

全固态八边形大模场光子晶体光纤的设计*

郭艳艳^{1)†} 侯蓝田¹⁾²⁾

1) (燕山大学红外光纤与传感技术研究所, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学亚稳材料制备技术与科学重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2009 年 7 月 24 日收到; 2009 年 11 月 2 日收到修改稿)

提出一种新型的全固态八边形大模场低损耗的掺镱石英光子晶体光纤, 利用多极法对光纤的结构和特性进行了模拟. 这种结构的光子晶体光纤空气孔由掺有少量氧化硼的石英棒代替, 简化了制备过程, 提高了光纤的热损伤阈值. 在波长为 1.064 μm 处, 光纤的模场面积可达 2000 μm^2 , 还可实现单模传输, 而且其弯曲损耗很小, 当弯曲半径为 5 cm 时弯曲损耗小于 0.5 dB/m. 这种光纤对光纤激光器和光纤放大器的发展有重要意义.

关键词: 光子晶体光纤, 模场面积, 弯曲损耗, 限制损耗

PACC: 4280L, 4281D

1. 引 言

光子晶体光纤 (PCF) 由于其独特的性质, 自 1996 年问世以来, 对这种新型光纤^[1] 的研究一直受到人们极大的关注. PCF 较传统光纤最大的优势在于其结构设计的灵活性. PCF 的特性易于集成化, 同一根光纤既有大的模场面积又可以单模传输而且还可以达到弯曲半径很小的目的, 这是传统光纤所不能实现的. 大模场面积单模光纤有许多应用, 如可应用于高功率光纤激光器、高功率光纤放大器^[2-4]. 由于应用中对宽光谱和高功率光纤激光器、放大器的要求, 使得高功率光纤激光器、光纤放大器得到了不断的发展, 它们的输出功率已经从最初的几百毫瓦上升到了千瓦水平. 影响高功率输出的主要原因是强非线性效应, 而大模场面积单模光纤的发展恰恰解决了这一问题^[5-7], 光纤中传输模式面积的增大, 降低了纤芯中的光功率密度, 从而有效地减小了光纤中的非线性效应. 1998 年, Knight 等^[8] 首次拉制出了大模场面积 PCF. 2003 年, Mortensen 等^[9] 发现, 用三根石英棒替代毛细管作为纤芯拉制出的具有近似三角形芯的 PCF, 在和普通结构的 PCF 在弯曲损耗等性能基本相同的情况下, 模场面积可比普通结构的 PCF 增大 30% 左右. 随后, 又出现模场面积为 600, 1000 μm^2 的大模场面积

PCF^[3]. 2007 年, Tsuchida 等^[10] 设计了在波长为 1.064 μm 处, 模场面积达 1400 μm^2 的大模场面积 PCF, 弯曲半径为 5 cm 时弯曲损耗为 1 dB/m.

本文提出一种新型的全固态八边形结构的掺镱石英 PCF, 在 1.064 μm 波长 (光纤激光器的工作波长) 处光纤的模场面积达到 2000 μm^2 , 还可以实现单模传输, 且弯曲损耗很小, 当弯曲半径为 5 cm 时弯曲损耗小于 0.5 dB/m. 对于包层为空气孔的 PCF, 有效折射率有微小的变化都会导致模式的改变, 在制备过程中增加层数又会引起空气孔的畸变影响光纤的结构, 所以我们用掺有少量氧化硼的石英棒来代替空气孔, 这使光纤的热损伤阈值很高, 简化了制备过程. 这种纤芯中掺有镱的大模场面积单模光纤, 十分适合研制高功率、高光束质量的激光器.

2. 基本理论

我们利用多极法对微结构光纤的损耗特性和有效模面积进行数值模拟, 该方法适合于快速计算由圆柱形空气孔 (或实心圆) 构成的微结构光纤, 可以同时产生模式传播常数的实部和虚部, 利用实部可以计算色散, 而利用虚部可以计算有限包层情况下的限制损耗, 并且可以根据设定波长求其传播常数. 利用多极法, 模场可以展开成柱 Bessel 函数的形

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60637010) 资助的课题.

