

文章编号: 1001-4322(2007)03-0425-04

## 拼接光栅对压缩系统中的误差补偿\*

张晓亮, 李 钊, 李 铭, 张 彬

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

**摘 要:** 根据失调拼接光栅对压缩系统模型, 推导了拼接误差引起的角色散公式。针对光栅拼接中的转角误差和光栅常数误差, 得到了误差间的相互补偿关系式, 并对补偿方式进行了讨论。研究表明, 绕光栅平面内垂直于刻线方向的转角在一定范围内可以补偿绕光栅厚度方向旋转造成的误差, 绕光栅刻线方向的转角可以补偿光栅常数不同造成的误差, 绕光栅平面内垂直于刻线方向或绕光栅厚度方向的转角在一定范围内也可以补偿由光栅常数不同造成的误差。前两种补偿方式的补偿效果较好。

**关键词:** 光栅拼接; 误差补偿; 压缩系统; 转角误差; 光栅常数误差

**中图分类号:** O436

**文献标识码:** A

近年来, 随着啁啾脉冲放大技术<sup>[1]</sup>的广泛应用, 获得更高能量、更高强度的超短脉冲激光成为可能, 从而给许多领域的研究工作提供了有力的工具, 如超高次谐波产生<sup>[2]</sup>、惯性约束核聚变中的快点火实验<sup>[3]</sup>、实验室天体物理学<sup>[4]</sup>、以及对超快现象的研究<sup>[5]</sup>等。在快点火方面, 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。世界上许多大型的激光装置, 其压缩系统和靶区都非常庞大, 如英国卢瑟福·阿普尔顿实验室的“火神”拍瓦装置<sup>[6]</sup>, 其压缩系统和靶区就占据了一座大楼。因此, 为满足系统要求, 要求压缩系统的关键元件(压缩光栅)在 m 量级。目前, 世界上只有美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)能够制造<sup>[7]</sup>, 但产品制作周期长, 价格极其昂贵, 技术也处于保密状态。为此, 科学家们试图通过光栅拼接的方法来获得大口径光栅<sup>[8-9]</sup>, 即将若干较小的光栅拼成所希望的大口径光栅, 以满足应用要求。然而, 由于系统校准误差的缘故, 拼接光栅不可能做到理想状况, 各子光栅间必定存在失调。已有的研究工作中, Zhang<sup>[10]</sup>等人从限制压缩脉冲脉宽展宽的角度对光栅拼接过程中的各种误差提出了设计要求, 文献[11-13]从远场强度分布的角度研究了拼接光栅的各种误差。然而, 有关拼接光栅对压缩系统中各种失调间互补关系的报道并不多见。

本文针对光栅拼接中的转角误差和光栅常数误差, 推导出误差间的相互补偿关系式, 对拼接光栅对压缩器各种失调间的互补关系进行了讨论。

### 1 拼接光栅对压缩系统失调时的角色散

典型的光栅压缩器是由 2 块平行光栅对组成的。对于拼接光栅对系统来说, 为了达到满意的脉冲压缩效果, 光栅拼接后相互之间也应该平行。本文考虑的拼接光栅对系统由 4 块光栅两两拼接而成, 如图 1 所示。

假设拼接光栅  $G_1$  内两子光栅拼接完好, 不存在误差, 第 2 块拼接光栅  $G_2$  内的子光栅  $G_{2A}$  平行于  $G_1$ , 其光栅常数也与  $G_1$  相等, 那么, 光栅对  $G_1$  和  $G_2$  间的刻线间距误差就可以看作是  $G_1$  和  $G_{2B}$  间的刻线间距误差  $\Delta d$ 。图 1 中, 光栅刻线方向为  $x$  轴, 光栅平面内垂直于刻线方向为  $y$  轴, 垂直于  $x-y$  平面, 即光栅厚度方向为  $z$  轴。 $G_{2B}$  相对于  $G_{2A}$  的平行位置沿顺时针方向旋转一个小角度  $\Delta\xi$ , 光栅对间垂直距离为  $G = A_1B_2$ , 波长为  $\lambda$  的光在光栅  $G_1$  的入射角和衍射角分别为  $\beta_1$  和  $\gamma_1$ 。由于转角  $\Delta\xi$  的存在, 波长  $\lambda$  的光在  $G_{2B}$  的入射角  $\beta_2$  和衍射角  $\gamma_2$  并不等于  $\gamma_1$  和  $\beta_1$ , 并且  $A_1B_2$  不再垂直于  $G_{2B}$ 。假设相应于入射激光束中心波长的距离  $G$  在旋转中不变, 则各倾斜距离就可通过  $G$  来计算。于是, 由图 1 可以得到

