

文章编号: 0258-7025(2008)03-0426-04

增益导引和折射率导引在大模场 单模光纤设计中的应用

王伟能 张铁犁 谭晓玲 姚建铨

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所,
天津大学教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要 传统的大模场光纤是通过设计光纤结构来获得大模场面积的, 可以实现的模场面积只能达到几百平方微米。增益导引和折射率导引相结合是实现大模场单模光纤的一种新方法。通过分析增益因子对折射率以及归一化频率的影响, 得到了光纤中各阶模式截止条件与纤芯包层折射率差和增益因子的关系。最后以包层折射率为 1.5734, 纤芯折射率为 1.5689, 纤芯半径为 50 μm , 10% (原子数分数) 重掺杂钕离子的磷酸盐光纤作为模拟计算对象, 当波长为 1.064 μm 时, 得到其模场直径大于 90 μm 。对于普通光纤, 增益导引和负折射率导引相结合的方法对实现大模场单模传输很有前景。

关键词 光纤光学; 光纤激光器; 大模场单模光纤; 增益导引; 折射率导引

中图分类号 TN 248.1; TN 252 **文献标识码** A

Application of Gain Guiding and Index Guiding for Designing Large-Mode-Area Single-Mode Fiber

Wang Weineng Zhang Tieli Tan Xiaoling Yao Jianquan

(Institute of Laser and Opto-Electronics, College of Precision-Instrument and Opto-Electronics Engineering,
Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science and Technology,
Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract The large mode area in conventional fiber is achieved generally by design fiber structure, which leads to limited mode area about several hundreds square microns. Gain guiding plus index guiding is a new method to realize single mode fiber with large mode area. By analyzing the effect of gain coefficient on refractive index and the complex-valued normalized frequency, the relationship between index-difference, gain-coefficient and cutoff conditions of different modes is obtained. Finally taking a Nd doped phosphate fiber with a 100 μm diameter core for an example, where the refractive index of 10% (atomic fraction) Nd-doped core is 1.5689 and 1.5734 in the cladding, through simulation computation, the mode-diameter is larger than 90 μm at 1.064 μm . To achieve large-mode-area single-mode fiber, it is a good method of applying gain guiding and index guiding for conventional fiber.

Key words fiber optics; fiber laser; larger-mode-area single-mode fiber; gain guiding; index guiding

1 引言

高功率光纤激光器在激光加工、军事等方面有广泛应用^[1~3]。然而在几千瓦的抽运功率下, 普通

的单模光纤将会产生非常严重的非线性效应。因此, 需要一种具有大模场特性的单模光纤。

传统实现大模场光纤主要采用减小数值孔径和

收稿日期: 2007-08-16; 收到修改稿日期: 2007-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(60637010, 10471071)资助项目。

作者简介: 王伟能(1983—), 男, 湖南人, 硕士研究生, 主要从事全固态激光和非线性频率变换研究。

E-mail: w_wein@yahoo.com.cn

导师简介: 姚建铨(1939—), 男, 上海人, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 目前主要研究光学方法产生太赫兹。

E-mail: jiyao@tju.edu.cn

设计光纤折射率分布等方法。第一种方法会导致导光效应变弱, 损耗增加。第二种方法可能会带来多模振荡问题。这两种方法都是通过设计光纤的结构来获得大模场面积, 目前可以实现的模场面积只能达到几百平方微米^[4]。要实现模场直径 100 μm 以上, 同时满足单模传输条件, 传统设计光纤结构的方法就难以实现。本文采用纤芯掺杂激活离子, 引入增益, 综合利用折射率导引和增益导引来实现单模光纤大模场。

2 增益因子 g 对折射率的影响

考虑沿 z 向传输的光波。纤芯未引入增益时, 设导波模解的复振幅项为 $A \exp\{-i[2\pi(n + \Delta n)/\lambda]z\}$ 。纤芯引入增益后, 其导波模解的复振幅项变为 $A \exp\{-i[2\pi(n + \Delta n)/\lambda]z + \Delta g z\}$ 。其中 n 为包层的折射率, Δn 为纤芯与包层的折射率差, λ 为传播的波长, Δg 为纤芯引入的增益因子。

