

# 不同 $\text{Yb}^{3+}$ 掺杂分布对多模光纤振荡器的影响

王文亮 冷进勇\* 曹涧秋 郭少锋 姜宗福

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 光纤纤芯中不同的掺杂分布对高功率多模光纤振荡器输出特性有重要的影响。通过建立多模光纤振荡器理论模型,求解光纤振荡器速率方程组,数值模拟了均匀型及抛物线型  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂的双包层增益光纤接入激光器时的输出特性;并针对纤芯 75% 区域内均匀掺杂  $\text{Yb}^{3+}$  的情况,通过引入模式耦合系数矩阵,分析了掺杂分布对光纤振荡器输出特性的影响。计算结果表明,不同的  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂分布对振荡输出特性的影响存在差异;通过设计纤芯内  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂分布规律和形状,可有效抑制多模光纤振荡器中的高阶模式,从而使多模光纤振荡器实现基模输出。

**关键词** 激光器; 高功率多模光纤振荡器;  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂分布; 基模; 高阶模

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0702010

## Effect of Different $\text{Yb}^{3+}$ Dopant Profiles on Output Characteristics of Multimode Fiber Oscillator

Wang Wenliang Leng Jinyong Cao Jianqiu Guo Shaofeng Jiang Zongfu

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A theoretical model of high power multimode fiber oscillator is built based on rate equations of the multimode  $\text{Yb}^{3+}$  doped fiber considering improvement of the mode coupling in the core. The effect of  $\text{Yb}^{3+}$  dopant profiles in the core on the output characteristics of fiber oscillator is carried out. The output characteristics of the high power multimode fiber oscillator with flat and parabolic dopant profiles fibers are described respectively. The output characteristics of the fiber oscillator with 75% flat dopant profiles fibers in different coupling coefficients are described. The results show that the different  $\text{Yb}^{3+}$  dopant profiles may have different impacts on the output characteristics. Specially, the fundamental mode output can be achieved by designing and controlling the  $\text{Yb}^{3+}$  dopant profiles.

**Key words** lasers; high power multimode fiber oscillator;  $\text{Yb}^{3+}$  dopant profile; fundamental mode; high-order mode

**OCIS codes** 060.2310; 060.2320; 060.2430; 060.3510

## 1 引 言

光纤激光器作为新型激光器,其增益介质是掺稀土离子的光纤,具有激光效率高、体积小和光束质量好等优势,是 21 世纪最具发展潜力的激光器。虽然光纤激光器有诸多优点,但光纤的热效应以及非线性效应制约着其功率的提升<sup>[1-2]</sup>。增大纤芯直径可以增大光纤的模场面积,从而降低纤芯中的功率密度,进而抑制非线性效应和避免光纤损坏。但该方法的不足之处是存在高阶模传输,从而会降低输出光的光束质量。为了在降低纤芯功率密度的同时

保证单模运转,研究人员提出了大模场面积(LMA)光纤技术:增大纤芯直径的同时减小纤芯数值孔径。但此方式增加 LMA 光纤模场面积有限,而且会带来弯曲敏感、传输损耗过大等缺陷,影响光纤激光器和放大器系统的稳定运转<sup>[3-5]</sup>。

目前,研究表明通过优化纤芯内掺杂离子的浓度分布情况,可以对多模纤芯中的高阶模进行抑制<sup>[6-7]</sup>。国内外的相关研究主要集中在理论分析和探讨:Hotoleanu 等<sup>[6]</sup>利用 Liekki 公司开发的软件进行了数值模拟;Gong 等<sup>[7]</sup>通过建立了多模光纤激

收稿日期: 2013-02-07; 收到修改稿日期: 2013-03-07

作者简介: 王文亮(1986—),男,博士研究生,主要从事大功率光纤激光器方面的研究。

E-mail: wangwenliang123@yahoo. cn

导师简介: 姜宗福(1963—),男,博士,教授,主要从事高能激光技术与应用、光束控制与气动光学和物理光学等方面的研究。E-mail: jiangzongfu@yahoo. com. cn

