

文章编号: 0253-2239(2005)08-1067-5

# CCD 扫描检测光束准直度

张明丽 刘立人 万玲玉 栾竹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 提出一种检测光束准直度的新方法。在对波面矢高进行定义的基础上, 提出 CCD 轴向扫描检测激光束准直度的方法。利用采样光波在会聚透镜后形成的衍射图样, 测量两个相同基准衍射图样之间的距离, 即可确定入射光波的波面矢高, 进而确定入射光波的准直度。在给出测量原理及模拟基准衍射图样的基础上, 进行了实验验证。CCD 轴向扫描方法具有结构简单、加工便利、操作方便的特点, 是检测光束准直度的有效方法。

**关键词:** 衍射与光栅; 准直测试; 波面矢高; 基准衍射图样; 基准衍射平面

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

## Method of CCD Scan for Collimation Testing

Zhang Mingli Liu liren Wan Lingyu Luan Zhu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** A new wavefront analysis method is proposed for collimation testing of laser beam. Based on the definition of wavefront rise wavefront analysis method of CCD scan is introduced. Wavefront rise is obtained by measuring the distance between the two same fiducial diffraction planes of the sampled wave. Therefore, the degree of collimation is determined. The principle of measurement and simulated fiducial diffraction patterns are given before experiment is made. The results demonstrated the feasibility of the method. The method holds a definite advantage in simplicity, and it is applicable for checking the degree of collimation of noncollimated wave.

**Key words:** diffraction and gratings; collimation testing; wavefront rise; fiducial diffraction pattern; fiducial diffraction plane

## 1 引 言

迄今已提出了多种检测光束准直度的技术。这些技术可大致归为两类:一类是利用塔尔博特自身成像与叠栅现象,另一类是剪切干涉法。当光栅由一单色准直光束照明时<sup>[1~3]</sup>,在垂直于光传播方向的特定平面内将形成准确的光栅自身像。若在光栅自身像处放置第二块光栅,则可观察到叠栅条纹。光束的非准直会引起叠栅条纹的变化。反之,由叠栅条纹的变化,即可检测光束的准直性。关于对偶线性光栅、螺旋形光栅、渐屈形光栅和圆形光栅进行光束准直度检测的研究发现<sup>[4,5]</sup>,采用圆形光栅优于其他形状的光栅。剪切干涉法中最广为应用的是默蒂的楔板剪切干涉仪<sup>[6~8]</sup>,它以干涉条纹与基准线平行作为光束准直性的基准,而非准直光束的干涉条纹与基准线之间将存在一个倾角。后来 Kothiyal 等<sup>[9,10]</sup>对该技术进行了改进,引入了自参考准直方法。最近,Anand 和

Narayanamurthy<sup>[11,12]</sup>又提出一种利用光折变晶体的衍射效应及激光束的时间相干性来检测光束准直性的新方法。前面提到的这几类方法在光束准直度的测量当中,其精度已经相当高了,但是制作较为复杂,对于较大发散度光束的测量,没有必要采用这些技术。

本文提出一种新型的简单的准直测试方法,采用 CCD 轴向扫描接收待测光束在会聚透镜后的衍射图样,通过测量两个相同基准衍射平面之间的距离,来确定待测光束的准直度。

## 2 理 论

### 2.1 波面矢高定义

非准直光波是具有一定曲率半径  $R$  的球面波,如图 1(a)所示,波面矢高  $W$  由方程(1)定义:

$$W = a^2 / (2R), \quad (1)$$

作者简介:张明丽(1976~),女,辽宁抚顺人,博士研究生,主要从事波面检测的研究。E-mail: zhangminli666@163.com

收稿日期:2004-09-15;收到修改稿日期:2004-11-17

式中  $a$  为圆孔光阑半径。

非准直光波可写为

$$u(r) = \exp\left(j \frac{k}{a^2} W r^2\right), \quad (2)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $r$  为光阑平面的坐标。

