

高掺杂碲基 EDFA 增益噪声特性的数值模拟

俞忠兴 李荣玉 衡志德 张 犇

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200030)

摘 要 采用四能级理论模型对高掺杂碲基 EDFA 进行了数值模拟, 得出 C 波段和 L 波段 EDFA 的主要增益和噪声系数特性, C+L 波段同时放大时, 20 dB 增益带宽达到 85 nm. 同时分析了钇离子高掺杂带来的上转换效应对放大增益和噪声性能的影响程度, C 波段为 4%, L 波段为 10%, 当增大泵浦光功率时, 影响程度会更小, 采用两段级双向泵浦结构放大时影响仅为 0.1%.

关键词 EDFA; 碲酸盐玻璃; 上转换; 高掺杂; EFTFA

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

随着通信的发展, 对带宽的要求越来越大, 碲基掺钇光放大器由于其宽带特性性能受到极大关注, 带宽能够达到 80 nm 左右^[1,2]. 城域网的发展要求低成本, 集成化的光放大器的出现, 以便灵活组网, 降低建设成本. 所以高掺杂的光放大器成为研究热点. 碲酸盐玻璃和磷酸盐玻璃都是理想的玻璃基质. 虽然高掺杂能够实现掺光放大器的集成化, 但是相应的高掺杂带来了上转换^[3]效应特性, 降低了放大器的放大性能. 能量传递上转换是两个比较靠近的处于亚稳态的钇离子发生能量转移, 一个钇离子将自己的能量交给另一个钇离子, 自己回到基态, 而另一个钇离子得到能量跃迁到更高的能级, 停留非常短的时间, 然后无辐射地跃迁到亚稳态, 这样就造成亚稳态的离子数减少了. 碲酸盐玻璃基质显示出比硅酸盐和磷酸盐玻璃更好的高掺杂性能, 从结构上来讲是因为化学键 Si-O 结合得最牢固, P-O 次之, Te-O 最小, 所以在碲酸盐中掺杂钇离子比前两者容易, 相应的也就更加均匀, 所以上转换系数是最小的, 是最理想的高掺杂玻璃基质^[3]. 本文对高掺杂的碲基掺钇光放大器进行数值模拟, 着重研究各种条件下增益特性和噪声特性与上转换特性的关系.

1 理论模型

由于碲酸盐玻璃低的声音能量 (800 cm^{-1}), 钇离子在 $^4I_{11/2}$ 能级的寿命相应更长 ($\sim 300 \mu\text{s}$), 而硅酸盐只有 $10 \mu\text{s}$ 左右. 所以采用 980 nm 泵浦时, 将存在较强的激发态吸收泵浦 (ESA) 和 $^4I_{11/2}$ 能级的能量上转换 ($^4I_{11/2} + ^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2} + ^4I_{7/2}$). 正因为这个原因, 980 nm 泵浦不适合碲酸盐玻璃基质 (也有人提出共掺铈^[4]可以减少 $^4I_{11/2}$ 能级寿命, 这样就可以使用 980 nm 泵浦). 本文采用 1480 nm 泵浦, 并且忽略 ESA. 图 1 是钇离子四能级图, 虚箭头代表上

转换.

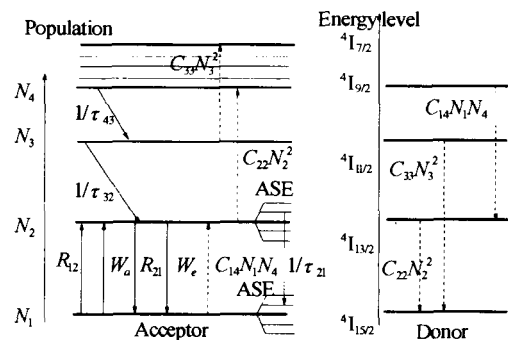


图 1 高浓度掺杂钇离子上能级
Fig. 1 Schematic diagram of four energy levels and transitions of Er^{3+} in high concentration tellurite glass

如图 1, 多能级速率方程如下^[5]

