

# 激光束准直检测仪:原理、功能与精度

徐德行 沃敏政 陈扬霖 陈淑琴 张鸿 郑朝思 郑艳玲

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

## 提 要

根据先前曾提出的单楔板旋转原理与实验研究<sup>[1]</sup>, 一种定量检测光学系统离焦量及激光发散度的仪器已经研制成功<sup>[2]</sup>. 本文概括地介绍了该仪器原理、主要功能、测试方法及精度评价等. 由于本仪器具有一系列优点, 已成为激光实验、光学教学及光学工程必备的仪器 \*

**关键词** 离焦量, 发散度, 准直性.

## 1 技术背景与仪器特性

现行的一些激光准直技术<sup>[3~7]</sup>, 主要是灵敏度较低且只能给出定性结果. 新近一种采用相位共轭反射镜新技术<sup>[8]</sup>, 由于相位共轭反射镜(BaTiO<sub>3</sub> 晶体)制备困难、价格昂贵. 美国 Melles Griot 公司“剪切板准直检验仪”, 虽然可以用公式 ( $R = bs/\lambda\sin\theta$ ) 给出波面半径  $R$  的定量结果, 但条纹宽度  $b$  和条纹方向  $\theta$  仍用传统的取值方法, 显然, 这种定量测试精度是不高的.

基于我们先前的实验研究<sup>[1]</sup>, 最近研制成一种新的激光束准直检测仪<sup>[2]</sup>, 其主要特点在于: 1) 能够给出高精度定量结果; 2) 可以给出系统离焦量、光束发散性、波面半径及判断光束会聚或发散、波面的对称性等; 3) 仪器结构简单, 操作方便, 造价低廉, 不受干扰, 易于推广.

## 2 基本原理与主要功能

### 2.1 离焦量与发散性

仪器的基本原理及实验分析已有详述<sup>[2]</sup>, 这里仅给予简要简明. 对于准直光束, 入射到楔角方向垂直放的平板上, 将产生垂直楔角方向的等厚剪切干涉条纹; 而当平板转动 180°时, 仍获得与上述方向相同的剪切干涉条纹. 对于非准直光束, 在上述两种情况下, 将出现并非垂直楔角方向的剪切干涉条纹; 被检验光束的准直程度可以通过这种剪切干涉条纹的倾角大小来度量. 对焦距为  $f$  的光学系统, 其离焦量  $\Delta f$  可表示为

$$\Delta f = (1/S)n\beta f^2 \tan\alpha, \quad (1)$$

式中  $n, \beta$  分别为平板材料的折射率及楔角;  $S$  为平板的剪切量;  $\alpha$  为干涉条纹与水平轴的倾角. 光束的发散角  $\theta$  可以表示为

$$\theta = (D/S)n\beta \tan\alpha, \quad (2)$$

式中  $D$  为光束直径.

收稿日期: 1992 年 4 月 3 日

\* 本仪器已属专利产品, 现正批量生产, 供应国内外市场

2.2 波面及其特性判定

当得出  $\Delta f$  或  $\theta$  后,便可以计算出光束波面的曲率半径

$$R = f^2/\Delta f = D/\theta. \quad (3)$$

发散光束或会聚光束的判定,或者是判定光学系统是焦前离焦还是焦后离焦,本仪器已作如图 1 的规定.

2.3 波面象差干涉图

平板在两个极端位置(楔角  $\beta$  方向在正,反两个方向)时,条纹宽度及取向的关系式<sup>[1]</sup>,为方便起见,再一次写出

$$\left. \begin{aligned} b_+ &= \lambda/2 |a_1s + n\beta|, b_- = \lambda/2 |a_1s - n\beta|, \\ \alpha_+ &= \tan^{-1}(a_1s/n\beta), \alpha_- = \tan^{-1} - (a_1s/n\beta). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将其推广到转动 360°任意位置时,若离焦一定,实际上,只可以把  $\pm n\beta$  顶看做随转动角变化而改变的一个倾斜因子,致使  $b$  及  $\alpha$  都是随之改变着.关于这点,在文献[5,9]的相应公式中也很容易理解.这里不作赘述.仅将几个主要象差图形列出.球差图形如图 2 所示.

