

环形掺铒光纤激光器输出特性的理论研究^{*}

孙军强

(华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

(1995 年 5 月 12 日收到)

通过求解速率方程, 建立了环形掺铒光纤激光器的理论模型. 获得了激光器的阈值泵浦功率、输出功率、斜率效率以及最佳掺铒光纤长度的解析解. 对结果给予了清晰的物理解释.

PACC: 4255W; 4260

1 引 言

掺铒光纤激光器由于能激射波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 左右的光, 成为光纤通信系统的光源而得到广泛的应用. 铒离子的亚稳态寿命长达 10 ms , 因此, 掺铒光纤激光器不仅可以单纵模^[1]而且也可以皮秒^[2]或飞秒级^[3]的脉冲工作. 由于掺铒光纤激光器是以光纤的纤芯作为激光增益介质的横截面, 并且在较长的距离内, 泵浦光和激射光总是具有较高的功率密度, 因此, 在较低的泵浦注入条件下, 光纤激光器具有较低的阈值和较高的增益, 这便能以半导体激光器作为泵浦源. 要使掺铒光纤激光器处在最佳工作状态, 关键是激光器的谐振腔的设计. 随着掺铒光纤激光器的进一步发展, 需要更加准确和简洁的理论模型. 单模光纤的波导特性, 可将激光器的横模考虑为不随光纤长度而变化, 使分析光纤激光器的理论模型更为简化. 基于不同的简化和假设, 建立了许多物理模型, 并获得了解析解. Digonnet^[4]给出三能级和四能级的小信号增益的解析解. Mignon 等^[5,6]在不考虑腔内损耗的情况下, 讨论了两能级和三能级光纤激光器的阈值特性和斜率效率.

本文应用较为简洁的物理模型, 在考虑腔内损耗的情况下, 获得了反映掺铒光纤激光器主要特性参数(包括阈值泵浦功率、输出功率、斜率效率)的解析表达式, 为环形光纤激光器的设计提供理论依据.

2 理 论

对于掺铒光纤, 根据速率方程, 由文献[7]知, 在稳态状况下激发态粒子数 N_2 为

$$N_2 = \frac{\xi_p [P_p(z)/I_{\text{TH}}] \Psi_p^2(r) + \xi_s [P_s(z)/I_{\text{SAT}}] \Psi_s^2(r)}{[P_p(z)/I_{\text{TH}}] \Psi_p^2(r) + [P_s(z)/I_{\text{SAT}}] \Psi_s^2(r) + 1} N_{\text{tot}} \quad (1)$$

激光器激射光 $P_s(z)$ 及泵浦光 $P_p(z)$ 在掺铒光纤内的传输方程为

^{*} 国家自然科学基金资助的课题.

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = k(z)P_s(z), \quad (2)$$

$$k(z) = 2\pi N_{\text{tot}} \sigma_E^s \int_0^{a_{\text{dop}}} \Psi_s^2(r) \{X(z, r) - (\sigma_A^s/\sigma_E^s)[1 - X(z, r)]\} r dr, \quad (3)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\mu(z)P_p(z), \quad (4)$$

$$\mu(z) = 2\pi N_{\text{tot}} \sigma_A^p \int_0^{a_{\text{dop}}} \Psi_p^2(r) \{[1 - X(z, r)] + (\chi_{\text{ESA}} - \chi_{\text{EP}})X(z, r)\} r dr, \quad (5)$$

