

引用本文: 吴杉, 杨世泰, 陈意坚, 等. 模块式四芯光纤信道分束器及其性能测试方法[J]. 光通信技术, 2024, 48(2): 68–71.

模块式四芯光纤信道分束器及其性能测试方法

吴杉¹, 杨世泰^{2,3}, 陈意坚², 段劭琛², 徐陈睿², 苑立波^{2*}

(1. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541010; 2. 桂林电子科技大学 光学工程学院, 广西 桂林 541010;

3. 桂林电子科技大学 机械工程博士后流动站, 广西 桂林 541010)

摘要: 针对传统多芯光纤分束器与多芯光纤连接方式的不足, 如拆卸困难和测试方案需额外引入测试分束器等问题, 采用双包层光纤束拉锥法制备了四芯光纤信道分束器。为了方便器件的测试和连接, 在单模光纤和四芯光纤的尾端分别制备了 LC/PC 型的活动连接器, 从而形成了单个模块式的四芯光纤信道分束器; 同时, 提出了一种针对该模块式器件的镜像反射式测试方法。这种测试方法仅需要一个 LC/PC 活动连接器式反射器, 就可以轻松完成器件的插入损耗和芯间串扰的测试。测试结果表明, 所制备的四芯光纤信道分束器性能优异, 其最大插入损耗和最大芯间串扰分别为 0.84 dB 和 -46.32 dB。

关键词: 多芯光纤; 信道分束器; 光纤活动连接器; 插入损耗; 芯间串扰

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)02-0068-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.02.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Modular four-core optical fiber channel beam splitter and its performance test method

WU Shan¹, YANG Shitai^{2,3}, CHEN Yijian², DUAN Shaochen², XU Chenrui², YUAN Libo^{2*}

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541010, China;

2. School of Optical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541010, China; 3. Postdoctoral Research Center of Mechanical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541010, China)

Abstract: Addressing the shortcomings of traditional multi-core fiber beam splitters and multi-core fiber connections, such as difficulties in disassembly and the need for additional test beam splitters in testing solutions, a four-core fiber channel beam splitter is prepared using a double-clad fiber bundle tapering method. To facilitate device testing and connection, LC/PC-type active connectors are prepared at the ends of the single-mode fiber and the four-core fiber, thus forming a single modular four-core fiber channel beam splitter. Meanwhile, a mirror-based testing method is proposed for this modular device. This testing method requires only one LC/PC active connector-type mirror to easily complete the testing of the device's insertion loss and inter-core crosstalk. The test results indicate that the prepared four-core fiber channel beam splitter exhibits excellent performance, with a maximum insertion loss of 0.84 dB and a maximum inter-core crosstalk of -46.32 dB.

Key words: multi-core fiber, channel beam splitter, optical fiber activity connector, insertion loss, inter-core crosstalk

收稿日期: 2024-01-28。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2203903)资助; 国家自然科学基金项目(61827819)资助; 广西博士后创新人才计划资助; 国家资助博士后研究人员计划(GZC20230632)资助。

作者简介: 吴杉(1998—), 男, 硕士研究生, 本科毕业于北京工业大学机电学院仪器科学与技术专业, 主要研究方向为多芯光纤器件制作、光纤设备和测试设备的制作和测试。

*** 通信作者:** 苑立波(1962—), 男, 博士, 桂林电子科技大学教授, 主要研究方向为特种光纤及器件的设计、制作与应用。



0 引言

多芯光纤分束器涵盖多种类型, 包括基于微透镜^[1]和自聚焦透镜的空间光路型器件^[2-3]、利用飞秒激光加工的波导直写技术制备的器件^[4-5]、以及通过腐蚀光纤束^[6-8]或细径光纤束^[9,10]组合而成的器件。此外, 还有一种基于光纤束拉锥型的波导变换型器件^[11-12]。然而, 现有的文献大多仅关注多芯光纤信道分束器单个器件的制备技术, 对多芯光纤活动连接器技术^[13]的研究相对匮乏。

