

文章编号: 0253-2239(2008)06-1057-05

铒镱共掺特性对光放大器增益和噪声系数的影响

吴粤湘 马晓明 赵晓吉

(深圳职业技术学院, 广东 深圳 518055)

摘要 基于速率方程和光传输方程,对双包层铒镱共掺光纤放大器进行了研究,数值模拟分析了 Er^{3+} 浓度和 Yb^{3+} 浓度的变化对光纤放大器增益和噪声系数的影响。结果表明, Er^{3+} 浓度较低时,有较好的噪声特性;同时,较低的 Yb^{3+} 浓度有助于提高增益,并且存在一个增益最大的最佳 Er^{3+} 浓度值。

关键词 光纤通信; 光纤放大器; 速率方程和光传输方程; 双包层铒镱共掺光纤; 掺杂浓度

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Effects of Er^{3+} and Yb^{3+} Concentration on Gain and Noise Coefficient of Fiber Amplifier

Wu Yuexiang Ma Xiaoming Zhao Xiaoji

(Shenzhen Polytechnic College, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract The influence of concentration of rare-earth ions Er^{3+} and Yb^{3+} on gain and noise characteristics of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-clad fiber amplifier is analyzed based on rate equation and light propagation equation. The numerical simulation result shows that, the amplifier has better noise characteristic with lower Er^{3+} concentration and larger gain with lower Yb^{3+} concentration, and there is an optimal Er^{3+} concentration to get the largest gain.

Key words fiber communication; fiber amplifier; rate equation and light propagation equation; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double clad fiber; doping concentration

1 引 言

目前随着光纤通信技术的不断进步,特别是波分复用(WDM)技术在主干网和城域网中的应用,掺铒光纤放大器(EDFA)逐步成为了实现高速传输的核心部件。传统的掺铒光纤放大器存在着对抽运源的激光模式要求较高,抽运耦合效率低等问题。虽然可以通过增加掺杂铒离子浓度的方式增加功率输出,但随着铒离子浓度的提高,铒离子发生聚集,使铒离子对出现能量上转换现象,抑制了掺铒光纤放大器的抽运转换效率和增益的提高^[1]。近年来,为了提高输出功率和输出特性,提出了一种以双包层光纤为基础的包层抽运技术,克服了单包层结构的缺点,使光纤激光器和放大器的输出功率提高了3~4个数量级^[2]。双包层 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 共掺光纤放大器(EYDFA)比传统的掺铒光纤放大器有更优良的特

性。以双包层光纤为基础的包层抽运技术使能量转换效率提高到一个新的水平,抽运耦合效率大大提高,而且能够降低对抽运光模式的要求。另外, Yb^{3+} 的掺入不但抑制了 Er^{3+} 之间的能量上转换,而且使铒镱共掺光纤的吸收谱大大加宽(800~1100 nm)。因此近年来铒镱共掺光纤放大器和激光器成为了研究的热点^[3~5]。

双掺光纤中的 Yb^{3+} 主要是起到敏化作用,当 Yb^{3+} 掺入光纤之后,与 Er^{3+} 形成 $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$ 离子对,当抽运光入射时,基态的 Yb^{3+} 吸收大部分的抽运光后激发到上能级。被激发的 Yb^{3+} 把吸收到的能量转移给基态的 Er^{3+} ,得到能量后的 Er^{3+} 跃迁到高能级。由于 Yb^{3+} 作为敏化剂吸收截面大,因此 Yb^{3+} 有比较强的吸收特性,吸收的光谱较宽。有效地将 Er^{3+} 均匀分开,减弱了 Er^{3+} 团簇的形成并降低

收稿日期: 2007-11-26; 收到修改稿日期: 2008-01-17

基金项目: 深圳市科技计划(06KJP023)资助课题。

作者简介: 吴粤湘(1978-),男,讲师,主要从事光纤通信系统和器件等方面的研究。E-mail: yx.wu@163.com

了能量上转换等效应的影 响,改善了增益特性。但是 Yb^{3+} 掺杂浓度高到一定程度就会引起较大的损耗。因此,为了获得最好的放大性能,必须研究掺杂特性对于光放大器性能的影响。目前对于该方面的研究虽已有报道^[6,7],但深入的计算分析还很少。

