

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

光楔分光中波红外Fizeau型干涉仪光学系统设计

杨帅, 李杨, 张文喜, 伍洲, 覃日康, 樊耀轩

引用本文:

杨帅, 李杨, 张文喜, 等. 光楔分光中波红外Fizeau型干涉仪光学系统设计[J]. 光电工程, 2023, 50(5): 230014.

Yang S, Li Y, Zhang W X, et al. Optical system design of wedge beam splitter splitting mid-wave infrared Fizeau interferometer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 230014.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230014>

收稿日期: 2023-01-16; 修改日期: 2023-03-21; 录用日期: 2023-03-21

相关论文

基于并联法布里-珀罗干涉仪的高灵敏度光纤气压传感器

郭允, 吴玉纯, 王嘉浩, 张莹方, 王东宁, 徐贲

光电工程 2022, 49(8): 210420 doi: 10.12086/oe.2022.210420

激光测振仪中最小均方误差前向预测器的研究

王之昊, 张文喜, 伍洲, 孔新新, 王永彪, 郝义伟

光电工程 2022, 49(5): 210391 doi: 10.12086/oe.2022.210391

用于检测激光棒的变倾角马赫-曾德尔干涉仪

孔璐, 陈磊, 丁煜, 吴志飞, 郑东晖, 朱文华

光电工程 2020, 47(2): 190254 doi: 10.12086/oe.2020.190254

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230014

光楔分光中波红外 Fizeau 型干涉仪光学系统设计

杨 帅^{1,2}, 李 杨^{1,2*}, 张文喜^{1,2},
伍 洲^{1,2}, 覃日康¹, 樊耀轩^{1,2}

¹中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

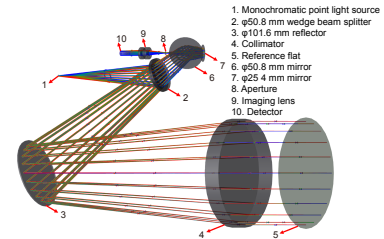
²中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要: 针对中波红外波段胶合立方型分束镜分光局限的问题, 本文提出基于光楔分光的中波红外 Fizeau 干涉仪光学设计方案。在 $3.39\ \mu\text{m}$ 工作波长下, 为降低干涉系统回程误差, 提升测量准确度, 采用了两次反射折叠准直光路结构, 既保证良好的准直波前, 同时优化设计光楔兼顾干涉成像波前。设计采用 ZnSe、 CaF_2 材料, 干涉仪准直镜为单片平凸非球面结构, 成像镜由双分离式球面镜构成, 经蒙特卡罗模拟公差分析, 准直镜 0.1° 视场内准直波前 PV 优于 $\lambda/4$, 归一化出射孔径内角像差优于 $3.01 \times 10^{-5}\ \text{rad}$; 干涉成像光路归一化视场成像波前 PV 优于 $\lambda/5$, 在 $25\ \text{lp/mm}$ 处 MTF 值优于 0.38, 干涉系统最大成像畸变优于 0.11%; 在标准面 0° 视场放置, 被测表面倾斜 0.05° 内干涉系统回程误差小于 $\lambda/50$ 。基于光楔分光的中波红外 Fizeau 干涉仪为中波红外干涉仪光学系统设计提供了新的思路。

关键词: 中波红外干涉仪; 光楔分光; 像差理论; 光学设计

中图分类号: O439

文献标志码: A



杨帅, 李杨, 张文喜, 等. 光楔分光中波红外 Fizeau 型干涉仪光学系统设计 [J]. 光电工程, 2023, 50(5): 230014

Yang S, Li Y, Zhang W X, et al. Optical system design of wedge beam splitter splitting mid-wave infrared Fizeau interferometer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 230014

Optical system design of wedge beam splitter splitting mid-wave infrared Fizeau interferometer

Yang Shuai^{1,2}, Li Yang^{1,2*}, Zhang Wenxi^{1,2}, Wu Zhou^{1,2}, Qin Rikang¹, Fan Yaoyuan^{1,2}

¹Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: To solve the problem of beam splitting limitation of cemented cubic beam splitters in the mid-wave infrared band, the optical design scheme of mid-wave infrared Fizeau interferometers based on wedge splitting is proposed. At the working wavelength of $3.39\ \mu\text{m}$, to reduce the return error of the interference system and improve the measurement accuracy, a two-reflection folding collimating optical path structure is adopted, which not only ensures a good collimating wavefront, but also optimizes the design of the optical wedge to take into account the wavefront quality of the interference imaging. ZnSe and CaF_2 materials are used, the collimator of the interferometer is a single plano-convex aspheric structure, and the imaging lens is composed of two separate

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-03-21; 录用日期: 2023-03-21

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDC07040300)

*通信作者: 李杨, liyang@aoe.ac.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

spherical mirrors. Through the Montecarlo simulation tolerance analysis, the collimator wavefront PV of the collimator within 0.1° field of view is better than $\lambda/4$. The normalized field of view imaging wavefront PV of the interferometric optical path is better than $\lambda/5$; The interferometric system return error is smaller than $\lambda/50$ at 0° field of view placed on the standard surface and the surface under test is tilted within 0.05° .

Keywords: midwave infrared interferometer; wedge beam splitter splitting; aberration theory; optical design

1 引言

光学干涉测量技术是以光波长为测量尺度, 通过干涉方法对光学元件的表面面形、光学系统的波像差进行检测^[1-2]。Fizeau 型干涉仪因其共光路结构简单, 精度高等特点被广泛应用^[3]。其中, 中波红外干涉仪是测量红外材料折射率均匀性、红外光学系统波像差以及球面面形的重要精密仪器, 也可用于测量微米级粗糙表面面形及某些矢高较大的非球面。上世纪 80 年代初, Furuya 等人^[4]研制了一台波长 $3.39\ \mu\text{m}$ 的 Fizeau 型中波红外干涉仪用于红外材料折射率均匀性测量, 目前美国 Zygo 公司已成为世界上设计和制造中波红外干涉仪的主流厂商。国内红外干涉仪发展起步较晚, 主要集中在短波与长波红外干涉仪的设计, 如南京理工大学研制了 Fizeau 型 $\phi 250\ \text{mm}$ 口径长波红外干涉仪^[5], 中科院光电所研制了波长 $10.6\ \mu\text{m}$ 的长波红外干涉仪^[6]。

