

嵌入式微结构光纤器件的制作与研究

于海娇 闫奇 刘永军 田赫 孙伟民

(哈尔滨工程大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 提出了一种基于大芯径塑料包层光纤的嵌入式微结构光纤器件,该结构的锥区末端具有均匀的折射率分布与光场分布。理论分析结果表明,耦合系数随着锥区直径的减小呈现指数形式增大,增大锥区的长度可以使器件的损耗减小。实验上采用固定式加热方法和移动式加热方法分别制作了这种器件,使用移动大热区拉锥系统可以使锥区的长度增大近 5 倍。利用波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光,测试了该器件不同长度锥区的损耗,锥区长度为 0.7 cm 时损耗约为 2.63 dB,而锥区长度为 3.4 cm 时损耗约为 1.06 dB,锥区长度对器件损耗的影响与理论分析一致,可以通过改进器件的结构实现低损耗传输。

关键词 光纤光学;塑料包层光纤;拉锥;模式耦合

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0605002

Fabrication and Study of the Embedded Microstructure Fiber Device

Yu Haijiao Yan Qi Liu Yongjun Tian He Sun Weimin

(Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract An embedded microstructure fiber device with large-core plastic cladding fibers inserted is presented. The refractive index profile of the taper end is uniform, and so is the power distribution. On the basis of the theoretical analysis, the coupling coefficient of the nearest-neighboring fibers is exponentially decreased with the decreasing diameter of the taper. The transmission loss of the device is lower when the length of the taper is longer. This kind of devices are fabricated by the fixed flame method and the movable flame method, respectively. The taper is elongated nearly five times by the movable large-hot-zone fiber-tapering system. The transmission loss of the two devices from one inserted fiber to the taper end is measured with He-Ne laser at about 632.8 nm wavelength. The loss values are about 2.63 dB with the taper length of 0.7 cm and 1.06 dB with the taper length of 3.4 cm. The influence of the taper length agrees with the theoretical analysis, and low-loss device can be achieved by improving the structure.

Key words fiber optics; plastic cladding fiber; taper; mode coupling

OCIS codes 060.1810; 060.2340; 060.2280

1 引言

目前,光纤已经发展成一个庞大的研究领域,光纤的种类繁多,光纤器件更是五花八门。光纤已经从通信^[1]和传感^[2]领域逐渐应用到各个领域,如医学^[3]、工程测量^[4]、天文光学^[5]等。近年来,光纤以频带宽、抗电磁干扰能力强、抗腐蚀性强、成本低等优点得到了天文研究者的广泛关注。光纤型“光子灯笼”就是一种可以被应用于天文学的光纤器件,

2005年,Leon-Saval等^[6]提出将多根单模光纤嵌入到光子晶体光纤预制棒中,经过熔融拉锥形成多模波导。2009年,Noordegraaf等^[7]制作出了第一个含7根单模光纤端口的实心固体型光子灯笼。这种制作方法使光子灯笼的多模部分不含有空气孔,制作工艺相对简单。

本文中提出的这种嵌入式微结构光纤器件就是光子灯笼的一种,实际上这种器件就是一种模式分

收稿日期: 2012-12-29; **收到修改稿日期**: 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(11078009,61107059)和中科院天文光学技术重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 于海娇(1986—),女,博士研究生,主要从事嵌入式微结构光纤器件方面的研究。

E-mail: haihai951@yahoo.com.cn

导师简介: 孙伟民(1968—),男,博士,教授,主要从事光学传感器和光学信息处理等方面的研究。

E-mail: sunweimin@hrbeu.edu.cn(通信联系人)

解/合并器。无论是将光纤嵌入到光子晶体预制棒中^[6,8],还是嵌入到玻璃毛细管中^[7,9,10]制成的器件,都是将多根光纤阵列中的光模式与一个单芯层波导中的光模式进行相互转换,将模式分解或者合并。这种嵌入式微结构光纤器件不仅可以用于天文学,也可以用于通信、传感、激光技术等领域,如制成激光器^[11],用于非相干激光信号的组合^[12],或者产生宽谱光源^[13]等。

