

# 980 nm 泵浦掺铒光纤放大器增益特性的理论研究<sup>\*</sup>

杜戈果 陈国夫

(瞬态光学技术国家重点实验室, 西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘要** 从均匀加宽三能级结构的速率方程组和光传输方程出发, 在引入光场与掺杂分布的重叠因子后, 忽略放大自发辐射(ASE)时, 得到了 980nm 波段泵浦的掺铒光纤放大器(EDFA)速率方程组在稳态情况下的解析解, 并利用数值模拟结果对放大器的增益、泵浦阈值、最佳光纤长度进行了分析和讨论。

**关键词** 掺铒光纤放大器 速率方程 增益

掺铒光纤放大器(EDFA)具有许多优点, 如增益高、噪声小、连接损耗小、增益与偏振无关等, 自 1987 年公开报道以来, 已成为当前研究的热点, 在光纤通信系统中发挥着巨大的作用。根据掺铒石英玻璃的吸收谱, 可用多种波长对 EDFA 泵浦, 其中包括  $\lambda_p = 514.5, 532, 800, 980, 1480 \text{ nm}$  等。研究表明, 低于 980 nm 波长的泵浦带存在着激发态吸收, 因此效率较高的泵浦波段是 980 和 1480 nm 波段, 而且, 相应的大功率量子阱半导体二极管激光器也日趋成熟并迅速商品化。

除了大量的实验研究外, 人们对 EDFA 还做了大量的理论工作。在用来描述放大器的理论中, 速率方程理论是应用最广的。由于速率方程组包含一组非线性方程, 因而大多数只能作数值分析<sup>[1, 2]</sup>。在较为简化的条件下, 对掺铒光纤放大器也进行过一些解析研究<sup>[3, 4]</sup>。本文在此基础上, 报道 980 nm 波段泵浦的 EDFA 的速率方程组解析求解的结果, 并利用数值模拟结果对放大器的特点进行了分析和讨论。

## 1 理论分析

掺铒光纤放大器在 980 nm 泵浦下, 是三能级系统, 如图 1 所示。基态吸收泵浦光从  $^4I_{15/2}$  跃迁到  $^4I_{11/2}$  能级, 该能级的不稳定性导致无辐射衰减, 使粒子快速转移到  $^4I_{13/2}$  能级, 形成粒子数反转。图中  $\tau_{32}$  为  $N_3$  能级至  $N_2$  能级的弛豫时间,  $\tau_{21}$  为  $N_2$  能级到  $N_1$  能级的弛豫时间。一般来说,  $\tau_{21}$  典型值为 10 ms 左右,  $\tau_{32}$  为 ns

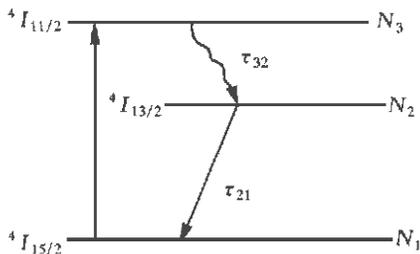


图 1 铒离子  $\text{Er}^{3+}$  能级简图

量级. 由于  $\tau_{21} \gg \tau_{32}$ , 因此  $N_3$  能级上的粒子数可近似为零, 从而可用二能级粒子与双波长相互作用来描述 EDFA.

在光纤中, 光场可写成场横向分布与纵向变化的两个函数之积, 即

$$\begin{aligned} I_p(r, \phi, z) &= f_p(r, \phi) I_p(z), \\ I_s(r, \phi, z) &= f_s(r, \phi) I_s(z), \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $I_p(r, \phi, z)$ ,  $I_s(r, \phi, z)$  分别表示泵浦光和信号光的光强(用  $p$  和  $s$  分别标记泵浦光和信号光),  $f_{p,s}(r, \phi)$  是归一化的场横向分布函数, 即满足

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\infty} f_{p,s}(r, \phi) r dr = 1. \quad (2)$$

类似地, 粒子数分布也可写成

$$N_i(r, \phi, z) = g(r, \phi) N_i(z), \quad (3)$$

其中  $g(r, \phi)$  是归一化的掺杂(横向)分布函数.  $N_0$  为  $\text{Er}^{3+}$  掺杂粒子数密度. 在均匀掺杂情况下, 有  $N_0(z) = N_0$ .