中波红外 Fizeau 干涉仪光学系统设计具有一定的难度, 在分光方案中, 可见光波段常采用胶合立方型分束镜进行分光, 一种有代表性的光硬化光学胶 Norland NOA61^[7]在可见光波段的透射率优于 98%, 而在中波红外波段的透射率不足 30%, 胶合能量损失极为严重, 且红外波段的膜系设计较为复杂, 在红外薄膜材料使用过程中, 其折射率和吸收特性受温度影响^[8], 宽带红外波段的膜层层数多、厚度大, 不易规整^[9], 因此在中波红外波段利用胶合立方型分束镜进行分光较难实现。针对这个问题, 以 Ge、ZnSe、 CaF_2 等红外光学材料为基底的平板型分束镜被广泛应用, 如 Polavarapu 等人以商用偏振片组合实现中波红外干涉仪分光^[10], 但是平板型分束镜在干涉分光系统中易引入以像散为主的像差。

针对中波红外 Fizeau 干涉仪光学系统的设计难点以及分光方案的局限性, 本文提出基于光楔分光的中波红外 Fizeau 干涉仪光学系统设计方案, 采用光楔分光可有效校正平板型分束镜分光在干涉成像波前中引入的像散像差, 由此可提升干涉成像波前质量, 降低

干涉系统回程误差, 提升测量准确度。本文重点分析了光楔分光干涉系统中准直镜 $F\#$ 、光楔倾斜角 T 、光楔楔角 w 等参数对优化干涉光学系统成像波前的影响, 据上述分析完成了中波红外 Fizeau 干涉仪的光学系统设计, 采用两次反射折叠准直光路, 通过控制单片平凸非球面准直镜的角像差设计, 保证了干涉仪良好的准直波前, 对干涉成像光路的成像畸变、归一化视场成像波前进行严格控制, 以减小干涉系统回程误差, 提升干涉测量准确度。

2 设计原理与方案

Fizeau 型干涉系统为等厚干涉, 本文设计一种基于光楔分光的中波红外 Fizeau 型干涉仪系统。光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪原理图如图 1, 其中红色光路代表照明光路, 蓝色光路代表成像光路。由激光器输出单频激光被显微物镜汇聚到准直镜的焦点处, 再经准直镜出射为平行准直光束, 平行准直光束经标准透射平晶或标准球面透镜的参考面时一部分光反射作为参考光束, 另一部分光透射到达被测表面后反射作为被测光束。参考光束与被测光束相干涉并成像于探测器, 通过解调含有相位信息的干涉图即可得到被测表面的面形信息。

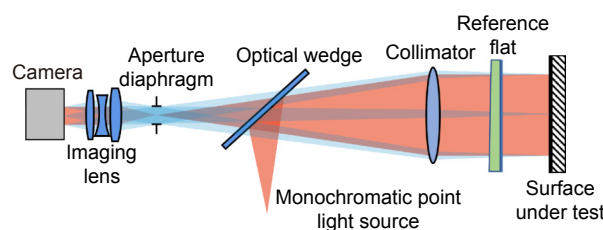


图 1 光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪原理图
Fig. 1 Schematic design of the wedge splitting medium wave infrared Fizeau interferometer

当被测表面倾斜或有局部倾斜时, 参考光束和被测光束沿不同的路径通过干涉仪, 非共光路积累了不同的像差最终产生回程误差。为降低中波红外干涉仪的回程误差, 在照明光路中需要保证良好的准直波前, 相较于传统 Fizeau 型干涉仪光源透过分光镜后准直出

光的方案, 本文采用反射式准直出光方案, 图 2(a) 所示为反射式准直出光干涉系统回程误差示意图, 根据图 2(b) 可知, 随被测光束倾斜角增大, 系统回程误差 PV 值增加, 但反射式准直出光结构相较于透射式准直出光结构回程误差更小。该方案光源出射光不透过分光元件, 更容易保证准直波前, 且可将准直波前归一化出射孔径内的角像差降低一个数量级; 在成像光路中需要保证成像低畸变、优像质、各视场下成像波前良好, 因此在平板型分束镜中引入楔角, 可通过优化设计光楔的楔角、倾斜角度, 并联合准直镜、成像镜设计, 减小平板型分束镜引入的以像散为主的波像差, 同时保证成像光路中的成像畸变、归一化视场成像波前 PV 均良好, 以此降低干涉系统回程误差, 进一步提升干涉测量精度。

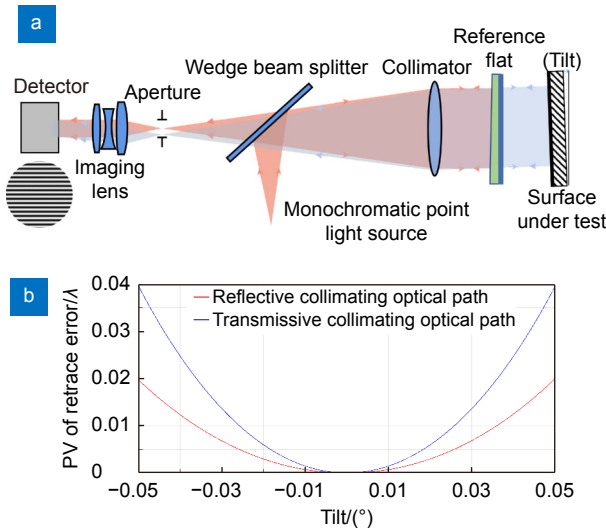


图 2 干涉系统回程误差。(a) 反射式准直出光干涉系统回程误差示意图; (b) 反射式、透射式准直出光干涉系统回程误差

Fig. 2 Return error of the interference system. (a) Return error diagram of the reflective collimating optical interference system; (b) Return error of the reflective and transmissive collimating optical path interference system

为满足干涉仪系统测量功能与精度要求, 本文设计一种中波红外 Fizeau 干涉仪, 光源中心波长为 $3.39\ \mu\text{m}$, 有效通光口径为 6 英寸 (1 英寸 = 2.54 cm)。在照明光路中, 为提升点光源的装调容差, 需兼顾在 0° 视场、 0.1° 外视场下的准直波前 PV 优于瑞利判据 $\lambda/4$ ^[11]; 在成像光路中, 为消除视差并使光学系统放大倍率恒定, 采用双远心光路设计, 严格控制干涉系统成像畸变优于 0.1% ^[12-13], 同时归一化各视场成像波前需优于瑞利判据 $\lambda/4$, 以降低由成像畸变引起的测