但是目前制作这种器件所使用的光纤都是单模光纤,嵌入到基底材料中经熔融拉锥形成多模波导,其包层由基底材料形成,芯层由单模光纤形成。由于单模光纤本身的纤芯和包层由两种折射率材料组成,因此多模波导的芯层折射率分布不均匀,这就导致了其出射光场的分布不均匀^[7]。

本文提出的这种嵌入式微结构光纤器件,使用的光纤为塑料包层多模光纤,其包层可以溶于丙酮溶液,而纤芯完好无损。将嵌入部分的光纤包层完全去除后,再嵌入到二氧化硅毛细管中,这样经熔融拉锥形成新的波导,其芯层部分就具有均匀的折射率分布,因此得到的光场分布也是均匀分布的。如果该器件的锥区长度合适,就可以实现低损耗传输。

2 嵌入式微结构光纤器件的理论研究与仿真结果

对嵌入式微结构光纤器件的理论分析主要采用两个理论,多光纤耦合理论和缓变波导耦合理论^[14]。这里所说的缓变是指波导沿着光传输方向(z 轴方向)的非均匀性变化缓慢。这种缓变波导没有精确的场解,但是可以通过局域模式进行近似,如图1所示。其中曲线代表缓变波导的实际形状,阶梯状直接代表缓变波导的近似模型,将波导微分成很多段,每段长度为 δ_z ,中心位置为 z_c ,折射率分布为 $n(x, y, z)$ 。缓变波导中模式的振幅以及相位都随 z 变化,在任意位置 $z = z_c$ 处的局域模式与对应于 $z = z_c$ 处的折射率分布为 $n(x, y, z_c)$ 的无限长均匀光纤所传播的模式相近似。由于波导沿着 z 方向

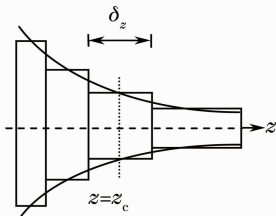


图1 缓变波导的理论近似模型

Fig. 1 Approximation of a slow varying waveguide

的非均匀性有变化,因此在同一个波导内也存在不同模式之间的耦合现象。

与此同时,嵌入光纤之间相互存在模式耦合,采用多光纤的模式耦合理论进行分析。相邻的两根光纤的耦合系数为^[14]

$$C_{jk}(z) = C_{kj}(z) \cong \frac{1}{4} \frac{k}{N_j} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \int_{S_\infty} (n^2 - n_j^2) \psi_j \psi_k dS, \quad (1)$$

式中 ϵ_0 和 μ_0 分别是真空介电常数与磁导率, N_j 是模式归一化常数,与归一化频率 V 相关, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, ψ_j 是第 j 个光纤在独立情况下的标量波动方程解, S 表示光纤横截面上面积微元, S_∞ 表示对无穷大的横截面进行积分。定义 n 为复合波导的折射率分布,即在纤芯处 $n = n_{co}$,其余位置处 $n = n_{cl}$ 。 n_j 为第 j 个光纤的折射率。这里 $N_j, n, n_j, \psi_j, \psi_k$ 都是随 z 变化的。由于嵌入的光纤为同种折射率分布的阶跃光纤,因此任意两相邻光纤的耦合系数均相同。分别使用高斯远场和近场的近似表达式代替 ψ_j, ψ_k ,就可以求得基模的近似耦合系数:

$$C = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\Delta}{\pi A} \right)^{1/2} \frac{V^3 \ln V}{(V^2 - 1)(V - 1)^{1/2}} \times \exp \left[(V - 1) \left(\frac{V}{V + 1} - A \right) \right], \quad (2)$$

式中 Δ 是光纤折射率差, $A = d/\rho$ 是光纤的相对间距, d 是两光纤的中心间距, ρ 为光纤直径。

图2给出了归一化的耦合系数 $\lg[(\rho C/\Delta)^{1/2}]$ 随 V 和 A 的指数变化曲线。当 V 不变时,耦合系数随 A 减小而呈现指数形式的增大。因此在进行多光纤耦合理论分析时,只考虑最邻近的两光纤耦合,而忽略其他光纤之间的耦合。在锥区部分,光纤的芯径沿着 z 轴逐渐减小,归一化频率 V 也随之减小,因

