

文章编号: 1001-3806(2003)04-0345-04

## 双包层 Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤激光器稳态特性的分析\*

占生宝 赵尚弘 董淑福 夏贵进 李云霞  
(空军工程大学电讯工程学院, 西安, 710077)

摘要: 对 980nm 泵浦光泵浦双包层 Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤激光器进行了数值模拟, 分析了泵浦光与激光在双包层 Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤中的分布情况、输出功率与泵浦功率的关系、光纤长度与腔镜反射率对输出激光功率的影响, 计算的最大斜效率为 56.3%, 接近于理论计算值的极限。

关键词: 光纤激光器; 双包层 Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤; 稳态特性; 泵浦功率

中图分类号: TN248 文献标识码: A

### Analysis of the steady-state behavior of Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> co-doped double-clad fiber laser

Zhan Shengbao, Zhao Shanghong, Dong Shufu, Xia Guijin, Li Yunxia  
(Institute of Telecommunication Engineering, AFEU, Xi'an, 710077)

**Abstract:** Numerical analysis of the Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> co-doped double-clad fiber laser has been performed. The distribution of pump light and laser power along the function of output power versus pump power, the effect of fiber length and mirror reflectivity on output power have been analyzed. The calculated slope efficiency is up to 56.3%. It is relatively close to the quantum limit.

**Key words:** fiber laser; Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> co-doped double-clad fiber; steady state behavior; pump power

## 引 言

掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器已广泛运用, 但高浓度的掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器, 存在能量上转换和自脉动<sup>[1, 2]</sup> 等缺陷。为抑制这些缺陷, 研究发现, 在 Er<sup>3+</sup> 中掺入一定的 Yb<sup>3+</sup> 效果非常明显<sup>[3, 4]</sup>, 由此产生了 Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤激光器。普通的 Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤激光器, 其最大输出功率仍然较低, 为获得高功率的激光输出, 采用了包层泵浦技术<sup>[5]</sup>。因此, 开展了以双包层 Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤为增益介质的双包层 Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤激光器的研究。借助速率方程, 分析了双包层 Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤激光器达到稳态时, 泵浦功率与产生的 1550nm 的激光功率沿光纤长度的分布规律、输出功率与泵浦功率的关系以及腔镜反射率对输出功率的影响。

## 1 速率方程

研究双包层 Er<sup>3+</sup> / Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤激光器, 其理论依据依然是 Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> 变化的速率方程, 图 1 给出了 Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup> 在泵浦光作用下发生能级转换的图形<sup>[6]</sup>。

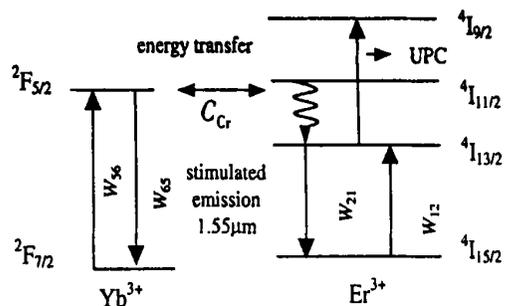


Fig. 1 Energy level transitions for an Er-Yb system

图中, <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> 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>:

