

掺铒光纤激光放大的研究*

宁继平 何志宏 刘宏伟 傅 靖 姚建铨

(天津大学精仪系, 天津 300072)

董 孝 义

(南开大学现代光学所, 天津 300071)

提 要

本文研究了描述掺铒光纤激光放大的速率方程解, 分析了光纤中几种场分布和铒离子横向分布时的解析解, 并进行了数值计算. 得到了任意信号强度(包括大信号)时的增益以及影响信号增益的主要参数, 利用 532 nm 激光泵浦掺铒光纤, 得到信号的最大增益为 29.5 dB.

关键词 光纤, 掺铒光纤, 激光放大, 信号增益.

1 引 言

光纤放大器和激光器是一种新颖的有源光纤器件, 其中的光纤有非线性光纤, 晶体光纤及掺杂稀土元素光纤等三种型式可作为激光介质的放大器和激光器^[1]. 在这三类器件中, 尤以掺杂光纤发展较为迅速, 特别是掺铒光纤放大器激起了更多的研究兴趣, 因为它能提供高的增益, 低的噪声, 其光波长落在光通信窗口 1530 nm 附近, 而且插入损耗小, 有希望很快在光通信领域得到广泛应用. 本文主要对掺铒光纤放大器进行研究.

2 掺铒光纤放大的数学模型

掺铒光纤的吸收与荧光谱如图 1 所示; 铒离子的电子能级如图 2 所示^[2,3], 在 Er^{3+} 离子的吸收峰中, 利用 532 nm 和 980 nm 的光作为泵浦光, 不存在激发态吸收效应. 假定利用 532 nm 的光作为泵浦光, 铒离子浓度分布径向对称, 沿光纤长度不变, 则沿光纤传输的泵浦光, 信号光及掺杂总离子浓度分别为^[4]

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{pump}}(r, \theta, z) &= I_p(z) f_p(r, \theta), \\ I_{\text{signal}}(r, \theta, z) &= I_s(z) f_s(r), \\ n(r, \theta, z) &= n(r), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $f_p(r, \theta)$, $f_s(r)$ 分别为泵浦光和信号光横向强度轮廓, $n(r)$ 是铒离子的总浓度. 当放大器处于稳态时求解三能级速率方程, 得到任意信号强度时激发态的离子浓度 $n_2(r, z, \theta)$ 和基态的离子浓度 $n_1(r, z, \theta)$.

$$\left. \begin{aligned} n_2(r, z, \theta) &= \frac{n(r) \{ [I_p(r, z, \theta)/I_{sp}] + [I_s(r, z)/I_{ss}] \}}{[I_p(r, z, \theta)/I_{sp}] + 2[I_s(r, z)/I_{ss}] + 1}, \\ n_1(r, z, \theta) &= n(r) - n_2(r, z, \theta) = \frac{n(r) \{ 1 + [I_s(r, z)/I_{ss}] \}}{[I_p(r, z, \theta)/I_{sp}] + 2[I_s(r, z)/I_{ss}] + 1}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

收稿日期: 1991年4月11日; 收到修改稿日期: 1991年10月3日

* 天津市自然科学基金资助的项目.

