

文章编号: 0258-7025(2009)11-2836-06

## 部分掺杂光纤掺杂半径的选择

廖素英<sup>1,2</sup> 巩马理<sup>1</sup> 张海涛<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学精密仪器与机械学系光子与电子研究中心, 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

<sup>2</sup> 桂林空军学院, 广西 桂林 541003

**摘要** 掺杂半径的选择是部分掺杂光纤能够有效选模的关键。从模式的归一化模场分布出发, 通过对模式场分布的比较, 确定采用较小或较大的掺杂半径均不利于基模的选取。从饱和增益和功率分配两个角度详细分析了掺杂半径的变化对各模式的增益获取能力和功率提取能力的影响。纤芯掺杂半径的变化改变了模式场与增益粒子的相互作用机会, 因而改变了各模式的增益获取能力及模式功率的输出大小。当掺杂分布与基模场分布达到最佳重叠并使得基模在强度上占据优势时, 则基模获得的增益超过其他模式, 输出功率达到最大。定量计算结果说明, 阶跃光纤采用 0.6 左右的相对掺杂半径可以有利于提取基模。

**关键词** 光纤激光器; 部分掺杂; 掺杂半径; 相对增益; 模式竞争

**中图分类号** TN 248.1; TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2836

## Selection of Doping Radius for Part-Doped Fibers

Liao Suying<sup>1,2</sup> Gong Mali<sup>1</sup> Zhang Haitao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> *The State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*  
<sup>2</sup> *Guilin Air Force Academy, Guilin, Guangxi 541003, China*)

**Abstract** The choice of doping radius is the key of ensuring the part-doped fibers to play an effective role in mode selections. This paper begins with the normalized mode distributions. By comparing the intensity distributions of different fiber modes, the use of smaller or larger doping radius is deemed not to be conducive to the fundamental mode selection. And then from the views of saturation gain and mode power allocation, the influences of doping changes on the mode ability to gain access and the ability to power extraction are analyzed in detail. The varying of doping radius changes the interaction opportunities between the mode field and the population inversion, and then changes the mode ability to gain access as well as its mode power output. When the gain doping optimally overlaps with the fundamental mode distribution, and the fundamental mode intensity gets the advantage over other modes, the access gain of the fundamental mode will exceed any other mode, and its power will reach the maximum value. Some quantitative results have indicated that selecting about 0.6 relative doping radius for step-index fiber can help us to efficiently extract the fundamental mode power.

**Key words** fiber laser; part-doped; doping radius; relative gain; mode competition

## 1 引 言

大模场光纤被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限制问题的最直接有效的途径。而大模场光纤激光器在高功率下要输出高光束质量的激光, 需要对横模的输出进行模式

控制。光纤弯曲<sup>[1~3]</sup>、拉锥<sup>[4,5]</sup>、增益控制<sup>[6,7]</sup>和腔镜选模<sup>[8,9]</sup>等均被证明是有效的模式选择方法。其中, 增益控制选模通过改变掺杂粒子沿径向的分布来改变光纤横模与增益粒子的相互作用机会, 突出基模的竞争优势而达到选模目的。M. Hotoleanu

收稿日期: 2008-12-08; 收到修改稿日期: 2009-03-23

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

导师简介: 巩马理(1959—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光技术与光电子信息工程等方面的研究。

E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

等<sup>[7]</sup>和袁艳阳等<sup>[10]</sup>均证明了在纤芯采用部分掺杂或高斯型的掺杂分布有利于基模的选取。明显的模式区分能力使人们非常看好增益控制选模的作用。而增益选模作用的关键是掺杂半径的选择,只有当掺杂分布与基模场分布达到最佳重叠并使基模在强度上占据优势时,基模才可能获得高于其他高阶模的增益而在模式竞争中胜出,获得较大功率比例的输出。本文从模式的归一化模场分布出发,通过分析、比较各模式在不同掺杂半径下的增益获取能力和功率提取能力,应用定量计算的结果说明阶跃光纤采用多大的掺杂半径,才能有效地抑制高阶模的增长,提高基模的功率输出比例。

