

# 弱光反馈对半导体激光器 AM 和 FM 噪声谱的影响

李 林 林  
(郑州大学)

## Effect of weak optical feedback on AM and FM noise spectra of semiconductor lasers

Li Linlin  
(Zhengzhou University, Zhengzhou)

**Abstract:** Both FM noise spectrum and AM noise spectrum of a semiconductor laser(LD) can be changed by weak optical feedback under proper conditions. The suppression of noise is accompanied by the reduction of relaxation oscillating frequency.

**Key words:** optical feedback, laser noise

### 一、引 言

相干光通信系统具有灵敏度高、选择性好及可采用波分复用等优点<sup>[1]</sup>。为了实现相干光通信系统,一个首要的问题便是抑制作为发射机振荡器与接收机本地振荡器的 LD 的噪声。光反馈是抑制 LD 噪声的有效手段,近年来人们对此进行了大量研究。然而,这些研究一般都局限于 LD 的线宽<sup>[2,3]</sup>。由于 LD 的场功率谱通常不是洛伦兹型的<sup>[4]</sup>,因此,必须研究 LD 的 FM 和 AM 噪声功率谱才有实际意义。

### 二、分 析

描述弱光反馈 LD 腔中光子产生算符  $b^+(t)$  的运动方程为<sup>[5,6]</sup>

$$\frac{d}{dt} b^+ = (j\omega - k) b^+ + \sum_{kk'} g_{kk'}^* a_{kc}^+ a_{k'v} + \eta f_a b_T^+ + F_1^+ \quad (1)$$

$\omega$  为腔频率  $k=1/2\tau_p$ , 是腔损耗,  $\tau_p$  是光子寿命,  $g_{kk'}^*$  为具有波数  $k$  的导带态与具有波数  $k'$  的价带态间的光跃迁算符,  $a_{kc}^+ a_{k'v}$  为偶极矩算符,  $\eta$  为反馈到 LD 的光场与 LD 内光场的幅度比,  $f_a$  为 LD 的纵模间隔,  $b_T^+ = b^+(t-T)$ ,  $T$  为光在外腔往返一周所需时间,  $F_1^+(t)$  为漂移算符。

在绝热消除偶极矩算符后,取<sup>[5]</sup>

$$\sum_{kk'} \frac{|g_{kk'}^*|^2 (n_{kc} - n_{k'v})}{j(\Omega - \varepsilon_{kk'}) + \tau_{kk'}} = \frac{1}{2} G + j\delta\omega \quad (2)$$

$n_{kc}$  与  $n_{k'v}$  分别为导、价带的电子算符,  $\Omega$  为激射频率,  $\varepsilon_{kk'}$  是具有波数  $k$  的导带态与具有波数  $k'$  的价带态的频率间隔,  $\tau_{kk'}$  为二态间的相对相位延迟,  $G$  为 LD 的增益, 它是载流子数  $N$  的函数<sup>[5]</sup>

$$G(N) = G_0(N - N_0) \quad (3)$$

$G_0$  与  $N_0$  分别为增益与材料参数。

为了消除(1)式中的高频振荡项  $\omega$ , 令<sup>[5]</sup>

$$b^+(t) = [n(t)]^{1/2} e^{-j\Omega t - j\varphi(t)} \quad (4)$$

则  $n(t)$  为 LD 腔中的光子数,  $\varphi(t)$  为 LD 光场的瞬时相位, 同时考虑到  $T \ll 1$ ,  $n(t-T) \approx n(t) - T\dot{n}(t)$ ,  $\varphi(t-T) = \varphi(t) - T\dot{\varphi}(t)$ , 同时将(2)~(4)式代入到(1)式中, 就有<sup>[5]</sup>

$$k_c \dot{n} + 2k_s n \dot{\varphi} = \left[ G_0(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} + 2\eta f_d \cos \Omega T \right] n + R_s + F_n \quad (5)$$

$$-\frac{k_s}{2n} \dot{n} + k_c \dot{\varphi} = \frac{\alpha}{2} \left[ G_0(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right] - \eta f_d \sin \Omega T + F_\varphi \quad (6)$$