2 理论模型

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤中原子的能级及能量传递如图 1 所示^[3]。从图中可以看出 Yb^{3+} 吸收抽运光从 $^2F_{7/2}$ 跃迁到 $^2F_{5/2}$; 然后通过 Yb^{3+} 的敏化作用, $^2F_{5/2}$ 将能量传递给 Er^{3+} 的 $^4I_{11/2}$, 然后重新回到 $^2F_{7/2}$, 可以表示为 $^2F_{5/2} + ^4I_{15/2} \rightarrow ^2F_{7/2} + ^4I_{11/2}$; Er^{3+} 在 $^4I_{11/2}$ 处于不稳定的状态,通过无辐射衰减跃迁到

$^4I_{13/2}$, 当积累到一定程度时,在能级 $^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{15/2}$ 之间形成粒子数反转。在此过程中还需要考虑下面的几个过程: Yb^{3+} 的 $^2F_{5/2}$ 能级的受激发射和自发辐射衰减; Er^{3+} 的 $^4I_{15/2}$ 能级的受激吸收; Er^{3+} 的 $^4I_{13/2}$ 能级的自发辐射衰减。

对方程进行简化、合并之后得到粒子速率方程组^[8,9]:

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - N_2/\tau_{21} + W_{13}N_1 + C_{cr}N_1N_6 - C_{up}N_2^2, \quad (1)$$

$$\frac{dN_6}{dt} = W_{56}N_5 - W_{65}N_6 - N_6/\tau_{65} - C_{cr}N_1N_6, \quad (2)$$

$$N_1 + N_2 = N_{Er}, \quad (3)$$

$$N_5 + N_6 = N_{Yb}, \quad (4)$$

上面方程组中,参量 N_1, N_2 分别表示 Er^{3+} 在 $^4I_{15/2}$ 和 $^4I_{13/2}$ 能级上的粒子数密度; 参量 N_5, N_6 分别为 Yb^{3+} 在 $^2F_{7/2}$ 和 $^2F_{5/2}$ 能级的粒子数密度; τ_{21} 和 τ_{65} 表示 $^4I_{13/2}$ 和 $^2F_{5/2}$ 能级上粒子自发辐射的寿命。 C_{up} 是 Er^{3+} 从亚稳态 $^4I_{13/2}$ 到受激态 $^4I_{9/2}$ 的能量上转化系数,当小信号输入时,可以不考虑能量上转化过程,但当大功率的信号光输入时,就不能忽略这个过程; C_{cr} 表示从 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 的能量传递过程的交叉弛豫系数。

而上式中的跃迁系数则由下面的公式确定:

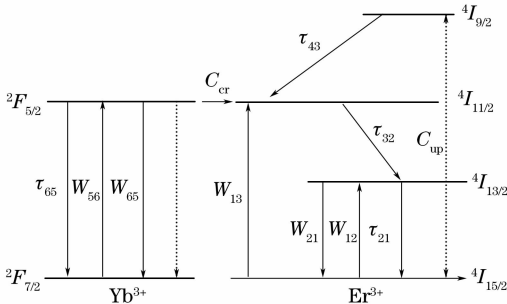


图 1 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺系统能级结构

Fig. 1 Energy level for $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped systems

$$W_{12}(z, t) = \frac{\Gamma_s \sigma_{12}}{h\nu_s A_{\text{core}}} P_s(z) + \frac{\Gamma_s}{hc A_{\text{core}}} \int_0^\infty \sigma_{12} [P_{\text{ASE}}^+(z, \lambda) + P_{\text{ASE}}^-(z, \lambda)] \lambda d\lambda,$$

$$W_{21}(z, t) = \frac{\Gamma_s \sigma_{21}}{h\nu_s A_{\text{core}}} P_s(z) + \frac{\Gamma_s}{hc A_{\text{core}}} \int_0^\infty \sigma_{21} [P_{\text{ASE}}^+(z, \lambda) + P_{\text{ASE}}^-(z, \lambda)] \lambda d\lambda, \quad (5)$$

$$W_{56}(z, t) = \frac{\Gamma_p \sigma_{56}}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z), \quad W_{65}(z, t) = \frac{\Gamma_p \sigma_{65}}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z),$$

