

文章编号 1004-924X(2018)11-2639-08

半导体双波长透射式红外干涉仪的研制及应用

赵智亮^{1,2}, 陈立华^{2*}, 赵子嘉¹, 刘 杰², 刘 敏¹

(1. 成都太科光电技术有限责任公司, 四川 成都 610041;

2. 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要:采用 635 nm 波长半导体可见光激光和 10.5 μm 波长半导体红外激光作为干涉光源, 设计了 635 nm 和 10.5 μm 双波段共光路透射式红外干涉仪, 实现了可见光波段干涉测试与红外光波段干涉测试共光路, 且双光路共用可见光对准。双波段共用机械式相移系统, 并采用 635 nm 测试光分段驻点标定 10.5 μm 测试时相移器的长行程误差。研制的双波长红外干涉仪系统的红外测试精度达到 PV 优于 0.05 λ , RMS 优于 0.02 λ , 系统重复性 RMS 优于 0.001 λ 。采用该干涉仪测试口径为 400 mm \times 400 mm, 离轴量为 800 mm 的离轴非球面, 得到边缘最大偏差值为 21.9 μm , 能够实现大口径离轴非球面从粗磨到精磨高精度加工面形的全过程干涉测试。

关键词:光学检测; 干涉测量; 半导体双波长; 红外干涉仪; 离轴非球面

中图分类号: TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182611.2639

Fabrication and application of dual-wavelength infrared transmission-type interferometer

ZHAO Zhi-liang^{1,2}, CHEN Li-hua^{2*}, ZHAO Zi-jia¹, LIU Jie², LIU Min¹

(1. Chengdu Tyggo Photo-electricity Co. Ltd., Chengdu 610041, China;

2. Chengdu Fine Optics Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

* Corresponding author, E-mail: zzl_siom@163.com

Abstract: A 635 nm and 10.5 μm dual-band coherent optical infrared transmission interferometer was designed. This integrated system employs a visible semiconductor laser at 635 nm and an infrared semiconductor laser at 10.5 μm as the interference light source. Through tests with this integrated system, a common optical path between the interference of the visible light band and the infrared light band could be determined. The common mode of the mechanical phase shift system and the visible light co-alignment were used in the dual-band optical path, and the phase shifter long-stroke error was calibrated at 10.5 μm based on the segment stagnation point of the 635 nm testing light. The accuracy of the developed dual-wavelength infrared interferometer system was measured, where the values of PV, RMS, and RMS repeatability were better than 0.05 λ , 0.01 λ , and 0.001 λ , respectively. The interferometer was used to test an aspherical mirror with off-axis amount of 800 nm and dimensions of 400 mm \times 400 mm, where the maximum deviation of the measured edge value is 21.9 μm . Furthermore, the interferometer enables high-accurate surface measurements during the entire

收稿日期: 2018-02-10; 修订日期: 2018-03-30.

基金项目: 十三五国家重点研发计划重大科学仪器设备开发项目资助(No. 2016YFF0101900)

grinding process of large-aperture off-axis aspheric components.

Key words: optical testing; interferometry; double diode laser wavelength; infrared interferometer; off-axis aspheric surface

1 引言

近年来,光学测试技术飞速发展,尤其是干涉测试技术,其应用越来越广泛。对于 $3\sim 50\ \mu\text{m}$ 之间的光学元件表面,由于测量范围的限制,利用可见光波段的干涉测试手段难以实现非球面前期加工表面和金属粗糙表面等面形精度的测试。随着红外光学技术的发展,红外干涉测试技术和测试设备越来越多^[1-4],并受到国内外研究人员的高度重视。

1980年,美国 Veeco 公司研制了首台泰曼-格林式数字相移式红外干涉仪^[5]。此后,国内外多家研究机构和企业开始对红外干涉测试设备与技术进行研究^[6-9]。目前,国内外开展红外干涉测试的研究主要集中在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个波段,对于 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段的红外干涉测试研究均是基于 CO_2 激光输出谱线 $10.6\ \mu\text{m}$ 开展研究,测试光源也是采用 CO_2 气体激光器,激光功率的数量级均在瓦级以上^[10]。对于仪器使用的安全性,红外探测器的损伤特性对测试人员存在一定的潜在危险。 $10.6\ \mu\text{m}$ 波段为不可见光,在操作使用过程中会给测试人员带来极大的不便,同时由于采用功率为瓦级的 CO_2 气体激光器,因而操作人员的人身安全将会受到威胁。为了避免上述安全隐患,科研人员展开了一系列研究,并提出泰曼格林式测试系统、反射式非球面斐索系统等^[11-12],以解决红外干涉测试中的光路调试与可见光对准问题。目前,仅有测试对准问题得到解决,将可见光波段和红外波段结合并实现从可见到红外范围的测试与共光路对准还未见报道。

