

抽运光与信号光的光强重叠因子和 掺铒玻璃波导放大器的增益特性*

邵公望[†] 金国良 戴亚军

(上海交通大学物理系, 上海 200240)

(2007 年 12 月 18 日收到 2008 年 7 月 19 日收到修改稿)

在掺铒玻璃波导放大器(EDWA)的三能级速率-传输方程中,考虑两次离子交换工艺中波导掩模窗口宽度 w 不同所导致的抽运光、信号光模场与光强分布的不同,讨论不同 w 对 EDWA 增益特性的影响,得到光强分布的数值解.引入描述波导中抽运光和信号光的归一化光强重叠因子,对 EDWA 的传统近似解提出修正,得到了修正解,使其更加接近光强分布的数值解.模拟结果表明,在条波导长度为 4 cm、抽运光波长为 980 nm、功率为 80 mW、信号光波长为 1534 nm、功率为 -10 dBm 条件下,不同 w 所导致 EDWA 的增益差别可达 2.97 dB.修正解的结果比传统近似解更加接近光强分布的数值解.修正解对于 EDWA 的理论研究、器件设计具有指导作用.

关键词:集成光学,掺铒玻璃波导放大器,重叠积分因子,增益

PACC:4280L, 4281W, 4282

1. 引言

掺铒玻璃波导放大器(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)提出后又一种具有良好应用前景的放大器^[1].它可用于城域网、局域网的光纤通信系统中,也可用来与其他各种光学元器件集成,以满足不同的应用需求.应用 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 两次离子交换工艺制作的埋入型掺铒条波导(EDW)不仅工艺简单、制作成本低,而且具有传输损耗低、易于与光纤耦合等优点^[2,3].

在现行 EDWA 与 EDFA 理论研究中,无论是三能级模型^[4]还是四能级、六能级^[5]模型,都是基于传统 EDFA 的理论模型.第 i 能级沿传输方向上的粒子数 $n_i(z, \lambda)$ 用抽运光、信号光光强分布 $\psi_{ps}(x, y)$ 与第 i 能级的铒粒子数密度 $N_i(x, y, z)$ 之间的重叠积分表述,为 $n_i(z, \lambda) = \iint_A \psi_{ps}(x, y) N_i(x, y, z) dx dy$ ^[6,7],其中 A 为波导横向截面面积, z 是抽运光、信号光的传输方向.在传统 EDFA 中,掺铒光纤中的折射率分布使抽运光、信号光都以单模传输,两

者光强分布重叠性较好^[8].在波导中,抽运光、信号光于横向上呈稳态分布,第 i 能级的粒子数密度在横向也是定态分布的,可将 $N_i(x, y, z)$ 变量分离为 $N_i(x, y, z) = N_i(x, y) N_i(z)$,其中 $N_i(x, y)$ 是粒子数横向密度分布, $N_i(z)$ 是传输方向上 z 处粒子数密度.求解 $n_i(z, \lambda)$ 是一个计算量很大的过程.为简化数值计算,往往以材料衬底中横向铒离子掺杂浓度 $f(x, y)$ 代替 $N_i(x, y)$,引入抽运光、信号光与铒掺杂离子数浓度分布间重叠因子 Γ_{ps} ,定义为 $n_i(z, \lambda) = \Gamma_{ps} N_i(z)$, $\Gamma_{ps} = \iint_A \psi_{ps} f(x, y) dx dy$ ^[9-11].一般情况下, $f(x, y)$ 是一个常量,可将 Γ_{ps} 同时定义为两个常数,用其计算信号光增益、自发辐射放大光强度以及噪声强度等^[12].在传统 EDFA 理论中,这个近似解能够简化计算过程,提高计算效率.

在 EDWA 以及具有双包层结构的 EDFA 中,在保证长波长信号光单模工作的情况下,短波长抽运光往往会出现多模,并且抽运光、信号光光强重叠程度也会出现变化.在应用两次离子交换工艺制作条波导的 EDWA 中,一、二次交换时间、融盐离子浓度、波导掩模窗口宽度 w 等工艺参数都会对条波导

* 上海市科学技术委员会科研计划(批准号 022261002)资助的课题.

