

# 双包层光纤激光器泵浦吸收效率的模场计算方法\*

王子华 张辉 徐晟

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

**摘要** 提出一种计算双包层光纤激光器泵浦吸收效率的新方法. 该方法是建立在模式分析基础上的, 对对称的和偏心的双包层光纤结构都适用. 我们的数值计算结果与以前的射线方法结果基本一致, 但我们的方法更为精确一些.

**关键词** 光纤光学; 双包层光纤激光器; 模式分析; 泵浦光吸收; 多模光纤

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

掺稀土元素的单模光纤激光器或放大器在需要结构紧凑、便携的场合已经找到了广泛的应用. 它们被认为是产生单横模激光的有效方式. 然而, 由于很难将泵浦光注入进掺稀土元素的纤芯, 其功率输出很低. 于是就产生了双包层光纤结构以获得很高的功率<sup>[1-3]</sup>. 这样一种结构使得高功率、大光束尺寸以及大数值孔径的泵浦光注入进与之相匹配的光纤内包层成为可能. 然后, 内包层中的泵浦光在以内包层为纤芯的多模光纤中传播, 并逐渐为掺稀土元素的纤芯所吸收. 这样的大尺寸内包层光纤的泵浦吸收效率显然要低于那种直接泵浦进掺稀土元素纤芯结构形式. 怎样来权衡两者的利弊以获得高效率、高功率的激光器, 那么优化设计就成为十分重要和必需的了. 不同光纤横截面形状及其光纤参数的双包层光纤的吸收效率, 已经在理论与实验方面进行了大量的研究<sup>[4-6]</sup>. 在研究方法上也已经有好几种了, 诸如二维空间射线光学方法<sup>[7]</sup>, 射线的混沌力学方法<sup>[8]</sup>等. 这些方法都是建立在射线光学近似基础上的.

本文提出一种新的方法, 即模式分析方法, 来分析双包层光纤的吸收效率. 将内包层当作一个阶跃折射率多模光纤的纤芯, 我们计算了所有传输模式的焦散面半径(每个模都被认为限制在这个半径之内). 然后, 根据这些焦散面半径来判定该模式能否被掺稀土元素纤芯所吸收. 文中给出了数值计算实例, 并将其与二维空间射线方法<sup>[7]</sup>结果进行了比较. 接着还研究了吸收效率与纤芯大小以及偏心距离的关系.

## 1 原理

圆形双包层光纤一般有两种横截面形状: 对称的圆形双包层光纤(纤芯在光纤中心)与偏心双包层光纤(纤芯不在光纤中心, 与光纤轴线的偏心距离为  $p$ ), 其横截面如图 1 所示.

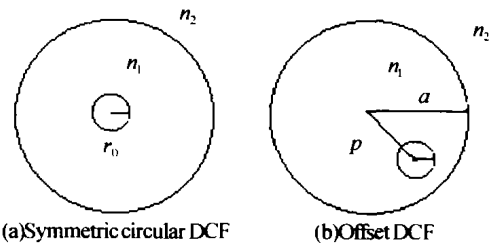


图 1 双包层光纤横截面图

Fig. 1 Cross sections of double-clad fibers (DCF)

它们由一个单模纤芯(半径  $r_0$ , 掺稀土元素), 一个很大的内包层(半径  $a$ , 折射率  $n_1$ ), 和一个外包层(折射率  $n_2$ ) 构成. 内包层的作用是传输泵浦光, 但阻止信号光在其内传输, 而外包层的作用是限制泵浦光. 在本文的分析中, 纤芯的损耗忽略不计. 由于纤芯与内包层面积之比非常小, 我们得以忽略掺稀土元素纤芯的存在而将双包层光纤看作为一个简单的内包层为纤芯的阶跃折射率多模光纤.

