

文章编号 1004-924X(2008)08-01349-05

双包层 Yb/Er 共掺光纤放大器的数值模拟

赵崇光^{1,2}, 宁永强¹, 刘 洋^{1,2,4}, 王 蓊^{1,2,3}, 王立军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022;

4. 武汉军械士官学校, 湖北 武汉 430075)

摘要:为优化光纤放大器结构,对 980 nm 抽运的双包层 Yb/Er 共掺光纤放大器进行了数值模拟,分析了不同功率下信号光的增益,计算了稳态情况下光纤中的反转粒子数、抽运光功率、信号光功率沿光纤轴向的分布以及放大器的斜率效率。根据数值模拟的结果,采用 10 m 长的双包层 Yb/Er 共掺光纤建立了光纤放大器实验装置。最大光纤抽运功率为 6 W,初始信号光功率为 0.5 W 时,获得了 1.9 W 的最大输出功率,斜率效率为 23.4%。

关键词:光纤放大器;双包层 Yb/Er 共掺光纤;数值模拟

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Numerical analysis of Yb/Er co-doped double cladding fiber amplifier

ZHAO Chong-guang^{1,2}, NING Yong-qiang¹, LIU Yang^{1,2,4}, WANG Ji^{1,2,3}, WANG Li-jun¹

(1. *Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*; 4. *Opto-electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-commissioned Officers Academy, Wuhan 430075, China*)

Abstract: To optimize the fiber amplifier, an Yb/Er co-doped double cladding fiber amplifier pumped at 980 nm was analyzed numerically. The gain of the amplifier with different signal powers was analyzed and the distribution of population inversion, pump power and signal power along the axis direction of the fiber were calculated at stable state. According to the numerical results, a fiber amplifier with 10 m Yb/Er co-doped double cladding and launched maximum pump power of 6 W was set up. Proposed amplifier shows the maximum output power of 1.9 W and slope efficiency of 23.4% on conditions of the initial signal power of 0.5 W.

Key words: fiber amplifier; Yb/Er co-doped double cladding fiber; numerical analysis

收稿日期:2007-12-02;修订日期:2008-01-24.

基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(No. K04M092)

1 引言

由于发光波段处于光通讯波段,掺 Er 光纤光源得到了广泛的关注^[1-3]。高功率的光纤激光器和放大器对于远距离大容量的通讯系统十分重要,而提高功率,必须应用双包层结构和高浓度 Er 离子掺杂光纤。但这种光纤在 Er 离子浓度过大,Er 离子间的距离较短时,两个相邻的处在⁴I_{13/2}激发态的 Er 离子会相互作用,进行能量转换,发生上转换^[2],降低量子转化效率(QCE)^[3],并且 Er 离子浓度过大还会导致 Er 离子的团簇。目前,所得到的纯硅基质中掺杂质量比一般为数百个 10⁻⁶^[4],所以采用加大离子浓度的方法来提高增益有一定的局限性,尽管铝的加入可以抑制浓度淬灭,将掺杂质量比提高到 1 × 10⁻³,但其作用也有限。在掺铒光纤中共掺杂 Yb 离子,可以减少 Er 离子团簇效应和上转换发生的几率^[5-6]。另外,能量传递提供了一种间接的抽运机制,使 Yb 离子向 Er 离子传递能量的效率非常高,从而使 Er/Yb 共掺光纤的抽运波长可以扩展到 Yb 的吸收带。现在,双包层 Yb/Er 共掺光纤已广泛地应用于高功率的激光器和放大器中^[7-10]。

本文借助光功率的输运方程对 980 nm LD 抽运的双包层 Yb/Er 共掺光纤放大器进行了数值模拟。分析了稳态时放大器的增益,计算了稳态情况下光纤中反转粒子数、抽运光功率和信号光功率沿光纤轴向的分布。