† E-mail: guoyanyan1018@126.com

式^[11,12],在第 l 个空气孔(或实心圆)的内部,其纵向电场可以在极坐标系下展开为

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m^{(l)} J_m(k^i r_l) \exp(im\phi_l) \exp(i\beta z). \quad (1)$$

在第 l 个空气孔(或实心圆)近邻的介质中,其纵向电场可以表示为

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [b_m^{(l)} J_m(k^s r_l) + c_m^{(l)} H_m^{(1)}(k^s r_l)] \times \exp(im\phi_l) \exp(i\beta z). \quad (2)$$

这里 $k^i = (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$ 为掺有少量氧化硼的石英中的波数; $k^s = (k_0^2 n_s^2 - \beta^2)^{1/2}$ 为基底中的波数; n_i 为掺有少量氧化硼的石英棒的折射率, $n_i = 1.452$; n_s 为基底的折射率,即掺铈石英的折射率, $n_s = 1.46$. $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是自由空间的波数. 磁场分量 H_z 的表达式与此类似.

通过利用空气孔(或实心圆)界面上的电磁场边界条件,可以得到关于 $a_m^{(l)}$, $b_m^{(l)}$ 和 $c_m^{(l)}$ 的表达式,在实际运算中选择适当的截断值 M (取 $-M \leq m \leq M$) 可以优化计算速度和精度,进一步通过 $\beta = n_{\text{eff}} k_0$ 求得所求模式的有效折射率 n_{eff} . 通过模式有效折射率 n_{eff} 的虚部可以得到该模式所对应光纤的限制损耗^[13,14](单位为 dB/m)

$$L = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6, \quad (3)$$

其中 λ 为光波长,单位为 μm . 光纤的有效模面积表示如下^[15]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint_S |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint_S |E|^4 dx dy}, \quad (4)$$

其中 E 为电场矢量, S 为光纤的横截面积. 光纤的弯曲损耗系数为^[16,17]

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{1}{A_{\text{eff}}} \frac{\rho}{W} \frac{\exp\left(-\frac{4}{3} \frac{R}{\rho} \frac{\Delta}{V^2} W^3\right)}{\sqrt{W \frac{R}{\rho} + \frac{V^2}{2\Delta W}}}, \quad (5)$$

其中 R 为弯曲半径, ρ 为纤芯半径,

$$\Delta = \sin^2 \theta_c / 2,$$

$$V = \beta \rho \sin \theta_c,$$

$$W = \rho \sqrt{\beta^2 - \beta_{\text{cl}}^2}.$$

由于一般情况下 $R \geq \rho$, 所以对于 PCF 的弯曲损耗系数可以表示为^[18,19]

$$\alpha = \frac{\Lambda}{8\pi A_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{\Lambda}{R}} \exp\left[-\frac{\pi R}{6\Lambda n_s^2} \left(\frac{\Lambda}{\Lambda}\right)^2\right], \quad (6)$$

其中 Λ 为孔间距.

3. 数值模拟结果与分析

不同于传统光纤, PCF 所有的模式在一定程度上都有泄漏. 为了使 PCF 可以单模传输, 文献[10]中通过调节光纤的结构, 令不同模式的限制损耗不同来实现单模传输, 即高阶模式的限制损耗很高 ($L > 1$ dB/m), 而基模的限制损耗很小 ($L < 0.1$ dB/m) 可以无限制地传输, 从而实现单模传输. 我们主要研究二阶模和基模的限制损耗, 若二阶模的限制损耗 ($L > 1$ dB/m) 和基模的限制损耗 ($L < 0.1$ dB/m) 的比值大于 10 时, 光纤就可以实现单模传输. 与文献[10]中提到的六边形结构 PCF 相比, 八边形结构的 PCF 能更有效地实现不同模式间的损耗差异且能得到小的弯曲损耗. 本文设计的八边形结构 PCF 分别标注为 PCF8-1 和 PCF8-2, 如图 1(b), (c) 所示. 为了考察本文所设计光纤的优

