

文章编号: 1001-3806(2006)02-0198-04

超宽带 Er, Tm 共掺石英光纤放大器稳态研究

郑光威, 赵尚弘*, 李玉江, 胥杰, 张虎, 樊国丽, 杨庆华
(空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710077)

摘要: 分析了波长为 980nm 激光抽运下的 Er³⁺, Tm³⁺ 共掺石英光纤放大器的工作原理, 并根据此工作原理, 建立了 Er³⁺ 与 Tm³⁺ 之间能量转移过程的数学模型。基于速率方程和功率传输方程, 数值模拟了此种光纤放大器稳态工作特性, 给出了不同光纤长度、不同输入抽运功率以及不同掺 Tm³⁺ 浓度下多路光信号放大时输出信号功率谱的变化规律。仿真结果表明, 当输入抽运功率为 400mW 时, Er, Tm 共掺石英光纤放大器的 3dB 带宽可达 90nm (比传统掺 Er³⁺ 光纤放大器的增益带宽大两倍以上), 平均增益可达 10dB, 可用于未来密集复用系统 (DWDM) 中的宽带放大器。

关键词: 光纤光学; Er, Tm 共掺石英光纤放大器; 速率方程和功率传输方程; 密集波分复用 (DWDM)

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Analysis of steady state operation of ultra-wide band Er, Tm co-doped silica fiber amplifier

ZHENG Guang-wei, ZHAO Shang-hong, LI Yu-jiang, XU Jie, ZHANG Hu, FAN Guo-li, YANG Qing-hua

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

Abstract The operation principal of Er³⁺, Tm³⁺ co-doped silica fiber amplifier is presented when pumped at 980nm. Depending on the principal mathematical model of energy transfer process between Er³⁺ and Tm³⁺ ions is established. Based on the rate and propagation equations, numerical simulation of its steady state operation properties is performed and the simulation of output power spectrum of several channel signals as a function of different factors (such as different fiber length, different pump power, and different Tm³⁺ ions concentration) is also given. The simulation results show that the amplifying bandwidth of this fiber is up to 90nm (twice larger than the traditional Er-doped fiber amplifier) and the average gain is up to 10dB when the pump power is just 400mW. Its characteristic of ultrawideband amplifying is useful for DWDM in the near future.

Key words fiber optics; Er, Tm co-doped silica fiber amplifier; rate equations and propagation equations; dense wavelength division multiplexing (DWDM)

引 言

密集波分复用 (DWDM) 技术的发展, 在一定程度上解决了通信带宽匮乏的问题。其中, 作为密集波分复用系统中最关键的器件——宽带光纤放大器对于密集波分复用技术的实用化起着至关重要的作用。当前, 掺铒光纤放大器 (EDFA) 已能分别放大处于 C 波段^[1]和 L 波段的光信号, 并已处于实用化阶段, 但随着人们对于通信容量的不断提高, 光纤放大器的低带宽放大特性已不能满足 DWDM 的发展, 并成为限制通信容量进一步增长的瓶颈。当前, 工作带宽在 100nm 以上的稀土掺杂宽带光纤放大器的研究已受到了广泛的关注。国外已有实验表明, Er³⁺, Tm³⁺ 共掺石英光纤可以获得超过 90nm 的超荧光输出^[2], 如果利用此

种光纤作为放大介质, 将可大大提高放大器的工作带宽, 进一步提高系统通信容量。作者正是由此实验出发, 分析了 Er³⁺, Tm³⁺ 共掺这一新型石英光纤在波长为 980nm 激光抽运下的工作过程。通过理论分析, 建立了在此波长激光抽运下 Er³⁺, Tm³⁺ 之间能量转移过程的数学模型, 并根据速率方程和功率传输方程数值模拟了此种光纤放大器的稳态工作特性。仿真结果表明: 该光纤放大器放大带宽为 1460nm ~ 1550nm, 比传统的 EDFA 的增益带宽高两倍以上, 这种超宽带放大特性无疑给应用于 DWDM 系统的宽带放大器的优化设计提供了一种可行的方案。

