

## 基于光学自准直法的光波导阵列平行度测试

黄银国, 梁佳琪, 杨永, 李杏华

引用本文:

黄银国, 梁佳琪, 杨永, 等. 基于光学自准直法的光波导阵列平行度测试[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(7): 1415–1423.

HUANG Yin-guo, LIANG Jia-qi, YANG Yong, et al. Parallelism measurement of geometric waveguide array based on autocollimation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1415–1423.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202807.1415>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### Ce:SBN75光折变晶体中的离散空间光孤子波导阵列

Waveguide array generated by discrete spatial soliton in Ce: SBN75 photorefractive crystal

*光学精密工程*. 2016, 24(10s): 141–147 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0141>

### 测试设备位姿失调对自准直仪法测量圆分度误差的影响

Influence of test equipment pose error on dividing error measurement based on autocollimator

*光学精密工程*. 2017, 25(9): 2267–2276 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172509.2267>

### 耐高温增量式光电编码器的研制

Development of high-temperature resistant incremental encoder

*光学精密工程*. 2019, 27(7): 1458–1464 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192707.1458>

### 四通道二维光子晶体解波分复用系统

Four-channel WDM system based on two-dimensional photonic crystal

*光学精密工程*. 2015, 23(3): 692–699 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152303.0692>

### 多信道二维光子晶体滤波器

Multi-channel drop filter based on two-dimensional photonic crystal

*光学精密工程*. 2016, 24(5): 1021–1027 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162405.1021>

文章编号 1004-924X(2020)07-1415-09

# 基于光学自准直法的光波导阵列平行度测试

黄银国, 梁佳琪, 杨 永, 李杏华\*

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了提高几何光波导的成像质量, 提出了一种基于离轴自准直光路的光波导阵列平行度测试方法。根据阵列平面特征分析了以空间二维角度表征光波导中半透半反膜阵列平行度的误差评定模型, 将几何光波导成像原理与自准直光路相结合, 推算出了阵列平行度的数学关系式。然后, 构建了光波导阵列平行度测量系统, 系统中具有光源控制器可以控制输出光强, 有效解决了因光波导中不同半透半反膜的光能利用率不同而影响测量的难题。利用 Steger 算法对自准直回像进行图像处理。最后, 完成了标定和阵列平行度测试以及验证实验。实验结果表明, 平行度测量系统的测量不确定度为  $1.14''$ , 最大重复性误差为  $0.32''$ 。该方法可以快速准确地测量几何光波导中的阵列平行度, 对光波导阵列面的姿态修正以及成像质量的提高具有指导意义。

**关键词:** 几何光波导; 自准直法; 半透半反膜阵列; 平行度测量

**中图分类号:** TH712 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202807.1415

## Parallelism measurement of geometric waveguide array based on autocollimation

HUANG Yin-guo, LIANG Jia-qi, YANG Yong, LI Xing-hua\*

(National Key Laboratory of Precision Testing Techniques and Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

\* Corresponding author, E-mail: lixinghua@tju.edu.cn

**Abstract:** To improve the imaging quality of the geometric waveguide, a method of measuring the parallelism of the waveguide array based on the off-axis autocollimation optical path was proposed. In this study, the error evaluation model of the parallelism of the semi-transparent and semi-reflective film array in the waveguide was analyzed according to the characteristics of the array plane. Combining the imaging principle of the geometric waveguide with the autocollimation optical path, the mathematical relationship of the array parallelism was deduced. Further, the parallelism measurement system of the waveguide array was developed. The system utilized a light source controller to control the output light intensity, which prevented the measurement from being affected by the light energy utilization of different semi-transparent and semi-reflective films in the waveguide. Subsequently, the Steger algorithm was used to process the autocollimation image. Finally, the calibration, array parallelism, and verification experiments were conducted. The experimental results show that the measurement uncertainty of the parallelism measurement system is  $1.14''$ , and the maximum

收稿日期: 2020-04-16; 修订日期: 2020-05-07.

基金项目: 航空科学基金资助项目 (No. 20175748009)

repeatability error is  $0.32''$ . The proposed method can quickly and accurately measure the parallelism of the geometric waveguide array, which is of guiding significance to the attitude correction of the waveguide array and imaging quality improvement.

**Key words:** geometric waveguide; autocollimation; semi-transparent and semi-reflective film array; parallelism measurement

## 1 引言

光波导是一种利用全反射原理引导光波在其中无损传输的介质装置<sup>[1]</sup>。根据耦合结构的不同,光波导主要分为几何光波导和衍射光波导<sup>[2]</sup>两类。其中,几何光波导也称阵列光波导,即波导内部存在用于输出图像并扩展出瞳范围的平行的半透半反膜阵列<sup>[3]</sup>。相比衍射光波导,几何光波导采用传统几何光学的设计理念,技术门槛低,而且成像质量较高<sup>[4]</sup>。

