

# 双包层 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤放大器增益和噪声特性分析

庄茂录<sup>1</sup>, 董淑福<sup>1</sup>, 管桦<sup>2</sup>, 赵尚弘<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 空军工程大学 科研部, 陕西 西安 710051)

**摘要:**基于速率方程和光传输方程,对980 nm激光泵浦Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺双包层光纤放大器的增益和噪声特性进行了分析。数值模拟结果表明,在小信号和大信号情况下,双包层Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤放大器在1 520 nm~1 570 nm波长范围内都具有良好的增益和噪声特性。

**关键词:**光纤放大器; 双包层光纤; 增益; 噪声特性

**中图分类号:**TN253 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)06-0048-05

随着波分复用(WDM)技术的不断应用,光纤通信技术取得了突破性的进展,其中掺铒光纤放大器以其众多优点成为实现高速传输的核心部件。但传统的掺铒光纤放大器主要采用掺铒单模光纤,对泵浦源的激光模式要求较高,导致泵浦耦合效率低,为了提高输出光功率,可增加掺铒离子的浓度。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<sup>[1]</sup>,抑制了掺铒光纤放大器的泵浦转换效率和增益的提高。

包层泵浦技术的出现,打破了光纤放大器泵浦耦合效率低的瓶颈<sup>[2]</sup>;而纤芯中镱离子的加入,不但有效地抑制了高浓度铒离子之间的能量上转换过程<sup>[3]</sup>,提高了能量转换效率,而且使铒镱共掺光纤的吸收谱变得相当宽阔(800 nm-1 100 nm)<sup>[4]</sup>,降低了对泵浦光模式的要求,使高功率、高转换效率光纤放大器的出现成为现实。本文从速率方程和功率传输方程出发,对双包层Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤放大器进行数值模拟,并利用数值模拟方法对不同波长情况下的增益和噪声特性进行了比较分析。

## 1 双包层 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤放大器理论模型

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所示<sup>[5]</sup>。

图1中,<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>上的粒子数密度分别用N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>和N<sub>4</sub>表示,<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>和<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>上的粒子数密度分别用N<sub>6</sub>、N<sub>5</sub>表示。通过对Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺粒子数密度变化情况的分析,可得出以下粒子数稳态时的速率方程<sup>[6]</sup>。

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - \frac{N_2}{\tau_{21}} + C_{cr}N_1N_6 - C_{up}N_2^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_6}{\partial t} = W_{56}N_5 - \frac{N_6}{\tau_{65}} - W_{65}N_6 - C_{cr}N_1N_6 \quad (2)$$

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

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

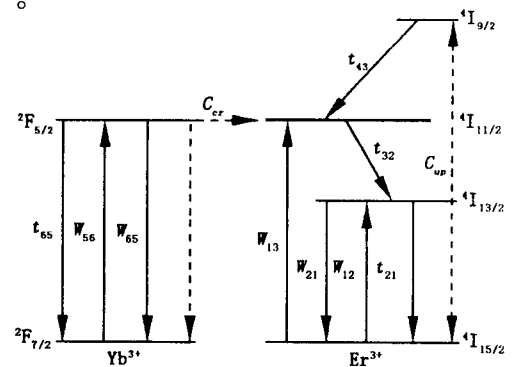


图1 Er-Yb共掺系统能级图

收稿日期:2003-05-02

基金项目:空军工程大学学术基金资助项目

作者简介:庄茂录(1971-),男,黑龙江讷河人,硕士生,主要从事光通信研究。

式中  $W_{ij}$  表示能级  $i$  和  $j$  之间的受激吸收和受激辐射跃迁的几率,  $\tau_{21}$  和  $\tau_{65}$  表示<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, 从<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>态分别到<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>态和<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>态的能量上转换用二次项系数  $C_{up}$  表示, 从 Yb<sup>3+</sup> 到 Er<sup>3+</sup> 的能量传递过程用交叉弛豫系数  $C_{cr}$  表示。激光、泵浦光受激吸收和受激辐射跃迁几率  $W_{ij}$  由下列式子给出。

$$W_{12}(z) = \frac{\Gamma_s(\lambda_s)\sigma_{12}(\lambda_s)\lambda_s}{hcA_{core}}P_s(z, \lambda_s) + \frac{\Gamma}{hcA_{core}}\int_0^\infty \sigma_{12}(\lambda_s)[P_{ASE}^+(z, \lambda) + P_{ASE}^-(z, \lambda)\lambda]d\lambda \quad (5)$$

