

# 斐索式红外干涉仪研制和测试技术研究

袁 群 高志山 李建欣 周宇轩 褚 光 石 钊

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 研制了斐索式红外干涉仪,口径为  $\phi 120$  mm,配置  $F/1, F/4$  标准球面锗透镜,用于检测红外非球面透镜的非球面面形和波像差质量。干涉仪中采用两个红外探测器分别形成对点、测试两路成像光路,并配合光栅尺,实时监控标准镜和被测件的方位,解决了红外光不可见性带来的测试中装夹调整的困难。采用在线标定的方法,实现了大伸长量移相器的标定。使用干涉仪检测了红外非球面透镜的质量,并标定了系统误差。检测结果表明,干涉仪的测量精度均方根(RMS)值优于  $0.01\lambda$ ,测量重复性 RMS 优于  $0.002\lambda$ 。

**关键词** 测量; 红外干涉仪; 双视场; 非球面; 光栅尺

**中图分类号** TN21 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0808001

## Research on Techniques of Fabrication and Measurement about Fizeau Infrared Interferometer

Yuan Qun Gao Zhishan Li Jianxin Zhou Yuxuan Chu Guang Shi Yang

(Institute of Electrical Engineering & Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** A Fizeau infrared (IR) interferometer which can test the quality of aspheric surfaces and wavefront aberration of IR aspheric lens is designed and fabricated. The interferometer with aperture of  $\phi 120$  mm comprises  $F/1$  and  $F/4$  standard germanium lens. Two IR detectors are mounted on imaging paths for alignment and measurement, which can be used to monitor orientations of standard lens and elements under test, coupled with raster ruler. The configuration solves the problems of adjustment brought by invisible characteristic of IR light. Phase shifter with great elongation is calibrated by technique of on-line calibration. The quality of IR aspheric lens is measured with the interferometer, and system errors of the interferometer are also tested. Results indicate that the accuracy and repeatability of the interferometer are better than  $0.01\lambda$  (RMS) and  $0.002\lambda$  (RMS), respectively.

**Key words** measurement; infrared interferometer; dual field of view; aspheric surface; raster ruler

**OCIS codes** 120.3180; 040.3060; 120.4640; 220.1250

## 1 引言

红外光学系统中采用非球面设计可以降低各种单色像差,提高像质,简化光学系统结构。随着红外探测等技术的深入发展,红外非球面透镜已经得到广泛的应用,因此对其光学质量的检测也显得尤为重要。红外非球面透镜的光学质量包含非球面面形质量和透射波像差质量。红外干涉仪采用波长较长的  $\text{CO}_2$  激光作为光源,可不采用补偿器直接测量与参考面形偏差较大的被测件,测试对象较广泛,有效地降低了检测成本,  $\text{CO}_2$  激光又可以透射红外材料,所以可采用红外干涉检测技术测量红外非球面透镜。

自 1980 年 Veeco 公司加工出首台移相式红外干涉仪以来<sup>[1]</sup>,国内外已研制出多台光机电一体化红外干涉仪。美国马里兰大学<sup>[2~4]</sup>、南京理工大学<sup>[5~7]</sup>、中国科学院光电研究所<sup>[8,9]</sup>等均研制了红外干涉仪。目前红外干涉仪的光路形式有泰曼格林式和斐索式两种,泰曼格林式两臂分离,系统误差控制与稳定性没有斐索式好。红外干涉仪的设计难点在于红外光的不可见性带来的仪器装调阶段和实际检测操作时的不方便,但到目前为止未能提出行之有效的方法解决上述困难。现有的斐索式红外球面干涉仪在实际检测过程中通过调整被测件获得可见光

收稿日期: 2011-03-07; 收到修改稿日期: 2011-03-24

作者简介: 袁 群(1986—),男,博士研究生,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail:karmen86913@126.com

导师简介: 高志山(1966—),男,博士,教授,主要从事光学测试、光学设计和眼视光学等方面的研究。

E-mail:zhishgao@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

条件下的干涉图,从而获得红外光条件下的干涉图,但光路中 ZnSe 扩束准直镜将使得可见光和红外光不完全共光路,即使获得了可见光条件下的干涉图,也很难同步获得红外光条件下的干涉图,必须做精细的调整才能获得红外干涉图。

