

注入锁定半导体激光器稳定范围的解析表示*

李林林

(郑州大学电子系, 郑州 450052)

提要 给出了注入锁定半导体激光器稳定锁定范围的简单解析表达式。该式仅与激光器自由运转时的参数及注入光功率有关。

关键词 半导体激光器, 注入锁定, 锁定带宽

1 引 言

半导体激光器的注入锁定对光通信系统有着极为重要的应用^[1~4]。为了应用注入锁定技术, 首先必须确定稳定锁定范围^[5~8]。激光器的锁定范围可由稳态分析得到^[5]。然而, 该锁定范围的一部分是动态不稳定的^[5~8]。

稳态的锁定范围由注入光与激光器的光频差的上、下限决定。下限可由稳态分析得到, 但上限则由动态行为所决定^[5~8]。在过去的研究中, 这个下限是由锁定的激光参数所确定, 而上限仅能由数值分析得到^[5~8]。显然, 这对于实际应用是很不方便的。

本文给出了稳定范围的解析表达式。该式仅与自由运转的激光器参数及注入功率有关。与数值解相比, 当注入光功率与激光器发射的光功率比为 0.01 时, 若归一化偏置电流大于 1.1, 解析表达式的误差小于 0.01。

2 分 析

当外部光注入时, 半导体激光器腔内的复电场 E_L 和载流子密度 n 服从^[5,9]

$$\dot{E}_L = \{j[\omega(n) - \omega_{th}] + (G - 1)/2\tau_{ph}\} E_L + K_e e^{j\omega_0 t} E_i \quad (1)$$

$$\dot{n} = J/eV - n/\tau_s - GS/\tau_{ph}V \quad (2)$$

式中 $\omega(n)$ 是腔频率, ω_{th} 是激光器自由运转时的角频率, $G(n) = g(n)v_g\tau_{ph}$ 是归一化增益, $g(n) = \partial g(n - n_0)/\partial n$, $\partial g/\partial n$ 是增益系数, v_g 是光群速度, τ_{ph} 是光子寿命。增益实际上也取决于光子数 $S = |E_L|^2$, 但为简单起见, 这里不考虑增益饱和的影响, 这对激光器偏置不高或注入光功率不太大时是正确的^[5,6]。 n_0 是透明载流子密度, $\Delta\omega_0$ 是自由运转激光器与外部场 E_i 的光频差, K_e 是一耦合常数^[5~8], J 为偏置电流, e 为电子电荷, V 为有源区体积, τ_s 是载流子寿命。

当激光器被锁定时, 它将振荡在外部场的频率上。故这里引入 $E = E_L e^{-j\omega_0 t}$ 。代入到(1)式

* 本课题由德国洪堡基金会资助。

中去,则有

$$\dot{E} = \{j[\omega(n) - \omega_{th} - \Delta\omega_0] + (G - 1)/2\tau_{ph}\}E + K_c E \quad (3)$$

另一方面,当外部光注入时,载流子密度也将同时变化 Δn 。故增益和光频可分别表示为 $G \approx 1 + G_n \Delta n$ 与 $\omega(n) = \omega_{th} + \alpha G_n \Delta n / 2\tau_{ph}$, 这里 $G_n = v_g \tau_{ph} \partial g / \partial n$, α 是线型展宽因子^[5,9]。代入到(2), (3)式,则有

$$\dot{E} = [G_N \Delta N (1 + j\alpha) / 2 - j\Delta\omega_0] E + K_c E \quad (4)$$

$$\Delta \dot{N} = -\Delta S / \tau_{ph} - \Delta N / \tau_e \quad (5)$$

式中 $G_N = G_n / \tau_{ph} V$, $\Delta N = \Delta n V$, $\Delta S = S - S_{os}$, S_{os} 是激光器自由运转时的光子数, $1/\tau_e = 1/\tau_s + G_N S$ 。

