

铒镱共掺波导放大器的增益特性*

汪玉海 马春生[†] 李德禄 张大明

(集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 吉林大学电子科学与工程学院, 长春 130012)

摘要: 在忽略放大自发辐射(ASE)及均匀掺杂和稳态的情况下,在初始能量转移效率的基础上从速率方程和传输方程出发,推导出了用于分析铒镱共掺波导放大器(EYCDWA)的新公式.利用这些公式分析了泵浦光功率、信号光功率、掺杂浓度、波导长度对放大器增益特性的影响,并与单掺铒波导放大器(EDWA)进行了比较,得到了一些具有实用价值的模拟结果.

关键词: 波导放大器; 铒镱共掺; 速率方程; 传输方程; 增益特性

PACC: 4280L

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)03-0578-05

1 引言

在未来的光电子集成回路(OEIC)中,掺铒波导放大器(EDWA)与掺铒光纤放大器(EDFA)相比,因其易小型化、集成化,可以在微小器件尺寸内获得高的光信号增益,已受到越来越多的关注^[1~3].为了提高单位长度的增益,需要有足够的激活离子来吸收泵浦光能量,要求掺入的 Er^{3+} 浓度足够高,但是较高的 Er^{3+} 浓度容易形成 Er^{3+} 团簇,产生合作上转换、激发态吸收和交叉弛豫等效应^[4],增益效果反而下降.由于 Yb^{3+} 在 800~1080nm 间具有很强的吸收,其浓度猝灭效应很弱,容易实现高浓度掺杂,可以显著降低 Er^{3+} 浓度猝灭引起的负效应^[5],因此采用铒镱共掺可以改善波导放大器的性能,提高放大器的增益.因而铒镱共掺波导放大器(EYCDWA)更具有发展潜力.

当采用有限差分光束传播法(FD-BPM)^[6]、Runge-Kutta 法^[7]等数值方法对 EYCDWA 模拟时,模拟过程复杂繁琐,消耗大量机时.本文根据 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 之间的能量传递过程,建立起泵浦光功率、信号光功率、掺杂浓度、波导长度与放大器增益的内在联系,给出了用于分析这种器件增益特性的新公式.利用这些公式对 EYCDWA 的增益特性进行模拟,可以有效地简化模拟过程,并具有简捷实用等特点.我们对磷酸盐玻璃基质 EYCDWA 进行了分析和讨论,从中得到了一些有益的结论.

2 理论分析

图 1 为铒镱共掺系统能级跃迁和能量转移示意图.图中,基态能级 $^2F_{7/2}$ 上的 Yb^{3+} 吸收泵浦光能量跃迁到激发态能级 $^2F_{5/2}$ 上,然后把能量快速传递给基态能

级 $^4I_{15/2}$ 上的 Er^{3+} ,使其跃迁到激发态能级 $^4I_{11/2}$ 上.由于该能级不稳定,使 Er^{3+} 快速衰减到亚稳态能级 $^4I_{13/2}$,形成粒子数反转.离子在激发态能级 $^4I_{11/2}$ 上的寿命(为 ns 量级)远小于亚稳态能级 $^4I_{13/2}$ 上的寿命(约为 8~10ms),因此可认为激发态能级 $^4I_{11/2}$ 上离子数为零.对磷酸盐玻璃基质而言,较大的声子能量增大了 Er^{3+} 从激发态能级 $^4I_{11/2}$ 到亚稳态能级 $^4I_{13/2}$ 的跃迁几率,从而阻止了 Er^{3+} 回转移给 Yb^{3+} 的能量^[8].