本文设计并研制了一台可完成平面和球面测量的移相斐索式红外干涉仪,能满足红外光和可见光共光路条件,采用两个红外探测器分别形成对点、测试两路成像光路,同时配合光栅尺,解决了红外干涉仪在装调和实际检测过程中的困难。利用该干涉仪检测了红外非球面透镜的光学质量。

## 2 仪器的系统结构和原理

### 2.1 系统组成

斐索式红外干涉仪原理框图如图 1(a)所示。干涉仪主机 1 中的 CO<sub>2</sub> 激光器的功率为 5 W,配有水冷装置 3。标准镜 8 装夹在配备移相器的二维调整架 7 上,被测件装夹在五维调整架 9 上,五维调整架 9 通过滑块固定在导轨 10 上,导轨 10 与光栅尺 11 相连接,光栅尺的数显表实时显示被测件的轴向位置,用于被测件的精确定位。电源箱 6 给干涉仪主机 1 中的激光器和探测器等供电,同时给出移相测量时二维调整架 7 中移相器的电压信号。干涉仪主机 1 中采用两个红外焦平面阵列作为探测器分别采集对点、测试双视场图像,对点/测试切换装置 4 选择对点图像信号或测试图像信号并分频成两路,一路输入到监视器 5 用于测试操作时观察,另一路被计算机 2 接收。

红外探测器的分辨率为 388 pixel×284 pixel,

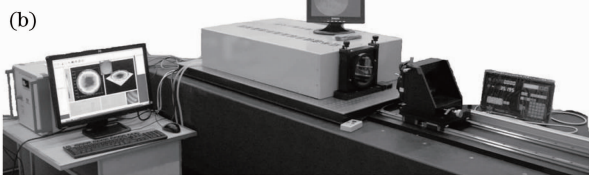
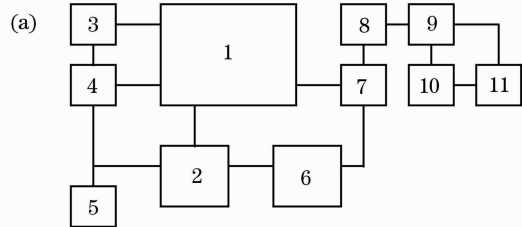


图 1 斐索式红外干涉仪的组成。(a) 系统框图;  
(b) 实物照片

Fig. 1 Schematic diagram of Fizeau IR interferometer  
(a) Block diagram; (b) photo

其采集的干涉图经图像采集卡形成 8 byte 的数字图像被计算机处理。干涉测试软件恢复波面数据并进行处理,给出波面的一维波差曲线、二维等值图、三维波差分布,并计算波面峰-谷(PV)值、20 点 PV 值、均方根(RMS)值,Zernike 多项式系数、赛德像差系数,被测光学系统的点扩展函数(PSF)、调制传递函数(MTF)和点列图等。

干涉仪有效测试口径  $\phi 120$  mm,配备平面标准镜完成对粗磨平面的测量,配备  $F/1$  和  $F/4$  球面标准镜完成对粗磨球面、非球面的测量。同时,配合标准镜头和参考反射球面可以实现对红外光学系统的透射波像差质量或红外材料的折射率均匀性的测量。图 1(b)为斐索式红外干涉仪的实物照片。

### 2.2 光路设计

斐索式红外干涉仪光路主要由光源、扩束准直光路、对点成像光路和测试成像光路组成,图 2 为红外干涉仪检测平面时光路原理图。CO<sub>2</sub> 激光器 1 发出  $\lambda=10.6 \mu\text{m}$  的红外激光经反射镜 3、4 入射至扩束镜 5,扩束镜 5 将入射的小口径平行光会聚,光束经过会聚焦点以后变为发散的球面波。球面波依次经过分光镜 6、7 反射至离轴抛物面反射镜 8。离轴抛物面镜 8 有效口径 140 mm,离轴量 120 mm,焦距 720 mm。离轴抛物面反射镜 8 的焦点与扩束镜 5 的焦点重合,发散球面波经离轴抛物面反射镜 8 反射后变成准直的平行光束,这样形成扩束准直光路。平行光束经过相互平行的标准镜 17 和被测件 18 返回再经离轴抛物面反射镜 8 反射变为会聚的球面波。会聚的球面波一部分经分光镜 7 的前表面反射,依次透射经过分光镜 6、小孔光阑 9 和成像透镜 10,最终被测试红外探测器 11 采集形成测试成像光路;另一部分经分光镜 7 透射,经折转反射镜 12 折转光路,透射通过毛玻璃屏 13 衰减部分光强,经折转反射镜 14 入射至成像透镜 15 最终被对点红外探测器 16 采集形成对点成像光路。