量误差; 考虑到在干涉仪实际使用过程中, 将干涉条纹置零是较为困难的, 且在实际测量过程中存在多条纹的测量系统, 如针对非球面的测量, 因此为提升干涉仪的测量准确度, 设计光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪在标准面 0° 视场放置, 被测表面倾斜 0.05° 内的回程误差优于 $\lambda/50$ 。

3 设计分析

3.1 准直镜、成像镜设计分析

光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪中, 干涉图采集选取一款靶面大小为 640×512 , 像元尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 的中波红外探测器, 为保证干涉仪准直波前, 准直光路采用两次反射折叠设计, 避免因透射光楔等光学元件而破坏准直波前。

当准直镜存在像差时, 出射的平行光束随不同出射孔径会有不同角像差 u , 其在干涉条纹光程差中增加了附加量 du^2 , 其中 d 为干涉腔空气厚度, 若在 Fizeau 干涉仪中由准直镜角像差引入的测量误差不超过 $k\lambda$ (k 为常数), 则要求角像差满足下式^[3]:

$$du^2 \leq k\lambda. \quad (1)$$

本文设计的干涉仪拟要求在干涉腔空气厚度 $d = 2\ \text{m}$ 条件下, 保证由准直镜角像差引入的测量误差不会超过 0.001λ ($k = 0.001$), 即是要求其角像差 $u < 4.12 \times 10^{-5}\ \text{rad}$ 。

干涉仪成像镜要求保证干涉成像光路归一化视场波前优于 $\lambda/4$, 干涉成像畸变优于 0.1% 。

3.2 光楔设计分析

在会聚光学系统中采用倾斜的平板型分束镜会引入以像散为主的像差, 可采取使平板其中的一个面变为弱球面或平板变为弱光楔的方法校正像差, 优化波前^[14-15]。光楔主要引入以像散、彗差为主, 球差、三叶像散、高阶像差所占比例较小的波前像差^[16]。会聚光束经光楔后在距离其后表面 L 处像面上的像散、彗差公式表达如下^[17]:

$$Ast = a_1(nw - T) + a_2w(2T - w), \quad (2)$$

$$Com = b_1[a_2 \arctan(1/2F\#)w - T + b_2(nT - w)]. \quad (3)$$

在式 (2)、式 (3) 中, n 为光楔材料折射率, w 为光楔楔角, T 为光楔倾斜角, $F\#$ 为准直镜 F 数, $a_1 = \frac{d(n^2 - 1)}{n^3}$, $a_2 = \frac{(1 - k)(n^2 - 1)DF\#}{n}$, $b_1 = \frac{n^2 - 1}{2n^3}$, $b_2 = \frac{d \arctan^2(1/2F\#)}{n^2}$, d 为光楔中心厚度, D 为准直镜

入瞳直径, k 为准直镜与光楔中心距的相关系数, $k \in (0, 1)$ 。

据式 (2)、式 (3) 可知, 光楔像散、彗差与光楔中心厚度 d 成正相关, 光楔彗差与准直镜和光楔中心距的相关系数 k 成负相关。在光楔材料、中心厚度及相关系数选定后, 光楔像散、彗差随准直镜 $F\#$ 、光楔楔角 w 和光楔倾斜角 T 的变化而变化, 基于光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪原理图搭建如图 3 所示的光楔波前仿真光路, 分析上述三个参量对于光楔分光干涉系统波前 PV 的影响。

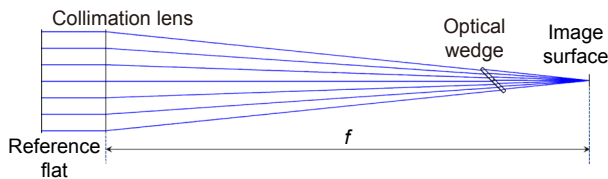


图 3 光楔波前仿真光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the optical path of the wedge beam splitter wavefront simulation

给定 $n = 1.41$, $d = 5 \text{ mm}$, $k = 0.9$, 不同准直镜 $F\#$ 、光楔倾斜角 T 下光楔最优楔角 w_{best} 曲线如图 4 所示, 据此可知, 不同准直镜 $F\#$ 下的曲线变化趋势一致, 随光楔倾斜角 T 增大, 光楔最优楔角 w_{best} 呈抛物线变化, 在 $T = 40.5^\circ$ 时达到各准直镜 $F\#$ 下的最大值。

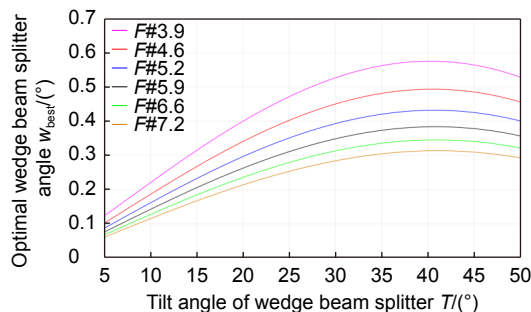


图 4 不同准直镜 $F\#$ 、光楔倾斜角 T 下光楔最优楔角 w_{best} 曲线

Fig. 4 Optimal wedge beam splitter angle w_{best} curves for different collimator $F\#$ and tilt angles of the wedge beam splitter T

图 5 所示为准直镜 $F\#5$ 时, 平板型分束镜、光楔在不同倾斜角 T 下, 分光干涉系统波前 PV 曲线。由图可知, 随平板型分束镜倾斜角 T 增大, 分光干涉系统波前 PV 受到严重破坏, 当倾斜角 $T > 25^\circ$ 时, 波前 PV 已超过 $\lambda/2$ 。采用光楔替代平板型分束镜, 在倾斜角 $T \in (5^\circ, 50^\circ)$ 区间内, 分光干涉系统波前 PV 均可保证优于 $\lambda/4$ 。在倾斜角 $T = 20^\circ$ 时, 平板型分束镜、光楔分光干涉系统波前标准 Zernike 多项式系数 (Z5 ~ Z10) 如表 1 所示, 相较于平板型分束镜, 光楔引入

更少的像散 (Z6) 和彗差 (Z7), 有助于提升干涉系统成像波前质量。

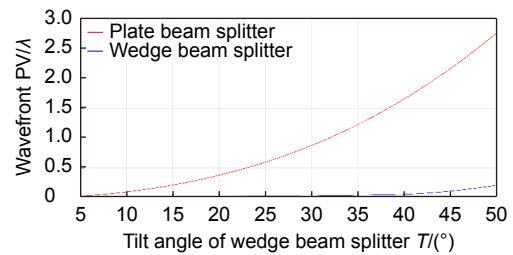


图 5 平板型分束镜、光楔在不同倾斜角 T 下分光干涉系统波前 PV 曲线

Fig. 5 Wavefront PV curve of the plate beam splitter and wedge beam splitter interference system at different tilt angles of the beam splitter T

