

光子晶体光纤的全光纤纤芯变形研究*

孙桂林^{1)2)†} 陈子伦²⁾ 奚小明²⁾ 湛鸿伟²⁾ 侯静²⁾ 姜宗福²⁾

1) (海军航空工程学院基础部, 烟台 264001)

2) (国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2010年6月17日收到; 2011年4月1日收到修改稿)

利用有限差分光束传输法分析了全光纤纤芯变形光子晶体光纤中的模场分布以及能量损耗情况. 实现了光子晶体光纤的选择性空气孔塌缩, 制作了由小纤芯到大纤芯和圆形芯到矩形芯的纤芯变形光子晶体光纤, 该光纤在波长 1550 nm 下以小于 0.05 dB 的能量损耗实现了光斑的整形. 实验结果与模拟结果有很好的 consistency.

关键词: 光子晶体光纤, 空气孔塌缩, 纤芯变形

PACS: 42. 81. Bm, 07. 60. Vg, 42. 60. Jf

1. 引言

1996年, 南安普顿大学的 Knight 等^[1] 制备了世界上第一根光子晶体光纤 (PCF), 其特殊的结构和性质引起了广泛的关注. 通过调整光纤包层空气孔的排列和形状可以设计具有不同零色散点^[2-4]、高双折射^[5-7] 和高非线性^[8] 的 PCF. 由于 PCF 所具有的诸多优良特性, 人们试图扩大 PCF 的应用范围, 并利用 PCF 制作更多的光学器件. 2001年, 悉尼大学的 Town 等^[9] 提出 PCF 的拉锥技术, 并给出了 PCF 在拉锥过程中所遵循的渐变原则; 2005年, 巴斯大学的 Wadsworth 等^[10] 提出 PCF 的充气膨胀技术, 并给出了 PCF 中空气孔膨胀或塌缩的条件; 2006年, Witkowska 等^[11] 提出了 PCF 的堵孔技术, 并实现了在同一根光纤中光斑形状的低损耗改变. 这种利用拉锥、充气膨胀和选择性空气孔塌缩等技术改变 PCF 的空气孔直径和孔间距以及光纤横截面形状的技术称为 PCF 后处理技术. PCF 后处理技术是对现有 PCF 进行处理从而改变光纤的特性, 并通过这种方法制成各种全光纤器件. 该技术极大地扩展了 PCF 的应用范围, 尤其是其中的选择性空气孔塌缩技术, 由于其在光斑整形^[11]、模式转换器制作^[12, 13] 方面的诱人前景, 已成为国内外光学领域中的研究热点之一.

本文利用有限差分光束传输法对纤芯变形 PCF 中光的传播过程进行了数值模拟, 并在实验中实现了 PCF 的选择性空气孔塌缩. 制作了由小纤芯到大纤芯和圆形芯到矩形芯的纤芯变形 PCF, 实现了低损耗的光斑整形输出. 实验结果与模拟结果具有很好的 consistency.

2. 理论分析及模拟结果

2.1. 空气孔塌缩或膨胀的条件

当温度为 1700 °C 左右时, 熔融二氧化硅中空气孔表面单位面积的张力为^[10]

$$P_{ST} = \frac{6 \times 10^5}{d}, \quad (1)$$

其中 P_{ST} 的单位为 Pa, d 为空气孔直径, 单位为 μm . 当空气孔内的压强 $P > P_{ST}$ 时, 空气孔膨胀; 当 $P = P_{ST}$ 时, 空气孔不变形; 当 $P < P_{ST}$ 时, 空气孔缩小.

图 1 所示为 PCF 的侧剖面, 其中白色部分为空气孔, 其他部分为二氧化硅材料. 如图 1 所示, 将光纤一端的所有空气孔用胶水封住, 而另一端仅有某些空气孔被封堵, 对这一端进行充气加压. 于是, 两端均被封堵的空气孔内的压强为大气压 P_0 , 只有一端被封堵的空气孔内的压强为外界所加压强 P . 已知大气压强 $P_0 = 10^5$ Pa, 当 $d = 3.16 \mu\text{m}$ 时, 由 (1) 式可知, $P_{ST} = 1.9 \times 10^5$ Pa, 则 $P_0 < P_{ST}$. 于是, 两端均

* 教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-08-0142) 资助的课题.

