

文章编号: 0253-2239(2007)05-0928-7

掺 Er 及 Yb-Er 共掺 Al₂O₃ 光波导放大器的 理论与实验研究*

李淑凤¹ 李成仁^{1,2} 宋昌烈¹

(¹ 大连理工大学物理系, 大连 116023)
(² 辽宁师范大学物理系, 大连 116029)

摘要: 抽运波长为 0.98 μm 时, 考虑合作上转换、交叉弛豫、激发态吸收等上转换机理给出了掺 Er 及 Yb-Er 共掺系统的速率方程, 并利用二维波导的有限元理论及包含正反向放大的自发辐射的场传输方程, 建立了一套分析光波导放大器增益特性的综合理论模型。得到掺 Er 及 Yb-Er 共掺 Al₂O₃ 光波导放大器增益与波导长度、抽运功率、掺杂浓度等多个参量的关系, 绘制出具有实用性的优化设计曲线。将该理论模型应用于实际制作的 Yb-Er 共掺 Al₂O₃ 光波导放大器, 结果与实验数据相符。

关键词: 集成光学; 掺 Er 及 Yb-Er 共掺 Al₂O₃ 光波导放大器; 综合理论模型; 净增益

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Er-Doped and Yb-Er Co-Doped Al₂O₃ Waveguide Amplifier

Li Shufeng¹ Li Chengren^{1,2} Song Changlie¹

(¹ Physics department, Dalian University of Technology, Dalian 116023)
(² Physics Department, Liaoning Normal University, Dalian 116029)

Abstract: The rate equations of Er-doped and Yb-Er co-doped systems pumped at 0.98 μm are presented, considering the upconversion mechanisms, such as cooperative upconversion, cross relaxation, and excited state absorption. A multi-theoretical model is founded to analyze the gain characteristic of the waveguide amplifier, by two-dimensional waveguide finite element model and propagation equations with forward and backward amplified spontaneous emission. The dependences of the gain on waveguide length, pump power and doping concentration are obtained. The new theory is used to analyze the gain performance of a practical Yb-Er co-doped Al₂O₃ waveguide amplifier, and the analyzing results are in accordance with experimental data.

Key words: integrated optics; Er-doped and Yb-Er co-doped Al₂O₃ waveguide amplifier (EDAWA, YEDAWA); multi-theory model; net gain

1 引言

在全光通信网研究中, 研制 1.53 μm 掺铒光波导放大器 (EDWA) 或铒铒共掺光波导放大器 (YEDWA) 是目前光有源器件研究的热点^[1~3], 它体积小, 制造成本低, 性能稳定可靠, 便于集成。

目前研究人员已对 Si、SiO₂、磷硅玻璃、钠钙硅玻璃、LiNbO₃、Al₂O₃ 等作为基体材料的掺铒氧化铝光波导放大器作了大量的探索和研究^[4,5]。其中以掺 Er 和 Yb-Er 共掺的 Al₂O₃ 光波导放大器 (掺铒氧化铝光波导放大器和铒铒共掺氧化铝光波导放

大器) 更为引人注目^[6]。Al₂O₃ 与缓冲层 (SiO₂)、覆盖层之间的折射率差较大, 波导模可以高约束低损耗传输; 高折射率差可实现小的波导弯曲半径^[4], 允许制作微小的波导元件; 另外, Al₂O₃ 和 Er₂O₃、Yb₂O₃ 的晶体结构相似, Er 和 Yb 可高浓度结合进 Al₂O₃ 晶体结构中, 从而在较短的尺寸内得到较高的增益。掺入 Yb, 是因为 Er³⁺ 吸收谱与 Yb³⁺ 发射谱间有较大重叠^[7], 并且 Yb³⁺ 对 0.98 μm 的吸收截面要比 Er³⁺ 的大一个量级, 通过 Yb、Er 间的能量传递, 可大大提高抽运效率。

* 国家自然科学基金 (60477023) 资助课题和辽宁省博士启动基金 (20051081) 资助课题。

作者简介: 李淑凤 (1966—), 女, 副教授, 博士, 主要从事电磁场理论和光波导放大器方面的研究。E-mail: sf.lee@163.com

收稿日期: 2006-07-07; 收到修改稿日期: 2006-10-18

Hoven 等^[8]1996 年已经利用集成技术开展了在面积为 15 mm² 的硅片上集成总长度为 4 cm 的掺 Er Al₂O₃ 光波导放大器的研究工作。最近其研究组又在实验室研制出 Yb-Er 共掺的 Al₂O₃ 光波导^[9]。

理论上, C. E. Chryssou 等^[10]研究了 2 μm × 2 μm 的掺铈 Al₂O₃ 沟道波导放大器的增益^[10], 但这种结构, 信号光是非单模传输的。另外有些理论分析由于缺乏相关的实验数据, Al₂O₃ 基体放大器的理论计算中铈的吸收发射截面等参量一般都采用铈在玻璃或其它基质中的数据^[10,11], 有些又忽略了放大的自发辐射或者上转换效应的影 响^[12], 因此给出的结果有一定的局限。