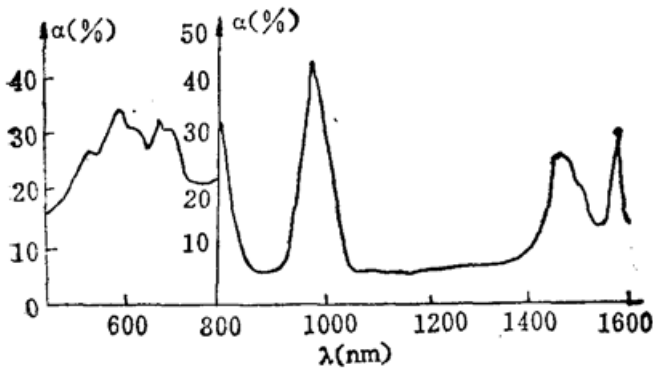


Fig. 1 Absorption spectrum of Erbium-Doped fiber

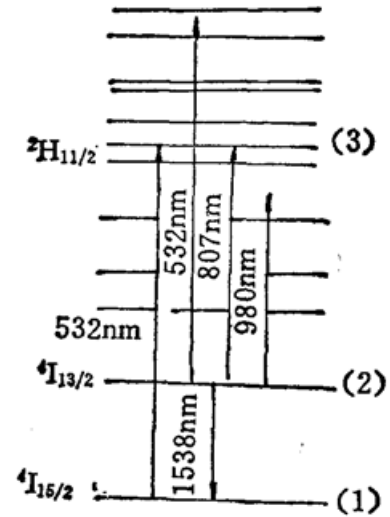


Fig. 2 Simplified energy level diagram in silica

式中 I_{sp} 和 I_{ss} 分别为泵浦光和信号光的饱和强度

$$I_{ss} = h\nu_s / \sigma_s \tau_2, \quad I_{sp} = h\nu_p / \sigma_p \tau_2, \quad (3)$$

式中 σ_s 为受激辐射截面, σ_p 为泵浦光从能级 1 到能级 3 的吸收截面. ν_s 和 ν_p 分别为信号光和泵浦光的频率, h 是普朗克常数. 假定信号光的频率(波长 1520 nm)小于光纤的截止频率(实验中光纤截止波长 999.6 nm), 基模信号光在光纤中传播时保持基模状态. 泵浦光的频率(532 nm)大于光纤的截止频率, 因此进入光纤中的泵浦光激发了高阶模. 假定单模光纤的归一化频率 $\nu = 5$, 因而基模泵浦光在光纤中将激发 4 个允许的光纤模式(LP₀₁, LP₀₂, LP₁₁, LP₂₁). 当然 LP₀₁ 功率最大. 对于阶跃式折射率光纤, 泵浦光和信号光横向强度分布由下式决定:

$$\begin{aligned} \text{信号光:} \quad & f_s(r) = J_0^2(u_1 r) \approx J_0^2(ur), \\ \text{泵浦光:} \quad & f_p(r, \theta) = \sum_{n,l} J_n^2(u_{2l} r) \cos^2(l\theta) \approx \sum_{n,l} J_n^2(ur) \cos^2(l\theta), \quad (r < a) \end{aligned} \quad (4)$$

当泵浦光和信号光在掺杂光纤中同向传播时, 其光强的变化由下式表示:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial I_p(r, \theta, z)}{\partial z} &= -\sigma_p n_1(r, \theta, z) I_p(r, \theta, z), \\ \frac{\partial I_s(r, \theta, z)}{\partial z} &= \sigma_s [n_2(r, \theta, z) - n_1(r, \theta, z)] I_s(r, \theta, z), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将(1)、(2)、(4)式代入(5)式, 泵浦光和信号光输出为

$$\left. \begin{aligned} P_p^{\text{out}} &= P_p^{\text{in}} + \int_0^{2\pi} \int_0^l \int_0^a n(r) \sigma_p I_p(z) \\ &\quad \cdot \frac{1 + [I_s(z) J_0^2(ur) / I_{ss}] \sum_{n,l} J_n^2(ur) \cos^2(l\theta) r dr d\theta dz}{[I_p(z) \sum_{n,l} J_n^2(ur) \cos^2(l\theta) / I_{sp}] + 2[I_s(z) J_0^2(ur) / I_{ss}] + 1}, \\ P_s^{\text{out}} &= P_s^{\text{in}} + \int_0^{2\pi} \int_0^l \int_0^a n(r) \sigma_s I_s(z) \\ &\quad \cdot \frac{[I_p(z) \sum_{n,l} J_n^2(ur) \cos^2(l\theta) / I_{sp}] - 1}{[I_p(z) \sum_{n,l} J_n^2(ur) \cos^2(l\theta) / I_{sp}] + 2[I_s(z) J_0^2(ur) / I_{ss}] + 1} J_0^2(ur) r dr d\theta dz, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 l 为光纤长度, a 为光纤芯径, 利用(6)式, 对于不同的模式分别进行数值求解.

2.1 泵浦光在光纤中为基模情况 (LP₀₁ 模)

当 $n=l=0$ 时, (6)式表示为泵浦光在光纤中保持基模状态, 这也是泵浦光的主要成份. 如果铒离子在光纤中呈横向均匀分布, 求得的数值解如图 3~图 5 所示. 从图 3 看出: 对于不同的泵浦功率, 信号增益随光纤长度变化的趋势基本相同, 但最大增益不同, 泵浦越强, 增益越大, 最佳光纤长度越长, 当泵浦功率从 15 mW 增加到 90 mW 时, 最大增益从 10 dB 增加到 60 dB, 最佳光纤长度从 4 m 增加到 15 m. 由图 4 可见, 输入信号功率越小, 增益越大, 当输入信号功率由 10 μ W 减小到 4 nW 时, 信号最大增益由 25 dB 增加到 45 dB, 而最佳光纤长度由 7 m 增加到 11 m, 这主要是由信号的饱和效应引起.