对比变化前后导波模的复振幅项, 可以得

$$\frac{2\pi(n + \Delta n)}{\lambda} + i\Delta g = \frac{2\pi[n + \Delta n + i(\lambda/2\pi)\Delta g]}{\lambda} = \frac{2\pi(n + \Delta \tilde{n})}{\lambda}, \quad (1)$$

纤芯折射率由 $n + \Delta n$ 等效为 $n + \Delta \tilde{n}$ 。其中 $\Delta \tilde{n} = \Delta n + i(\lambda/2\pi)\Delta g$ 。

传统光纤有一个重要参数归一化频率 V , 它的取值大小与光纤中存在的模式数有关

$$V^2 = u^2 + w^2 = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 [(n + \Delta n)^2 - n^2] \approx \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 (2n\Delta n), \quad (2)$$

式中 $u^2 = a^2[k_0^2(n + \Delta n)^2 - \beta^2]$, $w^2 = a^2(\beta^2 - k_0^2 n^2)$, k_0 为真空中波矢, a 为纤芯半径, β 为光纤的传播常数。把引入增益后的光纤纤芯等效折射率代入(2)式, 可以得到

$$\tilde{V}^2 = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 [(n + \Delta \tilde{n})^2 - n^2] \approx \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 2n\left(\Delta n + i\frac{\lambda}{2\pi}\Delta g\right), \quad (3)$$

引入增益后, 归一化频率 \tilde{V} 不仅与光纤纤芯半径 a , 传输波长 λ , 纤芯折射率 $n + \Delta n$, 包层折射率 n 有关, 还与增益因子 Δg 有关。

3 光纤中各阶模对应的 V 的取值范围

在圆柱坐标系中, 光纤满足的亥姆霍兹方程为^[5]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + k^2 \Psi = 0, \quad (4)$$

r, φ, z 为圆柱坐标系中的三个坐标参量, Ψ 可以是电场纵向分量, 也可以是磁场纵向分量。在所研究的光纤中, 纤芯与包层折射率差比较小, 满足弱导近似条件, 光纤中的各种模式简并成为光纤中确实存在的线偏振(LP)模。为了实现大模场单模光纤, 只考虑 LP_{01} 模和 LP_{11} 模。

由(4)式, 得到 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的纵向电场分量为^[5]

$$\tilde{E}_{01}(r) = \begin{cases} J_0(\tilde{u}r/a) & r \leq a \\ [J_0(\tilde{u})/K_0(\tilde{w})] \times K_0(\tilde{w}r/a) & r \geq a \end{cases}, \quad (5)$$

$$\tilde{E}_{11}(r) = \begin{cases} J_1(\tilde{u}r/a) & r \leq a \\ [J_1(\tilde{u})/K_1(\tilde{w})] \times K_1(\tilde{w}r/a) & r \geq a \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $\tilde{u} = a[K_0^2(n + \Delta \tilde{n})^2 - \beta^2]^{1/2}$, $\tilde{w} = a(\beta^2 - K_0^2 n^2)^{1/2}$, $\tilde{\beta}$ 为光纤的复传播常数, J 为第一类贝塞耳函数, K 为第二类变型贝塞耳函数。

由于在纤芯与包层分界面上要满足电场切向分量连续的边界条件, 再结合(5)和(6)式, 化简可得 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的本征方程^[6]

$$\frac{\tilde{u}J_1(\tilde{u})}{J_0(\tilde{u})} = \frac{\tilde{w}K_1(\tilde{w})}{K_0(\tilde{w})} \quad (\text{LP}_{01}), \quad (7)$$

$$\frac{\tilde{u}J_0(\tilde{u})}{J_1(\tilde{u})} = -\frac{\tilde{w}K_0(\tilde{w})}{K_1(\tilde{w})} \quad (\text{LP}_{11}), \quad (8)$$

