

# 扩芯-拉锥技术对光子晶体光纤合束器性能的改善

周 航 陈子伦 李 杰 侯 静 陈金宝

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 设计了一种新型的光子晶体光纤(PCF)合束器,利用光子晶体光纤的后处理技术塌缩纤芯周围的三圈空气孔使纤芯直径增大,再对 PCF 合束器进行熔融拉锥,将多路熔融拉锥后的光子晶体光纤熔接到一路多模光纤作为输出端。通过数值模拟计算得到:扩芯-拉锥 PCF 合束器在入射不同波长时的轴向损耗远小于直接拉锥 PCF 合束器。

**关键词** 光纤光学;光子晶体光纤;选择性空气孔塌缩;合束器;拉锥;传输损耗

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0905006

## Improved Performance of PCF Combiners with Expanded Core-Tapered Technology

Zhou Hang Chen Zilun Li Jie Hou Jing Chen Jinbao

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A novel design of photonic crystal fiber (PCF) combiners is demonstrated. First, collapse three rings of air holes near to the fiber core using the post-processing techniques of PCFs, to enlarge the core. Then, taper it. Finally, splice the tapered multi-photonic crystal fibers into a multimode fiber for output. The axial losses of the directly tapered combiners and the expanded core-tapered combiners at different incident wavelengths are simulated and compared. The results show that the transmission losses of the expanded core-tapered combiners are far below those of the combiners without using the technology.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber; controlled hole collapse; combiners; taper; transmission loss

**OCIS codes** 060.5295; 060.2280; 060.2310; 060.2270

## 1 引 言

英国巴斯大学的 Russell<sup>[1]</sup>于 1992 年提出,并于 1996 年成功拉制出第一根光子晶体光纤(PCF)<sup>[2]</sup>。PCF 在结构上与普通光纤有着根本区别,它由单一介质构成,在光纤包层中沿轴向周期性排列着波长量级的空气孔,光被限制在纤芯中通过全内反射原理进行传输。由于其空气孔的大小、排列和形状可以在很大范围内进行调节,所以通过调节空气孔可以灵活地改变光子晶体光纤的模场分布和色散特性<sup>[3,4]</sup>。光子晶体光纤的后处理技术是实现其潜在应用价值的重要技术手段,主要包括拉锥技术、膨胀后拉锥技术和选择性空气孔塌缩技术等。

其中选择性空气孔塌缩技术可以选择性地塌缩光子晶体光纤的某些空气孔,并使塌缩后的空气孔和原始纤芯形成新的纤芯形状,即通过此技术可以任意改变光子晶体光纤的纤芯形状,如环形芯、矩形芯等。

功率合束器是将多个中等功率的光纤激光合并到单根光纤输出来获得高功率光纤激光的关键器件。光子晶体光纤的出现给合束器的制作带来了新的发展方向,在 PCF 合束器中光传输时的波导都被一层玻璃所包围,因此光束不会到达装置的表面,不会受到机械接触和洁净度的影响<sup>[5]</sup>,而传统合束器至少在锥形区域要保持绝对的洁净,表面的污染物

**收稿日期**: 2011-04-19; **收到修改稿日期**: 2011-05-20

**基金项目**: 国家自然科学基金(61007037)和教育部新世纪优秀人才计划(NCET-08-0142)资助课题。

**作者简介**: 周 航(1987—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤合束器方面的研究。E-mail: sy20200563@sina.com

**导师简介**: 陈金宝(1970—),男,博士,研究员,主要从事高能激光方面的研究。E-mail: kdchenjinbao@yahoo.com.cn

会造成散射、发热甚至导致整个系统损坏。

本文根据光子晶体光纤的特殊结构,提出一种新型的 PCF 合束器,通过光子晶体光纤后处理技术使光子晶体光纤纤芯周围的空气孔塌缩,增加光子晶体光纤模场直径,保证了拉锥后仍能将其尤其是长波段的光束束缚在纤芯中进行传播,进而有效降低传输损耗。

