

具有强耦合外腔的半导体激光器 稳定性极限条件

柴燕杰 张汉一 周炳琨

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

提要 从理论上分析了强耦合外腔半导体激光器的稳定性。在外腔半导体激光器速率方程分析中引入了强反馈因子近似, 通过增益速率-频率平面中的特性分析得到如下结论: 对于给定参数的外腔半导体激光器, 存在有一个技术不能超越的稳定性理论极限条件。强反馈和短外腔长度有利于提高外腔半导体激光器的稳定性。

关键词 半导体激光器, 稳定性, 外腔

外腔半导体激光器由于具有窄线宽和宽带可调谐性, 已在如下领域中得到了广泛的研究与应用^[1~3], 如高分辨率光谱测量、光外差传感、相干光纤通信、相干检测和光电检测等。通过外腔将半导体激光器的部分输出光再反馈回激光器使之与有源区中的光场进行有效的相互作用, 结果将会降低激光器的相位噪声和强度噪声。对强反馈外腔, 即外腔的反馈率远高于半导体激光器解理面的反馈率时(通过对激光器解理面镀增透膜实现), 激光模式主要由外腔参数决定^[4]。若利用具有频率选择性的光反馈元件, 如光栅做外腔^[2], 通过改变反馈光波长就可以实现波长调谐。

因为外腔半导体激光器包含有较多的光学和机械元件, 其在实际应用中所遇到的一个主要问题是模式的不稳定, 即容易跳模。虽然已采取了频率稳定和温度稳定^[5]等措施, 但这些措施只能改善其稳定性, 却不能从根本上消除不稳定性。本文的分析结果表明: 对强反馈外腔半导体激光器, 存在一个由器件参数决定的稳定性的理论极限条件, 其依赖于激光器和外腔的结构参数, 纯技术方案无法超越这个理论极限条件。

1 强反馈外腔半导体激光器模型

图 1 为本文分析中所使用的强反馈外腔半导体激光器模型, 其中 l 为有源区长度, n 为有源区折射率, L 为外腔长度, r_1, r_2, r_3 分别为激光器

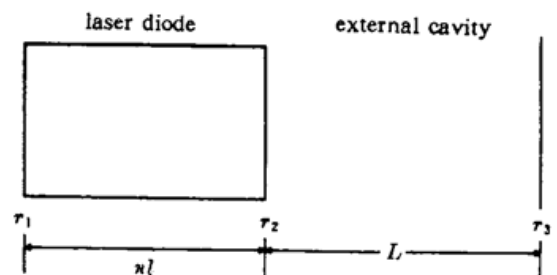


Fig. 1 Model of a strongly coupled external cavity semiconductor laser

两个解理面和外腔的振幅反射系数($R_i = r_i^2, i = 1, 2, 3$), 其中 R_3 为包括了耦合和传输损耗在

内的外腔等效光强反馈率。当 $r_3 \gg r_2$ 时,称为强反馈外腔半导体激光器。与弱反馈外腔半导体激光器的分析的不同点在于,由于相对较强的外腔反馈系数 r_3 ,在分析中必须考虑来自强反馈外腔的多次反射光。设有源区中的激光场为

$$E(t) = E_0(t)\exp[-j\omega_0 t - j\phi(t)] \quad (1)$$

其中 ω_0 为外腔激光器的振荡角频率, $\phi(t)$ 为激光场的相位, $E_0(t)$ 为激光场的电场振幅,光强 $I(t) = |E_0(t)|^2$,外腔半导体激光器的运动方程可表示为^[6]

$$\frac{dE(t)}{dt} = -j\Omega E(t) + \frac{1}{2}(G - \gamma)(1 - j\alpha)E(t) + \gamma_{\text{ext}}E(t) \quad (2)$$

其中 Ω 为激光器的本征振荡角频率(无外腔时), α 为半导体激光器的线宽加宽因子^[7], G 为激光器的增益速率, γ 为激光器的光强损耗速率, γ_{ext} 为外腔反馈速率(其中包含有相位延迟因子),外腔半导体激光器的行为主要由 γ_{ext} 决定。

