

双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器上能级 粒子数分布研究*

夏贵进 张居梅 何海光

(西安通信学院通信工程系, 陕西 西安 710106)

摘要 基于速率方程和功率传播方程,数值分析了双包层Er-Yb共掺光纤放大器在波长为972 nm的泵浦光作用下,分别采用三种不同泵浦方式,其Er³⁺和Yb³⁺上能级粒子数分布情况.数值结果表明,Er³⁺上能级粒子数分布受信号功率影响作用大,激发率基本保持在50%以上;Yb³⁺上能级粒子数分布受泵浦功率影响作用大,激发率基本保持在10%以下,该结论对双包层Er-Yb共掺光纤放大器的性能研究具有一定指导意义.

关键词 光纤放大器;双包层光纤;上能级;粒子数分布

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

0 引言

在可以产生光放大的稀土元素能级结构中,总是存在一个与被放大光波长匹配的亚稳态能级,相对于基态能级,它又被称为上能级,通过该能级与基态能级之间的辐射跃迁,信号光被放大.因此,可以说,上能级的粒子数比例决定了光信号的增益.除发生受激辐射外,上能级的粒子还存在着自发辐射.一般,可以用信号增益和噪声系数(由放大的自发辐射功率决定)等参数来表征光纤放大器的特性.因此,光纤放大器的特性与上能级的粒子数分布密切相关^[1,2].近年来,为了满足密集波分复用(DWDM)系统和空间激光通信系统对高功率光纤放大器的需求,人们开始研发新一代基于包层泵浦技术的双包层Er-Yb共掺光纤放大器^[3-6],这种光纤放大器具有双包层光纤结构的特点,以及Er³⁺和Yb³⁺两种稀土元素同时参与能量传递,使得光信号获得增益的过程相对复杂.本文根据Er³⁺和Yb³⁺之间的能量传递过程,建立双包层Er-Yb共掺光纤放大器的粒子数密度的速率方程和功率传播方程,探讨972 nm泵浦的双包层Er-Yb共掺光纤放大器在三种不同泵浦方式作用下,Er³⁺和Yb³⁺的上能级粒子数分布情况.

1 双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器的理论模型

图1描述了Er-Yb共掺系统的能量传递关系.根据Yb-Er能量传递过程以及各参量在此过程中影

响的大小,考虑以下传递过程:1)Yb³⁺的²F_{7/2}能级对泵浦光子吸收;2)Yb³⁺的²F_{5/2}能级的受激发射;3)Yb³⁺的²F_{5/2}能级的自发辐射衰减;4)Yb³⁺对Er³⁺的能量传递:²F_{5/2} + ⁴I_{15/2} → ²F_{7/2} + ⁴I_{11/2};5)Er³⁺的⁴I_{15/2}能级的受激吸收;6)Er³⁺的⁴I_{13/2}能级的受激发射;7)Er³⁺的⁴I_{13/2}能级的自发辐射衰减;8)两个处于⁴I_{13/2}能级的成对Er³⁺间的合作上转换.设N₁、N₂、N₃和N₄分别是Er³⁺的⁴I_{15/2}、⁴I_{13/2}、⁴I_{11/2}和⁴I_{9/2}能级上的粒子数密度,N₅、N₆分别是Yb³⁺的²F_{5/2}和²F_{7/2}能级上的粒子数密度.从亚稳态⁴I_{13/2}分别到基态⁴I_{15/2}和受激态⁴I_{9/2}的合作上转换过程用二次项描述,系数C_{up}来表示;从Yb³⁺到Er³⁺的能量传递过程用交叉弛豫系数C_{cr}来表示.可以得到Er³⁺和Yb³⁺粒子数密度的速率方程

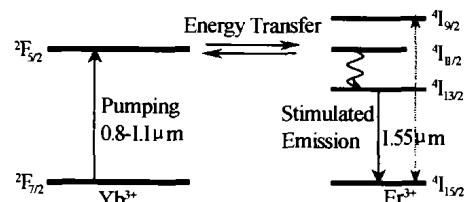


图1 Er-Yb共掺系统的能量传递模型
Fig. 1 Model of energy transfer in an Er-Yb system

$$\frac{\partial N_2(z,r)}{\partial t} = W_{12} N_1(z,r) - W_{21} N_2(z,r) -$$

$$\frac{N_2(z,r)}{\tau_{21}} + C_{cr} N_1(z,r) N_6(z,r) - C_{up} N_2^2(z,r) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_6(z,r)}{\partial t} = W_{56} N_5(z,r) - \frac{N_6(z,r)}{\tau_{65}} - W_{65} N_6(z,r) - C_{cr} N_1(z,r) N_6(z,r) \quad (2)$$

