

文章编号: 0258-7025(2003)06-0509-03

脉冲啾啾对高次谐波谱影响的理论研究

李 伟, 刘建胜, 曾志男, 张正泉

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学实验室, 上海 201800)

摘要 采用单电子近似和软核势模型, 通过数值求解一维含时薛定谔方程的方法, 研究了当脉冲分别带有正、负啾啾的情况下所产生的高次谐波谱的变化。结果表明, 对于正啾啾脉冲, 其高次谐波谱将出现分裂, 而对于负啾啾, 高次谐波谱呈现展宽的趋势。同时发现, 在激光脉冲带有很大的啾啾的情况下, 无论是正啾啾还是负啾啾, 都会使谐波峰分裂成多个更加细小的谱峰。

关键词 非线性光学; 啾啾脉冲; 高次谐波谱; 软核势模型

中图分类号 O 437 文献标识码 A

Theoretical Investigation of Effect of Pulse Chirp on High-order Harmonic Spectrum

LI Wei, LIU Jian-sheng, ZENG Zhi-nan, ZHANG Zheng-quan

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Based on the single electron approximation and soft-core potential model, 1D time-dependent Schrödinger equation is solved to investigate the effect of positive and negative chirp on high-order harmonic spectrum. It is shown that the harmonic spectrum generated by a positive chirped pulse splits, while that generated by a negative chirped pulse is broadened, which implies that a radiation source as short as attosecond could be produced.

Key words nonlinear optics; chirped pulse; high-order harmonic spectrum; soft-core potential model

1 引言

在激光与物质的相互作用进入强场物理领域后, 出现了许多高阶的非线性物理现象, 如高次谐波、阈上电离等。对高次谐波的研究之所以长盛不衰, 是由以下几个原因造成的: 首先, 利用高次谐波辐射可以获得相干的、波长连续可调谐的、脉冲持续时间短的 XUV 和 X 射线源^[1~4]; 其次, 高次谐波辐射是人们突破飞秒极限、获得阿秒相干脉冲的首选光源^[5, 6]。强场高次谐波由于辐射谱呈现平台区以及平台区谐波有规律的等频率间隔分布的独特优点, 成为突破阿秒界限的首选光源。同时, 高次谐波辐射的研究对强场物理的研究本身有着强大的推动作用。

在超短超强脉冲产生高次谐波的过程中, 利用

激光脉冲啾啾来控制产生的高次谐波, 一直是一个非常重要的研究内容^[5~9]。Z. Chang 等在实验中^[5]发现, 当激光脉冲带有一定量的正啾啾时, 可以使产生的高次谐波谱峰更锐, 更加容易分辨, 而负啾啾则会使谐波变成连续的一片, 难以分辨出单个的谐波峰。同时理论计算结果表明, 高次谐波产生过程中的自由电子运动使高次谐波带上了负啾啾, 因此适当的激光脉冲正啾啾有利于使产生的高次谐波峰宽度变窄。而最近 Lee 等^[6]在实验中又发现, 在考虑了传播效应以后, 由于高强度的激光脉冲在传播过程中的自相位调制效应 (SPM) 会给高次谐波引入正啾啾, 适当的负啾啾反而有利于产生很锐的高次谐波峰, 这与低强度下的实验结果是完全不同的。因此在采用激光脉冲啾啾控制产生高次谐波的过程中, 必须同时考虑激光脉冲啾啾、传播效应等各

收稿日期: 2002-02-01; 收到修改稿日期: 2002-05-23

作者简介: 张伟 (1978.5—), 男, 陕西省延安市人, 硕士研究生, 主要从事光学工程研究。E-mail: azuo.lee@sohu.com

种因素。

在 Z. Chang 等^[5]的理论计算中,给出了非常明确的物理图像。他们的计算采用的是 Lewenstein 模型^[3],偶极子的相位由电子在激光场中的运动过程决定,在采用鞍点法(saddle-point)计算了谐波截止位置对应的电子运动以后,他们给出了偶极运动的相位。虽然在他们的计算中采用了各种近似,但是计算结果仍然与实验结果非常吻合,同时给出了非常明确的物理图像。在不考虑传播效应的情况下,我们通过求解一维含时薛定谔方程发现,在比较小啁啾(本文中,对应于 $N < 4$)的情况下,计算结果与 Z. Chang 等的计算结果是一致的,即适当的正啁啾有利于产生很锐的谐波峰,而负啁啾则会使谐波峰展宽。但是在大的啁啾情况下(本文中,对应于 $N > 4$),正啁啾产生的高次谐波峰出现明显的分裂,每一个级次的谐波峰分裂成好几个很锐的谱峰,而负啁啾产生的高次谐波则继续展宽,使整个谐波谱接近于成为连续谱。