式中 $\sigma_{12}, \sigma_{21}, \sigma_{56}$ 和 σ_{65} 分别是与频率有关的 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 的吸收和发射截面面积。 ν_s 和 ν_p 分别为信号光和抽运光的频率, A_{core} 是纤芯面积, Γ_s 和 Γ_p 分别是和频率相关的重叠因子, h 是普朗克常量。

在稳态情况下,抽运光、信号光、自发辐射噪声的传输方程分别为^[3,9]

$$\frac{dP_p}{dt} = -\Gamma_p [\sigma_{56}(\lambda_p) N_5 + \sigma_{13}(\lambda_p) N_1 - \sigma_{65}(\lambda_p) N_6] P_p - \alpha_p P_p, \quad (6)$$

$$\frac{dP_s}{dt} = \Gamma_s [\sigma_{21}(\lambda_s) N_2 - \sigma_{12}(\lambda_p) N_1] P_s - \alpha_s P_s, \quad (7)$$

$$\frac{dP_{\text{ASE}}^\pm}{dt} = \pm mh\nu \Delta\nu \Gamma_s \sigma_{21}(\lambda) N_2 \pm \{ \Gamma_s [\sigma_{21}(\lambda) N_2 - \sigma_{12}(\lambda) N_1] - \alpha_s \} P_{\text{ASE}}^\pm. \quad (8)$$

由于单模 LP_{01} 光纤支持 2 个偏振模式,所以取 $m=2$ 。

在计算过程中,由于(1)式~(4)式和(5)式组成的方程组没有解析解,因此需要通过迭代计算出粒子浓度,然后代入传输方程计算出相应的光功率分布。

3 数值模拟与结果讨论

数值模拟所取的参量为：光纤纤芯直径为 $6.6 \mu\text{m}$ ，纤芯数值孔径为 0.18。 Er^{3+} 对波长为 1550 nm 信号光的吸收截面和发射截面分别为 $1.92 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ， $2.62 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ， Er^{3+} 、 Yb^{3+} 的上能级寿命分别是 11 ms 和 0.35 ms ，激活光纤对抽

运光重叠因子为 0.01，交叉弛豫系数 $C_{\text{cr}} = 0.4 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ ，上转系数 $C_{\text{up}} = 8 \times 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$ 。抽运光波长是 980 nm ，抽运光功率是 5 W ，信号光功率是 $10 \mu\text{W}$ ，激活光纤长度是 4 m 。

3.1 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 掺杂浓度对噪声系数的影响

图2~图4是在不同的抽运方式和不同掺杂浓

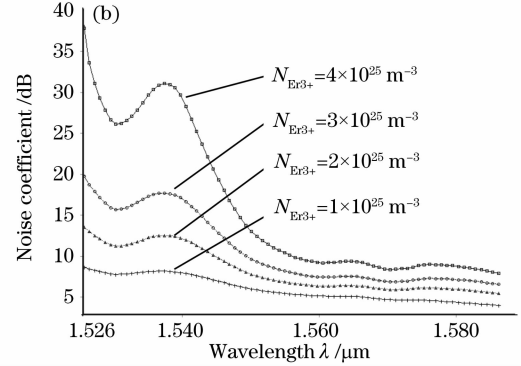
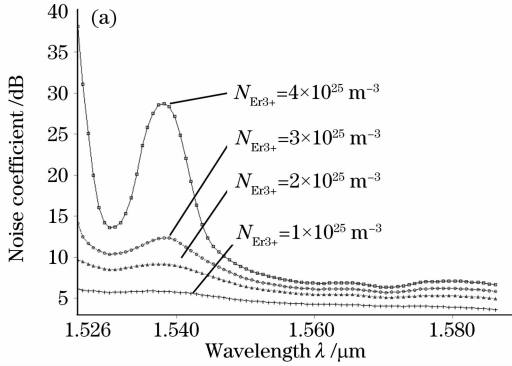