$$\beta_2 = \gamma_1 + \Delta\xi \quad (1)$$

对于实际的光栅对压缩器, 除了考虑绕  $x$  方向的转角误差外, 还应该考虑更普遍的情形, 即拼接光栅在任

\* 收稿日期 2006-12-17; 修订日期 2007-03-09

基金项目 四川省青年科技基金资助课题(05ZQ026-013)

作者简介 张晓亮(1982—), 男, 辽宁锦州人, 硕士研究生, 主要从事光栅拼接方面的研究, zxl428120@sohu.com。

意一个方向上存在失调,它将导致色散扭曲,从而影响脉冲压缩。在光栅对压缩器中,失调光栅相对于平行位置可由 3 个转角和 1 个距离来描述,如图 2 所示。

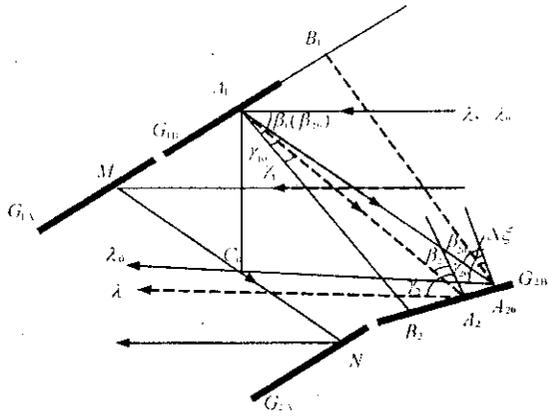


Fig. 1 Schematic of a misaligned tiled grating-pair compressor

图 1 光栅对压缩器存在失调示意图

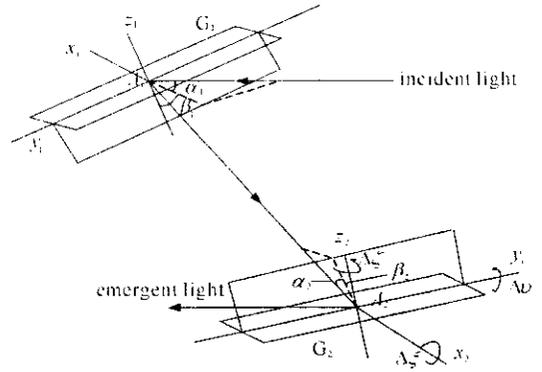


Fig. 2 Schematic of angular errors between G1 and G2

图 2 光栅 G2 与光栅 G1 间有转角误差示意图

绕  $x_2$  轴的转角为  $\Delta\xi$ , 绕  $y_2$  轴的转角为  $\Delta\zeta$ , 绕  $z_2$  轴的转角为  $\Delta\nu$ .  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为入射光到相应的  $x_1$ - $y_1$  平面倾角  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为光线在  $y_1$ - $z_1$  平面的投影与  $z_1$  轴的夹角。由于转角  $\Delta\xi$ ,  $\Delta\zeta$  和  $\Delta\nu$  的影响,  $\alpha_2$  和  $\beta_2$  角分别可为<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} \sin\alpha_2 = K_1 \sin\Delta\zeta - K_2 \cos\Delta\zeta \\ \tan\beta_2 = -(K_1 \cos\Delta\zeta + K_2 \sin\Delta\zeta) / K_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $K_1 = -\cos\alpha_1 \sin(\beta_0 + \Delta\xi)$ ;  $K_2 = \sin\alpha_1 \cos\Delta\nu + \cos\alpha_1 \cos(\beta_0 + \Delta\xi) \sin\Delta\nu$ ;  $K_3 = \cos\alpha_1 \cos(\beta_0 + \Delta\xi) \cos\Delta\nu - \sin\alpha_1 \sin\Delta\nu$ .  $\beta_0$  为光栅严格平行时 ( $\Delta\xi = \Delta\nu = \Delta\zeta = 0$ )  $\beta_2$  的值。于是, 相应的角色散可以表示为

