

文章编号: 0253-2239(2005)01-99-6

掺铒磷酸盐玻璃波导放大器的特性研究*

王洁红¹ 慕 桓¹ 金国良¹ 胡丽丽²

(¹ 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)
(² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 研究了掺铒磷酸盐玻璃波导放大器的特性。利用重叠因子将 980 nm 光抽运的掺铒玻璃波导放大器四能级模型的速率-传输方程进行化简, 在考虑上转换效应和放大自发发射的情况下, 利用数值模拟的方法, 得到了掺铒玻璃波导放大器的增益与 Er^{3+} 离子浓度、抽运功率、波导长度等参量之间的关系曲线; 同时模拟出放大自发发射曲线并与实验测量结果进行比较。结果表明在考虑上转换效应和放大自发发射的情况下, 理论结果和实验测量结果是一致的。同时看到, 选择合适的铒离子浓度是制作掺铒玻璃波导放大器的关键; 并且为了全面发挥掺铒玻璃波导放大器的性能, 需要抽运功率、波导长度等各个参量配合起来。

关键词: 导波光学; 掺铒波导放大器; 速率-传输方程; 上转换效应; 放大自发发射

中图分类号: TN252 文献标识码: A

The Characteristic of Er-Doped Phosphate Glass Waveguide Amplifier

Wang Jiehong¹ Mu Huan Jin Guoliang¹ Hu Lili

(¹ Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, The State Key Laboratory of Advanced Optical Communication System and Network, Shanghai 200240)
(² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: The characteristics of Er^{3+} -doped phosphate glass waveguide amplifier (EDWA) are investigated. Using the overlapping factor, the rate-propagation equations of the four-level system of EDWA are simplified. With taking account of up-conversion and amplified spontaneous emission (ASE), the relation curves are obtained by numerical simulation between the gain and the parameters such as Er^{3+} ions concentration, pump power and waveguide length, and the theoretic results are consistent with the experimental results. Selecting suitable erbium ions concentration is the key of fabricating EDWA. Moreover, in order to improve the EDWA performance, the parameters are optimized such as pump power and waveguide length.

Key words: guided wave optics; Er^{3+} -doped glass waveguide amplifier; rate-propagation equation; up-conversion; amplified spontaneous emission

1 引 言

掺铒玻璃波导放大器(EDWA)^[1]是继掺铒光纤放大器(EDFA)、半导体激光放大器(SOA)研制成功以来又一种具有发展前景的光放大器。掺铒玻璃波导放大器(EDWA)是在掺铒的玻璃衬底上,以二次离子交换技术^[2],在衬底表面形成多路埋入式条形光波导有源区,将抽运光引入有源区,使通过有源区的多路信号光得到放大,构成阵列型光放大器。它具有多路通道、体积小、多功能、短距离高增益

(10~15 dB左右)及成本低等优点,对于城域网(MAN)、局域网(LAN)、有线电视(CATV)以及光纤到户(FTTH)等系统中的应用,具有明显的优势。

与掺铒光纤放大器相比较,掺铒玻璃波导放大器中信号光短距离高增益的特性来自衬底材料中的高掺铒浓度。一般说来,掺铒光纤放大器中的铒离子浓度为万分之几;掺铒玻璃波导放大器中的铒离子浓度为百分之几,后者比前者高两个数量级。但是,掺铒玻璃波导放大器中铒离子的浓度也不能太

* 上海市科委(022261002)资助课题。

作者简介: 王洁红(1979~),女,河北省行唐县人,硕士,主要从事集成光子器件方面研究。E-mail: wangjehong@sjtu.edu.cn。

收稿日期: 2003-10-19; 收到修改稿日期: 2004-04-02

高。否则会产生铒离子上转换效应,构成铒离子点阵群,相互之间耦合能量,导致掺铒玻璃波导放大器增益下降,抽运效率降低。

对掺铒玻璃波导放大器的理论研究,已经在一些资料^[6~8]中提到。但是没有同时考虑合作上转换效应(up-conversion)和放大自发发射(ASE)的影响。本文从四能级模型的速率-传输方程出发,同时考虑上转换效应和放大自发发射的影响,利用数值模拟的方法,对掺铒玻璃波导放大器的理论特性作进一步的研究,得到了放大自发发射曲线。实验中,利用光谱分析仪(OSA)测量了波导放大器在不同条件下的增益以及自辐射放大。

