

文章编号: 0258-7025(2008)07-1009-04

# 基于多台阶反射光栅的飞秒脉冲压缩装置

贾 伟<sup>1,2</sup> 周常河<sup>1</sup> 戴恩文<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 反射式光栅对是一种具有负色散性质的器件,可用于飞秒激光脉冲的压缩和展宽,具有无材料色散的优点。给出了一种基于多台阶反射光栅的脉冲压缩装置。该装置为倍密度光栅结构,由两个周期分别为 $40\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 的四台阶反射式光栅组成。实验得到的衍射效率可以达到 $70\%$ 以上,输入脉冲经过两个光栅的衍射后会按原路返回,从而达到色散补偿的效果。利用此压缩装置,脉冲宽度为 $66.8\ \text{fs}$ 的输入脉冲压缩至接近傅里叶变换极限脉冲,即 $46.6\ \text{fs}$ ,由此证明只要多台阶光栅效率足够高,此装置就有可能成为不同于棱镜对进行飞秒脉冲腔内和腔外压缩的另一种途径。

**关键词** 衍射与光栅;二元光学;多台阶反射光栅;飞秒激光脉冲;脉冲压缩

**中图分类号** O 436.1      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/CJL20083507.1009

## Femtosecond Laser Pulse Compressor Based on Multi-Level Reflection Gratings

Jia Wei<sup>1,2</sup> Zhou Changhe<sup>1</sup> Dai Enwen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** Reflection grating pairs are usually used for femtosecond pulse compressing and stretching because of its advantage of negative dispersion. In this paper, a multi-level reflection grating based pulse compressor was presented, which is also called double-line-density gratings structure. It contains two four-step reflection gratings with periods of  $40\ \mu\text{m}$  and  $20\ \mu\text{m}$ , respectively, and the compressor has the efficiency of more than  $70\%$ . The input femtosecond pulses will go back along the input direction after diffractions of the two gratings, and in this way, the positive group velocity dispersion (GVD) of the input pulses is compensated. Using this compressor, the input pulses  $66.8\ \text{fs}$  are compressed into Fourier-transform-limited ones with the bandwidth of  $46.6\ \text{fs}$ . So it is demonstrated that, with high efficiency, low density reflective grating pair is an alternative approach different from prism pair as a compressor for both inside and outside femtosecond laser cavities.

**Key words** diffraction and gratings; binary optics; multi-level reflection grating; femtosecond laser pulse; pulse compression

## 1 引 言

光栅对作为具有负群速色散性质的光学器件<sup>[1]</sup>,可以实现飞秒脉冲的展宽和压缩,因而被广泛应用于啁啾脉冲放大(CPA)和光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)系统中<sup>[2~6]</sup>。这种光栅一般具有高效率、

高密度等特点,而低密度光栅可以用作分束器,进行飞秒脉冲测量和多脉冲的产生<sup>[7~9]</sup>。但是如果待压缩飞秒脉冲的正群速色散量较小时,仍然可以使用低密度的光栅对进行色散补偿,并实现脉冲压缩<sup>[10,11]</sup>。棱镜对是目前使用最多的小色散量补偿

收稿日期:2007-11-05;收到修改稿日期:2008-01-07

基金项目:上海市科委(06SP07003,065NM005)和 973 计划(2006CB806000)资助项目。

作者简介:贾 伟(1981—),男,山东人,博士研究生,主要从事脉冲压缩与脉冲测量技术方面的研究。

E-mail:jw81@163.com

导师简介:周常河(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事微结构与微光学以及飞秒测量与飞秒加工方面的研究。

E-mail:chazhou@mail.shcnc.ac.cn

光学元件<sup>[11,12]</sup>,它的主要优点是效率比较高,缺点是所占空间较大,光路调节比较麻烦,另外棱镜对会不可避免地引入材料色散。使用反射式光栅对就会在不引入材料色散的同时,使装置更小巧、调节更容易,而其缺点就是低密度二台阶光栅的效率太低。为此,本文给出了基于多台阶光栅的飞秒脉冲压缩装置,介绍了倍密度光栅对压缩原理,并利用自制的周期分别为40 μm和20 μm的四台阶光栅进行了压缩实验。

## 2 光栅对压缩脉冲原理

通常情况下,光栅对包括两个完全相同的平行放置的光栅再加一个反射镜<sup>[1,11]</sup>,它可以产生负群速度色散。

最近提出了一种新型的光栅对压缩装置,为倍密度光栅结构<sup>[13]</sup>,如图1所示。这种结构由两个光栅组成,光栅II的线密度是光栅I的两倍,光栅II位于光栅I的+1级衍射级次方向上,因此根据光栅方程,入射脉冲经两个光栅的衍射后会沿入射方向原路返回,不但消除了角色散和空间啁啾的影响,而且产生了与一般光栅对相同的负色散效应。倍密度光栅对省去了反射镜,因而使结构更加紧凑,调节更加简便。

