



四能级系统光纤激光放大器的理论分析*

宁继平 刘宏伟 姚建铨 郑义

(天津大学精密仪器系, 天津 300072)

Theoretical analysis of fiber laser amplifiers for four-level system

NING Jiping, LIU Hongwei, YAO Jianquan, ZHENG Yi

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

Abstract Amplification characteristics of four-level fiber amplifiers are analyzed using four-level system rate equations. The relations of the signal gain against fiber length, doped ion concentration, pumping power and signal power are obtained and calculated.

Key words neodymium-doped fiber, four-level system, fiber laser amplifier, signal gain

本文从理论上分析了属于四能级系统的光纤激光放大器的增益特性,得到了信号增益与光纤长度、掺杂离子浓度、泵浦光和信号光功率等参数之间的关系式,并进行了数值计算。对四能级系统的激光放大器的设计有一定的指导作用。

1. 理论分析

掺钕光纤是在石英玻璃基质中掺杂少量稀土钕离子。掺钕光纤的吸收谱和荧光谱如图 1(a) 所示,图 1(b) 是 Nd^{3+} 的电子能级图。从中可以看出 Nd^{3+} 的重要吸收带是

从 ${}^4I_{9/2}$ (基态) $\left\{ \begin{array}{l} {}^2H_{9/2} \text{ 和 } {}^4F_{5/2} \text{ 中心波长 } \sim 0.8 \mu\text{m} \\ {}^4F_{3/2} \text{ 中心波长 } \sim 0.9 \mu\text{m} \end{array} \right.$

Nd^{3+} 的重要荧光带是

从 ${}^4F_{3/2}$ (激发态) $\left\{ \begin{array}{l} {}^4I_{9/2} \text{ 中心波长 } \sim 0.90 \mu\text{m} \\ {}^4I_{11/2} \text{ 中心波长 } \sim 1.06 \mu\text{m} \\ {}^4I_{13/2} \text{ 中心波长 } \sim 1.32 \mu\text{m} \end{array} \right.$

因此,在 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.32 \mu\text{m}$ 处属于四能级系统,且 $1.32 \mu\text{m}$ 波长处于光纤通信窗口,位于低损耗区。

采用四能级系统激光速率方程,利用和三能级系统同样的分析方法^[1],得到钕离子各能级

* 天津市自然科学基金资助。

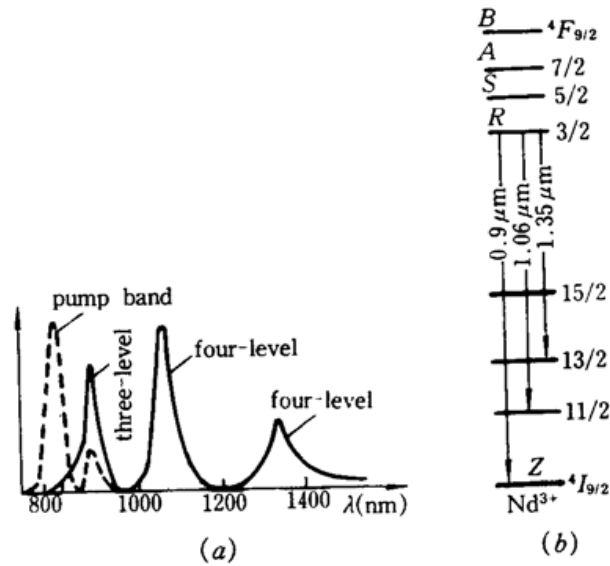


Fig. 1

(a) Absorption and fluorescence spectrum of neodymium-doped fiber;

(b) Simplified energy level diagram in neodymium

的粒子数, 泵浦光功率及信号光功率在光纤中传播时的变化方程^[2]:

$$n_1 = \frac{1 + \frac{I_s(z)g(r)}{I_{ss}}}{1 + \frac{I_s(z)g(r)}{I_{ss}} + \frac{I_p(z)f(r,\theta)}{I_{sp}}} \quad (1)$$

$$n_3 = \frac{\frac{I_p(z)f(r,\theta)}{I_{sp}}}{1 + \frac{I_s(z)g(r)}{I_{ss}} + \frac{I_p(z)f(r,\theta)}{I_{sp}}}$$

