

文章编号: 0253-2239(2007)09-1643-6

掺铒玻璃波导放大器中抽运光信号光重叠因子分析

顾浩然 金国良 娄娜 戴亚军 邵公望

(上海交通大学物理系先进光通讯系统与网络国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 通过分析掺铒(Er^{3+})玻璃波导放大器(EDWA)的放大增益机理, 提出抽运光与信号光光模场分布之间的归一化重叠积分因子(Γ), 并引入到掺铒波导放大器增益模拟计算中, 使理论模型更切合实际。以 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 二次离子交换工艺制作的具有埋入型渐变折射率分布的掺铒波导放大器为例, 采用数值方法模拟了条形波导截面上的二维折射率分布及抽运光、信号光的光模场分布。计算了不同工艺参量设置下的 Γ 大小, 讨论 Γ 对放大器增益的影响。结果显示, 在二次离子交换制作过程中设置适当工艺参量优化折射率分布, 能有效改善波导中抽运光与信号光光模场分布之间的重叠因子, 提高掺铒波导放大器的增益。计算结果显示, 在一定条件下, Γ 从 0.5 增至 0.8, 每厘米长度掺铒波导放大器的放大增益可提高近 1.5 dB。

关键词: 集成光学; 掺铒玻璃波导放大器; 重叠积分因子; 增益

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Analysis of Overlap Factor between Pump- and Signal-Light Intensity profiles in Er-Doped Waveguide Amplifier

Gu Haoran Jin Guoliang Lou Na Dai Yajun Shao Gongwang

(Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, The State Key Laboratory of Advanced Optical Communication System and Network, Shanghai 200240)

Abstract: The normalized overlap factor between pump- and signal-light intensity profiles in the waveguide (Γ) is introduced, and be taken into account in the theoretic model of the Er-doped glass waveguide amplifier (EDWA). For an EDWA with buried graded refractive-index profile which is fabricated by $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ two-step ion-exchange on process Er-doped phosphate glass, the two dimensional refractive-index profiles, and the guide modes of both pump and signal light in the channel waveguide is obtained using the numerical methods. The normalized value of Γ with different fabrication parameters is calculated, and its effect on the gain of EDWA has been investigated. The results show that by tailoring the fabrication parameters, the overlap factor between pump and signal light in the waveguide can be optimized and the gain of EDWA can be enhanced. With Γ enhanced from 0.5 to 0.8, the gain of EDWA can be improved nearly 6 dB.

Key words: integrated optics; Er-doped glass waveguide amplifier; overlap factor; gain

1 引言

掺铒波导放大器(EDWA)具有结构紧凑、尺寸小、成本低等优点, 是继掺铒光纤放大器(EDFA)后一种具有较好应用前景的光放大器, 可被用于城域、局域网的光通信系统^[1]; 也可用来与其他各种光学器件集成以满足不同的应用需求。通过 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 二次离子交换法制作的埋入型掺铒波导放大器不仅工艺简便, 制作成本低, 与一次离子交换工艺比较更具有传输损耗低、与光纤的耦合效率高等优点^[2,3], 是潜在实

用价值较高的一种光纤通信网络元件。在测试实际($\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 二次离子交换)制作的掺铒波导放大器过程中, 发现由不同掩膜窗口宽度制成的掺铒波导放大器, 存在传输损耗相同, 放大增益随窗口宽度变化的情况。经由红外线探测器测量, 不同波导中的抽运光、信号光的光强分布都不相同, 两者间相互的重叠性也有较大差别, 在以往掺铒波导放大器的理论研究中^[6,7], 往往忽略了抽运光与信号光光模场分布两者间的重叠性质对抽运效率与及掺铒波导放大器放大

作者简介: 顾浩然(1982—), 男, 上海人, 硕士研究生, 主要从事光纤通信、集成光学器件等方面的研究。

E-mail: hrgu.sean@gmail.com

导师简介: 金国良(1945—), 男, 教授, 主要从事光纤通信、集成光学器件等方面的研究。E-mail: gljin@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-05-26; 收到修改稿日期: 2006-09-21

增益的影响。据此,本文提出掺铒波导放大器波导截面中的抽运光与信号光模场分布之间的归一化重叠积分因子 Γ ; 将之引入到掺铒波导放大器理论模型中,使增益特性的模拟更切合实际情况。并以常用的 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 二次离子交换工艺制作的具有埋入型渐变折射率分布的掺铒波导放大器为例,模拟其折射率分布及信号光与抽运光在波导截面上的二维光模场分布。由模拟结果计算不同制作参量下 Γ 的大小,分析其对放大器增益产生的影响。

