

文章编号: 1001-3806(2007)04-0431-04

光纤参数对双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的影响

何 凤, 赵尚弘, 夏 鸣*

(空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710077)

摘要: 为了研究掺杂浓度、包层尺寸对双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的影响, 根据双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器产生激光的机理, 基于速率方程, 采用改变 Er^{3+} , Yb^{3+} 掺杂浓度、内包层尺寸等光纤参数的方法, 得到了双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器随光纤参数变化的特征结果。结果表明, 在 Er^{3+} 掺杂浓度不变的情况下, 增大 Yb^{3+} 的掺杂浓度, 可有效地提高激光器的输出功率; 在 Yb^{3+} 掺杂浓度保持不变的情况下, 增大 Er^{3+} 掺杂浓度, 也可提高激光器的输出功率, 但提高的幅度不明显; 减小内包层尺寸, 激光器的最佳光纤长度随之减小。

关键词: 激光器; 双包层光纤激光器; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺; 掺杂浓度; 包层尺寸

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Effect of fiber parameters on the performance of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-cladding fiber lasers

HE Feng, ZHAO Shang-hong, XIA Ming

(Institute of Telecommunication Engineering Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract Based on rate equations changing doping concentration and cladding size of the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-cladding fiber laser, the effect of the doping concentration and cladding size on the performance of the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-cladding fiber laser was studied. Analysis results show that when Er^{3+} -concentration is stable, the output power will be increased efficiently with Yb^{3+} -concentration increase; when Yb^{3+} -concentration is stable, the output power will be increased too with Er^{3+} -concentration increase, but the change is not obvious; the optimal fiber length of the laser becomes shorter when the inner cladding size becomes smaller.

Key words lasers; double-cladding fiber laser; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped; doping concentration; cladding size

引 言

基于特定光纤参数的双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的稳态和动态特性已进行了分析^[1,2], 显示了双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的特征。但不同的光纤参数对激光器的性能有着重要的影响, 特别是对于 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器, 由于其存在 $\text{Yb}(^2\text{F}_{5/2}) + \text{Er}(^4\text{I}_{5/2}) \rightarrow \text{Yb}(^2\text{F}_{7/2}) + \text{Er}(^4\text{I}_{1/2})$ 的复杂能量传递过程。因此, 研究双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器输出功率随光纤参数的变化, 可在最低成本下生产出最佳的光纤光源。

作者基于速率方程, 分析了 Er^{3+} , Yb^{3+} 掺杂浓度、内包层尺寸等光纤参数对双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的影响, 得到了双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激

光器随光纤参数变化的特征。

1 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器产生激光的机理

众所周知, 光纤是由玻璃晶格 $(\text{SiO}_4)^{2-}$ 构成的四面体网状结构, 这种四面体网状结构导致 $(\text{SiO}_4)^{2-}$ 之间存在较大的自由空间^[3]。而 Er^{3+} 在 $(\text{SiO}_4)^{2-}$ 中的溶解度较低, 这样 Er^{3+} 就容易形成聚集状态。聚集状态导致铒离子之间的距离减小, 从而使一部分 Er^{3+} 集聚成团, 形成离子对; 另一部分未成对的 Er^{3+} 也通过偶极-偶极相连而相互作用。在抽运光作用下, 集聚成团的 Er^{3+} 将发生离子对诱导的浓度猝灭; 偶极-偶极相连的 Er^{3+} , 也将发生均匀上转换的能量转移过程。基于以上原因, 高浓度的掺 Er^{3+} 光纤激光器能量转换效率较低。

为提高掺 Er^{3+} 光纤激光器的能量转换效率, 通常在掺 Er^{3+} 光纤中加入 Yb^{3+} 。这是因为 Yb^{3+} 在 $(\text{SiO}_4)^{2-}$ 中的溶解度与 Er^{3+} 一样较低, 且 Yb^{3+} 同 Er^{3+} 具有相近的离子半径。这样, 当大量的 Yb^{3+} 围绕在 Er^{3+} 的周围, 就能在 Er^{3+} 的周围形成屏障, 屏蔽 Er^{3+} ,