\* 通信联系人。E-mail: jinyongleng@gmail. com

光器理论模型,对几种典型掺杂进行了初步的探讨;文献[8]通过对功率传输方程组的求解,数值模拟了不同掺杂的双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤接入放大器时的输出特性。本文通过建立高功率多模光纤激光器理论模型,分析了不同掺杂的双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤接入振荡器时,振荡器所需的最佳光纤长度、阈值功率、输出总功率及输出各模式的比例。在此基础上,引入纤芯内模式之间的功率耦合矩阵,分析纤芯 75% 的区域均匀掺杂 Yb<sup>3+</sup> 时,不同的耦合系数对光纤振荡器输出特性的影响。

## 2 理论分析

### 2.1 速率方程

端面抽运双包层光纤激光器的结构如图 1 所

示,抽运光从光纤端面注入,光纤长度为  $L$ ,前后腔镜对激光的反射率分别为  $R_1$  和  $R_2$ 。

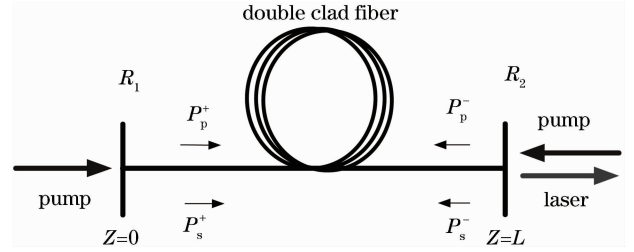


图 1 端面抽运双包层光纤激光器的示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the end-pumped fiber laser

根据光纤振荡器中激光与掺杂离子相互作用过程<sup>[9]</sup>以及模式间的耦合机理<sup>[10]</sup>,可得多模光纤振荡器的速率方程组为<sup>[7]</sup>

$$\pm \frac{dP_{s,i}^{\pm}(z)}{dz} = \left\{ \iint_0^{2\pi} [(\sigma_{a,s} + \sigma_{e,s})N_2(r, \varphi, z) - \sigma_{a,s}N(r, \varphi, z)]\Gamma_{s,i}(r, \varphi)rdrd\varphi \right\} P_{s,i}^{\pm}(z) - \alpha_{s,i}P_{s,i}^{\pm}(z) - \sum_j d_{i,j} [P_{s,i}^{\pm}(z) - P_{s,j}^{\pm}(z)], \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^{\pm}(z)}{dz} = \left\{ \iint_0^{2\pi} [(\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p})N_2(r, \varphi, z) - \sigma_{a,p}N(r, \varphi, z)]\Gamma_p(r, \varphi)rdrd\varphi \right\} P_p^{\pm}(z) - \alpha_p P_p^{\pm}(z), \quad (2)$$

$$\frac{N_2(r, \varphi, z)}{N(r, \varphi, z)} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{a,p}\Gamma_p(r, \varphi)\lambda_p}{hc} + \sum_i \frac{[P_{s,i}^+(z) + P_{s,i}^-(z)]\sigma_{a,s}\Gamma_{s,i}(r, \varphi)\lambda_s}{hc}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p})\Gamma_p(r, \varphi)\lambda_p}{hc} + \frac{1}{\tau} + \sum_i \frac{[P_{s,i}^+(z) + P_{s,i}^-(z)](\sigma_{a,s} + \sigma_{e,s})\Gamma_{s,i}(r, \varphi)\lambda_s}{hc}}, \quad (3)$$

