

大模场光纤模场大小提升能力分析

廖素英

(桂林空军学院, 广西 桂林 541003)

摘要 为了获得大模场光纤结构以提升光纤激光的输出功率,通常采取多种技术措施来增加光纤的模场大小。但随着光纤模场大小的增加,光纤波导对模场的约束能力下降,导致模场大小的提升受到限制。从光纤波导的本征模场理论出发,首先分析大模场光纤模场分布的特点,然后讨论模式耦合和模场畸变现象对模场大小增长的限制作用。最后,在考虑限制因素影响的基础上,应用有限元分析方法对几种折射率分布的光纤模场进行计算。结果表明,光纤模场的等效面积与相邻模式之间的等效折射率平方差的乘积趋向一个常量,光纤模场大小的增长受到这一常量的约束。

关键词 光纤激光器;大模场光纤;模场大小;模场畸变;模式耦合

中图分类号 TN248.1

OCIS 060.2310 060.2400

文献标识码 A

Analysis of Mode Scalability in Large Mode Area Fibers

Liao Suying

(Guilin Air Force Academy, Guilin, Guangxi 541003, China)

Abstract In order to obtain a large-mode-area fiber structure to improve fiber lasers' output power, several technical measures have been adopted to scale the fiber mode field size. However, with the mode field size increasing, the fiber waveguide's ability to confine the mode field declines, which limits the growth of the mode field size. Based on the fiber eigen-mode field theory, the mode field distributions of the large-mode-area fibers are discussed, and the limitation effects of the mode field size growth imposed by mode coupling and mode distortion are analyzed. Considering the impact of the limitations, the mode field distributions of several refractive index fibers are calculated by using the finite element method. The numerical results show that the product of the equivalent mode area and the square difference of the effective refractive index between two adjacent modes tends to a constant, which constrains the scalability of the fiber mode field.

Key words fiber lasers; large-mode-area fiber; mode field size; mode distortion; mode coupling

1 引言

大模场光纤被普遍认为是解决光纤激光器功率提升面临的非线性效应及光纤损伤等功率增长限制的一种最直接有效的途径。为了提升激光光纤的模场大小,研究人员采取了多种技术措施,包括光纤结构设计^[1~4]、模式选择控制^[5~9]和模式转换法^[10,11]等,这些技术措施的应用,使光纤的模场大小得到有效增加,不同结构的大模场光纤的应用也推动着激光功率的不断增长。但随着光纤模场大小的增加,光纤作为波导结构的场约束能力通常会下降,导致模场受周围扰动影响的敏感性增加,稳定性下降。这说明大模场光纤的模场大小增加是受到限制的。因此本文从本征模场基本理论出发,分析大模场光纤模场分布特点和模场大小增长的限制因素,说明模场增加的能力。

2 大模场光纤的模场分布及模场大小

大模场光纤通常采用双包层的光纤结构,光纤沿轴向的折射率分布均匀,所以光纤波导中能够传播导模,其场分布可分离成随光纤横截面二维分布的模式场和纵向波动项 $\exp(-j\beta z)$ 的乘积,这里 j 为虚数单

收稿日期: 2010-06-16; 收到修改稿日期: 2010-08-23

作者简介: 廖素英(1972—),女,博士,副教授,主要从事光纤激光技术方面的研究。E-mail: liaosuying@gmail.com

位, β 为光波的纵向传播常数, z 为光纤轴向坐标。光纤横截面上的模式场分布通过求解二维的亥姆霍兹方程可以得到。

假设光纤的芯径和内包层直径分别为 $2a$ 和 D , 纤芯、内包层、外包层的折射率分布依次为 n_{co} , n_{icl} , n_{ecl} , 且 $n_{co} \approx n_{icl}$, 满足弱导近似条件, 则在选取光纤轴向的柱坐标系 (r, θ, z) 时, 光纤的模场分量 E_y 或 E_x 满足的二维亥姆霍兹方程为