如果掺杂的铒离子只集中在光纤芯上, 即 $r \rightarrow 0$, $J_0(ur) = 1$, 泵浦光和信号光的光强随光纤长度的变化由下式来决定:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial I_p(z)}{\partial z} &= -\sigma_p n(0) I_p(z) \frac{1 + [I_s(z)/I_{ss}]}{[I_p(z)/I_{sp}] + 2[I_s(z)/I_{ss}] + 1}, \\ \frac{\partial I_s(z)}{\partial z} &= \sigma_s n(0) I_s(z) \frac{[I_p(z)/I_{sp}] - 1}{[I_p(z)/I_{sp}] + 2[I_s(z)/I_{ss}] + 1}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

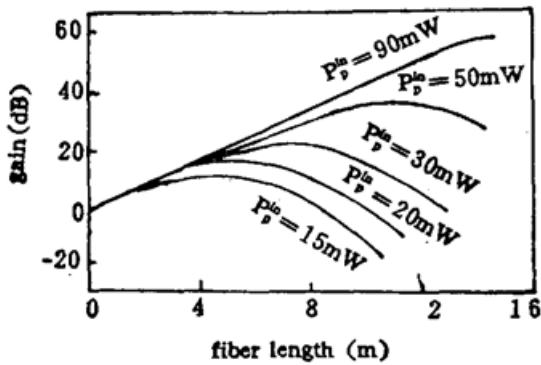


Fig. 3 Signal gain against fiber length for erbium-doped concentration of $8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and input signal power of 4 nW

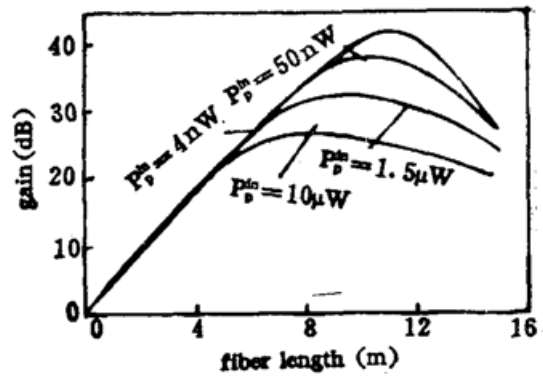


Fig. 4 Signal gain as a function of fiber length for erbiumdoped concentration of $8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and pump input power of 50 mW

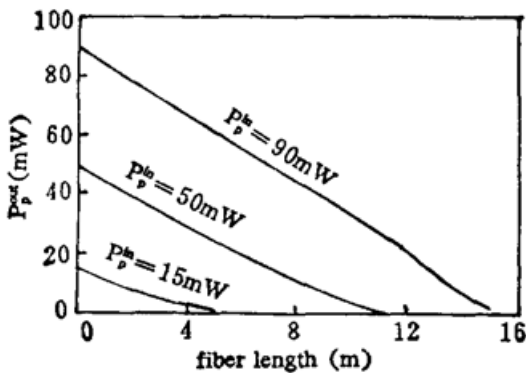


Fig. 5 Output pump power against fiber length for erbium-doped concentration of $8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and input signal power of 4 nW

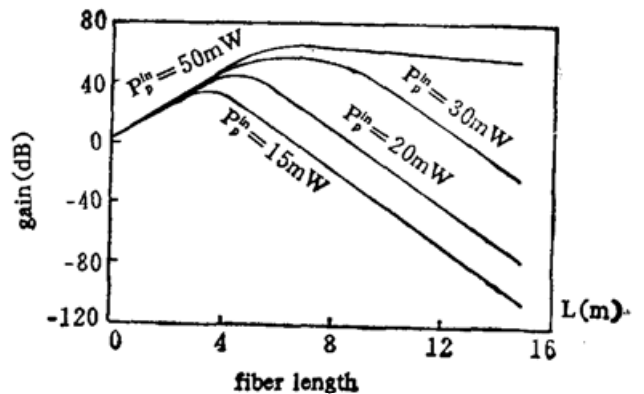


Fig. 6 Signal gain against fiber length for erbium-doped concentration of $8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and input signal power of 4 nW

