

文章编号 1004-924X(2023)10-1454-10

多芯光纤活动连接器光学性能评价

段劭琛, 杨世泰, 陈意坚, 董保明, 苑立波*

(桂林电子科技大学 光电工程学院光子学研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了实现对多芯光纤在光网络系统中的接续并评价连接效果, 给出了一种多芯光纤活动连接器的制备方法, 用光学连续波反射计和光学低相干反射计分别构建了多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗测量系统。详细地分析了外在因素和端面质量对多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗的影响, 提出了多芯光纤活动连接器制备和对接时需要满足的三项质量控制条件: 精准对芯、物理接触和不相对转动。所制备的多芯光纤活动连接器具有标准的 LC 型接口, 采用三维轮廓仪对多芯光纤活动连接器端面的三维参数(顶点偏移、曲率半径和光纤凹凸度)以及粗糙度进行了表征。用构建的测量系统测得制备的四芯光纤活动连接器中所有纤芯通道实现了平均 0.089 dB 的低插入损耗和 52.31 dB 的高回波损耗。为多芯光纤活动连接器走向实际应用提供了制备方法和性能评价方案。

关键词: 多芯光纤; 光纤活动连接器; 插入损耗; 回波损耗

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233110.1454

Optical performance evaluation of multi-core fiber connectors

DUAN Shaochen, YANG Shitai, CHEN Yijian, DONG Baoming, YUAN Libo*

(*Photonics Research Center, School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China*)

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

Abstract: In this study, a technique for the synthesis of multi-core optical fiber connectors used in optical network systems is developed. In addition, systems that can measure the insertion and return losses of multi-core optical fiber movable connectors are constructed using an optical continuous wave reflectometer and optical low-coherence reflectometer, respectively, to evaluate the connection effect. Three quality control requirements-accurate core alignment, physical contact, and non-relative rotation-that must be satisfied during the preparation and docking of multi-core optical fiber connectors are proposed after a detailed analysis of the effects of external factors and end-face quality on the insertion and return losses of multi-core optical fiber connectors. A multi-core optical fiber connection with a typical LC-type interface is prepared. A three-dimensional (3D) profiler is used to record the 3D characteristics (vertex offset, curvature radius, optical fiber concavity, and convexity) of the multi-core optical fiber connector, as well as the roughness of its end face. Using the constructed measurement systems, an average low insertion loss of 0.089 dB and average high return loss of 52.31 dB are achieved for all fiber core channels in the prepared

收稿日期: 2022-11-30; **修订日期:** 2022-12-30.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2019YFB2203903); 国家自然科学基金资助项目(No. 61827819); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(No. 2022YCXS165)

four-core fiber connector. Thus, the proposed synthesis method and performance evaluation scheme may facilitate the practical applications of multi-core fiber-optic movable connectors.

Key words: multi-core fiber; optical fiber connector; insertion loss; return loss

1 引 言

光通信容量的需求在不断增长,然而目前传统单模光纤受限于非线性效应,其传输容量已达到 102.3 Tb/s^[1],短时间内难以提高。利用空分复用技术的多芯光纤(Multi-Core Fiber, MCF)是将来实现超宽带光传输的最有竞争力的候选者之一^[2-4]。多芯光纤活动连接器可以实现多芯光纤稳定的接续,是多芯光纤光网络系统中的必要器件^[5]。TAKASHI MATSUI在文献[6]中将多芯光纤活动连接器分为单芯式和MPO(Multi-fiber Push On)式两种,其中MPO式多芯光纤活动连接器^[7-9]装配复杂、端面清洁困难并且需要很大的端接力。而单芯式多芯光纤活动连接器^[10-14]需要附加/改变部件或提高部件精度。但目前所报道的非透镜式多芯光纤活动连接器都需要高精度的设备夹持多芯光纤,在陶瓷插针中实现旋转,且旋转后陶瓷插针与光纤相对位置在后续制备过程中需要保持不变,增加了制备的难度,不利于器件的批量生产。

本文在对影响多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗的因素分析之后,提出了保障多芯光纤活动连接器的性能指标的三项质量控制条件。由此给出了一种满足性能要求的多芯光纤活动连接器的制备方法。该方法可适用于各种类型的多芯光纤连接器的制备,如LC,FC,SC等。制备时可先固化研磨再旋转对芯,降低了操作的难度,简化了制备流程。以四芯光纤为例,利用所提出的制备方法,制备了LC型的多芯光纤活动连接器。用光学连续波反射计(Optical Continuous-Wave Reflectometer, OCWR)和光学低相干反射计(Optical Low-Coherence Reflectometer, OLCR)构建了多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗测量系统。用测量系统测得连接器中纤芯通道的平均插入损耗为 0.089 dB,其中插入损耗 ≤ 0.2 dB的纤芯通道占 92%以上,最大插入损耗 < 0.34 dB,所有纤

