

# 掺铒光纤激光器输出特性的研究\*

徐华斌 陈林

(上海第二工业大学应用物理系, 上海 201209)

**摘要** 根据掺铒光纤激光器的速率方程,对线性腔连续掺铒光纤激光器的输出特性进行了详细的理论分析,得到了980 nm 泵浦的掺铒光纤激光器在稳态条件下的解析表达式. 利用数值模拟结果对光纤激光器的上下能级粒子数和泵浦功率沿光纤长度分布以及泵浦阈值、斜率效率等进行了分析和讨论,并进行了980 nm 泵浦的掺铒光纤激光器的实验,实验证明:光纤激光器的阈值与理论计算基本一致.

**关键词** 掺铒光纤激光器;放大自发辐射(ASE);最佳光纤长度

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

## 0 引言

掺铒光纤激光器(EDFL)具有许多突出的优点和特点,其辐射波长与通信光纤最低损耗窗口相匹配;可用带宽较宽;与光纤元件具有天然兼容性;与半导体激光器相比,光束质量较好,噪声较低;由于光纤放大器(EDFA)的广泛应用,掺铒光纤激光器相关元器件的产业化水平高,等等. 因而它在光纤通信、光纤传感等领域具有重要的应用前景,成为研究的热点.

人们对掺铒光纤激光器(EDFL)在实验和理论上已经做了很多研究. 文献[1]系统地给出了光纤激光器的基本理论. 文献[2]给出了在线形激光谐振腔型情况下,掺铒光纤激光器在稳态条件下输出特性主要参量的解析表达式. 文献[3,4]讨论了光纤激光器中的自发辐射噪声问题. 文献[5]讨论了设计光纤激光器时的最佳光纤长度问题. 本文拟从光纤激光器的速率方程和光传输方程出发,对线性腔掺铒光纤激光器的稳态输出特性进行理论分析,利用解析表达式和数值模拟方法,对掺铒光纤激光器的阈值、输出功率、斜率效率等主要性能,及其同材料和结构参量的关系进行分析和讨论,为掺铒光纤激光器的优化设计提供依据. 并进行了980 nm 的掺铒光纤激光器的实验,理论与实验结果基本一致.

## 1 理论分析

### 1.1 器件结构和模型

采用如图1所示的简化线形激光谐振腔模型. 掺铒光纤的长度为  $l$ , 谐振腔左、右腔镜的反射率分别为  $R_1$ 、 $R_2$ , 其中  $R_1$  是一个双色镜,对泵浦光透明,

对信号激光则是高反; $R_2$  仅对信号激光具有反射率,这样泵浦光仅通过谐振腔一次.

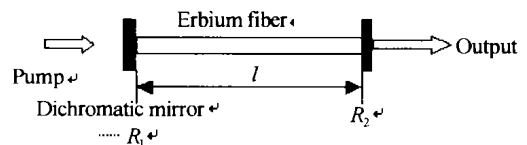


图1 线性腔掺铒光纤激光器的结构

Fig. 1 Schematic diagram of the linear cavity erbium-doped fiber laser

### 1.2 速率方程

单向泵浦时,假设光纤均匀掺杂,泵浦光子密度、掺铒光纤中上、下能级的粒子密度和发射的光子密度应满足如下的速率方程<sup>[4]</sup>

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\sigma_a \eta_s}{h\nu_s A} (P_s^+ + P_s^-) N_1 + \frac{\sigma_p \eta_p}{h\nu_p A} P_p N_1 - \frac{\sigma_e \eta_s}{h\nu_s A} (P_s^+ + P_s^-) N_2 - A_{21} N_2 \quad (1)$$

$$N_1(z,t) + N_2(z,t) = N_t \quad (2)$$

光传播方程为

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -P_p \eta_p \sigma_p N_1 \quad (3)$$

$$\frac{dP_s^+(z)}{dz} = P_s^+ \eta_s (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) \quad (4)$$

$$\frac{dP_s^-(z)}{dz} = -P_s^- \eta_s (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) \quad (5)$$

式中,  $N_t$  为  $Er^{3+}$  掺杂粒子数浓度,  $N_1 + N_2 = N_t$ .  $N_1$ 、 $N_2$  为 1、2 能级的粒子数浓度.  $P_p(z)$  为泵浦光子密度,  $P_s^+$ 、 $P_s^-$  分别表示与泵浦光传输方向相同和相反方向的受激发射光子密度.  $\sigma_e$ 、 $\sigma_a$  分别为信号激光发射和吸收截面,  $\sigma_p$  为泵浦光吸收截面;  $\eta_s$ 、 $\eta_p$  分别为信号激光和泵浦光与铒掺杂的重迭因子;  $\nu_s$  和  $\nu_p$  分别表示信号光和泵浦光的频率;  $A_{21}$  为自发辐射几率;  $A$  为纤芯有效面积;  $h$  为普朗克常量.