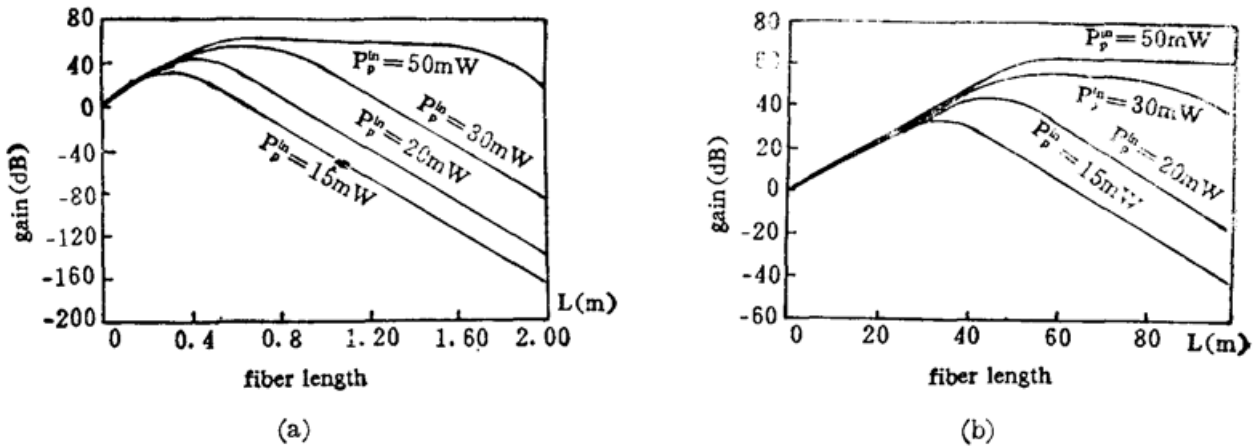


Fig. 7 Signal gain against fiber length for an input signal power of 4 nW and two different erbium-doped concentrations:

(a) $88 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

(b) $0.88 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

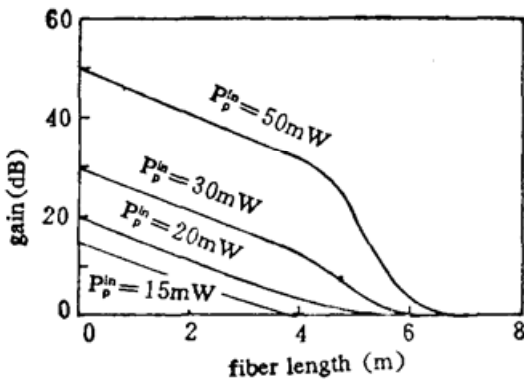


Fig. 8 Output pump power against fiber length for erbium-doped concentration of $8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and input signal power of 4 nW

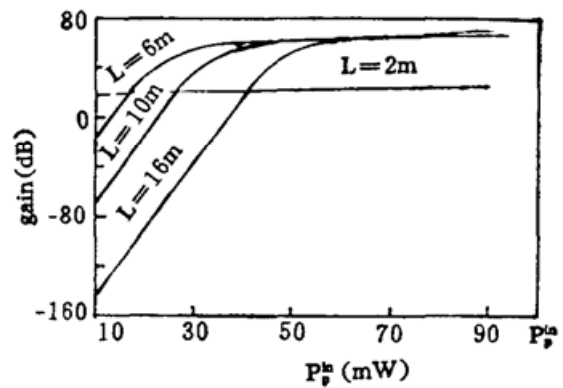


Fig. 9 Signal gain against input pump power for erbium-doped concentration of $8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and input signal power of 4 nW

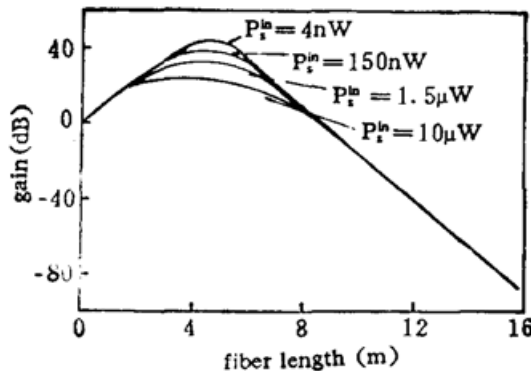


Fig. 10 Signal gain as a function of fiber length for an erbium-doped concentration of $8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and input pump power of 20 mW