2 计算模型

我们采用单电子近似和软核势模型,数值求解一维含时薛定谔方程。软核势的形式取为^[10]

$$V(x) = -\frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}}$$

通过调节 a 的数值,可以调节势场深度和基态能量,取 a^2 为 0.4713,通过求解薛定谔方程的定态解可以知道此时基态能量为 -0.9043 a. u., 近似等于氦的第一电离能。

于是,含时薛定谔方程可以表示成如下形式(以下均采用原子单位)

$$i \frac{\partial \Psi(t, x)}{\partial t} = \left[-\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}} - xE(t) \right] \Psi(t, x) \quad (1)$$

场的形式取为

$$E(t) = E_0 e^{-a^2 t} \sin(\omega_0 t - bt^2) \quad (2)$$

本文取脉冲包络 $e^{-a^2 t}$, 即高斯脉冲,脉冲峰值强度为 3.51×10^{14} W/cm²。波长为 800 nm, 相当于 $\omega_0 = 0.057$ a. u., 计算的时间长度为 64 个基频光周期,采用的脉冲宽度为 4 个基频光周期,相当于 10 fs 左右。 b 为线性啁啾系数。

以基态的定态波函数为初始条件,采用 Crank-Nicolson 中心差分方法数值求解方程(1),可以得到

不同时刻的 $\Psi(t, x)$, 即电子波函数随时间的演化,利用 $\Psi(t, x)$ 可以求出

$$a(t) = \langle \Psi(t, x) \left| -\frac{dV}{dx} + E(t) \right| \Psi(t, x) \rangle$$

最后对 $a(t)$ 进行傅里叶变换

$$d(\Omega) = \int a(t) e^{i\Omega t} dt$$

从而就可以得到相应的光谱强度 $|d(\Omega)|^2$ 。

3 结果与分析

无啁啾时,(2)式中 a 与 b 的取值分别为

$$a_0 = \frac{1}{2} \ln 2 \left/ \left(\frac{\tau}{2} \right)^2 \right., \quad b_0 = 0$$

当脉冲加入啁啾以后,导致脉冲展宽为原来的 N 倍,此时的 a 将为

$$a_N = a_0 / N^2$$

对应的啁啾项 b 则为

$$b_N = \pm a_N \sqrt{N^2 - 1}$$

b 的不同符号分别对应正、负啁啾的情况。针对 N 取值 1 ~ 8 的情况,分别计算了正、负啁啾情况下产生的高次谐波谱,结果如图 1, 2 所示。图 1 为正啁啾的情形,从 $N = 1$ 到 $N = 8$ 表示逐渐增强的啁啾强度,计算的激光波长为 800 nm, 强度为 3.51×10^{14} W/cm²。从图上可以看出,随着啁啾程度的加强,谐波辐射的强度逐渐加强,在 $N = 7$ 时辐射强度最大。在小啁啾情况下($N < 4$),从图中可以看出,每个谐波峰有所增强,很容易分辨出来。但是在啁啾继续加大的情况下($N > 4$),每个谐波峰开始不断变宽,同时开始分裂成很多个小的谱峰。随着 N 的增大,分裂出小峰的数目逐渐增多。图 2 为负啁啾的情形,从 $N = 1$ 到 $N = 8$ 表示逐渐增强的啁啾强度,计算的激光波长为 800 nm, 强度为 3.51×10^{14} W/cm²。有啁啾($N > 1$)比无啁啾时($N = 1$)时的辐射强度有明显提高。而且,随着啁啾程度的增强,每个级次的谐波谱逐渐变宽,最宽的谐波峰宽度超过 $1.5\omega_0$, 而整个谐波谱则趋于连续。同时与正啁啾情况有一点相同的是,大啁啾情况下($N > 4$),在不断展宽的谐波峰上,开始出现很锐的细小的谱峰。

