

掺铒光纤激光器输出特性的解析研究*

吴正茂 夏光琼

(西南师范大学物理系, 重庆 630715)

陈建国

(四川大学光电系, 成都 610064)

摘 要 从描述掺铒光纤激光器的速率方程组出发, 对 980 nm 和 1480 nm 波段泵浦下掺铒光纤激光器的输出特性进行了解析研究, 得到了这两个波段泵浦下输出功率、斜效率等重要参量的隐式或显式解析表达式。

关键词 掺铒光纤激光器, 输出特性。

1 引 言

在光通信领域, 掺铒光纤激光器和放大器以其众多独特的优点受到广泛关注。近十年来, 人们不但进行了大量的实验研究^[1~6]使它们日趋实用化, 而且在理论上也开展了大量研究工作。在用来描述掺铒光纤激光器和放大器的理论中, 速率方程理论是应用最广的。由于速率方程包含一组非线性方程, 因而大多只能作数值分析^[7, 8]。为了突出物理意义, 在较为简化的条件下, 人们对掺铒光纤放大器也进行过一些解析研究^[9, 10], 但针对掺铒光纤激光器(EDFLs)的解析分析很少。本文将报道对掺铒光纤激光器输出特性(如输出功率、斜效率)的解析研究结果。

2 980 nm 泵浦下掺铒光纤激光器的输出特性

在用 980 nm 波段的光泵浦时, 掺铒光纤激光器可用三能级系统^[7]和双波长场的相互作用来描述, 本文中用 $|3\rangle$ 、 $|2\rangle$ 和 $|1\rangle$ 来表示这三个能级。忽略光纤的损耗并采用平均场近似, 稳态下速率方程可写作

$$dF^+(x)/dx = \eta_k[\sigma_e(s)N_2 - \sigma_a(s)N_1]F^+(x) \quad (1)$$

$$- dF^-(x)/dx = \eta_k[\sigma_e(s)N_2 - \sigma_a(s)N_1]F^-(x) \quad (2)$$

$$dS(x)/dx = \eta_p[\sigma_e(p)N_3 - \sigma_a(p)N_1]S(x) \quad (3)$$

$$N_3/\tau_{31} + N_3/\tau_{32} = v_g\eta_p[\sigma_a(p)N_1 - \sigma_e(p)N_3]S(x) \quad (4)$$

$$N_2/\tau_{21} = N_3/\tau_{32} + v_g\eta_k[\sigma_a(s)N_1 - \sigma_e(s)N_2][F^+(x) + F^-(x)] \quad (5)$$

* 重庆市科委资助项目。

收稿日期: 1995 年 9 月 16 日; 收到修改稿日期: 1996 年 2 月 5 日

$$N_0 = N_1 + N_2 + N_3 \quad (6)$$

在以上诸式中, N_3 、 N_2 、 N_1 表示各能级的粒子数密度, N_0 为铒掺杂浓度, τ 为驰豫时间, $F^+(x)$ 和 $F^-(x)$ 分别表示与入射泵浦光同向和反向传播的激光的光子数密度, $S(x)$ 为泵浦光的光子数密度, v_g 为光纤中光速, η_k 和 η_p 分别是激光、泵浦光和铒掺杂的重迭因子, σ_a 和 σ_e 分别为吸收和发射截面(括号内的 s 和 p 分别表示激光和泵浦光)。激光器的边界条件为:

$$R_2 F^+(l) = F^-(l), \quad F^+(0) = R_1 F^-(0), \quad S(x)_{x=0} = S(0) \quad (7)$$

式中 R_1 和 R_2 分别为两个端面的反射率, l 为腔长。

在弱光泵浦(即小于阈值泵浦功率)下, 激光器的输出很小可以忽略, 那么通过速率方程组可以确定阈值泵浦功率。本文主要考虑在强光泵浦(即大于阈值泵浦功率)下激光器的输出情形。结合(1)~(5)式可以导出

$$dF^+/dx - dF^-/dx + ds/dx + N_3/(v_g \tau_{31}) + N_2/(v_g \tau_{21}) = 0 \quad (8)$$

