

多芯光纤对角芯反射耦合器

杨世泰^{1,2}, 陈大伟³, 段劭琛³, 陈意坚³, 邓洪昌³, 滕传新³, 苑立波^{1,3*}¹哈尔滨工程大学纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150006;²哈尔滨工程大学物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006;³桂林电子科技大学光电工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 提出一种多芯光纤对角芯反射耦合器,可实现多芯光纤对称纤芯的光路低损耗串联。首先,采用纤端精密研磨的方法制备出 45° 圆台,得到平均插入损耗为2.14 dB的器件;其次,通过研磨制备出多角度圆台,并采用电弧平滑优化的方法实现了圆台的弧形优化,使得平均插入损耗降低至1.39 dB。对2种圆台型器件的制备容差进行了对比分析,结果表明,优化后的弧形圆台相较于优化前具有更好的制备容差和性能。

关键词 光纤光学; 多芯光纤; 反射耦合器; 插入损耗; 纤端研磨

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230465

1 引言

多芯光纤近年来得到了广泛的关注,并获得了喜人的发展。在光纤通信领域,基于多芯光纤的空复用技术是解决未来通信容量问题的关键途径之一^[1-3];在光纤传感方面,多芯光纤将多个光学通道集成在同一根光纤内部,为在同根光纤内部构造集成传感器提供了更多的可能性^[4-7]。多芯光纤的推广应用必然离不开各种各样的多功能集成器件,因此围绕着多芯光纤,在单根光纤中构建集成度更高、性能更好、功能更丰富的微光学器件是近年来多芯光纤技术的研究热点。

有一种在多芯光纤末端集成的器件,其能够将多芯光纤不同的2个纤芯在光纤的末端实现串联^[8-9]。这类器件使得多芯光纤在分布式传感上有独特的应用,例如文献[8]采用了多芯光纤扇入扇出器的方式,先将七芯光纤的光路分离,再将多芯光纤扇入扇出器的2个单模尾纤焊接起来以实现七芯光纤2个纤芯的串联。在分布式拉曼测温方面,多芯光纤串联的2个纤芯一来一回形成了一个环路,可排除光源波长漂移、光纤损耗变化以及局部弯曲损耗等因素的影响,保证分布式温度测量精度^[10-11]。多芯光纤在单根光纤内集成了多个纤芯通道,因此如果有一种集成器件能在多芯光纤的末端实现2个独立纤芯光路的串联,那么这2个纤芯便实现了一来一回的环路连接,由此可实现通过一根多芯光纤实现环路式的分布式拉曼测温。然而,

多芯光纤扇入扇出器的尺寸较大,其在油田、油井等恶劣且空间狭窄的环境中的应用受到限制。

本文提出一种基于多芯光纤的对角芯反射耦合器,在对称多芯光纤的末端制备具有抛物面形状的弧形反射锥体圆台,多芯光纤的周边纤芯内的光波能够被低损耗反射并耦合到对称纤芯内反向传输,实现对角纤芯间的串联。通过对圆台结构进行优化设计,得到了理论最优的反射圆台结构,并通过精密研磨和电弧塑形的的方法,成功制备出低损耗的对角芯反射耦合器。该器件直接在多芯光纤纤端制备,超紧凑的结构使其在基于多芯光纤的分布式拉曼温度传感器上有重要的应用。

2 多芯光纤对角芯反射耦合器

为了方便多芯光纤的制造、多芯光纤的熔接与活动连接,多芯光纤的纤芯分布通常会被设计成具有对称性的几何分布。所提出的对角芯反射耦合器就适用于这种纤芯呈中心对称分布的多芯光纤。多芯光纤大体上可以分成两类:一类没有中间纤芯,例如图1(a)、(c)所示的双芯光纤和四芯光纤;另一类具有一个中间纤芯,例如图1(b)、(d)所示的三芯光纤和七芯光纤。图1(e)~(h)所示为本实验室制备的对应于图1(a)~(d)的多芯光纤的显微图片。

对于两类光纤,均可以在光纤的末端制备对角芯反射耦合器来实现2个对角边芯的光路耦合连接。如图2(a)所示,以七芯光纤为例,在其纤端熔接一段很

收稿日期: 2023-01-11; 修回日期: 2023-02-20; 录用日期: 2023-02-24; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2203903)、国家自然科学基金(61827819, 61965009)

通信作者: *lbyuan@vip.sina.com

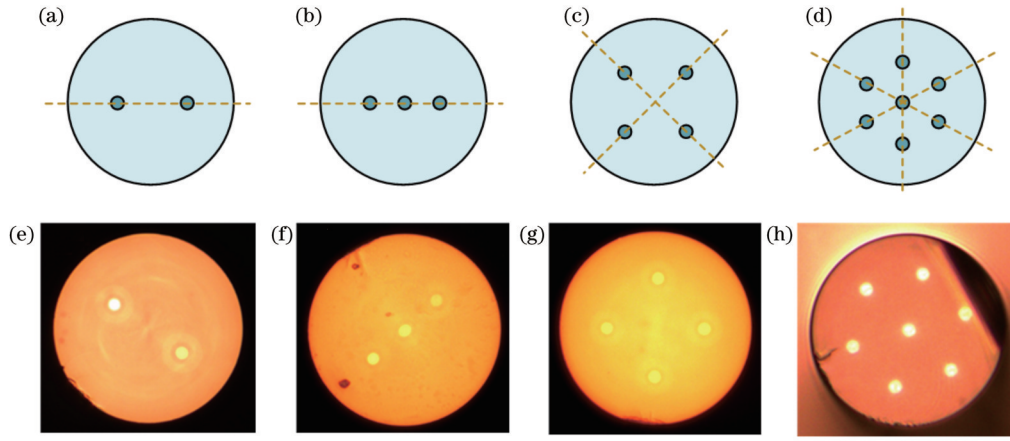


图 1 纤芯呈中心对称分布的多芯光纤。(a)~(d) 光纤结构示意图; (e)~(h) 对应的端面显微照片

Fig. 1 Multicore optical fibers with centrosymmetric core distribution. (a)~(d) Diagrams of fiber structure; (e)~(h) micrographs of end face

