

文章编号: 0253-2239(2010)12-3403-05

一种实现矩形光源与光纤高效耦合的方法

孙桂林^{1,2} 陈子伦¹ 奚小明¹ 侯 静¹ 姜宗福¹

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
² 海军航空工程学院基础部, 山东 烟台 264001)

摘要 提出利用变形光子晶体光纤实现矩形光源和普通单模光纤的高效耦合, 变形光子晶体光纤矩形芯一端连接矩形光源, 圆形芯一端连接普通光纤。首先利用光束传播法计算了此结构的耦合效率; 然后通过堵孔、充气和加热的方法, 实现了矩形芯到圆形芯的变形光子晶体光纤的制作。模拟结果显示, 该耦合方式优于矩形光源与普通单模光纤的直接耦合, 可将耦合效率提高 3.9 dB 以上。实验结果表明, 利用这种耦合方式连接矩形光源与普通单模光纤是完全可行的。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 空气孔塌缩; 耦合效率; 矩形光源; 普通单模光纤

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3403

An Effective Way of Reducing Coupling Loss between Rectangular Laser and Conventional Fiber

Sun Guilin^{1,2} Chen Zilun¹ Xi Xiaoming¹ Hou Jing¹ Jiang Zongfu¹

(¹ College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
² Institute of Systems and Mathematics, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract An anamorphic photonic crystal fiber (PCF) is introduced to improve the coupling loss between rectangular laser and conventional single-mode fiber. One end with rectangular core is connected with laser, the other end with round core connect with conventional fiber. Firstly, the coupling efficiency is calculated by beam propagation method. Then after blocking four holes of the PCF, and inflating, heating, an anamorphic core-shape PCF is formed with four holes absolutely collapsed. The simulation results show that, comparing to the straight coupling between rectangular laser and conventional single-mode fiber, more than 3.9 dB improvement of coupling efficiency is achieved by this new method. And the experimental results show that the new structure is feasible.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber (PCF); air holes collapsed; coupling efficiency; rectangular laser; conventional single-mode fiber

1 引 言

1996 年, 英国巴斯大学的 J. C. Knight 等^[1] 成功拉制了世界上第一根光子晶体光纤 (PCF), 开辟了新的光传输方式, 引起国内外许多研究机构的关注^[2~4]。通过改变 PCF 空气孔的形状和排列可以

得到许多传统光纤所不具有的特殊性质, 如高双折射^[5,6]、可变色散^[7] 和高非线性^[8,9] 等特性。

2001 年, G. E. Town 等^[10] 提出了光子晶体光纤拉锥技术, 并给出了 PCF 拉锥过程中所遵循的渐变原则。2005 年, M. Lentonen 等首先提出利用拉

收稿日期: 2010-03-03; 收到修改稿日期: 2010-04-24

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

作者简介: 孙桂林 (1982—), 女, 硕士研究生, 讲师, 主要从事光子晶体光纤后处理技术方面的研究。

E-mail: guilinspace@163.com

导师简介: 姜宗福 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事高能激光及气动光学等方面的研究。

E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn (通信联系人)

锥 PCF 连接普通单模光纤和矩形光波导,并指出该连接方式虽然增加了单模光纤与 PCF 之间的熔接损耗和 PCF 的拉锥损耗,但是显著提高了光纤与波导间的耦合效率,使得总损耗由原来的 6 dB 降为 4 dB^[11]。2006 年, A. Witkowska 等^[12]提出利用堵孔、充气和加热 PCF 的方式,完全塌缩 PCF 中的某些空气孔,实现了全光纤纤芯的任意变形。

由于矩形光源与普通单模光纤之间的耦合损耗主要来源于模场不匹配,因此本文提出利用全光纤的矩形芯到圆形芯的变形 PCF 连接矩形光源和普通单模光纤以提高耦合效率。并通过堵孔、充气和加热的方法制做了由圆形芯到矩形芯的变形光子晶体光纤。利用有限差分光束传播法(FD-BPM)对本文提出的连接方式进行了数值模拟。结果表明,本文提出的方法是可行的,并且利用这种纤芯变形的光子晶体光纤连接矩形光源与普通单模光纤可以将耦合效率提高 3.9 dB 以上。