图2 Er^{3+} 浓度 $N_{\text{Er}^{3+}}$ 变化对噪声系数的影响 (Yb^{3+} 浓度不变 $8 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$)。(a) 前向抽运，(b) 后向抽运
Fig. 2 Noise coefficient versus wavelength with different Er^{3+} concentrations (Yb^{3+} concentration is $8 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$).

(a) Forward pumped, (b) backward pumped

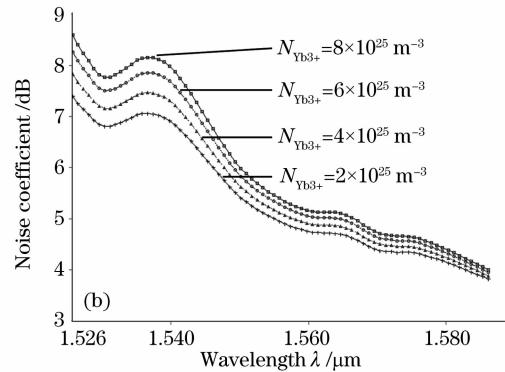
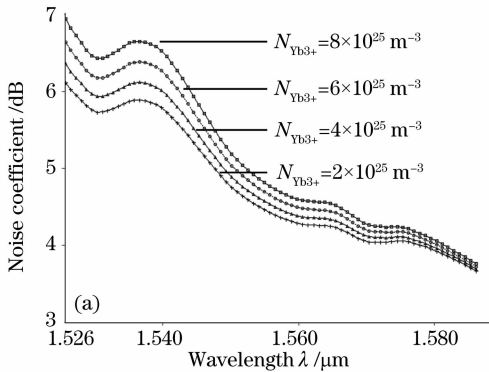


图3 Yb^{3+} 浓度 $N_{\text{Yb}^{3+}}$ 变化对噪声系数的影响 (Er^{3+} 浓度不变 $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$)。(a) 前向抽运，(b) 后向抽运
Fig. 3 Noise coefficient versus wavelength with different Yb^{3+} concentrations (Er^{3+} concentration is $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$).

(a) Forward pumped, (b) backward pumped

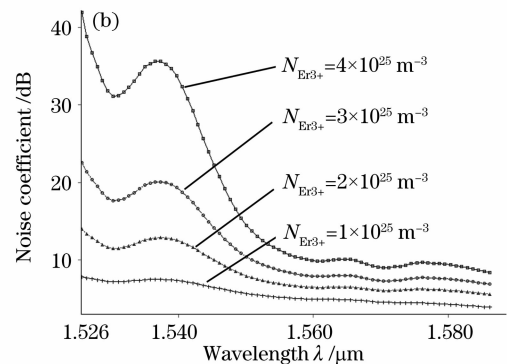
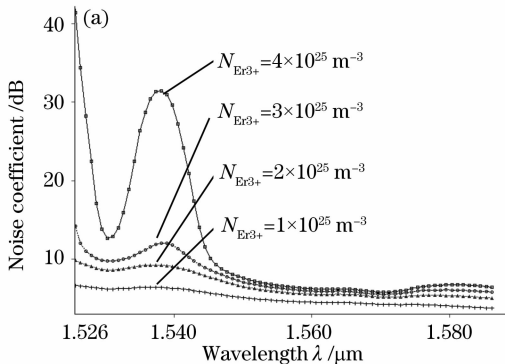


图4 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 浓度按比例变化对噪声系数的影响 (保持 $N_{\text{Yb}^{3+}}/N_{\text{Er}^{3+}} = 4$)。(a) 前向抽运，(b) 后向抽运
Fig. 4 Noise coefficient versus wavelength with different Er^{3+} concentrations ($N_{\text{Yb}^{3+}}/N_{\text{Er}^{3+}} = 4$).

