

文章编号: 1001-3806(2002)06-0416-03

光纤环形腔半导体激光器弛豫振荡的分析

赵延 罗斌 潘炜

(西南交通大学计算机与通信工程学院,成都,610031)

摘要: 通过建立光纤环形腔半导体激光器的单模速率方程,用小信号方法讨论了弛豫振荡与环形腔长度的关系,以及直接电流调制下的调制响应与调制带宽。分析发现,在确定的参数下,存在环形腔长度的临界值。只有当环形腔长度小于该临界值时,激光器才发生弛豫振荡。

关键词: 半导体激光器;光纤环形腔;弛豫振荡;调制响应;调制带宽

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Analysis of relaxation oscillation of fiber ring semiconductor laser

Zhao Yan, Luo Bin, Pan Wei

(School of Computer and Communication Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

Abstract: Based on single mode rate equations of fiber ring semiconductor lasers and small signal method, the dependence of relaxation oscillation on the length of ring cavity is discussed. The results show that there is critical value of the length of ring cavity with certain parameters. Relaxation oscillation exists only when the length of ring cavity is below the value. Modulation response and bandwidth under direct-current modulation are also studied.

Key words: semiconductor laser; fiber ring cavity; relaxation oscillation; modulation response; modulation bandwidth

引言

光纤环形腔激光器的研究一直受到人们的关注。国际上已报道的光纤环形腔激光器多采用掺铒光纤作为增益介质,如采用锁模掺铒光纤环形腔激光器产生高重复速率的皮秒光脉冲^[1,2]。近年来,随着光纤通信的快速发展,光纤环形腔半导体激光器(FRSL)的研究逐渐引起了人们的关注。FRSL多采用半导体激光放大器作为增益介质,已有文献报道了对FRSL输出特性的理论分析^[3],利用FRSL实现窄线宽、宽调谐范围的单纵模输出^[4,5],同时产生多个波长的激光输出^[6],实现四波混频波长转换^[7],以及传感器应用^[8]等。

通过建立FRSL的单模速率方程组,分析了FRSL的弛豫振荡、小信号强度调制响应及调制带宽^[9]。分析发现,在确定的参数下,存在环形腔长度的临界值。只有当环形腔长度小于该临界值时,激光器才会在电流调制时发生弛豫振荡。

1 FRSL 弛豫振荡的分析

当激光器的偏置电流由初始值突然增大到高于阈值的某个值时,激光腔内的光子数和载流子数在达到稳态值以前会反复振荡,称为弛豫振荡。弛豫振荡是激光器固有谐振的表现,是系统存储的能量在光子和载流子之间的振荡。弛豫振荡对器件的响应有重要影响,特别是在高速调制情况下,会成为限制激光器调制带宽的主要因素。

FRSL 的示意图如图 1 所示。环形腔激光器由半导体激光放大器(SLA)、光纤耦合器(coupler)和光隔离器(isolator)构成。光隔离器用于保证光的单向传输。FRSL 满足下列方程:

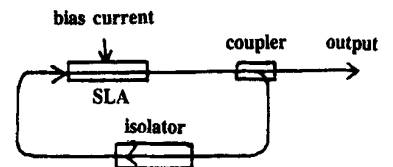


Fig. 1 Schematic diagram of the fiber ring semiconductor lasers

$$\dot{N}(t) = \frac{I}{qV} - \alpha N(t) - [N(t) - N_0]S(t) \quad (1)$$

$$\dot{S}(t) = (G - \gamma)S(t) + R_{sp}v_g/V \quad (2)$$

式中, $N(t)$ 是载流子密度, $S(t)$ 是输出光的通量, I 是偏置电流, q 是电子电荷, V 是有源区的体积, α 是载流子复合速率, a 是微分增益系数, N_0 是透明

