

# 级联双包层钇镱共掺光纤放大器的性能分析\*

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, 对级联双包层钇镱共掺光纤放大器 (Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-Doped Fiber Amplifier, EYDFA) 进行了研究. 数值模拟计算得到级联双包层 EYDFA 的最佳光纤长度, 以及前后向泵浦功率之比和光隔离器位置对于增益以及噪音系数的影响. 通过选择合适的前后向泵浦功率之比和隔离器的位置优化级联放大器结构, 其增益提高了 4 dB, 噪音系数降低了近 3 dB.

**关键词:** 光纤通信; 双包层钇镱共掺光纤放大器; 速率方程和光传输方程; 隔离器

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2066-5

## 0 引言

双包层光纤技术产生之后, 随着其在激光器和光纤放大器中的应用, 解决了泵浦耦合效率低的瓶颈问题<sup>[1-3]</sup>. 同时, 纤芯中镱离子的加入有效地提高了能量转换效率, 实现了高功率、高转换效率光纤放大器, 因而双包层光纤技术成为了目前的研究热点<sup>[4-6]</sup>. 采用级联结构双包层放大器技术是一项提高其性能的比较有效的技术<sup>[7]</sup>. 但是对级联的双包层放大器的结构进行优化却是较少涉及到的领域, 本文就该方面的问题进行探讨. 通过基于双包层 EYDFA 的速率方程和传输方程分析了带隔离器的两级双包层 EYDFA 的性能, 分析了两级结构对最佳光纤长度的影响, 以及隔离器位置和前后向泵浦功率比对级联放大器性能的影响, 根据计算结果对放大器的结构进行优化.

## 1 理论模型

Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤中原子的能级及能量传递如图 1<sup>[8]</sup>. 根据对 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤的粒子数变

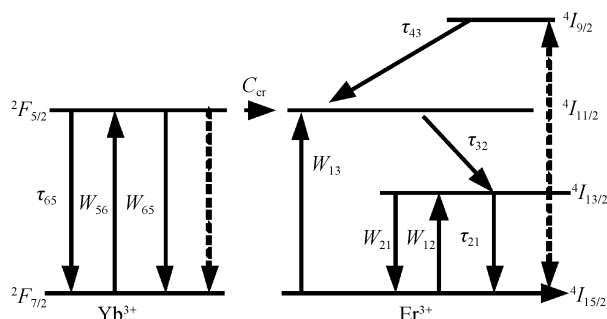


图 1 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺系统能级结构

Fig. 1 Energy level for Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped systems

化情况的分析, 可得到相应的粒子数稳态速率方程<sup>[8-9]</sup>

$$\frac{dN_4}{dt} = -N_4/\tau_{43} + C_{up}N_2^2 \quad (1)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{13}N_1 - N_3/\tau_{32} + N_4/\tau_{43} + C_{cr}N_1N_6 \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - N_2/\tau_{21} + N_3/\tau_{32} - 2C_{up}N_2^2 \quad (3)$$

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = N_{Er} \quad (4)$$

$$\frac{dN_6}{dt} = W_{56}N_5 - W_{65}N_6 - N_6/\tau_{65} - C_{cr}N_1N_6 \quad (5)$$

$$N_5 + N_6 = N_{Yb} \quad (6)$$

式(1)~(6)中, 参量  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  和  $N_4$  分别表示 Er<sup>3+</sup> 在 <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>、<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>、<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 和 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 能级上的粒子数密度; 参量  $N_5$ 、 $N_6$  分别为 Yb<sup>3+</sup> 在 <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> 和 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 能级的粒子数密度;  $\tau_{43}$ 、 $\tau_{32}$ 、 $\tau_{21}$  和  $\tau_{65}$  分别表示 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>、<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>、<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 和 <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> 能级上粒子自发辐射的寿命.  $C_{up}$  是 Er<sup>3+</sup> 从亚稳态 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 到受激态 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 能级的能量上转化系数, 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<sup>3+</sup> 到 Er<sup>3+</sup> 的能量传递过程的交叉弛豫系数. 由于能级 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 和 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 上粒子寿命相对很小, 也就是  $\tau_{21}$  的值远大于  $\tau_{43}$  和  $\tau_{32}$ , 式(1)~(4)又可以简化为