表 1 在倾斜角 $T=20^\circ$ 时, 平板型分束镜、光楔波前标准 Zernike 多项式系数

Table 1 Wavefront standard Zernike polynomial coefficients for the plate beam splitter and wedge beam splitter at a tilt angle of beam splitter $T=20^\circ$

	Plate beam splitter	Wedge beam splitter
Z5	0.0000	0.0000
Z6	0.0702	-0.0004
Z7	0.0117	0.0048
Z8	0.0000	0.0000
Z9	-0.0005	0.0009
Z10	0.0000	0.0000

图 6 所示为在最优楔角 w_{best} 下的光楔分光干涉系统波前 PV 曲线, 其中图 6(a) 为波前 PV 与准直镜 $F\#$ 的关系, 由曲线可知波前 PV 随准直镜 $F\#$ 的增大而缓势变优, 当 $F\#$ 大于 5.5 后, 单位 $F\#$ 下波前 PV 优化效率小于 2.5%, 准直镜大 $F\#$ 带来的优化效果已不显著; 图 6(b) 为波前 PV 与光楔倾斜角 T 的关系, 由图可知随光楔倾斜角 T 的增大, 波前 PV 呈增长趋势, 在 $T < 40^\circ$ 区间, 单位倾斜角度下波前 PV 增长低于 20%, 在 $T > 40^\circ$ 区间, 单位倾斜角度下波前 PV 增长高于 50%, 在 $F\#4.6$, $T = 50^\circ$ 时可达 142%, 波前 PV 因光楔倾斜角 T 的增大而被严重破坏。

中波红外 Fizeau 干涉仪常见的测试口径包括 4 英寸、6 英寸和 8 英寸等, 可设计不同口径下相同 $F\#$ 的准直镜。以 $F\#5$ 准直镜为例, 光楔倾斜角选定为 $T = 25^\circ$, 最终优化的光楔分光干涉系统波前 PV 基本保持不变, 光楔最优楔角 w_{best} 随准直镜焦距增大而缓势减小, 如图 7 所示。

综合光楔分光干涉系统波前 PV 仿真分析结果,

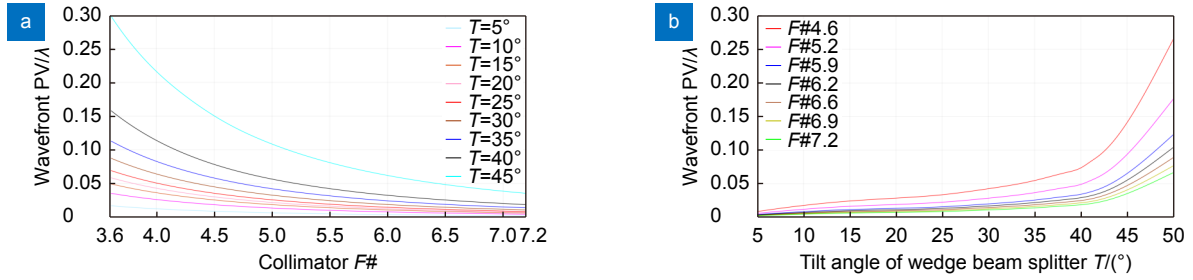


图6 光楔分光干涉系统波前 PV 曲线。(a) 光楔分光干涉系统波前 PV 与准直镜 $F\#$ 关系;
(b) 光楔分光干涉系统波前 PV 与光楔倾斜角 T 关系

Fig. 6 Wavefront PV curve of the wedge beam splitter interference system. (a) Relationship between wavefront PV of wedge beam splitter interferometric system and collimator $F\#$; (b) Relationship between wavefront PV of wedge beam splitter interferometric system and tilt angle of wedge beam splitter T

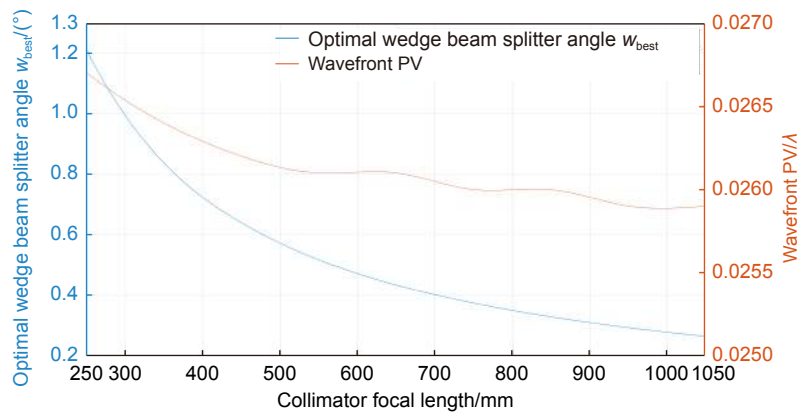


图7 光楔最优楔角 w_{best} 、光楔分光干涉系统波前 PV 与准直镜焦距关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between the optimal wedge beam splitter angle w_{best} , wavefront PV of wedge beam splitter interference system and the focal length of the collimator

对光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪进行设计时, 光楔倾斜角选定在 $T \in (15^\circ, 25^\circ)$ 区间, 准直镜 $F\#$ 选定在 $F\# \in (4.5, 5.5)$ 较为合适, 在上述条件下光楔最优楔角 $w_{best} < 0.4^\circ$, 考虑到小楔角光楔前后表面反射可能引入杂散光干扰干涉测量, 因此在光楔设计时应适当调整光楔楔角以规避杂散光, 既保证良好的光楔分光干涉系统波前 PV, 同时光楔的可加工性、干涉仪整机小型轻量化有所保障。

4 设计结果

本文设计的光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪光学系统布局如图 8 所示, 系统采用多次折返设计, 结构布局更紧凑, 在材料的选择上, 采用高折射率的红外材料有利于降低光学系统像差, 综合考量材料稳定性、造价等方面因素, 准直镜、成像镜采用 ZnSe 材料, 光楔采用 CaF_2 材料。在照明光路中, 光源光束经口径 $D_0 = 50.8 \text{ mm}$, 中心厚度 $d = 5 \text{ mm}$, 分光比为 5:5 的光楔分光表面及口径 $D_1 = 101.6 \text{ mm}$ 的反射镜两次