其中 $X(z, r) = N_2(z, r)/N_{\text{tot}}(z, r)$, $N_{\text{tot}}(z, r)$ 为铷离子的密度, a_{dop} 为光纤掺杂区域的半径, σ_E^s, σ_A^s 为激光光的辐射和吸收截面, σ_E^p, σ_A^p 为泵浦光的辐射和吸收截面, σ_{ESA} 为激发态对泵浦光的吸收截面, $\Psi_s^2(r), \Psi_p^2(r)$ 为归一化的激光光和泵浦光的模场强度,

$$\chi_{\text{EP}} = \frac{\sigma_E^p}{\sigma_A^p}, \quad (6)$$

$$\chi_{\text{ESA}} = \frac{\sigma_{\text{ESA}}}{\sigma_A^p}, \quad (7)$$

$$\xi_s = \frac{\sigma_A^s}{\sigma_A^s + \sigma_E^s}, \quad (8)$$

$$\xi_p = \frac{\sigma_A^p}{\sigma_A^p + \sigma_E^p}, \quad (9)$$

$$P_{\text{TH}} = I_{\text{TH}} \pi \omega_p^2 = \frac{h\nu_p}{(\sigma_A^p + \sigma_E^p) \tau_{21}} \pi \omega_p^2, \quad (10)$$

$$P_{\text{SAT}} = I_{\text{SAT}} \pi \omega_s^2 = \frac{h\nu_s}{(\sigma_A^s + \sigma_E^s) \tau_{21}} \pi \omega_s^2, \quad (11)$$

其中 h 为普朗克常数, τ_{21} 为铷离子的亚稳态寿命, ν_s, ν_p 为激光光和泵浦光的频率, ω_s, ω_p 为激光光和泵浦光的模场半径. 考虑到用波长为 1480 nm 的半导体激光器泵浦掺铷光纤, 忽略激发态对泵浦光的吸收, 即 $\chi_{\text{ESA}} = 0$. 且设归一化的模场强度为 $\Psi_p^2(r) = (\pi \omega_p^2)^{-1}$ 和 $\Psi_s^2(r) = (\pi \omega_s^2)^{-1}$, 由(1)–(5)式可得

$$\frac{\omega_s^2 \xi_s}{N_{\text{tot}} \sigma_A^s \epsilon^2 a^2} \frac{dP_s(z)}{P_s(z)} = \frac{(\xi_p - \xi_s) \frac{P_p(z)}{P_{\text{TH}}} - \xi_s}{\frac{P_p(z)}{P_{\text{TH}}} + \frac{P_s(z)}{P_{\text{SAT}}} + 1} dz, \quad (12)$$

$$\frac{\omega_p^2 \xi_p}{N_{\text{tot}} \sigma_A^p \epsilon^2 a^2} \frac{dP_p(z)}{P_p(z)} = \frac{(\xi_s - \xi_p) \frac{P_s(z)}{P_{\text{SAT}}} - \xi_p}{\frac{P_p(z)}{P_{\text{TH}}} + \frac{P_s(z)}{P_{\text{SAT}}} + 1} dz, \quad (13)$$

其中 $\epsilon = \frac{a_{\text{dop}}}{a}$ 为掺杂区域的半径与光纤的纤芯半径之比. 考虑如图 1 所示的环形掺铷光纤激光器, 假设在光纤环中包含光纤隔离器, 以保证激光场在光纤环内的单一方向传输, 激光器谐振腔的总损耗为

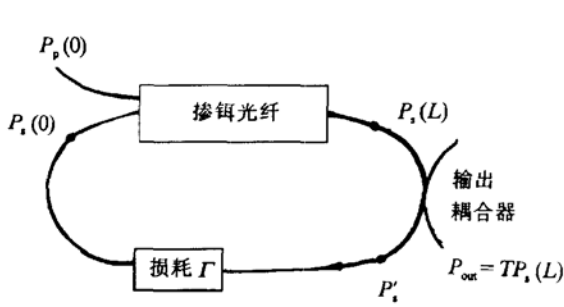


图1 环形掺铒光纤激光器的结构示意图

$$\Gamma_{\text{tot}} \equiv \frac{P_s(L)}{P_s(0)}, \quad (14)$$

L 为掺铒光纤的长度. 此损耗可分为两部分, 一部分为光纤耦合器的耦合损耗 γ , 包括光纤耦合器的耦合输出带来的损耗. 假设光纤耦合器的耦合输出比为 T , 则有

$$P_{\text{out}} = TP_s(L) \quad (0 < T < 1), \quad (15)$$

因此

$$\gamma \equiv \frac{P_s(L)}{P'_s} = \frac{1}{1-T} \quad (\gamma > 1). \quad (16)$$