2 实验基础

实验中所用掺铒磷酸盐玻璃由中国科学院上海光学精密机械研究所提供。此掺铒磷酸盐玻璃的吸收谱线如图 1,光在波导中传输满足朗伯定律:

$$I(\lambda) = I_0 \exp[-\alpha(\lambda)l],$$

其中 I_0 初始光强, I 为光通过玻璃后的光强; $\alpha(\lambda)$ 为吸收系数, l 为波导长度。当抽运光足够强,使铒离子全部跃迁到高能级时,吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 和铒离子浓度 N_t 之间有关系^[3]:

$$\alpha(\lambda) = \sigma_{\text{abs}} \Gamma(\lambda) N_t,$$

其中 $\Gamma(\lambda)$ 为光波模场与 Er^{3+} 离子掺杂分布之间的重叠因子, σ_{abs} 为 Er^{3+} 的吸收截面, N_t 为掺铒磷酸盐玻璃中 Er^{3+} 的浓度。由以上两式可得 Er^{3+} 的吸收截面:

$$\sigma_{\text{abs}}(\lambda) = \frac{-\ln[I(\lambda)/I_0]}{N_t \Gamma(\lambda) l}, \quad (1)$$

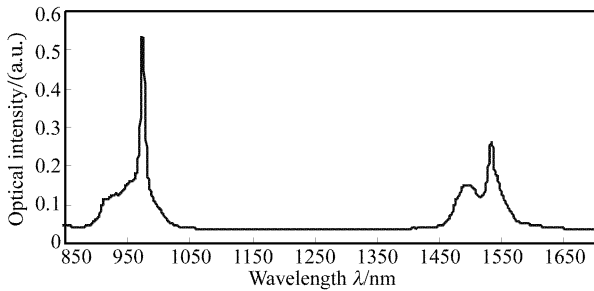


图 1 铒离子的吸收谱

Fig. 1 The absorption spectrum of Er^{3+}

根据 Macumber 理论, Er^{3+} 的吸收截面和发射

截面存在如下的可逆关系^[4]:

$$\sigma_{\text{emit}}(\lambda) = \sigma_{\text{abs}}(\lambda) \exp\left(\frac{\epsilon - hc/\lambda}{K_B T}\right), \quad (2)$$

其中 K_B 为波尔兹曼常量, T 为绝对温度, ϵ 为与温度有关的激发能量, h 为普朗克常量。

3 理论分析

考虑放大自发发射和上转换^[5,8]的情况下, 980 nm 抽运光抽运时掺铒玻璃波导放大器的能级系统如图 2 所示, 其中 ${}^4I_{15/2}$ 、 ${}^4I_{13/2}$ 、 ${}^4I_{11/2}$ 分别为基态、亚稳态、激发态能级。

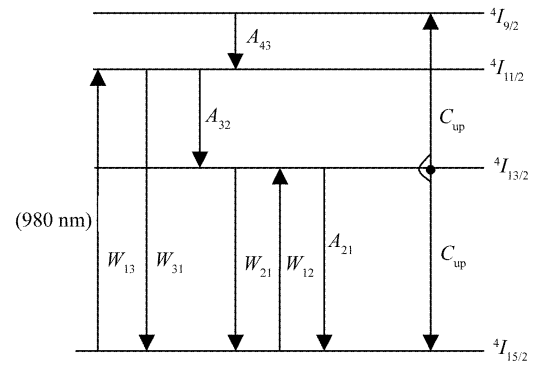


图 2 980 nm 抽运光抽运时铒离子的能级图

Fig. 2 The energy level diagram of Er^{3+} ion pumped by 980 nm light

980 nm 抽运时掺 Er^{3+} 波导放大器的速率方程表示为^[6]:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = -W_{13}N_1 + N_2/\tau_2 + C_{\text{up}}N_2^2 + \\ \quad W_{31}N_3 + W_{21}N_2 - W_{12}N_1, \\ \frac{dN_2}{dt} = -N_2/\tau_2 + N_3/\tau_3 - 2C_{\text{up}}N_2^2 + \\ \quad W_{12}N_1 - W_{12}N_2, \\ \frac{dN_3}{dt} = W_{13}N_1 - N_3/\tau_3 + N_4/\tau_4 - W_{31}N_3, \\ \frac{dN_4}{dt} = -N_4/\tau_4 + C_{\text{up}}N_2^2, \\ N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = N_t, \end{cases} \quad (3)$$