1 理论分析

Er³⁺, Tm³⁺ 离子能级示意图如图 1 所示。ESA 表示激发态的受激吸收, PQ 表示离子对感应猝灭, MPR 表示多声子弛豫过程, GSA 表示基态受激吸收。当此掺杂光纤由波长为 980nm 的激光抽运时, 在 Er³⁺ 离子和 Tm³⁺ 离子之间存在两种能量转移方式, 分别由图 1

作者简介: 郑光威 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为光通信、光纤放大器。

* 通讯联系人。E-mail: zhaoshangh@ yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-03-13 收到修改稿日期: 2005-04-20

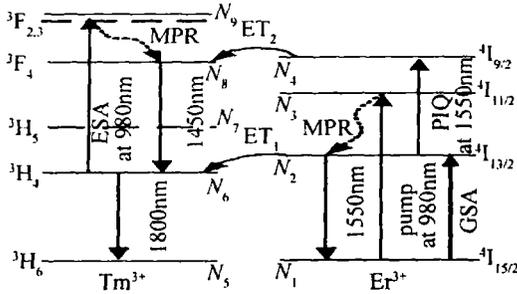


Fig 1 The schematic energy-level diagram of Er and Tm ions and energy-transfer routes between them

中的单向箭头 ET₁, ET₂ 所标示。处于基态 (⁴I_{5/2} 能级) 的 Er³⁺ 离子吸收抽运光被激发到高能级 ⁴I_{3/2}, 当 ⁴I_{3/2} 和 ⁴I_{5/2} 能级之间形成粒子数反转时, 就能够放大处于 C 波段的信号光。处于 ⁴I_{3/2} 能级上的 Er³⁺ 离子同时也可将能量转移给在其周围处于基态的 Tm³⁺ 离子, 使其跃迁到 ³H₄ 能级, 这一能量转移过程如图 1 中 ET₁ 所示。由于在石英基质中处于 ³H₄ 能级上的 Tm³⁺ 离子寿命较长 (大约 334 7μs^[31]), 因而在此能级上的 Tm³⁺ 离子可通过吸收 980nm 的抽运光被激励到更高能级 ³F_{2,3}, 这一过程被称为激发态受激吸收过程 (ESA), 但由于多声子弛豫作用, 处于 ³F_{2,3} 能级上的 Tm³⁺ 离子立刻无辐射跃迁到 ³F₄ 能级。Tm³⁺ 离子从基态被激发到 ³F₄ 能级还可直接通过 Er³⁺, Tm³⁺ 离子之间的能量转移过程来实现, 两相邻同处于 ⁴I_{3/2} 能级上的 Er³⁺ 离子, 通过能量上转换过程, 将一 Er³⁺ 离子能量转移到另一 Er³⁺ 离子上, 使其跃迁到更高能级 ⁴I_{9/2} 上, 而自身返回到基态 ⁴I_{5/2} 能级, 被激励到更高能级 ⁴I_{9/2} 上的 Er³⁺ 离子通过与相邻 Tm³⁺ 离子之间的相互作用, 将自身能量转移到相邻 Tm³⁺ 离子, 使 Tm³⁺ 离子从基态跃迁到 ³F₄ 能级, 而自身回到基态, 这一能量转移过程如图 1 中 ET₂ 所示。通过这两种能量转移方式, 可将 Tm³⁺ 离子激发到 ³F₄ 能级, 当能级 ³F₄ 与 ³H₄ 之间形成粒子数反转时, 就能够放大处于 S 波段的信号光。从上述分析可知, 当选取适当参数使得能级 ⁴I_{3/2} 与 ⁴I_{5/2} 能级 ³F₄ 与 ³H₄ 之间同时形成粒子数反转时, 就能够放大处于 S+ C 波段的信号光, 达到宽带放大的目的。

2 数学模型

从上述理论分析, 可得出波长为 980nm 激光抽运下各能级粒子数浓度表达式为 (为简化方程, 省略了参数 z, t):