芯通道回波损耗的平均值为 52.31 dB。这也符合标准 GD/J 097-2020 对单模光纤活动连接器的要求^[15]。

2 影响多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗因素的分析

影响多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗的因素可分为三组:内在因素、外在因素和端面质量。其中内在因素是指与连接的多芯光纤性质相关的因素,如纤芯直径失配、折射率分布失配、纤芯的椭圆度和纤芯位置分布不同,而目前多芯光纤活动连接器一般用于连接同种光纤,所以内在因素对连接器插入损耗和回波损耗的影响可以忽略。外在因素是指与对接不良相关的因素,如多芯光纤未能精准对芯、陶瓷插针内径偏大以及陶瓷插针同心度差会导致在对接时出现横向偏移;多芯光纤活动连接器三维参数超出允许范围、端接力过小会导致纵向偏移;陶瓷插针内径不一、外径误差以及光纤端面的弧度等会导致端面倾斜。端面质量是指与光纤研磨相关的因素,包括多芯光纤端面粗糙、顶点偏移过大、陶瓷插针曲率半径过大或过小以及光纤凹陷或突出过多,而目前研磨后多芯光纤表面的粗糙度对透射光和反射光引入的光程差较小,不会使相位差大于 $\pi/2$,所以粗糙度一般对多芯光纤活动连接器的插入损耗和回波损耗影响较小。因为多芯光纤中纤芯分布的位置不同,所以外在因素和端面质量对不同纤芯插入损耗和回波损耗的影响也不相同。明确了插入损耗和回波损耗的影响机理对于多芯光纤活动连接器的制备有重要的指导意义。

2.1 多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗的理论分析

光纤活动连接器光学性能主要是指插入损耗和回波损耗,其中插入损耗 I_L 和回波损耗 R_L

可表达为:

$$I_i = -10 \lg\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) = -10 \lg(\xi \cdot T),$$

$$R_L = -10 \lg\left(\frac{P_r}{P_{in}}\right) = -10 \lg(\xi' \cdot R_f), \quad (1)$$

式中: P_{in} 为发射光纤发射光的功率; P_{out} 为接收光纤接收光的功率; P_r 为发射光纤收到反射光的功

$$\xi = \frac{\left(\frac{2}{\omega_1 \omega_2}\right)^2}{\left(\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega_1^2 \omega_2^2}\right) + \left(\frac{n_0 k_0}{2R}\right)^2} \cdot \exp\left[-\frac{(c' + id')^2}{a' + ib'} - \frac{(c' - id')^2}{a' - ib'}\right],$$

$$a' = -\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega_1^2 \omega_2^2}, \quad b' = -\frac{n_0 k_0}{2R}, \quad c' = \frac{t}{\omega_2^2}, \quad d' = \frac{n_0 k_0 t}{2R} - \frac{n_0 k_0 \alpha}{2}, \quad (2)$$

式中: ω_1 和 ω_2 分别表示高斯光束在发射光纤和接收光纤端面处的束腰半径; R 表示高斯光束传输到接收光纤端面处束腰的曲率半径; n_0 为空气的折射率; k_0 为传输光在空气中的波矢。根据菲涅尔反射和多光束干涉可以得到经过纤芯-空气-纤芯三层介质的光反射比 R_f 和透射比 T :

$$R_f = \left| \frac{r_{01} + r_{12} \exp(i\delta)}{1 + r_{01} r_{12} \exp(i\delta)} \right|^2, \quad T = 1 - R_f$$

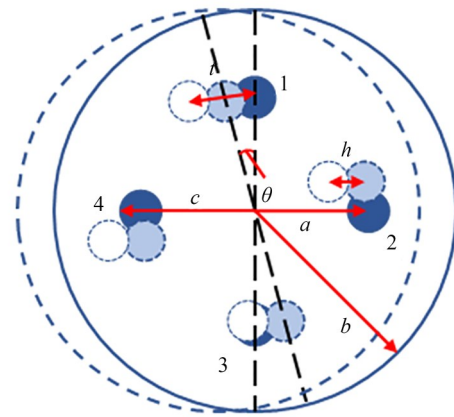
$$r_{01} = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}, \quad r_{12} = \frac{n_0 - n_1}{n_1 + n_0}, \quad \delta = 2k_0 z$$

2.2 外在因素对多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗的影响

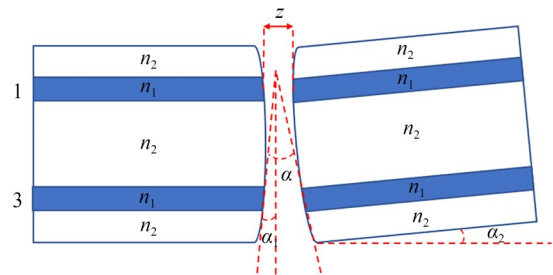
本节以四芯光纤为例, 在传输光波长为 1 550 nm 的情况下, 对影响连接器插入损耗和回波损耗的外在因素和三维参数进行分析。外在因素对四芯光纤对接时影响如图 1 所示, 四芯光纤纤芯 1, 2, 3, 4 位于非中心部分, θ 表示多芯光纤活动连接器制备时产生的夹角; h 表示由于陶瓷插针内径和同轴度而产生的偏移量; t 为横向偏移量; z 为纵向偏移量; α_1 为光纤端面的弧度; α_2 为陶瓷插针导致的角度; α 端面倾斜的角度; a 为光纤中心到边芯模场中央的距离; b 为包层半径; c 为光纤中心到边芯模场边缘的距离; n_1 为多芯光纤纤芯折射率; n_2 为多芯光纤包层的折射率。所用光纤的具体参数见表 1, 表中 E 为光纤的杨氏模量; ν 为光纤的泊松比^[17]。

