

线形腔掺铒光纤激光器输出特性的理论研究*

黄志坚 孙军强 黄德修

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘 要 通过求解速率方程, 从理论上详细地分析线形腔掺铒光纤激光器的输出特性。得到了稳态条件下激光器阈值泵浦功率、输出功率和斜率效率的解析表达式; 给出了构造线形腔掺铒光纤激光器所需掺铒光纤最短长度和最佳长度的表达式。

关键词 线形腔, 掺铒光纤激光器。

1 引 言

近年来, 掺铒光纤激光器作为一种新型的激光源, 受到越来越多的关注^[1]。掺铒光纤具有很宽的增益谱, 构造的窄线宽激光器可在很宽的频率范围内调谐^[2]。掺铒光纤激光器既可以工作在连续状态下, 又能以脉冲方式工作。由于光纤具有较高的光学破坏阈值, 采用调 Q 技术可以在掺铒光纤激光器中输出高功率的短激光脉冲^[3]; 利用光纤的非线性效应, 在锁模掺铒光纤激光器中得到了飞秒光孤子脉冲^[4]。掺铒光纤激光器以其独特的性能, 在光纤通信、激光测距以及自由空间光通信等领域有着十分广阔的应用前景。

要获得高性能的掺铒光纤激光器, 关键在于合理地选择参数, 优化激光器谐振腔的结构。掺铒光纤激光器根据其结构的不同, 可以分为环形腔和线形腔两种。本文从掺铒光纤激光器的速率方程出发, 对线形腔掺铒光纤激光器的输出特性进行了研究。得到了激光器泵浦阈值功率、输出功率和斜率效率的解析表达式, 并从此出发推导出激光器工作所需掺铒光纤最短长度和最佳长度的表达式, 为线形腔掺铒光纤激光器的优化设计提供了理论依据。

2 理 论

图 1 为线形腔掺铒光纤激光器的结构示意图。

光纤的长度为 L 。激光器左、右反射镜的功率反射系数为 r_1 和 r_2 。腔镜对泵浦光透明, 这样泵浦光仅通过光纤一次。 ϵ_1 和 ϵ_2 表示线形谐振腔中分立损耗元件(如调谐元件、光纤与谐振腔镜的耦合等)的

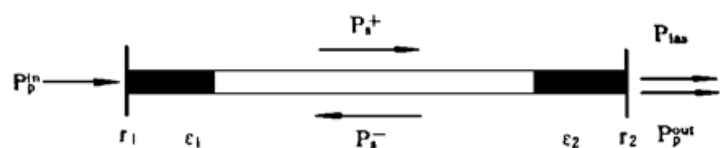


Fig. 1 Schematic diagram of linear cavity erbium-doped fiber laser

* 国家自然科学基金、国家教委博士点基金资助项目。

收稿日期: 1995 年 11 月 11 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 22 日

单程功率透过率。为简化起见, 取 $R_1 = r_1 \epsilon^2$ 和 $R_2 = r_1 \epsilon^2$, 另外取 $R^2 = R_1 R_2$ 。 P_p^{in} 、 P_p^{out} 分别为入射和出射泵浦光功率, P_{las} 为受激信号光的输出功率。

线形腔中掺铒光纤用三能级速率方程描述^[5]:

$$dP_p(z)/dz = -\sigma_p A_p \rho n_1 P_p(z) \quad (1)$$

$$dP_s^+(z)/dz = A_s \rho [\sigma_E(\lambda) n_2 - \sigma_A(\lambda) n_1] P_s^+ \quad (2)$$

$$dP_s^-(z)/dz = -A_s \rho [\sigma_E(\lambda) n_2 - \sigma_A(\lambda) n_1] P_s^- \quad (3)$$

$$n_2 = \{n_1 P_p(z)/P_{p, \text{sat}} - [n_2 - \sigma_A(\lambda) n_1 / \sigma_E(\lambda)] [P_s^+(z) + P_s^-(z)] / P_{s, \text{sat}}\} \quad (4)$$