作者简介: 何 凤 (1980-), 女, 硕士研究生, 主要从事光电对抗方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xmch@sina.com

收稿日期: 2006-05-22 收到修改稿日期: 2006-07-05

从而减小由于 Er^{3+} 浓度提高而形成的离子对, 减小离子对诱导的浓度猝灭。

实验表明^[4]: Yb^{3+} 在 980nm 附近有一个较强的吸收峰。当 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器被 980nm 抽运光抽运时, 一方面, 大量的 Yb^{3+} 首先吸收抽运能量, 从基态 ($^2\text{F}_{5/2}$) 受激跃迁至激发态 ($^2\text{F}_{7/2}$), 而处于激发态的 Yb^{3+} 不是迅速地向下能级跃迁产生新的光子, 而是将能量快速地扩散至 Er^{3+} , 导致 Er^{3+} 的受激; 另一方面, 少部分 Er^{3+} 也可直接从抽运光吸收能量而受激。对于 Er^{3+} 受激过程, 文献[5]中做了详细的阐述。通过这两种能量吸收过程, 最终导致 Er^{3+} 受激而产生 1550nm 的激光, 这就是 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器产生激光的机理, 如图 1 所示。

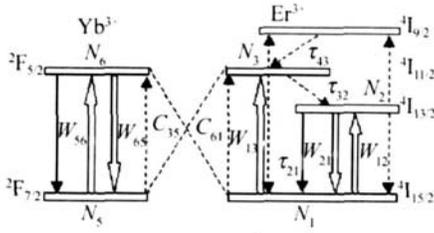


Fig 1 Energy level transfer of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped system

2 理论模型

2.1 Er^{3+} , Yb^{3+} 变化的速率方程

依据 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器产生激光的机理, 可得到如下粒子数变化的速率方程^[6]:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + \frac{N_2}{\tau_{21}} - W_{13}N_1 + C_{56}N_2^2 - C_{14}N_1N_4 + C_{up}N_3^2 - C_{cr}N_1N_6 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - \frac{N_2}{\tau_{21}} + A_{32}N_3 - 2C_{up}N_2^2 - C_{14}N_1N_4 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = W_{13}N_1 - A_{32}N_3 + A_{43}N_4 - 2C_{up}N_3^2 + C_{cr}N_1N_6 \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_6}{\partial t} = W_{56}N_5 - \frac{N_6}{\tau_{65}} - W_{65}N_6 - C_{cr}N_1N_6 \quad (4)$$

$$N_{\text{Er}} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (5)$$

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

式中, W_{ij} 为:

$$W_{12}(z, t) = \frac{\Gamma_s(\nu)\sigma_{12}(\nu_s)}{h\nu_s A_{\text{core}}} P_s(z) \quad (7)$$

$$W_{21}(z, t) = \frac{\Gamma_s(\nu)\sigma_{21}(\nu_s)}{h\nu_s A_{\text{core}}} P_s(z) \quad (8)$$

$$W_{13}(z, t) = \frac{\Gamma_p\sigma_{13}(\nu_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z) \quad (9)$$

$$W_{56}(z, t) = \frac{\Gamma_p\sigma_{56}(\nu_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z) \quad (10)$$

$$W_{65}(z, t) = \frac{\Gamma_p\sigma_{65}(\nu_p)}{h\nu_p A_{\text{core}}} P_p(z) \quad (11)$$