横向偏移对多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗的影响如图 1(a) 所示(彩图见期刊电子版), 蓝色纤芯为初始状态, 浅蓝色纤芯是蓝色

率; ξ 为传输光发散作用而在连接时产生的能量损耗; ξ' 为反射光发散作用而在连接时产生的能量损耗; T 为传输光经过多层介质的透射比; R_f 为传输光经过多层介质的反射比。光在多芯单模光纤的每个纤芯中传输可近似为高斯光, 根据文献[16]得到了高斯光束在空气中的耦合损耗可以描述为:



(a) 横向偏移
(a) Lateral offset



(b) 纵向偏移和端面倾斜
(b) Longitudinal offset and angle of end face

图 1 外在因素对四芯光纤活动连接器影响示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the influence of external factors on four-core optical fiber connector

纤芯旋转 θ 后的状态, 白色纤芯为浅蓝色纤芯偏移 h 后的状态。多芯光纤活动连接器对接时横向偏移会导致部分纤芯与包层对齐, 而光纤纤芯的

表 1 四芯光纤物理参数

Tab. 1 Physical parameters of four-core optical fiber

$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$c/\mu\text{m}$	n_1	n_2	E/Pa	ν
38	62.5	32	1.463	1.460	7.15×10^{10}	0.14

折射率和包层的折射率很接近,所以菲涅尔反射的影响较小,高斯光传输的损耗则占主要部分。在非旋转因素一定的情况下,由于多芯光纤不同纤芯的位置不同,所以旋转角度对不同的纤芯插入损耗影响不同如图 2(a)所示,其中纤芯 1 和纤

芯 3 插入损耗最大可以相差 0.46 dB。因菲涅尔反射而回波输入光纤纤芯的能量极小,所以旋转角度造成的回波损耗都在 71 dB 以上如图 2(b)所示,并且不同纤芯回波损耗变化情况各不相同,其中纤芯 3 在旋转过程中出现不重合到重合再不重合的过程,所以变化趋势与其他 3 个纤芯差异较大。不同旋转角度导致纤芯重合部分不同,透射能量增加时反射能量减少,而透射能量减少时反射能量增加,所以同一纤芯插入损耗和回波损耗变化趋势相反。

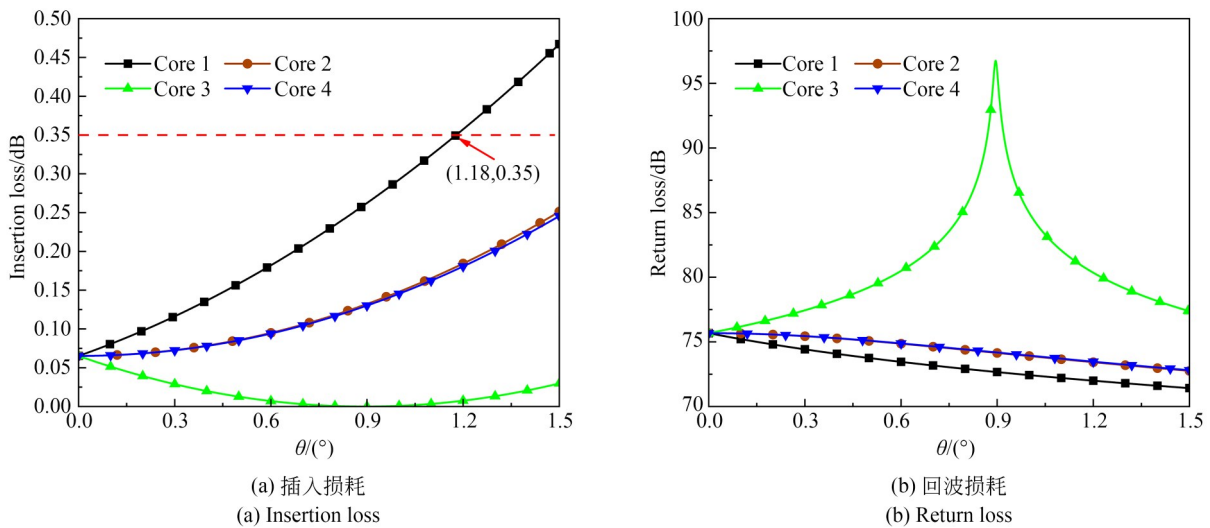


图 2 偏移量 h 为 $0.5 \mu\text{m}$ 时不同纤芯插回损随径向旋转角度的变化

Fig. 2 Variation of insertion loss and return loss of different cores with radial rotation angle when h is $0.5 \mu\text{m}$