为分析受多种因素影响的放大器增益性能, 技术上实现合理的优化设计, 本文建立了一套描述波导放大器的综合理论模型。模型包括互相关联的三部分内容: 1) 通过有限元法计算出由波导几何参量、物理参量和入射耦合条件所决定的波导模的成分结构, 得到信号光和抽运光的模场分布。2) 考虑激活粒子(Er³⁺ 和 Yb³⁺) 的吸收、发射、上转换及交叉弛豫等多种线性和非线性过程, 对 Er 离子采用六能级系统, 建立速率方程, 确定各能级粒子数分布。3) 由传输方程确定信号光、抽运光及正反向放大的自发辐射在波导内的演变。由此给出放大器增益的多参量优化及设计曲线, 其对波导的制备, 包括掺杂浓度、刻蚀尺寸和波导长度以及抽运条件具有指导意义。

2 综合理论模型

2.1 波导模式与场分布的计算

作为信号放大的波导放大器, 为不使放大过程带来模式色散, 以及为了光纤-波导耦合及放大后的波导-光纤耦合效率更高, 亦要求波导内信号光为单模传输。而抽运光则不受此限制, 可以保持多模状态。在 1 μm 厚的有源膜层, 刻蚀宽度是 3 μm 的情况下, 利用有限元法计算了不同脊高的波导的模场及各模的归一化光强分布, 在保证信号光单模传输, 模场约束性好又远离截止的情况下, 通过比较选择脊高 0.8 μm 比较合适^[13]。

脊波导及各参量如图 1 所示。1.53 μm 信号光只有 E₁₁^x 和 E₁₁^y 两个基模传输, 0.98 μm 抽运光有 E₁₁^x、E₁₁^y、E₂₁^x、E₂₁^y、E₃₁^x、E₃₁^y 模传输。通过偏振激发可以实现信号光的单模传输。假设波导内的信号光和抽运光是由光纤直接耦合进波导激发的, 则模激发系数为

$$\alpha_i = c_i c_i^* / \left(\sum_{i=1}^N c_i c_i^* \right),$$

其中 N 为信号光或抽运光的导模个数, c_i 为总场按第 i 个导模场展开的展开系数, 与光纤输出场分布及耦合时光纤波导的位置偏移有关^[14]。信号光和抽运光在波导截面上的总归一化光强分布分别为

$$\psi_s(x, y) = \sum_{i=1}^{N_s} \alpha_{si} \psi_{si}, \quad \psi_p(x, y) = \sum_{i=1}^{N_p} \alpha_{pi} \psi_{pi}.$$

另外由各模激发系数及总功率, 还可以得到各模功率。

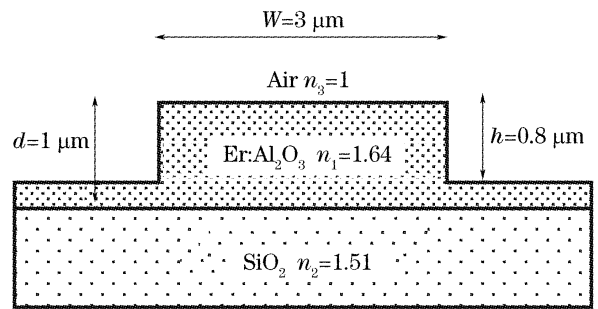


图 1 脊波导

Fig. 1 Ridge waveguide

2.2 受激跃迁速率方程

图 2 为 0.98 μm 抽运时 Yb³⁺-Er³⁺ 共掺系统的能级结构及跃迁示意图, 据此列出了铈共掺杂的光波导放大器的速率方程(1)~(10), 方程考虑了合作上转换、激发态吸收、交叉弛豫、Yb³⁺、Er³⁺ 能量传递及反向能量传递过程:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} = & -W_{13}N_1 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + W_{31}N_3 + \\ & \frac{N_2}{\tau_2} + C_2N_2^2 + C_3N_3^2 - C_{14}N_1N_4 - \\ & K_{tr18}N_1N_8 + K_{tr37}N_3N_7, \end{aligned} \quad (1)$$

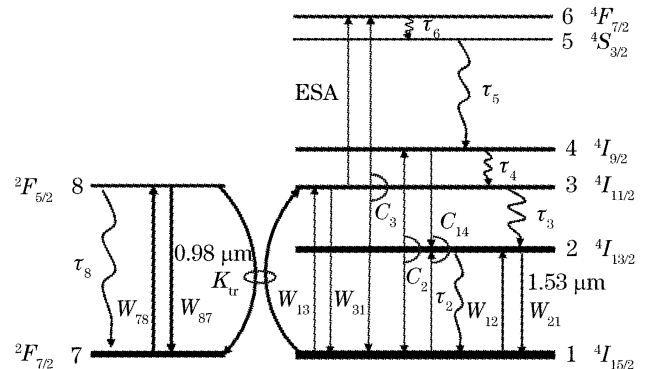


图 2 0.98 μm 抽运时 Er³⁺-Yb³⁺ 共掺系统的能级结构及跃迁示意图

Fig. 2 Energy level and transition diagram of the Er³⁺-Yb³⁺ co-doped system pumped at 0.98 μm

