

# 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究

李朝明 吴建宏 陈新荣 胡祖元 钱国林

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 脉冲压缩光栅是激光约束核聚变系统中的重要光学元件。随着激光约束核聚变工程的快速发展,对光栅的口径要求越来越大。全息技术是制造大口径脉冲压缩光栅的重要手段,其制作的光栅大小受限于记录光学系统口径。为了制造出超大口径的脉冲压缩光栅,提出了一种采用多次曝光拼接技术制作大口径脉冲压缩光栅的方法。该方法采用参考光栅作为检测元件,利用其再现的光学特性,以检测记录干涉光场与已记录光栅之间位相匹配情况,并利用条纹锁定系统控制记录干涉光场的相位,实现光学拼接制作大口径脉冲压缩光栅的目的。开展了 1740 lp/mm 光栅拼接实验研究,拼接对准精度优于 30 nm。

**关键词** 光栅;拼接;叠栅条纹;脉冲压缩

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092907.1943

## Research on the Multi-Exposure Method to Fabricate Pulse Compression Mosaic Grating

Li Chaoming Wu Jianhong Chen Xinrong Hu Zuyuan Qian Guolin

(Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract** Pulse compression grating plays very important role in the laser confinement fusion system. Along with the development of laser confinement fusion project, more and more large aperture gratings are needed. Holographic technology is very important means to manufacture large aperture gratings, but the aperture of gratings is limited by the recording system. In order to create large aperture pulse compression grating, the method by several times exposure to fabricate large aperture mosaic gratings is investigated in this paper. The method use a reference grating as a detecting devices to test the phase matching situation between the recording light wave and the recorded grating. By using stripes locking system to control the phase of light wave, the goal of manufacture large aperture compression mosaic grating will be achieved. At last, the mosaic grating experiment is studied. The grating frequency is 1740 lp/mm and the alignment accuracy is better than 30 nm.

**Key words** grating; mosaic; Moire fringe; pulse compression

## 1 引言

随着激光脉冲啾啾脉冲放大技术(Chip Pulse Amplification-CPA)的应用,获得更高能量、更高强度的超短脉冲激光成为可能。在惯性约束核聚变快点火方面,根据科学界目前的分析和认识,需要在 ps 甚至 fs 激光脉宽内输出几十至几百 kJ 激光能量来引发快点火过程。要在如此短的脉宽时间内实现如此高的脉冲能量输出,大型脉冲压缩系统至关重

要。脉冲压缩系统核心元件之一是大口径脉冲压缩光栅(Pulse Compression Grating, PCG)。惯性约束核聚变的激光装置,其压缩系统和靶区都非常庞大,为满足系统要求,要求压缩系统的关键元件(压缩光栅)在米量级。目前多层介质膜(MLD)<sup>[1,2]</sup>全息光栅是能达到压缩系统使用要求的最有潜力的一种光栅,但是该光栅的制备非常困难,很难加工到大尺寸水平(一般均小于 1 m)。

**收稿日期:** 2008-10-12; **收到修改稿日期:** 2008-11-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(60808013)、江苏省高校自然研究计划(08KJB140009)、江苏省高校省级重点实验室开放课题(KJS0804)和江苏省高校自然重大基础研究(07KJA51002)资助项目。

**作者简介:** 李朝明(1975—),男,博士,主要从事光学设计与光信息处理等方面的研究。E-mail: chaoming@suda.edu.cn

全息技术是制造大口径衍射光栅十分重要的技术手段,用此手段制作的衍射光栅,其口径受限于全息记录光学系统口径。为了制造出超大口径的全息光栅,人们希望采用多块光栅拼接的方式实现大面积全息光栅的制作<sup>[3,4]</sup>。大面积全息光栅的获得可以采用全息曝光拼接和机械拼接两种方法。目前,机械拼接方法<sup>[5~9]</sup>很难保证光栅拼接完成后长时间的稳定性,这将限制其工程使用。而采用全息曝光拼接方法制作的大面积全息光栅稳定性好<sup>[10]</sup>,工程实用性更强。全息曝光拼接的要点在于两次记录光栅的栅线密度相等,栅线平行,且栅线相位必须一致。