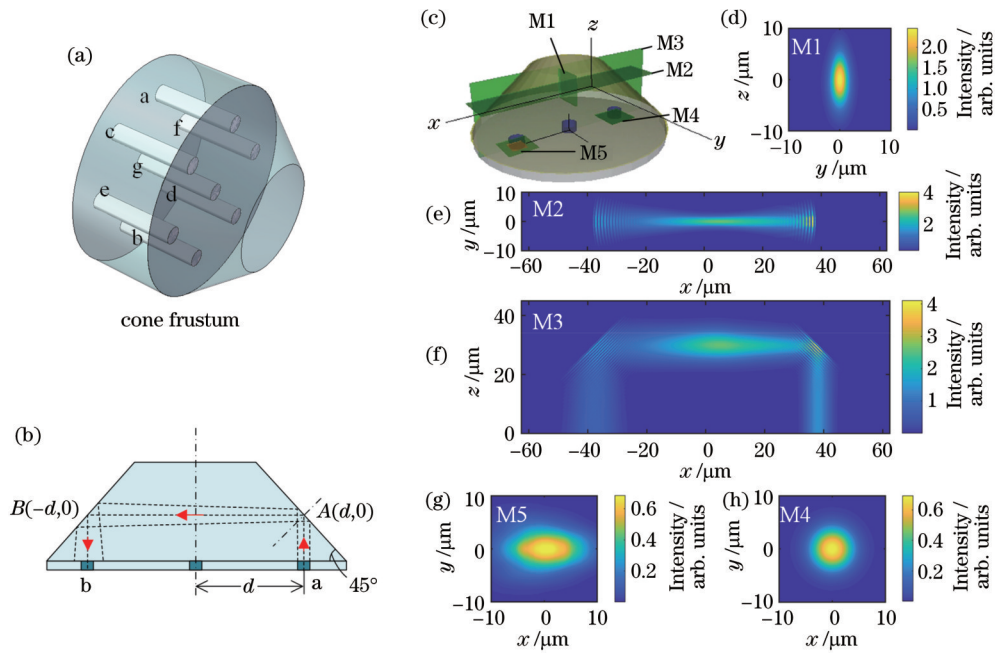


图 2 七芯光纤端 45°圆台及其仿真结果 ($d=38 \mu\text{m}$)。(a) 45°圆台结构三维图; (b) 45°圆台结构沿纤芯 a、b 的轴剖面; (c) 三维仿真模型; (d)~(h) 监视器 M1~M5 获得的光场分布

Fig. 2 45° cone frustum at seven-core fiber end and its simulation results ($d=38 \mu\text{m}$). (a) 3D diagram of 45° frustum; (b) axial section of 45° frustum along fiber core a and b; (c) 3D simulation model; (d)~(h) optical field distributions obtained by monitor M1~M5

短的无芯光纤后,通过精密研磨的方法制备 45°的圆台。该圆台可连接 3 对纤芯光路,例如纤芯 a 内的光可通过底角为 45°的圆台表面 2 次直角反射至纤芯 b 内反向传输,反之亦然。图 2(b)所示为 45°圆台沿一对纤芯的轴剖面,其中纤芯 a、b 的中间点与光纤中心的距离均为 d ,即芯间距相等。纤芯 a 和 b 的中轴线与 45°圆台表面的交点分别为 $A(d,0)$ 和 $B(-d,0)$ 。箭头表示光束的传输方向,其由纤芯 a 出发并经过 2 次直角反射进入纤芯 b。虚线表示纤芯内 3 条不同光线的传输路径。3 条光线的方向会有一些偏差,是因为当光束离开七芯光纤纤芯进入无芯光纤后,会发生衍射扩散,

这导致光束在被 45°圆台 2 次反射后,很大一部分光束不能耦合进纤芯 b 内。为了说明光束在反射传输过程中的衍射发散情况,针对芯间距 $d=38 \mu\text{m}$ 的七芯光纤,使用时域有限差分法建立了图 2(c)所示的三维光学模型,并在光束传播的路径上建立了 5 个关键的监视器。监视器能够反馈该位置处切面的光场分布,结果分别如图 2(d)~(h)所示。监视器 M3 显示的是图 2(b)中 2 个对称纤芯轴剖面的光场分布。可见,光束在传输和反射的过程中确实发生了较为严重的衍射发散。然而通过监视器 M2 可以看出,光束在圆台面上反射后,在 xoy 面上发生了先聚焦后发散的情况,并且

聚焦和发散几乎是对称的,这是因为圆台的反射表面在 xoy 面内呈圆弧形。监视器 M1 的光场分布也说明了光束在穿过中心截面时在 y 和 z 方向上分别发生了压缩和发散,因此到达纤芯 b 的光场(由监视器 M5 反馈)和纤芯 a 的发射光场(由监视器 M4 反馈)显著不同,到达纤芯 b 的光场和纤芯的基模不能完全匹配耦合,有相当大一部分能量被损耗。对监视器 M5 光场和纤芯 b 基模模场进行重叠积分计算,所得到的光场耦合效率仅为 66.2%。

为了改善光束在 xoz 平面内的发散效应,使光束在传输到纤芯 b 处时的光场和基模模场尽量匹配,提高光波与纤芯 b 的耦合效率,对光纤端的 45° 圆台结构进行弧形优化。如图 3(a)、(b) 所示,如果锥体圆台的反射界面是弧形的,那么纤芯 a 出射的光束在 A 点反射后产生聚焦效果,由于光纤的纤芯是对称结构,当聚焦效果和发散效果相抵消时,光束在经过第 2 次反射后就能被高效耦合进纤芯 b 中。当然,必须对弧形圆台的形状进行精细的设计才能实现高效的反射耦合,设计的准则主要有 2 个:

1) 选择旋转抛物面作为反射面函数形状,这是因为抛物面具有将平行光束聚焦于一点的特性。此外,由于光纤的纤芯对称分布,聚焦的焦点应该在光纤的轴心上。由此,设定旋转抛物面的函数为

$$z(r) = ar^2 + b, \quad (1)$$

式中: r 和 z 分别为光纤的径向和轴向坐标;参数 a 和 b 均为待定系数。

2) 为了使光束呈 45° 反射,抛物线(母线)需要满足 $A(d, 0)$ 点切线与水平线的夹角为 45° ,即 A 点处的斜率为 -1 。由此,可得方程组

$$\begin{cases} z(d) = ad^2 + b = 0 \\ z'(d) = 2ad = -1 \end{cases} \quad (2)$$

可见,当芯间距为 d 时,可解出参数 a 和 b ,优化的旋转抛物面的方程也是唯一且确定的:

$$z(r) = -\frac{1}{2d}r^2 + \frac{d}{2} \quad (3)$$

由于后续器件制备中采用的光纤为芯间距 $d = 38 \mu\text{m}$ 的七芯光纤,所述弧形锥体圆台结构的旋转对称抛物面母线满足以下抛物线方程:

$$z = -\frac{1}{76}r^2 + 19. \quad (4)$$

图 3(c) 所示为多芯光纤纤端锥体圆台在按上述抛物面弧形优化后的三维仿真模型,图 3(d)~(h) 所示分别为 5 个监视器获得的光场分布。可以看到,经过弧形圆台优化后,光束由纤芯 a 输出后经过第一次反射,在 2 个方向上均聚焦于光纤的中心轴线,再发生发散。聚焦和发散效应相互抵消,光束可对称地经过第 2 次反射,耦合进入纤芯 b。经过光场重叠积分计算,得到的光场耦合效率达到了 76.4%。由此可见,优化后的耦合效率提高了 10.2%。

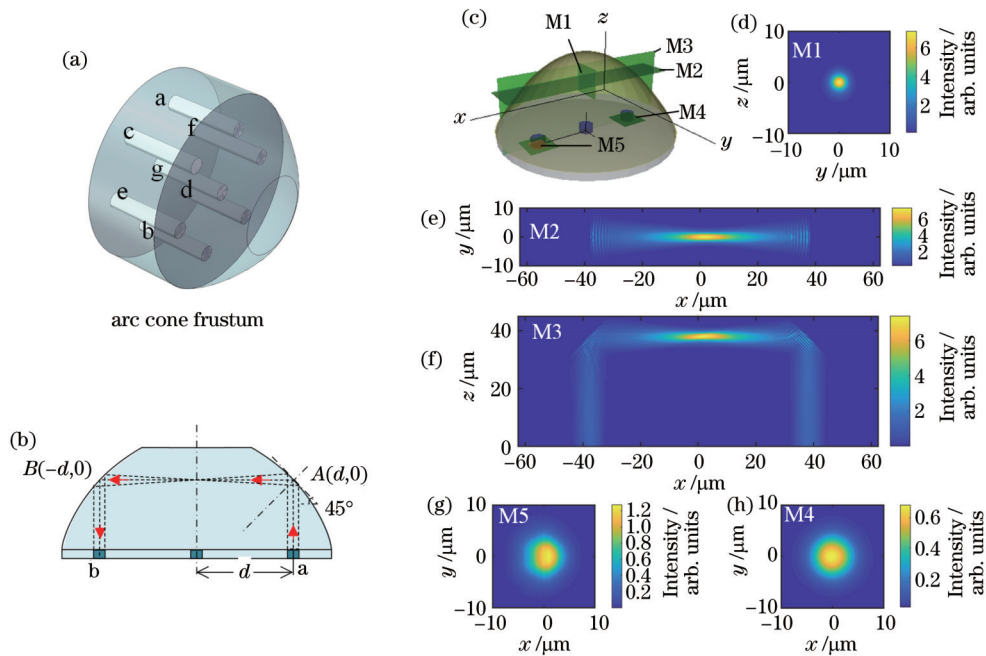


图 3 优化后的七芯光纤端 45° 弧形圆台及其仿真结果 ($d = 38 \mu\text{m}$)。(a) 45° 弧形圆台结构三维图;(b) 45° 弧形圆台结构沿纤芯 a、b 的轴剖面;(c) 三维仿真模型;(d)~(h) 监视器 M1~M5 获得的光场分布

Fig. 3 Optimized 45° arc cone frustum at seven-core fiber end and its simulation results ($d = 38 \mu\text{m}$). (a) 3D diagram of 45° arc frustum; (b) axial section of 45° arc frustum along fiber core a and b; (c) 3D simulation model; (d)~(h) optical field distributions obtained by monitor M1-M5