式中, 利用了  $\Omega = \omega_0 + \frac{\alpha}{2} \left[ G_0(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right]$ <sup>[6]</sup>,  $\alpha$  为线型展宽因子(折射率变化的实、虚部之比),  $\omega_0 = \omega + \delta\omega$ ,  $R_s$  是自发辐射到激射模的速率,  $F_n$  与  $F_\varphi$  为朗之万噪声源<sup>[5]</sup>,

$$k_c = 1 + \eta f_d T \cos \Omega T, \quad k_s = \eta f_d T \sin \Omega T$$

LD 有源区的载流子数  $N$  服从<sup>[5]</sup>

$$\dot{N} = P - \frac{N}{\tau_s} - G_0(N - N_0)n + F_N \quad (7)$$

$P$  为泵浦率,  $\tau_s$  为载流子寿命,  $N/\tau_s$  为总的载流子复合速率,  $F_N$  为朗之万噪声源。

在无光反馈时,  $\eta = 0$ , (5)~(7)式就为普通单腔 LD 的广义速率方程组。

为求解噪声特性, 令  $n(t) = \bar{n} + \delta n(t)$ ,  $\bar{n}$  为稳态平均光子数, 可由(5)~(7)式的稳态平均求得,  $\delta n(t)$  为绕  $\bar{n}$  所作的扰动。则(5)~(7)式变成

$$k_c \delta \dot{n} + 2k_s \bar{n} \delta \dot{\varphi} = -R_s/\bar{n} \delta n + G_0 \bar{n} \delta N + F_n(t) \quad (8)$$

$$-\frac{k_s}{2\bar{n}} \delta \dot{n} + k_c \delta \dot{\varphi} = \frac{\alpha}{2} G_0 \delta N + F_\varphi(t) \quad (9)$$

$$\delta \dot{N} = -G_0(N - N_0) \delta n - \frac{1}{\tau_R} \delta N + F_N(t) \quad (10)$$

上面,  $1/\tau_R = 1/\tau_s + G_0 \bar{n}$ , 且为方便计, 表示稳态平均的符号省略了。

因此即可得相对强度噪声谱(AM 噪声谱):

$$S_{AM}(\omega) = \frac{|\dot{\varphi}(\omega)|^2}{\bar{n}^2 |D(\omega)|^2} \left\{ 2D_{nn} \left[ k_c^2 \left( \omega^2 + \frac{1}{\tau_R^2} \right) \right] + 2D_{NN} [G_0^2 \bar{n}^2 (k_c + \alpha k_s)^2] + 2D_{\varphi\varphi} \left[ 4k_s^2 \bar{n}^2 \left( \omega^2 + \frac{1}{\tau_R^2} \right) \right] + 2D_{nN} [2k_c G_0 \bar{n} (k_c + \alpha k_s) / \tau_R] \right\} \quad (11)$$

$$D(\omega) = j\omega [G_0^2 \bar{n} (N - N_0) (k_c + \alpha k_s) - (k_c^2 + k_s^2) \omega^2 + j\omega (k_c^2 + k_s^2) / \tau_R] + j\omega k_c R_s / \bar{n} + k_c R_s / \bar{n} \tau_R$$

同理可得 FM 噪声谱:

$$S_{\text{FM}}(\omega) = \frac{|j\omega|^2}{|D(\omega)|^2} \{ 2D_{nn}(M_1^2 + M_2^2) + 2D_{NN}(M_3^2 + M_4^2) - 2D_{\varphi\varphi}(M_5^2 + M_6^2) - 2D_{nN}(2M_1M_3 + 2M_2M_4) \} \quad (12)$$

上式中

$$M_1 = \frac{\alpha}{2} G_0^2 (N - N_0) + k_s \omega / 2n\tau_R, \quad M_2 = -\omega^2 k_s / 2n$$

$$M_3 = \frac{\alpha}{2} G_0 R_s / n, \quad M_4 = \frac{\omega}{2} G_0 (\alpha k_c + k_s)$$

$$M_5 = R_s / n\tau_R + G_0^2 n (N - N_0) - k_c \omega^2, \quad M_6 = k_c \omega / \tau_R + R_s \omega / n$$