† E-mail: guilinspace@163.com

被封堵的空气孔在光纤熔融状态下将不断缩小,直至完全塌缩;而当外界所加压力 $P = P_{ST}$, 被封堵一端的空气孔将保持孔的大小不变. 用以加热光纤的火头的运动轨迹为长度逐渐减小的“之”字形,最后

在加热区域的两侧分别形成空气孔逐渐缩小的过渡区域,整段光纤的侧剖面如图 1 所示. 用切割刀在火头运动轨迹的中部将该光纤截断,就可得到两段纤芯变形 PCF.

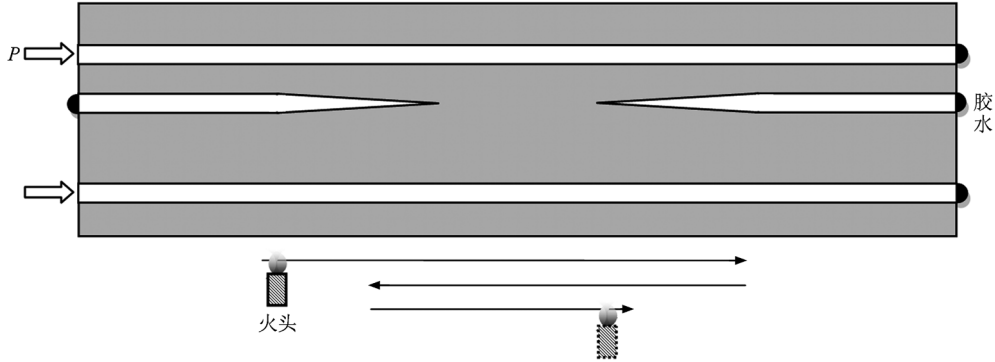


图 1 空气孔塌缩形成过程和塌缩后的 PCF 侧剖面

2.2. 模拟结果

1989 年, Yevick 等^[14, 15] 提出有限差分光束传输法 (finite difference beam propagation method), 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, 则可得到整个

波导横截面上的场分布, 从而最终得到整个波导中的场分布. 有限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.

模拟计算采用的是空气孔直径 $d = 3.16 \mu\text{m}$, 占空比 $d/\Lambda = 0.54$ 的全内反射型 PCF, 其中 Λ 为 PCF 横截面内的空气孔间距. 计算所用的横向网格间距