引入光波模场与  $\text{Er}^{3+}$  掺杂分布之间的重合积分  $\Gamma$ , 它与半导体激光器采用的限制因子类似, 其定义为

$$\Gamma_{p,s} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^a f_{p,s}(r, \phi) g(r, \phi) r dr, \quad (4)$$

其中  $a$  为铒光纤中  $\text{Er}^{3+}$  离子掺杂半径.

对图 1 所示  $\text{Er}^{3+}$  离子的能级, 考虑均匀展宽情况, 参考文献[5] 中三能级系统的速率方程, 忽略放大自发辐射, 在  $N_3 \approx 0$  时, 速率方程可简化为

$$\begin{aligned} \frac{dN_2(r, \phi, z, t)}{dt} &= \frac{\sigma_{ap} I_p(r, \phi, z)}{h\nu_p} N_1(r, \phi, z, t) + \frac{\sigma_{as} I_s(r, \phi, z)}{h\nu_s} N_1(r, \phi, z, t) - \\ &\quad \frac{\sigma_{es} I_s(r, \phi, z)}{h\nu_s} N_2(r, \phi, z, t) - A_{21} N_2(r, \phi, z, t), \end{aligned} \quad (5)$$

$$N_1(r, \phi, z, t) + N_2(r, \phi, z, t) = N_0(r, \phi, z, t), \quad (6)$$

式中  $N_1$ ,  $N_2$  分别表示基态和亚稳态的粒子数密度.  $h\nu_p$ ,  $h\nu_s$  分别表示泵浦光和信号光光子能量,  $\sigma_{ap}$ ,  $\sigma_{as}$  代表基态对泵浦光和信号光的吸收截面,  $\sigma_{es}$  为激发态的受激辐射截面;  $A_{21}$  为自发辐射几率,  $A_{21} = 1/\tau_{21}$ .

设泵浦光和信号光沿  $z$  方向传播, 忽略光纤损耗, 传输方程为

$$\frac{dI_p(r, \phi, z)}{dz} = \mp \sigma_{ap} N_1(r, \phi, z, t) I_p(r, \phi, z), \quad (7)$$

$$\frac{dI_s(r, \phi, z)}{dz} = [\sigma_{es} N_2(r, \phi, z, t) - \sigma_{as} N_1(r, \phi, z, t)] I_s(r, \phi, z), \quad (8)$$

其中, “-”表示同向泵浦, “+”表示反向泵浦.

稳态条件下,  $\frac{dN_2(z, t)}{dt} = 0$ . 对(5)~(8)式两边作横向积分, 得

$$0 = \frac{dN_2(z, t)}{dt} = \frac{\sigma_{ap} \Gamma_p P_p(z)}{A_c h\nu_p} N_1(z, t) + \frac{\sigma_{as} \Gamma_s P_s(z)}{A_c h\nu_s} N_1(z, t) -$$

$$\frac{\sigma_{es} \Gamma_s P_s(z)}{A_c h \nu_s} N_2(z, t) - A_{21} N_2(z, t), \quad (9)$$

$$N_1(z) + N_2(z) = N_0, \quad (10)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = \mp \Gamma_p \sigma_{ap} N_1(z) P_p(z), \quad (11)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \Gamma_s [\sigma_{es} N_2(z) - \sigma_{as} N_1(z)] P_s(z), \quad (12)$$

其中  $\tau = \tau_{21}$ ,  $A_c$  表示纤芯掺铒有效面积. (9)式可改写为

$$N_2(z) = \frac{\tau \Gamma_p \sigma_{ap} P_p(z)}{A_c h \nu_p} N_1(z) + \frac{\tau \Gamma_s [\sigma_{as} N_1(z) - \sigma_{es} N_2(z)] P_s(z)}{A_c h \nu_s}. \quad (13)$$

在同向泵浦下, 将(11)式  $\times \frac{\tau}{A_c h \nu_p}$  + (12)式  $\times \frac{\tau}{A_c h \nu_s}$  + (13)式得

$$N_2(z) + \frac{\tau}{h \nu_p} \frac{dP_p(z)}{dz} + \frac{\tau}{h \nu_s} \frac{dP_s(z)}{dz} = 0. \quad (14)$$