[†] E-mail: shaodog@sjtu.edu.cn

的折射率分布、抽运光和信号光的光强分布产生影响^[13,14]。条波导中,抽运光可以存在基模、一阶模、二阶模等模式,EDW 中种种缺陷会激发抽运光可能存在的模式。双包层结构的 EDFA 也有类似情况。抽运光光强决定铟离子中的亚稳态能级粒子数,即截面上的反转粒子数分布由抽运光光强分布制约;信号光只有存在于粒子数反转区域才能得到放大,信号光增益直接与抽运光、信号光的相互作用区域大小有关。既然抽运光与信号光的光强重叠性质直接影响 EDWA,EDFA 的抽运光效率与信号光放大增益,因而对其研究也非常必要。在传统 EDFA 理论中将 $\Gamma_{p,s}$ 简化为两个常数的近似处理方式,在 EDWA 以及双包层 EDFA 理论中必须对其进行必要的修正。

本文主要利用 EDWA 三能级模型研究抽运光、信号光光强分布对抽运效率与信号光增益的影响。EDWA 四能级、六能级模型中,除了光强分布,其他如自发辐射放大光、上转换等都能影响信号光的增益。本文为了突出抽运光、信号光光强分布对增益的影响,在 EDWA 三能级模型中^[15],忽略自发辐射放大光,考虑不同 w 的条波导中抽运光、信号光光强分布,计算 EDWA 增益特性,得到所谓考虑光强分布的数值解,简称光强分布数值解。同时,提出波导横截面上抽运光与信号光光强归一化重叠积分因子 Γ_{sp} ,对 EDWA 传统近似解进行修正后得到修正解,使对 EDWA 增益特性的模拟更接近于光强分布数值解,同时又有明确的物理意义。对于在掺铟磷酸玻璃衬底上通过不同 w 下进行的 $Ag^+ - Na^+$ 两次离子交换获得条波导,以交替方向隐式差分格式 (Peaceman-Rachford 格式)与预测校正差分格式相结合的有限差分方法求解二维波导截面上的折射率分布^[16]。用半矢量-有限差分法模拟信号光、抽运光在波导截面上的二维光模场分布^[17]。应用正交模展开理论处理光从光纤向波导传输过程中的不同模式间的光强分配。将解得的抽运光、信号光的光强分布代入光强分布数值解方程,可以定量讨论 EDWA 的增益特性。模拟结果表明,EDWA 中不同 w 下的条波导具有不同的抽运光、信号光光强分布,进而具有不同的信号光增益。光强分布数值解中,当条波导长度为 4 cm,抽运光波长为 980 nm、功率为 80 mW,信号光波长为 1534 nm、功率为 -10 dBm 条件下,不同 w 所导致的 EDWA 增益差别可达 2.97 dB。同时,相对于 EDWA 传统近似解,修正解更接近于光强分布数值解。修正解比传统近似解能更准确地反映 EDWA

增益特性,又可有效地缩短计算过程。修正解对于 EDWA 的研究、设计具有指导意义,同时也可将其应用于双包层 EDFA 等器件的理论研究之中。

2. 理论模型

2.1. EDWA 三能级传输-速率方程

使用波长为 980 nm 的抽运光,EDWA 的三能级模型速率方程为

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

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

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

$$N_1 + N_2 + N_3 = \rho. \quad (4)$$

这里 N_1 、 N_2 和 N_3 分别是基态能级、亚稳态上能级和 980 nm 抽运能级上的粒子数浓度; ρ 是 EDWA 中铟粒子数的总掺杂浓度; A_{21} 和 A_{32} 是自发辐射跃迁概率,其中 $A_{21} = 1/\tau$, τ 是能级 N_2 的荧光寿命; W_{ij} 是受激跃迁速率项,定义为

$$W_{12}(x, y, z) = \frac{\sigma_{12}}{h\nu_s} I_s(x, y, z, \nu_s) + \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_{12}}{h\nu_j} [I_{ASE+}(x, y, z, \nu_s) + I_{ASE-}(x, y, z, \nu_s)], \quad (5)$$

$$W_{21}(x, y, z) = \frac{\sigma_{21}}{h\nu_s} I_s(x, y, z, \nu_s) + \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_{21}}{h\nu_j} [I_{ASE+}(x, y, z, \nu_s) + I_{ASE-}(x, y, z, \nu_s)], \quad (6)$$

$$W_{13}(x, y, z) = \frac{\sigma_{13}(\nu_p)}{h\nu_p} [I_p(x, y, z, \nu_p)], \quad (7)$$