式中  $P_{s,i}^+$  和  $P_{s,i}^-$  分别为腔内正向和反向第  $i$  个模式激光功率;  $P_p^+$  和  $P_p^-$  分别为正向和反向抽运光功率;  $N_2$  为处于上能级 Yb<sup>3+</sup> 的浓度;  $N$  为光纤掺 Yb<sup>3+</sup> 的浓度;  $\Gamma_p$  是抽运光耦合进纤芯的比例,它可由纤芯面积与包层面积比得到,  $\Gamma_{s,i}$  为对应模式激光在纤芯中的百分比,可由光纤的模式理论得到;  $\sigma_{a,p}$  和  $\sigma_{e,p}$  分别为抽运光的吸收截面和发射截面;  $\sigma_{a,s}$  和  $\sigma_{e,s}$  分别为信号光的吸收截面和发射截面;  $\tau$  为自发辐射寿命;  $h$  为普朗克常量;  $c$  为真空中的光速;  $\alpha_p$  和  $\alpha_{s,i}$  分别为抽运光和信号光的散射损耗系数,它们与位置无关;  $\lambda_p$  和  $\lambda_s$  分别为抽运光和激光的波长; 引入模式  $i$  到模式  $j$  的耦合系数  $d_{i,j}$ , 反映纤芯内模式间的功率转换强度<sup>[11]</sup>。

$P_{s,i}^+(z)$  和  $P_{s,i}^-(z)$  满足边界条件:

$$\begin{cases} P_{s,i}^+(0) = R_1 P_{s,i}^-(0) \\ P_{s,i}^-(L) = R_2 P_{s,i}^+(L) \end{cases} \quad (4)$$

在此通过设定光纤端面上掺杂离子浓度  $N(r, \varphi, z)$  的取值,可分析不同掺杂情况下的系统特性。

### 2.2 耦合系数矩阵

多模纤芯中不同模式间的耦合强度不同,耦合系数的大小与模式传播常数之差的四次方成反比<sup>[10]</sup>,且相邻模式间的耦合强度远大于非相邻模式间的耦合强度。当纤芯支持的模式数较少时,各模式传播常数的差别较小,可近似认为相邻模式之间耦合系数相等,而非相邻模式之间耦合系数为 0,采用耦合系数矩阵表示为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times d, \quad (5)$$

模式间耦合系数的大小与很多因素有关,如弯曲、应力和温度等;一般情况下,系数  $d$  很难确定,只能通过实验测试得到,在  $0.001 \sim 0.1 \text{ m}^{-1}$  之间。利用模式耦合系数矩阵,并结合速率方程组就可以对多模光纤激光器特性进行数值模拟。

### 3 数值仿真与结果讨论

#### 3.1 计算参数

选用阶跃折射率分布的双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤为例进行仿真讨论,计算所用相关参数值<sup>[7]</sup>如表 1 所示。根据光纤结构参数可知,共有 4 个模式可在纤芯内传输,分别为 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>和 LP<sub>02</sub>。

表 1 仿真所用参数<sup>[7]</sup>

Table 1 Parameters used in simulation

Parameters	Values
Core diameter $2a / \mu\text{m}$	28
Inner-clad diameter $2b / \mu\text{m}$	500
NA of core	0.06
NA of inner-clad	0.46
Max density of Yb <sup>3+</sup> $N_{\text{max}} / \text{m}^{-3}$	$4.6 \times 10^{25}$
Pump attenuation coefficient $\alpha_p / \text{m}^{-1}$	$2 \times 10^{-3}$
Pump attenuation coefficient $\alpha_s / \text{m}^{-1}$	$4 \times 10^{-4}$
Spontaneous lifetime $\tau / \text{s}$	$0.8 \times 10^{-3}$
Coupling coefficient $d / \text{m}^{-1}$	0.01
$R_1 / \%$	99
$R_2 / \%$	4