根据文献[6],泵浦光沿光纤分布的表达式为

\*上海市教委基金项目资助

Tel: 021-50687809 Email: hbhbxu@sina.com

收稿日期: 2004-01-09

$$\ln [p(z)] + \frac{\beta R_n}{\eta_p} [p(z) - 1] = -\sigma_p N_i \eta_p z \quad (6)$$

其中  $\beta = \frac{\sigma_p P_p^{\text{in}}}{A_{21} h\nu_p A}$ ,  $R_n$  是与输入泵浦光能量密度有关的参数,  $p(z)$  是归一化的泵浦功率沿光纤长度的分布函数. 当输入的泵浦光功率小于泵浦饱和功率  $A h\nu_p A_{21} / \sigma_p$ , 基态上的粒子没有充分上转换, 左边第一项占主导,  $p(z)$  沿光纤以指数衰减; 当输入的泵浦光功率远大于泵浦饱和功率, 基态上的粒子完全上转换, 左边第二项占主导,  $p(z)$  沿光纤线性变化.

在线性谐振腔中, 受激信号光有如下边界条件

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0), P_s^-(l) = R_2 P_s^+(l)$$

由式(4)和(5)可以推出稳态时, 在掺铒光纤上的任一点, 正向传输和反向传输的信号光功率乘积等于一个常数, 设该常数为  $C$ , 则有  $P_s^+(z)P_s^-(z) = C$ , 那么, 边界条件变为

$$P_s^+(0) = \sqrt{C} \sqrt{R_1}, P_s^-(0) = \sqrt{C} / \sqrt{R_1}$$

$$P_s^-(l) = \sqrt{C} \sqrt{R_2}, P_s^+(l) = \sqrt{C} / \sqrt{R_1} \quad (7)$$

在光纤激光器中, 设  $g(z, \lambda)$  为掺铒光纤长度为  $z$  处的增益系数, 掺铒光纤总长度为  $l$ , 则信号激光的单程增益为

$$G(l, \lambda) = \eta_s \int_0^l (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) dz$$

结合式(2)、(3)对上式积分得

$$G(l, \lambda) = gl + \frac{g + \alpha}{\alpha_p} \ln \frac{P_p^{\text{out}}}{P_p^{\text{in}}} \quad (8)$$

式(8)中,  $g = \sigma_e \eta_s N_i$ ,  $\alpha = \sigma_a \eta_s N_i$ ,  $\alpha_p = \sigma_p \eta_p N_i$

激光腔的往返损耗为  $\delta = \alpha - \ln R_1 R_2$ ,  $\alpha$  为光纤的损耗, 包括散射损耗以及光纤与腔镜的耦合损耗. 一般情况下,  $\alpha$  与  $-\ln R_1 R_2$  相比可以忽略, 则激光腔的单程损耗为

$$\delta = -2^{-1} \ln R_1 R_2 \quad (9)$$

当激光器实现稳态工作时, 激光器在阈值及超过阈值时, 谐振腔的增益与损耗相等<sup>[5]</sup>, 则有

$$G(l, \lambda) = \delta(l, \lambda) \quad (10)$$

将式(8)、(9)代入式(10)有

$$\ln \left[ \frac{P_p^{\text{out}}}{P_p^{\text{in}}} \right] = -\frac{\alpha_p (2^{-1} \ln R_1 R_2 + gl)}{g + \alpha} \quad (11)$$

在稳态时,  $dN_2(z, t)/dt = 0$ , 由式(1)可以求出

$$(P_s^+ + P_s^-) \frac{\eta_s}{h\nu_s A} (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) + A_{21} N_2 = P_p \frac{\eta_p \sigma_p N_1}{h\nu_p A} \quad (12)$$