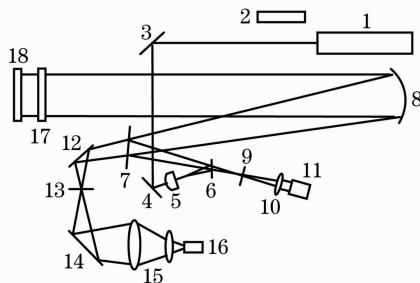


图 2 斐索式红外干涉仪光学系统图

Fig. 2 Schematic diagram of Fizeau IR interferometric optical system

对点成像光路中对点红外探测器 16 可以在较大的视场范围内对标准镜和被测件成点像,从而监测标准镜和被测件的倾斜、俯仰二维信息,实现对标准镜和被测件的粗调定位。测试成像光路中测试红外探测器 11 采集标准镜和被测件干涉形成的干涉图,完成对标准镜和被测件的精调定位。

由于红外 CO<sub>2</sub> 激光不可见,在对于干涉仪光学系统中的元件进行装配时,引入 He-Ne 激光器 2 进行可见光辅助调整光路。光路调整完成后,将 He-Ne 激光器 2 从光路中移出。为了满足可见光和红外光共光路的要求,在干涉仪的扩束准直光路中尽量少采用透射式元件多采用反射式元件。扩束镜 5 是扩束准直光路中唯一的透射元件,采用 ZnSe 材料并镀可见光增透膜,它将入射的小口径准直光束聚焦,可见光和红外光条件下的焦点仅相差 0.42 mm,所以在干涉仪的扩束准直光路中,可见光和红外光光路基本一致,从而可以采用可见光辅助校准的方法调整光路。

### 2.3 标准镜头

斐索式红外干涉仪测量时需配备红外标准镜头。除锗平晶作为平面标准镜以外,还需红外标准球面透镜用于球面或非球面的测量。可见光波段的标准球面透镜一般采用 2~4 片正透镜,若以此结构用红外材料加工红外标准球面透镜会存在以下问题:1) 红外材料的价格昂贵,采用多片式结构耗费的材料较多使得成本较高;2) 红外材料的折射率高,使得红外标准球面透镜的透射率降低,需对多个面镀红外增透膜,提高了加工成本;3) 红外材料的比重大,采用多片式结构会使得标准球面透镜的装

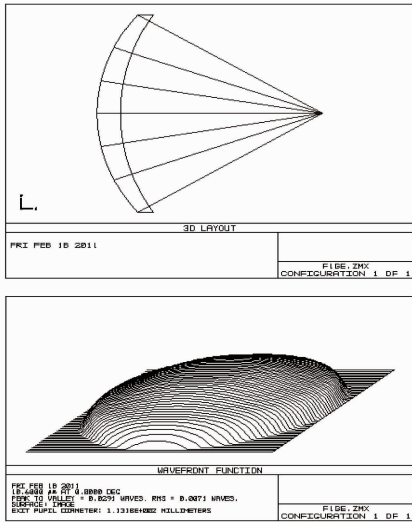


图3 F/1 标准球面锗透镜波像差质量图

Fig.3 Wavefront aberration of F/1 standard germanium lens

夹扭矩大,造成干涉图不稳定。为了克服以上缺点,红外标准球面透镜采用单片非球面锗透镜设计加工。锗材料的折射率比红外波段的硒化锌、硫化锌等材料高很多,可以加工小矢高大半径的曲面,且较高的折射率有利于减小像差从而降低设计难度,并使得标准球面透镜可以采用单片透镜的形式设计,这样既降低了加工成本又减小了装夹扭矩。为了进一步提高波像差质量,对透镜的前表面采用非球面设计。标准球面透镜将斐索式红外干涉仪出射的准直平面波转化为 PV 值优于  $\lambda/20$  的标准球面波,且焦点与最后一个球面的曲率中心重合。图 3 为采用单片非球面设计的 F/1 标准球面锗透镜的波像差质量图,设计结果  $d_{PV} = 0.0291\lambda$ ,  $D_{RMS} = 0.0071\lambda$ 。