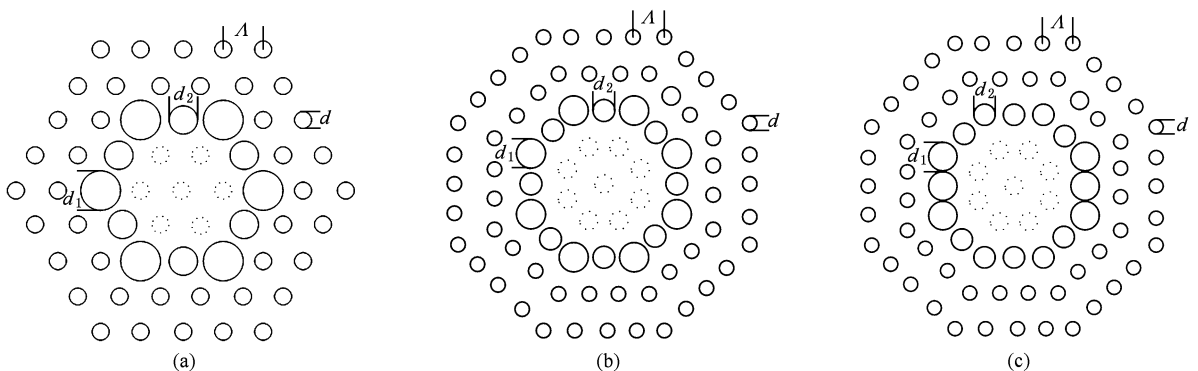


图1 模拟的光纤截面图 d_1 为最内层大圆的直径, d_2 为最内层小圆的直径, d 为外包层圆的直径. (a) PCF6, (b) PCF8-1, (c) PCF8-2

势,同时对如图 1(a)所示的六边形结构 PCF(标注为 PCF6)进行了模拟.如图 1 所示,光纤去掉两层虚线小圆来形成大纤芯,最内层由掺有少量氧化硼的石英棒大小相间组成,这样可以有效地实现不同模式间的损耗和小的弯曲损耗.为了使图 1 所示的光纤具有极小的弯曲损耗, d_1/Λ 的值固定为 0.95.

下面讨论 d_2 和 d 对模式损耗的影响.将光波长设定为 $1.064 \mu\text{m}$,随着 d_2/Λ 的增大,二阶模的限制损耗不断增大,当 PCF6, PCF8-1 和 PCF8-2 的 d_2/Λ 值分别取 0.82, 0.76, 0.79 时,二阶模的限制损耗达到最大($L > 1 \text{ dB/m}$),而基模的限制损耗变化很小

($L < 0.1 \text{ dB/m}$),如图 2 所示.然后令 PCF6, PCF8-1 和 PCF8-2 的 d_2/Λ 值分别为 0.82, 0.76, 0.79,进一步讨论 d 对模式损耗的影响.从图 3 可以看出,随着 d/Λ 的变化,PCF6, PCF8-1 和 PCF8-2 的二阶模和基模的限制损耗差分别在 $d/\Lambda = 0.4, 0.43, 0.41$ 处达到了最大,三种结构的 PCF 都满足二阶模限制损耗高于 1 dB/m 而基模限制损耗小于 0.1 dB/m 的条件,但是与 PCF6 相比,PCF8-1 和 PCF8-2 的高阶模式限制损耗比较高,这样可以更好地实现单模传输,而其中 PCF8-2 不同模式间的限制损耗差最大,所以 PCF8-2 在实现单模传输的性能上相对较好.