另一部分是来自腔的内部损耗 Γ :

$$\Gamma = \frac{P'_s}{P_s(0)} \quad (\Gamma > 1), \quad (17)$$

所以激光器的总损耗为

$$\Gamma_{\text{tot}} = \frac{P_s(L)}{P_s(0)} = \gamma\Gamma. \quad (18)$$

众所周知, 环形激光器稳定振荡的条件是掺铒光纤的增益应等于腔的总损耗. 比较(12)和(13)式, 并利用激光器振荡的条件可得

$$P_s(L) = \frac{\left(\frac{\xi_p}{\xi_s} - 1\right) \frac{P_p(0)}{P_{\text{TH}}} \left(\frac{P_p(L)}{P_p(0)} - 1\right) - \ln\left(\frac{P_p(L)}{P_p(0)}\right) + \frac{\omega_s^2 \sigma_A^p}{\omega_p^2 \sigma_A^s} \ln(\gamma\Gamma)}{\left(\frac{\xi_s}{\xi_p} - 1\right) \frac{\gamma\Gamma - 1}{\gamma\Gamma} \frac{\omega_s^2 \sigma_A^p}{\omega_p^2 \sigma_A^s}} P_{\text{SAT}}. \quad (19)$$

将(12), (13)式相减, 可得

$$\frac{P_p(L)}{P_p(0)} = (\gamma\Gamma)^{\frac{\omega_s^2 \xi_s \sigma_A^p / \omega_p^2 \xi_p \sigma_A^s}{\omega_s^2 \xi_s \sigma_A^p / \omega_p^2 \xi_p \sigma_A^s}} \exp\left[-\frac{N_{\text{tot}} \sigma_A^p \epsilon^2 a^2}{\omega_p^2 \xi_p} (\xi_p - \xi_s) L\right], \quad (20)$$

不难得到激光器的输出功率为

$$P_{\text{out}} = TP_s(L). \quad (21)$$

由 $P_{\text{out}} = 0$, 激光器的阈值泵浦功率为

$$P_p^{\text{th}}(0) = \frac{\frac{\omega_s^2 \sigma_A^p}{\omega_p^2 \sigma_A^s} \ln(\gamma\Gamma) + \frac{N_{\text{tot}} \sigma_A^p \epsilon^2 a^2}{\omega_p^2} L}{\frac{\xi_p}{\xi_s} \left\{ 1 - (\gamma\Gamma)^{\frac{\omega_s^2 \xi_s \sigma_A^p / \omega_p^2 \xi_p \sigma_A^s}{\omega_s^2 \xi_s \sigma_A^p / \omega_p^2 \xi_p \sigma_A^s}} \exp\left[-\frac{N_{\text{tot}} \sigma_A^p \epsilon^2 a^2}{\omega_p^2 \xi_p} (\xi_p - \xi_s) L\right] \right\}} P_{\text{TH}}. \quad (22)$$

激光器的输出功率可表示为

$$P_{\text{out}} = \frac{(\gamma - 1)\Gamma}{\gamma\Gamma - 1} \frac{\nu_s}{\nu_p} \left\{ 1 - (\gamma\Gamma)^{\frac{\omega_s^2 \xi_s \sigma_A^p / \omega_p^2 \xi_p \sigma_A^s}{\omega_s^2 \xi_s \sigma_A^p / \omega_p^2 \xi_p \sigma_A^s}} \exp\left[-\frac{N_{\text{tot}} \sigma_A^p \epsilon^2 a^2}{\omega_p^2 \xi_p} (\xi_p - \xi_s) L\right] \right\} \times (P_p(0) - P_p^{\text{th}}(0)). \quad (23)$$