为了证明上述优化方法的一般性,再选取芯间距 $d=42\ \mu\text{m}$ 的情况进行建模分析。根据式(3)可得抛物面的方程为

$$z = -\frac{1}{84}r^2 + 21. \quad (5)$$

同样对优化前 45° 圆台和优化后的弧形抛物面圆

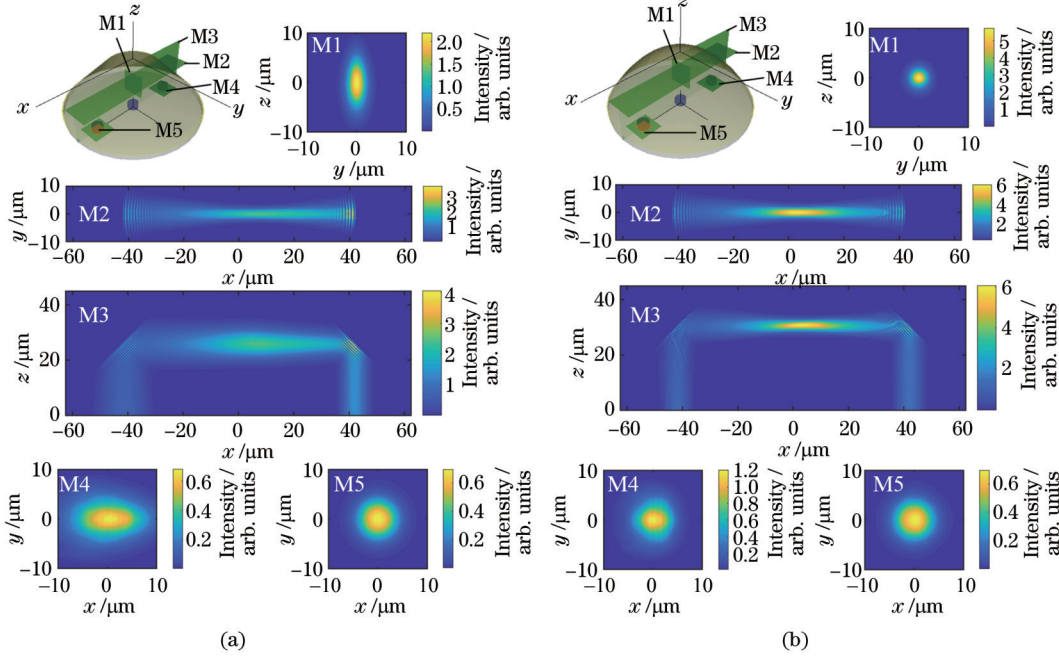


图 4 芯间距 $d=42\ \mu\text{m}$ 情况下 45° 圆台和抛物面弧形优化后圆台的仿真结果。(a) 优化前的三维仿真模型及监视器 M1~M5 获得的光场分布;(b) 优化后的三维仿真模型及监视器 M1~M5 获得的光场分布

Fig. 4 Simulation results of 45° frustum and parabolic optimized frustum with $d=42\ \mu\text{m}$. (a) 3D simulation model and optical field distributions obtained by monitor M1~M5 before optimization; (b) 3D simulation model and optical field distributions obtained by monitor M1~M5 after optimization

3 器件的制备和测试

3.1 45° 圆台的制备

45° 圆台的制备流程如图 5(a) 所示,包括以下 3 个步骤。

步骤 1: 准备光纤。在七芯光纤端熔接一段无芯光纤后,切割光纤并保留无芯光纤的长度为 $40\ \mu\text{m}$,如图 5(b) 所示。光纤端面的切割角度越小越好,因为较大的切割角度会使得 45° 圆台在研磨过程中失去对称性。

步骤 2: 圆台研磨。光纤端圆台研磨装置的工作原理如图 5(e) 所示。首先,将准备好的光纤装载到一个可以同轴旋转的夹具上,通过显微成像系统测量光纤与研磨盘之间的夹角 α ,并将其调整到 45° ;然后,开启研磨设备,让研磨盘和同轴夹具同时旋转,在七芯光纤的纤端研磨出 45° 锥体圆台。根据实际需要更换不同颗粒度的砂纸来确保 45° 圆台表面尽量光滑。图 5(c) 所示为制备好的圆台结构的显微照片。

步骤 3: 表面镀膜。七芯光纤中的光束会在圆台表面发生 2 次反射后进入对称纤芯传输,需要满足全

台分别建立仿真模型,得到图 4 所示的对角芯反射光路。优化后的弧形圆台能够改善光束衍射带来的模场扩散问题,并且计算得到二者的耦合效率分别为 64.5% 和 71.8% ,可见耦合效率得到显著提升,因此所提优化方法具有一般性。

反射条件

$$\theta \geq \theta_c = \arcsin\left(\frac{n_e}{n_c}\right), \quad (6)$$

式中: n_e 为环境折射率, n_c 为无芯光纤折射率; θ 为入射角, θ_c 为全反射临界角。当外界气体为空气时, $n_e=1$, $n_c=1.457$, $\theta_c=43.34^\circ$ 。在 45° 圆台的情况下,光束入射角 $\theta=\alpha=45^\circ$,非常接近临界角。为了适应不同折射率的环境,例如水环境,可在 45° 圆台结构表面镀上一层金膜来确保光束完全反射。镀完膜的纤端 45° 圆台结构如图 5(d) 所示。

3.2 45° 弧形圆台的制备

弧形圆台的制备流程如图 6(a) 所示,包括如下 4 个步骤。

步骤 1: 准备光纤。在七芯光纤端熔接一段无芯光纤后,切割光纤并保留无芯光纤的长度为 $40\ \mu\text{m}$ 。

步骤 2: 多角度研磨圆台。在制备弧形圆台的过程中,需要先将光纤端研磨成图 6(b) 所示的多角度圆台,目的是使圆台的表面母线更接近于优化设计的弧形抛物线。需要注意的是,为了确保光束在离开纤芯后在圆台表面被直角反射,必须将该局域(A、B 两点

