

# 光栅拼接旋转误差检测系统

夏 兰<sup>1</sup> 杨学东<sup>1</sup> 徐 光<sup>2</sup> 戴亚平<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)  
(<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 拼接光栅技术是提高高功率激光器输出能量的一条可能途径, 为保障高功率激光器光束时空光束质量, 拼接光栅角度误差必须小于  $0.4 \mu\text{rad}$ , 位移偏差小于  $20 \text{ nm}$ 。为了满足光栅拼接调整系统的高精度高稳定性要求, 设计了光栅拼接旋转角度偏差检测方案用于测量两块相邻光栅之间的相对空间姿态。测量系统测量光束与压缩器主光束同轴, 利用相移式干涉仪测量待测光, 得到若干干涉图样, 通过快速傅里叶变换还原波前得到相邻两块光栅相对空间角度偏差。通过实验验证了检测系统的理论可行性, 目前在小口径光束下精度达到  $0.45 \mu\text{rad}$ 。测量方案结合拼接光栅只需要测量波面倾斜误差的要求, 简化了干涉测量光路及图像分析流程, 有利于光栅拼接技术的工程化应用。

**关键词** 光栅; 介质膜光栅; 拼接误差; 检测系统; 快速傅里叶变换

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0308001

## Tiled-Grating Rotation Detecting Technology

Xia Lan<sup>1</sup> Yang Xuedong<sup>1</sup> Xu Guang<sup>2</sup> Dai Yaping<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai, 201800, China)  
(<sup>2</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China)

**Abstract** Tiled-grating technology is a possible approach to improve the high power laser output energy. For the protection of high-power laser beam temporal and spatial beam quality, stitching error of grating angle must be less than  $0.4 \mu\text{rad}$ , and the piston deviation is less than  $20 \text{ nm}$ . A detecting system is designed to measure the error of rotation angle between tiled-gratings to meet the high accuracy and high stability of the tiled-grating assembly. A phase-shift interferometer is used to measure the detecting beam which is coaxial with the main laser beam, and some interference patterns are gotten and analyzed to reconstruct the wave front. The feasibility of the system has been verified by a series of experiments and the accuracy of the system is  $0.45 \mu\text{rad}$ . Tiled-grating measurement program with only the requirements of wavefront tilt error, which simplifies the optical interferometry and image analysis process, will help grating tiling technology applied in engineering.

**Key words** gratings; multilayer dielectric grating; alignment error; detecting system; fast Fourier transform

**OCIS codes** 230.1950; 140.7090; 230.0040

## 1 引 言

高功率激光系统已经应用到诸如激光惯性约束聚变(ICF)快点火和天体物理等许多领域, 更高功率和更好光束质量的激光条件是这些领域共同的需求。高功率激光驱动器因元器件破坏等原因<sup>[1]</sup>, 需要通过扩大光束口径来提高输出功率。通常的啁啾脉冲放大激光器通过啁啾脉冲展宽、放大、压缩得到

高功率短脉冲激光<sup>[2,3]</sup>, 而激光器扩大光束口径受到光栅压缩器尺寸的限制。目前介质膜光栅的破坏阈值为  $1\sim 2 \text{ J/cm}^2$ <sup>[4]</sup>, 因工艺限制无法得到超过米量级口径光栅, 拼接光栅达到更大尺寸光栅是进一步提高输出功率的一条可能途径。光栅拼接压缩器提供了解决问题的途径, 同时也带来一系列的问题——光栅拼接调整系统必须满足相当高的精度与

收稿日期: 2010-09-07; 收到修改稿日期: 2010-10-21

基金项目: 国家 863 计划(2010AA8044008)资助课题。

作者简介: 夏 兰(1976—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事超短脉冲激光传输方面的研究。

E-mail: septem\_tuo@hotmail.com

稳定性要求<sup>[4~10]</sup>。针对这些问题,国内外同行们相继提出了各种拼接方案<sup>[5~14]</sup>,所有的拼接方案各不相同却都有一个共同点,即需要相应的测量系统提供测量信息或者反馈信息以便于调整架的调整及自控。

