

文章编号: 1001-3806(2020)03-0283-05

利用啁啾组合场获得单一谐波辐射能量峰

刘辉, 李义, 冯立强

(辽宁工业大学 理学院, 锦州 121001)

摘要: 为了获得由单一谐波能量峰贡献产生的谐波平台区, 采用负向啁啾场与紫外场组合调控谐波光谱的方法, 进行了理论分析和数值模拟。结果表明, 在负向啁啾场调控下, 谐波截止能量可以达到选取的参考值, 谐波平台区由单一谐波能量峰贡献产生; 适当引入一束紫外光源, 在紫外共振电离的影响下, 谐波平台区强度可以得到增强, 并且达到参考值范围; 选取平台区谐波进行叠加可以获得一个 36as 的超短脉冲。该研究提出了一种利用低强度组合激光场获得阿秒脉冲的新方案, 对激光光源的发展有帮助。

关键词: 激光光学; 高次谐波; 单一谐波能量峰; 啁啾激光; 阿秒脉冲

中图分类号: O562.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2020.03.003

Generation of single harmonic emission peak by using chirped combined field

LIU Hui, LI Yi, FENG Liqiang

(College of Science, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: In order to obtain the harmonic plateau, contributed by single harmonic emission peak, an effective method to control the harmonic spectrum by using the negative chirped pulse combined with an ultraviolet pulse has been proposed. It is shown that with the control of the negative chirped pulse, not only the harmonic cutoff can achieve the referenced value, but also the harmonic plateau is coming from the single harmonic emission peak. Further, with the proper introduction of an ultraviolet pulse, the intensity of harmonic plateau can be enhanced and reach the referenced value due to the ultraviolet-resonance-ionization. Finally, an ultra-short 36as pulse can be obtained by superposing the harmonics on the plateau. The present investigation provides a new method to obtain the attosecond pulse by using the low-intensity combined field, which is helpful to the development of the laser source.

Key words: laser optics; high-order harmonic generation; single harmonic emission peak; chirped pulse; attosecond pulse

引言

相干紫外、极紫外光的产生具有许多潜在的应用价值。目前, 有许多种方法可以获得紫外、极紫外光。近 30 年来, 高次谐波作为其中最为成功的方法一直被广泛研究^[1-2]。

1987 年, MCPHERSON 等^[3] 利用激光驱动 Ne 原子首次发现了高次谐波现象。随后, 研究人员发现高次谐波不仅可以发生在激光驱动原子和分子, 当激光驱动固体时也可以发射高次谐波^[4]。但是, 阿秒脉冲

的获得还主要集中在利用原子高次谐波光谱。目前, 原子辐射高次谐波的过程可由 CORKUM^[5] 提出的半经典三步模型来解释: 第 1 步, 电子在激光场作用下发生隧道电离; 第 2 步, 被电离的电子在激光驱动下加速并获得能量; 第 3 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, 利用高次谐波光谱获得超短阿秒脉冲需要满足 3 个条件: (1) 要有足够宽的谐波平台区; (2) 谐波平台区强度要足够强; (3) 谐波平台区最好由单一谐波辐射能量峰贡献产生。经过近 30 年的研究, 人们提出了许多方案来满足上述 3 个条件并获得阿秒量级的脉冲。例如: 利用光强较高的单周期激光场^[6]; 单色或者双色极化门方案^[7-8]; 多色线偏振组合场方案^[9-10] 及非均匀场调控方案^[11-12]。

基于三步模型理论, 谐波截止能量与激光频率的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11504151); 辽宁省自然科学基金资助项目(2019-MS-167)

作者简介: 刘辉(1986-), 男, 硕士, 讲师, 现主要从事强激光与物质的相互作用等方面的研究。

E-mail: phys_ingy@126.com

收稿日期: 2019-06-25; 收到修改稿日期: 2019-08-19

平方成反比。因此,利用啁啾调频技术调控谐波光谱受到了广泛关注。例如:FENG 等人^[13]和 LIU 等人^[14]通过引入对称调频和负向调频方案,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 40as 以下的超短脉冲。LARA-ASTIASI 等人^[15]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。WANG 等人^[16]和 LI 等人^[17]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,利用啁啾场调控谐波辐射过程是一种有效获得超长谐波平台区的方法。但是,之前研究都集中在如何利用啁啾场去寻找最佳的谐波延伸效果。作者主要研究利用最低强度的啁啾组合场去实现某一高强度参考场下所产生的谐波截止能量和谐波辐射强度。并且,在啁啾组合场驱动下,谐波平台区要由单一的谐波辐射峰来贡献产生。这么做的优点在于可以降低实验上获得阿秒脉冲的要求。