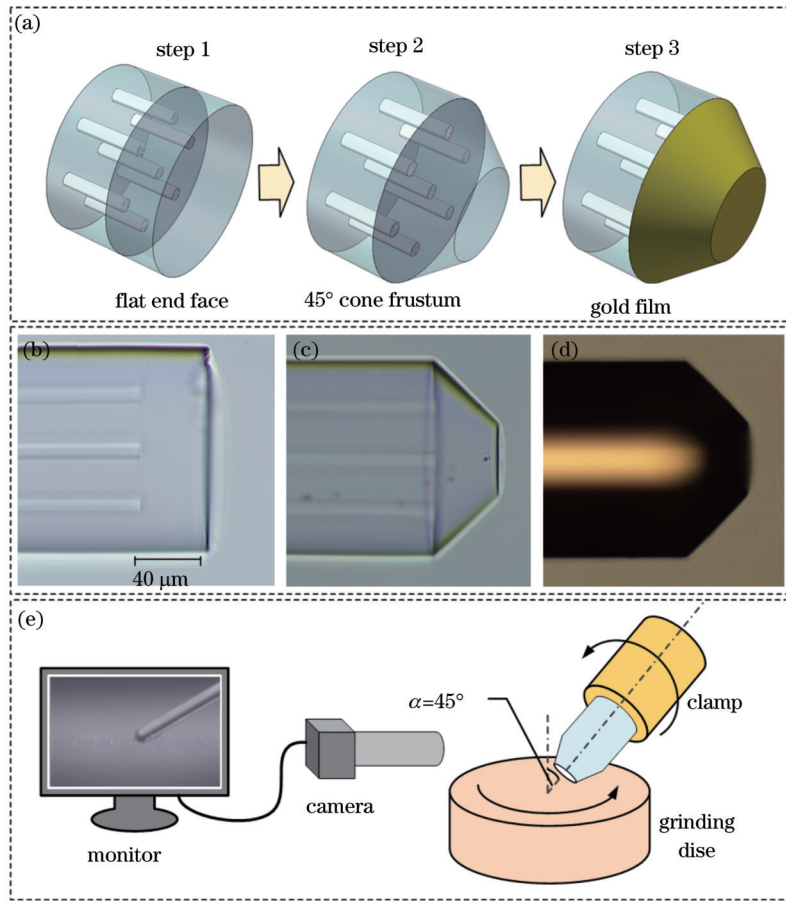


图 5 45°圆台的制备。(a)制备步骤示意图；(b)熔接一段40 μm无芯光纤的七芯光纤端；(c)研磨后的纤端45°圆台；(d)表面镀膜后的45°圆台；(e)纤端研磨装置原理图

Fig. 5 Fabrication of 45° cone frustum. (a) Schematic of preparation procedure; (b) seven-core fiber end fused with a 40 μm coreless fiber; (c) 45° cone frustum after grinding; (d) 45° cone frustum with metal film; (e) schematic of fiber end grinding device

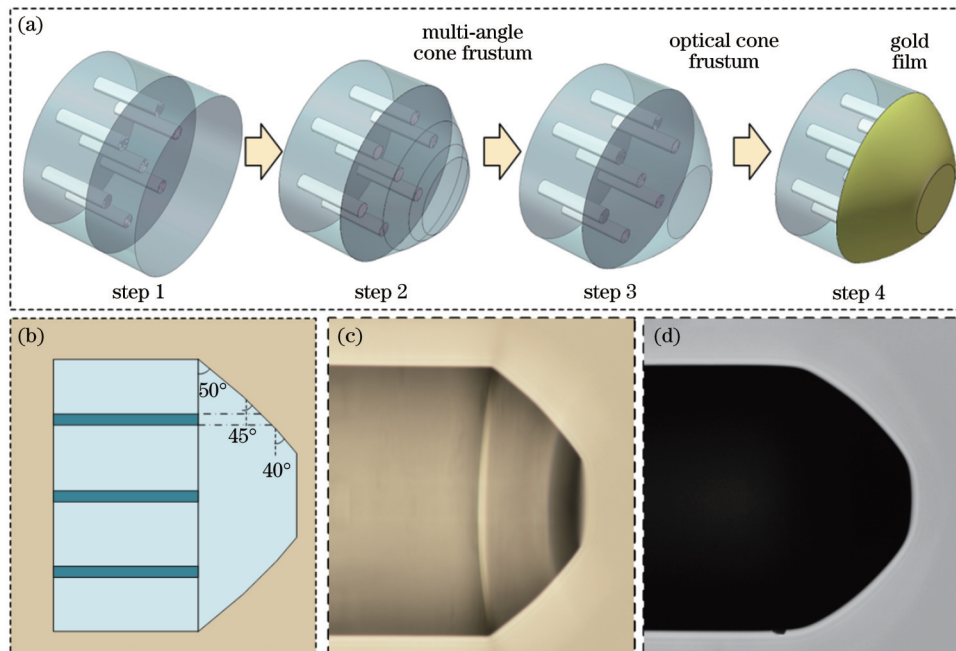


图 6 45°弧形圆台的制备。(a)制备步骤示意图；(b)多角度圆台剖面示意图；(c)研磨后的多角度圆台显微图；(d)电弧优化并表面镀膜后的弧形圆台显微图

Fig. 6 Fabrication of 45° arc cone frustum. (a) Schematic of preparation procedure; (b) schematic of multi-angle cone frustum; (c) micrograph of multi-angle cone frustum after grinding; (d) micrograph of arc cone frustum after arc optimization and metal filming

之间)处的反射角度研磨为 45°,在纤芯对应位置的两侧可稍稍修改角度,使形状接近抛物线。具体制备方法为:将准备好的光纤装载在研磨装置的旋转夹具上,调节七芯光纤和研磨盘表面的法线间的夹角 α 至 50°;研磨出圆台形状后,调节 α 至 45°,继续研磨一段时间,再调节 α 至 40°研磨。通过在线观察系统监测角度转折点 A 和 B 的位置,得到如图 6(c)所示的多角度圆台。

步骤 3:电弧塑形。将多角度圆台放置在光纤熔接机中,通过调节放电电流及放电时间的参数来使多角度圆台的棱角 A、B 两点处在电弧产生的高温下轻微熔融,并依靠表面张力使多角度圆台表面变得光滑,形成弧形圆台。

步骤 4:表面镀膜。在弧形圆台的抛物面上镀制金反射膜,最终得到的弧形圆锥体圆台如图 6(d)所示。

这里有两点需要说明:其一,由于采用了高温熔融的方法对多角度圆台进行形状优化和抛光,如果不熔接无芯光纤,直接在七芯光纤上制备多角度圆台并熔融抛光,会导致七芯光纤的纤芯在与圆台表面相交处发生畸变,从而影响光波的传输与反射角度。在熔接了很短的一段无芯光纤后,可以避免纤芯畸变带来的不确定影响。其二,之所以采用多角度圆台而不直接采用 45°底角的圆台来在电弧下进行弧形优化抛光,是因为多角度圆台更接近理论设计的优化模型,并且通过轻微的电弧抛光即可得到和预设相差不大的形状。如果直接采用 45°的圆台来制备,难以得到理想的优化弧形圆台。如图 7 所示,对得到的弧形圆台的显微图片[图 6(d)]进行几何边缘提取,得到 2 条对称的弧形轮廓曲线。图 7 也展示了优化设计的抛物线(图中虚