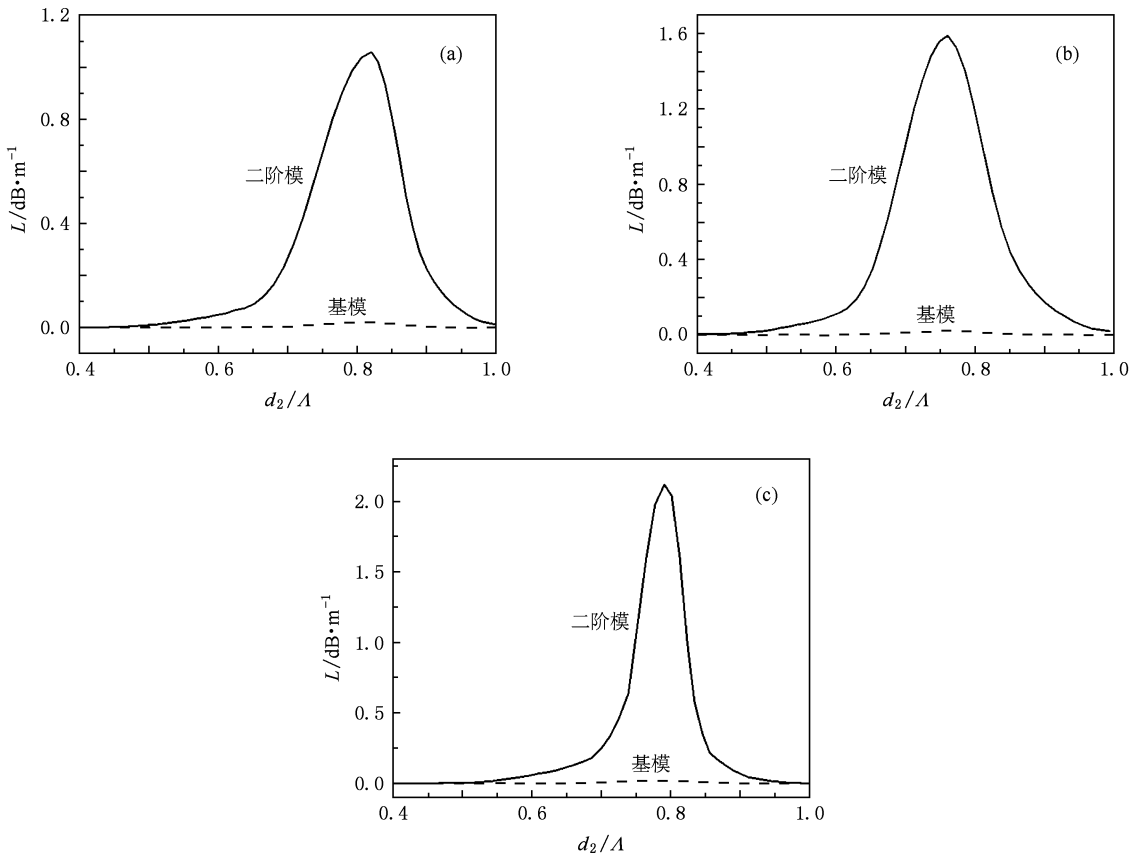


图 2 当 $d_1/\Lambda = 0.95$, $d/\Lambda = 0.451$, $\Lambda = 20 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 时不同模式的限制损耗 L 与 d_2/Λ 的关系 (a)PCF6, (b)PCF8-1, (c)PCF8-2

将图 1 所示的 PCF 中心去掉两层虚线小圆来形成纤芯,这样很小的孔间距 Λ 就可以得到极大的模场面积,如图 4 所示.在满足二阶模和基模的限制损耗差很大的情况下,光纤的模场面积可达 $2000 \mu\text{m}^2$.

经过模拟分析发现,光纤 PCF6, PCF8-1 和 PCF8-2 的最优参数分别如下: $d_1/\Lambda = 0.95$, $d_2/\Lambda = 0.82$, $d/\Lambda = 0.4$, $\Lambda = 25$; $d_1/\Lambda = 0.95$, $d_2/\Lambda = 0.76$, $d/\Lambda = 0.43$, $\Lambda = 20$; $d_1/\Lambda = 0.95$, $d_2/\Lambda = 0.79$, d/Λ

$= 0.41$, $\Lambda = 19.1$.三种结构的 PCF 在波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 时都可以实现大模场面积单模传输.其中 PCF6 和 PCF8-1 是六重对称结构,而 PCF8-2 是二重对称结构,所以 PCF8-2 会表现出一定的偏振特性,但是它的双折射小于 10^{-7} (图 5),此时 X 偏振和 Y 偏振的限制损耗差值甚微,不会影响光纤的单模传输特性^[20].