以色列的 Lumus 公司<sup>[5]</sup>、国内的珑璟光电、灵犀微光等公司都在致力于研制几何光波导。但目前几何光波导的制造工艺非常复杂,尚未成熟,而且价格很高,难以量产。在几何光波导的制造过程中,任何一点偏差都会导致成像出现瑕疵,例如明暗条纹、鬼像等问题<sup>[6]</sup>。在众多影响成像质量的因素中,一个关键因素就是光波导中半透半反膜阵列的平行度,若无法保持良好的平行度,出瞳光线会不均匀,会严重影响成像质量,因此,阵列平行度的测试是检定几何光波导性能的一个重要依据。由于光波导的工作原理特殊,很多用于普通平面间平行度的测量方法无法直接应用于光波导,因此,如何快速准确地测试光波导阵列的平行度是一个亟待解决的问题。

本文基于光学自准直法提出了一种光波导阵列平行度测量方法,该方法的测量光路与光波导的成像光路一致,解决了自准直法难以适用于光波导离轴光路的问题,具有精度高、非接触、快速高效等特点。

## 2 几何光波导结构

几何光波导示意图如图 1 所示,其内部由一个全反射镜以及若干个以一定间距平行排布的半透半反膜阵列组成,其工作原理如图 2 所示。工作时,入射光进入光波导经过若干次全反射后到

达半透半反膜中,一部分光线反射后射出波导,另一部分光线透射进入下一个半透半反膜中继续反射与透射,从而实现水平方向上光的复制。

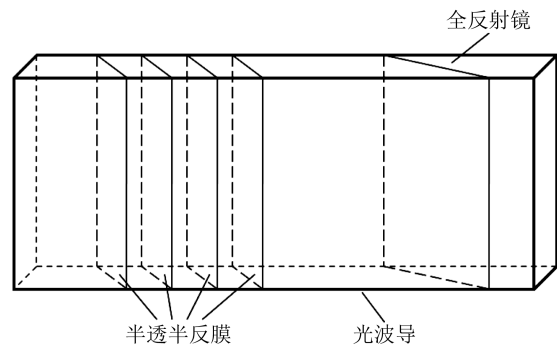


图 1 几何光波导示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geometric waveguide

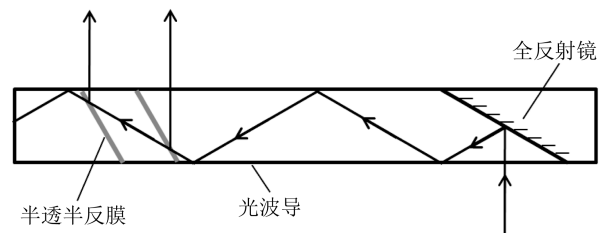


图 2 几何光波导工作原理

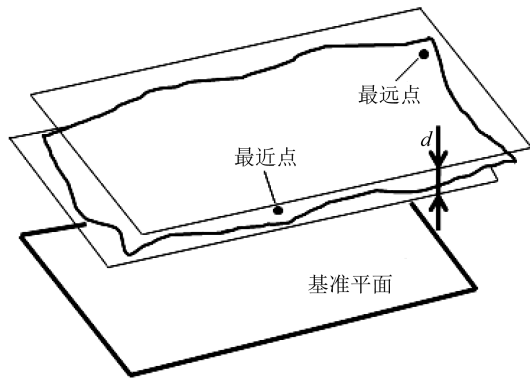
Fig. 2 Principle for geometric waveguide

## 3 测量方案

### 3.1 平行度误差评定模型

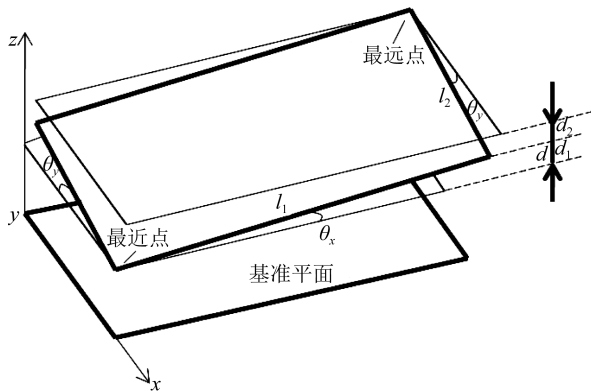
本文所述测量方案的待测量为光波导阵列面的平行度,即各个半透半反膜之间的平行度。面与面之间的平行度作为方向公差在测量时需要参考基准,如果两个面互为基准,会因基准面与理想平面之间存在面型误差而导致平行度测量存在较大误差。因此,建立合适的参考基准也是平行度测量的重要环节。常用的基准平面建立方法有最小区域法、最小二乘法、公差原则法和三远点法等<sup>[7]</sup>。确定基准平面后,可以直接利用最小包容区域法来评定平行度误差,如图 3(a)所示。最远