### 3 移相算法和移相器的标定

斐索式红外干涉仪中采用重叠四步平均法进行相位计算<sup>[10]</sup>。该方法以传统四步法为基础,对干涉光强作采样间隔  $\pi/2$  的  $2M+3$  次采样,四个光强场为一个周期计算一个相位值,再对所得  $2M$  个相位值求平均得到所要求的相位,这样就能用  $M$  组相位值的正负抵消移相误差,并随着  $M$  的增加,消除误差的效果越好。通常取  $M=4$ ,采集 11 幅移相干涉图,就达到预期的效果,这就是重叠四步平均法的算法。通过  $2M$  次循环取平均可得到实际相位分布为

$$\bar{\phi} = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^{2M} \arctan\left(\frac{I_{k+3} - I_{k+1}}{I_k - I_{k+2}}\right). \quad (1)$$

红外 CO<sub>2</sub> 激光的波长是可见光的 17 倍,所以红外干涉仪中移相器的伸长量也要比可见光干涉仪中的长。红外干涉仪中每  $\pi/2$  移相对应移相器伸长量为  $1.325 \mu\text{m}$ ,11 幅移相干涉图要求移相器伸长量至少为  $10.6 \mu\text{m}$ 。大伸长量的移相器在移相过程中存在较大的移相线性误差和非线性误差,且工作状态不够稳定,需对其进行校正。本装置中采用伸长量  $70 \mu\text{m}$  的压电陶瓷 (PZT) 构建移相器,每次测量时进行移相器在线标定。在线标定的基本原理是:控制 PZT 实现移相,对移相干涉图序列中空间一点  $(x, y)$  得到一系列的光强值,如图 4 所示。对这些光强值进行一维时域傅里叶变换,处理得到移相量。

$t$  时刻的光强值为

$$I(t) = a + b\cos(4\pi\Delta x t/\lambda + \phi_0), \quad (2)$$

式中  $\Delta x$  表示移相步长,  $\phi_0$  表示初始相位差。取

$$f_0 = \frac{4\pi\Delta x}{\lambda}, c = \frac{b}{2} \exp(j\phi_0), \text{ 则 (2) 式可以表示成指}$$

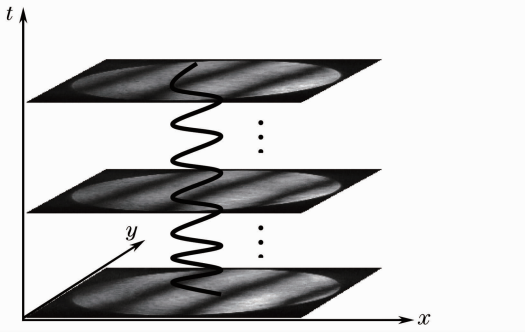


图 4 移相干涉图序列中空间一点的光强曲线  
Fig. 4 Intensity curve of one point in phase shifting interferograms

数形式

$$I(t) = a + c \exp(jf_0 t) + c^* \exp^*(-jf_0 t). \quad (3)$$

对(3)式做傅里叶变换

$$I(f) = A(f) + C(f - f_0) + C^*(f + f_0), \quad (4)$$

式中  $C(f - f_0) = \pi b \exp(j\varphi_0) \delta(f - f_0)$ ,

$$C^*(f + f_0) = \pi b \exp(-j\varphi_0) \delta(f + f_0),$$

式中 \* 表示共轭,取出一级旁瓣并移至原点,做傅里叶逆变换

$$\mathcal{F}^{-1}[C(f)] = \frac{1}{2} b \exp(j\varphi_0 + jf_0 t), \quad (5)$$

由(5)式可得相位值

$$\varphi_0 + f_0 t = \arctan \frac{\text{Im}\{\mathcal{F}^{-1}[C(f)]\}}{\text{Re}\{\mathcal{F}^{-1}[C(f)]\}}. \quad (6)$$