在仅考虑纵向偏移作用的情况下,多芯光纤的所有纤芯插入损耗和回波损耗受到的影响相同。多芯光纤活动连接器需要每一个纤芯通道的光学性能达到使用要求,而发生端面倾斜时纤芯 3 受到影响最为严重,所以以纤芯 3 为例仿真计算插入损耗和回波损耗随纵向偏移和端面倾斜增长的变化。从图 3(a)中可以看出,随着纵向偏移的增大插入损耗先增大后减小,而回波损耗变化趋势相反,这是因为纵向偏移会导致多芯光纤活动连接器对接时出现空气间隙,而空气间隙的存在使得连接器对接时形成了纤芯-空气-纤芯的类似法布里-珀罗腔结构,所以插入损耗和回波损耗的图线接近法布里-珀罗腔的透射光谱和反射光谱。由图 3(b)可知,当端面倾角为 0.2° 时,插入损耗高达 1.53 dB,相较于横向偏移和纵向偏移,端面倾斜对于多芯光纤活动连接器的插

入损耗影响最大,这是由于端面倾斜除了会造成空气间隙引起多层介质菲涅尔反射外,还使得出射光无法垂直入射到接收光纤增大了损耗。但端面倾斜会使反射回发射光纤的能量增加,反而会降低回波损耗。多芯光纤活动连接器使用时要求每个纤芯通道的插入损耗小于 0.35 dB,根据仿真结果可知,多芯光纤活动连接器制备时应保证纤芯旋转角度误差小于 1.18° ,使用时应保证纤芯间纵向偏移小于 $0.2 \mu\text{m}$,端面倾角小于 0.104° 以满足连接器的使用要求。

2.3 三维参数对多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗的影响

多芯光纤活动连接器的三维参数如图 4(a)所示,图中 Δ 为光纤的顶点偏移; R 为陶瓷插针端面的曲率半径; U 为光纤的凹凸度。当顶点偏移为 $8 \mu\text{m}$,光纤端面曲率半径为 8mm ,光纤凹陷为

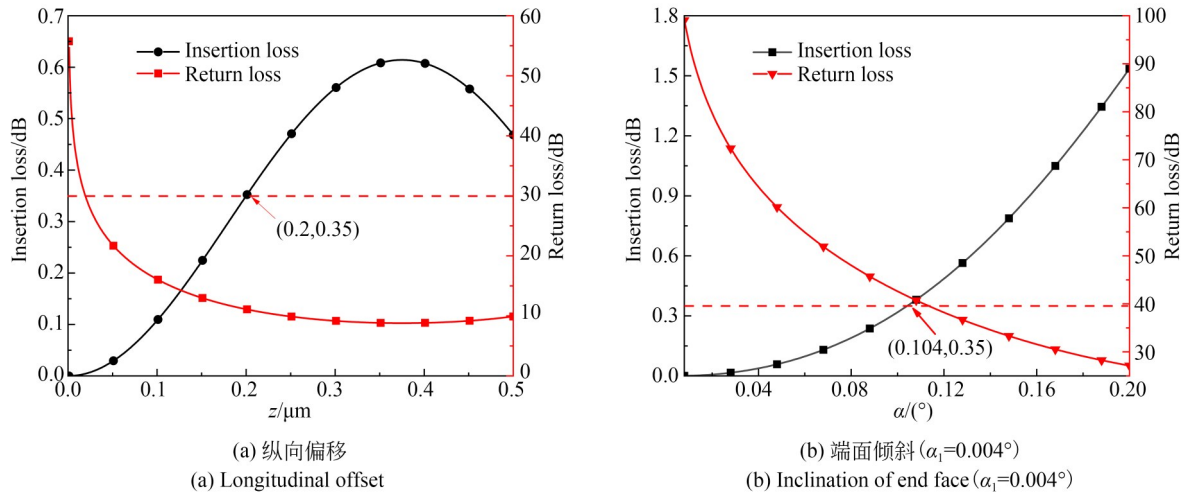


图3 纤芯3插入损耗和回波损耗随外在因素的变化

Fig. 3 Variation of insertion loss and return loss of fiber core 3 with external factors

正,假设两光纤端面镜像对称且陶瓷插针正对接触,选取受三维参数影响最大的纤芯3和最小的纤芯1进行分析如图4(b)所示。在不施加压力的情况下,光纤凹凸度的增加导致纤芯间空气间隙变厚,所以纤芯1和纤芯3插回损的变化趋势相似,插入损耗随光纤凹凸度增加变大,回波损耗随光纤凹凸度增加变小。而顶点偏移和曲率半径对两个纤芯影响不同,所以光纤凹凸度增加时两个纤芯对接产生的空气间隙变化不同,导致插回损的变化并不完全相同。三维参数是由光纤研磨生成的,其对连接器插入损耗和回波损耗的影响可以等效为纵向偏移和端面倾斜的综合影响。其中曲率半径和光纤凹凸度会直接影响各个纤芯通道的插入损耗和回波损耗,而顶点偏