2 掺铒波导放大器增益理论模型分析

不考虑自发辐射(ASE)和上转换效应情况下,使用波长 980 nm 的抽运光,掺铒波导放大器可用三能级模型的速率方程描述^[6]:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = A_{21}N_2 - W_{12}N_1 - W_{13}N_1 + W_{21}N_2, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = A_{32}N_3 - W_{21}N_2 - W_{21}N_2 + W_{12}N_1, \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = -A_{32}N_3 - W_{13}N_1, \quad (3)$$

稳定条件下,上式等号左边都为 0,并且粒子数满足守恒条件:

$$N_1(x, y, z, t) + N_2(x, y, z, t) + N_3(x, y, z, t) = N_{\text{total}}(x, y, z, t), \quad (4)$$

其中 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_{total} 分别是 Er^{3+} 的基态能级、亚稳态上能级、980 nm 光抽运能级上的粒子数浓度及 Er 粒子数总体掺杂浓度。 A_{21} 和 A_{32} 分别是自发辐射跃迁概率。而 W_{ij} 代表受激跃迁速率项,分别定义为

$$W_{21} = \frac{\sigma_{21}(\nu_s)}{Ah\nu_s} P_s(x, y, z, t, \nu_s), \quad (5)$$

$$W_{12} = \frac{\sigma_{12}(\nu_s)}{Ah\nu_s} P_s(x, y, z, t, \nu_s), \quad (6)$$

$$W_{13} = \frac{\sigma_{13}(\nu_p)}{Ah\nu_p} P_p(x, y, z, t, \nu_p), \quad (7)$$

其中 h 为普朗克常量, ν_i 为频率。 σ_{12} 、 σ_{13} 和 σ_{21} 、 σ_{31} 分别为吸收和发射截面, P_p 、 P_s 为抽运光和信号光功率分布。 A 为与光模场分布相关的有源区波导截面面积。

稳态条件下,抽运光与信号光沿传播方向(z 向)的传输方程为

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = \iint_A \psi_p(x, y) P_p(z) \sigma_{13} N_1(x, y) N_1(z) dx dy, \quad (8)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \iint_A \psi_s(x, y) P_s(z) [\sigma_{a12} N_1(x, y) N_1(z) - \sigma_{e21} N_2(x, y) N_2(z)] dx dy, \quad (9)$$

其中由于光功率分布与粒子数浓度分布在 z 方向独立,可分解为 z 向分布: $P_{p,s}(z)$ 、 $N(z)$, 及截面归一化分布 $\psi_{p,s}(x, y)$ 、 $N(x, y)$ 。在一定的初始、边界条件下,由(1)式~(9)式采用龙格-库塔(Runge-Kutta)进行迭代计算,可得到掺铒波导放大器的最终输出增益。

在以往的理论模拟中,为简化计算引入了抽运光、信号光与稀土掺杂粒子数浓度分布间重叠因子 η_p 、 η_{si} ^[6,7]:

$$\eta_p = \iint_A \psi_p(x, y) N_1(x, y) dx dy, \quad (10)$$

$$\eta_{si} = \iint_A \psi_s(x, y) N_i(x, y) dx dy,$$

其中粒子数截面分布 $N(x, y)$ 用玻璃中稀有粒子的掺杂浓度分布替代,则传输方程(8)式、(9)式被简化为

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = \eta_p P_p(z) \sigma_{a13} N_1(z), \quad (11)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = [\eta_{s1} \sigma_{a12} N_1(z) - \eta_{s2} \sigma_{e21} N_2(z)] P_s(z), \quad (12)$$

这样的简化能够有效地缩短迭代计算时间,但其中忽略了抽运光与信号光之间的相互作用。从(1)式~(7)式可见,上下能级间的反转粒子数分布会受到波导截面上抽运光光模场分布的影响,达到稳态后在横截面上应具有与抽运光光强相近的分布,而不能再假设为初始的掺杂浓度分布。若波导中抽运光与信号光光模场分布重叠性较好,则信号光光强与反转粒子数之间充分相互作用,此时抽运效率高,能产生较大的放大增益;反之则抽运效率低下,增益下降。