通过相邻时刻点的相位值相减,可以得到每步移相的步进量  $\Delta\varphi$ ,这样就得到了移相器控制电压  $V$  与  $\Delta\varphi$  之间的关系。采用干涉仪进行干涉测量时,先根据估算的步进量-电压曲线的斜率粗采样移相间隔约  $\pi/2$  的 32 幅干涉图,取干涉图上  $N$  个点,对每个点的 32 个光强值进行傅里叶变换处理后取平均得到步进量和电压之间的关系;对二者进行拟合,寻找相位改变  $\pi/2$  时对应的电压;根据标定好的电压信号,控制移相器采集间隔  $\pi/2$  的 11 幅干涉图用于波面计算。由于移相器标定和实际移相测试过程的间隔时间较短,移相器的步进量-电压曲线基本不发生变化,所以在线标定的方法适用于斐索式红外干涉仪上大伸长量的移相器结构,并且每一次测量时进行在线标定即使在工作环境或状态发生变化时,也可获得移相较准确的干涉图。

## 4 斐索式红外干涉仪的测试方法和实例

### 4.1 红外非球面透镜质量检测

斐索式红外干涉仪测量红外非球面透镜非球面

面形的装置原理如图 5(a)所示。由于红外光的不可见性,不能像在可见光干涉仪上那样通过观察出射标准球面波的焦点从而判断被测件应该放置的位置。斐索式红外干涉仪检测非球面面形时,先根据标准球面镜的焦距寻找猫眼位置,再根据被测件的半径寻找共焦位置。

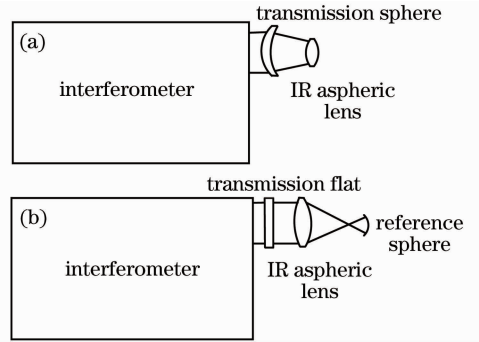


图 5 红外非球面透镜质量检测。(a) 非球面面形;  
(b) 波像差

Fig. 5 Test quality of IR aspheric lens. (a) Aspheric surface; (b) wave aberration

非球面面形检测时装夹调整的过程为:首先通过切换对点和测试两种状态分别粗调和精调标准球面镜的方位,图 6(a)为对点状态下的图案。然后根据标准球面镜的焦距,调整红外透镜的非球面至猫眼位置。图 6(b)为非球面位于猫眼位置附近的干涉图,猫眼位置的干涉图应该充满整个背景,实际测量时应该将干涉图调整到零条纹状态,这样更接近猫眼位置。最后根据被测非球面半径的理论值,参照实时监测被测件位置的光栅尺数显表的读数,将非球面移动到共焦位置附近。通过切换对点、测试两种状态调整出对比度较好边缘清晰的干涉图。图 6(c)为实际检测非球面时的干涉图,标准球面镜相对孔径为 1:1,被测非球面相对孔径为 1:2.1,所以干涉图只占背景图案的一部分。

被测件的面形为偶次非球面

$$z = \frac{x^2}{R + \sqrt{R^2 - (1 + K)x^2}} + A_4 x^4 + A_6 x^6. \quad (7)$$

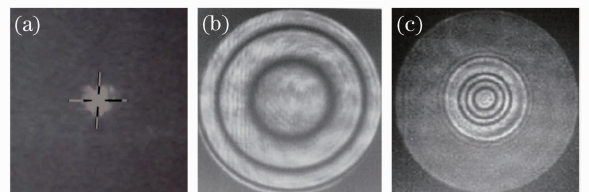


图 6 对点图像和干涉图。(a) 对点; (b) 猫眼; (c) 共焦  
Fig. 6 Image for alignment and interferograms  
(a) For alignment; (b) cat's eye; (c) confocal

