

一种掺铒光波导放大器的频谱数值分析方法

禹 忠, 韦 玮, 陈 烽, 侯 洵

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种基于 Douglas 离散格式的有限差光束传播法的数值计算方法. 采用该方法对实验中所获得的吸收光谱和激发光谱进行 Lorentzian 叠加拟合, 并结合多能级速率方程计算出掺铒光波导放大器(EDWA)中光的场传输强度分布, 从而得到掺铒光波导放大器的增益和吸收频谱特性. 数值分析结果表明, 选用泵浦光波长为 980 nm 的泵浦光源比 1480 nm 的可以获得更大的泵浦效率, 同时合理增加 EDWA 的泵浦长度和掺杂离子数密度可以获得更大的信号增益. 由于考虑了协同上转换和交叉弛豫效应, 该算法能够对高掺杂的 EDWA 进行较宽频谱的分析.

关键词: 掺铒光波导放大器; 有限差光束传播法; 频谱分析

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2004)10-1068-04

Numerical Spectrum Analysis Method for Erbium Doped Waveguide Amplifiers

Yu Zhong, Wei Wei, Chen Feng, Hou Xun

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A numerical analysis method for erbium doped waveguide amplifiers (EDWA), based on the finite difference beam propagation method modified by Douglas scheme, was presented. In the method, the emission and absorption spectrums obtained from experiments were superposed and fitted by Lorentzian algorithm, and combining with multi-level rate equations, the transmission intensity distribution of the optical field in (EDWA) was simulated. Finally, the gain and absorption spectral behavior of EDWA were obtained numerically. Results show that the pump efficiency of EDWA pumped at 980 nm is higher than that at 1480 nm. Meanwhile, by rationally increasing of the pump length and the erbium concentration, larger signal gains can be acquired. Taking account of the up-conversion and cross-relaxation effects of cooperation, the spectrum analysis of highly doped EDWA can be carried out over a wider frequency band.

Keywords: erbium doped waveguide amplifiers; finite-difference beam propagation method; spectrum analysis

随着掺铒光波导放大器(EDWA)在波分复用技术中的广泛应用^[1], 寻找简便、准确的理论计算工具, 对复杂 EDWA 进行优化设计就显得尤为重要. 目前常用的方法主要是利用有限元法和传输线法等方法进行 EDWA 结构设计优化^[2, 3]. 但是, 这些算法复杂, 并且只能对单一波长信号光进行分析, 与无源光波导器件广泛使用的设计方法的兼容性不是很好.

本文提出一种基于光束传播法对掺铒光波导放大器进行频谱分析的数值计算方法. 这种方法利用 Douglas 离散格式有限差光束传播法(FD-BPM)对 EDWA 中泵浦光和信号光光场进行求解, 同时求解多能级方程中各个能级的离子数分布, 得到不同光频率下的复数原子极化率, 从而获得光波导放大器中的光放大频谱特性, 为优化设计掺铒光波导放大器提供了参考.

收稿日期: 2004-02-26. 作者简介: 禹 忠(1973~), 男, 博士生; 侯 洵(联系人), 男, 教授, 中国科学院院士. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59983001).

1 理论模型

由于 EDWA 中泵浦长度较短,掺杂离子数密度相对较大(大于 $1.0 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$),离子之间距离较近,所以不能忽略协同上变换和交叉弛豫效应而简单套用掺铒光纤放大器(EDFA)中的三能级方程来描述 Er^{3+} 系统离子的分布特性,必须使用考虑到上述效应的多能级方程^[4, 5].

