具有双模特性的大模场面积微结构光纤的设计*

陈艳1) 周桂耀1)† 夏长明1) 侯峙云1) 刘宏展1) 王超2)

(华南师范大学微纳光子功能材料与器件重点实验室,广州 510006)
 (燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室,秦皇岛 066004)
 (2013年7月19日收到;2013年9月9日收到修改稿)

本文提出了一种具有双模特性大模场面积的微结构光纤,通过有限元法计算其模场分布、基模有效模场 面积及弯曲损耗特性,并分析了不同结构参量对限制损耗及有效模场面积的影响.计算结果表明:通过合理地 改变光纤结构参量,可以使二阶模LP₁₁、三阶模EH₁₁截止,实现基模LP₀₁、三阶模HE₃₁双模传输,其中基模 的有效模场面积可达700 μm².这种结构的光纤制作简单,在大容量光纤传输系统中具有重要应用.

关键词: 微结构光纤, 双模, 大模场面积, 有限元法 PACS: 47.11.Fg, 42.81.Qb, 42.68.Ay, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.63.014701

1引言

随着光纤通信网络的快速发展,现有单模光纤的传输容量逐渐无法满足当今信息日益增长的需求,为了克服光纤通信的容量限制,从而提出了基于少模光纤的模分复用技术(MDM)^[1,2].少模光 纤支持有限个模式传输,相比于单模光纤,可利用 MDM技术增大光纤传输容量;而相比于多模光纤, 又可通过合理地改变结构参数来控制模式数量,从 而降低模式色散和串扰.此外,少模光纤还可应用 于一些光栅和传感器中,这些器件通过检测模式耦 合对应的谐振波长变化,可以对温度、应变等多种 物理量进行测量^[3-5].

影响光纤传输容量的主要因素是光纤的非线 性效应,而光纤的非线性系数与有效模场面积成反 比,可通过增大纤芯直径增加模场面积从而降低非 线性效应^[6,7],但是这样会增大光纤的弯曲损耗和 模式数量,影响光纤传输质量.少模光纤不仅能增 加纤芯直径提高传输容量,还能大大降低色散和传 输损耗.但是少模光纤还存在一些问题:模式数目 的增加会增大光纤的传输损耗以及本身的稳定性. 因此,如何有效地减少少模光纤的模式数量、增大 模场面积、降低传输损耗是急需解决的问题.

本文提出了一种具有双模特性的大模场面积 微结构光纤.通过合理地改变光纤结构参数,可提 高模场面积、降低传输损耗,控制光纤只支持基模 LP₀₁和三阶模HE₃₁,从而实现双模传输.相比于最 近报道的多芯双模大模场光纤^[8,9],该光纤为单芯 结构,基模有效模场面积可达700 µm²,支持基模 LP₀₁和三阶模HE₃₁独特的双模传输;而相比于近 来出现的新型微结构光纤^[10,11],该光纤结构简单, 材料组成单一,易于拉制.

2 光纤结构设计

双模特性的大模场微结构光纤横截面如 图1所示,光纤包层空气孔呈花瓣形排列,四组 梯形空气孔群对称分布于纤芯周围,其特点相比传 统的微结构光纤,多出了四条泄露通道.该光纤包 层可看成由四个微结构包层元素组成,每个微结构 包层元素内空气孔直径为d,相邻空气孔间距为A, 石英包层直径为190 μ m,折射率为 $n_{clad} = 1.45$,工 作波长1.55 μ m,定义相对空气孔径f = d/A.

* 国家重点基础研究发展 (973 计划)(批准号: 2010CB327604) 和国家自然科学基金 (批准号: 61377100) 资助的课题.

