文章编号 2095-1531(2019)03-0432-09

应用于空间精密测量的全玻璃光纤耦合器的系统设计

赵 亚[1,2],姚 东[1],王 智[1*],方 超[1],李钰鹏[1,2]
(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,北京 100049)

摘要:本文提出了一种全玻璃材料的光纤耦合器以实现高精度,高稳定的干涉测量。首先,介绍了干涉测量系统的工作原理以及光纤耦合器的系统设计,然后通过理论分析选取了非球面透镜,并根据具体的透镜参数进行了数值分析以及软件分析。接着进行了光束参数匹配度以及光束矢量匹配度的容差分析以及结构的热分析。最后结合理论分析以及精密的装调手段完成了光纤耦合器的制作。实验结果表明:光斑尺寸相对于仿真结果的误差约为 3.4%,两光斑尺寸差异为 0.9%,偏心距离低于 40 μm,夹角约为 60 μrad,基本满足干涉测量系统的使用要求。

关 键 词:空间引力波探测;干涉测量;光纤耦合器;光斑
中图分类号:TB133; TB121 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20191203.0432

System design of all glass fiber couplers for precise space measurement

ZHAO Ya[1,2], YAO Dong[1], WANG Zhi[1*], FANG Chao[1], LI Yu-peng[1,2]
(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: wz*070611@126.*com*

Abstract: A fiber-optic coupler with all glass materials is presented in this paper to realize high-precision, ultrastable interferometry. Firstly, we introduce the working principle of interferometry systems and the design of the fiber-optic coupler. Secondly, through theoretical analysis, selection of aspheric lenses is performed based on specific parameters of the lenses, which are investigated using numerical and software analysis. Then, we carry out a tolerance analysis of matching degrees of beam parameters and beam vectors, along with a thermal analysis of the structures. Finally, by combining theoretical analysis with precise adjustment, the manufacturing process of the fiber-optic coupler is finalized. Experimental results indicate that the error of the spot size compared to the result of simulations is about 3.4%. The difference between two beams′spot size is about 0.9%, their center distance is less then 40 μm and their included angle is about 60 μrad. This data can satis-

收稿日期:2018-07-04;**修订日期**:2018-08-25
基金项目:中科院战略性先导科技专项(B)(No. XDB23030000)
Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(No. XDB23030000)

fy the application requirements of the interferometric system.

Key words: space gravitational wave detection; interferometry measurement; fiber-optic coupler; spot

1　引　言

空间引力波探测的基本原理是通过测量测试质量间的间距变化,将引力波信号转化为测试质量间距变化的信号,然后利用高精度的激光干涉仪对这个距离变化进行读出。因此,高精度的激光干涉测距系统,是获取引力波信号的直接手段。在激光干涉测距系统中,光学平台是不同的激光束在设计的光路中运行并能很好地产生干涉的硬件基础。为了完成探测目标,光学平台系统在1 ~ 30 mHz 频段内的测距精度要低于 10 pm/$\sqrt{\text{Hz}}$,指向精度要低于 20 nrad/$\sqrt{\text{Hz}}$[1-2]。要满足该精度要求,光学平台的尺寸稳定性,光学元件的位置精度,对准精度需要严格保证。而光纤耦合器作为光学平台内所有干涉光束的光源,直接决定了干涉光束的质量以及稳定性,直接影响整个激光干涉测距系统的干涉效果。因此需要对光纤耦合器进行详细的设计、制造、装调以满足测量要求。

传统的光纤耦合器通常分为两种:一种是 1968 年由日本科学家北野一郎等人发明的采用自聚焦透镜(Grin-Lens)的准直器,由于其体积小,易于装配,因此在光通信领域有大量的应用[3-4]。另一种是 2001 年华科公司的罗勇发明的采用定折射率透镜(C-lens)的准直器,相对于 Grin-lens,C-lens 成本较低,工作距离范围大[5]。市场上的准直器,无论是 C-lens 准直器还是 G-lens 准直器,大都由金属外壳和透镜组成[6],它们精度不高,而且由于金属与透镜的热膨胀系数不一致,在温度波动下,将会导致光纤耦合器的结构发生形变,进而使光束的准直效果以及传播方向发生改变,最终导致整个干涉系统的干涉效果变差,测量精度降低。为满足空间激光测距系统的要求,本文提出一种采用全玻璃材料制作的光纤耦合器。该耦合器采用非球面透镜对光束进行准直,采用全玻璃材料固定光纤与非球面透镜,极大地提高了结构的热稳定性,通过精密的装调手段极大地提高了光束的干涉效果。最后,通过系统仿真与实验验证,证明此结构基本满足目前激光测距系统的要求。