## 2 理论基础

在多横模光纤激光器或放大器中,激光模式是以光纤导波模式为基础,在增益和损耗导引以及腔镜选模等共同作用下被激励或振荡的模式。但在目前增益不高的条件下,激光模式的场分布与本征模式的场分布差别很小,所以文中认为激光模式的场分布与本征模式场分布相同,因而不同阶次的激光模式的场分布各不相同。这些模场分布与激光增益粒子相互作用,抢夺反转粒子数。由于存在横向空间烧孔效应,每个模式都有可能它在它光强占优势的地方赢得反转粒子数而获得增益,一旦获得的增益超过它的损耗,这个模式就会形成稳定的激光输出。因此模场分布与增益掺杂分布的重叠程度直接关系

到各模式的增益竞争能力。图 1 所示为光纤中 6 个最低阶线偏模的功率归一化强度分布曲线。横坐标表示相对掺杂半径,定义为掺杂半径与纤芯半径的比值。图中黑粗线围住区域表示增益掺杂区(假定光纤掺杂后折射率不变)。从图中可以直观地看出,当掺杂区域较小时,大部分强度集中在中心较小区域的 LP<sub>02</sub> 模,强度分布明显高于相应位置处的 LP<sub>01</sub> 模的强度,这时候 LP<sub>02</sub> 模获得的增益将超过 LP<sub>01</sub> 模;而在掺杂半径较大时,高阶模在掺杂的边缘区域具有强度上的优势,获得的增益也很容易超过 LP<sub>01</sub> 模,所以掺杂半径较大或较小都不利于基模的竞争。

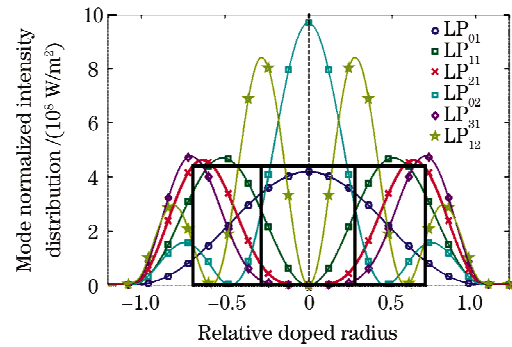


图 1 几个低阶模式的归一化强度分布曲线

Fig. 1 Normalized intensity distributions of several lower order modes

为了确定掺杂半径的大小,需考虑光纤激光器中的横向模式竞争。在只有单纵模、忽略放大自发辐射和横模之间的偏振效应及干涉作用的条件下,各模式的功率传播及反转粒子数变化满足稳态速率方程

$$\frac{N_2(r, \theta, z)}{N_1(r, \theta, z)} = \frac{\{ [P_p^+(z) + P_p^-(z)] \sigma_{sp} E_p^2(r, \theta) / (h\nu_p) \} + \sum_{i=1}^M \{ [P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)] \sigma_{as} E_{si}^2(r, \theta) / (h\nu_s) \}}{\{ [P_p^+(z) + P_p^-(z)] \sigma_{sp} E_p^2(r, \theta) / (h\nu_p) \} + (1/\tau) + \sum_{i=1}^M \{ [P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)] \sigma_{as} E_{si}^2(r, \theta) / (h\nu_s) \}}, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^a [\sigma_{sp} N_2(r, \theta, z) - \sigma_{sp} N_1(r, \theta, z)] E_p^2(r, \theta) r dr d\theta \right\} P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_{si}^\pm(z)}{dz} = \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^a [\sigma_{as} N_2(r, \theta, z) - \sigma_{as} N_1(r, \theta, z)] E_{si}^2(r, \theta) r dr d\theta \right\} P_{si}^\pm(z) - \alpha_{si} P_{si}^\pm(z) - \sum_j d_{ij} [P_{si}^+(z) - P_{sj}^+(z)], \quad (3)$$

其中  $(r, \theta, z)$  是极坐标表示的空间点位置坐标,  $h$  是普朗克常数,  $\tau$  是粒子在激光上能级的寿命,  $\nu_p$  和  $\nu_s$  分别是抽运光和激光的频率,  $a$  是光纤纤芯的半径,  $M$  是光纤中激光模式的数量,  $N_2(r, \theta, z)$  和  $N_1(r, \theta, z)$