式中 \tilde{u} 和 \tilde{w} 都是复数。因为光场在纤芯中为驻波场解, 在包层中为衰减场解, 所以由(5)和(6)式可以得出 \tilde{w} 的实部只能取大于零的值^[7], 虚部可以取任意值。由(7)式和(8)式, 可以得出 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的 \tilde{u} 值范围, 如图 1 所示。 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的 \tilde{u} 值范围分别为实线和点线围成的区域。

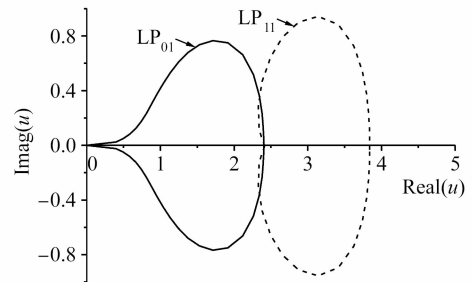


图 1 \tilde{u} 平面对应的 LP_{01} 模和 LP_{11} 的取值范围

Fig. 1 Interval of the LP_{01} and LP_{11} modes in the \tilde{u} plane

由于 LP_{01} 模和 LP_{11} 模对应的 \tilde{u} 和 \tilde{w} 值较小, 对 $J(\tilde{u})$ 和 $K(\tilde{w})$ 可以进行近似计算。(7)和(8)式

进一步简化得

$$\tilde{u} = \{2/[\lg 2 - s_E - \lg(\tilde{\omega})]\}^{1/2} \quad (\text{LP}_{01}), \quad (9)$$

$$\tilde{u} = \left[\frac{2 + \omega^2 \lg\left(\frac{2}{s\tilde{\omega}}\right)}{\frac{1}{2} + \frac{\omega^2}{8} \lg\left(\frac{2}{s\tilde{\omega}}\right)} \right]^{1/2} \quad (\text{LP}_{11}), \quad (10)$$

式中 $s_E = \lg(s) = 0.577216$, s 为欧拉常数。将(9)和(10)式分别代入(2)式中,结合求出的各阶模 \tilde{u} 值范围,可以计算 LP_{01} 模和 LP_{11} 模对应的 \tilde{V}^2 取值区间,结果如图 2 所示。图中实线表示 LP_{01} 模的截止频率,点线表示 LP_{11} 模的截止频率, LP_{01} 模和 LP_{11} 模对应的 \tilde{V}^2 取值区间分别为实线和点线所分平面的右半部分。由前面分析可知, \tilde{V}^2 的实部与折射率差 Δn 及纤芯半径 a 有关, \tilde{V}^2 的虚部与增益差 Δg 及纤芯半径 a 有关。选择合适的增益差 Δg 和折射率差 Δn , 就可以保证单模传输情况下,实现 $100 \mu\text{m}$ 以上的模场直径。

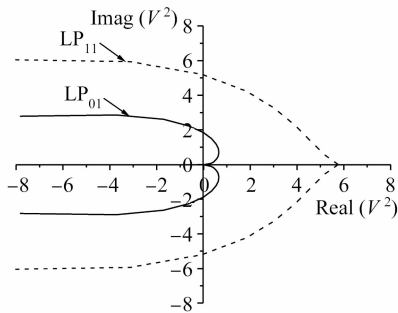


图 2 光纤中 LP_{01} 模和 LP_{11} 模对应的 \tilde{V}^2 区间
Fig. 2 Mode regions for the LP_{01} and LP_{11} modes in the \tilde{V}^2 plane

4 理论模拟与结果分析

一般情况下,增益因子引起的光纤折射率虚部比折射率实部小得多,所以增益导引效应非常不明显。例如大的增益因子 $g = 1.2 \text{ cm}^{-1}$ 引起的折射率虚部大小也只有 10^{-5} 量级。但是这种量级的折射率虚部能够实现大模场单模光纤。

