Er^{3+}/Yb^{3+}共掺双包层光纤放大器的增益特性

胡贵军,李晓光,张 鹏

(吉林大学 通信工程学院,长春 130012)

摘 要:基于速率方程和功率传输方程,分析了Er^{3+}/Yb^{3+}共掺双包层光纤放大器增益特性随光纤长度的变化及信号光、抽运光功率对放大器增益的影响,并进行了实验验证。结果表明:有源光纤长度对放大器增益有影响,大信号输入时放大器达到增益饱和对应的光纤长度更短;放大器增益随着信号光和抽运光功率不同而变化,要适当调整其大小以获得较高的放大增益。

关键词:光电子学与激光技术;光纤放大器;放大器增益;光纤长度

中图分类号:TN248 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2012)01-0240-05

Gain performance of Er^{3+}/Yb^{3+} codoped double-clad fiber amplifier

HU Gui-jun, LI Xiao-guang, ZHANG Peng

(*College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun* 130012, *China*)

Abstract: Based on the rate equation and power propagation equation, change of the gain characteristics of Er^{3+}/Yb^{3+} codoped double-clad fiber amplifier with the fiber length was analyzed. The influence of signal power and pump power on amplifier gain was also studied. Experiments were conducted to validate the analysis. The results indicate that the fiber length influences the gain of the amplifier. The fiber length corresponding to gain saturation is shorter when the input signal is large. Amplifier gain changes with the difference of the signal and pump power, higher gain can obtained by adjusting the signal power or pump power.

Key words: optoelectronics and laser; fiber amplifier; amplifier gain; fiber length

随着密集波分复用(DWDM)[1]、光纤到户(FTTH)和光纤有线电视(CATV)[2]等技术的发展,Er^{3+}/Yb^{3+}共掺高功率双包层光纤放大器有着越来越广泛的应用前景。在掺铒光纤中加入Yb^{3+},解决了Er^{3+}掺杂浓度过高时的浓度淬灭问题[3],且加宽了吸收谱[4-5];此外,基于双包层结构光纤的包层抽运技术,提高了泵浦光的吸收效率[6],降低了对抽运光的单模要求[4]。近年来Er^{3+}/Yb^{3+}共掺高功率双包层光纤放大器成为了研究的热点之一[6-8]。

增益是光纤放大器主要特性指标之一,研究光纤长度对放大系统增益特性的影响,选择合适的有源光纤长度,对于提高放大器性能具有重要意义。本文基于Er^{3+}/Yb^{3+}共掺双包层光纤放大器(EYDFA)的速率方程和功率传输方程,数值模拟了稳态情况下放大器的增益特性,分析了有源光纤长度对放大器增益特性的影响,研究了放大器增益与信号光和抽运光功率的关系并进行了实验验证。

1 理论模型

图1为Er^{3+}/Yb^{3+}共掺系统的能级和能量传

收稿日期:2010-08-23.

基金项目:吉林省科技发展计划重点项目(20090352);吉林省科技发展计划项目(20070522).

作者简介:胡贵军(1970-),男,教授.研究方向:光纤通信,光电子学. E-mail:hugj@jlu.edu.cn

递关系图[6]。其中 N_1、N_2、N_3、N_4 分别表示 Er^{3+} 的 $^4I_{15/2}$、$^4I_{13/2}$、$^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{9/2}$ 能级粒子数密度，N_5 和 N_6 表示 Yb^{3+} 的 $^2F_{7/2}$ 和 $^2F_{5/2}$ 能级粒子数密度。