因此,即使在不考虑传播效应的情况下,当激光脉冲带有很大的啁啾时,高次谐波谱也会由于激光脉冲的啁啾而出现分裂,在 Lee 等的实验中已经可以看到这种趋势。这在采用激光脉冲啁啾控制产生高次谐波谱的过程中是值得注意的。

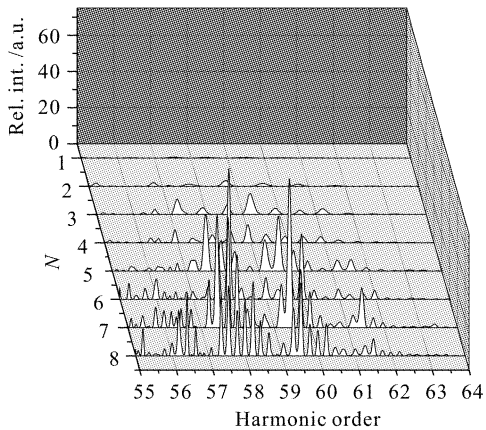


图 1 加入正啁啾时高次谐波谱的变化

Fig. 1 High order harmonic spectrum of the pulse with positive chirp

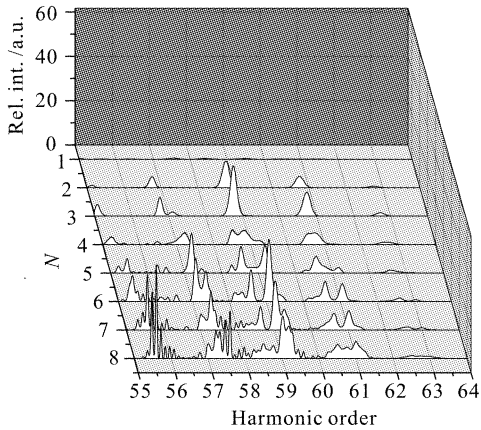


图 2 加入负啁啾时高次谐波谱的变化

Fig. 2 High order harmonic spectrum of the pulse with negative chirp

4 结 论

分别研究了正、负啁啾对产生的高次谐波辐射谱的影响,发现了正负啁啾对产生的高次谐波谱有不同的控制作用。与以前的理论结果相似,在正啁啾情况下,适当的啁啾可以产生很锐的、更容易分辨的谐波峰。在负啁啾情况下,得到了谐波辐射谱随啁啾加强逐渐变宽并趋于连续的结果。同时还发

现,在激光脉冲带有很大的啁啾的情况下,无论是正啁啾还是负啁啾,都会使谐波峰分裂成多个更细小的谱峰。

致谢 感谢吴海涛硕士提供的一维含时薛定谔方程计算程序。

参 考 文 献

- 1 Anne L' Huillier, Ph. Balcou. High-order harmonic generation in rare gases with a 1-ps 1053-nm laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(6):774~777
- 2 Zenghu Chang, A. Rundquist, Haiwen Wang *et al.*. Generation of coherent soft X-rays at 2.7 nm using high harmonics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(16):2967~2970
- 3 M. Lewenstein, Ph. Balcou, M. Yu. Ivanov *et al.*. Theory of high-harmonic generation by low-frequency laser fields [J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **49**(3):2117~2132
- 4 M. Yu. Kuchiev, V. N. Ostrovsky. Quantum theory of high harmonic generation as a three-step process [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **60**(4):3111~3124
- 5 Z. Chang, A. Rundquist, H. Wang *et al.*. Temporal phase control of soft-x-ray harmonic emission [J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **58**(1):R30~R33
- 6 D. G. Lee, J.-H. Kim, K.-H. Hong *et al.*. Coherent control of high-order harmonics with chirped femtosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(24):243902-1~243902-4
- 7 T. Sekikawa, T. Ohno, T. Yamazaki *et al.*. Pulse compression of a high-order harmonic by compensating the atomic dipole phase [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(13):2564~2567
- 8 H. J. Shin, D. G. Lee, Y. H. Cha *et al.*. Generation of nonadiabatic blueshift of high harmonics in an intense femtosecond laser field [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(13):2544~2547
- 9 P. Salières, P. Antoine, A. de Bohan *et al.*. Temporal and spectral tailoring of high-order harmonics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(25):5544~5547
- 10 Zeng Zhinan, Li Ruxin, Cheng Ya *et al.*. Great enhancement of high-order harmonic generation efficiency by special two-color lase driving field [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10):1153~1156 (in Chinese)