纤芯 10% (原子数分数) 重掺杂铒离子的光纤^[8]以磷酸盐为基质。对于 $1.064 \mu\text{m}$ 波长,包层折射率为 1.5734,重掺杂后的纤芯折射率为 1.5689。由于增益因子大小是随抽运变化的,为了计算方便,取 $g = 0.6 \text{ cm}^{-1}$,纤芯半径假定为 $a = 50 \mu\text{m}$,代入(3)式,得 $\tilde{V}^2 = -1234.5 + 2.09i$ 。参照图 3 可以发现,这种情况满足 LP_{01} 模存在而其他高阶模式不存在的条件,即单模传输。计算了 LP_{01} 模的电场强度分布,如图 4 所示,其模场直径大于 $90 \mu\text{m}$ 。

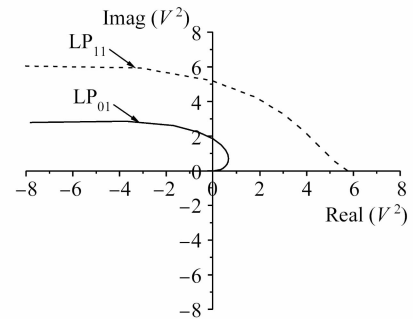


图 3 \tilde{V}^2 平面中 LP_{01} 模和 LP_{11} 模对应的上边界
Fig. 3 Upside bounds of the LP_{01} and LP_{11} modes in the \tilde{V}^2 plane

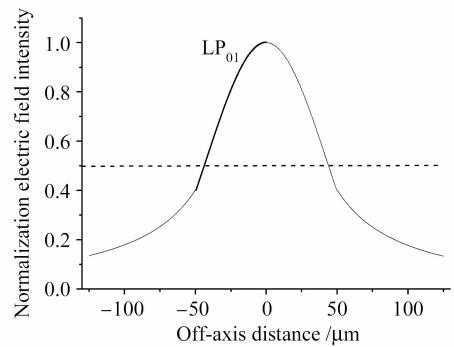


图 4 LP_{01} 模的电场分布

Fig. 4 Distribution of the electric field intensity

理论上,只要选择合适的折射率差和增益差,使之落在 \tilde{V}^2 平面 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的分离区域,就能实现单模光纤大模场。模拟计算还发现在纤芯和包层折射率不变的情况下,增益因子大小发生改变,其模场直径也会发生变化。

5 结 论

总结了光纤芯包层折射率差和增益差对归一化频率 V 参数的影响,进而得出了光纤中各阶模截止条件与折射率差和增益差的关系,并模拟计算了 10% (原子数分数) 掺铒的磷酸盐光纤,其模场直径大于 $90 \mu\text{m}$ 。对于普通光纤,要想实现大模场单模传输,增益导引和负折射率导引相结合的方法是很有前景的。

参 考 文 献

- Shang Liang, Song Zhiqiang, Mao Qinghe. Experimental-research on output characteristics of high power Yb^{3+} -doped double clad fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):755~758
尚 亮,宋志强,毛庆和. 高功率掺铒光纤激光器输出特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):755~758
- Libo Li, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. High power low-order

- modes operation of a multimode fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4):221~222
- 3 Daru Chen, Shan Qin. Injection-switchable erbium-doped fiber laser with two output ports [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2):96~98
- 4 Gong Yandong, Jian Shuisheng. Research on large effective area fiber [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1999, **10**(3):278~281
龚岩栋, 简水生. 大有效面积光纤研究进展[J]. *光电子 • 激光*, 1999, **10**(3):278~281
- 5 Se Shouxian. The Physical Foundation of Waveguide Optics [M]. Beijing: The Press of Northern Jiaotong University, 2002. 304~318
余守宪. 导波光学物理基础[M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2002. 304~318
- 6 Ding Meming, Song Lixin, Yu Huaqing *et al.*. The Foundation of Optical Waveguides and Fiber Communication [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. 18~41
丁么明, 宋立新, 余华清 等. 光波导与光纤通讯基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 18~41
- 7 A. E. Siegman. Propagating modes in gain-guided optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(8):1617~1628
- 8 A. E. Siegman, Ying Chen, Vikas Sudesh *et al.*. Confined propagation and near single-mode laser oscillation in a gain-guided, index antiguided optical fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**:251101-1~251101-3