

文章编号 1004-924X(2018)08-1945-09

适用于光黏工艺的干涉仪公差保证方法

姚 东^{1,2*}, 李钰鹏², 赵 亚², 王 智¹, 沙 巍¹, 王永宪¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学 研究生院, 北京 100049)

摘要:空间干涉测量系统是空间引力波探测的重要组成部分。本文介绍了一种全玻璃材料的差频激光干涉仪的组成结构和工作原理,对差频干涉仪中双相干光束的匹配对准难题,介绍了一种适用于光黏装配工艺的角度公差和位置公差保证方法。这种方法采用了监测系统和微量调整机构相结合的方式,首先,监控系统可以实现光线相对位置的实时测量,给出被调整光线的调整方向和调整量;然后,微量调整机构可以在平面移动和轴向转动 3 个自由度上,对目标器件实现微米量级的微量调整;监控过程和调整过程反复迭代,可实现对光学元器件的高精度位置控制和角度控制。实验结果表明,在调整方向上角度公差优于 $80\ \mu\text{rad}$,位置公差优于 $85\ \mu\text{m}$ 。本方案基本满足差频激光干涉仪的装配精度需求,为后续更高精度的装配奠定基础。

关 键 词:激光干涉仪;氢氧离子催化黏接;高精度测量;高精度装配;空间太极计划

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182608.1945

Tolerance assurance of interferometer for optical HCB process

YAO Dong^{1,2*}, LI Yu-peng², ZHAO Ya², WANG Zhi¹, SHA Wei¹, WANG Yong-xian¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: yd_banrou@sina.com*

Abstract: Space interference measurement system is an important part of gravitational wave detection in space. This paper introduces the composition and working principle of a differential frequency interferometer made of only glass. To address the problem of matching and aligning double coherent beams in differential frequency interferometers, we introduce a method that can guarantee the angular and position tolerance of double frequency laser interferometers; this method is suitable for the hydroxide catalysis bonding assembly process. In the proposed method, an observation system is combined with a microadjustment mechanism. First, the monitoring system measures the relative position of light rays in real time. Next, the microadjustment mechanism adjusts the target device to micron-order resolution along three degrees of freedom, including two-dimensional planar movement and one-dimensional axial rotation. The monitoring and adjustment processes are iterated to achieve high-precision

收稿日期:2018-06-18;修订日期:2018-07-23.

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(B)(No. XDB23030000);吉林省重点科技研发项目(No. 20180201039GX)

position and angular control of the optical components. Manual adjustments can ensure an angular tolerance and a position tolerance greater than $80\ \mu\text{rad}$ and $85\ \mu\text{m}$, respectively. This scheme can meet the accuracy requirements of differential frequency laser interferometers and lay the foundation for achieving higher accuracy in the future.

Key words: laser interferometer; hydroxide catalysis bonding; high accuracy measurement; high precision assembly; space Taiji plan

1 引言

空间引力波探测是人类在天文学研究领域的一个新窗口,引力波的直接观测开启了引力波天文学的新篇章,爱因斯坦的百年预言终获证实^[1]。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和欧洲空间局(European Space Agency, ESA)合作的 LISA (Laser Interferometer Space Antenna)项目是最早的空间激光干涉引力波探测项目。中国科学院太极计划拟在太空中构建大型激光干涉仪进行引力波探测,主要针对 $0.1\ \text{mHz}\sim 1\ \text{Hz}$ 频率区间的引力波进行高精度探测^[2-4]。

差频激光干涉仪是太极计划的重要载荷之一,在引力波探测过程中发挥着重要作用。LISA 卫星系统内的干涉光学平台中包含 4 个激光干涉仪:(1)参考干涉仪,该干涉仪不包含经由测试质量的反射光,主要用于测量共模路径中的光程波动;(2)测试质量干涉仪,发出的一束激光射向测试质量工作表面并被反射回光学平台,主要用于测量测试质量与光学平台之间的相对位置变化;(3)科学干涉仪,科学干涉仪将接收光束与本地参考光束叠加,用于测量两个光学平台之间的光程变化;(4)超前指向干涉仪,由于双星系统距离达 500 万公里,光的传播时间约为 $16.7\ \text{s}$,接收到的光束方向已经不代表远端卫星的实际位置,因而需要使用此干涉仪计算超前指向角度。

在干涉仪中常使用的光电传感器为四象限探测器(Quadrant Photodiode, QPD),感光面为平面。测量光束和参考光束在探测器上的投影为两个独立的圆斑,这二个圆斑的重合程度直接影响光电探测器中提取信号的信噪比。因而在干涉仪

