

文章编号: 0258-7025(2008)09-1380-04

极紫外啾啾多层膜反射镜产生亚飞秒脉冲

陈锐 王凤丽* 王占山

(同济大学精密光学工程技术研究所 物理系, 上海 200092)

摘要 超短超强激光与稀有气体相互作用产生高次谐波获取亚飞秒脉冲是近年来超短超快光学的研究热点之一。具有谐波选择和啾啾补偿作用的极紫外啾啾多层膜反射镜是产生亚飞秒脉冲的有效元件。阐述了运用极紫外啾啾多层膜反射镜由高次谐波得到亚飞秒脉冲的机制, 计算了特定实验条件下高次谐波产生过程中的啾啾, 利用遗传算法完成了极紫外啾啾多层膜反射镜的设计, 模拟分析了其产生亚飞秒脉冲的作用。结果表明, 所设计极紫外啾啾多层膜反射镜能够获得半峰全宽为 132 as 的脉冲。

关键词 薄膜; 啾啾多层膜反射镜; 遗传算法; 亚飞秒脉冲

中图分类号 O 484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1380

Producing Subfemtosecond Pulses by Using Chirped Multilayer Mirror in the Extreme Ultraviolet Region

Chen Rui Wang Fengli Wang Zhanshan

(Institute of Precision Optical Engineering, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract A major effort in ultrashort and ultrafast optics is to obtain subfemtosecond pulses from high harmonics generated by interaction of an intense short-pulse laser and a jet of rare gases. The chirped multilayer mirror in the extreme ultraviolet region can be used to select some high harmonics and compensate the chirp. It is an effective element for the production of subfemtosecond pulses. The mechanism of obtaining subfemtosecond pulses from high harmonics by using the mirror was presented. The chirp of high harmonics in specified experiment condition was calculated. The chirped multilayer mirror was designed by using a genetic algorithm. Its capability of producing subfemtosecond pulses was shown by numerical simulation. Results indicate that the designed chirped multilayer mirror can be used for production of 132 as pulses.

Key words thin films; chirped multilayer mirror; genetic algorithm; subfemtosecond pulses

1 引言

超短超强激光与稀有气体相互作用产生的高次谐波部分级次的叠加能够获得亚飞秒脉冲^[1~5]。由于高次谐波各级谐波间的相位不是简单的线性关系, 群延迟色散(Guoup Delay Dispersion)会展宽各级谐波叠加后的脉冲宽度, 限制了超短脉冲的获得。目前主要使用滤光片^[6]和极紫外啾啾多层膜反射镜^[7,8]两种方法选择不同级次的谐波, 从而消除群

延迟色散获取亚飞秒脉冲。由于滤光片可用材料少, 且其带宽、色散特性、透过率受材料性能的影响较大, 所以用滤光片获得亚飞秒脉冲有很大的限制。极紫外啾啾多层膜反射镜是通过优化膜层厚度得到的在一定波长带宽内具有色散补偿能力和较高反射率的膜层结构, 其带宽、色散补偿量、反射率都可以在一定范围内进行改变, 给实际应用带来很多方便。

本文阐述了由高次谐波获得亚飞秒脉冲的机

收稿日期: 2007-10-09; 收到修改稿日期: 2008-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(10704056)资助项目。

作者简介: 陈锐(1982—), 男, 江苏人, 硕士研究生, 主要从事极紫外线与软 X 射线波段薄膜光学研究。

E-mail: rchen27@163.com

导师简介: 王占山(1963—), 男, 吉林人, 教授, 博士生导师, 主要从事极紫外与软 X 射线光学及技术等的研究。

E-mail: wangzs@mail.tongji.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangfengli@mail.tongji.edu.cn