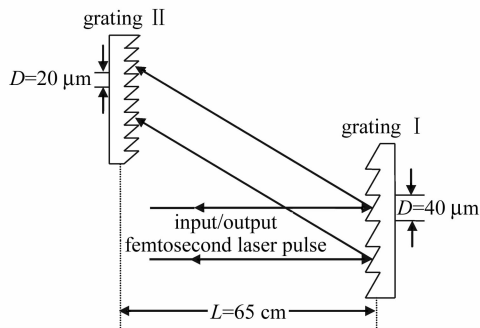


图1 倍密度光栅对结构

Fig. 1 Structure of double-line-density gratings

根据文献[1,11,13],可以得到压缩后脉冲的半峰全宽(FWHM)为

$$\tau_0 = \tau \sqrt{(1 - 4bk\beta^2 z)^2 + \frac{(8k\beta^2 z \ln 2)^2}{\tau^4}}, \quad (1)$$

式中 $\tau$ 为入射脉冲的半峰全宽, $b > 0$ 为入射脉冲带有的正啁啾, $k$ 为波数, $\beta$ 为参量<sup>[11]</sup>, $z$ 为两个光栅之间的距离。调整距离 $z$ 可以实现脉冲压缩输出,当间距刚好能补偿输入脉冲的正色散时,输出的是傅里叶变换极限脉冲,它的半峰全宽为

$$\tau_{0\min} = \tau \sqrt{1/[1 + (b\tau^2/2\ln 2)^2]}. \quad (2)$$

因此,当入射脉冲的半峰全宽以及入射脉冲带有的正啁啾已知时,能利用(2)式计算理论上可以得到的最小出射脉冲宽度。

事实上,当两个光栅线密度相同时,也可以得到同样的装置,只是光栅I位于光栅II的+2级衍射级次方向上,即对光栅I来说,+1级衍射的光栅方程为

$$d'_I \sin \theta = \lambda, \quad (3)$$

式中 $d'_I$ 为光栅I的周期。对光栅II来说,+2级衍射的光栅方程为

$$d'_{II} (\sin \theta + \sin \theta) = d'_I (\sin \theta + \sin \theta) = 2\lambda, \quad (4)$$

式中 $d'_{II}$ 为光栅II的周期。于是经过两次衍射后,输入脉冲仍然会沿原路返回,压缩效果完全相同。

这两种结构都可用,关键是如何将光栅效率提高。为此,实验制作了多台阶光栅以模拟闪耀光栅,并将这种光栅用于倍密度光栅结构进行飞秒脉冲的压缩。

## 3 光栅制作及脉冲压缩

利用二元光学湿法套刻技术,制作了不同周期的四台阶光栅,每个台阶的深度控制在100 nm左右,从而对中心波长为800 nm的入射脉冲,实现-1级的高效率衍射。具体制作过程包括制作流程的改进,对准误差的弥补等<sup>[14]</sup>。图2(a),(b)分别给出了周期为20 μm和40 μm的四台阶光栅的扫描图像,在此表面镀上金膜用作反射式光栅,得到衍射效率(中

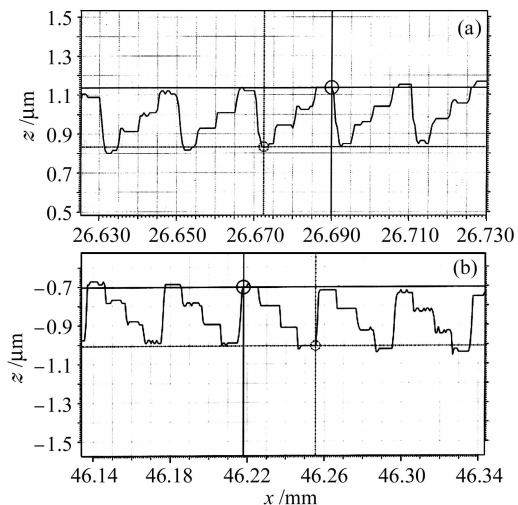


图2 周期分别为20 μm(a)和40 μm(b)四台阶反射光栅的表面形态

Fig. 2 Surface profiles of the reflective four-level gratings with periods of 20 μm (a) and 40 μm (b)

心波长为800 nm)略高于70%,比一般二台阶光栅的一级衍射效率(约40%)高出许多。金膜的损伤阈值在入射脉冲波长为800 nm时大约0.15 J/cm<sup>2</sup>。

采用两种光栅进行飞秒脉冲压缩实验,首先输入脉冲由掺钛蓝宝石飞秒激光谐振腔 Mira-Seed (Coherent 公司, Verdi 6 抽运)产生,重复频率为76 MHz,中心波长为810 nm。利用频率分辨光学开关装置(FROG)<sup>[15]</sup>可以测量脉冲时域和谱域的各种信息。输入脉冲的时谱图及时域强度与相位曲线分别如图3(a)和(c)所示。其中脉冲宽度(半峰全宽)为66.8 fs,光谱宽度为20.7 nm。