(a) Forward pumped, (b) backward pumped

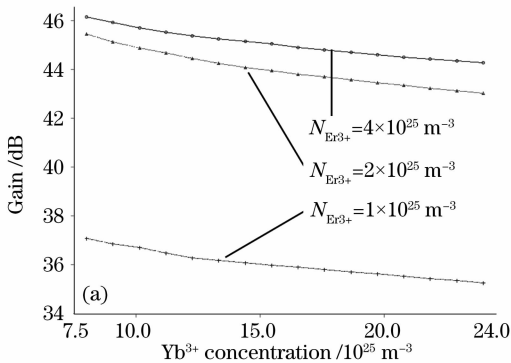
度下所得到的光纤放大器的噪声系数输出曲线。

从图 2~图 4 中可以看出,在计算所取的窗口内,长波长范围噪声系数要明显优于短波长范围的噪声系数,在长波长段粒子浓度变化对于噪声系数的影响比较小,波动范围在 3~6 dB 左右。

还可以看到,采用前向抽运方式的噪声系数优于后向抽运噪声系数。这是由于光放大器的噪声系数等于粒子反转因子 n_{sp} 的两倍,粒子数反转由下式决定^[10]:

$$n_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1), \quad (9)$$

前向抽运在掺杂光纤前端抽运光较强,粒子数反转强,粒子数反转因子较小,因此噪声系数较小,同时



由于放大系统的噪声系数主要取决于前端放大器的噪声性能,因此会有这个结果。

同时从图 2 到图 4 可以看出 Er^{3+} 浓度和 Yb^{3+} 浓度相比较, Er^{3+} 浓度对于噪声系数的影响较大。随着 Er^{3+} 浓度的增大,噪声系数也增大。这是由于光放大器的噪声系数是粒子反转因子 n_{sp} 的两倍,随着 Er^{3+} 浓度的增大其粒子反转因子应该是增大的,所以噪声系数会呈增大的趋势。

3.2 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 掺杂浓度对增益的影响

图 5~图 7 是在不同的抽运方式和不同掺杂浓度下情况下所得到的光纤放大器的增益输出曲线,采用的信号光波长是 1550 nm。

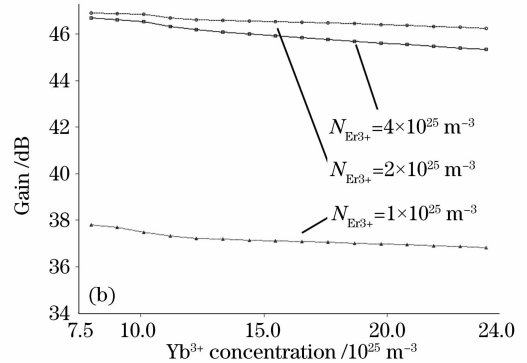


图 5 Yb^{3+} 浓度变对增益的影响。(a) 前向抽运, (b) 后向抽运

Fig. 5 Gain versus Yb^{3+} concentration with different Er^{3+} concentrations. (a) Forward pumped, (b) backward pumped

