

doi:10.3788/gzxb20124112.1412

双层孔大模场微结构光纤的模式特性分析

李裕蓉, 陈明阳

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要:本文分析一种由两层低折射率孔组成的大模场光纤的模式特性. 采用多极法和有限元方法数值计算并分析了内层孔与外层孔尺寸变化对光纤基模与高阶模的束缚损耗与弯曲损耗的影响, 设计获得了一种具有较高的高阶模和基模损耗比同时允许一定程度弯曲的大模场光纤. 结果表明: 当内层孔直径为 $34 \mu\text{m}$, 外层孔直径为 $24 \mu\text{m}$ 时, 其基模束缚损耗为 0.00017 dB/m , 而高阶模束缚损耗为 1.39 dB/m ; 光纤的基模模场面积为 $2150.9 \mu\text{m}^2$, 当弯曲半径为 1.2 m 时, 弯曲损耗为 0.106 dB/m .

关键词:大模场光纤; 束缚损耗; 单模传输

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

文章编号: 1004-4213(2012)12-1412-4

0 引言

非线性效应及光纤损伤等限制了光纤激光器功率的提升, 而大模场光纤被认为是解决这一问题最直接有效的途径. 理想的大模场光纤应该使其基模损耗较低而高阶模损耗较高, 即两者的损耗比应该较大. 同时, 光纤应该允许一定程度的弯曲, 从而保证光纤性能的稳定性. 光子晶体光纤或微结构光纤, 因其独特的结构和奇特的传光特性, 为光纤通信、光纤激光及光纤传感领域提供了一种新型的光传输媒质. 人们已经提出了多种新型结构大模场微结构光纤^[1-7].

Tsuchida 等人提出了一种基于谐振耦合提高高阶模损耗的方法, 获得了模场面积 $1400 \mu\text{m}^2$, 且在弯曲半径 0.05 m 时的弯曲损耗小于 1 dB/m , 但其高阶模损耗仅为约 1 dB/m ^[1]. Wong 等人提出了一种基于单层空气孔结构的大模场光纤结构, 通过调整空气孔的大小、间距和排列方式等, 使高阶模的损耗大于基模的损耗而泄露出去, 获得了等效的单模传输, 并具有较低的弯曲损耗^[2]. 随后, Dong 等人提出基于低折射率孔的大模场泄露光纤结构. 采用单层孔组成的这种光纤, 纤芯直径可达 $50 \mu\text{m}$ 以上, 高阶模和基模的损耗比在 25 左右. 采用双层孔结构, 高阶模与基模的损耗比可达 600 以上, 但由于束缚能力增强, 其高阶模损耗一般在 1 dB/m 以下^[4]. 这种全玻璃的保偏泄露通道光纤已经被应用

于皮秒脉冲激光的放大实验^[6], 获得了峰值功率 230 kW 、光束质量因子 1.35 的激光输出, 模场直径达到 $64 \mu\text{m}$.

文献[4]报道的双层孔结构泄露通道光纤, 其内层孔和外层孔的孔直径是相同的. 由于内层孔和外层孔对光纤模式传输特性的影响不同, 因此, 对内层孔和外层孔的作用和影响进行研究, 有可能获得更为理想的传输性能. 本文分析了两层孔结构参量变化对光纤传输性能的影响, 为制作具有大损耗比特性的大模场光纤提供了理论依据.

1 数值计算

光纤的横截面结构如图 1 所示, 光纤包层由基质材料和包围纤芯的两层低折射率孔组成. 设光纤基质材料为纯石英, 其折射率 $n_c = 1.45$. 所有孔均

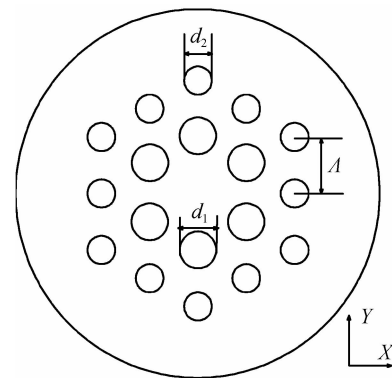


图 1 光纤横截面面积
Fig. 1 Cross-section of the optical fiber

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10904051)资助

第一作者: 李裕蓉(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤技术. Email: 821992573@qq.com

导师(通讯作者): 陈明阳(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤技术及应用. Email: miniyong@163.com

收稿日期: 2012-05-31; 修回日期: 2012-07-30

由掺杂的石英组成,孔和包层折射率差 $\Delta n=0.006$. 孔的周期为 $\Lambda=50 \mu\text{m}$. 内层孔直径为 d_1 , 外层孔直径为 d_2 . 本文取光波长 $\lambda=1.064 \text{ nm}$.