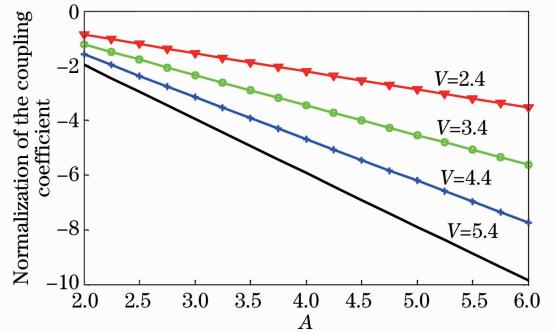


图2 归一化耦合系数 $\lg[(\rho C/\Delta)^{1/2}]$ 随归一化频率 V 和相对间距 A 的指数变化曲线

Fig. 2 Relation curves between relative separation A and normalized coefficient $\lg[(\rho C/\Delta)^{1/2}]$ at different normalized constants

此(2)式表示的耦合系数也随着 z 轴变化。当 A 不变时,耦合系数随着 V 的增大而减小,而且 V 越大,耦合系数对 A 的变化越敏感。对于大芯径的光纤,即使间距很小,由于 V 值很大,其耦合效应也会非常弱,当 V 减小到一定的程度,耦合效应才明显。

图 3 是采用光束传输法进行的仿真分析图,此方法可以直观地反映出光沿着波导的传播情况。图 3 中仿真参数如下:纤芯和包层折射率分别为 1.4600、1.4575,嵌入纤芯直径为 $90\ \mu\text{m}$,中心间距为 $100\ \mu\text{m}$,拉锥比例为 $1/3$ (直径方向),其中锥区形状为弧形,始末位置分别为 z_0 和 z_1 。波长为 $632.8\ \text{nm}$ 的高斯光由底部(嵌入光纤端)入射。图 3(a)分别对应图 3(b)中 z_0 和 z_1 处的横截面仿真

图,从图中可以看出:在 z_0 位置处入射光的能量主要集中在嵌入光纤的纤芯内,而且不同光纤之间存在能量耦合,但很弱;在 z_1 位置处,能量主要集中在出射多模波导的纤芯区。图 3(b)是在 $y=0$ 的平面内, z 轴方向上的光能量分布曲线。图 3(c)~(e)分别对应锥区长度 L 为 3×10^4 , 4×10^4 , $5\times 10^4\ \mu\text{m}$ 的能量监测结果。从光场的横向和纵向分布图可以看出,光能量主要集中在嵌入光纤中。只改变锥区长度时,光纤中传播的能量有所差别,锥区长度为 $5\ \text{cm}$ 时,纤芯中束缚的能量要比锥区长度为 $3\ \text{cm}$ 时大,损耗相对要小。可见锥区的长度对器件的损耗有直接的影响,锥区越长,损耗越小。