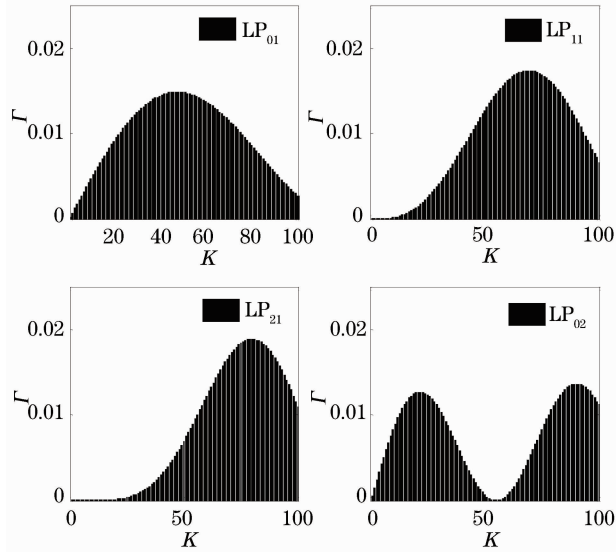


图 2 纤芯内几个主要模式的功率填充因子分布

Fig. 2 Overlapping factors  $\Gamma$  of main modes in fiber core

采用环带划分求解法<sup>[7]</sup>,将光纤的纤芯半径 100 等分,即有  $r_k - r_{k-1} = a/100$  ( $a$  为纤芯半径)。根据光纤的模式理论可得每个模式在各个环带上的功率填充因子  $\Gamma_{s,i}$ 。图 2 为纤芯内 4 个模式的功率填充因子分布,其中横坐标  $K$  表示芯径等分后的份数序列,纵坐标  $\Gamma$  表示每一份中各模式的功率填充因子。由图 2 可见,与各模式功率分布存在一定差异,这是由各个环带的面积不等造成的。其中 LP<sub>01</sub> 在靠近纤芯中心的位置具有较大的  $\Gamma_{s,i}$  值;LP<sub>11</sub> 和 LP<sub>21</sub> 最大  $\Gamma_{s,i}$  值较远离纤芯中心;而 LP<sub>02</sub> 沿纤芯半

径存在两个峰值。

对图 3 所示的 6 种掺杂分布情况进行数值模拟。图 3(a)表示纤芯 100%区域均匀掺杂,图 3 (b)和(c)分别表示纤芯内部 75%和 50%区域均匀掺杂;图 3 (d)、(e)和(f)则表示与图 3 (a)、(b)和(c)相应的区域内进行抛物线形掺杂。

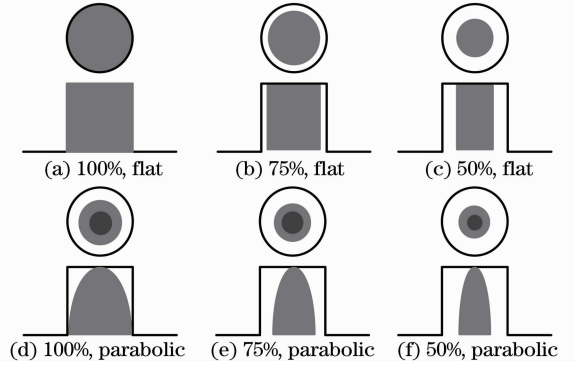


图 3 几种典型的掺杂方式

Fig. 3 Various dopant profiles

#### 3.2 不考虑耦合时掺杂离子分布的影响

假设所采用的掺杂光纤为完美无缺陷的,且不受外界的干扰,因此忽略各模式之间的耦合。在此激光器采用前向抽运,抽运光功率为 50W,不同掺杂离子分布双包层光纤接入激光器,根据前面对双包层光纤振荡器的分析,得到振荡器所需对应光纤的最佳长度,输出总功率,以及 LP<sub>01</sub> 模所占总功率的百分比,如表 2 所示。

图 4 给出了采用不同掺杂离子分布双包层光纤  
表 2 不同掺杂分布的激光器输出特性

Table 2 Output characteristics of fiber lasers with various dopant profiles

Dopant profiles	Fiber length /m	Output power /W	Percentage of LP <sub>01</sub> mode/%
Fig. 3(a)	8	41.1	60.5
Fig. 3(b)	14	40.8	99.9
Fig. 3(c)	25	38.3	99.8
Fig. 3(d)	20	41.7	99.5
Fig. 3(e)	35	41.2	99.9
Fig. 3(f)	60	38.4	94.2