本文采用 CUDOS MOF Utilities 软件对光纤的模式特性进行分析. CUDOS MOF Utilities 是一个基于多级法原理,模拟微结构光纤模式特性的仿真软件^[8-9]. 它可以模拟由圆形结构孔组成的微结构光纤的模式特性. 本文选取贝塞尔函数系的截止阶数为 10.

为实现有效的单模传输,一般要求大模场光纤的基模束缚损耗低于 0.1 dB/m ,同时高阶模束缚损耗大于 1 dB/m . 显然,在要求高阶模获得相同程度的衰减时,高阶模与基模损耗比更大的大模场光纤可以具有更低的基模损耗. 反之,在基模衰减相同的前提下,损耗比更大的光纤可以使其高阶模衰减更大. 首先本文分别改变内外层孔的大小来分析外层孔和内层孔对模式损耗的影响.

图 2 中实线表示基模(LP_{01})的损耗曲线,虚线表示高阶模(LP_{11})的损耗曲线;图中曲线从无标记、圆圈标记、十字叉到菱形标记分别表示外层孔直径 $d_2=32,34,36,38 \mu\text{m}$ 时的结果. 由图 2 可知,在外层孔直径一定的前提下,内层孔直径的增大对模式束缚损耗的影响并不是很大. 当外层孔直径较大时,无论内层孔直径怎样变化,高阶模的束缚损耗都小于 1 dB/m . 因此外层孔增大时,虽然可以减小束缚损耗,但是不能保证有效单模传输.

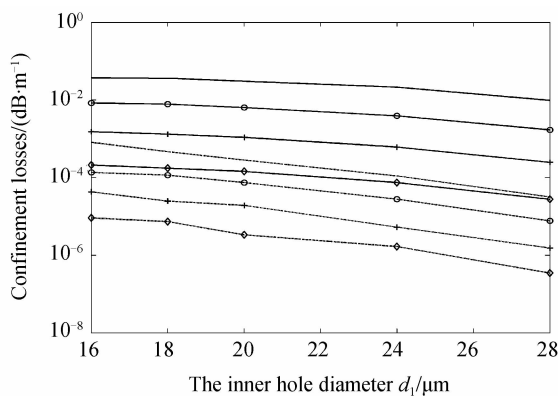


图 2 束缚损耗与内层孔直径的关系曲线
Fig. 2 Confinement losses of the large-mode area fiber as functions of inner hole diameters

从图 3 可知,在外层孔直径 d_2 不变,而内层孔直径 d_1 增大时,其高阶模和基模的损耗比也逐渐增大,损耗比最大可达 200 以上. 本文进一步分析了内层孔大小对损耗性能的影响. 图 4 中实线表示 LP_{11} 模的损耗曲线,虚线表示 LP_{01} 模的损耗曲线;图中曲线从无标记、带十字叉到菱形标记分别表示内层孔直径 $d_1=34,36,38 \mu\text{m}$ 时的结果. 由图 4 可

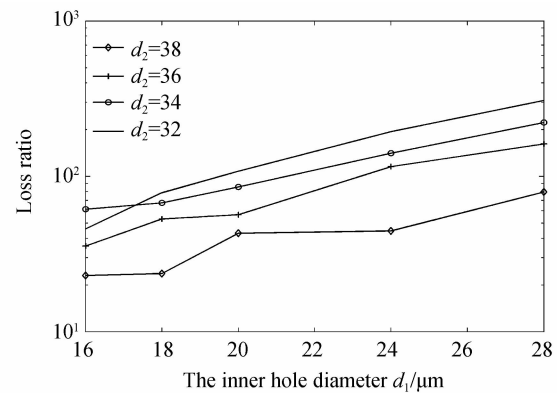


图 3 损耗比与内层孔直径 d_1 的关系曲线
Fig. 3 Loss ratio of the LMA optical fiber as functions of the inner hole diameter

知,当内层孔直径不变时,随外层孔直径的增大,其基模损耗减小,其趋势接近于线性变化. 而在外层孔直径小于一定值时,其高阶模损耗均保持在较大值;只有当外层孔直径大于一定值后其高阶模损耗迅速减小. 这一点同样也反映在基模和高阶模的损耗比上. 由图 5 看出,损耗比有一极大值,外层孔直径过大或过小都会导致损耗比的减小. 内层孔直径变化对损耗比的影响不大,其曲线走势基本一致. 由此可