## 2 光子晶体光纤扩芯技术基本原理

在加热光子晶体光纤的时候,空气孔由于表面张力的作用会使其塌缩变小。而熔融二氧化硅中空空气孔单位面积的表面张力在温度为 1700 °C 时为<sup>[6]</sup>

$$P_{st} = 6/d, \quad (1)$$

式中  $d$  为空气孔直径。对光子晶体光纤进行加热,当空气孔内的压强  $P > P_{st}$  时,加热段空气孔将膨胀;当  $P = P_{st}$  时,空气孔将不变形;当  $P < P_{st}$  时,加热段空气孔将缩小。

图 1 为塌缩内三圈空气孔示意图。用紫外胶堵住光子晶体光纤一端的纤芯周围三圈的空气孔,并在此端充气,而把另一端的所有空气孔都堵住。于是,两端均被封住的空气孔内的压强为大气压  $P_0$ ,只有一端被封住的空气孔内的压强为外界所加压强  $P$ 。已知大气压强  $P_0 = 1.01 \times 10^5$  Pa,由(1)式可知空气孔直径的取值在一个范围内会使  $P_0 < P_{st}$ 。所以,两段均被封住的空气孔在光纤熔融状态下将不断缩小,直至中间部分完全塌缩。空气孔气压达到平衡后,用拉锥机加热一段光子晶体光纤,其加热部分范围内被两端堵住的空气孔将塌缩,形成一个新的纤芯<sup>[7]</sup>。其中火头的运动轨迹为长度逐渐减小的之字形,可以在两侧形成空气孔逐渐塌缩的过渡区域<sup>[8]</sup>,从而降低加入损耗。用切割刀从加热光纤

的中部将该光纤截断,即可得到两段纤芯直径增大的光子晶体光纤。

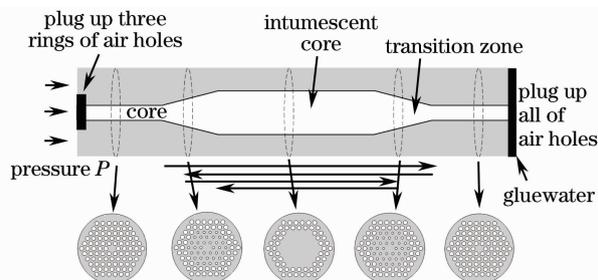


图 1 塌缩内三圈空气孔过程及轴向各段截面示意图  
Fig. 1 Process of collapsing three rings of air holes near to the fiber core and the diagram of the axial sections

## 3 模拟运算

### 3.1 结构设计

设想将多路光子晶体光纤拉锥后与多模光纤(MMF)的端面对接,从而获得一种波长适用范围广泛的功率合束器<sup>[9]</sup>。如图 2(a)所示,合束器中的光子晶体光纤包括未拉锥区、过渡区和拉锥之后的锥腰区域。其中过渡区长度  $L$  和锥腰长度  $L'$  会影响合束器的耦合效率。

在相同拉锥比例下,拉锥过渡区长度  $L$  越长损耗越小;相同过渡区长度下,拉锥比例越小损耗越小,当过渡区长度  $L$  小于拉锥衍射长度  $L_0$  时损耗较大,随着  $L$  的增大损耗会减小,但当  $L$  远大于  $L_0$  时,再增大  $L$  对减小损耗的贡献逐渐减弱<sup>[9]</sup>。经过计算,设拉锥过渡区长度  $L = 1$  mm,扩芯-拉锥的过渡区长度  $L = 3.5$  mm,锥腰  $L' = 5$  mm。而且,为了保证在拉锥开始之前光的传输功率得到稳定,设 PCF 的未拉锥长度为 5 mm。