在测试实际($\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 二次离子交换)制作的掺铒波导放大器过程中,经由红外线探测器拍摄到的照片,图 1 为掩膜窗口宽度不同的波导中的抽运光(980 nm)、信号光(1550 nm)的光强分布。

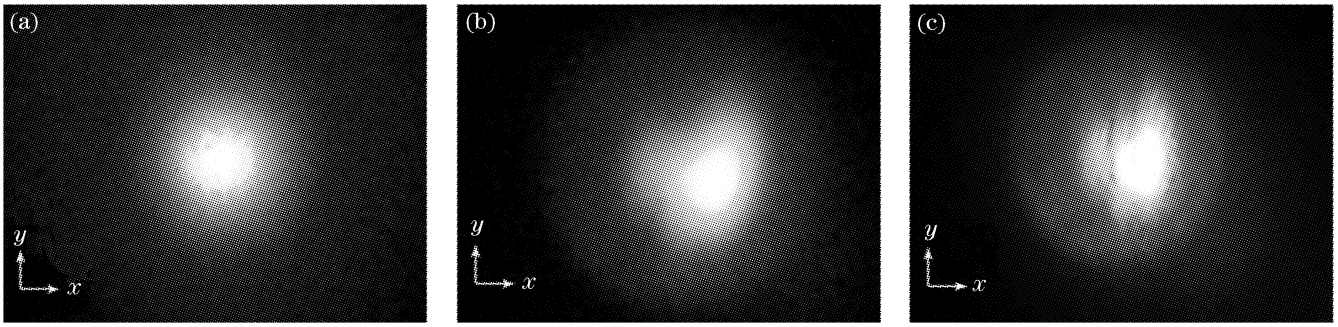


图 1 不同波导中的(a)信号光、(b)、(c)抽运光光强分布照片

Fig. 1 Photo of Signal light (a) and pump intensity profiles (b), (c) in EDWA with different channel opening widths

信号光一般如图 1(a)为单模传播。而抽运光会随不同的工艺参量设置形成高阶传播模式,光强分布变化如图 1(b)、图 1(c),从而抽运光与信号光光强分布相互之间的重叠性发生改变。

因此在简化的理论模型中,应对 η 再加上一个抽运光与信号光光模场截面分布之间的重叠权重因子 Γ 修正项,并以归一化形式给出 Γ :

$$\Gamma = \frac{\iint_A \psi_p(x, y) \psi_s(x, y) dx dy}{\iint_A \psi_p^2(x, y) dx dy \iint_A \psi_s^2(x, y) dx dy}, \quad (13)$$

修正后的 η 为: $\eta' = \eta \cdot \Gamma$ 。

为具体确定 Γ 的大小,需要确定模拟钕波导(EDW)中折射率分布,及波导截面上的抽运光、信号光光模场分布。下面以 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 二次离子交换工艺制作的玻璃掺钕波导放大器为例,采用交替方向隐式差分格式(Peaceman-Rachford 格式^[4])与预测校正差分格式相结合的有限差分法来模拟计算折射率分布 $n(x, y)$,用半矢量-有限差分方法(SV-FDM)^[5]模拟波导截面上的抽运、信号光的二维光模场分布。

3 折射率分布模拟

对于一般离子交换的玻璃光波导,其折射率变化正比于扩散进入波导的交换离子浓度的(当浓度较低时)^[8]。因此通过求解非线性二维扩散方程得到衬底中交换离子浓度分布,便得到条形光波导折射率分布。

在无外加电场的离子交换过程中,进入衬底的交换离子(Ag^+)浓度变化满足非线性二维对流扩散方程^[8~10]

$$\frac{\partial C_{\text{Ag}}}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{D_{\text{Ag}}}{1 - \alpha C_{\text{Ag}}} \nabla C_{\text{Ag}} \right), \quad (14)$$

其中 C, D 分别为从熔盐中交换入玻璃基片的交换离子(Ag^+)归一化浓度和自扩散系数, α ($\alpha = 1 - D_{\text{Ag}}/D_{\text{Na}}$) 则是两种离子(Ag^+, Na^+)的相对扩散系数。

用交替方向隐式差分格式与预测校正差分格式相结合,将(14)式数值求解。对于两次离子交换过程,分别采用不同的初始、边界条件。第一次离子交换的初始条件和边界条件为

$$\begin{cases} C|_{|x| < w/2, y > 0, t=0} = 0, \\ \partial C / \partial t|_{|x| > w/2, y, t} = 0, \\ C_{x, y=0, t} = 1, \\ C_{x, y=b, t} = 0, \end{cases} \quad (15)$$