移会造成不同纤芯通道受影响程度不同。

多芯光纤活动连接器可以通过弹簧挤压光纤消除对接时产生的空气间隙。所需弹簧施加力的大小可由赫兹方程得到。在光纤凹凸度满足公式(4)的情况下,可以得到实现纤芯紧密接触时端接力需要满足的条件^[17]如式(5)。根据表1可得 U_p 为82 nm,所以当光纤凹凸度小于82 nm且光纤端面曲率半径为5~25 mm时,只需施加0.9~0.18 N的压力即可实现光纤的物理接触。而单模光纤活动连接器中的弹簧可以提供5~6 N的力,所以在此情况下只需使用相同弹簧即可实现多芯光纤的紧密接触。

$$U \leq U_p = \frac{b^2 - 2a^2}{2R}, \quad (4)$$

$$F = \frac{4a^3 E}{3(1 - \nu^2) R}. \quad (5)$$

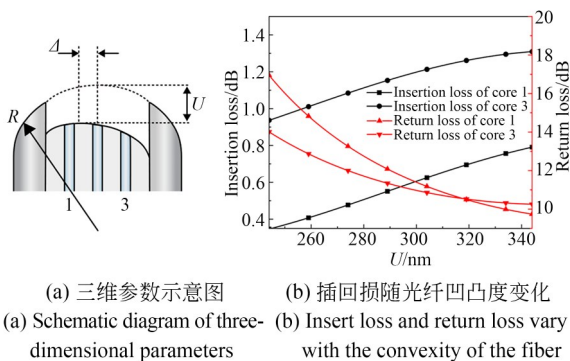


图4 多芯光纤连接器三维参数及对不同纤芯插回损影响
Fig. 4 Three-dimensional parameters of multi-core fiber connectors and effects on insertion loss and return loss

3 多芯光纤活动连接器测试实验

3.1 多芯光纤活动连接器的制备

由第2节的分析可知,要制备插入损耗小和回波损耗大的多芯光纤活动连接器,需要满足下述三项质量控制条件:

- (1) 对接前务必精准调芯,使多芯光纤的每个纤芯在几何结构上一一对应;
- (2) 对接时多芯光纤的每个纤芯均需实现紧密的物理接触^[18];
- (3) 对接后需要保证连接器内的多芯光纤不

产生相对转动。

为了降低生产难度以及避免现有系统不兼容的问题,满足数据中心等应用场景对于光连接

器小型化、便于操作的需求^[19-20]。因此选择以 LC 型单模光纤活动连接器为基础进行改进。制备的多芯光纤活动连接器如图 5 所示。

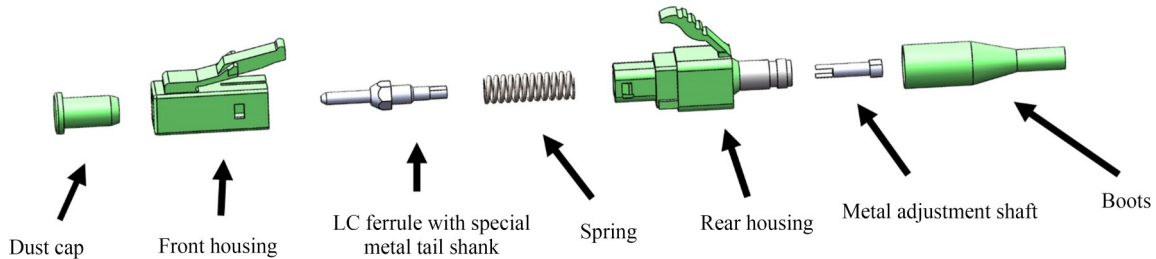


图 5 多芯光纤活动连接器结构图

Fig. 5 Structure diagram of multi-core fiber movable connector

制备多芯光纤活动连接器时,可先将光纤固化到陶瓷插芯中,再组装研磨抛光,最后可利用金属调节轴转动陶瓷插芯进行旋转对芯。在精准对芯的前提下,降低了对调节设备的要求和操作的难度。最终制备的四芯光纤活动连接器如图 6 所示,制备过程中也保证了纤芯旋转角度的误差在 0.5° 以内。

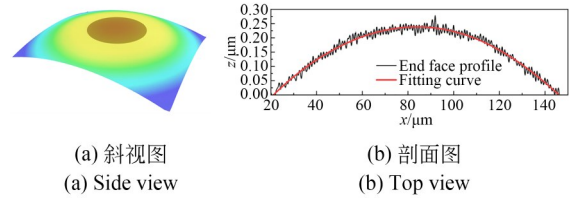


图 7 四芯光纤活动连接器端面检测结果

Fig. 7 End face inspection results of four-core fiber connector

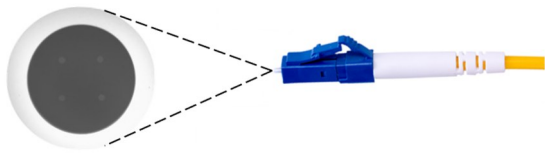


图 6 四芯光纤活动连接器实物图

Fig. 6 Physical diagram of four-core fiber connector

表 2 四芯光纤连接器三维参数和粗糙度

Tab. 2 Three-dimensional parameters and roughness of multi-core fiber connectors

顶点偏移	曲率半径	光纤凹凸度	粗糙度
$\Delta/\mu\text{m}$	R/mm	U/nm	$/\text{nm}$
0.4~6.3	7.0~9.2	-24.1~14.8	12.2~16.4