令 N_1, N_2 分别为能级 $^4I_{15/2}, ^4I_{13/2}$ 上的 Er^{3+} 浓度, N_{Er} 为 Er^{3+} 的总浓度; N_4, N_5 分别为能级 $^2F_{7/2}, ^2F_{5/2}$ 上的 Yb^{3+} 浓度, N_{Yb} 为 Yb^{3+} 的总浓度.在均匀掺杂和稳态的情况下,各能级上的 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 离子数只是波导长度 z 的函数, $N_i = N_i(z)$,在这种情况下,铒镱共掺系统的速率方程^[9]简化为

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_{12} P_s(z) \Gamma_s}{A_c h \nu_s} N_1(z) + \frac{\sigma_{13} P_p(z) \Gamma_p}{A_c h \nu_p} N_1(z) - \\ & \frac{\sigma_{21} P_s(z) \Gamma_s}{A_c h \nu_s} N_2(z) - \frac{N_2(z)}{\tau_{21}} + \frac{\sigma_{45} P_p(z) \Gamma_p}{A_c h \nu_p} N_4(z) - \\ & \frac{\sigma_{54} P_p(z) \Gamma_p}{A_c h \nu_p} N_5(z) - \frac{N_5(z)}{\tau_{54}} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中

$$N_1(z) + N_2(z) = N_{\text{Er}}, N_4(z) + N_5(z) = N_{\text{Yb}} \quad (2)$$

$$\Gamma_{p,s} = \iint_{A_c} \varphi_{p,s}(x, y) dx dy \quad (3)$$

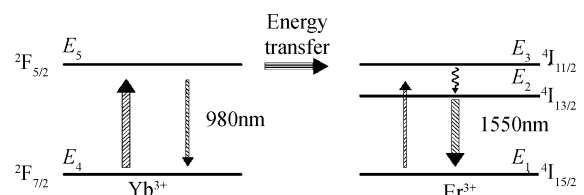


图 1 铒镱共掺系统的能级图

Fig. 1 Energy levels for the Er-Yb co-doped system

* 国家自然科学基金资助项目(批准号:60576045,60507004)

[†] 通信作者. Email: mcscheng@163.com

2007-07-26 收到,2007-10-04 定稿

其中 $\Gamma_{p,s}$ 为波导的光功率限制因子; $\varphi_p(x, y), \varphi_s(x, y)$ 分别为泵浦光和信号光的横向归一化光强分布函数; A_c 为波导芯横截面面积; $\sigma_{12}(\nu_s), \sigma_{21}(\nu_s)$ 分别为 Er^{3+} 对频率为 ν_s 的信号光的吸收和发射截面; $\sigma_{13}(\nu_p)$ 为 Er^{3+} 对频率为 ν_p 的泵浦光的吸收截面; $\sigma_{45}(\nu_p), \sigma_{54}(\nu_p)$ 分别为 Yb^{3+} 对频率为 ν_p 的泵浦光的吸收和发射截面; h 为普朗克常数。

在稳态情况下, 设泵浦光、信号光的功率分别为 P_p 和 P_s , 则 EYCDWA 中的传输方程为^[9]

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z) \quad (4)$$

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

波导端面 $z=0$ 处的边界条件为

$$P_p(0, \nu_p) = P_{p0}(\nu_p) \quad P_s(0, \nu_s) = P_{s0}(\nu_s) \quad (6)$$

式中 γ_p 为泵浦光的吸收系数; γ_{12}, γ_{21} 分别为信号光的吸收系数和发射系数, 分别为

$$\gamma_p(z, \nu_p) = \Gamma_p[\sigma_{13}(\nu_p)N_1(z) + \sigma_{45}(\nu_p)N_4(z) - \sigma_{54}(\nu_p)N_5(z)] \quad (7)$$

$$\gamma_{12}(z, \nu_s) = \Gamma_s\sigma_{12}(\nu_s)N_1(z) \quad (8)$$

$$\gamma_{21}(z, \nu_s) = \Gamma_s\sigma_{21}(\nu_s)N_2(z) \quad (9)$$

2.1 放大器的增益

由(1)~(9)式得

$$\frac{1}{A_c h\nu_p} \times \frac{dP_p(z)}{dz} + \frac{1}{A_c h\nu_s} \times \frac{dP_s(z)}{dz} + \frac{N_2(z)}{\tau_{21}} + \frac{N_5(z)}{\tau_{54}} = 0 \quad (10)$$

式中

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{13}N_1(z) + \sigma_{45}N_4(z) - \sigma_{54}N_5(z)]P_p(z) \quad (11)$$