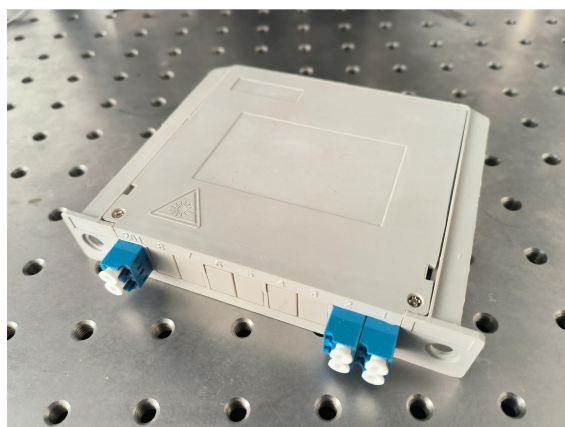
在性能测试方面, 目前的方法通常是将一对器件

的多芯光纤尾纤熔接^[4]在一起,然后逐个测试每个信道的特性,从而评估器件的插入损耗和芯间串扰指标。但这种方法只能评价一对器件组合的性能,无法单独评估单个器件的性能,因此不适用于带有多芯光纤活动连接器的模块式器件。

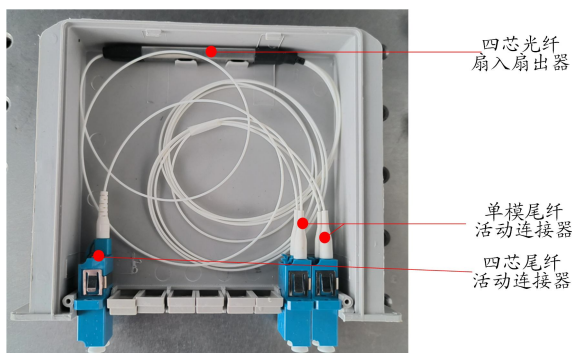
针对这一问题,本文采用双包层光纤(TCF)束拉锥技术制备四芯光纤信道分束器,并以此为基础,提出一种镜像反射式的测试方案,实现对单个模块式器件的有效测试。

1 模块式四芯光纤信道分束器

本文制备的模块式四芯光纤信道分束器如图 1 所示,其被封装于标准插片式封装盒内,且两端尾纤分别安装了 LC 型活动连接器,以便于连接和集成。此外,还将整个器件封装在模块盒内,以确保其与传统机房内的机柜设备兼容。



(a) 信道分束器模块实物图



(b) 内部结构

图 1 模块式四芯光纤信道分束器

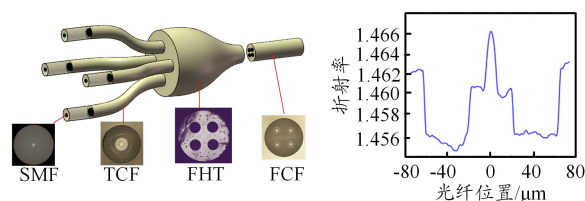
1.1 信道分束器结构

四芯光纤信道分束器如图 2(a)所示,该分束器基于光纤锥体模场绝热转换原理,由 4 根特殊设计的 TCF 构成。TCF 的折射率剖面如图 2(b)所示,其纤芯和内包层的数值孔径与标准单模光纤(SMF)相匹配。

制备过程中,首先将这 4 根光纤插入四孔石英毛细管(FHT)内,然后在高温条件下进行熔融拉锥,形成锥体并在锥腰处进行切割,以获得与四芯光纤(FCF)相匹配的输出端面。接着,将这些处理过的光纤与四芯光纤对芯熔接,从而完成分束器的制作。

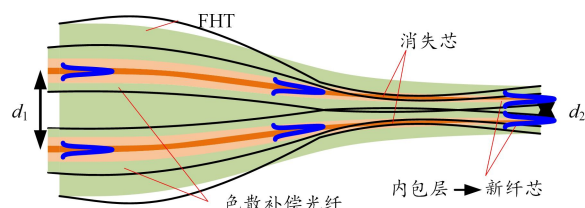
TCF 束锥体在 xoz 切面的轴剖图如图 2(c)所示。当 TCF 经过熔融拉锥处理时,其纤芯逐渐变小,无法支持传输模。此时,光波能量逐渐转移到内包层内,导致光波导发生转换,形成了以内包层为新纤芯的单模波导结构。通过调节拉锥比例,可以精确地控制波导模场直径的大小,实现其减小、放大或保持不变。当四孔石英毛细管的孔间距、TCF 参数和拉锥比例经过优化设计后,可以获得与四芯光纤相匹配的纤芯分布和模场分布,从而实现了双包层光纤排列间距 d_1 与四芯光纤芯间距 d_2 之间的相互转换。