式中, N_1, N_2, N_3 和 N_4 分别表示 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{5/2}$, $^4\text{I}_{3/2}$, $^4\text{I}_{11/2}$ 和 $^4\text{I}_{9/2}$ 能级上的粒子数密度, N_5, N_6 分别表示 Yb^{3+} 的 $^2\text{F}_{5/2}$ 和 $^2\text{F}_{7/2}$ 能级上的粒子数密度; τ_{21} 和 τ_{65} 表示 $^4\text{I}_{3/2}$ 和 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级自发辐射的寿命; A_{32} 和 A_{43} 是 Er^{3+} 非辐射的弛豫率; C_{up} 和 C_{cr} 分别是 Er^{3+} 上转换系数和交叉弛豫系数; σ_{12} , σ_{21} 是激光的吸收截面、发射截面, σ_{13} , σ_{56} 和 σ_{65} 是抽运光的吸收截面、发射截面; h 为普朗克常数; ν_p, ν_s 分别为抽运光和信号光频率; A_{core} 是纤芯截面积; $P_s(z), P_p(z)$ 分别是激光功率和抽运光功率; $\Gamma_p(\nu)$ 和 $\Gamma_s(\nu)$ 是与频率有关的、抽运光和信号光的填充因子, Γ_p 近似等于纤芯面积与内包层面积之比^[7], 对于 Γ_s , 可由 $\Gamma_s(\lambda) = 1 - \exp\{-2[b/\omega(\nu)]^2\}$ 算出, 其中, $\omega(\nu) = a(A_1 + A_2/V^{1.5} + A_3/V^6)$, $V = 2\pi a NA/\lambda$, b 为掺杂区域半径, a 为纤芯半径, NA 是数值孔径。当 $b/\lambda = 1$ 时, A_1, A_2, A_3 的值分别为: $A_1 = 0.616, A_2 = 1.660, A_3 = 0.987$ ^[8]。

2.2 功率输运方程

图 2 是一典型的 F-P 平面腔结构。

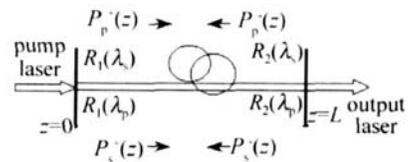


Fig 2 Schematic view of the fiber laser structure

图 2 中, 抽运光从 $z=0$ 处耦合入光纤后, 沿光纤正向传播, 到达 $z=L$ 处, 经后腔镜反射后再沿光纤反向传播。设 $P_p^+(z), P_p^-(z), P_s^+(z), P_s^-(z)$ 分别为正、反两方向传播的抽运光和信号光的功率分布函数; $R_1(\lambda_p), R_2(\lambda_p), R_1(\lambda_s), R_2(\lambda_s)$ 分别为前腔镜和后腔镜对抽运光和信号光的反射率; λ_p 和 λ_s 分别为抽运光和信号光波长。

通过分析, 可得到稳态时抽运光和信号光沿光纤长度的功率输运方程为^[11]:

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p \{ \sigma_a(\lambda_p) N_{\text{Yb}} - [\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_e(\lambda_p)] N_{\text{Yb}}(z) \} P_p^\pm(z) - \alpha_p(z) P_p^\pm(z) \quad (12)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \Gamma_s \{ [\sigma_e(\lambda_s) - \sigma_a(\lambda_s)] N_{\text{Er}}(z) - \sigma_a(\lambda_s) N_{\text{Er}} \} P_s^\pm(z) + \Gamma_s \sigma_e(\lambda_s) N_{\text{Er}}(z) P_0(\lambda_s) - \alpha_s(z) P_s^\pm(z) \quad (13)$$

式中, $\sigma_e(\lambda_s)$ 和 $\sigma_a(\lambda_s)$ 分别为激光的辐射截面和吸收截面, $\sigma_a(\lambda_p)$ 为抽运光的吸收截面。 P_0 是自发辐射对激光功率的贡献, 其值为 $2hc^2/\lambda^3$ ^[11]。正向抽运时,

有以下边界条件^[11]:

$$\begin{cases} P_p^+(0) = P_{p, in} \\ P_p^-(L) = R_2 P_p^+(L) \\ P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0) \\ P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \end{cases} \quad (14)$$