制;计算了特定实验条件下高次谐波产生过程中的啁啾,并完成了啁啾多层膜反射镜的设计;模拟分析了啁啾多层膜反射镜产生亚飞秒脉冲的作用。

2 亚飞秒脉冲产生机制

超短超强激光与稀有气体相互作用产生高次谐波,特点是在强度单调下降的几个级次谐波后,高次谐波辐射谱呈现出一个平台区。该区各级次谐波强度十分接近,在平台区的某一级次附近,谐波强度突然下降,进入截止区^[2]。谐波总光强 $I(t)$ 可表示为^[3]

$$I(t) = \left| \sum_N A_q \exp\{-i[\omega_q t + \varphi(\omega_q)]\} \right|^2, \quad (1)$$

式中 N 为高次谐波数, q 为谐波级次(取奇数), A_q 为第 q 次谐波的振幅,频率 $\omega_q = q\omega_0$ (ω_0 为入射激光频率),相位 $\varphi(\omega_q) = q\omega_0 t_e$ (t_e 为谐波发射时间)。假设 t_e 相同,则各级次谐波相位 $\varphi(\omega_q)$ 保持线性关系,考虑强度接近的平台区的 M 个谐波,设 $A_q = 1$,总光强 $I(t)$ 可表示为

$$I(t) = \left| \sum_M \exp[-iq\omega_0(t + t_e)] \right|^2 = \frac{\sin^2[M\omega_0(t + t_e)]}{\sin^2[\omega_0(t + t_e)]}, \quad (2)$$

则 $I(t)$ 的周期为 $T_L/2 = \pi/\omega_0$, T_L 为入射激光的光振荡周期。脉宽(脉冲峰值与第一极小值之间的宽度) $\Delta T = T_L/2M$ 。例如,当 $M = 5$, $T_L = 2.67$ fs(入射激光波长为 800 nm)时, $\Delta T = 267$ as。因此,高次谐波平台区部分级次的叠加可能产生亚飞秒脉冲。

各级次高次谐波并不是同时发射的,且谐波发射存在长、短两条量子轨道^[2],实验更易得到短量子轨道对应的谐波^[9, 10]。理论计算表明^[11]该轨道上谐波发射时间和频率之间存在一个正啁啾,即不同频率的谐波发射时间存在线性延迟,谐波频率越高,发射时间越晚。啁啾可定义为

$$C = \frac{\partial t}{\partial \omega} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \right) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \omega^2}, \quad (3)$$

单位为 as^2 。各级次谐波不同的发射时间使得谐波间相位关系变为非线性,即带来了群延迟色散,限制了超短脉冲的获得。极紫外啁啾多层膜反射镜不仅可以选择谐波,还能补偿啁啾,因而可以获得亚飞秒脉冲。

3 极紫外啁啾多层膜反射镜的设计

3.1 啁啾计算

设计极紫外啁啾多层膜反射镜,首先要确定啁

啾大小。Lewenstein 模型^[12]能够计算高次谐波的啁啾^[11]。考虑激光强度 $7.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 下 800 nm 钛宝石激光与氖气相互作用的情况^[7],对应截止级次为 105,计算得到了 15~105 级次高次谐波(波长范围为 7.62~53.33 nm)的发射时间 t_e ,而啁啾 C 近似为相邻谐波的发射时间差 Δt_e 。与角频率差 $2\omega_0$ 之比,结果如图 1 所示。

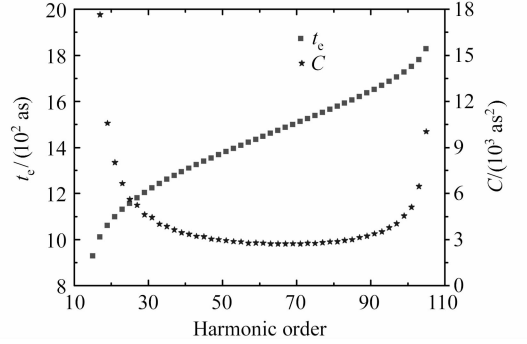


图 1 发射时间和啁啾随谐波级次的变化曲线
Fig. 1 Curves of emission time and chirp versus harmonic order