当泵浦波长为 980 nm 时,在 EDWA 中能级传输的速率方程表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -(R_{13} + W_{12})N_1 + (W_{21} + \frac{1}{\tau_2})N_2 + \\ &\quad K_2 N_2^2 + K_3 N_3^2 - C_{14} N_1 N_4 \\ \frac{dN_2}{dt} &= W_{12} N_1 - (W_{21} + \frac{1}{\tau_2})N_2 + \\ &\quad \frac{N_3}{\tau_{32}} - 2K_2 N_2^2 + 2C_{14} N_1 N_4 \\ \frac{dN_3}{dt} &= R_{13} N_1 - \frac{N_3}{\tau_{32}} - 2K_3 N_3^2 + \frac{N_4}{\tau_4} \\ \frac{dN_4}{dt} &= K_2 N_2^2 - C_{14} N_1 N_4 - \frac{N_4}{\tau_4} + K_3 N_3^2 \\ N_{\text{Er}} &= N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

当泵浦波长为 1 480 nm 时,在 EDWA 中能级传输的速率方程表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -(R_{12} + W_{12})N_1 + (W_{21} + R_{21} + \frac{1}{\tau_2})N_2 + \\ &\quad K_2 N_2^2 + K_3 N_3^2 - C_{14} N_1 N_4 \\ \frac{dN_2}{dt} &= (R_{12} + W_{12})N_1 - (W_{21} + R_{21} + \frac{1}{\tau_2} + \\ &\quad R_{24})N_2 + \frac{N_3}{\tau_{32}} - 2K_2 N_2^2 + 2C_{14} N_1 N_4 \\ \frac{dN_3}{dt} &= \frac{N_3}{\tau_{32}} - 2K_3 N_3^2 + \frac{N_4}{\tau_4} \\ \frac{dN_4}{dt} &= R_{24} N_2 + K_2 N_2^2 - C_{14} N_1 N_4 - \frac{N_4}{\tau_4} + K_3 N_3^2 \\ N_{\text{Er}} &= N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: N_{Er} 是 EDWA 中 Er^{3+} 的体积离子数; N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 分别是 Er^{3+} 能级 $^4\text{I}_{15/2}$ 、 $^4\text{I}_{13/2}$ 、 $^4\text{I}_{11/2}$ 、 $^4\text{I}_{9/2}$ 和 $^4\text{F}_{7/2}$ 上的粒子翻转数; τ_n 为相应能级的自发辐射寿命; K_n 为相应能级上的协同变换常数; C_{14} 是交叉弛豫常数; R_{ij} 和 W_{ij} 为能级跃迁时相应的激发转化速率,可以表示为 $R_{ij} = \frac{I_p(x, y, z)}{h\nu_p} \sigma_{ij}$, $W_{ij} = \frac{I_s(x, y, z)}{h\nu_s}$

σ_{ij} (其中 h 是 Planck 常数, I_p 和 I_s 分别是泵浦和信号光强度, ν_p 和 ν_s 分别是泵浦和信号光的频率, σ_{ij} 是相应能级上的吸收截面和发射截面). Stark 分裂能引起吸收截面和发射截面线型展宽,所以对实验所得的吸收光谱和发射光谱在光频率 ν 下进行 Lorentzian 叠加拟合可以得到

$$\sigma(\nu) = \sigma_{\text{max}} L(\nu) = \sigma_{\text{max}} \sum_{i,j} a_{i,j} / [1 + 4(\nu - \nu_{i,j})^2 / (\Delta \nu_{i,j})^2] \quad (3)$$

式中: σ_{max} 为相应频率的最大峰值; $a_{i,j}$ 为相应的权重峰高; $\Delta \nu_{i,j}$ 为在光频率 $\nu_{i,j}$ 下的半高宽.

在掺铒光波导放大器中,泵浦光和信号光的电场满足 Helmholtz 方程

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z) - k_0^2 \epsilon(\nu) \Phi(x, y, z) = 0 \quad (4)$$

式中: k_0 为空间波数. 信号光和泵浦光的复合介电常数可以表示为

$$\epsilon(\nu) = \epsilon_r(\nu) + \epsilon_0 x(\nu) = \epsilon_r(\nu) + \epsilon_0 (\chi'(\nu) - i \chi''(\nu)) \quad (5)$$