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + [k_0^2 n^2(r, \theta) - \beta^2] \right\} \cdot E_y(r, \theta) = 0. \quad (1)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数, λ 为激光波长, $n(r, \theta)$ 为光纤横截面上的折射率分布。求解(1)式可得到光纤波导对不同波长的模式折射率分布与归一化强度分布。

(1)式的求解过程与折射率分布 $n(r, \theta)$ 密切相关。而出于不同使用目的的需要, 大模场光纤横截面的折射率采用了图1所示的几种分布, 图中 n_t 为 A 形折射率分布的阶梯折射率, n_d 为 W 形折射率分布的沟道折射率, D_1 表示沟道的直径大小。这些折射率分布对应的亥姆霍兹方程相关参数及具体边界条件发生变化, 导致求解的方法及模场的分布都有较大区别。对于简单的阶跃形折射率分布, 光纤模场的分布由特征方程解出模式折射率后, 可以得到解析式的模场分布; 对于复杂的折射率分布(如抛物线形), 模场分布很难有解析解的表达式, 往往需要借助于数值求解的办法。

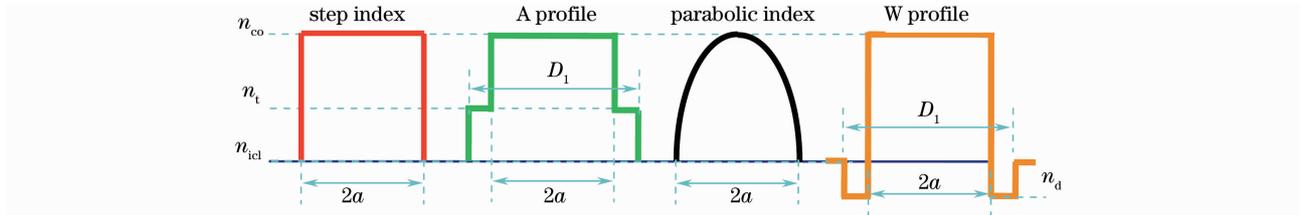


图1 几种大模场光纤的横截面折射率分布

Fig. 1 Refractive index distribution of the cross-section for several large-mode-area fibers

在求解光纤模场分布的常用数值方法中, 有限元法具有简单、方便、精确、通用等特点, 特别是这种方法可以用来分析具有任意横截面折射率分布的光纤波导模场, 只需要给出光波的波长和相应的折射率分布以及所求解的何种模式, 即可以同时解出光纤中对应该波长的所有模式的折射率和模场分布。所以文中采用有限元法对上述几种折射率分布的光纤模场进行计算, 分析它们的模场大小提升能力。

正规光纤圆波导中的模场分布呈现出一系列的规则图案。在弱导近似下, 这些图案分布通常以线偏模符号 LP_{ml} 表示, 这里 m, l 表示模场出现的次序, 其中 m 表示方位角向次序, l 表示径向次序。按照这样的排序方法, 线偏模从低阶到高阶依次出现的顺序为: $LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}, LP_{31}, LP_{12}, \dots$ 。图2给出的是几个低阶线偏模的模场光功率分布图, 在导模沿光纤向前传播过程中, 线偏模的光功率分布保持不变, 且各种光纤的线偏模都有着相似的模斑图样。随着光纤结构变化, 模斑大小可能改变, 但分布的形状、图样相似。