反射, 再由单片平凸非球面准直镜出射为准直光束。为保证良好的成像波前, 同时规避由光楔前后表面反射引入的杂散光, 设计光楔楔角 $w = 0.2^\circ$, 空间倾斜角 $T = 17.5^\circ$, 其与准直镜中心距 $d_0 = 580 \text{ mm}$, 准直光束经标准面反射后, 参考光束再经准直镜、口径 $D_1 = 101.6 \text{ mm}$ 的反射镜, 透过光楔到达双分离式球面成像镜组, 其中孔径光阑口径为 6 mm , 光楔距孔径光阑 166.4 mm , 孔径光阑距成像镜 27.0 mm , 在 100 mm 物距下, 像距为 33.6 mm 。光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪光学系统在照明光路和成像光路中均可满足设计要求, 准直镜、成像镜设计参数如表 2 所示, 干涉仪关键部件镜头参数如表 3 所示。

最终设计准直镜 0° 视场准直波前 PV 优于 0.0015λ , 0.1° 视场准直波前 PV 优于 0.0919λ , 归一化出射孔径内角像差 $u < 3.01 \times 10^{-5} \text{ rad}$, 满足设计要求, 如图 9 所示。

结合现有光学加工及装调能力对准直镜进行公差分析, 表 4 为准直镜公差分配数据, 经 1000 次蒙特

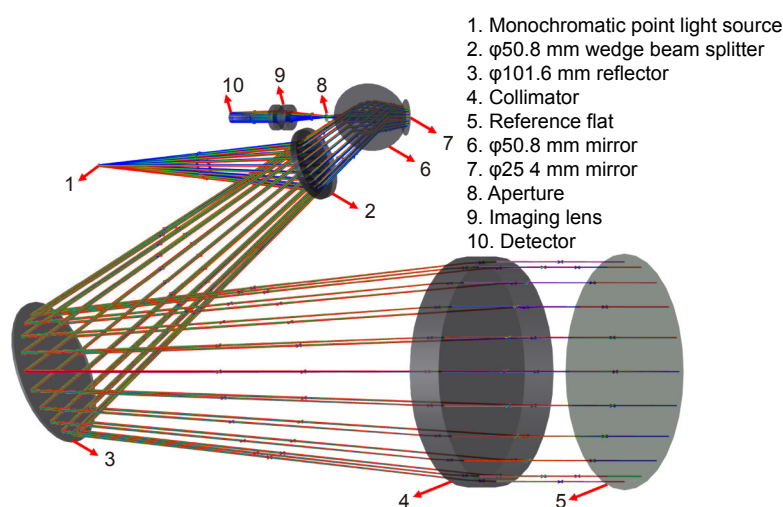


图 8 光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪照明光路

Fig. 8 Illumination path of the wedge splitting medium wave infrared Fizeau interferometer

表 2 准直镜、成像镜设计参数

Table 2 Collimator and imaging lens design parameters

	Wavelength/ μm	$F\#$	Focal length/mm
Collimator	3.39	5	762
Imaging lens	3.39	5.82	35

表 3 光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪光学系统镜头参数

Table 3 Lens data of the wedge splitting medium wave infrared Fizeau interferometer

	Comment	Surf. type	Radius	Thickness	Material	Semi-diameter	Conic	Tilt about X
OBJ		Standard	Infinity	Infinity	-	Infinity	-	-
1	Collimator	Even asphere	1091.615	26.000	ZnSe	78.000	-1.862	-
2		Standard	Infinity	580.000	-	78.000	-	-
3	Wedge beam splitter	Coordinate break	-	0.000	-	0.000	-	-17.500
4		Standard	Infinity	5.000	CaF ₂	25.400	-	-
5		Coordinate break	-	0.000	-	0.000	-	-0.200
6		Standard	Infinity	0.000	-	25.400	-	-
7		Coordinate break	-	0.000	-	0.000	-	0.200 (P)
8		Coordinate break	-	166.347	-	0.000	-	17.500(P)
STO		Standard	Infinity	26.960	-	3.000	-	-
10	Imaging lens	Standard	37.274	6.000	ZnSe	9.000	-	-
11		Standard	30.000	5.000	-	9.000	-	-
12		Standard	164.984	5.000	ZnSe	9.000	-	-
13		Standard	-52.379	33.554	-	9.000	-	-
IMA		Standard	Infinity	-	-	3.503	-	-

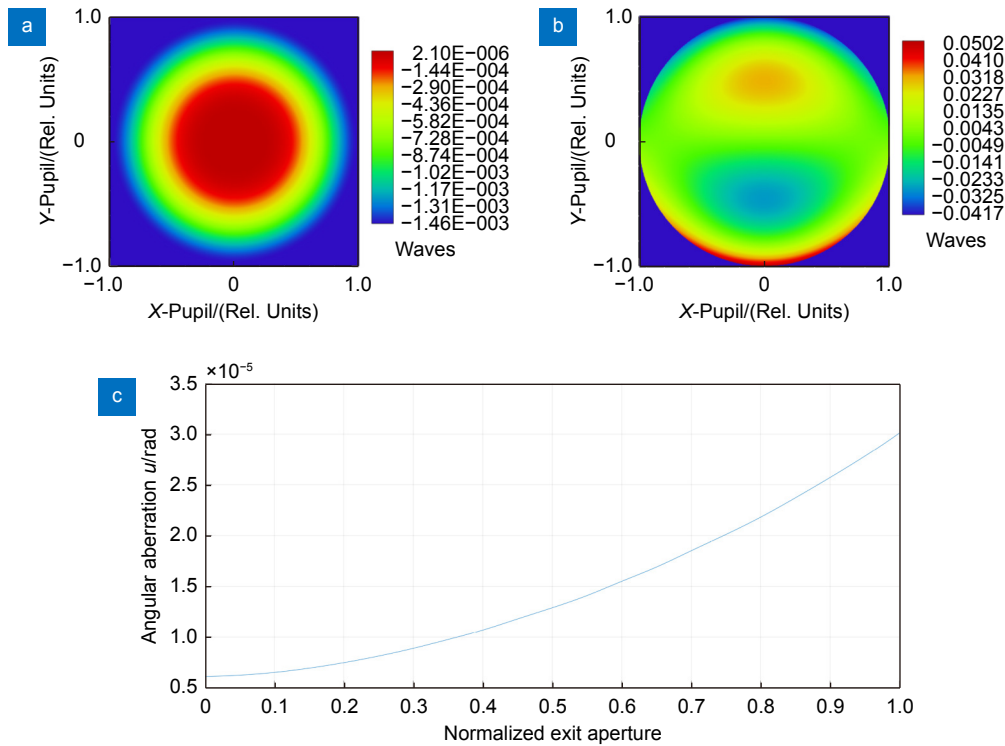


图 9 准直镜设计结果。(a) 准直镜 0°视场准直波前 PV; (b) 准直镜 0.1°视场准直波前 PV; (c) 准直镜归一化出射孔径角像差

Fig. 9 Design results of the collimator. (a) PV of collimated wavefront for the collimator at 0° field of view; (b) PV of collimated wavefront for the collimator at 0.1° field of view; (c) Angular aberration of the normalized exit aperture for the collimator at 0° field of view