作者简介:赵延,女,1976年8月出生。硕士研究生。现从事通信与信息系统的研究工作。

收稿日期:2001-11-23;收到修改稿日期:2001-12-31

载流子密度, v_g 是群速度。本文中的讨论采用平均场方法, 因此, 将受激辐射速率 G 、光子衰减速率和自发辐射速率 R_{sp} 在环形腔中做了修正:

$$G = n_1 L_1 - v_g a (N - N_0) / (n_1 L_1 + n_2 L_2) \quad (3)$$

$$= c (L_1 - \ln k_1 - 2) / (n_1 L_1 + n_2 L_2) \quad (4)$$

$$R_{sp} = B N^2_{sp} V n_1 L_1 / (n_1 L_1 + n_2 L_2) \quad (4)$$

式中, n_1 和 n_2 分别是有源区和光纤中的折射率, L_1 是 SLA 的腔长, L_2 是环形腔长度, 是限制因子, c 是真空中光速, 是有源区内的净损耗, k 是光纤耦合器的耦合比, 1 和 2 分别是 SLA 与光纤在两个端面的耦合系数, B 是辐射复合系数, sp 是自发辐射因子。

用小信号分析方法求解方程(1)和(2), 可以得到线性方程组:

$$\dot{N}(t) = -N N(t) - a(N - N_0) S(t) \quad (6)$$

$$\dot{S}(t) = -p S(t) + X N(t) \quad (7)$$

式中, $N = c + N \partial / \partial N + aS$ 是载流子密度的衰减速率, $p = -G$ 是输出光通量的衰减速率, $X = G_N S + (\partial R_{sp} / \partial N) v_g / V$, $G_N = \partial G / \partial N$ 。

假设 $N(t) = N_0 \exp(-ht)$, $S(t) = S_0 \times \exp(-ht)$ 。其中 N_0 和 S_0 分别为小量 $N(t)$ 和 $S(t)$ 的初值, h 表征达到稳态前的暂态过程。代入方程(6)和(7), 则得到一个 h 的一元二次方程:

$$h^2 - (N + p)h + Y = 0 \quad (8)$$

式中, $Y = N p + a(N - N_0) X$ 。由上文可知, p , X , Y 均是 L_2 的函数, 故方程(8)的判别式:

$$(L_2) = (N + p)^2 - 4Y \quad (9)$$

$(L_2) = 0$ 时, 是系统的临界状态, 有环形腔长度的临界值 L_c 。 $(L_2) < 0$ 时, $L_2 < L_c$, $h = -R \pm i R_r$, $R = (N + p) / 2$ 是激光器弛豫振荡的衰减速率, $R_r = (Y - R^2)^{1/2}$ 是弛豫振荡角频率。 R 和 R_r 越大, 弛豫振荡持续的时间越短。 $(L_2) > 0$ 时, $L_2 > L_c$, h 是两个正实数, 这时, 激光器的输出不出现弛豫振荡, 小量 $N(t)$ 和 $S(t)$ 由初值逐渐衰减至 0, 即系统缓慢地达到稳态。

图 2 给出了一定偏置电流下, 环形腔长度 L_2 与弛豫振荡角频率 R_r 和衰减速率 R 的关系。图 2a 为 R_r-L_2 曲线, 图 2b 为 $R-L_2$ 曲线。从图中可以看出, 随着 L_2 的增大, 弛豫振荡的角频率和衰减速率均迅速减小。可见环形腔长度对弛豫振荡的影响较大。环形腔越长, 暂态时间越久, 达到稳态所需要的时间越长。当环形腔长度大于临界值时, 弛豫振荡频率为 0, 即不发生弛豫振荡。模拟计算采用

的参数参见文献[10], 此外, 激光器输出波长为 1300nm, $n_2 = 1.5$, $\alpha = -40\text{cm}^{-1}$ 。

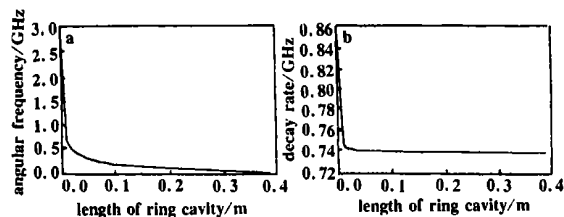


Fig. 2 Relaxation oscillation angular frequency R_r (a) and decay rate R (b) as a function of the length of ring cavity L_2

