

1477 nm LD 泵浦掺铒光纤放大器的研究*

宁继平 孙小卫 汤声书 许 晟 姚建铨

(天津大学精仪系, 天津 300072)

提要 报道了采用 1477 nm 激光二极管(LD)泵浦的掺铒光纤放大器的实验结果。研究了放大器的增益和时域特性。对 1520 nm 的信号光,获得了 23 dB 的增益,泵浦效率为 2.28 dB/mW。低频脉冲信号经过放大器后未发生波形畸变。

关键词 掺铒光纤,光放大器,时域特性,激光二极管

掺铒光纤放大器增益高、噪声低、交叉串扰小及插入损耗低、其光波长落在光通信窗口 1520 nm 处,在光通信中有广泛的应用前景。实用化的掺铒光纤放大器必须满足:(1)为信号光提供高增益;(2)光脉冲信号经过放大器后不失真;(3)泵浦源体积小、可靠、稳定且功率大。1480 nm 或 980 nm 波长的激光二极管是最佳的选择,它们不存在激发态吸收,泵浦效率高,而且 1480 nm 波段的 LD 工艺成熟、寿命长、可靠性好,可与信号光共线传输,现今报道的光纤通信系统实验多采用这种泵浦源的光纤放大器。本文报道了采用国产 1477 nm 激光二极管泵浦的掺铒光纤放大器,研究了其增益和时域特性。

1 理论分析

掺铒光纤的激光过程属于三能级系统,若严格地描述掺铒光纤放大过程,并确定出各相关参量间的关系,需要求助于三能级系统的速率方程。令三个能级上的粒子数分别为 n_1 , n_2 , n_3 , 泵浦速率分别为 W_{13} , W_{12} , 非辐射跃迁几率和自发辐射系数分别为 S_{31} , S_{32} , A_{21} , 因此各能级粒子数随时间的变化方程为

$$\begin{aligned} \frac{dn_3}{dt} &= n_1 W_{13} - n_3(S_{32} + A_{31} + S_{31}) \\ \frac{dn_2}{dt} &= n_3 S_{32} + n_1 W_{12} - n_2 W_{21} - n_2(A_{21} + S_{21}) \\ \frac{dn_1}{dt} &= n_3(A_{31} + S_{31}) + n_2(W_{21} + A_{21}) - n_1(W_{13} + W_{12}) \\ n_1 + n_2 + n_3 &= N \end{aligned} \quad (1)$$

假定掺铒离子浓度沿光纤长度方向均匀,且径向分布圆对称均匀分布,根据上述速率方程可以得到掺铒光纤放大器的主要特性。

1.1 增益特性

当系统处于稳态时,由(1)式可得到泵浦光、信号光在掺铒光纤中的变化为^[1]

* 天津市自然科学基金资助项目。

$$\begin{aligned} \partial P_p(z)/\partial Z &= -N\sigma_p[P_s(z)/P_{ss} + 1]P_p(z)/[P_p(z)/P_{sp} + 2P_s(z)/P_{ss} + 1] \\ \partial P_s(z)/\partial Z &= N\sigma_s[P_p(z)/P_{sp} - 1]P_s(z)/[P_p(z)/P_{sp} + 2P_s(z)/P_{ss} + 1] \end{aligned} \quad (2)$$

式中 σ_p , σ_s 分别为泵浦光和信号光受激吸收截面, $P_p(z)$ 和 $P_s(z)$ 分别为泵浦光和信号光入纤功率, P_{sp} 和 P_{ss} 分别为泵浦光和信号光的饱和功率。由上式可知, 只有 $P_p(z) > P_{sp}$ 时, $\partial P_s(z)/\partial Z > 0$, 即只有泵浦功率超过其饱和功率时, 信号光才有放大现象。 $P_p(z) = P_{sp}$ 为阈值条件。

1.2 时域特性

光脉冲信号在掺铒光纤传输放大过程中, 由于光纤放大器的噪声及很多参数的影响, 有可能变形, 必须尽量消除或减小影响变形的因素。

当一光脉冲信号在光纤放大介质中传输时, 不考虑光纤中的损耗, 只考虑铒离子分布集中在光纤芯中心的情况。入射的信号在 $t = 0$ 时进入光纤放大器, 光信号进入放大器前, 放大器处于粒子数反转状态

$$\Delta n(z, t) = \Delta n_0(z) \quad (3)$$

则任意时间 t 和坐标 z 处的信号光强由下式决定^[2]

$$I_s(z, t) = \frac{I_0(t - z/v)}{1 - \{1 - \exp[\sigma_s \int_0^z \Delta n_0(z) dz]\} \exp[-2\sigma_s \int_{-\infty}^{t-z/v} I_0(t') dt']} \quad (4)$$