稳态锁定范围可由(4), (5)式的稳态解($\dot{E} = \Delta \dot{N} = 0$)得到。故可得光频差 $\Delta f_0 = \Delta\omega_0 / 2\pi$, 必须满足^[5,6]

$$K_c \sqrt{S_i / S_{os}} / 2\pi \geq \Delta f_0 \geq \Delta f_1 \quad (6)$$

这里 $\Delta f_1 = -K_c \sqrt{(1 + \alpha^2) S_i / S_{os}} / 2\pi$ 是光频差的下限, S_o 是激光器锁定时的光子数, 它取决于注入光功率。

为了求得光频差的上限, 必须求解激光器的动态行为。因此, 令 $E(t) = \sqrt{S(t)} e^{-j\varphi(t)}$, $\varphi(t)$ 是光场的位相^[5,6]。应用小信号分析, 则有 $\Delta N = \Delta N_0 + \delta N(t)$, $S = S_o + \delta S(t)$, $\varphi = \varphi_0 + \delta\varphi(t)$ 。代入到(4), (5)式中, 则有

$$\delta \dot{S} = G_N \Delta N_0 \delta S / 2 + G_N S_o \delta N + S_o (\alpha G_N \Delta N_0 - 2\Delta\omega_0) \delta\varphi \quad (7)$$

$$\delta \dot{N} = -\delta S / \tau_p - \delta N / \tau_e \quad (8)$$

$$\delta \dot{\varphi} = (\Delta\omega_0 - \alpha G_N \Delta N_0 / 2) \delta S / 2S_o - \alpha G_N \delta N / 2 + G_N \Delta N_0 \delta\varphi / 2 \quad (9)$$

式中 $1/\tau_p = 1/\tau_{ph} + G_N \Delta N_0$ 。

对(7), (8), (9)式应用傅氏变换, 则可得稳定性判别式

$$D(\omega) = G_N S_o [\alpha \Delta\omega_0 - (1 + \alpha^2) G_N \Delta N_0 / 2] / \tau_p + K / \tau_e - \omega^2 (1/\tau_e - G_N \Delta N_0) + j\omega (K + G_N S_o / \tau_p - G_N \Delta N_0 / \tau_e - \omega^2) \quad (10)$$

式中 $K = K_c^2 S_i / S_{os}$, S_i 是注入光的光子数。

由(10)式所决定的系数当其实、虚部同时为零时是不稳定的。因此, 光频差的上限 Δf_u 可由(10)式计算。

3 稳定锁定范围的解析表达式

由上节可见, 光频差的下限 Δf_l 依赖于锁定的激光器参数, 而上限 Δf_u 仅可由数值计算得到。这对于实际应用是极为不便的。因此, 我们采用一阶近似来求上、下限的解析表达式。首先, 由(4), (5)二式, 可求得

$$\Delta N_0 = \frac{\alpha \Delta\omega_0 + \frac{K_o}{\tau_{eo} \omega_{ro}^2} - \sqrt{(1 + \alpha^2) K_o + \frac{K_o}{\tau_{eo} \omega_{ro}^2} + \frac{2\alpha K_o \Delta\omega_0}{\tau_{eo} \omega_{ro}^2}}}{G_N (1 + \alpha^2) / 2} \Delta\omega_0 \quad (11)$$

这里 $K_o = K_c^2 S_i / S_{os}$, $1/\tau_{eo} = 1/\tau_e + G_N S_{os}$, $\omega_{ro} = \sqrt{G_N S_{os} / \tau_{ph}}$ 。(11)式中的所有参数仅与激光器自由运转时的参数、注入光功率、光频差有关。代入到(6)式中去, 则可得下限的表达式为

$$\Delta f_l = \frac{\alpha K_o / \tau_{eo} \omega_{ro}^2 - \sqrt{(1 + \alpha^2) [K_o + (K_o / \tau_{eo} \omega_{ro}^2)^2]}}{2\pi} \quad (12)$$

同理,将(11)式代入到(10)式,可得上限为

$$\Delta f_u = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{4A\pi} \quad (13)$$