的装配过程中,对参考光束和测量光束的位置公差和角度公差的保证至关重要。

传统的光学系统零部件之间的位置关系需通过机械支撑结构配合保证^[5-6]。例如在典型的离轴三反光学系统中,采用内外框结合的方法设计反射镜组件,同时设置柔性变形环节,增加应力源与镜面间传递距离来削弱应力对反射镜面形的影响;或者通过主三镜共基准一体化结构形式实现主镜和三镜光学加工、检测和装调的基准统一,在降低整体重量的同时提升了系统的动/静态刚度^[7]。然而,机械零件的加入将提高系统的整体体积和质量。航天光学系统必须在轻量化的条件下,满足大加速度冲击和温度冲击实验,氢氧催化黏接技术可以减小体积尺寸、降低系统重量并提高系统的稳定度^[8]。

国际上,美国的斯坦福大学、英国的格拉斯哥大学等知名学府已经开展了适应于氢氧催化黏接技术(Hydroxide Catalysis Bonding, HCB)的干涉仪装配工艺研究,在 2015 年发射的 LISA Pathfinder 卫星已经使用光黏工艺实现了全光学元件的干涉仪装配^[9]。在国内,哈尔滨工业大学于 2003 年对氢氧催化黏接技术在光学部件黏接中的应用开展了相关研究^[10-11];华中科技大学开展了基于氢氧根催化黏接的超低热膨胀玻璃材料平台的实验制作研究^[12]。然而,对光学元件的角度公差和位置公差的具体保证措施却鲜有介绍。

本文从实际装配角度出发,简略介绍了差频激光干涉仪的基本原理、LISA 计划所采用的 HCB 装配工艺、双四象限探测器光束位置监控原理,介绍了一种能够适用于 HCB 装配工艺的双光束公差的控制方法,给出了交汇角度计算公式,在商业 QPD 产品的情况下,该方法的角度精度优于 $100\ \mu\text{rad}$,位置精度优于 $100\ \mu\text{m}$ 。

2 干涉仪系统的构成及精度保障工艺

2.1 差频激光干涉仪的基本原理

差频激光干涉仪中探测器信号的光强可以表示为:

$$I = (A_M^2 + A_R^2) \left[1 + \frac{2A_M A_R}{A_M^2 + A_R^2} \cos(\omega_{\text{het}} t + \Delta\phi) \right], \quad (1)$$

式中 A_M 表示测量光振幅, A_R 表示参考光振幅; $\omega_{\text{het}} = \omega_M - \omega_R = 2\pi(f_M - f_R)$, 表示角频率之差; $\Delta\phi = \phi_M - \phi_R$, 表示测量光和参考光的相位差, 可视为恒定值。因而, 光电探测器接收到的是一个以角频率 ω_{het} 随时间变化的正弦信号, $(A_M^2 + A_R^2)$ 可视为直流分量部分, 对比度函数为 $\frac{2A_M A_R}{A_M^2 + A_R^2}$ 。

当测量光程改变时, 相位计会解算出探测器处的相位变化 ϕ , 根据相位和距离的关系, $\Delta s_m = \frac{\phi}{k}$, 进而解算出测量光束光程的变化量。在太极测量系统中, 差频激光干涉仪是由两颗卫星构成的, 本地卫星提供参考光, 对方卫星的射出光束作为测量光; 测量光束光程的改变是由引力波引起的, 因而 ϕ 将反映出经过系统的引力波的相关信息。

本实验构建了简易差频干涉仪来模拟双卫星系统, 其光学结构如图1所示。

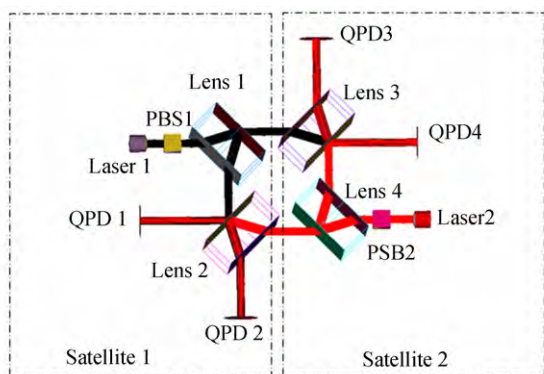


图1 简易差频干涉仪光学原理图

Fig. 1 Principle diagram of differential frequency interferometer with four lenses