$$\Delta n = n_3 - n_2 \approx n_3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_p(z)}{\partial z} = \pm \int_0^\infty \int_0^{2\pi} N_0 n(r) \sigma_p \frac{\left[1 + \frac{I_s(z)g(r)}{I_{ss}}\right] \cdot I_p(z)f(r,\theta)}{1 + \frac{I_s(z)g(r)}{I_{ss}} + \frac{I_p(z)f(r,\theta)}{I_{sp}}} r dr d\theta \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_s(z)}{\partial z} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} N_0 n(r) \sigma_s \frac{\frac{I_p(z)f(r,\theta)}{I_{sp}} I_s(z)g(r)}{1 + \frac{I_s(z)g(r)}{I_{ss}} + \frac{I_p(z)f(r,\theta)}{I_{sp}}} r dr d\theta \quad (4)$$

式中假定信号光沿 $+z$ 方向传播, (3) 式中“+”和“-”号分别对应两束光反向和同向传播情况。 $P_p(z)$, $I_p(z)$, I_{sp} 和 $P_s(z)$, $I_s(z)$, I_{ss} 分别为泵浦光和信号光的功率、光强和饱和光强。 N_0 , n_1 , n_3 , Δn 分别为总掺杂离子浓度、钕离子的能级中参与激光过程的基态、激光三能级及反转粒子数。在推导过程中假定掺杂离子浓度沿光纤长度方向没有变化, 且径向分布为圆对称分布。泵浦光强、信号光强和掺杂离子沿光纤分布形式由下式给出

$$\begin{aligned} I_p(r,\theta,z) &= I_p(z) \cdot f(r,\theta) \\ I_s(r,\theta,z) &= I_s(z) \cdot g(r) \\ N_T(r,\theta,z) &= N_0 \cdot n(r) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $f(r,\theta)$, $g(r)$ 反映光纤中的模式特征, 对阶跃式光纤有^[2]

$$f(r, \theta) = J_m(ur/a) \cos^2 m\theta \quad 0 \leq r \leq a \quad (6)$$

$$g(r) = J_0^2(ur/a) \quad 0 \leq r \leq a \quad (7)$$

由(1),(2)两式可知,只要 $I_p > 0$,就有反转粒子数 Δn 存在,这时即可出现信号光放大现象。

2 数值计算

假定泵浦光在光纤中传播只激发两个模式 LP_{01} 和 LP_{11} ,利用(3)式和(4)式进行数值求解,可以得到信号光的放大增益与光纤长度、泵浦光、信号光功率等参数之间的关系曲线。图2为掺杂离子均匀分布且离子浓度为 $N_0 = 8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,输入信号光功率为 4 nW,对应不同的泵浦功率时,信号增益与光纤长度之间的关系曲线。由图2可知,当泵浦光进入光纤时,信号增益增长与光纤长度几乎呈线性关系,当增益达到最大值时,由于泵浦光强等于零,它似乎不再随光纤长度而变化,这主要是由于未考虑信号光在光纤中传播的损耗引起的。如果考虑光纤的损耗,信号增益的表达式应为

$$10 \log \frac{P_s(l)}{P_s(o)} = B - \alpha = B' \quad (8)$$

式中 $P_s(o)$ 和 $P_s(l)$ 分别为信号光的输入和输出功率, α , B 和 B' 分别为信号光在光纤中的传播损耗、放大增益及净放大增益。一般当光纤及信号光波长确定后, α 为常数,大约 0.5~1 dB/m 的量级,实际的净增益比未考虑损耗的增益小一常数 α ,但其变化规律相同,只是考虑损耗后的信号增益达到最大值以后,应随光纤长度的增加而减小,因而光纤存在一最佳值,即信号增益达到最大值时所对应的光纤长度。

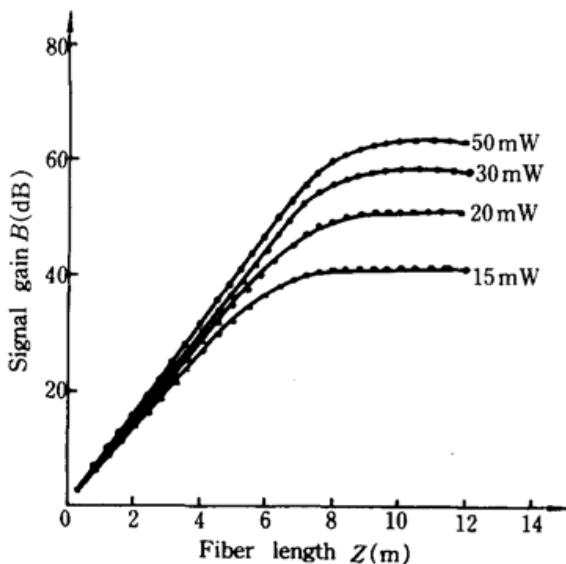


Fig. 2 Relation curve of signal gain vs fiber length for a neodymium-doped concentration of $8.8 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ and an input signal power of 4 nW