为实现大口径全息光栅的制作,本文提出了一种利用参考光栅检测记录干涉场的相位以实现各子光栅相位匹配的方法,采用全息曝光拼接技术获得了大面积全息光栅。

## 2 基本原理

### 2.1 全息曝光干涉光场相位的检测

两块在  $x$  方向周期分别为  $d_1$  和  $d_2$  的光栅,其振幅透射率分别为<sup>[11]</sup>

$$\tau_1 = 1 + \cos\left(2\pi \frac{x}{d_1}\right) = 1 + \cos(2\pi f_1 x) = 1 + \cos(2\pi m_1), \tag{1}$$

$$\tau_2 = 1 + \cos\left(2\pi \frac{x}{d_2}\right) = 1 + \cos(2\pi f_2 x) = 1 + \cos(2\pi m_2), \tag{2}$$

其中  $m_1$  和  $m_2$  是相应的光栅线条的序数,并有  $m_1 = f_1 x, m_2 = f_2 x$ 。

用强度为  $\varphi_0$  的平面光波通过这两块相叠合的光栅,透射光的强度为

$$\varphi = \varphi_0 \tau_1 \tau_2 = \varphi_0 \left\{ 1 + \cos(2\pi m_1) + \cos(2\pi m_2) + \frac{1}{2} \cos[2\pi(m_1 + m_2)] + \frac{1}{2} \cos[2\pi(m_1 - m_2)] \right\}.$$

式中第一项为平均光强度,第二、三项呈现的是原光栅的周期性结构,第四项为和频项,构成高条纹密度的等和条纹,第五项为差频项,表现为低条纹密度的等差条纹,即叠栅条纹。相应的等和条纹和等差条纹的序数方程为

$$p = m_1 + m_2, q = m_1 - m_2. \tag{3}$$

如两块光栅周期相同,均为  $d_0$ ,光栅栅线方向与  $y$  轴的夹角分别为  $\alpha$  和  $-\alpha$ ,相应的刻线方程为

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha = m_1 d_0, \tag{4}$$

$$x \cos \alpha - y \sin \alpha = m_2 d_0. \tag{5}$$

等差条纹的序数方程为

$$\frac{2 \sin \alpha}{d_0} y = m_1 - m_2 = q. \tag{6}$$

根据叠栅条纹的性质,即:如果一个光栅不动(定光栅),移动另一个光栅(动光栅),则等差条纹会移动,若其移动一个条纹间距,等差条纹亦相应移动

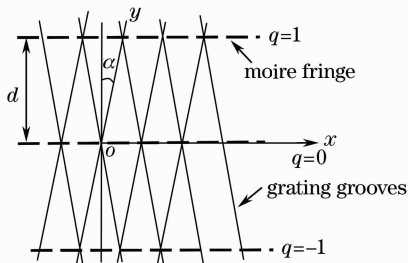


图 1 叠栅条纹示意图

Fig. 1 Sketch of Moire fringes

### 2.2 全息曝光拼接方法

全息曝光拼接方法的核心是:利用参考光栅(定光栅)与全息曝光干涉场(即记录光场,动光栅)形成叠栅条纹,通过检测两次曝光过程中形成的两套叠栅条纹空间分布的一致性实现在大口径全息记录干板上的光学拼接。

具体过程如下:

1) 将用于制作参考光栅的记录干板放置在全息记录干板前方中部,如图 2 所示,其高度与待拼接的主光栅高度相当。仅对参考光栅记录干板进行

一个条纹间距。叠栅条纹的疏密(条纹间距  $d$ )与两光栅之间的夹角  $\theta = 2\alpha$  相对应,如图 1 所示。

由以上分析可见,可以由叠栅条纹的分布推断出光栅移动的情况,亦即光栅相位变化的情况。

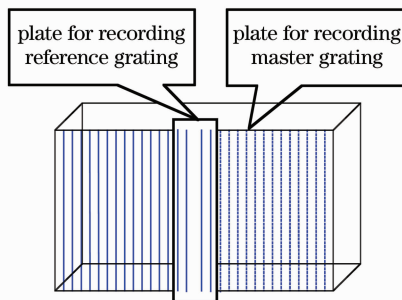


图 2 全息曝光拼接示意图

Fig. 2 The sketch map of mosaic grating with holographic exposure

曝光、显影,完成参考光栅的制作。

2) 将参考光栅放回原位,如图 3 所示。调节曝光支架使参考光栅与记录光场之间形成较疏的叠栅条纹,微调物光星点 1 的位置使叠栅条纹的方向与参考光栅栅线方向垂直如图 4 所示,并用 CCD 记录下第一套叠栅条纹,如图 4 中的(a)所示。通过图像处理分析叠栅条纹的密度以及初相位信息。