式中 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 分别代表 Er^{3+} 能级 ${}^4I_{15/2}$ 、 ${}^4I_{13/2}$ 、 ${}^4I_{11/2}$ 和 ${}^4I_{9/2}$ 上的粒子数浓度, N_t 为总的 Er^{3+} 浓度, C_{up} 是合作上转换系数^[8], τ_i 为各能级粒子寿命, W_{12} 、 W_{21} 分别为信号光的受激吸收和受激辐射速率, W_{13} 、 W_{31} 分别为抽运光受激吸收和受激辐射速率。 W_{12} 、 W_{21} 、 W_{13} 和 W_{31} 分别定义为

$$\begin{aligned} W_{21} = & \frac{\sigma_{\text{es}}(\nu_s)}{h\nu_s} I_s(x, y, z, t, \nu_s) + \frac{\sigma_{\text{ep}21}}{h\nu_p} [I_{\text{p}+}(x, y, z, t, \nu_p) + I_{\text{p}-}(x, y, z, t, \nu_p)] + \\ & \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_{\text{e}21}(\nu_j)}{h\nu_j} [I_{\text{ASE}+}(x, y, z, t, \nu_j) + I_{\text{ASE}-}(x, y, z, t, \nu_j)], \end{aligned}$$

$$W_{12} = \frac{\sigma_{as}(\nu_s)}{h\nu_s} I_s(x, y, z, t, \nu_s) + \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_{a12}(\nu_j)}{h\nu_j} [I_{ASE+}(x, y, z, t, \nu_j) + I_{ASE-}(x, y, z, t, \nu_j)],$$

$$W_{13} = \frac{\sigma_{ap}(\nu_p)}{h\nu_p} [I_{p+}(x, y, z, t, \nu_p) + I_{p-}(x, y, z, t, \nu_p)],$$

$$W_{31} = \frac{\sigma_{ep}(\nu_p)}{h\nu_p} [I_{p+}(x, y, z, t, \nu_p) + I_{p-}(x, y, z, t, \nu_p)],$$

其中 $j = 1, 2, \dots, m$, m 是荧光(ASE) 谱样条数目, $I_{p\pm}(x, y, z, t, \nu_p)$ 、 $I_s(x, y, z, t, \nu_s)$ 和 $I_{ASE\pm}(x, y, z, t, \nu_j)$ 分别是抽运光、信号光和放大自发发射光的强度(ν_p 、 ν_s 、 ν_j 分别为抽运光、信号光、荧光谱样的频率), σ_{as} 、 σ_{ap} 、 $\sigma_{a12}(\nu_j)$ 和 σ_{ep} 、 σ_{es} 、 $\sigma_{e21}(\nu_j)$ 和 σ_{ep21} 分别为相应的吸收和辐射截面。

假设抽运光、信号光以及放大自发发射光的功率分别为 P_p 、 P_s 和 P_{ASE} , 不考虑波导损耗的情况下, 波导中的传输方程可描述为^[6]:

$$\begin{cases} dP_p(z)/dz = -\gamma_p(z, \nu_p)P_p(z), \\ dP_s(z)/dz = [\gamma_{21}(z, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu_s)]P_s(z, \nu_s), \\ dP_{ASE}(z, \nu_j)/dz = [\gamma_{21}(z, \nu_j) - \gamma_{12}(z, \nu_j)]P_{ASE}(z, \nu_j) + Mh\nu_j\Delta\nu_j\gamma_{21}(z, \nu_j), \end{cases} \quad (4)$$