3 理论分析

从 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器产生激光的机理可以发现: 不同的 Yb^{3+} 的离子浓度最终将影响 Er^{3+} 的受激程度, 而这种影响程度可通过 Er^{3+} 上转换系数 C_{up} 和交叉弛豫系数 C_{cr} 的变化来体现。研究发现^[6]: Yb^{3+} 的离子掺杂浓度在 $1.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3} \sim 1.0 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$ 范围变化时, C_{cr} 从 $1.0 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ 到 $5.0 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ 随 Yb^{3+} 的离子浓度线性增加; 若 Yb^{3+} 的离子浓度大于 $1.0 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$, C_{cr} 将保持常数 $5.0 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ 不变。计算公式如下:

$$C_{cr} = 1.0 \times 10^{-22} + (N_{\text{Yb}} - 1.0 \times 10^{25}) \times 3.9604 \times 10^{-49} \quad (15)$$

对于 C_{up} , 当 Er^{3+} 的掺杂离子浓度 N_{Er} 在 $4.4 \times 10^{25} \text{ m}^{-3} \sim 1.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 范围之间变化时, C_{up} 从 $3.5 \times 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$ 到 $1.7 \times 10^{-23} \text{ m}^3/\text{s}$ 随 Er^{3+} 的离子浓度线性变化。计算公式为:

$$C_{up} = 3.5 \times 10^{-24} + (N_{\text{Er}} - 4.4 \times 10^{25}) \times 2.4107 \times 10^{-49} \quad (16)$$

为分析双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器随光纤参数的变化, 本文中进行了如下假设: (1) 光纤纤芯设为圆形, 直径和数值孔径分别为 $16 \mu\text{m}$ 和 0.20 , 光纤的损耗为 0.2 dB/m ; (2) 抽运光波长为 980 nm , 输出激光波长设为 1550 nm ; (3) 激光器的前腔镜对激光的反射率和对抽运光的透射率都为 100% 、光纤末端为 4% 的菲涅耳反射; (4) 抽运功率 $P_p = 5 \text{ W}$ 。

3.1 Yb^{3+} 的离子掺杂浓度对光纤激光器的影响

为分析 Yb^{3+} 浓度对双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的影响, 假设 Er^{3+} 的离子浓度 $N_{\text{Er}} = 5.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 保持不变, 当 Yb^{3+} 的离子掺杂浓度在 $1.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3} \sim 4.8 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 范围内变化时, 可得到图 3 所示的激光斜效率与光纤长度的关系曲线。这里, 内包层设

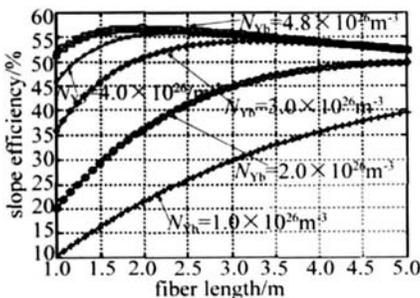


Fig 3 Relation between slope efficiency and length of the fiber with Yb^{3+} - concentration

为正六边形, 两平行边间的距离为 $200 \mu\text{m}$ 。

由图 3 可知: 当 Yb^{3+} 的掺杂离子浓度为 $1.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 时, 随着光纤长度的增加, 激光斜效率逐渐增加, 在光纤长度 $L = 5 \text{ m}$ 处, 最大转换率不到 35% , 激光输出功率没有达到饱和。当 Yb^{3+} 的掺杂离子浓度为 $2.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 时, 激光输出功率的斜效率达到 50% , 激光输出功率在 5 m 处刚好达到饱和。随着 Yb^{3+} 离子浓度的进一步增加, 激光输出功率的斜效率也在不断地提高, 但增加的幅度相对来说要小些, 激光输出功率达到饱和所需的光纤长度也在逐渐减少。因此, 选择合适的 Yb^{3+} 的掺杂离子浓度, 可减少光纤的长度。

3.2 Er^{3+} 的离子掺杂浓度对光纤激光器的影响

决定双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器输出的主要因素是 Er^{3+} 的掺杂离子浓度。图 4 中给出了 Er^{3+}