本文采用新型半导体光源作为测试光源,基于斐索透射式测试系统实现了可见光波段和红外波段同等测试精度,并解决了其共光路对准问题。采用 $10.5\ \mu\text{m}$ 半导体干涉光源,光源输出功率仅为 $100\ \text{mW}$ 左右,解决了红外测试高功率输出的安全性,同时保障了红外探测器功率损伤与过饱和问题。采用 $635\ \text{nm}$ 半导体干涉光源,并与 $10.5\ \mu\text{m}$ 波段测试系统共光路设计,同时实现双

波长测试精度与测试过程共光路对准调试。采用自研的双波长红外干涉仪测试 $400\ \text{mm}\times 400\ \text{mm}$ 的离轴非球面,实现从粗磨到高精度非球面边缘最大离轴测试^[13]偏差值于 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 的全过程测试。

2 仪器系统设计

2.1 双波长干涉测试光路

双波长红外干涉仪光学系统主要由双波段共光路准直输出模块、双波段共光路干涉测试模块、 $10.5\ \mu\text{m}$ 红外光源与干涉成像模块和 $635\ \text{nm}$ 可见光源与干涉成像及对准模块四部分组成。图 1 为双波长红外干涉仪系统光路图。

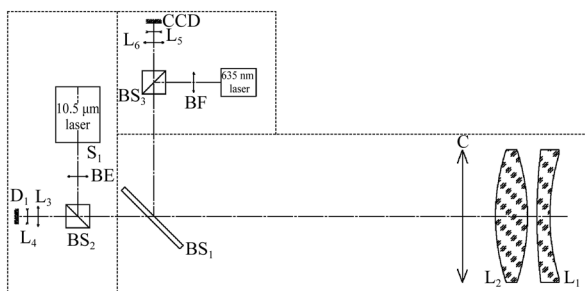


图 1 双波长透射式红外干涉仪系统光路图

Fig. 1 Optics system of dual-wavelength IR interferometer

仪器共光路准直输出模块的有效输出口径为 $80\ \text{mm}$,由标准球面镜头(由球面标准镜 L_1 和双凸球面补偿镜 L_2 组成)或平面标准楔镜、球面准直镜 C 和 45° 分光镜 BS_1 组成。光学元件 L_1, L_2, C, BS_1 和标准平面楔镜均采用宽光谱 ZnSe 材料,元件外径为 $86\ \text{mm}$,通光口径为 $82\ \text{mm}$,有效口径为 $80\ \text{mm}$ 。球面标准镜 L_1 输出面和标准平面楔镜输出面镀 $635\ \text{nm}$ 和 $10.5\ \mu\text{m}$ 双波长透射膜,透射率 $T=92\%$,标准面上剩余反射 $R=8\%$,解决了 ZnSe 材料折射率和自反射率过高而导致与被测元件反射干涉光强不同,使得干涉对比度下降的问题。球面标准镜 L_1 和标准平面楔镜另一面镀 $635\ \text{nm}$ 和 $10.5\ \mu\text{m}$ 波长的透射膜,透射率 $T>99.5\%$ 。双凸球面补偿镜 L_2 和球面准直输出

镜 C 双面均镀 635 nm 和 10.5 μm 波长的透射膜,透射率 $T > 99.5\%$ 。45°分光镜 BS₁ 双面镀 45°入射 10.5 μm 波长的透射膜,透射率 $T > 99.5\%$ 。前表面利用 10.5 μm 波长透射膜短波截止实现 635 nm 波长反射,反射率可达到 90%。

10.5 μm 红外光源与干涉成像模块由分光棱镜 BS₂、干涉成像镜头(由 L₃ 和 L₄ 组合装配而成)、红外探测器 D₁、扩束聚焦镜 BE 和 10.5 μm 红外相干光源 S₁ 组成。其中球面元件 L₃、L₄、BE 和分光棱镜 BS₂ 均采用 ZnSe 材料,球面元件双面镀 10.5 μm 波长的透射膜,透射率 $T > 99.5\%$ 。分光棱镜分光面镀 10.5 μm 波长、1 : 1 的分光膜,并采用无胶真空胶合;四面镀 10.5 μm 波长的透射膜,透射率 $T > 99.5\%$ 。扩束聚焦镜 BE 与准直输出镜 C 形成 10.5 μm 红外扩束准直输出。红外相干光源 S₁ 采用 10.5 μm 波长输出半导体相干激光光源,光源输出线宽小于 1 MHz,输出功率不大于 100 mW。红外探测器采用 640×480 pixel,单像元尺寸为 17 μm×17 μm。