$$n_1 = 1 - n_2 \quad (5)$$

其中 $P_{p, \text{sat}}$ 、 $P_{s, \text{sat}}$ 分别为泵浦光和信号光的饱和功率:

$$P_{p, \text{sat}} = (h\nu_p / \sigma_p \tau) (A / A_p) \quad (6)$$

$$P_{s, \text{sat}} = (h\nu_s / \sigma_s \tau) (A / A_s) \quad (7)$$

在以上方程中, $P_p(z)$ 、 $P_s(z)$ 分别为泵浦光功率和信号光功率沿光纤的纵向分布, 正号表示受激信号光的传输方向与泵浦光相同, 负号则表示与泵浦光传输方向相反。 σ_p 为泵浦光吸收截面; $\sigma_{E, A}(\lambda)$ 为信号光受激与吸收截面; ρ 为掺铒光纤掺杂浓度; A_p 为泵浦光场重迭积分; A_s 为受激信号光场重迭积分; $n_{2, 1}$ 为上、下能级粒子数占总粒子数的百分比; τ 为上能级粒子的寿命; A 为掺铒光纤的芯区面积。以上各参数均可通过实验进行测量。

线形谐振腔中受激信号光场有如下边界条件:

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0), \quad P_s^-(L) = R_2 P_s^+(0) \quad (8)$$

由(2)式和(3)式可以推出在掺铒光纤的任一点上, 正向传输和反向传输信号光功率的乘积等于一个常数; 设该常数为 C , 则有

$$P_s^+(z) P_s^-(z) = C \quad (9)$$

图 1 所示线形腔的单程光功率损耗因子为

$$\delta = -\frac{1}{2} \ln R_1 R_2 = -\ln R \quad (10)$$

掺铒光纤的增益用下式表示^[6]

$$G(\lambda) = A_s \rho \int_0^L [\sigma_E(\lambda) n_2 - \sigma_A(\lambda) n_1] dz \quad (11)$$

结合(1)式和(5)式对(11)式进行积分, 得到

$$G(\lambda) = g(\lambda)L + \frac{g(\lambda) + a(\lambda)}{\alpha_p} \ln \left[\frac{P_p^{\text{out}}}{P_p^{\text{in}}} \right] \quad (12)$$

上式中,

$$g(\lambda) = \sigma_E(\lambda) A_s \rho \quad (13)$$

$$a(\lambda) = \sigma_A(\lambda) A_s \rho \quad (14)$$

$$\alpha_p = \sigma_p A_p \rho \quad (15)$$

式中 $g(\lambda)$ 、 $a(\lambda)$ 分别为掺铒光纤的增益、衰减系数; α_p 为掺铒光纤的泵浦吸收系数; 其中增益系数和衰减系数均为信号光波长的函数。

众所周知, 当激光器实现稳态工作时, 激光器的增益与谐振腔的损耗相平衡, 即有

$$G(\lambda) = \delta(\lambda) \quad (16)$$

将(10)式、(12)代入(16)式中, 有

$$\ln \left(\frac{P_p^{\text{out}}}{P_p^{\text{in}}} \right) = - \frac{\alpha_p [g(\lambda)L + \ln R]}{g(\lambda) + a(\lambda)} = - \Psi(\lambda) \quad (17)$$

结合(1)~(4)式,可以得到以下守恒关系式:

$$\frac{1}{\alpha_p P_{p, \text{sat}}} \frac{dP_p(z)}{dz} + \frac{1}{g(\lambda) P_{s, \text{sat}}} \left[\frac{dP_s^+(z)}{dz} - \frac{dP_s^-(z)}{dz} \right] + n_2 = 0 \quad (18)$$

对(18)式积分,并利用(6)~(9)式可得

$$\frac{P_p^{\text{in}}}{P_{p, \text{sat}}} \left(\frac{P_p^{\text{out}}}{P_p^{\text{in}}} - 1 \right) + \frac{v_p}{v_s} \frac{1}{P_{p, \text{sat}}} \frac{(1-R)(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})}{\sqrt{R_1}} P_s^+(L) = -\alpha_p L - \ln \left(\frac{P_p^{\text{out}}}{P_p^{\text{in}}} \right) \quad (19)$$