表 4 准直镜公差分配表

Table 4 Tolerance table for the collimator

Tolerance types	Tolerance data
Radius/%	0.1
Surface irregularity(RMS)/ λ ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)	$\lambda/40$
Conic	± 0.01
Thickness/mm	± 0.05
Surface tilt/(°)	± 0.05
Surface dec/mm	± 0.05
Element tilt/(°)	± 0.05
Element dec/mm	± 0.05

卡罗模拟分析, 0°视场和0.1°视场准直波前 PV 有 90% 以上的概率优于 $\lambda/4$, 如图 10 所示。

干涉仪成像光路归一化视场成像波前 PV 均优于 $\lambda/5$, 25 lp/mm 处弧矢与子午的调制传递函数 MTF 值均优于 0.38, 干涉系统最大成像畸变优于 0.05%, 如图 11 所示。

结合现有光学加工及装调能力, 对干涉成像光路进行公差分析, 经 1000 次蒙特卡罗模拟分析, 干涉仪成像光路归一化最大视场成像波前 PV 有 98% 概率

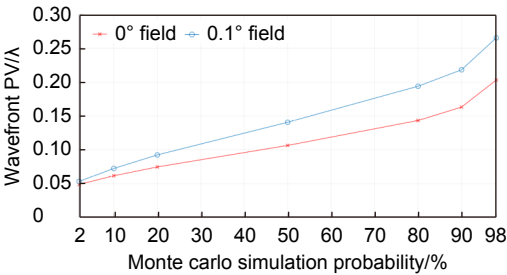


图 10 准直镜蒙特卡罗模拟公差分析

Fig. 10 Monte Carlo simulation tolerance analysis of the collimator

优于 $\lambda/5$, 最大成像畸变有 80% 概率优于 0.11%, 如图 12 所示。

图 13 所示为光楔元件杂散光分析示意图, 其中图 13(a) 为 0° 视场下光楔前后表面反射引入的杂散光示意图, 参考光束、被测光束经光楔前后表面反射去往成像光路, 孔径光阑面处光迹如图 13(b) 所示, 由

图可知光楔前后表面反射引入的杂散光最终被孔径光阑遮挡而不到达像面, 故该杂散光不影响干涉测量。

本文设计的光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪干涉系统回程误差如图 14 所示, 回程误差随被测表面倾斜的增大而增大, 在标准面 0° 视场放置, 被测表面倾斜 0.05° 内, 干涉系统回程误差优于 $\lambda/50$ 。

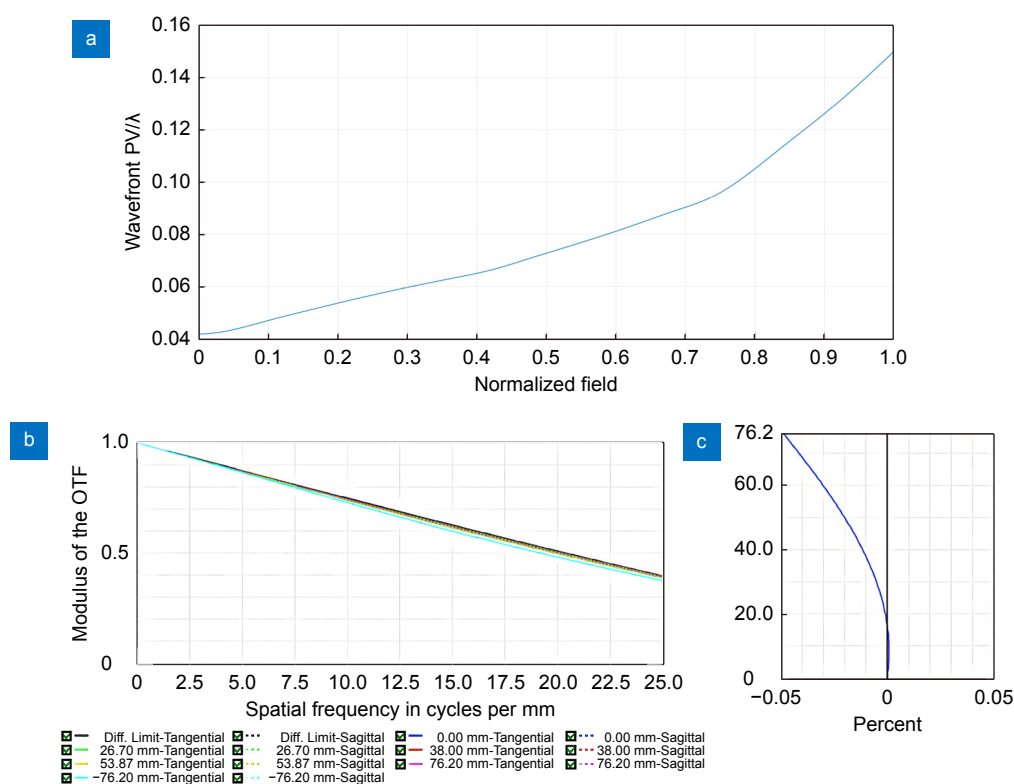


图 11 干涉仪成像光路像质评价。(a) 归一化视场成像波前 PV; (b) MTF 曲线; (c) 畸变曲线

Fig. 11 Image quality evaluation of the interferometer imaging optical path. (a) Imaging wavefront PV of the normalized field; (b) MTF curve; (c) Distortion curve