斐索式红外干涉仪检测的结果为非球面与最佳参考球面的面形偏差值,图 7(a)~(c)分别为干涉测试软件给出的三维波差分布,二维等值图和  $X, Y$  两个方向上的一维波差曲线,测量 PV 值为  $1.217\lambda$ 。图 7(d)为根据非球面方程计算的理论一维波差曲线, PV 值为  $1.242\lambda$ 。测量值相对于理论值的偏差为 2%。可再根据理论的非球面方程,计算出被测非球面的面形误差。

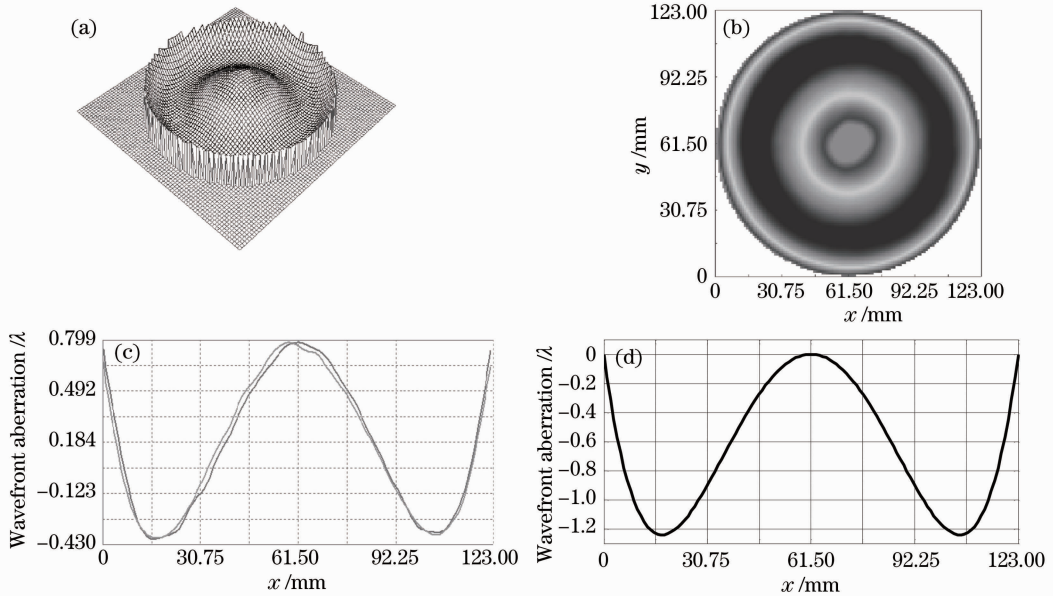


图 7 非球面面形检测结果。(a) 三维波差分布;(b) 二维等值图;(c) 一维波差曲线;(d) 理论一维波差曲线

Fig. 7 Test results of IR aspheric surface. (a) 3D wavefront; (b) 2D wavefront; (c) 1D curve; (d) theoretical 1D curve

## 4.2 系统误差标定

红外标准球面锪透镜的质量除了非球面和参考球面的面形,还包括出射球面波质量,所以必须检测红外标准球面锪透镜的综合质量。为了标定斐索式红外干涉仪的系统误差和红外标准球面锪透镜的综合质量,使用斐索式红外干涉仪检测可见光条件下面形较好的平面或球面。标定斐索式红外干涉仪测量平面时的系统误差时,采用 ZYGO 可见光干涉仪上的标准平晶( $\phi 150$  mm)作为被测件,其面形偏差 PV 值优于  $\lambda_1/20$  ( $\lambda_1 = 0.6328 \mu\text{m}$ ),在红外光条件下 PV 值优于  $\lambda/340$ ,可当成理想的平面,此时测量的波面偏差结果为斐索式红外干涉仪的系统误差。同样,将 ZYGO 可见光干涉仪上的标准球面镜( $\phi 37$  mm,  $F/0.68$ )当成理想的球面,标定斐索式红外干涉仪分别采用  $F/1$  标准球面锪透镜和  $F/4$  标准球面锪透镜测量球面时的系统误差。表 1 列出分别采用锪平晶、 $F/1$  标准球面锪透镜、 $F/4$  标准球面锪透镜作为标准镜头测试的数据,测量结果表明,红外标准球面锪透镜的综合质量符合要求,斐索式红