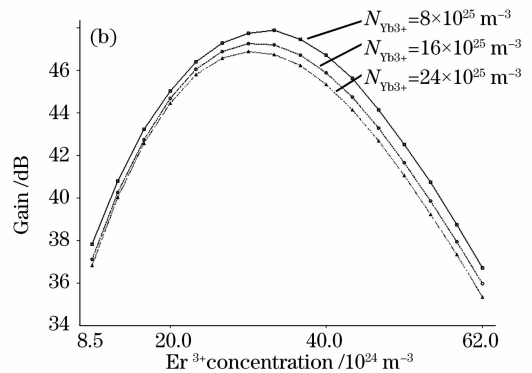
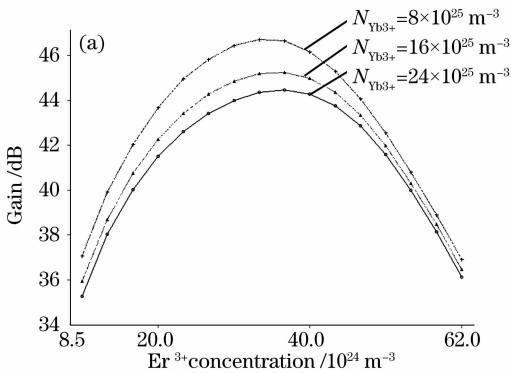


图 6 Er^{3+} 浓度变化对于增益的影响。(a) 前向抽运, (b) 后向抽运

Fig. 6 Gain versus Er^{3+} concentration with different Yb^{3+} concentration. (a) Forward pumped, (b) backward pumped

从图 5 到图 7 可以看到,后向抽运的增益要大于前向抽运的增益。这点和传统的掺铒光纤放大器相同。

图 5 中,随着 Yb^{3+} 掺杂浓度的减小,增益增大。但是也必须考虑到,随着 Yb^{3+} 掺杂浓度的减小,会导致 Er^{3+} 周围的 Yb^{3+} 数目的减小,可能会出现浓度猝灭。因此为了获得大的增益,应该在保证不出现浓度猝灭问题的情况下,尽可能地保持较小的 Yb^{3+} - Er^{3+} 掺杂浓度比。

在图 6 和图 7 中, Yb^{3+} 的浓度不变或者 Yb^{3+} - Er^{3+} 掺杂浓度比固定,而改变 Er^{3+} 的浓度。随着 Er^{3+} 浓度增大时,光纤放大器件的增益都是先增大后减小,并且存在一个最佳的 Er^{3+} 浓度值,因此可以得出结论,对于一个其他设计参量固定的光纤放大器,总能找到相对应的最佳 Er^{3+} 浓度。同时,从计算结果还可以发现,这个最佳的 Er^{3+} 浓度值与 Yb^{3+} 的浓度或者 Yb^{3+} - Er^{3+} 掺杂浓度相关,而且还和抽运的方式相关。

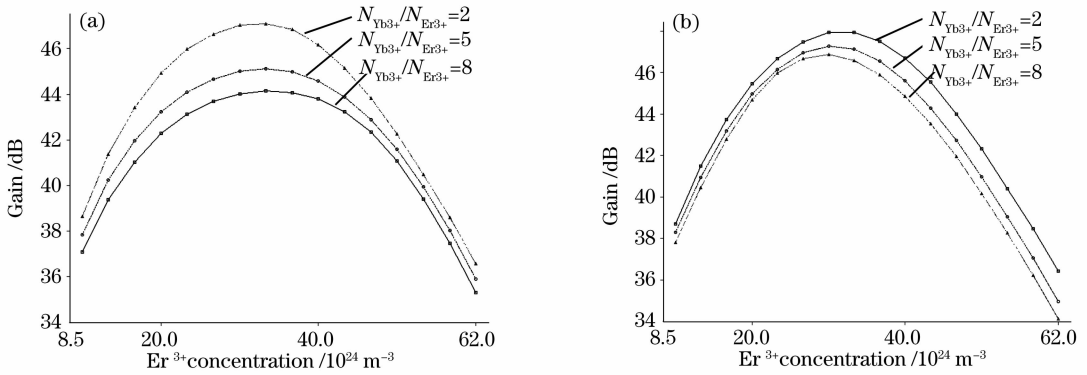


图 7 不同 Yb^{3+} - Er^{3+} 掺杂浓度比时增益随 Er^{3+} 浓度变化曲线。(a) 前向抽运, (b) 后向抽运

Fig. 7 Gain versus Er^{3+} concentration with different Yb^{3+} - Er^{3+} ratios. (a) Forward pumped, (b) backward pumped

