

文章编号: 0258-7025(2003)10-0925-03

计算掺铥光纤放大器增益的解析方法

刘 琳, 张明德, 孙小茜

(东南大学电子工程系, 江苏 南京 210096)

摘要 从稳态条件铥离子(Tm^{3+})粒子速率方程出发, 进行合理的近似, 得出掺铥光纤放大器(TDFA)增益的解析表达式。计算了三种不同参数的 TDFA 的增益, 解析解与实验数据及数值求解结果比较显示, 一致性相当好。

关键词 光纤通信技术; 增益; 速率方程; 掺铥光纤放大器

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Analytical Method to Evaluate the Gain for the Thulium Doped Fiber Amplifiers

LIU Lin, ZHANG Ming-de, SUN Xiao-han

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract In this paper, based on the rate equations in a steady state of the Tm^{3+} ions, an analytical solution of the gain for thulium doped fiber amplifiers (TDFAs) is obtained after some reasonable simplicities. The gains of the three TDFAs with different parameters are calculated which show good agreement with the experimental data.

Key words fiber communication technique; gain; rate equations; thulium doped fiber amplifiers

1 引 言

如何满足日益增长的信息需求, 已成为通信技术研究的当务之急。波分复用(WDM)系统利用不同波长承载多个高速信道, 迅速提高了光传输系统的容量。光纤放大器在 WDM 网络中用于补偿各种传输损耗及接入损耗。随着 WDM 通信容量的急剧增加, 对新型超宽带光纤放大器的研究引起人们越来越多的重视。目前相对于通信低损耗窗口的 C 波段和 L 波段光放大器的研究已较成熟, 因而低损耗 S 波段光放大器的开发研究成为 WDM 传输系统的一个重要研究课题。

S 波段光放大器主要有光纤拉曼放大器方案和掺铥光纤放大器(TDFA)^[1,2]。同时考虑到抽运效率、抽运可行性、带宽覆盖、环境因素以及与 C、L 波段的一致性, TDFA 有增益的放大波段范围为 1450~1520 nm, 已成为目前 S 波段放大器最有前景的竞争者。

目前对 TDFA 的研究大多为通过改进抽运方式、掺杂浓度、抽运功率和光纤长度来提高放大器性能^[3]。但实验方法常常不能有效地分析某一个参数对放大器性能的影响, 且实验系统的搭建与实现均比较繁琐。因而, 建立详细的数学模型, 并由此计算放大器性能及各种参数的影响是提高放大器性能的有效快捷方法, 且可以用于指导实验研究。

2 理 论

TDFA 中的铥离子(Tm^{3+})是一种多能级系统^[4,5], 其能级图如图 1 所示。在 1.064 μm 抽运光作用下, 基态(3H_6)粒子首先激发到 3H_5 能级并由于多量子弛豫衰减到亚稳态 3H_4 。这些粒子由于激发态吸收(ESA)再次激发到了能级 3F_2 , 并弛豫到了 3F_4 能级。ESA 减少了 3H_4 能级的粒子数, 增加了 3F_4 能级的粒子数, 由此形成了能级 3F_4 与能级 3H_4 之间的粒子数反转。另外, $^3F_4 \rightarrow ^1G_4$ 的 ESA 会

收稿日期: 2002-06-07; 收到修改稿日期: 2002-07-23

作者简介: 刘琳(1978—), 女, 东南大学电子工程系光子学与光通信实验室硕士, 主要从事光纤通信的研究。E-mail: liulin_seu@sina.com

减少 3F_4 能级的粒子数,不过在 $1.064\ \mu\text{m}$ 抽运光作用下这种能级跃迁并不是很活跃。图中 $N_0, N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$ 分别为各相应能级上的粒子数密度; N 为总的粒子数密度。 W_{p1}, W_{p2}, W_{p3} 和 $\sigma_{p1}^a, \sigma_{p2}^a, \sigma_{p3}^a$ 分别是 ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_5, {}^3H_4 \rightarrow {}^3F_2, {}^3F_4 \rightarrow {}^1G_4$ 的抽运几率和受激吸收截面。从第 i 能级到第 j 能级的自发发射或多量子弛豫记为 γ_{ij} 。 $1.47\ \mu\text{m}$ 处受激吸收截面 σ_s^e 与受激发射截面 σ_s^a 近似相等,记为 σ_s ,信号光的受激发射几率与受激吸收几率均记为 W_s 。

