

强反馈外腔半导体激光器线宽特性研究

柴燕杰 张汉一 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要 本文分析了具有强反馈外腔的半导体激光器线宽特性,给出了强反馈外腔半导体激光器的线宽压窄率表示式.分析结果表明:该公式与数值解的结果符合很好,并且在一定条件下,弱反馈外腔可以得到比强反馈外腔更窄的线宽.

PACC: 4255P, 4260D, 3270

1 前言

窄线宽可调谐半导体激光器在高分辨率光谱测量、外差传感测量、相干光通信相干检测、光电子检测等方面有广泛的应用,而通常的单模半导体激光器(如DFB)的线宽太宽(数兆赫—数十兆赫)^[1],无法满足需要.利用外腔技术将半导体激光器的部分输出光反馈回有源区内,通过反馈光与有源区内光场之间的有效相互作用,可以改善激光器的工作特性,降低其强度噪声和相位噪声,压窄半导体激光器的线宽^[2].利用外腔半导体激光器很容易得到1MHz以下的线宽,实验上已得到了小于1kHz线宽的激光输出^[3].根据外腔反馈光的强度,可将外腔半导体激光器分为强反馈和弱反馈两种情况,由于弱反馈下分析简便,已得到了较为深入的研究和分析^[4].本文根据强反馈下的特点,对强反馈外腔的反馈率进行了新的近似处理,得到了强反馈外腔半导体激光器的线宽压窄率公式及相应的分析结果.

2 强反馈外腔半导体激光器模型

图1为本文中分析用的外腔激光器模型,其中有源区长度为 l ,折射率为 n ,外腔长为 L . r_1, r_2, r_3 分别为有源区两端面及外腔的振幅反射率,且有 $R_i = r_i^2 (i=1, 2, 3)$,其中 R_3 为包括了耦合损耗及传输损耗在内的等效外腔光强反射率.当 $r_3 \ll r_2$ 时,称为弱反馈;当 $r_2 \ll r_3$ 时,称为强反馈.在弱反馈时,由于 r_3 较小,因此只需考虑外腔的一次反射光即可;

柴燕杰 男,1965年生,副教授,现从事高速光纤通信系统研究
张汉一 男,1942年生,教授,现从事半导体激光器与光纤通信系统研究
周炳琨 男,1936年生,教授,中国科学院院士,现从事光电子与光纤通信系统研究
1995年3月17日收到初稿,1995年6月20日收到修改稿

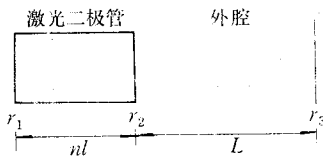


图 1 外腔半导体激光器模型

在强反馈时, r_3 的反射光比 r_2 的反射光强得多, 即来自外腔的反馈光比来自激光管解理面的反馈光要强, 因此必须考虑外腔的多次光反射才可. 设有源区中的光场为:

$$E(t) = E_0(t)e^{-j\omega_0 t - j\varphi(t)} \tag{1}$$

其中 ω_0 为外腔存在时的激光振荡角频率, $\varphi(t)$ 为激光场的相位, $E_0(t)$ 为光场的缓变振幅, 可写出外腔半导体激光器的速率方程为:

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

其中 Ω 为激光管的本征振荡角频率, α 为半导体激光器线宽加宽因子, G 为光强增益速率, γ 为光强损耗速率, γ_{ext} 为外腔的振幅反馈速率(其中包括了外腔产生的相位延时在内), γ_{ext} 决定外腔激光器的行为. 以下导出强反馈下 γ_{ext} 的表达式.

3 强反馈外腔激光器线宽公式

考虑外腔中的多次延时光反射后, 反射进入有源区的光场为:

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

其中 $\tau = 2L/c$, 为光子在外腔中的往返渡越时间. 由于半导体激光器中的强度与相位噪声均为平稳随机噪声(白噪声)^[5], 满足各态历经性, 利用其特性:

$$\frac{E_0[t - (m + 1)\tau]}{E_0(t - m\tau)} = \frac{E_0(t - \tau)}{E_0(t)} \tag{4}$$

$$\varphi(t - m\tau) - \varphi[t - (m + 1)\tau] = \varphi(t) - \varphi(t - \tau) \tag{5}$$