式中: ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空介电常数和波导中相应的光频率下的介电常数; χ' 和 χ'' 是信号和泵浦光的复数原子极化常数 χ 的实部和虚部^[6, 7]. 当泵浦波长为 980 nm 时,有

$$\chi''_s = \frac{[\epsilon_r(\nu_s)]^{1/2}}{k_{0,s}} g_s = \frac{[\epsilon_r(\nu_s)]^{1/2}}{k_{0,s}} [\sigma_{21}(\nu_s) N_2 - \sigma_{12}(\nu_s) N_1] \quad (6)$$

$$\chi''_p = \frac{[\epsilon_r(\nu_p)]^{1/2}}{k_{0,p}} = \frac{[\epsilon_r(\nu_p)]^{1/2}}{k_{0,p}} \sigma_{13}(\nu_p) N_1 \quad (7)$$

当泵浦波长为 1 480 nm 时,有

$$\chi''_s = \frac{[\epsilon_r(\nu_s)]^{1/2}}{k_{0,s}} g_s = \frac{[\epsilon_r(\nu_s)]^{1/2}}{k_{0,s}} [\sigma_{21}(\nu_s) N_2 - \sigma_{12}(\nu_s) N_1 - \sigma_{24}(\nu_s) N_2] \quad (8)$$

$$\chi''_p = \frac{[\epsilon_r(\nu_p)]^{1/2}}{k_{0,p}} \alpha_p = \frac{[\epsilon_r(\nu_p)]^{1/2}}{k_{0,p}} [\sigma_{21}(\nu_p) N_2 - \sigma_{12}(\nu_p) N_1] \quad (9)$$

式中: g_s 和 α_p 是相应的信号和泵浦波长下的增益和吸收系数. χ' 可以通过对虚部 χ'' 进行 Hilbert 变换得到.

在每一步传输步长上,利用 Douglas 离散格式有限差光束传播法(FD-BPM)对信号光和泵浦光场求解,代入铒系统的多能级速率方程得到各个能级离子数分布.由式(8)和式(9)得到相应光频率下的复数原子极化率和复介电常数,依次迭代直到泵浦末端,从而获得光波导放大器中光放大特性.为了减小有限的计算边界场产生的光反射,边界条件采用

完美匹配层(PML)边界条件.

2 结果与分析

本文对掺铒的通道光波导放大器进行模拟, 计算窗口为 $64\ \mu\text{m}$, x 和 z 方向的步长分别为 $0.4\ \mu\text{m}$ 和 $4\ \mu\text{m}$. 计算输入场分别是在泵浦光波长为 $980\ \text{nm}$ 、 $1\ 480\ \text{nm}$ 以及信号光波长(λ)为 $1\ 532\ \text{nm}$ 附近的单模高斯场. Al_2O_3 芯层构成的通道波导宽和高都是 $2\ \mu\text{m}$, 并置于计算窗口的中心. 在 $980\ \text{nm}$ 、 $1\ 480\ \text{nm}$ 和 $1\ 532\ \text{nm}$ 时芯层的折射率分别是 1.74 、 1.66 和 1.65 . 芯层和包层的折射率差为 0.4 . 铒离子亚稳态($1\ 530\ \text{nm}$)附近的吸收和发射截面曲线及其他相应参数见文献[4,5].

在 Er^{3+} 离子数密度为 $1.0\times 10^{26}\ \text{m}^{-3}$ 的 EDWA 中选取功率为 $100\ \text{mW}$ 的泵浦光源, 对 $1\ \mu\text{W}$ 信号光进行泵浦放大, 信号的增益总量与泵浦长度的关系曲线如图 1 所示. 可以看出, 随着 EDWA 中泵浦长度的增加, 增益不断增加达到最大值. 当泵浦长度超过最大增益点时, 由于协同上转换和交叉弛豫的影响, 增益总量减小, 泵浦效率明显下降. 因而, 在 EDWA 的设计中必须选取最佳的泵浦长度才能获得 EDWA 的最大增益, 提高泵浦效率. 同时, 不同波长的信号光因其吸收和发射的截面积不同, 信号的增益总量也不同.