将式(3)~(5)代入式(12)得

$$\frac{d(P_s^+ - P_s^-)}{dz} \frac{1}{h\nu_s A} + A_{21} N_2 + \frac{dP_p}{dz} \frac{1}{h\nu_p A} = 0 \quad (13)$$

由式(2)、(3)得  $N_2$  的表达式并将其代入式(13), 对  $z$  积分得

$$\frac{1}{h\nu_s A} [P_s^+(l) - P_s^+(0) - P_s^-(l) + P_s^-(0)] + A_{21} \left[ \frac{1}{\sigma_p \eta_p} \ln \frac{P_p^{\text{out}}}{P_p^{\text{in}}} + N_i l \right] + \frac{1}{h\nu_p A} P_p^{\text{in}} \left( \frac{P_p^{\text{out}}}{P_p^{\text{in}}} - 1 \right) = 0 \quad (14)$$

将式(7)、(11)代入式(14)并求出  $P_s^+(l)$  的表达式, 得

$$P_s^+(l) = -h\nu_s A \omega \left\{ \left[ -\frac{A_{21}}{\sigma_p \eta_p} \frac{\alpha_p \left( \frac{1}{2} \ln R_1 R_2 + gl \right)}{g + \alpha} + A_{21} N_i l \right] + \frac{P_p^{\text{in}}}{h\nu_p A} \exp \left[ -\frac{\alpha_p \left( \frac{1}{2} \ln R_1 R_2 + gl \right)}{g + \alpha} \right] - \frac{P_p^{\text{in}}}{h\nu_p A} \right\} \quad (15)$$

式中

$$\omega = \frac{\sqrt{R_1}}{\sqrt{R_1 - R_1} \sqrt{R_2 - R_2} \sqrt{R_1 + \sqrt{R_2}}}$$

则激光器的输出功率为

$$P_{\text{las}}(l) = T_2 P_s^+(l) = (1 - R_2) P_s^+(l) \quad (16)$$

### 1.2.1 光纤激光器的阈值泵浦功率

由式(16)可以推出激光器的阈值泵浦功率.

当  $P_{\text{las}}(l) = 0$  时, 可得阈值泵浦功率为

$$P_p^{\text{th}} = \frac{A_{21} h\nu_p A \left[ N_i l - \frac{1}{\sigma_p \eta_p} \zeta \right]}{1 - \exp(-\zeta)} \quad (17)$$

式中,  $\zeta = \frac{\alpha_p \left( \frac{1}{2} \ln R_1 R_2 + gl \right)}{g + \alpha}$

### 1.2.2 光纤激光器的斜率效率

由式(16)还可以推出光纤激光器的斜率效率

$$\eta = \frac{dP_{\text{las}}}{dP_p^{\text{in}}} = \frac{\nu_s \omega (1 - R_2)}{\nu_p}$$

$$\left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{\alpha_p \left( \frac{1}{2} \ln R_1 R_2 + gl \right)}{g + \alpha} \right] \right\} \quad (18)$$

### 1.2.3 最短光纤长度

取  $\eta = 0$ , 可以得到激光器受激发射所需的最短掺铒光纤长度为

$$l_{\text{min}} = -\frac{\ln R_1 R_2}{2g} \quad (19)$$

### 1.2.4 最佳光纤长度

对于给定的泵浦功率, 掺铒光纤存在一个最佳长度, 使掺铒光纤的增益为最大. Peroni<sup>[7]</sup> 等人指出, 当信号的增益在光纤输出端为零时, 该光纤长度  $l_{\text{opt}}$  达到最佳值. 因此由  $\frac{dP_{\text{las}}}{dz}(z=l) = 0$ , 可得掺铒光纤的最佳长度为

$$l_{opt} = \frac{g + \alpha}{\alpha_p g} \ln \Psi - \frac{\ln R_1 R_2}{2g} \quad (20)$$

式中

$$\Psi = \frac{\alpha_p g}{g + \alpha} \frac{P_p^{in}}{h\nu_p A} \frac{1}{A_{21} (N_t - \frac{1}{\eta_p \sigma_p} \frac{\alpha_p g}{g + \alpha})}$$