$$\begin{cases} \frac{d\alpha_2'}{d\lambda} = m_1 [ \sin\Delta\zeta \cos(\beta_0 + \Delta\xi) - \cos\Delta\zeta \sin(\beta_0 + \Delta\xi) \sin\Delta\nu ] / (d_1 \cos\alpha_2 \cos\gamma_1) \\ \frac{d\delta_2'}{d\lambda} = -1 / (\cos\gamma_2 \cos\delta_2') \times \{ [ \sin\alpha_2 (1 + \sin\beta_2 \sin\gamma_2) \chi \frac{d\alpha_2}{d\lambda} ] + \sin\gamma_2 (m_2 / d_2 - \cos\alpha_2 \cos\beta_2 \frac{d\beta_2}{d\lambda}) \} \\ \frac{d\beta_2}{d\lambda} = \cos^2\beta_2 m_1 \{ \cos\alpha_1 \cos\Delta\zeta \cos\Delta\nu - \sin\alpha_1 [ \cos\Delta\zeta \sin\Delta\nu \cos(\beta_0 + \Delta\xi) - \sin\Delta\zeta \sin(\beta_0 + \Delta\xi) ] \} d_1 \cos\gamma_1 K_3^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\alpha_2'$  为第 2 块光栅出射光束方向与  $y_1$ - $z_1$  平面的夹角,  $\delta_2'$  为第 2 块光栅出射光束方向与  $x_1$ - $y_1$  平面的夹角。

分析式(3)可知,由于光栅拼接误差的存在,激光束经过压缩系统后会出现不同程度的角色散,从而对脉冲压缩质量产生不良影响。

## 2 拼接光栅对各种失调间的补偿

由于光栅拼接误差导致的色散扭曲会对脉冲压缩产生影响,因此,在实际工作中需要采取必要措施,尽可能减小光栅拼接误差引起的角色散。于是,令

$d\alpha_2'/d\lambda = 0$  及  $d\delta_2'/d\lambda = 0$ , 可以得到

$$\tan\Delta\zeta = \tan(\beta_0 + \Delta\xi) \sin\Delta\nu \quad (4)$$

$$\frac{m_2}{d_2} = \cos\alpha_2 \cos\beta_2 \frac{d\beta_2}{d\lambda} \quad (5)$$

### 2.1 拼接光栅对失调角间的补偿关系

从(4)式可以看出,当拼接光栅存在绕  $y$  轴旋转误差时,可以通过适当改变绕  $x$  轴和  $z$  轴的转角而得到补偿,且这种情况下的补偿关系与  $\Delta d$  无关。此外,进一步分析(4)式可知,当  $\Delta\zeta = 0$  (无绕  $y$  轴的旋转误差)时,  $\Delta\nu = 0$ , 此时,失调角间无补偿关系。为了直观地分析各角度间的误差

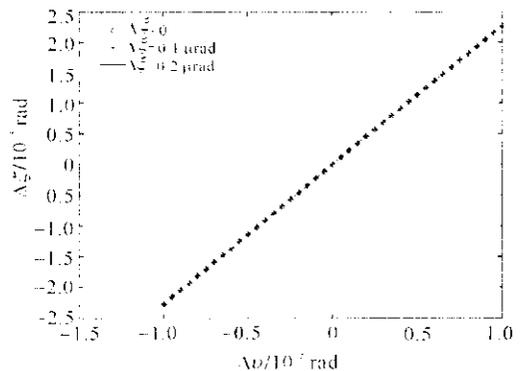


Fig. 3 The compensative relationship between  $\Delta\zeta$  and  $\Delta\nu$  at different  $\Delta\xi$

图 3 不同  $\Delta\xi$  情况下  $\Delta\zeta$  与  $\Delta\nu$  的补偿关系

补偿关系,图3给出了 $\Delta\xi$ 取不同值时 $\Delta\zeta$ 与 $\Delta\nu$ 的补偿关系。计算参数为:光栅刻线数 $1\ 740\ \text{g}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,入射角 $66.5^\circ$ ,波长 $1\ 053\ \text{nm}^{[9]}$ 。