1 计算方法

外场下 He 原子的薛定谔可描述为^[18]:

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

式中, x 为电子坐标, t 表示时间, $\psi(x,t)$ 为体系波函数, $V(x) = -1/\sqrt{0.484+x^2}$ 表示 He 原子库仑势能, $E(t)$ 表示激光场,可描述为:

$$E(t) = E_1 \exp[-4(\ln 2)t^2/\tau_1^2] \cos(\omega_1 t + \beta \omega_1 t^2) + E_2 \exp[-4(\ln 2)(t-t_d)^2/\tau_2^2] \times \cos[\omega_2(t-t_d)] \quad (2)$$

式中, E_i, ω_i 和 $\tau_i (i=1,2)$ 为 2 束激光场振幅、频率和脉宽, β 为啁啾参量, t_d 为 2 束激光场延迟时间。

高次谐波 $S(\omega)$ 表示为:

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

式中, $a(t) = \langle \psi(x,t) | -\frac{\partial V(x)}{\partial x} + E(t) | \psi(x,t) \rangle$ 为偶极加速度, ω 为谐波阶数。

2 结果与分析

首先,选择一个激光场作为参考激光场,并且用其产生的谐波截止能量和谐波辐射强度为参考值。这

里,激光场为 10fs, 800nm 无啁啾激光场。激光强度由 $1.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 变化到 $1.0 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 。图 1a 中给出了谐波截止能量和谐波辐射强度随上述激光场激光强度的变化。由图可知,谐波截止能量随激光强度升高而延伸;但是,谐波辐射强度随激光强度增强而呈现先增大在减小的趋势,并且,在激光强度 $I_1 = 7.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 时具有最高的谐波辐射强度。因此,本文中的参考激光场为 10fs, 800nm, 激光强度为 $7.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 参考谐波截止能量和谐波辐射强度分别为 $100\omega_1$ 和 0.007。图 1b 和图 1c 中给出了光强在 $7.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 时的谐波辐射光谱和谐波辐射时频分析图^[19]。由图可知,谐波光谱由多个谐波辐射峰共同作用产生(见图 1c),但是由于谐波辐射峰辐射时间不同导致谐波相位不匹配。这是谐波辐射强度下降的原因。同时,由于多个谐波辐射峰的共同作用,谐波连续平台区的干涉非常明显,这不利于单个阿秒脉冲的

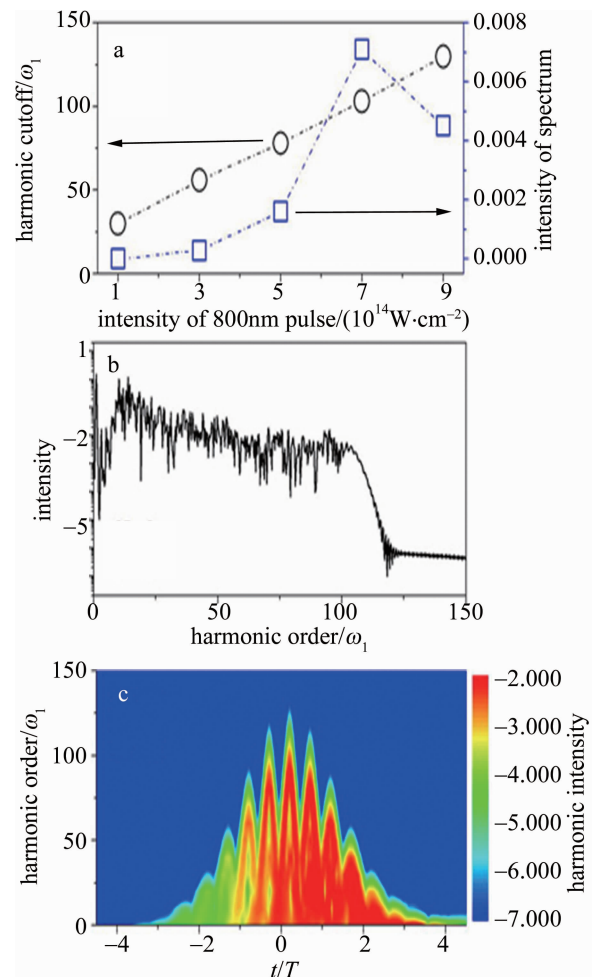


Fig. 1 a—the harmonic cutoff and harmonic yield as a function of 800nm laser intensity b—the harmonic spectrum from $I_1 = 7.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ c—the time-frequency analyses of the harmonics for the case of $I_1 = 7.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$