式中 $t' = t - z/v$, 由(4)式可知, 在光纤放大器中, 任意时间 t 和坐标 z 处的信号光的光强与放大介质的反转粒子数和入射的信号光强有关。换言之, 被放大的信号光由泵浦光强、铒离子浓度、光纤长度、信号光强及波形来决定。如果初始的反转粒子数 $\Delta n_0(z)$ 及入射的光脉冲信号 $I_0(t)$ 已知, 即可计算出输出的光脉冲光强及波形。

假定泵浦光为连续光, 信号光的脉冲间隔长, 即信号光到来前, 由于泵浦光的作用, 各能级间的离子分布达到稳定状态, 粒子反转数为^[1]

$$\Delta n_0(z) = N(0)[P_p(z)/P_{sp} - 1]/[P_p(z)/P_{sp} + 1] \quad (5)$$

由于泵浦光强在传播过程中不断激发基态粒子及其他吸收损耗, 能量不断减少, 所以 $\Delta n_0(z)$ 随光纤长度变化, 如泵浦光足够强, Δn_0 可近似为常数。如果信号光脉冲间隔很短, 假定脉冲间隔 $t_0 \ll 1/A_{21}$, 这时自发辐射的作用可以忽略, 利用三能级速率方程, 能级 2 的粒子数为

$$n_2(t) = N(0)[1 - \exp(-W_{13})], \quad W_{13} = P_p/(P_{sp} \cdot t/\tau_2) \quad (6)$$

τ_2 为能级 2 的弛豫时间。由 n_2 及总粒子数即可计算出 Δn_0 。

光脉冲信号经过放大介质后光强增大, 波形发生变化。为使传递信息不发生畸变, 应选择最佳参数使波形畸变最小。以简单矩形信号脉冲为例, 入射的信号脉冲 $I_0(t) = I_0(0 < t < \tau)$, 假定初始反转粒子数沿径向分布均匀, 即

$$\int_0^z \Delta n_0(z) dz = \Delta n_0 Z \quad (7)$$

如果脉冲的不同部位放大增益不同, 则放大的波形发生变化。对于脉冲前沿 $t = L/V$ 和脉冲后沿 $t = Z/V + \tau$, 由(4)式可知, 只有满足小信号条件, 即

$$2\sigma_s I_0 \tau \ll 1 \text{ 且 } 2\sigma_s I_0 \tau \ll \exp(-\sigma_s \Delta n_0 L) \quad (8)$$

时, 脉冲的各部位增益相同, 为

$$G \approx \exp(\sigma_s \Delta n_0 L) \quad (9)$$

可见, 只有在小信号(I_0 很小)或脉冲极窄(τ 很小)的信号时, 才能得到指数增益, 反之, 当入射信号很强, 或脉冲较宽时, 脉冲后沿由于增益饱和和无明显放大甚至无放大。总之, 矩形脉冲的变

形源于脉冲各部位获得的增益不同。其他的波形如高斯型,脉冲前沿按 $\exp(-t^2/\tau^2)$ 变化,比指数型上升快,经过放大后,脉宽受到压缩。再如指数型,脉冲经过放大介质时,波形和脉宽变化都不大。

图 1 表示信号脉冲是高斯型时,被放大的波形的理论计算结果。其中图 1(a) 为入射高斯信号波形。图 1(b) 为入纤信号功率 $6 \mu\text{W}$, 光纤长度 5 m , 掺铒离子浓度一定, 不同泵浦功率的放大波形。可见放大后的波形仍为高斯型, 泵浦功率越高, 放大的信号越强。但当泵浦功率分别为 30 mW , 50 mW 时, 被放大的波形重为一体, 这说明了泵浦功率为 30 mW 时已足以使掺铒光纤达到最大粒子反转, 只有增加光纤长度或掺铒离子浓度, 对 50 mW 的泵浦功率, 才能使信号得到进一步放大。图 1(c) 为泵浦功率、光纤长度及信号功率一定, 改变掺铒离子浓度获得的光脉冲信号放大的情况。可见, 离子浓度越高, 放大效果越明显, 对于 N_3 和 N_4 波形重为一体的情况, 只有增加泵浦功率, 才能使掺铒离子浓度为 N_4 的光纤放大器提高信号增益。