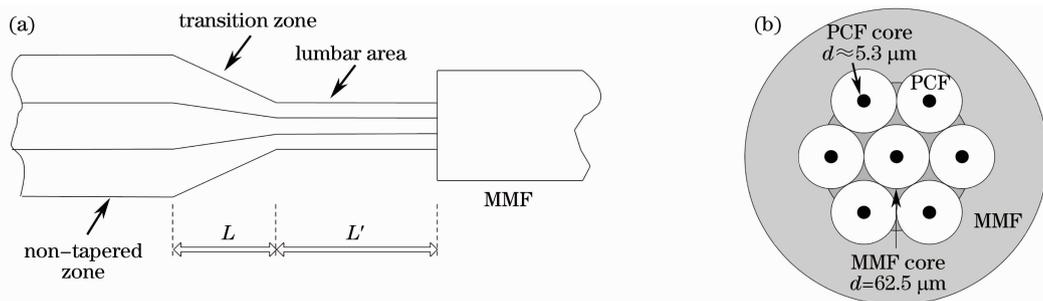


图 2 合束器结构示意图

Fig. 2 Schematic of combiners

采用的 PCF 的外径  $D = 80 \mu\text{m}$ ,空气孔直径  $d = 1.5 \mu\text{m}$ ,周期  $\Lambda = 3.4 \mu\text{m}$ 。这种 PCF 的纤芯直径在  $5.3 \mu\text{m}$  左右,由于 PCF 拉锥之后要使每路纤

芯都处于多模光纤的纤芯区域内,如图 2(b)所示。因此假设将每路 PCF 外径分别从  $D_1 = 80 \mu\text{m}$  拉锥至  $D_2 = 27 \mu\text{m}$ ,  $D_2/D_1 \approx 1/3$ 。

多模光纤采用康宁公司的纤芯直径为  $62.5\ \mu\text{m}$  的常规多模光纤,其参数如表 1 所示。

表 1 多模光纤参数

Table 1 Parameters of the multimode fiber

$D_{\text{core}}/\mu\text{m}$	$D_{\text{clad}}/\mu\text{m}$	NA	Effective refractive $\Delta n / \%$	$N_{\text{eff}}$
62.5	125	0.275	2	850 nm: 1.496 1300 nm: 1.491

合束器轴向的传输损耗是反映合束器性能的一项重要参数,轴向损耗是指沿光传播的方向,在特定部分(包括光子晶体光纤的过渡区、锥腰以及一定长度的多模光纤)的损耗情况。因为在此部分会进行光子晶体光纤的拉锥和光子晶体光纤与多模光纤的熔接<sup>[10,11]</sup>,而整个合束器损耗的绝大部分都是由于光子晶体光纤的拉锥和光耦合进入多模光纤。因此,研究并降低合束器的轴向损耗是提高合束器整体性能的重要手段。

模拟计算轴向损耗采用有限差分光束传输法。1989年,D. Yevick 等提出有限差分光束传输法(FD-BPM),即将波导的横截面分成许多方格,每一方格内的场用差分方程来表示,并加入边界条件,则可得整个横截面上的场分布,最终得到整个波导中的场分布<sup>[10~14]</sup>。有效差分光束传输法是分析复杂光波导结构的有效计算工具之一。

仿真计算所用的横向步长为  $0.1\ \mu\text{m}$ ,轴向步长为  $0.125\ \mu\text{m}$ ,入射场为基模高斯光束,束腰半径为  $2.5\ \mu\text{m}$ ,边界条件设置为透明边界条件,轴向每计算  $100\ \mu\text{m}$  输出一次横向电场的振幅和相位数据,分别仿真计算波长为 532, 800, 1064, 1310 和 1550 nm 时合束器沿轴向变化的损耗。为观察扩