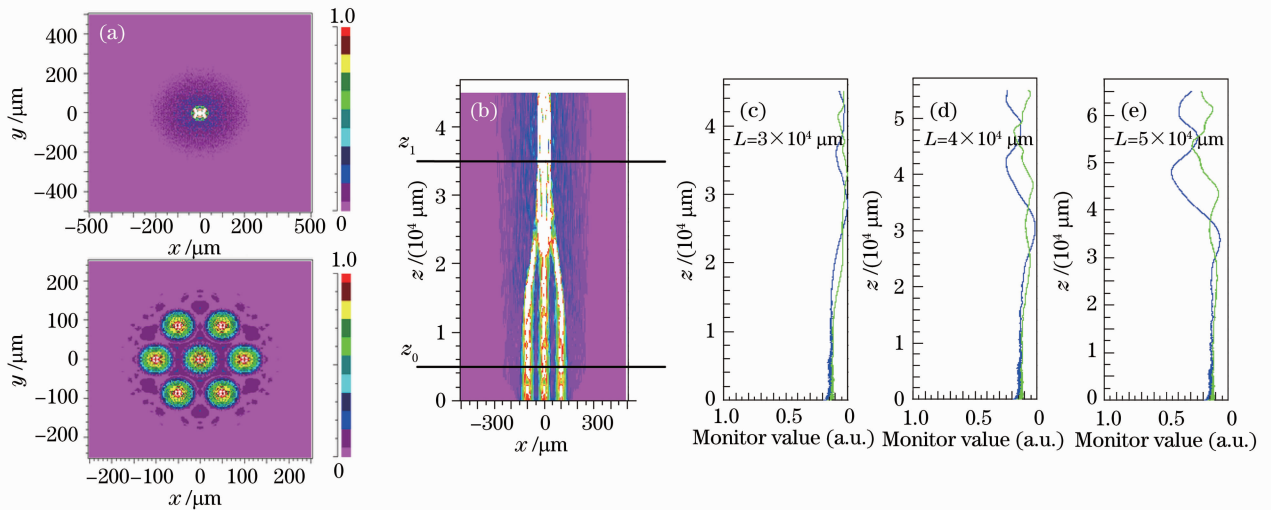


图 3 利用光束传播法对嵌入式微结构光纤器件的仿真分析结果。(a) 横向光场分布;(b) 纵向光场分布图;(c)~(e) 为能量监测图,其中蓝色线代表图(b)中左侧纤芯能量分布,绿色线代表中间纤芯的能量分布

Fig. 3 Simulation results of embedded microstructure optical fiber device by beam propagation method. (a) Contour map of transverse field profile; (b) contour map of longitudinal field profile; (c)~(e) monitored power diagrams, the blue, green lines represent the light power of the left and middle cores in (b), respectively

3 嵌入式微结构光纤器件的制作

为了使得拉锥形成的多模波导的芯层具有均匀的折射率分布,嵌入的光纤只能具有单一的折射率。如果采用普通的石英包层光纤,其纤芯和包层难以分离。采用氢氟酸腐蚀的方法虽然可以有效地除去包层,但是由于腐蚀不均匀可能会造成包层的残留或者对光纤纤芯的损伤,其表面缺陷也可能影响器件的性能。因此实验中采用大芯径的塑料包层多模光纤,其包层可以完全溶于丙酮溶液,而纤芯完好无损。将除去包层的光纤(直径为 $125\ \mu\text{m}$)嵌入到纯二氧化硅毛细管(内径为 $400\ \mu\text{m}$,外径约为 $600\ \mu\text{m}$)中,这样经过熔融拉锥形成的多模波导,其

芯层折射率只有一种且均匀分布。

嵌入的光纤在毛细管中呈六角排列,如图 4 所示。其中图 4(b)是毛细管经过熔融拉锥之后,锥区起始端的照片,虽然光纤有轻微的形变,但是光纤在毛细管内仍有序排列。从仿真结果可知,锥区的长度对器件的损耗影响很大。因而在拉锥比例不变的条件增大锥区的长度,可以有效地减小器件损耗。一般的拉锥熔融方法,其加热火焰都是固定的,如图 5(a)所示。当火焰宽度一定时,如果火焰位置固定,就会使加热区域受限,锥区的长度也就受到了限制。采用固定火焰加热法制成的器件,其锥区的长度约为 $0.7\ \text{cm}$,如图 5(b)所示。为了增大火焰加热的区

域,可采用移动火焰的加热方法^[15],如图 5(c)所示。火焰在整个拉锥的过程中沿着拉锥的方向做往返移动,拉锥系统共有 4 个可控参数,分别是预制棒向两侧的移动速度、火焰的移动速度、往返次数以及每次移动的距离。通过对这些参数的设定,可有效地控制锥区的长度以及形状。采用这种方法可以有效地增大加热区域,从而增加锥区长度,减小器件的损耗。除了拉锥参数可控,火焰的温度也可以通过控

制可燃气体与氧气的流量来控制,选定拉锥参数和气体流量参数后,就可以保证器件制作的重复性。图 5(d)均采用移动火焰加热法制成的器件,锥区长度约为 3.4 cm。由于锥区长度过长,无法在一个视场内显示,因此选取锥区不同位置的照片片段进行了拼接。从图 5(b)和(d)对比也可以看出,锥区长度的增加,使直径变化变缓,因而可以有效地降低光的传输损耗。