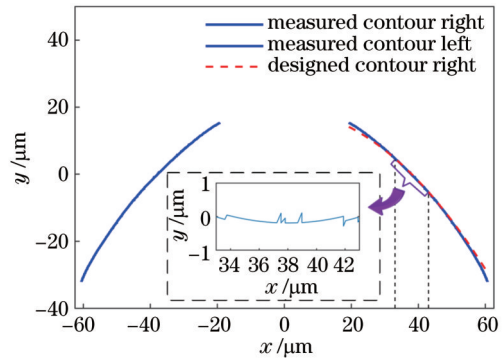


图 7 45°弧形圆台轮廓曲线和优化函数曲线之间的比较
Fig. 7 Comparison between contour curve of 45° arc cone frustum and optimization function curve

线),其中箭头所指插图 为纤芯对应区域 $[x=(38 \pm 5) \mu\text{m}]$ 轮廓曲线和抛物线之间的差值,可见尽管在弧形圆台的底部和顶部,实际制备的弧形圆台和预设的抛物线形状有一定的差异,但是在纤芯位置处,二者基本重合。因此制备得到的弧形圆台结构和设计的结构在提高反射耦合效率方面有几乎相同的效果。

3.3 器件性能测试

采用如图 8 所示的测试系统就可以评价纤端对角芯反射耦合器的性能。将制得的器件与 1 个七芯光纤扇入扇出器熔接,在扇入/扇出器件的 2 个输入端口分别连接 1 个波长为 1550 nm 的测试光源和 1 个功率计,分别对应于七芯光纤的 2 个对称光纤芯。光源的输出功率和功率计的检测功率分别表示为 $P_{in}(i)$ 和 $P_{out}(j)$,其中 i 和 j 表示扇入/扇出器的对称端口序号。对角芯反射耦合器的插入损耗为

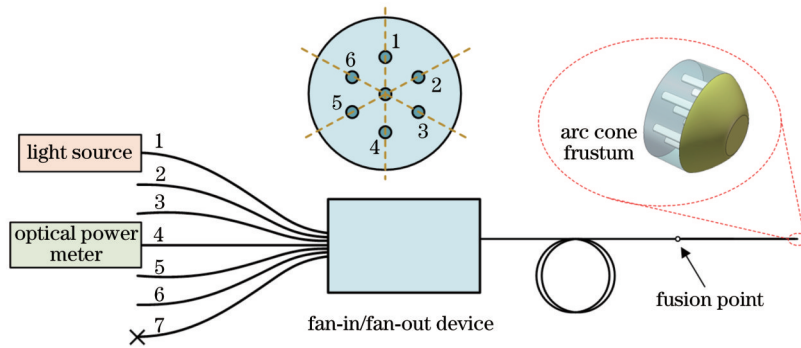


图 8 七芯光纤对角芯反射耦合器的测试原理
Fig. 8 Test principle of seven-core fiber diagonal core reflection coupler

$$L(i, j) = -10 \log \left[\frac{P_{out}(j)}{P_{in}(i)} \right] - L_i - L_j - L_t, \quad (7)$$

式中: L_i 和 L_j 分别为扇入/扇出器第 i 、 j 通道的插入损耗; L_t 为对角芯反射耦合器和扇入/扇出器的熔接损耗。所使用的扇入/扇出器为实验室自制的七芯光纤扇入/扇出器,各通道插入损耗如表 1 所示,其中纤芯序号 7 为中间芯(CC),其在后续的测试中没有用

到。采用日本藤仓的 CO₂ 激光光纤处理工作站(LZM110)熔接多芯光纤。尽管每次的熔接损耗出现轻微差别,并且在熔接扇入/扇出器和对角反射器后难以直接准确测量熔接损耗,但经过多次单独七芯光纤之间的熔接和测量实验后,得到在熔接良好的情况下,可控制平均熔接损耗在 0.1 dB 以内,相对较小,故选择忽略熔接损耗 L_t 。通过式(7)计算得到

45°圆台和优化后的 45°弧形圆台对角芯反射耦合器的插入损耗,结果如表 2 所示。通过对比可知,45°圆台和弧形圆台的对角芯平均插入损耗分别为

2.14 dB 和 1.39 dB,对应的耦合效率分别是 61.1% 和 72.6%。优化后,弧形圆台的对角芯光路耦合效率得到显著提高。

表 1 七芯光纤扇入/扇出器的各通道插入损耗

Table 1 Insertion loss of each channel for seven-core fiber fan-in/fan-out device

Core number	1	2	3	4	5	6	7(CC)
Insertion loss /dB	0.78	0.67	0.83	0.98	0.73	0.74	0.51

表 2 45°圆台对角芯反射耦合器优化前后的插入损耗测试结果

Table 2 Insertion loss test results of optimized and unoptimized diagonal core reflection couplers of 45° cone frustum

Core number	1-4	4-1	2-5	5-2	3-6	6-3	Average
Insertion loss of 45° cone frustum /dB	2.05	2.09	2.16	2.12	2.20	2.23	2.14
Insertion loss of arc cone frustum /dB	1.32	1.35	1.40	1.44	1.42	1.39	1.39