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

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

式中W_{ij}表示能级i和j之间的受激吸收和受激发射跃迁几率,τ₂₁和τ₆₅分别是Er³⁺能级⁴I_{13/2}和Yb³⁺能

*西安通信学院2003年度科研项目资助课题
Tel:029-88447009 Email:xgjb@163.com
收稿日期:2003-06-30

级 $F_{5/2}$ 上的自发辐射寿命, N_{Er} 和 N_{Yb} 分别是 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 的总粒子数密度. 信号光的受激吸收和受激发射跃迁几率分别为

$$W_{12}(z, r) = P_s(z) \psi_s(z, r) \sigma_{12}(v_s) / h\nu_s \quad (5)$$

$$W_{21}(z, r) = P_s(z) \psi_s(z, r) \sigma_{21}(v_s) / h\nu_s \quad (6)$$

式中, $\sigma_{12}(v_s)$ 和 $\sigma_{21}(v_s)$ 分别是信号光的吸收截面和发射截面, $P_s(z)$ 是信号功率, $\psi_s(z, r)$ 是信号光在纤芯横截面上归一化光强分布, 可近似成半径为 ω 的高斯函数, 满足

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\infty \phi_k(r, \phi) r dr d\phi = 1 \quad (7)$$

对于泵浦光的受激吸收和受激发射跃迁几率, 可以引入泵浦光的重叠因子 $\Gamma_p(v)$ 得到

$$W_{56}(z) = \frac{\Gamma_p(v) \sigma_{56}(v_p)}{h\nu_p A_{core}} (P_p^+(z) + P_p^-(z)) \quad (8)$$

$$W_{65}(z) = \frac{\Gamma_p(v) \sigma_{65}(v_p)}{h\nu_p A_{core}} (P_p^+(z) + P_p^-(z)) \quad (9)$$

式中, $\sigma_{56}(v_p)$ 和 $\sigma_{65}(v_p)$ 分别是泵浦光的吸收和发射截面, A_{core} 是纤芯截面积, $P_p^+(z)$ 和 $P_p^-(z)$ 分别是前向和后向传播的泵浦功率; 对于双包层光纤, 泵浦光在内包层中传播, 从侧面进入纤芯, $\Gamma_p(v)$ 约等于纤芯面积与内包层面积之比.

信号功率和前向、后向泵浦功率传播方程分别为

$$\frac{\partial P_s(z)}{\partial z} = \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty [N_2(z, r) \sigma_{21} - N_1(z, r) \sigma_{12}] \cdot \phi(r, \phi) r dr d\phi - \alpha \right\} P_s(z) \quad (10)$$

$$\frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \pm (\Gamma_p [\sigma_{65} N_6(z) - \sigma_{56} N_5(z)] \cdot P_p(z) - \alpha_p P_p(z)) \quad (11)$$

式中, α_s 、 α_p 分别是信号光、泵浦光在光纤中的传输吸收系数.

在数值分析 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 上能级粒子数分布时, 必须对不同泵浦方式的边界条件作如下考虑

前向泵浦: $P_s(0) = P_s^{in}$, $P_p^+(0) = P_{pf}^{in}$

后向泵浦: $P_s(0) = P_s^{in}$, $P_p^-(L) = P_{pb}^{in}$

双向泵浦: $P_s(0) = P_s^{in}$, $P_p^+(L) = P_{pf}^{in}$, $P_p^-(L) = P_{pb}^{in}$

式中, P_s^{in} 是输入信号功率, P_{pf}^{in} 、 P_{pb}^{in} 分别是前向、后向输入泵浦功率, L 是光纤长度.

2 数值分析

实际中, 由于泵浦方式的不同以及信号功率、泵浦功率的差异都将直接影响到上能级粒子数分布, 因此, 在的数值分析中, 我们将探讨在 972 nm 泵浦功率的作用下, 对于不同的泵浦方式, 其 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 上能级粒子数分布情况. 本文数值分析的相

关参数取值为: Er^{3+} 、 Yb^{3+} 浓度分别是 $1.35 \times 10^{25} m^{-3}$ 、 $8.50 \times 10^{26} m^{-3}$; 光纤长度是 18.0 m, 纤芯半径是 3.3 μm , 纤芯数值孔径是 0.16; Er^{3+} 、 Yb^{3+} 的自发辐射寿命分别是 11.0 ms 和 0.35 ms; 交叉弛豫系数 $C_{cr} = 3.0 \times 10^{-22} m^3/s$, 上转系数 $C_{up} = 1.1 \times 10^{-23} m^3/s$, 背景损耗系数是 15 dB/km; 泵浦功率是 1.2 W.