从图3可以看出,当 $\Delta\xi$ 一定时,对于 $\Delta\nu$ 的任何一个变化量 $\Delta\zeta$ 均有相应的值与其对应,且 $\Delta\zeta$ 与 $\Delta\nu$ 几乎呈线性关系。进一步分析图3可知,对于不同的 $\Delta\xi$ , $\Delta\zeta$ 与 $\Delta\nu$ 的补偿关系曲线几乎重合,即是说 $\Delta\xi$ 的取值对 $\Delta\zeta$ 与 $\Delta\nu$ 的补偿关系的影响很小。因此,在实际工作中,如果光栅拼接时存在绕光栅平面内垂直于刻线方向( $y$ 轴)的旋转误差,则可以通过绕光栅厚度方向( $z$ 轴)旋转适当的角度而得到补偿,或者说,可通过绕光栅平面内垂直于刻线方向( $y$ 轴)旋转适当的角度来补偿光栅拼接时存在的绕光栅厚度方向( $z$ 轴)的旋转误差。

### 2.2 拼接光栅对的失调角与光栅常数误差间的补偿关系

考虑入射光线在光栅刻线法平面内,即 $\alpha_1=0$ ,将(2)以及(3)式代入(5)式,在只考虑一级衍射的情况下,可推导出拼接光栅对的失调角与光栅常数误差间的补偿关系式为

$$\frac{d_1 + \Delta d}{d_1} = \frac{\cos\gamma_1 \cos^2(\beta_0 + \Delta\xi) \cos\Delta\nu}{\sqrt{1 - \cos^2(\beta_0 + \Delta\xi)} \frac{(1 - \cos^2\Delta\zeta \cos^2\Delta\nu)^2}{\cos^2\Delta\zeta \sin^2\Delta\nu} \left( \sqrt{\frac{\sin^2\Delta\nu}{\sin^2\Delta\nu + \sin^2\Delta\zeta \cos^2\Delta\nu}} \right)^3 \cos\Delta\zeta} \quad (6)$$

当 $\alpha_1=0$ 时 $\beta_0$ 实质上等于第1块光栅的衍射角 $\gamma_1$ 。(6)式表明,当拼接的光栅间存在光栅常数误差时,原则上可以通过适当绕 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴3个方向的转角 $\Delta\xi$ 、 $\Delta\zeta$ 和 $\Delta\nu$ 得到补偿。

图4给出不同 $\Delta\xi$ 情况下 $\Delta\nu$ 与 $\Delta d/d$ 间的关系曲线。图5给出不同 $\Delta\zeta$ 时 $\Delta\xi$ 与 $\Delta d/d$ 间的关系曲线。图4和5的计算参数与图3相同。

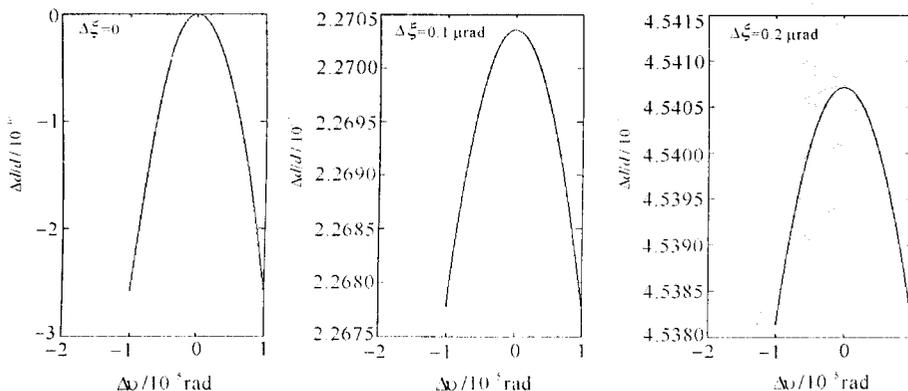


Fig. 4 The compensative relationship between  $\Delta\nu$  and  $\Delta d/d$  at different  $\Delta\xi$