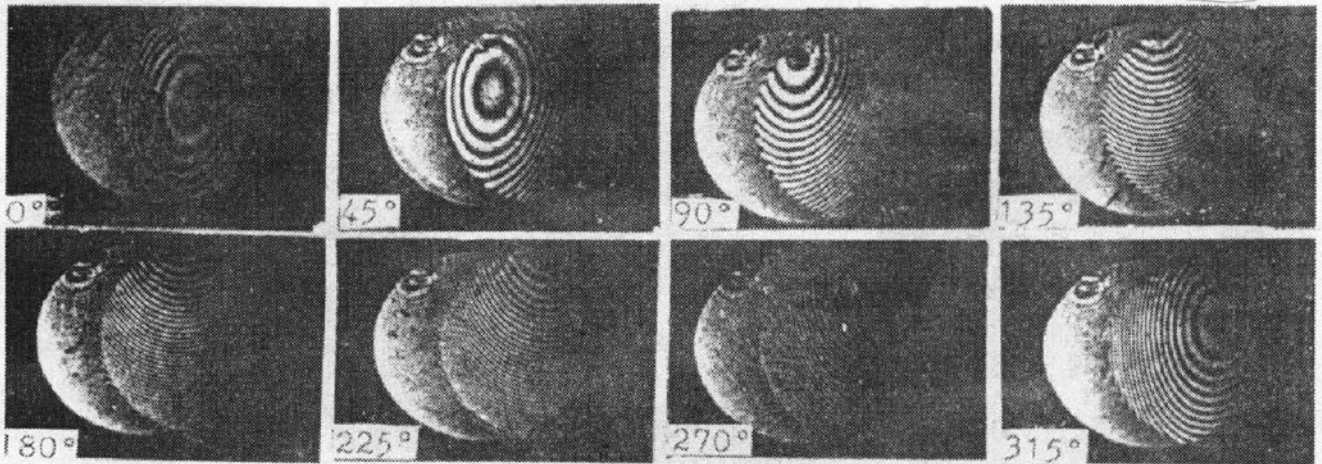
	indicative amount of graduator		wavefront form	defocusing feature
	about 180°	about 0°		
fringe orientation				at the back of focus
				at the front of focus

Fig. 1 Discrimination of convergent or divergent beam



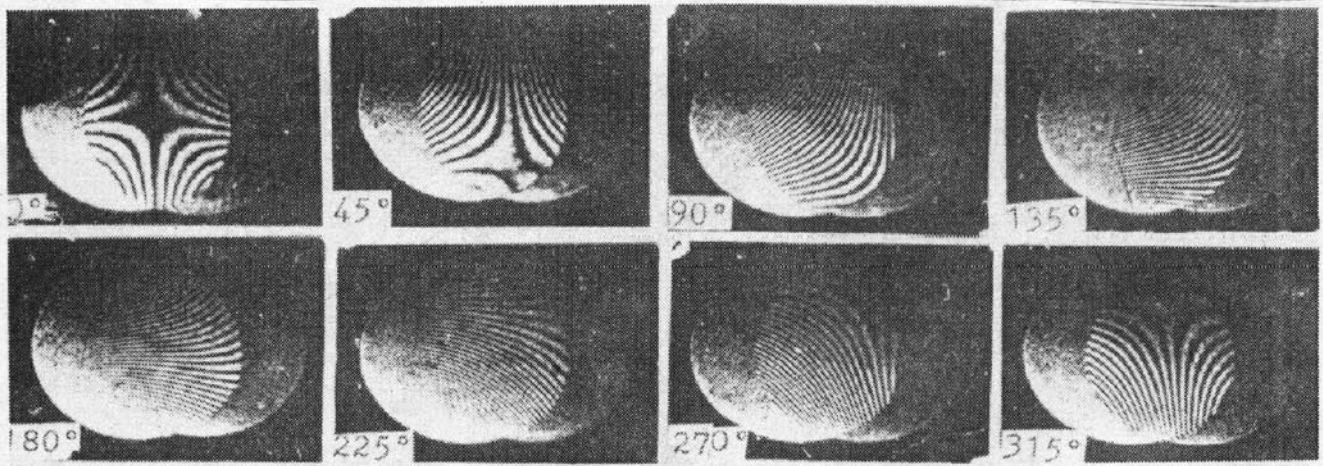
Fig. 2 Shearing interferogram of spherical aberration (wedge angle vertical is 0°)

由此可见,同一个被检验差波面,由于平板楔角方向不同,呈现出不同形式的剪切干涉图形,而不能相反误认为是不同象差波面.彗差图形如图 3 所示,特别要注意彗差方向,剪切方向及楔角不同所呈现出有差异的图形.



(a) Coma direction parallel shearing direction (wedge angle vertical is 0°)





(b) Coma direction perpendicular shearing direction

Fig. 3 Shearing interferogram of coma (wedge angle vertical is 0°)

象散图形是易被混淆的特殊图形,当象散焦线垂直于或平行于剪切方向时,可以理解为波面离焦的不同,即条纹多少的改变,若能使波面在不同方向上剪切,则条纹数目及方向将会发生改变,说明有象散存在,所以我们说,如果被检验系统不能转动的话,这种准直检测仪不能发现象散\*

### 3 仪器简介

#### 3.1 仪器结构与参数

仪器外型如图 4 所示,它是由入射窗、出射观测屏及背后带有度盘的楔形平板所组成.观测屏上刻有双水平标线.这一主体部分安装在一可上下升降 $\pm 50$  mm 的支座上.