其中 w 为掩膜窗口宽度, C 为交换离子(银离子)浓度, t 为时间。第二次离子交换的初始条件和边界条件为

$$\begin{cases} C|_{|x| < w/2, y > 0, t=0} = C_{\text{END1}}, \\ \partial C / \partial t|_{|x| > w/2, y, t} = 0, \\ C_{x, y=0, t} = 0, \\ C_{x, y=b, t} = 0, \end{cases} \quad (16)$$

其中 C_{END1} 为第一次变换末时银离子浓度。波导中的折射率分布 $n(x, y)$ 因此可由衬底中银离子浓度分布得到

$$n(x, y) = n_s + \delta \cdot C(x, y),$$

其中 $n_s = 1.53$ 为衬底折射率, δ 为与实验数据 ($\Delta n_{\text{max}} = n_{\text{max}} - n_s$) 有关的比例系数,实验所得折射率增量最大值约为 0.008。

考虑到离子交换过程中波导的展宽,模拟计算的横向窗口的范围大于 2 倍的掩膜宽度,纵向深度方向 (y 向)的计算窗口的范围大约为横向 (x 向)的一半,分别为 $(-20 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m})$ 和 $(0, 20 \mu\text{m})$;节点数为 400×200 ,取 x 方向和 y 方向节点节距相等, $dh_1 = dh_2 = 0.1 \mu\text{m}$;其他参量为 $D_{\text{Ag}} = 0.14 \mu\text{m}^2/\text{min}$, $\alpha = 0.1$ 。图 2 为模拟所得波导中折射率分布。

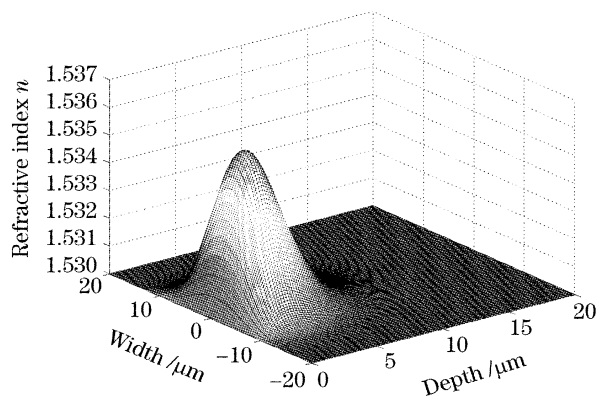


图2 二次离子交换法在波导中所形成的折射率分布模拟结果

Fig. 2 Simulation result of refractive-index profile fabricated by two-step ion-exchange process