2 γ_{ext} 的近似处理

考虑到外腔的多次光反馈,我们可以得到从外腔反馈进入有源区的光场为

$$\begin{aligned} E_r(t) &= r_2 E_0(t)\exp[-j\omega_0 t - j\phi(t)] \\ &\left[1 + \sum_{m=1}^{\infty} r_3(1 - r_2^2)(-r_2 r_3)^{m-1} \frac{E_0(t - m\tau)}{r_2 E_0(t)} \exp[j\phi(t) - j\phi(t - m\tau) + jm\omega_0 \tau] \right] \\ &= \frac{r_2 + r_3[E_0(t - \tau)/E_0(t)]\exp[j\omega_0 \tau + j\phi(t) - j\phi(t - \tau)]}{1 + r_2 r_3[E_0(t - \tau)/E_0(t)]\exp[j\omega_0 \tau + j\phi(t) - j\phi(t - \tau)]} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\tau = 2L/c$ 为光子在外腔中的往返渡越时间(相应地, $\tau_{\text{in}} = 2nl/c$ 为光子在有源区中的往返渡越时间)。在上面的分析中利用了半导体激光器的相位和强度噪声具有高斯白噪声特性^[8],因而其过程具有各态历经性这一特点。当半导体激光器耦合有强反馈外腔时,激光二极管的耦合面处的等效反射系数为 $r_2^{\text{eff}} = E_r(t)/E(t)$ 。外腔半导体激光器的阈值条件为

$$(r_1 r_2^{\text{eff}})^2 \exp[(G - \gamma - 2\gamma_{\text{ext}})\tau_{\text{in}}] = 1 \quad (4)$$

由此我们可以得到 $\gamma_{\text{ext}} = \gamma_1 + j\gamma_2$,其中

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{1}{\tau_{\text{in}}} \left[\ln \frac{r_3}{r_2} - \frac{\dot{I}}{2I}\tau + \frac{r_2}{r_3} \cos\omega_0 \tau + \frac{r_2}{r_3} \frac{\dot{I}}{2I} \tau \cos\omega_0 \tau - \frac{r_2}{r_3} \dot{\phi} \tau \sin\omega_0 \tau \right] \\ \gamma_2 = \frac{1}{\tau_{\text{in}}} \left[\dot{\phi} \tau - \frac{r_2}{r_3} \sin\omega_0 \tau - \frac{r_2}{r_3} \frac{\dot{I}}{2I} \tau \sin\omega_0 \tau - \frac{r_2}{r_3} \dot{\phi} \tau \cos\omega_0 \tau \right] \end{cases} \quad (5)$$

在以上推导中利用了强反馈外腔的 $r_3/r_2 \gg 1$ 这一条件,并对光场振幅 $E(t)$ 和相位 $\phi(t)$ 的非线性项进行了一阶 Taylor 近似。

3 稳定性分析

对处于稳定工作状态的外腔半导体激光器,有 $\dot{I} = 0$, $\dot{\phi} = 0$,因此我们可以从式(2)和式(5)得到耦合外腔前后激光器增益速率差 ΔG 和频率差 $\Delta\omega$ 与外腔激光器参数的关系如下:

$$\begin{cases} \Delta G = (G - \gamma) = -\frac{2}{\tau_{\text{in}}} \left[\ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_2}{r_3} \cos\omega_0 \tau \right] \\ \Delta\omega = (\omega_0 - \Omega) = \frac{\alpha}{2}(G - \gamma) + \frac{1}{\tau_{\text{in}}} \cdot \frac{r_2}{r_3} \sin\omega_0 \tau \end{cases} \quad (6)$$

由于强反馈外腔半导体激光器工作于具有最低阈值的模式而非具有最窄线宽的模式, 即 $\omega_0\tau = 2m\pi$, 因此从式(6)可知 ΔG 和 $\Delta\omega$ 均为负值, 也即耦合有强反馈外腔后, 半导体激光器的阈值和工作频率都将下降, 与实验结果一致。

