

脉冲啁啾对于阿秒脉冲的影响

王向欣 王 成 李邵辉 刘建胜 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 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, 理论研究了当脉冲分别带有正、负啁啾的情况下所产生的阿秒脉冲. 分析了不同脉冲啁啾特性对阿秒脉冲的强度和宽度的影响. 研究表明, 无论是正啁啾还是负啁啾, 随着啁啾量的增加, 都将使激光脉冲由产生单个阿秒脉冲趋向于产生阿秒脉冲链. 正啁啾和负啁啾对于阿秒脉冲宽度的影响是不同的, 负啁啾对于阿秒脉冲宽度影响很小, 适当的负啁啾有利于缩小阿秒脉冲的宽度; 而正啁啾脉冲产生的阿秒脉冲较无啁啾时展宽, 且随着啁啾量的增加, 其阿秒脉冲宽度迅速增大.

关键词 非线性光学; 阿秒脉冲; 啁啾脉冲; 软核势模型

中图分类号 O437 **文献标识码** A

0 引言

在物质的相互作用过程中, 许多基本的物理过程都是在单个可见光光周期量级甚至在一个光周期以内完成的, 如内壳层光电离, 电子隧穿等在几分之一光周期内发生. 对于这些过程的了解, 就需要极短的、阿秒量级的“光探针”. 产生这种光脉冲的方法, 理论上提出了两种, 一是受激喇曼散射(SRS)^[1], 另一种是高次谐波^[2,3]. 高次谐波辐射是获得阿秒脉冲的首选光源, 由几个光周期的超短激光脉冲产生的高次谐波, 用随时间变化的椭圆偏度对其调制或直接在截止区附近用滤波片滤出一部分频谱, 就能得到只有几分之一光周期的相干脉冲. 在脉冲啁啾对高次谐波产生过程的研究发现^[4,5], 即使在不考虑传播效应的情况下, 激光脉冲的啁啾也会对高次谐波谱发生很大的影响, 比如适当的正啁啾会使产生的高次谐波的谱峰变锐, 相反负啁啾则会使谐波谱展宽; 当啁啾量很大时, 正啁啾脉冲则使谐波峰发生分裂, 负啁啾脉冲则继续使谐波谱展宽至接近连续谱等. 这些效应进一步都会影响阿秒脉冲的产生过程. 在此, 从理论上研究超短脉冲啁啾对于阿秒脉冲产生的影响.

1 计算模型

由一维含时薛定谔方程结合单电子近似及软核势模型来模拟超短脉冲与氦气相互作用产生阿秒脉冲的过程. 所取软核势的形式为^[6]

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

其中 β 的取值不同, 代表不同的势阱深度和基态能

量. 本文计算中均采用原子单位, 取 β^2 为 0.4713, 对应的基态能量为 -0.9043 a. u., 近似等于氦的第一电离能.

由上述软核势, 可得一维含时薛定谔方程为

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

超短激光脉冲取高斯形式为

$$E(t) = E_0 \exp(-dt^2 + j(\omega_0 t + bt^2))$$

其中激光参量为: ω_0 为 0.057 a. u., E_0 为 0.1 a. u., 对应激光波长 800 nm, 脉冲峰值强度 3.51×10^{14} W/cm². d 与脉冲宽度有关, b 为线性啁啾系数.

对于无啁啾激光脉冲, $b = 0$, 脉冲宽度 τ_0 取为 5 fs

$$E(t) = E_0 \exp(-d_0 t^2 + j\omega_0 t)$$

其中 $d_0 = \frac{1}{2} \ln 2 / (\frac{\tau_0}{2})^2$.

当脉冲宽度被啁啾展宽为原来的 N 倍时, 即

$$d = d_0 / N^2$$

对应的线形啁啾系数 b 为

$$b = \pm d \sqrt{N^2 - 1}$$

上式 b 取正负符号分别对应正、负啁啾脉冲. 为了分析更直观, 我们在下一部分以 N 取正负代表正负啁啾脉冲.

以基态的定态波函数为初始条件, 采用 Crank-Nicolson 中心差分算法数值求解含时薛定谔方程, 得到不同时刻的电子波函数, 从而得到原子偶极加速度 $a(t)$.

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

再对偶极加速度进行傅里叶变换, 得到高次谐波谱

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) e^{-i\omega t} dt$$

分析高次谐波过程中产生的阿秒脉冲,采用如下形式滤波片

$$W(\omega_0, \Delta\omega; \omega) = e^{-(\omega - \omega_0)^2 / (\Delta\omega)^2}$$

所得中心频率在 ω_0 的阿秒脉冲的时域包络为

$$E_x(\omega_0, t) = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) W(\omega_0, \Delta\omega; \omega) e^{i\omega t} d\omega \right|$$

频率 ω_0 对应的光子能量为 92 eV, 与目前阿秒脉冲实验中的光子能量相近^[7].

2 结果与分析

取计算时间长度为 16 个基频光周期, 计算了激光脉冲具有不同啾啾情况所产生的阿秒脉冲, 结果示于图 1. 从图中可以明显地看到脉冲啾啾对所产生的阿秒脉冲的影响. 在无啾啾的情况下 ($N=1$), 产生了主脉冲和左端的小脉冲信号, 而小脉冲的强度和主脉冲相比可以忽略, 故基本上可认为产生了单个的阿秒脉冲. 当脉冲具有啾啾且啾啾量逐渐增大时, 与无啾啾的情况不同将不是产生单个阿秒脉冲, 而是趋向于产生阿秒脉冲链. 在负啾啾情况下, 随着啾啾量的增大, 主脉冲强度不变, 左端的小脉冲强度将逐步增加, 与主脉冲相比不能被忽略. 在正啾啾情况下, 当有一定的啾啾量时 ($N=1.2$) 时, 主脉冲右端也出现小脉冲信号, 而且随着啾啾量的增大, 两端小脉冲的强度迅速增加到可与中间的主阿秒脉冲相比拟的地步.