图 6 为三种光纤在不同的弯曲半径下的弯曲损

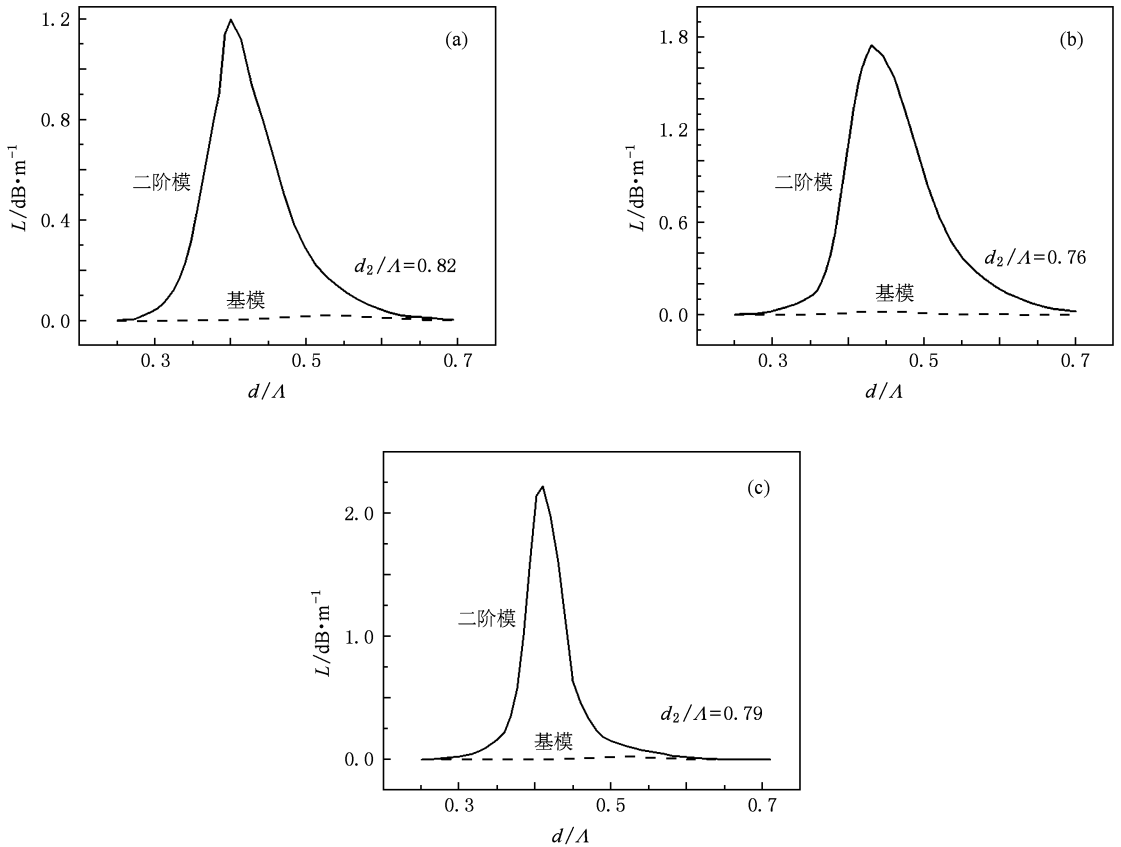


图 3 当 $d_1/\Lambda = 0.95$, $\Lambda = 20 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 时不同模式的限制损耗 L 与 d/Λ 的关系 (a) PCF6, (b) PCF8-1, (c) PCF8-2