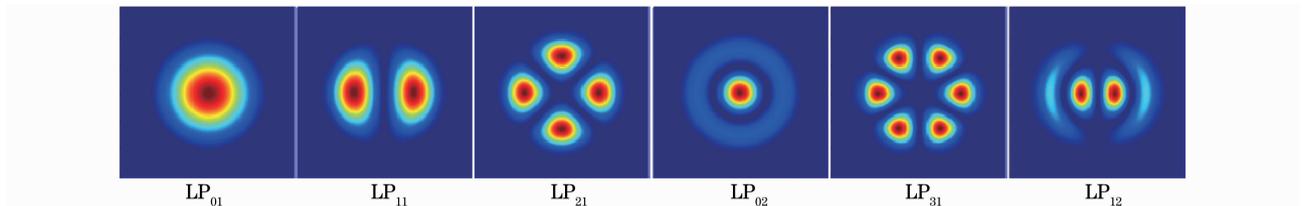


图2 几个低阶线偏模的模场分布

Fig. 2 Mode field distributions of several low linear polarized modes

光纤模场的分布通常还应用归一化传播常数 b 和等效模场面积 A_{eff} 两个参数描述, 它们分别定义为^[12]

$$b = (n_{eff}^2 - n_{icl}^2) / (n_{co,max}^2 - n_{icl}^2), \quad (2)$$

$$A_{eff} = 2\pi \left[\int_0^{\infty} |E_{01}(r)|^2 r dr \right]^2 / \int_0^{\infty} |E_{01}(r)|^4 r dr, \quad (3)$$

式中 n_{eff} 为模式的等效折射率, $n_{co,max}$ 为纤芯折射率分布的最大值, E_{01} 是基模 LP_{01} 的模场分布。 $b(0 \leq b \leq 1)$

等于模式场相应的平面波波矢偏离光纤轴向的方向角余弦,即 b 的取值越大,相应的波矢方向偏离轴向越小。基模的等效模场面积 A_{eff} 则是基模场的光强降至中心处的 e^{-2} 时对应半径所围成的圆面区域面积,它反映模斑的大小,模场能量的集中程度,是衡量光功率密度的重要参数,有时也用基模场的等效直径反映模场的大小。

3 限制模场大小提升的因素

在提升光纤模场大小的多种方法措施中,光纤结构设计是通常采用的方法。这种方法主要通过改变纤芯或包层的折射率分布以达到增加模场大小的目的,比如,光纤横截面采用图 1 中的几种折射率分布,或者光子晶体光纤^[13,14]、泄漏通道光纤^[15]的折射率分布,都可以在不同程度上增加光纤模场的大小。但由于光纤波导传输的特点,光纤结构设计方法提升模场大小主要受到两个因素的限制:一是光纤模式之间的耦合;二是光纤模场的畸变。

理论上,光纤中传输的导模为正交模,相互之间不发生能量转移,而实际使用时,由于外界扰动因素(如光纤弯曲、光纤本身存在的缺陷、加工过程导致的折射率分布不均匀等)的影响,模式之间容易产生相互耦合,使得模式变得不稳定,低阶模的输出得不到保证。这种模式耦合的可能性通常与模式之间的折射率差有关,模式之间的折射率差越小,则模式之间耦合的可能性就越大。为了比较不同芯径光纤的模场稳定性,对数值孔径在 0.02~0.1、纤芯直径小于 100 μm 的阶跃光纤的 LP_{01} 与 LP_{11} 模之间的等效折射率差进行了计算,计算结果如图 3 所示,图中每一个点对应的数值表示该点相应的光纤结构的 LP_{01} 模与 LP_{11} 模之间的等效折射率差,等位线标示的数值表示相应光纤结构的 LP_{01} 模与 LP_{11} 模之间的等效折射率差。如图中 A 点对应的数值表示:纤芯数值孔径为 0.05、纤芯直径为 40 μm 的阶跃光纤的 LP_{01} 模与 LP_{11} 模之间的等效折射率差为 0.00017,等位线 BC 上各点对应的光纤结构的 LP_{01} 模与 LP_{11} 模之间的等效折射率差都是 0.0001。从结果可看出,光纤芯径越大、数值孔径越小,相邻模式之间的折射率差越小。芯径在 50 μm 以上、数值孔径 0.05 以下的光纤,如等位线 BC 上方区域表示的光纤结构,这些光纤的 LP_{01} 模与 LP_{11} 模之间的等效折射率差低于 1×10^{-4} ,而目前光纤加工过程中导致的折射率分布不均匀引起的折射率差均高于这一数值,也就是说,这些光纤的模场会非常不稳定,按目前光纤加工的最好水平,也很难避免光纤加工过程中导致的折射率分布不均匀性引起光纤的模式耦合。因此,从模场稳定性的角度考虑,光纤的芯径不宜太大,数值孔径不宜太小,光纤模式之间的耦合限制了模场大小的增长。