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - N_2/\tau_{21} + W_{13}N_1 + C_{cr}N_1N_6 - C_{up}N_2^2 \quad (7)$$

$$N_1 + N_2 = N_{Er} \quad (8)$$

而式(7)、(8)中的跃迁系数则由下面的公式确定

$$W_{12}(z) = \frac{\Gamma_s(\nu_s)\sigma_{12}(\nu_s)}{h\nu_s A_{core}} P_s(z) + \sum_j \frac{\Gamma_s(\nu_j)\sigma_{12}(\nu_j)[P_{ASE}^+(z, \nu_j) + P_{ASE}^-(z, \nu_j)]}{h\nu_j A_{core}}$$

\* 深圳市科技计划项目(06KJP023)资助

Tel: 0755-26731169

Email: yx.wu@163.com

收稿日期: 2008-11-28

修回日期: 2009-02-02

$$\begin{aligned}
 W_{21}(z) &= \frac{\Gamma_s(\nu_s)\sigma_{21}(\nu_s)}{h\nu_s A_{\text{core}}} P_s(z) + \\
 &\sum_j \frac{\Gamma_s(\nu_j)\sigma_{21}(\nu_j)[P_{\text{ASE}}^+(z,\nu_j) + P_{\text{ASE}}^-(z,\nu_j)]}{h\nu_j A_{\text{core}}} \\
 W_{13}(z) &= \frac{\Gamma_p(\nu_p)\sigma_{13}(\nu_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z) \\
 W_{56}(z) &= \frac{\Gamma_p(\nu_p)\sigma_{56}(\nu_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z) \\
 W_{65}(z) &= \frac{\Gamma_p(\nu_p)\sigma_{65}(\nu_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z)
 \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\sigma_{12}$ 、 $\sigma_{13}$ 、 $\sigma_{21}$ 、 $\sigma_{56}$  和  $\sigma_{65}$  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,  $\nu_s$  和  $\nu_p$  分别为信号光和泵浦光的频率,  $A_{\text{core}}$  是纤芯面积,  $h$  是普朗克常量,  $\Gamma$  为信号和泵浦模场与纤芯掺杂区的重叠积分因子, 其中  $\Gamma_p$  近似等于纤芯面积与内包层面积之比<sup>[8]</sup>, 对于纤芯中的模场采用高斯分布近似表示, 则有  $\Gamma_s(\nu) = 1 - \exp(-2 \frac{b^2}{\omega(\nu)^2})$ , 其中  $b$  是光纤的掺杂区域半径,  $\omega(\nu)$  是信号功率的模场半径<sup>[10]</sup>.  $P_{\text{ASE}}^+(z, \nu_j)$  和  $P_{\text{ASE}}^-(z, \nu_j)$  为在  $\nu_j$  处  $\Delta\nu$  的间隔内沿  $z$  方向的正向和反向传输的 ASE 光功率.

在稳态情况下, 泵浦光、信号光、自发辐射噪声的传输方程分别为<sup>[8]</sup>

$$\frac{dP_p^\pm(z, \nu_p)}{dz} = \pm \{ \Gamma_p(\nu_p) [\sigma_{65}(\nu_p) N_6 - \sigma_{56}(\nu_p) N_5 - \sigma_{13}(\nu_p) N_1] - \alpha_p \} P_p(z, \nu_p) \quad (10)$$

$$\frac{dP_s(z, \nu_s)}{dz} = \{ \Gamma_s(\nu_s) [\sigma_{21}(\nu_s) N_2 - \sigma_{12}(\nu_s) N_1] - \alpha_s \} P_s(z, \nu_s) \quad (11)$$

$$\frac{dP_{\text{ASE}}^\pm(z, \nu_j)}{dz} = \pm m h \nu_j \Delta\nu \Gamma_s(\nu_j) \sigma_{21}(\nu_j) N_2 \pm$$

$$\Gamma_s(\nu_j) [\sigma_{21}(\nu_j) N_2 - \sigma_{12}(\nu_j) N_1] - \alpha_s \} P_{\text{ASE}}^\pm(z, \nu_j) \quad (12)$$

由于单模 LP<sub>01</sub> 光纤支持 2 个偏振模式, 所以取  $m=2$ .