式中 γ_{ij} 分别为抽运、信号及荧光的吸收和辐射系数, 是包括归一化抽运和信号能量密度的重积分:

$$\gamma_{12}(z, \nu_s) = \iint_A \Psi_s(x, y) \sigma_{as}(\nu_s) N_1(x, y, z) dx dy,$$

$$\gamma_{21}(z, \nu_s) = \iint_A \Psi_s(x, y) \sigma_{es}(\nu_s) N_2(x, y, z) dx dy,$$

$$\gamma_p(z) = \iint_A \Psi_p(x, y) [\sigma_{ap}(\nu_p) N_1(x, y, z) - \sigma_{ep}(\nu_p) N_3(x, y, z)] dx dy,$$

$$\gamma_{12}(z, \nu_j) = \iint_A \Psi_{ASE}(x, y) \sigma_{a12}(\nu_j) N_1(x, y, z) dx dy,$$

$$\gamma_{21}(z, \nu_j) = \iint_A \Psi_{ASE}(x, y) \sigma_{e21}(\nu_j) N_2(x, y, z) dx dy,$$

其中 Ψ_p 、 Ψ_s 和 Ψ_{ASE} 分别是抽运光、信号光和荧光归一化的横向光场分布, A 是掺 Er^{3+} 光波导的导波区横截面积, $\Delta\nu_j$ 是谱样条宽度, M 是导模数目(对于单模波导 $M=1$)。

z 方向传播的导模的边界条件为

$$P_p(0) = P_{p0}, P_s(0) = P_{s0}, P_{ASE}(0, \nu_j) = 0, \quad (5)$$

4 数值模拟

4.1 利用重叠因子化简速率-传输方程

考虑正向抽运的情况, 即 $P_{p-} = 0$ 。在波导中, 光强可写成横向场分布与纵向归一化强度变化的两个函数之积^[7],

$$I_{p,s}(x, y, z) = \Psi_{p,s}(x, y) I_{p,s}(z),$$

类似地, 粒子数分布也可表示为

$$N_{1,2}(x, y, z) = f(x, y) N_{1,2}(z),$$

其中 $f(x, y)$ 为归一化的掺杂(横向)分布函数, $N_{1,2}$ 分

别为基态 E_1 和亚稳态 E_2 上 Er^{3+} 离子浓度。由光波模场和 Er^{3+} 掺杂分布之间的重叠因子 Γ 的定义^[7]:

$$\Gamma_{p,s} = \iint_A \Psi_{p,s}(x, y) f(x, y) dx dy,$$

在均匀掺杂的掺铒玻璃中, $f(x, y) = 1$, 则重叠因子 Γ 变为

$$\Gamma_{p,s} = \iint_A \Psi_{p,s}(x, y) dx dy.$$

考虑在稳态情况下, (3) 式微分方程组左边等于零, 方程两边同时对波导区域进行横向积分, 可以将其中 $\Psi_{p,s}(x, y)$ 转化为重叠因子 $\Gamma_{p,s}$ 。假定单模波导中导波光模场近似为高斯分布, 由于导波光模场尺寸很小, 可近似认为重叠因子为定值。考虑到光强 $I_{p,s}$ 和光功率 $P_{p,s}$ 之间的关系: $P_{p,s} = I_{p,s}/A$, 可将稳态时的 980 nm 光抽运的速率方程写成如下形式:

$$\left\{ \begin{array}{l}
-\frac{\sigma_{ap} P_p \Gamma_p N_1(z)}{Ah\nu_p} + \frac{N_2(z)}{\tau_2} + C_{up} N_2(z)^2 + \frac{\sigma_{ep} \Gamma_p N_2(z)}{Ah\nu_p} + \\
\left[\frac{\sigma_{es} P_s \Gamma_s}{Ah\nu_s} + \frac{\sigma_{ep} P_p \Gamma_p}{Ah\nu_p} + \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_{e21}(\nu_j) \Gamma_{ASE}(\nu_j) P_{ASE}(\nu_j)}{Ah\nu_j} \right] N_2(z) - \\
\left[\frac{\sigma_{as} P_s \Gamma_s}{Ah\nu_s} + \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_{a21}(\nu_j) \Gamma_{ASE}(\nu_j) P_{ASE}(\nu_j)}{Ah\nu_j} \right] N_1(z) = 0, \\
-\frac{N_2}{\tau_2} + \frac{N_3}{\tau_3} - 2C_{up} N_2(z)^2 + \left[\frac{\sigma_{as} P_s \Gamma_s}{Ah\nu_s} + \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_{a21}(\nu_j) \Gamma_{ASE}(\nu_j) P_{ASE}(\nu_j)}{Ah\nu_j} \right] N_1(z) + \\
\left[\frac{\sigma_{es} P_s \Gamma_s}{Ah\nu_s} + \frac{\sigma_{ep} P_p \Gamma_p}{Ah\nu_p} + \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_{e21}(\nu_j) \Gamma_{ASE}(\nu_j) P_{ASE}(\nu_j)}{Ah\nu_j} \right] N_2(z) = 0, \\
\frac{\sigma_{ap} P_p \Gamma_p N_1(z)}{Ah\nu_p} - \frac{N_3}{\tau_3} + \frac{N_4}{\tau_4} - \frac{\sigma_{ep} P_p \Gamma_p N_2(z)}{Ah\nu_p} = 0, \\
-\frac{N_4}{\tau_4} + C_{up} N_2(z)^2 = 0, \\
N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = N_1.
\end{array} \right. \quad (6)$$

传输方程可化为:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dP_p(z)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_{ap} N_1(z) - \sigma_{ep} N_3(z)] P_p(z), \\
\frac{dP_s(z)}{dz} = \Gamma_s [\sigma_{es} N_2(z) - \sigma_{as} N_1(z)] P_s(z), \\
\frac{dP_{ASE}(z, \nu_j)}{dz} = \Gamma_{ASE}(\nu_j) [\sigma_{e21}(\nu_j) N_2(z) - \sigma_{a21}(\nu_j) N_1(z)] P_{ASE}(z) + Mh\nu_j \Delta\nu_j \sigma_{e21}(\nu_j) N_2(z) \Gamma_s(\nu_j),
\end{array} \right. \quad (7)$$

这样就将速率方程由微分方程组转化为一组非线性方程组,将传输方程转化为常微分方程组。

4.2 模拟方法

首先将边界条件代入非线性方程组(6),利用牛顿迭代法得到初始的铒离子浓度 $N_1(0)$ 、 $N_2(0)$ 、 $N_3(0)$ 、 $N_4(0)$,然后将得到铒离子浓度代入传输方程(7),利用龙格-库塔(Runge-Kutta)法,求得下一步抽运光和信号光的功率 $P_p(z)$ 、 $P_s(z)$;再将 $P_p(z)$ 、 $P_s(z)$ 代入(6)式,循环迭代求解(6)式和(7)式,即可得到每一步的抽运光和信号光功率,最终求得抽运光和信号光的输出功率。

根据增益的定义 $G(z) = \lg[P_s(z)/P_s(0)]$,即可得到在某一波导长度处增益的数值解。

4.3 参量选取

$\nu_p = 3.061 \times 10^{14}$ Hz ($\lambda_p = 980$ nm), $\nu_s = 1.958 \times 10^{14}$ Hz ($\lambda_s = 1535$ nm), $\Gamma_p = 0.55$, $\Gamma_s = 0.65$, $\Gamma_{ASE} = 0.1$ (ASE为荧光非导模,故 Γ_{ASE} 较小), $T = 300$ K, 掺杂区域为 $A = \pi \times (5 \times 10^{-6})^2$ m², 上转换系数 $C_{up} = 2 \times 10^{-24}$ m³ · s⁻¹ [6]。能级寿命 $\tau_2 = 11$ ms, $\tau_3 = \tau_4 = 1.0 \times 10^{-6}$ ms, 吸收截面和发射截面根据中国科学院上海光学精密机械研究所提供的数据由(1)式、(2)式计算可得: $\sigma_{as} = 6.58 \times 10^{-25}$, $\sigma_{es} = 7.68 \times 10^{-25}$, $\sigma_{ap} =$