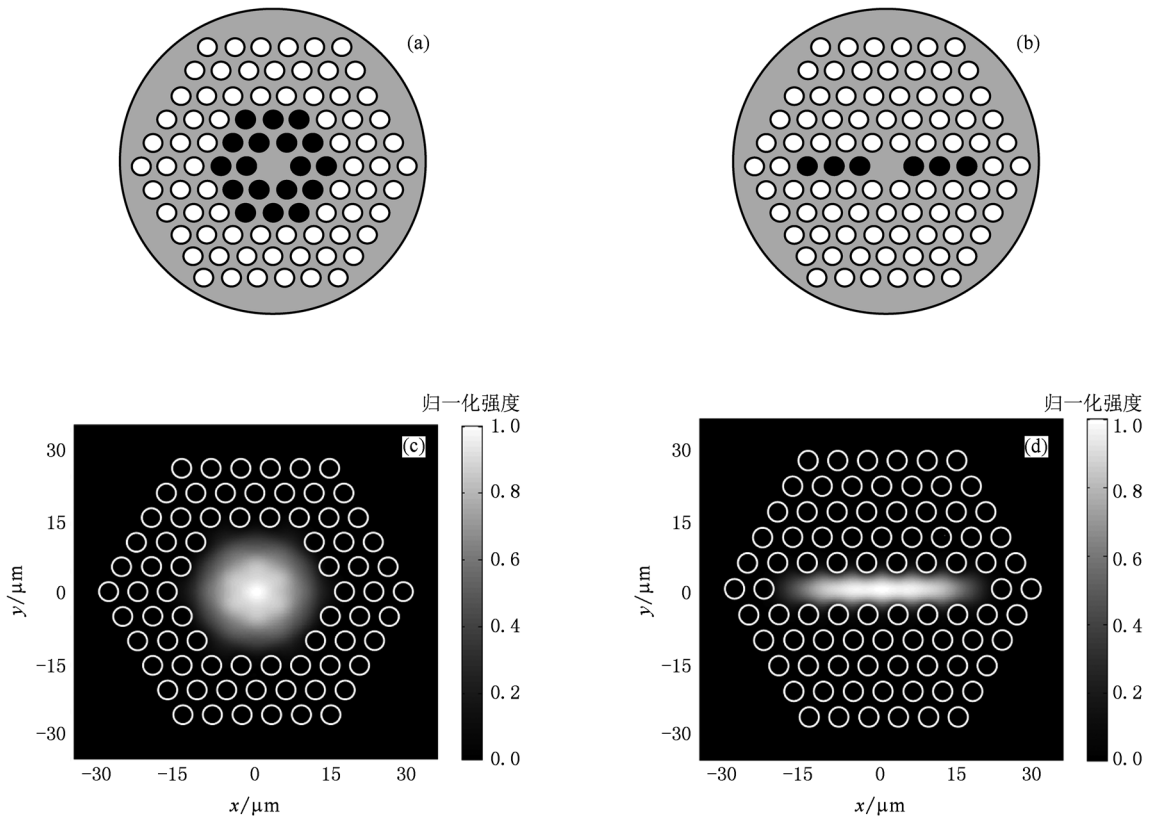


图 2 纤芯变形 PCF 空气孔示意图 (白色小圆代表未封堵的空气孔, 黑色小圆代表封堵的空气孔) 和出射端模场分布的模拟结果 (白色圆环代表空气孔所在位置) (a) 封堵内侧两圈空气孔, (b) 封堵一个方向上的六个空气孔, (c) 内侧两圈空气孔塌缩后出射端的模场分布, (d) 六个空气孔塌缩后出射端的模场分布

为 $0.02 \mu\text{m}$, 纵向网格间距为 $0.05 \mu\text{m}$, 入射光是波长为 1550 nm 的高斯光束, 光束的束腰半径与空气孔的孔间距大小相等. 纤芯变形 PCF 中的原始光纤、过渡区域和空气孔完全塌缩部分的长度分别为 $20, 1$ 和 5 cm . 若将图 2(a) 所示光纤内侧两圈空气孔封堵, 并对这段光纤进行充气、加热和切割后就得到两段小纤芯到大纤芯的变形 PCF. 当高斯光束入射到原始光纤一端时, 就会在光纤的另一端得到如图 2(c) 所示的近场光斑, 光斑形状呈六边形, 但大部分的能量还是集中在中间的圆形区域. 在该波长下, 纤芯变形导致的能量损耗约为 0.01 dB . 若封堵图 2(b) 所示的六个空气孔, 并对其进行充气、加热和切割后就得到两段圆形芯到矩形芯的变形 PCF, 图 2(d) 为光纤出射端的近场光斑, 这种纤芯变形导致的能量损耗也为 0.01 dB 左右. 模拟结果显示, 这种变形 PCF 可以在低损耗的情况下实现光斑的整形.

3. 实验装置及纤芯变形 PCF 的制作

3.1. 实验装置及制作过程

选择性空气孔塌缩所需实验装置如图 3 所示. 图 3(a) 为堵孔装置, 主要由显微镜和三维调节架组

成; 图 3(b) 为充气装置, 主要由压力调节计和充气仓组成; 图 3(c) 为加热 PCF 的装置, 即普通熔融拉锥机, 其火头的移动速度和运动轨迹等通过计算机进行控制.

