

注入锁定半导体激光器的相位调制特性研究

李 林 林

(郑州大学电子系)

Study of phase modulation characteristics for injection-locked semiconductor lasers

Li Linlin

(Zhengzhou University, Zhengzhou)

提要: 本文研究了在考虑载流子变化引起折射率变化的情况下, 注入锁定半导体激光器(LD)的相位调制(PM); 并提出了在PM时, 对伪强度调制(SIM)的抑制。

关键词: 相位调制, 伪强度调制, 注入锁定

一、引 言

近年来, 相干光通信系统以其接收机灵敏度、可采用波分复用等优点引起了人们的重视^[1,2]。实现LD的PM就具有极其重要的意义^[3~6]。用光电反馈的方法可以实现LD的PM, 但其相位响应特性受到环路时延的严重影响, 只能在较低调制频率(≤ 15 MHz)下, 获得平坦的相位响应曲线^[5]。

人们对LD的注入锁定进行了多方面的研究, 但是, 还没有考虑载流子变化引起折射率变化对注入锁定LD的PM的影响。另外, 在实现LD直接PM的同时, SIM也将伴随着出现, 它将极大地影响到相干PSK光通信系统的性能^[1,2]。

本文从描述注入锁定LD的量子力学方程出发, 考虑了载流子变化引起的折射率变化的影响, 从抑制SIM的角度, 研究了注入

锁定LD的PM特性, 给出了注入光功率、LD偏置、锁定相位及线宽增长因子等对LD的PM的影响。这里的结论对相干光PSK系统是极为有用的。

二、理 论

描述注入锁定LD腔中光子产生算符 $b^+(t)$ 的运动方程为^[7~9]:

$$\frac{d}{dt} b^+ = \left(j\omega - \frac{1}{2\tau_p} \right) b^+ + j \sum_{k,k'} g_{kk'}^* a_{kk'}^+ a_{kk'} + f_a b_1^+ \quad (1)$$

式中, ω 为腔频率; τ_p 是光子寿命; $g_{kk'}^*$ 是具有波数 k 的导带态和具有波数 k' 的价带态间的光跃迁矩阵元; $a_{kk'}^+ a_{kk'}$ 为偶极矩算符; f_a 为LD的纵模间隔; $b_1^+(t)$ 为注入光的光子产生算符。

在绝热消除偶极矩算符后, 有^[8,9]

收稿日期 1988年2月1日。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} b^+ &= \left(j\omega - \frac{1}{2\tau_p} \right) b^+ \\ &+ b^+ \sum_{kk'} \frac{|g_{k-k'}^*|^2 (n_{k0} - n_{k'0})}{j(\Omega - \varepsilon_{kk'}) + r_{kk'}} \\ &+ f_d b_1^+ \end{aligned} \quad (2)$$

$\varepsilon_{kk'}$ 为具有波数 k 的导带态和具有波数 k' 的价带态的频率间隔; $r_{kk'}$ 为二态间的相对相位延迟; Ω 为 LD 锁定时的激射频率, 在锁定时, 它也是注入光的频率^[7]; n_{k0} 和 $n_{k'0}$ 分别为导、价带的电子算符。

令

$$\sum_{kk'} \frac{|g_{k-k'}^*|^2 (n_{k0} - n_{k'0})}{j(\Omega - \varepsilon_{kk'}) + r_{kk'}} = \frac{1}{2} G + j\delta\omega \quad (3)$$

即上式左端实部为 $\frac{1}{2} G$, 虚部为 $\delta\omega$ 。 G 为 LD 的增益, 它是载流子数 N 的函数

$$G(N) = G_0(N - N_0) \quad (4)$$

G_0 和 N_0 分别为增益和材料特性参数。

因此, (2) 式变成

$$\frac{d}{dt} b^+ = \left(j\omega_0 + \frac{G}{2} - \frac{1}{2\tau_p} \right) b^+ + f_d b_1^+ \quad (5)$$

式中 $\omega_0 = \omega + \delta\omega$, 为 LD 自由振荡时的频率, 也即对普通 LD 而言, 激射频率偏离于腔频率 ω 一个差值 $\delta\omega$ 。

如令

$$B^+(t) = b^+(t) e^{-j\Omega t} \quad (6)$$

$$B_1^+(t) = b_1^+(t) e^{-j\Omega t} \quad (7)$$

则(5)式变成

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} B^+ &= \left[j(\omega_0 - \Omega) + \frac{1}{2} G - \frac{1}{2\tau_p} \right] B^+ \\ &+ f_d B_1^+ \end{aligned} \quad (8)$$

可看到, 注入锁定时的激射频率不同于自由振荡时的激射频率, 从而, 将会影响到 PM 特性及 SIM 特性。

为了用光子数 $n = B^+ B$ 和光场的相位 $\varphi(t)$ 来描述 LD 的瞬态特性, 令

$$B^+(t) = [n(t)]^{1/2} e^{j\varphi(t)} \quad (9)$$

$$B_1^+(t) = [n_1(t)]^{1/2} e^{j\varphi_1(t)} \quad (10)$$

代入(8)式, 分离实、虚部; 同时, 考虑到自发辐射耦合到激射模的影响, 则有

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} n &= \left[G_0(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right] n \\ &+ G_0 N + 2(n_1 n)^{1/2} \cos \Psi \cdot f_d \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \varphi = -(\omega_0 - \Omega) + (n_1/n)^{1/2} \sin \Psi \cdot f_d \quad (12)$$

$$\Psi(t) = \varphi_1(t) - \varphi(t) \quad (13)$$

因为激射频率 Ω 可表示为^[7]

$$\Omega = \omega_0 + \frac{1}{2} \alpha \left[G_0(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right] \quad (14)$$