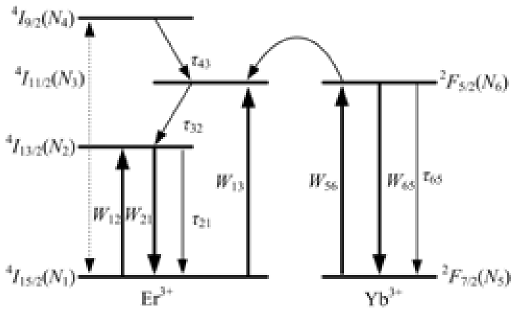


图 1　Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺系统能级图

Fig. 1　Sketch map of energy level of Er^{3+}/Yb^{3+} co-doped system

在抽运光的作用下，Yb^{3+} 由 $^2F_{7/2}$ 能级跃迁到 $^2F_{5/2}$ 能级，然后通过敏化作用将能量传递给 Er^{3+}，Er^{3+} 由 $^4I_{15/2}$ 能级跃迁到 $^4I_{11/2}$，同时 Yb^{3+} 返回到 $^2F_{7/2}$ 能级；并且部分 Er^{3+} 直接吸收抽运光由 $^4I_{15/2}$ 能级跃迁到 $^4I_{11/2}$ 能级；处于 $^4I_{11/2}$ 能级的 Er^{3+} 极不稳定，无辐射跃迁到 $^4I_{13/2}$ 能级，在 $^4I_{13/2}$ 和 $^4I_{15/2}$ 能级间形成了粒子数反转。根据各能级的能量传递关系，得出 Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺系统的稳态速率方程[9-10]为

$$-W_{12}N_1 - W_{13}N_1 + N_2/\tau_{21} + W_{21}N_2 + C_{up}N_2^2 - C_{cr}N_1N_6 = 0 \tag{1}$$

$$W_{56}N_5 - N_6/\tau_{65} - W_{65}N_6 - C_{cr}N_1N_6 = 0 \tag{2}$$

$$N_1 + N_2 = N_{Er} \tag{3}$$

$$N_5 + N_6 = N_{Yb} \tag{4}$$

式中：W_{ij} 代表能级 i、j 之间受激吸收和受激发射的跃迁几率；τ_{21}、τ_{65} 分别为 Er^{3+} 能级 $^4I_{13/2}$ 和 Yb^{3+} 能级 $^2F_{5/2}$ 的自发辐射寿命；N_{Er}、N_{Yb} 分别为 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 的掺杂浓度；C_{up} 为从 $^4I_{13/2}$ 能级到 $^4I_{15/2}$ 和 $^4I_{9/2}$ 能级的上转换系数；C_{cr} 为 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 的交叉弛豫系数。

抽运光、信号光和 ASE 光沿有源光纤传输的功率传输方程为[11]

$$\frac{dP_p(z,\lambda_p)}{dz} = -\Gamma_p(\lambda_p)[\sigma_{56}(\lambda_p)N_5(z) - \sigma_{65}(\lambda_p)N_6(z)]P_p(z,\lambda_p) - \alpha_p P_p(z,\lambda_p) \tag{5}$$

$$\frac{dP_s(z,\lambda_s)}{dz} = -\Gamma_s(\lambda_s)[\sigma_{21}(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_{12}(\lambda_s)N_1(z)]P_s(z,\lambda_s) - \alpha_s P_s(z,\lambda_s) \tag{6}$$

$$\frac{dP_{ASE}^{\pm}(z,\lambda_k)}{dz} = \pm 2h\frac{c^2}{\lambda_k^3}\Delta\lambda\Gamma_s(\lambda_k)\sigma_{21}(\lambda_k)N_2(z) \pm \{\Gamma_s(\lambda_k)[\sigma_{21}(\lambda_k)N_2(z) - \sigma_{12}(\lambda_k)N_1(z)] - \alpha_s\}P_{ASE}^{\pm}(z,\lambda_k) \tag{7}$$

式中：$\sigma_{21}(\lambda)$、$\sigma_{12}(\lambda)$ 和 $\sigma_{65}(\lambda)$、$\sigma_{56}(\lambda)$ 分别为在不同波长处 Er^{3+}、Yb^{3+} 的发射和吸收截面；h 为普朗克常数；λ_s、λ_p 分别为信号光、抽运光波长；$P_s(z,\lambda_s)$、$P_p(z,\lambda_p)$ 分别为信号光功率和抽运功率；$P_{ASE}^{+}(z,\lambda)$ 和 $P_{ASE}^{-}(z,\lambda)$ 分别为前、后向放大的自发辐射功率；Γ_p 和 Γ_s 分别为抽运光和信号光的重叠因子。

2　数值模拟

结合前向抽运方式的边界条件，选取抽运光波长为 975 nm，对 Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺系统速率方程和功率传输方程进行了数值求解。仿真中所用到的有源光纤的主要参数如表 1 所示。