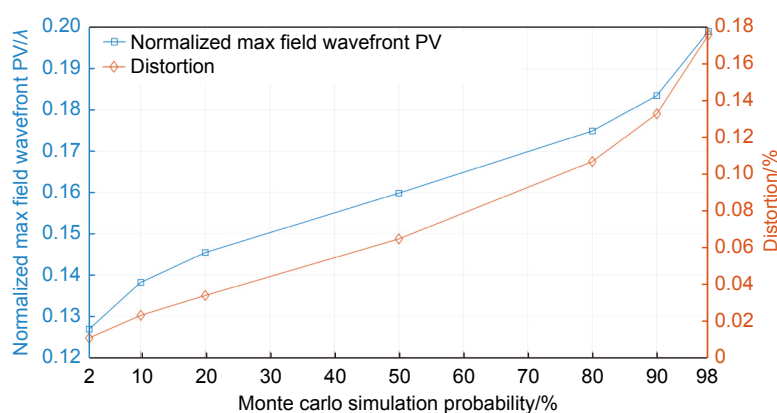


图 12 干涉仪成像光路蒙特卡罗模拟公差分析

Fig. 12 Monte Carlo simulation tolerance analysis of the interferometer imaging optical path

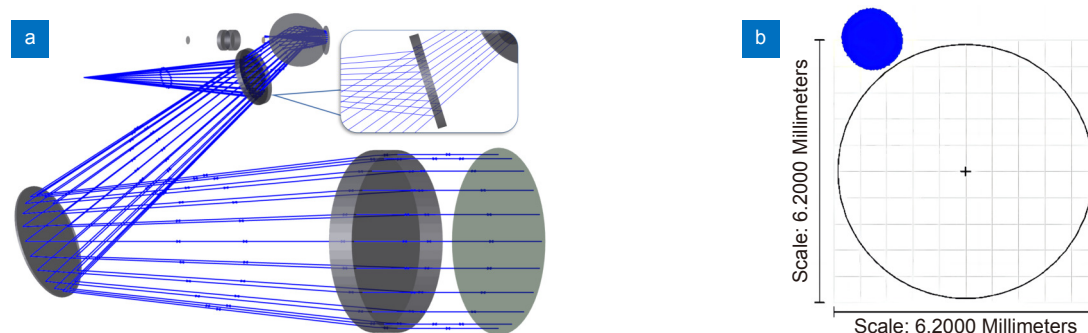


图 13 光楔元件杂散光分析示意图。(a) 光楔前后表面反射引入的杂散光示意图; (b) 孔径光阑面处光迹图
Fig. 13 Stray light analysis diagram of the wedge beam splitter. (a) Schematic diagram of stray light introduced by reflection from the front and rear surfaces of the wedge beam splitter; (b) Light traces at the aperture diaphragm surface

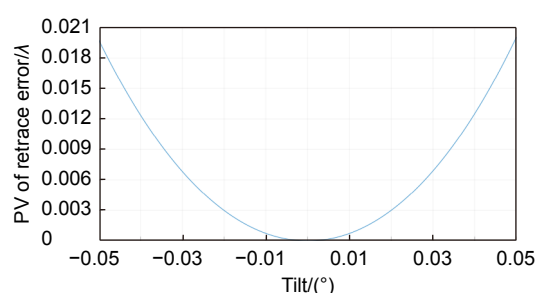


图 14 光楔分光中波红外 Fizeau 干涉仪回程误差
Fig. 14 Retrace error of wedge splitting medium wave infrared Fizeau interferometer

5 结 论

本文提出一种光楔分光的 Fizeau 型中波红外干涉仪系统方案, 进行了干涉仪的光学系统设计。采用光楔分光方案, 有效校正了平板型分束镜在干涉成像波前引入的像散像差, 提升了干涉成像波前质量, 降低了干涉系统回程误差, 提升了测量准确度。以光楔分光干涉系统中准直镜 $F\#$ 、光楔倾斜角 T 、光楔楔角 w 等参数对干涉光学系统成像波前的影响为分析重点, 采用反射式准直出光, 获得 0.1° 视场内波前 PV 优于 $\lambda/4$ 的准直波前, 同时降低了准直波前归一化出射孔径内的角像差, 通过严格控制成像光路中的成像畸变、归一化视场成像波前 PV, 降低了干涉系统回程误差, 进一步提升干涉测量准确度。蒙特卡罗模拟公差分析结果显示, 准直光路 0.1° 视场内准直波前 PV 优于 $\lambda/4$; 干涉成像光路归一化视场下成像波前 PV 优于 $\lambda/5$, 干涉成像畸变优于 0.11% ; 在标准面 0° 视场放置, 被测表面倾斜 0.05° 内, 干涉系统回程误差优于 $\lambda/50$ 。设计结果表明, 光楔分光中波红外 Fizeau 型干涉仪光学系统设计方案能够保证高精度中红外干涉测量要求, 具有一定的实际意义及应用前景。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Lamare M. Interferometer for testing infrared materials and optical systems[J]. *Proc SPIE*, 1978, **136**: 43–51.
- [2] Wang Z H, Zhang W X, Wu Z, et al. Research on the forward predictor of minimum mean square error in laser vibrometer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(5): 210391.
王之昊, 张文喜, 伍洲, 等. 激光测振仪中最小均方误差前向预测器的研究[J]. *光电工程*, 2022, **49**(5): 210391.
- [3] Malacara D. *Optical Shop Testing*[M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2007: 17–19.
- [4] Furuya A. Design of infrared interferometer[J]. *Proc SPIE*, 1990, **1320**: 478–482.
- [5] Chen J B, Chen L, Wang Q, et al. A large aperture phase-shifting CO_2 laser interferometer[J]. *Chin J Lasers*, 1998, **25**(1): 31–36.
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, **25**(1): 31–36.
- [6] Wu Y Q, Zhang Y D, Wu F, et al. Far-infrared Fizeau interferometer for large aspheric mirror[J]. *Proc SPIE*, 2008, **7064**: 70640S.
- [7] Yoder P, Vukobratovich D. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2015: 131–132.
- [8] Wang S Z. *Optical Thin Film and Its Technical Application Research*[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2020.
王生钊. 光学薄膜及其技术应用研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [9] Que L Z. Study of a $3\ \mu\text{m}$ to $13\ \mu\text{m}$ wideband infrared beamsplitter[J]. *Infrared Technol*, 2011, **33**(12): 695–698.
阙立志. $3\sim 13\ \mu\text{m}$ 宽带红外分束镜研究[J]. *红外技术*, 2011, **33**(12): 695–698.
- [10] Polavarapu P L, Chen G C, Weibel S. Development, justification, and applications of a mid-infrared polarization-division interferometer[J]. *Appl Spectrosc*, 1994, **48**(10): 1224–1235.
- [11] Zhu B. Key technologies and applications of phase-shifted Fesol mid-wave infrared interferometer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
朱波. 移相式斐索中波红外干涉仪关键技术及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [12] Selberg L A. Interferometer accuracy and precision[J]. *Proc SPIE*, 1991, **1400**: 24–32.