可以求得激光器有源区耦合面处等效反射系数为:

$$r_2^{\text{eff}} = \frac{E_{r0}(t)}{E_0(t)} = \frac{r_2 + r_3 \frac{E_0(t - \tau)}{E_0(t)} e^{j\omega_0 \tau + j\varphi(t) - j\varphi(t - \tau)}}{1 + r_2 r_3 \frac{E_0(t - \tau)}{E_0(t)} e^{j\omega_0 \tau + j\varphi(t) - j\varphi(t - \tau)}} \tag{6}$$

根据激光器的阈值条件, 可以得出:

$$\gamma_{\text{ext}} = \frac{1}{\tau_{\text{in}}} \ln \frac{r_2^{\text{eff}}}{r_2} = \frac{1}{\tau_{\text{in}}} \ln \left(\frac{1 + \frac{r_3 E_0(t - \tau)}{r_2 E_0(t)} e^{j\varphi_1}}{1 + r_3 r_2 \frac{E_0(t - \tau)}{E_0(t)} e^{j\varphi_1}} \right) \tag{7}$$

其中 $\tau_{\text{in}} = 2nl/c$, 为光子在有源区中的往返渡越时间, $\varphi_1 = \omega_0 \tau + \varphi(t) - \varphi(t - \tau)$, (7) 式为外腔反馈率的普适表达式. 在弱反馈下, 即 $r_3/r_2 \ll 1$, $r_2 r_3 \ll 1$ 时, 可得出弱反馈外腔的结果^[4]. 而对于强反馈外腔, 利用强反馈下的条件: $r_3/r_2 \gg 1$ 和 $r_2 r_3 \ll 1$, 再对(7)式中的 $E(t)$, $\varphi(t)$ 利用一阶 Taylor 展开式:

$$\begin{cases} \frac{E_0(t-\tau)}{E_0(t)} \approx 1 - \frac{I}{2I}\tau \\ \varphi(t) - \varphi(t-\tau) \approx \dot{\varphi}(t)\tau \end{cases} \quad (8)$$

即可得到:

$$\gamma_{\text{ext}} = \gamma_1 + j\gamma_2 \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{1}{\tau_{\text{in}}} \left[\ln \frac{r_3}{r_2} - \frac{I}{2I}\tau + \frac{r_2}{r_3} \cos(\omega_0\tau) + \frac{r_2}{r_3} \frac{I}{2I}\tau \cos(\omega_0\tau) - \frac{r_2}{r_3} \dot{\varphi}\tau \sin(\omega_0\tau) \right] \\ \gamma_2 = \frac{1}{\tau_{\text{in}}} \left[\dot{\varphi}\tau - \frac{r_2}{r_3} \sin(\omega_0\tau) - \frac{r_2}{r_3} \frac{I}{2I}\tau \sin(\omega_0\tau) - \frac{r_2}{r_3} \dot{\varphi}\tau \cos(\omega_0\tau) \right] \end{cases} \quad (10)$$

利用上述结果, 并引入朗之万(Langevin)噪声项 $F_i(t)$ ($i=I, \varphi, N$)^[6], 可得到关于相位 φ , 光强 $I=|E|^2$ 和注入载流子数 N 的一组方程:

$$\begin{cases} AI + 2IB\dot{\varphi} = (G - \gamma)I + \frac{2I}{\tau_{\text{in}}} \left[\ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_2}{r_3} \cos(\omega_0\tau) \right] + F_I(t) \\ A\dot{\varphi} - \frac{B}{2I}I = -(\omega_0 - \Omega) + \frac{\alpha}{2}(G - \gamma) + \frac{1}{\tau_{\text{in}}} \frac{r_2}{r_3} \sin(\omega_0\tau) + F_\varphi(t) \\ \dot{N} = J - GI - SN + F_N(t) \end{cases} \quad (11)$$

其中 J 为注入电流, S 为载流子复合速率, $A=1+[1-(r_2/r_3)\cos(\omega_0\tau)](\tau/\tau_{\text{in}})$, $B=(\tau/\tau_{\text{in}})(r_2/r_3)\sin(\omega_0\tau)$. 根据文献[4]的一般分析方法; 对(11)式进行付立叶(Fourier)变换后, 可求得相位项 $\varphi(t)$ 在频域中的表示式 $\varphi(\omega)$, 考虑到强反馈下外腔激光器应工作于最低阈值模式 ($\omega_0\tau=2m\pi$), 并对与线宽有关的 $\varphi(\omega)$ 在复平面中的极点 $\omega_p=0$ 求环路积分即可得到强反馈外腔半导体激光器的线宽为:

$$\Delta\nu = \Delta\nu_0 \frac{1}{\left[1 + \frac{\tau}{\tau_{\text{in}}}(1 - \frac{r_2}{r_3})\right]^2} \quad (12)$$

其中 $\Delta\nu_0$ 为无外腔时的激光器本征线宽.