2 圆形芯到矩形芯的纤芯变形 PCF 的形成过程

如图 1(a)所示,将光纤的一个端面的所有空气孔堵住,在另外一个端面将纤芯两侧共 4 个空气孔堵住。对堵住四个空气孔的一端充气加压,然后加热这

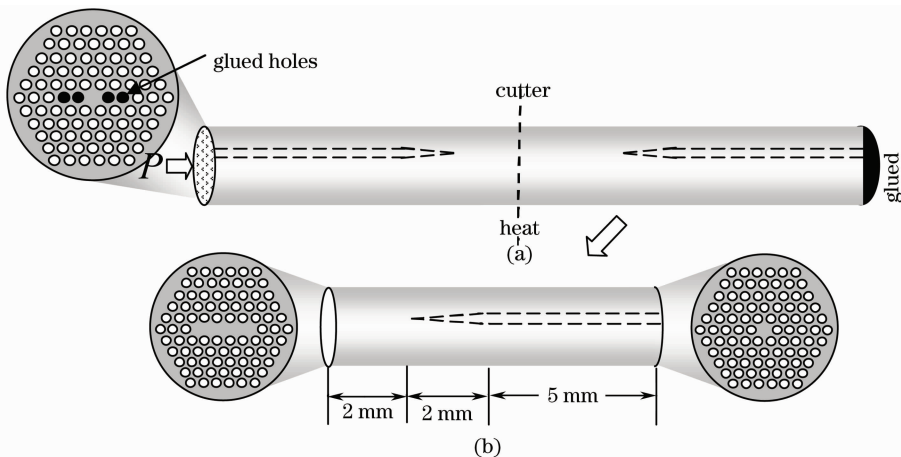


图 1 变形 PCF 制作过程示意图

Fig. 1 Forming course of anamorphic PCF

3 利用纤芯变形 PCF 连接矩形光源和普通单模光纤

采用圆形芯到矩形芯的变形 PCF 连接矩形光源和普通单模光纤(SMF)以降低由于模场不匹配

产生的耦合损耗,如图 2 所示。在这种情况下整个过程的能量损耗包括矩形光源与 PCF 矩形芯一端的耦合损耗、PCF 变形所导致的能量损耗和 PCF 圆形芯一端与普通单模光纤之间的熔接损耗。

$$P_{st} = 2\gamma/d, \quad (1)$$

式中 d 为空气孔直径。若空气孔内部空气压力 $P > P_{st}$, 则空气孔膨胀;若 $P < P_{st}$, 则空气孔塌缩。二氧化硅(SiO_2)玻璃的黏性在接近其熔点 1700 °C 时随温度的变化很大,但表面张力的变化却很小^[13], 因此不考虑在空气孔塌缩过程中温度对流体静压力的影响。空气孔的塌缩与否仅由空气孔内部压力与流体静压力之间的关系决定,熔融二氧化硅的表面张力为 $\gamma = 0.3 \text{ J/m}^2$ ^[13], 将其代入(1)式,即可得到

$$P_{st} = 6/d, \quad (2)$$

式中 d 为空气孔直径,单位为 μm ; P_{st} 单位为 10^5 Pa 。若空气孔直径 $d = 3.36 \mu\text{m}$, 则通过(2)式计算可得 $P_{st} = 1.786 \times 10^5 \text{ Pa}$, 大于一个大气压。在加热区域中,被堵住的四个空气孔内的压强为 1 个大气压,由于表面张力的作用将塌缩直至消失,而在保证表面张力与所充气体对空气孔表面产生的压力的大小相等时,其它空气孔大小和形状可保持不变,因此光纤的外直径也可基本保持不变,此时在光纤内部形成长宽比例为 5:1 的矩形芯。用切割刀在光纤中部将光纤截断,最后得到两段如图 1(b)所示的纤芯变形光子晶体光纤。

产生的耦合损耗,如图 2 所示。在这种情况下整个过程的能量损耗包括矩形光源与 PCF 矩形芯一端的耦合损耗、PCF 变形所导致的能量损耗和 PCF 圆形芯一端与普通单模光纤之间的熔接损耗。