为了能够快速有效且高精度测量拼接光栅的旋转误差,本文设计了旋转角度误差检测系统方案,根据方案编写了检测软件雏形,实验验证了该系统的可行性。

## 2 理论分析

拼接子光栅与标准子光栅之间存在 6 个维度的调整误差(俯仰角度误差、方位角度误差、面内角度误差、前后位移误差、左右位移误差及子光栅之间的刻线密度误差),图 1 为其中几种误差。对于光束的空间特性,这 6 种误差两两互相补偿<sup>[6,7,11,14]</sup>,但是这种空间特性上的补偿却引入了时间特性的误差,最终导致通过压缩器的激光时间脉冲展宽。在拼接光栅系统中,往往通过精密装校、预先初调以及控制光栅刻线差异等手段将其中的面内角度误差与光栅刻线密度误差控制在时间脉冲要求的允许范围内,然后精密调整俯仰、方位、前后位移误差。对于皮秒脉冲 300 mm 口径的激光系统,拼接光栅俯仰、方位角度误差的调整精度要求达到  $0.3 \sim 0.4 \mu\text{rad}$ <sup>[7]</sup>。

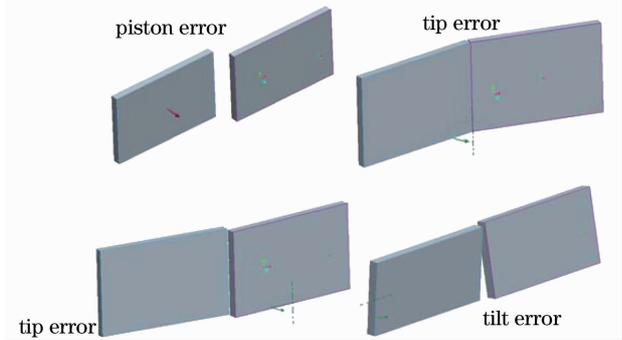


图 1 拼接子光栅之间的几种主要偏差  
Fig. 1 Error between the tiled-gratings

旋转角度误差检测系统包含干涉仪、图像采集单元和图像处理单元。设计的测量光路干涉仪单元如图 2 所示,测量光路与主激光光路同轴,在主激光打靶之前切入主激光光路测量拼接光栅空间姿态。

图 2 中待测光束通过光栅、反射镜之后原光路返回,与参考镜(半透半反镜)反射的参考光干涉。假设待测波面的电场表达式为

$$E_1(x, y) = A[\cos(\phi_1) + i\sin(\phi_1)], \quad (1)$$

式中  $(x, y)$  是垂直光轴平面上的方位坐标,  $\phi$  是波

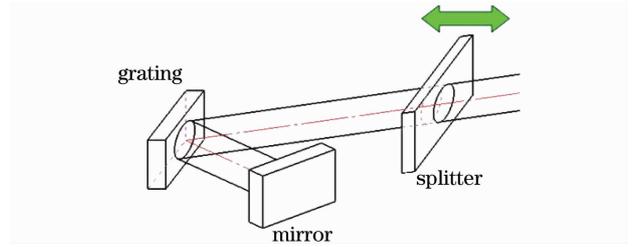


图 2 干涉仪光路

Fig. 2 Optical path of the interferometer

面的相位,为  $(x, y)$  的函数,  $A$  是场强振幅。参考波面的表达式为

$$E_2(x, y) = A[\cos(\phi_2) + i\sin(\phi_2)], \quad (2)$$

假设二者振幅相等,干涉叠加得到电场分布为

$$E_{\text{tot}} = E_1 + E_2 = A[\cos(\phi_1) + i\sin(\phi_1)] + A[\cos(\phi_2) + i\sin(\phi_2)], \quad (3)$$

从(3)式得到的光强分布也就是干涉图样为

$$I_{\text{tot}} = 2A^2[1 + \cos(\phi_1 - \phi_2)]. \quad (4)$$

将参考波面的相位平移  $\pi/2$ (参考镜 Splitter mirror 移动  $\lambda/4$ ,  $\lambda$  为检测波长),得到另一幅干涉图样的光强分布为

$$I'_{\text{tot}} = 2A^2[1 + \sin(\phi_1 - \phi_2)]. \quad (5)$$

对两幅干涉图像光强进行处理得到新的表达式  $E_{\text{sum}}$  为

$$E_{\text{sum}} = I_{\text{tot}} + iI'_{\text{tot}} = 2A^2(1 + i) + 2A^2[\cos(\phi_1 - \phi_2) + i\sin(\phi_1 - \phi_2)], \quad (6)$$

式中  $E_{\text{sum}}$  第一项是常数项,与波面的  $x, y$  方位无关。第二项的相位角是待测波前与参考波前的相位差。假设参考波前的相位为与  $x, y$  方位无关的常数,则第二项是待测波前的电场表达式。

$E_{\text{sum}}$  进行傅里叶变换得到空间频谱分布,  $E_{\text{sum}}$  第一项为常数项,空间频谱表现为基频成分,只要去除基频,余下的就是第二项的空间频谱,即待测波前的空间频谱,对其逆傅里叶变换还原待测波前<sup>[15]</sup>。