表 1　模拟用主要参数

Table 1　Parameters used in simulation

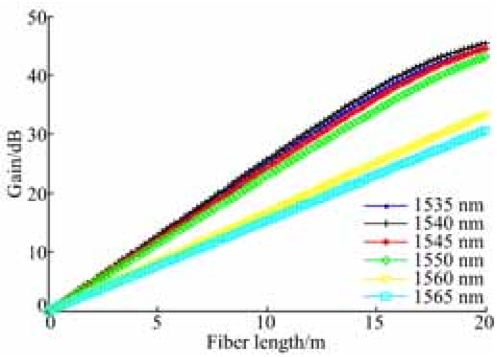
Er^{3+}	1.35×10^{25} ions/m^3	$\sigma_{56}(\lambda_p)$	0.8×10^{-25} m^2
Yb^{3+}	8.5×10^{25} ions/m^3	$\sigma_{65}(\lambda_p)$	0.85×10^{-25} m^2
τ_{21}	11.0 ms	Γ_s	0.8254
τ_{65}	1.5 ms	Γ_p	0.0085
$\sigma_{12}(\lambda_s)$	$0.08-0.35\times10^{-25}$ m^2	α_s	4 dB/m
$\sigma_{21}(\lambda_s)$	$0.33-0.55\times10^{-25}$ m^2	α_p	12 dB/m
$\sigma_{13}(\lambda_p)$	0.14×10^{-25} m^2		

2.1　增益特性与有源光纤长度的关系

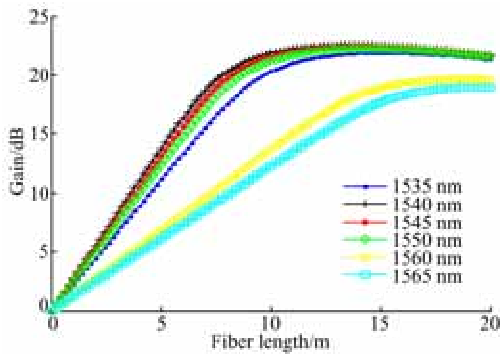
在抽运光功率为 2 W，输入信号光波长分别为 1535、1540、1545、1550、1560 和 1565 nm 时，仿真了放大器增益随光纤长度的变化情况，结果如图 2 所示。

图 2(a)为 1 μW(小信号)输入时放大器增益随光纤长度的变化情况。处于 1535～1550 nm 的 Er^{3+} 高增益波长范围内的 4 条增益曲线斜率达到了 2.2 dB/m，直到光纤长度 20 m 时，出现了曲线斜率下降的趋势，增益增长速度有所下降，此时 1550 nm 信号的增益约为 43 dB，而 1540 nm 信号的增益最大，约为 45 dB。对于 1560 nm 和 1565 nm 的信号输入，Er^{3+} 在这两个波长处的吸收和发射截面造成了放大器在这两个波长处的放大能力较弱，对抽运光的消耗较慢。其增益曲线始终以约 1.5 dB/m 的速率线性增加，直到光纤 20 m 处，仍未出现增益增长速度下降的趋势。图 2(b)为 1 mW(大信号)输入时放大器增益随光纤长度的变化情况，可见，大信号在 1535～1550 nm

的4条增益曲线在光纤长度为8 m时,曲线斜率开始减小,增益的增加速率减慢,直到光纤长度达到12 m左右时,放大器进入了增益饱和的状态,增益不再随着光纤长度的增加而增加,反而有下降趋势。对于1560 nm和1565 nm的信号输入,在光纤长度为18 m左右时才出现了增益饱和的现象。



