 由图可知,在短脉宽控制场下 W 波形消失了,因此在谐波辐射能量峰 P 中并未观测到折叠区域. 这是导致谐波光谱中并未观测到单阶谐波增强的原因.

4 结 论

综上所述,本文理论提出一种双色场激光调控方案,并且获得了一种特殊的‘W’波形结构. 在该‘W’波形结构下,谐波辐射会呈现折叠区域. 当折叠区域仅为单阶谐波时,该阶谐波会比其它谐波强度有明显增强,进而实现单阶谐波的选择增强. 而且,第二束调控场的脉宽以及波长对‘W’波形下所形成的谐波辐射折叠区域有较大影响.

参考文献:

- [1] Krausz F, Ivanov M. Attosecond physics [J]. Rev Mod Phys, 2009, 81: 163.
- [2] Lu R F, Zhang P Y, Han K L. Attosecond-resolution quantum dynamics calculations for atoms and molecules in strong laser fields [J]. Phys Rev E, 2008, 77: 066701.
- [3] 刘航, 李义, 姚震, 等. 利用啁啾场与单极场的组合场驱动 He⁺ 发射高次谐波 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 118.
- [4] 刘航, 冯立强. 利用 He⁺ 离子链模型增强谐波辐射强度 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 349.
- [5] 冯立强. H₂⁺ 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, 35: 267.
- [6] 冯立强. 双色场驱动不对称分子产生超短 X 射线光源 [J]. 原子与分子物理学报, 2015, 32: 269.
- [7] Corkum P B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization [J]. Phys Rev Lett, 1993, 71: 1994.
- [8] Lu R F, He H X, Guo Y H, et al. Theoretical study of single attosecond pulse generation with a three-colour laser field [J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2009, 42: 225601.
- [9] Feng L Q, Chu T S. Intensity improvement in the

- attosecond pulse generation with the coherent superposition initial state [J]. *Phys Rev A*, 2012, 376: 1523.
- [10] Chang Z. Chirp of the single attosecond pulse generated by a polarization gating [J]. *Phys Rev A*, 2005, 71: 023813.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Wei P F, Miao J, Zeng Z N, *et al.* Selective enhancement of a single harmonic emission in a driving laser field with subcycle waveform control [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 233903.
- [15] Wei P F, Zeng Z N, Jiang J M, *et al.* Selective generation of an intense single harmonic from a long gas cell with loosely focusing optics based on a three-color laser field [J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 151101.
- [16] 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.
- [17] 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: 刘辉, 冯立强. 激光波形调控实现单阶谐波的增强[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2020, 57: 311.

英文: Liu H, Feng L Q. Enhancement of a single-order harmonic via laser waveform control [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2020, 57: 311.