© 2014 中国物理学会 Chinese Physical Society

[†]通讯作者. E-mail: gyzhou@scnu.edu.cn



图1 双模特性大模场微结构光纤横截面结构示意图

3 模式特性

采用全矢量有限元法,边界条件为完美匹配层 (perfectly matched layer, PML),分析该双模特性 大模场微结构光纤的模式特性,光纤中的磁场强度 *H*满足亥姆赫兹方程

$$\nabla \times \left(n^{-2} \nabla \times \boldsymbol{H} \right) - k_0^2 \boldsymbol{H} = 0, \qquad (1)$$

其中, $H = H(x, y) \exp(-j\beta z)$, n表示光纤横截面 的折射率分布, k_0 是真空中的波数, β 是模式的传 播常数.对于给定的包层折射率、孔间距入、相对孔 径 f, 根据该方程就能唯一确定光纤折射率的分布 n(x, y), 从而计算出给定波长下各模式的磁场强 度 H 和传播常数 β .如图 2 所示为该光纤在波长 $\lambda = 1550$ nm 时两个简并基模 HE₁₁、二阶模 TE₀₁, TM₀₁, HE₂₁ 以及三阶模 HE₃₁ 和 EH₁₁ 的模场分布 和二维电矢量分布.在这里我们通过引入四条泄露 通道, 来增加高阶模的泄露损耗, 从而达到了减少 模式数目的目的.进一步研究表明, 通过合理地选 择光纤结构参数二阶模 TE₀₁, TM₀₁, HE₂₁ 以及三 阶模 EH₁₁ 可以截止, 光纤中传输的模式只剩下两 个简并基模 HE₁₁ 和两个简并三阶模 HE₃₁.

4 结构参数对光纤特性的影响

用来表征双模特性大模场光纤的结构参量有: 空气孔间距 Λ 、相对空气孔径大小 $f = d/\Lambda$.下面通 过研究各参量对该光纤的限制损耗以及模场面积 的影响来分析模式传输的截止特性.

4.1 光纤的限制损耗

通常而言,包层空气孔的层数是有限的,光 在纤芯中传输时会通过包层空气孔的间隙泄露到 包层,从而造成光纤传输能量的损耗,这种损耗 称为限制损耗.基模的限制损耗*C*_{loss}可通过下式 计算^[12]:

$$C_{\rm loss} = \frac{40\pi}{\ln(10)\lambda} {\rm Im}(n_{\rm eff}) ({\rm dB/m}), \qquad (2)$$

其中n_{eff}是基模的有效折射率, Im(n_{eff}) 是基模 有效折射率的虚部, 根据微结构光纤模式选择理 论^[13]可知, 当模式损耗大于1 dB/m时, 该模式 截止.

这里利用有限元法模拟计算该光纤各模式的 限制损耗. 假设相对孔径分别为f = 0.45, 0.50,0.55, 0.60, 我们研究了孔间距 A 对光纤各模式限 制损耗的影响,如图3所示.不同相对孔径f时,基 模、二阶模、三阶模 EH_{11} 大体都会随 Λ 的增大而减 小,但三阶模HE₃₁却出现了两个明显的低谷,这是 因为随着 Λ 的增大,四条泄露通道会减小,导致损 耗值出现了先减小后增大,再减小再又增大的反复 变化的现象.相同的 $f, \Lambda, - c h$ 值内, 基模损耗 最小、其次是三阶模 HE31, 最后则是二阶模和三阶 模EH11. 而当二阶模LP11和三阶模EH11的限制 损耗大于1 dB/m 时根据模式传输理论可知, LP11, EH11 传输模式截止, LP01, HE31 双模传输.进一步, 当三阶模 HE31 限制损耗也大于1 dB/m 时, 光纤实 现基模传输.此外,由图中可知,不同f时实现双模 传输的 / 值不一样, 说明为实现双模传输, 需要不 同的结构参量组合.如表1所示为不同f对应单 模、双模传输的 Λ 值. 当f = 0.50, 0.55时, 可取的 Λ 值范围较广,且基模LP₀₁、三阶模HE₃₁损耗较 低,易于双模传输.