635 nm 可见光源与干涉成像模块由分光棱镜 BS₃、干涉成像镜头(L₅ 和 L₆)、可见光 CCD、扩束聚焦镜和 635 nm 相干光源组成。其中球面元件 L₅、L₆、BF 和分光棱镜 BS₃ 均采用熔石英材料,球面元件双面镀 635 nm 波长的透射膜,透射率 $T > 99.8\%$ 。分光棱镜分光面镀 635 nm 波长、1 : 1 的分光膜;四面镀 635 nm 波长的透射膜,透射率 $T > 99.5\%$ 。扩束聚焦镜与准直输出镜形成 635 nm 可见光的扩束准直输出。可见相干光源采用 635 nm 波长输出半导体相干激光光源,光

源输出线宽小于 500 kHz,输出功率为 7 mW。组合干涉成像镜头中球面镜 L₆ 在安装结构上采用沿轴线移动结构,测试过程中通过沿轴线前后移动该球面镜并与球面镜 L₅ 配合,在采样 CCD 上可成像得到干涉条纹或测试对准点。可见光 CCD 采用 640 × 480 pixel,单像元尺寸为 4.65 μm×4.65 μm。

2.2 双波长准直波前分析

基于上述研制的双波长共光路红外干涉系统,共光路系统所用的准直物镜设计结果见图 2,其通光口径为 82 mm,焦距为 480 mm。



图 2 双波长共光路准直物镜设计示意图

Fig. 2 Design schematic of dual-wavelength common path collimating lens

在 635 nm 工作波长下,对应准直物镜的波像差如图 3 所示。从图中可看出,中心视场的 PV 值为 0.041 7λ,RMS 值为 0.012λ;在对应测试的 OPD 图像中,各视场的波像差值约为 0.05λ,消除系统所引起的球差效应。

在 10.5 μm 工作波长下,对应准直物镜的波像差如图 4 所示。从图中可看出,中心视场的 PV 值为 0.001 8λ,RMS 值为 0.000 5λ;在对应的 OPD 图像中,各视场的波像差值约为 0.01λ,消除系统所引起的球差效应。