利用(3)式和(4)式可得

$$N_3 = - [v_g (\tau_{31} \tau_{32}) / (\tau_{31} + \tau_{32})] dS/dx \quad (9)$$

$$N_1 = - \{1/[\eta_p \sigma_a(p) S]\} dS/dx - \{v_g \sigma_e(p) \tau_{31} \tau_{32} / [\sigma_a(p) (\tau_{32} + \tau_{31})]\} dS/dx \quad (10)$$

把(6)、(9)和(10)式代入(8)式并从 0 到 l 积分, 则有

$$\begin{aligned} & F^+(l) - F^+(0) - [F^-(l) - F^-(0)] \\ & + [S(l) - S(0)] [\tau_{31} - \tau_{21} + \sigma_e(p) \tau_{31} / \sigma_a(p)] \tau_{32} / [\tau_{21} (\tau_{31} + \tau_{32})] \\ & + [S(l) - S(0)] + \ln [S(l)/S(0)] / [v_g \tau_{21} \eta_p \sigma_a(p)] + N_0 l / (v_g \tau_{21}) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

考察(1)和(2)式可得

$$F^+(x) F^-(x) = D^2 \quad (12)$$

式中 D 为常数。则边界条件(7)式可写成

$$F^+(0) = D R_1^{\frac{1}{2}}, \quad F^+(l) = D / R_2^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$F^-(0) = D / R_1^{\frac{1}{2}}, \quad F^-(l) = D R_2^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

把(13)和(14)式代入(11)式并整理得

$$\begin{aligned} K_1 D = [S(0) - S(l)] + [S(0) - S(l)] [\tau_{31} - \tau_{21} + \sigma_e(p) \tau_{31} / \sigma_a(p)] \tau_{32} / [\tau_{21} (\tau_{31} + \tau_{32})] \\ + \ln [S(0)/S(l)] / [v_g \tau_{21} \eta_p \sigma_a(p)] - N_0 l / (v_g \tau_{21}) \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$K_1 = [1 - (R_1 R_2)^{\frac{1}{2}}] (R_1^{\frac{1}{2}} + R_2^{\frac{1}{2}}) / (R_1 R_2)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

另外把(6)、(9)、(10)式代入(1)式并积分, 再利用边界条件(13)式可以推出

$$\begin{aligned} (1/\eta_k) \ln [1/(R_1 R_2)^{\frac{1}{2}}] = \sigma_e(s) N_0 l + \{[\sigma_a(s) + \sigma_e(s)] / [\eta_p \sigma_a(p)]\} \ln [S(l)/S(0)] \\ + [S(l) - S(0)] [v_g \tau_{31} \tau_{32} / (\tau_{31} + \tau_{32})] \\ \times \{[\sigma_a(s) + \sigma_e(s)] \sigma_e(p) / \sigma_a(p) + \sigma_e(s)\} \end{aligned} \quad (17)$$

上式就是关于 $S(l)$ 和 $S(0)$ 的隐式关系式。从 R_1 端面激光器的输出功率可以表示为:

$$P_1 = h \nu_s A v_g (1 - R_1) D / R_1^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

式中 h 为普朗克常数, ν_s 为激光频率, A 为纤芯截面积。由以上可知, 对于已知的 $S(0)$, 由(17)式可求出 $S(l)$, 通过(15)式 D 也就能确定, 那么再利用(18)式就能得到激光器的输出功率。

用 dP_1/dP_p 定义激光器的输出斜效率 η_h , P_p 为泵浦光的输入功率, 可表示成

$$P_p = h \nu_p A v_g S(0) \quad (19)$$

式中 ν_p 为泵浦光频率。利用(15)式可得

$$\eta_1 = \frac{\kappa(1-R_1)}{v_g R_1 K_1} \left\{ [1 - dS(l)/dS(0)] \left[1 + (\tau_{31} - \tau_{21} + \frac{\tau_{31}\sigma_e(p)}{\sigma_a(p)}) \frac{\tau_{32}}{\tau_{21}(\tau_{31} + \tau_{21})} \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{v_g \tau_{21} \eta_p \sigma_a(p) S(0)} \left[1 - \frac{S(0)}{S(l)} \frac{dS(l)}{dS(0)} \right] \right\} \quad (20)$$