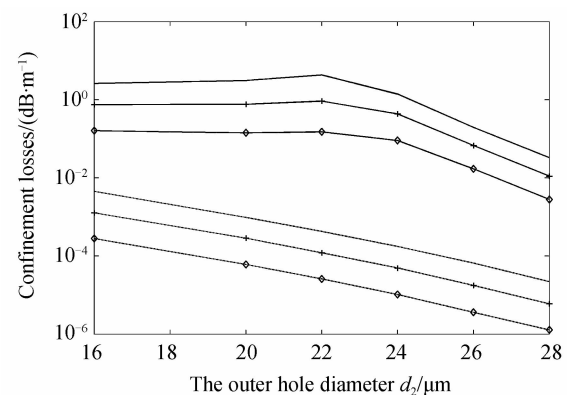


图 4 束缚损耗与外层孔直径的关系曲线
Fig. 4 Confinement losses of the LMA (large-mode area) fibre as functions of hole diameters of outer layer

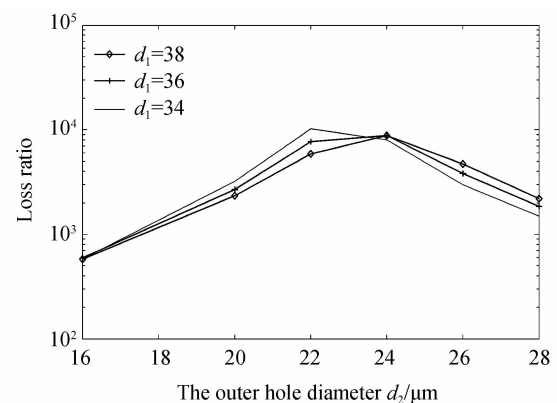


图 5 损耗比与外层孔直径 d_2 的关系曲线
Fig. 5 Loss ratio of the LMA optical fiber as functions of the outer hole diameter

见,外层孔直径变化对损耗比影响最大,损耗比最高达到 10 000. 特别地,当内层孔直径 $d_1=34\ \mu\text{m}$,外层孔直径 $d_2=24\ \mu\text{m}$ 时,基模束缚损耗为 $0.000\ 17\ \text{dB/m}$,而高阶模束缚损耗为 $1.39\ \text{dB/m}$.

计算光纤的弯曲损耗时,本文采用有限元法对其进行模拟. 这里网格划分总量在 4 万左右,并在包层区采用完美匹配层边界条件. 获得模式的有效折射率后,由损耗计算公式 $L=[20/\ln(10)](2\pi/\lambda)\cdot\Im(n_{\text{eff}})$ 得出其弯曲损耗,这里 $\Im(n_{\text{eff}})$ 为模式有效折射率的虚部,取光纤的孔直径参量为内层孔直径 $d_1=34\ \mu\text{m}$ (弯曲半径 $1.2\ \text{m}$),分析外层孔变化时的弯曲损耗情况. 由图 6 可见,随着外层孔直径的增大,损耗逐渐减小. 即外层孔对弯曲损耗是有作用的,尤其当外层孔直径大于 $26\ \mu\text{m}$ 时这种作用更为明显.

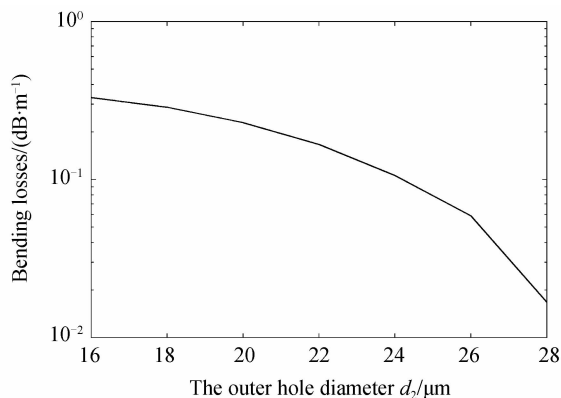


图 6 外层孔直径 d_2 变化时的弯曲损耗曲线
Fig. 6 Bending losses of LMA fiber as functions of outer hole diameter

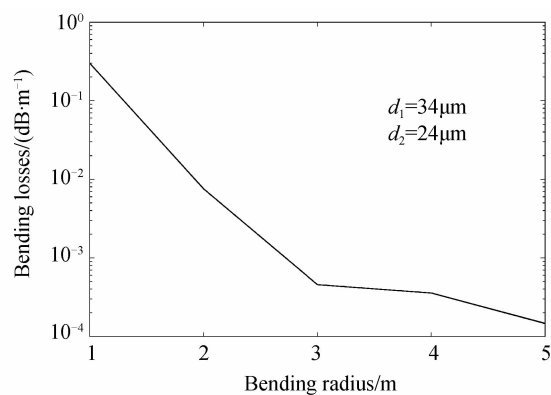


图 7 弯曲损耗与弯曲半径的关系曲线
Fig. 7 Bending losses as functions of bending radius

结合图 6 和图 7 可知,当取内层孔直径 $d_1=34\ \mu\text{m}$,外层孔直径 $d_2=24\ \mu\text{m}$ 时,光纤的综合性能最好.