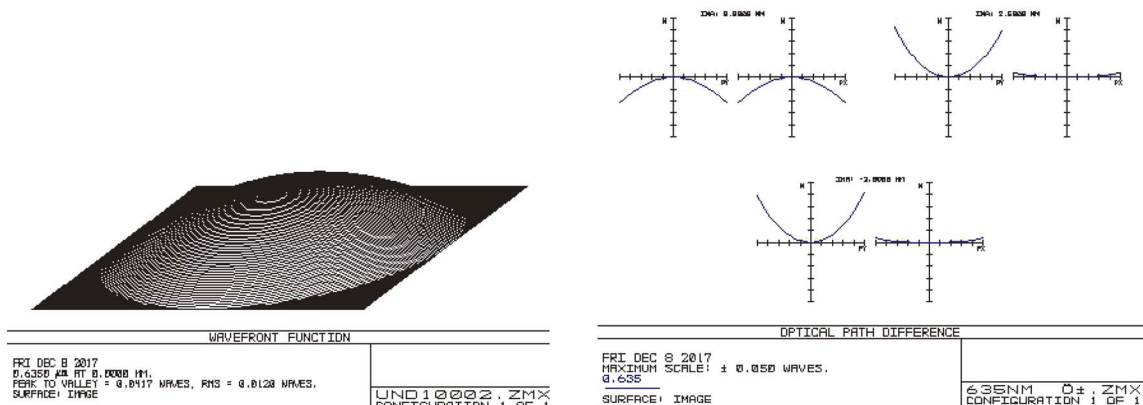


图 3 635 nm 波长下准直物镜的波像差

Fig. 3 Wave aberration of collimated objective at 635 nm

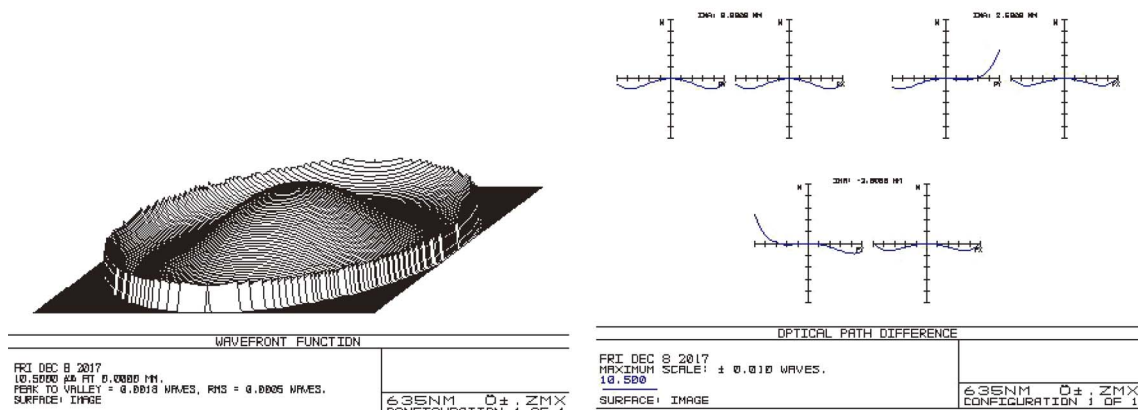


图 4 10.5 μm 波长下准直物镜的波像差

Fig. 4 Wave aberration of collimated objective at 10.5 μm

2.3 F1.5 球面标准镜设计

图 5 为 F1.5 球面标准镜的光学设计结果，通光口径为 82 mm。该光学系统由 4 片透镜组成，所用材料相同且几何形状相近。由于干涉仪以标准球面镜头的波前测试结果作为衡量参考球面的精度基准，因而精度测试主要取决于标准镜头参考球面的面形精度。

当工作波长为 635 nm 时，由图 6 所示的波前图像中可看出，中心视场 PV=0.061 2λ，RMS 值为 0.021 9λ，达到衍射极限设计。同时，在 OPD 图像中，各视场的波像差平均值约为 0.02λ，实现了光学系统的消球差设计。