对于不同反馈相位 $\omega_0\tau$, 式(6)在 $G \sim \omega$ 平面上画出一个椭圆, 其位置和大小随 r_3 和 L 的取值而变化。若反馈越强, 则该椭圆的位置越低, 说明外腔激光器的阈值也越低。这个封闭的椭圆区域称为外腔半导体激光器的自锁定区^[9]。自锁定区域的面积越大, 则其包含的允许振荡的外腔模式也就越多, 这时也越容易产生跳模, 降低激光器的稳定性。当外腔反馈强度增强时, r_3/r_2 的值增大, 对应的椭圆面积减小, 所包含的允许振荡的外腔模式数目也相应减少, 增强了外腔半导体激光器的稳定性。

由(6)式可以得出外腔反馈相位所能产生的最大频率变化范围为 $(\Delta\omega)_{\max} = (2/\tau_{in})(r_2/r_3)\sqrt{1+\alpha^2}$, 而外腔的模式间距为 $(\Delta\omega)_{\text{ext}} = 2\pi/(\tau + \tau_{in})$, 当该最大频率变化范围 $(\Delta\omega)_{\max}$ 小于外腔的模式间距 $(\Delta\omega)_{\text{ext}}$ 时, 有

$$\frac{r_3}{r_2} \geq \frac{1}{\pi} \sqrt{1+\alpha^2} \cdot \frac{\tau + \tau_{in}}{\tau_{in}} \quad (7)$$

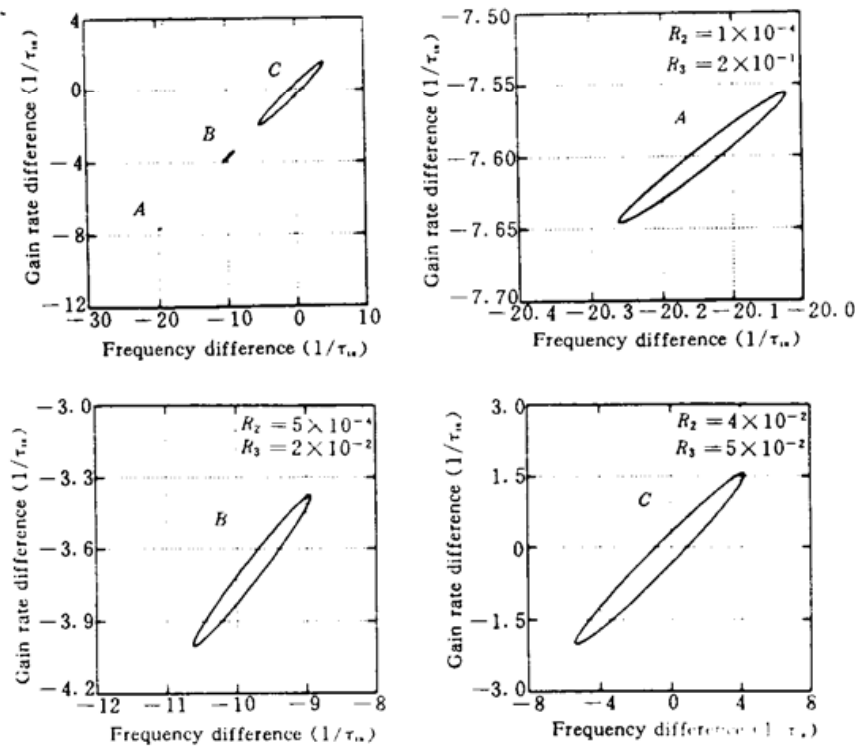


Fig. 2 Relationship of the gain-rate difference and frequency difference for different parameters of the strongly coupled external cavity semiconductor laser