3.2 多芯光纤活动连接器三维参数和粗糙度检测

传统的端面检测仪可以快速检验端面是否有污染物、划痕、缺陷等不合格因素,但是多芯光纤活动连接器比单模光纤活动连接器的要求更加严苛,所以需要更高精度、更微观的检测。同时多芯光纤活动连接器的三维参数要求更高,如果其三维参数达不到第 2 节所述要求,在连接过程中就会出现纵向偏移的问题,严重影响连接器的插入损耗和回波损耗。因此使用了 3D 轮廓仪检测了四芯光纤活动连接器端面,如图 7 所示。根据测量结果,优化了研磨工艺,最终制备的四芯光纤活动连接器的三维参数和粗糙度如表 2 所示,完全可以满足 2.3 节中对四芯光纤活动连接

器三维参数的要求。

3.3 多芯光纤活动连接器性能测试

多芯光纤难以直接与现有测量系统兼容,需要使用多芯光纤扇入/扇出器(Fan In/Fan Out, FIFO)实现光源和多芯光纤的连接。由此用扇入/扇出器和 OCWR 构建了如图 8(a)所示的多芯光纤活动连接器插入损耗测量系统。测量过程如下:首先在不连接多芯光纤的情况下测得扇入/扇出器的损耗,然后连接待测的多芯光纤活动连接器到扇入/扇出器上测出整体损耗,两个损耗相减即可得到待测多芯光纤活动连接器的插入损耗。用此系统测得所制备的四芯光纤活

动连接器插入损耗如图 8(b)所示,平均损耗为: 0.089 dB,其中 92% 小于 0.2 dB。

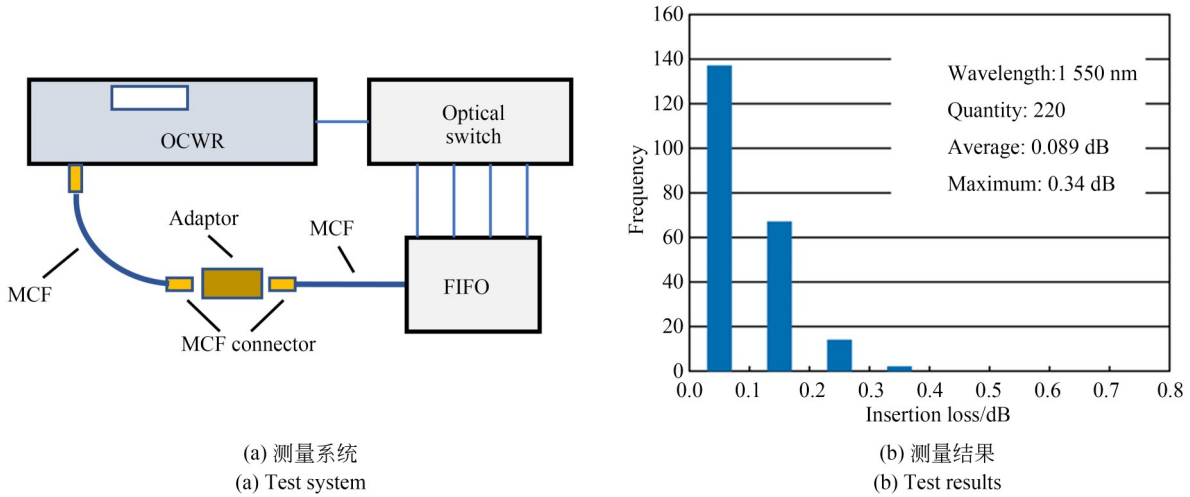


图 8 多芯光纤活动连接器插入损耗测量

Fig. 8 Insertion loss test of multi-core fiber movable connector

多芯光纤活动连接器回波损耗的测量需要考虑光路上的扇入/扇出器件和连接点处的反射,难以用 OCWR 的方法直接进行测量。虽然文献[21]提出了利用 OCWR 计算测量多芯光纤活动连接器的回波损耗,但是需要对所使用的扇入/扇出器的插入损耗和回波损耗进行测量并计算,难以体现 OCWR 定义式测量的优势,而且 OCWR 测量回波损耗的过程中需要极为稳定的光源和光功率计,对测量设备的要求较高,使得

OCWR 测量回波损耗的成本也显著增加。而 OLCR 可以实现单连接点回波损耗的测量,同时具有大于 80 dB 的测量动态范围,可以探测极弱的反射能量,所以用 OLCR 和扇入/扇出器件构建了多芯光纤活动连接器回波损耗测量系统,如图 9(a)所示。利用测量系统测得所制备的四芯光纤活动连接器回波损耗如图 9(b)所示,平均回波损耗为 52.31 dB,且所有连接器的回波损耗都大于 51.01 dB。