2　干涉测量系统

2.1　干涉测量系统的工作原理

干涉仪原理样机原理图如图 1 所示。激光器(1 064 nm)发出的光通过光纤分束器分成两路,每一路连接一个 AOM,对 2 个 AOM 分别设置,使它们对相应光束进行不同的频率调制,这样来自同一激光器具有相同频率的两束激光间就产生了频率差,接着通过光纤耦合器将两束激光准直成光斑大小为 1 mm 左右的高斯光束后,该高斯光束先经过一半反半透镜分为两路,每一路又通过一半反半透镜与所对应的另一光束光路合束后一起打到四象限探测器上,进行干涉测量。

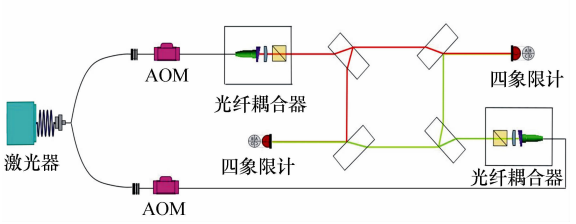


图 1　干涉仪样机原理图

Fig. 1　Schematic diagram of interferometer prototype

2.2　影响干涉效果的因素

四象限探测器获取的是一个随着时间变化的拍频信号。为了在四象限探测器上获取低噪声的干涉信号,必须保证两干涉光束具有良好的干涉对比度,其定义为:

$$c = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \tag{1}$$

而两干涉光束的匹配度是影响其干涉对比度的关键因素。其匹配度可以概括为两个方面:(1)光束参数的匹配度:包括光斑大小,光束波前,偏振状态;(2)光束矢量的匹配度:包括角度偏差,位置偏差。

由此可知,光纤耦合器需要满足两个设计目标:(1)可以提供良好光束质量以满足光束参数

的匹配度;(2)可以调整出射光束矢量以满足光束矢量的匹配度。

3 光纤耦合器

3.1 光纤耦合器的系统设计

光纤耦合器 CAD 设计结果如图 2 所示,其所包含的部件及其功能如表 1 所示。其中保偏光纤跳线为熊猫型的 FC/APC 光纤跳线,具有良好的消光比与回波损耗。其名义输出模场半径为 3.85 μm,其端面模场分布为零阶贝塞尔函数,可近似为高斯分布[7]。通过分析零阶贝塞尔函数在远场处的光场分布得知,束腰为 4.88 μm 的高斯光束与其较为匹配,故假定光纤发出的光是束腰为 4.88 μm 的高斯光束,此数值将用于后面的理论计算。光纤支座,透镜 U 形支座,玻璃基板的材料都是熔石英。

为满足两干涉光束的匹配度要求,需要仔细设计耦合器上的部件,并且需要严格保证每个部件的相对位置精度以及整个耦合器粘接到光学平台上的位置精度,其中非球面透镜的选择极为重要,因为它直接关系到光束的准直状态与波前质量。

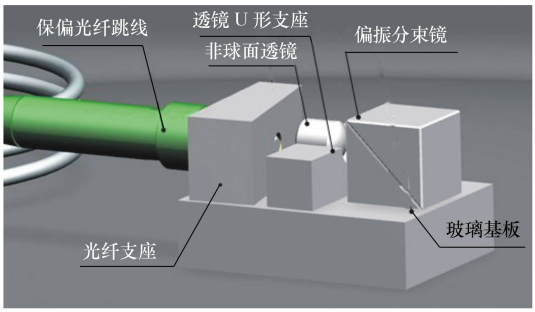


图 2 光纤耦合器 CAD 图

Fig. 2 CAD drawing of fiber optic coupler

表 1 光纤耦合器组成部分及其功能

Tab. 1 Components of fiber optic coupler and their corresponding functions

序号	部件名称	功能
1	保偏光纤跳线	发射光束
2	光纤支座	固定支撑光纤头
3	非球面透镜	准直光束
4	透镜 U 形支座	固定支撑透镜
5	偏振分束镜	控制出射光的偏振状态
6	玻璃基板	用来提供部件的安装面并与干涉大基板粘接