表 3 各模式的增益阈值功率

Table 3 Gain threshold power of each mode

Dopant profile	Gain threshold power /W			
	LP <sub>01</sub>	LP <sub>11</sub>	LP <sub>21</sub>	LP <sub>02</sub>
Fig. 3(a)	2.96	3.06	3.27	3.46
Fig. 3(b)	3.69	3.79	3.99	4.16
Fig. 3(c)	5.27	5.36	5.56	5.73
Fig. 3(d)	4.54	4.63	4.83	5.01
Fig. 3(e)	6.71	6.81	7.01	7.18
Fig. 3(f)	10.34	10.44	10.64	10.81

接入激光器时各个模式沿光纤的功率分布情况。从图中可以看出,有些模式的功率值恒为零,其功率分布曲线与横坐标轴重合。

激光器中各模式的增益阈值功率由掺杂浓度分布、光纤结构及长度、掺杂离子吸收发射截面、模式

损耗决定。表 3 给出了不同掺杂分布光纤接入激光器时,各模式的增益阈值功率。

图 5 给出了采用不同掺杂离子分布双包层光纤接入振荡器时各个模式的输出功率随抽运光功率的变化以及 LP<sub>01</sub> 模所占总功率百分比的变化情况。

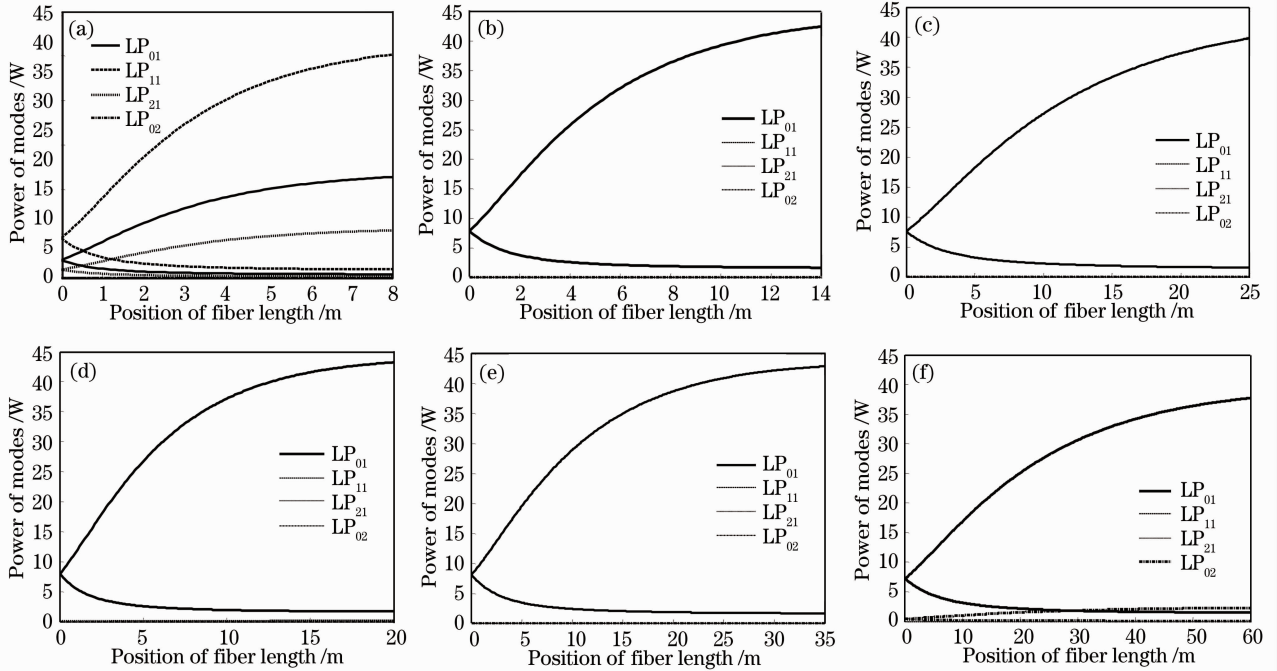


图 4 不同掺杂分布对振荡器中各模式功率分布的影响

Fig. 4 Effect of dopant profiles on power propagation of each mode in fiber oscillators