4 强反馈外腔半导体激光器线宽行为分析

由式(12)可以看出, 对于强反馈外腔激光器, 由于 $r_2 \ll r_3, \tau \gg \tau_{\text{in}}$, 因此激光器的线宽将得到压窄, 可以实现窄线宽的激光输出, 实验中已经利用强反馈外腔半导体激光器得到了小于 1kHz 的窄线宽输出^[3], 并且外腔长度越长, 线宽越窄. 外腔反馈率 r_3 越大, 线宽也越窄. 减小 r_2 , 即对激光器耦合面镀增透膜, 有利于线宽压窄. 在 $r_2=0$ 的极端情况下, 有:

$$\Delta\nu = \Delta\nu_0 \frac{1}{\left[1 + \frac{\tau}{\tau_{\text{in}}}\right]^2} \quad (13)$$

这时激光器的线宽行为完全为外腔长所控制, 而与 r_3 无关.

图 2 中给出了在不同 R_2 值情况下, 分别利用数值解^[6]、强反馈线宽公式(12)和弱反馈线宽公式^[4]得到的激光器线宽特性曲线. 结果表明随 R_3 的增大, 线宽将得到压窄, 而且在 $R_3/R_2 < 10$ 及 $R_3/R_2 > 10$ 的区域, 弱反馈近似及强反馈近似结果分别得到与数值解结果符合得相当好. 曲线还表明, 强反馈下线宽压窄率随 R_3 的变化比弱反馈下的变化要缓慢.