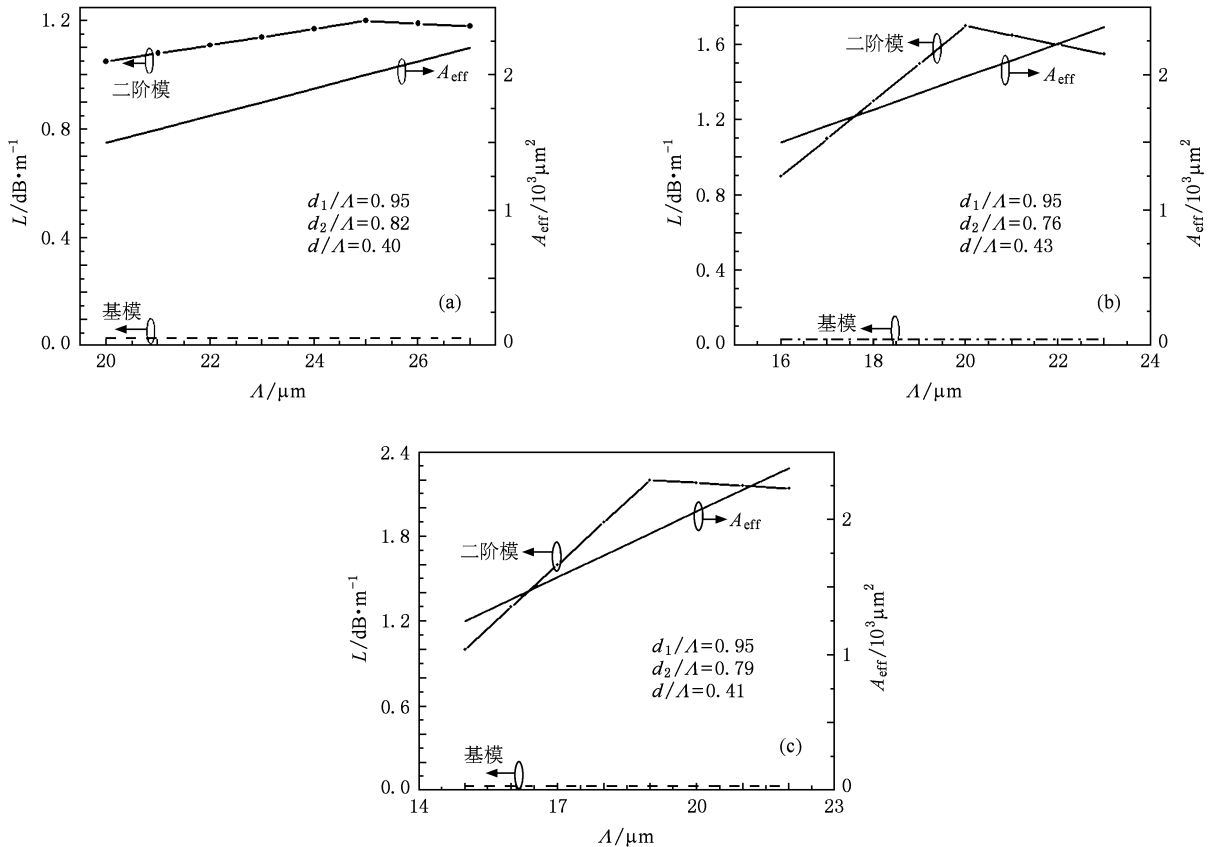


图 4 当 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 时不同模式的限制损耗 L 、有效模面积 A_{eff} 与 Λ 的关系 (a) PCF6, (b) PCF8-1, (c) PCF8-2

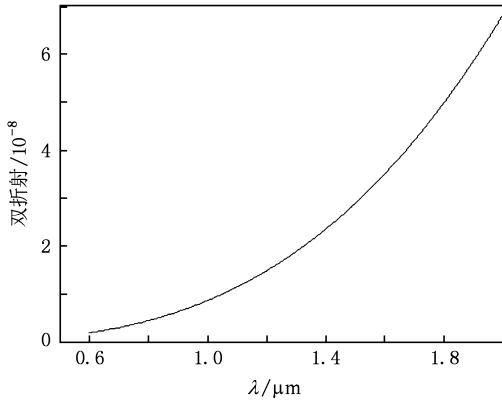
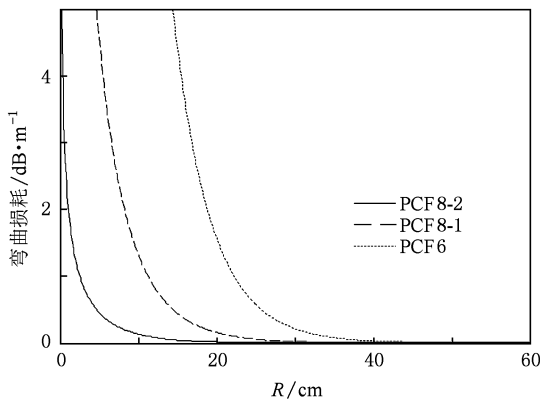


图5 光纤 PCF8-2 的双折射特性

图6 当波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 时光纤 PCF8-2, PCF8-1 和 PCF6 的弯曲损耗

耗特性. 虽然三种光纤有相同的有效模面积 ($2000 \mu\text{m}^2$), 在波长 $1.064 \mu\text{m}$ 处都可以实现单模传输, 但 PCF8-2 的弯曲半径可以小于 5 cm , 当弯曲半径为 5 cm 时弯曲损耗小于 0.5 dB/m . 由此可见, PCF8-2 这种二重对称结构的八边形光纤在保证大模场面积和较好单模传输特性的情况下, 能够极大地减小光纤的弯曲损耗.

