

重迭因子对光波导放大器增益特性的影响

张晓军* 陈海燕 刘永智

(电子科技大学光电子技术系 成都 610054)

【摘要】在忽略放大自发辐射(ASE)和上转过程的情况下,用重迭因子的方法,研究了980 nm波段泵浦的掺铒光波导放大器(EDWA'S)的速率方程,得到了其增益的隐式解析解,在此基础上得到了泵浦阈值功率的解析表达式。详细讨论了重迭因子对增益、泵浦阈值功率的影响。

关键词 集成光学; 掺铒光波导; 光放大器; 重迭因子

中图分类号 TN252.927

近几年来,掺Er³⁺玻璃波导光放大器在通信中的潜在应用越来越引起人们的注意^[1~3]。它降低了1.5 μm波段光放大器的成本和尺寸以便于集成化,可用作末端放大器、前置放大器、光纤到家(FTTH)和光纤到路边(FTTC)网络中的无损分路器、功率放大器等。为了制作短、增益高的玻璃波导光放大器,高浓度掺杂(比光纤放大器(EDFA's)高两个数量级)是必须的。研究表明,波导结构在放大器性能优化方面起作重要作用,通过优化信号光与泵浦光光场及Er³⁺浓度分布的重迭,可以大大提高泵浦效率,从而提高放大器的增益^[4]。本文用重迭因子的方法,得到了980 nm波段泵浦的掺铒光波导放大器增益的隐式解析解,得到了泵浦阈值功率的解析表达式,讨论了重迭因子对增益、泵浦阈值功率的影响。

1 理论分析

在用980 nm波段的光泵浦时,当铒离子掺杂浓度较低时,掺铒光波导放大器可用三能级系统描述^[4],如图1所示。基态能级(⁴I_{15/2})上的铒离子吸收泵浦光而跃迁到⁴I_{11/2}能级,由于该能级的不稳定性导致无辐射衰减,使离子快速衰减到亚稳态能级(⁴I_{13/2}),形成离子数反转,由于离子在亚稳态能级上的寿命较长(约8~10 ms),而泵浦能级(⁴I_{11/2})上离子的寿命较短(为ns量级)。因此,泵浦能级上的离子数可近似为零,从而可用二能级粒子与双波长光场相互作用来描述EDWA。用下标P, S分别标记泵浦光和信号光,前向泵浦下,速率方程可变为^[4,5]



图1 Er³⁺能级跃迁简图

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\sigma_{ap} \Gamma_p P_p(z,t, \nu_p)}{Ah\nu_p} N_1(z,t) + \frac{\sigma_{as} \Gamma_s P_s(z,t, \nu_s)}{Ah\nu_s} N_1(z,t) - \frac{\sigma_{as} \Gamma_s P_s(z,t, \nu_s)}{Ah\nu_s} N_2(z,t) - A_{21} N_2(z,t) \quad (1)$$

$$N_1(z,t) + N_2(z,t) = N_T(z,t) \quad (2)$$

式中 N_1, N_2 分别表示基态和亚稳态的粒子数密度; A 为波导区的横截面面积; P_p, P_s 分别为泵浦光和信号光的功率; $h\nu_p, h\nu_s$ 分别表示泵浦光和信号光光子的能量; σ_{ap}, σ_{as} 代表基态对泵浦

2000年10月13日收稿

*男 44岁 大学 工程师

光和信号光的吸收截面, σ_{es} 为激发态的受激辐射截面; A_{21} 为自发辐射几率, $A_{21} = 1/\tau_{21}$, τ_{21} 为亚稳态粒子的寿命。 $N_T(z, t)$ 为 Er^{3+} 掺杂粒子数密度, + 表示传播方向。光波模场与 Er^{3+} 掺杂分布之间的重迭因子 Γ 为^[6]

$$\Gamma_{p,s} = \iint \psi_{p,s}(x, y) f(x, y) dx dy \quad (3)$$

积分区域为掺铒波导范围。 $\psi_p(x, y)$, $\psi_s(x, y)$ 分别是泵浦光和信号光(横向场分布)的归一化强度; $f(x, y)$ 是归一化的掺杂(横向)分布函数; N_T 为 Er^{3+} 掺杂粒子数密度; 在均匀掺杂情况下, 有 $N_T(z, t) = N_T$ 。

忽略波导损耗, 在稳态情况下, 泵浦光和信号光沿 Z 轴的传输方程为^[4]

$$\frac{dP_{p+}(z)}{dz} = -\gamma_p(z) P_{p+}(z) \quad (4)$$

$$\frac{dP_s(z, \nu_s)}{dz} = [\gamma_{21}(z, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu_s)] P_s(z, \nu_s) \quad (5)$$