4 误差讨论

在多芯光纤对角芯反射耦合器的制备过程中,有 2 个影响耦合效率的重要因素需要讨论。

1)多芯光纤的纤芯分布对称性将会直接影响对角芯的反射耦合效率。如图 9(a)、(b)所示,在多芯光纤的制备过程中,预制棒的纤芯组棒会产生几何误差,这些误差在拉丝后会致光纤纤芯偏离完美对称的几何位置。以芯间距 $d=38\ \mu\text{m}$ 为例,假设一对对角纤芯中的一个纤芯在 x 和 y 两个方向上的偏离量分别为 Δx 和 Δy ,分别对 45°圆台和具有抛物线型的弧形圆台建立仿真模型。纤芯偏离误差对耦合效率的影响如图 9(c)所示。从图 2(g)可以看出,45°圆台纤芯 a 出射的

光束在经过 2 次垂直反射后到达纤芯 b 的光场分布发生严重的畸变,光场呈椭圆形分布,因此耦合效率随 Δx 和 Δy 的变化曲线有些许区别。从图 3(g)可以看出,优化后的弧形圆台中到达纤芯 b 的光场基本保持圆形的高斯分布,因此其耦合效率随 Δx 和 Δy 的变化曲线近乎重合。然而,无论纤芯在哪个方向发生了偏离,在偏离量小于 $\pm 2\ \mu\text{m}$ 的范围内,弧形圆台的耦合效率均大于未优化的 45°圆台。

2)需要考虑纤端圆台在制备过程中的工艺容差问题。如图 9(d)、(e)所示,在圆台的研磨制备过程中,其圆台底角并不能严格控制在 45°。将底角制备偏离误差记为 $\Delta\theta$,对 $\Delta\theta$ 在 $\pm 1^\circ$ 内建立三维模型进行参数扫描,得到 45°圆台和抛物线型弧形圆台的耦合效率随底

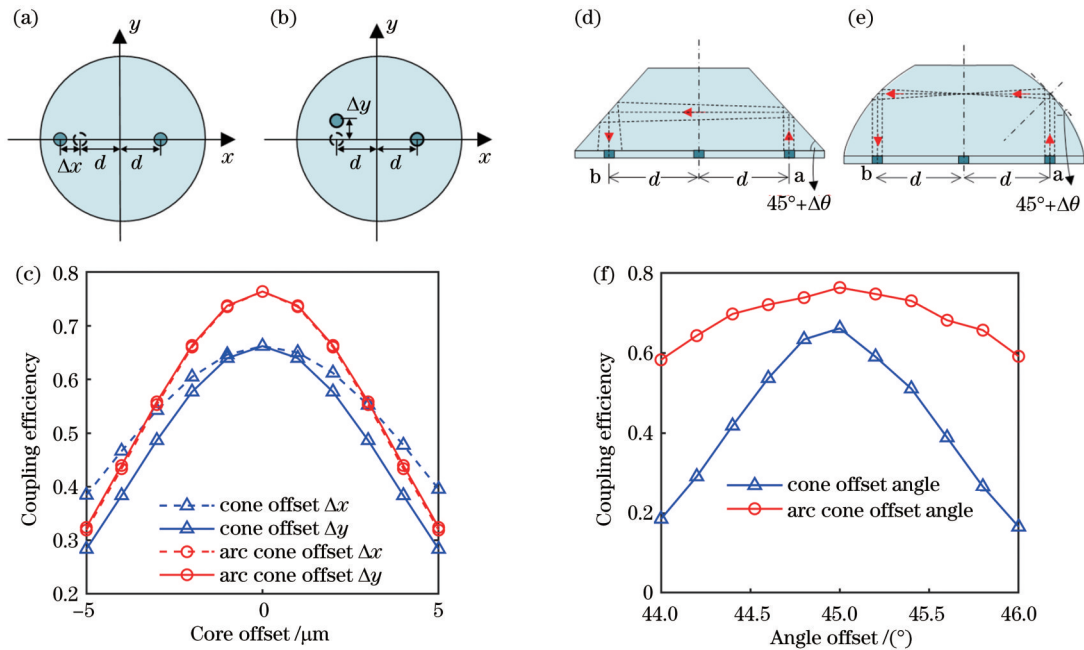


图 9 多芯光纤对角芯反射耦合器的耦合效率容差分析。(a)(b)纤芯在 x 和 y 方向上的偏移量示意图;(c)耦合效率随纤芯偏离误差的变化曲线;(d)(e) 45°圆台和弧形圆台底角的制备误差示意图;(f)耦合效率随圆台底角偏离误差的变化曲线

Fig. 9 Coupling efficiency tolerance analysis of multi-core fiber diagonal reflection coupler. (a)(b) Offsets of fiber core in x and y directions; (c) variation curves of coupling efficiency with fiber core deviation error; (d)(e) base angle preparation error of 45° cone frustum and arc cone frustum; (f) variation curves of coupling efficiency with base angle deviation error

角的变化关系,如图 9(f)所示。显然,在 $-1^\circ < \Delta\theta < 1^\circ$ 时,弧形圆台耦合效率基本能稳定在 60% 以上,可见其对研磨工艺的精度具有更大的容差。