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

定义初始能量转移效率 $\eta = \frac{N_2}{N_2 + N_5}$ ^[10], 即 $N_5 = \frac{1-\eta}{\eta}N_2$,

并令 $B = \frac{\tau_{21}\tau_{54}}{\tau_{54} + \tau_{21}(1-\eta)/\eta}$, 则(10)式可化为

$$N_2(z) = -B \frac{1}{A_c h\nu_p} \times \frac{dP_p(z)}{dz} - B \frac{1}{A_c h\nu_s} \times \frac{dP_s(z)}{dz} \quad (13)$$

设 $\int_0^z N_2(z)dz = S$, 对(11)~(13)式分别积分可得

$$S = \frac{\frac{1}{\Gamma_p} \ln \frac{P_p(z)}{P_p(0)} + \sigma_{13}N_{Er}z + \sigma_{45}N_{Yb}z}{\sigma_{13} + \frac{1-\eta}{\eta}(\sigma_{45} + \sigma_{54})} \quad (14)$$

$$S = \frac{\frac{1}{\Gamma_s} \ln \frac{P_s(z)}{P_s(0)} + \sigma_{12}N_{Er}z}{\sigma_{12} + \sigma_{21}} \quad (15)$$

$$S = -B \frac{1}{A_c h\nu_p} [P_p(z) - P_p(0)] - B \frac{1}{A_c h\nu_s} [P_s(z) - P_s(0)] \quad (16)$$

由(14)和(15)式得到

$$P_p(z) = P_p(0) \left[\frac{P_s(z)}{P_s(0)} \right]^\alpha \exp[\alpha\Gamma_s\sigma_{12}N_{Er}z - \Gamma_p(\sigma_{13}N_{Er} + \sigma_{45}N_{Yb})z] \quad (17)$$

式中

$$\alpha = \frac{\Gamma_p\sigma_{13} + \Gamma_p(\sigma_{45} + \sigma_{54})(1-\eta)/\eta}{\Gamma_s(\sigma_{12} + \sigma_{21})} \quad (18)$$

把(17)式代入(16)式后再与(15)式比较可得

$$[G(z)]^\alpha \exp(-\alpha\Gamma_s\sigma_{12}N_{Er}z) = 1 - \frac{\nu_p P_s(0)}{\nu_s P_p(0)} [G(z) - 1] - \frac{\ln G(z) + \Gamma_s\sigma_{12}N_{Er}z}{B\Gamma_s(\sigma_{12} + \sigma_{21})} \times \frac{A_c h\nu_p}{P_p(0)} \quad (19)$$

式中

$$G(z) = \frac{P_s(z)}{P_s(0)}$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{12} + \sigma_{21}}{\sigma_{13} + (\sigma_{45} + \sigma_{54})(1-\eta)/\eta} \left(\sigma_{13} + \sigma_{45} \frac{N_{Yb}}{N_{Er}} \right) - \sigma_{12} \quad (20)$$

其中 $G(z)$ 为放大器的增益。

2.2 放大器的泵浦阈值

当 $G(z) = 1$ 时, 由(19)式得到放大器的泵浦阈值 P_{th} 为

$$P_{th} = P_p(0) = \frac{A_c h\nu_p \sigma_{12} N_{Er} z}{B(\sigma_{12} + \sigma_{21}) [1 - \exp(-\alpha\Gamma_s\sigma_{12}N_{Er}z)]} \quad (21)$$

2.3 放大器的最佳波导长度

当 $\left. \frac{\partial G(z)}{\partial z} \right|_{z=L_0} = 0$ 时, 由(19)式可得到放大器的

最大增益 G_0 与最佳波导长度 L_0 的关系为

$$G_0(L_0) = \gamma^\frac{1}{\alpha} \exp(\Gamma_s\sigma_{12}N_{Er}L_0) \quad (22)$$

$$L_0(G_0) = \frac{\ln G_0 - \frac{1}{\alpha} \ln \gamma}{\Gamma_s\sigma_{12}N_{Er}} \quad (23)$$