在 41~91 级次间,啁啾近似为 2800 as^2 ,对应波长范围为 8.79~19.51 nm。

3.2 优化设计

传统的啁啾镜^[13~15]工作在可见光和近红外波段,在极紫外波段几乎所有材料折射率都趋于 1,且存在吸收和色散,增加了设计难度。设计时,考虑带有 2800 as^2 啁啾的 45~57 级次的谐波(波长范围为 14.04~17.78 nm),设计波长范围为 14~18 nm。不同的工作波长选择不同的多层膜材料对^[16, 17],由啁啾镜工作波段,膜对材料选择 Mo/Si,基底为 Si。材料的光学常数来自美国伯克利国家实验室 X 射线光学中心^[18],正入射,膜层数取 50,膜厚范围限定为 1~6 nm。优化算法采用具有较强全局搜索能力的遗传算法^[19~21]。目标反射率 R_0 和啁啾 C_0 分别为 0.12 和 -2800 as^2 ,评价函数为

$$F = \omega_1 \sum_{i=1}^k (R_i - R_0)^2 + \omega_2 \sum_{i=1}^k (C_i - C_0)^2, \quad (4)$$

式中 k 为设计波长范围上所选取的波长点数, R_i 和 C_i 依次为各波长点处的反射率与啁啾, ω_1, ω_2 分别为反射率和啁啾的权重,程序中的啁啾为国际单位 s^2 ,即 $C_0 = -2800 \text{ as}^2 = -0.28 \times 10^{-32} \text{ s}^2 \approx -0.12 \times 2.333 \times 10^{-32} \text{ s}^2$ 。为了均衡反射率和啁啾的优化效果, ω_1 取 2.333 的平方,即 5.44, ω_2 取 10^{32} 的平方,即 10^{64} 。

图 2 中, 14~18 nm 波长范围内反射率平均值

为 $9.7 \pm 1.8\%$, 相位在设计波长范围内的变化是非线性的。由于 -2800 as^2 的啁啾很小, 图中相位变化近似线性。为更好地说明啁啾镜消除正啁啾的作用, 图 3 中给出了啁啾镜补偿啁啾和计算啁啾的曲线, 两者大小接近, 符号相反。

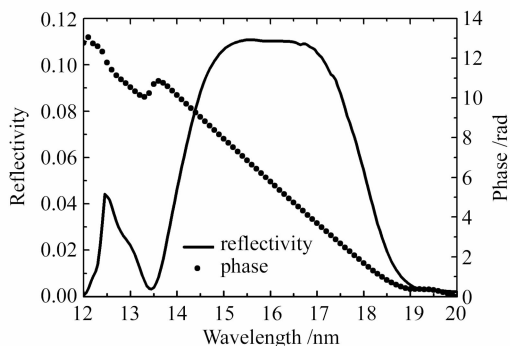


图 2 正入射反射率和相位随波长的变化曲线
Fig. 2 Curves of reflectivity and phase versus wavelength at normal incidence

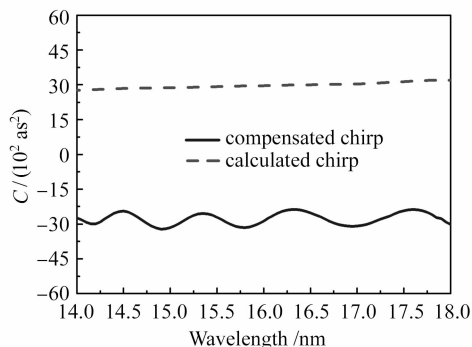


图 3 正入射啁啾镜补偿啁啾和计算啁啾随波长的变化曲线

Fig. 3 Curves of compensated chirp by using the chirped mirror and calculated chirp versus wavelength at normal incidence