1.83×10^{-24} , $\sigma_{ep} = 0$ 。

4.4 数值模拟结果及分析

4.4.1 信号光功率对掺铒玻璃波导放大器增益的影响

由图3可看到,在 Er^{3+} 浓度、波导长度、抽运功率相同的情况下,小信号增益明显高于大信号增益,且增益随波导长度的增大逐渐趋于平缓,这是由于信号光引起的增益饱和现象^[9]。在饱和情况下,小信号增益系数大约为大信号的2倍。

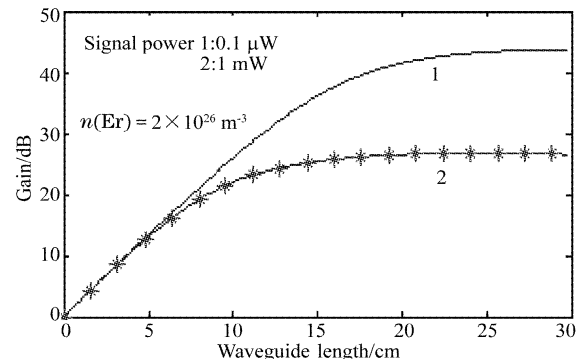


图3 信号光功率对增益的影响

Fig. 3 Gain at different signal power

4.4.2 最佳波导长度处掺铒玻璃波导放大器增益与抽运功率及 Er^{3+} 掺杂浓度关系

图4为在抽运光固定(200 mW)情况下,20 cm

波导范围内最佳长度处(一定抽运功率下,一定铒离子浓度下,增益达到最大时的波导长度)的增益与掺杂浓度之间的关系。由图 4 可见,浓度增大到一定程度,最佳长度处的增益达到峰值,此后再增大 Er^{3+} 浓度,最佳波导长度处增益开始下降,即存在一最佳掺杂浓度。这是因为 Er^{3+} 浓度超过一定范围,抽运光已不足以使所有基态能级上的粒子吸收,多余的粒子就在基态能级存在,反而增大了粒子数反转的难度,降低产生受激辐射光子的几率使增益降低。并且当超过最佳 Er^{3+} 浓度时,由于上转换的影响,抽运效率降低,导致增益下降。同样在掺杂浓度一定情况下,也会存在一个最佳的抽运功率,使得在最佳波导长度处的增益最大。

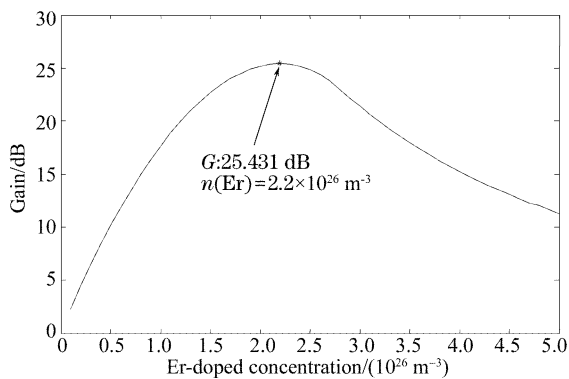


图 4 最佳波导长度处增益与掺铒浓度之间的关系

Fig. 4 Relation between gain and Er-doped concentration

4.4.3 不同铒离子掺杂浓度下,抽运阈值功率的比较

图 5 为波导长度为 5 cm,在四种不同的铒离子浓度情况下,掺铒玻璃波导放大器增益随抽运光强变化(其中虚线为 $G=0$)情况。由图 5 可见,当增大抽运功率时,四条曲线都呈现增大的趋势,但增大会逐渐趋向于缓和,这是由于随着抽运的增加,会产生