产生。图中坐标上未专门标注单位的均为任意单位。

图 2a 中给出了啁啾激光和负向啁啾激光驱动下谐波辐射光谱。啁啾激光强度 $I_1 = 1.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 激光参量 $\beta = -0.004$, 负向啁啾激光强度 $I_1 = 7.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。由图可知, 虽然激光强度降低了, 但是在引入适当地负向啁啾参量时, 谐波截止能量依然能达到参考值附近。在较低的激光强度下, 谐波辐射强度比参考值小很多。图 2b ~ 图 2d 中给出了低光强下无啁啾和啁啾激光波形及在该波形下谐波辐射时频分析图。从图中可知, 负向啁啾可以使激光下降区域的瞬

时频率减小, 如图 2b 所示。根据三步模型可知, 谐波截止能量与激光频率的平方成反比。因此, 越小的激光频率可以产生越高的辐射能量, 这是在低光强下谐波截止能量延伸的原因。具体来说, 谐波截止能量的延伸来自于谐波辐射峰 P , 如图 2c 和图 2d 所示。并且, 分析图 2d 可知, 谐波平台区只由单一的辐射能量峰 P 贡献产生, 这比较有利于单个阿秒脉冲的产生。图 2b 中, $E(t)$ 的单位为原子单位 (atomic unit, a. u.)。

由图 2 分析可知, 在负向啁啾调控下可以获得由单一能量峰贡献产生的平台区, 但是其强度很低。因此, 在图 3 中采用紫外共振电离的方案来增强谐波辐射强度。本文中选取的紫外光为 1.45fs, 123nm, 紫外光与啁啾场的延迟时间为 $t_a = -0.2T$ (T 表示 800nm 激光场的光学周期)。具体来说, 图 3a 中给出了谐波辐射强度随紫外光强的变化。由图可知, 随着紫外光强的增大, 谐波辐射强度被增强。当紫外光强为 $I_2 = 1.8 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 时, 谐波辐射强度达到之前设定的参考值。图 3b 中给出了组合场驱动下谐波辐射光谱。由图可知, 在紫外光加入后, 不仅谐波辐射强度得到增大, 而且谐波截止能量也有少许延伸。根据三步模型理论, 在只考虑谐波辐射的微观效应时, 谐波辐射强度与电离几率成正比。因此, 图 3c 和图 3d 中给出了啁啾场, 组合场和紫外场的激光波形图及 He 原子在啁啾场和组合场下的电离几率。图 3d 中啁啾激光与负向啁啾激光的激光强度与激光参量的数值和图 2a 中的参量数值相同。从图中分析可知, 在紫外场加入之后 He 原子电离几率得到明显增强, 这显然是谐波辐射强度增大的原因。实际上, 选取 123nm 紫外光的原因在于其光子能量近似满足 He 原子基态到第一激发态之间的双光子共振跃迁。这样当紫外光引入时, 由于紫外共振增强电离的影响, He 原子的电离几率会被增大, 进而导致谐波辐射强度的增大。图 3e 中给出了在组合场驱动下谐波辐射时频分析图。由图可知, 当 $t = 0$ 点附近的电离几率增大后, 谐波辐射能量峰 P 的强度有明显增强, 这是谐波平台区强度增大的原因。同时, 当谐波能量大于 $30\omega_1$ 时, 谐波光谱只由单一的能量峰 P 贡献, 这非常有利于单个阿秒脉冲的产生。需要指出的是, 本方案组合场的总光强为 $2.8 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 远小于原参考场场强 $7.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。这减小了实验上获得驱动场的难度。

图 4a 中给出了啁啾场脉宽对谐波光谱的影响。图中负向啁啾激光强度仍为 $I_1 = 7.0 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。由图可知, 当采用 20fs, 800nm 啁啾场时, 啁啾场光强只