影响模场大小提升的另一个因素是模场的弯曲畸变现象。由于光纤激光器或放大器通常需要使用数米以上的光纤长度,光纤缠绕、弯曲在所难免。光纤弯曲后,等效光程的变化和弯曲应力的光弹效应使光纤横截面上的折射率分布发生变化,从而使光纤模场出现中心偏离、面积压缩的畸变现象^[16,17]。这种现象的存在可能加剧模式之间的能量迁移、也可能改变光纤中各阶模式在激光增益竞争中的优势^[18],使光纤激光输出朝不利的一面发展。对模场畸变现象的研究表明,模场的弯曲敏感性与芯径大小、纤芯数值孔径和折射率分布以及弯曲半径的大小等都有关系,芯径越大,数值孔径越小的光纤,弯曲敏感性越高,光纤弯曲后出现畸变的程度越大。因此,如果考虑光纤要在弯曲情况下使用,则光纤的芯径也不能选择太大,纤芯的数值孔径也不宜取得太小,模场畸变现象是限制光纤模场大小增长的另一个因素。

4 光纤模场大小的提升能力

综合考虑模场畸变及模式之间耦合两个因素的影响,光纤模场的增加是有限的。对于给定的光纤结构,光纤中的各阶本征模场的分布则确定。这些模式场分布的等效折射率 n_{eff} 及归一化传播常数 b 从低阶模到高阶模依次递减。由(2)式和归一化频率 V 的定义,可以得到任意两个相邻模式之间的等效折射率差满足

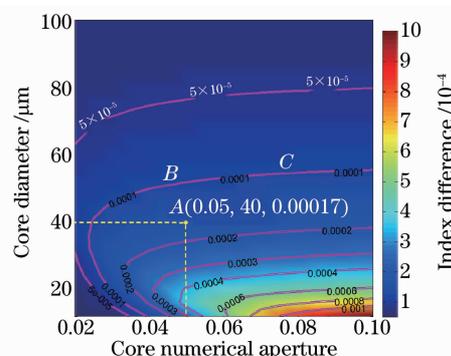


图 3 相邻模式之间的等效折射率差
Fig. 3 Equivalent refractive index difference between two adjacent modes

$$a^2 k^2 (n_{\text{eff},1}^2 - n_{\text{eff},2}^2) = V^2 (b_1 - b_2), \quad (4)$$

式中 k 为光波在光纤中的波数, n_{eff} 的下标 1, 2 表示任意两个相邻模式的编号。在已知光纤的归一化频率 V 的条件下, (4) 式的右边为一固定值, 左边的模式等效折射率的平方差随着芯径的增加而减少。即 (4) 式表明, 在一定的 V 参数下, 光纤的纤芯面积与相邻两个模式之间的等效折射率的平方差成反比关系。考虑到 a^2 与模场的等效面积相对应, 结合模场面积与相邻两个模式之间的等效折射率的关系, 对图 1 所示的 4 种折射率分布的光纤的模场分布及模场面积进行了数值计算, 计算采用的相关参数的取值为 $2a/D_1 = 0.714$, $n_i - n_{\text{icl}} = (n_{\text{co}} - n_{\text{icl}})/3$, $n_{\text{icl}} - n_d = (n_{\text{co}} - n_{\text{icl}})/3$, $\lambda = 1.1 \mu\text{m}$, $n_{\text{icl}} = 1.44$, 结果如图 4 所示。图 4 中曲线表示 4 种折射率分布光纤的模场等效面积间距随 V 参数的变化关系, 其中作为纵坐标的等效面积间距 ΔA 定义为: 光纤的等效模场面积 A_{eff} 与 LP_{01} , LP_{11} 模之间的等效折射率的平方差的乘积, 即

$$\Delta A = \frac{A_{\text{eff}}}{\lambda^2} (n_{\text{eff},1}^2 - n_{\text{eff},2}^2), \quad (5)$$