芯-拉锥技术对合束器传输性能的影响,分别仿真计算直接拉锥的合束器和扩芯之后再拉锥的合束器的轴向损耗,予以比较。

模拟中设定将 PCF 的内三圈空气孔塌缩为纤芯。

### 3.2 模拟结果

分别建立直接拉锥合束器与扩芯-拉锥合束器的模型结构,为了评价 PCF-MMF 合束器的合束效果,需要在不同波长处分别进行仿真和数据处理。考虑到折射率随波长的改变而变化,采用三项 Sellmeier 方程进行拟合:

$$n^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.89616^2} \quad (2)$$

由(2)式计算出各波长下的折射率如表 2 所示。

表 2 各波长的折射率

Table 2 Refractive index of each wavelength

$\lambda / \text{nm}$	Refractive index of PCF background	Refractive index of MMF core	Refractive index of MMF clad
532	1.461	1.500	1.470
800	1.453	1.496	1.466
1064	1.450	1.494	1.464
1310	1.447	1.491	1.461
1550	1.444	1.490	1.460

经过仿真计算,首先可以观察到不同波长时合束器轴向的模场分布,以波长为 1064 nm 为例。由图 3 可以看出,扩芯-拉锥后,光纤的模场面积明显增大,并且很少有光泄露出纤芯,这保证了传输的低损耗,有更高功率的激光耦合进入光纤。

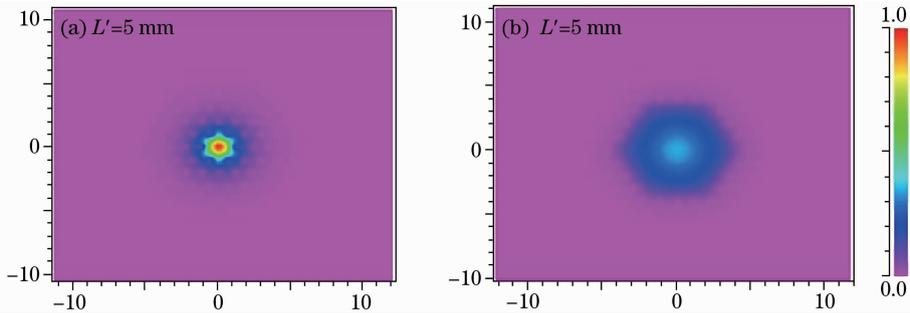


图 3 波长为 1064 nm 时锥腰处的模场分布。(a)直接拉锥;(b)扩芯-拉锥

Fig. 3 Mode field distribution of combiners when wavelength is 1064 nm. (a) Directly tapered; (b) expanded core-tapered

然后分别计算在各个波长时直接拉锥情况下的合束器  $z$  轴轴向损耗,做出曲线图如图 4 所示。由图 4 可以看出,合束器损耗变化的总趋势是随着波长的增大而增大,损耗主要出现在 PCF 与 MMF 熔

接的过程中。传输长波时,波长相对于纤芯直径比较大,光容易泄露出去,从而损耗大;而传输短波时,波长相对纤芯直径较小,模场被束缚在纤芯区,所以泄露较少。

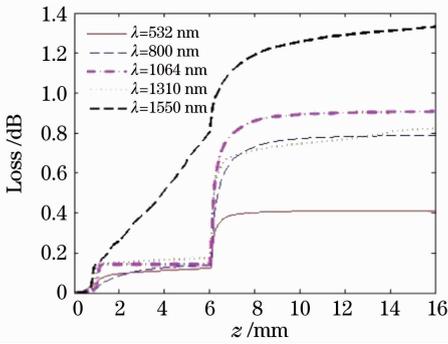


图 4 拉锥 PCF-MMF 合束器在不同波长时的轴向损耗曲线

Fig. 4 Loss of the directly tapered combiners along  $z$  with different wavelengths

在扩芯-拉锥情况下,计算合束器的轴向损耗如图 5 所示。由图 5 可以看出,合束器损耗变化的总趋势仍然是随着波长的增大而增加,与图 4 不同的是,在 PCF 与 MMF 熔接处的损耗减小了很多,使总体的损耗有了明显的降低。