5 结 论

提出并优化了一种多芯光纤对角芯反射耦合器,实现了多芯光纤对称纤芯的光路低损耗串联。该器件是通过精密研磨的方法,在多芯光纤纤端制备 1 个反射圆台。为了提高器件对角芯的耦合效率,减小插入损耗,对 45° 圆台的表面形状进行了抛物线弧形优化。通过时域有限差分的方法,分别建立了 45° 圆台和弧形圆台三维模型,结果表明,优化后的弧形圆台相较于优化前具有更好的制备容差和性能。通过精密研磨和电弧熔融优化,成功制备了 45° 圆台和弧形圆台,并且插入损耗的测试结果与仿真结果基本吻合。这类器件实现了多芯光纤对角纤芯的低损耗串联,并且整个器件制备位于光纤纤端,结构紧凑,可在拉曼分布式测温方面,尤其是在油田、油井等空间狭窄的情形下具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Nakajima K, Matsui T, Saito K, et al. Multi-core fiber technology: next generation optical communication strategy[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2017, 1(3): 38-45.
- [2] 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 Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106003.
- [3] Saitoh K, Matsuo S. Multicore fiber technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 55-66.
- [4] 苑立波. 多芯光纤特性及其传感应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170612.
- Yuan L B. Multi-core fiber characteristics and its sensing applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170612.
- [5] Zhang X T, Yuan T T, Yang X H, et al. In-fiber integrated optics: an emerging photonics integration technology[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(11): 110601.
- [6] Zhao Z Y, Tang M, Lu C. Distributed multicore fiber sensors [J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(2): 190024.
- [7] 夏启, 王洪业, 杨世泰, 等. 多芯光纤形状传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306012.
- Xia Q, Wang H Y, Yang S T, et al. Research development of multi-core optical fiber shape sensing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306012.
- [8] Du H Z, Wu H, Zhang Z S, et al. Single-ended self-calibration high-accuracy Raman distributed temperature sensing based on multi-core fiber[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 34762-34769.
- [9] Ko W, Feder K S, Sun X G, et al. Simultaneous interrogation of multiple cores in a shape sensor fiber with a graded index fiber micro-turnaround[J]. Optics Express, 2022, 30(14): 24452-24460.
- [10] Soto M A, Signorini A, Nannipieri T, et al. Impact of loss variations on double-ended distributed temperature sensors based on Raman anti-Stokes signal only[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1215-1222.
- [11] Soto M A, Signorini A, Nannipieri T, et al. High-performance Raman-based distributed fiber-optic sensing under a loop scheme using anti-Stokes light only[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(9): 534-536.

Diagonal Core Reflection Coupler on Multi-Core Fiber

Yang Shitai^{1,2}, Chen Dawei³, Duan Shaochen³, Chen Yijian³, Deng Hongchang³,
Teng Chuanxin³, Yuan Libo^{1,3*}

¹Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics, Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin 150006, Heilongjiang, China;

²College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150006, Heilongjiang, China;

³School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract

Objective The popularization and application of multi-core fiber cannot be realized without integrated devices with various functions. Therefore, how to build micro-optical devices with higher integration, better performance, and richer functions in a single multi-core fiber has become a research hotspot in recent years. This paper proposes a diagonal core reflection coupler based on multi-core fiber, which can connect the optical path of the diagonal core with an arcuate shape frustum on the multi-core fiber tip.

Methods The proposed diagonal core reflection coupler is suitable for multi-core fibers with centrosymmetric core distribution (Fig. 1). With seven-core fiber as an example, after the end of the fiber is fused with a short coreless fiber, a 45° frustum is prepared by precision grinding, as shown in Fig. 2 (a). The frustum can realize the connection of three pairs of diagonal core optical paths. For example, the light in the fiber core a can be reflected twice through the surface of the frustum with a base angle of 45° and then transmitted in reverse to the fiber core b, and vice versa. When the beam leaves

the core a and enters the coreless fiber, diffraction diffusion will occur. Then a large part of the beam cannot be coupled into core b after it is reflected twice by the 45° frustum. To illustrate the diffraction divergence of the beam during reflection, this paper builds a three-dimensional optical model as shown in Fig. 2 (c) through the finite-difference time-domain method for core spacing $d=38\ \mu\text{m}$, and five key monitors are constructed along the beam propagation path. The monitor can provide feedback related to the optical field distribution of the section at this position, and the results are respectively displayed in Fig. 2 (d)–(h). The monitor M3 shows the light field distribution of two symmetrical side core profiles in Fig. 2 (b). Serious diffracted beam does occur during transmission and reflection. The light field is matched as much as possible with the fundamental mode field of core b, the coupling efficiency when the beam is transmitted to core b is improved, and the 45° frustum at the fiber end is optimized by an arc melt-shaping method to improve the divergence effect of the beam in the xoz plane. As shown in Fig. 3 (a) and (b), if the reflecting interface of the frustum is arcuate, the beam emitted from core a will have a focusing effect after being reflected at point A. Since cores a and b are symmetrical, when the focusing and divergence effects offset each other, the beam can be efficiently coupled into core b after the second reflection. Paraboloid is selected as the optimized shape, and the general shape function Eq. (1) is obtained.

Results and Discussions The 45° frustum is prepared by precision grinding of the fiber end, and the arcuate shape frustum is prepared by the arc melting shaping method. Then the shape outline of the arcuate shape frustum is extracted and compared with the theoretical design. The tests indicate that the reflection coupling efficiency of the arcuate shape frustum is improved from 61.1% of the 45° platform before optimization to 72.6%, showing an obvious optimization effect. Finally, this paper discusses two important factors that affect the coupling efficiency in the preparation of a diagonal core reflection coupler, including the core shift of the multicore optical fiber and the base angle shift of the frustum. The results reveal that the arcuate shape frustum can provide greater tolerance in the preparation.

Conclusions In this paper, a diagonal core reflection coupler on multi-core fiber tip is presented and optimized to realize the low loss connection of the optical path of multi-core fiber symmetric core. The device is designed to fabricate a reflection frustum at the end of a multi-core fiber by the precision grinding method. The surface shape of the 45° frustum is optimized by an arcuate shape frustum to improve the coupling efficiency of the diagonal core and reduce the insertion loss. Through the finite-difference time-domain method, the three-dimensional models of the 45° frustum and the arcuate shape frustum are built respectively. The results show that the optimized arcuate shape frustum has better preparation tolerance and performance than that before optimization. By precision grinding and arc melting optimization, the 45° frustum and the arcuate shape frustum are fabricated successfully, and the insertion loss test results are basically consistent with the simulation results. This kind of device realizes low loss connection of multi-core fiber diagonal fiber core, and the whole device is prepared on the fiber end of the fiber with a compact structure, which can be employed in Raman distributed temperature measurement, especially in the case of narrow space such as oil field and oil wells.

Key words fiber optics; multi-core fiber; reflection coupler; insertion loss; optical fiber end grinding