$$\partial N_2 / \partial t = W_{12} N_1 - W_{21} N_2 - N_2 / \tau_{21} +$$

\* 陕西省自然科学基金资助项目。

作者简介: 占生宝, 男, 1967 年 9 月出生。研究生。主要从事光通信研究。

收稿日期: 2002-08-02; 收到修改稿日期: 2002-10-29

$$C_{cr}N_1N_6 - C_{up}N_2^2 = 0 \quad (1)$$

$$\partial N_6 / \partial t = W_{56}W_5 - N_6 / \tau_{65} - W_{65}N_6 -$$

$$C_{cr}N_1N_6 = 0 \quad (2)$$

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

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

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  $^4I_{13/2}$  和  $^2F_{5/2}$  能级上粒子自发辐射的寿命, 从  $^4I_{13/2}$  态分别到  $^4I_{15/2}$  态和  $^4I_{9/2}$  态的能量上转换用 2 次项系数  $C_{up}$  表示, 从  $Yb^{3+}$  到  $Er^{3+}$  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<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} W_{12}(z, t) &= \frac{\Gamma_s(\nu) \sigma_{12}(\nu_s)}{h \nu_s A_{core}} P_s(z) \\ W_{21}(z, t) &= \frac{\Gamma_s(\nu) \sigma_{21}(\nu_s)}{h \nu_s A_{core}} P_s(z) \\ W_{56}(z, t) &= \frac{\Gamma_p(\nu) \sigma_{56}(\nu_p)}{h \nu_p A_{core}} P_p(z) \\ W_{65}(z, t) &= \frac{\Gamma_p(\nu) \sigma_{65}(\nu_p)}{h \nu_p A_{core}} P_p(z) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\sigma_{12}(\nu)$ ,  $\sigma_{21}(\nu)$ ,  $\sigma_{56}(\nu)$  和  $\sigma_{65}(\nu)$  分别是与频率有关的  $Er^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$  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,  $\nu_s$ ,  $\nu_p$  分别是激光和泵浦光频率。  $A_{core}$  是纤芯截面积,  $\Gamma_p(\nu)$ ,  $\Gamma_s(\nu)$  是与频率有关的重叠因子。

## 2 稳态时输出功率的数值分析

### 2.1 功率传输的速率方程

图 2 是一典型的 F-P 平面腔。

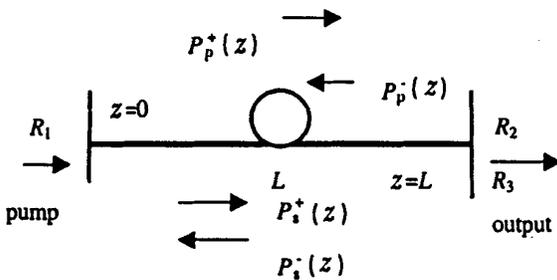


Fig. 2 Schematic illustration of a typical fiber laser

图中, 设光纤长度为  $L$ , 纤芯中的  $Er^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$  单位体积的浓度分别为  $N_{Er}$ ,  $N_{Yb}$ , 各点上能级  $Er^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$  的浓度为  $N_{Er}(z)$ ,  $N_{Yb}(z)$ ; 泵浦光从  $z = 0$  处耦合入第 1 包层后, 先正向传播, 到达  $z = L$  处, 经输出耦合镜反射后再沿反向传播, 设  $P_p^+(z)$

和  $P_p^-(z)$  分别为沿光纤正反两个方向传播的泵浦光的功率,  $P_s^+(z)$  和  $P_s^-$  分别为沿光纤正反两个方向传播的激光的功率,  $R_1$  和  $R_2$  分别为前端镜和后端镜对激光的反射率,  $R_3$  为后端镜对泵浦光的反射率。通过分析, 可得到稳态时泵浦功率和激光功率随光纤长度变化的传输方程<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} &= -\Gamma_p [\sigma_a(\lambda_p) N_{Yb} - (\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_e(\lambda_p)) N_{Yb}(z)] P_p^\pm(z) - \alpha_p(z) P_p^\pm(z) \\ \pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} &= \Gamma_s [\sigma_e(\lambda_s) - \sigma_a(\lambda_s)] N_{Er}(z) - \sigma_a(\lambda_s) N_{Er} / P_s^\pm(z) + \Gamma_s \sigma_e(\lambda_s) N_{Er}(z) P_0(\lambda_s) - \alpha_s(z) P_s^\pm(z) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, 正、负号分别表示功率沿光纤的正反方向运动,  $\alpha_p$ ,  $\alpha_s$  表示泵浦光和激光的散射损耗系数,  $\sigma_e(\lambda_s)$ ,  $\sigma_a(\lambda_s)$  表示激光的辐射和吸收截面面积,  $\sigma_e(\lambda_p)$ ,  $\sigma_a(\lambda_p)$  表示泵浦光的辐射和吸收截面面积,  $\lambda_p$  是泵浦光波长, 设为 980nm,  $\lambda_s$  是输出激光的波长, 设为 1550nm,  $\Gamma_p$ ,  $\Gamma_s$  是与频率有关的重叠因子。自发辐射对激光功率的贡献设为  $P_0 = 2hc^2 / \lambda_s^3$ , 式中,  $h$  是普朗克常数。边界条件为<sup>[8,9]</sup>:

$$\begin{cases} P_p^+(0) = P_p(in) \\ P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0) \\ P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \\ P_p^-(L) = R_3 P_p^+(L) \end{cases} \quad (8)$$