图 2(d)和图 2(e)分别是 TCF 锥体和锥体输出端面的显微图片。



(a) 器件结构图

(b) TCF 折射率剖面



(c) TCF 束锥体在 xoz 切面的轴剖图



(d) 锥体显微图片

(e) 锥体输出端面显微图片

图 2 四芯光纤信道分束器

1.2 活动连接器结构

在完成四芯光纤信道分束器的制备后,为了提升其使用的便捷性,需要在器件的单模尾纤和四芯尾纤端分别安装低损耗的活动连接器,以便于与其它器件的连接。本文设计的活动连接器实物及其端面图如图 3 所示。

本文在 LC 单模光纤活动连接器的基础上,对陶瓷插针的结构设计和装配方式进行了改进。活动连接

吴杉,杨世泰,陈意坚,等: 模块式四芯光纤信道分束器及其性能测试方法

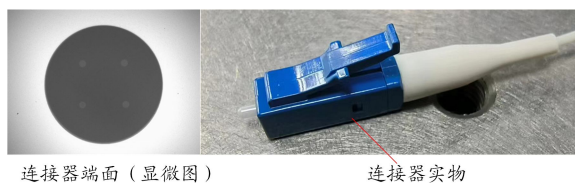


图3 活动连接器实物和端面图

器的内部结构如图4所示。具体来说,活动连接器内陶瓷插针的金属尾柄部分被巧妙地分为2个紧密配合的部分,通过旋转整个陶瓷插针,可以实现四芯光纤的精确对芯。在制备过程中,首先按照单模光纤活动连接器的制备方法,将四芯光纤在陶瓷插针中用胶固化并研磨。然后,通过旋转尾柄的LC法兰盘2,联动尾柄的LC法兰盘1实现调芯。一旦纤芯的角向定位角确定,则在尾柄将LC法兰盘2与FCF的涂覆层粘合固定,这种方式确保了LC法兰盘1在使用过程中不会发生角向移动。同时,二者连接处留出的线性调整区域为弹簧的伸缩提供了空间,从而在连接区连接时产生适当的接触压力。这种新结构不仅简化了制备工艺,降低了操作难度,而且更有利于器件的实际生产。测试结果表明,采用这种结构的LC活动连接器的平均插入损耗可降低至0.09 dB。

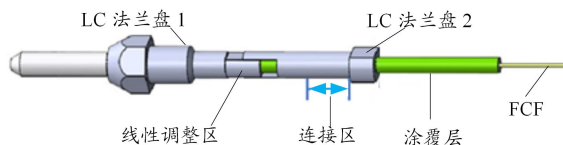


图4 活动连接器内部结构图

四芯光纤活动连接器的关键在于纤芯分布方向与活动连接器上的Key键的对齐情况。若存在偏差,则光纤角向定位误差 θ 会产生横向偏移量 Δx 和纤芯连接损耗 $L^{[20]}$,其表达式如式(1)、式(2)所示。

$$\Delta x = 2R \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

$$L = -10 \lg \left[\left(\frac{2\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \right)^2 \exp \left(-\frac{2\Delta x^2}{\omega_1 + \omega_2} \right) \right] \quad (2)$$

其中, R 为纤芯到光纤中心的距离, ω_1 和 ω_2 分别为多芯光纤2个对接纤芯的模场半径。

四芯光纤活动连接器的对芯连接损耗随光纤角向定位误差 θ 的变化关系如图5所示。可以看出,当角向定位误差 $\theta < 2^\circ$ 时,连接器的连接损耗小于0.272 dB;当角向定位误差 $\theta < 1^\circ$ 时,连接器的连接损耗小于0.068 dB。