光纤的模场面积可以表示为^[10]: $A_{\text{eff}} = [\int dr_{\perp} I(r_{\perp})]^2 [\int dr_{\perp} I^2(r_{\perp})]^{-1}$. 这里 $I(r_{\perp})$ 为基

模的横向场强分布,而光纤的模场直径 d_{MFD} 可以通过 $d_{\text{MFD}}=2(A_{\text{eff}}/\pi)^{1/2}$ 获得. 此时,光纤的基模模场面积为 $2\ 150.9\ \mu\text{m}^2$. 同时,当弯曲半径为 $1.2\ \text{m}$ 时,弯曲损耗为 $0.106\ \text{dB/m}$.

2 结论

本文给出了一种基于两层不同孔直径的大模场光纤的传输特性,分析了不同孔直径时光纤的基模与高阶模束缚损耗变化趋势,以及光纤的弯曲损耗. 结果发现:当内层孔直径大小固定,外层孔直径较小时,高阶模束缚损耗变化较慢,基模束缚损耗却随着外层孔直径增大而明显减小;而光纤的弯曲损耗总是随着外层孔直径的增大而减小. 因此,可以采用适当的外层孔直径,从而获得较高的高阶模与基模损耗比和允许一定程度弯曲的光纤结构.

参考文献

- [1] TSUCHIDA Y, SAITOH K, KOSHIBA M. Design of single-mode hole fibers with large-mode-area and low bending losses: the significance of the ring-core region[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(4): 1794-1803.
- [2] WONG W S, PENG X, McLAUGHLIN J M, et al. Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers[J]. *Optics Express*, 2005, **30**(21): 2855-2857.
- [3] CANAT G, JETSCHKE S, UNGER S, et al. Multifilament-core fibers for high energy pulse amplification at $1.5\ \mu\text{m}$ with excellent beam quality[J]. *Optics Express*, 2008, **33**(22): 2701-2703.
- [4] DONG L, WU T, McKAY H A, et al. All-glass large-core leakage channel fibers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(1): 47-53.
- [5] SAITOH K, TSUCHIDA Y, ROSA L, et al. Design of all-solid leakage channel fibers with large mode area and low bending loss[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(6): 4913-4919.
- [6] DONG L, McKAY H A, FU L, et al. Ytterbium-doped all glass leakage channel fibers with highly fluorine-doped silica pump cladding[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(11): 8962-8969.
- [7] CHEN M Y, ZHANG Y K. Bend insensitive design of large-mode-area microstructured optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(15): 2216-2222.
- [8] WHITE T P, KUHLMEY B T, McPHERAN R C, et al. Multipole method for microstructured optical fibers. I. formulation[J]. *JOSA B*, 2002, **19**(10): 2322-2330.
- [9] KUHLMEY B T, WHITE T P, RENVERSEZ G, et al. Multipole method for microstructured optical fibers. II. implementation and results[J]. *JOSA B*, 2002, **19**(10): 2331-2340.
- [10] MORTENSEN N A, NIELSEN M D, FOLKENBERG J R, et al. Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(6): 393-395.

Analysis in Large Mode Area Optical Fiber with Two-ring Holes

LI Yu-rong, CHEN Ming-yang

(*School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China*)

Abstract: The modal properties of large-mode-area microstructured optical fiber with two-ring holes are analyzed. By using the multipole method and finite element method, the influence of inner and out hole sizes on the fundamental mode and higher-order mode losses of the fiber are numerically calculated and analyzed. In addition, a large-mode area microstructured optical fiber is designed with high loss ratio of higher-order mode and fundamental mode as well as allowing for bending at a moderate radius. For the fiber with the inner ring of hole diameters of $34\ \mu\text{m}$ and the outer ring of hole diameters of $24\ \mu\text{m}$, the fundamental mode loss is $0.00017\ \text{dB/m}$, whereas the high order mode loss is $1.39\ \text{dB/m}$. The mode area of the fundamental mode is $2150.9\ \mu\text{m}^2$, and the bending loss at the bending radius of $1.2\ \text{m}$ is $0.106\ \text{dB/m}$.

Key words: Large-mode area optical fiber; Confinement loss; Single-mode operation