因为  $\text{CO}_2$  激光可以透射红外材料,所以红外干涉仪可以检测红外材料的透射波前,这是区别于可见光干涉仪的重要功能。红外非球面透镜透射波像差质量干涉检测的原理如图 5(b)所示,被测透镜放置在标准锪平晶和参考球面形成的干涉腔内,且与参考球面共焦。利用该原理还可以测量其他光学系统的透射波像差质量或者检测红外材料的折射率均匀性。

外干涉仪系统误差(RMS)优于  $0.01\lambda$ ,测量重复性 RMS 优于  $0.002\lambda$ 。干涉测试软件可记录系统误差,实际测量时可将系统误差扣除。

表 1 红外斐索干涉仪标准镜测量结果

Table 1 Test results of Fizeau IR interferometer with standard lens

Test results	PV	RMS
TF	$0.052\lambda$	$0.010\lambda$
TS( $F/1$ )	$0.063\lambda$	$0.010\lambda$
TS( $F/4$ )	$0.056\lambda$	$0.009\lambda$

## 5 结 论

介绍了自行研制的斐索式红外干涉仪的工作原理和光路设计,采用两个红外焦平面阵列作为探测器,提供了对点、测试两路成像光路,配合光栅尺,快速便捷地完成标准镜和被测件的装夹调整,解决了红外光不可见性带来的检测困难。设计并加工了高精度非球面锪透镜作为球面标准镜。采用在线标定的方法完成对伸长量为  $70 \mu\text{m}$  的移相器标定。使

用斐索式红外干涉仪测量了红外非球面透镜的非球面面形和透射波像差质量,通过检测标准平面和球面测量了干涉仪的质量,系统误差 RMS 优于  $0.01\lambda$ ,测量重复性 RMS 优于  $0.002\lambda$ 。

## 参 考 文 献

- 1 O. S. Kwon, J. C. Wyant, C. R. Hayslett. Rough surface interferometry at  $10.6\ \mu\text{m}$ [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(11): 1862~1869
  - 2 K. Verma, B. Han. Warpage measurement on dielectric rough surfaces of microelectronics devices by far infrared Fizeau interferometry[J]. *J. Electronic Packaging*, 2000, **112**(3): 227~232
  - 3 K. Verma, B. Han. Far-infrared Fizeau interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(28): 4981~4987
  - 4 K. Verma, B. Han. Sensitivity enhancement of far-infrared Fizeau interferometry by digital image processing [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(9): 1970~1977
  - 5 Chen Jinbang, Chen Lei, Wang Qing *et al.*. A large aperture phase-shifting CO<sub>2</sub> laser interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(1): 31~36
  - 6 He Yong, Chen Lei, Wang Qing *et al.*. Twyman-Green infrared phase-shifting interferometer and application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(4): 335~338
  - 7 Chen Lei, Wang Qing, Zhu Rihong. Measurement of the homogeneity of refractive index of the germanium crystal using IR interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 404~406
  - 8 Wu Yongqian, Zhang Yudong, Wu Fan *et al.*. Far-infrared Fizeau interferometer for large aspheric mirror[C]. *SPIE*, 2008, **7064**:70640S
  - 9 Wu Yongqian, Zhang Yudong, Zhang Juan. Design and fabrication of far-infrared Fizeau interferometer [C]. *SPIE*, 2010, **7659**: 765919
  - 10 Zhu Rihong, Chen Jinbang, Wang Qing *et al.*. A new algorithms on phase-shifting interferometry: the overlapping averaging 4-frame algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(12): 1288~1293
- 陈进榜, 陈磊, 王青等. 大孔径移相式 CO<sub>2</sub> 激光干涉仪 [J]. 中国激光, 1998, **A25**(1): 31~36
- 何勇, 陈磊, 王青等. 移相式泰曼-格林红外干涉仪及应用 [J]. 红外与激光工程, 2003, **32**(4): 335~338
- 陈磊, 王青, 朱日宏. 使用红外干涉仪测量锗材料折射率均匀性 [J]. 中国激光, 2005, **32**(3): 404~406
- 朱日宏, 陈进榜, 王青等. 移相干涉术的一种新算法: 重叠四步平均法 [J]. 光学学报, 1994, **14**(12): 1288~1293