由(17)式 $dS(l)/dS(0)$ 可表示成

$$\frac{dS(l)}{dS(0)} = \frac{Q/[\eta_p S(0)] + [v_g \tau_{31} \tau_{32}/(\tau_{31} + \tau_{32})][Q\sigma_e(p) + \sigma_e(s)]}{Q/[\eta_p S(l)] + [v_g \tau_{31} \tau_{32}/(\tau_{31} + \tau_{32})][Q\sigma_e(p) + \sigma_e(s)]} \quad (21)$$

式中

$$Q = [\sigma_e(s) + \sigma_a(s)]/\sigma_a(p) \quad (22)$$

这样对于已知的 $S(0)$, 结合(17), (21) 和(20) 式, 输出斜效率 η_1 就能被确定。

3 1480 nm 泵浦下掺铒光纤激光器的输出特性

1480 nm 波段泵浦的掺铒光纤激光器可用二能级系统^[8]和双波长光场的相互作用来描述。稳态下的速率方程可写成如下形式

$$dF^+(x)/dx = \eta_k[\sigma_e(s)N_2 - \sigma_a(s)N_1]F^+(x) \quad (23)$$

$$- dF^-(x)/dx = \eta_k[\sigma_e(s)N_2 - \sigma_a(s)N_1]F^-(x) \quad (24)$$

$$dS(x)/dx = \eta_p[\sigma_e(p)N_2 - \sigma_a(p)N_1]S(x) \quad (25)$$

$$N_2/(v_g \tau_{21}) = \eta_p[\sigma_a(p)N_1 - \sigma_e(p)N_2]S(x) \\ + \eta_k[\sigma_a(s)N_1 - \sigma_e(s)N_2][F^+(x) + F^-(x)] \quad (26)$$

$$N_0 = N_1 + N_2 \quad (27)$$

结合(23)~(26)式可导出

$$dS/dx + dF^+/dx - dF^-/dx + N_2/(v_g \tau_{21}) = 0 \quad (28)$$

利用(25)和(27)式, N_2 可化为

$$N_2 = [(1/S)dS/dx + \eta_p \sigma_a(p)N_0]/\{\eta_p[\sigma_a(p) + \sigma_e(p)]\} \quad (29)$$

把上式代入(23)式并积分可得

$$\frac{\ln [F^+(l)/F^+(0)] + \frac{\eta_k \sigma_a(s) N_0 l}{\eta_k [\sigma_a(s) + \sigma_e(s)]}}{\eta_k [\sigma_a(s) + \sigma_e(s)]} = \frac{\ln [S(l)/S(0)] + \frac{\eta_p \sigma_a(p) N_0 l}{\eta_p [\sigma_a(p) + \sigma_e(p)]}}{\eta_p [\sigma_a(p) + \sigma_e(p)]} \quad (30)$$

由于采用二能级系统模型, 激光发射和泵浦光吸收发生在同一对能级, 因此上式对于激光和泵浦光是对称的。

把(29)式代入(28)式并积分能推出

$$K_1 D = S(0) - S(l) + \{\ln [S(l)/S(0)] + \eta_p \sigma_a(p) N_0 l\}/\{v_g \tau_{21} \eta_p [(\sigma_a(p) + \sigma_e(p))]\} \quad (31)$$

利用(30)式, 并考虑(13)式可得

$$S(l)/S(0) = (R_1 R_2)^{-1} W \quad (32)$$

其中

$$t = \eta_p [(\sigma_a(p) + \sigma_e(p))]/\{2\eta_k [\sigma_a(s) + \sigma_e(s)]\} \quad (33)$$

$$W = \exp \{[2t\eta_k \sigma_a(s) - \eta_p \sigma_a(p)] N_0 l\} \quad (34)$$

至此, 由(31)和(32)式, D 的解析表达式就能得到了。需要指出的是, 对于 1480 nm 泵浦的掺铒光纤激光器, $S(l)$ 和 $S(0)$ 的比值是一个常数, 而对 980 nm 泵浦的掺铒光纤激光器, 这个比值是与 $S(0)$ 有关的。