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -(R_{12} + W_a)N_1 + (1/\tau_{21} + W_e + R_{21})N_2 + C_{22}N_2^2 + (C_{33}N_3^2 - C_{14}N_1N_4) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = (W_a + R_{12})N_1 - (W_e + 1/\tau_{21} + R_{21})N_2 - 2C_{22}N_2^2 + \frac{N_3}{\tau_{32}} + 2C_{14}N_1N_4 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = -\frac{N_3}{\tau_{32}} + \frac{N_4}{\tau_{43}} - 2C_{33}N_3^2 \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_4}{\partial t} = -\frac{N_4}{\tau_{43}} + C_{22}N_2^2 + (C_{33}N_3^2 - C_{14}N_1N_4) \quad (4)$$

其中 R, W_a 和 W_e 分别是泵浦率, 受激吸收率, 受激发射率, 定义为

$$R_{12} = R_{12}(x, y, z) = \frac{\sigma_{pa}(I_p^+(x, y, z) + I_p^-(x, y, z))}{h\nu_p} \quad (5)$$

$$R_{21} = R_{21}(x, y, z) = \frac{\sigma_{pe}(I_p^+(x, y, z) + I_p^-(x, y, z))}{h\nu_p} \quad (6)$$

$$W_a = W_a(x, y, z) = \sigma_{sa}(\nu_i) \frac{I_s(x, y, z)}{h\nu_i} + \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{sa}(\nu_i)}{h\nu_i} [I_{ASE}^+(x, y, z) + I_{ASE}^-(x, y, z)] \quad (7)$$

$$W_e = W_e(x, y, z) = \sigma_{se}(\nu_i) \frac{I_s(x, y, z)}{h\nu_i} + \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{se}(\nu_i)}{h\nu_i} [I_{ASE}^+(x, y, z) + I_{ASE}^-(x, y, z)] \quad (8)$$

式中 $I_p(x, y, z), I_s(x, y, z), I_{ASE}^+(x, y, z)$ 分别是泵

Email: zhongxing_yu@sju.edu.cn

收稿日期: 2004-07-09

浦光, 信号光和放大器的自发辐射噪声光的强度. $\sigma_{pa}, \sigma_{pe}, \sigma_{sa}(\nu_s), \sigma_{se}(\nu_s)$ 分别是泵浦吸收截面, 泵浦发射截面, 信号的受激吸收截面和受激发射截面. τ_{21} 是亚稳态 $^4I_{13/2}$ 的荧光寿命, τ_{32} 和 τ_{43} 分别对应多光子的非辐射豫弛 $^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$.

在稳态情况下, 式(1), (2), (3), (4) 都等于零 (表示不随时间变化). 并认为除四能级外其他能级的粒子数为零, 则粒子总数

$$N_0 = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (9)$$

光纤中的泵浦光, 信号光和放大器的自发辐射噪声功率可由下面微分方程描述

$$\frac{dP_{p\pm}(z)}{dz} = \mp \gamma_p(z) P_{p\pm}(z) \mp \alpha_p P_{p\pm}(z) \quad (10)$$

$$\frac{dP_s(z, \nu_s)}{dz} = [\gamma_{se}(z, \nu_s) - \gamma_{sa}(z, \nu_s)] P_s(z, \nu_s) - \alpha_s P_s(z, \nu_s) \quad (11)$$

$$\frac{dP_{ASE\pm}(z, \nu_i)}{dz} = \pm [\gamma_{se}(z, \nu_i) - \gamma_{sa}(z, \nu_i) \mp \alpha_s] P_{ASE\pm}(z, \nu_i) \pm 2h\nu_i \cdot \Delta\nu_i \cdot \gamma_{se}(z, \nu_i) \quad (12)$$

式中, 吸收和发射系数 $\gamma_{pa}, \gamma_{se}(z, \nu_s), \gamma_{sa}(z, \nu_i)$ 是个二重积分

$$\gamma_p(z) = \iint_{\text{core}} [\sigma_{pa} N_1(x, y, z) - \sigma_{pe} N_2(z, y, z)] \cdot \Psi_p(x, y) dA \quad (13)$$

$$\gamma_{sa}(z, \nu_i) = \iint_{\text{core}} \sigma_{sa}(\nu_i) N_1(x, y, z) \Psi_s(x, y) dA \quad (14)$$

$$\gamma_{se}(z, \nu_i) = \iint_{\text{core}} \sigma_{se}(\nu_i) N_2(x, y, z) \Psi_s(x, y) dA \quad (15)$$

其中 $\Psi_p(x, y), \Psi_s(x, y)$ 是泵浦和信号在光纤中归一化的模场分布.