在计算过程中, 由于式(5)~(8)和式(9)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. 噪音系数可以利用式(3)得到<sup>[11]</sup>

$$NF = \frac{1}{G} \left( \frac{P_{\text{ASE}}^+}{h\nu\Delta\nu} + 1 \right) \quad (13)$$

式中  $G$  为放大器的增益,  $\nu$  为光的频率,  $P_{\text{ASE}}^+$  为正向的 ASE 光功率

## 2 数值分析与结果讨论

在计算中, 选择总的泵浦功率为 4 W, 泵浦波长为 980 nm, 输入信号光功率为 10  $\mu\text{W}$ , 波长为 1 550 nm. 光纤纤芯直径为 6.6  $\mu\text{m}$ , 纤芯数值孔径为 0.18.  $\text{Er}^{3+}$  对波长为 1 550 nm 信号光的吸收截

面  $\sigma_{12}$  和发射截面  $\sigma_{21}$  分别为  $3.86 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 、 $4.27 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ , 对波长为 980 nm 泵浦光的吸收截面  $\sigma_{13}$  为  $2.684 2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  对波长为 980 nm 的吸收截面  $\sigma_{56}$  和发射截面  $\sigma_{65}$  分别为  $9.045 0 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 、 $1.023 6 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ,  $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Yb}^{3+}$  的上能级寿命分别是 11 ms 和 0.35 ms, 激活光纤对泵浦光重叠因子为 0.01, 对于信号光的重叠因子为 0.83, 交叉弛豫系数  $C_{\text{cr}} = 0.4 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ , 上转系数  $C_{\text{up}} = 8 \times 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 2.1 级联放大器的结构对掺杂光纤的最佳长度的影响

图 2 是单级和双级 EYDFA 的结构. 单级 EYDFA 采用前向泵浦, 双级 EYDFA 采用带波分复用器的双向泵浦结构. 该结构在两段掺杂光纤之间增加两个波分复用器和一个光隔离器, 使得后一级的泵浦功率能够绕过光隔离器在前一级得到重新利用, 从而可以提高泵浦功率的利用率, 得到较好的输出性能<sup>[12]</sup>. 计算时单级结构前向泵浦功率为 4 W; 级联结构的前、后向泵浦功率各为 2 W, 隔离器位于中间位置. 计算之后的结果如图 3.

由计算结果来比较两种结构的光纤放大器的掺杂光纤最佳长度以及增益和噪音性能. 双包层钇铒共掺光纤的最佳长度是指当泵浦功率一定时, 能够获得最大增益的掺杂光纤长度. 从图 3 可以看出, 如

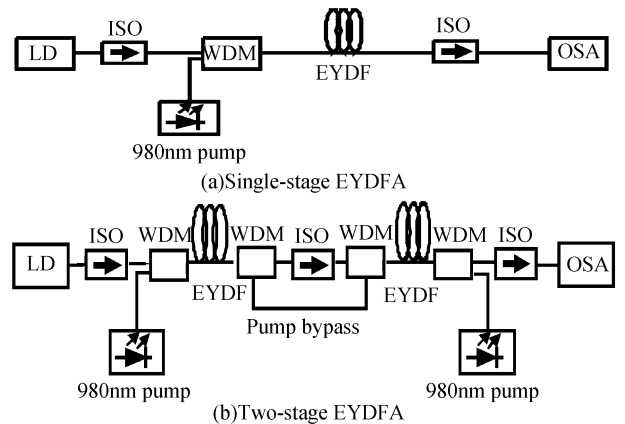
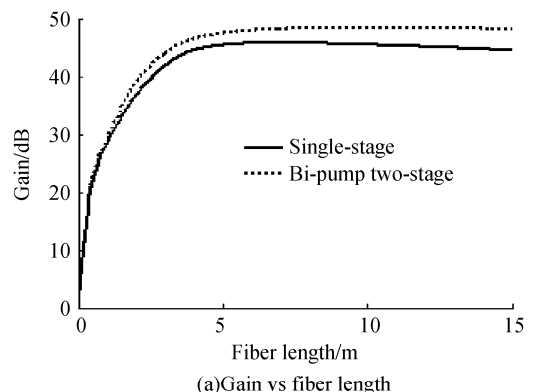