$$W_{21}(z) = \frac{\Gamma_s(\lambda_s)\sigma_{21}(\lambda_s)\lambda_s}{hcA_{core}}P_s(z, \lambda_s) + \frac{\Gamma}{hcA_{core}}\int_0^\infty \sigma_{21}(\lambda_s)[P_{ASE}^+(z, \lambda) + P_{ASE}^-(z, \lambda)\lambda]d\lambda \quad (6)$$

$$W_{56}(z) = \frac{\Gamma_p(\lambda_p)\sigma_{56}(\lambda_p)\lambda_p}{hcA_{core}}P_p(z, \lambda_p) \quad , \quad W_{65}(z) = \frac{\Gamma_p(\lambda_p)\sigma_{65}(\lambda_p)\lambda_p}{hcA_{core}}P_p(z, \lambda_p) \quad (7)$$

式中,  $\sigma_{12}(\lambda)$ 、 $\sigma_{21}(\lambda)$ 、 $\sigma_{56}(\lambda)$  和  $\sigma_{65}(\lambda)$  分别是与频率有关的 Yb<sup>3+</sup> 到 Er<sup>3+</sup> 的吸收和发射截面面积,  $h$  是普朗克常数,  $P_s(z)$ 、 $P_p(z)$  分别是激光功率和泵浦光功率,  $\lambda_s$ 、 $\lambda_p$  分别是激光和泵浦光波长。  $A_{core}$  是纤芯截面积,  $\Gamma_p(\lambda)$ 、 $\Gamma_s(\lambda)$  是与频率有关的重叠因子。

泵浦光、信号光和 ASE 的功率传输方程为<sup>[7]</sup>

$$\frac{dP_p(z, \lambda_p)}{dz} = -\Gamma_p(\lambda_p)[\sigma_{56}(\lambda_p)N_5(z) - \sigma_{65}(\lambda_p)N_6(z)]P_p(z, \lambda) - \alpha_p P_p(z, \lambda) \quad (8)$$

$$\frac{dP_s(z, \lambda_s)}{dz} = -\Gamma_p(\lambda_p)[\sigma_{21}(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_{12}(\lambda_s)N_1(z)]P_s(z, \lambda_s) - \alpha_s P_s(z, \lambda_s) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE}^\pm(z, \lambda_s)}{dz} = & \pm mh \frac{c^2}{\lambda_k^3} \Delta\lambda \Gamma_s(\lambda_s) \sigma_{21}(\lambda_k) N_2(z) \\ & \pm \Gamma_s(\lambda_k) [\sigma_{21}(\lambda_k) N_2(z) - \sigma_{21}(\lambda_k) N_1(z)] P_{ASE}^\pm(z, \lambda_s) \end{aligned} \quad (10)$$

ASE 功率谱密度方程为<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE}^\pm(z, \lambda_k)}{dz} = & \pm mh \frac{c}{\lambda_k} \Gamma_s(\lambda_k) N_2(z) \\ & \pm \Gamma_s(\lambda_k) [\sigma_{21}(\lambda_k) N_2(z) - \sigma_{21}(\lambda_k) N_1(z)] S_{ASE}^\pm(z, \lambda_k) \mp \alpha_s(\lambda_k) S_{ASE}^\pm(z, \lambda_k) \end{aligned} \quad (11)$$

方程(8)~(11)的边界条件<sup>[7-8]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} P_p(0) = P_p^{in} \quad P_s(0) = P_s^{in} \\ P_{ASE}^+(z=0, \lambda_k) = P_{ASE}^-(z=L, \lambda_k) = 0 \quad 1520 \text{ nm} < \lambda_k < 1570 \text{ nm} \\ S_{ASE}^+(z=0, \lambda_k) = S_{ASE}^-(z=L, \lambda_k) = 0 \quad 1520 \text{ nm} < \lambda_k < 1570 \text{ nm} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

噪声系数的表达式为<sup>[8]</sup>

$$N_f = \frac{1}{G} \left( \frac{S_{ASE}^+(\lambda_s, L)\lambda_s}{hc} + 1 \right) \quad (13)$$