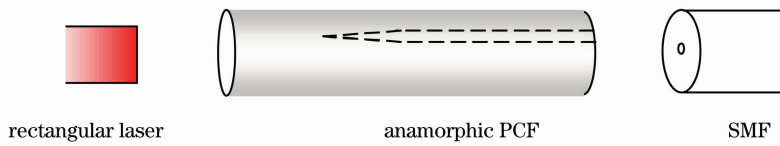


图 2 矩形光源和普通单模光纤的连接示意图

Fig. 2 Connection scheme of rectangular laser and conventional single-mode fiber

利用有限差分光束传播法(FD-BPM)对上述结构中光场的传播过程进行数值模拟。有限差分光束传播法利用有效的差分格式代替波动方程中的微分形式,是分析复杂光波导结构的有效的计算工具之一^[15,16]。本文模拟计算采用结构为 11 孔的全内反射型光子晶体光纤,光纤的各模拟参数为孔间距 $\Lambda = 7 \mu\text{m}$,孔直径 $d = 3.36 \mu\text{m}$,则 $d/\Lambda = 0.48$,在波长 1550 nm 下模场直径约为 $d_{\text{MFD}} = 8.92 \mu\text{m}$ 。其它模拟参数为:二氧化硅的折射率取为 $n = 1.45$;过渡光纤的各部分长度如图 1(b)中所示;入射光为长 $40 \mu\text{m}$,宽 $8 \mu\text{m}$ 的矩形阶梯状光束,波长为 1550 nm ,光斑形状

如图 3(a)所示。计算区域为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 的正方形区域,光纤横截面内网格间距取为 $0.05 \mu\text{m}$;光纤轴向网格间距取值为 $0.15 \mu\text{m}$ 。纤芯变形光子晶体光纤中入射端、中间部分和出射端的光斑形状分别如图 3(b)~(d)所示。计算结果显示,矩形光源与 PCF 矩形芯一端的耦合损耗为 0.747 dB ,PCF 变形所导致的能量损耗为 1.006 dB 。采用相同的计算方法模拟了矩形光源与普通单模光纤直接耦合的情况,得到整个过程的耦合损耗为 5.792 dB 。结果表明,变形光子晶体光纤可以实现矩形光源与普通单模光纤的低损耗耦合。

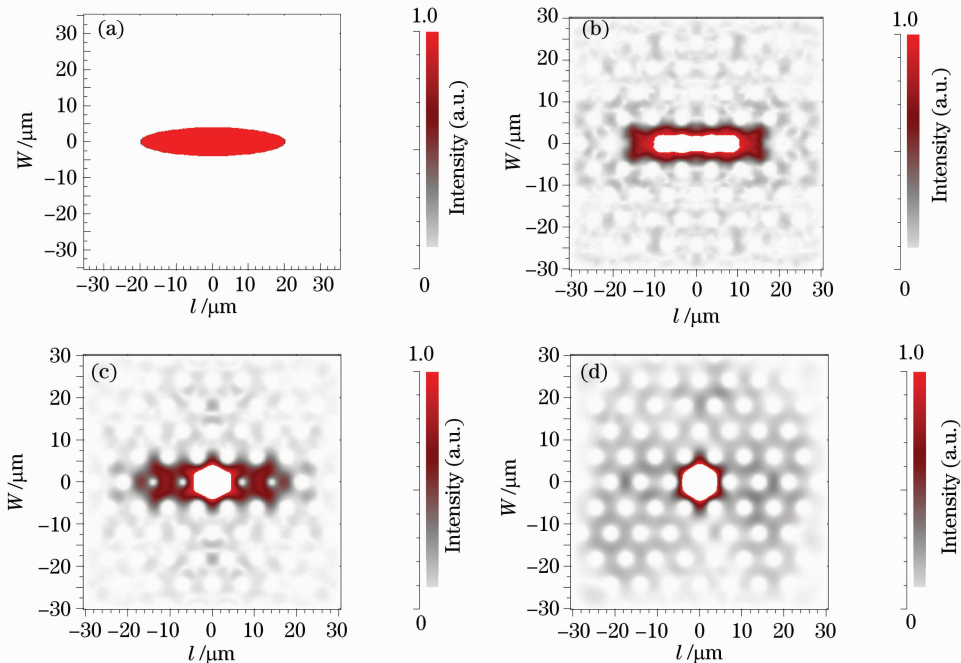


图 3 (a)入射的光斑形状;纤芯变形光子晶体光纤各部分光斑形状:(b)入射端,(c)中部,(d)出射端

Fig. 3 (a) Light spot of incidence; light spot in the various parts of anamorphic PCF at (b) incident, (c) middle and (d) exit end