图 4 结果显示, 不管光纤横截面的折射率分布如何, 随着归一化频率 V 的增加, 模式之间的等效面积间距趋向一个定值, 阶跃形、A 形和 W 形折射率分布的 $\Delta A \rightarrow 0.338$, 抛物形折射率分布由于具有较小的模场面积(相比如同样条件的其它折射率分布), 所以 ΔA 趋向的定值小一些, $\Delta A \rightarrow 0.32$ 。结果表明, 在一定的 V 参数下, 增加光纤模场的面积必然使得光纤相邻模式之间的折射率差减少, 过多地增加模场面积只会使模式之间的等效折射率差别微乎其微。根据前面的分析, 可知模式之间的折射率差是关系到模式的稳定性的, 如果相邻模式之间的折射率差太小, 一个模式很容易因为外界的扰动因素(弯曲、光纤本身存在的缺陷、加工过程导致的折射率分布不均匀等)而耦合向邻近的高阶模, 使得模式变得不稳定, 并且在光纤弯曲后还会出现严重的模场畸变, 使低阶模的输出得不到保证。例如, 如果光纤的纤芯数值孔径 0.03、芯径 $100 \mu\text{m}$, 其 LP_{01} 模与 LP_{11} 模之间的折射率差约等于 3×10^{-5} , 这一数值明显低于目前光纤加工的最好精度水平——折射率分布的不均匀性降到 10^{-4} 数量级^[10](大多数情况很难达到), 则激光在这样的光纤中激发传播时, 模场能量很容易以相互之间不断耦合的方式向前传输, 总的耦合趋势导致能量向高阶模转移, 激光输出的光束质量下降。因此, 在增加光纤模场的大小时, 需要考虑模场的稳定性要求, 这样的增长是有限的。按照现有最好的光纤加工条件(即折射率分布的不均匀性为 10^{-4} 数量级), 同时考虑光纤模场稳定传输的条件, 由 (5) 式可知, 光纤能够获得的最大模场直径还与激光波长 λ 和增益介质的折射率大小有关, 采用长波长的激光辐射和降低增益介质的折射率, 都有利于增加模场直径。当选择增益介质 $n = 1.44$, $\lambda = 1.1 \mu\text{m}$, $\Delta A = 0.338$, LP_{01} 模与 LP_{11} 模之间的折射率差为 1×10^{-4} 时, 阶跃光纤目前能达到的最大模场直径大约是 $45 \mu\text{m}$ 。

5 结 论

通过改变纤芯或包层的折射率分布, 等效地降低光纤纤芯与包层之间的折射率差, 可以达到增加模场大小的目的, 但同时, 光纤波导的模场约束能力会下降。因此, 在提升光纤模场大小时, 需综合考虑模场稳定性和抗弯特性的要求。由于模式之间的耦合及模场畸变因素的限制, 大模场光纤的模场大小增长能力有限, 其等效模场面积 A_{eff} 与相邻模式场之间的等效折射率的平方差的乘积趋向一个常量, 大模场光纤模场大小的增长受到这一常量值的约束。

参 考 文 献

- 1 Zhao Chujun, Peng Runwu, Tang Zhixiang *et al.*. Design and analysis of a kind of large flattened mode optical fiber[J]. *Chin. Phys.*, 2006, **15**(8): 1838~1842

