

# 1700 线/mm 镀金光栅的拼接理论和实验研究 \*

左言磊<sup>1,2)</sup> 魏晓峰<sup>1)</sup> 朱启华<sup>1)</sup> 刘红婕<sup>1)</sup> 王道<sup>1)</sup> 黄征<sup>1)</sup> 郭仪<sup>1)</sup> 应纯同<sup>2)</sup>

1) 中国工程物理研究院, 绵阳 621900

2) 清华大学工程物理系, 北京 100084

(2006 年 11 月 9 日收到 2007 年 1 月 25 日收到修改稿)

提出了一个能够实时地监控拼接光栅状态的方案, 理论上论证了氦氖光不能用来实时监控 1740 线衍射光栅的光栅拼接实验, 提出了一种选择监控光波长的方法, 使得拼接光栅的各种误差对于主光束和监控光的影响是一致的, 并且通过实验进行了验证。

关键词: 拼接光栅, 刻线密度误差, 实时监控, 光栅对压缩池

PACC: 4225B, 4225F

## 1. 引 言

近年来, 世界上一些激光聚变演示装置上纷纷设计和建设千焦耳、拍瓦量级的皮秒激光装置以演示快点火实验<sup>[1,2]</sup>, 如美国利弗摩尔实验室的 NIF, 罗彻斯特大学的 OMEGA, 法国的 LMJ, 日本大阪大学的 GEKKO。由于用于脉冲压缩的衍射光栅的损伤阈值有限, 要求光栅的尺寸足够大, 约为 1~2 m<sup>[3,4]</sup>。目前可获得的最大的商业介质膜光栅包括法国 Jobin-Yvon 公司的 45 cm × 42 cm 口径光栅以及美国利弗摩尔实验室的 83 cm × 42 cm 口径光栅, 因此, 很多实验室都在进行将小口径光栅相干拼接为单光栅的研究<sup>[5~8]</sup>。

前面的实验<sup>[5]</sup>显示, 环境因素如温度改变以及空气震动等都会影响拼接光栅的状态, 因此建立一套实时监控的设备是必需的。由于某些拼接误差如刻线密度误差和错位误差等对光束的影响是依赖于波长和入射角的, 因此它们对主光束(一般为 1053 nm)与监控光的影响不一致。本文提出了一种在线监控的方案, 在该方案中, 所有拼接误差对监控光和主激光的影响完全一致, 并通过实验进行了论证。

## 2. 拼接误差对光束的影响

图 1 为光栅拼接过程中存在的各种误差示意

图 1 光栅母线方向为竖直方向。定义拼接误差如下: shift(x 方向偏移), piston(z 向偏移), tip(绕 x 轴的相对旋转), tilt(绕 y 轴的相对旋转), twist(绕 z 轴的相对旋转), 以及光栅刻线宽度误差  $\Delta d$  (图中未标出)。

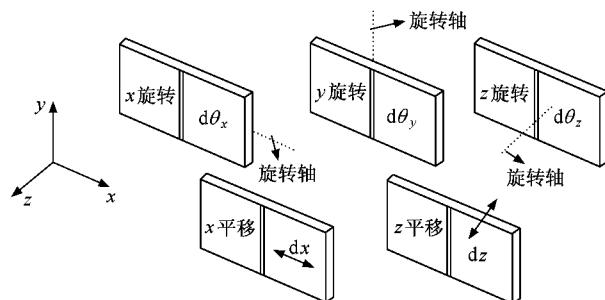


图 1 光栅拼接误差类型示意图

上述 6 种拼接误差对失调子光束的影响包括附加相位延迟  $\phi$ , 附加角度偏转  $\epsilon_x$  和  $\epsilon_y$ , 其表达式分别为

$$\begin{aligned}\phi &= \left[ dz \cdot (\cos\alpha + \cos\beta) - dx \cdot \frac{\lambda}{d} \right] \cdot \frac{2\pi}{\lambda}, \\ \epsilon_x &= \frac{\Delta d}{d^2} \cdot \frac{\lambda}{\cos\beta} - d\theta_y \cdot \frac{\cos\alpha + \cos\beta}{\cos\beta}, \\ \epsilon_y &= d\theta_x \cdot (\cos\alpha + \cos\beta) - d\theta_y \cdot (\sin\alpha + \sin\beta),\end{aligned}\quad (1)$$

其中,  $dz, dx$  分别是沿  $z$  和  $x$  方向的平移误差值;  $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$  分别是绕  $x, y, z$  轴旋转的角度误差值;  $\Delta d$  为两拼接光栅之间的刻线宽度误差值,  $\alpha, \beta$  分

\* 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号:2006AA84502)和高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室项目(批准号:9140C6803010702)资助的课题。

