

文章编号: 0258-7025(2008)03-0422-04

锥形光纤的功率分布特性

赵楚军^{1,2} 范滇元² 周 萍² 曾夏辉² 慕 伟³ 陈光辉³

¹ 湖南大学计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082
(² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ³ 中国电子科技集团第二十三研究所, 上海 200437)

摘要 从波动理论出发,对锥形光纤的纵向传播常数进行泰勒(Taylor)级数展开,经近似得到了锥形光纤功率分布的解。基于此理论,对锥形光纤的功率分布特性进行了讨论,并分析了锥形光纤的长度、锥度和光纤折射率等参数对锥形光纤不同模式功率分布的影响。为了减小功率泄漏,当光从锥形光纤大端入射时,应当减小锥长,减小锥度,增大纤芯包层折射率差;当光从锥形光纤小端入射时,应当增加锥长,增加锥度,增大纤芯包层折射率差。在长锥长、大锥度情况下,光纤折射率分布的影响相对较小。

关键词 光纤光学;高功率光纤激光;锥形光纤;功率分布

中图分类号 TN 253;TN 248.1 **文献标识码** A

Power Distribution Characteristics of Tapered Fibers

Zhao Chujun^{1,2} Fan Dianyuan² Zhou Ping² Zeng Xiahui² Mu Wei³ Chen Guanghui³

¹ Computer and Communication College, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China
² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
³ Electronics Technology Group Corporation No. 23 Research Institute, Shanghai 200437, China

Abstract The power distribution of the tapered fiber has been investigated based on Maxwell's equation and the Taylor series expansion method. Following rigorous analytical approach, the general expressions for power in the core are derived, and a study is presented for the power distribution along the propagation direction in respect of different lower order modes. It is observed that the variation of the taper length, taper ratio, and refractive index can influence the power distribution of different fiber modes dramatically. The leakage loss, the taper length, taper ratio should be decreased. And refractive index difference should be increased if the light is launched from the smaller core-size end. And the taper length, taper ratio and refractive index difference should be increased if the light is launched from the larger core-size end to confine the power efficiently. When the fiber has long length and large taper ratio, the influence of refractive index on the power distribution is small compared with those of taper length and taper ratio.

Key words fiber optics; high power fiber laser; tapered fiber; power distribution

1 引言

当光从大端入射时,锥形光纤^[1~6]可以提高入射端损伤阈值,可以准直入射光束,提高光束质量^[3]。当光从小端入射时,锥形光纤可以作为扩束器等。了解锥形光纤的传输等特性,必将促进熔融拉锥工艺的提高和锥形光纤器件性能的改进。

锥形光纤是一种不规则光纤,其传输特性的理论研究还不很完善,通常使用的研究方法可以分为几何方法和波动方法^[7~11]。几何方法中忽略光的波动效应,通过光线路径叠加的方式分析波导中的光传输特性。这种方法简单,但一般只有定性的结果。波动方法严格,包括光束传播方法、时域有限差

收稿日期:2007-08-16;收到修改稿日期:2007-11-02

基金项目:国家 863 计划(2004AA84ts12),国家自然科学基金重点项目(60538010)和国家自然科学基金(10576012)资助课题。

作者简介:赵楚军(1979—),男,内蒙古人,博士研究生,主要从事光波导理论研究。E-mail:c_j_zhao@yahoo.com.cn

导师简介:范滇元(1939—),男,江苏人,中国工程院院士,研究员,博士生导师,主要从事高功率固体激光技术的研究及应用。E-mail:fandy@smmail.cn

分法、有限元法等,但一般计算量很大。

本文从波动理论出发,对锥形光纤的纵向传播常数进行泰勒(Taylor)级数展开,经过近似得到了锥形光纤功率分布的解析解。这种方法简单,而且能给出准确的结果。基于此理论,考虑了光从锥形光纤大端入射和小端入射两种情形,并分析了锥形光纤的长度、锥度和光纤折射率等参数对锥形光纤功率分布的影响。