点与最近点上下包容面之间的区域即为最小包容区域,待测面与基准平面之间的平行度误差用距离  $d$  表示。



(a)一般平面间的平行度误差

(a)Parallelism error between general planes



(b)光波导阵列平面间的平行度误差

(b)Parallelism error between plane of waveguide array

图 3 最小包容区域法

Fig. 3 Minimum containment area method

光波导中阵列平面的平面度误差较小,可认为是理想平面,因此可以以其中一个阵列平面作为基准平面,则两阵列面之间的平行度误差示意图如图 3(b)所示,此时最远点和最近点是平面的两个顶点,两平面间的平行度误差为:

$$d = d_1 + d_2 = l_1 \sin \theta_x + l_2 \sin \theta_y. \quad (1)$$

实际上光波导中阵列面之间的角度非常小,为角秒级别,因此有  $\sin \theta = \theta$ ,则有:

$$d = l_1 \theta_x + l_2 \theta_y. \quad (2)$$

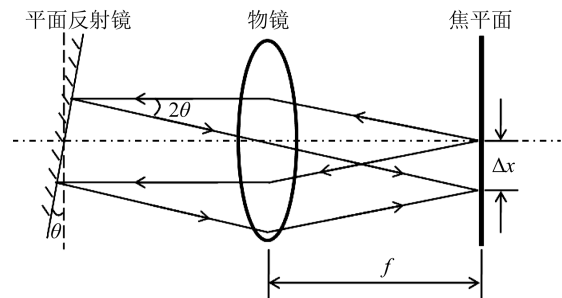
由此可知,平行度误差  $d$  的产生原因是因为它分别绕  $x$  轴与  $y$  轴方向旋转了一个角度,因此,本文利用两平面之间的夹角来表示平行度误差。相比于用  $d$  来表示阵列面之间的平行度误

差,这种用角度来表示的方法便于之后对各个光波导阵列面的姿态修正,从而提高几何光波导的成像质量。

### 3.2 测量原理

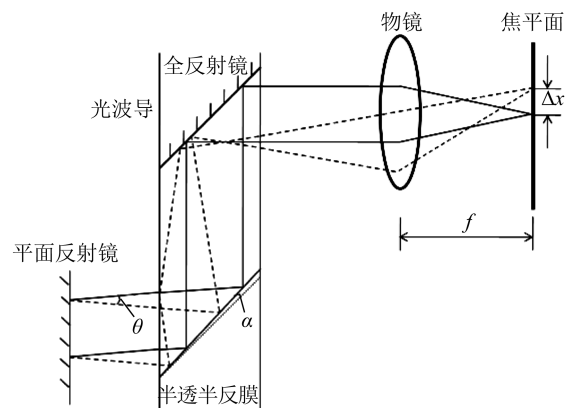
几何光波导中的半透半反膜阵列之间的平行度非常小,小角度测量的常用方法有光学内反射法、激光干涉法和光学自准直法等<sup>[8]</sup>。其中,光学自准直法具有结构简单、适用性广等特点,因此本文选取自准直法对阵列平行度进行测量。

光学自准直系统是一种非接触式的小角度高精度测量装置<sup>[9]</sup>,其典型光路结构如图 4(a)所示。当它用于平板平行度测量时,平板的两个平面作为自准直系统的平面反射镜。若两个平面存在平行度误差  $\theta$  时,那么自准直系统将产生两个不重合的回像。根据公式  $\theta = \frac{\Delta x}{2f}$ ,利用回像的间距  $\Delta x$  即可得到平面的平行度。



(a)典型自准直光路结构

(a)Typical autocollimation optical path



(b)光波导阵列平行度测量

(b)Parallelism measurement of waveguide array

图 4 典型自准直光路及其在平行度测量中的应用  
Fig. 4 Typical autocollimation optical path and its application in parallelism measurement

如果直接将该光路结构应用于光波导阵列面之间的小角度测量时,入射光与出射光不在一个光轴上。此外,与平板平行度测量不同,因为光波导表面是全内反射的,所以半透半反膜阵列不能当作多个平面反射镜。

为了解决这一问题,本文根据图 2 所示的几何光波导工作原理,设计了一种可以用于测量光波导阵列平行度的方法,如图 4(b)所示。

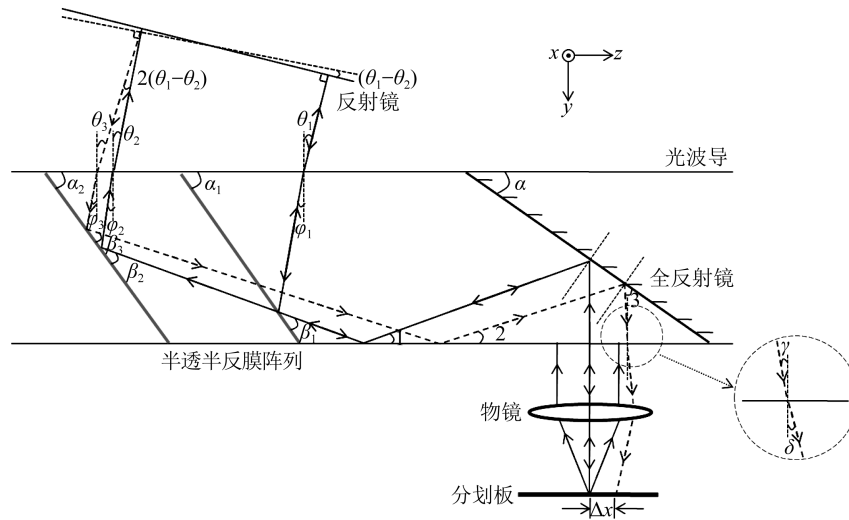


图 5 阵列面平行度测量原理

Fig. 5 Principle for array plane parallelism measurement

光垂直入射进光波导,经全反射镜反射,根据垂直关系有:

$$\angle 1 = 90^\circ - 2\alpha. \quad (4)$$

光经过在光波导中全反射,射到半透半反膜阵列上,根据反射角的性质以及外角定理得:

$$\beta_1 = \alpha_1 - \angle 1 = \alpha_1 + 2\alpha - 90^\circ, \quad (5)$$

$$\beta_2 = \alpha_2 - \angle 1 = \alpha_2 + 2\alpha - 90^\circ. \quad (6)$$

后经半透半反膜反射,分别以  $\varphi_1, \varphi_2$  从光波导中出射,根据外角定理可分别得到:

$$\varphi_1 = \alpha_1 + \beta_1 - 90^\circ = 2\alpha_1 + 2\alpha - 180^\circ, \quad (7)$$

$$\varphi_2 = \alpha_2 + \beta_2 - 90^\circ = 2\alpha_2 + 2\alpha - 180^\circ. \quad (8)$$

光射出光波导时,根据折射定律可知(其中,  $n$  为光波导的折射率):

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{\sin \theta_1}{n}\right), \quad (9)$$

$$\varphi_2 = \arcsin\left(\frac{\sin \theta_2}{n}\right). \quad (10)$$

由泰勒展开式可知,当  $\theta$  很小时,  $\sin \theta \approx \theta$ ,  $\arcsin \theta \approx \theta$ 。由于光波导中的半透半反膜阵列之

### 3.3 平行度误差数学关系

已知光波导中的全反射镜与光波导表面的夹角为  $\alpha$ ,且假设光波导两表面相互平行。以两个半透半反膜阵列面在  $x$  方向上的平行度为例,如图 5 所示。为方便查看内部光路并分析原理,仅用平行光中的一条光路作图,设平行度为  $P_x$ ,则可以表示为:

$$P_x = \alpha_1 - \alpha_2. \quad (3)$$

间的平行度为角秒级别,因此可近似为:

$$\varphi_1 = \frac{\theta_1}{n}, \quad (11)$$

$$\varphi_2 = \frac{\theta_2}{n}. \quad (12)$$

光射出光波导后将进入反射镜(为了方便作图,使角度标注更清晰,图 5 中画出的反射镜偏转角较大,但实际测量中反射镜近似与光波导正对),光经过反射镜反射后,假设通过第一个半透半反膜的光将原路返回至光波导。实际上,经推导,平行度测量结果与反射镜角度无关,因此不必使光线严格原路返回。而通过第二个半透半反膜的光将以  $\theta_3$  为入射角返回射入光波导中。此时:

$$\theta_3 = 2\theta_1 - \theta_2. \quad (13)$$

根据折射定律,有:

$$\varphi_3 = \frac{\theta_3}{n} = \frac{2\theta_1 - \theta_2}{n} = 2\varphi_1 - \varphi_2. \quad (14)$$

由外角定理可知:

$$\beta_3 = \varphi_3 - \alpha_2 + 90^\circ. \quad (15)$$

将式(7),(8)和式(14)代入,得:

$$\beta_3 = 4\alpha_1 - 3\alpha_2 + 2\alpha - 90^\circ. \quad (16)$$

根据外角定理及反射角的性质可得:

$$\angle 2 = \alpha_2 - \beta_3 = 4\alpha_2 - 4\alpha_1 - 2\alpha + 90^\circ. \quad (17)$$

由于光波导两表面相互平行,则有:

$$\angle 3 = \angle 2 + \alpha = 4\alpha_2 - 4\alpha_1 - \alpha + 90^\circ. \quad (18)$$

根据三角形内角和可得:

$$\gamma = 90^\circ - \angle 3 - \alpha = 4\alpha_1 - 4\alpha_2. \quad (19)$$

最后,返回光以  $\gamma$  射出光波导,经折射后回到光波导阵列平行度测量仪中,此时,根据折射定律有:

$$n \sin \gamma = \sin \delta. \quad (20)$$

由于  $\gamma$  和  $\delta$  都很小,所以:

$$P_x = \alpha_1 - \alpha_2 = \frac{\delta}{4n}. \quad (21)$$

利用光波导阵列平行度测量仪中两个自准直回像的相对位置  $\Delta x$  可以获得  $\delta$ ,由此可以计算出半透半反膜阵列面在  $x$  方向上的平行度  $P_x$ ;同理可以得到  $y$  方向上的平行度  $P_y$ .