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - \frac{N_2}{\tau_2} + \frac{N_3}{\tau_3} - 2C_2N_2^2 + 2C_{14}N_1N_4, \quad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{13}N_1 - W_{31}N_3 - \frac{N_3}{\tau_3} + \frac{N_4}{\tau_4} - 2C_3N_3^2 - W_{ESA}N_3 + K_{tr18}N_1N_8 - K_{tr37}N_3N_7, \quad (3)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = -\frac{N_4}{\tau_4} + \frac{N_5}{\tau_5} + C_2N_2^2 - C_{14}N_1N_4, \quad (4)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = -\frac{N_5}{\tau_5} + \frac{N_6}{\tau_6}, \quad (5)$$

$$\frac{dN_6}{dt} = -\frac{N_6}{\tau_6} + C_3N_3^2 + W_{ESA}N_3, \quad (6)$$

$$\frac{dN_7}{dt} = -W_{78}N_7 + W_{87}N_8 + \frac{N_8}{\tau_8} + K_{tr18}N_1N_8 - K_{tr37}N_3N_7, \quad (7)$$

$$\frac{dN_8}{dt} = -\frac{dN_7}{dt}, \quad (8)$$

$$N_{Er} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6, \quad (9)$$

$$N_{Yb} = N_7 + N_8, \quad (10)$$

其中 N_{Er} 、 N_{Yb} 分别为铒、镱掺杂浓度, N_i 、 τ_i 分别为第 i 能级的离子数密度和平均寿命。 C_2 、 C_3 分别为 2、3 能级的合作上转换系数, C_{14} 为 1、4 能级间的交叉弛豫系数。 W_{12} 、 W_{21} 和 W_{13} 、 W_{31} 分别是信号光和抽运光的受激吸收、受激辐射速率, W_{ESA} 是激发态吸收跃迁速率 (${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$)。 K_{tr18} 是 Yb^{3+} (${}^2F_{5/2}$)、 Er^{3+} (${}^4I_{15/2}$) 间的能量传递系数。 K_{tr37} 是 Er^{3+} (${}^4I_{11/2}$)、 Yb^{3+} (${}^2F_{7/2}$) 间的反向能量传递系数, 但由于 Er^{3+} 离子 ${}^4I_{11/2}$ 能级的寿命较短, 这种反向传递可以忽略。

分析掺 Er 或 Yb-Er 共掺放大器增益时, 要把放大的自发辐射考虑进去, 此时波导中存在三种光波: 信号光、抽运光及自发辐射(含正向和反向), 因此

表 1 Yb^{3+} - Er^{3+} 共掺杂 Al_2O_3 薄膜的相关参量

Table 1 Parameters of Yb^{3+} - Er^{3+} co-doped Al_2O_3 film

Parameter	Value
Pump absorption cross section ($\lambda_p = 0.98 \mu m$) / $\times 10^{-21} \text{ cm}^2$	$\sigma_{Er-a13} = 1.7$, $\sigma_{Yb-a78} = 11.7$
Pump emission cross section ($\lambda_p = 0.98 \mu m$) / $\times 10^{-21} \text{ cm}^2$	$\sigma_{Er-e31} = 0$, $\sigma_{Yb-e87} = 11.6$
Signal absorption cross section ($\lambda_s = 1.53 \mu m$) / $\times 10^{-21} \text{ cm}^2$	$\sigma_{Er-a12} = 5.7$
Signal emission cross section ($\lambda_s = 1.53 \mu m$) / $\times 10^{-21} \text{ cm}^2$	$\sigma_{Er-e21} = 5.7$
Excited state absorption cross section / $\times 10^{-21} \text{ cm}^2$	$\sigma_{ESA} = 0.8$
Excited state lifetime	$\tau_2 = 7.8 \text{ ms}$, $\tau_3 = 30 \mu s$, $\tau_4 = 1.0 \text{ ns}$, $\tau_5 = 7.0 \mu s$, $\tau_6 = 20 \text{ ns}$, $\tau_8 = 1.1 \text{ ms}$
Cooperative upconversion coefficient (Assumed linearly increasing function of Er concentration)	$C_2 = C_3 = C_{14} = 4.1 \times 10^{-18} \text{ cm}^3/\text{s}$ ($N_{Er} = 2.7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) $C_2 = C_3 = C_{14} = 3.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^3/\text{s}$ ($N_{Er} = 4.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)
Energy transfer coefficient / ($\times 10^{-17} \text{ cm}^3/\text{s}$)	$K_{tr18} = 4.0$