式中 σ_{12} 和 σ_{21} 分别为吸收截面和发射截面, $I_s(x, y, z, \nu_s)$ 和 $I_p(x, y, z, \nu_p)$ 分别为信号光和抽运光的光强分布, $I_{ASE\pm}(x, y, z, \nu_s)$ 为自发辐射放大光的强度, h 为普朗克常量。

在稳态条件下 (1)–(3) 式的等号左边均为零。利用自发辐射远大于受激辐射 (即 $A_{32} \gg W_{13}$) 以及 (4) 式,可以解得 N_1 、 N_2 、 N_3 分别为^[18]

$$N_1(x, y, z)$$

$$= \rho \frac{1 + W_{21}(x, y, z)\tau}{1 + W_{13}(x, y, z)\tau + W_{21}(x, y, z)\tau + W_{12}(x, y, z)\tau}, \quad (8)$$

$$N_2(x, y, z) = \rho \frac{W_{13}(x, y, z)\tau + W_{12}(x, y, z)\tau}{1 + W_{13}(x, y, z)\tau + W_{21}(x, y, z)\tau + W_{12}(x, y, z)\tau}, \quad (9)$$

$$N_3(x, y, z) = 0. \quad (10)$$

引入变量分离 $I_{s,p}(x, y, z) = P_{s,p}(z)\psi_{s,p}(x, y)$ 其中 $P_{s,p}(z)$ 为 z 方向信号光和抽运光的功率, $\psi_{s,p}(x, y)$ 为信号光、抽运光横向归一化光强分布. 条波导中抽运光、信号光的传输方程可以表示为^[18]

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z), \quad (11)$$

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

式中 $\gamma_p, \gamma_{21}, \gamma_{12}$ 分别表示为

$$\gamma_p(z) = \sigma_{13} \iint_A N_1(x, y, z)\psi_p(x, y) dx dy, \quad (13)$$

$$\gamma_{21}(z) = \sigma_{21} \iint_A N_2(x, y, z)\psi_s(x, y) dx dy, \quad (14)$$

$$\gamma_{12}(z) = \sigma_{12} \iint_A N_1(x, y, z)\psi_s(x, y) dx dy. \quad (15)$$

由此可以看出, 信号光、抽运光光强分布对各能级粒子数分布有直接影响, 研究其对增益的作用也很有必要. 同时 (13)–(15) 式与上述第 i 能级上粒子数 $n_i(z, \lambda)$ 表达式之间仅相差一个常数.

2.2. EDWA 传输-速率方程的三种解法

如上所述, 在速率-传输方程中, 求解 $\gamma_p, \gamma_{21}, \gamma_{12}$ 是一个计算量很大的复杂过程. 为简化计算, 以材料衬底中横向铟离子掺杂浓度代替 $\gamma_p, \gamma_{21}, \gamma_{12}$ 中 $N_i(x, y)$ 横向粒子分布, 引入抽运光、信号光与铟掺

杂离子浓度分布间重叠因子 $\Gamma_{p,s}$, 并将它们设为常数, 可以得到传统的近似解方法. $N_i(x, y)$ 不作近似, 将条波导中解得的信号光、抽运光光强分布代入传输-速率方程中, 可以得到考虑光强分布的数值解. 传统的近似解法虽然简化了计算, 但是忽略了条波导中抽运光、信号光具有模式分布, 以及抽运光、信号光光强分布重叠情况对 EDWA 增益的影响. 在此, 我们通过引入抽运光与信号光光强分布的归一化重叠因子 Γ_{sp} , 对传统近似解中的 Γ_s 进行修正, 从而得到修正解方法, 并且与光强分布数值法、传统近似解法相比较. 本文在计算过程中为突出信号光、抽运光光强分布对 EDWA 增益的作用, 忽略了自发辐射放大光的影响.