图 2 单级和双级 EYDFA 的结构

Fig. 2 Configurations of single-stage and two-stage EYDFA



(a) Gain vs fiber length

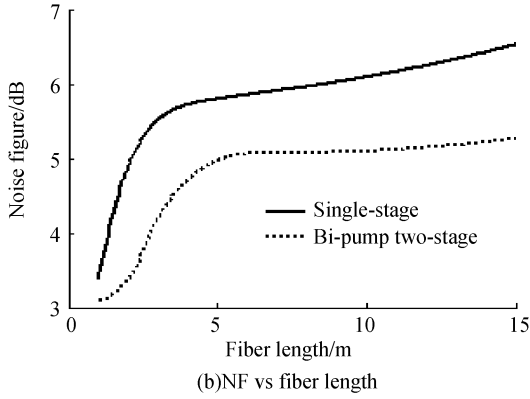


图 3 放大器性能与光纤长度的关系  
Fig. 3 Performance vs fiber length

果掺杂光纤太短时,因为由于对泵浦吸收的不充分,增益比较低;而当掺杂光纤太长时,泵浦光已经被充分吸收,不能形成粒子数反转,这时掺杂光纤反而会吸收信号光功率,造成增益的下降.在掺杂光纤长度增大的过程中,可以看出噪音系数始终是处于增大的趋势的.

比较级联和单级双包层 EYDFA 可以发现:级联结构放大器的光纤最佳长度比单级结构放大器的长度要大.这是由于通过在两段铒镱共掺光纤之间加入光隔离,隔离器阻断了反向 ASE 光传输,使其不能进入第一段铒镱共掺光纤,可以提高放大器的增益和抑制噪音,也使得泵浦光功率利用率提高,所以最佳长度也相应增大.

2.2 隔离器的位置与前后泵浦功率之比对于性能的影响

进一步研究发现,对于级联双包层 EYDFA,两级之间的光隔离器的不同位置,对放大器的增益和噪音系数会产生影响,同时前后向泵浦功率的分布也会对光放大器的性能存在影响.

图 4 是增益、噪音系数与光隔离器的位置以及前向泵浦功率和总的泵浦功率之比的曲线关系.在计算时,前后向泵浦的总功率保持为 4 W,首先固定一个前向泵浦功率与总的泵浦功率之比,改变隔离器的位

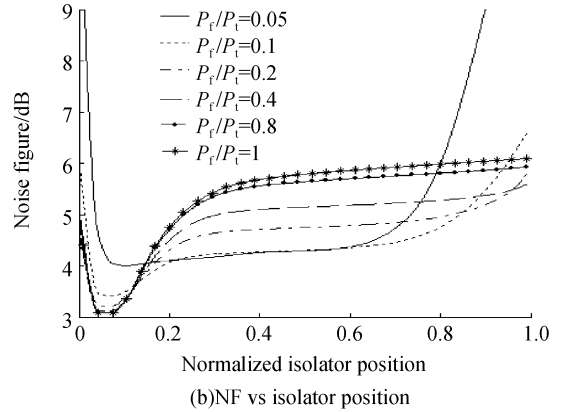
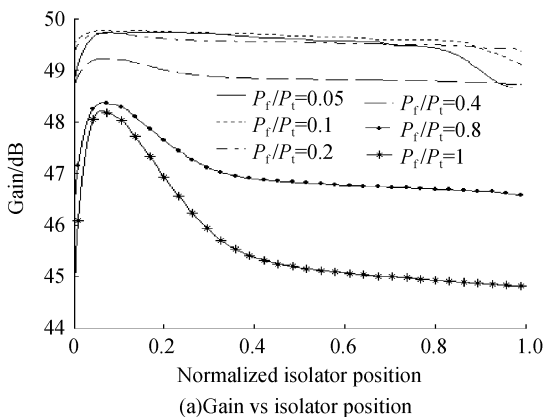


图 4 对于不同的前向泵浦与总泵浦功率之比,放大器性能与光隔离器位置的关系  
Fig. 4 Performance vs isolator position with different ratio of forward to total pump power

置,计算出增益和噪音系数相对于光隔离器位置的变化曲线,其中对光隔离器的位置进行了归一化处理.