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = - (W_{13} + W_{12})N_1 + (W_{21} + A_{21})N_2 + A_{31}N_3 + A_{41}N_4 + C_2N_2^2 + T_{25}N_2N_5 + T_{45}N_4N_5 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = W_{12}N_1 - (W_{21} + A_{21})N_2 + (NR_{32} + A_{32})N_3 + A_{42}N_4 - 2C_2N_2^2 - T_{25}N_2N_5 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = W_{13}N_1 - (A_3 + NR_{32})N_3 + (NR_{43} + A_{43})N_4 \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_4}{\partial t} = C_2N_2^2 - (A_4 + NR_{43})N_4 - T_{45}N_4N_5 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N_5}{\partial t} = - T_{25}N_2N_5 - T_{45}N_4N_5 + (A_6 + NR_{65})N_6 + A_{75}N_7 + A_{85}N_8 + A_{95}N_9 \quad (5)$$

$$\frac{\partial N_6}{\partial t} = T_{25}N_2N_5 + (-W_{69} - W_{68} + W_{86} + A_6 + NR_{65})N_6 + (A_{76} + NR_{76})N_7 + A_{86}N_8 + A_{96}N_9 \quad (6)$$

$$\frac{\partial N_7}{\partial t} = - (A_{75} + A_{76} + NR_{76})N_7 + A_{87}N_7 + A_{97}N_7 \quad (7)$$

$$\frac{\partial N_8}{\partial t} = T_{45}N_4N_5 + W_{68}N_6 - (W_{86} + A_{86} + A_{85} + A_{87})N_8 + (NR_{98} + A_{98})N_9 \quad (8)$$

$$\frac{\partial N_9}{\partial t} = W_{69}N_6 - (NR_{98} + A_{99}) \quad (9)$$

粒子数守恒方程为:

$$N_{Er} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (10)$$

$$N_{Tm} = N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + N_9 \quad (11)$$

式中, N₁, N₂, N₃ 和 N₄ 分别表示处于 ⁴I_{5/2}, ⁴I_{3/2}, ⁴I_{11/2} 和 ⁴I_{9/2} 能级上的 Er³⁺ 粒子数浓度, N₅, N₆, N₇, N₈ 和 N₉ 分别表示处于 ³H₆, ³H₄, ³H₅, ³F₄ 和 ³F_{2,3} 能级上的 Tm³⁺ 粒子数浓度, N_{Er}, N_{Tm} 分别表示 Er³⁺, Tm³⁺ 总的掺杂浓度。W_{ij} 表示受激辐射跃迁几率, A_j, A_i 表示自发辐射跃迁几率, NR_{ij} 表示无辐射跃迁几率, C₂, T₂₅ 和 T₄₅ 分别表示能量上转换系数和能量转移系数。W₁₃, W₆₉ 分别表示 Er³⁺, Tm³⁺ 对抽运光的受激吸收几率, W₁₂, W₂₁, W₆₈ 和 W₈₆ 表示信号光的受激吸收和受激辐射几率, 其数学表达式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} W_{13} &= \frac{\Gamma_p}{hcA} \int_{13}(\lambda) [P_{pf}(z, \lambda) + P_{pb}(z, \lambda)] \lambda d\lambda \\ W_{69} &= \frac{\Gamma_p}{hcA} \int_{69}(\lambda) [P_{pf}(z, \lambda) + P_{pb}(z, \lambda)] \lambda d\lambda \\ W_{12} &= \frac{\Gamma_s(\lambda)}{hcA} \int_{12}(\lambda) [P_{sf}(z, \lambda) + P_{sb}(z, \lambda)] \lambda d\lambda \\ W_{21} &= \frac{\Gamma_s(\lambda)}{hcA} \int_{21}(\lambda) [P_{sf}(z, \lambda) + P_{sb}(z, \lambda)] \lambda d\lambda \\ W_{68} &= \frac{\Gamma_s(\lambda)}{hcA} \int_{68}(\lambda) [P_{sf}(z, \lambda) + P_{sb}(z, \lambda)] \lambda d\lambda \\ W_{86} &= \frac{\Gamma_s(\lambda)}{hcA} \int_{86}(\lambda) [P_{sf}(z, \lambda) + P_{sb}(z, \lambda)] \lambda d\lambda \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中, Γ_p 和 Γ_s 分别表示抽运光和信号光的重叠因子, h 表示普朗克常量, c 表示光速, A 表示纤芯截面积, $\sigma_{13}(\lambda)$ 和 $\sigma_{69}(\lambda)$ 表示抽运光的受激吸收截面, $\sigma_{12}(\lambda)$, $\sigma_{21}(\lambda)$, $\sigma_{68}(\lambda)$, $\sigma_{86}(\lambda)$ 分别表示信号光在 Er^{3+} , Tm^{3+} 离子上的受激吸收和受激辐射截面. $P_{pf}(z, \lambda)$ 和 $P_{pb}(z, \lambda)$ 分别表示前向和后向抽运光功率, $P_{sf}(z, \lambda)$ 和 $P_{sb}(z, \lambda)$ 分别表示信号波长为 λ 的前向和后向光功率.