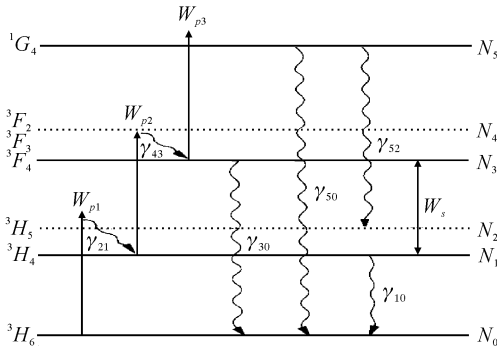


图 1 铥离子(Tm^{3+})能级图

Fig. 1 Energy level of a trivalent thulium ion (Tm^{3+})

根据图 1 所示, Tm^{3+} 能级图可得各能级粒子的速率方程为^[4,5]

$$\frac{dN_0}{dt} = -W_{p1}N_0 + \gamma_{10}N_1 + \gamma_{30}N_3 + \gamma_{50}N_5 \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -(\gamma_{10} + W_{p2} + W_s)N_1 + \gamma_{21}N_2 + W_sN_3 \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{p1}N_0 - \gamma_{21}N_2 + \gamma_{52}N_5 \quad (3)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_sN_1 - (\gamma_{30} + W_s + W_{p3})N_3 + \gamma_{43}N_4 \quad (4)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = W_{p2}N_1 - \gamma_{43}N_4 \quad (5)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = W_{p3}N_3 - (\gamma_{50} + \gamma_{52})N_5 \quad (6)$$

在求解稳态条件下的粒子速率方程的基础上,可以得到信号光及抽运光功率变化的微分方程

$$\frac{dI_s(z)}{dz} = k_s(z)I_s(z) \quad (7)$$

$$\frac{dI_p(z)}{dz} = -k_p(z)I_p(z) \quad (8)$$

其中系数

$$k_s(z) = \sigma_s^e N_3 - \sigma_s^a N_1 = \sigma_s \Delta N \quad (9)$$

$$k_p(z) = \sigma_{p1}^a N_0 + \sigma_{p2}^a N_1 + \sigma_{p3}^a N_3 \quad (10)$$

令 $W_{p1} = \frac{\sigma_{p1}^a}{h\nu_p} I_p = k_1 I_p, W_{p2} = \frac{\sigma_{p2}^a}{h\nu_p} I_p = k_2 I_p, W_{p3} = \frac{\sigma_{p3}^a}{h\nu_p} I_p = k_3 I_p, W_s = \frac{\sigma_s}{h\nu_s} I_s = k_4 I_s$ 。一般情况下, $W_{p2} \gg W_{p1}, W_{p2} \gg W_{p3}, W_{p2} \gg \gamma_{10}, W_{p2} \gg \gamma_{30}, W_{p2} \gg \gamma_{50}, \gamma_{30} \gg W_{p1}, \gamma_{50} \gg W_{p1}, (\gamma_{10} + \gamma_{30}) \gg 2W_{p1}$ 。在这些近似条件下,系数 $k_s(z), k_p(z)$ 可简化为

$$k_s(z) = \frac{k_{15} I_p^2(z)}{k_{11} I_p(z) + k_{12} I_p^2(z) + k_{13} I_s(z) + k_{14} I_p(z) I_s(z)} \quad (11)$$

$$k_p(z) = \frac{k_{21} I_p(z) + k_{22} I_s(z) I_p(z) + k_{23} I_p^2(z)}{k_{11} I_p(z) + k_{12} I_p^2(z) + k_{13} I_s(z) + k_{14} I_p(z) I_s(z)} \quad (12)$$