分别是坐标  $(r, \theta, z)$  处激光上能级和下能级的粒子数。  $N_1(r, \theta, z)$  和  $N_2(r, \theta, z)$  满足  $N(r, \theta, z) = N_1(r, \theta, z) + N_2(r, \theta, z)$ ,  $N(r, \theta, z)$  是掺杂粒子密度分布;  $P_p^+(z)$  和  $P_p^-(z)$  分别是抽运光沿光纤轴正向和负向

的功率分布,  $P_{si}^+(z)$  和  $P_{si}^-(z)$  是第  $i$  个激光模式沿光纤正向和负向的功率分布;  $\sigma_{sp}$  ( $\sigma_{ep}$ ) 和  $\sigma_{ns}$  ( $\sigma_{es}$ ) 分别表示抽运光和激光的受激吸收(发射)截面;  $\alpha_p$  和  $\alpha_{si}$  分别是抽运光和第  $i$  个激光模式因散射、吸收而造成的损耗系数;  $d_{ij}$  表示第  $i$  个激光模式和第  $j$  个激光模式之间的功率耦合因子;  $E_p(r, \theta)$  和  $E_{si}(r, \theta)$

分别表示抽运光和激光第  $i$  个模式的功率归一化场强分布。考虑到光纤的内包层直径通常较纤芯直径大许多, 且抽运光源为高度多模的分布, 所以近似认为抽运光在光纤横截面上分布是均匀的。

由(1)~(3)式, 得到光纤中激光模式的增益系数为

$$g_i(z) = \iint \left\{ \frac{[(\sigma_{sp}\sigma_{es} - \sigma_{ns}\sigma_{ep}) / (h\nu_p/\tau)] \cdot I_p(z) - \sigma_{ns}}{[(\sigma_{ep} + \sigma_{sp}) / (h\nu_p/\tau)] \cdot I_p(z) + 1 + [(\sigma_{es} + \sigma_{ns}) / \sigma_{es}] \cdot \sum_{i=1}^M I_{si}(r, \theta, z) / I_{sat}} \cdot N(r, \theta) \cdot I_{si}(r, \theta, z)} \right\} r dr d\theta, \quad (4)$$

式中  $I_{sat}$ ,  $I_p$ ,  $I_{si}$  分别表示饱和光强、抽运光强和第  $i$  个模式的光强,  $I_p$ ,  $I_{si}$  与模场分布的关系为

$$I_p(z) = P_p(z) \cdot E_p^2(r, \theta) = [P_p^+(z) + P_p^-(z)] \cdot E_p^2(r, \theta), \quad (5)$$

$$I_{si}(r, \theta, z) = P_{si}(z) \cdot E_{si}^2(r, \theta) = [P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)] \cdot E_{si}^2(r, \theta), \quad (6)$$

根据(4)式, 如果给定抽运功率, 在基模出现不同程度的饱和后, 其他各阶模式可能获得的增益由掺杂分布和光强分布决定。实际光纤激光系统中, 基模最容易被激发而达到饱和, 因此分析基模出现饱和后各高阶模式的可能增益情况可以从一个方面反映出模式在光纤中的增益竞争能力。当基模刚出现饱和时, 其光强远大于其他高阶模的光强, 即  $I_0 \gg I_{si}$ , 此时, 忽略高阶模式的光强, 则模式可能的增益近似为

$$g_i(z) = \iint \left\{ \frac{[(\sigma_{sp}\sigma_{es} - \sigma_{ns}\sigma_{ep}) / (h\nu_p/\tau)] \cdot I_p(z) - \sigma_{ns}}{[(\sigma_{ep} + \sigma_{sp}) / (h\nu_p/\tau)] \cdot I_p(z) + 1 + [(\sigma_{es} + \sigma_{ns}) / \sigma_{es}] \cdot (I_0 / I_{sat})} \cdot N(r, \theta) \cdot I_{si}(r, \theta, z)} \right\} r dr d\theta. \quad (7)$$