边界条件

$$P_{p+}(0) = P_{p0} \quad (6)$$

$$P_s(0, \nu_s) = P_{s0}(\nu_s)$$

式中 泵浦光和信号光的吸收和发射系数 $\gamma_p(z)$, $\gamma_{12}(z, \nu_s)$, $\gamma_{21}(z, \nu_s)$ 分别为

$$\gamma_p(z) = \iint_A \psi_p(x, y) \sigma_{ap} N_1(x, y, z) dx dy \quad (7)$$

$$\gamma_{12}(z, \nu_s) = \iint_A \psi_s(x, y) \sigma_{as} N_1(x, y, z) dx dy \quad (8)$$

$$\gamma_{21}(z, \nu_s) = \iint_A \psi_s(x, y) \sigma_{es} N_2(x, y, z) dx dy \quad (9)$$

将式(7)~(9)分别代入式(4)和式(5), 并利用式(3)有

$$\frac{dP_{p+}(z)}{dz} = -\sigma_{ap} N_1(z) \Gamma_p P_{p+}(z) \quad (10)$$

$$\frac{dP_s(z, \nu_s)}{dz} = [\sigma_{es} N_2(z) - \sigma_{as} N_1(z)] \Gamma_s P_s(z, \nu_s) \quad (11)$$

联立式(1)、式(2)、式(10)、式(11), 并利用式(6), 经推导得

$$[G(z)]^\gamma \exp(-\gamma \Gamma_s \sigma_{es} N_T z) = 1 - \frac{\nu_p P_{s0}}{\nu_s P_{p0}} [G(z) - 1] - \frac{[\ln G(z) + \Gamma_s \sigma_{as} N_T z] A h \nu_p}{\tau_{21} P_{p0} \Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})} \quad (12)$$

式中 $\gamma = \Gamma_p \sigma_{ap} / \Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})$, $G(z) = P_s(z) / P_{s0}$ 表示放大器的增益。

在泵浦阈值下, 信号光通过长度为 L 的波导后功率保持不变, 即 $G(L) = 1$, 代入式(12)有

$$P_{pth} = \frac{A h \nu_p \sigma_{as} N_T L}{\tau_{21} (\sigma_{es} + \sigma_{as}) \left[1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_p \sigma_{ap}}{\sigma_{es} + \sigma_{as}} \sigma_{es} N_T L\right) \right]} \quad (13)$$

式(13)即为泵浦阈值的表达式。可见, EDWA的阈值泵浦功率和EDFA一样, 与信号光强无关, 且与信号光的重迭因子无关。

2 讨论

利用文献[4]给出的有关参数: $\sigma_{es} = 5.41 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_{as} = 5.36 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_{ap} = 2.58 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\nu_p = 3.061 \times 10^{14} \text{ Hz}$, $\nu_s = 1.959 \times 10^{14} \text{ Hz}$, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $\tau_{21} = 10 \text{ ms}$, $A = 3 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $N_T = 1 \times 10^{26} \text{ ions/m}^3$, 波导长度 $L = 5 \text{ cm}$, 泵浦功率 $P = 60 \text{ mW}$ 。

2.1 重迭因子 Γ_p 对泵浦阈值的影响

图2为泵浦阈值与重迭因子 Γ_p 的关系曲线。从图2上可看出，在一定的掺杂浓度、波导长度下， Γ_p 越大，泵浦阈值越小。这是因为 Γ_p 增加，波导对泵浦光的吸收增加，提高了泵浦效率从而间接的减小了泵浦阈。

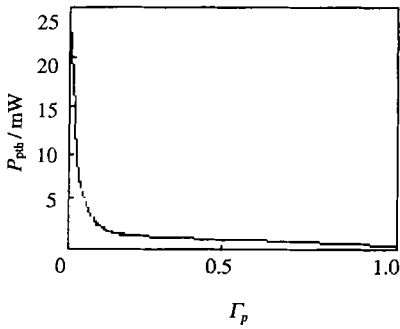
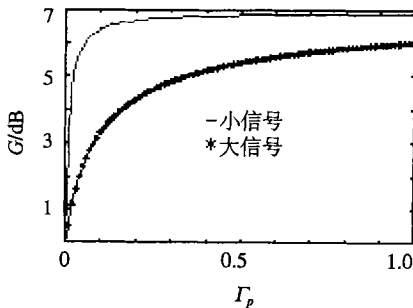