(a) 1 μW 输入时



(b) 1 mW 输入时

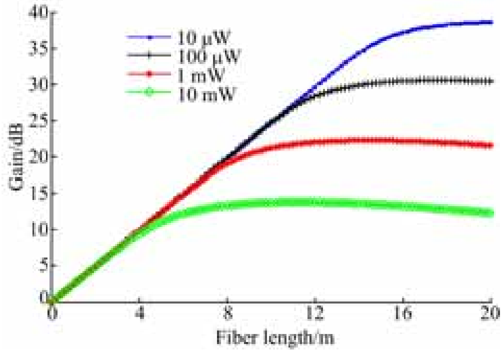
图2　不同信号功率时增益与有源光纤长度的关系

Fig. 2　Gain vs fiber length under different signal power

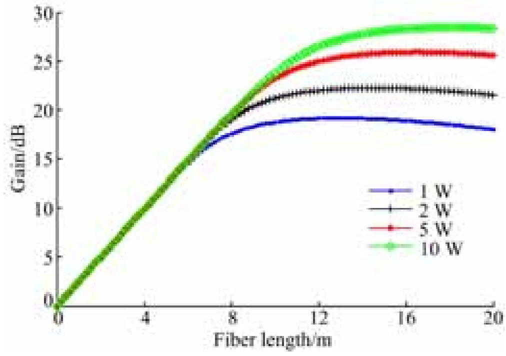
对比图2(a)(b)可知,有源光纤的长度对放大器的增益有重要影响。小的信号光输入消耗较少的抽运光,抽运光相对充足,可以在较长的光纤长度范围内保证抽运光功率的供给,在较长的光纤长度处才能达到增益饱和;而大信号光输入对抽运光的消耗增加,有源光纤在一个较短长度时,抽运光功率下降到阈值功率以下,有源光纤将对信号光产生吸收损耗,出现了增益饱和甚至是增益下降的结果。可见,放大器增益是随有源光纤长度的不同而变化的。对于大信号、高功率光纤放大器,其达到增益饱和所对应的光纤长度明显短于小功率光纤放大器的长度值。

2.2　信号光和抽运光功率对放大器增益的影响

选定1550 nm波长的输入信号光,对放大器增益特性在不同的信号光和抽运光功率下随光纤长度的变化进行分析。图3为不同的信号光和抽运光条件下放大器增益随光纤长度变化的曲线。



(a) 信号光



(b) 抽运光

图3　不同信号光、抽运光功率时信号增益与有源光纤长度的关系

Fig. 3　Gain vs fiber length under different signal or pump power

图3(a)是在2 W的抽运条件下,信号光功率不同时放大器的增益随着光纤长度变化的情况。在光纤长度较短的时候(<4 m),抽运光充足,增益光纤都可以提供足够的上能级粒子数,对于不同功率输入的信号光,放大器增益随着光纤长度几乎线性增加,约为2.5 dB/m。而随着光纤长度的继续增加,增益曲线的增长速率变缓,放大器出现了增益饱和甚至增益下降的现象。而由于大的输入信号光消耗更多的抽运光功率,较大的信号光达到增益饱和的长度更短(10 mW信号光出现增益饱和时的光纤长度约为11 m,10 μW在光纤长度为20 m处仍未出现明显的增益饱和现象),而在相同的光纤长度处,较小的信号光输入可以获得较大的增益。

图3(b)是输入信号光为1 mW时,抽运光功率不同时放大器的增益随着光纤长度变化的情况。同样,由于抽运光功率充足,对于不同功率的抽运光,在光纤长度不超过6 m的时候,放大器增益以2.5 dB/m的速率线性增加。光纤长度继

续增加,抽运光功率逐渐减小且存在有源光纤对信号光的吸收损耗,在光纤长度为 12 m 处,抽运光功率较小的(1 W)的增益曲线首先出现了增益饱和的现象,最大增益约为 19 dB;而对于较大的抽运功率(10 W),增益饱和出现在光纤长度约为 19 m 处,且最大增益达到了 29 dB。这是由于较大的抽运功率可以在更长的有源光纤长度内提供充足的上能级粒子数,支持更长的有源光纤,获得较大的增益,也就是说在相同的光纤长度处,较大的抽运光可以获得较大的增益。如图 3 所示,在光纤长度约为 12 m 处,10 W 抽运功率的增益为 27 dB,而 1 W 的增益为 19 dB。

由图 3 可知,放大器的增益饱和特性与信号光功率和抽运光功率直接相关。在相同的抽运功率下,信号光越强,增益饱和对应的光纤长度越短;在相同的信号光功率下,抽运光越强,放大器达到增益饱和所需的光纤长度越长。因此,为了实现放大器较好的增益特性,要根据信号光、抽运光功率的不同,合理调整有源光纤的长度。为了更直观展示放大器增益与信号光和抽运光的关系,图 4 给出了增益随信号光和抽运光变化的二维图形。其中信号光功率为 1 μW～10 mW,抽运光功率为 0.5～10 W。