2.2.1. 传统的近似解法

如上所述, 对各能级粒子数作变量分离 $N_i(x, y, z) = N_i(x, y)N_i(z)$, 并以横向铟粒子掺杂浓度 $f(x, y)$ 代替 $N_i(x, y)$, 引入抽运光、信号光与铟掺杂离子浓度分布间重叠因子 $\Gamma_{p,s}$, 表示为

$$\Gamma_{p,s} = \iint_A \psi_{p,s} f(x, y) dx dy. \quad (16)$$

将 (16) 式代入 (11)–(12) 式, 可以得到

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\Gamma_p P_p(z) \sigma_{13} N_1(z), \quad (17)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \Gamma_s [\sigma_{21} N_2(z) - \sigma_{12} N_1(z)] P_s(z) \quad (18)$$

一般在铟离子均匀掺杂的条波导中, $f(x, y)$ 为一个常数, $\Gamma_{p,s}$ 也近似为一个常数. 传统的近似解一般用上述 (17)–(18) 式讨论放大器增益特性. 传统近似解简化了计算过程, 但是忽略了信号光、抽运光光强分布对 EDWA 增益的影响.

2.2.2. 光强分布数值解法

将 (8) 和 (9) 式代入 (11) 和 (12) 式, 可得条波导中信号光、抽运光的传输方程分别为

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \int_A \frac{\rho \left[\sigma_{21} \left(\frac{\sigma_{13}}{h\nu_p} \psi_p(x, y) P_p(z) \right) \tau - \sigma_{12} \right]}{1 + \frac{\sigma_{13}}{h\nu_p} \psi_p(x, y) P_p(z) \tau + \frac{\sigma_{12} + \sigma_{21}}{h\nu_s} \psi_s(x, y) P_s(z) \tau} \psi_s(x, y) P_s(z) dx dy, \quad (19)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = - \int_A \frac{\sigma_{13}(\lambda_p) \rho \left[1 + \frac{\sigma_{21}}{h\nu_s} \psi_s(x, y) P_s(z) \tau \right]}{1 + \frac{\sigma_{13}}{h\nu_p} \psi_p(x, y) P_p(z) \tau + \frac{\sigma_{12} + \sigma_{21}}{h\nu_s} \psi_s(x, y) P_s(z) \tau} \psi_p(x, y) P_p(z) dx dy. \quad (20)$$

在一定的初始条件和边界条件下, 采用龙格-库

塔算法对 (19)–(20) 式进行迭代计算, 可以得到考虑

信号光、抽运光强分布条件下的 EDWA 增益数值解.这种方法可以用来研究 EDWA 增益特性,也可以与其他两种解法进行比较.

2.2.3. 修正解法

考虑信号光、抽运光光强分布对 EDWA 增益的影响,对传统近似解中的 Γ_s 作修正,引入抽运光与信号光光强分布的归一化重叠因子 Γ_{sp} . 定义为

$$\Gamma_{sp} = \frac{\iint_A \phi_p(x, y) \phi_s(x, y) dx dy}{\sqrt{\iint_A \phi_p^2(x, y) dx dy \iint_A \phi_s^2(x, y) dx dy}} \quad (21)$$

因而(18)式可以修正为

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \Gamma_s [\sigma_{21} N_2(z) - \sigma_{12} N_1(z)] P_s(z), \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} \Gamma'_s &= \Gamma_s \Gamma_{sp} \\ &= \iint \phi_s(x, y) f_i(x, y) dx dy \\ &\times \frac{\iint_A \phi_p(x, y) \phi_s(x, y) dx dy}{\sqrt{\iint_A \phi_p^2(x, y) dx dy \iint_A \phi_s^2(x, y) dx dy}} \end{aligned} \quad (23)$$

联合解(17)(22)式,构成修正解,可以期待得到与光强分布数值解相近的结果.修正解不但考虑了具体的光强分布对 EDWA 增益的贡献,而且简化了数值计算.