经过两次离子交换后,衬底折射率最大的地方埋入衬底表面以下,形成埋入型条形波导。其具有近似高斯型折射率分布,易于与光纤模场相匹配。

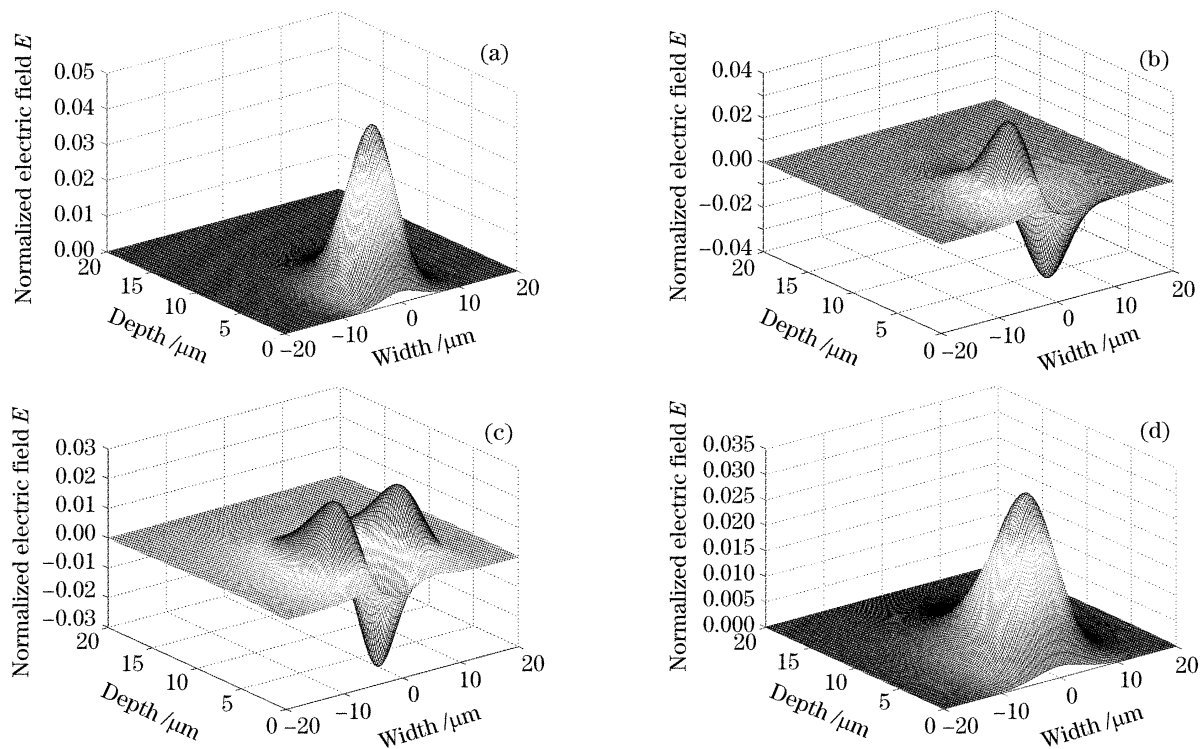


图3 抽运光($\lambda=980$ nm)与信号光($\lambda=1550$ nm)在相同波导中的模场分布。抽运光产生的基模(a)、1阶模(b), 2阶模(c), 信号光基模(d)

Fig. 3 Propagation modes profile at pump (980 nm) and signal (1550 nm) wavelengths. Fundamental mode (a), the 1st-order mode (b), the 2nd-order mode (c) of pump light respectively, the fundamental mode of signal light (d)

由抽运光($\lambda=980$ nm)、信号光($\lambda=1550$ nm)各自所有模场分布可分别得到抽运光于信号光在波导截面中的光模场分布:

$$\begin{aligned} \psi_{p,s}(x,y) = & [P_{p,s00}(x,y) + E_{p,s01}(x,y) + \cdots + E_{p,sij}(x,y)] \cdot \\ & [P_{p,s00}(x,y) + E_{p,s01}(x,y) + \cdots + E_{p,sij}(x,y)]^*, \end{aligned} \quad (18)$$

4 抽运光、信号光模场分布模拟

在已知波导折射率分布的情况下,可以用半矢量有限差分法(SV-FDM)^[5]解出不同波长光在波导中的本征模场分布,进而得到抽运光和信号光的光模场分布。由于使用 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 交换构成的波导双折射效应很小(10^{-5} 量级或更小)基本可以忽略^[11](实际测得的偏振相关损耗(PDL)小于 0.1 dB),本文仅以准 TE 光为例(E_y 近似为 0),并假定折射率在 z 方向上一致。

对准 TE 波,霍姆赫兹方程可写成:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial \epsilon_r}{\partial x} E_x \right) + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k_0^2 \epsilon_r - \beta^2) E_x = 0, \quad (17)$$

其中 ϵ_r 是 $x-y$ 截面上的相对介电常量,可由之前得到的折射率 $n(x,y)$ 取平方后得到, β 为传播常量。通过求解其本征矩阵方程可分别得到抽运光、信号光的归一化导模分布,如图 3。

其中下标 p,s 分别代表抽运光与信号光。且光强场为归一化的：

$$\int_{\Omega} \psi_{p,s}(x,y) dx dy = 1,$$

Ω 为整个计算区域。

5 归一化重叠因子与掺铒波导放大器增益讨论

由求得的抽运光与信号光光场截面分布 $\psi_p(x,y)$ 、 $\psi_s(x,y)$ ，应用(13) 式计算抽运光与信号

光光模场分布之间的归一化重叠积分因子 Γ 。

表 1 列出在其它参量相同的情况下(一次交换时间 3 h; 二次交换时间 1 h, $D_{Ag} = 5 \times 10^{-4}$; $\alpha=0.1$), 改变掩膜窗口宽度所引起的抽运光(980 nm)与信号光(1550 nm)间光模场之归一化重叠积分因子 Γ 变化。