在全部光学元件固定在光学基板上, 总体上看可以将上述系统的左右两侧元件分别视为“卫星1”和“卫星2”。激光器1和激光器2所发出的

激光的频率存在角频差 ω_{het} , 激光器的出射激光经过 PBS1 和 PBS2 变成偏振方向垂直于光学基板上表面的偏振光, 二者可互为参考光和测量光。以左半部分的“卫星1”为例, 参考光为激光器1的出射激光, 测量光为激光器2的出射激光, 二者在半反半透镜2的工作表面处汇合, 平行准直入射至四象限探测器1和四象限探测器2。

2.2 装配误差分析

加工误差和装配误差的存在, 会导致光束光斑直径不一致、入射方向不一致、发散角不一致等现象, 它们在探测器上的光斑往往是不重合的, 如图2所示。两光斑重合部分会产生差频信号, 为有效测量能量; 不重合部分的光强不会随光程差的改变而改变, 因而其对探测器所激发出的电压为直流分量, 降低差分正弦信号的对比度。等臂干涉测量中, 双光束能量分布越一致, 测量信号的对比度越大。因此在实际操作中要力争满足以下两个方面的要求: (1) 保证双光束在探测器中的光斑直径和能量分布一致; (2) 双光束平行重合地入射到探测器中心。

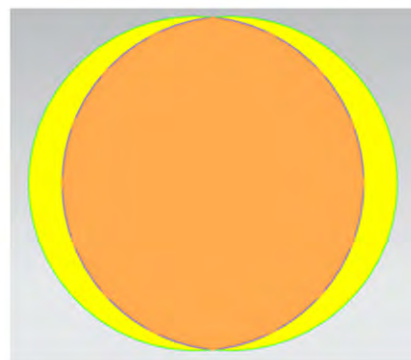


图2 双光斑重合公差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double spot coincidence

现实中的完全重合准直是不能实现的, 格拉斯哥大学确定可接受的对比度为80%。在实际中, 我们设计的光斑直径为 $1\,000\,\mu\text{m}$, 通过计算图2两圆的重合面积, 当中心点距离为 $150\,\mu\text{m}$ 时, 重合面积占比全光斑面积为81%; 与此同时, 准直后的激光光束能量分布为高斯分布, 中间能量高外围能量低, 因而当中心偏置 $150\,\mu\text{m}$ 时, 实际的理论对比度会优于81%。将 $150\,\mu\text{m}$ 作为等腰直角边的斜边, 做 X、Y 方向分解, 可得 X、Y 方向上的分量均为 $106\,\mu\text{m}$, 取 $100\,\mu\text{m}$ 作为 X、Y 方向上双光束中点位置的公差要求。

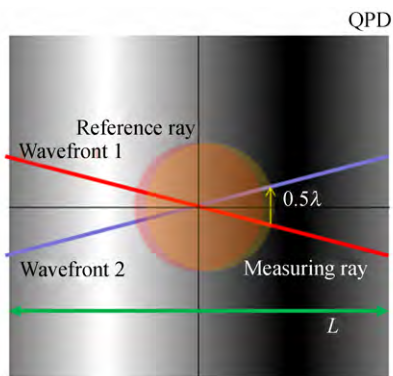


图 3 双光束夹角所引起的干涉条纹能量分布示意图
Fig. 3 Energy distribution of interference fringe caused by double-beam intersection angle

双光束波前交角直接影响四象限探测器上干涉条纹的分布密度,如图 3 所示。条纹宽度为 L , 双光束夹角为 θ ,二者之间的关系可以表示为:

$$L = \frac{\lambda}{\theta}. \quad (2)$$

为了能探测到干涉强度的变化,要求线宽 L 的单调区间大于光束的直径 D ,即满足:

$$L \geq D. \quad (3)$$

由于光斑直径 D 约为 1 mm,探测器有效感光面的直径也是 1 mm, λ 为 1 064 nm,可计算得临界交角 θ 为 1 mrad,为了提高系统的线性度,将光线角度公差设为 0.1 mrad,即 100 μ rad。

经分析可得,双光束的位置公差和角度公差如表 1 所示。

表 1 公差要求
Tab. 1 Tolerance requirements

	公差类别	要求
1	位置公差	100 μ m
2	角度公差	100 μ rad

2.3 光黏工艺介绍

HCB 装配工艺起源于斯坦福大学^[13-14],该技术介绍了一种在室温下,通过氢氧根离子的催化作用,在两个表面之间形成了分子共价键,起到了黏接的效果,黏接区域厚度为 26 ~ 100 nm^[7]。HCB 的优点主要表现在以下几个方面:(1)体积小,HCB 装配工艺省去了机械支撑结构,因而体积减小至原体积的四分之一;(2)质量轻,省去了机械支撑结构的质量,降低了系统的总质量;(3)