利用(18), (31)和(32)式, 激光器的输出功率可表示为

$$P_1 = K_0 \{ P_p [1 - (R_1 R_2)^{-1} W] - E [\eta_s \sigma_a(s) N_0 l - (1/2) \ln (R_1 R_2)] \} \quad (35)$$

式中

$$K_0 = [(1 - R_1) R_2^{\frac{\nu_s}{\nu_p}} / \{ (R_1^{\frac{\nu_s}{\nu_p}} + R_2^{\frac{\nu_s}{\nu_p}}) [1 - (R_1 R_2)^{\frac{\nu_s}{\nu_p}}] \}] \quad (36)$$

$$E = h \nu_p A / \{ \tau_{21} \eta_s [\sigma_a(s) + \sigma_e(s)] \} \quad (37)$$

激光器的输出斜效率 η_i 为

$$\eta_i = K_0 [1 - (R_1 R_2)^{-1} W] \quad (38)$$

这样就得到了在 1480 nm 波段泵浦下掺铒光纤激光器输出功率和斜效率的显式表达式。

掺铒光纤激光器的阈值泵浦功率的计算结果如图 1 所示。图 1(a) 是用 980 nm 泵浦, $\eta_p = 0.8$, $h \nu_p A / \tau_{21} = 8 \times 10^{-21} (\text{mW cm}^2)$, 图 1(b) 是用 1480 nm 泵浦, $\eta_p = 0.6$, $h \nu_p A / \tau_{21} = 5 \times 10^{-21} (\text{mW cm}^2)$, 激光器被调在 1535 和 1590 nm 振荡。其余参数为: $\eta_s = 0.6$, $N_0 = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $R_1 R_2 = 0.03$, 各截面参数来自文献[11]。从该图可以看到, 不论在哪个波长振荡, 光纤激光器均有最小长度。如果光纤短于该长度, 不论泵浦多强也是不能振荡的。此外, 还具有最佳长度。当光纤为该长度时, 泵浦功率最小, 这一点可由图中的几个极小值点看出。超过最佳长度后, 随光纤长度的增大, 阈值泵浦功率随之增大。这些结论都与实验观察是一致的。计算表明, 光纤激光器的斜效率是较高的, 并且在光纤足够长后, 趋于一个常值。如图 1(b) 的情况, 该常值超过百分之八十。