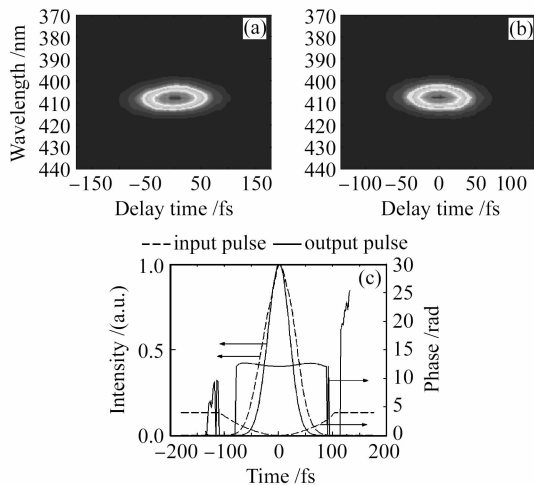


图3 输入脉冲(a)和输出脉冲(b)的频率分辨光学开关装置时谱图,以及计算得到的脉冲时域强度和相位(c)

Fig. 3 FROG traces of the input pulse (a) and the output pulse (b), and retrieved intensity and phases in the time domain

很明显,输入脉冲的相位为弯曲的曲线,因此具有啁啾,经计算得到啁啾量为 $3.2 \times 10^{-4}$  rad/fs<sup>2</sup>。为了补偿脉冲所携带的群速色散,利用自制的周期为20  $\mu\text{m}$ 和40  $\mu\text{m}$ 的四台阶光栅,组成倍密度光栅对进行脉冲压缩。光栅间距 $L$ 约为65 cm。实验中为了将输入脉冲和输出脉冲分开,把光栅 I 和 II 在竖直方向上倾斜了一个很小的角度。压缩后的脉冲仍用频率分辨光学开关装置进行测量,如图3(b),(c)所示,脉冲宽度压缩至46.6 fs,这与理论计算的傅里叶变换极限脉宽46.5 fs非常接近(将 $\tau = 66.8$  fs,  $b = 3.2 \times 10^{-4}$  rad/fs<sup>2</sup>代入(2)式即可得到理想情况下的出射脉冲宽度)。从图3(c)也可以明显地看出脉冲被压缩,同时相位也变得比较平坦,表明线性啁啾基本得到补偿。

实验表明,与二台阶光栅相比,多台阶光栅可以显著地提高装置效率,只是仍然比棱镜对的效率低

很多。为了实现无空间啁啾的脉冲压缩,棱镜对需要经过9次折射或反射<sup>[11,12]</sup>,而光栅对只需要经过3次反射衍射,如果能进一步提高光栅效率,即使单个光栅的效率不如棱镜高,整个光栅对装置的效率却可能接近棱镜对。目前腔内色散补偿使用最多的仍然是棱镜对<sup>[16]</sup>,虽然啁啾镜也有使用<sup>[17]</sup>,但较昂贵。因此,只要能制作出高质量的闪耀光栅,再加上反射式光栅对结构简单、易调节、无材料色散等优点,多台阶反射式光栅对可以替代棱镜对,成为实现飞秒激光腔内色散补偿和腔外脉宽压缩的另一种技术途径。

## 4 结 论

利用基于多台阶反射式光栅的飞秒脉冲压缩装置,将带有正啁啾的输入脉冲压缩为接近傅里叶变换极限的脉冲。在实现脉冲压缩的同时,也降低了装置的能量损耗。实验验证了多台阶光栅对进行飞秒脉冲压缩在实际应用中的可行性。经过分析证明,即使单个光栅的效率不如棱镜,整个装置的效率却仍有可能接近棱镜对,因此考虑到无材料色散的优点,基于反射式光栅的飞秒脉冲压缩装置将可能成为不同于棱镜对的飞秒激光腔内和腔外压缩的另一种技术途径。

## 参 考 文 献

- 1 E. B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE-5**:454~458
- 2 Donna Strickland, Gerard Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3):219~221
- 3 P. Maine, D. Strickland, P. Bado *et al.*. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**:398~403
- 4 Igor Jovanovic, Brian J. Comaskey, Christopher A. Ebbers *et al.*. Optical parametric chirped-pulse amplifier as an alternative to Ti:sapphire regenerative amplifiers [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15):2923~2929
- 5 Deng Qinghua, Peng Hansheng, Zhang Xiaomin *et al.*. New method of chirped-pulse spectrum shaping using phase mismatched optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):354~359  
邓青华,彭翰生,张小民等. 光学参变啁啾脉冲放大相位失配啁啾脉冲频谱整形新方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):354~359
- 6 Gao Yanxia, Zhao Gaiqing. Optical parametric amplification in periodically poled LiNbO<sub>3</sub> for high energy perawatt laser system front end [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1092~1095  
高艳霞,赵改清. 用于高能拍瓦激光系统前端的周期极化LiNbO<sub>3</sub>光参量放大[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1092~1095
- 7 Guowei Li, Changhe Zhou, Enwen Dai. Splitting of femtosecond laser pulses by using a Dammann grating and compensation gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**