2.3. 条波导折射率 $n(x, y)$ 以及导波模式分布求解

图 1 是两次离子交换工艺制作条波导的横截面示意图.通过不同的 w ,以两次离子交换工艺制作条波导,得到折射率分布 $n(x, y)$ 以及导波模场.以交替方向隐式差分格式(Peaceman-Rachford 格式)与预测校正差分格式相结合的有限差分法求解波导二维折射率分布.以半矢量-有限差分法求解信号光、抽运光在波导截面上的二维光模场分布.同时,由此可以得到导模的传播系数、模斑大小等参数.

2.4. 正交模展开理论^[4]

当 w 发生变化时,如果条波导中保证长波长(1534 nm)信号光单模运行,短波长(980 nm)抽运光必然会出现多模现象.用正交模展开理论可以求解从光纤传输到条波导中的抽运光各个模式间的光强分配.

进入条波导中的任意电磁场 $\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{H}$ 可以表示为

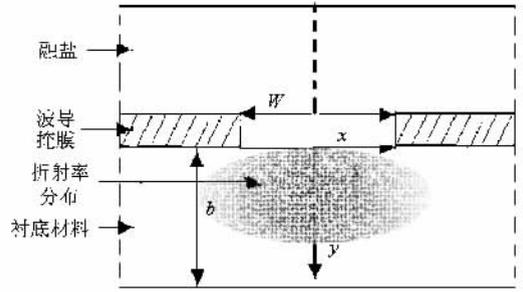


图 1 两次离子交换工艺制作条波导横截面示意图

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \sum_{n=0}^n C_n \boldsymbol{E}^{(n)} + \sum_{\text{TE, TM}} \int_0^{+\infty} C_\sigma \boldsymbol{E}^{(\sigma)} d\sigma, \quad (24)$$

$$\boldsymbol{H} = \sum_{n=0}^n C_n \boldsymbol{H}^{(n)} + \sum_{\text{TE, TM}} \int_0^{+\infty} C_\omega \boldsymbol{H}^{(\sigma)} d\sigma, \quad (25)$$

式中 $\boldsymbol{E}^{(n)}, \boldsymbol{H}^{(n)}, \boldsymbol{E}^{(\sigma)}, \boldsymbol{H}^{(\sigma)}$ 分别为某个导模及辐射模的电场强度、磁场强度, n 是条波导中激发的导模数量.忽略辐射模,并且每一个导模场分别归一化,则正交模展开系数 C_n 可以表示为

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} (\boldsymbol{\varepsilon} \times \boldsymbol{H}^{(n)*}) \cdot \boldsymbol{e}_z dx dy \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} (\boldsymbol{E}^{(n)} \times \boldsymbol{H}^*) \cdot \boldsymbol{e}_z dx dy. \end{aligned} \quad (26)$$

这里 $|C_n|^2 / \sum_n |C_n|^2$ 代表某导模的能量分配比, $\sum_n |C_n|^2$ 可以理解为总的导模能量耦合效率.

由此可以得到条波导中抽运光、信号光总的光强分布为

$$\begin{aligned} \phi_{p,s}(x, y) &= K \left[\sum_{n=1}^n C_n \boldsymbol{E}_n(x, y) \boldsymbol{I} \sum_{n=1}^n C_n \boldsymbol{E}_n(x, y) \right]^* \\ \text{其中 } K &\text{ 是归一化系数. } \phi_{p,s}(x, y) \text{ 用在光强分布数值解和修正解中,可以确定 EDWA 的信号光增益.} \end{aligned}$$

3. 结果与讨论

表 1 中列出了数值计算中使用的一些参数^[19, 20].

表 1 EDWA 的数值计算参数

参数	数值
σ_{12}/m^2	7.2×10^{-25}
σ_{21}/m^2	6.6×10^{-25}
σ_{13}/m^2	2.0×10^{-25}
τ_{21}/s	11×10^{-3}
ρ/m^{-3}	3.5×10^{26}
$A/\mu\text{m}^2$	$\pi \times 4.5 \times 3.5$
λ_s/nm	1534
λ_p/nm	980

3.1. 正交模展开系数

抽运光、信号光以高斯光模场形式从光纤传输到条波导. 抽运光、信号光在条波导中分别表现为多模、单模. 这里主要讨论抽运光多模行为. 表 2 是不同 w 下抽运光准 TE 模的正交模展开系数以及总光强耦合效率. C_0, C_1 和 C_2 分别为基模、一阶模和二阶模的展开系数. 表 2 表明, 当 w 在 2—5 μm 之间时, 抽运光存在基模和一阶模. 当 w 大于 5 μm 时, 除了基模和一阶模, 还出现二阶模. 基模展开系数和总光强耦合效率都在 w 接近 6 μm 时达到最大值.