其中

$$k_{11} = \gamma_{30} k_2 + \gamma_{10} k_3, k_{12} = k_1 k_3 + \frac{\gamma_{50}}{\gamma_{50} + \gamma_{52}} k_2 k_3,$$

$$k_{13} = (\gamma_{10} + \gamma_{30}) k_4, k_{14} = \frac{\gamma_{50}}{\gamma_{50} + \gamma_{52}} k_3 k_4,$$

$$k_{15} = \sigma_s N k_1 (k_2 - k_3), k_{21} = 2N \gamma_{30} \sigma_{p1}^a k_2,$$

$$k_{22} = N k_4 \left(\frac{\sigma_{p1}^a}{\gamma_{50} + \gamma_{52}} \gamma_{50} k_3 + \sigma_{p2}^a k_1 + \sigma_{p3}^a k_1 \right),$$

$$k_{23} = \frac{N \sigma_{p1}^a}{\gamma_{50} + \gamma_{52}} \gamma_{50} k_3 k_2 + N \sigma_{p2}^a k_1 k_3 + N \sigma_{p3}^a k_1 k_2.$$

一般而言,在放大器中,抽运光功率和信号光功率总是指数变化的。令方程(7),(8)的解的形式为

$$I_s(z) = I_s(0) e^{k_s^{(1)}(z) \cdot z} \quad (13)$$

$$I_p(z) = I_p(0) e^{-k_p^{(1)}(z) \cdot z} \quad (14)$$

其中

$$k_s^{(1)}(z) = k_s^{(0)} + k_s'(z) \cdot z \quad (15)$$

$$k_p^{(1)}(z) = k_p^{(0)} + k_p'(z) \cdot z \quad (16)$$

$k_s^{(0)}, k_p^{(0)}$ 分别为(11)式,(12)式在 $z=0$ 时的值, $k_s'(z), k_p'(z)$ 分别为 $k_s(z), k_p(z)$ 的导数,其解析形式可以从(11),(12)式简单推导得到。

将(15),(16)式代入(13),(14)式,求得信号光增益为

$$G(L_0) = \frac{I_s(L_0)}{I_s(0)} = \exp\{k_s^{(1)}(z)|_{z=L_0} \cdot L_0\} \quad (17)$$

式中 L_0 为光纤放大器长度,改变抽运光功率,在其他参数给定情况下,可由上述求出的增益的解析表达式(17)计算得到信号光增益。

3 结果及数据

图 2 所示为 TDFA 增益随抽运光功率的变化曲线。图 2(a)~(c)分别对应掺铥光纤(TDF) A, B, C,其参数如表 1 所示^[5,7]。其他参数为 $\lambda_s = 1.47$

μm , $\lambda_p = 1.064 \mu\text{m}$, $\gamma_{10} = 172.4 \text{ s}^{-1}$, $\gamma_{30} = 702.8 \text{ s}^{-1}$, $\gamma_{50} = 676.3 \text{ s}^{-1}$, $\gamma_{52} = 492.9 \text{ s}^{-1}$, $\sigma_{p1}^a = 1.1 \times 10^{-27} \text{ m}^2$, $\sigma_{p2}^a = 8.2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_{p3}^a = 1.0 \times 10^{-26} \text{ m}^2$, $\sigma_s = 6.7 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\tau_3 = 1.35 \text{ ms}$ 。图中直线

对应的为数值求解微分方程(7)、(8)得到的结果,虚线对应的为由(17)式求得的解析结果,有黑点的曲线对应的是报道过的实验数据^[4,6]。

由图2可见,在一定近似条件下,由(17)式求得

表 1 掺铥光纤的参数

Table 1 Parameters of the thulium doped fibers

	Core diameter/ μm	Cut off wavelength/ μm	NA	Tm ³⁺ concentration ($\times 10^{-6}$)	Length/m
Fiber A	4.0	1.39	0.270	2000	10
Fiber B	4.0	0.90	0.172	2000	10
Fiber C	6.5	1.41	0.170	2000	10