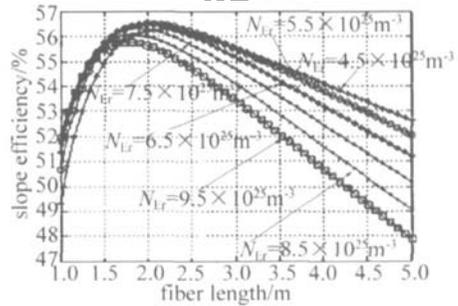


Fig 4 Relation between slope efficiency and length of the fiber with Er^{3+} - concentration

离子浓度改变时激光输出功率的变化。计算中, 假设 Yb^{3+} 的掺杂离子浓度为 $N_{\text{Yb}} = 3.7 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 保持不变, 内包层参数与图 3 相同。

从图 4 可以看出: 在 Yb^{3+} 的掺杂离子浓度保持不变的情况下, 随着 Er^{3+} 的掺杂离子浓度的增大, 输出激光的斜效率虽然也增大, 达到功率饱和时所需的光纤长度也减小, 但变化的程度不如改变 Yb^{3+} 的离子浓度那样明显。其原因是: 在特定的抽运功率下, Yb^{3+} 所吸收的能量已达到了极限, 并将全部吸收的能量扩散给了 Er^{3+} , 从而导致受激的 Er^{3+} 数量保持在相对稳定的状态。

3.3 内包层尺寸对光纤激光器的影响

包层抽运技术的关键在于光纤的内包层, 当内包层尺寸发生改变时, 抽运和激光输出功率如何变化, 图 5 和图 6 中分别给出了这种变化的结果。这里, 内包层都设为圆形, 半径 R_{clad} 分别设为 $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ 。

图 5 是不同内包层半径下抽运光功率沿光纤的分布曲线。从图 5 可以看出: 内包层尺寸的变化对抽运光功率沿光纤长度的分布影响非常明显。当内包层半径 $R_{\text{clad}} = 50 \mu\text{m}$ 时, 在光纤长度 $L = 2.5 \text{ m}$ 处, 抽运光已

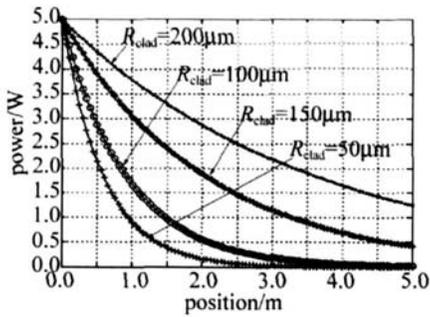


Fig 5 Pump power in different inner cladding sem idiameter

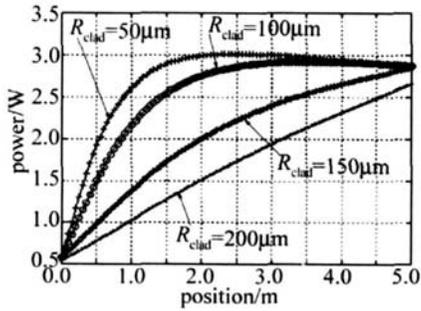


Fig 6 Laser power in different inner cladding sem idiameter

经几乎全部被光纤吸收; 当内包层半径 $R_{\text{clad}} = 200 \mu\text{m}$ 时, 在光纤长度 $L = 5\text{m}$ 处, 还有接近 28% 抽运光没有被光纤吸收。图 6 是不同内包层半径下产生的激光功率沿光纤的分布曲线。从图 6 可以看出: 内包层尺寸的变化对产生的激光功率影响也非常明显。当内包层半径 $R_{\text{clad}} = 50 \mu\text{m}$ 时, 腔内激光最大功率大于 3W; 当内包层半径 $R_{\text{clad}} = 200 \mu\text{m}$ 时, 腔内激光最大功率不到 2.65W。造成这种情况的原因是: 抽运光在内包层中是均匀分布, 内包层越小, 特定的抽运功率下单位面积上的光强分布就越强, 从而纤芯吸收的抽运功率就越多, 进而产生的激光功率就越强。