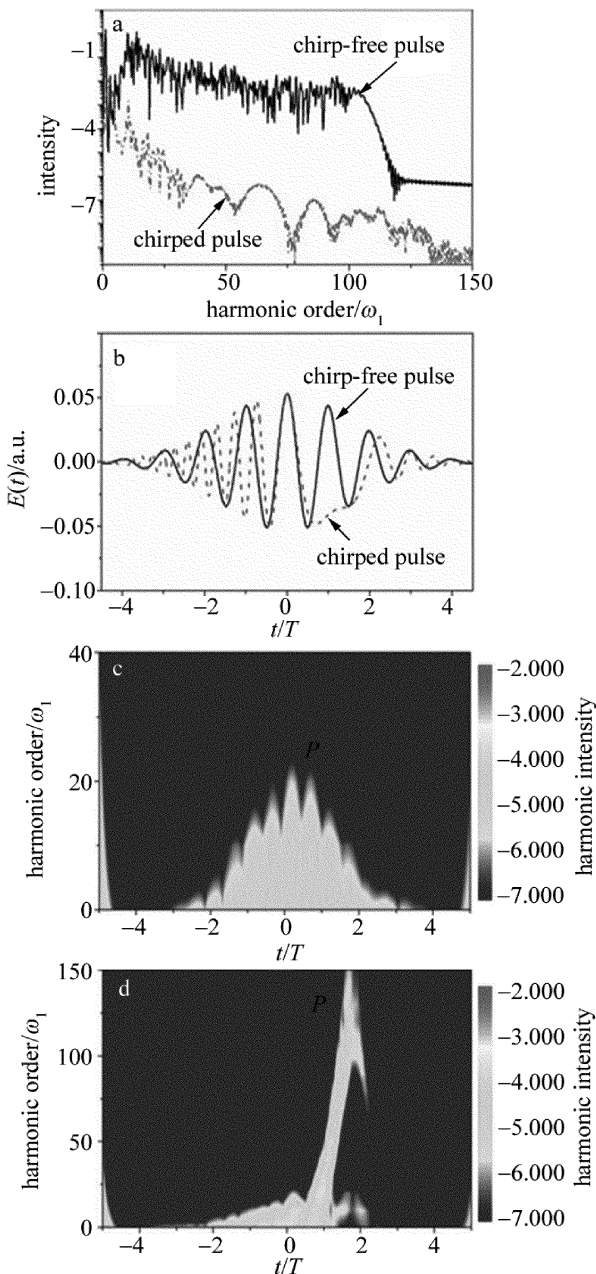


Fig. 2 a—the harmonic spectra b—the laser profiles c—the time-frequency analyses of the harmonics for the cases of $\beta = 0$ d—the time-frequency analysis of the harmonics for the cases of $\beta = -0.004$