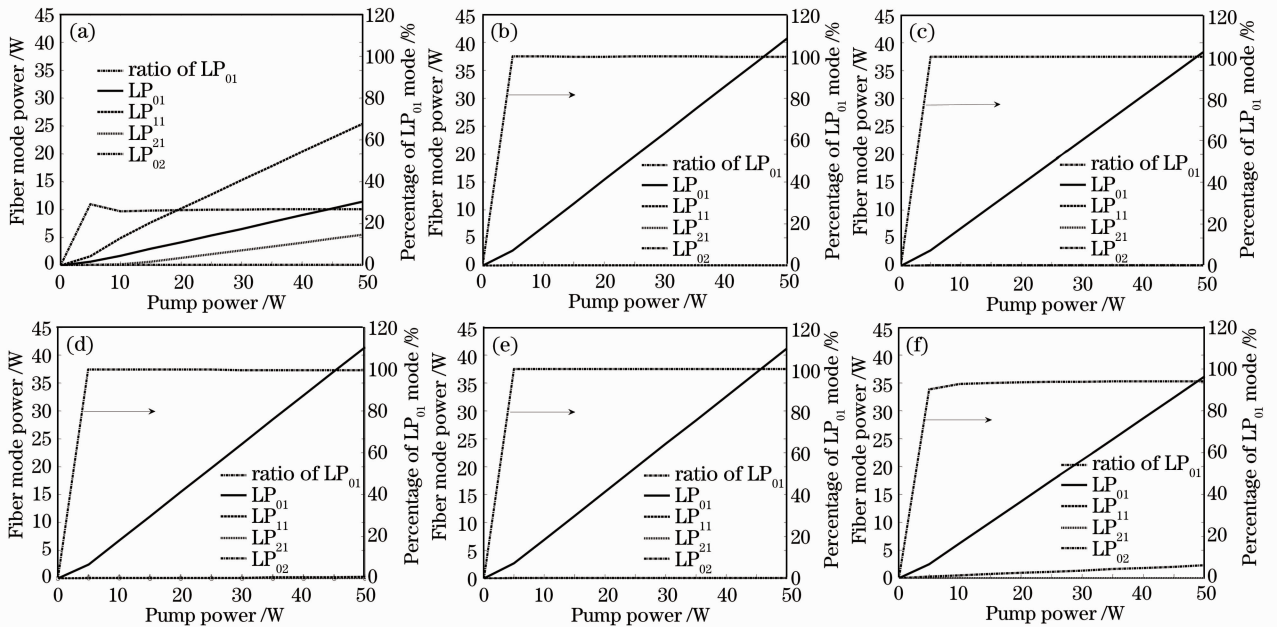


图 5 不同掺杂分布对振荡器输出特性的影响

Fig. 5 Effect of dopant profiles on output characteristics of fiber oscillators

计算结果表明:1) 掺杂区域越充分,振荡器所需光纤长度越短。100%均匀掺杂时所需光纤长度

最短,50%抛物掺杂时所需光纤长度最长;2) 无论均匀掺杂还是抛物线形掺杂,75%掺杂时,高阶模获

得的增益最小, LP<sub>01</sub> 所占总功率的百分比最高; 3) 掺杂区域越小, 激光器所需最佳光纤长度越长, 相同掺杂区域时, 抛物线形掺杂时系统所需最佳光纤长度更长; 4) 无论何种掺杂, 各模式的增益阈值功率大小顺序依次为 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub> 和 LP<sub>02</sub>, 而且掺杂区域越充分, 各模式的增益阈值功率越小; 5) 纤芯中心 50%~80% 均匀掺杂都可以保证输出光中 LP<sub>01</sub> 模的比例大于 95%。当中心掺杂的区域小于 50% 时, LP<sub>02</sub> 开始被激发, 并随着掺杂区域的减小输出光中 LP<sub>02</sub> 比例增大; 当中心掺杂的区域大于 80% 时, LP<sub>11</sub> 开始被激发, 并随掺杂区域的增大输出光中 LP<sub>11</sub> 比例增大。