从图 4 可以看出,对于每一个不同的  $P_f/P_t$  ( $P_f$  为前向泵浦功率,  $P_t$  为泵浦的总功率),都有一个最大的增益值,也会存在一个噪音系数的最小值,而且每条曲线对应的最佳光隔离器的位置也不一样.因此可以找出一个最佳的前后向泵浦功率之比以及对应的光隔离器的最佳位置.这需要找出每一个前向泵浦和总功率之比所对应的最大增益值和最小噪音系数,以及此时所对应的最佳隔离器的位置,据此得到的曲线关系如图 5 和图 6.

从图 5 可以看出,总的泵浦功率不变,随着前向泵浦功率的增大,其最大增益有一个先增大后减小的趋势,而相对应的光隔离器的最佳位置由后向前移动,逐渐稳定在与前端距离占总长度的 7% 左右.最佳的泵浦功率之比大概在 0.1 位置左右,此时相应隔离器与输入端的距离占总长度的 9%.这是由于对于采用后向泵浦的第二级放大器,能够提高泵浦功率的利用率,因此为了获得大的增益,后向泵浦的所占比

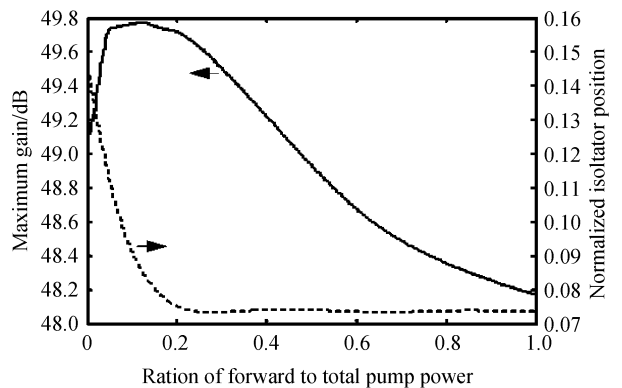


图 5 不同泵浦功率之比的最大增益和相应最佳隔离器位置  
Fig. 5 Maximum gain and corresponding isolator position vs ratio of forward to total pump power

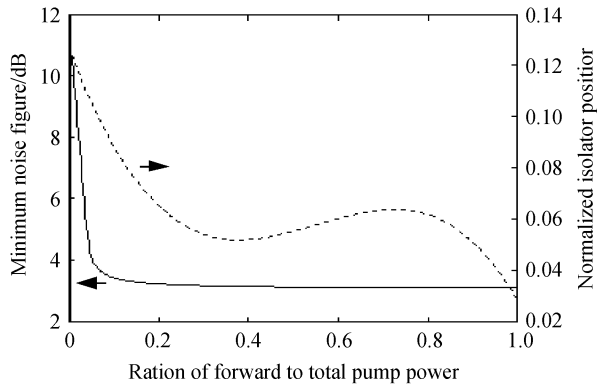


图6 不同泵浦功率之比的最小噪音系数和对应最佳隔离器位置

Fig. 6 Minimum NF and corresponding isolation position vs ratio of forward to total Pump power

例比较大。

从图6看到当前向泵浦光功率很小时,噪音系数比较大,但是随着前向泵浦光功率的增大,噪音系数迅速减小。当前向泵浦和总泵浦功率之比大于0.06之后,在较大的比例范围之内,其噪音系数的变化幅度不大,小于1个dB,前向泵浦的比例越大,噪音系数越小。对应的最佳隔离器的位置变化范围也不大,与输入端的距离占总长度的比值在3%到12%之间变化。这是由于通过控制反向的ASE功率的影响,能够尽可能地减小前一级的放大器的噪音,而光放大器的噪音系数主要由前一级的放大器的噪音特性决定,因此隔离器的位置比较靠近输入端,能够明显降低整个放大器的噪音系数。当前向泵浦和总泵浦功率之比大于0.6时可以获得接近于理论极限3dB的噪音系数。

综合考虑放大器的结构对于增益和噪音系数的影响,选择前向泵浦功率占总泵浦功率之比为0.1,光隔离器位置距离输入端为9%总长度,此时能获得最优化的性能,相对于图2(a)中采用4W前向泵浦的单级光放大器,增益提高近4个dB,噪音系数降低近3dB。