由(23)式知,光纤激光器的斜率效率为

$$\eta = \frac{dP_{\text{out}}}{dP_p(0)} = \frac{(\gamma - 1)\Gamma}{\gamma\Gamma - 1} \frac{\nu_s}{\nu_p} \left\{ 1 - (\gamma\Gamma)^{\frac{\omega_s^2 \xi_s \sigma_A^p}{\omega_p^2 \xi_p \sigma_A^s}} \exp \left[- \frac{N_{\text{tot}} \sigma_A^p \epsilon^2 a^2}{\omega_p^2 \xi_p} (\xi_p - \xi_s) L \right] \right\}. \quad (24)$$

3 结果分析与讨论

(22)–(24)式是激光输出耦合器放置在掺铒光纤之后的情况下,反映激光器特性的参数解析表达式.若将激光输出耦合器放置在掺铒光纤之前,则激光器的输出功率和斜率效率将减少 Γ 倍,这说明激光输出耦合器在光纤环中的位置将影响激光器的输出功率及斜率效率.

从斜率效率的计算式(24)可以看到,它包括三部分.第一部分为 ν_s/ν_p ,这是激光器的量子效率,它是由于泵浦光与激光光的光子能量差异所致,给出了光纤激光器的斜率效率的上限.第二部分是 $(\gamma - 1)\Gamma/(\gamma\Gamma - 1)$,这部分小于 1,表明激光器的腔内损耗的存在,使掺铒光纤激光器的斜率效率减小,在不考虑光纤耦合器的耦合输出及环内损耗($\Gamma \rightarrow 1$)下,当选择 L 较长时,光纤激光器的斜率效率将是量子效率 ν_s/ν_p .第三部分较为复杂,主要是指腔内的非线性效应对斜率效率造成的影响.通过 $dP_{\text{out}}/d\gamma = 0$,可合理地选择光纤耦合器的输出耦合系数,以获得最大的输出光功率.

在给定的注入泵浦功率 $P_p(0)$ 的情况下,可得掺铒光纤的最佳长度.令 $dP_{\text{out}}/dL = 0$,得

$$\frac{dP_p(L)}{dL} \left[\left(\frac{\xi_p}{\xi_s} - 1 \right) \frac{1}{P_{\text{TH}}} - \frac{1}{P_p(L)} \right] = 0. \quad (25)$$

很显然 $dP_p(L)/dL \neq 0$,因此

$$P_p(L) = \frac{\xi_s}{\xi_p - \xi_s} P_{\text{TH}}. \quad (26)$$

由掺铒光纤的透明条件 $k(z) = 0$,可得透明时的泵浦功率为

$$P_{\text{TR}} = \frac{\xi_s}{\xi_p - \xi_s} P_{\text{TH}}. \quad (27)$$

由此,当经掺铒光纤吸收后剩下的泵浦功率为掺铒光纤透明时的泵浦功率时,此时掺铒光纤的长度为最佳长度.其物理意义相当明确,若掺铒光纤的长度超过一定值时,即超过最佳长度时,剩余的泵浦功率将低于透明时的泵浦功率,因此,其中必有一段掺铒光纤起吸收激光光的作用.这势必导致激光器斜率效率的减小及激光输出功率的降低,对激光器的工作毫无意义.最佳的掺铒光纤长度为

$$L_{\text{opt}} = \frac{\omega_p^2 \xi_p}{N_{\text{tot}} \sigma_A^p \epsilon^2 a^2 (\xi_s - \xi_p)} \ln \left[\frac{\xi_s}{\xi_p - \xi_s} \frac{P_{\text{TH}}}{P_p(0)} (\gamma\Gamma)^{-\frac{\omega_s^2 \xi_s \sigma_A^p}{\omega_p^2 \xi_p \sigma_A^s}} \right]. \quad (28)$$

应用已有的条件,针对如图 1 所示的环形掺铒光纤激光器进行了实验研究.所用掺铒光纤的长度为 13 m,数值孔径为 0.18,截止波长为 955 nm,掺杂浓度为 300×10^{-6} ,光纤环焊后测得的总损耗为 7 dB.泵浦用半导体激光器的波长为 1480 nm,光纤激光器的激光