仪器可测光束口径 50 mm(特殊要求可专门制作);可测最小离焦量 0.001 mm;可测光束最小角发散度 0.02 mrad;可测光束最小曲率半径约 0.6 m.

#### 3.2 测试方法简要说明

基本原理中提到的平板楔角方向垂直于剪切方向即垂直于水平标线方向,以此作为测量干涉条纹方向是不能达到较高精度的.多次实测证明,用 YZZ 1" 自准直仪或内调焦平行光管标定一块平板楔角方向误差范围约在 $\pm 8^\circ$ 之内.而用“二次旋转法”,直读可达 6' 的精度.由公式(1)、(2)看出,本仪器只是归结为测量角度 $\alpha$ ,其它量均视为已知量.

$\alpha$  值的读取是这样的:当被测光束经平板在观测屏上出现倾斜干涉条纹,旋转平板使条纹与水平标线重合为止,记下此时度盘角度值 $\alpha_1$ ,再旋转平板约 $180^\circ$ ,使条纹再与水平标线重合,记下此时度盘的读数 $\alpha_2$ 于是所求的 $\alpha$ 值为

$$\alpha = |\alpha_1 - \alpha_2 \pm 180^\circ| \quad (5)$$

式中,当 $\alpha_1 > 180^\circ$ ,取“-”; $\alpha_1 < 180^\circ$ ,取“+”.

如果一些参数已知,根据求出角度值查表即可得知系统的离焦量或光束发散角.

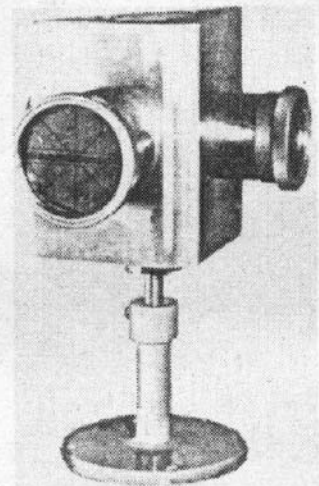


Fig. 4 Photo of the collimation tester

\* 能发现象散的另一仪器将另文发表.

## 4 精度分析与精度比较

### 4.1 精度分析

除了其他因素以外,影响检测精度的主要方面是 $\alpha$ 值的测试误差,其中包括:1)度盘的刻划误差 $\sigma_1$ ;2)干涉条纹与标准线的对准误差 $\sigma_2$ ;3)度盘的读数误差 $\sigma_3$ ;4)引起条纹方向改变的平板最小旋转角 $\sigma_4$ .下面分别予以叙述.

- 1) 一般中等精度的机械刻划机,圆度盘刻划精度为 $20'$ 是可以达到的,即 $\sigma_1 = 20' / \sqrt{3} = 12'$ ,其中 $\sqrt{3}$ 是均匀分布的置信系数;
- 2) 用双线夹单一条纹的瞄准方式,经多次反复瞄准同一状态下的条纹,重复性 $\sigma_2 \leq \pm 1^\circ$ ,于是 $\sigma_2 = 2^\circ / \sqrt{3} = 1^\circ 15'$ ;
- 3) 本仪器度盘最小格值 $1^\circ$ ,利用游标读数最小格值 $6'$ ,估读值 $2' \sim 3'$ ,则 $\sigma_3 = 1' 2 \sim 1' 8$ .
- 4) 多次实验证明,平板旋转可觉察到条纹方向改变的最小角度约为 $1^\circ$ .

综合上述误差

$$\sigma = \sqrt{\sum \sigma_i^2} = \sqrt{2.6015} \approx 1^\circ 37'$$

设一被测光学系统 $f = 500 \text{ mm}$ , $D = 50 \text{ mm}$ ,剪切量 $S = 10 \text{ mm}$ ,平板楔角 $\beta = 20''$ ,折射率 $n = 1.51$ ,则由(1)式计算得

$$\sigma \Delta f = (1/S)n\beta f^2 \tan \sigma = 0.103 \text{ mm}$$

同理用公式(2)可得到角发散的测试精度为

$$\sigma_\theta = (1/S)Dn\beta \tan \sigma = 0.021 \text{ m rad}$$

### 4.2 精度比较

#### 4.2.1 与理论值比较

上述系统,对于 $\lambda = 0.0006328 \text{ mm}$ ,衍射极限 $\varphi = 160''/D = 0.015 \text{ m rad}$ ,此值与 $\sigma_\theta = 0.021 \text{ m rad}$ 基本相当;

上例系统的焦深 $\Delta l = 0.253 \text{ mm}$ ,此值与 $\sigma \Delta f$ 相比, $\sigma \Delta f$ 为 $\Delta l$ 的 $1/2 \sim 1/3$ ;

由焦深 $\Delta f$ 引起的光束发散 $\theta_M = 0.051 \text{ m rad}$ ,同样地, $\sigma_\theta$ 为 $\theta_M$ 的 $1/2 \sim 1/3$ .