4 模拟分析

已知谐波的振幅和相位, 通过复振幅的叠加可以得到脉冲光强 $I(t)$ 。各级次谐波振动表达式为

$$E_0(q) = A_0(q) \exp[-i(\omega_q t + \omega_q t_e)], \quad (5)$$

N 个谐波叠加后的光强 $I(t)$ 为

$$I(t) = \left| \sum_N E_0(q) \right|^2, \quad (6)$$

经极紫外啁啾多层膜反射镜反射后

$$\begin{aligned} E'(q) &= E_0(q) \sqrt{R_0(q)} \exp[-i\varphi(q)] = \\ &A_0(q) \sqrt{R_0(q)} \exp\{-i[\omega_q t + \omega_q t_e + \varphi(q)]\}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $R_0(q)$ 和 $\varphi(q)$ 分别为各级次谐波在该镜子上

的反射率和相位。此时, N 个级次谐波叠加后的光强 $I'(t)$ 为

$$I'(t) = \left| \sum_N E'(q) \right|^2, \quad (8)$$

上述极紫外啁啾多层膜反射镜的工作波长范围为 $14 \sim 18 \text{ nm}$ 。由于该反射镜在其他波长处存在一定反射率, 模拟波长范围取 $12 \sim 40 \text{ nm}$, 相应的谐波级次范围为 $21 \sim 65$ 。对于这些谐波, 振幅 $A_0(q)$ 设为 1, 频率 $\omega_q = q\omega_0$, 发射时间 t_e 。如图 1 所示。对应每个时间 t , 利用 (5) 式计算出各级次谐波振动表达式 $E_0(q)$, 由 (6) 式对模拟波长范围内的 $E_0(q)$ 求和后取模的平方得到光强 $I(t)$, 如图 4 虚线所示。谐波由极紫外啁啾多层膜反射镜反射后, 通过多层膜反射率和相位计算程序求得各级次谐波对应波长处的反射率 $R_0(q)$ 和 $\varphi(q)$, 结合 (5) 式计算出的 $E_0(q)$, 对应每个时间 t , 利用 (7) 式计算出新的振动表达式 $E'(q)$, 同样对 $E'(q)$ 求和后取模的平方得到新的光强 $I'(t)$, 如图 4 实线所示。为了便于比较, 图中的光强进行了归一, 并将脉冲平移, 使得两个脉冲的中心对准。

由图 4 可知, 经极紫外啁啾多层膜反射镜反射后, 原脉冲变形程度得到明显改善, 脉冲半峰全宽 (FWHM) 从 307 as 压缩至 132 as 。

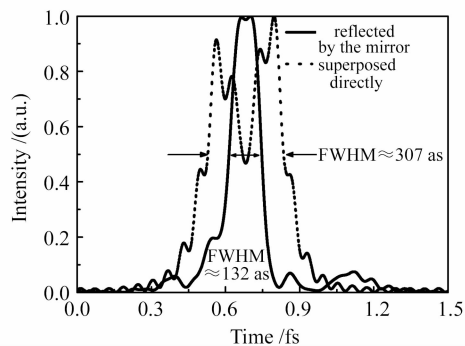


图 4 21~65 级次高次谐波直接叠加和经啁啾镜反射后叠加所得光强

Fig. 4 Light intensities of high harmonics of 21 ~ 65 superposed directly and superposed after reflected by the chirped multilayer mirror

5 结论

运用极紫外啁啾多层膜反射镜由高次谐波得到亚飞秒脉冲的机制, 计算了特定实验条件下高次谐波产生过程中的啁啾, 完成了啁啾多层膜反射镜的设计, 模拟分析了其产生亚飞秒脉冲的作用。结果表明, 所设计极紫外啁啾多层膜反射镜能够获得半峰全宽为 132 as 的脉冲。