(4):767~772

- 8 Enwen Dai, Changhe Zhou, Guowei Li. Dammann SHG-FROG for characterization of the ultrashort optical pulses [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16):6145~6152
- 9 Bing Bai, Changhe Zhou, Enwen Dai *et al.*. Generation of double pulses in-line by using reflective Dammann gratings [J]. *Optik*, 2008, **119**:74~80
- 10 O. E. Martinez, J. P. Gordon, R. L. Fork. Negative group-velocity dispersion using refraction [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1984, **1**(10):1003~1006
- 11 O. E. Martinez. Grating and prism compressors in the case of finite beam size [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(7):929~934
- 12 R. L. Fork, O. E. Martinez, J. P. Gordon. Negative dispersion using pairs of prisms [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(5):150~153
- 13 Jiangjun Zheng, Changhe Zhou, Enwen Dai. Double-line-density gratings structure for compression and generation of double femtosecond laser pulses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(4):979~984
- 14 Jia Wei, Zhou Changhe, Dai Enwen *et al.*. Fabrication of low-density blazed gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):183~186
- 贾伟,周常河,戴恩文等.低密度台阶型闪耀光栅的制作[J].*中国激光*, 2008, **35**(2):183~186
- 15 Rick Trebino. Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulsed [M]. Kluwer Academic Publishers, 2002
- 16 D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60-fsec pulse generation from a self-mod-locked Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1):42~44
- 17 G. Steinmeyer. Femtosecond dispersion compensation with multilayer coatings: toward the optical octave [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(7):1484~1490

## “Code-V”杯光学设计大赛暨论坛

由中科院上海光学精密机械研究所主办的光学设计高级讲习班旨在提升我国光学设计人员的设计思想和理念,培育光学大师,目前安排的课程有光学系统设计、光机系统设计、光学薄膜、光学加工等。该高级讲习班自2004年由王之江院士提议举办以来,已连续成功举办四届。第五届光学设计高级讲习班将在2008年10月举办,同期将举办首届全国光学设计大赛和首届光学设计论坛,《激光与光电子学进展》(核心期刊)也将在论坛期间出版“光学设计”专刊。欢迎广大从事光学设计的人员踊跃参加。

### 主办单位:

中国科学院上海光学精密机械研究所

### 冠名单位:

Optical Research Associates

### 承 办:

光学期刊联合编辑部

### 组织委员会

#### 共主席:

王之江 院士 中国科学院上海光学精密机械研究所

薛鸣球 院士 苏州大学

朱健强 研究员 中国科学院上海光学精密机械研究所

#### 副主席:

徐文东 研究员 中国科学院上海光学精密机械研究所

Robert S. Hilbert 总裁 美国 Optical Research

Associates 公司

王涌天 教授 北京理工大学

范志刚 教授 哈尔滨工业大学

岑兆丰 教授 浙江大学

邢廷文 研究员 成都光电技术研究所

#### 委员:

杜春雷 成都光电技术研究所

孟军和 天津航技术物理研究所

沈为民 苏州大学

王小鹏 西安应用光学研究所

翁志成 长春光学精密机械与物理研究所

张 新 长春光学精密机械与物理研究所

赵葆常 西安光学精密机械研究所

金 宁 昆明物理研究所

张国瑞 北京空间机电技术研究所

杨长城 华中光电技术研究所

李 林 北京理工大学

曾吉勇 凤凰光学(上海)有限公司

王文鉴 舜宇光学科技(集团)有限公司

### 日程安排

公布参赛试题:2008年8月10日

提交参赛作品:2008年9月10日~10月10日

检验参赛作品:2008年10月11日~25日

颁奖典礼暨光学设计论坛:2008年10月29日

### 奖项设置

奖 项	奖金金额
光学设计第一名	5000 元
光学设计第二名	3000 元
光学设计第三名	2000 元
光学设计第四~第十名	1000 元

所有参赛代表均可免费参加首届光学设计论坛及首届光学设计大赛颁奖典礼,与顶级光学设计专家面对面交流。

详情请咨询(中国光学期刊网www.opticsjournal.net)

中国科学院上海光学精密机械研究所 光学设计高级讲习班筹备组

段家喜 编辑

电话/传真:021-69918426/021-69918098

E-mail: duanjiaxi@siom.ac.cn