$$W_{12(21)}(x, y, z) = \frac{\sigma_{Er-a12(Er-e21)}(\nu_s)}{h\nu_s} I_s(x, y, z) + \sum_{j=1}^M \frac{\sigma_{Er-a12(Er-e21)}(\nu_j)}{h\nu_j} [I_{ASE+}(x, y, z, \nu_j) + I_{ASE-}(x, y, z, \nu_j)], \quad (11)$$

$$W_{13}(x, y, z) = \frac{\sigma_{Er-a13}(\nu_p)}{h\nu_p} I_p(x, y, z), \quad (12)$$

$$W_{ESA}(x, y, z) = \frac{\sigma_{ESA}(\nu_p)}{h\nu_p} I_p(x, y, z), \quad (13)$$

$$W_{78(87)}(x, y, z) = \frac{\sigma_{Yb-a78(Yb-e87)}(\nu_p)}{h\nu_p} I_p(x, y, z), \quad (14)$$

$\sigma_{Er-a12}(\nu_s)$ 、 $\sigma_{Er-e21}(\nu_s)$ 是 Er^{3+} 对 $1.53 \mu m$ 信号光的吸收、辐射截面, $\sigma_{Er-a13}(\nu_p)$ 、 $\sigma_{Yb-a78}(\nu_p)$ 和 $\sigma_{Yb-e87}(\nu_p)$ 分别为 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 对 $0.98 \mu m$ 抽运光的吸收及辐射截面, σ_{ESA} 为 Er^{3+} 激发态吸收截面, I 代表光强。 M 是将自发辐射谱 ($1.45 \sim 1.65 \mu m$) 进行区间离散化的取样数目, ν_j 是各样条的中心频率, $\sigma_{Er-a12}(\nu_j)$ 、 $\sigma_{Er-e21}(\nu_j)$ 是 Er^{3+} 对 $1.45 \sim 1.65 \mu m$ 波段内频率为 ν_j 的光波的吸收、辐射截面^[6], 该项可用于分析放大器的噪声。光强在波导内的分布用波导横截面上的归一化光强分布和波导内的实际传输功率表示:

$$I_{s(p)}(x, y, z) = \psi_{s(p)}(x, y) P_{s(p)}(z), \quad (15)$$

$$I_{ASE\pm}(x, y, z, \nu_j) = \psi_s(x, y) P_{ASE\pm}(z, \nu_j), \quad (16)$$

$P_s(z)$ 、 $P_p(z)$ 、 $P_{ASE\pm}(z)$ 分别为信号光、抽运光和正反向的自发辐射功率。

分析只掺 Er^{3+} 的波导放大器增益时, 只需令 $N_{Yb} = 0$, 并设 Yb、Er 间的能量传递系数为零。理论分析中所用光学参量取自 Al_2O_3 作基体材料的相关文献中的实验数据^[1,8,9], 见表 1。

2.3 传输方程

稳态时,信号光、抽运光、放大的自发辐射沿有源波导的功率变化由传输方程描述^[15]:

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z) - \alpha_p P_p(z), \quad (17)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = [\gamma_{21}(z, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu_s)]P_s(z) - \alpha_s P_s(z), \quad (18)$$

$$\frac{dP_{ASE\pm}(z, \nu_j)}{dz} = \pm [\gamma_{21}(z, \nu_j) - \gamma_{12}(z, \nu_j)]P_{ASE\pm}(z, \nu_j) \pm mh\nu_j \Delta\nu\gamma_{21}(z, \nu_j) \mp \alpha_s P_{ASE\pm}(z, \nu_j), \quad (19)$$

$$(j = 1 \sim M),$$

其中

$$\gamma_{12(21)}(z, \nu_s) = \iint_A \psi_s(x, y) \sigma_{Er-a12(Er-e21)}(\nu_s) N_{1(2)}(x, y, z) dx dy, \quad (20)$$

$$\gamma_{12(21)}(z, \nu_j) = \iint_A \psi_s(x, y) \sigma_{Er-a12(Er-e21)}(\nu_j) N_{1(2)}(x, y, z) dx dy, \quad (21)$$

$$\gamma_p(z) = \iint_A \psi_p(x, y) [\sigma_{Er-a13}(\nu_p) N_1(x, y, z) + \sigma_{ESA}(\nu_p) N_3(x, y, z) + \sigma_{Yb-a78}(\nu_p) N_7(x, y, z) - \sigma_{Yb-e87}(\nu_p) N_8(x, y, z)] dx dy, \quad (22)$$

α_s 和 α_p 是信号光和抽运光的波导损耗, $\Delta\nu$ 为自发辐射谱离散化的取样宽度, A 是掺铒光波导的有源区横截面积, m 为信号光导模个数, 由波导各膜层介电常数和几何结构决定, 如双基膜传输则 $m=2$ 。

