

集成光学移相干涉仪的研制与性能表征

郝寅雷¹, 丁君珂¹, 陈浩¹, 蒋建光¹, 孟浩然², 刘欣悦²

(1. 浙江大学 信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 干涉仪是综合孔径望远镜的核心器件, 与传统的分立元件干涉仪相比, 集成光学移相干涉仪结构紧凑, 用于构建综合孔径望远镜能显著优化望远镜结构并提高系统稳定性。文中报道了二氧化硅基集成光学移相干涉仪的设计和制作, 并给出了对这种器件主要性能的性能表征结果。研究表明, 集成光波导制作技术可以保证干涉仪芯片上两个方向耦合器的耦合特性的一致性; 器件的插入损耗优于 1.8 dB, 插入损耗均匀性优于 0.1 dB; 通过对 MZ 干涉仪插入损耗的测量估计了移相器的偏差, 结果显示干涉仪中 90° 移相器的偏差大约为 1.5°。分析表明, 二氧化硅基光波导技术用于综合孔径望远镜用光干涉仪制作具有显著的优势。

关键词: 移相干涉仪; 综合孔径望远镜; 集成光学; 光波导

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0420001

Manufacturing and characterization of integrated optical phase-shift interferometer

Hao Yinlei¹, Ding Junke¹, Chen Hao¹, Jiang Jianguang¹, Meng Haoran², Liu Xinyue²

(1. College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Optical interferometers are key devices in constructing aperture synthesis telescope. Compared with optical interferometers implemented with conventional discrete elements, integrated optical phase-shift interferometers possess ultra-compact structure, and thus can be applied in aperture synthesis telescope to optimize its structure and improve its stability as well. Silica based integrated optical phase-shift interferometer was studied, in aspects of its design, fabrication, as well as its characterization. Results show that the two direction couplers in interferometer chip possess well consistency in terms of their coupling efficiency, thanks to integrated optical waveguide technology itself. Excess loss of interferometer chip was measured to be as low as 1.8 dB, with uniformity of 0.1 dB. Phase shift error was estimated by measuring MZ interferometers, and results exhibit that error of 90° phase shifter is approximately 1.5°. Analysis show that silica based waveguide technology is promising in fabrication of optical phase-shift interferometers utilized in aperture synthesis telescope.

Key words: phase-shift interferometer; aperture synthesis telescope; integrated optics; optical waveguide

收稿日期: 2018-11-03; 修订日期: 2018-12-26

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY17F050007); 深圳市科技计划项目(JCYJ20170816172409618)

作者简介: 郝寅雷(1974-), 男, 副教授, 博士, 主要从事集成光学器件方面的研究。Email: haoyinlei@zju.edu.cn

0 引言

在天文观测、空间遥感和军事侦察等诸多应用领域,人们对望远镜的空间分辨能力不断提出更高要求,而传统望远镜空间分辨能力的持续提升遇到了技术和工程上的瓶颈。一方面,受到大尺寸光学透镜和反射镜材料制备和光学加工技术的限制,传统的直接成像望远镜的口径不能无限制地持续增大,限制了望远镜分辨力的持续提高^[1-4]。另一方面,对于机载和星载光学望远镜,受其体积、重量和功耗方面的限制,难以持续通过增大望远镜口径来提高其空间分辨能力。

发展光学综合孔径望远镜技术,通过增大望远镜的等效口径成为提高望远镜空间分辨能力的有效途径^[5-9]。光学综合孔径望远镜的空间分辨能力与基线长度有关,因为增加基线长度比增加望远镜口径更容易实现,综合孔径望远镜可望获得更高的空间分辨能力。但由于基线配置的限制,综合孔径望远镜实现观测目标空间频谱的获取需要很长时间,因此,长期以来其应用局限于天文观测领域,VLTI(Very Large Telescope Interferometer)^[10-11]和 IOTA(Infrared Optical Telescope Array)^[12]都是天文综合孔径望远镜的典型例子。2014 年,美国洛克希德·马丁公司和加州大学戴维斯分校提出了“SPIDER (Segmented Planar Imaging Detector for Electro-optical Reconnaissance)”^[13]的概念,这种望远镜利用大规模集成光学干涉仪组成微缩干涉阵列,大幅度增加了基线配置,可望解决天文综合孔径望远镜无法实时成像的不足,对观测目标实现准实时成像(据报道,SPIDER 的成像时间在 100 ms 的数量级)。同时,在实现相同的分辨能力的条件下,SPIDER 的尺寸和重量可以缩减为传统望远镜的 1/10~1/100。由于 SPIDER 概念的提出为综合孔径望远镜的应用向遥感和军事侦察等领域的扩展提供了可能性,这项技术近年来受到国外研究者的极大关注,中国工程物理研究院与清华大学^[14]、中国科学院西安光学精密机械研究所^[15]、北京空间机电研究所^[16]以及中国科学院长春光学精密机械研究所等研究机构也开展了相关的研究工作。