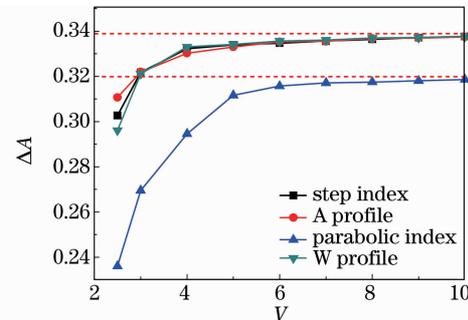


图 4 相邻模式之间的等效面积间距随归一化频率的变化关系

Fig. 4 Equivalent area spacing between adjacent modes varies with the normalized frequency

- 赵楚军, 彭润伍, 唐志翔 等. 一种平坦模光纤的设计和分析[J]. 中国物理, 2006, **15**(8): 1838~1842
- 2 John M. Fini. Design of large-mode-area amplifier fibers resistant to bend-induced distortion[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1669~1676
- 3 Zhou Qinling, Lu Xingqiang, Zhang Guang *et al.*. Mode characteristics of a large mode area flattened-mode photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1497~1500
周秦岭, 卢兴强, 张光 等. 大模面积平顶模场光子晶体光纤模式分析[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1497~1500
- 4 Shuang Chen, Ying Feng, Ling Wang. Design of large-mode-area rare earth doped fiber for high power coiled fiber amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(8): 671~674
- 5 Xue Yuhao, He Bing, Wang Wei *et al.*. Hundred-micron core diameter fiber laser and its mode control[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1900~1904
薛宇豪, 何兵, 王伟 等. 百微米芯径光纤激光器及其模式控制技术研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1900~1904
- 6 V. Filippov, Y. Chamorovskii, J. Kerttula *et al.*. 600 W power scalable single transverse mode tapered double-clad fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 103~1214
- 7 Jens L., Zellmer H., Tunnermann A. *et al.*. Suppression of higher order modes in a multimode fiber amplifier using efficient gain-loss-management (GLM)[C]. *Advanced Solid-State Lasers: Optical Society of America, Québec City Canada*, 2002: MB20
- 8 J. R. Marciante, R. G. Roides. Mode control in large-mode-area fiber lasers via gain filtering[C]. *OSA/CLEO/IQEC 2009*, 2009, CWD2
- 9 Liao Suying, Gong Mali, Zhang Haitao. Selection of doping radius for part-doped fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **39**(11): 2836~2841
廖素英, 巩马理, 张海涛. 部分掺杂光纤掺杂半径的选择[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2836~2841
- 10 Ramachandran S., Nicholson J. W., Ghalmi S. *et al.*. Light propagation with ultralarge modal areas in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1797~1799
- 11 J. W. Nicholson, C. Headley, J. Phillips *et al.*. Higher-order-mode fiber amplifiers[C]. *OSA/ASSP/LACSEA*, 2010z: LSWD1
- 12 Petermann K.. Constraints for fundamental-mode spot size for broadband dispersion-compensated single-mode fibres[J]. *Electronics Letters*, 1983, **19**: 712~714
- 13 Bouillet J., Zaouter Y., Desmarchelier R. *et al.*. High power ytterbium-doped rod-type three-level photonic crystal fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 17891~17902
- 14 Fabio Di Teodoro, Christopher D. Brooks. Multi-MW peak power single-transverse mode operation of a 100 micron core diameter, Yb-doped photonic crystal rod amplifier[C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 645308~645315
- 15 Liang Dong, Jun Li, Xiang Peng. Bend-resistant fundamental mode operation in ytterbium-doped leakage channel fibers with effective areas up to $3160 \mu\text{m}^2$ [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11512~11519
- 16 Fini J. M.. Bend-resistant design of conventional and microstructure fibers with very large mode area[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 69~81
- 17 Fini J. M.. Intuitive modeling of bend distortion in large-mode-area fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1632~1634
- 18 Liao S., Gong M., Zhang H.. Influence of mode distortion on the transverse mode competition in large-mode-area amplifiers[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(3): 406~412