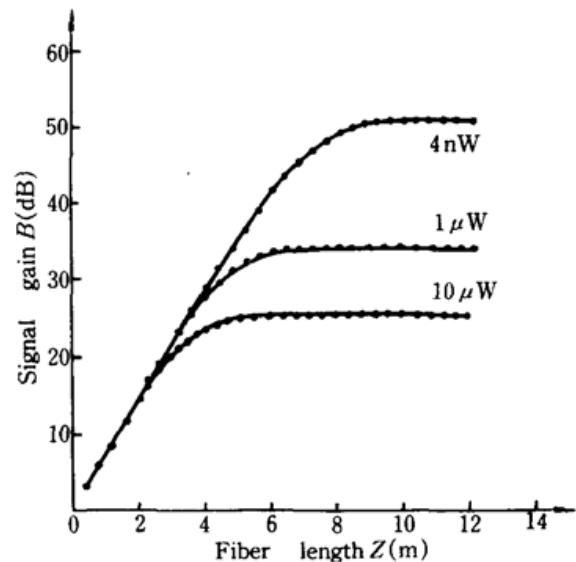


Fig. 3 Relation curve of signal gain vs fiber length for a neodymium-doped concentration of $8.8 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ and an input pump power of 20 mW

图3为泵浦功率一定(20 mW),对应不同的输入信号功率:4 nW, $1 \mu\text{W}$, $10 \mu\text{W}$,信号增益与光纤长度之间的关系曲线。掺钕光纤放大器的小信号增益较之大信号的增益大,这与三能级系统的情况相似^[1],主要是由于信号光放大饱和效应引起的。因此,信号光越强,光纤的最佳长

度越短,例如,信号光在 4 nW 时,其最佳长度为 8 m,而在 1 μ W 时,最佳长度缩短为 4 m。与图 2 的情况类似,增益达到最大值后不再随光纤长度的增加而改变,这也是因为未考虑光纤对信号光的吸收损耗引起的。考虑损耗后的情况与对图 2 分析一样。

图 4 为输入信号光功率 4 nW,而输入泵浦光功率为 15 mW,20 mW,30 mW 及 50 mW 情况下,泵浦光功率随传播的光纤长度变化的曲线。显然,在泵浦光进入光纤的初始阶段,泵浦光随光纤长度的增加几乎呈线性减少,以后剧烈减少,这主要是由于信号光的放大在不同阶段消耗不同的泵浦光引起的。

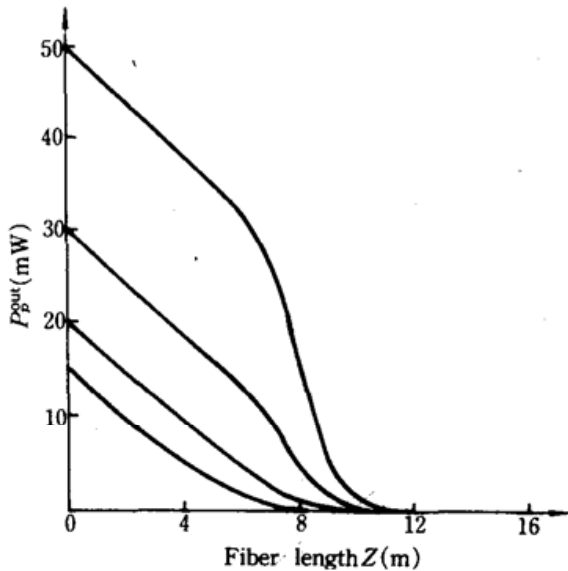


Fig. 4 Relation curve of output pump power vs fiber length for an input signal power of 4 nW and input pump powers of 15 mW, 20 mW, 30 mW, 50 mW