光干涉仪是综合孔径望远镜的核心器件,集成

光学干涉仪的研究对综合孔径望远镜技术的发展具有关键意义。与传统的分立光学元件(反射镜、透镜等)制作光干涉仪相比,集成光学干涉仪在体积和稳定性方面具有明显的优势,已经在天文综合孔径望远镜中取得应用,而且对于需要大规模基线配置的综合望远镜(譬如 SPIDER 系统),需要大量光干涉仪,集成光学干涉仪的优势更加明显。

面向综合孔径望远镜用集成光学干涉仪的应用,文中设计并制作了集成光学移相干涉仪芯片,并对这种干涉仪芯片的主要性能进行了表征。文中报道了对集成光学移相干涉芯片研究的结果。

1 器件设计与制作

文中所研究的移相干涉仪芯片结构如图 1 所示。干涉仪芯片上包括两条输入波导、两个 Y 分支、一个 90°移相器、两个方向耦合器和四条输出波导。对这一器件,除插入损耗及其均匀性之外,移相值的准确性、方向耦合器的耦合系数的准确性和一致性,都是器件的关键性能指标。

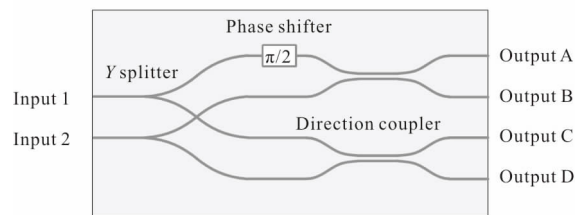


图 1 集成光学移相干涉仪结构示意图

Fig.1 Structure of integrated optical phase-shift interferometer

波导材料为二氧化硅,器件的中心工作波长 λ_0 选择 1 550 nm;波导芯层与包层之间的相对折射率差为 0.45%,条形光波导的横截面尺寸为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$,保证波导工作于单模状态。为了尽可能减小波导的弯曲损耗对器件插入损耗的影响,芯片上所有的弯曲波导的曲率半径均取 20 mm。

干涉仪芯片中的 90°移相器采用局部增大波导长度的方法实现,其中波导长度差为:

$$\Delta L = \frac{\lambda_0}{4N_{\text{eff}}}$$

式中: N_{eff} 为波导的有效折射率。

移相误差的精确度直接关系到移相干涉仪的性能,为了测试移相器设计及制作工艺引入的移相误

差,在移相干涉仪同一块掩膜板上设计制作了 MZ (Mach-Zehnder) 干涉仪,MZ 干涉仪的两条干涉臂之间引入了相移设计值为 $164^{\circ}\sim 197^{\circ}$ 的一系列相移值。这些移相器的设计采用前述 90° 移相器方案。通过测试这些 MZ 干涉仪的插入损耗,估算相移的设计值与实际值之间的偏差。

3 dB 方向耦合器是干涉芯片中的另一个关键结构,其中方向耦合器的实验优化是关键。3 dB 方向耦合器的耦合长度通过 BPM (Beam Propagation Method) 计算获得。计算得知,当耦合器两波导之间的距离为 $3.66\text{ }\mu\text{m}$ 时,耦合的最佳长度 L 约为 $395\text{ }\mu\text{m}$ 。由于波导制作过程中误差不可避免,考虑到制作误差对波导耦合长度的影响,在版图上设计了耦合长度为 $0.5\sim 2.0 L$ 的一系列的的方向耦合器。