2 数值模拟

在 Yb/Er 共掺系统中,Yb 离子起能量传递的作用,发光离子为 Er 离子,用能级表示 Yb、Er 离子的跃迁和两离子间的能量传递,如图 1 所示。

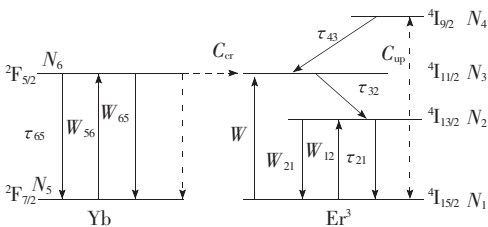


图 1 铒镱共掺系统能级图

Fig. 1 Sketch energy level of Er/Yb co-doped system

Er³⁺的⁴I_{15/2}、⁴I_{13/2}、⁴I_{11/2}和⁴I_{9/2}上的粒子数密度分别用 N₁、N₂、N₃和 N₄表示,Yb³⁺的²F_{5/2}和²F_{7/2}上的粒子数密度分别用 N₆和 N₅表示,N_{Yb}和 N_{Er}分别为 Yb 和 Er 的掺杂浓度。在 Er/Yb 共掺光纤中,Yb 离子吸收抽运光被激发到²F_{5/2}能级上,在 Er 离子被激发到⁴I_{11/2}能级后,Yb 离子将能量传递给 Er 后就返回到基态,而吸收了能量的 Er 离子通过弛豫迅速地⁴I_{11/2}能级上返回到⁴I_{13/2}能级上,这就在⁴I_{13/2}和⁴I_{15/2}能级间形成粒子数反转。Er³⁺/Yb³⁺共掺系统的速率方程可写为:

$$\frac{dN_4}{dt} = -\frac{N_4}{\tau_{43}} + C_{up}N_2^2 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{13}N_1 - \frac{N_3}{\tau_{32}} + \frac{N_4}{\tau_{43}} + C_{cr}N_1N_6 = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 + \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} - 2C_{up}N_2^2 = 0, \quad (3)$$

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

$$\frac{dN_6}{dt} = W_{56}N_5 - \frac{N_6}{\tau_{65}} - W_{65}N_6 - C_{cr}N_1N_6 = 0, \quad (5)$$

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

式中,W_{ij}表示能级 i 和 j 之间的受激吸收或受激辐射跃迁的几率,τ₂₁和 τ₆₅表示⁴I_{13/2}和²F_{5/2}能级上粒子自发辐射的寿命,τ₄₃和 τ₃₂表示⁴I_{9/2}和²I_{11/2}能级上粒子自发辐射的寿命,二次项系数 C_{up}表示从⁴I_{13/2}态分别到⁴I_{15/2}态和⁴I_{9/2}态的能量上转换过程,交叉弛豫系数 C_{cr}表示从 Yb³⁺到 Er³⁺的能量传递过程。跃迁的几率可表示为:

$$W_{ij} = \frac{\lambda P}{hcA} \sigma_{ij}, \quad (7)$$

在 Er³⁺/Yb³⁺共掺光纤中,由于镱离子的加入,有效地抑制了高浓度铒离子之间的能量上转换过程,所以,在实际的计算过程中可以不考虑铒离子的能量上转换过程。在大信号增益的连续放大情况下,忽略了放大的自发辐射(ASE),又由于 Er³⁺的⁴I_{11/2}和⁴I_{9/2}能级上粒子寿命远 < ⁴I_{13/2}能级上粒子寿命(τ₄₃ ≈ 1 ns, τ₃₂ ≈ 0.1 μs, τ₂₁ ≈ 11 ms^[8-9])。

故式(1)~(6)可简化:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{\Gamma_s \lambda_s P_s}{hcA} [\sigma_{eEr}(\lambda_s)N_2 - \sigma_{aEr}(\lambda_s)N_1] + \frac{\Gamma_p \lambda_p P_p}{hcA} [\sigma_{aEr}(\lambda_p)N_1 - \sigma_{eEr}(\lambda_p)N_2] + \frac{N_2}{\tau_{21}} + C_{cr}N_1N_6 - C_{up}N_2^2 = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial N_6}{\partial t} = \frac{\Gamma_p \lambda_p P_p}{hcA} [\sigma_{aYb}(\lambda_p) N_5 - \sigma_{eYb}(\lambda_p) N_6] - \frac{N_6}{\tau_{65}} - C_{cr} N_1 N_6 = 0, \quad (9)$$