式中

$$\gamma = \frac{A_c h\nu_p \sigma_{12}}{\alpha B \Gamma_s (\sigma_{12} + \sigma_{21}) P_p(0) \sigma} \quad (24)$$

特别是, 当 $N_{Yb} = 0$ 时, $N_4 = N_5 = 0$, EYCDWA 退化成 EDWA。

3 数值结果

下面对磷酸盐玻璃基质 EYCDWA 的增益特性进行分析, 相关参数值选取如下^[9,11]: 在波长 980nm 下, Er^{3+} 的吸收截面 $\sigma_{13} = 2.58 \times 10^{-25} \text{m}^2$, Yb^{3+} 的吸收截面 $\sigma_{45} = 1.0 \times 10^{-24} \text{m}^2$, Yb^{3+} 的发射截面 $\sigma_{54} = 1.0 \times 10^{-24} \text{m}^2$; 在波长 1550nm 下, Er^{3+} 的吸收截面 $\sigma_{12} = 6.5 \times 10^{-25} \text{m}^2$, Er^{3+} 的发射截面 $\sigma_{21} = 9.0 \times 10^{-25} \text{m}^2$; Er^{3+} 在 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级上的寿命 $\tau_{12} = 10\text{ms}$; Yb^{3+} 在 $^2\text{F}_{5/2}$ 能级上的寿命 $\tau_{54} = 2\text{ms}$; 取初始能量转移效率 $\eta = 11.5\%$; 波导芯的折射率 $n_1 = 1.52812$, 包层的折射率 $n_2 = 1.51$, 导

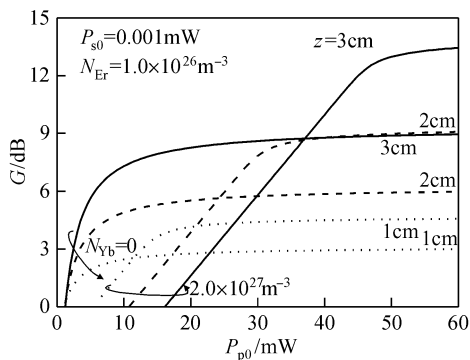


图 2 泵浦光功率 P_{p0} 与增益 G 的关系曲线
Fig.2 Curves of gain G versus pump power P_{p0}

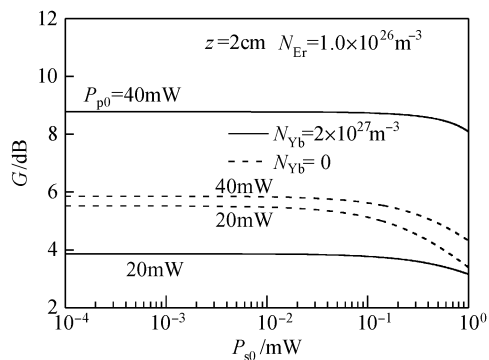


图 4 信号光功率 P_{s0} 与增益 G 的关系曲线
Fig.4 Curves of gain G versus signal power P_{s0}

波区的横截面面积 $A_c = 4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$, 由此可以计算得到功率限制因子分别为 $\Gamma_p = 0.921, \Gamma_s = 0.795$.

图 2 显示了泵浦光功率 P_{p0} 与增益 G 的关系曲线. 可以看出, 在 EYCDWA 和 EDWA 相同尺寸的情况下, 当泵浦光功率增大到一定值后, 前者增益更大. 这是由于掺入的 Yb^{3+} 能包围 Er^{3+} 形成 $\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ 离子对, Yb^{3+} 能够把吸收到的能量通过离子对充分转移给 Er^{3+} , 使 Er^{3+} 达到粒子数反转. 可见 Yb^{3+} 为 Er^{3+} 提供了一种高效的间接泵浦方式. 对于一定的掺杂浓度, 泵浦光功率增大到一定值时, 几乎所有的 Er^{3+} 都已实现粒子数反转, 增益随之达到饱和. 在相同条件下, EYCDWA 泵浦阈值功率比 EDWA 大, 这是由于 Yb^{3+} 的引入, 吸收了部分泵浦光能量.