将(17)式代入(19)式中,有

$$P_s^+(L) = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{P_{p, \text{sat}} \sqrt{R_1}}{(1-R)(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})} \left[\frac{P_p^{\text{in}}}{P_{p, \text{sat}}} \{1 - \exp[-\Psi(\lambda)]\} - \alpha_p L + \Psi(\lambda) \right] \quad (20)$$

则输出光功率为:

$$P_{\text{las}} = (1 - R_2) P_s^+ \quad (21)$$

即

$$P_{\text{las}}(L) = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{P_{p, \text{sat}} \sqrt{R_1} (1 - R_2)}{(1-R)(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})} \left[\frac{P_p^{\text{in}}}{P_{p, \text{sat}}} \{1 - \exp[-\Psi(\lambda)]\} - \alpha_p L + \Psi(\lambda) \right] \quad (22)$$

由(22)式可以推出激光器的阈值泵浦功率与斜率效率。取 $P_{\text{las}} = 0$, 可得阈值泵浦功率:

$$P_p^{\text{th}} = \frac{\alpha_p L - \Psi(\lambda)}{1 - \exp[-\Psi(\lambda)]} P_{p, \text{sat}} \quad (23)$$

将(23)式分子项中的 $\Psi(\lambda)$ 展开,有

$$P_p^{\text{th}} = \frac{\alpha_p}{g(\lambda) + \alpha(\lambda)} \cdot \frac{\alpha(\lambda)L - \ln R}{1 - \exp[-\Psi(\lambda)]} P_{p, \text{sat}} \quad (24)$$

斜率效率为

$$\eta = \frac{dP_{\text{las}}}{dP_p^{\text{in}}} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{\sqrt{R_1}(1-R_2)}{(1-R)(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})} \{1 - \exp[-\Psi(\lambda)]\} \quad (25)$$

3 讨 论

由(25)式可知,线形腔掺铒光纤激光器的斜率效率 η 由三部分组成。第一部分, λ_p/λ 为掺铒光纤的量子转换效率,它取决于泵浦光和信号光的光子能量差异,它决定了激光器斜率效率的上限。因此,要得到较高的斜率效率,泵浦光波长越接近信号光波长越好。第二部分为损耗项,由激光器谐振腔的损耗决定。第三部分较为复杂,与掺铒光纤本身的特性有关。图2所示为在不同的损耗条件下斜率效率 η 与掺铒光纤长度的关系曲线。图中计算所采用的参数分别为^[7] $\rho = 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $\sigma_p = 1.91 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_E(\lambda) = 7.4 \times 10^{25} \text{ m}^2$, $\sigma_A(\lambda) = 4.39 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $A_s = 0.2$, $A_p = 0.5$ 。以上数据均对应于 1533 nm。

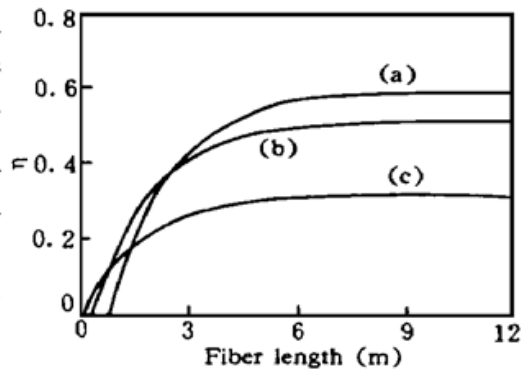


Fig. 2 Slope efficiency as a function of EDF length for (a) $R_1R_2 = 0.08$, (b) $R_1R_2 = 0.32$, (c) $R_1R_2 = 0.64$