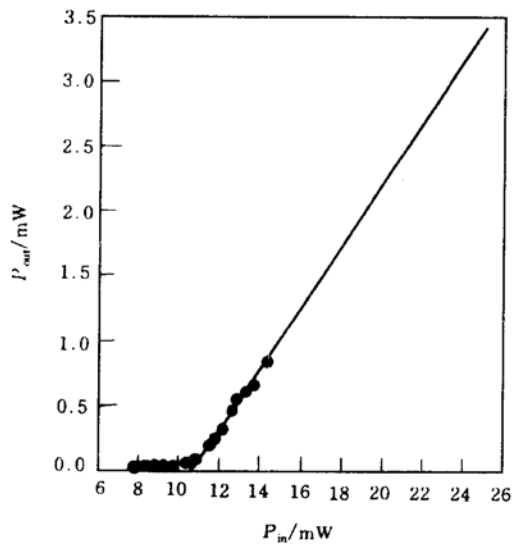


图2 环形掺铒光纤激光器的输出特性的理论与实验结果
——为理论值; ●●●为实验结果

波长为 1530 nm. 测得激光器的输出特性如图 2 所示. 激光器的阈值泵浦功率约为 10.5 mW. 由实验参数并选取理论计算参数为 $\sigma_A^p = 2.0 \times 10^{-25} \text{m}^2$, $\sigma_E^p = 0.6 \times 10^{-25} \text{m}^2$, $\sigma_A^s = 5.94 \times 10^{-25} \text{m}^2$, $\sigma_E^s = 7.04 \times 10^{-25} \text{m}^2$ [8]. 其理论计算结果如图 2 所示, 理论计算的阈值泵浦功率为 10.7 mW. 在误差允许范围内, 理论和实验结果符合较好. 误差主要来源于理论计算中归一化模场强度的假设以及实验测量中的误差. 由此表明, 应用本文简洁的理论结果可作为掺铒光纤环形激光器设计的理论依据.

4 结 论

本文建立了环形掺铒光纤激光器的主要特性参数的理论模型. 获得了激光器输出功率、泵浦阈值功率、斜率效率以及最佳掺铒光纤长度的解析表达式. 结果表明, 光纤激光器的斜率效率由腔内的损耗、量子效率及与非线性作用有关的因子决定. 并就光纤激光器中最佳掺铒光纤长度给出了清晰的物理解释. 为掺铒光纤激光器结构参数的选择及优化设计提供了理论依据.

- [1] H. Schmuck, Th. Pfeiffer and G. Veith, *Electron. Lett.*, **27**(1991), 2117.
- [2] M. Zirngbil, L. W. Stulz, J. Stone, J. Hugi, D. Digiranni and P. B. Hansen, *Electron. Lett.*, **27**(1991), 1734.
- [3] I. N. Duling, *Electron. Lett.*, **27**(1991), 544.
- [4] M. J. F. Digonnet, *IEEE J. Quantum Electron.*, **26**(1990), 1788.
- [5] M. Mignon and E. Desurvire, *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **4**(1992), 850.
- [6] J. Chen, X. Zhu and W. Sibbet, *Opt. Lett.*, **17**(1992), 926.
- [7] E. Desurvire, C. R. Giles and J. R. Simpson, *J. Lightwave Technol.*, **7**(1989), 2095.
- [8] E. Desurvire, J. L. Zyskind, C. R. Giles, *J. Lightwave Technol.*, **8**(1990), 1730.

THEORETICAL STUDY ON OUTPUT CHARACTERISTICS OF Er^{3+} -DOPED FIBER RING LASERS

SUN JUN-QIANG

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

(Received 12 May 1995)

ABSTRACT

A theoretical model has been established based on the solution of the rate equations for the erbium-doped fiber ring laser (EDFL). Analytic solutions for the threshold pump power, the output power, the slope efficiency and optimum erbium-doped fiber length of EDFL are obtained. The physical explanations have been given for the results.

PACC: 4255W; 4260