3.2 非球面透镜

3.2.1 非球面透镜选取过程

高斯光束经过透镜的转换示意图如图 3 所示,ω_0、ω_i 分别为高斯光束经透镜转换前后的束腰半径,q_0、q_i 分别为高斯光束经透镜变换前后束腰处的 q 参数。高斯光束的传输符合 ABCD 定律[8-10]:

$$q_1 = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D}. \tag{2}$$

为简便计算,将透镜简化为薄透镜进行分析。通过计算可得 s_i、w_i 的变换公式为:

$$s_i = f + \frac{\Delta x \cdot f^2}{(\Delta x)^2 + Z_0^2}, \tag{3}$$

$$\omega_i^2 = \frac{\omega_0^2 f^2}{(\Delta x)^2 + Z_0^2}, \tag{4}$$

其中,$\Delta x = s_0 - f$,指的是初始束腰位置距离透镜物方焦点的距离;$Z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$,为瑞利尺寸,表征的是高斯光束的准直范围,准直前束腰为 4.88 μm,其对应的瑞利长度是 0.07 mm,因此需要扩束准直。考虑实际测量需求,在先期的初步

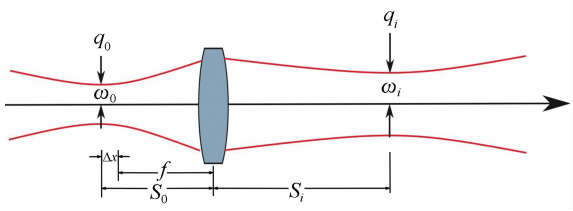


图 3 高斯光束经过透镜转换示意图

Fig. 3 Conversion diagram of Gauss beam passing through a len

设计中将准直距离 Z_i 初定为 500 ~ 1 000 mm,已知激光波长为 1 064 nm,以此算出的束腰 ω_i 为 0.411 ~ 0.582 mm。若已知 ω_0 = 4.88 μm,取 Δx = 0,根据(7)式可算得透镜的焦距范围为 5.92 ~ 8.38 mm。考虑实际光纤耦合器的装配过程,应尽量选择口径、厚度、工作距离(物方焦点到透镜前表面顶点的距离)合适的透镜。经过仔细挑选,本文选择了 lightpath 公司的 352110 型号的非球面透镜,材料是 ECO550,其名义尺寸参数如表 2所示。

表 2　透镜名义尺寸参数

Tab. 2　Nominal parameters of lens

名义尺寸	参数值	
透镜厚度/mm	5.258	
透镜口径/mm	5	
1 064 nm 波长下折射率	1.592	
1 064 nm 波长下焦距	6.294	
	前表面	后表面
曲率半径/mm	−14.45	4.33
2 次系数	−105.23	−0.846 9
四次非球面系数	$-1.059\ 4\times10^{-3}$	$0.521\ 51\times10^{-3}$
六次非球面系数	76.926×10^{-6}	$-6.876\ 6\times10^{-6}$
面型	RMS≤0.087, PV≤0.270	
工作距离/mm	3.397	

3.2.2　非球面透镜分析过程

非球面透镜的参数性能直接影响准直后的光束质量以及装调过程。因此需要详细分析所选取非球面透镜的性能。

3.2.2.1　数值分析

在前面的理论分析中,假定透镜为没有厚度的薄透镜。但实际的透镜是有厚度的。设透镜物方主面与透镜前表面顶点的距离为 h_1,工作距离 L 为物方焦点到透镜前表面顶点的距离[11],因此工作距离 L 为:

$$L = f - h_1. \tag{5}$$

通过计算得到 h_1 = 2.897 mm,因而求得工作距离 L = 3.397 mm。之后的装调工作就是在微米量级改变 Δx 以调整准直光束的束腰位置 s_i。在目前设计的干涉仪样机中,光束从光纤耦合器出发传播 200 mm 后打到探测器上。因此将准直后的高斯光束的束腰放置在 200 mm 处最为合适。式(3)、式(4)分别表征 s_i、ω_i 与 Δx 的函数关系,

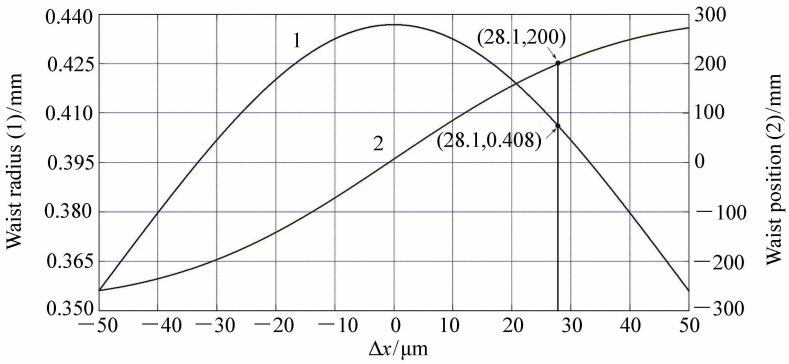


图 4　s_i、ω_i 随 Δx 变化趋势图

Fig. 4　Trend diagram of s_i, ω_i with the change of Δx

将非球面透镜的已知参数代入可得 s_i、ω_i 变化趋势图，如图 4 所示。从图 4 可知，当 s_i = 200 mm 时，Δx_i = 28.1 μm，ω_i = 0.410 mm，此时光纤端面距离透镜前表面的距离 s_0 = 3.425 mm。