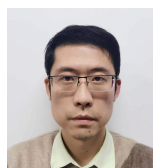
- [13] Liu M L, Yang W, Xu W C. Calibration of measuring error caused by interferometric imaging distortion[J]. *Opt Precis Eng*, 2011, 19(10): 2349–2354.
刘满林, 杨旺, 许伟才. 干涉仪成像畸变引起测量误差的校正方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2349–2354.
- [14] Li J Z. *Optical Manual*[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1986: 865–867.
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986: 865–867.
- [15] Li J P, Wang X R, Yang Y X, et al. A wedge plate type beam splitter for visible-infrared simultaneous imaging system: CN213182178U[P]. 2021-05-11.
李金鹏, 王鑫蕊, 杨永兴, 等. 一种用于可见-红外光同步成像系统的楔板型分束镜: CN213182178U[P]. 2021-05-11.
- [16] Howard J W. Formulas for the coma and astigmatism of wedge prisms used in converging light[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(23): 4265–4268.
- [17] Cai Z H. Research on the technology of testing large convex aspherical mirror by single wedge compensation stitching method[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. <https://doi.org/10.27522/d.cnki.gkcgs.2021.000075>.
蔡志华. 基于单光楔补偿拼接检测大口径凸非球面反射镜技术的研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021. <https://doi.org/10.27522/d.cnki.gkcgs.2021.000075>.

作者简介



杨帅 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学面形精密检测方面的研究。

E-mail: yangshuai20@mails.ucas.ac.cn



【通信作者】李杨 (1986-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学精密检测技术方面的研究及光学相干测量仪器的研制工作。

E-mail: liyang@aoe.ac.cn



伍洲 (1986-), 女, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学精密检测技术研究和仪器研制等工作。中科院青年创新促进会工程装备分会会长。

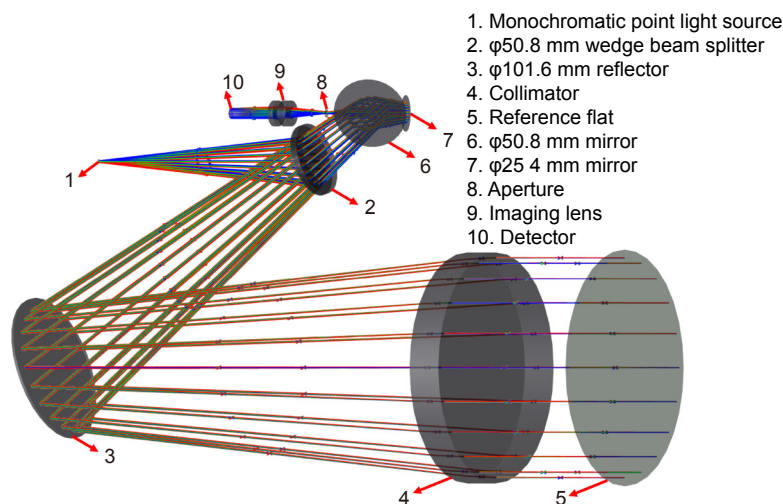
E-mail: wz@aircas.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Optical system design of wedge beam splitter splitting mid-wave infrared Fizeau interferometer

Yang Shuai^{1,2}, Li Yang^{1,2*}, Zhang Wenxi^{1,2}, Wu Zhou^{1,2}, Qin Rikang¹, Fan Yaoxuan^{1,2}



Illumination path of optical system of wedge splitting medium wave infrared Fizeau interferometer

Overview: The mid-wave infrared interferometer is an important precision instrument for measuring the refractive index uniformity of infrared materials, wave aberration of infrared optical systems, and spherical surface shape. Its optical system design has certain difficulties. In the spectroscopy scheme, it is difficult to realize spectroscopy by using the glued cubic beam splitter, and it is easy to introduce aberration mainly by image dispersion in the interferometric spectroscopy system by using the flat beam splitter. To investigate the design difficulties of the optical system of the mid-wave infrared Fizeau interferometer and the limitations of the spectroscopic scheme, this paper proposes the design of the mid-wave infrared Fizeau interferometer based on optical wedge spectroscopy. The use of optical wedge spectroscopy can effectively correct the image scattering aberration introduced by flat beam splitter spectroscopy in the interferometric imaging wavefront, which can improve the quality of the interferometric imaging wavefront, reduce the return error of the interferometric system, and improve the accuracy of measurement. This paper focuses on the effect of the collimator, wedge tilt angle, wedge angle, and other parameters on the optimized wavefront of the interference optical system. According to the above analysis, the optical system design of the mid-wave infrared Fizeau interferometer was completed. The twice reflective folding collimated optical path is used to ensure a well collimated wavefront of the interferometer by controlling the angular aberration design of the single plano-convex aspherical collimator, and the imaging aberration and normalized field-of-view imaging wavefront of the interferometric optical path are strictly controlled to reduce the return error of the interferometric system and improve the interferometric accuracy. At the working wavelength of $3.39\ \mu\text{m}$, ZnSe, and CaF_2 materials are used, the collimator of the interferometer is a single plano-convex aspheric structure, and the imaging mirror is composed of two separate spherical mirrors. Through the Montecarlo simulation tolerance analysis, the collimation wavefront PV of the collimator within 0.1° field of view is better than $\lambda/4$, and the normalized angular aberration of the exit aperture is better than 3.01×10^{-5} rad. The normalized field of view imaging wavefront PV of the interferometric optical path is better than $\lambda/5$, the MTF value is better than 0.38 at 25 lp/mm, and the maximum imaging distortion of the interferometric system is smaller than 0.1%. The interferometric system return error is smaller than $\lambda/50$ at 0° field of view placed on the standard surface and the surface under test is tilted within 0.05° . The mid-wave infrared Fizeau interferometer based on optical wedge spectroscopy provides a new idea for the design of optical systems for mid-wave infrared interferometers.

Yang S, Li Y, Zhang W X, et al. Optical system design of wedge beam splitter splitting mid-wave infrared Fizeau interferometer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 230014; DOI: [10.12086/oee.2023.230014](https://doi.org/10.12086/oee.2023.230014)

Foundation item: Strategic Priority Research Program of China Academy of Sciences (XDC07040300)

¹Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; ²School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* E-mail: liyang@aoe.ac.cn