稳定性高,在元器件之间构建起分子共价键,变成了准单体结构,因而整体系统稳定性得到提高。同时,HCB 固化时间短,在数秒到数十分钟之间,这给元器件高精度定位带来了风险,需要将元器件高精度快速定位。

2.4 双四象限光束位置监测原理

光线在均匀介质中沿直线传播,两点确定一条直线,根据这种几何关系构造监测系统——双四象限探测校准系统。从工程实践角度,需要利用半反半透镜将光束一分为二,入射至两个四象限探测器中。格拉斯哥大学根据此原理加工制作了 CQP(calibrated quadrant photodiode pair),用于对空间光线进行准直校准和空间方向矢量测量^[15],其原理如图 4 所示。

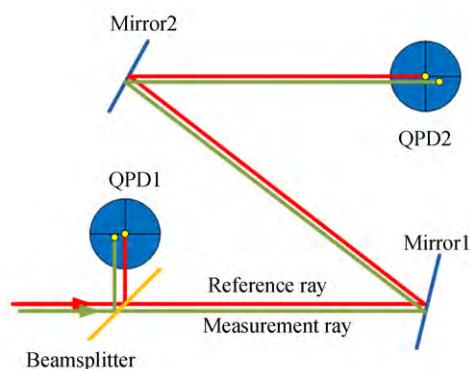


图 4 双四象限探测校准系统
Fig. 4 Double-QPD detection and calibration system

本试验使用监测系统同样采用双探测器结构,主要用于双光束空间位置检测,依据光点在双四象限探测器靶面上的位置来判断调整的方向。本设计采用双反射镜将光路折叠,双 QPD 之间的距离约为 $D_{CQP} = 500$ mm,单 QPD 的光斑位置分辨率为 1 μ m,解算出系统角度的保证精度为 2 μ rad。双四象限探测校准结构样机如图 5 所示。

2.5 元器件角度和位置的控制方法

半反半透镜的 6 个自由度中,只有 3 个可以调整,分别为 X 、 Y 和 γ ,如图 6(a)所示,其中 X 、 Y 表示光学基板上的平动方向, γ 表示以 Z 轴方向的转动角度。如图 6(b)所示,使用 3 个测微头对 3 个自由度进行调整。测微头 1、测微头 2 负责光学元件的平动和转动;测微头 3 起到限位和横向推动的作用。最终的调整目标是将双光束调整为重合出射状态。在此将透射光学元件的光束定义为参考光束,将在半反半透镜折转的光束定义为

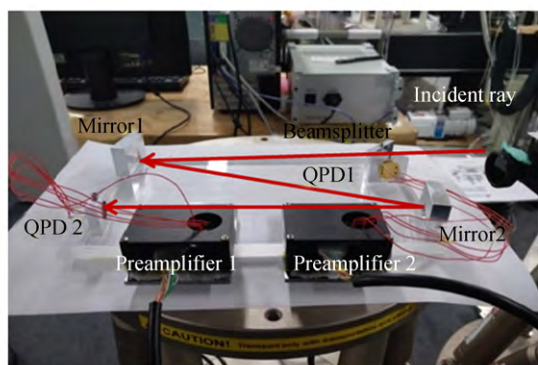
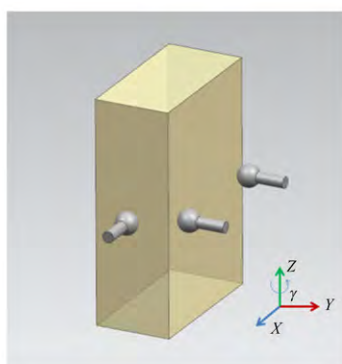
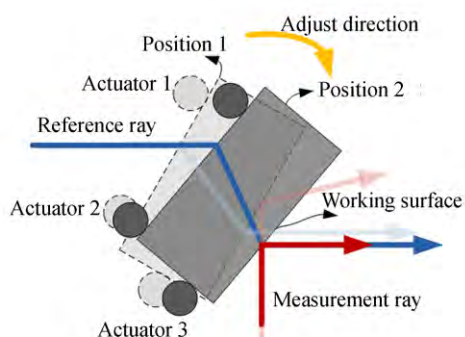