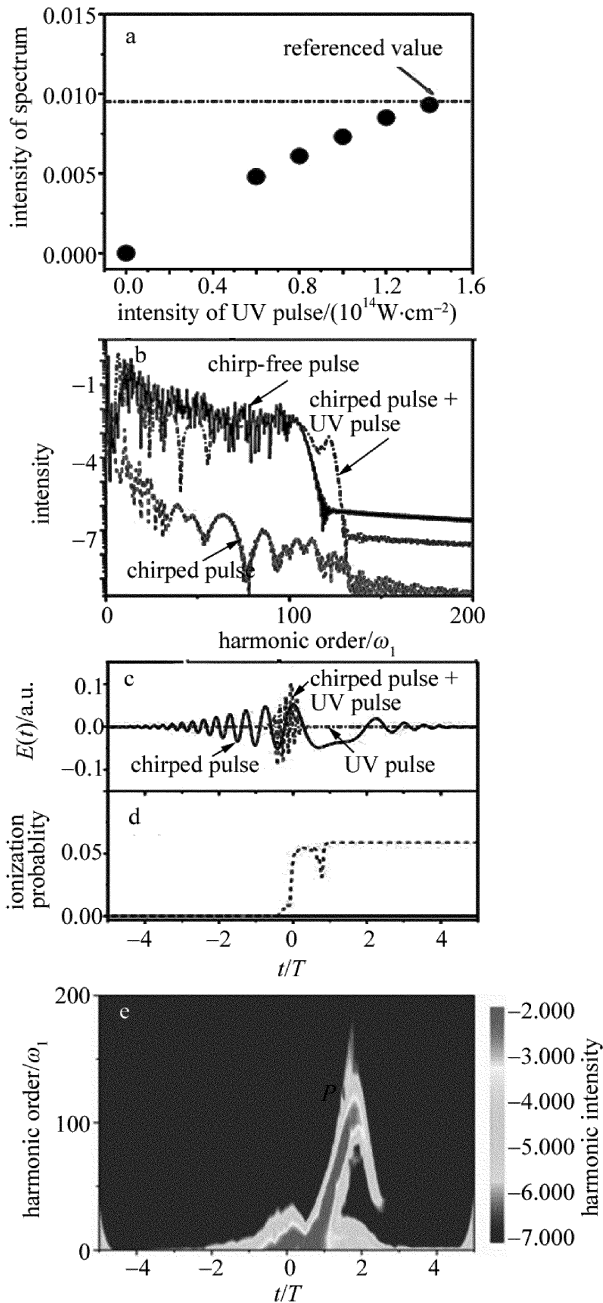


Fig. 3 a—the harmonic yield as a function of UV intensity b—the harmonic spectra c—the laser profiles d—the ionization probability e—the time-frequency analyses of the harmonics for the case of combined field

需要 $\tau_1 = 20\text{fs}$, $I_1 = 0.4 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ 时即可使谐波截止能量达到参考值。但是,当引入紫外光源后,无论如何调控激光参量,谐波高阶处强度总是不能得到很好的增强,这不利于产生高强度阿秒脉冲。图 4b 中给出了组合场下谐波辐射时频分析图。从图中分析可见,谐波平台区主要来自于谐波辐射能量峰 P 的贡献。但是 P 强度明显分为两部分。当谐波能量大于 $30\omega_1$ 、且小于 $75\omega_1$ 时, P 的强度很强,这是谐波平台区在这

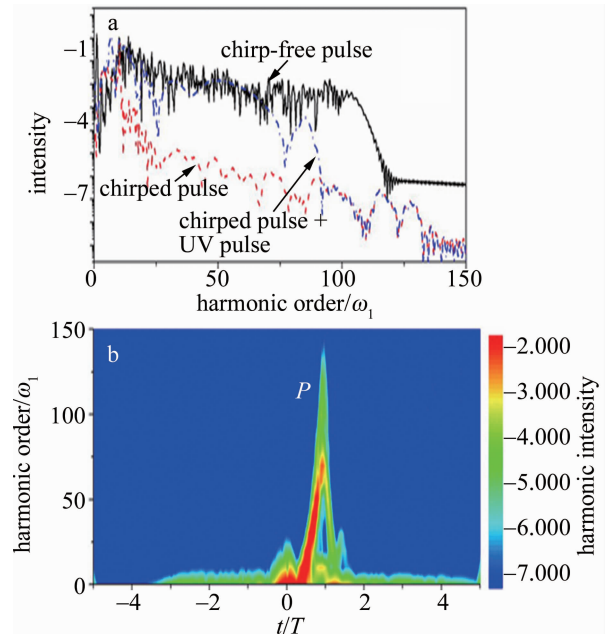


Fig. 4 a—the harmonic spectra b—the time-frequency analyses
—区域具有较高强度的原因。但是当谐波能量大于 $75\omega_1$ 时, P 强度明显下降,这是高阶谐波区域强度不高的原因。

由上述分析可知,当驱动场采用 10fs , 800nm 负向啁啾激光场与 1.45fs , 123nm 的紫外组合场时,谐波截止能量和谐波辐射强度可以达到预先设定的参考值,但是不同于参考场下的谐波光谱,在组合场下谐波平台区由单一谐波能量峰贡献产生,同时组合场的总光强要明显小于参考场光强,这非常有利于实验上获得单个阿秒脉冲。因此,通过叠加傅里叶变换后的谐波平台区可以产生超短的阿秒脉冲。具体来说,当叠加谐波光谱的 30 阶 ~ 110 阶谐波后可获得一个脉宽在 36as 的单个阿秒脉冲,如图 5 所示。

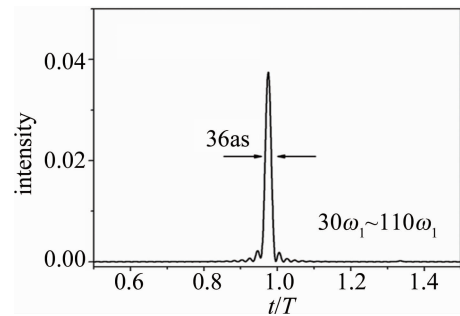


Fig. 5 The time profile of attosecond pulse

3 结论

理论上提出一种利用低强度啁啾紫外组合场去实现某一高强度参考场下所产生的谐波截止能量和谐波

辐射强度的方法。在负向啁啾场调控下,不仅谐波截止能量可以达到选取的参考值,而且谐波平台区由单一谐波能量峰贡献产生。在紫外共振电离的影响下,谐波平台区强度可以得到有效增强,并且达到参考值范围。值得注意的是,组合场的总光强要比选取的参考光强低很多,这降低了实验要求。选取平台区谐波进行叠加可以获得一个36as的超短脉冲。