一束半径  $a_0$ 、波面矢高  $W_0$  的非准直光波被一个半径  $a$  的圆孔光阑采样截取, 如图 1(b) 所示, 如

果光阑内光波的波面矢高为  $W$ , 则  $W_0$  为

$$W_0 = \frac{a_0^2}{a^2} W, \quad (3)$$

待测光波的发散度可以用波面矢高表示为

$$\varphi = 4W_0/a_0. \quad (4)$$

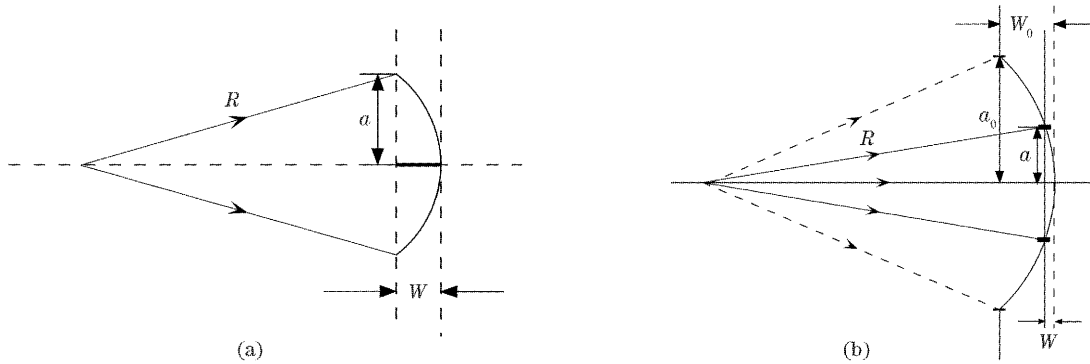


图 1 (a) 波面矢高的定义, (b) 待测波面矢高的计算

Fig. 1 (a) Definition of wavefront rise, (b) calculation of the wavefront rise to be tested

### 2.2 测量原理

一块圆孔光阑紧靠理想会聚透镜放置, 波面矢高  $W_0$  的一束非准直光束入射在圆孔光阑上, 若光阑内光波的波面矢高为  $W$ , 则会聚透镜后任一位置  $z$  处的场振幅为

$$u_z(r_z) = \frac{2\pi}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp\left(j \frac{k}{2z} r_z^2\right) \times \int_0^\infty \exp\left(jk \frac{W}{a^2} r^2\right) \text{circ}\left(\frac{r}{a}\right) \exp\left(-j \frac{k}{2f} r^2\right) \times \exp\left(j \frac{k}{2z} r^2\right) J_0(2\pi\rho_z r) r dr, \quad (5)$$

式中  $\rho_z = r_z/\lambda z$ ,  $a$  为圆孔光阑的半径,  $f$  为会聚透镜的焦距,  $\text{circ}$  为圆柱函数,

$$\text{circ}\left(\frac{r}{a}\right) = \begin{cases} 1, & r \leq a \\ 0, & r > a \end{cases}$$

由于常数相位因子在强度测量中不起作用, 因此方程(5)可改写为

$$u_z(r_z) = \frac{2\pi}{j\lambda z} \int_0^a \exp\left\{j \frac{k}{a^2} \left[W - \frac{a^2(z-f)}{2fz}\right] r^2\right\} \times J_0(2\pi\rho_z r) r dr. \quad (6)$$

令 
$$W' = W - \frac{a^2(z-f)}{2fz}, \quad (7)$$

方程(6)变成

$$u_z(r_z) = \frac{2\pi}{j\lambda z} \int_0^a \exp\left(j \frac{k}{a^2} W' r^2\right) J_0(2\pi\rho_z r) r dr. \quad (8)$$

由方程(6)和方程(8)可以看出, 对于波面矢高  $W$  的入射光波, 在透镜后  $z$  平面接收到的衍射图样与波面矢高  $W'$  光波的远场衍射图样具有相同的特征,  $W'$  与  $z$  之间满足方程(7)。图2是计算机生成的准直光束在会聚透镜后的横向光强分布图。图中  $x$  轴坐标  $W'$  与  $z$  之间满足方程(7)。