图 5 双四象限探校准系统的工程样机

Fig. 5 Engineering prototype of double four-quadrant probe calibration system

测量光束。当调整半反半透镜平移或转动时,光斑在 QPD 探测器上的位置可被实时显示,如图 7 所示。

(a) 元件的 X、Y 和 γ 三个自由度(a) X, Y, and γ degrees of freedom of components

(b) 装配元件的调整目标及过程

(b) Adjustment target and process of components

图 6 元器件自由度调整示意图

Fig. 6 Schematic diagram of adjustment of freedom degree of components

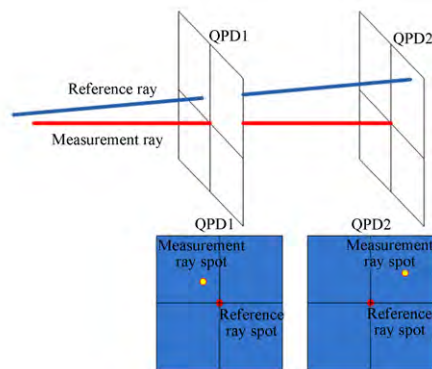


图 7 双光束在 CQP 上的光斑位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of double beams spot position on CQP

根据 CQP 系统的物理模型,计算出双光束在 X 方向的交角 $\Delta\varphi_X$ 以及 Y 方向的交角 $\Delta\varphi_Y$,然后计算出双光束的实际总交角 $\Delta\varphi$,其表达式为:

$$\Delta\varphi_X = \left| \frac{(X_M^{QPD1} - X_R^{QPD1}) - (X_M^{QPD2} - X_R^{QPD2})}{D_{CQP}} \right|, \quad (4)$$

$$\Delta\varphi_Y = \left| \frac{(Y_M^{QPD1} - Y_R^{QPD1}) - (Y_M^{QPD2} - Y_R^{QPD2})}{D_{CQP}} \right|, \quad (5)$$

$$\Delta\varphi = \sqrt{\Delta\varphi_X^2 + \Delta\varphi_Y^2}, \quad (6)$$

其中: (X_M, Y_M) 表示测量光的坐标点, (X_R, Y_R) 表示参考光的坐标点。在实际调整中监控测量光束在 QPD 上的光点位置,调整测微头 1 和测微头 2 的前进量,进而调整光学元器件的位置和角度。

实际操作系统的调整流程如下:

(1) 调平: 首先调整激光器出射光束与光学基板之间的位置关系,要求出射光束与光学基板上表面平行等高,平行度优于 $100 \mu\text{rad}$,高度差优于 $100 \mu\text{m}$;

(2) 初对准: 将激光观察卡沿光束传播的方向前后移动,观察双光点在观察卡中距离的变化趋势,粗略调整测微头,使双光束近似平行重合;

(3) 调整范围确认: 由于本调整方法具有单向性,将元器件的目标位置至于当前位置的可控区域,如图 6(b)所示;

(4) 参考光调零: 将测量光束遮挡,使用六足平台调整 CQP 的空间位置,使得参考光束穿过 QPD1 和 QPD2 的几何中心,即落在 $(0,0)$ 点处;

(5) 测量光调整: 释放测量光束,将参考光束遮挡,观测测量光束在双 QPD 探测器上的位置,

调节测微头,使测量光束光斑 $X_M^{QPD1} \in [-0.025 \text{ mm}, 0.025 \text{ mm}]$ 、 $X_M^{QPD2} \in [-0.025 \text{ mm}, 0.025 \text{ mm}]$,此时利用式(4)可以计算出 X 方向双光束的最大交角为 $100 \mu\text{rad}$;

(6)涂胶:将长臂端的测微头回撤 $10 \mu\text{m}$,取出半反半透镜,涂覆黏接溶液,重新贴紧测微头放置,调整测微头使透镜在 $\pm 0.025 \text{ mm}$ 的公差范围内;

(7)固化:静置 24 h ,待黏接面产生化学反应并具有足够强的黏接强度后,开展下一步工作。

2.6 关于姿态解耦的分析

在调整过程中,存在三自由度耦合问题,对一个自由的调整必然带来另外两个自由度的改变。在调整过程中,本实验人员特别注重以下几点:

(1)经过计算明确重点调整方向;(2)调整过程实时监视变化趋势,要求变化趋势向好;(3)微量调整,调整量不能超过公差范围。通过这些措施进而得到合理的试验结果。而另外 3 个自由度的位置精度,则需要结合光学零件超精加工来进一步保证。