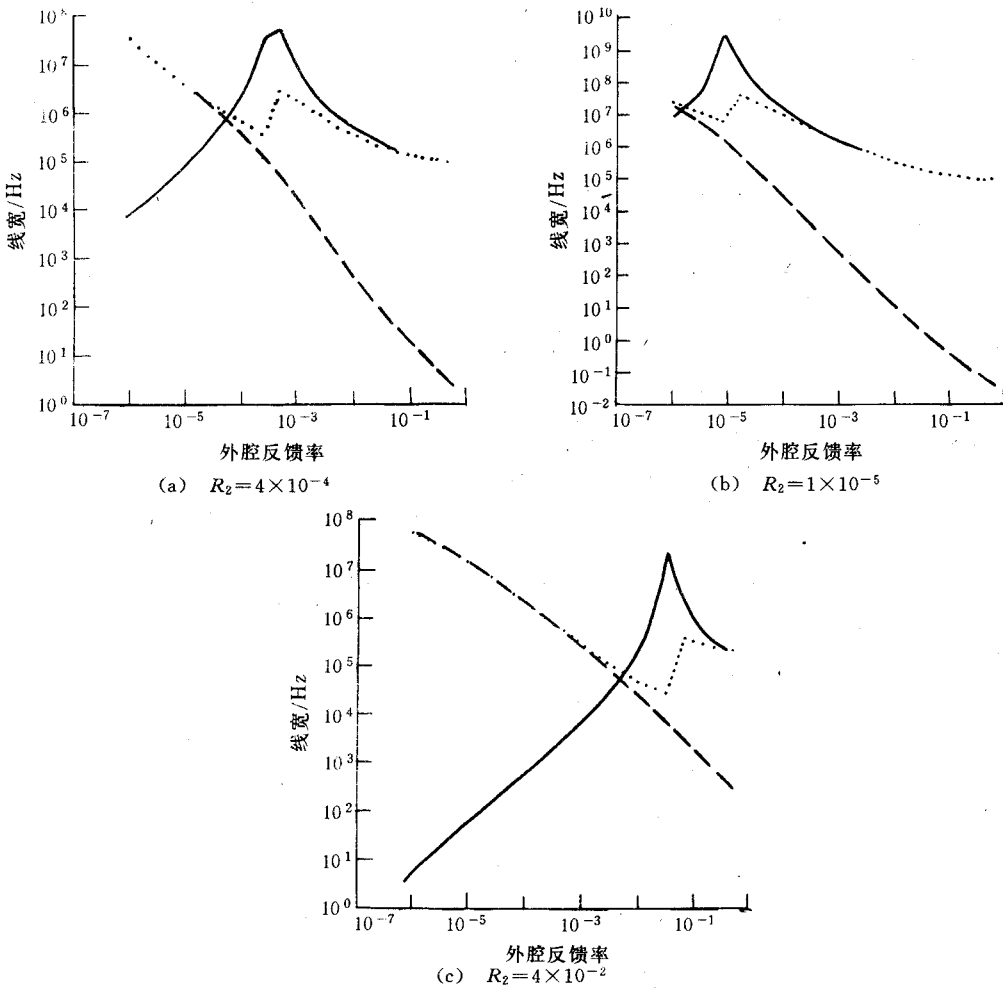


图 2 外腔半导体激光器线宽与外腔反馈率关系

其中 $R_1=0.32$, $L=3\text{cm}$, $n=3.6$, $l=230\mu\text{m}$, $\alpha=5.3$. 实线: 强反馈公式; 虚线: 弱反馈公式; 点线: 数值解

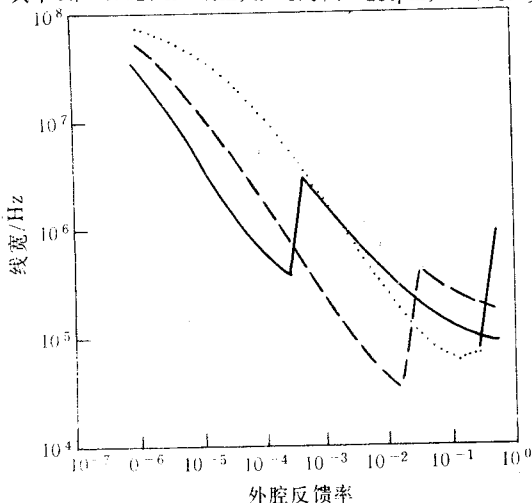


图 3 激光二极管耦合面不同镀膜情况下的线宽压窄特性

其中 $R_1=0.32$, $L=3\text{cm}$, $n=3.6$, $l=230\mu\text{m}$, $\alpha=5.3$
虚线: $R_2=3 \times 10^{-2}$ 实线: $R_2=3 \times 10^{-4}$ 点线: $R_2=0.32$

图 3 为激光管耦合面不同镀膜情况下(即不同 R_2 值)的线宽压窄情况, 曲线表明, 在一定条件下, 弱反馈外腔虽然可能得到比强反馈外腔更窄的线宽, 然而由于强反馈外腔的模式比弱反馈外腔的模式更加稳定, 因此在实际应用中大多采用强反馈外腔方案.

5 结论

本文考虑了强反馈外腔半导体激光器中外腔的多次反射作用, 导出了强反馈外腔激光器的线宽表达式. 分析结果表明, 该公式与数值计算结果符合很好, 并且在

一定条件下，采用弱反馈外腔可以得到比强反馈外腔更窄的线宽。

参 考 文 献

- [1] M. Fukuda *et al*, *J. Lightwave Tech.*, 1989, **7**(10):1504—1509.
- [2] N. A. Olsson *et al*, *J. Lightwave Tech.*, 1987, **5**(4):510—515.
- [3] R. Wyatt, *Electron. Lett.*, 1985, **21**(15):658—659.
- [4] G. P. Agrawal, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **20**(5):468—471.
- [5] C. H. Henry, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **19**(9):1391—1397.
- [6] R. F. Kazarinov *et al*, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **23**(9):1401—1409.

Linewidth Performance Analysis of Semiconductor Lasers with Strong Feedback External Cavity

Chai Yanjie, Zhang Hanyi and Zhou Bingkun

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

Received 17 March 1995, revised manuscript received 20 June 1995

Abstract Linewidth analysis of strongly coupled external cavity semiconductor laser is performed, and a linewidth reduction formula is given. The results show that this formula coincide with the numerical result perfectly, and in certain situations the linewidth of weakly coupled external cavity semiconductor laser can be narrower than the strongly coupled ones.

PACC: 4255P, 4260D, 3270