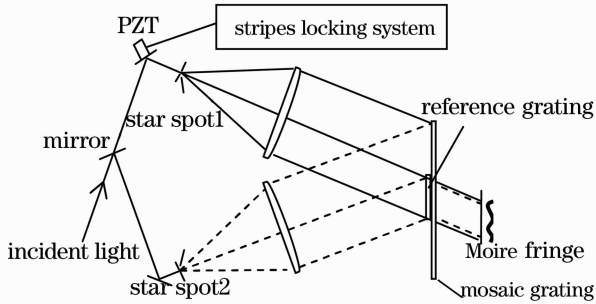


图 3 大口径光栅全息曝光拼接制作系统示意图  
Fig. 3 System of fabricating large scale grating with holographic exposure mosaic technology

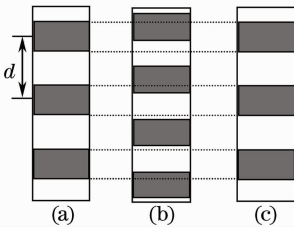


图 4 参考光栅与记录光场形成的叠栅条纹示意图  
Fig. 4 The Moire fringes produced by reference grating and the recording light field

3) 对主全息干板的左半边曝光,右半边不曝光。  
4) 随后将主全息干板连同参考光栅一起移动,使主干板的右半部分移动到记录光场中。此时可以观察到参考光栅与记录光场之间形成的另一套叠栅条纹,如图 4 中的(b)所示,该叠栅条纹的间距以及相位与第一套叠栅条纹会存在一定的差异。

5) 调节曝光记录支架,并利用条纹锁定系统控制第二套叠栅条纹的相位,使其与第一套叠栅条纹信息一致,如图 4 中的(c)所示。条纹锁定系统是通过控制图 3 中反射镜 1 的前后移动,实现光程调节,达到位相控制的目的。

6) 对主全息干板右半部分曝光,完成全息曝光拼接光栅制作过程。

### 3 光栅全息曝光拼接误差分析

在通过两次曝光实现光栅拼接过程中,需要移

动主全息记录干板的基底,由此,基底将发生平动、水平旋转、垂直旋转、俯仰变化等变化。这些微小变化导致两次曝光出的子光栅条纹之间存在水平对准误差、条纹倾斜,条纹密度相对误差等。以下逐一分析这些误差对拼接精度的影响以及解决办法。

拼接光栅运动自由度情况如图 5 所示。当主全息记录干板绕 X 轴旋转,在平行光光路中,光栅的空频不发生变化。设光栅的空间频率为 1740 lp/mm,每次曝光的光栅长度为 400 mm,宽度为 300 mm,记录波长  $\lambda$  为 0.4131  $\mu\text{m}$ 。

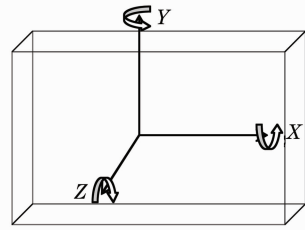


图 5 拼接光栅运动自由度示意图

Fig. 5 Freedom degrees of movement of the mosaic garting

当主全息记录干板绕 Y 轴旋转,记录光的入射角将发生变化,相应所记录的光栅空频将发生变化。光栅空频  $f$  由下式决定:

$$\sin\theta_o - \sin\theta_e = f\lambda. \tag{7}$$

基片绕 Y 轴转动量对光栅的空频将产生影响,随着光栅长度的增加,空频变化被将累积,其衍射产生的像差  $w$  为

$$w = \Delta f \times l, \tag{8}$$

其中  $l$  为曝光区的长度, $\Delta f$  为两次曝光的空频差。绕 Y 轴转动量  $\beta$  对光栅衍射像差的影响见图 6。当 Y 轴转动量被控制在  $0.02^\circ(72'')$  以内时,光栅的波象差增加  $0.05\lambda$ 。这一个角度的偏移是容易控制的。

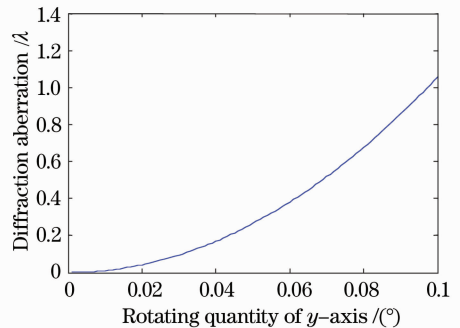


图 6 y 轴转动量与光栅衍射波像差的关系

Fig. 6 Relationship between the rotating quantity of y-axis and diffractive aberration