表1 不同相对孔径f对应的最佳孔间距A值

不同 f 的模式数	$f = 0.45 \ \Lambda/\mu m$ 值	$f=0.5~\Lambda/\mu{\rm m}$ 值	$f = 0.55 \ \Lambda/\mu$ m 值	$f=0.6~\Lambda/\mu{ m m}$ 值	
单模	$12.0 \leqslant \varLambda \leqslant 12.6$	$12.0 \leqslant \varLambda \leqslant 12.9$	$12.0 \leqslant \varLambda \leqslant 13.5$	$12.0 \leqslant \Lambda \leqslant 13.7$	
	$15.1 \leqslant \varLambda \leqslant 18.0$	$15.9 \leqslant \varLambda \leqslant 16.2$			
双模	$12.6 \leqslant \varLambda \leqslant 15.1$	$12.9 \leqslant \varLambda \leqslant 15.9$	$13.5 \leqslant \varLambda \leqslant 16.0$	$13.7 \leqslant \varLambda \leqslant 15.5$	
		$16.2 \leqslant \varLambda \leqslant 17.0$	$16.1 \leqslant \Lambda \leqslant 16.7$		



图 2 该双模特性的大模场微结构光纤各模式的模场分布和二位电矢量分布 (a), (b) 基模 HE₁₁ 的两个简并模式; (c) TE₀₁ 模; (d) TM₀₁ 模; (e), (f) HE₂₁ 模; (g) EH₁₁ 模; (h) HE₃₁ 模



5

图 3 大模场少模光纤各模式限制损耗随孔间距 A 的变化曲线

(a)—(d)分别表示相对孔径 f = 0.45, 0.50, 0.55, 0.60

基模弯曲损耗特性分析

18

光纤的有效模场面积 4.2

光纤中基模的模场分布属于尽高斯分布,其模 场面积可表示为[12]

$$A_{\rm eff} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x,y)|^2 \,\mathrm{d}x \,\mathrm{d}y\right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x,y)|^4 \,\mathrm{d}x \,\mathrm{d}y},\qquad(3)$$

其中, E(x,y)为基模横向电场分量. 由上式可知光 纤截面的横向电场分布越广,其有效模场面积越 大,这为设计大模场光纤提供了理论依据.

为了研究该光纤各结构参量对基模有效模场 面积的影响, 计算了不同相对孔径 f 下有效模场 面积 A_{eff} 随孔间距 Λ 变化的情况,结果如图4所示, 当孔间距 / 增大时, 基模有效模场面积均减小.这 是因为1较小时,基模接近于截止,对模场的束缚 能力较弱,基模泄露到包层中,限制损耗变大,有效 模场面积变大.

等效折射率分布可以用下式表示[14]: $n(x, y) = n_0(x, y) \exp(x/R),$ (4)

改变,影响光纤的传输特性,造成模场泄露,产生光

纤弯曲损耗.若光纤沿+x方向弯曲,光纤横截面的

当光纤弯曲时,光纤几何结构和折射率会发生

其中, $n_0(x, y)$ 是光纤初始折射率分布, R 是光纤的 弯曲半径.

取二阶模LP11限制损耗为1dB/m,光纤中实 现双模传输时,通过计算比较不同弯曲半径下相对 孔径不同时基模弯曲损耗的变化,如图5所示.光 纤弯曲损耗随弯曲半径的增大呈指数下降后保持 稳定,弯曲半径 R = 7.5 cm 时,相对孔径 f = 0.5 $(\Lambda = 17 \ \mu m)$, 弯曲损耗为 0.0698 dB/m; 相对孔 径 f = 0.55 ($A = 16.6 \mu m$), 弯曲损耗为 0.0276 dB/m; 相对孔径 f = 0.6 ($A = 15.5 \mu m$), 弯曲损耗 为0.4885 dB/m. 当弯曲半径 R小于 7.5 cm 时, 相

对孔径 f = 0.5 ($\Lambda = 17 \mu m$)的弯曲损耗随 R的减 小迅速增大.