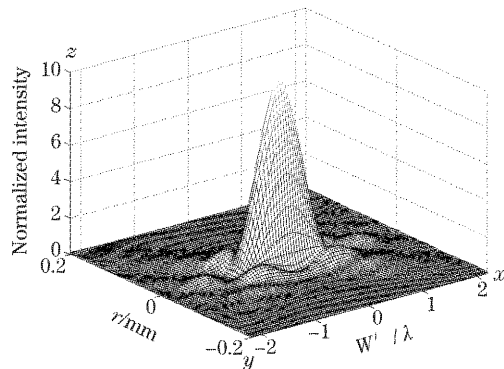


图 2 准直光束在会聚透镜后的横向光强分布图

Fig. 2 Transverse intensity profiles behind the focusing lens for collimated beam

当平面  $z$  遵守方程

$$W' = W - \frac{a^2(z-f)}{2fz} = \pm m\lambda, \quad (9)$$

式中  $m$  为正整数, 这时, 方程(8)变为

$$u_z(r_z) = \frac{2\pi}{j\lambda z} \int_0^a \exp\left(j \frac{k}{a^2} \cdot \pm m\lambda \cdot r^2\right) \times J_0(2\pi\rho_z r) r dr. \quad (10)$$

$z$  平面衍射图样的中心振幅为

$$u_z(0) = \frac{2\pi}{j\lambda z} \int_0^a \exp\left(j \frac{k}{a^2} \cdot \pm m\lambda \cdot r^2\right) r dr = 0. \quad (11)$$

又  $I_z(0) = |u_z(0)| = 0. \quad (12)$

也就是说,  $z$  平面衍射图样的中心光强为零。图

3 模拟了  $m = 1, 2, 3$  的非准直光波的远场衍射图样。可以观察到, 波面矢高为  $\pm m\lambda$  的非准直光波的远场衍射图样有  $(m - 1)$  个暗环, 且中心光强为零, 定义该衍射图样为基准衍射图样, 可以用于光波准直度的检测。

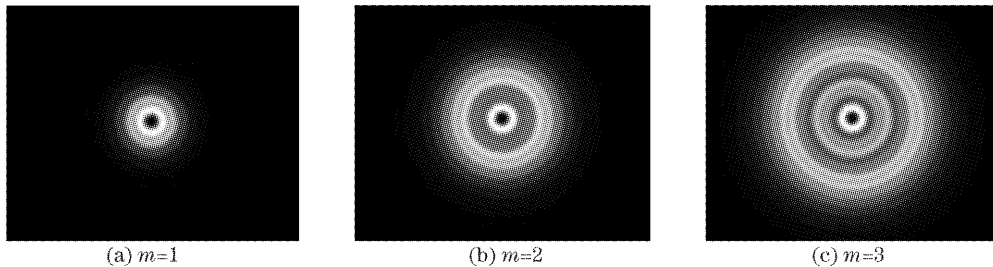


图 3 计算机模拟的光波的基准衍射图样

Fig. 3 Fiducial diffraction patterns simulated by computer

由方程(9)可见, 在会聚透镜后存在两个具有相同基准衍射图样的平面, 定义其为基准衍射平面。令  $W'_m = m\lambda, Z_m$  和  $Z_{-m}$  分别为满足方程(9)的两个基准衍射平面的位置,  $Z_m$  和  $Z_{-m}$  形式如下:

$$Z_m = \frac{a^2 f}{a^2 - 2fW + 2fW_m}, \quad (13a)$$

$$Z_{-m} = \frac{a^2 f}{a^2 - 2fW - 2fW_m}, \quad (13b)$$

则两平面之间的距离  $\delta_m$  为

$$\delta_m = \frac{4a^2 f^2 W_m}{(a^2 - 2fW)^2 - 4f^2 W_m^2}, \quad (14)$$

由方程(14) 可以看出  $\delta_m$  与  $W$  之间存在确定关系,  $\delta_m$  的值随入射波波面矢高的改变发生变化。

以上分析为我们指出了一种切实可行的准直测试方法。采用圆孔光阑对待测光波的波面进行采样, 采样波面的波面矢高  $W$  可以通过测量两个相同基准衍射平面之间的距离  $\delta_m$  获得