表 2 w 在 2~9 μm 变化情况下准 TE 模的正交模展开系数以及总光强耦合效率

$w/\mu\text{m}$	C_0	C_1	C_2	$\sum_n C_n ^2$
2	0.903	0.049		0.818
3	0.917	0.026		0.842
4	0.920	0.050		0.849
5	0.924	0.022		0.856
6	0.925	0.057	0.214	0.903
7	0.923	0.021	0.219	0.900
8	0.918	0.057	0.230	0.899
9	0.903	0.019	0.250	0.878

3.2. EDWA 增益特性的光强分布数值解

图 2 给出了不同 w 下信号光增益随波导长度的变化关系. 抽运光(980 nm) 信号光(1534 nm) 的功率分别为 80 mW、-10 dBm. 由图 2 可以看出, w 为 6 μm 的曲线峰值增益比 2 μm 的大 2.97 dB. 相对于 w 为 2 或 4 μm 情况, w 为 6 或 8 μm 情况下, 由于二阶模的出现, 抽运光和信号光光强之间的重叠程度变大, 有效地提高了 EDWA 的抽运光效率.

图 3 给出了不同 w 条件下信号光增益随输入信号光功率的变化关系. 抽运光功率为 100 mW, 波导长度为 4 cm. 图 3 表明当 w 从 2 到 6 μm 变化时, 同一输入信号光的增益逐渐增大. 当信号光功率小于 -20 dBm 时, 由于抽运光强度相对充足, 所有 w 下的增益都不再随信号光强度的变化而发生明显变化. 当信号光功率大于 -10 dBm 时, 由于抽运光并不是足够大, 对于所有 w , 信号光增益都随信号光功率的增加而迅速下降.