通过采用优化后强度较低的组合激光场获得了超短的阿秒脉冲。但是,如果去掉“利用低强度激光场”这个限定条件,通过采用本文中的啁啾紫外组合场驱动He原子,其高次谐波截止能量可以进一步延伸到水窗区间或者keV区间。这一区间的光谱连续区可以获得能量在水窗区间或者keV范围内的阿秒脉冲,这也是目前被广泛研究的能量区间。因此,在后续研究中,将采用本文中提出的研究机制或者双啁啾调控机制来进一步研究谐波截止能量的延伸。

参 考 文 献

- [1] L'HUILLIER A, BALCOU P. High-order harmonic generation in rare gases with a 1ps 1053nm laser [J]. *Physical Review Letters*, 1993, 70 (6): 774-777.
- [2] LIU H, FENG L Q. Mid-infrared field phase measurement and attosecond pulse generation [J]. *Laser Technology*, 2017, 41 (2): 151-158 (in Chinese).
- [3] MCPHERSON A, GIBSON G, JARA H, *et al.* Studies of multiphoton production of vacuum-ultraviolet radiation in the rare gases [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1987, B4(4): 595-601.
- [4] YU C, JIANG S C, LU R F. High order harmonic generation in solids: A review on recent numerical methods [J]. *Advances in Physics: X*, 2018, 4(4): 1562982.
- [5] CORKUM P B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization [J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(13): 1994-1997.
- [6] GOULIELMAKIS E, SCHULTZE M, HOFSTETTER M, *et al.* Single-cycle nonlinear optics [J]. *Science*, 2008, 320(5883): 1614-1617.
- [7] FENG L Q, LI Y, LIU H. High intensity attosecond pulse generation by the improved multi-cycle polarization gating technology [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(4): 451-456 (in Chinese)
- [8] ZHANG Q B, LU P X, LAN P F, *et al.* Multi-cycle laser-driven broadband supercontinuum with a modulated polarization gating [J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9795-9803.
- [9] ZENG Z, CHENG Y, SONG X, *et al.* Generation of an extreme ultraviolet supercontinuum in a two-color laser field [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(20): 203901.
- [10] 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]. *Journal of Physics*, 2009, B42(22): 225601.
- [11] FENG L Q. Molecular harmonic extension and enhancement from H_2^+ ions in the presence of spatially inhomogeneous fields [J]. *Physical Review*, 2015, A92(5): 053832.
- [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 Physics Letters*, 2018, 15(11): 115301.
- [13] FENG L Q, CHU T S. Generation of an isolated sub-40as pulse using two-color laser pulses: Combined chirp effects [J]. *Physical Review*, 2011, A84(5): 053853.
- [14] LIU H, LI Y, YAO Z, FENG L Q. Chirp pulse control on harmonic cutoff and harmonic intensity [J]. *Laser Technology*, 2017, 41 (5): 708-711 (in Chinese).
- [15] LARA-ASTIASO M, SILVA R E F, GUBAYDULLIN A, *et al.* Enhancing high-order harmonic generation in light molecules by using chirped pulses [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117 (9): 093003.
- [16] WANG X, JIN C, LIN C D. Coherent control of high-harmonic generation using waveform-synthesized chirped laser fields [J]. *Physical Review*, 2014, A90(2): 023416.
- [17] LI Y, FENG L Q, QIAO Y. Improvement of high-order harmonic generation via controlling multiple acceleration-recombination process [J]. *Zeitschrift Für Naturforschung*, 2019, A74(7): 561-571.
- [18] LU R F, ZHANG P Y, HAN K L. Attosecond-resolution quantum dynamics calculations for atoms and molecules in strong laser fields [J]. *Physical Review*, 2008, E77(6): 066701.
- [19] ANTOINE P, PIRAUX B, MAQUET A. Time profile of harmonics generated by a single atom in a strong electromagnetic field [J]. *Physical Review*, 1995, A51(3): R1750-R1753.