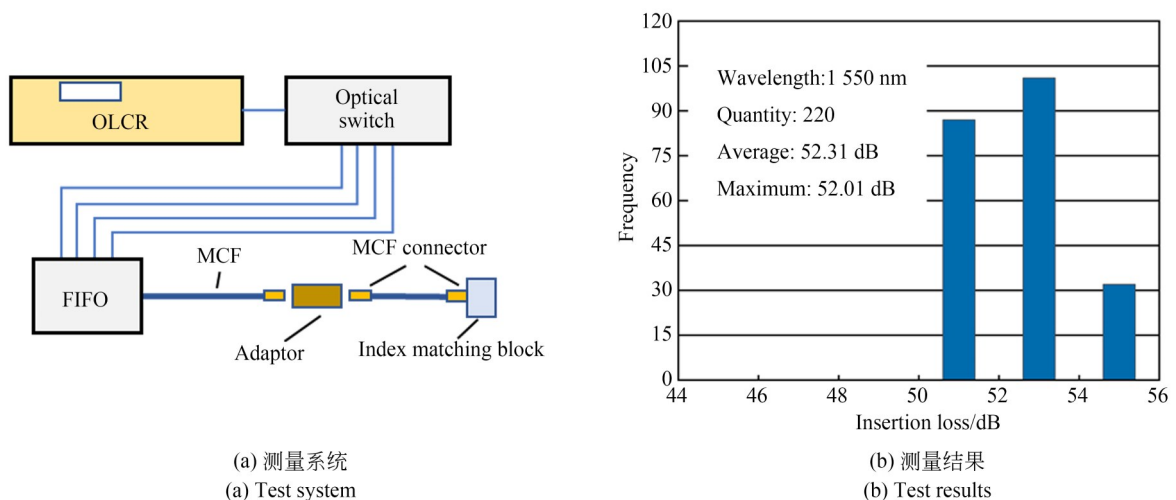


图 9 多芯光纤活动连接器回波损耗测量

Fig. 9 Return loss test of multi-core fiber movable connector

根据 GD/J 097-2020 单模光纤活动连接器的测量方法,对所制备的四芯光纤活动连接器进行了高温老化、低温储存、温度循环和湿度老化的环境测试以及振动、碰撞、重复和耐久的机械测试,测试后连接器没有出现变形、龟裂、松弛、褪色、结构松动、部件脱落等机械损伤,其性能汇总在表 3 中。从结果可以看出机械测试对于连接器的回波损耗影响更大,测试使得个别纤芯通道的回波损耗略低于标准,但可以通过优化抛光工艺进一步提高回波损耗。

利用同样的制备方法,制备了七芯光纤活动连接器。用多芯光纤活动连接器测量系统测量了插入损耗和回波损耗如表 4 所示。由表 4 的结果可以看出,纤芯 4 为中间芯,插入损耗小于边芯,这是由于所用七芯光纤可以保证中间纤芯在光纤中央,而边芯的位置由于工艺的原因会略有偏差,但所有纤芯通道的插入损耗均小于 0.35 dB,回波损耗均大于 52 dB。这也证明了这种连接器的制备方法适用于各种多芯光纤。

表 3 在光源波长为 1 550 nm 的情况下四芯光纤活动连接器环境和机械测试结果

Tab. 3 Results of environmental and mechanical test of the four-core fiber connectors at λ of 1 550 nm

测试项目	测试环境	插入损耗和回波损耗				测试结果/dB			
		要求/dB				最大 插损	最小 回损	插损 变化	回损 变化
		最大 插损	最小 回损	插损 变化	回损 变化				
高温老化	85 °C, 96 h					0.39	47.5	0.14	4.77
低温储存	-45 °C, 96 h					0.36	48.3	0.11	4.53
温度循环	-40~85 °C, 8 h/循环, 96 h					0.42	47.4	0.23	4.82
湿度老化	85 °C, 85%, 96 h					0.31	49.6	0.05	4.05
振动	振幅为 1.5 mm, 连续扫频范围 10~50 Hz, 扫频次数为 每分钟 45 次; X, Y, Z 三个方向分别振动 2 h;	0.50	50	0.30	5	0.37	50.3	0.18	1.89
碰撞	在距离连接器 1.5 m 的位置固定光缆, 将连接器拉至水 平, 自由落下撞击混凝土板, 重复 8 次					0.33	51.5	0.05	1.53
机械耐久性	重复插拔 500 次					0.35	49.8	0.28	3.62
重复性	重复插拔 10 次	0.50	50	0.10	5	0.32	51.8	0.06	1.37

表 4 七芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗

Tab. 4 Insertion loss and return loss of seven-core fiber connectors

(dB)

插入损耗	1	2	3	4	5	6	7
I	0.11	0.08	0.05	0.01	0.09	0.06	0.12
II	0.09	0.07	0.10	0.01	0.03	0.11	0.04
III	0.05	0.11	0.03	0.02	0.09	0.07	0.12
IV	0.12	0.08	0.04	0.02	0.10	0.03	0.08
V	0.18	0.05	0.07	0.01	0.09	0.12	0.14
回波损耗	1	2	3	4	5	6	7
I	52.04	52.34	52.83	52.01	52.74	52.30	52.26
II	52.19	52.32	52.21	53.12	52.11	52.08	52.27
III	52.09	52.09	52.34	52.17	52.33	52.18	52.69
IV	52.05	52.36	52.65	52.23	52.39	52.23	52.19
V	52.84	52.69	53.37	52.31	53.33	53.13	52.47

4 结 论

为实现多芯光纤的良好对接,在分析横向偏移、纵向偏移、端面倾角和三维参数对多芯光纤活动连接器插入损耗和回波损耗的作用机理后,提出了制备多芯光纤活动连接器需要满足的三项质量控制条件:精准对芯、物理接触和不相对转动。据此,给出了一种满足要求的 LC 型多芯