对于弱导阶跃光纤的  $LP_m$  模, 其横向场的径向分量  $R(r)$  在纤芯内满足方程  $\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + k_r^2 R = 0$ ,

其中  $k_r^2 = (u/a)^2 - (m/r)^2$ , 其中  $u = \sqrt{(n_1^2 k_0^2 - \beta^2)} a$  为纤芯内的横向相位常数,  $m$  和  $n$  为周向及径向模指数,  $r$  为径向坐标<sup>[9]</sup>. 如果是传输的模式, 在纤芯内必须是驻波,  $k_r$  为实数, 即  $k_r^2 > 0$ ; 否则它是迅衰波, 以  $k_r = 0$  为分界. 分界条件

$$r = r_c = (ma/u) \tag{1}$$

并称之为焦散半径. 它表示在  $r_c \leq r \leq a$  范围内, 光波为驻波, 在  $r \leq r_c$  以及  $r \geq a$  范围, 光波为迅衰波, 也就是说光波在横向受  $r_c$  和  $a$  的界定.  $r_c$  主要由周向模指数决定. 当  $m = 0$ , 模场分布具有轴对称特

\*国家自然科学基金面上项目(60277025)和上海市重点学科建设项目(2001-44)资助

Tel: 021-56333252 Email: zhwang@mail.shu.edu.cn

收稿日期: 2003-09-30

性,此时  $r_c=0$ . 模场分布于整个纤芯横截面. 随着  $m$  的增加,焦散半径越来越大. 当达到其最大值时,波便截止,此时得到  $u$  的最大值  $u=V$ ,相应的  $r_c$  达到最大  $r_{c,max} = \frac{ma}{V} \cdot r_0$ . 也与径向模指数  $n$  有关. 对于同一个  $m, n$  越大,  $u$  越大,同时  $r_c$  越小.

每个  $LP_{mn}$  模的  $u$  值可以由本征值方程<sup>[9]</sup>

$$u \frac{J_{m+1}(u)}{J_m(u)} = \sqrt{V^2 - u^2} \frac{K_{m+1}(\sqrt{V^2 - u^2})}{K_m(\sqrt{V^2 - u^2})} \quad (2)$$

求得,其中  $J_m, K_m$  分别为第一类贝塞尔函数和第二类修正贝塞尔函数,  $V$  为已知的光纤归一化频率  $V = n_1 k_0 a \sqrt{2\Delta}$ , 其中  $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2$ . 这样所有模式的焦散半径都可以由式(1)求出.

## 2 吸收效率

如果将双包层光纤看作为多模光纤,其  $V$  值自然是很大的,泵浦光分别由许多  $LP_{mn}$  模式传输,每个模被限制在一个环形区域( $r_c \leq r \leq a$ ). 焦散面半径  $r_c$  越大(一般说来,模指数越高),该模式的功率分布越趋向于远离光纤中心. 如果掺稀土纤芯与这一环形区域交叠,只要光纤足够长,该模式可以被认为全部吸收,而交叠的程度只影响吸收的快慢而已. 如果掺稀土纤芯与这一环形区域不相交,该模式就一点也不能被吸收. 本文将这一交叠条件作为每一个模式是否被吸收的判据.

我们知道当一根多模光纤达到稳态平衡以后,光功率是均匀分布于各个模式之中<sup>[10]</sup>,每个模式所携带的功率是相等的,就可以将吸收效率定义为  $\eta = N_a/N_T$ , 其中  $N_a$  为吸收模式数目,  $N_T$  是多模光纤中所能传输的模式总数.

### 2.1 圆对称双包层光纤

设内包层折射率  $n_1 = 1.454$ , 内、外包层相对折射率差为  $\Delta = 0.00063$ , 波长  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ . 如果内包层半径  $a = 200 \mu\text{m}$ , 那么计算得到多模光纤的  $V = 50$ . 每个  $LP_{mn}$  模的  $u$  和  $r_c$  可以求得,因此所能传输的模式总数  $N_T$  也知道了. 如果掺稀土元素纤芯半径  $r_0$  也已知的的话,那么交叠条件成为  $r_c < r_0$ , 能吸收模式的数目也可以确定. 当  $r_0 = 3 \mu\text{m}, 6 \mu\text{m}, 9 \mu\text{m}$  时,计算了不同内包层半径  $a$  时的吸收效率  $\eta$ , 并将其在图 2 中用 ‘\*’ 所连成的曲线表示. 为了便于比较,将文献[7]中公式(7)计算的结果也在图 2 中用虚线表示,两者符合得较好. 从图 2 还可以看出,增加掺稀土元素纤芯半径可以增加吸收效率. 然而,  $r_0$  达到某一个值后,再进一步增加就会破坏其单模运作机制.