† E-mail: zuoyanlei@tsinghua.org.cn

别为入射角和衍射角。在实际的光栅拼接实验中，只有刻线宽度误差  $\Delta d$  本身是不能调整的，而光栅拼接本身对刻线宽度误差的容限很小，约为  $10^{-3}$  线/mm，这在光栅加工过程中是很难做到的，因此它必需与角度旋转误差  $d\theta_y$  进行配对补偿<sup>[6]</sup>。通过分析(1)式中  $\epsilon_x$  表达式可以看出，刻线宽度误差对光束角偏  $\epsilon_x$  的影响依赖于光束的波长和衍射角，所以刻线宽度误差对于主光束(1053 nm)和监控光的影响一般是不一致的，给实时监控带来了难度。

### 3. 如何选择监控光的波长和入射角

为了满足“拼接光栅对监控光和主光束影响一致”这一条件，必需有下式成立：

$$\begin{aligned}\epsilon_{x1} = 0 &\Rightarrow \frac{\Delta d}{d^2} \cdot \lambda_1 - d\theta_y \cdot (\cos\alpha_1 + \cos\beta_1) = 0, \\ \epsilon_{x2} = 0 &\Rightarrow \frac{\Delta d}{d^2} \cdot \lambda_2 - d\theta_y \cdot (\cos\alpha_2 + \cos\beta_2) = 0, \\ \sin\alpha_1 + \sin\beta_1 &= \lambda_1/d, \\ \sin\alpha_2 + \sin\beta_2 &= \lambda_2/d,\end{aligned}\quad (2)$$

其中  $\epsilon_{x1}, \epsilon_{x2}$  分别为主光束和监控光束在  $x$  方向的角偏  $\alpha_1, \beta_1$  和  $\alpha_2, \beta_2$  分别是主光束和监控光束对应的入射角和衍射角； $\lambda_1, \lambda_2$  分别为主光束和监控光束的波长。值得注意的是，由(2)式中前两式可以得到  $\frac{\cos\alpha_1 + \cos\beta_1}{\lambda_1} = \frac{\cos\alpha_2 + \cos\beta_2}{\lambda_2}$  成立，因此，拼接光栅对主光束和监控光束的附加相位项即(1)式中第一项的影响是一致的，也就是说，只要监控光和主光束同时满足  $\epsilon_x = 0$ ，那么拼接误差导致的附加相位延迟项将完全相同。 $y$  方向上的角偏  $\epsilon_y$  在实际实验中较容易消除，因此只要监控光的参数满足(2)式，就可以完全描述主光束的状态。目前，世界范围内用于产生拍瓦点火脉冲的衍射光栅都是采用 1740/mm，为了保证衍射效率，一般设计光束的入射角和衍射角接近于利特罗角，典型值为  $\alpha_1 = 71.7^\circ, \beta_1 = 62^\circ$ 。将上述参数代入方程(2)中可得，对于 1740/mm 的拼接光栅，监控光的波长至少应满足  $0.75 \mu\text{m} < \lambda_2 < 1.057 \mu\text{m}$ 。可见，氦氖光( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ )不能用来监控 1740/mm 光栅的拼接实验。

### 4. 实验验证

$G_1$  为单光栅，拼接光栅  $G_2$  由两子光栅  $G_{2a}, G_{2b}$  拼接而成，主光束(1053 nm)经过单程压缩后，经分束镜  $B_2$  进入靶室，透射的部分光经透镜聚焦后利用显微物镜成像在 CCD 的像面上，975 nm 的监控光经分光镜  $B_1$  后，反射光通过全反镜  $M_1, M_2$  后入射到拼接光栅面上，其零级反射光与一级衍射光分别由全反镜  $R_1, R_2$  反射后沿原路返回，经分束镜透射后由透镜聚焦并由显微物镜(图中未画出)成像到 CCD 的像面上。