2 数值模拟步骤与结果

由于采用 1480 nm 泵浦, 相应的 $^4I_{11/2}$ 粒子数较少, 所以忽略 $C_{33} N_3^2$ 项. 同时不考虑交叉豫弛, 同样是因为 $^4I_{9/2}$ 粒子数非常少. 掺杂粒子数密度是 $4 \times 10^{26} / \text{m}^3$, 泵浦和信号的受激吸收和受激发射截面数据 $\sigma_{pa}, \sigma_{pe}, \sigma_{sa}(\nu_s), \sigma_{se}(\nu_s)$ 取自文献[6], τ_{21} 取 $2.5 \text{ms}^{[6]}$, 上转换系数 C_{22} 取 $2.74 \times 10^{-24} \text{m}^3 / \text{s}^{[5]}$, $1/\tau_{32}$ 取 3769s^{-1} , $1/\tau_{31}$ 取 398s^{-1} , $1/\tau_{43}$ 取 $10219 \text{s}^{-1}^{[5]}$.

2.1 数值模拟步骤

在以上理论模型的基础上, 编写数值仿真模块, 并利用 OptiAmplifier4.0 软件, 进行数值仿真:

1) C波段放大特性: 选择信号光功率为 -30 dB, 泵浦光功率为 100 mW. 为了找出合适的光纤长度, 选择 C 波段的典型波长, 画出增益随光纤长度变化的曲线图. 找到合适的光纤长度之后, 画出 C 波段的增益图, 并分析 C 波段中上转换效应的影响, 得到图 2(a)、(b)、(c).

2) L波段放大特性: 选择信号光功率为 -30 dB, 泵浦光功率为 100 mW, 采取类似 C 波段的方法得到图 3(a)、(b)、(c).

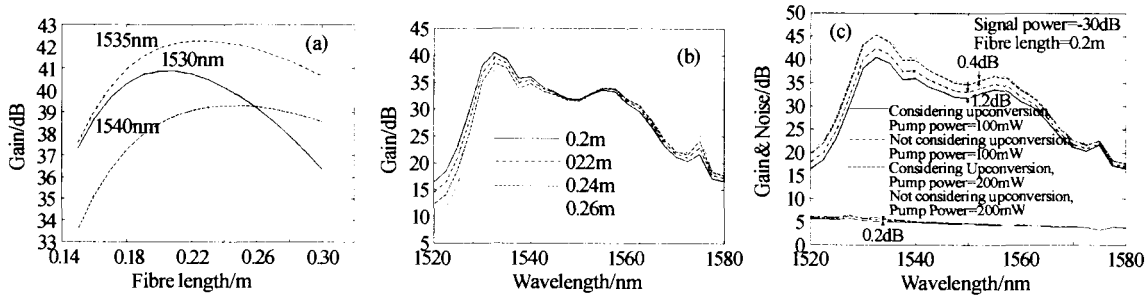


图 2 (a)C 波段典型波长的增益随光纤长度变化, (b)C 波段不同波长的信号增益, (c)C 波段中上转换效应对信号增益影响的曲线

Fig. 2 (a)Gain characteristic of typical C-band signals fluctuate with fiber length, (b)Gain spectrum of C-band signals, (c)Gain and noise figure of C-band difference between considering upconversion and without considering upconversion

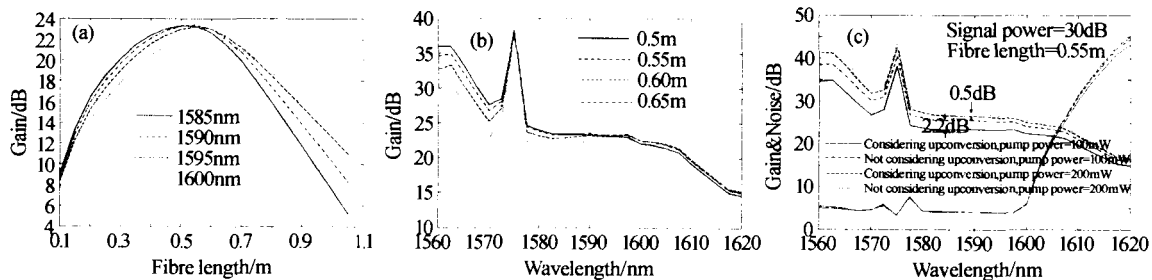


图 3 (a)L 波段典型波长的增益随光纤长度变化, (b)L 波段不同波长的信号增益, (c)L 波段中上转换效应对信号增益影响的曲线

Fig. 3 (a)Gain characteristic of typical L-band signals fluctuate with fiber length, (b)Gain spectrum of L-band signals, (c)Gain and noise figure of L-band difference between considering upconversion and without considering upconversion