图 3 显示了泵浦光功率 P_{p0} 与最佳波导长度 L_0 和最大增益 G_0 的关系曲线. 可以看出, 当泵浦光功率增大时, 最佳波导长度与最大增益均随之增大. 在相同的泵浦光功率下, 大信号时的最佳波导长度比小信号时的最佳波导长度短, 而且相应的最大增益值也小.

图 4 显示了信号光功率 P_{s0} 与增益 G 的关系曲线. 可以看出, 在信号光功率小于 $20\mu\text{W}$ 的范围内, 增益几乎保持不变, 超出这个范围时, 增益随着信号光功率的增大而逐渐减小. 这是因为大的信号光功率降低了 $^4\text{I}_{15/2}$ 和 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级间 Er^{3+} 的粒子数反转的程度, 增益因此减小.

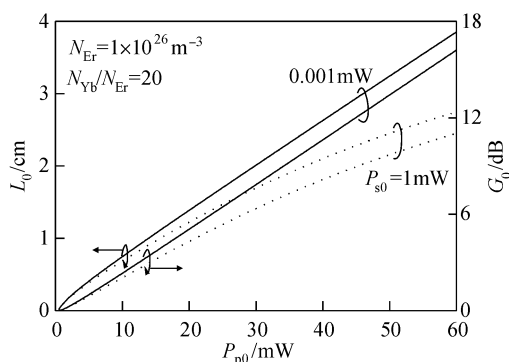


图 3 泵浦光功率 P_{p0} 与最佳波导长度 L_0 和最大增益 G_0 的关系曲线
Fig.3 Curves of optimum waveguide length L_0 and maximum gain G_0 versus pump power P_{p0}

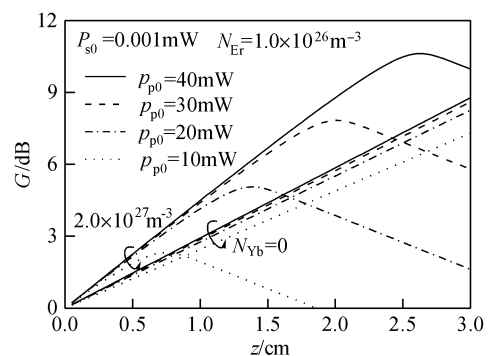


图 5 波导长度 z 与增益 G 的关系曲线
Fig.5 Curves of gain G versus waveguide length z

图 5 显示了波导长度 z 与增益 G 的关系曲线. 可以看出, 随着波导长度的增大, EYCDWA 的增益首先几乎是线性地增大. 但当波导长度增大到一定值时, 增益达到最大值. 若波导长度继续增大, 增益反而会下降. 若波导长度过长, 还会出现增益小于零的情况. 最大增益 G_0 所对应的波导长度称为最佳波导长度 L_0 . 例如当信号光功率为 0.001mW , 泵浦光功率为 30mW 时, EYCDWA 的最佳波导长度约 2cm , 对应的最大增益约为 7.8dB . 泵浦光功率越高, 最佳波导长度越长. 还可看出, 当其他条件相同时, Yb^{3+} 的引入可使 EYCDWA 的最佳波导长度 L_0 变短, 这说明了 EYCDWA 较 EDWA 在尺寸上更有利于器件小型化、集成化.

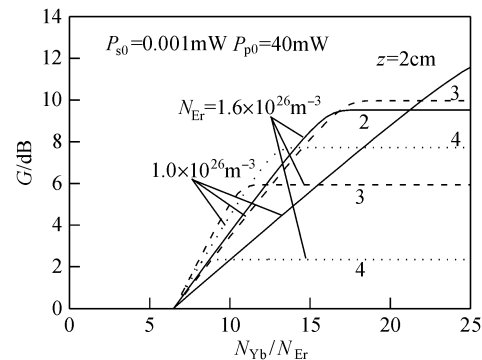


图 6 铈钇掺杂比率 $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$ 与增益 G 的关系曲线
Fig.6 Curves of gain G versus Yb-Er co-dopant ratio $N_{\text{Yb}}/N_{\text{Er}}$