2.1 同向泵浦的上能级粒子数分布

图 2 所示为同向泵浦时, Er^{3+} 和 Yb^{3+} 上能级归一化粒子数的分布情况, 从图 2(a) 可以看出, 在较小功率信号(输入信号功率为 -10 dBm)入射时, 在距离光纤的输入端较近(光纤长度小于 1.5 m)处, Er^{3+} 的激发率大于 80%; 随着光纤长度增加, Er^{3+} 上能级的粒子数下降尤为明显; 当光纤长度增至 4 m 以后, Er^{3+} 的激发率开始趋于稳定, 并保持 50% 以上, 但接近于 50%. 这个过程说明, 当光纤中传播的信号功率较小时, Er^{3+} 的激发率随信号功率的增加下降显著; 但是, 一旦当传播的信号功率超过某个值时, Er^{3+} 的激发率渐渐趋于稳定值.

在图 2(a) 中, Yb^{3+} 的激发率低于 9%, 这是由于 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 之间发生能量传递时, 主要发生 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 的能量传递过程, 基本上不存在 Er^{3+} 到 Yb^{3+} 的能量反传递过程; 因此, Yb^{3+} 上能级粒子数很容易由于能量传递而被消耗.

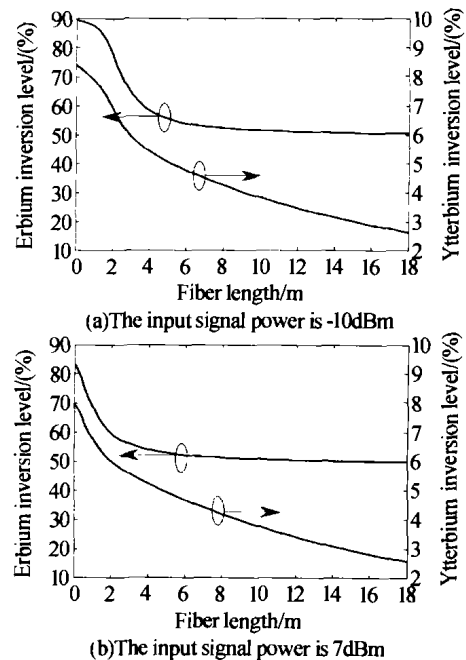


图 2 同向泵浦时, Er^{3+} 和 Yb^{3+} 上能级归一化粒子数沿光纤长度的分布

Fig. 2 Normalized population distribution of the Er^{3+} and Yb^{3+} upper state along the fiber length under the co-propagating pumping scheme

图 2(b) 所示为大信号(输入信号功率约为 7 dBm)输入的情况, 在距离光纤的输入端较近处, Er^{3+} 的激发率明显比图 2(a) 所示的 Er^{3+} 的激发率

低;这是由于在大信号入射情况下,信号光相对容易激发 Er^{3+} 上能级的粒子数发生跃迁,而消耗上能级粒子数;一旦光纤长度超过 3 m, Er^{3+} 的激发率渐渐趋于稳定值. 在图2(b)中, Yb^{3+} 的激发率低于8%.

2.2 反向泵浦的上能级粒子数分布

图3所示为反向泵浦时, Er^{3+} 和 Yb^{3+} 上能级归一化粒子数的分布情况,图3(a)是较小功率信号(入射信号功率为 -10 dBm)入射时的结果;图3(b)是大信号(入射信号功率为 7 dBm)入射时的结果. 首先,观察 Er^{3+} 上能级归一化粒子数的分布情况,与图2进行比较,发现反向泵浦与同向泵浦有着相近的曲线变化趋势,但在光纤入射信号的输入端附近(光纤长度小于 2 m)处, Er^{3+} 的激发率明显低于同向泵浦时的相应值,这由于在光纤入射信号输入端,泵浦功率被严重吸收而减小的缘故. 但是当光纤长度超过 4 m 以后,一旦传播的信号功率超过某个值, Er^{3+} 的激发率渐渐趋于稳定值,并保持在 50% 以上,这一点变化趋势与同向泵浦方式相似.