$$W = \frac{a^2 \cdot \delta_m - (4f^2 W_m^2 \delta_m^2 + 4a^2 f^2 W_m \delta_m)^{1/2}}{2f\delta_m}. \quad (15)$$

待测光波的发散度可根据方程(3)和方程(4)计算得到。

### 3 实 验

激光束准直测试的实验装置如图 4 所示。实验采用波长 632.8 nm 的氦氖激光器, 从激光器出射的激光束经由  $40\times$  显微物镜聚焦到  $5 \mu\text{m}$  大小的针孔上, 放在精密调整架上的准直透镜位于发散光束的传输路径上, 通过调整准直透镜的位置引入待测光波的波面矢高。如果准直透镜的直径和焦距分别为  $A'$  和  $f'$ , 则出射光波的波面矢高为

$$W' = \frac{A'^2 \Delta f'}{8f'^2}, \quad (16)$$

这里,  $\Delta f'$  是待测光波的离焦距。

一块圆孔光阑放在高质量的平凸会聚透镜(光束入射在平面一侧)之前, 且紧靠会聚透镜放置, 会聚透镜与 CCD 相机同轴, CCD 相机是单个像素尺寸  $9 \mu\text{m}, 768 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  的阵列, 放在一维手

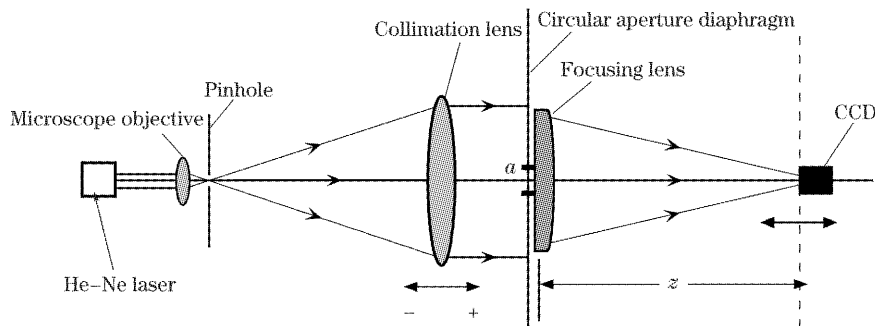


图 4 准直测试的实验装置。1: 氦氖激光器, 2: 显微物镜, 3: 针孔, 4: 准直透镜, 5: 圆孔光阑, 6: 会聚透镜

Fig. 4 Experimental setup for collimation testing. 1: He-Ne laser, 2: Microscope objective, 3: Pinhole,

4: Collimating lens, 5: Circular aperture diaphragm, 6: Focusing lens

动精密调整架(行程 100 mm, 分辨力 0.001 mm)上,可以沿光轴方向前后移动。

实验中采用的圆孔光阑直径为 10 mm,平凸会聚透镜焦距 550 mm,准直透镜直径 40 mm,焦距 200 mm。之所以选择口径如此小的光阑,是为了减小球差对实验的影响,由平凸会聚透镜引入的孔径光阑内的球差约为  $0.01\lambda$ ;但光阑的口径也不能选得过小,必须保证 CCD 在测量过程中的移动不超出精密调整架的行程,对于实验装置而言,光阑直径最小不能小于 9.8 mm。实验过程中 CCD 相机沿光轴