## 4 测量装置与图像处理

### 4.1 测量装置

利用上述测量原理,研制了一套光波导阵列平行度测量仪,该测量仪由光源、分隔板、分光棱镜、物镜以及图像传感器 CCD 等器件组成。其中,分隔板决定了自准直回像的形状,为了提高回像位置的测量精度,本研究采用十字形分隔板。

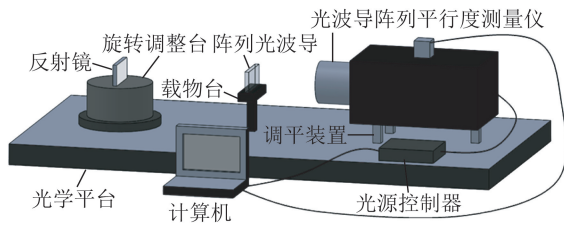


图 6 光波导阵列平行度测量系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of waveguide array parallelism measurement system

光波导阵列平行度测量装置系统如图 6 所示。测量系统由光波导阵列平行度测量仪、载物台、旋转调整台、反射镜和计算机等组成。其中,光波导阵列平行度测量仪下方安装有调平装置,可以调节其姿态便于测量;载物台具有固定装置,

用以固定待测光波导;光源控制器可以根据光波导阵列平面的反射率而控制输出光强;计算机用于处理自准直回像并计算平行度误差,与用户完成实时交互。另外,还配有合适宽度的狭缝,用于遮挡光波导中其他半透半反膜的出射光,以防止它们对当前被测半透半反膜的自准直回像位置测量的干扰。

### 4.2 十字光条中心点的获取

根据测量原理可知,自准直回像的位置偏移量(即回像中十字光条的中心点坐标变化量)是光波导阵列平行度误差测量的主要数据。十字光条的中心点坐标的主要计算过程如下:

首先,利用 Steger 算法提取十字光条中心线上所有的点,然后再根据各个点的特征来分成两类(即水平光条上和竖直光条上的点),并分别拟合直线,两条直线的交点即为十字光条的中心点。

其中,Steger 算法是一种可以实现亚像素级别的光条中心处理算法<sup>[10]</sup>,是一种基于极大值点的中心提取方法,其原理基于 Hessian 矩阵。Steger 算法的处理流程如图 7 所示。

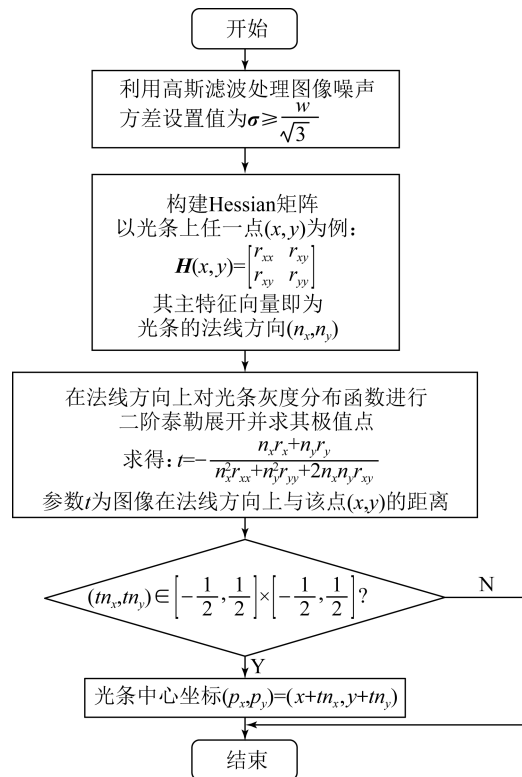
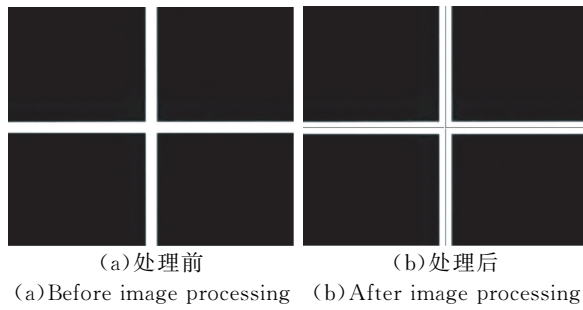


图 7 Steger 算法步骤

Fig. 7 Flow-chart of Steger algorithm

经 Steger 算法处理后,可得到如图 8 所示的效果。



(a)处理前 (b)处理后

(a)Before image processing (b)After image processing

图 8 Steger 提取十字光条中心

Fig. 8 Extraction of center of light stripe with Steger algorithm

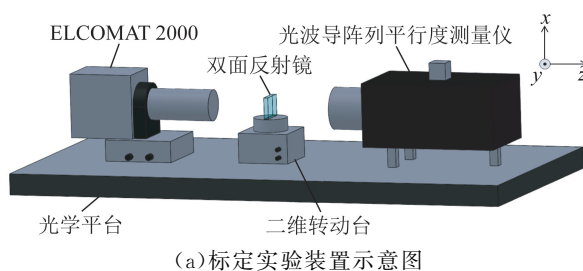
图 8(b)是经过 Steger 算法提取出的十字光条中心线上所有的点,为了找到光条的十字交点,需要分别将水平和垂直两条中心线上所有的点拟合成两条直线,它们的交点即为自准直回像的中心点。