放大器稳态运行时,速率方程的解为:

$$N_6 = \frac{\frac{\Gamma_p \lambda_p P_p}{hcA} \sigma_{aYb}(\lambda_p) N_{Yb}}{\frac{\Gamma_p \lambda_p P_p}{hcA} [\sigma_{aYb}(\lambda_p) + \sigma_{eYb}(\lambda_p)] + \frac{1}{\tau_{65}} + C_{cr} (N_{Er} - N_2)}, \quad (10)$$

$$N_2 = \frac{N_{Er} \left[\frac{\Gamma_s \lambda_s P_s}{hcA} \sigma_{aEr}(\lambda_s) + \frac{\Gamma_p \lambda_p P_p}{hcA} \sigma_{aEr}(\lambda_p) + C_{cr} N_6 \right]}{\frac{1}{\tau_{21}} + \frac{\Gamma_s \lambda_s P_s}{hcA} [\sigma_{aEr}(\lambda_s) + \sigma_{eEr}(\lambda_s)] + \frac{\Gamma_p \lambda_p P_p}{hcA} [\sigma_{aEr}(\lambda_p) + \sigma_{eEr}(\lambda_p)] + C_{cr} N_6}, \quad (11)$$

抽运光、信号光的功率传输方程为^[10-12]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_p}{\partial z} = & -\Gamma_p [\sigma_{aYb}(\lambda_p) N_5 - \sigma_{eYb}(\lambda_p) N_6] + \\ & \sigma_{eEr}(\lambda_p) N_1 - \sigma_{eEr}(\lambda_p) N_2] \cdot P_p - \alpha(\lambda_p) P_p = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = \Gamma_s [\sigma_{eEr}(\lambda_s) N_2 - \sigma_{aEr}(\lambda_s) N_1] P_s - \alpha(\lambda_s) P_s = 0, \quad (13)$$

其中, h 为普朗克常数, c 是光速, A 是纤芯掺杂面积, $\sigma_{aYb}(\lambda)$ 和 $\sigma_{aEr}(\lambda)$ 分别是 Yb 和 Er 在不同波长的吸收截面, $\sigma_{eYb}(\lambda)$ 和 $\sigma_{eEr}(\lambda)$ 分别是 Yb 和 Er 在不同波长的发射截面。 P_s 是信号光功率, P_p 为抽运光功率。 Γ_s 和 Γ_p 分别是信号光和抽运光的重叠因子。由于抽运光是多模的,内包层截面远大于纤芯截面,可以假定抽运光在光纤内包层径向服从均匀分布,纤芯中传输的抽运光功率与总的抽运功率的比值近似为纤芯截面与内包层截面之比。基模传输的信号光光场分布函数采用高斯分布近似,假定光纤归一化的掺杂直径为纤芯直径 D ,信号光的模场直径 ω ,信号光重叠因子^[10]:

$$\Gamma_s = 1 - e^{-(D_{core}/2)^2/\omega^2}, \quad (14)$$

由于方程(9),(10),(11),(12)互有耦合项的存在,很难求出解析解。抽运光波长选取为 980 nm,激光光波长选取为 1 550 nm。运用 MATLAB 对上述方程进行数值求解,放大器所用的双包层光纤长度为 10 m,设放大器的初值条件:

$$\begin{cases} P_p(0) = P_p0 \\ P_s(0) = P_s0 \end{cases}, \quad (15)$$

通过改变参数,可以求出不同初值下的放大功率。数值计算所用的参数如下:

$$\begin{aligned} \sigma_{aYb}(\lambda_p) &= 2.0 \times 10^{-24} \text{ m}^2, \sigma_{eYb}(\lambda_p) = 1.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2, \\ \sigma_{aEr}(\lambda_p) &= 5.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2, \sigma_{eEr}(\lambda_p) = 5.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2, \\ \sigma_{aEr}(\lambda_s) &= 7 \times 10^{-25} \text{ m}^2, \sigma_{eEr}(\lambda_s) = 7 \times 10^{-25} \text{ m}^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{cr} &= 2.02 \times 10^{-22} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}, D_{core} = 7 \text{ } \mu\text{m} \\ \alpha_p &= 3.45 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}, N_{Er} = 1 \times 10^{25}, N_{Yb} = 1 \times 10^{26}, \\ \alpha_s &= 3.45 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}, \tau_{21} = 11 \text{ ms}, \\ \tau_{65} &= 1.5 \text{ ms}, \Gamma_s = 0.85, \Gamma_p = 0.0028 \end{aligned}$$