抽运光和信号光的传输方程可表示如下:

$$\pm \frac{dP_{pfpb}(z, \lambda)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_{13}(\lambda)N_1(z) + \sigma_{69}(\lambda) \times N_6(z)] P_{pfpb}(z, \lambda) - \alpha_p(z, \lambda) P_{pfpb}(z, \lambda) \quad (14)$$

$$\pm \frac{dP_{sf sb}(z, \lambda)}{dz} = \Gamma_{Er}(\lambda) [\sigma_{21}(\lambda)N_2(z) - \sigma_{12}(\lambda)N_1(z)] + \Gamma_{Tm}(\lambda) [\sigma_{86}(\lambda)N_7(z) - \sigma_{68}(\lambda)N_6(z)] P_{sf sb}(z, \lambda) + \Gamma_{sEr}(\lambda) \sigma_{21}(\lambda) N_2(z) P_{0Er}(z, \lambda) + \Gamma_{sTm}(\lambda) \sigma_{86}(\lambda) \times N_7(z) P_{0Tm}(z, \lambda) - \alpha_s(z, \lambda) P_{sf sb}(z, \lambda) \quad (15)$$

式中, α_p , α_s 是背景噪声, $P_{0s} = 2hc^2/\lambda^3 [4]$, 表示在信号光波段范围内的自发辐射值.

3 数值模拟

为便于模拟仿真, 可对上述过程作如下假设: (1) 由于 3H_5 和 $^3F_2, 3$ 能级上的粒子数寿命非常短, 分别为 $0.007\mu s$ 和 $0.0004\mu s [3]$, 因而在这两能级上的粒子数可被忽略; (2) 由于从 $^4I_{1/2}$ 到 $^4I_{3/2}$ 能级的多声子过程很迅速, 因而可以忽略 $^4I_{1/2}$ 能级上的粒子数; (3) 由于共掺石英光纤中 Er^{3+} , Tm^{3+} 离子的相互作用以及 Tm^{3+} 离子的存在使得 Er^{3+} 离子很难聚集, 抑制了处于 $^4I_{3/2}$ 能级上的 Er^{3+} 离子之间的能量上转换过程, 因此, 处于 $^4I_{3/2}$ 能级上的粒子数可忽略; (4) 基于同样的原因, 从 Er^{3+} 离子到 Tm^{3+} 离子的能量转移过程 ET_2 可被忽略. (14) 式和 (15) 式可通过 Runge-Kutta 迭代算法来解决. 本文中模拟仿真所用到的参数 [2, 5~9], 如不加说明, 均如表 1 所示.