## 5 实验

### 5.1 标定及线性实验

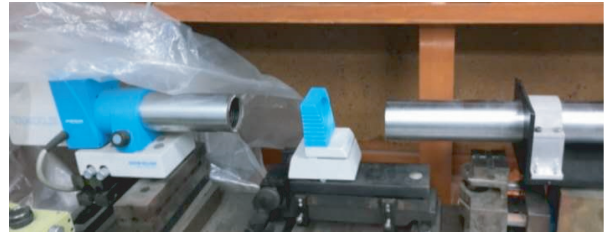
利用 ELCOMAT2000 型光电自准直仪作为标准来标定本文所设计的光波导阵列平行度测量仪。ELCOMAT2000 型光电自准直仪的最大示值误差为 $\pm 0.25''$ 。将它们放置于光学平台上,在中间放置二维转动台,并在转动台上方固定放好一个双面反射镜,如图 9 所示。

以标定光波导阵列平行度测量仪的  $x$  轴输出的像素当量为例,固定好二维转动台的  $y$  方向旋钮,调节  $x$  方向旋钮使得双面反射镜偏转一个较大的角度,但同时要确保测量仪能够接收到自准直回像,根据 ELCOMAT2000 的角度测量值和自准直回像移动的像素点数可以标定出  $x$  轴的像素当量为  $0.71 (''/\text{pixel})$ 。 $y$  轴的像素当量标定方法同  $x$  轴,标定结果也为  $0.71 (''/\text{pixel})$ 。



(a)标定实验装置示意图

(a)Schematic diagram of calibration experimental equipment



(b)标定实验装置实物图

(b)Photo of calibration experimental equipment

图 9 光波导阵列平行度测量的标定实验装置

Fig. 9 Experimental calibration equipment for waveguide array parallelism measurement

利用上述标定步骤及装置还可以检测光波导阵列平行度测量仪的线性指标。以检测测量系统中  $x$  轴的线性为例,首先调整双面反射镜的  $x$  轴旋钮使它置于角度值  $-125''$ ,然后调整  $y$  轴旋钮使自准直回像能回到一个合适的位置。然后在  $-125'' \sim +125''$  内以  $25''$  为增量调节双面反射镜的  $x$  轴旋钮, $y$  轴的线性测试方法与  $x$  轴相同,绘制  $x$  轴与  $y$  轴各组数据的误差曲线如图 10 所示。

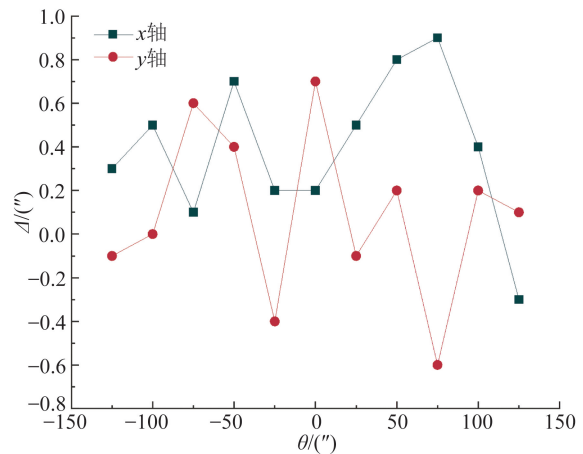


图 10 光波导阵列平行度测量仪误差曲线

Fig. 10 Error curves of waveguide array parallelism measuring instrument

由此可知,在  $-125'' \sim +125''$  内,光波导阵列平行度测量仪的  $x$  轴和  $y$  轴最大非线性误差分别为  $0.9''$  和  $0.7''$ 。

### 5.2 光波导阵列平行度测量实验

光波导阵列平行度测量系统如图 11 所示。首先将光波导阵列平行度测量仪、旋转调整台以及载物台置于光学平台上,将光波导放置在载物台上,将反射镜置于旋转调整台上,调整各仪器使

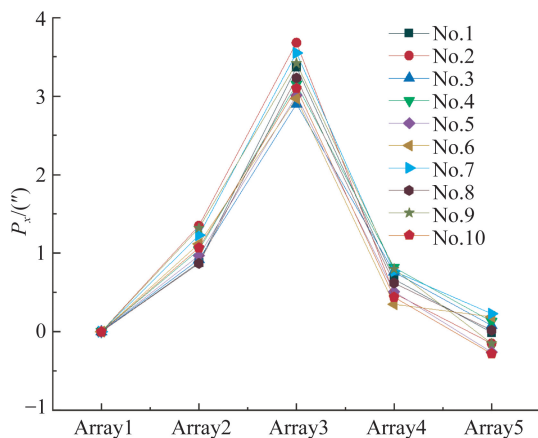
光波导阵列平行度测量仪的平行光束中心高度与光波导、反射镜的中心高度一致,并调整光源控制器至最大光强附近,方便寻找返回像,然后再调节旋转调整台以调整反射镜的姿态,直至测量仪能在合适的位置接收到返回像。