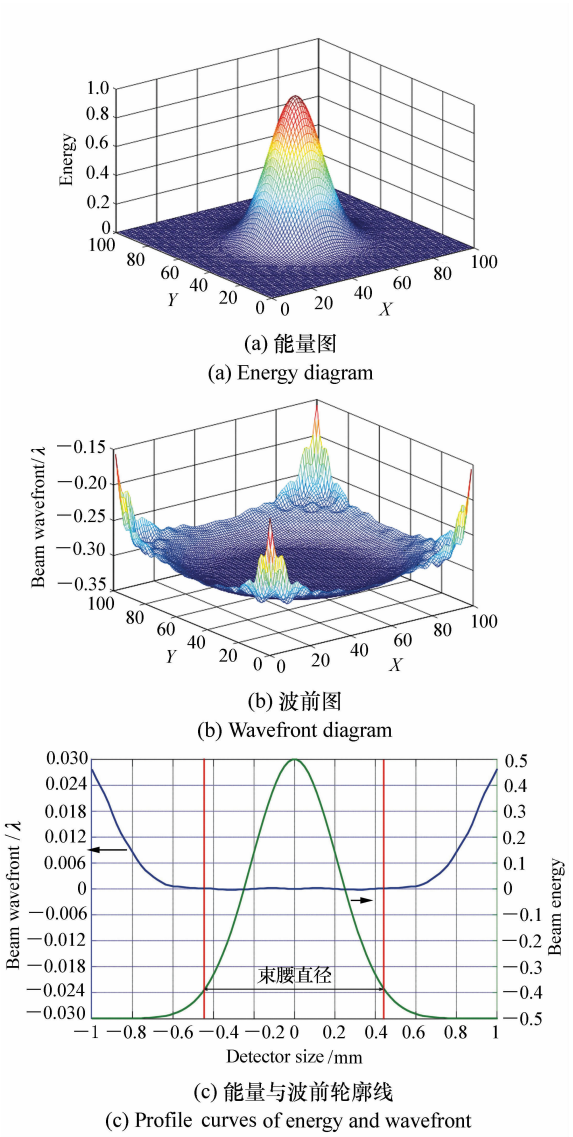
3.2.2.2 软件分析

无论是非球面透镜的选取过程还是数值分析过程，采用的分析方法都属于高斯光学。但是高斯光学不能直接进行波前追迹，因此不能分析透镜像差对光束的影响，同时通过高斯光学分析的数据在非球面系数高次项的作用下会有细微改变，因此需要通过软件全面分析非球面透镜，进而得出更准确的数据指导实验。分析过程如下：

(1)在软件中建立透镜几何模型，将初始高斯光束束腰放置在物方焦点上。

(2)设置优化方式。首先优化变量：设置初始高斯光束束腰位置的变化范围是物方焦点左右 50 μm。其次，优化目标：利用高斯光束束腰处光斑中心能量最大的性质，将探测器上中心能量最高时探测器的位置距坐标原点的距离优化至 200 mm。

(3)分析结果：当初始束腰距离透镜前表面 3.421 mm 时，追迹后 200 mm 处探测器上的中心能量最高，可以认为束腰此时就在探测器上。与数值分析的 3.425 m 十分接近。图 5(a)、图 5(b)分别是探测器上的能量图与波前图。图 5(a)中能量衰减到 13.5% 处的半径为 0.413 mm，与数值分析的 0.408 mm 十分接近。但是波前图与数值分析有偏差。受球差的影响[12]，探测器边缘处波前畸变较严重，但是否影响干涉效果还需要综合分析。图 5(c)为综合了能量与波前的曲线。四象限计是通过探测能量读取信号的，从图中可以看出束腰直径内能量集中处所对应的波前质量十分好，优于百分之一的波长，完全满足探测要求。畸变处波前中心对称并且所对应的能量很小，基本可以忽略。因此可以得出结论：目前所选取的非球面透镜完全满足使用要求。