2 理论模型

锥形光纤结构如图 1 所示。

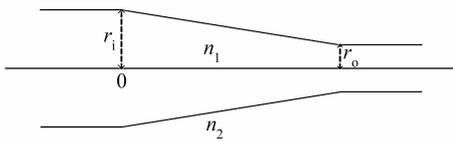


图 1 锥形光纤示意图

Fig. 1 Schematic of a section of tapered fiber

线性锥形光纤的输入端半径为 r_1 , 输出端半径为 r_0 , 锥长为 L , 光纤半径的变化关系为

$$r(z) = r_1 - \frac{z}{L}(r_1 - r_0), \quad (1)$$

锥形光纤纤芯折射率为 n_1 , 包层折射率为 n_2 , 时谐电磁场可以写作^[11]

$$\begin{aligned} E &= E_0(r) e^{jv\phi} e^{j(\omega t - \beta z)}, \\ H &= H_0(r) e^{jv\phi} e^{j(\omega t - \beta z)}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 ω 为角频率, β 为轴向传播常数, $E_0(r), H_0(r)$ 分别为径向电场和径向磁场。因为光纤的芯径变化, β 亦相应变化。选择光纤入射点作为原点, 假设芯径变化很缓慢, 利用泰勒级数展开可以得到

$$\beta = \beta_0 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial z}\right)z, \quad (3)$$

式中 β_0 为 $z = 0$ 处的传播常数。

由亥姆霍兹方程, 可以得到电磁场的 z 向分量^[12]

$$\begin{aligned} E_z^{(\text{core})} &= C_1 J_\nu(\gamma_1 r) e^{jv\phi} e^{-j(\omega t - \beta z)}, \\ H_z^{(\text{core})} &= C_2 J_\nu(\gamma_1 r) e^{jv\phi} e^{-j(\omega t - \beta z)}, \\ E_z^{(\text{cladding})} &= C_3 K_\nu(\gamma_2 r) e^{jv\phi} e^{-j(\omega t - \beta z)}, \\ H_z^{(\text{cladding})} &= C_4 K_\nu(\gamma_2 r) e^{jv\phi} e^{-j(\omega t - \beta z)}, \end{aligned}$$

其中 $\gamma_1 = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}, \gamma_2 = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2}, C_1, C_2, C_3, C_4$ 为幅度常数, J_ν, K_ν 为 ν 阶贝塞耳函数, 径向和角向分量为

$$\begin{aligned} E_r &= -\frac{j}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\omega \mu_0}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right), \\ E_\phi &= -\frac{j}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial r} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_r &= -\frac{j}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} - \frac{\omega \epsilon_0 n^2}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right), \\ H_\phi &= -\frac{j}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \omega \epsilon_0 n^2 \frac{\partial E_z}{\partial r} \right). \end{aligned}$$

光纤的功率密度可以表示为

$$S_z = \frac{1}{2} \text{Re}[E_r H_\phi^* - E_\phi H_r^*], \quad (4)$$

纤芯所占功率比为

$$\eta = \frac{P_{\text{core}}}{P_{\text{core}} + P_{\text{cladding}}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_a} S_{z1} r dr d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_a} S_{z1} r dr d\phi + \int_0^{2\pi} \int_{r_a}^{\infty} S_{z2} r dr d\phi}, \quad (5)$$

其中 $P_{\text{core}}, P_{\text{cladding}}$ 分别为纤芯和包层中的功率。

3 结果分析

在截止情况下, $\gamma_2^2 \rightarrow 0$, 对于基模, 应该满足^[10]

$$J_0(\gamma_1 r_a) = 0, \quad (6)$$

令 $S_n = \gamma_1 r_a$, 其中 n 为正整数, 对应于方程解的次序。结合(6)及(3)式, 可以得到方程

$$z^2 \left(\frac{\partial \beta}{\partial z}\right)^2 + 2\beta_0 z \left(\frac{\partial \beta}{\partial z}\right) + \left[\beta_0^2 - k_1^2 + \left(\frac{S_n}{r_a}\right)^2\right] = 0, \quad (7)$$

从而得到 $\partial \beta / \partial z$ 的解。

基于以上理论, 分别讨论了光从锥形光纤大端和小端入射时的功率分布特性。计算中, 纤芯折射率取 1.45, 纤芯和包层折射率差 $\Delta = 0.005$, 其定义为 $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$ 。

3.1 光从大端注入

当光从大端入射时, 其功率分布特性如图 2 所示。从图中可以看出, 在输入端芯径不变的情况下, 输出端芯径越小, 纤芯所占功率越少, 功率泄漏越多, 而且锥度增大时, 功率泄漏增加得很快。在高功率应用中, 光会从锥形部分辐射出来, 所以必须采取相应措施对后续光组件进行保护, 防止损坏。随着锥长的增加, 功率泄漏增加, 尤其对于锥度大的锥形光纤。而且, 锥长较短的情况下, $\nu = 1$ 的模式比 $\nu = 0$ 的模式变化平稳。