图 4 为模拟所得相应的抽运光与信号光光场截面分布等高线图, 图中虚线为信号光; 实线为抽运光(等高线最外层光强为中心最大光强的 $1/e^2$, 可由之判断波导截面大小)。

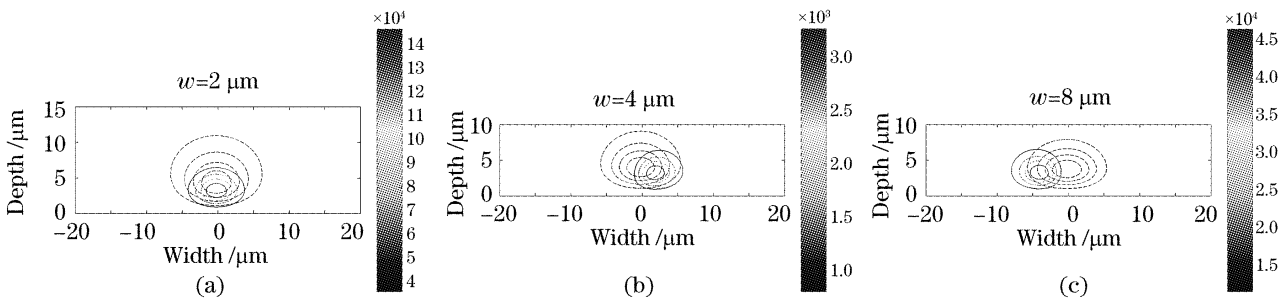


图 4 不同掩膜窗口宽度(w)下的抽运光、信号光光强场等高线图

Fig. 4 Contour of light intensity profile at pump and signal wavelength in erbium-doped waveguide amplifier of different w

从表 1 可以看出, 折射率增量随窗口宽度加宽而增加。当量变达到一定程度, 980 nm 波长的抽运光不再单模截止, 而激励起高阶模式(如窗口宽度从 $2.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$; $6.0 \sim 6.5 \mu\text{m}$)。这些高阶模的出现将导致抽运光光模场分布偏离波导中心, 如图 4 所示, 抽运光与信号光之间的重叠因子 Γ 明显变小。

表 1 其他参量相同的情况下, 不同掩膜窗口宽度的抽运光(980 nm)与信号光(1550 nm)光模场之归一化重叠积分因子变化

Table 1 Overlap factor between pump and signal for different channel opening widths w

$w / \mu\text{m}$	Γ	Mode number of pump light	mode number of signal light	Δn_{max}
2.0	0.8043	1	1	0.0042
2.5	0.6945	2	1	0.0044
3.0	0.6932	2	1	0.0047
3.5	0.6930	2	1	0.0049
4.0	0.6931	2	1	0.0051
4.5	0.6933	2	1	0.0053
5.0	0.6934	2	1	0.0055
5.5	0.6934	2	1	0.0056
6.0	0.6933	2	1	0.0057
6.5	0.5497	3	1	0.0058
7.0	0.5180	3	1	0.0060
7.5	0.5012	3	1	0.0060
8.0	0.4827	3	1	0.0061

将相应的 $\Gamma(0.5, 0.7, 0.8)$ 大小代入到传输-速率方程(8)、(9)中计算放大器增益, 图 5 给出在其他条件一定 (Er^{3+} 浓度 $2.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, 信号光功率 -20 dBm, 波导长度 4 cm), 不同所得模拟增益曲线。

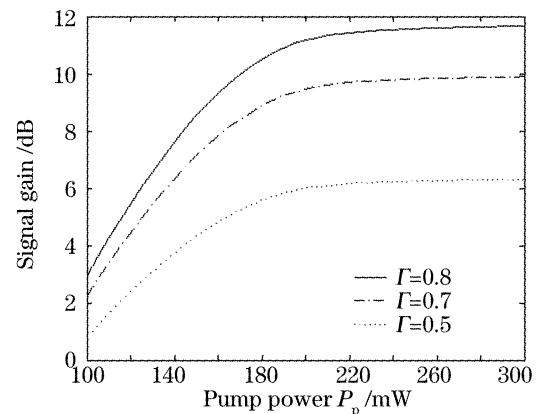


图 5 抽运光与信号光光场间重叠因子 Γ 与掺铒波导放大器增益曲线关系

Fig. 5 Signal gain in EDWA with different overlap factor Γ

由图 5 可知, Γ 的增加表示抽运光与信号光光强场之间的交叠越大, 其有效地提高了掺铒波导放大器的放大器增益。 Γ 从 0.5 增至 0.8, 每厘米波导的放大增益可提高约 1.5 dB。