图 11 光波导阵列平行度测量系统

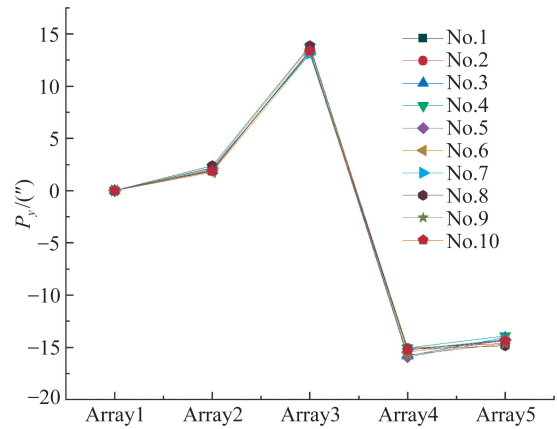
Fig. 11 Parallel measurement system of waveguide array

移动狭缝,使测量仪每次只接收光波导阵列中一个半透半反膜的自准直回像,并利用计算机中的软件设置光源控制器参数,将光条亮度调整至合适亮度,由于每个半透半反膜的光能利用率可能不同,因此每移动一次狭缝都需要调节一次光源控制器参数。最后用软件处理自准直回像,记录每一个十字光条的中心坐标。本实验是相对测量,以第一个阵列面为基准(0''),利用每一个自准直回像与第一个阵列面的自准直回像的相对位置  $\Delta x, \Delta y$  以及公式(21)即可计算出光波导阵列之间的平行度  $P_x, P_y$ ,在同一环境下对同一光波导重复上述测量过程 10 次。



(a)x 方向上的平行度误差  $P_x$

(a)Parallelism error in x direction



(b)y 方向上的平行度误差  $P_y$

(b)Parallelism error in y direction

图 12 同一光波导的阵列平行度误差 10 次测量结果  
Fig. 12 Ten measurement results of same waveguide array's parallelism error

已知被测光波导有 5 个半透半反膜阵列面,相邻两个半透半反膜的间距为 1.6 mm,光波导内全反射镜倾角为  $55^\circ$ ,半透半反膜的理论倾角为  $35^\circ$ ,光波导表面折射率为  $n = 1.51630$ 。另外,被测光波导的设计加工要求为:半透半反膜阵列的平行度误差要在  $\pm 30''$  以内。10 次测量结果如图 12 所示。

按照贝塞尔公式(22)对数据分别进行标准差计算,计算结果如表 1 所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (22)$$

表 1 光波导阵列平行度的测量平均值及标准差计算结果  
Tab. 1 Average and standard deviation results of parallelism

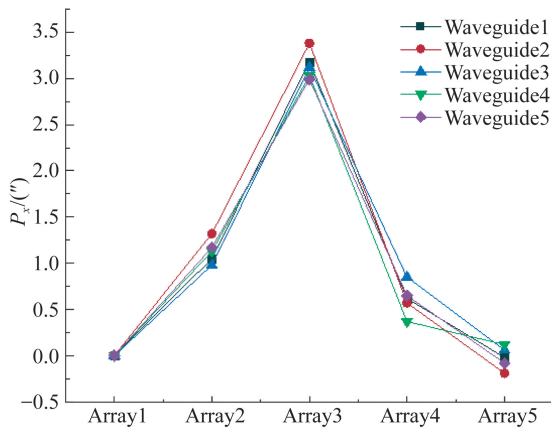
平行度	阵列面 1	阵列面 2	阵列面 3	阵列面 4	阵列面 5
平均值 $P_x$	0	1.08''	3.19''	0.62''	-0.02''
$P_y$	0	2.01''	13.40''	-15.40''	-14.37''
标准差 $\sigma_x$	0	0.18''	0.29''	0.17''	0.14''
$\sigma_y$	0	0.19''	0.24''	0.32''	0.28''

以标准差  $\sigma_x, \sigma_y$  作为光波导阵列在 x 方向和 y 方向上的平行度重复性误差,则在 x 方向平行度测量的最大重复性误差为  $0.29''$ ,y 方向的最大重复性误差为  $0.32''$ 。

为了验证该测量方法的正确性,需要进行验证实验。但由于光波导的加工工艺十分复杂,其

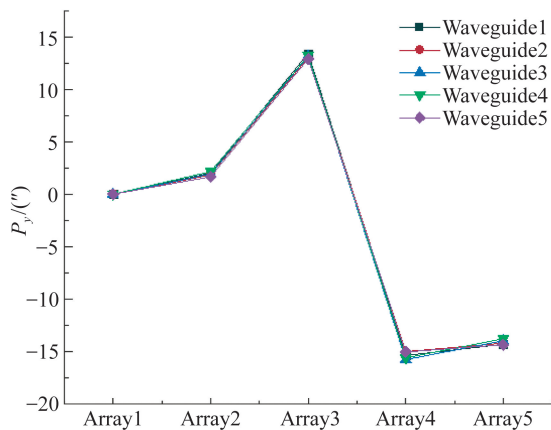
中的半透半反膜阵列需要经过镀膜、胶水黏合、切割等一系列过程才能制成,因此无法确切得知加工出来的光波导阵列的平行度,只已知设计加工的误差要求范围。不仅如此,当前国内外在对于光波导阵列的平行度测量这一方面并没有可以实际使用的测量方法,因此无法进行对比实验。