(a) 能量图
(a) Energy diagram

(b) 波前图
(b) Wavefront diagram

(c) 能量与波前轮廓线
(c) Profile curves of energy and wavefront

图 5 探测器上光束的能量与波前

Fig. 5 Energy and wavefront of beam on the detector

3.3 光束匹配度

3.3.1 光束参数匹配度容差分析

理想情况下两光束在干涉位置应该具有一致的波前以及光斑大小，但实际情况下，两者都会有所偏差，使得干涉对比度下降，增加了干涉信号的提取难度。因此需要定量分析由于干涉参数不匹配导致的干涉对比度的下降程度。因为两个光纤耦合器采用的是相同参数的光纤与透镜，唯一的变量就是由于装调误差引起的两工作距离 L 的不一致，下面进行仿真分析。

仿真光路示意图如图 6(a)所示，红光为参考光，绿光为测试光，两初始束腰位置有位置偏差 Δx，L = 3.394 mm，探测器放置在 200 mm 处。同时追迹参考光与测试光，在探测器上观察两光束干涉后能量变化的拍频信号。图 6(b)为一个周期内 16 个时刻探测器上的光强图，图 7(a)为一个周期的拍频信号，图 7(b)表征了干涉对比度与

Δx 的关系曲线,从图中可以看出,若使得干涉对比度大于 99%,Δx 要小于 20 μm,联合图 5 可以得到两干涉光束的光斑尺寸差异要低于 5%。

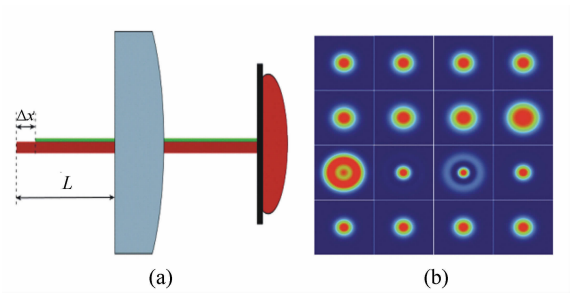


图 6　光路示意图(a)及 16 个时刻光强图(b)

Fig. 6　Schematic diagram of optical path(a) and energy diagrams on detector at 16 moments(b)

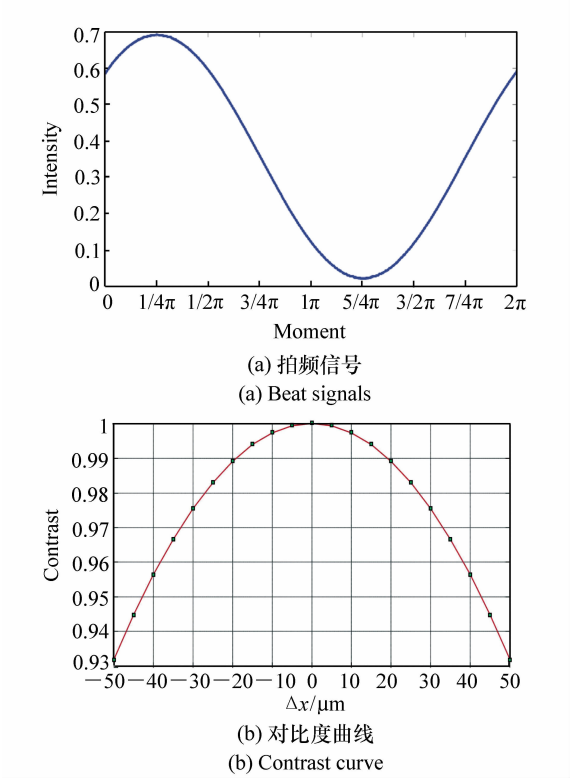


图 7　拍频信号及其信号对比度与 Δx 关系曲线

Fig. 7　Related curve of beat signal and signal contrast varying with Δx

3.3.2　光束矢量匹配度容差分析

两光束矢量的偏差包括角度偏差以及打到探测器上的位置偏差,下面进行仿真分析。

参照前面的分析结果,将参考光束与测试光束的束腰半径设置为 0.4 mm,并将探测器放置在距离坐标原点 200 mm 处。考察位置偏差时将参考光束与测试光束平行出射,同时设置偏心距离,结果如图 8(a)所示;考察角度偏差时将参考光束与测试光束以一定夹角出射并同时打到探测器中心,结果如图 8(b)所示。从图中可以看出,若使得干涉对比度大于 99%,偏心距离要小于 65 μm,夹角要小于 100 μrad。