### 3 结论

本文比较了单级和双级双包层EYDFA的性能,对影响双级结构放大器的光纤长度、前后泵浦功率分布和光隔离器的位置进行了研究。结果表明,双级结构的放大器的最优光纤长度相对于单级结构要大,小信号放大器的最大增益或者最小噪音系数对应的最佳隔离器位置,随着前向泵浦光功率与总泵浦光功率之比的不同而变化,当前向泵浦功率和总泵浦功率比值为0.1时,能得到最大的增益,对应隔离器的位置离输入端为光纤总长的9%;当该比值较大时,能得到较好的噪音系数,对应隔离器的位置离输入端为光

纤总长的3%~12%。综合比较之后,最终选择前向泵浦功率占总泵浦功率之比为0.1,光隔离器与输入端距离占总长度的9%,能获得最优化的性能,相对于相同总的泵浦功率采用前向泵浦的单级光放大器,增益提高近4个dB,噪音系数降低近3dB。该结论对于级联光纤放大器的设计具有指导意义。

### 参考文献

- [1] DOMINIC V, MACCORMACK S, WAARTS R, *et al.* 110 W fiber laser[J]. *Electron Lett*, 1999, **35**(14): 1158-1160.
- [2] DONG Shu-fu, WANG Yi-shan, SHEN Hua, *et al.* High power single mode  $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$  Co-doped double cladding fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1605-1609.  
董淑福,王屹山,沈华,等.高功率单模  $\text{Er}^{3+} : \text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1605-1609.
- [3] WANG Q, DUTTA N K. Er-Yb doped double clad fiber amplifier [C]. *SPIE*, 2003, **5246**: 208-215.
- [4] BERTRAND M, SØREN A, Carl H, *et al.* 10 W ASE-free single mode high power double cladding  $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$  amplifier[C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 645324. 1-645324. 8
- [5] XIA Gui-jin, ZHANG Ju-mei, HE Hai-guang. Study on the upper state population distribution of double cladding erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 654-657.  
夏贵进,张居梅,何海光.双包层Er-Yb共掺光纤放大器上能级粒子数分布研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 654-657.
- [6] WU Yue-xiang, MA Xiao-ming, ZHAO Xiao-ji. Effects of  $\text{Er}^{3+} / \text{Yb}^{3+}$  concentration on gain and noise coefficient of fiber amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1057-1061.  
吴粤湘,马晓明,赵晓吉.钇镱共掺特性对光放大器增益和噪音系数的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1057-1061.
- [7] HARUN S W, ABDUL-RASHID H A, MUHD-YASSIN S Z, *et al.* Dual-stage Er/Yb doped fiber amplifier for gain and noise figure enhancements[J]. *IEICE Electronics Express*, 2006, **23**(3): 517-521.
- [8] MARTIN A, ROBERT J, FENG P, *et al.* Gain and noise in ytterbium-sensitized erbium-doped fiber amplifiers: measurements and simulations[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **19**(10): 1521-1526.
- [9] ZHUANG Mao-lu, ZHAO Shang-hong, DONG Shu-fu, *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] PIOTR M, DUNG N, JACEK C. Effects of concentration on the performance of erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(1): 112-120.
- [11] YANG Xiang-lin. Optical amplifiers and their applications[M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2000: 37-38.  
杨祥林.光放大器及其应用[M].北京:电子工业出版社, 2000: 37-38.
- [12] LUMHOLT O, POLVSEN J H, SCHUSLER K, *et al.* Quantum limited noise figure operation of high gain Erbium doped fiber amplifiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, **11**(8): 1344-1352.

## Performance Analysis of Two-stage Double-clad $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-doped Fiber Amplifier

WU Yue-xiang, MA Xiao-ming, ZHAO Xiao-ji

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

**Abstract:** The performances of two-stage double-clad  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped fiber amplifier (EYDFA) are analyzed based on the rate equation and light propagation equation. The optimum length and the influence of the ratio of forward and backward pump power on gain and noise characteristics of two-stage double-clad EYDFA are obtained with numerical simulation. The gain improvement of 4 dB and the noise figure reduction of 3 dB is obtained by choosing the optimum position of the isolator and the the ratio of forward and backward pump power.

**Key words:** Fiber communication; Double-clad  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped fiber amplifier (EYDFA); Rate equation and light propagation equation; Isolator



**WU Yue-xiang** was born in 1978. He received the M. S. degree in 2004 from Huazhong University of Science and Technology. Now he is a teacher at Shenzhen Polytechnic, and his major research fields focus on optical fiber communication system and optical devices.