4. 结 论

光纤激光器和光纤放大器越来越广泛地应用于工业、医学、军事等领域, 所以研究对光纤激光器、光纤放大器的发展有重要推动意义的大模场面积 PCF 是非常必要的. 本文提出一种全固态八边形大模场低损耗掺镱的石英 PCF, 这种结构的 PCF 空气孔由掺有少量氧化硼的石英棒代替, 从而提高了光纤的热损伤阈值, 简化了制备过程. 在波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 处光纤模场面积可达 $2000 \mu\text{m}^2$, 而且还发现二重对称八边形结构的 PCF 不但可以很好地实现单模传输, 同时还发现它的弯曲损耗很小, 弯曲半径为 5 cm 时的弯曲损耗小于 0.5 dB/m . 这对光纤激光器和光纤放大器的发展有重要意义.

- [1] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [2] Song Y J, Hu M L, Liu Q W, Li J Y, Chen W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5045 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 刘庆文, 李进延, 陈伟, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 5045]
- [3] Wong W S, Peng X, McLaughlin J M, Dong L 2005 *Opt. Lett.* **30** 2855
- [4] Limpert J, Schmidt O, Rothhardt J, Roser F, Schreiber T, Tunnermann A, Ermeneux S, Yvernault P, Salin F 2006 *Opt. Express* **14** 2715
- [5] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N 2004 *Electron. Lett.* **40** 470
- [6] Wang P, Cooper L J, Sahu J K, Clarkson W A 2006 *Opt. Lett.* **31** 226
- [7] Fini J M 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1669
- [8] Knight J C, Birks T A, Cregan R F 1998 *IEEE Electron. Lett.* **34** 1347
- [9] Mortensen N A, Nielsen M D, Folkner J R, Petersson A, Simonsen H R 2003 *Opt. Lett.* **28** 393
- [10] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiba M 2007 *Opt. Express* **15** 1794
- [11] White T P, Kuhlmeier B T, McPhedran R C, Maystre D, Renversez G, de Sterke C M, Botten L C 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2322
- [12] Kuhlmeier B T, White T P, Renversez G, Maystre D, Botten L C, McPhedran R C 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2331
- [13] Koshiba M, Saitoh K 2005 *Opt. Commun.* **253** 95
- [14] White T P, McPhedran R C, de Sterke C M 2001 *Opt. Lett.* **26** 1660
- [15] Mortensen N A 2002 *Opt. Express* **10** 341
- [16] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiba M 2005 *Opt. Express* **13** 4770
- [17] Olszewski J, Szpulak M, Urbanczyk W 2005 *Opt. Express* **13** 6015
- [18] Nielsen M, Mortensen N, Albertsen M, Folkner J, Bjarklev B, Bonacinni D 2004 *Opt. Express* **12** 1775
- [19] Saitoh K, Tsuchida Y, Rosa L, Koshiba M, Poli F, Cucinotta A, Selleri S, Pal M, Paul M, Ghosh D, Bhadra S 2009 *Opt. Express* **17** 4913
- [20] Zhang X J, Zhao J L, Hou J P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4668 (in Chinese) [张晓娟, 赵建林, 侯建平 2007 物理学报 **56** 4668]

Design of all-solid octagon photonic crystal fiber with large mode area *

Guo Yan-Yan^{1)†} Hou Lan-Tian¹⁾²⁾

1) (Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2) (Key Laboratory of Metastable Material Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 24 July 2009; revised manuscript received 2 November 2009)

Abstract

In this paper, a novel all-solid octagonal Yb^{3+} -doped photonic crystal fiber (PCF) with large mode area and low loss is proposed. The air holes in the cladding are replaced by the B_2O_3 -doped quartz rods, which increases the thermal damage threshold of the PCF and simplifies the fabrication process. The properties of the PCF are investigated by multi-pole method. Simulation results show that the effective mode area of this PCF is up to $2000 \mu\text{m}^2$, and the bending loss for a bending radius of 5 cm is as low as 0.5 dB/m at 1.064 μm . Also, this PCF can support effectively single-mode operation. The design results of this paper are highly meaningful for the development of fiber lasers and fiber amplifiers.

Keywords: photonic crystal fiber, effective mode area, bending loss, confinement loss

PACC: 4280L, 4281D

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60637010).

† E-mail: guoyanyan1018@126.com