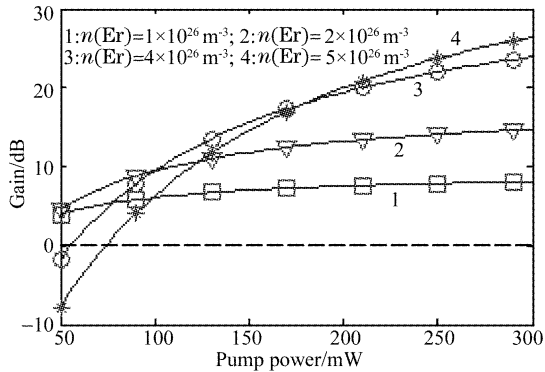


图 5 四个不同的掺杂浓度下,增益与抽运功率之间的关系

Fig. 5 Gain versus pump power at different doping concentration

增益饱和现象。比较曲线 1~4(掺铒浓度从低到高),发现产生有效增益的抽运阈值($G=0$ 时的抽运强度)越来越高。分析原因,主要是低浓度时基态粒子较少,用很少的抽运光子就可以完成粒子数反转,从而达到产生有效增益的必要条件。反之,较大的浓度就需要较大的抽运光强来实现粒子数反转;另外,高的掺杂浓度就会有较大的 α (吸收几率)值,导致输入光吸收。因而较低的抽运功率就不足以实现 Er^{3+} 亚稳能级的粒子数反转,所以一般存在负增益区。

4.4.4 上转换效应对掺铒玻璃波导放大器增益的影响

图 6 为两种不同掺杂浓度下,上转换效应对掺铒玻璃波导放大器增益的影响(其中带 * 线为考虑上转换影响的情况 $C_{up} = 2 \times 10^{-24} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。比较图 6 中 1-0, 1-1 两曲线可知,在低掺杂条件下,上转换对增益的影响不大;而在高浓度掺杂时,通过比较 2-0, 2-1 曲线可知,最大增益明显降低。这是由于当浓度升高时, Er^{3+} 离子成团现象变得明显,上转换效应的作用凸现,从而使抽运效率降低。

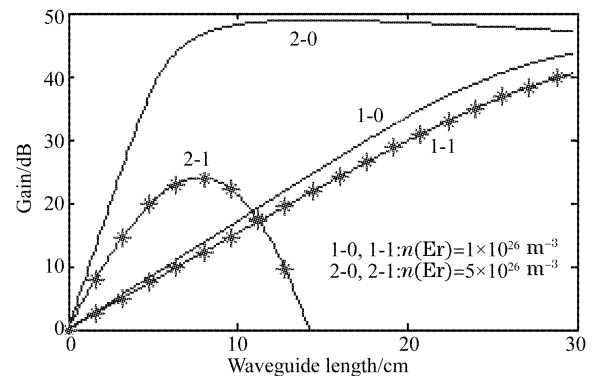


图 6 上转换效应对增益的影响

Fig. 6 The effect of up-conversion on gain

4.4.5 放大自发发射曲线的理论值与实验值的比较

图 7 为在不同抽运功率下的通过数值模拟所得的放大自发发射曲线,从图 7 可看到,当抽运光功率较小时,放大自发发射谱线发生红移,原因是抽运功率不足够大,在传输的过程中,抽运光不足以抽运所有的 Er^{3+} ,使得产生的放大自发发射光谱中 1535 nm 附近的光在传输过程中被 Er^{3+} 离子吸收,产生更长波长的放大自发发射光,使得能量向长波段转移。这说明只有在抽运光和 Er^{3+} 浓度相匹配时,所需信号光的增益才能达到最大。比较图 7 中 $P_p = 250 \text{ mW}$ 的理论放大自发发射曲线与图 8 的实验测量放大自发发射曲线,看到模拟值和测量值基