它随掺杂分布和基模饱和程度的不同而改变。

给定光纤的结构参数, 应用(1)~(3)式和(7)式, 可以获得光纤在掺杂半径改变时, 各阶模式的可能增益与饱和程度的关系、随掺杂分布的变化规律以及在光纤中的功率传播特点。根据这些特点, 则可以确定合理的纤芯掺杂分布。

### 3 数值计算

#### 3.1 模式的相对增益

按照上述分析, 对双包层的大模场阶跃型光纤放大器进行了计算。光纤的相关参数选择为: 纤芯折射率  $n_1 = 1.459$ , 包层折射率  $n_2 = 1.458$ , 激光波长  $\lambda_s = 1060 \text{ nm}$ , 抽运波长  $\lambda_p = 975 \text{ nm}$ , 纤芯直径

$d_1 = 100 \text{ }\mu\text{m}$ , 内包层直径  $d_2 = 600 \text{ }\mu\text{m}$ , 并假设纤芯掺杂为平顶阶跃掺杂。图 2 所示为光纤在满掺杂时, 各模式的可能相对增益随基模饱和程度的变化曲线, 图 2(b) 为图例放大后, 低饱和情况下的相对增益曲线。纵坐标取值为模式的增益系数与基模增益系数的比值, 即: 将基模的增益定为参考标准 1 (图中  $LP_{01}$  虚线所示), 如果模式的相对增益在 1 以上, 则说明该模式增益超过基模, 反之, 则低于基模。结果显示, 在低饱和时, 基模由于中心强度上的优势, 获得的增益高于多数高阶模的增益, 而随着饱和程度加深, 高阶模在大部分掺杂区域都有机会获取反转粒子数, 因此增益超过了基模, 并且强度分布在边缘占优势的高阶模在其他模式依次出现饱和后,

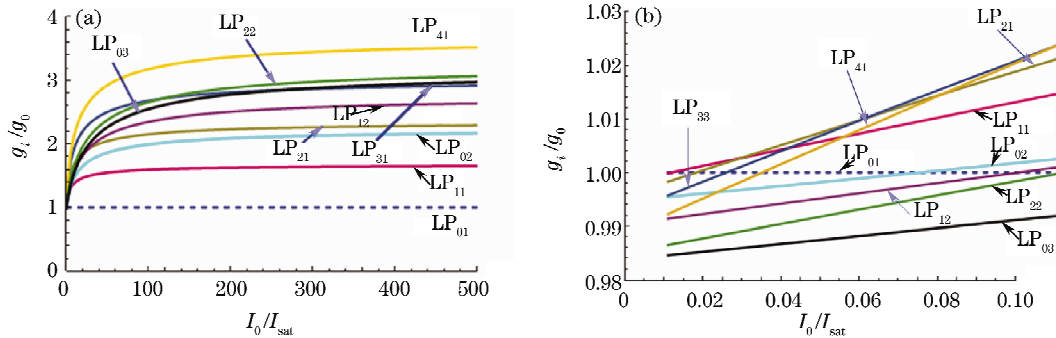


图 2 满掺杂时的模式相对增益随基模饱和程度的变化曲线。(a)高饱和程度;(b)低饱和程度

Fig. 2 Modal relative gain versus saturation level of fundamental mode at full doped.