4 实验

采用如图 7 所示的实验装置, 利用加拿大国家光学研究所生产的 EY805 型双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤, 在光纤长度为 2m 的情况下进行了实验验证。

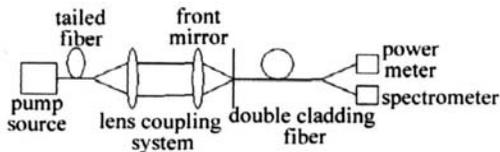


Fig 7 Experimental setup

EY805 型双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤的纤芯成分为: $4.80 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$ (质量分数为 0.0060) 的 Er^{3+} , $3.7 \times 10^{26} \text{m}^{-3}$ (质量分数为 0.0465) 的 Yb^{3+} 等; 纤芯为圆形, 直径和数值孔径分别为 $16 \mu\text{m}$ 和 0.20; 内包层为正六边形, 两平行边间的距离为 $200 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.35。图 8 是入纤抽运功率为 2.9W 时所测得的光

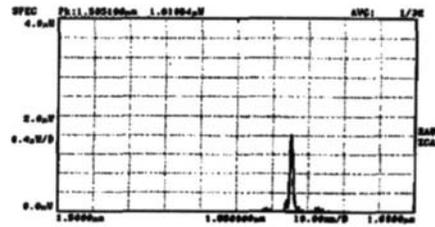


Fig 8 Light from the experiment at 2.9W of pump power

谱。这时测得输出激光输出功率为 769mW, 扣除损耗等因素, 实验结果与理论分析结果基本一致。

5 结论

阐明了双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器产生激光的机理。基于速率方程, 分析了 Er^{3+} , Yb^{3+} 的掺杂离子浓度, 内包层尺寸对双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的影响; 并通过实验进行了验证。通过研究, 可得出以下结论: (1) 在 Er^{3+} 的掺杂离子浓度保持不变的情况下, 增大 Yb^{3+} 的离子浓度, 可有效地提高双包层 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的输出功率; (2) 在 Yb^{3+} 的掺杂离子浓度保持不变的情况下, 增大 Er^{3+} 的离子浓度, 也可提高激光器的输出功率, 但提高的幅度不明显; (3) 在特定的抽运功率下, 减小内包层尺寸, 最佳光纤长度 L_{opt} 将减小; 反之, 增大内包层尺寸, 最佳光纤长度将增大。

参考文献

- [1] ZHAN Sh B, ZHAO Sh H, DONG Sh F *et al* The analysis of steady-state behavior of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped double-clad fiber laser [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 345~348 (in Chinese).
- [2] ZHAN Sh B, ZHAO Sh H, DONG Sh F *et al* The analysis of dynamic behavior of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped double-clad fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 32(4): 409~411 (in Chinese).
- [3] ZHAN Sh B, ZHAO Sh H, DONG Sh F *et al* Control of up-conversion process of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped fiber laser [J]. Laser & Infrared, 2002, 32(6): 400~402 (in Chinese).
- [4] M NELLY JD, BARNES W L, LAM NG R I *et al* Diode array pumping of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped fiber lasers and amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(3): 301~303.
- [5] VERMELHO M V D, PESCHEL U, A ICHISON J S Simple and accurate procedure for modeling erbium-doped waveguide amplifiers with high concentration [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(3): 401~407.
- [6] KARASEK M. Optimum design of Er/Yb codoped fiber for large signal high pump power applications [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(10): 1769~1705.
- [7] YAH EL E, HARDY A. Efficiency optimization of high-power Er^{3+} -codoped fiber amplifiers for wavelength-division multiplexing application [J]. JO SA, 2003, B20(6): 1189~1197.
- [8] MYSLNISK IP, NGUYEN D, CHROSTOWSKI J Effects of concentration on the performance of erbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(1): 112~120.