方向前后移动,这时,在 CCD 相机上接收的衍射图样将连续发生变化,在移动过程中,成对出现相同的基准衍射平面,测量两个相同基准衍射平面之间的距离,则可根据方程(15)计算得到采样波面的波面矢高,进而确定待测光波的发散度。实验中选取  $m=1,2,3$  的基准衍射平面,衍射图样如图 5 所示。其中图 5(a)中的衍射图样是在焦点前接收得到的,图 5(b)中的衍射图样是在焦点后接收到的。焦点前后衍射图样光强分布虽然相同,但大小不同,焦点后的图样比焦点前的图样模糊。

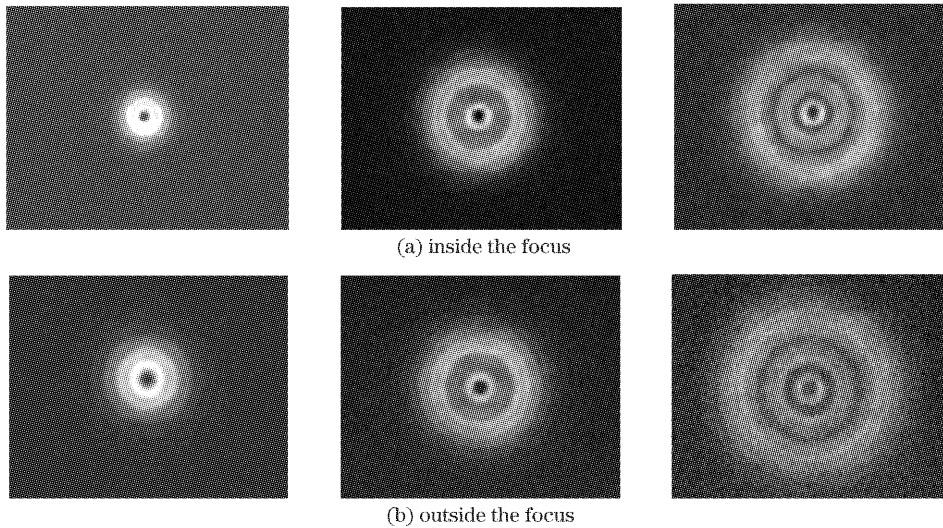


图 5 实验获得的  $m=1,2,3$  光波的基准衍射图样。(a) 焦点以内, (b) 焦点以外

Fig. 5 Experimental fiducial diffraction patterns of  $m=1,2,3$ . (a) Inside the focus, (b) outside the focus

表 1 列出了随离焦量  $\Delta f'$  变化计算得到的孔径光阑内的波面矢高  $W'$  和测量得到的两个基准衍射平面之间的距离  $\delta_m$  及由方程(15)确定的孔径光阑内的波面矢高  $W$ 。  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  分别是  $m=1,2,3$  的两相同基准衍射平面之间的距离。本实验装置的测量误差主要来源于小孔光阑的制作误差和轴向基准衍

射图样位置的读数误差。方程(15)分别对  $a$  和  $\delta_m$  求导,可以得到

$$\Delta W_a = \left[ \frac{a}{f} - \frac{aW_m}{(W_m^2\delta_m^2 + a^2W_m\delta_m)^{1/2}} \right] \Delta a, \quad (16)$$

$$\Delta W_\delta = \frac{a^2W_m}{2\delta_m(W_m^2\delta_m^2 + a^2W_m\delta_m)^{1/2}} \Delta\delta_m. \quad (17)$$

表 1 波面矢高的测量值与计算值的比较

Table 1 Comparison of measured values and calculated values of wavefront rise

$\Delta f' / \text{mm}$	$W' / \lambda$	$\delta_1 / \text{mm}$	$W / \lambda$	$\delta_2 / \text{mm}$	$W / \lambda$	$\delta_3 / \text{mm}$	$W / \lambda$
0	0	30.386	0.08	61.240	-0.06	92.787	0.05
0.5	0.25	31.242	0.34	62.559	0.32	94.052	0.29
1	0.49	31.383	0.42	63.378	0.55	95.341	0.53
1.5	0.74	31.829	0.67	63.921	0.70	96.325	0.71