## 2 数值分析

以加拿大国家光学研究所(INO)生产的 EY805 双包层 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤为增益介质, 结合边界条件式(12), 运用 Matlab 对上述方程进行数值求解。该种光纤的纤芯直径 16 μm, 纤芯数值孔径 0.2 μm; 内包层横截面为正六边形, 平行边距离 200 ± 10 μm; 通过查阅光纤参数表并参考文献[3, 9, 10], 进行数值模拟的有关参数取值见表 1。

表 1 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤参数

Er <sup>3+</sup>	4.8 × 10 <sup>25</sup> ions/m <sup>3</sup>	Yb <sup>3+</sup>	3.7 × 10 <sup>26</sup> ions/m <sup>3</sup>	$C_{cr}$	5.0 × 10 <sup>-21</sup> m <sup>3</sup> /s
$\sigma_{21}$	3.395 × 10 <sup>-25</sup> m <sup>2</sup>	$\sigma_{65}$	5.0 × 10 <sup>-25</sup> m <sup>2</sup>	$C_{up}$	1.157 × 10 <sup>-23</sup> m <sup>3</sup> /s
$\sigma_{12}$	2.75 × 10 <sup>-25</sup> m <sup>2</sup>	$\sigma_{56}$	2.0 × 10 <sup>-25</sup> m <sup>2</sup>	$\Gamma_p$	0.0058
$\sigma_{13}$	2.0 × 10 <sup>-25</sup> m <sup>2</sup>	$\tau_{65}$	1.5 ms	$\Gamma_s$	0.83254
$\tau_{21}$	11 ms			$\alpha_p$	4.193 × 10 <sup>-3</sup> m <sup>-1</sup>
$\tau_{32}$	0.1 μs			$\alpha_s$	4.193 × 10 <sup>-3</sup> m <sup>-1</sup>

### 2.1 信号增益特性分析

#### 2.1.1 信号增益随光纤长度的变化

首先,对在不同泵浦功率下信号增益随不同光纤长度的变化进行分析,信号波长为 1 550 nm。图 2(a) 是小信号情况时( $P_s = 1 \mu\text{W}$ ),在不同泵浦功率条件下,信号增益随光纤长度的变化情况。泵浦功率为 0.5 W 时,小信号增益在  $L = 2.3 \text{ m}$  时达到最大,接近 46 dB,当  $L$  大于 2.3 m 时,信号增益随光纤的增加逐步减小;在泵浦功率为 2 W 时,小信号增益在  $L = 4.6 \text{ m}$  时达到最大,接近 58 dB,当  $L$  大于 4.6 m 时,信号增益随光纤的增加逐步减小。图 2(b) 是大信号情况时( $P_s = 1 \text{ mW}$ ),在不同泵浦功率条件下,信号增益随光纤长度的变化情况。泵浦功率为 0.5 W 时,大信号增益接近 20 dB,泵浦功率为 2 W 时,大信号增益接近 29 dB。大信号情况时,信号增益随光纤长度的分布与小信号类似。

从图 2 可以观察到双包层  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺光纤放大器对 1 550 nm 波长的小信号和大信号具有良好的放大特性。