于是这里采用了另一种方法来验证本测量方法的正确性,即在同样的设计加工要求下(半透半反膜阵列平行度误差要求在 $\pm 30''$ 内)对同一批采用同种工艺加工的 5 个光波导的阵列平行度分别进行测量,测量结果如图 13 所示。可以看出,同一批的这 5 个光波导阵列的平行度测量结果近似相同,可以证明本原理的正确性。



(a)  $x$  方向上的平行度误差

(a) Parallelism error in  $x$  direction



(b)  $y$  方向上的平行度误差

(b) Parallelism error in  $y$  direction

图 13 5 个不同光波导的阵列平行度误差测量结果

Fig. 13 Measurement results of five different waveguide arrays' parallelism error

在测量光波导阵列面的平行度时,误差来源主要包括光波导平行度测量仪引入的误差以及测量系统中使用的狭缝、实际光波导以及反射镜、测量环境等引入的误差。

首先对光波导阵列平行度测量仪的误差  $u(\delta)$  进行分析,包括标定时不确定度  $u_1(\delta)$  以及测量时的不确定度  $u_2(\delta)$ ,其中  $u_2(\delta)$  由测量仪的最大非线性误差计算可得,均以正态分布估计:

$$u(\delta) = \sqrt{u_1^2(\delta) + u_2^2(\delta)} = \sqrt{\left(\frac{0.25''}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.9''}{2}\right)^2} = 0.47''.$$

而引入的其它误差无法采用经验值估计,测量时重复性误差包括了这些误差源,因此用重复性误差来近似代替这些误差因素的总和。本实验的最大重复性误差为  $0.32''$ ,因此,平行度测量的不确定度为:

$$u(P) = \sqrt{(0.32'')^2 + (0.47'')^2} = 0.57''.$$

取包含因子  $k=2$ ,则扩展不确定度为:

$$U(P) = ku(P) = 1.14''.$$

## 6 结 论

为了提高几何光波导的成像质量,需要尽量减小其中的半透半反膜阵列的平行度误差,本文依据光学自准直原理,配合光波导的工作原理,结合 Steger 图像处理算法,设计了一套光波导阵列平行度测量系统。经实验与分析,光波导阵列平行度测量仪在  $-125'' \sim +125''$  内, $x$  轴和  $y$  轴最大非线性误差分别为  $0.9''$  和  $0.7''$ ,平行度测量的  $x$  方向和  $y$  方向重复性误差分别为  $0.29''$  和  $0.32''$ ,测量不确定度为  $1.14''$ 。该测量系统结构简单,可以实现光波导阵列平行度的高精度、快速测量,对几何光波导的成像质量改善有着重要作用,可以有效改善光波导中存在的明暗条纹等问题,推动几何光波导技术的发展。

## 参考文献:

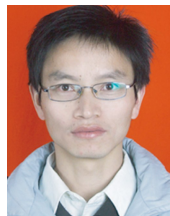
- [1] AI S. Radiation modulation via violation of total internal reflection with excitation of a waveguide mode [J]. *Technical Physics*, 2008, 53(6): 732-736.
- [2] ZHANG Y N, ZHU X L, LIU A, *et al.*. Modeling and optimizing the chromatic holographic waveguide display system[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(34): G84.
- [3] GU L, CHENG D W, WANG Q W, *et al.*. Design of a two-dimensional stray-light-free geometrical waveguide head-up display [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(31): 9246-9256.
- [4] 呼新荣, 刘英, 王健, 等. 半透膜阵列平板波导式头戴显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 216-221.
- HU X R, LIU Y, WANG J, *et al.*. Optical system design of head-mounted display based on planar waveguide of semi-transparent film array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 216-221. (in Chinese)
- [5] LUMUS LTD. Eye tracker based on retinal imaging via light-guide optical element; EP3397137 [P]. 2019-10-30.
- [6] XU M M, HUA H. Methods of optimizing and evaluating geometrical lightguides with microstructure mirrors for augmented reality displays[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5523-5543.
- [7] 李晨. 双面平行度测量方法与评定策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- LI CH. *Research on Measurement Method and Evaluation Strategy of Double-Faced Parallelism* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [8] 楼志斌, 赵辉, 刘权, 等. 结合激光准直的二维转角动态测量系统 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3): 561-568.
- LOU ZH B, ZHAO H, LIU Q, *et al.*. Two-dimensional rotation angle dynamic measurement system combining laser collimation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 561-568. (in Chinese)
- [9] HUANG Y G, YANG Y, LIANG J Q, *et al.*. An optical glass plane angle measuring system with photoelectric autocollimator [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2019, 2(2): 71-76.
- [10] WANG W X, LIANG Y J. Rock fracture centerline extraction based on hessian matrix and steger algorithm[J]. *Ksii Transactions on Internet and Information Systems*, 2015, 9(12): 5073-5086.

## 作者简介:



黄银国(1978—),男,江西九江人,副教授,2010年于天津大学获得博士学位,主要从事光电传感技术的研究。E-mail: hyg@tju.edu.cn

## 通讯作者:



李杏华(1976—),男,江西南昌人,副教授,主要从事光电传感技术以及几何量误差分析及测量的研究。E-mail: lixinghua@tju.edu.cn