图 4 给出了信号光增益与 Γ_{sp} 对不同 w 的变化关系. 抽运光(980 nm) 信号光(1534 nm) 的功率分

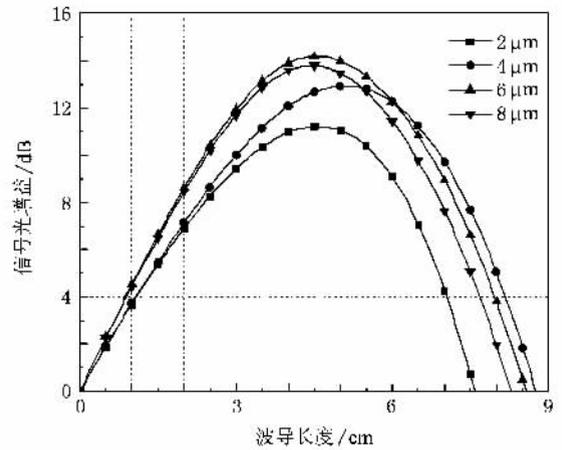


图 2 不同 w 下信号光增益随波导长度的变化关系 抽运光功率为 80 mW、信号光功率为 -10 dBm

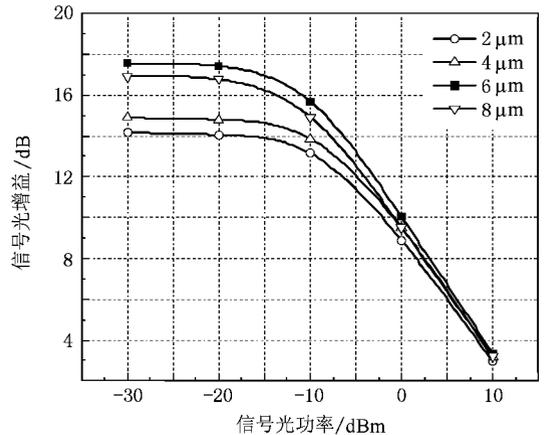


图 3 不同 w 下信号光增益随输入信号光功率的变化关系 抽运光功率为 100 mW、波导长度 4 cm

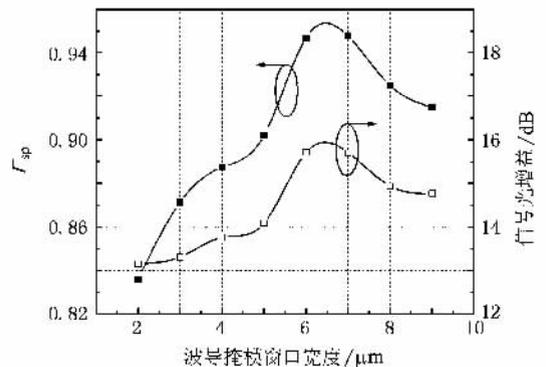


图 4 EDWA 中信号光增益、 Γ_{sp} 随 w 的变化关系 抽运光 100 mW、信号光 -10 dBm、波导长度 4 cm

别为 100 mW, -10 dBm, 波导长度为 4 cm. 由图 4 可以得出, 信号光的增益随着 w 变化而变化, 并且在

w 于 $6-7 \mu\text{m}$ 间达到最大值. Γ_{sp} 随 w 的变化趋势与信号光增益曲线相似, 且同样在 w 于 $6-7 \mu\text{m}$ 间达到最大值. 这表明抽运光与信号光光强间重叠因子的引入能够很好地反映 EDWA 增益随 w 变化的规律. 因此, 在 EDWA 设计和制作中, 可以通过选取适当的 w 、融盐离子浓度、温度等工艺参数来优化 Γ_{sp} , 以提高信号光增益.

3.3. EDWA 中三种解法的信号光增益比较

图 5 是 EDWA 光强分布数值解、传统近似解以及修正解中信号光增益随 w 的变化关系. 抽运光 (980 nm)、信号光 (1550 nm) 的功率分别为 100 mW 、 -10 dBm , 条波导长度为 4 cm . 两种近似方法中, Γ_s 和 Γ_p 均取 0.8 . 由图 5 可见, 传统近似解中没有考

虑条波导中抽运光、信号光光强的分布变化、交叠情况对增益的影响, 信号光增益在不同 w 条件下没有产生变化, 为一个常数. 传统的近似解与光强分布数值解相比, 增益差异最大可达 3 dB 左右. 修正解中考虑了抽运光、信号光重叠因素的影响, 信号光增益随 w 的变化而变化, 与光强分布数值解的变化趋势相似, 并且两者大小比较接近. 由此可见, 与传统的近似解相比, 修正解能正确反映条波导中抽运光、信号光分布情况对增益的影响; 与光强分布数值解相比, 修正解能够简化计算过程, 又不失一定的精度. 修正解对于 EDWA 的研究、设计具有指导意义.

4. 结 论

在 EDWA 的三能级速率-传输方程中, 考虑两次离子交换工艺中 w 不同所导致的抽运光、信号光模场和光强分布的不同, 讨论不同 w 对 EDWA 增益特性的影响, 得到光强分布的数值解. 引入描述条波导中抽运光、信号光归一化光强重叠因子, 对 EDWA 传统的近似解提出修正后得到修正解, 使其接近光强分布数值解. 模拟结果表明, 在条波导长度为 4 cm 、抽运光波长为 980 nm 、功率为 80 mW 、信号光波长为 1534 nm 、功率为 -10 dBm 条件下, 不同 w 所导致的 EDWA 增益差别可达 2.97 dB . 修正解的结果比传统的近似解更加接近光强分布数值解. 修正解对于 EDWA 的研究、设计具有指导作用, 同时也可将其应用于双包层 EDFA 等器件的理论研究之中.