由图 2 可知,在给定掺铒光纤长度时,激光器的输出损耗越大,斜率效率越高;同时输出损耗越大,阈值泵浦功率也越高。因此,必须适当地控制激光器的输出损耗以获得较高的斜率效率并保证阈值泵浦功率不至于太高。由图 2 可以发现,随着掺铒光纤长度的增长,斜率效率趋近于一个常数。由(25)式,当掺铒光纤的长度足够大时, $\exp\{-\Psi(\lambda)\} \rightarrow 0$, 可得

$$\eta_c = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{\sqrt{R_1(1-R_2)}}{(1-R)(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})} \quad (26)$$

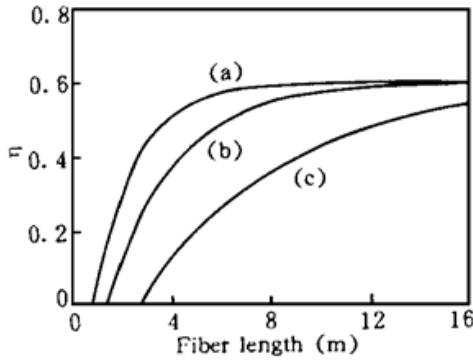


Fig. 3 Slope efficiency as a function of EDF length for (a) $\lambda = 1533$ nm, (b) $\lambda = 1553$ nm, (c) $\lambda = 1570$ nm, with $R_1R_2 = 0.08$

由(26)式可知 η_c 仅与掺铒光纤的量子效率和线形腔激光器的损耗有关。图 3 为在有确定的损耗时,对应于不同的工作波长,激光器的斜率效率随掺铒光纤长度变化的曲线。 $\lambda = 1553$ nm 时, $\sigma_p = 1.15 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_E(\lambda) = 4.6 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_A(\lambda) = 2.65 \times 10^{-25} \text{ m}^2$; $\lambda = 1570$ nm 时, $\sigma_p = 0.53 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_E(\lambda) = 2.41 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_A(\lambda) = 1.21 \times 10^{-25} \text{ m}^2$; 其余参数与图 2 中相同。可以发现,随着工作波长的增长,斜率效率趋向于一个常数的速度将逐渐减慢。从图 2 和图 3 中可以看出,随着掺铒光纤长度的缩短,斜率效率逐渐减小,甚至等于零。这表明激光器若要实现受激发射,掺铒光纤必须大于一定的长度。取激光器斜率效率等于零,可以得到激光器受激发射

所需最短的掺铒光纤长度为

$$L_{\min} = -\frac{\ln R}{g(\lambda)} = -\frac{\ln R_1R_2}{2\sigma_E(\lambda)A_s\rho} \quad (27)$$

其物理意义十分明显,即在给定掺铒光纤后,在特定的波长范围内,如果掺铒光纤的长度小于以上最短长度,即使泵浦功率很高,掺铒光纤所能提供的增益无法克服激光器的损耗而使激光器实现受激发射;而且激光器的损耗愈大或激光器的工作波长愈长,所需掺铒光纤的最短长度愈长,这一点十分清晰地体现在图 2 和图 3 中。

图 4 为对于不同的工作波长,激光器的阈值泵浦功率随掺铒光纤长度变化的曲线。 $P_{p, \text{sat}} = 1.4 \text{ mW}$, 其余参数与图 3 相同。

由图 4 可知,对于掺铒光纤长度较短的激光器,在 1533 nm 附近,激光器的阈值泵浦功率最低;而随着掺铒光纤长度的增加,低阈值泵浦功率出现在长波长上。由于激光器总是工作在阈值最小的波长上,如果激光器谐振腔中不存在调谐元件,那么增大激光器中掺铒光纤长度,将导致激光器工作波长向长波长方向移动。这可以解释为,当掺铒光纤的长度增大时, $\exp[-\Psi(\lambda)] \rightarrow 0$, (24) 式的变化主要由其分子项决定; $a(\lambda)L$ 项的增大将驱使 $a(\lambda)$ 减小,即波长向长波长移动以维持 $a(\lambda)L$ 项尽可能地小;同时掺铒光纤长度的增长,在靠近激光器输出端的掺铒光纤粒子数反转不充分,该段光纤将吸收受激信号光;此外,由于掺铒光纤对短波长信号光的吸收比对长波长信号光的吸收强烈得多,因此激光器出射的信号光