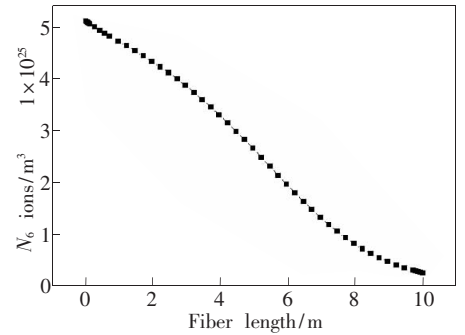


图 2 N_6 随光纤轴向的分布 ($P_s0=0.1 \text{ W}$; $P_p0=4 \text{ W}$)
Fig. 2 Calculated distribution of upper energy level population N_6 along axis direction of the fiber ($P_s0=0.1 \text{ W}$; $P_p0=4 \text{ W}$)

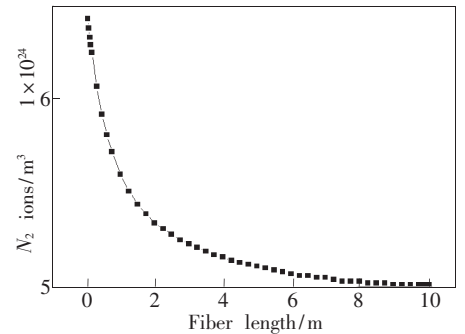


图 3 N_2 随光纤轴向的分布 ($P_s0=0.1 \text{ W}$; $P_p0=4 \text{ W}$)
Fig. 3 Calculated distribution of upper energy level population N_2 along axis direction of the fiber ($P_s0=0.1 \text{ W}$; $P_p0=4 \text{ W}$)

放大器的增益表达式为:

$$G = \exp \int_0^L [\sigma_{eEr}(\lambda_s) N_2 - \sigma_{aEr}(\lambda_s) N_1] dz, \quad (16)$$

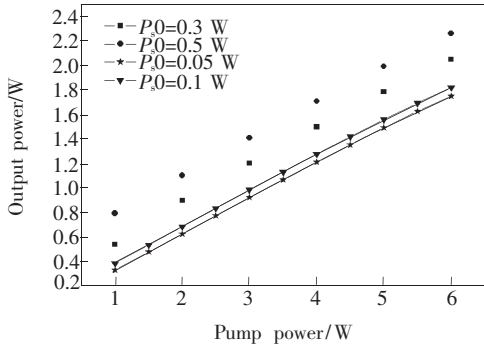


图 4 计算的放大器的输出功率 ($P_s0=0.05, 0.1, 0.3, 0.5$ W)
 Fig. 4 Calculated output power of fiber amplifier ($P_s0=0.05, 0.1, 0.3, 0.5$ W)

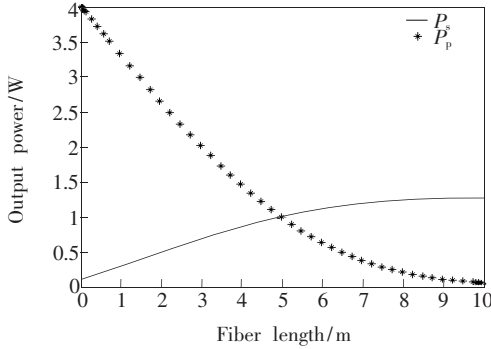


图 5 功率随光纤轴向的分布 ($P_s0=0.1$ W; $P_p0=4$ W)
 Fig. 5 Calculated power distribution along axis direction of the fiber ($P_s0=0.1$ W; $P_p0=4$ W)

从计算的结果看,初始的信号光功率较小时,增益较大,当光纤长度 $L=10$ m,放大器在 6 W 的抽运功率下,对于 50 mW 的信号光,有大约 25 dB 的增益,而 100 mW 的信号光增益大约为 12 dB, 0.5 W 的信号光,只有大约 6 dB 的增益。而且,在一定的抽运功率下,光纤中粒子反转数 N_2 的分布也不均匀,几乎是沿抽运端呈指数下降,达到

一定长度时就变化平缓,接近某一常数,放大器接近最大输出功率 P_m 。

如图 6,从实验结果看,当信号功率较小时,输出功率并不是随抽运功率线性增加,而是随着抽运功率越大,输出功率随抽运功率的变化变得平缓。这是由于抽运功率加大时,放大的自发辐射(ASE)变大,消耗了粒子反转数。所以在信号光功率的初始值较小的情况下,必须考虑 ASE 对放大器的影响。