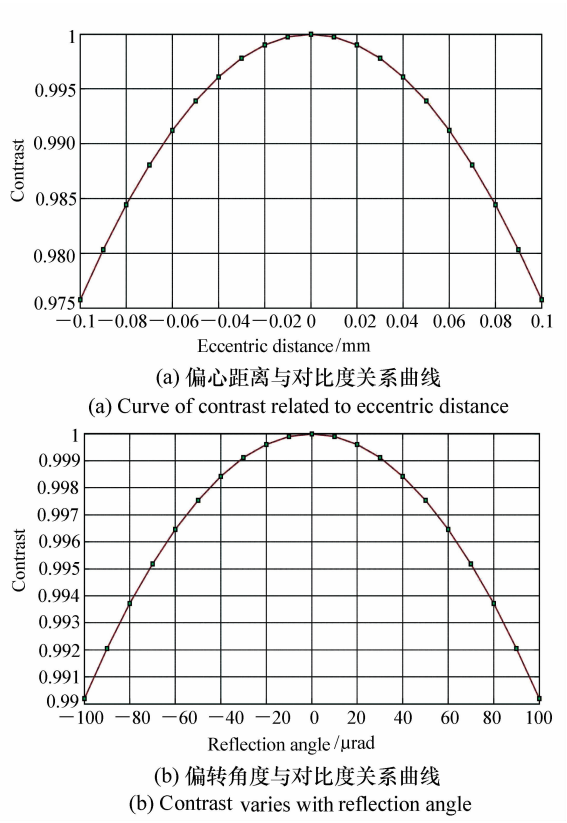


图 8　光束矢量与对比度的关系曲线

Fig. 8　Relationship between contrast and beam vector

3.3.3　热分析

已知熔石英材料的热膨胀系数为 0.5×10^{-6}/℃,玻璃材料的热膨胀系数为 11.5×10^{-6}/℃,温度波动导致的热变形会引起光纤与透镜的相对位置发生改变,因而导致准直光束参数以及矢量发生变化。准直光束经过 200 mm 的光程打到探测器上,光斑中心距离探测器中心要求在 ±0.1 mm 内,由此算得光束的角度改变量要低于 ±500 μrad。20 ℃温度波动下,透镜及支撑结构的有限元分析结果见图 9。由图 9 可知,20 ℃的温度波动下,光纤与透镜相对位置在竖直方向的偏移量约为 7.2×10^{-4} mm/℃,导致的角度改变量约为 120 μrad,低于 ±500 μrad,满足要求。

水平方向的偏移约为 7.8×10^{-5} mm/℃,20 ℃温度波动下的偏移量为 1.56 μm,由前面分析可得此变化量对光束参数影响很小。因此可以得知此光纤耦合器的热稳定性能够满足使用要求。

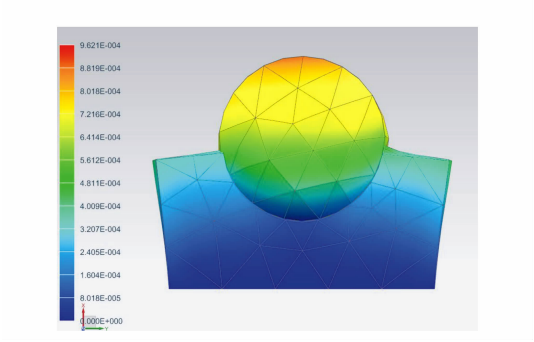
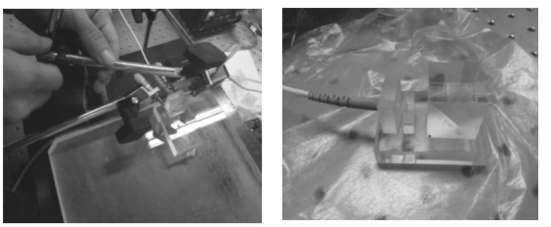


图 9 20 ℃温度波动下透镜及支撑结构的有限元分析

Fig. 9 Finite element analysis of a lens and its supporting structure under the condition of 20 ℃ temperature change

4 装调过程及其实验结果

准直装调过程如图 10(a)所示,将光束分析仪放在距离光纤耦合器 200 mm 处,首先通过基准块将光纤与透镜距离调整为 3.4 mm,然后通过微调促动器使得光束分析仪上的光斑直径最小,图 10(b)为完成装调的耦合器。两个耦合器最终的准直光束实测结果如图 11 所示。由图 11 知,在 200 mm 处,光束 1,光束 2 的光斑直径分别约为 846.7 μm,854.6 μm。对比理论值 826 μm,误差分别为 3.23%、3.64%,其误差主要是由透镜的形状误差,装调误差以及光束分析仪的测量误差导致的。结果表明,理论值与实际值的相对误差都在 10% 以内,同时两光斑尺寸差异为 0.9%,低于 5%,满足要求。