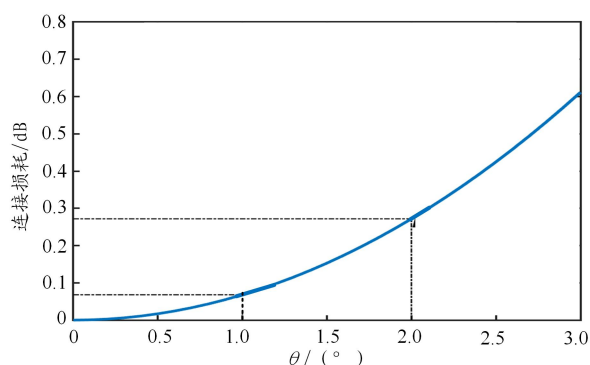


图5 连接损耗随光纤角向定位误差 θ 的变化曲线

2 测试方法和原理

2.1 插入损耗测试

本文采用镜像反射式测试方法对单个四芯光纤信道分束器进行测试,测试系统图如图6所示。首先,将环形器的端口1与测试光源的输出连接,端口2与四芯光纤信道分束器的第一输入信道 C_1 相接,端口3则与光功率计1连接。然后,功率为 P_m 的信号光经过四芯光纤信道分束器输入四芯光纤的纤芯1,传输至其端面处。端面连接的垂直反射器能将反射信号沿原路反射,经过光功率计1,测得输出功率为 $P_{1,1}$ 。按照相同的方法,可以测得输出功率 $P_{1,2}$ 、 $P_{1,3}$ 、 $P_{1,4}$ 。根据输入功率 P_m 、输出功率 $P_{1,i}$ ($i=1,2,3,4$),可测得每个纤芯信道的插入损耗为

$$L_i = \frac{1}{2} (P_m - P_{1,i} - L_r) \quad (3)$$

其中, L_r 为端面垂直反射器和环形器带来的损耗之和,通过将环形器的3个端口与垂直反射器直接相接进行测试后得出。

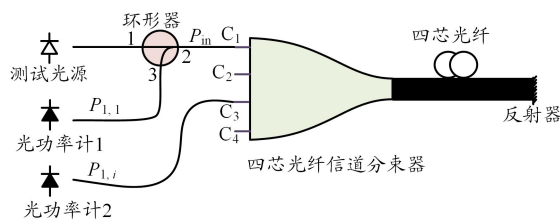


图6 镜像反射式单个多芯光纤信道分束器测试系统图

2.2 串扰测试

首先,将四芯光纤信道分束器的 C_2 、 C_3 、 C_4 信道尾纤依次接入光功率计2,测得光功率记为 $P_{2,2}$ 、 $P_{2,3}$ 、 $P_{2,4}$ 。然而,这些测得的值并不能直接被视为 C_1 到其它信道的串扰值。以 C_1 、 C_2 这2个相邻纤芯信道为例,当输入纤芯1内的功率为 P_m 时, C_2 输出的功率(光功率计2

测得的功率)为 P_{12} 。根据串扰测试原理图(如图 7 所示)可知, $P_{12}=P_3+P_4=2P_{in}\alpha_c\alpha_r$ 。其中, P_1 为 C_1 输入光反射前给 C_2 的串扰, P_2 为 P_{in} 反射回的功率, P_3 为 P_1 串扰反射回的功率, P_4 为 P_2 串扰至 C_2 的功率。因此, C_1 到 C_2 的串扰 X_{12} 为

$$X_{12}=10\lg\alpha_c=P_{12}-P_{in}-10\lg(2\alpha_r) \quad (4)$$

其中, α_c 串扰系数, α_r 为垂直反射器的反射系数。

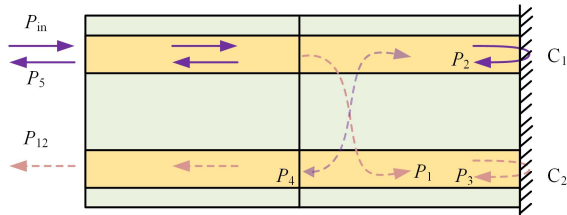


图 7 串扰测试原理

2.3 测试结果

本文按照镜像反射式测试方法,将 LC/PC 活动连接器式反射器插入四芯光纤接口,对模块式四芯光纤信道分束器进行测试和计算,得到器件的芯间串扰如表 1 所示,该器件的最大芯间串扰则达到了 -46.32 dB;而测得 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 的插入损耗分别为 0.58 、 0.67 、 0.84 、 0.43 dB。