#### 4.2.2 与现行常用法比较

Murty[3]的平行平板法常被用于检验准直的主要方法.应用前例的系统,用一块 $0.2''$ 平行平板,以干涉场一片均匀场作为准直光的判据,用千分表作为监测离焦距离,经反复多次测试“焦点”平均距离 $\Delta f \approx 0.225 \text{ mm}$ ,此值与该系统的焦深相当.即其精度低于本仪器.

#### 4.2.3 与国外新近报道相比

相位共轭法<sup>[8]</sup>的理论测试精度,对于 $f^{\pm} = 1$ 的系统 $\Delta f_{\min} = 0.0012 \text{ mm}$ .对于 $f^{\pm} = 10$ 的系统.若取 $S/D = 1/4$ 时,应用本文(1)式算得 $\Delta f_{\min} = 0.0080 \text{ mm}$ ,与 $\sigma \Delta f$ 相当.

美国一项专利报道测 $\text{CO}_2$ 激光器( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ )方向性的精度达 $20 \mu\text{ rad}$ ,即也为 $0.02 \text{ m rad}$ .但结构相当复杂<sup>[10]</sup>.

美国著名的Malles Griot公司研制的相应产品,就其原理讲,我们的原理精度至少提高一倍.

## 5 结 论

一种新型光束准直检测仪已经研制成功.已经批量生产的这项专利产品<sup>[11]</sup>的一系列特点

及多功能特性将逐渐被人们所接受.

参加本工作的还有沈良,马建生\*等,在此一并致谢.仪器的前期工作是第一作者在德国 PTB 光学实验室完成的,在此向光学实验室主任 K. J. Rosenbruch 教授致谢.

### 参 考 文 献

- [1] Deyan Xu, K. J. Rosenbruch, Rotatable single wedge plate shearing interference technique for collimation testing. *Optical Engineering*, 1991, **30**(4):391~396
- [2] 徐德衍,沃敏政,陈扬霖等,一种新型激光束准直检测仪. *中国激光*, 1991, **18**(12):955
- [3] M. V. R. K. Murty, The use of a single plane parallel plate as a lateral shearing interferometer with a visible gas laser source. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(4):531~534
- [4] P. Langenbeck, Improved collimation test. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(9):2590~2593
- [5] D. Malacara(ed.); 白国强,薛君敖,洪涛,李星健译,光学车间检验.北京工业出版社,1983:120~122
- [6] R. S. Sirohi, M. P. Kothiyal, Double wedge plate shearing interferometer for collimation test. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(19):4054~4056
- [7] M. P. Kothiyal, R. S. Sirohi, K. J. Rosenbruch, Improved techniques of collimation testing. *Optical and Laser Technology*, 1988, **20**(3):139~144
- [8] R. P. Shukla, M. Dokhanian, M. C. George *et al.*, Laser beam collimation using a phase conjugate Twyman-Green interferometer. *Optical Engineering*, 1991, **30**(4):386~390
- [9] 徐德衍编著,剪切干涉仪及其应用.北京:机械工业出版社,1987:77~79
- [10] Rex W. Goranson, Placitas, N. Mex, Instrument for determining infrared beam vergence. *USP* 4,166,954,
- [11] 徐德衍,沃敏政,检测光束准直的剪切干涉仪.中国发明专利,专利(申请)号:90101910.0.

### Laser beam collimation tester: principles, function and accuracy

XU Deyan      WO Minzheng      CHEN Yanglin      CHEN Suqin  
ZHEN Zhaosi      ZHEN Yanling

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 3 April 1992)

#### Abstract

A new shear plate collimation tester on the basis of a single wedge plate using two-time rotatable ways<sup>[1]</sup> have been developed<sup>[2]</sup>. It is mainly used to test laser beam collimation, divergence and amount of defocusing of optical systems in collimator, beam expander and telescope. It can be also used to test wavefront aberrations and laser parameters and to adjust optical systems. In this paper. The basic principles, quantitative interpretation, accuracy analyses, functions and features of the tester are presented.

**Key words** Amount of defocusing, Divergence, collimation.

\* 现为长春光机学院硕士生.