波导放大器的边界条件为 $P_p(0) = P_p, P_s(0) = P_s, P_{ASE+}(0, \nu_j) = P_{ASE-}(L, \nu_j) = 0$, L 为波导长度, 波导放大器的增益由下式确定为

$$G = 10 \lg \frac{P_s(z)}{P_s(0)}. \quad (23)$$

利用有限元法获得的脊波导中信号光和抽运光的归一化光强分布 ψ_s, ψ_p , 求解速率方程的稳态解, 得出各个能级上的粒子数 $N_i(x, y, z)$, 再由 ψ_s, ψ_p 和 N_i , 计算出 $\gamma_p(z), \gamma_{12}(z, \nu_j), \gamma_{21}(z, \nu_j)$ 最后根据传输方程, 由龙格-库塔(Runge-Kutta)法和多步法求解 $2M+2$ 个非线性微分方程, 按步长计算 $P_s(z)$ 和 $P_p(z)$ 及 $P_{ASE\pm}(z, \nu_j)$ 。信号光、自发辐射及抽运光的波导损耗取参考值 0.35 dB/cm ^[8], 步长取 $20 \mu\text{m}$ 。

通过比较取样数目 M 取 50 ($\Delta\lambda = 4 \text{ nm}, \Delta\nu = 512 \text{ GHz}$) 和 200 ($\Delta\lambda = 1 \text{ nm}, \Delta\nu = 128 \text{ GHz}$) 的结果, 当掺 Er 浓度 $N_{Er} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $P_p = 50 \text{ mW}$, $L = 15 \text{ cm}$ 时, 随着信号的传输, 相对增益偏差 $(G_{200} - G_{50})/G_{200}$ 从 1×10^{-6} 增至 1×10^{-3} 。但仍然非常小, 因此离散化 50 个区间就够了。

3 光波导放大器的增益特性

3.1 掺铒氧化铝光波导放大器和铈铒共掺氧化铝光波导放大器抽运效率和增益的比较

图 3 是掺铒及铈铒共掺杂情况下, 抽运效率和放大器增益对抽运功率的变化关系。输入信号光功率 $P_s(0) = 1 \mu\text{W}$ (-30 dBm), $N_{Er} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $N_{Yb} = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 波导长 2 cm 。增益随抽运功率的增加而增加, 并趋于饱和。铈铒共掺氧化铝光波导放大器的增益在抽运功率为 5 mW 时就接近达到饱和值, 而对掺铒氧化铝光波导放大器, 达到饱和需

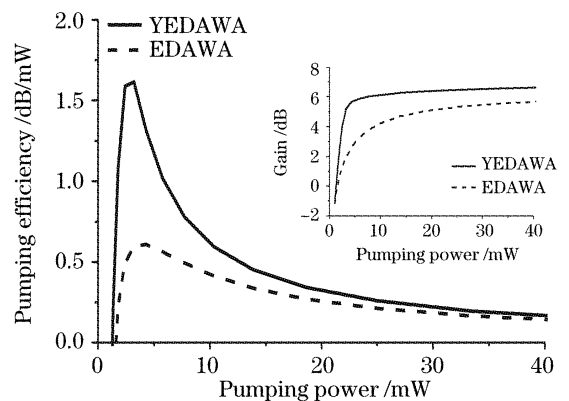


图 3 掺铒氧化铝光波导放大器 and 铈铒共掺氧化铝光波导放大器增益及抽运效率的比较

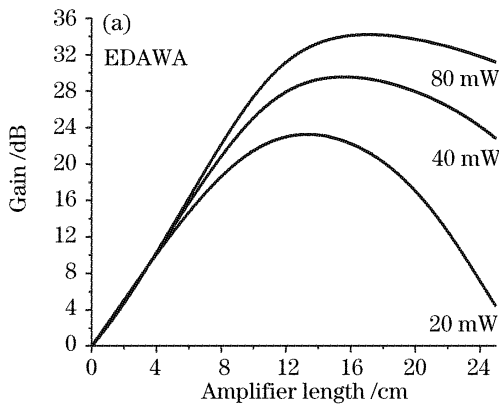
Fig. 3 Comparisons of pumping efficiencies and gain between YEDAWA and EDAWA

要较高的功率,并且没有镱共掺氧化铝光波导放大器获得的增益大。

就抽运效率而言,镱共掺氧化铝光波导放大器明显要比掺铒氧化铝光波导放大器的高,尤其功率较小时。随着抽运功率的增加抽运效率下降,所以高功率抽运时,掺铒不会明显提高抽运效率。

3.2 放大器的多参量优化

图 4 是以抽运功率为参变量,分别给出的掺铒氧化铝光波导放大器和镱共掺氧化铝光波导放大器增益随波导长度变化的特性曲线。增益的变化存在上升和下降两个区域。初始阶段,信号光很弱,