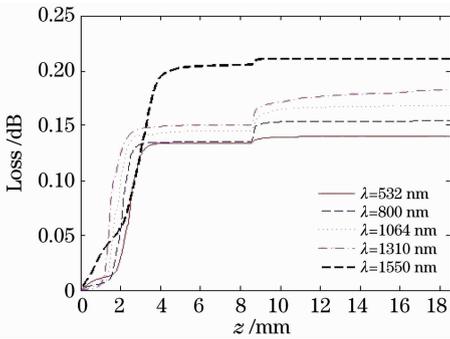


图 5 扩芯-拉锥 PCF-MMF 合束器在不同波长时的轴向损耗曲线

Fig. 5 Loss of the core expanded-tapered combiners along  $z$  with different wavelengths

由图 4 和图 5 做出合束器损耗与波长的关系曲线图如图 6 所示。图 6 直观地显示出扩芯-拉锥合束器的损耗有了明显的降低,尤其显著改善了长波传输时的损耗。

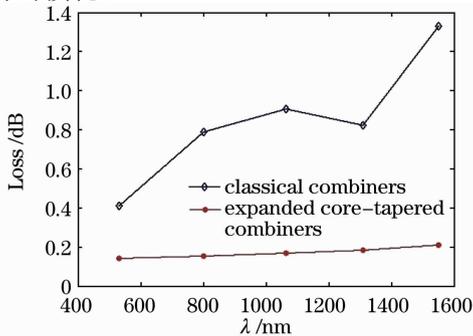


图 6 合束器损耗随波长变化的曲线

Fig. 6 Losses change with the wavelengths

## 4 结 论

扩芯-拉锥技术通过加热光子晶体光纤塌缩空气孔,可以有效地增加光子晶体光纤的模场直径和有效模场面积,使光被束缚在纤芯中传播,降低了泄漏损耗。应用此技术的扩芯-拉锥合束器在入射各个波长时的传输损耗都有了大幅度的降低,有利于高功率激光的传输,随着大功率光纤激光器的不断发展和日益广泛的应用,基于合束器等光纤器件的全光纤激光器定会是一种发展趋势。

## 参 考 文 献

- 1 P. St. J. Russell. Photonic band-gap[J]. *Phys. World*, 1992, **5**(8): 37~42
- 2 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 3 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 4 G. E. Town, J. T. Lizier. Tapered holey fibers for spot-size and numerical-aperture conversion [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14): 1042~1044
- 5 Martin D. Nilsen, Mads H. Sorensen, Andreas Liem *et al.*. High power PCF-based pump combiners [C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 64532C
- 6 W. J. Wadsworth, A. Witkowska, S. G. Leon-Saval *et al.*. Hole inflation and tapering of stock photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2005, **17**(13): 6541~6549
- 7 A. Witkowska, K. Lai, S. G. Leon-Saval *et al.*. All-fiber anamorphic core-shape transitions [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2672~2674
- 8 Chen Zilun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Post-processing techniques of photonics crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 020602  
陈子伦, 侯静, 姜宗福. 光子晶体光纤的后处理技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 020602
- 9 Liang Dongming. Optical Fiber Combiner for Supercontinuum [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. 24~26  
梁冬明. 超连续谱合束器研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. 24~26
- 10 Guo Tiejing, Lou Shuqin, Li Honglei *et al.*. Low loss arc fusion splice of photonics crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 511~516  
郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷等. 光子晶体光纤的低损耗电弧熔接方案[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 511~516
- 11 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin *et al.*. Fusion splicing of small solid core photonic crystal fibers with conventional fibers based on controlled hole collapse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0106004  
奚小明, 陈子伦, 孙桂林等. 普通光纤与小芯径实芯光子晶体光纤的塌孔熔接技术[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0106004
- 12 Fu Guangwei, Bi Weihong, Jin Wa. Heat transfer of fusion splicing photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2372~2379  
付广伟, 毕卫红, 金娃. 待熔光子晶体光纤中的热传导特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2372~2379
- 13 D. Yevick, B. Hermansson. New formulations of the matrix beam propagation method; application to rib waveguides [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(2): 461~467
- 14 D. Yevick, B. Hermansson. Split-step finite difference analysis of rib waveguides [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(7): 221~225