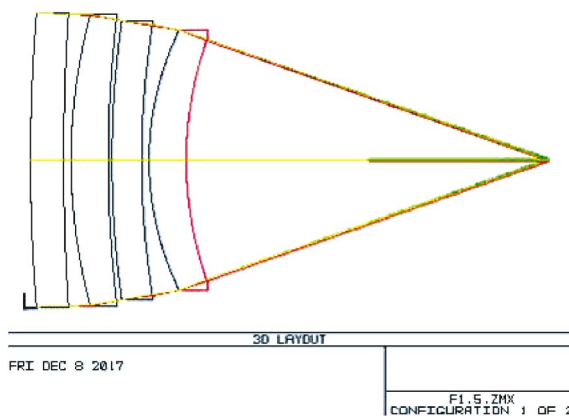


图 5 F1.5 球面标准镜头光学设计图

Fig. 5 Optical design of standard spherical lens with F1.5

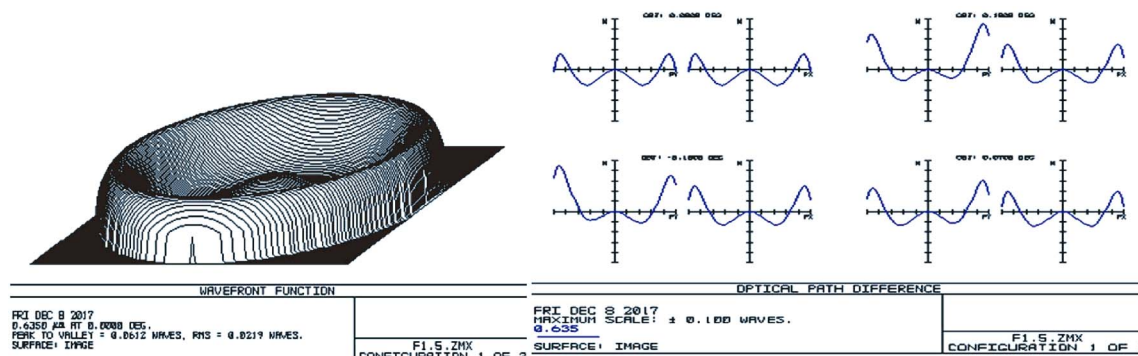


图 6 635 nm 波长下球面标准镜的波像差

Fig. 6 Wave aberration of standard spherical lens at 635 nm

当工作波长为 10.5 μm 时，从波前图像中可看出，中心视场 PV=0.004 9λ，RMS 值为 0.000 9λ，达

到衍射极限设计，如图 7 所示。为了优化成像质量，各视场 OPD 的设计值约为 0.01λ，满足消球差设计。

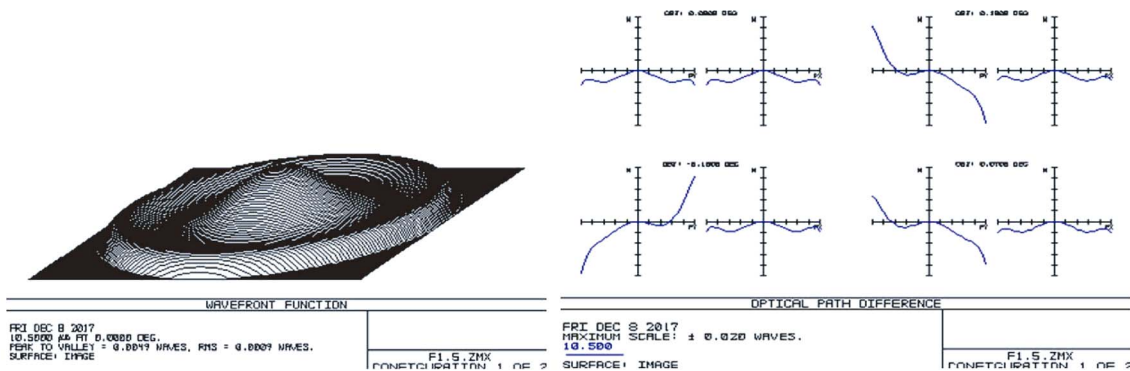


图 7 10.5 μm 波长下球面标准镜的波像差

Fig. 7 Wave aberration of standard spherical lens at 10.5 μm

2.4 光学系统容差分析

图 8 为双波长光学系统的容差分析数据。当设计透镜偏心为 ±0.05 mm, 倾斜角度为 ±0.1° 以及空气间隙为 ±0.1 mm 时, 列出十组对光学系统影响较大的数据, 均能达到装配设计要求。

Worst offenders:			
Type	Value	Criteria	Change
TSTX 1	0.100000000	0.009870808	0.003615178
TSTY 1	0.100000000	0.009860948	0.003605318
TSTY 1	-0.100000000	0.009860948	0.003605318
TSTX 1	-0.100000000	0.009842195	0.003586565
TSTY 6	-0.100000000	0.008763735	0.002508105
TSTY 6	0.100000000	0.008763735	0.002508105
TSTX 6	-0.100000000	0.008761779	0.002506149
TSTX 6	0.100000000	0.008733532	0.002477902
TABE 4	-0.607914268	0.008126672	0.001871042
TABE 5	0.363479205	0.008056112	0.001800482

Estimated Performance Changes based upon Root-Sum-Square method:	
Nominal RMS Spot Radius :	0.006256
Estimated change :	0.007098
Estimated RMS Spot Radius:	0.013354

Compensator Statistics:	
Thickness Surf 7:	
Nominal :	0.000000
Minimum :	-2.128260
Maximum :	2.183816
Mean :	0.018414
Standard Deviation :	0.334360

图 8 光学系统容差分析结果

Fig. 8 Results of tolerance analysis on optical system

3 双波长相移分析

3.1 相移算法

双波长干涉测试系统共光路共用压电相移系统, 通过相移解相分析计算被测元件面形。在实际测量中, 移相器 PZT 的位移存在一定误差, 会使相移偏离预置值, 给解相计算精度带来一定的影响。本文采用(N+1)平均四步相移算法^[14-16], 来解决移相器 PZT 的位移误差。当相移步进 π/2 时, 干涉条纹移动 1/4 周期, 将两次 π/2 相移过程产生的波前相位求平均值, 可减少误差。

(N+1)平均 4 步相移算法是在 4 幅干涉图

外再增加一幅或多幅干涉图时, 将 1~4 按四步法计算, 再将 2~5 直至 (N-3)~N (注: N>4) 连续按相同的方法全部进行计算, 并对上述结果求平均值, 得到的相位误差与单独使用四步法相比小很多, 即:

$$\tan(\varphi) = \frac{N}{D} = \frac{N_0 + N_{\pi/2}}{D_0 + D_{\pi/2}} \quad (1)$$

既是将分子分母分别求平均, 对四步法时:

$$\tan \varphi = \frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1}, N_0 = I_2 - I_4, D_0 = I_3 - I_1 \quad (2)$$

按 π/2 移相取五幅图时, 则后四幅图也按四步法得:

$$\tan \varphi = \frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_5}, N_{\pi/2} = I_2 - I_4, D_{\pi/2} = I_3 - I_5 \quad (3)$$