参考文献[3], 对(11)、(12)、(14)式分别沿  $z$  轴积分, 设  $S = \int_0^z N_2(z) dz$ , 经过推导得

$$S = \frac{\ln \frac{P_p(z)}{P_p(0)} + \Gamma_p \sigma_{ap} N_0 z}{\Gamma_p \sigma_{ap}} = \frac{\ln \frac{P_s(z)}{P_s(0)} + \Gamma_s \sigma_{as} N_0 z}{\Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})} = -\frac{\tau}{A_c h \nu_p} [P_p(z) - P_p(0)] - \frac{\tau}{A_c h \nu_s} [P_s(z) - P_s(0)]. \quad (15)$$

### 1.1 放大器增益

定义放大器放大倍数  $G(z) = P_s(z)/P_s(0)$  (若用 dB 数来表示时, 称为增益), 对(15)式经过仔细推导, 可得

$$[G(z)]^\beta \exp(-\beta \Gamma_s \sigma_{es} N_0 z) = 1 - \frac{\nu_p P_s(0)}{\nu_s P_p(0)} [G(z) - 1] - \frac{[\ln G(z) + \Gamma_s \sigma_{as} N_0 z] A_c h \nu_p}{\tau P_p(0) \Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})}, \quad (16)$$

其中  $\beta = \frac{\Gamma_p \sigma_{ap}}{\Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})}$ . (16)式就是放大器增益的隐函数形式的解析式.

### 1.2 泵浦阈值

在泵浦阈值下, 信号光通过长为  $L$  的光纤后功率保持不变, 即  $G(L) = 1$ , 代入(16)式得

$$P_{pth} = \frac{A_c h \nu_p \sigma_{as} N_0 L}{\tau (\sigma_{as} + \sigma_{es}) [1 - \exp(-\beta \Gamma_s \sigma_{es} N_0 L)]}, \quad (17)$$

由此式可见, EDFA 的阈值泵浦功率是与信号光强无关的.

### 1.3 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, 使放大器的增益为最大. 这是由于泵浦光在掺铒光纤内被铒离子吸收, 它的功率逐渐下降. 如果光纤太长, 当功率下降到泵浦阈值以下时, 有一部分光纤处于低于阈值泵浦, 这不但不能造成铒离子的反转分布, 反而吸收信号光; 光纤太短, 对泵浦光吸收太少, 降低了泵浦光的利用效率. Peroni<sup>[9]</sup> 等人指出, 当信号增益在光纤输出端为零时, 该光纤长度  $L_c$  达到最佳值.

由  $\frac{\partial G(z)}{\partial z}(z=L_c)=0$ , 可推导出

$$[G(L_c)]^\beta \exp(-\beta \Gamma_s \sigma_{es} N_0 L_c) = \frac{A_c h \nu_p \sigma_{as}}{\tau P_p(0) \Gamma_p \sigma_{ap} \sigma_{es}}, \quad (18)$$

这也是一个隐函数形式的解析解。

当光纤为最佳长度时, 信号通过放大器后获得的增益最大。

## 2 数值模拟计算

假设 EDFA 采用掺铒石英光纤, 计算中所用的参数为:  $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $\nu_p=3.061 \times 10^{14} \text{ Hz}$  ( $\lambda_p=980 \text{ nm}$ ),  $\nu_s=1.935 \times 10^{14} \text{ Hz}$  ( $\lambda_s=1550 \text{ nm}$ ),  $\Gamma_p=\Gamma_s=0.6$ , 掺杂粒子数密度  $N_0=2.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ,  $A_c=1.26 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  ( $a=2.0 \mu\text{m}$ ), 小信号功率  $1 \mu\text{W}$ , 大信号功率  $1 \text{ mW}$ . 下列数据出自文献 [7] (对 Al/Ge/SiO<sub>2</sub> 光纤):  $\tau=11.4 \text{ ms}$ ,  $\sigma_{ap}=3.8 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_{as}=3.1 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_{es}=2.7 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ .

### 2.1 放大器增益

图 2 为增益随泵浦功率、掺杂浓度、光纤长度的变化曲线, 横坐标取为掺杂浓度与光纤长度的乘积. 图 2(a) 为小信号时的情况, 图 2(b) 为大信号时的情况. 随着泵浦功率的增大, 增

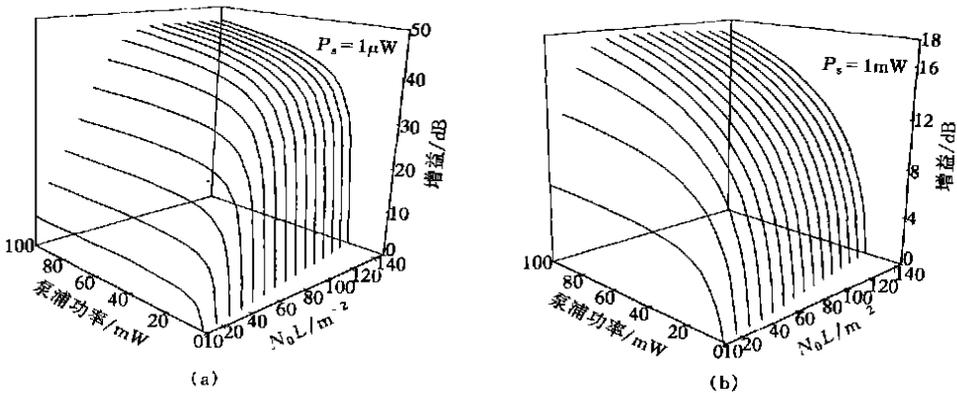


图 2 增益随泵浦功率、掺杂浓度与光纤长度的乘积 ( $N_0L$ ) 的变化

(a) 小信号情况, (b) 大信号情况

益逐渐增大并趋于饱和, 这是由泵浦光引起的增益饱和; 横坐标取值越小, 发生饱和所对应的泵浦功率越小. 在相同掺杂浓度、相同长度、相同泵浦功率下, 大信号时的增益明显小于小信号时的增益, 这是放大器中信号光引起的增益饱和。

图 3 为在不同掺杂浓度、不同泵浦功率下, 增益沿光纤长度的变化; 图 3(a) 为固定掺杂浓度时随泵浦功率变化的情况, 图 3(b) 为固定泵浦功率时随掺杂浓度变化的情况. 从图中可以看出, 增益沿光纤长度并不是线性增长的. 在某一长度处, 增益达到最大值, 而后开始下降. 增益最大值对应的光纤长度为最佳光纤长度. 掺杂浓度越高、泵浦功率越小, 增益的这种变化越早出现, 即最佳光纤长度越短. 大信号情况与小信号时相比, 在相同掺杂浓度、相同泵浦功率下, 不仅最佳光纤长度短了, 而且相应的增益值也小了。