(a) Higher saturation level; (b) lower saturation level

几乎抢占了边缘所有的反转粒子数,获得的增益最大。需要说明的是,为了减少计算量,这里只选择了最低阶的 9 个线偏模进行计算比较,下文相对增益的计算结果也是如此。

改变相对掺杂半径(从 0.1 变化到 0.9),也进行了类似的计算,当采用 0.6 的相对掺杂半径时,模式的相对增益曲线如图 3 所示。不管基模出现什么程度的饱和,所有高阶模可能获得的增益都低于基模,说明这种情况下基模的竞争占绝对优势。并且发现,在不同掺杂半径下,出现最大增益的模式不同,比如,0.6 掺杂时获得最大增益的是 LP<sub>01</sub> 模,采用 0.5 和 0.7 的掺杂半径时,增益最大的模式分别变成 LP<sub>22</sub> 和 LP<sub>11</sub> 模。这说明,采用不同的掺杂半径时,激发的激光模式比例是不同的。我们将不同掺杂半径下,获得最大增益的模式相应的相对增益值取出,画在同一图上,得到图 4 所示的最大相对增益随相对掺杂半径变化的曲线,图 4(a)为 I<sub>0</sub>/I<sub>sat</sub> = 0.1 时的结果,图 4(b)为 I<sub>0</sub>/I<sub>sat</sub> = 500 时的结果。从图 4 看出,低饱和时,较小的掺杂半径对高阶模有利,这是由于 LP<sub>02</sub>, LP<sub>03</sub> 等高阶模在中心的归一化强度比基模强,反转粒子数主要被它们抢夺,所以增

益超过基模;相对掺杂半径超过 0.4 后,基模从边缘掺杂区获取更多的反转粒子数,竞争优势体现出来。而高饱和情况下,掺杂半径小于 0.4 和大于 0.7,高阶模中的最大增益都明显超过基模,只有在大约 0.5 到 0.65 之间,基模的增益超过高阶模中的最大增益。两种饱和程度下的结果均显示,相对掺杂半径取 0.6 左右,对应的基模增益与高阶模中的最大增益之间的差值最大,即 0.6 左右的掺杂半径有利于选择基模。

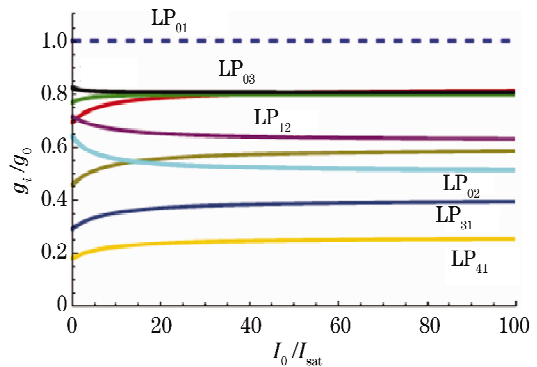


图 3 0.6 掺杂时的模式相对增益随基模饱和程度的变化曲线  
Fig. 3 Modal relative gain versus saturation level of fundamental mode at 0.6 doped

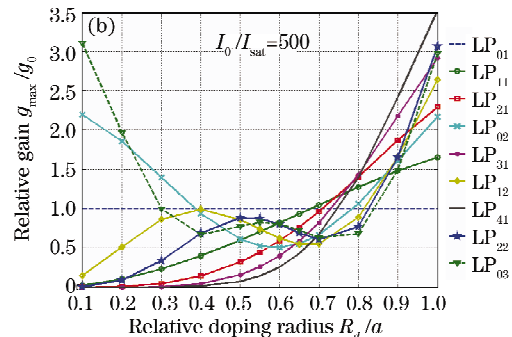
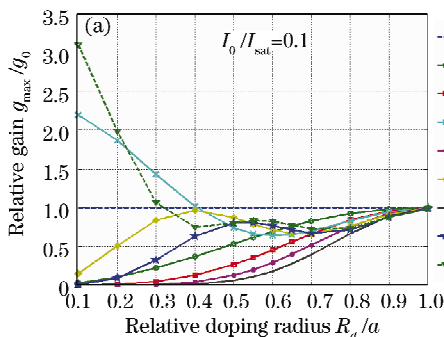


图 4 一定饱和程度下,增益最大的模式相应的相对增益值随掺杂半径的变化曲线

Fig. 4 Maximum mode relative gain versus doping radius at certain saturation level

### 3.2 模式的功率分配

前面从模式的饱和和增益方面比较了光纤激光器中各模式在基模出现饱和后可能获得的增益大小。考虑到实际光纤激光器或放大器系统中,模式的竞争还与模式的损耗密切相关,并且高阶模的增益饱和效应也需要加以考虑,所以需要再从模式功率分配方面分析掺杂半径对各模式功率传播的影响。