文献[12]中对参数为 $\Lambda = 8 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.46$ 的光子晶体光纤变形过程中的能量损耗进行了测量,在波长 1550 nm 处变形后的能量为变形前能量的 99.7% ,利用本文的计算方法对该结构进行模拟所得结果为 97.7% 。另外,利用此计算方法计算文献[11]中所给出的光子晶体光纤与矩形波导的耦合损耗,所得结果与其文中给出的结果一致。可见,FD-BPM 方法用于计算光子晶体光纤变形部分能量损

耗和光纤与波导耦合损耗具有较高的计算精度。

普通单模光纤直径为 $8.3 \mu\text{m}$,数值孔径为 $NA = 0.14$,该种光纤在波长 1550 nm 下模场直径为 $10.4 \mu\text{m}$ 。普通单模光纤与光子晶体光纤之间由于模场不匹配所产生的熔接损耗为^[16]

$$\alpha = -20 \lg \left(\frac{2\omega_{\text{PCF}} \omega_{\text{SMF}}}{\omega_{\text{PCF}}^2 + \omega_{\text{SMF}}^2} \right), \quad (3)$$

式中 ω_{SMF} , ω_{PCF} 分别为单模光纤和光子晶体光纤的模场直径。通过(3)式计算可得普通单模光纤与光

子晶体光纤之间的熔接损耗为 0.093 dB。

表 1 为改进后的耦合方式与矩形光源与普通单模光纤直接耦合的耦合效率对比值。由表 1 可知, 尽管利用纤芯变形光子晶体光纤连接矩形光源和普通单模光纤会增加变形光子晶体光纤中的能量损耗

表 1 矩形光源-普通单模光纤两种耦合方式耦合效率的结果比较

Table 1 Coupling loss between rectangular laser and conventional single mode fiber with or without anamorphic PCF

Anamorphic PCF	Coupling loss /dB	Anamorphic loss /dB	Splicing loss /dB	Total loss /dB
Without	5.792	0	0	5.792
With	0.747	1.006	0.093	1.846

4 实验结果与讨论

实验中采用孔直径 $d = 3.16 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Delta = 5.90 \mu\text{m}$ 的 11 孔全内反射型光子晶体光纤。图 4(a) 为被堵住四个空气孔的光纤端面, 箭头所指即为其中

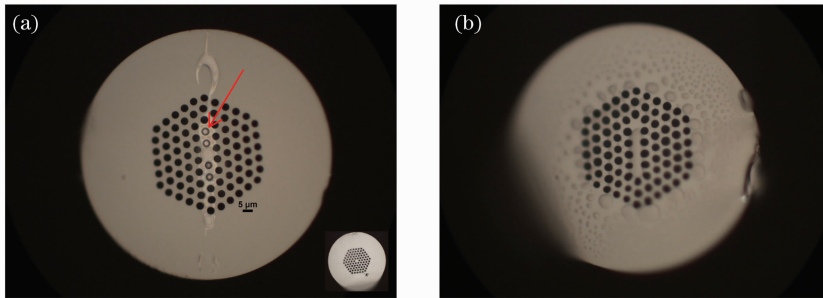


图 4 (a) 四个空气孔被堵住的光子晶体光纤的一个端面, 小图为原始光纤端面图; (b) 纤芯变形光子晶体光纤矩形芯一端的端面图

Fig. 4 (a) End faces of PCF with four holes blocked and original PCF (inset); (b) end face of PCF with anamorphic core-shape

图 5 为变形 PCF 矩形芯一端的光斑形状, 与未经整形的 LD 光源发出的光斑形状非常相似。虽然实验室没有合适的矩形光源进行相关的耦合实验, 但是通过堵孔、充气和加热的方式制作了一个 5:1 比例的矩形芯, 这说明前面提出的利用矩形芯变形光子晶体光纤连接矩形光源和普通单模光纤在实际中是可以实现的。