Table 1 Some parameters used in the simulation

parameter	values	parameter	values	parameter	values
$N_{Tm} / (\text{ions} \cdot \text{m}^{-3})$	8.0×10^{24}	σ_{13} / m^2	2×10^{-25}	n_1	1.46
$N_{Er} / (\text{ions} \cdot \text{m}^{-3})$	8.0×10^{24}	σ_{69} / m^2	5×10^{-25}	Δn	0.015
A / m^2	8.55×10^{-12}	σ_{21} / m^2	data from Ref [6], [7]	α_s / m^{-1}	4.2×10^{-3}
λ_p / nm	980	σ_{12} / m^2	data from Ref [6], [7]	α_p / m^{-1}	6.5×10^{-3}
λ_s / nm	1420~1580	σ_{86} / m^2	data from Ref [8]	pump power P_p / W	0.4
$T_{25} / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2.2×10^{-21}	σ_{68} / m^2	determined according to Ref [3]		

3.1 单路信号增益谱特性随光纤长度的变化

图 2 中给出了在抽运功率为 400mW 时不同光纤

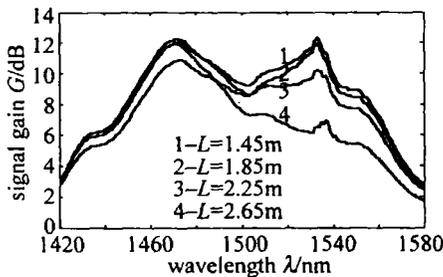


Fig 2 Output gain spectrum of a single channel signal at different fiber length

长度下的单路信号的增益谱 (信号功率为 1μW)。从图中可以看出, 3dB 带宽随着光纤长度的变化而变化, 当光纤长度为 1.85m 时, 3dB 带宽达到最大值 (90nm), 范围为 1460nm ~ 1550nm; 从图中还可以发现, 长波长范围光信号的衰减速率要比短波长快得多, 其主要原因是由 Er^{3+} , Tm^{3+} 离子的辐射特性决定的.

在此共掺放大系统中, Er^{3+} 离子可等效为三能级系统, 而 Tm^{3+} 离子等效为四能级系统, 当光纤输出端未形成有效粒子数反转时, Er^{3+} 离子对长波长信号的受激吸收要远远大于其受激辐射, 而 Tm^{3+} 离子则对短波长信号的受激吸收较弱. 因此, 光纤长度是影响 Er^{3+} , Tm^{3+} 共掺光纤放大器带宽特性的一个主要因素.

3.2 单路信号增益谱特性随抽运功率的变化

图 3 中给出了不同抽运功率下, 单一信号 (功率

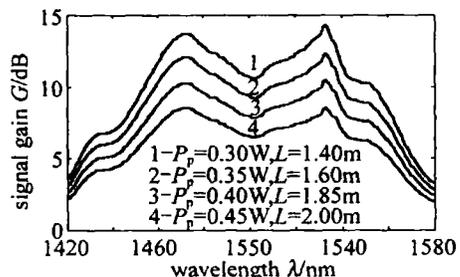


Fig 3 Output gain spectrum of a single channel signal at different pump power

为 $1\mu\text{W}$) 在最佳光纤长度下 (即带宽特性最优化时) 的增益谱线。从图中可以看出, 信号增益随抽运功率的增加而不断增大, 但增益平坦度特性却随着抽运功率的增大而不断下降, 当抽运功率为 0.45W 时, 3dB 带宽被分割为两个独立的部分, 这也就违背了设计此种光纤放大器的初衷, 因而抽运功率也是影响此光纤放大器宽带放大特性的一个主要因素。

3.3 不同 Tm^{3+} 掺杂浓度下单路信号增益谱特性

图 4 中给出了不同 Tm^{3+} 离子掺杂浓度时, 单路光

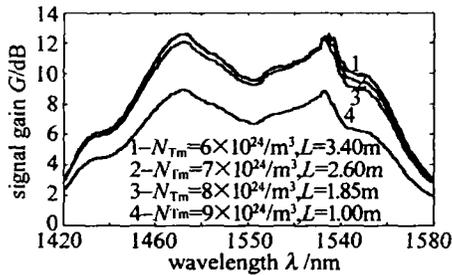


Fig 4 Output gain spectrum of a single channel signal at different Tm^{3+} ions concentration

信号 (信号功率为 $1\mu\text{W}$) 在其最佳光纤长度下 (即宽带特性最优化时) 的增益谱线。从图中可以看出, 当 Tm^{3+} 离子浓度不断增加时, 最佳光纤长度不断减小, 并且其平均增益也呈递减态势。因此, Tm^{3+} 离子的掺杂浓度是影响此种光纤放大特性的一个主要因素。