结合方程(1)~(4), 用 Matlab 可求出方程(6), (7) 满足边界条件(8)式的数值解。

### 2.2 泵浦功率、激光功率与光纤长度的关系

以加拿大国家光学研究所(INO)生产的 EY801 双包层  $Er^{3+} / Yb^{3+}$  共掺光纤为增益介质进行数值模拟, 该种光纤纤芯直径为  $(4.6 \pm 1.0) \mu m$ , 纤芯数值孔径为  $0.18 \pm 10\%$ , 正六边形内包层, 直径为  $200 \mu m$ 。进行数值模拟的有关参数的取值见表 1<sup>[10]</sup>。

Table 1 Parameters for  $Er^{3+} / Yb^{3+}$  co-doped fiber

$[Er^{3+}] / 10^{25} m^{-3}$	5.0	$[Yb^{3+}] / 10^{26} m^{-3}$	6.25
$\sigma_a(\lambda_p) / 10^{-21} cm^2$	2.5	$\sigma_e(\lambda_p) / 10^{-21} cm^2$	5.0
$\sigma_a(\lambda_s) / 10^{-21} cm^2$	6.6	$\sigma_e(\lambda_s) / 10^{-21} cm^2$	5.7
$\Gamma_p$	0.00128	$\Gamma_s$	0.82
$\tau_{Yb} / 10^{-3} s$	1.5	$\tau_{Er} / 10^{-3} s$	11
$\alpha_p / 10^{-5} cm^{-1}$	5	$\alpha_s / 10^{-5} cm^{-1}$	2.3
$C_{cr} / (10^{-16} cm^3 \cdot s^{-1})$	5.0	$C_{up} / (10^{-18} cm^3 \cdot s^{-1})$	4.8

根据表 1 的取值, 在泵浦功率  $P_p^+(0) = 20\text{W}$ ,  $R_1 = R_3 = 0.98$ ,  $R_2 = 0.04$ , 光纤长度  $L$  为 20m 时得到泵浦功率与激光功率沿光纤的分布曲线图 3。

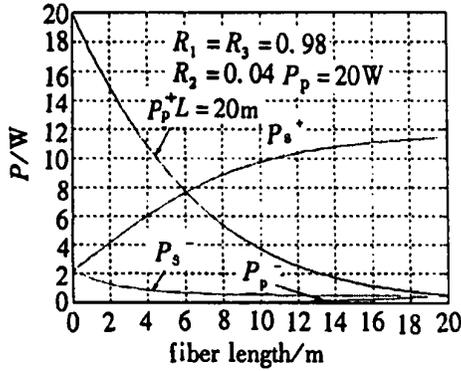


Fig. 3 Pump power and laser power distribution when fiber length is 20m

从图中可以看出: 正向激光功率随光纤长度的增加而增加, 激光功率没有达到饱和。为清楚地得出泵浦光和激光随不同长度的光纤的变化关系, 从光纤长度 10m 开始, 对每间隔 2m, 即 10m, 12m, 14m .....直到 50m 的 21 种不同长度的同种型号光纤进行模拟, 在  $P_p^+(0) = 20\text{W}$ ,  $R_1 = R_3 = 0.98$ ,  $R_2 = 0.04$  的情况下, 得到图 4, 从中可以看出: 当光纤长

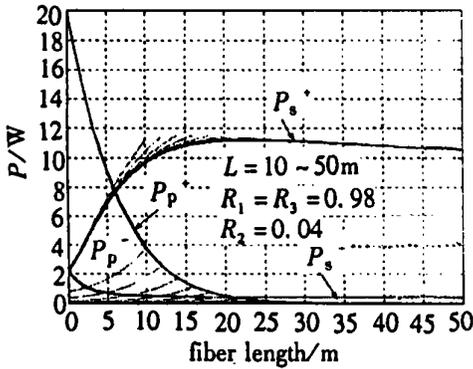


Fig. 4 Pump power and laser power distribution along the fiber under the cases of different lengths