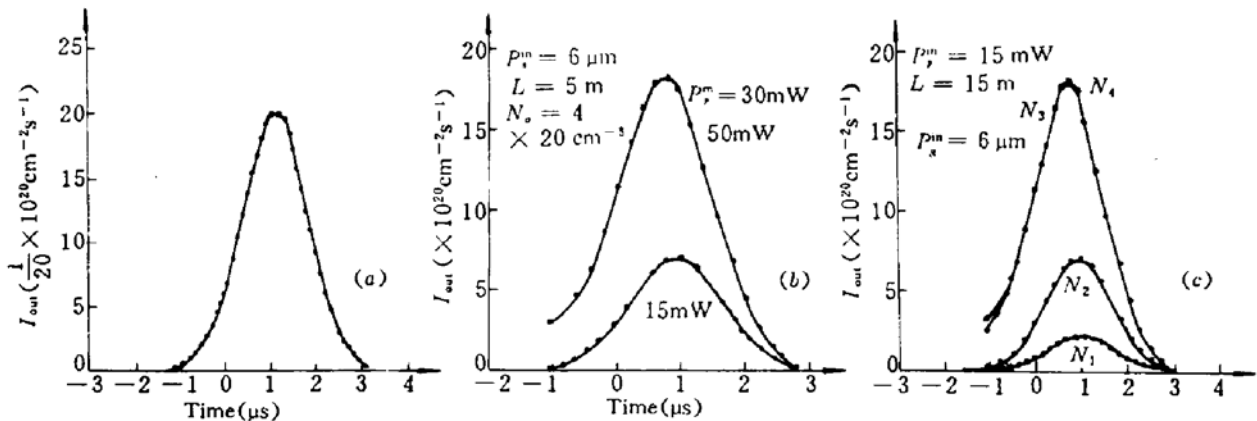


Fig. 1

(a) Gaussian signal pulse; (b) theoretical amplified pulses; (c) theoretical amplified pulses for erbium-doped concentrations of $8.8 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ (N_1), $3 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ (N_2), $8 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ (N_3) and $4 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ (N_4)

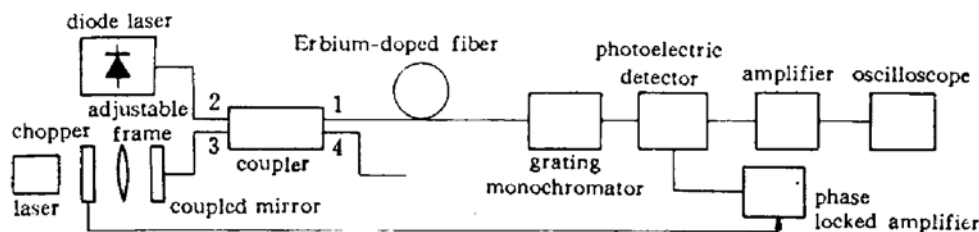


Fig. 2 Configuration of EDFA

2 实验装置

图 2 为掺铒光纤放大器实验装置图。泵浦光由耦合器 WDM ($1.4704 \mu\text{m}/1.5312 \mu\text{m}$) 的 2 端输入, $1.52 \mu\text{m}$ 波长 He-Ne 激光器或激光二极管作为信号源, 由 3 端输入, 两路光经耦合器合波后, 由 1 端进入掺铒光纤, 同时分出小部分光由 4 端输出, 用于功率监控。LD 的尾纤和掺铒光纤分别与耦合器的 2 端、1 端焊接在一起, 信号光经掺铒光纤放大后由锁相放大器测量出增益, 并由示波器观察出被放大的波形 (单色仪辅助测量)。

本实验所用泵浦 LD、耦合器及掺铒光纤均系国内研制。泵浦 LD 的中心波长是 1.477

μm , 阈值为 70 mA, 掺铒光纤的数值孔径和芯径分别为 $0.18 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$, 耦合器为 2×2 熔烧型器件, 插入损耗小于 0.6 dB , 最大输出功率达 18 mW 。