应用前面的 100 μm 光纤,加上抽运耦合模块则可以构成简单的光纤放大器系统。利用速率方程(1)~(3)式,对不同掺杂半径下各模式沿光纤轴向上的功率分布进行了计算。采用的相关参数为: P<sub>v</sub><sup>+</sup>(0) = 200 W, P<sub>v</sub><sup>-</sup>(L) = 0, N(r, θ) = 5 × 10<sup>-3</sup>,

α<sub>p</sub> = 2 × 10<sup>-3</sup> /m, α<sub>s</sub> = 4 × 10<sup>-4</sup> /m, σ<sub>as</sub> = 7.1162 × 10<sup>-27</sup> m<sup>2</sup>, σ<sub>ap</sub> = σ<sub>ep</sub> = 2.1756 × 10<sup>-24</sup> m<sup>2</sup>, σ<sub>es</sub> = 4.3678 × 10<sup>-25</sup> m<sup>2</sup>, L 的取值视掺杂半径而定,为使抽运光充分被吸收(衰减到 1% 以下),不同的掺杂半径需要的光纤长度 L 不同,一般掺杂半径越小,需要的光纤长度越长。计算还假设放大器初始输入端有 19 个模式被激励,并且每个模式的初始功率都取 200 mW。

图 5 给出的是两种掺杂半径下,模式的功率沿光纤轴向上的传播变化。各模式的功率逐渐增长并最终趋向饱和,0.3 的相对掺杂半径使 LP<sub>02</sub>, LP<sub>13</sub> 和 LP<sub>24</sub> 3 个模式的功率增长远高于其他模式,在光纤

输出端面上的功率比例分别达到总功率的 35.7%, 16.9% 和 9.4%, 而基模功率只有总功率的 6.0% 左右; 采用 0.6 的相对掺杂半径后, 基模获得的功率远高于其他模式, 最终输出的功率比例上升到 21.9%。

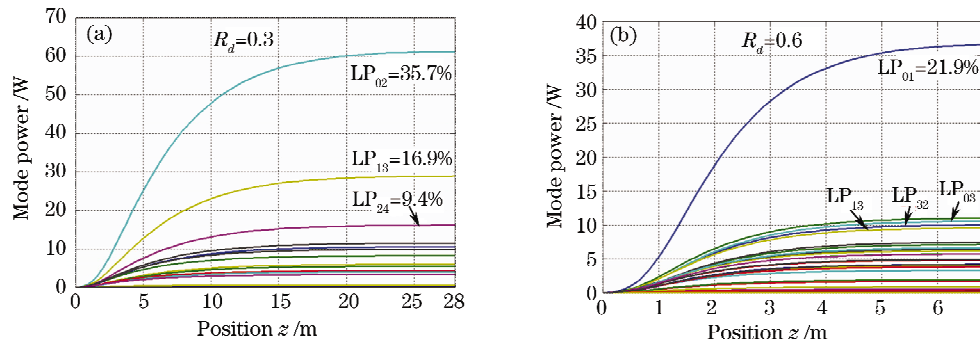


图 5 一定掺杂半径下, 模式的功率沿轴向上的传播变化

Fig. 5 Mode power evolution along the propagation axis at certain doped radius

图 6 为几个低阶模式的功率百分比随相对掺杂半径的变化曲线。基模的功率比例在 0.6 的相对掺杂半径附近仍达到最大值。对比图 4, 6 的结果, 相对掺杂半径小于 0.4 时,  $LP_{03}$  和  $LP_{02}$  模较大的增益确保它们获得了最大的功率百分比; 而相对掺杂半径大于 0.7 时, 尽管高阶模较基模有更强的增益能力, 但并没有使高阶模的功率比例超过基模, 这与反转粒子数的竞争中心由中心向周围转移及高阶模出现饱和现象有关, 当高阶模先后出现饱和后, 它们的功率增长也受到限制, 而基模在最初的增益竞争中获取了足够的增长, 使其功率仍可能超过高阶模的功率。