图 4 不同相对孔径 f 下基模有效模场面积 A_{eff} 随孔间距 A 的变化曲线



图 5 不同相对孔径下光纤基模弯曲损耗

6 结 论

本文介绍了一种新型双模特性的大模场微结构光纤,计算了该光纤的模场分布、基模有效模场

面积以及弯曲损耗,综合比较了各结构参量对各模 式限制损耗及基模有效模场面积的影响.研究表明, 在实现双模传输的情况下,基模有效模场面积约为 700 μm²,改变各结构参量还可实现单模传输.这种 光纤纤芯和包层材料都为石英材料,制备方便.该 光纤不仅可在高速大容量系统中作为传输线路使 用,还可应用于放大器和高功率激光器中.

参考文献

- Limpert J, Liem A, Reich M, Schreiber T, Nolte S, Zellmer H, Tünnermann A 2003 Opt. Lett. 28 393
- [2] Agruzov P M, Dukel'skii K V, Il'ichev I V, Kozlov A S, Shamrai A V, Shevandin V S 2010 Quant. Electron. 40 254
- [3] Rao Y J 1997 Meas. Sci. Technol. 8 355
- [4] Sun A, Qiao X G, Jia Z N, Guo T, Chen C Y 2005 Chin. J. Lasers **32** 224
- [5] Chen D, Wu C, Tse M L V, Tam H Y 2011 Progress In Electromagnetics Research 119 335
- [6] Al Amin A, Li A, Chen S, Chen X, GaoG, ShiehW 2011
 Opt. Express 19 16672
- [7] Love J D, Riesen N 2012 Opt. Lett. 37 3990
- [8] Zheng S W, Lin Z, Ren G B, Jian S S 2013 Acta Phys. Sin. 62 044224 [郑斯文,林桢,任国斌,简水生 2013 物理 学报 62 044224]
- [9] Lin Z, Zheng S W, Ren G B, Jian S S 2013 Acta Phys. Sin. 62 064214 [林桢, 郑斯文, 任国斌, 简水生 2013 物理 学报 62 064214]
- [10] Yi C S, Dai S X, Zhang P Q, Wang X S, Shen X, Xu T F, Nie Q H 2013 Acta Phys. Sin. 62 084206 [易昌申, 戴世勋,张培晴, 王训四, 沈祥, 徐铁峰, 聂秋华 2013 物理学报 62 084206]
- [11] Qin W, Li S G, Xue J R, Xin X J, Zhang Lei 2013 Chin. Phys. B 22 074213
- [12] Haxha S, Ademgil H 2008 Opt. Commun. 281 278
- [13] William S W, Peng X, Joseph M M, Dong L 2005 Opt. Lett. **30** 2855
- [14]~ Vu N H, Hwang I K, Lee Y H 2008 $Opt.~Lett.~{\bf 33}~119$

Analysis of a novel dual-mode large-mode-area micro-structured fiber^{*}

Chen Yan¹⁾ Zhou Gui-Yao^{1)†} Xia Chang-Ming¹⁾ Hou Zhi-Yun¹⁾ Liu Hong-Zhan¹⁾ Wang Chao²⁾

1) (Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, Guangzhou 510006, China)

2) (State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)
 (Received 19 July 2013; revised manuscript received 9 September 2013)

Abstract

A novel dual-mode large-mode-area micro-structured fiber is proposed. The characteristics of mode field distribution, effective area of fundamental mode, and bending loss based on FEM (finite element method) are analyzed. And the effects of all structured parameters on the confinement loss and effective area are discussed. Results show that this structure makes the first HOM (LP₁₁) and the second mode(EH₁₁) cut off, and it achieves dual-mode transmission in the fiber by adjusting the structural parameters. The effective area of a fundamental mode is approximately 700 μ m². The dual-mode large-mode-area micro-structured fiber can be used in large-capacity fiber transmission.

Keywords: micro-structured fiber, dual mode, large mode area, FEM (finite element method) PACS: 47.11.Fg, 42.81.Qb, 42.68.Ay, 42.81.-i DOI: 10.7498/aps.63.014701

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB327604), and the Key Program of the National Natural Foundation of China (Grant No. 61377100).

[†] Corresponding author. E-mail: gyzhou@scnu.edu.cn