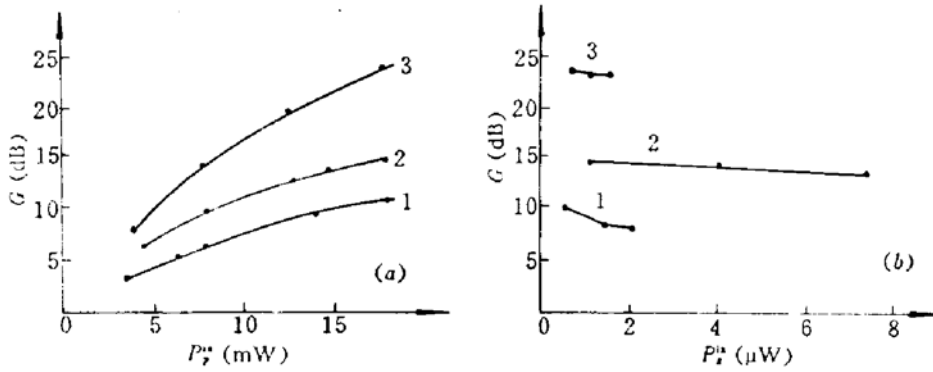


Fig. 3

(a) gain as a function of the pump power; (b) gain as a function of the signal input power

3 光脉冲在掺铒光纤放大器中的增益和时域特性

我们选用多种掺铒光纤进行了光脉冲放大特性参数的测试。在实验中测试了信号脉冲的增益与泵浦入纤功率、信号入纤功率、光纤中不同铒离子掺杂浓度等参数之间的关系曲线, 测试了光脉冲在掺铒光纤中放大的时域特性与放大增益等参数的关系。图 3 (a), (b) 分别为 EDFA 在不同掺铒离子浓度光纤情况下增益与泵浦入纤功率、与信号入纤功率之间的关系曲线。曲线 1 所用掺铒光纤长 5.81 m , 掺铒浓度大约 150 ppm , 对泵浦光和信号光的吸收分别为

0.6 dB/m 和 0.45 dB/m , 入纤信号功率为 $0.29 \mu\text{W}$, 该放大器小信号增益为 10.5 dB , 泵浦效率为 1.17 dB/mW 。在实验中, 测试了掺铒光纤输出端的泵浦功率仍有 11 mW 左右, 这说明泵浦功率未充分利用, 只有加长掺铒光纤长度, 增益才会进一步增加。曲线 2 所用掺铒光纤长 13.8 m , 掺铒浓度小于 100 ppm , 对泵浦光和信号光的吸收分别为 0.35 dB/m 和 0.4 dB/m , 入纤信号功率为 $0.8 \mu\text{W}$ 。该放大器小信号增益为 14.5 dB , 泵浦效率为 1.29 dB/mW 。实验中发现该掺铒光纤长度偏短, 因为在掺铒光纤输出端仍有 1 mW 左右的剩余功率。曲线 3 所用掺铒光纤长 4.3 m , 掺铒浓度大约为 300 ppm , 对泵浦光和信号光的

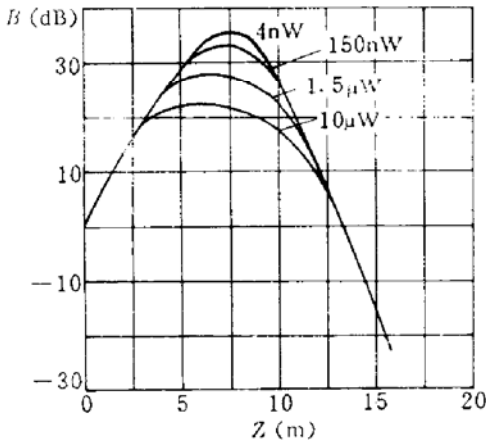


Fig. 4 Signal gain as a function of fiber length for an input pump power of 20 mW

的吸收分别为 1.5 dB/m 和 0.5 dB/m , 入纤信号功率为 $0.82 \mu\text{W}$ 。该放大器小信号增益为 23 dB , 泵浦效率为 2.28 dB/mW , 利用曲线 3 实验参数, 通过 (2) 式进行数值计算, 结果如图 4 所示, 泵浦功率为 20 mW , 信号增益为 25 dB 。它表明 4.3 m 并不是光纤的最佳长度, 增加光纤长度还可以提高信号增益。实验结果和理论计算基本一致。虽然掺铒光纤较短, 但由于掺铒浓度较高, 因此反转粒子数多, 得到较高增益。由图 3 (a) 可知, 放大器小信号增益随着泵浦功率的增加而增大, 但是增大的趋势逐渐变缓。图 3 (b) 表示放大器增益基本上不随信号功率而变, 处