(a) 准直过程
(a) Process of collimation

(b) 完成的耦合器
(b) completed coupler

图 10 耦合器的准直装调

Fig. 10 Collimation and adjustment of coupler

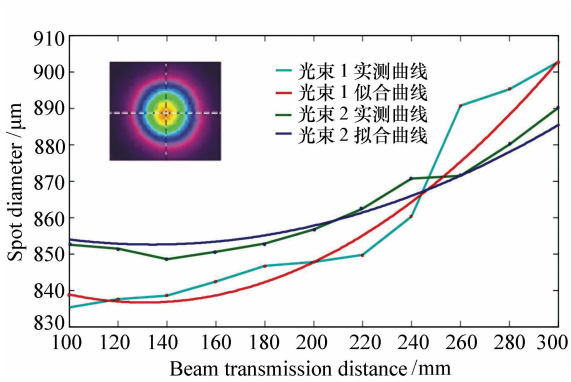


图 11 两准直光束实测结果

Fig. 11 Measured results of two collimated beams

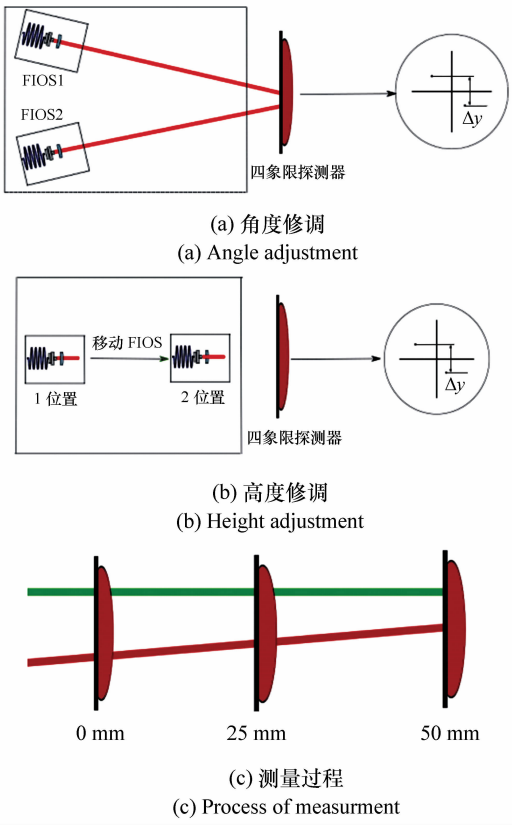


图 12 光束矢量装调过程

Fig. 12 Adjustment process of beam vector

光束矢量装调过程分为两个步骤[13-14]。第一步为角度修调过程,如图 12(a)所示。在基板调平的基础上,将光纤耦合器分别放置到位置 1 与位置 2 处,位置 1 与位置 2 的距离约为

200 mm,通过四象限探测器记录两次光斑位置。为给后面装调留有余量,俯仰角应尽量控制在 50 μrad 以内,通过研磨光纤耦合器的玻璃基板,使得 Δy 小于 10 μm。第二步为高度修调过程,如图 12(b)所示。在基板调平的基础上,将两个光纤耦合器放置到不同位置,通过四象限探测器记录光斑位置。可以认为分析仪中光斑 Y 方向的差值是由光束出射高度差造成的。为给后面装调留有余量,通过研磨光纤耦合器的玻璃基板,使得 Δy 小于 40 μm。图 12(c)为最终数据测量过程,移动四象限探测器观察 Δy 的变化,最终测得的 Δy 分别为 32、33 和 35 μm,误差主要是由于上述装调手段达不到微米级精度所致,在以后的工作中需要改进。但目前高度差低于 40 μm,俯仰角约为 60 μrad,因此满足要求。

5　结　论

本文以一种全玻璃光纤耦合器为研究对象,对非球面透镜的准直效果进行了理论推导和软件仿真,对光束匹配度如何影响干涉对比度进行了仿真分析,提出了两光束光斑尺寸差异要低于 5%,偏心距离低于 60 μm,夹角低于 100 μrad 的要求,然后对结构进行了热分析,结果满足使用要求。最后结合理论分析对光纤耦合器进行了精密的装调。实验结果证明:光斑尺寸相对于仿真结果的误差约为 3.4%,两光斑尺寸差异为 0.9%,偏心距离低于 40 μm,夹角约为 60 μrad,基本满足使用要求。但由于时间、设备的限制,并未对光纤耦合器进行热试验分析,在未来的研究中需要进行近一步的实验验证。

参考文献:

[1] 罗子人,白姗,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*.. Gravitational wave detection by space laser interferometry[J]. *Advances in Mechanics*,2013,43(4):415-447. (in Chinese).