这时仅由外腔反馈相位变化的作用不可能使外腔半导体激光器产生跳模, 式(7)即为强反馈外腔半导体激光器稳定性极限条件。而如果式(7)的条件得不到满足, 无论我们对激光器采取什么措施, 都不可能从根本上消除产生跳模的可能性。图2给出了不同外腔参数下的 $\Delta G \sim \Delta\omega$ 关系曲线, 曲线表明, 通过增大 r_3 或减小 r_2 , 可以得到更加稳定的外腔半导体激光器。式(7)还表明, 减小 τ (即采用短的外腔长度) 也有利于提高激光器的稳定度。

作为一个典型示例, 我们选取 $n = 3.6$, $l = 200 \mu\text{m}$, $L = 3 \text{ cm}$, $\alpha = 5.3$, $R_3 = 32\%$, 可以求

出稳定极限要求 $R_2 = 6 \times 10^{-5}$, 如此低的激光器解理面反射率在目前的镀膜条件下是可能实现的^[10]。因此, 在对外腔半导体激光器进行优化设计的同时, 除对激光器采取频率和温度稳定措施外, 还需使其满足(7)式所表明的稳定性极限条件。

综上所述本文对强反馈外腔半导体激光器的稳定性进行了分析, 结果表明存在一个外腔激光器的稳定极限, 其依赖于激光器的参数, 当激光器参数给定后, 纯技术方案无法克服这一极限, 提高外腔反馈率和减小外腔长度有利于提高强反馈外腔半导体激光器的稳定性。这一结论对设计和实现高稳定度的外腔半导体激光器具有积极的意义。

参 考 文 献

- 1 N. A. Olsson, J. R. Van Der Ziel. Performance characteristics of 1.5 μm external cavity semiconductor lasers for coherent optical communication. *J. Lightwave Technology*, 1987, LT-5(4) : 510
- 2 R. Wyatt. Spectral linewidth of external cavity semiconductor lasers with strong, frequency-selective feedback. *Electr. Lett.*, 1985, 21(15) : 658
- 3 K. Y. Liou. Single longitudinal mode operation of injection laser coupled to a GRIN-Rod external cavity. *Electr. Lett.*, 1983, 19(19) : 750
- 4 S. Sato, O. Nilsson, Y. Yamamoto. Oscillation center frequency tuning, quantum FM noise, and direct frequency modulation characteristics in external grating loaded semiconductor lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, QE-18(6) : 961
- 5 Hanyi Zhang, Bingkun Zhou, Jianglin Wang. Mode selectivity of multisegment composite-cavity semiconductor lasers. *Optics and Laser Technology*, 1987, 19(6) : 304
- 6 D. R. Hjelme, A. R. Mickelson. On the theory of external cavity operated single-mode semiconductor lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1987, QE-23(6) : 1000
- 7 C. H. Henry. Theory of the line width of semiconductor lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, QE-18(2) : 259
- 8 C. H. Henry. Theory of the phase noise and power spectrum of a single mode injection laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983, QE-19(9) : 1391
- 9 C. H. Henry. Phase noise in semiconductor lasers. *J. Lightwave Technology*, 1986, LT-4(3) : 298
- 10 L. F. Stokes. Accurate measurement of reflectivity over wavelength of a laser diode antireflection coating using an external cavity laser. *J. Lightwave Technology*, 1993, LT-11(7) : 1162

Stability Limit Conditions of Semiconductor Lasers with a Strongly Coupled External Cavity

Chai Yanjie Zhang Hanyi Zhou Bingkun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The stability properties of semiconductor lasers strongly coupled to an external cavity are theoretically analyzed. A strong feedback factor approximation is introduced to the rate equations of external cavity semiconductor lasers. Through a gain-rate-frequency ellipse drawing, we get a result that there exists a theoretical limit condition on the stability of given semiconductor lasers with a strongly coupled external cavity. Technical methods can not surpass this limit condition after the parameters of laser are given. We also concluded that stronger feedback and shorter length of the external cavity are beneficial to improving the stability of lasers.

Key words semiconductor laser, stability, external cavity