利用(7)式进行数值计算, 其结果如图6~图10所示. 与图3~图5比较可知, 信号增益随着泵浦光强、信号光强, 钕离子浓度及光纤长度变化的规律基本相同, 所不同的是, 在相同的泵浦光强和信号光强条件下, 钕离子浓度集中在光纤芯上, 最佳光纤长度短, 信号增益大, 计算结果说明, $f_s(r) \approx f_p(r) = 1$ 是信号放大中最有效利用泵浦光的一种情况.

2.2 泵浦光在光纤中为高阶模情况

在(6)式中, 当 $n \neq 0, l \neq 0$ 时, (6)式表示为泵浦光在掺铒光纤中传输处于高阶模状态. 对于铒离子在光纤芯中均匀掺杂的情况, 由于高阶模的光强与 $\cos^2(l\theta)$ 成正比, $l=1, 2$, 同时强度分布函数 $J_1^2(ur)$ 和 $J_2^2(ur)$ 比 $J_0^2(ur)$ 小, 这就导致了纤芯中的一部分区域未被泵浦, 在该区域内, 信号光被吸收, 泵浦效率大大降低. 图 11~12 表示 LP₁₁ 模的信号增益随光纤长度变化的关系, 与 LP₀₁ 模泵浦比较可知, 在同样的光纤放大条件下, 得到的信号增益比 LP₀₁ 模泵浦小. 如果 LP₀₁、LP₁₁、LP₀₂、LP₂₁ 作为泵浦光, 其泵浦效率依次降低.

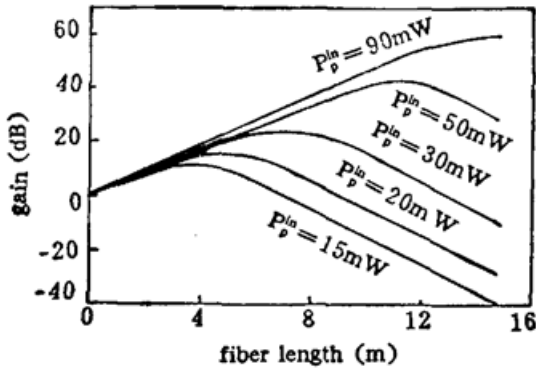


Fig. 11 Signal gain against fiber length for erbium-doped concentration of $8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and input signal power of 4nW for LP₁₁ mode

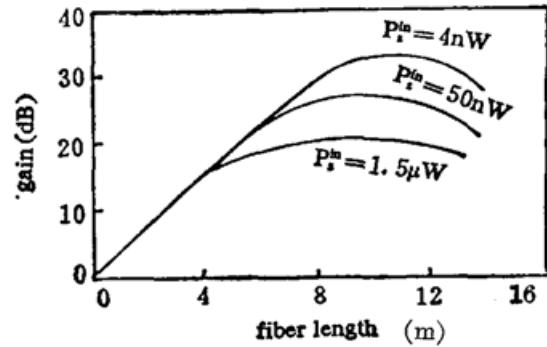


Fig. 12 Signal gain as a function of fiber length for an erbium-doped concentration of $8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and an input pump power of 50 mW for LP₁₁ mode

假定铒离子集中在光纤芯中心时, 由于 $J_1^2(0) = 0, J_2^2(0) = 0$, 则 LP₁₁ 和 LP₂₁ 模不能作为该种情况光纤放大的泵浦光. 由于 LP₀₂ 模的强度分布 $J_0^2(0)$ 与 LP₀₁ 模相同, 虽然有 $\cos^2(2\theta)$ 的影响, 但对于纤芯中心极小的范围来说, 其泵浦效率仅仅比 LP₀₁ 模稍低一点. 总的来说, 高阶模的存在降低了泵浦效率.