如若参考镜相移时出现误差  $\delta$ ,则(6)式变为

$$E_{\text{sum}} = 2A^2(1 + i) + [A^2 \exp(-i\delta) + A^2] \times [\cos(\phi_1 - \phi_2) + i\sin(\phi_1 - \phi_2)] + [A^2 - A^2 \exp(i\delta)][\cos(\phi_2 - \phi_1) + i\sin(\phi_2 - \phi_1)]. \quad (7)$$

(7)式包含了 3 个频率成分,第一项是基频,第二项的频率成分是待测波前的空间频谱,第三项则是第二项的负值。若偏差  $\delta$  为零,则(7)式化为(6)式;若偏差小于  $\pi/2$ ,则第二项振幅大于第三项振幅,在傅里叶变换得到的空间频谱图中,就表现为次级峰值,可以通过程序将其找出并滤去其他频谱成分还原波前;若偏差大于  $\pi/2$ ,则计算结果与实际波

前相反。因此,只要保证相移小于  $\pi$ ,就能够保证计算结果符号与数值的准确。

模拟过程如图 3 所示,采集干涉图像 pattern 1,将参考波前相移  $1/4$  波长(相当于参考波面相移  $\pi/2$ ),采集干涉图像 pattern 2,干涉图像 pattern 1 的

傅里叶变化 spectrum 1 加上,干涉图像 pattern 2 的傅里叶变化 spectrum 2 与纯虚数  $i$  之积,得到新的频谱分布 spectrum 3,滤除基频成分的频谱分布 spectrum 4 逆傅里叶变化得到还原待测波前( $x$  坐标与  $y$  坐标为空间坐标, $z$  坐标为相位值)。

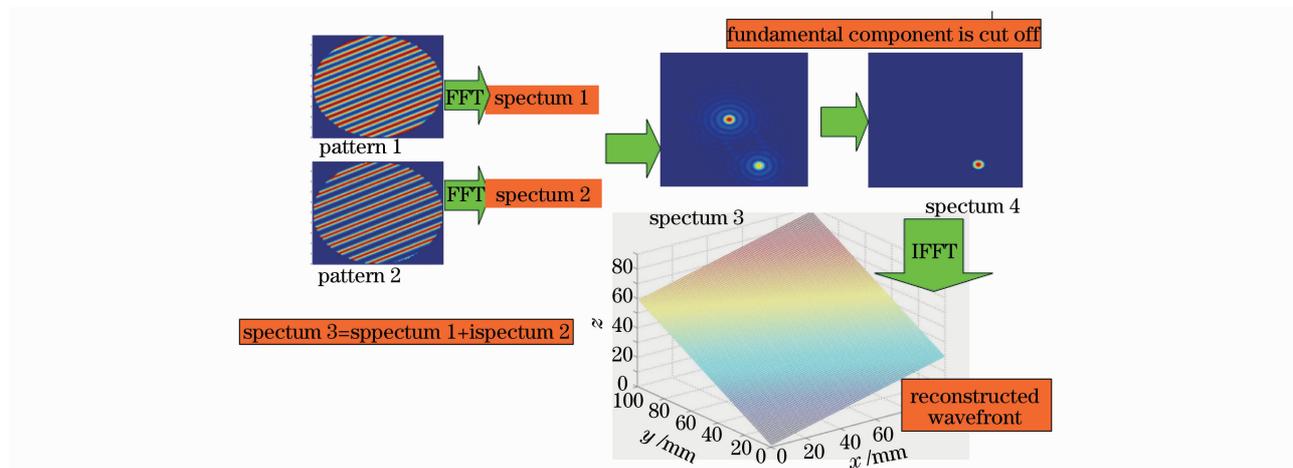


图 3 干涉图样解算流程

Fig. 3 Analysis process of interference pattern

### 3 实验论证

图 4 为图 3 测量分析流程的实验再现。检测光束口径为方口径  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ,波长  $632.8\text{ nm}$ 。还原波前图  $x$  坐标与  $y$  坐标为空间坐标, $z$  坐标为相位值。

理论建模曾经假设待测波前和参考波前的振幅相等,以及参考波前的相移为  $\pi/2$ ,如果这两种假设与实际不符,对测量精度没有影响,只是在快速傅里叶变换过程中多了一个残余频率相。图 5 是存在相移误差情况下的分析过程及结果,叠加频谱分布与

spectrum 3 比较多了一个残余空间频率,如果参考波前实际相移大于  $\pi$ ,则会影响测量结果的符号,如果实际相移小于  $\pi$ ,则对测量结果没有影响。这个结论在实验中也得到了印证,如图 5 所示。