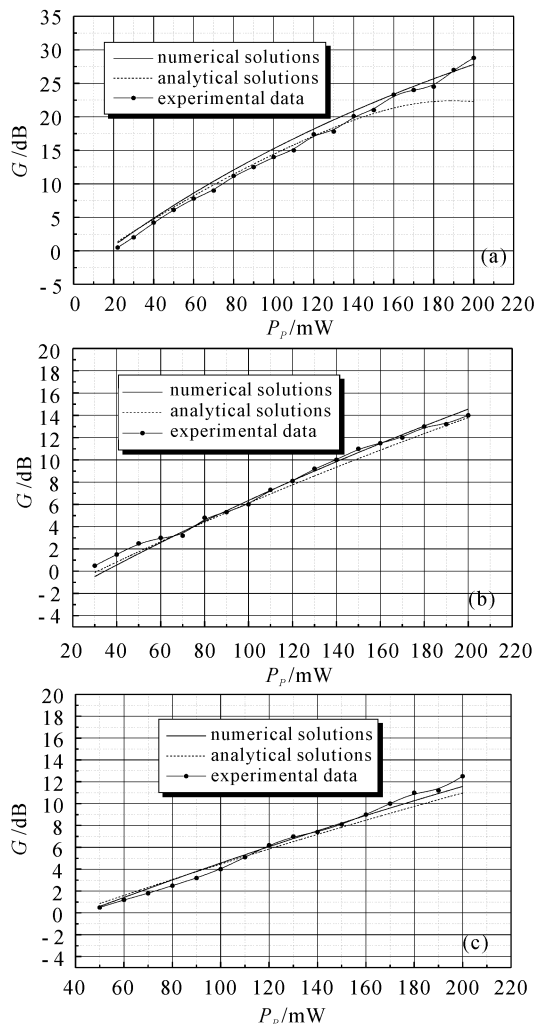


图 2 TDFA 增益随抽运光功率的变化

Fig. 2 Gain of TDFA vs pump power

(a) fiber A; (b) fiber B; (c) fiber C

的信号光增益与实验数据及数值结果均吻合得很好。在抽运光功率低于 100 mW 时,解析结果与实验数据及数值结果完全一致;当抽运光功率高于

100 mW 时,解析结果比实验数据及数值结果稍低,尤其是图 2(a),而图 2(b),(c)则仍相差不大。这是由于当抽运光功率较大时,对放大器 A 而言,此时近似条件不满足,如当 $P_p = 200 \text{ mW}$ 时, $2W_{p1} = 172.38$, $\gamma_{10} + \gamma_{30} = 875.20$, 式 $(\gamma_{10} + \gamma_{30}) \gg 2W_{p1}$ 不成立,因而解析表达式产生了误差。但是在一般的放大器工作条件下得到式(11),(12)时,近似条件均能满足,故(17)式仍具有很大的实用意义。

因此在一定近似条件下得到的解析表达式(17)能较精确地用来计算掺铥光纤放大器中的增益。计算了三种不同参数的 TDFA 的增益,经比较发现,解析解与实验数据及数值结果一致性相当好。

参 考 文 献

- 1 Tadashi Kasamatsu, Yutaka Yano, Takashi Ono. Laser-diode-pumped highly efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480~1510-nm band [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5):433~435
- 2 S. Aozasa, T. Sakamoto, T. Kanamori *et al.*. Tm-doped fiber amplifiers for 1470-nm-band WDM signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(10):1331~1333
- 3 Fabien Roy, Dominique Bayart, André Le Sauze *et al.*. Noise and gain band management of thulium-doped fiber amplifier with dual-wavelength pumping schemes [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8):788~790
- 4 Tetsuro Komukai, Takashi Yamamoto, Tomoki Sugawa *et al.*. Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47 μm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11):1880~1889
- 5 Stuart D. Jackson, Terence A. King. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5):948~956
- 6 Won Jae Lee, Bumki Min, Jaehyoung Park *et al.*. Study on the pumping wavelength dependency of S⁺-band fluoride based thulium doped fiber amplifiers [C]. *OFC'01, TuQ5*, 2001