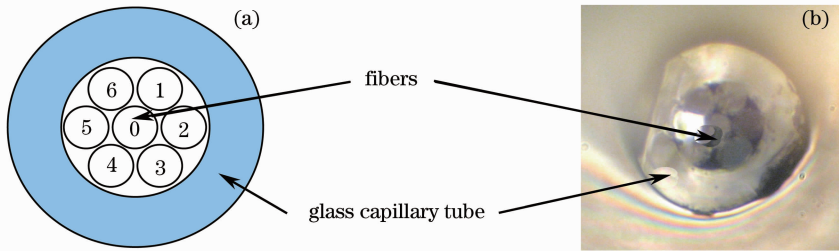


图 4 嵌入式微结构光纤器件的嵌入端结构示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of the inserted fibers in embedded microstructure fiber device

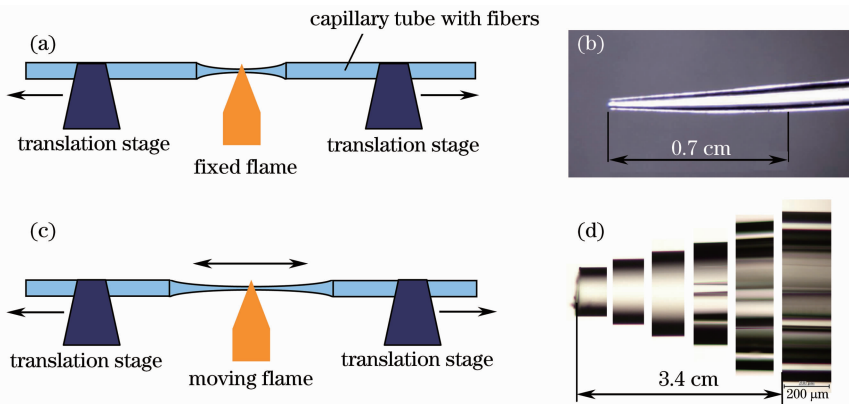


图 5 加热方法和锥区形态。(a) 固定火焰加热法;(b) 固定加热法的锥区形态;
(c) 移动火焰加热法;(d) 移动火焰加热法的锥区形态

Fig. 5 Heating methods and taper shapes. (a) Fixed flame method; (b) taper shape after tapering by fixed flame method;
(c) moving flame method; (d) taper shape after tapering by moving flame method

4 实验结果分析

4.1 锥区末端近场分析

光纤嵌入毛细管中经过拉锥之后,各个纤芯融合在一起,最后形成多模波导的芯层。图 6(a)为锥区末端的显微镜照片,从图中可以看出,波导中间芯层部分具有均匀的折射率分布,芯层和包层有明确的分界线。但是芯层部分形状并不是规则的圆形,可能是由于拉锥过程中各个光纤与毛细管受热不均造成的。

当光从嵌入光纤中入射时,可以观测到锥区末端的近场图像。图 6(b)为白光入射至任意一根嵌入光纤时,锥区末端的近场图像,其中倾斜的白色明

亮的痕迹为切割的刀痕。当光从任意一根嵌入光纤入射时,锥区末端出射光场相同,光场主要分布在纤芯部分。从图中可以看出,出光场在纤芯内分布均匀,且与入射的嵌入光纤无关。这说明光从嵌入光纤入射后,在拉锥区域与其他嵌入光纤进行耦合,使每一根光纤中均有光传输,在锥区末端,各个纤芯完全熔为一体,形成折射率单一且分布均匀的波导,光场均匀出射。这与图 6(a)中显微镜下观察到锥区末端的折射率分布情况吻合。

如果在毛细管中嵌入单模光纤,经过同样的移动式火焰拉锥过程制成光纤器件,则锥区末端的出射光场并不均匀,如图 7 所示。从图 7 中可以看出,

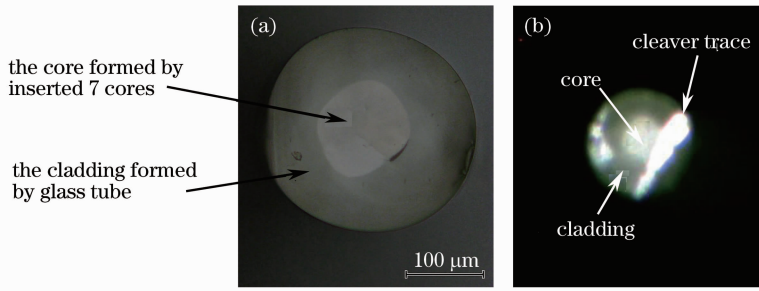


图 6 (a) 锥区末端的显微镜照片;(b) 白光从任意一根嵌入光纤入射时锥区末端的近场图片

Fig. 6 (a) Microscope picture of the taper end; (b) near-field image of the taper end when the visible light is coupled into any of the inserted fibers