实验中, 首先将 PCF 横截面向上固定在显微镜的活动平台上, 然后用三维调节架的支臂蘸取适量紫外胶涂抹在所需封堵的空气孔上. 然后将部分空气孔被封堵的 PCF 一端固定在充气仓内, 在保持另一端的所有空气孔都被封堵的情况下, 通过充气仓向部分空气孔被封堵的 PCF 一端充入干燥氮气, 通过压力调节计控制充气仓内的气压. 将充入氮气的 PCF 静置数分钟, 以保证光纤空气孔内气压的平衡. 最后利用普通熔融拉锥机以慢速高温的方式^[8,16]用火头加热这段光纤, 并保证火头有足够多的扫描次数以使得 PCF 内两端均被封堵的空气孔完全塌缩. 用切割刀在加热 PCF 的中部截断该光纤, 就可得到两段纤芯变形 PCF.

3.2. 制作纤芯变形 PCF

实验所用光纤为空气孔间距 $\Lambda = 5.90 \mu\text{m}$, 空气孔直径 $d = 3.16 \mu\text{m}$ 的全内反射型 PCF, 光纤横截面如图 4(a) 所示. 首先利用图 3(a) 所示装置封堵如图 2(a) 所示 PCF 一个端面上的最内侧两圈空气孔. 然后向这段光纤的空气孔内充入干燥的

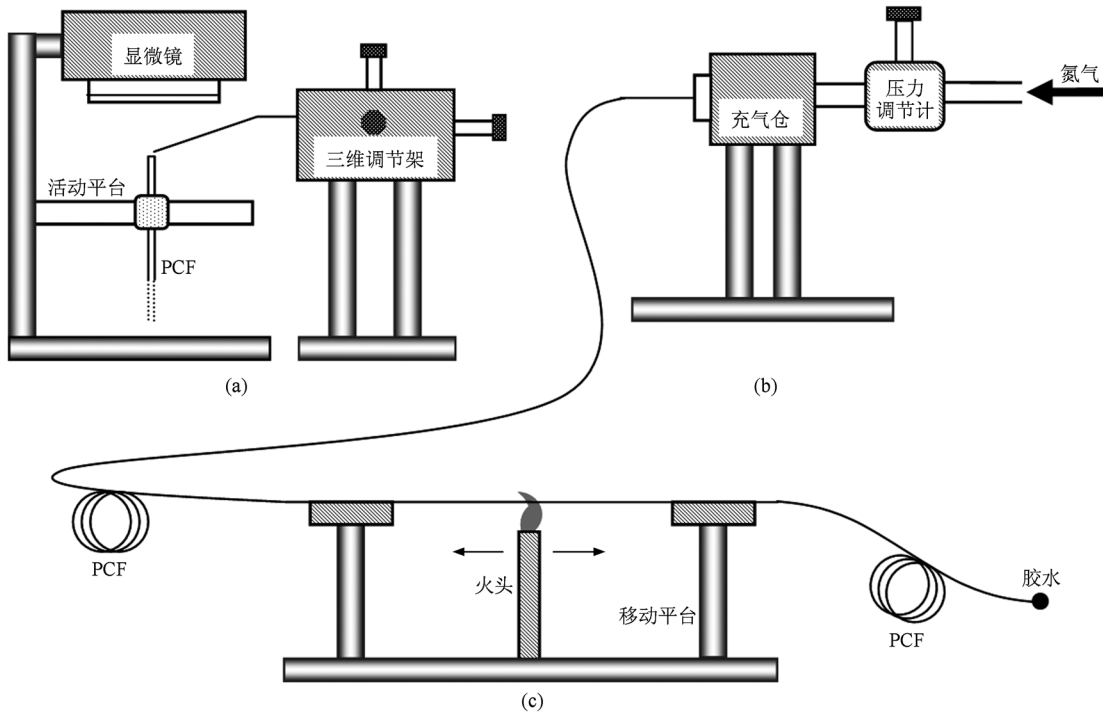


图 3 制作纤芯变形 PCF 的实验装置示意图 (a) 堵孔装置, (b) 充气装置, (c) 熔融拉锥机

氮气,气体压强为 0.2 MPa,并在氢气流量为 122 cm³/min 的情况下利用普通熔融拉锥机加热这段已剥除外包层的 PCF,火头往返运动 25 次后就使得加热光纤的中部变为图 4(d)所示的纤芯直径增大的 PCF.图 4(b),(c)所示为纤芯变形 PCF 过渡区域的横截面.最后得到两段原始光纤长度为 50 cm,过渡区域长度为 1 cm,空气孔完全塌缩