3) C+L 同时放大特性:在铒光纤中插入一个隔离器,采用双向泵浦(前向泵浦 100 mW,后向泵浦 100 mW),可以实现 C+L 波段的同时放大,隔离器离输入端的距离是总的铒光纤长度的 1/3. 画出增益图,并分析上转换影响,得到图 4(a)、(b).

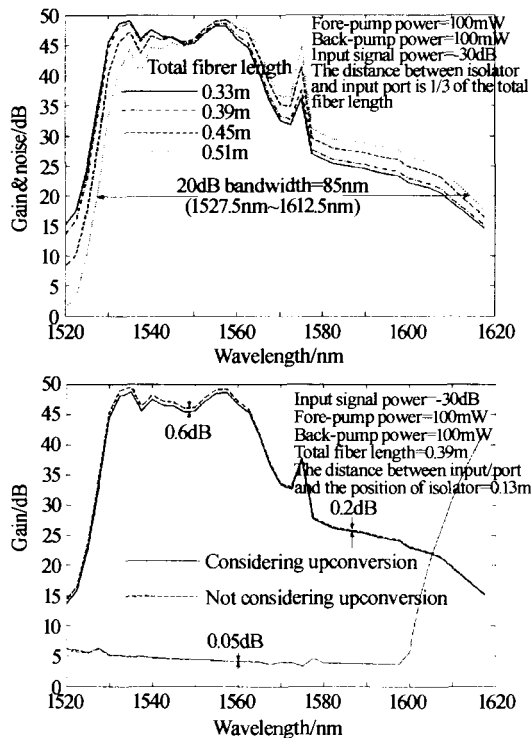


图 4 (a)C+L 波段同时放大的不同波长的信号增益,(b)C+L 波段同时放大时上转换效应对信号增益影响的曲线
Fig. 4 (a)Gain spectrum of C+L band signals,(b)Gain and noise figure of C+L band difference between considering upconversion and without considering upconversion

2.2 结果与讨论

1) 由于采用高掺杂,需要的光纤长度比较短.从图 2(a)看出 0.2 m 到 0.26 m 是 C 波段合适的光纤长度范围,选取长度分别为 0.2 m,0.22 m,0.24 m,0.26 m,得到的增益图(图 2(b)). 可以看到,20 dB 增益带宽大约为 47 nm(1528 nm~1575 nm).图 2(c)是考虑和忽略上转换效应的比较图.从图中可以清楚地看到,不考虑上转换效应,增益和噪声系数都增大了,但幅度不大,增益增大了 1.2 dB,噪声系数增大了 0.2 dB.可见碲酸盐玻璃非常适合铒离子的高掺杂,因为由于上转换特性带来的增益损耗占总增益的比例约为 4%.当泵浦功率增加到 200 mW 时,上转换效应影响更小,约为 1%.

2) 从图 3(a)看到,L 波段合适的光纤长度比 C 波段增大了,0.5 m 到 0.65 m 是个合适的长度.图 3(b)是 0.5 m,0.55 m,0.6 m,0.65 m 的增益图,可以看出 20 dB 增益带宽大约 32 nm(1575 nm~1607 nm).图 3(c)分析了上转换效应的影响.L 波段的上转换

增益影响占总增益的比例是 10%,比 C 波段要大.当泵浦功率增加到 200 mW 时,同样上转换影响变小,约为 2%.