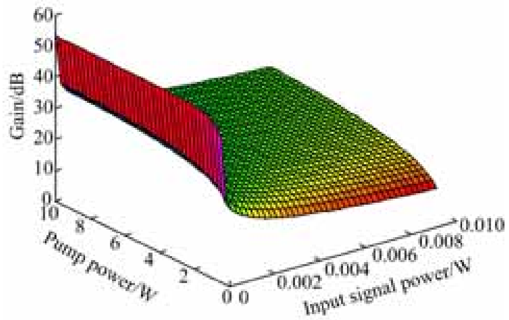


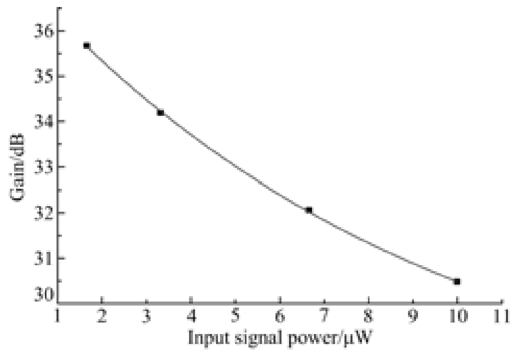
图 4　放大器增益与信号光、抽运光功率关系的二维曲线

Fig. 4　2D curve of gain of amplifier vs signal and pump power

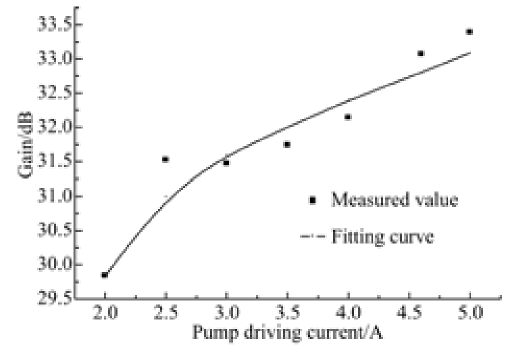
如图 4 所示,对于给定的信号光和抽运光,放大器增益是一个确定的值;而随着信号光和抽运光功率的变化,放大器增益也随之变化。输入信号光增大,对抽运光的消耗也随之增加,分配到单位功率信号光的上能级反转粒子数减小,放大器增益减小。从图 4 曲线可以看出,在输入抽运光功率一定的情况下,随着信号光功率的增加,放大器增益逐渐减小。在信号光较小的时候(小于 2 mW),随着信号光功率的增加,放大器增益迅速减小;当信号光功率超过 2 mW 的时候,放大器增益减小的速率逐渐减慢。而抽运光功率的提高,增加了上能级的反转粒子数,放大器增益随之增加,从图 4 可以看出,在输入信号光功率不变的情况下,放大器增益随着抽运光功率的增加而增加。在抽运功率较小的时候,增加较快;在抽运功率大于 2 W 的时候,基本呈缓慢的线性增长趋势。因此,要根据输入信号光的大小适当调整抽运光功率,以获得较高的放大器增益。

3　实验结果

根据数值模拟结果,基于自行设计并搭建的 Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺双包层光纤放大器,实验测量了放大器增益随着信号光和抽运光变化的情况,如图 5 所示。



(a) 抽运光驱动电流为 3 A 时



(b) 信号光功率为 10 μW 时

图 5　放大器增益与信号光、抽运光功率的关系

Fig. 5　Gain vs signal and pump power

图 5(a)为放大器增益随着信号光的变化情况。随着输入信号光由 1 μW 增加到 10 μW,放大器的增益由 35.7 dB 减小到了 30.5 dB;图 5(b)为放大器增益随着抽运光驱动电流的变化曲线,抽运光驱动电流由 2 A(1.5 W)增加到 5 A(3.8 W)的过程中,放大器的增益由 29.8 dB 增加到了 33.4 dB。为了更好地与理论结果相比较,图 6 给出了放大器增益随信号光和抽运光变化的一维仿真曲线。对比图 5 和图 6,可见实验

与数值模拟结果的变化趋势是一致的，但由于受到双包层光纤接续等工艺条件的制约，放大器产生的自激振荡及熔接点处的损耗，导致实际的增益测量值与理论模拟结果存在一定的差距[12]。