另以表 1 中抽运光二阶模激发临界点的 6.5

μm 掩膜窗口宽度的掺铒波导放大器为例,保持窗口宽度不变,将一、二次离子交换时间分别从 3 h 和 1 h 减少至 2 h 和 45 min。模拟结果显示,新产生的波导折射率增量虽然还比以前微量增加(0.0058 至 0.0061),但是由于折射率分布形貌改变(截面变小)反而不再激励出抽运光二阶模,从而使得 Γ 从 0.54 提高到 0.67。由此可知,设置不同的参量,改变折射率的分布可以优化 Γ ,提高增益。

最后必需说明,以上讨论仅为 Γ 与放大器增益的关系,实际上光模场分布的变化还会从其它方面影响放大增益。如第一部分所提波导截面 A ,及掺铒波导放大器与光纤中的光强场分布之间的交叠积分等。各因素对增益有着不同的影响,因此我们进一步的工作就是在以上系统模拟的基础上考虑各种因素的对掺铒波导放大器增益的影响,找出最优化值,从而更好地指导实验。

6 结 论

以实用性强的 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 二次离子交换工艺所制作的,具有埋入型渐变折射率分布的掺铒波导放大器为例,采用交替方向隐式差分格式与预测校正差分格式相结合的有限差分法来模拟折射率分布;半矢量-有限差分法(SV-FDM)^[5]模拟信号光与抽运光在波导中的二维光模场分布。由模拟的二维光模场分布计算不同制作参量下 Γ 的归一化值,分析其对放大器增益产生的影响。结果显示,通过设置不同的制作参量可以有效地优化波导截面中的抽运光、信号光光模场分布,使两者间的重叠因子 Γ 变大,从而帮助提高掺铒波导放大器的增益。一定条件下, Γ 从 0.5 增至 0.8 左右,每厘米掺铒波导放大

器放大增益可提高 1.5 dB 左右。

参 考 文 献

- 1 Reichmann K C, Iannone P P, Birk M *et al.*. An eight-wavelength 160-km transparent metro WDM ring network featuring cascaded erbium-doped waveguide amplifiers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(11): 1130~1132
- 2 Chartier G, Collier P, Guez A *et al.*. Graded-index surface or buried waveguides by ion exchange in glass[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(4): 1092~1095
- 3 J. Albert, G. L. Yip. Wide single-mode channels and directional coupler by two-step ion-exchange in glass[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(4): 552~563
- 4 Lu Jinpu, Gu Lizhen, Chen Jingliang. *Difference Method for Partial Differential Equation* [M]. Higher Education Publication, 1988. 259~272 (in Chinese)
陆金甫,顾丽珍,陈景良. 偏微分方程差分方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988. 259~272
- 5 Kenji Kawano, Tsutomu Kutoh. *Introduction to Optical Waveguide Analysis* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997. 117~164
- 6 Chen Haiyan, Liu yongzhi, Guan Zhouguo *et al.*. Analysis of propagation-rate equations of Er-doped optical waveguide amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 174~177 (in Chinese)
陈海燕,刘永智,官周国等. 掺铒光波导放大器的速率方程分析[J]. 光学学报, 2002, **22**(2): 174~177
- 7 Wang Jiehong, Mu Huan, Jin Guoliang *et al.*. The characteristic of Er-doped phosphate glass waveguide amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 99~104 (in Chinese)
王洁红,慕 桓,金国良等. 掺铒磷酸盐玻璃波导放大器的特性研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(1): 99~104
- 8 Peter C. Noutsios, Gar Lam Yip. Diffusion and propagation characteristics of buried single-mode waveguide in glass[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**: 549~555
- 9 R. V. Ramaswamy, S. I. Najafi. Planar, buried, ion-exchanged glass waveguide: Diffusion characteristics[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **22**: 883~891
- 10 J. Albert, G. L. Yip. Refractive-index profile of planar waveguide made by ion-exchange in glass[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**: 3692~3693
- 11 M. Stern. Semivectorial polarized finite difference method optical waveguides with arbitrary index profiles[J]. *IEE Proc. J.*, 1988, **135**: 333~338