锥区末端光场在纤芯与包层处并没有明显的分界,这是由于单模光纤的包层与毛细管的折射率几乎相同,因而熔融拉锥后光纤与毛细管熔为一体。而单模光纤的纤芯虽然折射率偏高,但是经拉锥后,原单模纤芯变得太细,不能将光完全束缚,只能使光场大部分分布在原单模纤芯的位置处,且这种分布是不均匀的。如果将毛细管换成低折射率材料,虽然可以将嵌入的单模光纤包层作为锥区芯层来束缚光场,但是嵌入单模光纤的纤芯仍然存在,并且影响出射光场,使出射光场分布不均^[7]。

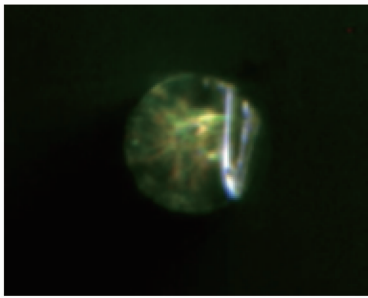


图 7 嵌入单模光纤的器件锥区末端的近场图片

Fig. 7 Near-field image of the taper end which is embedded with single mode fibers

4.2 传输损耗

传输损耗反映了器件的传光效率,测试了光从嵌入光纤入射,经拉锥区域后的传输损耗。图 8 为截断法测试损耗的实验装置,分别对图 2(b)和(d)中的器件进行测试。其中使用光源为 He-Ne 激光器(波长为 632.8 nm),光源与嵌入光纤之间通过一

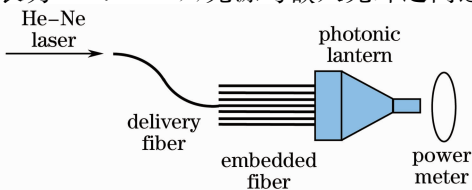


图 8 损耗测试装置

Fig. 8 Setup for loss measurement

根导引光纤相连,先测出导引光纤的出射光强,再将导引光纤与嵌入光纤熔融连接,连接损耗可以忽略不计。此时导引光纤出射光即为器件的入射光,只需再测出拉锥端出射光强,即可得到器件的损耗。用截断法分别对 7 个嵌入光纤端口进行测试,表 1 和表 2 分别列出了两个器件的测试结果。

表 1 由嵌入光纤一端到锥区末端的损耗测试结果 (锥区长度为 0.7 cm)

Table 1 Transmission loss from an inserted fiber port to the taper end with the taper length of 0.7 cm

Input port	Input power / μ W	Output power / μ W	Loss /dB
1	46	22	3.20
2	44	22	3.01
3	48	23	3.19
4	47	29	2.10
5	34	16	3.27
6	39	25	1.93
7	34	23	1.70
Average			2.63

表 2 由嵌入光纤一端到锥区末端的损耗测试结果 (锥区长度为 3.4 cm)

Table 2 Transmission loss from an inserted fiber port to the taper end with the taper length of 3.4 cm

Input port	Input power / μ W	Output power / μ W	Loss /dB
1	47	37	1.04
2	46	32	1.58
3	46	37	0.94
4	47	39	0.81
5	46	35	1.19
6	46	37	0.94
7	45	34	1.22
Average			1.06

表 1 和表 2 中探测的入射能量为导引光纤的出射能量,出射能量为锥区末端的出射能量。测试结

果显示,当锥区为 0.7 cm 时,器件的平均损耗约为 2.63 dB;而当锥区为 3.4 cm 时,平均传输损耗为 1.06 dB。由于仿真模型与实际制作的器件之间存在一定的结构差异,因此仿真结果与实际测量结果难以进行定量的对比分析,但从定性的角度分析,两者具有较好的一致性。仿真结果与实验结果都说明:锥区的长度对器件的损耗影响很大,较长的锥区可以有效地减小器件的损耗。另外,该测试器件在拉锥过程中芯层的形状发生改变[如图 6(a)所示],这也会影响器件本身的传光性能。