3 测量试验与结果

本试验主要验证适用于 HCB 装配工艺的差频干涉仪角度公差和位置公差的保证方法,这里以 X 方向光线的平行和准直关系为调整对象对本方法进行说明。采用 HCB 装配工艺的双频激光干涉仪样机如图 8 所示。

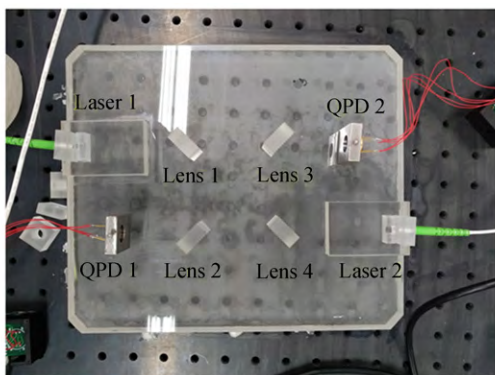


图 8 采用 HCB 工艺的双频激光干涉仪样机

Fig. 8 Prototype of dual-frequency laser interferometer using HCB bonding process

3.1 对 QPD 线性区间进行标定

QPD 是本试验系统的测量器件,需要对其线

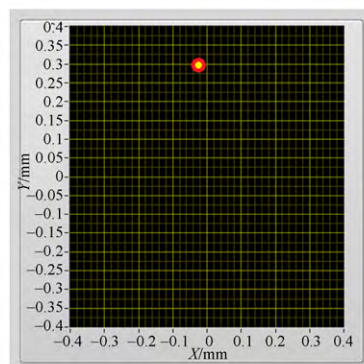
性区域进行标定。本文使用 PI 高精度位移台和一台固定的激光器对其探测边界进行标定,具体过程如下:首先将 QPD 探测器固定在高精度位移台上,调整激光器光束使它垂直入射到 QPD 探测器的中心区域;然后,驱动高精度位移台移动距离 ΔL_{mm} ,同时调整软件参数 k ,使软件中光斑移动量同为 ΔL_{mm} ,至此 k 值确定完毕;最后,标定得到 QPD 探测器 1 中 X 、 Y 方向的 k 值均为 0.8, QPD 探测器 2 中 X 、 Y 方向的 k 值分别为 0.8 和 0.83。

3.2 单光束对准

在 CQP 中,调整参考光束使之入射至双 QPD 探测器的中心位置。在本实验中采用了 QPD 自带软件的“零点偏置”功能, QPD1 的 (X, Y) 偏置值为 $(-0.0031, -0.0081)$, QPD2 的 (X, Y) 偏置值为 $(-0.0104, -0.0078)$ 。

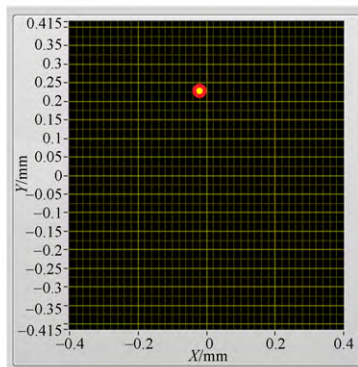
3.3 测量光束精确调整

经前文分析,需要将测量光束调整至 $\pm 0.025 \text{ mm}$ 的范围内。元器件仅有 3 个自由度 (x, y, γ) ,



(a) QPD1 中测量光束位置

(a) Measuring ray on QPD 1



(b) QPD2 中测量光束

(b) Measuring ray on QPD 2

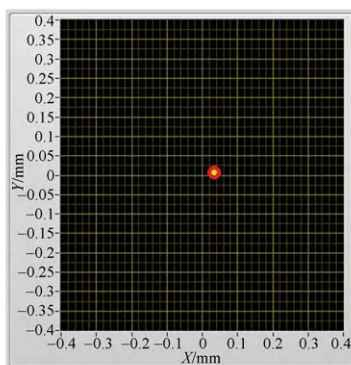
图 9 调整过程中测量光束在 CQP 中的位置

Fig. 9 Positions of measuring beam on CQP during adjustment

因而光束的俯仰角和高低位置不能被调整。本实验中对测微头进行手动调节,将CQP中双QPD探测器中光点位置调整至 y 轴附近,其坐标点分别为QPD1:(-0.024,0.3)和QPD2:(-0.021,0.227)。可见双光点坐标中 X 值已经位于 ± 0.025 mm的范围内。调整过程中测量光束在CQP中的位置如图9所示。