可见, 不同的纤芯掺杂离子分布对高功率多模光纤激光器输出特性影响明显不同。可以通过设计光纤内掺杂离子分布来有效抑制高阶模式。综合考

虑高阶模的抑制与所需最佳光纤长度, 纤芯 75% 均匀掺杂是多模光纤实现基模输出的最佳选择。

### 3.3 模式耦合对振荡器的影响

针对 75% 的均匀掺杂光纤, 引入耦合系数矩阵, 为了便于讨论, 在此令耦合系数  $d$  分别取  $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$ 、 $10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。图 6 给出了采用不同耦合系数时, 光纤振荡器中各个模式沿光纤的功率分布情况。

图 6 给出了各个模式沿光纤的功率分布情况。图 7 给出了采用不同耦合系数时光纤振荡器中各个模式的输出功率随抽运光功率的变化以及 LP<sub>01</sub> 模所占总功率百分比的变化情况。输出光中 LP<sub>01</sub> 模所占总功率比例分别为 38%、71% 和 92%。

可见, 耦合系数越小时, LP<sub>01</sub> 所占总功率的百分比越高, 所以, 在实际中, 要尽量采用无缺陷的光纤, 且减小弯曲、应力和温度等工作条件对耦合系数的影响。

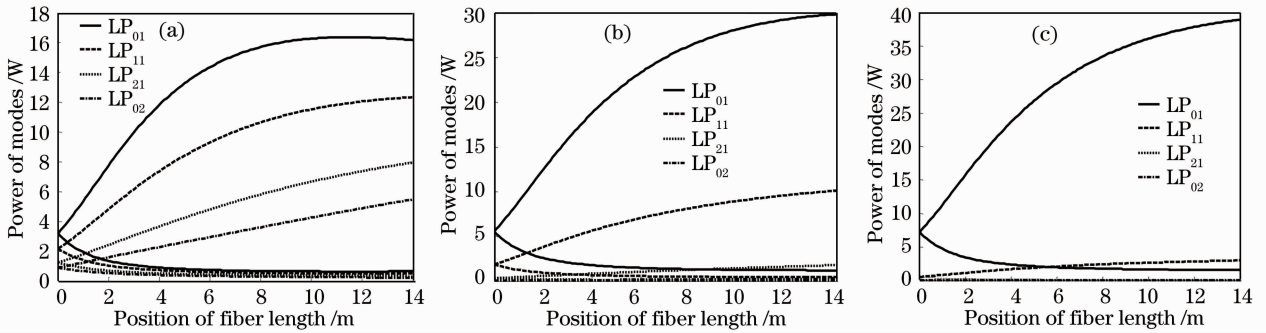


图 6 不同耦合系数对对振荡器中各模式功率分布的影响。(a)  $d=10^{-1} \text{ m}^{-1}$ ; (b)  $d=10^{-2} \text{ m}^{-1}$ ; (c)  $d=10^{-3} \text{ m}^{-1}$

Fig. 6 Effect of various coupling coefficients on power propagation of each mode in fiber oscillators.