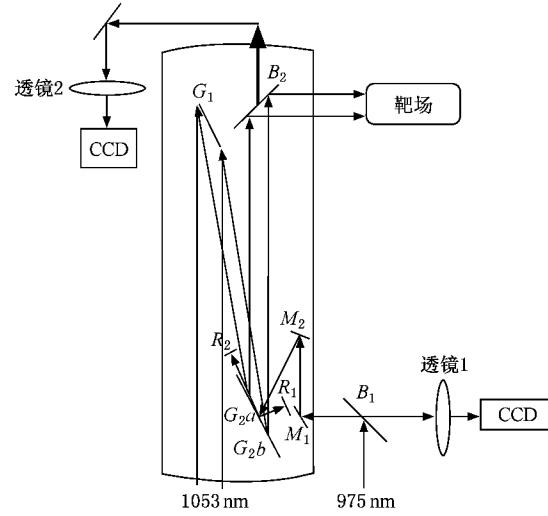


图 2 实时监控的单程拼接光栅压缩器

实验中光束口径为  $\phi = 8 \text{ cm}$ ，采用的光栅为  $18 \text{ cm} \times 11 \text{ cm}$  镀金光栅，刻线密度  $1700/\text{mm}$ ，拼接光栅上主光束的入射角和衍射角分别为  $\alpha_1 = 67^\circ, \beta_1 = 60.4^\circ$ ，监控光  $\lambda = 0.975 \mu\text{m}$ ，根据(2)式，选择监控光的入射角和衍射角分别为  $\alpha_2 = 41^\circ, \beta_2 = 86^\circ$ 。主要调整步骤如下：

- 1) 通过监视 975 nm 光的零级反射光的远场调节两拼接子光栅平行，即(1)式中  $d\theta_x = 0, d\theta_y = 0$ 。
- 2) 利用数字千分表调整拼接子光栅间的错位误差使得  $dz < 10 \mu\text{m}$ ，以满足时域压缩的需要。
- 3) 通过监控主光束远场，调整拼接光栅位置使满足  $d\theta_y = 0, \epsilon_x = 0$ 。
- 4) 通过反复调整反射镜  $M_1, M_2$  以改变 975 nm 入射光的角度，直至 CCD 上看到的 975 nm 的一级衍射光的远场与主光束的远场的状态一致。