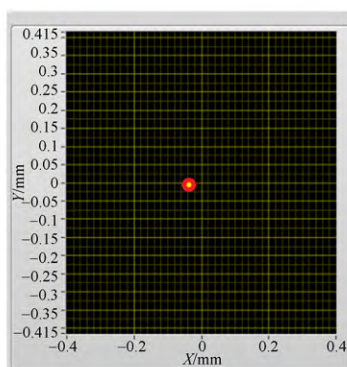
3.4 参考光束坐标点

经过调整后的半反半透镜位置已经满足测量光束的位置要求,但此时由于其转动角度 γ 的存在,参考光在CQP探测器中的位置会发生偏移,已经不再位于零点。遮挡测量光束、参考光束在双QPD探测器中的位置,得到其坐标值分别为:QPD1(0.034,0.008),QPD2(-0.039,-0.007),如图10所示。



(a) 参考光束在 QPD1 上的位置

(a) Reference ray on QPD 1



(b) 参考光束在 QPD2 上的位置

(b) Reference ray on QPD 2

图10 调整半反半透元件后参考光在CQP探测器中的位置偏移

Fig.10 Position offset of reference ray in CQP detector after adjustment

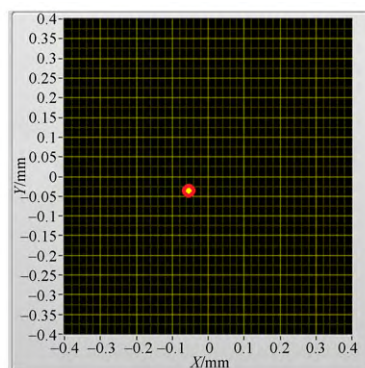
由于入射至QPD2上的光点比入射至QPD1上的光点的反射次数多一次,因此,QPD2上所有 X 方向的符号均取反值,参考光在QPD2上的坐标为(0.039,-0.007),测量光在QPD2上的坐标为(0.021,0.227)。 X 方向上双光束的夹角为:

$$\Delta\varphi_x = \left| \frac{(X_M^{QPD1} - X_R^{QPD1}) - (X_M^{QPD2} - X_R^{QPD2})}{D_{CQP}} \right| = \frac{0.04 \text{ mm}}{500 \text{ mm}} = 80 \mu\text{rad}. \quad (7)$$

双光束在 X 方向上的交角为 $80 \mu\text{rad}$,在所要求的范围内。

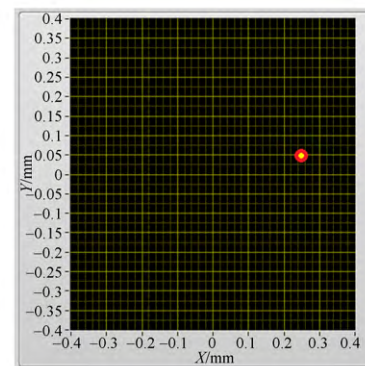
3.5 干涉仪上探测器的光点分布

在干涉仪上,QPD探测器的安装位置旋转了 90° ,所以图11中的 X 、 Y 方向与图10相反。由图11可知参考光在探测器中的位置坐标为(-0.053,-0.036),测量光在探测器中的位置坐



(a) 参考光束在四象限探测器1上的位置

(a) Reference ray on four-quadrant detector 1



(b) 测量光束在四象限探测器1上的位置

(b) Measuring ray on four-quadrant detector 1

图11 差频激光干涉仪中探测器1的实测双光点位置

Fig.11 Measured double spot position of detector 1 in differential frequency laser interferometer

标为(0.249,0.049),上述坐标中的 Y 值代表了CQP中的 X 值,可以计算出在干涉仪水平方向双光束的距离为 $85\text{ }\mu\text{m}$ 。通过图11可知,在竖直方向上双光束存在约 0.3 mm 的偏心,这主要是由于光线传播过程中误差积累导致,主要误差源包括双激光注入装置的角度偏差、分束镜自身底面的垂直度偏差、元器件装配偏差等。这些误差源的控制需在后续工作中重点开展。

4 结 论

本文介绍了一种适用于HCB装配工艺的差

频激光干涉仪双光束角度公差和位置公差保证方法。该方法首先提出了差频激光干涉仪在保证80%对比度的条件下,角度公差优于 $100\text{ }\mu\text{rad}$ 和位置公差优于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的约束条件。然后,结合HCB固化特点,介绍了采用微量调整机构和双四象限校准结构相结合的装调方法,使用该方法在调整维度内,实现了1套角度误差为 $80\text{ }\mu\text{rad}$ 和位置误差为 $85\text{ }\mu\text{m}$ 的原理验证样机,并给出了未来的优化方向。本方案基本满足差频激光干涉仪的装配精度需求,可为后续更高精度的装配奠定基础。