(18)式中的增益系数 $\gamma_{21}(z, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu_s)$ 近似为常数,增益沿波导线性增加。之后,增长变慢。一方面是由于随信号光不断增强,饱和效应使增益系数不断下降;另一方面,随放大过程的能量消耗,抽运功率下降,从而反转粒子数减小,也使增益系数随之下下降,增益增长缓慢。到某一长度处,增益系数等于波导损耗系数时,信号不再被放大,增益达到最大值。超过此长度,随反转粒子数和增益系数的继续下降,信号反而因增益不抵损耗,直至因吸收和损耗而减小,增益处于下降区。因此就放大器的净增益而言,存在一最佳波导长度,并且这一长度与抽运功率有关。

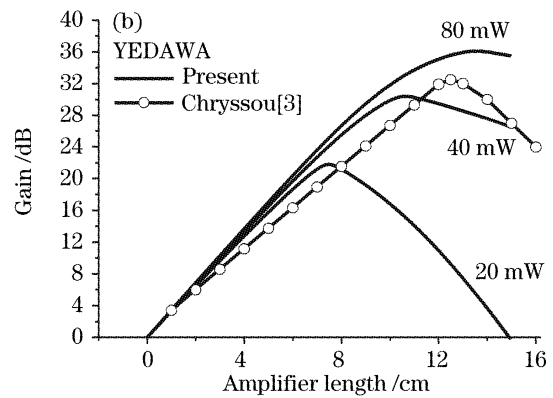


图 4 掺铒(a),镱共掺(b)脊波导放大器在不同抽运功率下信号增益与放大器长度的关系

Fig. 4 EDAWA (a), YEDAWA (b) signal gain as a function of amplifier length for different input pump powers

镱共掺氧化铝光波导放大器在增益上升区和下降区的线性特征更加显著。为得到较高增益需要更长的波导和更高的抽运功率。对掺铒氧化铝光波导放大器, $N_{Er} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 40 mW 抽运时, 16 cm 可得约 28 dB 最大增益,在同样的掺杂和抽运条件下,镱共掺氧化铝光波导放大器最大可获得约 32 dB 的增益,且放大器长度只需 10 cm。

运效率要高于 Chryssou 的结果,并且可以保证信号光单模传输。

Hoven^[8] 研究组理论计算预言 $1.48 \mu\text{m}$, 50 mW 功率抽运时,掺铒数浓度 $2.7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的 15 cm 长波导放大器可得到 20 dB 的光增益。本文采用的是优化的抽运波长 $0.98 \mu\text{m}$, 掺铒数浓度 $2.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的 15 cm 长波导放大器抽运功率 40 mW 时即可得到近 30 dB 的增益。

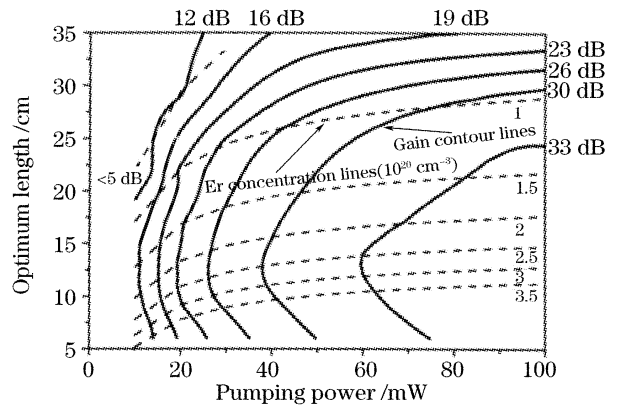


图 5 掺铒 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 波导放大器的多参量优化设计曲线

Fig. 5 Multi-parameter optimum of the Er-doped $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ waveguide amplifier

图 4(b)同时给出了 Chryssou^[10] 的计算结果,抽运功率为 100 mW, Yb、Er 的掺杂浓度与本论文一致。但 Chryssou 采用的是 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的凹道波导放大器,由于有源区域面积相对较大,需要较大的抽运功率,而且 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的凹道波导,信号光是多模传输的, $E_{11}^x, E_{11}^y, E_{21}^x, E_{21}^y, E_{12}^x$ 和 E_{12}^y 都会出现,信号放大过程将带来模式色散,作为放大器是一不利因素。结果显示本文采用的脊波导放大器的抽

不像光纤放大器,波导放大器一旦刻制出来,长度就不能改变。对一定的抽运功率,放大器的最佳长度设计应使残余的抽运功率达到使增益系数为 0 时的值,这时放大器获得的增益最大。当然最佳长度还要受到掺杂浓度的影响,因此最佳长度、掺杂浓度和抽运功率之间存在一最佳匹配关系。本文针对 EDAWA 对三者进行了同步优化,得到了非常实用

的优化设计曲线,如图 5 所示。图中横坐标为抽运功率,纵坐标是优化的放大器长度,虚线为不同的掺铒浓度,实线为最大增益等值线,虚线和实线的交点就是在相应的抽运功率、掺铒浓度、最佳长度下获得的最大增益。为获得合适的增益,还可以根据现有条件,对三者进行选择。