图4 不同 $\Delta\xi$ 情况下 $\Delta\nu$ 与 $\Delta d/d$ 间误差补偿关系曲线

从图4可以看出,当 $\Delta\xi=0$ 时,对于 $\Delta\nu$ 变化范围为 $-1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-5}\ \text{rad}$ ,只能补偿 $\Delta d/d$ 在 $10^{-10}$ 量级的变化量。而当 $\Delta\xi=0.1\ \mu\text{rad}$ 及 $0.2\ \mu\text{rad}$ 时, $\Delta d/d$ 的值在 $10^{-7}$ 量级,且 $\Delta\xi$ 越大,可被补偿的 $\Delta d/d$ 值也越大。由此可见,拼接光栅间的光栅常数误差 $\Delta d/d$ 可通过绕光栅厚度方向( $z$ 轴)旋转得到补偿。同样,由 $\Delta\zeta$ 与 $\Delta\nu$ 的对应关系 $\Delta d/d$ 也可通过适当绕光栅平面内垂直于刻线方向( $y$ 轴)的旋转得到补偿。只是上述补偿方式对 $\Delta d/d$ 的补偿量随 $\Delta\xi$ 的不同变化较为敏感,而随 $\Delta\nu$ 的变化较小,因此,实际应用中并不太适用。

分析图5可知 $\Delta d/d$ 与 $\Delta\xi$ 基本呈线性关系,说明绕光栅刻线方向( $x$ 轴)的转角可以补偿光栅常数不同造成的误差。同时还可以看出,对于不同的 $\Delta\zeta$ , $\Delta d/d$ 与 $\Delta\xi$ 的关系曲线几乎重合,说明 $\Delta d/d$ 与 $\Delta\xi$ 的关系随 $\Delta\zeta$ 的变化不敏感。因此,在实际中可以充分应用这种补偿方式。

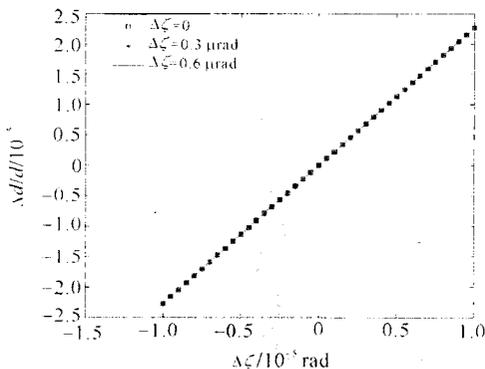


Fig. 5 The compensative relationship between  $\Delta\xi$  and  $\Delta d/d$  at different  $\Delta\zeta$

图5 不同 $\Delta\zeta$ 情况下 $\Delta\xi$ 与 $\Delta d/d$ 间误差补偿关系曲线

### 3 结论

本文针对光栅拼接技术中的几种典型失调误差,给出了误差间的相互补偿关系式,并对补偿方式进行了分

析。经分析得出 绕光栅平面内垂直于刻线方向(  $y$  轴 )的转角在一定范围内可以补偿绕光栅厚度方向(  $z$  轴 )旋转造成的误差 ,或者 绕  $z$  轴的转角在一定范围内可以补偿绕  $y$  轴旋转造成的误差 ;绕光栅刻线方向(  $x$  轴 )的转角可以补偿光栅常数不同造成的误差 ,绕  $z$  轴或  $y$  轴的转角在一定范围内也可以补偿光栅常数不同造成的误差。由于前两种补偿曲线基本成线性关系 ,且补偿范围比较容易控制 ,因此 ,在实际中可以广泛应用。

值得指出的是 ,由于实际的拼接光栅对压缩系统中的误差不可能只有一种 ,因此 ,单纯依靠绕  $y$  轴的转角补偿绕  $z$  轴旋转造成的误差 ,或绕  $x$  轴的转角来补偿光栅常数误差 ,以及绕  $z$  轴的转角补偿光栅常数误差是不够的。当各种误差同时存在时 ,正确的方法是 ,在满足设计所允许的误差范围内 ,尽量使其中的一种或几种误差得到补偿。