当锥形光纤纤芯和包层折射率差增大时, 功率泄漏可以有效地降低, 如图 2(c) 所示。对比图 2(a), (b) 和图 2(c), (d), 可以发现, 在光从锥形光纤大端入射时, 光纤的锥长、锥度对功率分布的影响比光纤纤芯与包层折射率差要大, 尤其是长锥长、大锥度的情况下。而且, 折射率差对 $\nu = 1$ 的模式比 $\nu = 0$ 的模式影响小。

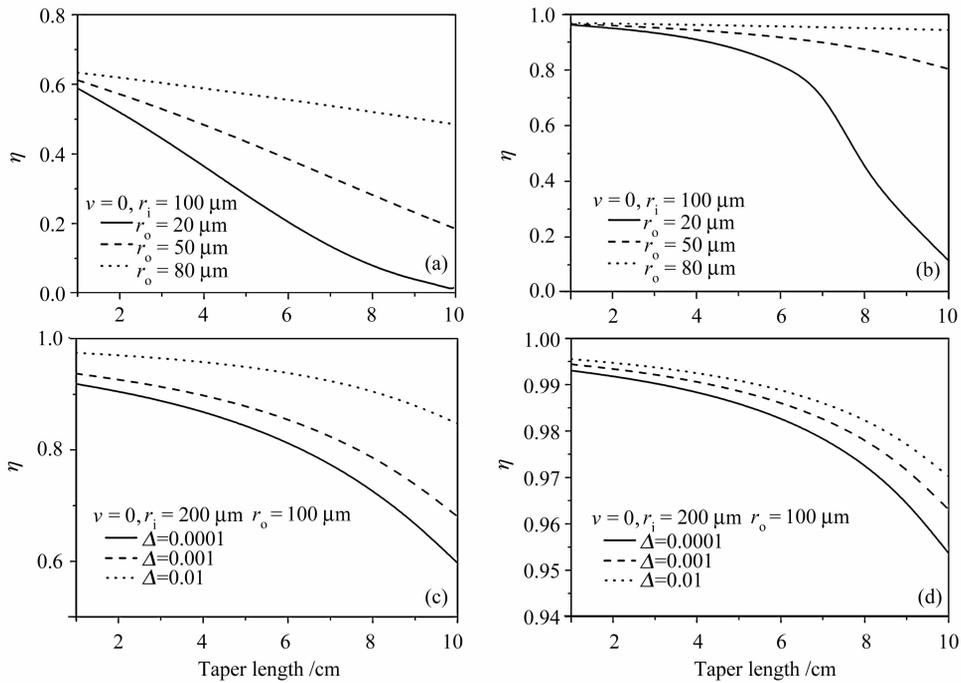


图 2 光从大端注入纤芯所占功率比与光纤长度的关系

Fig. 2 When light launch from the large core-size end, fractional power inside the fiber core versus fiber length