4 SiO₂/Si 基铒铒共掺氧化铝光波导放大器的实验研究

采用中频磁控溅射沉积法制备了 SiO₂/Si 基 Yb-Er 共掺 Al₂O₃ 薄膜^[16~19],过程主要包括:在单晶硅片上先用热氧化法氧化一层 SiO₂;经超声波清洗后放入真空镀膜室;在 SiO₂ 上用孪生靶中频溅射技术沉积一层 Yb-Er 共掺 Al₂O₃ 薄膜;对制得的样品进行 850℃ 退火。其中溅射孪生靶是两个尺寸、外形完全相同的嵌有一定数目和比例 $\phi 2$ mm 的 Yb 柱和 Er 柱的铝靶。溅射过程中两靶周期性轮流作为阴极和阳极,既可以抑制溅射靶面的弧光放电,也消除了普通直流反应磁控溅射中“阳极消失”及等离子体放电不稳定现象。

制得的薄膜均匀、致密,厚 1.16 μm ,折射率 1.65,掺铒分子数浓度 0.6%,掺铒分子数浓度 5.2%,膜片尺寸 22.4 mm \times 10.6 mm。薄膜光致发光谱中心波长在 1.53 μm 附近,半峰全宽达 40~60 nm。薄膜样品经北京创威纳公司刻蚀加工,由于 Al₂O₃ 材料刻蚀上的难度,目前刻蚀出的是非标准直脊波导样品,宽 10 μm 、脊高 1.04 μm 、波导长 2.24 cm,波导间距 30 μm ,空气作为覆盖层。

采用综合理论模型对制备的波导放大器进行了理论模拟,有限元分析显示波导内信号光和抽运光均是多模传输,信号光 x 偏振有 6 个模式,抽运光共有 26 个模式。由于波导截面尺寸较大,降低了抽运光的功率密度,阈值抽运功率要比小尺寸的波导放大器的大。

抽运光和信号光经由波分复用器合路后,由一根单模光纤输出,输出光纤的末端由 8.2 μm 被腐蚀拉成 $\phi 0.96$ μm 的锥形光纤尖。经纳米级五维光纤精密调节架调节,直接耦合进波导芯层。被放大的光信号经光学斩波器(425 Hz)和中心波长为 1.54 μm 、带宽为 26 nm 的光带通滤波器后入射到 InGaAs 探测器,再经锁相放大,由计算机显示及数据处理。实测中对信号光进行了 1 Hz 电源调制,测量峰一峰值,这样不仅完全分离了抽运光,同时还排

除了自发辐射和杂散光。测量在室温下进行。

图 6 是经测量和计算得到的放大器净增益随抽运功率的变化曲线,阈值抽运功率在 18 mW 左右。在 70 mW 的抽运功率下,获得了 8.44 dB 的净增益,相当 3.77 dB/cm。图中同时表示出了采用综合理论模型给出的模拟结果。实验与数值模拟的结果变化趋势一致,阈值抽运功率两者也非常接近。

理论计算 2.24 cm 的铒铒共掺氧化铝光波导放大器可获得 10.6 dB 的净增益,即 4.73 dB/cm,分析差别是由于计算中采用的光学参量会和实际参量有所差别,因为即使同种基体材料,但不同制备方法,参量值会有所不同^[20]。另外,计算时波导损耗取 0.35 dB/cm,而实际波导损耗估计要大一些,如芯层与包层界面的凹凸不平产生散射损耗等,这可通过制膜和刻蚀工艺的提高而得到改善。

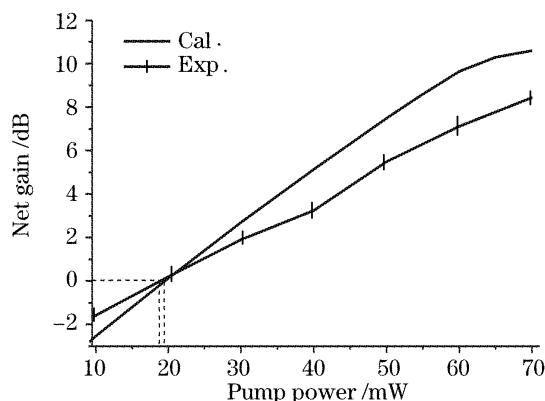


图 6 放大器净增益与抽运功率的关系

Fig. 6 Dependence of net gain of YEDAWA on pump power

5 结 论

利用包括速率方程、有限元场分布、传输方程,并考虑正反向自发辐射噪声影响的综合理论模型分析了掺铒氧化铝光波导放大器和铒铒共掺氧化铝光波导放大器增益特性。模拟计算中建立了更为合理的参量优化方案,实现了放大器抽运功率、掺杂浓度、长度和增益的同步优化,得到最佳长度下的最大增益,绘制出了优化设计曲线。将该理论模型应用于实际的 Yb-Er 共掺 Al₂O₃ 光波导放大器,结果与实验数据相符。