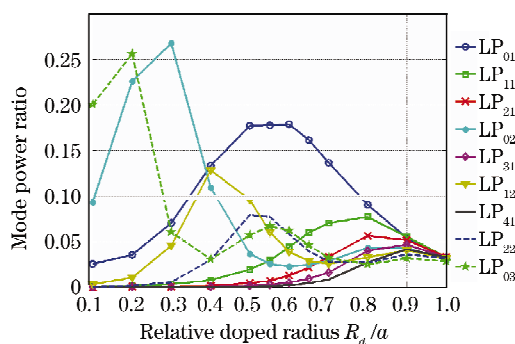


图 6 模式的功率百分比随掺杂半径的变化曲线

Fig. 6 Modal power ratios versus doped radius

## 4 结 论

综合两方面的分析, 在多横模的竞争中, 模场分布与掺杂分布的有效重叠及强度分布上的优势使光纤模式可能获得较大的饱和增益和较高比例的功率输出, 相对掺杂半径的变化将改变各模式的增益获

如果改进种子源的输入激励方式, 使其与光纤的基模尽可能地匹配, 或者适当引入模式的弯曲损耗效应, 加大高阶模的损耗, 则可以使基模的比例达到 50% 以上, 更有利于基模的选择。

取能力和功率提取的大小, 阶跃光纤采用 0.6 左右的相对掺杂半径可以使基模场分布与增益分布达到最佳重叠, 基模获得的增益超过所有高阶模式, 并且输出的功率也高出其他掺杂半径下相应的基模功率, 所以 0.6 的相对掺杂半径对阶跃光纤来说最有利于基模的选取。

需要说明的是, 本文虽然只给出了  $100 \mu\text{m}$  光纤放大器的计算结果, 实际上, 对  $50 \mu\text{m}$ ,  $80 \mu\text{m}$  等多种芯径大小的光纤放大器, 也进行了类似的分析计算, 得到了相似的结果, 因此确定 0.6 为阶跃光纤的最佳相对掺杂半径。当然, 光纤如果采用高斯型的掺杂方式, 基模场分布应该更有竞争优势, 但考虑到实际加工的困难, 所以这里选择阶跃掺杂方式进行讨论。最近, 我们利用国产的  $118 \mu\text{m}$ , 0.6 纤芯掺杂的大芯径阶跃光纤进行了实验, 在几瓦输出功率下, 测得的光束质量因子始终在 2.0 以下 (采用 90% 的刀口法测量)。

## 参 考 文 献

- 1 J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, L. Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7): 442~444
  - 2 D. A. V. Kliner, J. P. Koplow. Power scaling of diffraction limited fiber sources [C]. *SPIE*, 2005, **5647**: 550~556
  - 3 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
  - 4 J. A. Alvarez-Chavez, B. J. Grudinin, J. Nilsson *et al.*. Mode selection in high power cladding pumped fiber lasers with tapered section [C]. *CLEO'99*, 1999: 247~248
  - 5 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Mode selection of a tapered large-mode-area fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1625~1628
- 李立波, 楼祺洪, 周 军 等. 大模场面积光纤激光器拉锥法模式

- 选择[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1625~1628
- 6 J. Limpert, H. Zellmer, A. Tünnermann *et al.*. Suppression of high order modes in a multimode fiber amplifier using efficient gain-loss-management (GLM) [C]. *Advanced Solid-State Lasers*, 2002, Paper MB20. 1: 112~114
- 7 M. Hotoleanu, M. Söderlund, D. Kliner *et al.*. High order modes suppression in large mode area active fibers by controlling the radial distribution of the rare earth dopant[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61021T
- 8 U. Griebner, R. Koch, H. Schönningel *et al.*. Efficient laser operation with nearly diffraction-limited output from a diode-pumped heavily Nd-doped multimode fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(4): 266~268
- 9 U. Griebner, H. Schönningel. Laser operation with nearly diffraction-limited output from a Yb:YAG multimode channel waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11): 750~752
- 10 Yuan Yanyang, Gong Mali. Analysis and design of refractive-index and dopant distributions for large-mode-area fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1355~1359
- 袁艳阳, 巩马理. 大模面积光纤中折射率和掺杂分布的设计和分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(9): 1355~1359