2 直接电流调制下的调制响应与调制带宽

半导体激光器的一个重要特点就是具有直接调制能力。设无调制时, 激光器在偏置电流 I_b 下连续工作; 在直接电流调制下, $I_m(t)$ 是调制电流, 则偏置电流 $I(t) = I_b + I_m(t)$ 。同样采用小信号方法, 由方程(1)和(2)得到线性方程组:

$$\dot{N}(t) = -N N(t) - a(N - N_0) S(t) + I_m(t) / qV \quad (10)$$

$$\dot{S}(t) = -p S(t) + X N(t) \quad (11)$$

假设为正弦调制, 即 $I_m(t) = I_p \sin(\omega_m t)$, I_p 为调制电流的峰值, ω_m 为调制角频率。利用傅氏变换和反变换求解, 可以得到:

$$S(t) = \frac{X I_p / qV}{[(\omega_m^2 - Y)^2 + \omega_m^2 (N + p)^2]^{1/2}} \times \sin(\omega_m t + \phi) \quad (12)$$

式中, ϕ 为相移。

图 3 给出了 $I_p = 0.1\text{mA}$ 时, 不同环形腔长度下, 小信号调制响应与调制频率的关系。从图中可以看出, 环形腔比较短, 即其长度小于临界值 L_c 时, 有明显的响应峰值, 而且能够响应较高的调制频率。环形腔长度大于临界值 L_c 时, 无明显的响应峰值, 即使在低调制频率下也表现为迅速衰减。

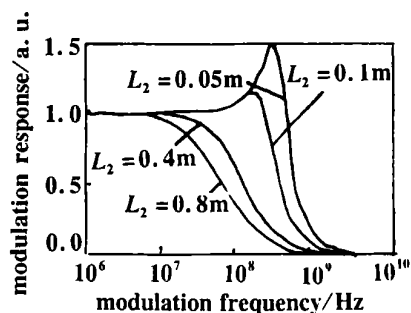


Fig. 3 Modulation response as a function of modulation frequency

在实际应用中, 3dB 带宽是一个重要的参数。如果在某个调制频率下, 调制响应下降至调制频率

为0时的调制响应的一半,则这个频率值就是3dB带宽。利用(12)式,可以得到3dB带宽的表达式:

$$\nu_B = \frac{1}{2} \left\{ Y - \frac{1}{2} (N + p)^2 [4Y^2 - Y(N + p)^2 + \frac{1}{4} (N + p)^4]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (13)$$

图4给出了调制带宽与环形腔长度的关系曲线。有图中可以看出,随着环形腔长度的增加,调制带宽快速减小。提高偏置电流 I_b 对增加带宽作用不大。这说明调制带宽受环形腔长度影响较大。

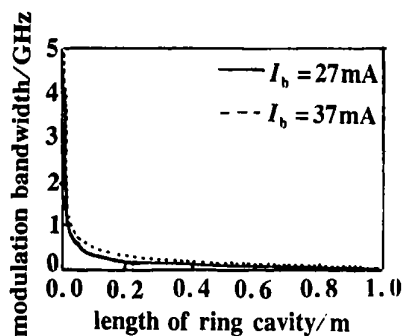


Fig. 4 Modulation bandwidth as a function of the length of ring cavity

3 结论

通过建立 FRSL 的单模速率方程组,分析了 FRSL 的弛豫振荡、小信号强度调制响应及调制带宽。分析发现,在确定的参数下,存在环形腔长度的临界值。当环形腔长度小于临界值时,激光器在调

制下会出现弛豫振荡,且振荡频率高,调制响应好,调制带宽大。环形腔长度大于临界值时,激光器不出现弛豫振荡,而且各项参数均发生劣化。这说明环形腔长度对 FRSL 的性能有较大影响。虽然 FRSL 具有易于实现单纵模振荡、可以在线内置各种控制器件等很多优点,但是较长的光纤环形腔导致损耗增加,响应速度降低,不能用于高速调制。因此,FRSL 适合制作成光电子集成器件,以充分发挥其优势。