本一致,说明在充分考虑放大自发发射和上转换效应的情况下,理论和实验是基本相符合的。

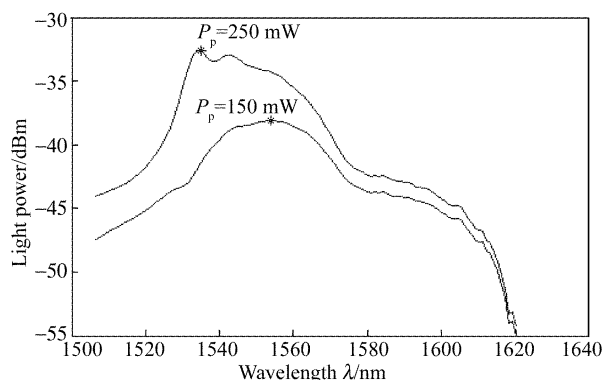


图 7 理论计算的放大自发发射曲线

Fig. 7 Theoretical amplified spontaneous emission curve

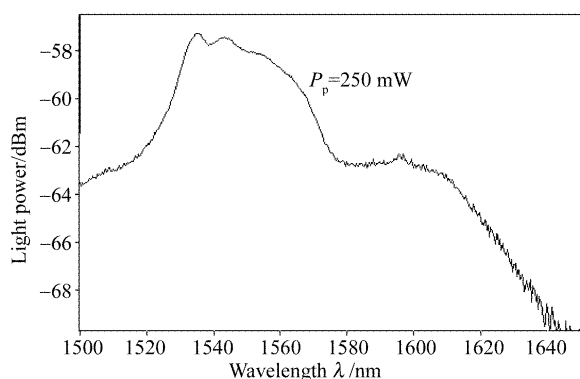


图 8 实验测量的放大自发发射曲线

Fig. 8 Experimental amplified spontaneous emission curve

5 结 论

本文在充分考虑上转换效应和放大自发发射的情况下,通过求解速率-传输方程的方法,对掺铒玻璃波导放大器的特性进行了理论分析,得出了掺铒玻璃波导放大器的增益与 Er^{3+} 离子浓度、抽运功率、波导长度、上转换系数等参量之间关系;同时还模拟得到了与实验测量结果相符合的放大自发发射曲线。总之, Er^{3+} 离子浓度大小直接影响掺铒玻璃波导放大器的整体性能,所以选择合适的 Er^{3+} 浓度是制作掺

铒玻璃波导放大器的关键;同时看到,要使掺铒玻璃波导放大器的性能得到全面的发挥,需要抽运功率、波导长度等各个参量配合。进一步,还应考虑插入损耗以及抽运光、导波光等不同模场分布对应的重叠因子等因素对掺铒玻璃波导放大器的影响。

参 考 文 献

- 1 Tian Hebin, Yang Tianxin, Wang Ying *et al.*. Analysis of burried channel Erbium-doped glass waveguide optical amplifiers [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, **15**(6): 27~30 (in Chinese)
田贺斌,杨天新,王颖等. 掩埋型掺铒玻璃波导光放大器的特性分析[J]. *光电子技术与信息*, 2002, **15**(6): 27~30
- 2 Shen Rongui. G. C. Righini. Glass waveguides and the double ion-exchange process[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(6): 558~563 (in Chinese)
沈荣桂, G. C. Righini 玻璃波导及两次离子交换法[J]. *光学学报*, 1991, **11**(6): 558~563
- 3 C. Randy Giles, Emmanuel Desurvire. Modeling Erbium-doped fiber amplifiers[J]. *J. Lightwave Technology*, 1991, **9**(2): 271~283
- 4 Li Maohe, Hu hefang, Qi Changhong. A method to calculate the emission cross section of rare-earth ions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 626~629 (in Chinese)
李毛和,胡和方,祁长鸿. 一种稀土离子发射截面的计算方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5): 626~629
- 5 Zhang Long, Lin Fengying, Qi Changhong *et al.*. High erbium doped glass for waveguide amplifiers at 1.5 μm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12): 1688~1693 (in Chinese)
张龙,李凤英,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
- 6 F. Di Pasquale, M. Federighi. Improved gain characteristics in high-concentration $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped glass waveguide amplifiers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(9): 2127~2131
- 7 Chen Haiyan, Liu Yongzhi, Guan Zhouguo *et al.*. Rate equation analysis of erbium-doped optical waveguide amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 174~177 (in Chinese)
陈海燕,刘永志,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
- 8 Chen Haiyan, Guan zhongguo, Liu Yongzhi. Studies on gain characteristics of silica waveguide amplifiers with high $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ concentrations[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2001, **18**(5): 391~393 (in Chinese)
陈海燕,官周国,刘永智. 高浓度 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 掺杂硅酸盐玻璃波导放大器的增益特性研究[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(5): 391~393
- 9 Wu Hejun, Chen Tianqi. Analysis of signal distortion in power amplification of erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Xiamen University (Natural Science)*, 1996, **35**(4): 504~507 (in Chinese)
吴河浚,陈天琪. 掺铒光纤放大器功率放大中的信号失真分析[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1996, **35**(4): 504~507