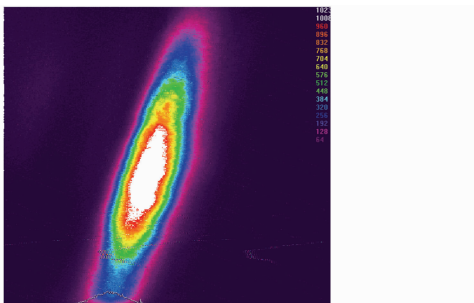


图 5 变形光子晶体光纤矩形芯一端的光斑形状

Fig. 5 Light spot shape at rectangular core of anamorphic PCF

和光子晶体光纤与普通单模光纤之间的熔接损耗, 但是总的损耗仍远低于将矩形光源与普通单模光纤直接连接的耦合损耗, 从而显著提高了矩形光源与普通单模光纤的耦合效率。

一个空气孔; 图 4(a) 内小图为原始光纤端面图。在压强约 $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 下利用普通熔融拉锥机加热这段光纤, 最终会在加热光纤的中部形成如图 4(b) 所示的具有 5:1 比例的矩形芯。

5 结 论

本文提出了一种利用变形光子晶体光纤实现矩形光源和普通单模光纤的高效耦合方式。利用光束传播法对此耦合结构进行了数值模拟。模拟结果显示: 此种方式的耦合比直接耦合效率提高了约 3.9 dB。最后通过堵孔、充气和加热的方式, 制作了一个矩形芯到圆形芯的纤芯变形光子晶体光纤。实验结果表明, 本文提出的方法在实际中是可以实现的。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*, Properties of photonic crystal fiber and the effective index modal [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(3): 748~752
- 3 Wang Zhi, Ren Guobin, Lou Shuqin *et al.*, The mode characteristics of photonic crystal Fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 324~329

- 王 智, 任国斌, 姜淑琴 等. 光子晶体光纤模式特征的研究 [J]. 光学学报, 2004, **24**(3): 324~329
- 4 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 5 Gong Taorong, Yan Fengping, Wang Lin *et al.*. Analysis of properties of high birefringence photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 559~565
- 龚桃荣, 延凤平, 王 琳 等. 高双折射光子晶体光纤特性分析 [J]. 中国激光, 2008, **35**(4): 559~565
- 6 A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth *et al.*. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1325~1327
- 7 R. K. Sinha, S. K. Varshney. Dispersion properties of photonic crystal fibers [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2003, **37**(2): 129~132
- 8 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
- 王清月, 胡明列, 柴 路. 光子晶体光纤非线性光学研究进展 [J]. 中国激光, 2006, **33**(1): 57~66
- 9 F. Poli, F. Adami, M. Foroni *et al.*. Optical parametric amplification in all-silica triangular-core photonic crystal fibers [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(1): 251~255
- 10 G. E. Town, J. T. Lizier. Tapered holey fibers for spot-size and numerical-aperture conversion [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14): 1042~1044
- 11 M. Lehtonen, G. Genty, H. Ludvigsen. Tapered microstructured fibers for efficient coupling to optical waveguides: a numerical study [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(1): 295~300
- 12 A. Witkowska, K. Lai, S. G. Leon-Saval *et al.*. All-fiber anamorphic core-shape transitions [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2672~2674
- 13 W. J. Wadsworth, A. Witkowska, S. G. Leon-Saval *et al.*. Hole inflation and tapering of stock photonic crystal fibres [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(17): 6541~6550
- 14 Lin Bin, Lian Hua, Jin Mengbi. Optical waveguide calculation and discussion with finite-difference beam propagation method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(s): 503~508
- 林 斌, 连 华, 金梦笔. 光波导的有限差分光束传播法设计及分析 [J]. 中国激光, 2004, **31**(s): 503~508
- 15 C. Yu, H. Chang. Applications of the finite difference mode solution method to photonic crystal structures [J]. *Opt. & Quant. Electron.*, 2004, **36**: 145~163
- 16 J. H. Chong, M. K. Rao. Development of a system for laser splicing photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(12): 1365~1370