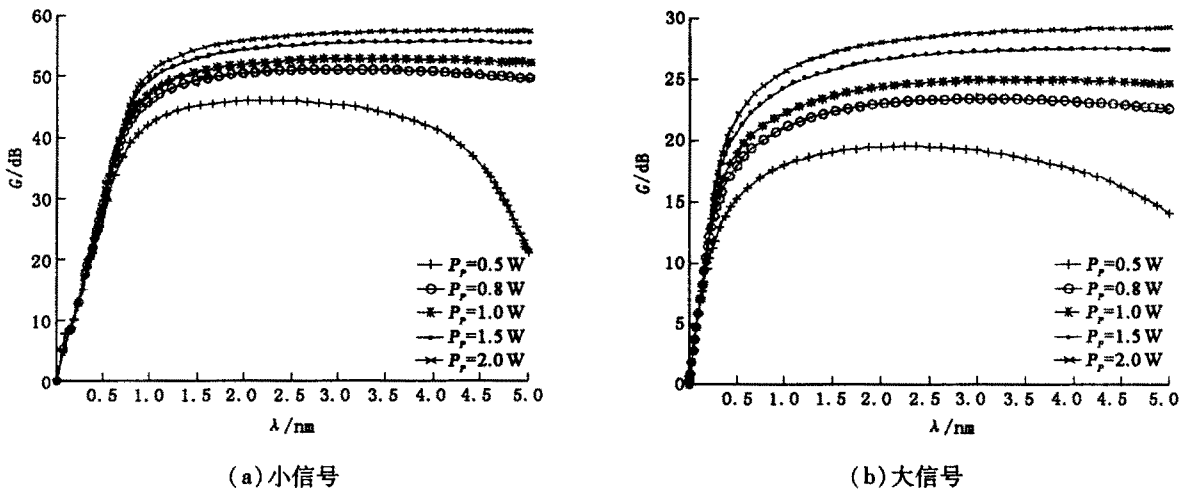


图2 信号增益沿光纤长度的分布

#### 2.1.2 信号增益随信号波长的变化

图 3 为信号增益随信号波长的变化曲线,泵浦功率为  $P_p = 1 \text{ W}$ ,通过计算分析,选取优化光纤长度  $L = 3.44 \text{ m}$ ,信号波长选取范围为 1520 nm ~ 1570 nm,波长间隔为 1 nm,覆盖 C 波段。

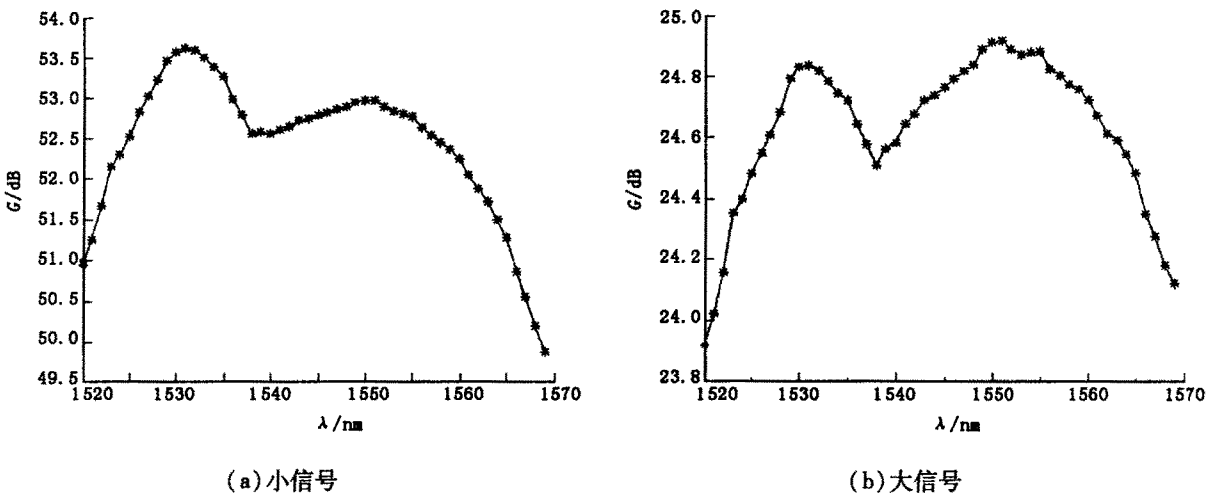


图3 信号增益随信号波长的变化

图 3(a) 为小信号情况下,信号增益随信号波长的变化曲线。小信号最小增益约 50 dB,最大约 53.6 dB。图 3(b) 为大信号情况下,信号增益随信号波长的变化曲线。大信号最小增益约 24 dB,最大约 24.9 dB。从图 3 可以看出,双包层光纤  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺放大器对 1 520 nm ~ 1 570 nm 波长范围的信号具有良好的放大特性。在 1 532 nm 和 1 550 nm 处分别出现两个增益峰值,这与 Er 离子的吸收、发射谱有关,与文献[9]完全吻合。通过采取增益均衡措施,加大增益平坦的波长范围,完全可以满足 DWDM 系统的工作波长范围。

### 2.2 噪声特性分析

#### 2.2.1 ASE 特性分析

首先,对 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺双包层光纤放大器的 ASE 特性进行分析(见图4),泵浦功率 P<sub>p</sub> = 1 W,光纤长度 L = 3.44 m,信号功率 P<sub>s</sub> 分别为 1 μW、1 mW。

在小信号情况下,ASE 最大功率约为 7.7 mW(1 532 nm 处);大信号情况下,ASE 最大功率约为 12.5 μW(1 532 nm 处)。出现小信号 ASE 功率大于大信号 ASE 功率的原因是:小信号时信号光中光子数比大信号时信号光中光子数要少,使处于集居数反转的上能级粒子没有充分通过受激辐射方式跃迁到下能级,产生相干光子,而是通过自发辐射方式产生非相干光子,进而增大了自发辐射功率。