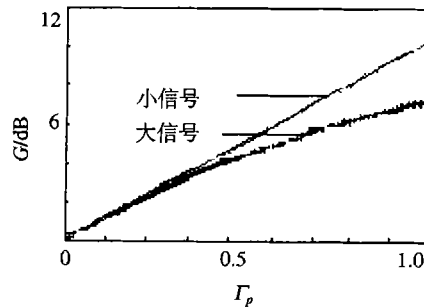
图2 泵浦阈值功率与重迭因子 Γ_p 的关系曲线

2.2 重迭因子对信号光增益的影响

图3为信号光增益随重迭因子的变化曲线。从图中可以看出，在相同重迭因子的情况下(是掺铒浓度和波导长度一定)，小信号增益明显大于大信号增益，这是由于信号光对泵浦光的吸收所致。图3a为 $\Gamma_s=0.6$ 时，增益随重迭因子 Γ_p 的变化曲线，从图中可以看出，在小信号即 Γ_p 大约为0.6时，增益达到饱和，这是由于泵浦光引起的增益饱和；在大信号时，增益随重迭因子 Γ_p 的增加而增加， Γ_p 约在0.6以后增益增加缓慢， Γ_p 在0.6~1.0之间，增益变化约1 dB。图3b为 $\Gamma_s=0.6$ 时，增益随重迭因子 Γ_s 在0.6的变化曲线，从图中可以看出，在小信号时，增益随重迭因子 Γ_s 的增加近似线性的增加。在大信号时，增益随重迭因子 Γ_s 的增加并不线性的增加， Γ_s 约在0.6之后增益增加缓慢， Γ_s 在0.6~0.9之间，增益变化约1 dB。



(a) $\Gamma_s=0.6$ 时，增益随重迭因子 Γ_p 的变化



(b) $\Gamma_p=0.6$ 时，增益随重迭因子 Γ_s 的变化

图3 信号光增益随重迭因子的变化曲线

3 结论

从上面的讨论中可以看到，在一定的泵浦功率和铒掺杂浓度下，提高泵浦光(信号光)与铒掺杂浓度分布之间的重迭可提高信号光增益。重迭因子与光波导放大器中的铒掺杂浓度的分布以及光场分布有关。而光场分布是由光波导结构(如折射率，几何形状，制作过程等)决定的，因此对光波导结构进行优化可提高波导中的光场与铒掺杂浓度分布之间的重迭，从而提高系统的信号光增益，这对光波导放大器的设计制作有一定的指导作用。

参 考 文 献

- 1 Nykolak G. Systems Evaluation of an Er^{3+} -Doped planar waveguide amplifier. IEEE Photonics Technol Lett, 1993, 5(10): 1 185~1 187
- 2 Shumulovich J,Wong A,Wong Y H, *et al.* Er^{3+} Glass Waveguide amplifier at $1.5 \mu\text{m}$ on silicon. Electron Lett, 1992, 28(13): 1 181~1 182
- 3 Choi Y B, S H Cho. Er-Al codoped silicate planar light waveguide -type amplifier fabricated by radio-frequency sputtering. Optics Lett, 2000, 25(4): 263~265
- 4 Fabrizio Di Pasquale, Maurizio Zoboli. Analysis of erbium-doped waveguide amplifiers by a full-vectorial finite-element method. IEEE J Lightwave Technol, 1993, 11(10): 1 565~1 573

- 5 Peng Yongjun, Qiu Kun, Tang Mingguang. Study of convergence rate of calculating EDFA's rate equations. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1998, 27(6): 622~626 [彭拥军, 邱 昆, 唐朝明. 掺铒光纤放大器速率方程数值求解收敛速度的研究. 电子科技大学学报, 1998, 27(6): 622~626]
- 6 Giles C R, Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. J Lightwave Technol, 1991, 9(3): 271~283

Effect of Overlapping Factors on Gain Characteristics of Erbium-doped Optical Waveduide Amplifiers

Zhang Xiaojun Chen Haiyan Liu Yongzh

(Dept. of Opto-electronic Technology, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, neglecting amplified spontaneous emission(ASE) and upconversion process, the rate equation for Erbium-Doped Waveguide amplifiers (EDWA's) pumped with 980 nm wavelength is studied using overlapping factors method, and an analytical implicit gain solution is derived. Based on which an analytical threshold expression of pumping power is also obtained. Effects of overlapping factors on the gain and pumping threshold power are discussed in detail.

Key words integrated optical; erbium-doped waveguide; optical amplifiers; overlapping factors

· 科研成果介绍 ·

3 mm相参雷达多模式信号处理和模拟器

主研人员: 向敬成 胡美莉 张 伟 肖国强 郑立岗 赵 睿 汪学刚

相参雷达多模式信号处理机和模拟器是3 mm相参雷达系统中的重要子系统之一。主要研究突破雷达平台运动补偿及主杂波抑制技术、可编程多模式信号处理机、高速数字信号处理技术、高分辨机械PD雷达回波模拟器和系统小型化工程设计等技术难点。信号处理机采用90年代中后期超大规模可编程器件和其他最新器件,具有多种工作模式,处理速度高、可编程、体积小、重量轻、功耗低等优点。模拟器能正确模拟机载和地面两种情况下的目标、杂波和噪声,且能方便灵活地改变参数。本项成果对毫米波雷达在军、民应用上有重要意义,有广阔的应用前景和社会经济效益。

· 科 卞 ·