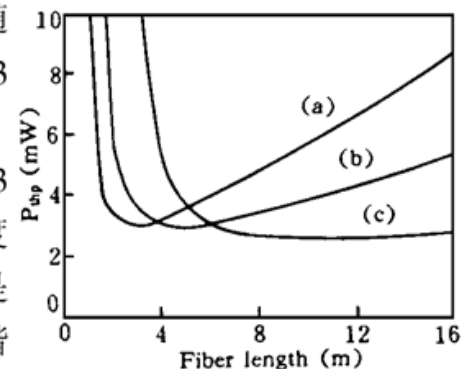


Fig. 4 Threshold pump power as a function of EDF length for (a) $\lambda = 1533$ nm, (b) $\lambda = 1553$ nm, (c) $\lambda = 1570$ nm, with $R_1R_2 = 0.08$

将以长波长为主。

前面的分析可知, 随着掺铒光纤长度的增长, 在一定的长度范围中, 激光器的斜率效率将逐渐增大; 同时激光器的泵浦阈值功率也将增大。因此, 对于三能级光纤激光器, 要使其输出功率可达到最大, 在给定波长下掺铒光纤存在一个最佳长度。由 $dP_{\text{las}}/dL = 0$, 可得最佳长度为

$$L_{\text{opt}} = \frac{g(\lambda) + a(\lambda)}{g(\lambda)\alpha_p} \ln \left[\frac{g(\lambda)P_p^{\text{in}}}{a(\lambda)P_{p, \text{sat}}} \right] - \frac{\ln R_1 R_2}{g(\lambda)} \quad (28)$$

从上式可知, 最佳长度与入射泵浦光功率的大小和受激发射波长有关, 随着入射泵浦光功率的改变而变化。

结 语 本文从理论上对三能级系统线形腔掺铒光纤激光器的连续工作输出特性进行了分析, 获得了激光器阈值泵浦功率、输出功率和斜率效率的解析表达式; 推导了激光器工作所需掺铒光纤最短长度以及在给定泵浦光功率时, 在特定输出波长上要获得最大输出功率所需最佳掺铒光纤长度的表达式。通过以上分析, 为线形腔掺铒光纤激光器结构的优化设计提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] L. Reekie, An overview of fiber lasers. *IOOC'95 Technical Digest.*, 1995, **3**(1): 6~ 7
- [2] H. Schmuck, Th. Pfeiffer, G. Veith, Widely tunable narrow linewidth erbium doped fiber ring laser. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(21): 2117~ 2119
- [3] F. Seguin, T. Oleskevich, Diode-pumped Q-switched fiber laser. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(9): 2036~ 2041
- [4] H. A. Haus, K. Tamura, L. E. Nelson *et al.*, Stretched-pulse additive pulse mode-locking fiber ring lasers: theory and experiment. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **QE-31**(3): 591~ 598
- [5] E. Desurvire, J. R. Simpson, Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single-mode fibers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(5): 835~ 845
- [6] C. R. Giles, D. DiGiovanni, Spectral dependence of gain and noise in erbium doped fiber amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(3): 797~ 799
- [7] E. Desurvire, C. R. Giles, J. R. Simpson, Gain saturation effects in high-speed, multichannel erbium-doped fiber amplifiers at $\lambda = 1.53 \mu\text{m}$. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(12): 2095~ 2014

Output Characteristics of Linear Cavity Erbium-Doped Fiber Laser

Huang Zhijian Sun Junqiang Huang Dexue

(Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 11 November 1995; revised 22 March 1996)

Abstract The output characteristics of linear cavity erbium-doped fiber laser have been analyzed theoretically and explicitly by solving rate equations. Analytical expressions are evaluated for threshold pump power, output power, and slope efficiency of the laser under steady-state conditions. The expression of minimum and optimum fiber length for designing a linear cavity erbium-doped fiber laser has been given.

Key words linear cavity, erbium-doped fiber laser.