按平均法得五步法的计算公式为:

$$\tan \varphi = \frac{2(I_4 - I_2)}{I_1 - 2I_3 + I_5} \quad (4)$$

同理(N+1)平均法可扩展到有 N 幅图像的情况, 本文中 N 为 7, 反复平均计算过程如图 9 所示。

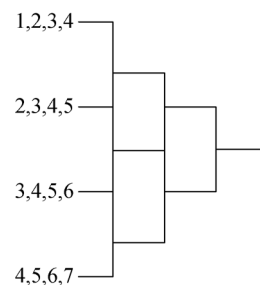


图 9 七步相移平均算法的平均过程

Fig. 9 Calculation process of seven-step phase-shift average algorithm

由式(1)按照式(2)~式(5)的计算方法,七步平均法的公式(每步相移量 $\delta_i=(i-1)\pi/2$)如下:

$$\tan \varphi = \frac{(N_0 + N_{\pi/2}) + 2(N_0 + N_{\pi/2})_{\pi/2} + (N_0 + N_{\pi/2})_{\pi}}{(D_0 + D_{\pi/2}) + 2(D_0 + D_{\pi/2})_{\pi/2} + (D_0 + D_{\pi/2})_{\pi}}$$

$$\frac{N_0 + 3N_{\pi/2} + 3N_{\pi} + N_{3\pi/2}}{D_0 + 3D_{\pi/2} + 3D_{\pi} + D_{3\pi/2}} = \frac{4(2I_4 - I_2 - I_6)}{I_1 - 7I_3 + 7I_5 - I_7} \quad (6)$$

3.2 相移系统实现与双波长相移标定

双波长干涉仪的红外测试波长为 $10.5 \mu\text{m}$, PZT 驱动相移系统, 压电陶瓷的驱动行程较长, 当采用 7 步相移时, 相位总变化量为 $7\pi/2$, 对应的相移量总行程为 $18.375 \mu\text{m}$, 考虑行程余量和波长之间的对应关系, 压电相移的行程总量为 $21 \mu\text{m}$ 。由于驱动器压电陶瓷的伸长量与驱动电压之间具有一定的线性偏差, 因而要求压电陶瓷的伸长总量足够大, 并在使用中选择满足分析行程的线性端。因此, 本文选用伸长总量为 $100 \mu\text{m}$ 的压电陶瓷作为相移驱动。

双波长干涉测试系统中, 可以通过可见光波段的相移过程选择红外测试过程中压电驱动电压线性端, 并分段驻点标定红外测试波段的相位确定电压。双波长相移系统实现与相移标定实现如图 10 所示。

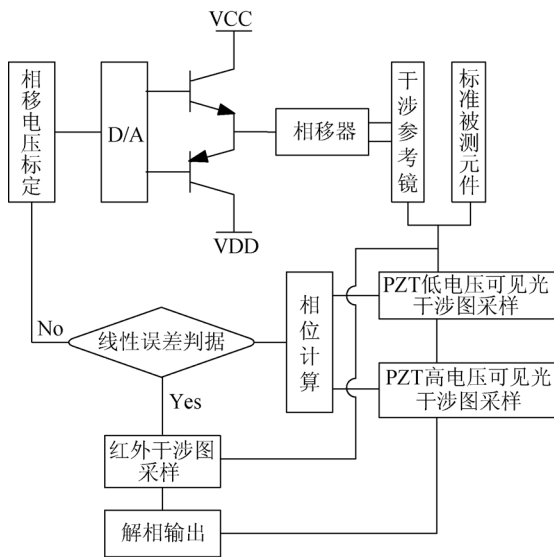


图 10 双波长相移系统实现与相位标定

Fig. 10 Implementation and phase calibration of dual wavelength phase-shift system

4 双波长红外干涉仪与测试应用实例

4.1 双波长红外干涉仪研制

本文研制的双波长透射式红外干涉仪如图 11 所示。该仪器测试输出的有效口径为 80 mm ,

ZnSe 平面标准楔镜精度 PV 优于 $\lambda_{\text{VR}}/12$ ($\lambda_{\text{VR}} = 635 \text{ nm}$), ZnSe 球面标准镜 F/1.5 标准镜精度 PV 优于 $\lambda_{\text{VR}}/10$ 。