部分长度为 3 cm 的纤芯变形 PCF,其中过渡区域和空气孔完全塌缩部分的长度可以通过改变火焰的扫描距离来控制.将图 4(d)与(a)相比较可以看出,变形后 PCF 包层中的空气孔直径比原始光纤的空气孔直径略大,这是由于外界所加压强略大于空气孔表面单位面积的张力而导致 PCF 空气孔发生了膨胀.

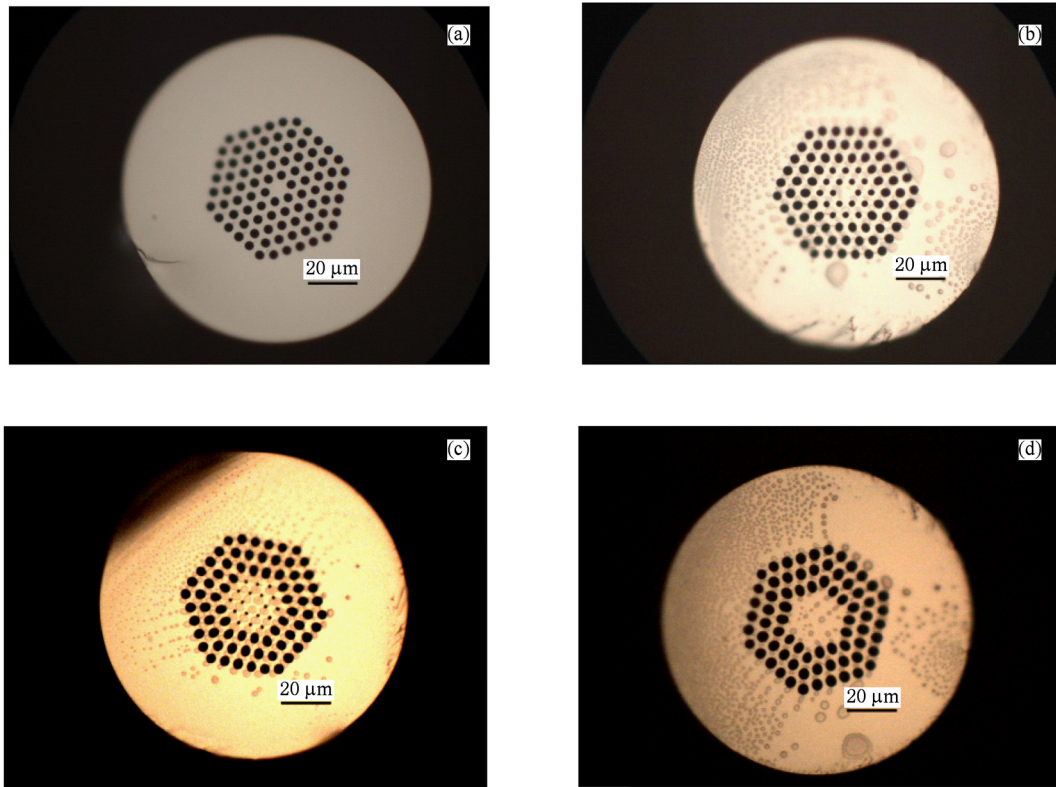


图 4 小纤芯到大纤芯的全光纤纤芯变形 PCF 不同位置处的横截面 (a)原始光纤,(b)空气孔变形较轻微的过渡区域,(c)空气孔变形较严重的过渡区域,(d)内侧两圈空气孔完全塌缩处

在保证 PCF 一端的所有空气孔完全封堵住的情况下,封堵图 5(a)所示 PCF 另一端的六个空气孔,并向这一端的其余空气孔内充入干燥的氮气,当压强大小和火头运动速度、轨迹等参数的设置与

制作小纤芯到大纤芯的变形 PCF 相同时,就可得到一端为圆形纤芯,另一端为图 5(b)所示矩形纤芯的纤芯变形 PCF,其原始光纤、过渡区域和矩形纤芯部分的长度分别为 50,1 和 3 cm.