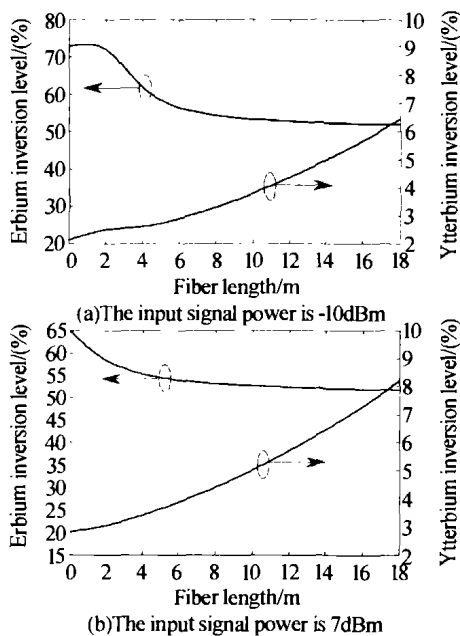


图3 反向泵浦时, Er^{3+} 和 Yb^{3+} 上能级归一化粒子数沿光纤长度的分布

Fig. 3 Normalized population distribution of the Er^{3+} and Yb^{3+} upper state along the fiber length under the counter-propagating pumping scheme

对于 Yb^{3+} 上能级归一化粒子数的分布情况,图3与图2比较,反向泵浦和同向泵浦方式的 Yb^{3+} 上能级粒子数分布曲线有着近似的反演关系,这说明光纤中传播的泵浦功率大小对 Yb^{3+} 上能级子数分布的影响明显,当泵浦功率相对高时, Yb^{3+} 的激发率相对大,随着泵浦功率的吸收, Yb^{3+} 的激发率随之减小. 图3(a)和图3(b)中 Yb^{3+} 的激发率均低于 10%.

2.3 双向泵浦的上能级粒子数分布

图4所示为双向泵浦时, Er^{3+} 和 Yb^{3+} 上能级归一化粒子数的分布情况,图4(a)是较小功率信号(入射信号功率为 -10 dBm)入射时的结果;图4(b)是大信号(入射信号功率为 7 dBm)入射时的结果. 首先,观察 Er^{3+} 上能级归一化粒子数的分布情况,与图2和图3比较,发现三种泵浦方式都有着相近的曲线变化趋势,但在光纤入射信号的输入端附近(光纤长度小于 2 m)处,双向泵浦的 Er^{3+} 的激发率明显高于同向泵浦和反向泵浦时的相应值,但当光纤长度超过 4 m 以后,一旦传播的信号功率超过某个值, Er^{3+} 的激发率渐渐趋于稳定值,并保持在 50% 以上,关于这一点,三种泵浦方式的 Er^{3+} 上能级粒子数曲线具有极其相似的变化趋势. 再观察 Yb^{3+} 上能级粒子数分布,可见,双向泵浦的条件下,在靠近光纤的端点位置处, Yb^{3+} 的激发率较大,在接近光纤的中央处, Yb^{3+} 的激发率相对较小;这是由于在光纤的两端泵浦功率比中央附近处的泵浦功率大的缘故. 图4(a)和图4(b)中 Yb^{3+} 的激发率均低于 10%.

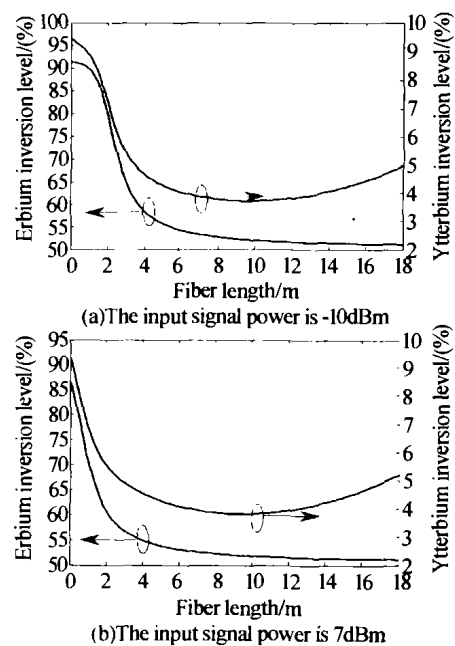


图4 双向泵浦时, Er^{3+} 和 Yb^{3+} 上能级归一化粒子数沿光纤长度的分布

Fig. 4 Normalized population distribution of the Er^{3+} and Yb^{3+} upper state along the fiber length under the bi-propagating pumping scheme