对公式(16)和公式(17)进行数值模拟,发现测量精度随小孔制作误差的增大而降低,随  $f/a$  值的增大而提高。在我们的实验装置中,小孔光阑的制作误差  $\Delta a$  约为 0.02 mm,则  $\Delta W_a$  约为  $0.15\lambda$ ;根据中心零点判断基准衍射平面的误差大约为 0.3 mm,对于  $m=1,2,3$  三种情况,  $\Delta W_\delta$  分别为  $0.15\lambda, 0.08\lambda, 0.05\lambda$ ,

则波面矢高的总的测量误差应该不超过  $0.30\lambda, 0.23\lambda, 0.20\lambda$ 。随着  $m$  值的增大,测量精度有所提高。但从图 5 我们可以看到,随着  $m$  值的增大,衍射图样变得越来越模糊,受人眼对连续变化的衍射图样的分辨本领的限制,  $m>3$  时基准衍射平面很难确定,因此在实际测量中,  $m$  选取过大,测量精度不会提高,反而

会降低。而且,  $m$  的值由于受到精密调整架行程的限制也不能选得太大。对我们的实验装置而言,  $m=3$  时测量精度最高, 此时小孔光阑内波面矢高的测量误差约为  $0.04\lambda$ , 相应整个入射波口径, 波面矢高的测量误差约为  $0.64\lambda$ , 则相应的光束发散度测量误差为  $0.08 \text{ mrad}$ 。增大  $f/a$  的值(需参考精密调整架的行程)或减小小孔光阑的制作误差都可进一步提高测量精度。

## 4 结 论

提出了 CCD 轴向扫描检测光束准直度技术, 这是一种新型的直接检测光束准直度的方法。以往的干涉方法往往需要花费大量的劳动去提取我们感兴趣的量, 还需采用复杂的条纹还原技术及分析代码。而 CCD 轴向扫描方法具有结构简单、操作方便、成本低的优点, 适用于光束准直度的测量。

### 参 考 文 献

- 1 D E Silva. A simple interferometric method of beam collimation [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(8): 1980~1982
- 2 S Yokozeki, K Patorski, K Ohnishi. Collimation method using Fourier imaging and moiré technique[J]. *Opt. Commun.*, 1975, **14**(4): 401~405
- 3 Zhao Ling, Qu Ronghui, Li Lin *et al.*. Apodization of fiber Bragg grating based on Moire effect[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1103~1106 (in Chinese)
- 赵 岭, 瞿荣辉, 李 琳 等. 基于莫尔效应的光纤光栅变迹的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1103~1106
- 4 K. V. Sriram, M. P. Kothiyal, R. S. Sirohi. Collimation testing with linear dual-field, spiral and evolute grating: a comparative study[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(31): 7258~7260
- 5 C. Shakher, S. Prakash, D. Nand *et al.*. Collimation testing with circular gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(8): 1175~1179
- 6 M. V. R. K. Murty. The use of a single parallel plate as a lateral shearing interferometer with a visible gas laser source[J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(4): 531~534
- 7 R. S. Sirohi, M. P. Kothiyal. Double wedge plate shearing interferometer for collimation test[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(19): 4054~4055
- 8 J. S. Darlin, K. V. Sriram, M. P. Kothiyal *et al.*. Modified double-wedge-plate shearing interferometer for collimation testing [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(16): 2886~2887
- 9 M. P. Kothiyal, R. S. Sirohi, K. J. Rosenburch. Improved techniques of collimation testing using Talbot interferometry[J]. *Opt. Laser Technol.*, 1988, **10**(1): 139~144
- 10 K. V Sriram, M. P. Kothiyal, R. S. Sirohi. Self-referencing collimation testing techniques[J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(1): 94~100
- 11 C. S. Narayanamurthy. Collimation testing using temporal coherence[J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(4): 1161~1164
- 12 A. Anand, C. S. Narayanamurthy. Collimation testing using photorefractive crystal and temporal coherence [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(4): 1108~1113