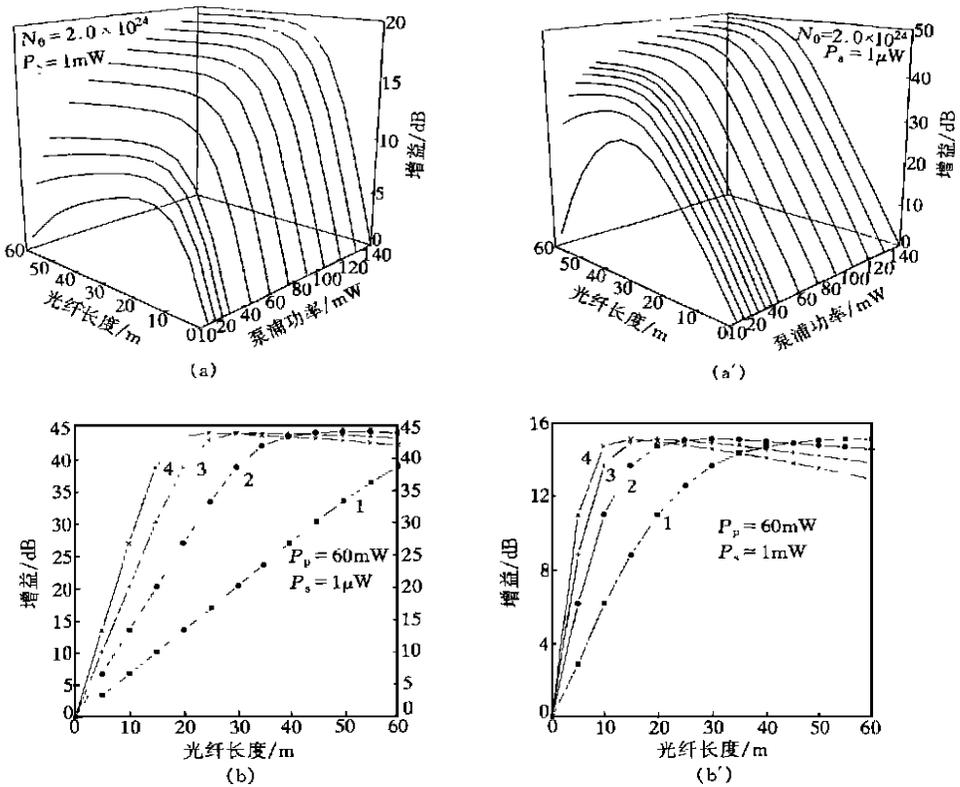


图 3 在不同泵浦功率与不同掺杂浓度下, 增益沿光纤长度的变化

(a'), (b) 为小信号情况, (a), (b') 为大信号情况; 图(b), (b') 中曲线 1 示  $N_0 = 1.0 \times 10^{24}$ , 2 示  $N_0 = 2.0 \times 10^{24}$ , 3 示  $N_0 = 3.0 \times 10^{24}$ , 4 示  $N_0 = 4.0 \times 10^{24}$

### 2.2 泵浦阈值

图 4 为泵浦阈值与光纤长度的关系曲线. 光纤长度越长, 泵浦阈值越大; 在同一长度下, 掺杂浓度越高, 泵浦阈值也越大. 这是因为光纤长度加长或掺杂浓度增加时, 光纤对信号光的吸收增大, 欲保持信号光通过光纤后强度不变, 需要增大泵浦功率, 即增大泵浦阈值.

### 2.3 最佳光纤长度

图 5(a)、(a') 为最佳光纤长度随泵浦功率在大、小信号、不同掺杂浓度下的变化. 泵浦功率越小、掺杂浓度越高, 最佳光纤长度越短; 在相同的掺杂浓度和泵浦功率下, 信号越强, 最佳光纤长度越短, 这与图 3 中得到的结论相符.

图 5(b)、(b') 给出  $N_0 = 2.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  时最佳光纤长度、相应的增益与泵浦功率在大、小信号下的关系. 在相同的泵浦功率下, 大信号时的最佳光纤长度比小信

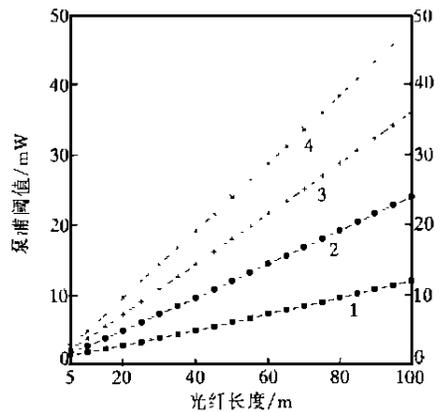


图 4 泵浦阈值与光纤长度、掺杂浓度的关系

1 示  $N_0 = 1.0 \times 10^{24}$ , 2 示  $N_0 = 2.0 \times 10^{24}$ , 3 示  $N_0 = 3.0 \times 10^{24}$ , 4 示  $N_0 = 4.0 \times 10^{24}$