## 参考文献 :

- [ 1 ] Perry M D , Mourou G. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers[ J ]. *Science* ,1994 ,**264**( 5161 ) :917-924.
- [ 2 ] Workman J , Maksimchuk A , Liu X , et al. Control of bright picosecond X-ray emission from intense subpicosecond laser-plasma interaction[ J ]. *Phys Rev Lett* ,1995 **75** :2324-2327.
- [ 3 ] Yoneyoshi K , Hisanori F , Ryosuke K , et al. Prepulse-free petawatt laser for a fast ignitor[ J ]. *IEEE J Quantum Electron* ,2004 ,**40**( 3 ) :281-293.
- [ 4 ] Takabe H. Laboratory astrophysics with intense and ultra-intense lasers[ C ]//AIP Conference Proceedings of the International Conference on Super-strong Field in Plasmas. 1996 **3** :560-570.
- [ 5 ] 袁庆华 , 王朝晖 , 朱起鹤 , 等. 用飞秒激光研究溶液中激光燃料分子的超快弛豫[ J ]. *中国激光* ,1996 **23**( 4 ) :349-352. ( Zhong Q H , Wang C H , Zhu Q H , et al. Study of relaxation of laser dye in solution by femtosecond laser. *Chinese J Lasers* ,1996 **23**( 4 ) :349-352 )
- [ 6 ] Danson C N , Needy N , Wyborn B E. Vulcan petawatt upgrade overview[ R ]. *Laser Science and Development-Vulcan Petawatt* ,Central Laser Facility Annual Report 2002/2003 :167.
- [ 7 ] 周志斌 , 肖沙里 , 周宴 , 等. 现代超精密加工技术的概况及应用[ J ]. *现代制造工程* 2005 ( 1 ) :121-123. ( Zhou Z B , Xiao S L , Zhou Y , et al. General situation and application of ultraprecise machining technique. *Modern Manufacturing Engineering* ,2005 ( 1 ) :121-123 )
- [ 8 ] Bunkenburg J , Kessler T J , Skulski W , et al. Phase-locked control of tiled-grating assemblies for chirped-pulse-amplified lasers using a Mach-Zehnder interferometer[ J ]. *Opt Lett* 2006 **31**( 10 ) :1561-1563.
- [ 9 ] Kessler T J , Joachim B , Huang H , et al. Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high-energy chirped-pulse-amplified lasers[ J ]. *Opt Lett* ,2004 **29**( 6 ) :635-637.
- [ 10 ] Zhang T J. An array-grating compressor for high-power chirped-pulse amplification lasers[ J ]. *Opt Commun* ,1998 **145**( 6 ) :367-376.
- [ 11 ] Tetsuo H. Far-field pattern analysis for an array grating compressor[ J ]. *Jpn J Appl Phys* 2004 **43**( 4A ) :1362-1365.
- [ 12 ] 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 Y L , Wei X F , Zhu Q H. Far-field analysis of ultrashort pulse through the tiled gratings. *High Power Laser and Particle Beams* ,2005 ,**17**( 9 ) :1323-1327 )
- [ 13 ] 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. ( Zuo Y L , Wei X F , Zhu Q H , et al. Design of an arrayed grating compressor based on far-field. *High Power Laser and Particle Beams* 2006 **18**( 10 ) :1619-1624 )
- [ 14 ] Treacy E B. Optical pulse compression with diffraction gratings[ J ]. *IEEE J Quantum Electron* ,1969 ,**5**( 9 ) :454-458.

## Compensation methods for alignment errors of tiled grating-pair compressor

ZHANG Xiao-liang , LI Zhao , LI Ming , ZHANG Bin

( College of Electronic Information , Sichuan University , Chengdu 610064 , China )

**Abstract :** Base on the model of grating-pair compressor , the formula of angular dispersion caused by alignment errors was derived. The compensative relations between the tilt angular errors and groove-width difference were obtained and the compensative methods were discussed. The results show that the relative rotation about the position normal to groove can compensate the error caused by the relative rotation about the position normal to the plan of gratings , the relative rotation about the position parallel to groove can compensate the error caused by groove-width difference and the relative rotation about the position normal to groove or about the position normal to the plan of gratings can compensate the error caused by groove-width difference. The compensation effects of the first two methods are proved to be better than the third one.

**Key words :** Tiled gratings ; Error compensation ; Compression system ; Tilt angular errors ; Groove-width difference