## 2 数值模拟与分析

### 2.1 上下能级粒子数沿光纤长度的分布

掺铒光纤激光器在稳态时并考虑单向泵浦条件下,根据式(1)~(5)可以计算出上下能级粒子数分布随掺铒光纤长度的变化,如图2. 计算中所用的参数为: $N_t = 1.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ,  $\sigma_e = 6.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_a = 7 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_p = 1.75 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\eta_s = 0.6$ ,  $\eta_p = 0.811$ ,  $\lambda_p = 980 \text{ nm}$ ,  $\lambda_s = 1550 \text{ nm}$ ,  $A_{21} = 83 \text{ s}^{-1}$ ,  $A = 5.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ,  $h = 6.626 \times 10^{-34}$ . 图2为分别在45 mW和90 mW泵浦功率条件下得出的. 可以看出激发态粒子浓度的最大值并不出现在抽运输入端,这是因为反向 ASE 功率在此处较高,因而消耗了大量的反转粒子数. 而且输入的泵浦光越强,激发态粒子的最大值偏离光纤输入端越明显.

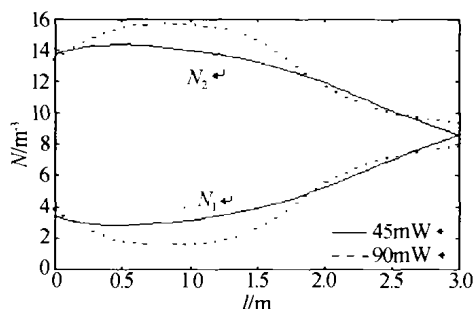


图2 上下能级粒子数分布随光纤长度的变化  
Fig. 2 Variation of population density of the upper and lower levels along a length of EDF

### 2.2 泵浦功率沿光纤长度的分布

根据式(1)~(5)还可以模拟出泵浦光功率随光纤长度的变化,如图3,分别在3 mW和45 mW泵浦功率条件下,此时泵浦饱和功率为3.3 mW. 可以看出泵浦功率沿光纤分别以指数和线性关系变化,与前面的式(6)分析一致.

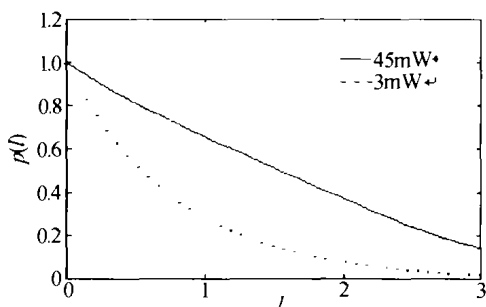


图3 泵浦功率随光纤长度的变化  
Fig. 3 Variation of pump along a length of erbium-doped fiber laser

### 2.3 光纤激光器的斜率效率

图4为一个腔镜的反射率为98%,另一个腔镜在不同的损耗条件下,斜率效率与掺铒光纤长度的关系,其他参数与上面的模拟计算相同. 这种腔镜反射率的假设与第四部分的实验情况相符. 可以看出,随着掺铒光纤长度的增大,斜率效率趋近于一个常数而且损耗越小,斜率效率越小. 同时还可以看出,随着掺铒光纤长度的缩短,斜率效率逐渐减小,甚至等于零. 表明激光器要实现振荡,掺铒光纤必须有一个最短长度. 如果掺铒光纤的长度小于最短长度,不论泵浦光多强也是不能振荡的. 而且掺铒光纤激光器的损耗越小,所需掺铒光纤的最短长度愈短.

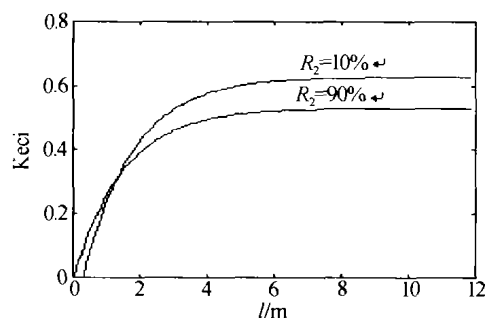


图4 斜率效率随光纤长度的变化  
Fig. 4 Variation of slope efficiency as a function of fiber length

### 2.4 光纤激光器的泵浦阈值

图5为一个腔镜的反射率为98%,另一个腔镜在不同的损耗条件下,泵浦阈值功率与光纤长度的关系. 从图中也可以看出,无论谐振腔镜的损耗多少,掺铒光纤均有最短长度. 此外,还具有最佳长度,这一点可以从图5中的几个极值点看出. 短于和超过最佳长度后,泵浦阈值功率都增加.