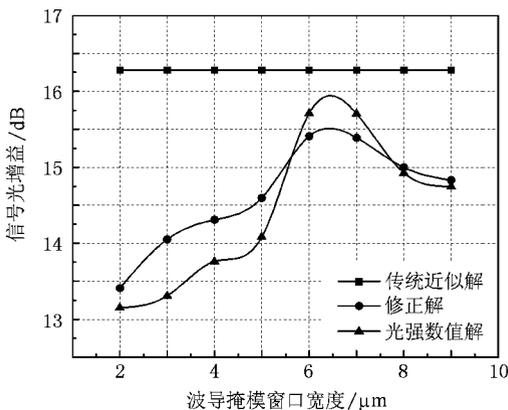


图 5 三种解法中信号光增益随 w 的变化关系. 抽运光 100 mW , 信号光 -10 dBm , 波导长度 4 cm

[1] Reichmann K C, Iannone P P, Birk M, Frigo N J, Barbier D, Cassagnettes C, Garret T, Verlucco A, Perrier S, Philipsen J 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 1130

[2] Chartier G, Collier P, Guez A, Jaussaud P, Won Y 1980 *Appl. Opt.* **19** 1092

[3] Zimmerman D R, Spiekman L H 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 63

[4] Pasquale F D, Zoboli M 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 1565

[5] Lou N, Jin G L, Gu H R, Li Q 2007 *Opt. Eng.* **46** 044601

[6] Pasquale F D, Federighi M 1995 *J. Lightwave Technol.* **13** 1858

[7] Vermelho M V D, Peschel U, Aitchison J S 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 401

[8] Desurvire E, Simpson J R 1989 *J. Lightwave Technol.* **7** 835

[9] Valles J A, Lazzaro J A, Rebolledo M A 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 1685

[10] Evgeny V V, Peschel U, Jacobsen G 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 243

[11] Liu K, Pun E Y B 2007 *Opt. Commun.* **273** 413

[12] Ohtsuki T, Honkanen S, Najafi S I, Peyghambarian N 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 1838

[13] Laliotis A, Yeatman E M, Al-Bader S J 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 1589

[14] Wong S F, Pun E Y B, Chung P S 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 80

[15] Chen H Y, Liu Y Z, Guan Z G, Huang X L, Zhang S X 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 174 (in Chinese) [陈海燕、刘永智、官周国、黄小莉、张少先 2002 光学学报 **22** 174]

[16] Layton W J, Rabier P J 2005 *Numer. Linear Algebra Appl.* **2** 363

[17] Kawano K, Kitoh T 2001 *Introduction to Optical Waveguide Analysis* (New York: John Wiley)

- [18] Desurvire E 1994 *Erbium Doped Fiber Amplifiers Principles and Applications* (New York : John Wiley) 375
- [19] Zhao S L , Chen B Y , Hu J J , Hu L L 2005 *Chin . J . Lasers* **32**
- [20] Chryssou C E , Pasquale F D , Pitt C W 2001 *J . Lightwave Technol .* **19** 345

Overlap factor between intensity profiles of signal and pump light and gain characteristics of Er-doped waveguide amplifier^{*}

Shao Gong-Wang[†] Jin Guo-Liang Dai Ya-Jun

(Department of Physics , Shanghai Jiao Tong University , Shanghai 200240 , China)

(Received 18 December 2007 ; revised manuscript received 9 July 2008)

Abstract

The model used for analyzing the gain characteristics of Er-doped waveguide amplifier (EDWA) is based on the rate-propagation equations with intensity profiles of pump and signal light. The intensity profiles of pump and signal light for different channel opening width (DCOW) of Er-doped waveguide is discussed. And the numerical method (NM) considering the difference of intensity profiles between signal and pump light in channel waveguide with DCOW is used to solve the gain characteristics of signal light in EDWA. An overlap factor Γ_{sp} between light intensity profiles of signal and pump is introduced to modify the conventional simplified method (CSM) in EDWA , which is a revised version of the conventional simplified method (RCSM). Results show that difference of 2.97 dB in gain for -10 dBm signal light at 1534 nm due to DCOW of waveguides is obtained for a 4 cm long waveguide amplifier pumped by 80 mw at 980 nm. Comparing with CSM , the gain characteristics of EDWA from RCSM is simpler and better approaches the result from NM. Therefore , the RCSM is valuable in the research of EDWA.

Keywords : integrated optics , Er-doped glass waveguide amplifier , overlap factor , gain

PACC : 4280L , 4281W , 4282

^{*} Project supported by the Scientific Research Program from the Science and Technology Committee of Shanghai , China (Grant No. 022261002).

[†] E-mail : shaodog@sjtu.edu.cn