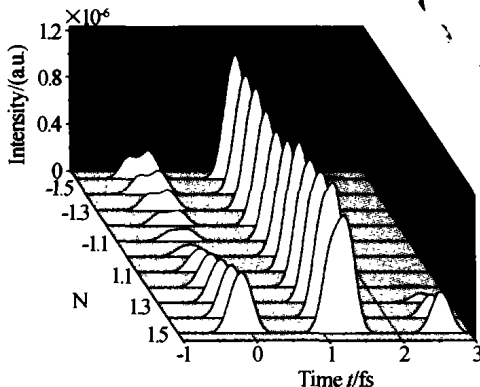


图 1 不同啾啾脉冲产生的阿秒脉冲

Fig. 1 Attosecond pulses produced by laser pulses with different chirps

同时, 还分析脉冲啾啾对于产生的阿秒脉冲宽度的影响, 主要针对中间的主阿秒脉冲的脉冲宽度变化, 结果如图 2. 从图中可以看出, 不同的啾啾特性对于阿秒脉冲宽度的影响不同. 在负啾啾脉冲情况下, 阿秒脉冲的宽度没有明显的变化, 而正啾啾产生的阿秒脉冲和无啾啾情况相比展宽, 且随着啾啾量的增加, 展宽程度很快增加. 从图中还可看到, 阿秒脉冲脉宽最窄的位置并不是出现在零啾啾的情

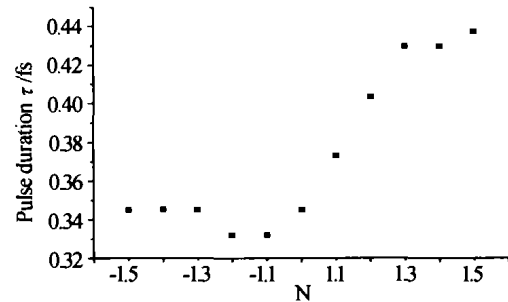


图 2 脉冲啾啾量对阿秒脉冲宽度的影响

Fig. 2 Durations of attosecond pulses produced by laser pulses with different chirps

况, 而是在脉冲带有一定量的负啾啾的情况下.

3 结论

从上述的分析来看, 即使在不考虑传播效应的情况下, 当激光脉冲带有啾啾时, 也会对阿秒脉冲的产生带来很大的影响, 而且不同的啾啾特性对于阿秒脉冲的影响是不同的. 因此, 在阿秒脉冲的产生和测量过程中, 激光脉冲的啾啾特性是非常值得注意的, 通过认识并恰当地利用这些特性将有助于我们获得更理想的阿秒脉冲.

致谢: 在此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 Sokolov A V, Walker D R, Yavuz D D, *et al.* Raman generation by phased and antiphased molecular states. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**(3):562 ~ 565
- 2 Antoine P, Huillier A L', Lewenstein M. Attosecond pulse trains using High-order harmonics. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**(7):1234 ~ 1237
- 3 Antoine P, Milosevic D B, Huillier A L', *et al.* Generation of attosecond pulses in macroscopic media. *Phys Rev A*, 1997, **56**(6):4960 ~ 4969
- 4 Chang Z, Rundquist A, Wang H, *et al.* Temporal phase control of soft-x-ray harmonic emission. *Phys Rev A*, 1998, **58**:30 ~ 33
- 5 李伟, 刘建胜, 曾志男, 等. 脉冲啾啾对高次谐波谱影响的理论研究. *中国激光*, 2003, **30**(6):509 ~ 511
Li W, Liu J S, Zeng Z N, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(6):509 ~ 511
- 6 曾志男, 李儒新, 程亚, 等. 采用附加共振高频场提高强场高次谐波的产生效率. *光子学报*, 2001, **21**(10):1153 ~ 1156
Zeng Z N, Li R X, Cheng Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **21**(10):1153 ~ 1156
- 7 Hentschel M, Kienberger R, Spielmann C, *et al.* Attosecond metrology. *Nature*, 2001, **414**(29):509 ~ 513

Dependence of Attosecond Pulses on The Chirp of The Excitation Pulse

Wang Xiangxin, Wang Cheng, Li Shaohui, Liu Jiansheng, Xu Zhizhan

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2004-04-13

Abstract With soft-core potential model and single electron approximation, the dependence of attosecond pulses on the chirp of the excitation pulse is theoretically investigated by solving 1D time-dependent Schrödinger equation. The intensity and duration of the attosecond pulses are respectively analyzed. The results show that, instead of producing single attosecond pulse as the unchirped pulse, both the positively and negatively chirped laser pulses will produce attosecond pulse trains. With the increase of the positive chirp of the driving laser pulse, the duration of the attosecond pulse will increase greatly, while the negatively chirped pulse's effect is little, and some negative chirp can even generate shorter attosecond pulse than that of the zero chirp case.

Keywords Nonlinear optics; Chirped pulse; Attosecond pulse; Soft-core potential model



Wang Xiangxin was born in He'nan Province in 1979. Now she is a master candidate in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. She is working in the field of nonlinear optics. Her research interests at present are nonlinear interactions of high-intensity ultrashort-pulse laser with matter.