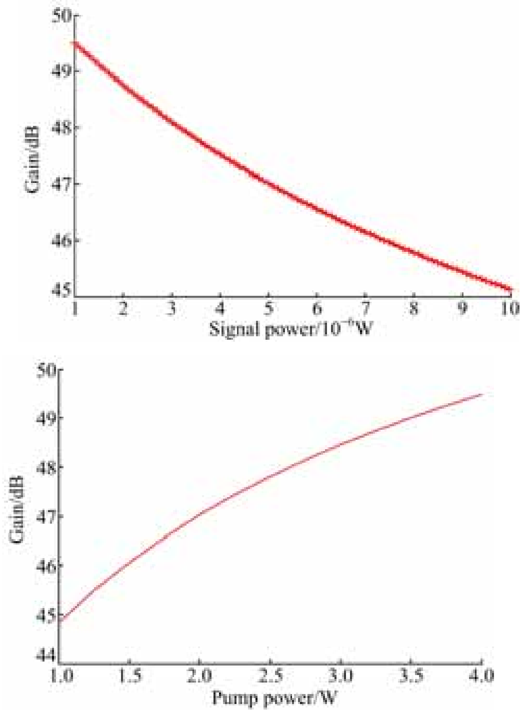


图6　放大器增益与信号光、抽运光功率的关系

Fig. 6　Gain of amplifier vs signal and pump power

4　结　论

(1)放大器增益随着有源光纤长度的不同而变化，在小信号和大信号情况下，增益饱和时的光纤长度有所不同，大信号达到增益饱和时所对应的光纤长度更短。

(2)对于不同的信号光和抽运光功率，放大器增益发生变化，且在信号光和抽运光功率较小时，变化更加明显。

(3)在放大器设计过程中，要综合考虑输入信号光和抽运光功率对 Er^{3+}/Yb^{3+} 共掺双包层光纤放大器增益特性的影响，选择合适的有源光纤长度，实现最佳的放大增益。

参考文献：

[1] Alam S U, Turner P W, Grudinin A B, et al. High-power cladding pumped erbium-ytterbium co-doped fiber laser[C]//OSA, 2001, 14:1-3.

[2] Wilson Gordon, Delavaux Jean-marc, Stentz Andrew, et al. Low-noise 1-watt Er/Yb fiber amplifier for CATV distribution in HFC and FTTH/C systems[C]//OFC, 2000:58-60.

[3] Kringlebont J T, Morkel P R, Reekie L, et al. Efficient diode-pumped signal frequency erbium: ytterbium fiber laser[J]. IEEE Photonics Technol Lett, 1993, 5(10):1162-1164.

[4] 吴粤湘，马晓明，赵晓吉. 铒镱共掺特性对光放大器增益和噪声系数的影响[J]. 光学学报，2008,28(6):1057-1061.
Wu Yue-xiang, Ma Xiao-ming, Zhao Xiao-ji. Effects of Er^{3+} and Yb^{3+} concentration on gain and noise coefficient of fiber amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6):1057-1061.

[5] Minelly J D, Barnes W L, Laming R I, et al. Diode-array pumping of Er^{3+}/Yb^{3+} co-doped fiber lasers and amplifier[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1993, 5(3):301-303.

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

[7] Morasse Bertrand, Aqqer Sren, Hovington Carl, et al. 10W ASE-free single-mode high-power double-cladding Er^{3+}-Yb^{3+} amplifier[J]. Fiber Lasers IV, 2007, 6543(324): 1-8.

[8] 周雷，宁继平，张蔚青，等. 全光纤高功率Er/Yb共掺双包层光纤放大器[J]. 中国激光，2009,36(7):1880-1885.
Zhou Lei, Ning Ji-ping, Zhang Wei-qing, et al. All-fiber high power Er/Yb co-doped double clad fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7):1880-1885.

[9] Martin A, Robert J, Peng P, et al. Gain and noise in ytterbium-sensitized erbium-doped fiber amplifier: measurements simulations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(10):1521-1526.

[10] Nguyen Dan T, Chavez-Pirson Arturo, Jiang Shi-bin, et al. A novel approach of modeling cladding-pumped highly Er-Yb co-doped fiber amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(11):1018-1027.

[11] Mirek Karasek. Optimum design of Er^{3+}-Yb^{3+} co-doped fibers for large-signal high-pump-power applications[J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(10):1699-1705.

[12] 李晓光，胡贵军，李公羽，等. Er/Yb共掺双包层光纤放大器的自激振荡[J]. 光电子·激光，2010,21(6):841-844.
Li Xiao-guang, Hu Gui-jun, Li Gong-yu, et al. Self-oscillation of Er/Yb co-doped double-clad fiber amplifier[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(6):841-844.