图 5 圆形纤芯到矩形纤芯的全光纤纤芯变形 PCF 横截面 (a)封堵六个空气孔的光纤横截面,(b)六个空气孔完全塌缩后的光纤横截面

4. 实验结果及讨论

当把超连续谱光分别输入制得的两种纤芯变形 PCF 的原始纤芯一端时,就会在 PCF 变形纤芯一端得到如图 6 所示的近场光斑分布. 图 6(a)为小纤芯到大纤芯变形 PCF 出射端的近场光斑图. 从图 6 可以看到,光纤的模场面积显著增大,有极少部分光能够泄漏到第三、第四圈空气孔的周围,而且在第五圈空气孔的周围几乎看不到泄漏的光. 光斑的六角形分布是由 PCF 横截面内空气孔分布的六角形结构决定的. 图 6(b)为圆形芯到矩形芯的纤芯变形 PCF 出射端的近场光斑图,光斑形状与图 2(d)

所示的模拟结果一致,均为明显的 1:7 比例的矩形光斑. 利用截断法测得波长为 1550 nm 时以上两种纤芯变形结构导致的能量损耗均小于 0.05 dB. 模拟结果和实验结果都显示,利用全光纤纤芯变形 PCF 进行模场整形的能量损耗在 1550 nm 的波长下小于 0.1%. 光场能量在纤芯变形 PCF 中的实际损耗比计算所得损耗略大,一方面是由实验所用光纤的包层并不是完全的周期性结构,并且空气孔的大小也不完全一致所产生的传输损耗导致的;另一方面是纤芯变形 PCF 包层空气孔的微小形变也会使得纤芯中的光发生泄漏,从而导致能量损耗的增加. 实验结果表明,这种利用全光纤纤芯变形 PCF 进行光斑整形的方式是非常有效的.

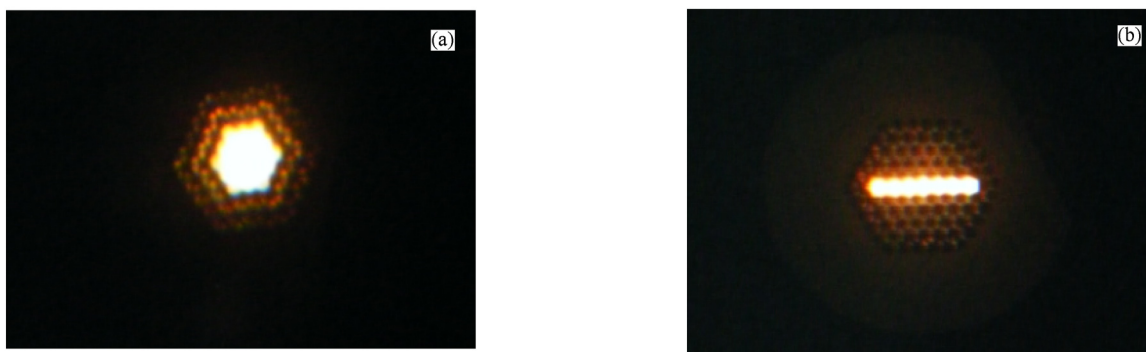


图 6 实验测得的小纤芯到大纤芯和圆形芯到矩形芯的变形 PCF 出射端近场光斑分布 (a)小纤芯到大纤芯变形 PCF, (b)圆形芯到矩形芯变形 PCF

5. 结 论

本文模拟了小纤芯到大纤芯和圆形芯到矩形芯的纤芯变形 PCF 中模场分布和能量损耗. 给出了进行选择空气孔塌缩实验的实验装置,并利用此装置成功制作了两种全光纤纤芯变形 PCF,测得了变形纤芯一端出射的近场光斑和光斑整形导致的

能量损耗. 模拟结果和实验结果都表明,利用该方法可以在低损耗的情况下实现光斑的整形. 这种纤芯变形 PCF 具有广阔的应用前景,如模场面积增大的纤芯变形 PCF 可以降低光源与光纤之间的耦合难度和提高它们的耦合效率,而圆形芯到矩形芯的变形 PCF 也可以实现矩形光波导与光纤之间的高效耦合.