于小信号放大状态。上述增益特性均是在光脉冲频率分别为 170 Hz, 2.0 kHz 情况下测试的, 甚至用 82 MHz 频率光脉冲信号实验时, 也得到了基本相同的结果。

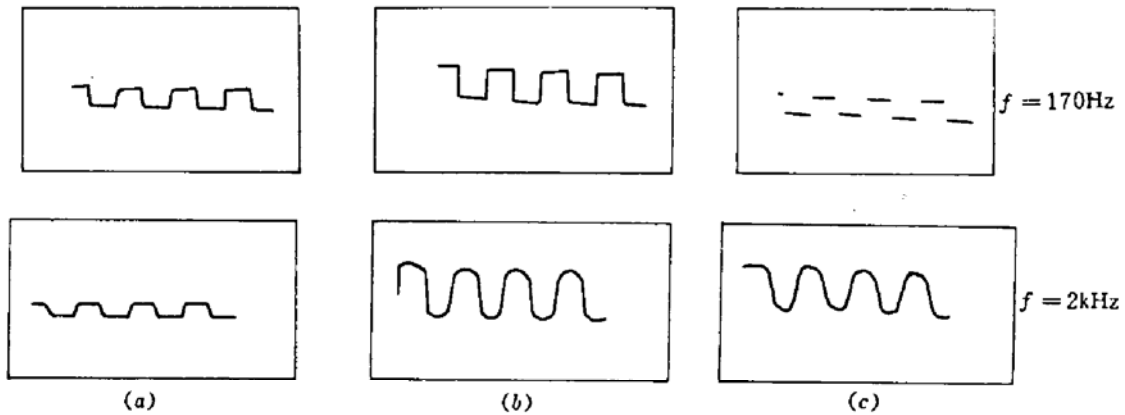


Fig. 5

(a) input signal pulses; (b) amplified signal pulses for the second EDFA; (c) amplified signal pulses for the third EDFA

实验中还观察了掺铒光纤放大器输入端和输出端信号光波形的变化。由合波耦合器空臂输出端观察输入的信号和泵浦光波形, 加泵浦光后由掺铒光纤输出经光栅单色仪得到被放大的信号波形。图 5 (a) 分别为 170 Hz 和 2 kHz 光脉冲信号波形, 图 5 (b), (c) 分别为两种频率时被放大的光脉冲波形, 图中显示了输出波形与输入波形一致, 说明在放大过程中未发生波形畸变, 这与上述理论分析和计算基本相符。

实验中研究了输入信号和被放大的信号光脉冲光谱情况, 发现它们的光谱线宽基本相同, 约 1.5~2.0 nm 左右, 所不同的是放大的信号中心波长相对于输入信号向长波长方向移动了 0.1~0.3 nm。可见它们的光谱差别不大, 足以说明光脉冲信号在放大过程中未发生波形畸变。

参 考 文 献

- 1 宁继平, 何志宏, 刘宏伟 等. 掺铒光纤激光放大的研究. 光学学报, 1992, 12(3): 678
- 2 蓝信钜 主编. 激光技术, 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988. 134~142
- 3 D. M. Spirit, L. C. Blank, D. L. Williams *et al.*. 5 Gbit/s, +10 dBm Lossless transmission in 10 km distributed erbium fiber amplifier. *Electr. Lett.*, 1990, 26(20): 1659
- 4 H. Izadpanah, D. Chen, Chinlon Lin *et al.*. Distortion-free amplification of high-speed test patterns up to 100 Gbit/s with erbium-doped fiber amplifiers. *Electr. Lett.*, 1991, 27(3): 197

Study of the Erbium-doped Fiber Amplifier Pumped by a 1477 nm Laser Diode

Ning Jiping Sun Xiaowei Tang Shengshu Xu Sheng Yan Jianquan

(Department of Precision Instrument Eng., Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract Experimental results on erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) pumped by a 1477 nm laser diode are reported. Gain and time characteristics of EDFA are investigated. A maximum gain of 23 dB has been obtained at 1520 nm, with pump efficiency being ~ 2.28 dB/mW.

Key words erbium-doped fiber, optical amplifier, time-characteristics, laser diode