#### 2.2.2 不同波长的信号噪声特性分析

在对 ASE 特性分析的基础上,对 1 520 nm ~ 1 570 nm 波长范围的信号噪声特性进行分析。泵浦功率 P<sub>p</sub> = 1 W,激活光纤长度 L = 3.44 m,信号功率分别为 1 μW、10 μW、100 μW、1 mW。

图5给出了不同信号功率情况下,噪声系数与信号波长的变化曲线。在 P<sub>s</sub> = 1 μW 时, N<sub>fmax</sub> = 3.0334 dB, N<sub>fmin</sub> = 3.028 dB;在 P<sub>s</sub> = 10 μW 时, N<sub>fmax</sub> = 3.041 dB, N<sub>fmin</sub> = 3.031 dB;在 P<sub>s</sub> = 100 μW 时, N<sub>fmax</sub> = 3.05 dB, N<sub>fmin</sub> = 3.13 dB;在 P<sub>s</sub> = 1 mW 时, N<sub>fmax</sub> = 3.9 dB, N<sub>fmin</sub> = 3.2 dB。从图5可以得出,以双包层 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>共掺光纤作为增益介质的光纤放大器在 1 520 nm ~ 1 570 nm 波长范围具有良好的噪声特性,在小信号时,噪声系数接近掺铒光纤放大器的噪声极限(3 dB),在大信号时也低于普通掺铒光纤放大器的噪声系数(4 ~ 6 dB)。

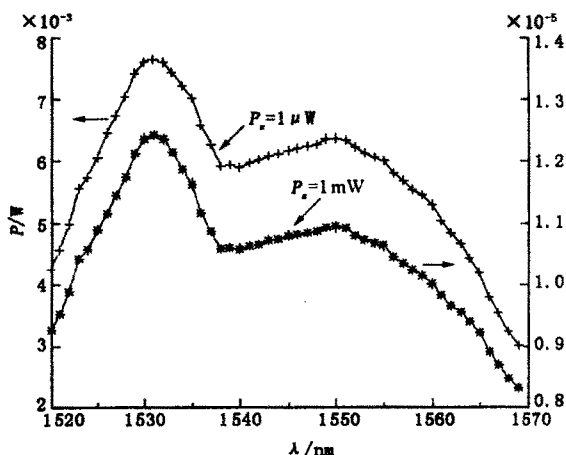
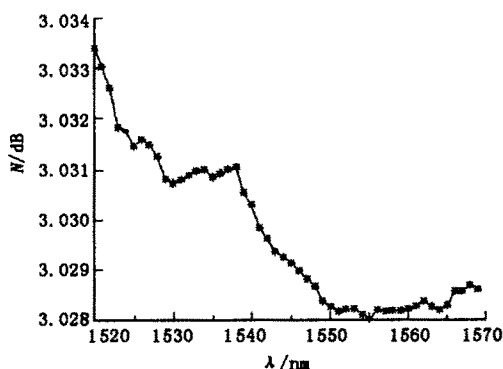
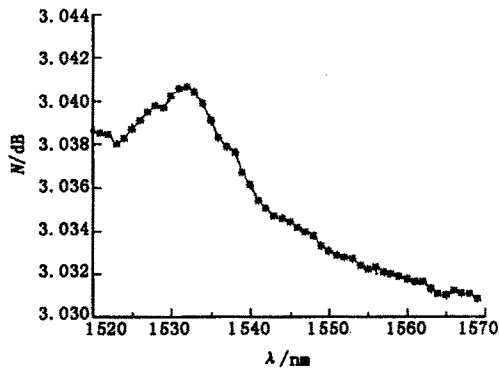