[2] 王智,马军,李静秋. 空间引力波探测计划-LISA 系统设计要点[J]. 中国光学,2015,8(6):980-987.
WANG ZH,MA J,LI J Q. Space-based gravitational wave detection mission:design highlights of LISA system[J]. *Chinese Optics*,2015,8(6):980-987. (in Chinese).

[3] 朱少丽,徐秋霜,刘德森. 自聚焦透镜在光纤准直器中的应用分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2004,29(3):379-382.
ZHU SH L,XU Q SH,LIU D S. The analysis of GRIN in optical fiber collimator[J]. *Journal of Southwest China Normal University*(*Natural Science Edition*),2004,29(3):379-382. (in Chinese)

[4] PALAIS J C. Fiber coupling using graded-index rod lenses[J]. *Applied Optics*,1980,19(12):2011-2018.

[5] 龚文杰. C-Lens 准直器特性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
GONG W J. Study on the properties of C-Lens collimator[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2006. (in Chinese)

[6] 丁原,王智,杨文波. 光纤准直器结构研究与设计[J]. 长春大学学报,2005,15(2):8-11..
DING Y,WANG ZH,YANG W B. Research and design of fiber collimator[J]. *Journal of Changchun University*,2005,15(2):8-11. (in Chinese).

[7] 雷成敏,谷炎然,陈子伦,等. 高功率全光纤侧面抽运耦合器研究进展[J]. 光学 精密工程,2018,26(7):1561-1569.
LEI CH M,GU Y R,CHEN Z L,*et al*.. Developments of high power all-fiber side-pumping combiner[J]. *Opt. Precision Eng*,2018,26(7):1561-1569. (in Chinese)

[8] 卢亚雄,吕百达. 矩阵光学[M]. 大连:大连理工大学出版社,1989:118-188.
LU Y X,LV B D. *Matrix Optics*[M]. Dalian:Dalian University of Technology Press,1989:118-188. (in Chinese).

[9] 卢亚雄,杨亚培,陈淑芬. 激光束传输与变换技术[M]. 成都:电子科技大学出版社,1999:20-80.
LU Y X,YANG Y P,CHEN SH F. *Laser Transmission and Transform Technology*[M]. Chengdu:Press of Electron Technology University,1999:20-80. (in Chinese)

[10] 杨光磊,井长龙,裴治棋,等. 固态体积式真三维立体显示器[J]. 液晶与显示,2015,30(1):137-142.
YANG G L,JING CH L,PEI ZH Q,*et al*.. Solid-state volumetric true 3D display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals*

and Displays,2015,30(1):137-142. (in Chinese)

[11] 张一谟. 应用光学(上册)[M]. 北京:北京工业出版社,1992.
ZHANG Y M. *Applied Optics*(*the upper book*)[M]. Beijing:Beijing Industrial Press,1992. (in Chinese)

[12] 杜木青,张伶莉,刘永军. 液晶及其不同填充结构对光子晶体光纤传输特性的影响[J]. 液晶与显示,2018,33(2):116-122.
DU M Q,ZHANG L L,LIU Y J. Effect of liquid crystal and its different filling structure on the transmission properties of photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Liquid Cryostals and Displays*,2018,33(2):116-122. (in Chinese)

[13] 姚东,李钰鹏,赵亚,等. 适用于光黏工艺的干涉仪公差保证方法[J]. 光学 精密工程,2018,26(8):1945-1953.
YAO D,LI Y P,ZHAO Y,*et al*.. Tolerance assurance of interferometer for optical HCB process[J]. *Opt. Precision Eng*.,2018,26(8):1945-1953. (in Chinese)

[14] 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 alignment of off-axis three-mirror system[J]. *Opt. Precision Eng*.,2015,23(12):3414-3421. (in Chinese)

作者简介:

赵 亚(1993—),男,新疆图木舒克人,硕士研究生,2012 年于东北大学获得学士学位,主要从事光机设计以及干涉测量方面的研究。E-mail: zhaoya16@mails.ucas.ac.cn

王 智(1978—),男,山东寿光人,博士,研究员,中科院青年创新促进会会员,2003 年于长春理工大学获得硕士学位,2006 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,2016 年 12 月~2017 年 12 月,德国马克斯普朗克引力物理研究所(爱因斯坦研究所)做访问学者,主要从事空间引力波探测领域的研究。E-mail: wz070611@126.com