参 考 文 献

- 1 M. Nisoli, S. Stagira, S. De. Silvestri *et al.*. A novel-high energy pulse compression system: generation of multigigawatt sub-5-fs pulses [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**:189~196
- 2 Philippe Antoine, Anne L'uillier, Maciej Lewenstein. Attosecond pulse trains using high-order harmonics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(7):1234~1237
- 3 Y. Mairesse, A. De. Bohan, L. J. Frasinski *et al.*. Attosecond synchronization of high-harmonic soft x-rays [J]. *Science*, 2003, **302**(5650):1540~1543
- 4 P. M. Paul, E. S. Toma, P. Breger *et al.*. Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation [J]. *Science*, 2001, **292**(5522):1689~1692
- 5 L. C. Dinu, H. G. Muller, S. Kazamias *et al.*. Measurement of the subcycle timing of attosecond XUV bursts in high-harmonic generation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(6):063901
- 6 Rodrigo López-Martens, Katalin Varjú, Per Johnsson *et al.*. Amplitude and phase control of attosecond light pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(3):033001
- 7 Anne-Sophie Morlens, Philippe Balcou, Philippe Zeitoun *et al.*. Compression of attosecond harmonic pulses by extreme-ultraviolet chirped mirrors [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(12):1554~1556
- 8 A. Wonisch, U. Neuhausler, N. M. Kabachnik *et al.*. Design, fabrication, and analysis of chirped multilayer mirrors for reflection of extreme-ultraviolet attosecond pulses [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(17):4147~4156
- 9 Mette B. Gaarde, Kenneth J. Schafer. Space-time considerations in the phase locking of high harmonics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(21):213901
- 10 Y. Mairesse, A. De. Bohan, L. J. Frasinski *et al.*. Optimization of attosecond pulse generation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(16):163901
- 11 S. Kazamias, Ph. Balcou. Intrinsic chirp of attosecond pulses: single-atom model versus experiment [J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **69**(6):063416
- 12 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
- 13 Robert Szipöcs, Kárpát Ferencz, Christian Spielmann *et al.*. Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3):201~203
- 14 Zhao Jiangshan, Zhang Zhigang, Chai Lu *et al.*. Optimum design of chirped mirror in the femtosecond pulse laser cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(3):213~217
赵江山, 张志刚, 柴 路 等. 用于飞秒脉冲激光腔内的啁啾镜的优化设计[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(3):213~217
- 15 Liao Chunyan, Wu Zubin, Fan Zhengxiu *et al.*. Negative dispersion mirror: Design, fabrication and use in Ti:sapphire lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):238~241
廖春艳, 吴祖斌, 范正修 等. 负色散镜的设计、制备及在掺钛蓝宝石激光谐振腔内的使用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):238~241
- 16 Wang Bei, Wang Zhanshan, Xu Yao *et al.*. Fabrication of normal incident Cr/C high-reflecting mirror for 4.48 nm soft X-ray laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):187~190
王 蓓, 王占山, 徐 垚 等. 4.48 nm 正入射软 X 射线激光用 Cr/C 多层膜高反射镜的研制[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):187~190
- 17 Zhu Jingtao, Zhang Shumin, Wang Bei *et al.*. SiC/Mg multilayer film reflective mirror at 30.4 nm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):735~738
朱京涛, 张淑敏, 王 蓓 等. 30.4 nm 波长 SiC/Mg 多层膜反射镜[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):735~738
- 18 http://henke.lbl.gov/optical_constants/getdb2.html
- 19 Xu Jiangfeng, Chen Qiuling. Anti-reflection coating designed by genetic algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1271~1275
徐江峰, 陈秋灵. 增透膜的遗传算法设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1271~1275
- 20 Cheng Xinbin, Wang Zhanshan, Zhang Zhong *et al.*. Wide-angle X-ray supermirror design using simulated annealing algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5):787~791
程鑫彬, 王占山, 张 众 等. 基于模拟退火算法的宽角度 X 射线超反射镜设计研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5):787~791
- 21 Zhou Ming, Sun Shudong. Genetic Algorithms: Theory and Applications[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. 1~64
周 明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. 1~64