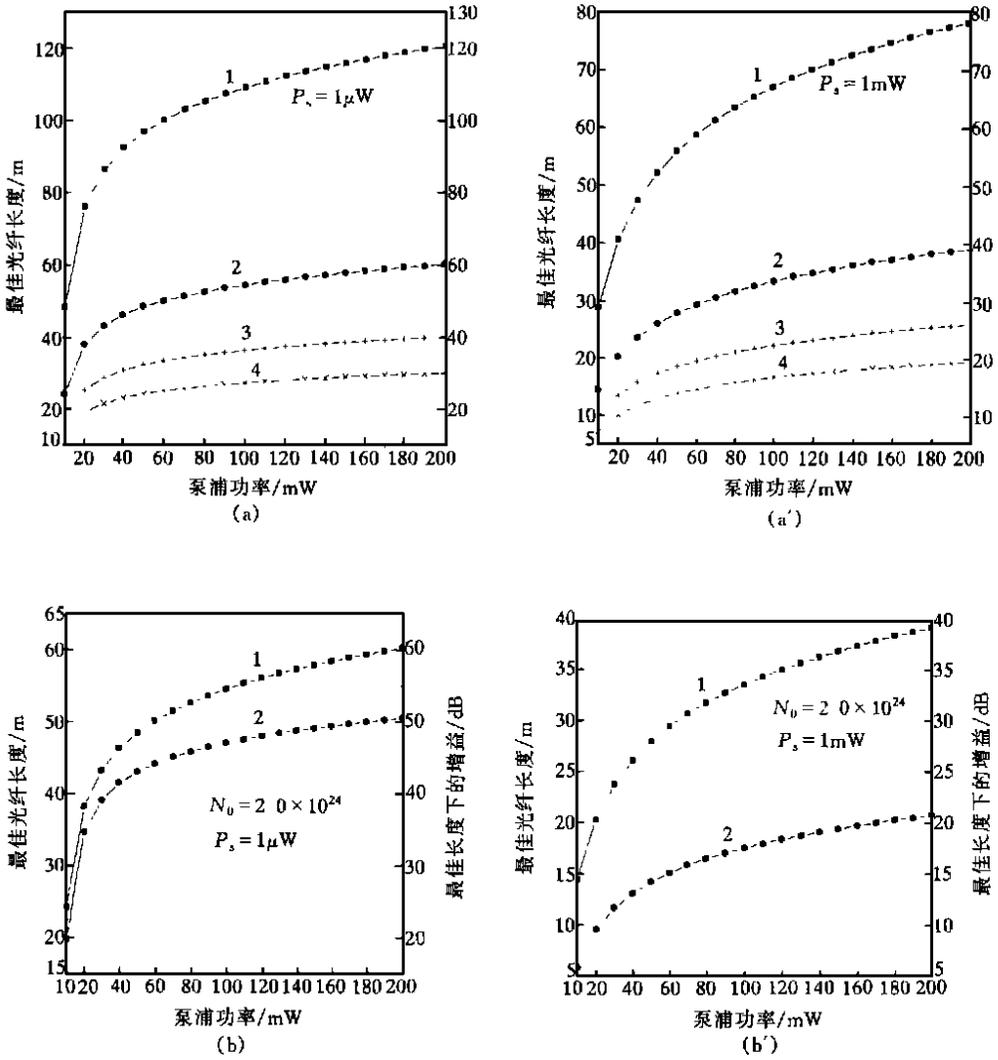


图 5 最佳光纤长度与泵浦功率、掺杂浓度以及最佳长度下增益随泵浦功率的关系

(a)小信号情况, (a')大信号情况, 1 示  $N_0 = 1.0 \times 10^{24}$ , 2 示  $N_0 = 2.0 \times 10^{24}$ , 3 示  $N_0 = 3.0 \times 10^{24}$ , 4 示  $N_0 = 4.0 \times 10^{24}$ ; (b)小信号情况, (b')大信号情况, 1 示长度, 2 示增益值

号时的最佳光纤长度要短, 而且相应的增益也小. 这与图 3 中得到的结论也相符.

### 3 结论

本文根据能级速率方程, 在忽略光纤损耗和不考虑放大自发辐射的情况下, 推导出了适合于 980nm 泵浦的、均匀加宽准二能级结构的掺铒光纤放大器的一组方程, 给出了放大器增益与最佳光纤长度的隐函数形式的解析解, 并利用数值法进行了模拟计算. 这些结果将对以后的实验起指导作用.

## 参 考 文 献

- 1 Desurvire E, Giles C, Simpson J. Gain saturation effects in high-speed, multichannel erbium-doped fiber amplifiers at  $\lambda = 1.53 \mu\text{m}$ . *J Lightwave Technol*, 1989, 7(12): 2 095~2 104
- 2 Morkel B, Laming R. Theoretical modeling of erbium-doped fiber amplifiers with excited-state absorption. *Opt Lett*, 1989, 14(19): 1 062~1 064
- 3 陈建国, 武 岚, 卢玉村. 掺铒光纤放大器的速率方程研究. *中国激光*, 1993, A20(4): 256~259
- 4 邱 昆, 汤启兵, 唐明光. 掺铒光纤放大器(EDFA)的简化模型. *中国激光*, 1995, A22(2): 108~112
- 5 周炳琨, 高以智, 陈家骅, 等编. *激光原理*. 北京: 国防工业出版社, 1987. 157~160
- 6 Peroni M, Tamburrini M. Gain in erbium-doped fiber amplifiers; a simple analytical solution for the rate equations. *Opt Lett*, 1990, 15(15): 842~844
- 7 Bo Pederson, Anders Bjarklev, Ole Lumholt, et al. Detailed design of erbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1991, 3(6): 548~550