经过上述步骤的调整，主光束和监控光束一级衍射光的远场的形态基本能够保持一致，如图 3—6 所示。

图 2 为一个单程拼接光栅压缩器的结构简图。

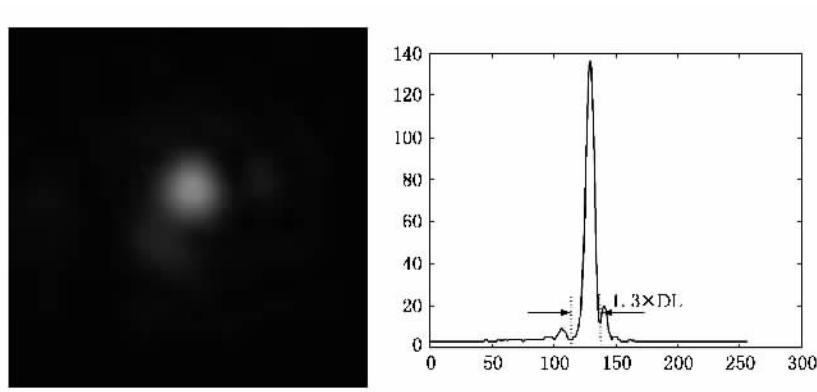


图3 主光束(1053 nm)通过拼接光栅后的远场以及能量分布图

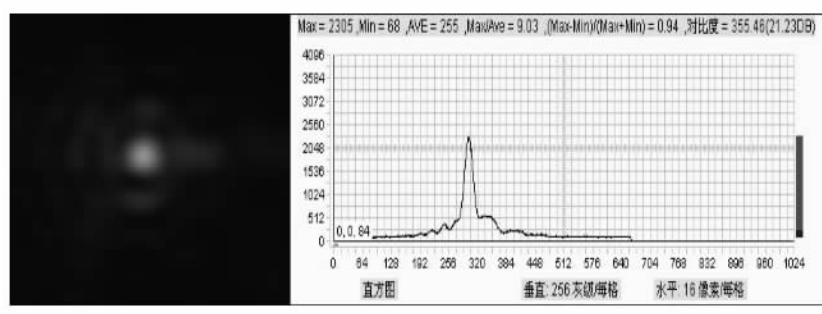


图4 监控光(975 nm)通过拼接光栅后的远场与能量分布图

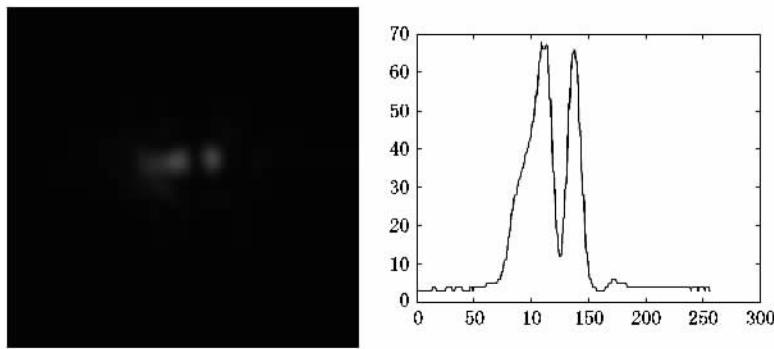


图5 主光束(1053 nm)通过拼接光栅后焦斑分裂时的远场与能量分布图

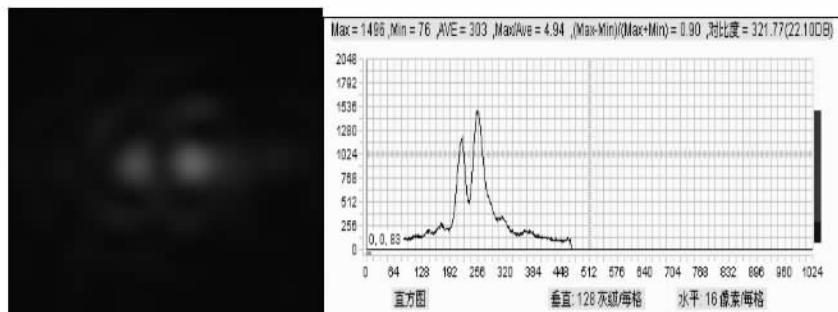


图6 监控光(975 nm)通过拼接光栅后的焦斑分裂时的远场与能量分布图

图 3 和图 4 为监控光和主光束的远场同时为单一焦斑时的远场, 经过标定, 二者焦斑的大小均为约 1.3 倍衍射极限。图 5 和图 6 为监控光和主光束同时产生焦斑分裂时的远场。可见, 当系统处于稳定状态时, 监控光可以完全描述主激光的状态, 即该监控光路可以实时监控拼接光栅的状态。

## 5. 结 论

本文从拼接光栅的误差方程(2)出发, 提出了选择监控光波长和入射角的方法, 并提出了一个可以

实时监控拼接光栅状态的拼接方案; 具体的实验研究表明, 该方案中的监控光确实可以完全描述主激光的状态, 在实验中对于主激光和监控光同时得到了单一焦斑和焦斑分裂的图像。值得注意的是, 拼接光栅的位置受环境因素影响显著, 当拼接光栅的状态产生一个微小的扰动时, 监控光和主激光的状态改变不同步, 经分析发现这是因为图 2 中的监控光路中监控光两次通过拼接光栅引起的。进一步的实验将采用一次通过拼接光栅的方案, 该实验目前还在进行中。

- [1] Bunkenburg J , Kessler T , Skulski W , Huang H 2006 *Opt . Lett .* **31** 1561
- [2] Mima K , Azechi H , Johzaki Y 2005 *Fusion Science and Technology* **47** 662
- [3] Kessler T J , Bunkenburg J , Huang H , Kozlov A , Meyerhofer D D 2004 *Opt . Lett .* **29** 635
- [4] Kong W J , Liu S J , Shen J 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 1143 (the Chinese)[孔伟金、刘世杰、沈健 2006 物理学报 **55** 1143]
- [5] Kessler T J 2004 *LLE REVIEW* **100** 242
- [6] Zeng L J , Li L F 2006 *Opt . Lett .* **31** 152
- [7] Zuo Y L , Wei X F , Zhu Q H et al 2007 *Acta Phys . Sin .* **56** 5227 (in Chinese)[左言磊、魏晓峰、朱启华等 2007 物理学报 **56** 5227]
- [8] Zuo Y L , Wei X F , Wang X , Zhu Q H , Ren R , Huang Z , Liu H J , Ying C T 2007 *Opt . Lett .* **32** 280

# Theoretical and experimental study of grating tiling<sup>\*</sup>

Zuo Yan-Lei<sup>1,2†</sup> Wei Xiao-Feng<sup>1)</sup> Zhu Qi-Hua<sup>1)</sup> Liu Hong-Jie<sup>1)</sup> Wang Xiao<sup>1)</sup>  
Huang Zheng<sup>1)</sup> Guo Yi<sup>1)</sup> Ying Chun-Tong<sup>2)</sup>

1) Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

2) Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

(Received 9 November 2006; revised manuscript received 25 January 2007)

## Abstract

A detailed scheme by which the status of tiled gratings can be inspected in a real-time way is put forward. The He-Ne laser is shown to be inappropriate for the grating-tiling experiment where 1740/mm grating is used. A method is proposed by which the wavelength can be selected for the real-time measurement, so that the impact of all sorts of errors of the tiled gratings on the main beam(1053 nm) and the beam for measurement is completely identical, which has been demonstrated by experiment.

**Keywords** : tiled gratings, groove-width error, real-time inspection, grating-pair compressor

**PACC** : 4225B, 4225F

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA84502) and the Science and Technology Foundation of State Key Laboratory of High Temperature and Density Plasma Physics (Grant No. 9140C6803010702).

† E-mail: zuoyanlei@tsinghua.org.cn