3) 图 4(a)中可以看到碲酸盐玻璃 C+L 波段同时放大时 20 dB 增益带宽达到 85 nm(1527.5 nm~1612.5 nm),可见碲基 EDFA 的在 WDM 中的巨大优势与前景.但是增益不是很平坦,要加入相应的滤波器.图 4(b)研究了上转换效应的影响,可以清楚地看到上转换效应的影响非常小,上转换增益影响占总增益的比例约是 0.1%.这主要是由于增加了反向泵浦,使泵浦光增加了一倍,从而降低了上转换效应的影响.据报道^[8],硅基的高掺杂 EDFA 的上转换系数约为 $1 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$,是碲酸盐玻璃基质高掺杂 EDFA 的上转换系数的 100 倍.从以上数据看出,碲基 EDFA 在高掺杂方面的特性非常优良,受到高掺杂带来的上转换影响非常小,碲酸盐玻璃是制造集成宽带放大器的优良材料.

3 结论

本文采用四能级理论模型编写数值仿真模块对高掺杂的碲基 EDFA 进行了数值仿真.单独对 C 波段进行放大,20 dB 带宽为 47 nm(1528 nm~1575 nm)和单独对 L 波段进行放大,20 dB 带宽为 32 nm(1575~1607 nm).当 C+L 波段一起放大,20 dB 带宽达到 85 nm(1527.5 nm~1612.5 nm).同时分析了高掺杂带来的上转换效应对增益的影响程度,C 波段为 4%,L 波段为 10%,当增大泵浦功率时,影响程度会变小.当光功率为 200 mW 时,C 波段和 L 波段分别约为 1%和 2%.对采用前后双泵浦的两级放大器的增益的影响仅为 0.1%.由此可见碲酸盐玻璃在制造高掺杂的集成宽带光放大器有巨大的优势和前景.

参考文献

- 1 Makoto Yamada. Gain-flattened tellurite-based EDFA with a flat amplification bandwidth of 76 nm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(9): 1244~1246
- 2 Mori A. Gain flattened Er^{3+} doped tellurite fibre amplifier for WDM signals in the 1581~1616 nm wavelength region. *Electronics Letters*, 2000, **36**(7): 621~622
- 3 Piotr Myslinski. Effects of concentration on the performance of erbium-doped fiber amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(1): 112~120
- 4 Shen S. Gain characteristics of $\text{Er}^{3+}/\text{Ce}^{3+}$ codoped tellurite short fibre amplifier pumped at 980nm. *Electronics Letters*, 2003, **39**(25): 1797~1799
- 5 Hu Yongdan, Jiang Shibin. Numerical analyses of the

- population dynamics and determination of the upconversion coefficients in a new high erbium-doped tellurite glass. *J Opt Soc Am B*, 2001, **18**(12): 1928 ~ 1934
- 6 Conti G Nunzi, Tikhomirov V K. Characterization of ion-exchanged waveguides in tungsten tellurite and zinc tellurite Er^{3+} -doped glasses. *Optical Engineering*, 2003, **42**(10): 2805 ~ 2811
- 7 马晓明. 两段级联掺铒光纤放大器的优化研究. *光子学报*. 2003, **32**(6): 688 ~ 692
Ma X M. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 688 ~ 692
- 8 Blixt P, Nilsson J, Carlnas C. Concentration-dependent upconversion in Er^{3+} -doped fiber amplifiers Experiments and modeling. *IEEE Photon Technol Lett*, 1991, **3**(8): 996 ~ 998

Numerical Simulation on Gain and Noise Characteristic of High Concentration Tellurite-based EDFA

Yu Zhongxing, Li Rongyu, Hen Zhide, Zhang Ben

Shanghai Jiaotong University, National Laboratory on Local Fiber-optic Communication Networks & Advanced Optical Communication System, Institute of Optical Fiber Technology, Shanghai 200030

Received date: 2004-07-09

Abstract Numerical simulation on high concentration tellurite EDFA is based on four energy-level model. The main characteristic of gain and noise figure both in C-band and L-band is presented. The bandwidth achieves 85 nm when gain of amplifier both in C-band and L-band achieves above 20 dB. Furthermore, the degradation of gain and noise characteristic caused by the effect of upconversion which is brought by high concentration is analyzed. The degradation is 4% in C-band and 10% in L-band. The degradation is decreasing when the pump power increasing. It is just 0.1% when the two-stage amplifier is bi-directional pumped.

Keywords EDFA ; Tellurite glass; Upconversion; High Concentration; EDTFA



Yu Zhongxing was born in 1980. He received B. S. degree in 2002 from Nanjing University of Posts and Telecommunications. Now, he is a M. S. degree candidate in Shanghai Jiaotong University. His major research fields is thulium doped optical amplifier in optical communications.