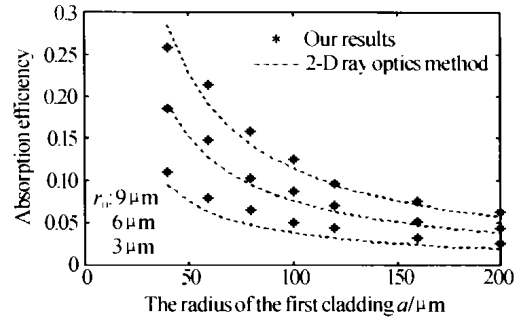


图 2 不同掺稀土元素纤芯半径  $r_0$  的圆对称双包层光纤吸收效率随内包层半径  $a$  的变化曲线

Fig. 2 The absorption efficiency of the symmetric circular DCF as a function of inner cladding radius  $a$  for different RE-doped core radius  $r_0$

### 2.2 偏心的双包层光纤

不增加掺稀土元素纤芯大小,而是将同样尺寸的纤芯偏离光纤中心位置,产生一个偏心距离  $p$  的话,也可以增加吸收效率. 对偏心双包层光纤而言,交叠条件变为  $r_c < p + r_0$ . 如果双包层光纤参数还是  $n_1 = 1.454, \Delta = 0.00063, \lambda = 1.3 \mu\text{m}$ , 但  $a = 200 \mu\text{m}$  固定不变的话,我们计算了  $r_0 = 3 \mu\text{m}, 6 \mu\text{m}, 9 \mu\text{m}$  时吸收效率  $\eta$  随偏心距离  $p$  的变化曲线,并将它们示于图 3. 由图 3 可以看出,偏心距离越大,吸收效率也越大.

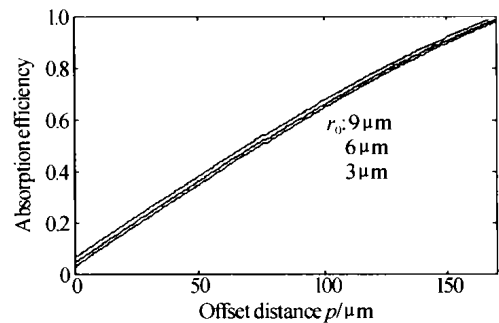


图 3 不同掺稀土元素纤芯半径  $r_0$  的偏心双包层光纤吸收效率随偏心距离  $p$  的变化曲线

Fig. 3 The absorption efficiency of the offset DCF as a function of offset distance  $p$  for different RE-doped core radius  $r_0$

当  $r_0 = 6 \mu\text{m}$  不变,两种不同方法计算得到的吸收效率在图 4 中进行了比较,其中实线为本文方法的结果,虚线为文献[7]中公式(11)计算的结果. 从图中可以看出当掺稀土元素纤芯位于靠近内包层边界时两者的差别变大. 用本文方法计算时,存在一个最大焦散半径  $r_{c,max}$ , 当偏心距离大于它时,吸收效率不再随偏心距离的增加而增加. 在  $a = 200 \mu\text{m}$  情况下,计算得到的  $r_{c,max} = 176.7 \mu\text{m}$ . 而用射线光学方法计算时,不存在  $r_{c,max}$ , 吸收效率会随偏心距离不断增加,直到等于内包层半径  $a$  为止(忽略掺稀土元素纤芯半径的话).