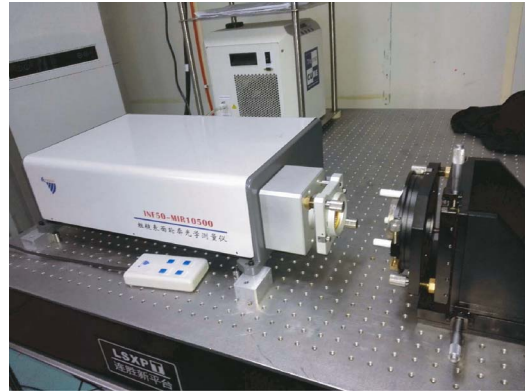


图 11 双波长透射式红外干涉仪装置

Fig. 11 Devices of dual-wavelength IR interferometer

采用该干涉仪红外平面系统测试 $\varphi 80 \text{ mm}$ 平面精磨后的粗糙表面面形。元件及干涉条纹如图 12 所示。测试的面形精度 $\text{PV} = 0.1785\lambda_{\text{IR}}$ ($\lambda_{\text{IR}} = 10.5 \mu\text{m}$) 优于 $0.2\lambda_{\text{IR}}$, $\text{RMS} = 0.0159\lambda_{\text{IR}}$ 优于 $0.016\lambda_{\text{IR}}$, 并进行 160 次系统重复测试, 统计计算 RMS 重复性 $0.0002\lambda_{\text{IR}}$ 优于 $0.001\lambda_{\text{IR}}$, 测试结果如图 13 所示。



(a) 粗糙表面光学元件 (b) 光学元件的干涉图像
(a) Optical component with rough surface (b) Fringe image of optical component

图 12 红外干涉仪测试结果

Fig. 12 Test results of infrared interferometer

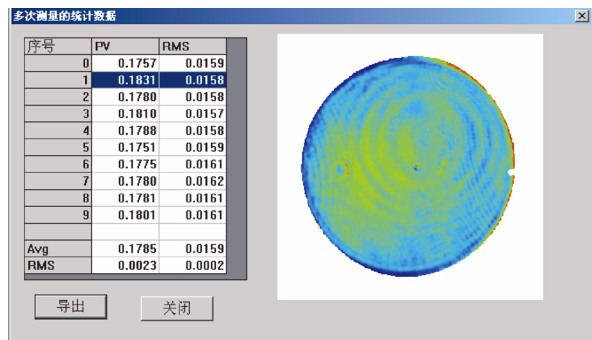


图 13 光学系统测试结果

Fig. 13 Measurement result of optical system

4.2 双波长红外干涉仪测试离轴非球面

双波长红外干涉仪对待检离轴非球面的测试过程如图 14 所示,待检离轴非球面的测试口径为 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,离轴量为 800 mm 。图中 M_1 为球面标准镜, M_2 为待检离轴非球面, M_3 为平面标准反射镜。测试过程如下:双波长红外干涉仪输出光束经球面标准镜会聚形成球面波,到达待检非球面表面反射形成平行光束,经平面标准反射镜反射形成检测光束,沿原光路返回形成自准直干涉光路进行测试。

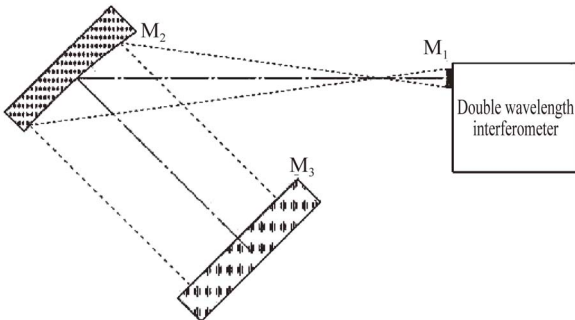


图 14 双波长红外干涉仪离轴非球面测试示意图

Fig. 14 Testing diagram of off-axis aspheric components with dual-wavelength infrared interferometer

参考文献:

- [1] 陈进榜,陈磊,王青,等. 大孔径移相式 CO_2 激光干涉仪 [J]. 中国激光, 1998, A25(1): 31-36.
CHEN J B, CHEN L, WANG Q, *et al.*. A large aperture phase-shifting CO_2 laser interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, A25(1): 31-36. (in Chinese)
- [2] VERMA K V, HAN B. Warpage measurement on dielectric rough surfaces of microelectronics device by far infrared Fizeau interferometry [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2000, 112(3): 227-232.

经 5 组 10 次重复测试得到待检离轴非球面的波面图及数据结果,如图 15 所示。待检离轴非球面边缘的最大系统偏差为 $2.086\ 1\lambda_{\text{IR}}$,均方根值 RMS 为 $0.350\ 6\lambda_{\text{IR}}$,可实现大离轴量非球面边缘面形的大误差测量。