参 考 文 献

- [1] Gupta K K, Novak D. *Electron Lett*, 1997, 33(15): 1330 ~ 1331.
- [2] Zhao D, Chan K T, Liu Y *et al.* *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13(3): 191 ~ 193.
- [3] 潘 炜, 罗 斌, 吕鸿昌 *et al.* *半导体光电*, 1999, 20(1): 69 ~ 71.
- [4] Chawki M J, Valiente I, Auffret R *et al.* *Electron Lett*, 1993, 29(23): 2034 ~ 2035.
- [5] Hu Z, Li F, Pan Z *et al.* *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12(8): 977 ~ 979.
- [6] Vlachos K, Ziros K, Houbavlis T *et al.* *IEEE Photo Technol Lett*, 2000, 12(1): 25 ~ 27.
- [7] Chi N, Qi J, Xu L *et al.* *IEEE Photo Technol Lett*, 2001, 13(5): 499 ~ 501.
- [8] Takahashi Y, Yoshino T. *J Lightwave Technology*, 1999, 17(4): 591 ~ 597.
- [9] Agrawal G P, Dutta N K. *Semiconductor lasers*. 2nd edition, New York: VanNostrand Reinhold Company, 1993.
- [10] 赵 延, 罗 斌, 潘 炜 *et al.* *激光杂志*, 2001, 22(3): 4 ~ 5.

(上接第 415 页)

于金属表面提高激光吸收率的传统方法不适合耐火材料。(3)激光加热冷却是一个非平衡过程,熔凝处理区因高应力的形成容易出现开裂现象,迄今为止,对这一问题还缺乏深层次的探讨。(4)激光熔凝层是非平衡组织,在高温下,组织和结构的稳定性如何,也会直接影响到处理层的性能。

耐火材料表面改性是随着冶金工业的发展提出来的新的问题,而激光表面改性技术具有传统工艺无可比拟的优势。在未来的发展中,耐火材料的激光表面改性将引起研究者和冶金企业的浓厚兴趣。围绕上述问题进行研究和开发所取得的理论和应用成果,会有力地推动耐火工业及冶金技术的发展。

参 考 文 献

- [1] Roy A, Manna I. *Mater Science & Engng*, 2001, A297: 85 ~ 93.
- [2] Konstantino E, Altus E. *Surface Engng*, 1999, 15(2): 126 ~ 128.

- [3] Wang A H, Yue T M. *Composite Mater and Technol*, 2001, 61(11): 1549 ~ 1554.
- [4] Wang A H, Xie C S. *J Mater Science*, 2001, 36(8): 1975 ~ 1979.
- [5] 王诚训, 王 珏. *耐火材料技术与应用*. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [6] Pou J, Gonzalez P, Garcia E *et al.* *Applied Surface Science*, 1994, 79(80): 338 ~ 343.
- [7] Lambert P, Marple B, Arsenaull B. *Proc Int Symp. On Developments and Appl of Ceramics and New Metal Alloys*, Canadian Institute of Mining, 1993.
- [8] Bradley L, Li L, Stott F H. *Applied Surface Science*, 1999, 138 ~ 139: 233 ~ 239.
- [9] Bradley L, Li L, Stott F H. *Mater Science & Engng*, 2000, A278: 204 ~ 212.
- [10] Lawrence J, Spencer J T. *Proc of SPIE*, 1997, 600: 3097.
- [11] Lawrence J, Li L. *Applied Surface Science*, 2000, 168: 71 ~ 74.
- [12] Part C, Costa G N, Autric M. *Gas Flow and Chemical Lasers*, 1995, 2502: 638.
- [13] Naeem M, Perston M E, Tyrer J. *Advanced Materials and Processes*, Proc First European Conf Euromat, 1989.