参 考 文 献

- 1 G. N. van den Hoven, E. Snoeks, A. Polman *et al.*, Upconversion in Er-implanted Al₂O₃ waveguides[J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(3): 1258~1270
- 2 A. Kozanecki, B. J. Sealy, K. Homewoos. Excitation of Er³⁺ emission in Er, Yb codoped thin silica films[J]. *J. Alloys and*

- Compounds*, 2000, **300~301**: 61~64
- 3 A. Polman. Erbium-doped planar optical amplifiers[C]. *Proc. 10th European Conference on Integrated Optics (ECIO)*, Paderborn, Germany, 2001. 75~78
 - 4 Zhang Long, Lin Fengying, Qi Changhong *et al.*. High Erbium doped glasses for waveguide amplifiers at 1.5 μm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12): 1688~1693 (in Chinese)
张 龙, 林凤英, 祁长鸿 等. 用于 1.5 μm 光波导放大器的高浓度 Er^{3+} 掺杂玻璃[J]. *光学学报*, 2000, **20**(12): 1688~1693
 - 5 Cheng Haiyan, Dai Jizhi, Yang Yapei *et al.*. Er^{3+} , Yb^{3+} -codoped phosphate glass channel waveguide amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 815~818 (in Chinese)
陈海燕, 戴基智, 杨亚培 等. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺杂磷酸盐玻璃沟道波导放大器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 815~818
 - 6 Gerlas N. van den Hoven, Jan A. van der. Elsken, Albert Polman *et al.*. Absorption and emission cross sections of Er^{3+} in Al_2O_3 waveguides[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(15): 3338~3341
 - 7 V. P. Gapontsev, S. M. Mtsin, A. A. Isineev *et al.*. Erbium glass lasers and their applications[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1989, **14**(4): 189~196
 - 8 G. N. van den Hoven, R. J. I. M. Koper, A. Polman *et al.*. Net optical gain at 1.53 μm in Er-doped Al_2O_3 waveguides on silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(14): 1886~1888
 - 9 Christof Strohhofer, Albert Polman. Absorption and emission spectroscopy in Er^{3+} - Yb^{3+} doped aluminum oxide waveguides [J]. *Optical Materials*, 2003, **21**: 705~712
 - 10 C. E. Chryssou, F. Di Pasquale, C. W. Pitt. Improved gain performance In Yb^{3+} -sensitized Er^{3+} -doped alumina (Al_2O_3) channel optical waveguide amplifiers [J]. *J. Lightwave Technology*, 2001, **19**(3): 345~349
 - 11 Fabrizio Di Pasquale, Maurizio Zoboli, Macro Federighi *et al.*. Finite-element modeling of silica waveguide amplifiers with high erbium concentration [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(5): 1277~1281
 - 12 A. P. Lopez-Barbero, H. E. Hernandez-Figueroa, P. Torres. Numerical modeling of multimode doped optical waveguides[J]. *Advances in Engineering Software*, 2000, **31**(4): 235~240
 - 13 Shufeng Li, Changlie Song, Chengren Li *et al.*. Theoretical model of Er-doped Al_2O_3 waveguides amplifier[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4927**: 263~270
 - 14 Shufeng Li, Changlie Song, Chengren Li *et al.*. Coupling of fiber-waveguide amplifier[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5644**: 250~258
 - 15 C. Randy Giles, Emmanuel Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~283
 - 16 Gao Jingsheng, Song Changlie, Li Chengren *et al.*. Photoluminescence of $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped Al_2O_3 film fabricated by medium frequency sputter [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(10): 1162~1166 (in Chinese)
高景生, 宋昌烈, 李成仁 等. 中频溅射沉积镱铒共掺 Al_2O_3 薄膜光致发光特性[J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(10): 1162~1166
 - 17 Chengren Li, Changlie Song, Shufeng Li *et al.*. Deposition of Er^{3+} : Al_2O_3 films by closed-field unbalanced magnetron sputtering and photoluminescence characterization of the films [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4905**: 617~622
 - 18 Song Qi, Song Changlie, Gao Jingsheng *et al.*. $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped Al_2O_3 optical waveguide fabricated by middle frequency sputter [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(4): 440~445 (in Chinese)
宋 琦, 宋昌烈, 高景生 等. 中频溅射技术制备镱铒共掺 Al_2O_3 光波导[J]. *激光技术*, 2005, **29**(4): 440~445
 - 19 Li Chengren, Li Shufeng, Song Qi *et al.*. Characteristics of net gain of $\text{Yb}:\text{Er}$ co-doped Al_2O_3 waveguide amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 650~654 (in Chinese)
李成仁, 李淑凤, 宋 琦 等. 镱铒共掺 Al_2O_3 光波导放大器的净增益特性[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 650~654
 - 20 P. G. Kik, A. Polman. Cooperative upconversion as the gain-limiting factor in Er doped miniature Al_2O_3 optical waveguide amplifiers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(9): 5008~5012