3 实验结果

掺铒光纤激光放大实验采用单模内腔倍频连续 YAG 激光为泵浦源, 泵浦波长 532 nm, 掺铒单模石英光纤的截止波长、数值孔径和芯径分别为 999.6 nm, 0.18 和 6 μm. 掺铒浓度大约为 300 ppm, 对 1520 nm 光的吸收损耗为 0.87 dB/m, 实验所用信号源是 1520 nm 的氢氦激光管, 1520 nm 和 532 nm 经过焦距为 10 mm 的透镜, 同向耦合进入掺铒光纤, 由于在 1520 nm 光路中插入斩波器, 故锗光电探测器接收的是被放大的方波信号. 通过相应的示波器观察信号放大的波形及测定激光放大器的增益量, 也可由功率计测定放大信号的平均功率, 进而计算出放大增益. 当信号光的输入功率为 4 nW, 泵浦光的输入功率为 20 mW, 光纤长度为 4.8 m 时, 最大的信号增益为 29.5 dB. 改变光纤长度, 测出了信号放大增益及泵浦光

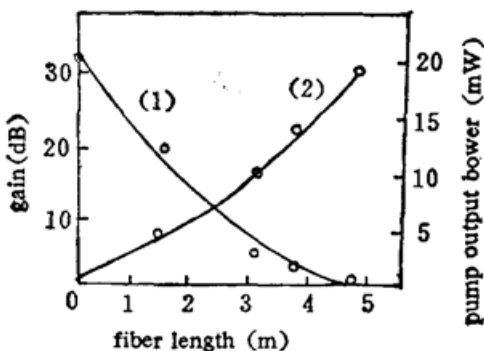


Fig. 13 Signal gain (2) and pump output power (1) against fiber length

改变光纤长度, 测出了信号放大增益及泵浦光

的输出功率,其结果如图 13 所示. 由图可见泵浦功率沿光纤长度变化几乎是线性函数,这和上述理论计算的结果图 5 和图 8 相符,这也表明掺铒光纤对 532 nm 光的吸收主要是基态吸收,激发态吸收效应最小. 信号增益与光纤长度几乎成正比关系,显然 4.8 m 也不是最佳光纤长度,这和上述理论计算基本相符.

4 结 论

由上述理论计算和实验研究可知,为了提高放大器的增益和稳定性,必须合理的设计光纤放大器的结构及选择合适的参数.

- 1) 铒离子集中在光纤芯中心比在纤芯中均匀分布有利于提高泵浦效率和信号增益.
- 2) 基模 LP_{01} 是泵浦光纤放大的最佳模式.
- 3) 合理的选择信号光和泵浦光的强度、光纤的长度,可以提高放大器的增益、信噪比及稳定度.
- 4) 利用 532 nm 和 980 nm 的光作为泵浦光,大大减小激发态吸收效应,提高泵浦效率.

参 考 文 献

- [1] 董孝义. 全光纤通信. 光通信技术, 1990, (1): 18~24
- [2] S. B. Poole, D. N. Payne, M. E. Fermann, Fabrication of Low-loss optical Fibers Dcontaining Rare-Earth ions. *Electron. Lett.*, 1985, **21** (17): 737
- [3] M. O. Farries, P. R. Morkel, R. I. Laming *et al.*, Operation of Erbium-Doped Doubled Nd:YAG Lasers. *J. Lightwave Technolog.*, 1989, **7** (10):1473~1477
- [4] Jonathan R. Armitage, Three-level fiber laser amplifier: a theoretical model. *Appl. Opt.*, 1988, **27** (23): 4831~4836
- [5] M. Peroni, M. Tamburrini, Gain in erbium-doped fiber amplifiers: a simple analytical solution for the rate equations. *Opt. Lett.*, 1990, **15** (15): 842~844

Study of Erbium-Doped Fiber Amplifiers

NING JIPING HE ZHIHONG LIU HONGWEI FU JING YAO JIANQUAN

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

DONG XIAOYI

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

(Received 11 April 1991; revised 3 October 1991)

Abstract

The solution of the rate equations describing an erbium-doped fiber amplifier is investigated in this paper. And the possibility of obtaining an analytical solution for some fields and erbium transverse distributions in the active fiber are determined and the solutions are calculated. The signal gain for arbitrary signal intensities (include large signal) and the main parameters that affect the signal gain are obtained. The maximum gain is as high as 29.5 dB at pump wavelength of 532nm.

Key words optical fiber, erbium-doped fiber, laser amplifier, signal gain.