- [1] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [2] Zhang D S, Dong X Y, Zhang W G, Wang Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1235 (in Chinese) [张德生、董孝义、张伟刚、王 志 2005 物理学报 **54** 1235]
- [3] Zhao X T, Hou L T, Liu Z L, Wang W, Wei H Y, Ma J R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2275 (in Chinese) [赵兴涛、侯蓝田、刘兆伦、王 伟、魏红彦、马景瑞 2007 物理学报 **56** 2275]
- [4] Jiang L H, Hou L T, Yang Q Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4726 (in Chinese) [姜凌红、侯蓝田、杨倩倩 2010 物理学报 **59** 4726]
- [5] Zhang L, Li S G, Yao Y Y, Fu B, Zhang M Y, Zheng Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1101 (in Chinese) [张 磊、李曙光、姚艳艳、傅 博、张美艳、郑 义 2010 物理学报 **59** 1101]
- [6] Chen D, Wu G 2010 *Appl. Opt.* **49** 1682
- [7] Yang Q Q, Hou L T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8345 (in Chinese) [杨倩倩、侯蓝田 2009 物理学报 **58** 8345]

- [8] Zhang M Y, Li S G, Yao Y Y, Zhang L, Fu B, Yin G B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3278 (in Chinese) [张美艳、李曙光、姚艳艳、张磊、傅博、尹国冰 2010 物理学报 **59** 3278]
- [9] Town G E, Lizier J T 2001 *Opt. Lett.* **26** 1042
- [10] Wadsworth W J, Witkowska A, Leon-Saval S G, Birks T A 2005 *Opt. Express* **13** 6541
- [11] Witkowska A, Lai K, Leon-Saval S G, Wadsworth W J, Birks T A 2006 *Opt. Lett.* **31** 2672
- [12] Witkowska A, Leon-Saval S G, Pham A, Birks T A 2008 *Opt. Lett.* **33** 306
- [13] Lai K, Leon-Saval S G, Witkowska A, Wadsworth W J, Birks T A 2007 *Opt. Lett.* **32** 328
- [14] Yevick D, Hermansson B 1989 *Electron. Lett.* **25** 461
- [15] Yevick D, Hermansson B 1989 *IEEE J. Quantum Electron.* **25** 221
- [16] Zhang R F, Ge C F, Wang S H, Hu Z Y, Li S C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 390 (in Chinese) [张瑞峰、葛春风、王书慧、胡智勇、李世忱 2003 物理学报 **52** 390]

Core-shape transitions in photonic crystal fiber^{*}

Sun Gui-Lin^{1)2)†} Chen Zi-Lun²⁾ Xi Xiao-Ming²⁾ Chen Hong-Wei²⁾ Hou Jing²⁾ Jiang Zong-Fu²⁾

1) (Department of Basic Sciences, Naval Aeronautics and Astronautics University, Yantai 264001, China)

2) (College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 17 June 2010; revised manuscript received 1 April 2011)

Abstract

The mode field and the translational efficiency are studied by the finite difference beam propagation method in an anamorphic photonic crystal fiber. Selective hole collapse is realized in laboratory and anamorphic fibers with circular to rectangular cores and small to large mode fields are made. The loss at wavelength 1550 nm is below 0.05 dB during each translation. The calculated and the experimental results are consistent with each other.

Keywords: photonic crystal fiber, air holes collapsed, core-shape transition

PACS: 42.81.Bm, 07.60.Vg, 42.60.Jf

* Project supported by the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-08-0142).

† E-mail: guilinspace@163.com