(11) 和 (12) 式是由 (8) ~ (10) 式的傅里叶变换得到的, 式中  $2D_{nn}$  等为稳态扩散系数<sup>[5]</sup>。

如果不考虑载流子噪声, 同时, 由于  $G_0^2 n (N - N_0) \gg R_s / n\tau_R, G_0^2 n (N - N_0) \gg \frac{\alpha}{2} G_0 R_s / n$ , 则洛伦兹线宽公式为<sup>[7]</sup>

$$\Delta\nu_{1/2} \approx \frac{1}{2\pi} S_{\text{FM}}(0) = \frac{(1 + \alpha^2) 2D_{\varphi\varphi}}{2\pi (k_c + \alpha k_s)^2} = \frac{\Delta\nu_{1/20}}{(k_c + \alpha k_s)^2} \quad (13)$$

上式推导中利用了  $2D_{nn} = 4n^2 2D_{\varphi\varphi}$ <sup>[5]</sup>。  $\Delta\nu_{1/20}$  为无光反馈时普通 LD 的线宽。显然, 光反馈使 LD 的线宽压缩了  $[(\eta f_d T) (1 + \alpha^2)^{1/2} \cos(\Omega T - \text{tg}^{-1} \alpha) + 1]^2$  倍。

### 三、讨 论

数值计算所需参数如下:  $G_0 = 5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ,  $N_0 = 2 \times 10^8$ ,  $\tau_p = 2 \times 10^{-12} \text{ s}$ ,  $\tau_s = 2 \times 10^{-9} \text{ s}$ ,  $R_s = 1.5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ,  $\alpha = 3$ ,  $f_d = 125 \text{ GHz}$ ,  $\Omega = 2.2 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ ,  $\eta = 0.05$ <sup>[5~7]</sup>。为讨论方便, 称  $\eta f_d T$  为反馈强度,  $\psi = \Omega T$  表示反馈相位。

图 1 给出了改变  $T$  从而改变反馈强度对噪声谱的影响,  $T = 0$  表示无反馈, 图中归一化泵浦率  $Q = 1.1$ 。显然, 随着  $T$  的大范围变化,  $\psi$  也变化。由图中可见, 光反馈使得张弛振荡频率降低了, 且反馈强度越大, 降低的程度亦越大。这就是弱光反馈降低 LD 噪声的代价。由图 1(a) 可见, 反馈强度越大, FM 噪声的降低越明显; 但图 1(b) 表明, 反馈强度的大小仅影响到 AM 噪声谱的高频端。因噪声功率为噪声谱的积分, 故反馈对 FM 和 AM 噪声均有抑制作用。

图 2 给出了微调  $T$  从而改变反馈相位对 FM 和 AM 噪声谱的影响。图中,  $T_0 = 2 \times 10^{-9} \text{ s}$ ,  $Q = 1.1$ 。由图 2 表明,  $\psi$  对噪声谱的影响极大, 对 FM 噪声谱而言, 它即改变了低频端的谱特性, 也改变了高频端的谱特性; 但对 AM 噪声谱而言, 反馈相位和反馈强度对谱特性的影响就截然不同, 前者对低频端的影响更大。

图 2 还表明, 当  $\psi$  接近  $\text{tg}^{-1} \alpha$  时, 噪声谱取值较小, 这同对线宽的影响类似[(13)式]。另外, 反馈相位越接近  $\text{tg}^{-1} \alpha$ , 张弛振荡频率越高。这可由 (11) 和 (12) 式中的  $D(\omega)$  项来解释。张弛振荡频率

$$\omega_R \approx \left\{ \frac{G_0^2 n (N - N_0) [\eta f_d T (1 + \alpha^2)^{1/2} \cos(\Omega T - \text{tg}^{-1} \alpha) + 1]}{1 + (\eta f_d T)^2 + 2\eta f_d T \cos \Omega T} \right\}^{1/2},$$

$\psi = \Omega T = \text{tg}^{-1} \alpha$  时  $\omega_R$  最大。

图 3 给出了两个不同的泵浦率情况下的 FM 噪声谱。  $T = 2 \times 10^{-9} \text{ s}$  表示有反馈,  $T = 0$  表示 LD 自由运转。归一化泵浦率分别取 1.1 与 1.5。由图 3 可见, 尽管光反馈抑制了张弛振荡