图 7 给出了两次曝光中星点在子午面内发生相对移动时对制作光栅的影响。图中可以看出,当星点

相对移动量大于  $0.3 \mu\text{m}$  时将产生  $0.1\lambda$  的像差。

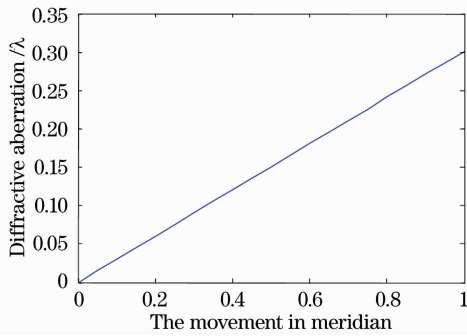


图 7 星点在子午面内的移动量与光栅衍射波像差的关系  
Fig. 7 Relationship between the movement in meridian plane and diffractive aberration

当主全息记录干板绕  $z$  轴旋转时,其第二次记录的光栅与第一次记录的光栅有一定的角度。假设基片绕  $z$  轴转动量控制在  $1''$ ,曝光区宽度  $300 \text{ mm}$ ,主全息记录干板的转动量为  $1.5 \mu\text{m}$ ,光栅条纹间距为  $0.575 \mu\text{m}$ ,产生的波像差为  $2.6\lambda$ 。这是一个比较大的量,必须矫正。由叠栅条纹的原理可知,此时记录光场与参考光栅之间形成的叠栅条纹,理论上将相差约  $2.6$  个条纹。

#### 4 拼接实验结果

根据上述提出的全息曝光拼接方法,在口径为  $80 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$  的全息记录基片上开展了空频为  $1740 \text{ lp/mm}$  的光栅拼接实验。拼接后光栅的一级衍射干涉条纹分布如图 8 所示。

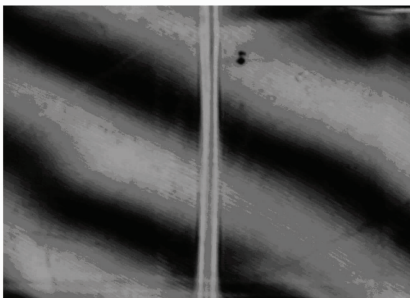


图 8 拼接光栅干涉条纹分布照片

Fig. 8 The photo of interference fringe of mosaic grating

从干涉图中可以判断出,光栅的左半边条纹与右半边的条纹相位连续性很好。经 Zygo 干涉仪检测,拼接精度优于  $1/20$  周期,即  $30 \text{ nm}$ 。实验结果表明,上述的全息曝光拼接方法切实可行,可以达到相当高的拼接精度。

#### 参 考 文 献

- Wei H B, Li L F. All-dielectric reflection gratings: a study of the physical mechanism for achieving high efficiency[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(31): 6255~6260
- Li L, Hirsh J. All-dielectric high-efficiency reflection gratings made with multilayer thin-film coatings[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11): 1349~1351
- Tetsuo H. Far-field pattern analysis for an arrayed grating compressor[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4A): 1362~1365
- Kessler T J, Bunkenburg J, Huang H. Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high energy chirped pulse amplified lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(6): 635~637
- Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. Effect of Tiling gratings errors on laser beam spatial distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 161~165  
马雪梅,戴亚平,朱健强. 拼接光栅的偏差对光束空间特性的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 161~165
- Zuo Yanlei, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua. Far-field analysis of ultrashort pulse through the tiled gratings[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9): 1323~1327  
左言磊,魏晓峰,朱启华. 超短脉冲通过拼接光栅的远场分析[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(9): 1323~1327
- Zuo Yanlei, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Design of an arrayed grating compressor based on far-field[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1619~1624  
左言磊,魏晓峰,朱启华等. 基于远场的拼接光栅压缩池的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(10): 1619~1624
- Lijiang Zeng, Lifeng Li. Method of making mosaic gratings by using a two-color heterodyne interferometer containing a reference grating[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 152~154
- Yao Hu, Lijiang Zeng, Lifeng Li. Method to mosaic gratings that relies on analysis of far-field intensity patterns in two wavelengths[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **26**(2): 285~290
- Lijiang Zeng, Lifeng Li. Optical mosaic gratings made by consecutive, phase-interlocked, holographic exposures using diffraction from latent fringes[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(9): 1081~1083
- Yu Meiwen. *Optical Holography and Its Application*[M]. Beijing Institute of Technology Press, 1996. 402~407  
于美文, *光全息学及其应用*[M]. 北京理工大学出版社, 1996. 402~407