度改变时, 正向传播的泵浦光功率沿光纤分布的曲线基本相同, 反向传播的泵浦光功率分布变化比较明显。当光纤长度在小于 25m 范围内变化时, 正向传播的激光功率沿光纤轴向分布曲线变化明显。当  $L > 25\text{m}$  后, 腔内激光的分布曲线基本不变, 大约在 22.5m 处增益达到饱和, 随后随  $L$  的增加, 激光功率开始减小。也容易发现, 增益达到饱和时的光纤长度并非最佳光纤长度。图 5 给出了输出功率 ( $P_{out}^+ = P_s^+(L)(1 - R_2)$ ) 与光纤长度的关系曲线, 从图中看出: 输出功率最大时光纤的最佳长度为 15m 左右, 此时的输出功率约为 11.5W, 此后, 随着光纤长度的增加, 输出功率将逐渐减小。

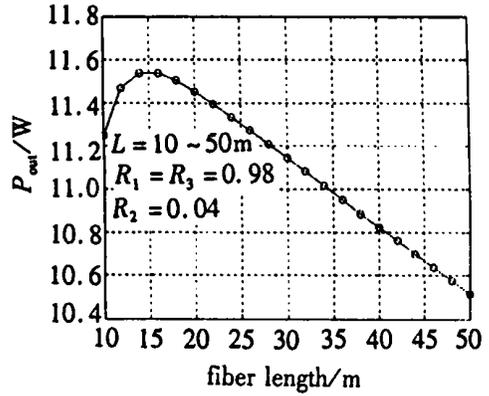


Fig. 5 Output power as a function of laser length

### 2.3 输出功率与后腔镜反射率 $R_3$ , $R_2$ 的关系

2.2 部分已经分析了在  $P_p^+(0) = 20\text{W}$ ,  $R_1 = R_3 = 0.98$ ,  $R_2 = 0.04$  时泵浦功率、激光功率及输出功率随光纤长度变化的规律。那么, 输出功率与腔镜反射率又有什么关系呢? 这里主要分析后腔镜反射率  $R_3$ ,  $R_2$  对输出功率的影响。

图 6 给出了光纤长度为 20m 时输出功率随泵浦功率的变化曲线, 其中,  $R_3$  分别为 0.98 和 0.04。

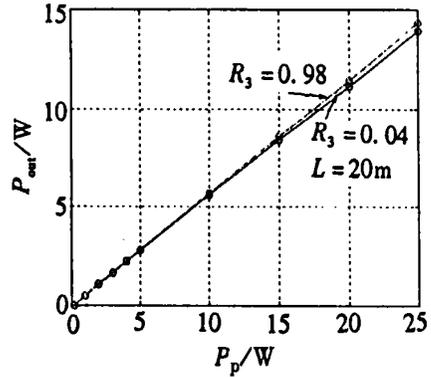


Fig. 6 Output power as a function of pump power

从图中可以看出: 当  $R_3 = 0.98$  时的输出功率和斜效率比  $R_3 = 0.04$  时对应的输出功率及斜效率要高, 计算的最大斜效率分别为 0.563, 0.547。出现这种情况的原因是: 当  $R_3 = 0.04$  时, 在  $z = L$  处的

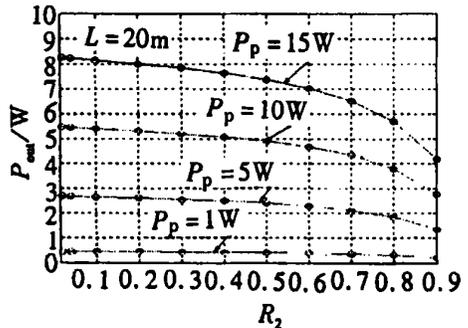


Fig. 7 Output power as a function of reflectivity  $R_2$  under the cases of different pump power when  $\lambda_p = 980\text{nm}$

剩余泵浦光被浪费掉了, 而  $R_3 = 0.98$  时, 这部分剩余泵浦光又返回谐振腔被充分利用。图 7 给出了  $L = 20\text{m}$ ,  $R_3 = 0.98$ , 泵浦功率分别为 15W, 10W, 5W, 1W 时输出功率随后腔镜对激光反射率  $R_2$  变化的关系曲线, 可以看出: 在泵浦功率大于 1W 的情况下, 输出功率随反射率  $R_2$  的增加将单调下降。