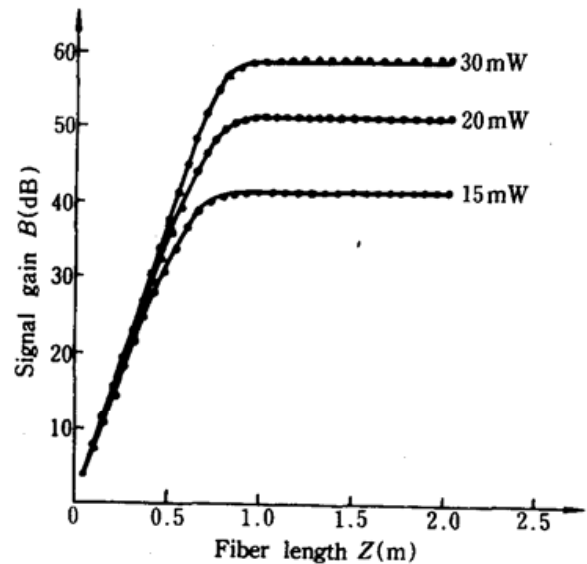


Fig. 5 Relation curve of signal gain vs fiber length for neodymium-doped concentration of $88 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ and an input signal power of 4 nW

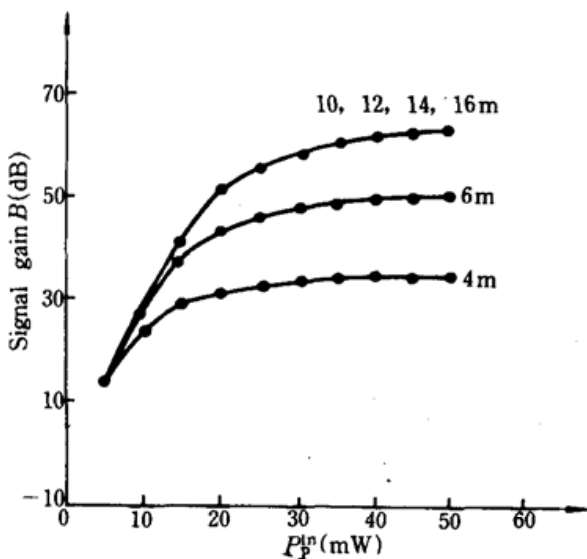


Fig. 6 Relation curve of signal gain vs input pump power for an input signal power

图 5 与图 2 比较,除了掺杂离子浓度增加 10 倍,为 $N_0 = 8.8 \times 10^{18} / \text{cm}^3$,其他参数相同。掺铈光纤放大器的离子浓度增加 10 倍,其光纤最佳长度减小 10 倍,由原来的 6~10 m 减为 0.6~0.8 m,而曲线变化规律及信号增益与图 2 均无改变。可见光纤掺杂离子浓度的改变只是成比例地改变了光纤的最佳长度。

图 6 为离子浓度仍为 $8.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,信号光功率为 4 nW,光纤长度分别为 4 m,6 m,10 m,12 m,14 m 及 16 m 时,信号增益与输入的泵浦功率之间的关系曲线。由图 6 可知,光纤长度超过最佳长度时,放大倍数基本不变,这与前面的分析是一致的。因此在光纤长度为 10 m,12 m,14 m 及 16 m 时,它们的曲线重合,这也是未考虑信号光在光纤中的损耗引起的。在较低泵浦功率下,信号增益增长较快,而泵浦功率增大

时,增益却增长缓慢,说明泵浦阈值很低,在很低的泵浦功率下,即可实现粒子数反转,产生信号放大,而高泵浦功率时,由于光纤长度不变和信号光放大的饱和效应,使信号增益增加缓慢。这表明一定的光纤长度对应一定的泵浦功率时,放大效果最好。

对于掺铒光纤激光放大器,采用 $0.80\ \mu\text{m}$ 或 $0.90\ \mu\text{m}$ 泵浦, $1.32\ \mu\text{m}$ 光为信号光,不但泵浦阈值低,而且 $1.32\ \mu\text{m}$ 光相对于掺铒光纤激光放大器的 $1.55\ \mu\text{m}$ 光在光纤中的损耗小,因为掺铒光纤的荧光峰 $1.55\ \mu\text{m}$ 也是其吸收峰。因此,掺铒光纤激光放大器大有应用前景。

参 考 文 献

- 1 宁继平 *et al.*, 光学学报, 12(8), 678(1992)
- 2 Jonathan R. Armitage, *Appl. Opt.*, 27(23), 4831(1988)

(收稿日期:1992年4月10日;收到修改稿日期:1992年8月26日)