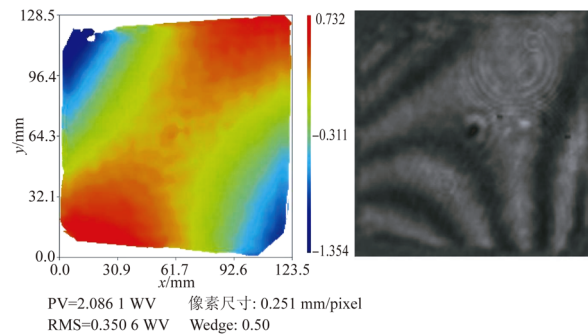


图 15 离轴非球面测试结果

Fig. 15 Measurement result of off-axis aspherical components

5 结 论

本文以 635 nm 半导体可见激光和 $10.5\ \mu\text{m}$ 半导体红外激光为干涉光源研制了双波长透射式红外干涉仪,实现了可见光波段测试与红外光波段测试的双波段共光路测试,得到红外测试精度 PV 值优于 0.05λ ,RMS 值优于 0.01λ ,系统重复性 RMS 值优于 0.001λ 。双波段共用机械式相移系统,实现了可见光波段测试光对红外波段测试的精准定位。基于上述干涉测试系统对大口径离轴非球面进行测试,得到边缘最大偏差值为 $21.9\ \mu\text{m}$,由此表明该红外干涉仪可应用于大范围离轴非球面光学元件的全过程检测。

- [3] WU Y Q, ZHANG Y D, ZHANG J. Design and fabrication of far-infrared Fizeau interferometer [C]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2010, 7659: 765919.
- [4] 贺俊,陈磊,王青,等.使用红外干涉仪测量红外材料折射率 [J]. 光子学报, 2010, 39(6): 1125-1128.
HE J, CHEN L, WANG J. Measurements of infrared materials refractive-index using infrared interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(6): 1125-1128. (in Chinese)
- [5] KWON O S, WYANT J C, HAYSLETT C R. Rough surface interferometry at $10.6\ \mu\text{m}$ [J]. *Ap-*

- plied Optics*, 1980, 19(11): 1862-1869.
- [6] YUAN Q, GAO Z S, ZHU B, *et al.*. An infrared interferometer with a broadband wavelength channel [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51: 1283-1290.
- [7] 贺俊, 陈磊. 使用红外干涉仪测量非球面面形 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 69-74.
HE J, CHEN L. Measurement of aspheric surfaces by infrared interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 69-74. (in Chinese)
- [8] 黄伟. 中远红外激光薄膜技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
HUANG W. *Study on Thin Films Technology for Mid-Far-Infrared Laser Coatings*[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. (in Chinese)
- [9] 赵维谦, 李文宇, 赵齐, 等. 被测件随机移相干涉面形测量方法 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2167-2172.
ZHAO W Q, LI W Y, ZHAO Q, *et al.*. Surface measurement by randomly phase shifting interferometry of measured element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2167-2172. (in Chinese)
- [10] PRETTYJOHNS K N, DEVORE S, DERENIAK, *et al.*. Direct phase measurement interferometer working at $3.8 \mu\text{m}$ [J]. *Applied Optics*, 1985, 24: 2211-2216.
- [11] ZHU W H, CHEN L, ZHENG D H, *et al.*. Dynamic Fizeau interferometer based on the lateral displacements of the point sources [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 91: 216-220.
- [12] EL-ZAIAT S Y, MISSOTTEN L, ENGELEN J. Radius of curvature measurement by Tyman-Green's interferometer [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1991, 15: 203-208.
- [13] 王孝坤. 大口径离轴凸非球面系统拼接检验技术 [J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 130-136.
WANG X K. Measurement of large off-axis convex asphere by systemic stitching testing method [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 130-136. (in Chinese)
- [14] ZHU M X, BAI F Z, GAN S M, *et al.*. Error compensation of four and five buckets wavefront extraction algorithms in phase-shifting interferometer [J]. *Optik*, 2013, 124: 5624-5627.
- [15] 赵智亮, 夏伯才, 陈立华, 等. 相移干涉测量中相移误差的自修正 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1116-1121.
ZHAO ZH L, XIA B C, CHEN L H, *et al.*. Self-correction of phase step error in phase shifting interferometric measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1116-1121. (in Chinese)
- [16] 朱日宏, 陈进榜, 王青, 等. 移相干涉术的一种新算法 [J]. *光学学报*, 1994, 14(12): 1288-1293.
ZHU R H, CHEN J B, WANG Q, *et al.*. A new algorithms on phase-shifting interferometry: the overlapping averageing 4-frame algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(12): 1288-1293. (in Chinese)

作者简介:



赵智亮(1974—),男,河北遵化人,博士,副研究员,2007年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,现为成都太科光电技术有限责任公司总经理,主要从事光学检测与高功率激光的研究。E-mail: zzl_siom@163.com

通讯作者:



陈立华(1973—),女,黑龙江五常人,2008年于四川大学获得硕士学位,主要从事高功率激光方向的研究。E-mail: zzl_caep@163.com