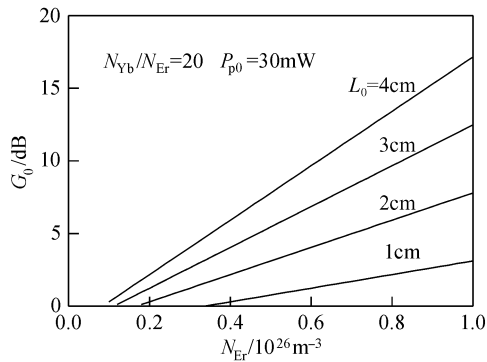
图7 掺钇浓度 N_{Er} 与最大增益 G_0 的关系曲线Fig.7 Curves of maximum gain G_0 versus erbium doped concentration N_{Er}

图6显示了钇镱掺杂比率 N_{Yb}/N_{Er} 与增益 G 的关系曲线.可以看出,钇镱掺杂比率小于某一特定值时,EYCDWA出现了负增益.这是因为当掺钇率太低时, Yb^{3+} 对泵浦光的吸收效率不高, Er^{3+} 会形成离子簇,引起浓度猝灭,从 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 的能量传递不是很有效.随着钇镱掺杂比率的逐渐增大,增益近似线性增大,当比率增大到一定值时,增益便出现了饱和.钇离子浓度越高,出现增益饱和的现象越快.引起增益饱和的原因是,对于一定的 Er^{3+} 浓度,当钇镱掺杂比率达到一特定值时,通过 $Yb^{3+}-Er^{3+}$ 离子对传递的能量使得 Er^{3+} 几乎全部实现了粒子数反转,进一步增大钇镱掺杂比率对器件的增益不再产生影响,使得增益变为常数,因而增益出现了饱和.因此选择合适的钇镱掺杂比率是十分重要的.对于不同的波导长度和 Er^{3+} 浓度,均有最佳的钇镱掺杂比率.例如3cm长的波导,在 $P_{p0} = 40mW$, $P_{s0} = 0.001mW$ 的情况下,对于 $N_{Er} = 1 \times 10^{26} m^{-3}$,最佳钇镱掺杂比率约为18,增益约为9.9dB;对于 $N_{Er} = 1.6 \times 10^{26} m^{-3}$,最佳钇镱掺杂比率约为11,增益约为5.8dB.

图7显示了掺钇浓度 N_{Er} 与最大增益 G_0 的关系曲线.可以看出,最大增益随着 Er^{3+} 浓度的增大而增大.对于一定的最大增益,最佳波导长度越短,掺钇浓度越高.还有,掺钇浓度必须到达一定数值才能对信号光进行放大,例如当 $N_{Yb}/N_{Er} = 20$, $P_{p0} = 30mW$, $L_0 = 2cm$ 时,最低掺钇浓度约为 $1.8 \times 10^{25} m^{-3}$.

4 结论

根据速率方程和传输方程,在忽略自发辐射的前提下建立了EYCDWA的增益模型,并给出了EYCDWA的增益、泵浦阈值等新公式.模拟结果表明, Yb^{3+} 的敏化作用,有效地抑制了 Er^{3+} 离子簇的形成,减小了 Er^{3+} 的合作上转换、激发态吸收等非线性效应所带来的负面影响,从而提高了放大器的增益和单位长度增益.

在最佳波导长度下EYCDWA具有最大增益;泵浦功率和钇镱掺杂浓度比率较大时,净增益趋于饱和;信号功率增强时,净增益下降;对于不同的波导长度和掺钇浓度,所对应的最佳钇镱掺杂比率会有所不同.模拟结果表明,对于3cm长的波导,在 $P_{p0} = 40mW$, $P_{s0} = 0.001mW$, $N_{Er} = 1 \times 10^{26} m^{-3}$, $\eta_0 = 11.5\%$ 时,最佳钇镱掺杂比率约为18,对应的增益约为9.9dB,单位长度的增益约为3.3dB/cm.与EDWA相比,EYCDWA不仅具有更好的增益特性,而且更有利于器件的小型化和集成化.