参考文献:

- [1] 王智,沙巍,陈哲,等.空间引力波探测望远镜初步设计与分析[J].中国光学,2018,11(1):131-151.
WANG ZH, SHA W, CHEN ZH, *et al.*. Preliminary design and analysis of space gravitational wave detection telescope [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11 (1):131-151. (in Chinese)
- [2] 傅雪.胡文瑞院士和吴岳良院士谈“空间太极计划”[J].科技导报,2016,34(3):55-56.
FU X. Academician Hu Wenrui and Academician Wu Yueliang talk about "Space Taiji Plan" [J]. *Science and Technology Review*, 2016, 34 (3): 55-56. (in Chinese)
- [3] 吴岳良,胡文瑞.中国的引力波探测计划[J].科学世界,2017(4):1-1.
WU Y L, HU W R. China's gravitational wave detection plan [J]. *Newton*, 2017 (4):1-1. (in Chinese)
- [4] 罗子人,白嫻,边星,等.空间激光干涉引力波探测[J].力学进展,2013,43(4):415-447.
LUO Z R, BAI SH, BIAN X, *et al.*. Space laser interference gravitational wave detection [J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43 (4): 415-447. (in Chinese)
- [5] 梅贵,翟岩,曲贺盟,等.离轴三反系统的无应力装调[J].光学精密工程,2015,23(12):3414-3421.
MEI G, ZHAI Y, QU H M, *et al.*. Stress-free assembly and adjustment of off-axis three-mirror system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23 (12): 3414 - 3421. (in Chinese)
- [6] 张学敏,宋兴,侯晓华,等.可调焦离轴三反光学系统的装调[J].光学精密工程,2017,25(6):1458-1463.
ZHANG X M, SONG X, HOU X H, *et al.*. Installation and adjustment of adjustable off-axis three-mirror optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25 (6): 1458-1463. (in Chinese)
- [7] 沙巍,陈长征,许艳军,等.离轴三反空间相机主三镜共基准一体化结构[J].光学精密工程,2015,23(6):1612-1619.
SHA W, CHEN CH ZH, XU Y J, *et al.*. Main three mirrors and common reference integrated structure of off-axis three-mirror space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23 (6): 1612 - 1619. (in Chinese)
- [8] ELLIFFE E J, BOGENSTAHL J, DESHPANDE A, *et al.*. Hydroxide-catalysis bonding for stable optical systems for space[J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2005, 22(10):S257-S267.
- [9] ROBERTSON D I, FITZSIMONS E D, KILLOW C J, *et al.*. Construction and testing of the optical bench for LISA pathfinder[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2013, 30(8):085006.
- [10] 陈晓峰,阮海军.氢氧催化粘接技术在光学部件粘接中的应用研究[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2004,20(1):59-63.
CHEN X F, RUAN H J. Application of hydrogen-oxygen catalytic bonding technology in optical component bonding [J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 2004, 20 (1): 59-63. (in Chinese)

- [11] 阮海军. 低温氢氧催化键合及其特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2004.
RUAN H J. *Study on Catalytic Bonding of Hydrogen and Oxygen at Low Temperature and its Characteristics* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
- [12] 骆颖欣. 星载激光稳频原理演示系统的研制[D]. 武汉:华中科技大学, 2016.
LUO Y X. *Development of a Demonstration System of Satellite-borne Laser Frequency Stabilization Principle* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] GWO D H. Ultra precision and reliable bonding method: US, US 6284085 B1[P]. 2001.
- [14] GWO D H. Hydroxide-catalyzed bonding: US, US 6548176 B1[P]. 2003.
- [15] FITZSIMONS E D, BOGENSTAHL J, HOUGH J, *et al.*. Precision absolute positional measurement of laser beams[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12):2527-2530.

作者简介:



姚东(1985—),男,吉林东丰人,博士研究生,助理研究员,2007年、2010年于北京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,主要从事航空遥感和干涉测量方面的研究。E-mail: yd_banrou@sina.com



李钰鹏(1992—),男,山东青岛人,博士研究生,2011年于青岛科技大学获得学士学位,主要从事光机结构设计方面的研究。E-mail: liyp0525@126.com