式中 $A = 1 + a_1^2 a_2^2$, $B = -2a_3 - 2a_1^2 a_2 / \tau_{eo}$, $C = -[K_o(1 + \alpha^2) - a_1^2 / \tau_{eo}^2]$, $a_1 = 1 + K_o / \omega_{ro}^2$, $a_2 = 2\alpha / (1 + \alpha^2)$, $a_3 = \alpha K_o / \tau_{eo} \omega_{ro}^2$. 所以有稳定的锁定范围 $\Delta f_u \geq \Delta f_o \geq \Delta f_l$. 显然,(12)与(13)式仅取决于自由运转参数与注入光功率,所以,可以容易地计算锁定范围了.

为了证实表达式的正确性,下面进行一些计算,所需参数如下: 激光波长为 $1.3 \mu\text{m}$, 激光器腔长为 $300 \mu\text{m}$, 有效群折射率为 4.5 , $\tau_{ph} = 2 \text{ ps}$, $\tau_s = 2 \text{ ns}$, $g/n = 300 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, $n_o = 1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, $\alpha = 6$, 光限制因子为 0.5 ^[9].

图 1 给出稳态锁定范围随归一化偏置电流 $J_n = J/J_{th}$ 变化的曲线, J_{th} 为阈值电流. Δf_u , Δf_l 与 $\sqrt{K_o}/2\pi$ 均在图 1 中表示了. $\sqrt{K_o}/2\pi$ 由虚线表示. 虚线以上为静态不稳定区域. 最下边的实线以下也同样是而非锁定区域. 两条实线之间为稳定锁定区域. 注入光功率为 $1 \mu\text{W}$. 在计算中,我们发现用(12)和(13)式给出的计算结果是非常精确的. 即便对于较大的注入光与激光器发射光功率比 $R = S_i/S_{os}$, (12)和(13)式也是精确的. 例如,在归一化注入电流 $J_n \geq 1.1$ 时,对 $R \leq 0.01$,用(12)和(13)式的结果与用数值计算的(6)和(10)式的结果相对误差也小于 0.01 . 因此,我们可以在实际应用时用(12)和(13)式进行计算.

(12)和(13)式的缺点也是稍为复杂. 然而,在实际应用时,半导体激光器的 α 值一般较大,且偏置要稍高于阈值^[6],因此,只要 $\alpha^2 \geq 1$, $(1 + \alpha^2)K_o\tau_{eo}^2 \gg 1$ 与 $K_o/\omega_{ro}^2 \ll 1$,我们就可以得到非常简单的解析表达式

$$\Delta f_l \approx -\sqrt{(1 + \alpha^2)K_o}/2\pi \quad (14)$$

$$\Delta f_u \approx \frac{-\sqrt{(1 + \alpha^2)K_o} + (1/2\tau_{eo}^2)/\sqrt{(1 + \alpha^2)K_o}}{2\pi} \quad (15)$$

这是非常容易计算的. 而锁定范围 $W = \Delta f_u - \Delta f_l = \sqrt{(1 + \alpha^2)K_o}/4\pi\tau_{eo}^2$ 也是非常简单的. 这对于实际应用中锁定范围的估计将有极大的帮助.

在计算中,我们发现当注入光功率低于某个数值时,式(13)无解. 这意味着在(6)式的范围内,激光器无条件稳定^[6],也即稳定锁定特性仅由稳态解决定. 由(13)式可得到此条件为

$$R = \frac{S_i}{S_{os}} \leq \frac{1}{\tau_{eo}^2(1 + \alpha^2) + 4\alpha^2/\omega_{ro}^2(1 + \alpha^2)} \quad (16)$$