验证实验中受实验条件限制,考核检测系统精度采用了间接测量的方法。分别用平行光管与干涉检测系统测量拼接光栅调整架的方位旋转调整精度,两相比较,估计该检测系统的测量精度。实验中调整架方位角调整步长为  $3\ \mu\text{rad}$ 。

图 6 是干涉测量系统测量结果,图 7 为平行光

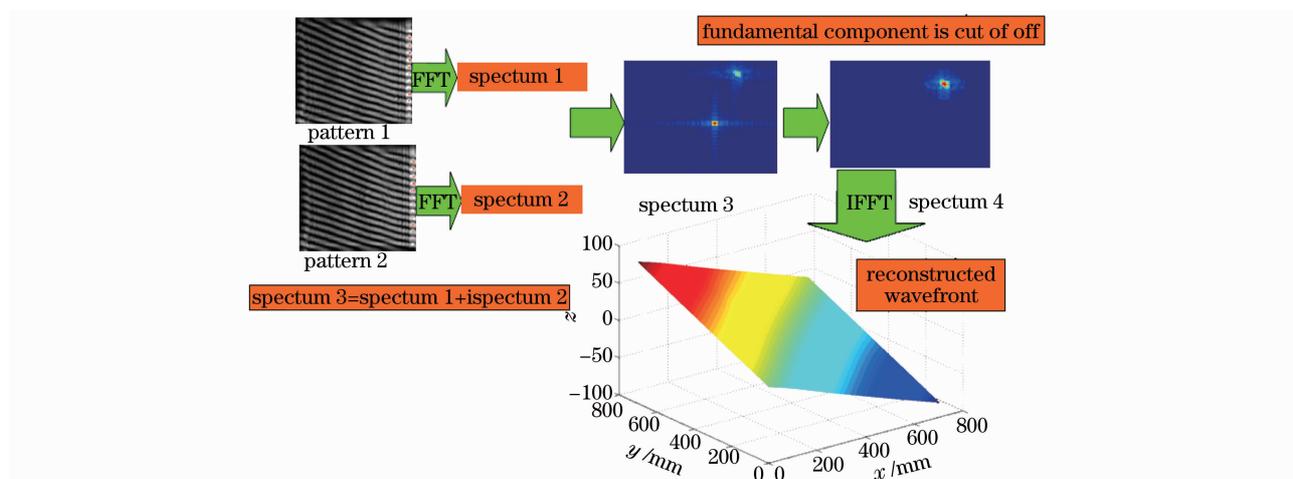


图 4 干涉图样实验分析结果

Fig. 4 Analysis result of interference pattern

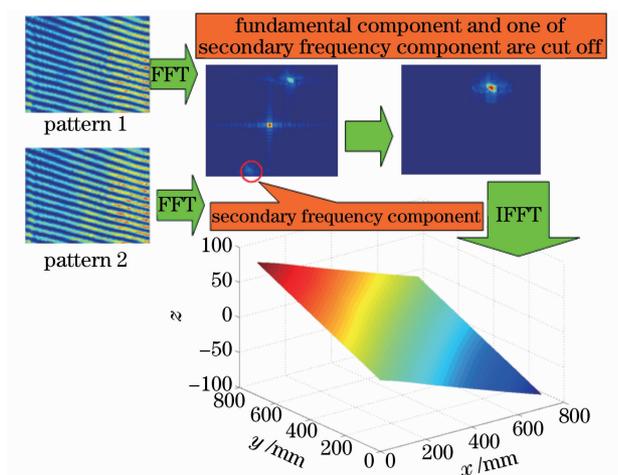


图 5 参考光相移存在偏差时计算过程及实验结果  
Fig. 5 Computation process and experiment result with phase shift error

管测量结果。通过简单计算,平行光管测量调整架方位角精度为  $0.54 \mu\text{rad}$ ,而相移干涉检测系统测量调整架方位角精度为  $0.45 \mu\text{rad}$ 。平行光管测量精度为  $0.5 \mu\text{rad}$ ,调整架的方位角调整精度最差为  $0.54 \mu\text{rad}$ 。从而可以推断出相移干涉检测系统本身的测量精度略高于平行光管,最差约为  $0.45 \mu\text{rad}$ 。虽然相移干涉测量系统的精度低于光栅拼接系统测量要求,但是相移干涉测量系统的精度与测量光束口