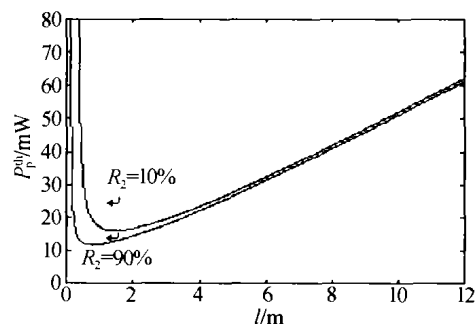


图5 泵浦阈值随光纤长度的变化  
Fig. 5 Variation of pump threshold as a function of fiber length

由图4和图5可知,对于一定长度的掺铒光纤来说,激光器的输出损耗越高,斜率效率越高;另一方面,输出损耗越高,阈值泵浦功率也越高. 因此,应当优化激光器的输出损耗以获得较高的斜率效率并保证阈值泵浦功率不至于太高.

## 3 实验

采用图6所示的实验装置,980 nm的泵浦光通

过 980/1550 nm WDM 耦合到掺铒光纤中. 光纤环形镜 (FLM) 作为谐振腔的一个反射镜, 根据文献 [8], 其在 1550 nm 波段反射率大于 99%, 在 980 nm 波段反射率约为 30%. 根据模拟计算, 一个优化的 80% 反射率、中心波长为 1555.10 nm 的光纤光栅 (FBG) 作为谐振腔的另一个反射镜. 1 m 长高掺铒光纤作为增益介质. 根据式 (17) 计算, 此光纤激光器的阈值为 10.7 mW, 实验测量在 13 mW 的泵浦功率时, 激光器才开始振荡. 理论值与实验测量有一差距可能是由于以下两方面的因素造成的: 1) 理论计算时, 忽略光纤的损耗以及熔接损耗; 2) 光纤环形镜由于耦合器的分束比在 FBG 的中心波长上有可能不是严格的 50%, 同时光纤圈的弯曲和损耗都会引起双折射<sup>[1]</sup>, 使其在所需波长上的反射率略低于文献中的 99% 反射率, 从而有部分光从光纤环形镜输出端口输出. 考虑这些因素后, 理论与实验基本吻合. 同时实验还测量了光纤激光器在不同的泵浦功率下掺铒光纤激光器的输出功率, 其功率输出特性如图 7. 100 mW 的泵浦功率下可获得 3.2 mW 的激光, 输出功率较小的原因主要是由于光纤环形镜在 980 nm 波段反射率约为 30%, 所用 1 m 长的掺铒光纤对泵浦光的吸收不充分, 部分泵浦光未经吸收即已从光纤环形镜的端口逸出. 一个改进的方案是: 采用  $Er^{3+}/Yb^{3+}$  共掺杂光纤<sup>[9]</sup>, 可将掺杂光纤对 980 nm 波段泵浦光的吸收效率提高两个数量级, 从而大大提高输出功率. 掺铒光纤激光器的输出激光光谱如图 8. 激射波长为 1555.10 nm, 与光纤光栅的 Bragg 波长一致. 激光输出谱宽为 0.12 nm, 此时泵浦功率为 80 mW.