为了验证本文方法的精度,我们用此方法对文献[9]给出的EYCDWA结构进行了模拟,所得结果与其数值模拟结果基本相符,相对误差为1%~3%.说明本文给出的方法具有简捷、实用的特点,为这类器件的特性分析、参数优化和结构设计提供了理论依据,具有实际应用价值.

参考文献

- [1] Yeh C H, Chien H C, Lee C C, et al. Gain-clamping erbium-doped waveguide amplifier module using optical feedback technique. *Opt Commun*, 2005, 246(1~3): 73
- [2] Huang T T, Anh T K, Nam M H, et al. Preparation and infrared emission of silica-zirconia-alumina doped with erbium for planar waveguide. *J Lumin*, 2007, 122/123: 911
- [3] Zhang Dan, Liu Ke, Zhang Daming, et al. Optical gain and upconversion in $Er^{3+}-Yb^{3+}$ co-doped phosphate glass waveguide amplifiers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(10): 1857 (in Chinese) [张丹, 刘克, 张大明, 等. 钇镱共掺磷酸盐玻璃波导放大器及上转换性质. *半导体学报*, 2006, 27(10): 1857]
- [4] Li J F, Duan K L, Wang Y S, et al. Modeling and optimizing of high-concentration erbium-doped fiber amplifiers with consideration of ion-clusters. *Opt Commun*, 2007, 277(1): 143
- [5] Lu Z G, Liu J R, Sun F G, et al. A hybrid fiber amplifier with 36.9-dBm output power and 70-dB gain. *Opt Commun*, 2005, 256(4~6): 352
- [6] Yu Z, Wei W, Hou X. Numerical analysis of amplification characteristic of ytterbium-sensitized erbium-doped waveguide amplifiers by the finite difference beam propagation method. *Opt Eng*, 2003, 42(10): 2790
- [7] Taccheo S, Sorbello G, Longhi S, et al. Measurement of the energy transfer and upconversion constants in Er-Yb-doped phosphate glass. *Opt Quantum Electron*, 1999, 31(3): 249
- [8] Xue Hui, Yang Yapei, Liu Xiaoshuang, et al. Progress in Er/Yb codoped optical glass waveguide amplifiers. *Infrared*, 2005, 26(8): 1 (in Chinese) [薛辉, 杨亚培, 刘小双, 等. 钇镱共掺磷酸盐玻璃光波导放大器的进展. *红外*, 2005, 26(8): 1]
- [9] Shoostari A, Touam T, Najafi S I. Yb^{3+} sensitized Er^{3+} -doped waveguide amplifiers: a theoretical approach. *Opt Quantum Electron*, 1998, 30(4): 249
- [10] Grubb S G, Humer W F, Cannon R S, et al. +21dBm erbium power amplifier pumped by a diode-pumped Nd:YAG laser. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1992, 4(6): 553
- [11] Jiang Chun, Zeng Qingji. Optimization of erbium-doped waveguide amplifier. *Optics and Laser Technology*, 2004, 36(2): 167

Gain Characteristics of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-Doped Waveguide Amplifiers*

Wang Yuhai, Ma Chunsheng[†], Li Delu, and Zhang Daming

(*State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China*)

Abstract: Novel formulas to analyze the gain characteristics of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped waveguide amplifiers (EYCDWA) are derived from the rate equations and the light propagation equations under the uniform dopant and steady-state conditions, neglecting the amplified spontaneous emission and introducing initial energy transfer efficiency. Using these formulas, the effects of the pumping power, signal power, dopant concentration, and waveguide length on the gain characteristics of the EYCDWA are analyzed. A comparison is performed between the EYCDWA and the singly erbium-doped optical waveguide amplifier and some useful results are obtained.

Key words: waveguide amplifier; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-dopant; rate equations; propagation equations; gain characteristic

PACC: 4280L

Article ID: 0253-4177(2008)03-0578-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60576045, 60507004)

[†] Corresponding author. Email: mcsheng@163.com

Received 26 July 2007, revised manuscript received 4 October 2007