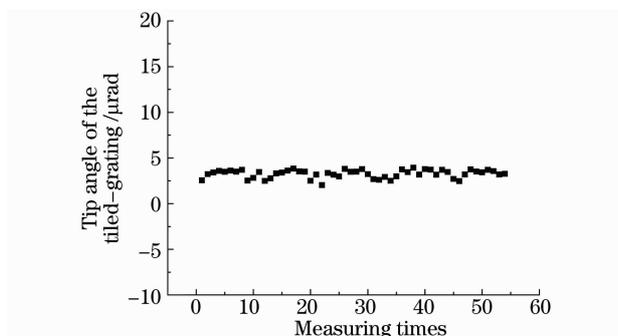


图 6 干涉检测系统测量结果  
Fig. 6 Measured result of interference system

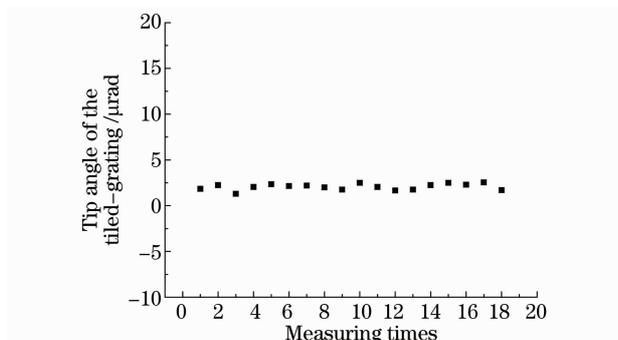


图 7 平行光管测量结果  
Fig. 7 Measured result of collimator

径成正比,可以通过扩束,提高相移干涉测量系统的精度以期达到拼接系统的调整测量要求。

## 4 结 论

光栅拼接检测系统是光栅拼接技术研究主要的内容之一。实验证明,本文设计的光栅拼接检测系统结构简单、测量速度快、图像分析程序简单,有利于光栅拼接装置工程化。在小口径测量光路的基础上检测系统测量精度亦接近米量级拼接光栅调整精度  $0.4 \mu\text{rad}$  的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Tang Shuxing, Ouyang Xiaoping, Zhu Baoqiang *et al.*. Research on high-power laser induced damage of large aperture fused silica [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 756~760  
唐顺兴, 欧阳小平, 朱宝强 等. 高功率激光对大口径熔融石英玻璃的破坏的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 756~760
- 2 Liu Lanqin, Lin Honghuan, Peng Zhitao *et al.*. Evolutionary rules of time modulation and intensity of stacked chirped pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1305~1309  
刘兰琴, 林宏奂, 彭志涛 等. 堆积啁啾脉冲时间调制及强度演化规律[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1305~1309
- 3 Che Yaliang, Luo Kaibin, Du Tinglong. Studies on the pulse response characters of large chirped fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2973~2976  
车雅良, 雒开彬, 杜廷龙. 大啁啾光纤布拉格光栅的脉冲响应特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 2973~2976
- 4 Kong Weijin, Fan Zhengxiu, Shao Jianda. Development of all dielectric pulse compressor grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(1): 32~36  
孔伟金, 范正修, 邵建达. 全电介质脉宽压缩光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(1): 32~36
- 5 T. J. Kessler, J. Bunkenburg, H. Huang *et al.*. The coherent addition of gratings for pulse compression in high-energy laser systems[C]. *L. L. E. Review*, 2003, **96**: 207~211
- 6 Terrance J. Kessler, Joachim Bunkenburg. Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high-energy chirped-pulse-amplified lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(6): 635~637
- 7 J. Qiao, A. Kalb, T. Nguyen. Demonstration of large-aperture tiled-grating compressors for high-energy, petawatt-class, chirped-pulse amplification systems [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(15): 1684~1686
- 8 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
- 9 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
- 10 Li Chaoming, Wu Jianhong, Chen Xinrong *et al.*. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression mosaic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1943~1946  
李朝明, 吴建宏, 陈欣荣 等. 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1943~1946
- 11 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
- 12 Liu Wenbing, Zhu Qihua. Effects of non-parallel grating pair on pulse space-time profiles[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(10): 1474~1478  
刘文兵, 朱启华. 光栅面不平行对压缩脉冲时空特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(10): 1474~1478
- 13 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
- 14 Yang Xuedong, Xia Lan, Ma Weixin *et al.*. Experiment of real-time monitoring and adjusting of rotation error about tiled gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1222~1226  
杨学东, 夏 兰, 马伟新 等. 光栅拼接旋转偏差实时监测调节实验[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1222~1226
- 15 Li Junchang. FFT computation of angular spectrum diffraction formula and its application in wavefront reconstruction of digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1163~1167  
李俊昌. 角谱衍射公式的快速傅里叶变换计算及在数字全息波面重建中的应用[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1163~1167