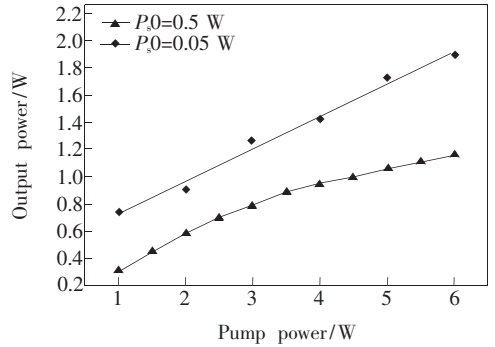


图 6 测得的放大器的输出功率 ($P_s0=0.05, 0.5$ W)
 Fig. 6 Measured output power of fiber amplifier ($P_s0=0.05, 0.5$ W)

3 结 论

利用功率传输方程,对稳态光纤放大器进行了数值模拟。由上能级粒子数随光纤长度的变化,可以看出放大器增益沿光纤轴向分布不均匀,靠近抽运端增益最大,且增益下降最快;由信号光和抽运光沿光纤轴向的分布可以得出在给定的抽运功率下,有一个最佳的光纤长度,使得抽运光被充分吸收,输出功率达到最大。综合考虑本文采用 10 m 长的双包层 Yb/Er 共掺光纤作为增益介质,在 6 W 的抽运功率下,0.5 W 的信号光功率放大为 1.9 W,测得的斜率效率为 23.4%。

参考文献:

[1] 乔学光,郭小东.基于光纤环形镜的 C+L 波段高平坦高功率掺铒光源[J].光学精密工程,2005,13(2):205-210.
 QIAO X G, GUO X D. High power, high flattening C+L band erbium-doped fiber source based on fiber loop mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 205-210. (in Chinese)
 [2] YE C C, MORTEL P R, TAYLOR E R, et al.. Direct observation of cooperative upconversion mechanisms in erbium-doped fiber amplifiers [C]. 19th ECOC, switzerland, 1993, 2: 73-76.
 [3] MEARS R J, REEKIE L, JAUNCE I M, et al.. Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μ m[J].

Elect. Lett., 1987, 23(19):1026-1028.

- [4] WAGENER J L, WYSOCKI P F, SHAW M J, *et al.*. Effects of concentration and clusters in erbium doped fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1993, 18(23):2014-2016.
- [5] KRINGLEBOTN J T, ARCHAMBAULT J L, REEKIE L, *et al.*. Highly efficient, low-noise grating feedback Er:Yb codoped fiber lasers[J]. *Elect. Lett.*, 1994, 30(12):972-973.
- [6] KRINGLEBOTN J T, MORTEL P R, REEKIE L, *et al.*. Efficient diode-pumped single frequency erbium:ytterbium fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1993, 5(10):1162-1164.
- [7] 贾秀杰,郭占城. Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤的高功率 L-band 光纤激光器的实验研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3):341-345.
JIA X J, GUO ZH CH. Experimental investigation on co-doped double-clad high-power fiber laser in L-band[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):341-345. (in Chinese)
- [8] PASQUALE F D. Modeling of highly-efficient grating-feedback and Fabry-Perot Er³⁺-Yb³⁺ co-doped fiber laser [J]. *IEEE J Q E*, 1996, 32(2):326-332.
- [9] SHOOSHTARI A, MESHKINFAM P, TOUAM T, *et al.*. Ion-exchanged Er/Yb phosphate glass waveguide amplifiers and lasers[J]. *Opt. Engng*, 1998, 37(4):1188-1192.
- [10] GILES C R, CAETA C J. Modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1991, 9:1321-1329.
- [11] KARVSEK M. Optimum design of Er³⁺-Yb³⁺ co-doped fibers for large signal high-pump-power applications[J]. *IEEE J Q E*, 1997, 33(10):1699-1705.
- [12] ACHTENHAGEN M, BEESON R J, PAN F, *et al.*. Gain and noise in ytterbium sensitized erbium-doped fiber amplifiers: measurements and simulations[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2001, 19(10):1521-1526.

作者简介:赵崇光(1978—),男,湖北汉川人,博士研究生,研究方向为光纤激光器和放大器。E-mail:zcgarrow@126.com

导师简介:王立军(1946—),男,吉林舒兰人,博士生导师,研究员,研究方向为大功率半导体激光器。E-mail:wanglj@ciomp.ac.cn