5 结 论

研究了一种利用大芯径塑料包层光纤制成的嵌入式微结构光纤器件。该器件是将除去涂覆层及包层的光纤嵌入到纯二氧化硅毛细管中,熔融拉锥制成。理论分析结果显示,光纤之间的耦合系数随着锥区直径的减小而增大。锥区的长度对器件的损耗有直接的影响,锥区越长,损耗越小。采用移动火焰加热的方法可以有效地增大锥区的长度,与固定火焰加热的方法相比,锥区长度增大近 5 倍。当锥区长度为 0.7 cm 时,平均传输损耗为 2.63 dB;而当锥区长度为 3.4 cm 时,传输损耗降为 1.06 dB。该器件在锥区末端具有均匀的折射率分布以及光场分布。通过的锥区末端近场光能量分布以及嵌入光纤到锥区末端的传输损耗的测试可以看出,采用这种方法可以实现嵌入光纤器件内均匀的光场分布以及低损耗的传输性能。

参 考 文 献

- Zhou Cuiyun, Liu Yuan, Du Songtao *et al.*. 1030 nm high repetition rate nanosecond pulse all fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802010
周翠芸, 刘 源, 杜松涛等. 1030 nm 高重复频率纳秒脉冲全光纤放大器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802010
- Wang Tingyun, Pang Fufei, Chen Zhenyi *et al.*. Research on cladding mode resonant specialty optical fibers and their sensing

- properties[J]. *Acta Opica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900140
王廷云, 庞拂飞, 陈振宜等. 包层模谐振特种光纤及传感特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900140
- Jae-Ho Han, J. U. Kang. Microball lens integrated fiber probe for optical frequency domain imaging[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(9): 090608
- Hu Zhengsong, Yang Qihua, Qiao Bo. Design of interference distributed fiber-optic underwater long gas pipeline leakage detection system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(7): 070602
胡正松, 杨其华, 乔 波. 干涉分布式光纤水下长输气管道泄漏检测系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(7): 070602
- Joss Bland-Hawthorn. Astrophotonics: the next wave in observational cosmology [C]. 35th Australian Conference on Optical Fiber Technology, 2010. 1~2
- S. G. Leon-Saval, T. A. Birks, J. Bland-Hawthorn *et al.*. Multimode fiber devices with single-mode performance[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2545~2547
- Danny Noordegraaf, Peter M. W. Skovgaard, Martin D. Nielsen *et al.*. Efficient multi-mode to single-mode coupling in a photonic lantern[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 1988~1994
- S. G. Leon-Saval, T. A. Birks, N. Y. Joly *et al.*. Splice-free interfacing of photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(13): 1629~1631
- D. Noordegraaf, P. M. W. Skovgaard, M. D. Maack *et al.*. Multi-mode to single-mode conversion in a 61 port photonic lantern[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 4673~4678
- D. Noordegraaf, P. M. W. Skovgaard, R. H. Sandberg *et al.*. Nineteen-port photonic lantern with multimode delivery fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(4): 452~454
- Zhang Xiaolei, Peng Gangding, Zhang Xingyu *et al.*. Pure single mode output of six-core fiber laser based on single-mode fiber mode selection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802002
张晓磊, 彭刚定, 张行愚等. 基于单模光纤选模机制的单模输出 6 芯光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802002
- D. Noordegraaf, M. D. Maack, P. M. W. Skovgaard *et al.*. All-fiber 7 × 1 signal combiner for incoherent laser beam combining[C]. *SPIE*, 2011, **7914**: 79142L
- Qi Yan, Haijiao Yu, Fengjun Tian *et al.*. A 5-port photonic lantern for light beam combining [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **571**: 261~264
- Allan W. Snyder, John D. Love. *Optical Waveguide Theory* [M]. London: Chapman and Hall, 1983. 407~419, 570~571
- Sun Weimin, Yuan Ming, Zeng Xianjin *et al.*. Impact analysis of setting parameter of movable large-zone furnace fiber-tapering system to shape of tapered fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0705005
孙伟民, 袁 明, 曾宪金等. 移动大热区拉锥系统中设定参数对拉锥光纤形状的影响分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0705005

栏目编辑:王晓球