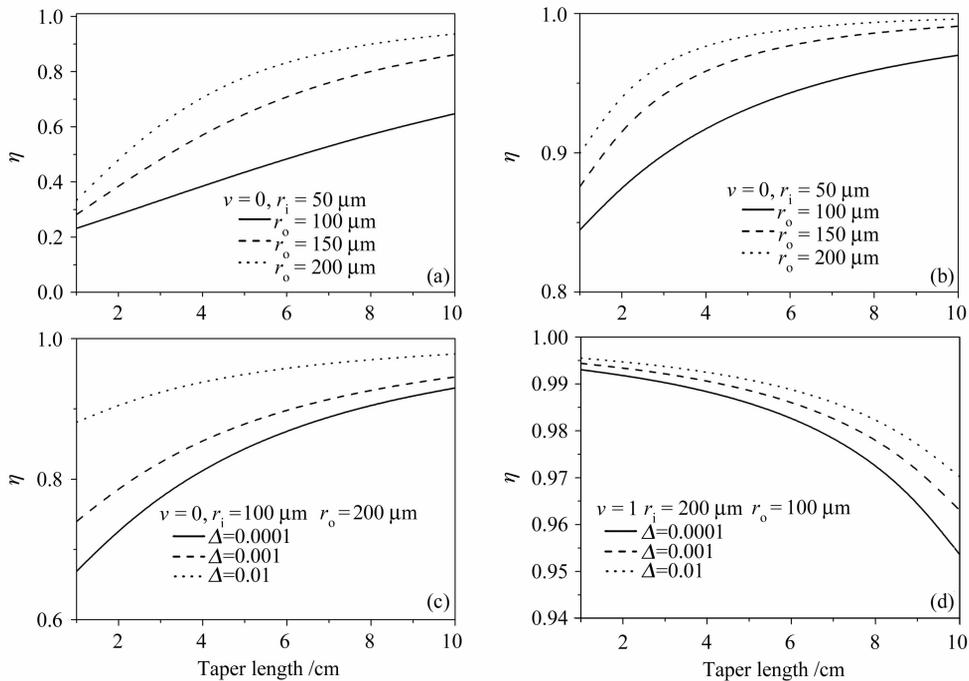


图 3 光从小端注入纤芯所占功率比与光纤长度的关系

Fig. 3 When light launch from the small core-size end, fractional power inside the fiber core versus fiber length

3.2 光从小端注入

当光从小端入射时,其功率分布特性由图 3 给出。从图 3(a),(b)中可以看出,在输入端芯径不变的情况下,输出端芯径越大,纤芯所占功率越多,功率泄漏越少。而且,随着锥长的增加,纤芯所占功率

增加,功率泄漏越少。在锥长较长时, $\nu = 1$ 的模式功率变化趋于平稳。与光从大端注入情况相同,当锥形光纤纤芯和包层折射率差增大时,功率泄漏可以有效地降低,如图 3(c),(d)所示。

4 结 论

分别对光从锥形光纤大端入射与小端入射两种情况下的功率分布特性进行了讨论,分析了锥形光纤的长度、锥度和光纤折射率等参数对锥形光纤功率分布的影响。为了减小功率泄漏,当光从锥形光纤大端入射时,应当减小锥长、减小锥度,增大纤芯包层折射率差;当光从锥形光纤小端入射时,应当增加锥长、增加锥度,增大纤芯包层折射率差。而且,通过计算表明,在长锥长,大锥度情况下,光纤折射率分布的影响相对较小。为达到最优的传输特性,应对锥形光纤进行优化设计。

参 考 文 献

- Jacques Bures, René Ghosh. Power density of the evanescent field in the vicinity of a tapered fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(8):1992~1996
- Andrey Kosterin, Valery Temyanko, Mahmoud Fallahi *et al.*. Tapered fiber bundles for combining high-power diode lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(19):3893~3900
- Andrey Kosterin, Valery Temyanko, Mahmoud Fallahi *et al.*. Tapered fiber bundles for high power applications [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2005), paper OTuF6
- Jun Ai, Yao Li. Mixing-rod power coupling for large-core polymer optical fibers [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(6):1024~1028
- Ping Yan, Mali Gong, C. Li *et al.*. Distributed pumping multifiber series fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(7):2699~2706
- Yang Chun, Sun Xiaohan, Wang Yunming *et al.*. 1×7 cylindrical mixing-rod plastic optical fiber coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9):1116~1122
杨春,孙小茜,王云明等. 1×7 圆柱形混合棒塑料光纤耦合器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9):1116~1122
- Wu Yulie, Zheng Yu, Li Shengyi *et al.*. Propagation properties analysis of fused taper PANDA fiber couplers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1111~1115
吴宇列,郑煜,李圣怡等. 熔锥型熊猫光纤耦合器的传输特性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1111~1115
- Shuai Cijun, Duan Jian, Cai Guohua. Research on morphology and microstructure in the taper region of fused fiber devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):121~125
帅词俊,段吉安,蔡国华. 熔融光纤器件熔锥区的形貌和微观结构研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1):121~125
- Yi-fan Li, John W. Y. Lit. Transmission properties of a multimode optical-fiber taper [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**(3):462~468
- S. C. Yeow, M. H. Lim, P. K. Choudhury. A rigorous analysis of the distribution of power in plastic clad linear tapered fibers [J]. *Optik*, 2006, **117**(9):405~410
- Xue Chunrong, Zhu Shengxiang, Xiao Zhigang *et al.*. The study for transforming property of right cone fiber [J]. *Applied Optics*, 2004, **25**(3):45~49
薛春荣,祝生祥,肖志刚等. 直锥形光纤传输性质的研究[J]. *应用光学*, 2004, **25**(3):45~49
- Allan W. Snyder, John D. Love. *Optical Waveguide Theory* [M]. London: Chapman and Hall, 1983