实验中采用了图 8 的装置, 以加拿大国家光学研究所 (INO) 生产的 EY805 双包层  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺多模光纤为增益介质进行实验, 光纤长度为 5m, 泵浦源是波长为 980nm 的带尾纤输出的激光器, 最大输出功率为 16W, 在低功率泵浦的情况下, 观察到了激光输出, 实验正在进行之中, 结果另文报道。

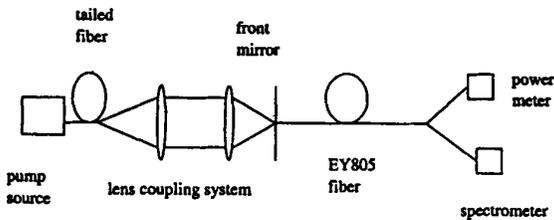


Fig. 8 Experimental setup

### 3 结论

通过对 980nm 泵浦光泵浦双包层  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺光纤激光器的数值模拟, 可得出以下结论: (1) 光纤长度改变时, 正向传播的泵浦光功率沿光纤基

本成同一函数分布, 反向传播的泵浦光功率变化情况比较明显。(2) 当光纤长度在小于某一范围内变化时, 正向传播的激光功率沿光纤轴向分布变化明显。当光纤长度大于某一范围后, 激光增益达到饱和, 以后激光的分布情况基本不变。(3) 在后腔镜对激光反射率不变的情况下, 随后腔镜对泵浦光反射率的增加, 激光输出功率将逐渐增大。(4) 在后腔镜对泵浦光反射率不变的情况下, 随后腔镜对激光反射率的增加, 当泵浦功率较大时, 激光输出功率将单调下降。

### 参 考 文 献

- [1] Aiso K, Tashiro Y, Suzuki T. Furukawa Review, 2001(20): 41~45.
- [2] Ding M, Cheo P K. IEEE Photon Technol Lett, 1996(12): 1627~1629.
- [3] Ding M, Cheo P K. IEEE Photon Technol Lett, 1997(3): 324~326.
- [4] 占生宝, 赵尚弘, 董淑福 *et al.* 激光与红外, 2002, 32(6): 400~403.
- [5] Dominic V, MacCormack S, Waarts R *et al.* Electron Lett, 1999, 35(14), 1158~1160.
- [6] Tanguy E, Larat C, Pocholle J P. Opt Commun, 1988(153): 172~183.
- [7] Karasek M. IEEE J Q E, 1997, 33(10): 1669~1705.
- [8] Kelson I, Hardy A A. IEEE J Q E, 1998, 34(9), 1570~1577.
- [9] Pasquale F D. IEEE J Q E, 1996, 32(2): 326~332.
- [10] Tellert T, DiPasquale F, Federighi M. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(11): 1462~1464.

(上接第 344 页)

导致峰值强度的大小和波动幅度均比无啁啾光脉冲入射时所得的结果要大一些。相反, 当入射脉冲具有负啁啾时, 初始啁啾和色散啁啾共同作用的结果将使得啁啾的波动幅度减小, 从而导致峰值强度的大小和波动幅度均比无啁啾光脉冲入射时所得的结果要小一些。

### 3 结论

超高斯光脉冲在常规单模光纤中传输时, 由于具有较平坦的顶部和陡峭的边沿, 其脉冲波形、瞬时

频率啁啾、脉冲峰值强度的演变都与高斯光脉冲在光纤中传输时不同。脉冲波形将经历由平顶、多峰、最后为单峰的变化; 脉冲峰值强度的变化趋势为先增加后减小; 脉冲的演变与入射超高斯脉冲的分布和初始啁啾有关。

### 参 考 文 献

- [1] Malomed B A, Berntson A. J O S A, 2001, B18: 1243.
- [2] Mrtensson J, Berntson A, Westland M W *et al.* Opt Lett, 2001, 26: 55.
- [3] Linkt R A. IEEE J Q E, 1985, 21: 593.
- [4] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics. 2nd, New York: Academic Press, 1995: 71.