光纤活动连接器的制备方法。用 3D 轮廓仪对制备的多芯光纤活动连接器的三维参数进行了表征。用构建的多芯光纤活动连接器测量系统测量了插入损耗和回波损耗,连接器所有纤芯通道的插入损耗和回波损耗均达到使用要求。为多芯光纤活动连接器走向实际应用提供了理论分析评价、制备质量控制以及器件性能测试的完整方案。

参考文献:

- [1] 余少华, 何炜. 光纤通信技术发展综述[J]. 中国科学(信息科学), 2020, 50(9): 1361-1376.
YU SH H, HE W. Latest survey on optical fiber communication [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(9): 1361-1376. (in Chinese)
- [2] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [3] 王亚捷, 侯尚林, 雷景丽. C+L 波段低损耗色散补偿 19 芯光子晶体光纤设计[J]. 光学精密工程, 2022, 30(22): 2860-2868
WANG Y J, HOU SH L, LEI J L. Design of 19-core photonic crystal fiber with low loss dispersion compensation in C+L band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(22): 2860-2868. (in Chinese)
- [4] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106003.
TU J J, LI ZH H. Review of research on space division multiplexing optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106003. (in Chinese)
- [5] GONDA T, IMAMURA K, TSUKAMOTO M, *et al.* Design of multicore fiber having upgradability from standard single-mode fibers and its application [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 396-403.
- [6] MATSUI T, PONDILLO P L, NAKAJIMA K. Weakly coupled multicore fiber technology, deployment, and systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(11): 1772-1785.
- [7] SATAKE T, NAGASAWA S, HUGHES M, *et al.* MPO-type single-mode multi-fiber connector: low-loss and high-return-loss intermateability of APC-MPO connectors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, 17(1): 17-30.
- [8] WATANABE K, SAITO T, KAWASAKI K, *et al.* MPO type 8-multicore fiber connector with physical contact connection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 351-357.
- [9] MORISHIMA T, ITO J, SHIMAZU T, *et al.* MCF-Enabled Ultra-High-Density 256-Core MT Connector and 96-Core Physical-Contact MPO Connector [C]. *Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers. Los Angeles, California. Washington, D. C. : OSA*, 2017: 1-3.
- [10] SAITO K, MATSUI T, NAKAJIMA K, *et al.* Multi-Core Fiber Connector with Precise Rotational Angle Alignment [C]. 2014 *OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology*. 6-10, 2014, Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2014: 872-874.
- [11] LEE Y, TANAKA K, NOMOTO E, *et al.* Multi-Core Fiber Technology for Optical-Access and Short-Range Links [C]. 2014 *12th International Conference on Optical Internet 2014 (COIN)*. 27-29, 2014, Jeju, Korea (South). IEEE, 2014: 1-2.
- [12] SHIMAKAWA O, SHIOZAKI M, SANO T, *et al.* Pluggable fan-out realizing physical-contact and low coupling loss for multi-core fiber [C]. 2013 *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*. IEEE, 2013: 1-3.
- [13] NOMOTO E, HIRUMA K, SUGAWARA T, *et al.* SC-type multi-core optical-fiber connectors using a pressurization spring [J]. *Optical Review*, 2015, 22(5): 679-685.
- [14] MORISHIMA T, MANABE K, TOYOKAWA S, *et al.* Simple-structure low-loss multi-core fiber LC connector using an align-by-contact method

- [J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 9157-9164.
- [15] 国家广播电视总局科技司. 光纤活动连接器技术要求 and 测量方法: GD/J 097-2020[S]. 北京: 国家广播电视总局科技司, 2020.
Technical requirements and measurement methods for fibre optic connector: GD/J 097-2020[S]. Beijing: Department of Science and Technology of National Radio and Television Administration, 2020. (in Chinese)
- [16] 王伟. 光纤连接器损耗机理及研磨抛光工艺研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
WANG W. *Research on Loss Mechanism and Lapping & Polishing Process for Optical Fiber Connectors* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] SHIKAMA K, ABE Y, YANAGIS, *et al.* Physical-contact conditions for multicore fiber optical connectors [C]. *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference* 2013. Anaheim, California. Washington, D. C.: OSA, 2013: 1-3.
- [18] NAGASE R, SAKAIME K, WATANABE K, *et al.* MU-type multicore fiber connector[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2013, E96. C (9): 1173-1177.
- [19] KACHRIS C, TOMKOS I. A survey on optical interconnects for data centers[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14(4): 1021-1036.
- [20] LI M J. Novel Optical fibers for data center applications [C]. *SPIE OPTO. Proc SPIE 9772, Broadband Access Communication Technologies X, San Francisco, California, USA.* 2016, 9772: 22-28.
- [21] NAGASE R. Optical connectivities for multicore fiber [C]. *Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America*, 2020: Th3I. 1.

作者简介:



段劭琛(1998—),男,河北辛集人,硕士研究生,2020年于暨南大学获得学士学位,主要从事光纤器件方面的研究。E-mail: 21082203003@mails.guet.edu.cn

通讯作者:



苑立波(1962—),男,黑龙江铁力人,教授,博士生导师,2003年于香港理工大学获得博士学位,主要从事光纤集成器件及传感应用方面的研究。E-mail: lbyuan@vip.sina.com