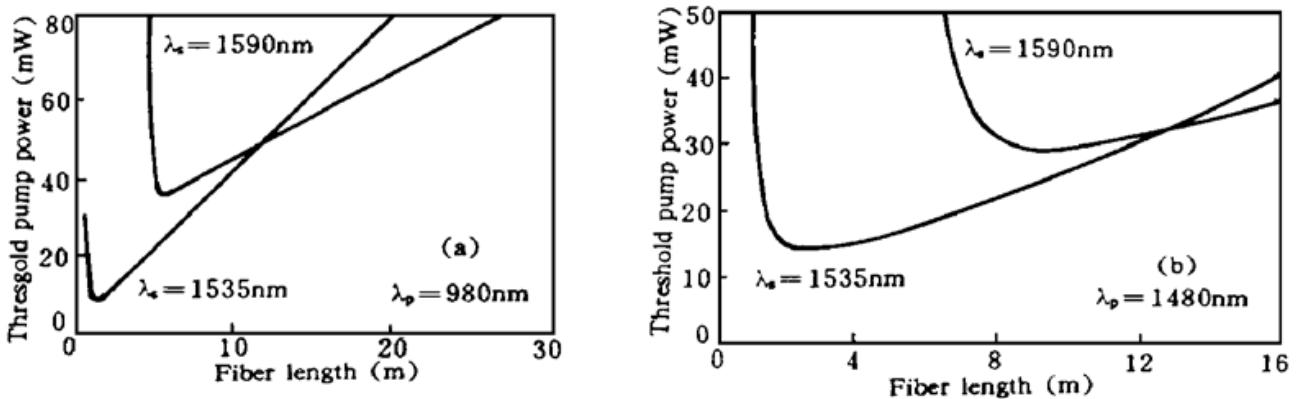


Fig. 1 Dependence of threshold pump powers of EDFLs on fiber lengths, where the pump wavelength is (a) 980 nm, (b) 1480 nm

结 论 本文从速率方程出发, 分别对 980 nm 和 1480 nm 泵浦下的掺铒光纤激光器的输出特性进行了解析研究。对于 980 nm 波段泵浦的掺铒光纤激光器, 得到了输出功率的隐式表达式, 并对输出斜效率进行了分析, 结果表明其与输入的泵浦光大小有关。对于 1480 nm 波段泵浦的掺铒光纤激光器, 获得了激光器输出功率的显式表达式, 并由此得到了输出斜效率的解析表达式, 激光器的输出斜效率只取决于系统本身的参数, 与输入的泵浦光无关。

参 考 文 献

- [1] R. Wyatt, High-power broadly tunable erbium-doped silica fiber laser. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(22): 1489~1499
- [2] M. Nakazawa, E. Yashida, Y. Kimura, Low threshold, 290 fs erbium-doped fiber laser with a nonlinear amplifying loop mirror pumped by InGaAsP laser diode. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(17): 2073~

2075

- [3] M. Yamada, M. Shimezu, M. Okawasu *et al.*, Temperature insensitive Er^{3+} -doped optical fibre amplifiers. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(20): 1649~ 1650
- [4] 姜 新, 彭江得, 吴庚生, 1480 nm LD 泵浦掺铒光纤放大器的增益带宽特性的研究. 中国激光, 1994, **A21**(9): 727~ 730
- [5] 孙军强, 刘雪峰, 黄德修等, 1.45 及 1.47 μm 半导体激光器泵浦的掺铒光纤放大器实验研究. 中国激光, 1994, **A21**(9): 731~ 733
- [6] 毛庆和, 杨祥林, 张明德等, 1.48 μm LD 双向泵浦掺铒光纤放大器的研究. 中国激光, 1995, **A22**(4): 249~ 252
- [7] E. Desurvire, C. Giles, J. Simpson, Gain saturation effects in high-speed, multichannel erbium-doped fiber amplifiers at $\lambda= 1.53 \mu\text{m}$. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(12): 2095~ 2104
- [8] P. Morkel, R. Laming, Theoretical modeling of erbium-doped fiber amplifiers with excited-state absorption. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(19): 1062~ 1064
- [9] 陈建国, 武 岚, 卢玉村, 掺铒光纤放大器的速率方程研究. 中国激光, 1993, **A20**(4): 256~ 259
- [10] 邱 昆, 汤启兵, 唐明光, 掺铒光纤放大器(EDFA) 的简化模型. 中国激光, 1995, **A22**(2): 108~ 112
- [11] M. Suyama, R. I. Laming, D. N. Payne, Temperature dependence gain and noise characteristics of a 1480 nm-pumped erbium-doped fiber amplifier. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(21): 1756~ 1757

Analytical Studies on Output Characteristics of Erbium-Doped Fiber Lasers

Wu Zhengmao Xia Guangqiong

(Department of Physics, Southwest Normal University, Chongqing 630715)

Chen Jianguo

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064)

(Received 16 September 1995; revised 5 February 1996)

Abstract Starting from the rate equations applicable to the erbium-doped fiber lasers, analytical studies on erbium-doped fiber lasers pumped at 980 nm and 1480 nm bands by strong-pump light have been carried out. The implicit or explicit analytical expressions of some important parameters describing the output characteristics, such as the output power, slope efficiency, have been obtained.

Key words erbium-doped fiber laser, output characteristics.