4 实验验证

目前关于钇镱共掺光纤放大器, 国外和国内已有不少的相关实验。而对于噪声系数的测试, P. Weßels和 C. Fallnich 给出了光学和电子两种测试方法, 并得到了两种光纤放大器的噪声系数测试结果^[11], 该方法同样也适合于本文中的放大器。在 L. Goldberg 和 J. Koplow 的实验中, 测量了所制作的钇镱共掺光纤放大器的噪声系数以及增益大小, 所得的结果和本文数值模拟的结果类似^[12]。上述文献中的实验结果, 在一定程度上验证了本文中所得到的计算结果的正确性。

5 结 论

从以上的数值模拟的结果可以看出: 1) 在长波段的噪声系数优于短波段的噪声系数, 而且前向抽运优于后向抽运的噪声系数; 2) 随着 Er^{3+} 浓度的增加, 放大器的噪声系数增加; 3) Er^{3+} 和 Yb^{3+} 掺杂浓度对于噪声系数的影响较小, 在 1550 nm 波段大概的波动范围在 3~6 dB 左右; 4) 保持 Er^{3+} 掺杂浓度不变, 适当减小 Yb^{3+} 掺杂浓度, 增益增大; 5) 如果保持 Yb^{3+} 掺杂浓度或者 Yb^{3+} - Er^{3+} 掺杂浓度之比不变, 发现可以找到一个最佳的 Er^{3+} 掺杂浓度, 使得输出光的增益达到最大。

参 考 文 献

1 P. Blixt, J. Nilsson, T. Carnas *et al.*. Concentration-dependent upconversion in Er-doped fiber amplifiers experiments and modeling[J]. *IEEE Trans. Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(11): 996~998

2 V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fiber laser[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14): 1158~1160

3 Q. Wang, N. K. Dutta. Er-Yb doped double clad fiber amplifier [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5246**: 208~215

4 Zhang Shumin, Dong Fajie, Lü Fuyun *et al.*. Wavelength tunable ring $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber laser operating in L-band [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(4): 449~452

张书敏, 董法杰, 吕福云等. L波段可调谐 Er/Yb 共掺环形腔光纤激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 449~452

5 Zhong Lanxiang, Li Jianlang. Simple realization of switchable two-wavelength Yb-fiber and Er/Yb-fiber hybrid laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 345~349

种兰祥, 李建郎. 切换式双波长激发在掺镱和钇镱共掺复合式光纤激光器中的实现[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 345~349

6 Ke Xiangping. Study of the properties of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber amplifier [J]. *J. WUT (Information & Management Engineering)*, 2006, **28**(7): 109~116

柯湘萍. 钇镱共掺光纤放大器的共掺杂特性研究[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2006, **28**(7): 109~116

7 A. Martin, J. Robert, Feng Pan *et al.*. Gain and noise in ytterbium-sensitized erbium-doped fiber amplifiers: measurements and simulations [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(10): 1521~1526

8 C. Barnard, P. Myslinski, J. Chrostowski *et al.*. Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(8): 1817~1830

9 Zhuang Maolu, Zhao Shanghong, Dong Shufu *et al.*. Numerical analysis of the population distribution characteristics in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-clad fiber amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(4): 379~382

庄茂录, 赵尚弘, 董淑福等. 双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤放大器粒子数特性分析[J]. *激光技术*, 2004, **28**(4): 379~382

10 Yang Yingjie. *Fiber Communication Technic* [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2004. 212~214

杨英杰. *光纤通信技术* [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2004. 212~214

11 P. Weßels, C. Fallnich. Noise figure measurements on Nd and Yb doped double-clad fiber amplifiers[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(13): 1531~1536

12 L. Goldberg, J. Koplow. Compact, side-pumped 25 dBm Er/Yb co-doped double cladding fiber amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(21): 2027~2028