3 结论

本文从理论上分析双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器在 972 nm 泵浦作用下,对于三种不同泵浦方式,其 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 上能级粒子数分布情况. 结果表明, Er^{3+} 上能级粒子数分布受信号功率大小影响作用大,激发率基本保持在 50% 以上; Yb^{3+} 上能级粒子数分布受泵浦功率大小影响作用大,激发率基本保

持在 10% 以下. 通过分析, 得到 Yb^{3+} 的激发率比较低 ($<10\%$), 因此, 我们在分析双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器放大的自发辐射 (ASE) 时, 可以忽略 Yb^{3+} 波段附近 (频带带宽大约为 850 ~ 1100 nm) 的 ASE \pm 光, 只考虑 Er^{3+} 波段附近 (频带带宽大约为 1450 ~ 1650 nm) 的 ASE \pm 光; 同时, 还可以忽略 Yb^{3+} 上能级的受激发射过程. 从而可以合理简化双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器的数学模型, 便于理论分析.

本文的速率方程和功率传播方程没有考虑 ASE 功率谱的影响 (关于 ASE 对该放大器性能的影响另文将作分析), 所以会引入一定误差, 但是由于双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器 Er^{3+} 上能级具有很长的自发辐射寿命 (~ 11 ms), 其影响作用很小; 另外, ASE 功率只在光纤的输入端附近 (信号光的注入端) 具有较大值, 这是由于反向放大的自发辐射的积累缘故, 因此, 可以认为, ASE 仅仅消耗了光纤输入端少量的上能级粒子数, 对整个粒子数的分布影响不具明显性. 所以, 本文的分析方法是有效的, 分析结果对双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器的性能研究具有一

定指导意义.

参考文献

- 1 Masuda H. Local fractional population measurement of the upper state $^4\text{I}_{13/2}$ of an erbium-doped fiber amplifier. *J Lightwave Technol*, 1992, **10**(11): 1540 ~ 1543
- 2 庞勇, 蒋佩璇, 徐大雄. 1480 nm 泵浦的掺铒光纤放大器上能级粒子数分布. *光子学报*, 1996, **25**(2): 170 ~ 174
Pang Y, Jiang P X, Xu D X. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(2): 170 ~ 174
- 3 Hofer R, Hofer M, Reider G A. High energy, sub-picosecond pulses from a Nd-doped double-clad fiber laser. *Opt Commun*, 1999, **169**(1): 135 ~ 139
- 4 Sucha G, Endert H. Femtosecond fiber lasers hit power highs. *Laser Focus World*, 2000, **36**(8): 133 ~ 136
- 5 Dominic V, MacCormack S, Waarts R, et al. 110W fibre laser. *Electron Lett*, 1999, **35**(14): 1158 ~ 1160
- 6 夏贵进, 赵尚弘, 董淑福, 等. 双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器的特性分析. *光电子·激光*, 2003, **14**(5): 473 ~ 477
Xia G J, Zhao S H, Dong S F, et al. *J Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(5): 473 ~ 477

Study on the Upper State Population Distribution of Double Cladding Erbium-ytterbium Co-doped Fiber Amplifiers

Xia Guijin, Zhang Jumei, He Haiguang

Communication Engineering Department, Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106

Received date: 2003-06-30

Abstract Based on rate and power propagation equations, the upper state population distribution of Er^{3+} and Yb^{3+} of an double cladding erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier was analyzed numerically under three different 972 nm pumping scheme. It was shown that the upper state population distribution of Er^{3+} is chiefly affected by signal power and its lasing rate is almost kept upward of 50%; and that the upper state population distribution of Yb^{3+} is chiefly affected by pump power and its lasing rate is almost kept under 10%. The results could be important for the characteristic investigation of double cladding erbium-ytterbium co-doped fiber amplifiers.

Keywords Fiber amplifiers; Double cladding; Upper state; Population distribution



Xia Guijin was born on July 18, 1977, in Chengkou County, Chongqing, China. He received the degree of bachelor of engineering from Xi'an communication institute, in 2000, and the master degree of engineering from Xi'an Telecommunication Engineering Institute, in 2003. Now he is a teacher of Xi'an Communication Institute, working on the optical fiber amplifiers and learning the course of telecom network.