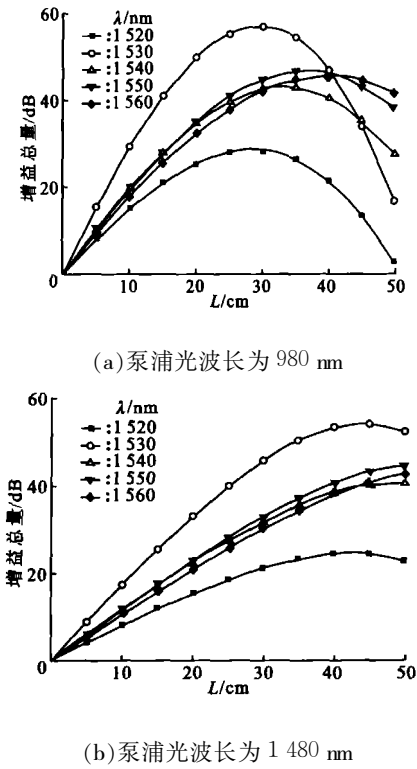


图 1 信号净增益与波导长度的关系

图 2 为在 Er^{3+} 离子数密度为 $1.0\times 10^{26}\ \text{m}^{-3}$ 的 EDWA 中选取功率为 $100\ \text{mW}$ 泵浦光源, 对 $1\ \mu\text{W}$ 信号光进行泵浦放大时的信号增益频谱曲线. 为了确保信号光增益随泵浦光线性变化, 最佳泵浦长度根据图 1 选择. 可以看出, 选取 $980\ \text{nm}$ 泵浦光实现的信号增益要大于 $1\ 480\ \text{nm}$ 的, 这是因为在 $980\ \text{nm}$ 泵浦过程中, 从能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 跃迁到 $^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁时 Er^{3+} 的吸收截面积为 0 . 从图中还可以看出, 在没有泵浦源的情况下, EDWA 中信号光在 $1\ 530\ \text{nm}$ 处的信号增益为 $-5.8\ \text{dB}/\text{cm}$.

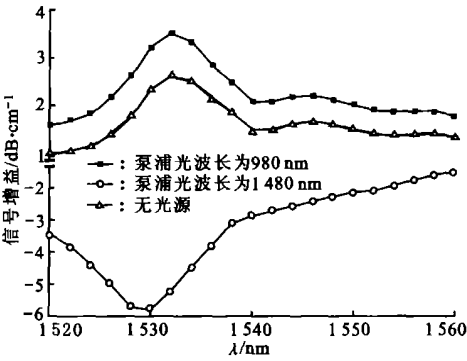


图 2 信号增益的频谱曲线

采用泵浦光波长为 $980\ \text{nm}$ 和 $1\ 480\ \text{nm}$ 、功率为 $100\ \text{mW}$ 的光源时, 功率为 $1\ \mu\text{W}$ 信号光的增益特性和 Er^{3+} 离子数密度关系如图 3 所示. 由于单位

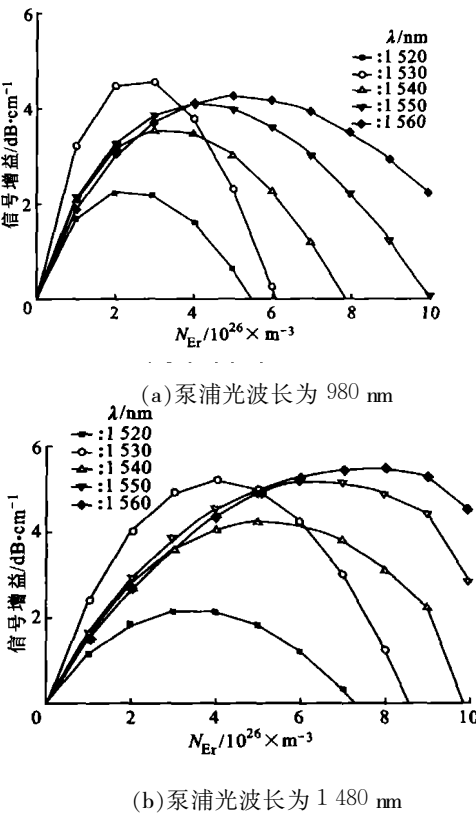


图 3 Er^{3+} 离子数密度与信号增益的关系

泵浦长度内的 Er^{3+} 离子数密度增加使粒子翻转总数增加,故信号光增益会随之增加.当离子数密度增加到一定值时,离子间距离进一步减小,受协同上转换和交叉弛豫的影响,增益开始下降.因此,可以根据不同的泵浦功率选取最佳的 Er^{3+} 掺杂浓度.