3.4 多路信号放大时输出功率谱特性

图 5 中给出了 10 路光信号输出功率谱 (信号功率

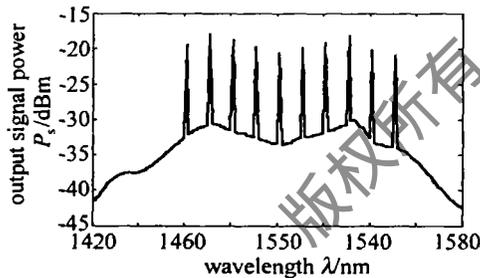


Fig 5 Output power spectrum of ten channel signals with the same power ($1\mu\text{W}$)

均为 -30dBm)。此 10 路信号波长从 1460nm 到 1550nm , 波长间隔为 10nm 。从图中不难看出, 这 10 路信号的最大增益为 12dB , 对应波长为 1470nm 和 1530nm 处的信号; 最小增益为 9dB , 对应波长为

1500nm 和 1550nm 处的信号, 3dB 带宽可达 90nm ($1460\text{nm} \sim 1550\text{nm}$), 这充分显示了此种光纤的宽带放大特性。

4 结 论

通过上述分析, 并且与国外实验^[2]相比较 (该实验指出在波长为 980nm 激光抽运下, Er^{3+} , Tm^{3+} 共掺石英光纤具有 3dB 带宽共 90nm ($1460\text{nm} \sim 1550\text{nm}$) 的超荧光输出, 以上仿真所得的放大特性与其基本一致), 可以发现据此实验建立起来的数学模型, 并由此模型而建立起来的模拟仿真, 可较好地解释和说明 Er Tm 共掺石英光纤的工作特性及其具有超宽带放大特性的主要原因, 从而可以看出, 此种光纤可以为今后实现宽带放大器的开发提供一种可行的方案, 为 DWDM 系统的进一步发展提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] YAHIEL E, HARDY A. Efficiency optimization of high power ErYb -codoped fiber amplifiers for DWDM [J]. J O S A, 2003, B20(6): 1189~1197.
- [2] JEONG H, OH H, HAN S R *et al*. Broadband amplified spontaneous emission from an Er^{3+} , Tm^{3+} -doped silica fiber [J]. Opt Lett 2003, 28(3): 161~163.
- [3] JACKSON S D, KING T A. Theoretical modeling of Tm -doped silica fiber lasers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 948~956.
- [4] HENRY C H. Theory of spontaneous emission noise in open resonators and its application to lasers and optical amplifier [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1986, LT-4(3): 288~297.
- [5] DONG S F, ZHAO S H, ZHAN S B *et al*. Operation principles and numerical analysis of double-cladding erbium-ytterbium codoped optical fiber amplifiers [A]. High Power Lasers and Applications II [C]. Shanghai Proc of SPIE, 2002, 28~36.
- [6] PASQUALE F D. Modeling of highly efficient grating feedback and Fabry-Perot Er^{3+} - Yb^{3+} codoped fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 1996, 32(2): 326~332.
- [7] BARNES W L, LAMING R I, TARBOX E J *et al*. Absorption and Emission cross section of Er^{3+} doped silica fibers [J]. IEEE J Q E, 1991, 27(4): 1004~1009.
- [8] DEGONNET M J F. Rare earth doped fiber lasers and amplifiers [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc, 2001, 91.
- [9] XU J, PRABHU M, LU J *et al*. Efficient double-clad thulium-doped fiber laser with a ring cavity [J]. Appl Opt, 2001, 40(12): 1983~1988.

(上接第 197 页)

- [12] HUANG X Q, CUI Y P. Degeneracy and split of defect states in photonic crystals [J]. Chinese Physics Letter, 2003, 20(10): 1721~1724.
- [13] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Beijing: Science

Press, 1978, 82~88 (in Chinese).

- [14] FANG Y T, SHEN T G, LING H. Photo wave propagation in one dimension random photonic crystal [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 153~155 (in Chinese).