(a)  $d=10^{-1} \text{ m}^{-1}$ ; (b)  $d=10^{-2} \text{ m}^{-1}$ ; (c)  $d=10^{-3} \text{ m}^{-1}$

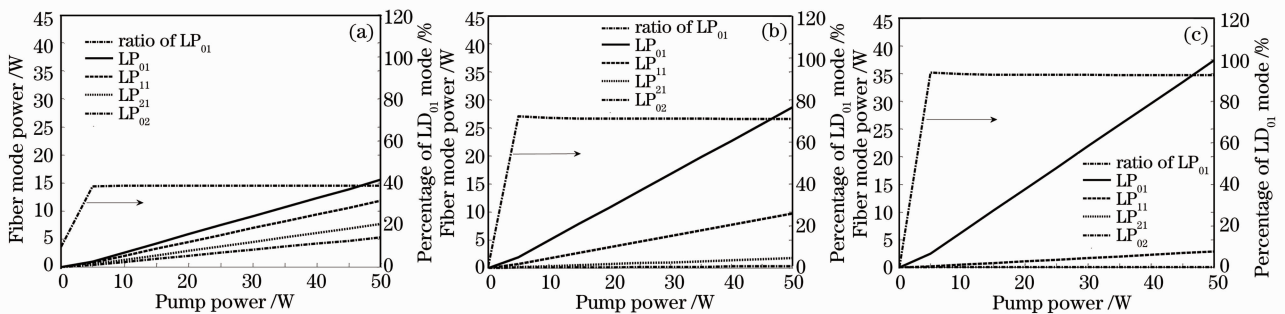


图 7 不同耦合系数对振荡器输出特性的影响。(a)  $d=10^{-1} \text{ m}^{-1}$ ; (b)  $d=10^{-2} \text{ m}^{-1}$ ; (c)  $d=10^{-3} \text{ m}^{-1}$

Fig. 7 Effect of various coupling coefficients on output characteristics.

(a)  $d=10^{-1} \text{ m}^{-1}$ ; (b)  $d=10^{-2} \text{ m}^{-1}$ ; (c)  $d=10^{-3} \text{ m}^{-1}$

## 4 结 论

分析了不同掺杂离子分布对光纤振荡器输出特性的影响, 给出了多模光纤激光器的理论模型和分析方法。结果表明, 通过对掺杂分布的设计, 可以控

制光纤振荡器的输出模式, 实现多模光纤振荡器基模输出。该物理模型和模拟结果对于高功率光纤放大器的构建和增益光纤选型有实际的指导意义。



## 参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics (2nd edition) [M]. London: Academic Press, 1995.
- 2 Jaouën Yves, Canat Guillaume, Grot Sébastien, et al.. Power limitation induced by nonlinear effects in pulsed high-power fiber amplifiers [J]. Comptes Rendus Physique, 2006, 7 (2): 163—169.
- 3 R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper, et al.. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(7): 1049—1056.
- 4 A. Hardy, R. Oron. Signal amplification in strongly pumped fiber amplifiers [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1997, 33(3): 307—313.
- 5 D. Gloge. Optical power flow in multimode fibers [J]. The Bell System Technical Journal, 1972, 51(10): 1767—1783.
- 6 M. Hotoleanu, M. Soderlund, 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: 425—432.
- 7 Gong Mali, Yuan Yanyang, Li Chen, et al.. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber laser and amplifiers [J]. Opt Express, 2006, 15 (6): 3236—3246.
- 8 Chen Shuang, Feng Ying, Wang Ling. Effect of rare earth dopant profiles on the output characteristics of the multimode fiber amplifier [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(4): 81—85.  
陈 爽, 王 玲, 冯 莹. 掺杂分布对多模光纤放大器输出特性的影响 [J]. 光电工程, 2009, 36(4): 81—85.
- 9 C. Rany, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifier [J]. Lightwave Technol, 1991, 9(2): 271—283.
- 10 D. Marcuse. Theory of Dielectric Optical Waveguides [M]. London: Academic Press, 1974.
- 11 W. A. Gambling, D. P. Payne, H. Matsumura. Mode conversion coefficients in optical fibers [J]. Appl Opt, 1975, 14(7): 1538—1542.

栏目编辑: 张 腾