3 结 论

本文提出了一种基于 Douglas 离散格式光束传播法的光波导放大器的频谱数值分析方法.在对 EDWA 中泵浦和信号光场进行求解时,先对实验中获得吸收光谱和激发光谱进行 Lorentzian 叠加拟合,再结合多能级方程得到相应的复原子极化率,并得到掺铒光波导放大器的增益和吸收频谱特性,优化掺铒光波导放大器设计.分析结果表明,在 EDWA 中,泵浦光波长为 980 nm 的光源比 1 480 nm 的光源可以获得更大的泵浦效率,此时适当地提高 EDWA 的泵浦长度、增加铒离子掺杂浓度,可以获得更大的信号增益.

参考文献:

[1] Kocyigit A,Gokisik D,Bilgen S. All-optical networking [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sci-

ences, 2001, 9(2): 69—121.
[2] Valles J A,Lazaro J A,Rebolledo M A. Modeling of integrated erbium-doped waveguide amplifiers with overlapping factors methods [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(9): 1 685—1 694.
[3] Huang W B,Syms R R A. Analysis of folded erbium-doped planar waveguide amplifiers by the method of lines [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(12): 2 658—2 664.
[4] van den Hoven G N,Koper R J I M,van Dam C,et al. Net optical gain at 1.53 μm in Er-doped Al₂O₃ waveguides on silicon[J]. Applied Physics Letters, 1996, 68(14): 1 886—1 888.
[5] Kik P G,Polman A. Cooperative upconversion as the gain-limiting factor in Er doped miniature Al₂O₃ optical waveguide amplifiers [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(9): 5 008—5 012.
[6] Reichel S,Lenz W, Zengerle R.Simulation of phase modulation in EDFA's using an extended model [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(12): 1 724—1 726.
[7] Yu Z, Gao L M, Wei W,et al. Numerical analysis of amplification characteristic of erbium-doped waveguide amplifiers by FD-BPM [J]. Optical and Quantum Electronics, 2004, 36(4): 321—330.

(编辑 刘 杨)

高性能固体片式铝电解电容器取得突破性进展

2004 年 7 月 5 日,教育部组织对西安交通大学与福建国光电子科技股份有限公司共同完成的“高性能固体片式铝电解电容器”的中试项目进行了技术成果鉴定.鉴定委员会认真听取了项目负责人徐友龙教授所做的研制报告,鉴定委员会经过质询和认真讨论后一致认为该项目在材料和核心工艺上有重大创新.

项目组在深入地研究了聚吡咯薄膜电聚合生长规律的基础上,开发了在复杂多孔的绝缘体表面原位均匀生长高电导率聚吡咯膜的新技术,解决了聚合电解液长期使用过程中的自聚合难题,提出并实现了铝箔阳极阴极隔离阻断工艺、在补形成过程中加入热处理工艺、在电聚合之前引入补形成过程等新技术,保证产品的低漏电流,提出了在最终补形成电解液中加入掺杂剂的方法,降低了产品的损耗值.

该项目在中试生产技术上取得了突破,自主设计了带有贵金属丝辅助电极的低温恒温电聚合装置等核心关键设备,建立了与工艺相适应的中试生产线,设计了多步聚恒电流方法的电聚合工艺,提高了生产效率.提出了整体工艺条原位合成聚吡咯薄膜工艺,保证了原位合成高精度,提高了产品合格率,并大幅度降低了生产成本.批量生产出的 8 种规格的高性能片式固体铝电解电容器的主要技术指标达到国际先进水平.

该中试项目填补了国内空白,技术达到国际先进水平,所研制的产品具有广阔的市场前景,对推动我国高性能片式固体铝电解电容器的技术进步有重要作用.

(来源:电信学院)