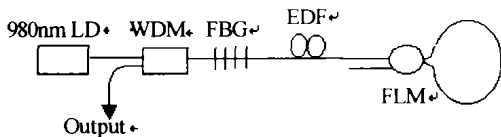


图 6 掺铒光纤激光器的实验装置  
Fig. 6 The experimental scheme of erbium-doped fiber laser

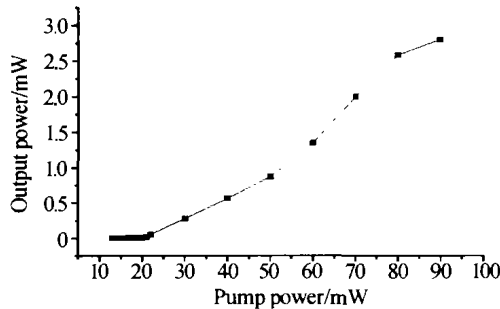


图 7 掺铒光纤激光器功率输出特性  
Fig. 7 Output character of the erbium-doped fiber laser

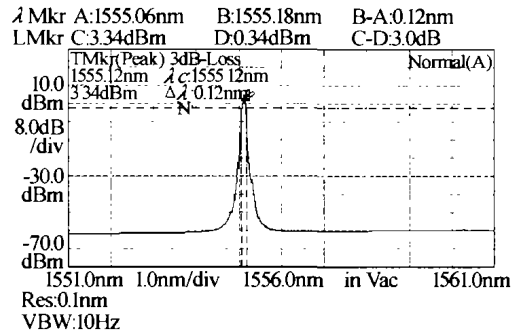


图 8 掺铒光纤激光器输出激光光谱  
Fig. 8 Output spectrum of the erbium-doped fiber laser

### 4 结论

从理论和实验上对线性腔掺铒光纤激光器的工作特性进行了分析. 得到了 980 nm 波段泵浦的掺铒光纤激光器在稳态条件下的解析表达式. 并利用数值模拟结果对光纤激光器的上下能级粒子数和泵浦功率沿光纤长度分布以及泵浦阈值、斜率效率等进行了分析和讨论, 为掺铒光纤激光器的优化设计提供了依据.

### 参考文献

- 1 聂秋华著. 光纤激光器和放大器技术. 北京: 电子工业出版社, 1997. 196 ~ 240  
Nie Q H. Fiber Laser and Amplifier. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997. 196 ~ 240
- 2 吴正茂, 夏光琼, 陈建国. 掺铒光纤激光器输出特性的解析研究. 光学学报, 1996, 16(12): 1676 ~ 1680  
Wu Z M, Xia G Q, Chen J G. Acta Optica Sinica, 1996, 16(12): 1676 ~ 1680
- 3 Desurvire E, Simpson J R. Amplification of spontaneous emission in Erbium-Doped single-mode fibers. J Lightwave Technology, 1989, 7(5): 835 ~ 845
- 4 Giles C R, Desuivire E. Propagation of signal and noise in concatenated erbium-doped fiber optical amplifiers. J Lightwave Technology, 1991, 9(2): 147 ~ 154
- 5 Mignon M, Desurvire E. An analytical mode for the determination of optimal output reflectivity and fiber length in erbium-doped fiber lasers. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(8): 850 ~ 852
- 6 Digonnet. Rare Earth Doped Fiber Laser and Amplifier. Publisher: Marcel Dekker, 2001. 183 ~ 193
- 7 Peroni M, Tamburrini M. Gain in erbium-doped fiber amplifiers: a single analytical solution for the rate equations. Opt Lett, 1990, 15(15): 842 ~ 844
- 8 安宏林, 林祥芝, 崔晓明, 等. 全光纤色散腔掺铒光纤激光器. 全国第 8 次光纤通信暨第 9 届集成光学学术会议论文集, 1997. 651 ~ 653

An H L, Lin X Z, Cui X M, *et al.* Erbium-doped Fiber Laser with Fiber Dispersion Cavity. The 8<sup>th</sup> fiber communication, 9<sup>th</sup> integrated optics academic conference, 1997. 651 ~ 653

9 Kringlebotn J T, Archambault J L, Reekie L, *et al.* Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup>-codoped fiber distributed-feedback laser. *Opt Lett*, 1994, **19** (24): 2101 ~ 2103

## Studies on the Output Characteristics of Erbium-doped Fiber Laser

Xu Huabin, Chen Lin

*The Physics Department of Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209*

Received date: 2004-01-09

**Abstract** According to the rate equations applicable to the erbium-doped fiber laser, continuous erbium-doped fiber laser of linear cavity was studied, and the expressions on erbium-doped fiber laser pumped by 980 nm band under stable condition was achieved. Variation of population density of the upper and lower levels, pump power, pump threshold and slope efficiency along a length of erbium-doped fiber were analyzed using numerical model, the experimental study on erbium-doped fiber laser by 980 nm band was shown that the pump threshold is consistent with theoretical calculate.

**Keyword** Erbium-doped fiber laser; Amplified spontaneous emission (ASE); Optimized fiber length

**Xu Huabin** was born in Anhui, China. He is a physics teacher in the Physics Department of Shanghai Second Polytechnic University, his major is fiber laser and excimer laser.