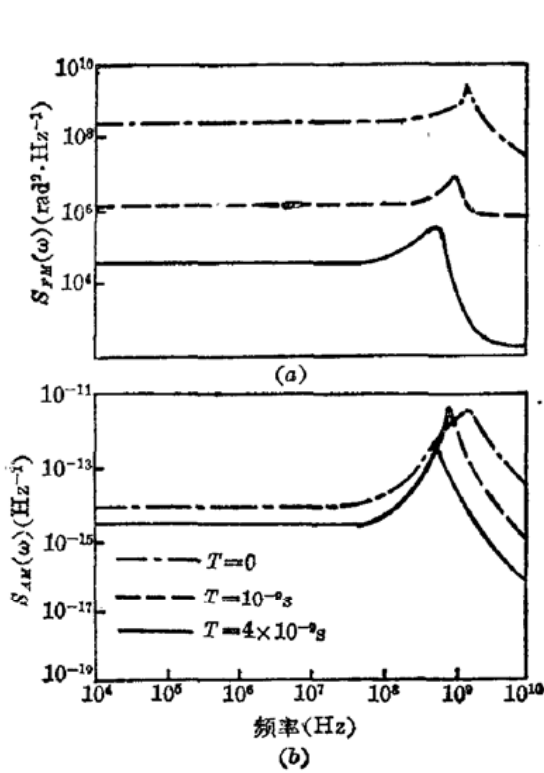


图1 反馈强度对噪声的影响

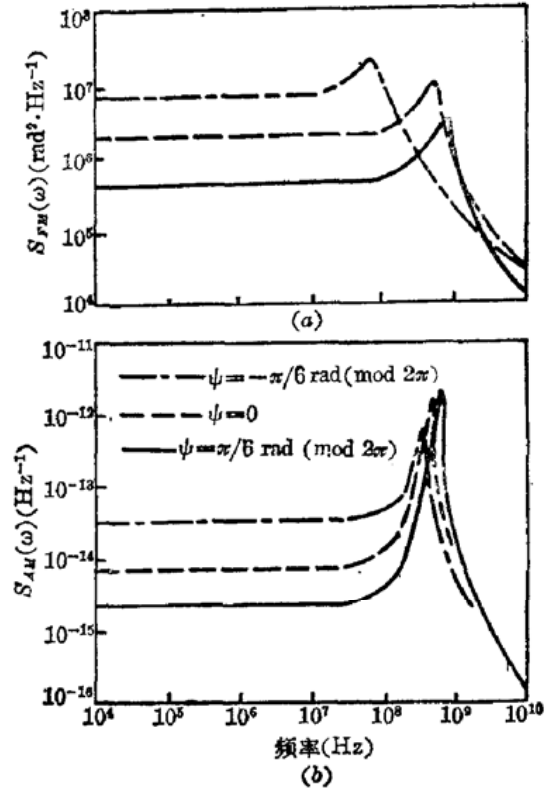


图2 反馈相位对噪声的影响

频率(也即调制截止频率), 但通过加大泵浦率来使张弛振荡频率增大(从而可使调制速率增大), 同时使 LD 具有较低 FM 噪声却是可行的。因此, 当需要较大的张弛振荡频率时, 可以采用增大泵浦率的方法。

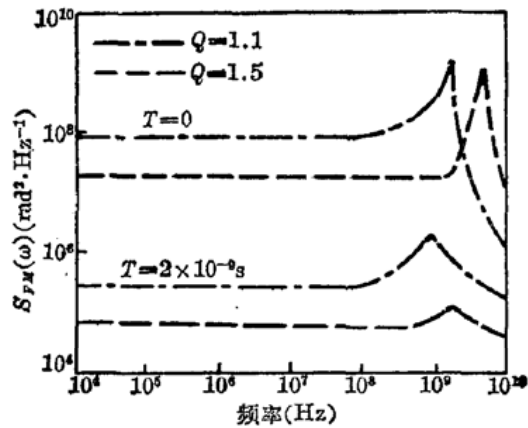


图3 泵浦率对 FM 噪声谱的影响

参 考 文 献

- 1 T. Kimura, *J. Lightwave Technol.*, **LT-5**, 414(1987)
- 2 R. Wyatt et al., *Electr. Lett.*, **19**, 110(1983)
- 3 G. P. Agrawal, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20**, 468(1984)
- 4 C. H. Henry, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**, 1391(1983)
- 5 李林林 et al., *中国激光*, **14**(9), 529(1987)
- 6 B. Tromborg et al., *IEEE J. Quant., Electr.*, **QE-20**, 1023(1984)
- 7 李林林 et al., *电子学报*, **15**(4), 62(1987)

(收稿日期: 1988年6月10日)