表 1 模块式四芯光纤信道分束器芯间串扰测试结果

纤芯序号	芯间串扰/dB			
	C_1	C_2	C_3	C_4
1	—	-48.32	-47.58	-49.34
2	-47.45	—	-49.36	-48.27
3	-46.32	-47.48	—	-46.77
4	-48.58	-49.29	-48.99	—

3 结束语

本文采用双包层光纤束拉锥法制备了四芯光纤信道分束器,并在单模光纤和四芯光纤的尾端分别制备了 LC/PC 型的活动连接器。整个器件被封装在标准的模块盒内,形成了模块式的四芯光纤信道分束器。这款多芯光纤信道分束器设计为插片式模块,与数据中心的传统设备完美兼容,可直接安装于数据中心的机柜内,既方便又实用。此外,本文还提出了一种用于模块式器件的镜像反射式测试方法,该方法仅需一个 LC/PC 型活动连接器式反射器即可完成器件插入损耗和串扰的测试。与传统测试方法相比,该测试方法简化了测试流程,并能更直观地反映单个模块式四芯光纤信道分束器的性能。

参考文献:

- [1] SHIMAKAWA O, ARAO H, HARUMOTO M, et al. Compact multi-core fiber fan-out with grin-lens and micro-lens array[C]//OSA. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. San Francisco: OSA, 2014: M3K.1.1–M3K.1.3.
- [2] TOTTORI Y, TSUBOYA H, KOBAYASHI T, et al. Improved return loss of fan-in/fan-out device for circular core array multi-core fiber using free space optics [C]//IEEE. Proceedings of 2014 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series. Montreal: IEEE, 2014: 166–167.
- [3] CHEN G, DENG H, YUAN L, et al. Optimization of GRIN lenses coupling system for twin-core fiber interconnection with single core fibers [J]. Optics Communications. 2018, 41(8): 10–15.
- [4] THOMSON R R, HARRIS R J, BIRKS T A, et al. Ultrafast laser inscription of a 121-waveguide fan-out for astrophotonics [J]. Optics Letter, 2012, 37: 2331–2333.
- [5] GROSS S, ROSS-ADAMS A, RIESEN N, et al. Ultrafast Laser-Written Sub-Components for Space Division Multiplexing[C]//OSA. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020. San Diego: OSA, 2020: W1A.1.1–W1A.1.3.
- [6] SHIMAKAWA O, ARAO H, SHIOZAKI M, et al. Connector type fan-out device for multi-core fiber [J]. SEI Technical Review, 2013 (77): 23–28.
- [7] CUI J, ZHU S, FENG K, et al. Fan-out device for multicore fiber coupling application based on capillary bridge self-assembly fabrication method [J]. Optical Fiber Technology, 2015, 26: 234–242.
- [8] YOSHIDA M, HIROOKA T, NAKAZAWA M. Fused type fan-out device for multi-core fiber based on bundled structure[C]//OSA. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. Anaheim: OSA, 2016: Tu3L.2.1–Tu3L.2.3.
- [9] SHIKAMA K, ABE Y, ONO H, et al. Low-loss and low-mode-dependent-loss fan-in/fan-out device for 6-mode 19-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 302–308.
- [10] ABE Y, SHIKAMA K, ONO H, et al. Fan-in/fan-out device employing v-groove substrate for multicore fibre [J]. Electronics Letters, 2015, 51(17): 1347–1348.
- [11] KANG Y, GUO X, GAN L, et al. Broadband low-loss fan-in/fan-out devices for multicore fibers [C]//IEEE. Proceedings of 2019 Asia Communications and Photonics Conference(ACP). Chengdu: IEEE, 2019: 1–3.
- [12] KOPP VI, PARK J, WLODAWSKI M, et al. Chiral fibers: micro-formed optical waveguides for polarization control, sensing, coupling, amplification, and switching[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(4): 605–613.
- [13] SHIMAKAWA O, SHIOZAKI M, SANO T, et al. Pluggable fan-out realizing physical-contact and low coupling loss for multi-core fiber [C]//OSA. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013. Anaheim: OSA, 2013: OM3I.2.1–OM3I.2.3.
- [14] AMMA Y, TAKENAGA K, MATSUO S, et al. Fusion splice techniques for multicore fibers[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 35(2): 72–79.