在集成光学移相干涉仪中,有一处波导交叉。波导交叉可能会在波导中引入损耗,并且在与之交叉的另一波导中产生串扰。增加波导之间的交叉角度可以减小损耗和串扰效应,但同时会增大器件的尺寸。为优化器件性能,采用 Rsoft 软件模拟计算了波导交叉角度与插入损耗和相邻波导串扰之间的关系,如图 2 所示。可以看出:在交叉角度大于 15° 时,交叉引入的损耗在 0.3 dB 以下,在与之相交的另一波导中产生的串扰优于 -30 dB 。在移相干涉仪芯片上,波导交叉的角度选择 20° 。

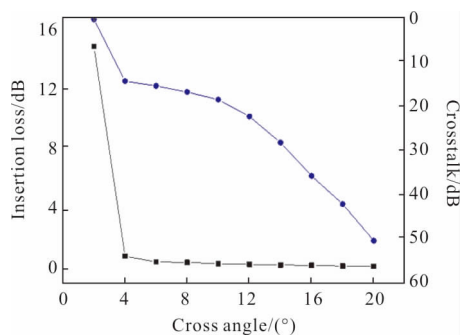


图 2 交叉波导插入损耗和串扰的模拟结果

Fig.2 Simulation results of cross waveguide insertion loss and crosstalk

光波导芯片采用基于等离子增强化学气相沉积(PECVD)技术制作。制作完毕的圆片经过划片、端面研磨抛光之后,得到集成光学移相干涉仪芯片(见图 3),采用标准的光学器件测试系统对移相干涉仪芯片的插入损耗进行测试。



图 3 集成光学移相干涉仪芯片

Fig.3 Integrated optical phase-shift interferometer chip

2 结果与讨论

针对具有不同长度方向耦合器的一系列干涉仪进行了插入损耗的测试,图 4 给出了分别对干涉仪中两个方向耦合器输出光功率归一化的结果。从图中可以看出:一、移相干涉仪中两个方向耦合器的耦合效率一致,这是集成光波导器件制作技术的特点和优势;二、当方向耦合器的耦合长度为 $474\text{ }\mu\text{m}(1.2L)$ 时,实现输出光在两条波导之间的均分(3 dB 耦合)。

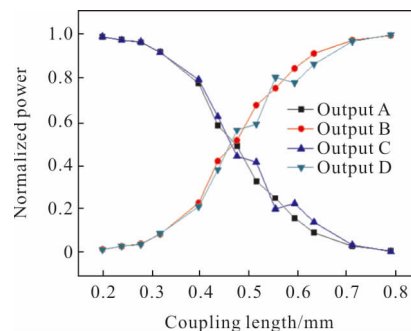


图 4 移相干涉仪中两个方向耦合器的归一化输出功率

Fig.4 Normalized output power of two direction coupler in phase-shift interferometer

表 1 列出了方向耦合器实现 3 dB 耦合的器件的插入损耗测试结果。从表中可以看出,器件的插入损耗小于 1.8 dB ,均匀性优于 0.1 dB 。

表 1 移相干涉仪插入损耗的测试结果(单位:分贝)

Tab.1 Insertion loss test of phase-shift interferometer (Unit: dB)

Input	Output A	Output B	Output C	Output D
Input 1	-7.61	-7.62	-7.65	-7.70
Input 2	-7.77	-7.79	-7.81	-7.82

对包含一系列移相器的 MZ 干涉仪的插入损耗的测试结果如图 5 所示。可以看出, MZ 干涉仪中移相器设计值为 177° 时具有最大的插入损耗。换句话说, 此时移相器的相移值接近 180° 。由此可以推断, 按照同一原理设计的 90° 移相器的相移值偏差大约为 1.5° 。相移设计值与理论值的偏差与波导折射率等设计参数以及波导制作工艺有关。这一测试结果为进一步提高移相器的相移准确性, 优化器件性能提供了参考。

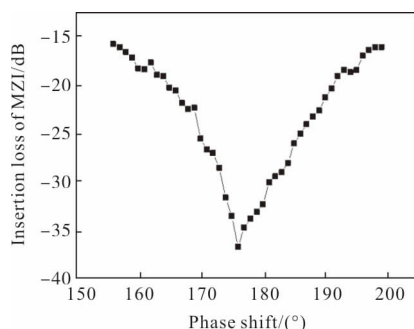


图 5 MZ 干涉仪插入损耗的测试结果

Fig.5 Insertion loss of MZ interferometer

二氧化硅材料在可见光和近红外波段具有很高的光透过率, 涵盖了天文观测的 H 波段 (波长 $1.4\sim 1.8\ \mu\text{m}$) 和 K 波段 (波长 $2.0\sim 2.4\ \mu\text{m}$)。经过数十年的研究与发展, 二氧化硅基光波导器件已经实现了产业化制作。因此, 二氧化硅基光波导用于工作在可见光和近红外波段的综合孔径望远镜移相干涉仪的制作具有广阔的前景。文中的研究工作是二氧化硅基移相干涉仪芯片的初步尝试, 从测试结果可以看出平面光波导技术用于干涉仪制作技术的潜力。而且, 通过进一步优化器件结构和制作工艺, 干涉仪的性能可以进一步提高, 可望有效推进综合孔径望远镜研制。