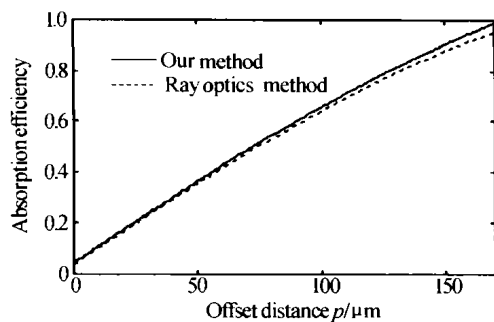


图4 当  $r_0 = 6 \mu\text{m}$  时,不同方法计算的偏心双包层光纤吸收效率曲线

Fig. 4 When  $r_0 = 6 \mu\text{m}$ , the absorption efficiency of offset DCF using different methods

### 3 结论

本文提出一种新的基于模式分析理论的方法来计算双包层光纤的吸收效率. 可以吸收模式数目与全部光纤中能传输的模式数目之比定义为吸收效率. 将焦散面半径作为一个门限,我们可以确定每个模式是否能被吸收. 计算结果表明,圆对称双包层光纤有相当一部分功率不被吸收,其吸收效率因此很低. 增加掺稀土元素纤芯尺寸虽然可以增加吸收效率,但单模运作机制被破坏. 对偏心双包层光纤而言,增加偏心距离可以达到高吸收效率. 所以可以增加偏心距离而不增加纤芯尺寸来增加吸收效率,这一结论与以前文献用射线光学方法得到的结果一致. 然而,存在一个偏心极限,超过它,吸收效率达到饱和. 这一点与以前文献结果不同.

本文的模式分析方法是精确的,因此其结果比射线方法的结果来得准确,特别是当内包层不是很大或者偏心距离接近内包层半径时.

### 参考文献

- 1 Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double-clad, offset core  $N_a$  fiber laser, Proc. Optical Fiber Sensors, 1988, Washington, D. C. Paper PD5
- 2 阮双琛,冯鸣,文华胡,等. 高效掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的研究. 光子学报, 2003, 32(8): 911 ~ 913  
Ruan S C, Feng M, Wen H H, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(8): 911 ~ 913
- 3 阮双琛,苏红新,冯鸣,等. 8.6 W 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的研究. 光子学报, 2003, 32(5): 523 ~ 524  
Ruan S C, Su H X, Feng M, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(5): 523 ~ 524
- 4 Bedo S, Luthy W, Weber H P. The effective absorption coefficient in double-clad fibers. Opt Commun, 1993, 99: 331 ~ 335
- 5 Muendel M H. Optical inner cladding shapes for double-clad fiber lasers, Dig. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'96), 1996. Paper CTuU2
- 6 Chernikov S V, Zhu Y, Taylor J R. Supercontinuum self-Q-switched ytterbium fiber laser. Opt Lett, 1997, 22(5): 298 ~ 300
- 7 Liu A, Ueda K. The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers. Opt Commun, 1996, 132: 511 ~ 518
- 8 Doya V, Legrand O, Mortessagne F. Optimized absorption in a chaotic double-clad fiber amplifier. Opt Lett, 2001, 26(12): 872 ~ 874
- 9 Unger H G. Planar Optical Waveguides and fibers. Oxford: Clarendon Press, 1977, Chapter 2
- 10 Marcuse D. Theory of Dielectric Optical Waveguides. New York: Academic Press, 1974, Chapter 5

## Calculation of the Absorption Efficiency for Double-clad Fiber by Using Modal Analysis Method

Wang Zihua, Zhang Hui, Xu Sheng

School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072

Received date: 2003-09-30

**Abstract** Based on the theory of mode analysis, a new method to calculate the absorption efficiency for symmetric or offset double-clad optical fibers (DCF) is presented. Both symmetric and offset conditions have been analyzed. Our results are in principle consistent with but more accurate than that of previous ray optics method.

**Keywords** Fiber optics; Double-clad fiber lasers; Modal analysis; Pumping light absorption; Multimode fiber



**Wang Zihua** was born on September 27, 1946, in Zhejiang Province, received B. S. degree at Harbin Institute of Technology in 1968 and M. S. degree at Shanghai University of Science and Technology in 1981. Now he is a professor at School of Communication and Information Engineering, Shanghai University. His research interests include fiber and integrated optics, microwave theory and technology and antennas. He is the author or co-author of more than 150 papers.