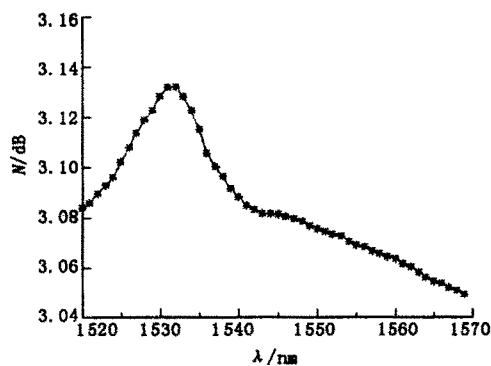
图4 ASE功率随信号波长的变化



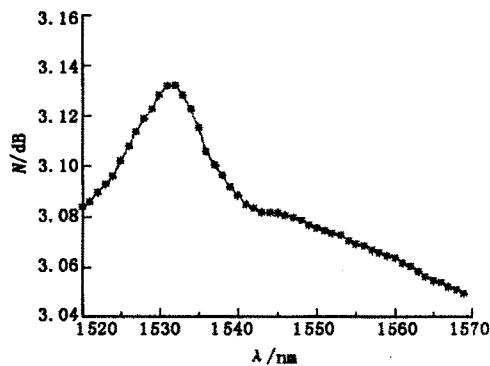
(a) P<sub>s</sub> = 1 μW



(b) P<sub>s</sub> = 10 μW



(c) P<sub>s</sub> = 100 μW



(d) P<sub>s</sub> = 1 mW

图5 噪声系数随信号波长的变化

### 3 结论

本文通过数值模拟对  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤放大器的信号增益特性和噪声特性进行了分析,结果表明: $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤放大器在 1 520 nm ~ 1 570 nm 波长范围内具有良好的增益特性和噪声特性,是满足光纤通信技术发展的理想的光纤放大器。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Blixt P, Nilsson J, Carlnas T, et al. Concentration - Dependent Upconversion in Er - doped Fiber Amplifiers Experiments and Modeling[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(11): 996 - 998.
- [ 2 ] Dominic V, MacCormack S, Waarts R, et al. 110W Fibre Laser[J]. Electronics Letters, 1999, 35(14): 1158 - 1160.
- [ 3 ] Federighi M, Di Pasquale F. The Effect of Pair - induced Energy Transfer on the Performance of Silica Waveguide Amplifiers With high  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  Concentrations[J]. IEEE Photon Techno Lett, 1995, 7(3): 303 - 305.
- [ 4 ] Minelly J D. Diode - Aarray Pumping of  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  + co - Doped Fiber Lasers and Amplifiers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1993, 5: 310 - 303 .
- [ 5 ] Taccheo S, Laporta P, Longhi S, et al. Diode - Pumped Bulk Erbium - Ytterbium Lasers[J]. Appl Phys B, 1996, 63: 425 - 436.
- [ 6 ] Nilsson J, Scheer P, Jaskorzynska B. Modeling and Optimization of Short  $\text{Yb}^{3+}$  - Sensitized  $\text{Er}^{3+}$  - Doped Fiber Amplifiers[J]. IEEE Photon Techno Lett, 1994, 6(3): 383 - 385.
- [ 7 ] Mirek Karúsek. Optimum Design of  $\text{Er}^{3+}$  -  $\text{Yb}^{3+}$  Codoped Fibers for Large - Signal High - Pump - Power Applications[J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(10): 1699 - 1705.
- [ 8 ] Bo Pedersen, Anders Bjaklev. The Design of Erbium - Doped Fiber Amplifiers[J]. IEEE J, Lightwave Technol, 1991, 9(9): 1105 - 1112
- [ 9 ] Fabrizio Di Pasquale. Modeling of Highly - Efficient Grating - Feedback and Fabry - Perot  $\text{Er}^{3+}$  -  $\text{Yb}^{3+}$  Co - Doped Fiber Laser[J]. IEEE J Quantum Electron, 1996, 32(2): 326 - 332.
- [ 10 ] Alireza Shooshtari, Peyman Meshkinfam Tahar Touam Mark, Andrews P, et al. Ion - Exchanged Er/Yb Phosphate Glass Waveguide Amplifiers and Lasers[J]. Opt Eng 1998, 37(4): 1188 - 1192.

(编辑:门向生)

## Numerical Analysis of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co - doped Double - clad Fiber Amplifiers for Gain and Noise Characteristics

ZHUANG Mao - lu<sup>1</sup>, DONG Shu - fu<sup>1</sup>, GUAN Hua<sup>2</sup>, ZHAO Shang - hong<sup>1</sup>

( 1. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China; 2. The training Department of Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China )

**Abstract:**  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  Co - doped double - clad fiber amplifier pumped at 980 nm is analyzed for gain and noise characteristics based on the rate equation and light propagation equation. And the numerical simulation result shows that, under the conditions of both small and large signals,  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co - doped double - clad fiber amplifiers have good gains and noise characteristics within the range of 1520nm ~ 1570nm wavelength.

**Key words:** fiber amplifier; double - clad fiber; gain; noise characteristic