值得指出的是, 由于所设计的移相干涉仪器件的光波导芯部和包层相对折射率差值较小, 目前所获得的干涉芯片器件尺寸长度大约为 $30\ \text{mm}$ 。通过进一步提高光波导芯部与包层之间的相对折射率差, 可以显著减小移相干涉仪的整体尺寸。

3 结 论

面向综合孔径望远镜的应用, 设计并制作了二氧化硅基集成光学移相干涉仪。对器件的性能进行

了表征。结果表明: 二氧化硅基集成光波导制作技术能够保证器件中的两个方向耦合器性能匹配; 在方向耦合器实现 $3\ \text{dB}$ 耦合时, 干涉仪的附加损耗优于 $1.8\ \text{dB}$, 均匀性优于 $0.1\ \text{dB}$ 。经估算, 干涉仪芯片中的 90° 移相器的误差大约为 1.5° 。

参考文献:

- [1] Li Jianfeng, Wu Xiaoxia, Shao Liang. Study on active support for large SiC primary mirror and force actuator design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (7): 0718003. (in Chinese)
- [2] Chen Hongda, Chen Yonghe, Shi Tingting, et al. Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 535-540. (in Chinese)
- [3] Li Hongzhuang, Zhang Jingxu, Zhang Zhenduo, et al. Correction experiment of 620 mm thin mirror active optics telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 166-172. (in Chinese)
- [4] Cunningham C. Future optical technologies for telescopes [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(5): 239.
- [5] Zhang Xuejun, Fan Yanchao, Bao He, et al. Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(11): 2613-2626. (in Chinese)
- [6] Gao Lili, Liu Zhong, Jin Zhenyu. High resolution reconstruction of images from an interferometry telescope [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2009, 6(4): 327-33. (in Chinese)
- [7] Wang Mengbi, Zhang Gaofer, You Zheng, et al. Optical properties of space-based synthetic aperture systems [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2014, 54(10): 276-1281. (in Chinese)
- [8] Li Chun, Mu Zonggao, Zhou Chenghao, et al. Research on optical synthetic aperture sensing system based on microsatellites [J]. *Space Electronic Technology*, 2016, 2: 26-30. (in Chinese)
- [9] Joss Bland-Hawthorn, Pierre Kern. Astrophotonics: a new era for astronomical instruments [J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1880-1884.
- [10] Bartko H, Perrin G, Brandner W, et al. GRAVITY: Astrometry on the galactic center and beyond [J]. *New Astronomy Reviews*, 2009, 53(11): 301-306.
- [11] Benisty M, Berger J P, Jocou L, et al. An integrated

- optics beam combiner for the second generation VLTI instruments [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, 498 (2): 601–613.
- [12] Monnier J D, Traub W A, Schloerb F P, et al. First results with the IOTA3 imaging interferometer: the spectroscopic binaries virgins and WR 140 [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2004, 602(1): L57.
- [13] Su T, Scott R P, Ogden C, et al. Experimental demonstration of interferometric imaging using photonic integrated circuits [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12653–12665.
- [14] Chu Q, Shen Y, Yuan M, et al. Numerical simulation and optimal design of segmented planar imaging detector for electro–optical reconnaissance [J]. *Optics Communications*, 2017, 405: 288–296.
- [15] Liu G, Wen D, Song Z. Rearranging the lenslet array of the compact passive interference imaging system with high resolution[C]//AOPC 2017: Space Optics and Earth Imaging and Space Navigation. International Society for Optics and Photonics, 2017, 10463: 1046310.
- [16] Zhu Z, Qiu M. Phase retrieval for interferometry imaging from microlens array [C]//Young Scientists Forum 2017. International Society for Optics and Photonics, 2018, 10710: 1071028.