实际上,若 $\omega_{ro}^2\tau_{eo} \gg 1$, (16)式则成为

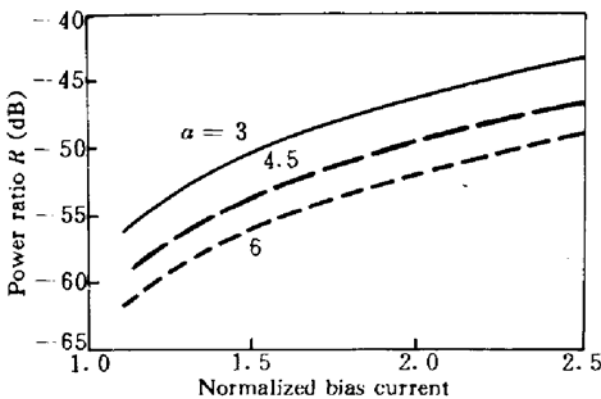


Fig. 2 The limit for the laser unconditionally stably operating

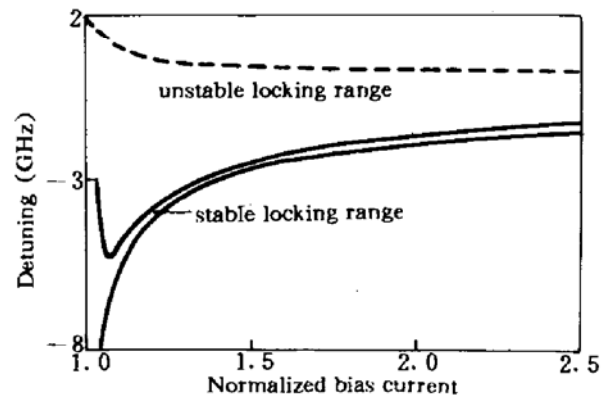


Fig. 1 The stable locking range

$$R \leq \frac{1}{\tau_{eo}^2(1 + \alpha^2)} \quad (17)$$

这与文献[6]的结论是一致的。

图 2 给出了三个 α 值下,此功率比随 J_n 的变化曲线。其他参数同图 1。由图 2 可以看到,对给定的 α ,大的偏置电流对应着大的功率比 R 。另一方面,对给定的偏置电流,小的 α 对应于较大的 R 。这与文献[6]的结论也是一致的,但这里的表达式是文献[6]的推广。

致谢 作者对柏林工业大学的 K. Petermann 教授的有益讨论表示感谢。

参 考 文 献

- 1 H. Toba, Y. Kobayashi, Y. Ranagimoto *et al.*. Injection-locking technique applied to a 170 km transmission experiment at 445.8 Mbit/s. *Electr. Lett.*, 1984, **20**(8): 370
- 2 N. A. Olsson, H. Temkin, R. A. Logan *et al.*. Chirp-free transmission, over 82.5 km of single mode fiber at 2 Gbit/s with injection locked DFB lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(1): 63
- 3 李林林. 注入锁定半导体激光器的相位调制特性研究. *中国激光*, 1989, **16**(10): 577
- 4 L. Li (李林林). Small signal analysis of optical FM signal amplification by an injection-locked semiconductor laser amplifier. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(4): 477
- 5 R. Lang. Injection locking properties of a semiconductor laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, **QE-18**(6): 976
- 6 F. Mogensen, H. Olesen, G. Jacobsen. Locking conditions and stability of injection locked semiconductor lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1985, **QE-21**(7): 784
- 7 C. H. Henry, N. A. Olsson, N. K. Dutta. Locking range and stability of injection locked at 1.54 μm InGaAsP semiconductor laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1985, **QE-21**(9): 1152
- 8 I. Petitbon, P. Gallion, G. Debarge *et al.*. Locking bandwidth and relaxation oscillations of an injection locked semiconductor laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1988, **QE-24**(2): 148
- 9 K. Petermann. *Laser Diode Modulation and Noise*. Holland: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 1991. 92

An Analytical Expression for the Stable Locking Range of an Injection-locked Semiconductor Laser

Li Linlin

(Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)

Abstract An analytical expression for the stable locking range of an injection-locked semiconductor laser is presented. The expression is only related to the free-running laser parameters and the injected power.

Key words semiconductor laser, injection-locking, locking bandwidth