α 为线宽增长因子, 它表示了载流子变化引起的折射率变化。所以, (12) 式可写为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \varphi &= \frac{1}{2} \alpha \left[G_0(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right] \\ &+ f_d (n_1/n)^{1/2} \sin \Psi \end{aligned} \quad (15)$$

LD 有源区的载流子数 N 服从

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} N &= P - \frac{N}{\tau_s} - GB^+ B \\ &= P - \frac{N}{\tau_s} - G_0(N - N_0)n \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $P = I/e$ 为泵浦率; I 为 LD 的注入电流; e 是电子电荷; τ_s 为载流子寿命; N/τ_s 为总的载流子复合速率。

由(11)、(15)和(16)式可见, 由于外部光注入, LD 的瞬态特性改变了, 稳态特性 ($\frac{d}{dt} n = \frac{d}{dt} \varphi = \frac{d}{dt} N = 0$) 也改变了, 而改变的程度取决于外部注入光的功率 (正比于 n_1) 以及两光场的相位差 ψ 。

为了分析注入锁定 LD 的 PM 特性, 设其注入电流为

$$I(t) = I_b + I_m e^{j\omega_m t} \quad (17)$$

I_b 为 LD 的偏置; I_m 为调制分量; $\omega_m = 2\pi f_m$; f_m 为调制频率。

这样, 光子数等均可写为

$$\begin{aligned} n &= n_b + n_m e^{j\omega_m t}, \quad \varphi = \varphi_b + \varphi_m e^{j\omega_m t}, \\ N &= N_b + N_m e^{j\omega_m t}. \end{aligned}$$

因此, 在不考虑注入光噪声的情况下, 由一阶近似可得

$$j\omega_m n_m = a_{11}n_m + a_{12}N_m + a_{13}\varphi_m \quad (18)$$

$$j\omega_m N_m = a_{21}n_m + a_{22}N_m + I_m/e \quad (19)$$

$$j\omega_m \varphi_m = a_{31}n_m + a_{32}N_m + a_{33}\varphi_m \quad (20)$$

式中,各符号为

$$a_{11} = -G_0 N_b / n_b - f_d (n_1 / n_b)^{1/2} \cos \varphi_L,$$

$$a_{12} = G_0 (n_b + 1)$$

$$a_{13} = 2f_d (n_1 n_b)^{1/2} \sin \varphi_L,$$

$$a_{21} = -G_0 (N_b - N_0)$$

$$a_{22} = -\frac{1}{\tau_s} - G_0 n_b,$$

$$a_{31} = \frac{1}{2} f_d \cdot r / n_b \cdot \sin \varphi_L$$

$$a_{32} = \frac{\alpha}{2} G_0,$$

$$a_{33} = f_d r \cos \varphi_L$$

$$r = (n_1 / n_b)^{1/2},$$

$$\varphi_L = \varphi_{1b} - \varphi_b$$

φ_{1b} 为注入光的稳态相位, φ_L 为稳态锁定相位。

由(18~20)式可见,注入锁定较大地改变了LD的调制特性。首先,由于相位偏移项(φ_m)耦合到光子偏移的方程(18),而在一般LD调制时,(18)式该项是不存在的。另一方面,光子漂移项 n_m 也出现在相位偏移的方程(20)中,而对一般LD, $j\omega_m \varphi_m$ 仅正比于 N_m 。此外,注入锁定对LD调制特性的影响也体现在各系数 a_{ij} 上。由 a_{ij} 的表达式可看到:注入光功率越大,对调制特性的影响越大,而 φ_L 的任意改变也会使调制特性变化。所以,由(18)~(20)式即可详细研究获得较好的PM特性的条件。

由于光功率

$$W(t) = \hbar \Omega n(t) \cdot \frac{c}{2L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) = C_n(t) \quad (21)$$

\hbar 为普朗克常数除以 2π ; c 为光速; L 为LD腔长; R 为端面反射率,所以可得注入锁定LD的强度调制

$$\text{SIM} = D_1(f_m) / D(f_m) I_m \quad (\text{mW/mA}) \quad (22)$$

这里

$$D_1(f_m) = C \frac{I_m}{e} [a_{13}a_{32} - a_{12}a_{33} + j\omega_m a_{12}] \quad (23)$$

$$\begin{aligned} D(f_m) = & a_{13}(a_{31}a_{22} - a_{21}a_{32}) \\ & + \omega_m^2 (a_{11} + a_{22}) \\ & - a_{33}(a_{11}a_{22} - \omega_m^2 - a_{12}a_{21}) \\ & + j\omega_m [a_{11}a_{22} - \omega_m^2 - a_{12}a_{21} \\ & + a_{33}(a_{11} + a_{22}) - a_{13}a_{31}] \quad (24) \end{aligned}$$

同理,可得注入锁定LD的PM的相位偏移

$$PD = D_3(f_m) / D(f_m) I_m \quad (\text{rad/mA}) \quad (25)$$

式中,

$$D_3(f_m) = \frac{I_m}{e} [a_{12}a_{31} - a_{11}a_{32} + j\omega_m a_{32}] \quad (26)$$

由于在得到PM的同时,也伴随着SIM,因此定义SIM-PD比为

$$\text{PSR} = \text{SIM} / \text{PD} = D_1(f_m) / D_3(f_m) \quad (\text{mW/rad}) \quad (27)$$

其意义为在得到单位相位偏移的同时,产生伪强度调制的功率。显然,|PSR|越小越好。

三、讨 论

注入锁定可使LD产生PM,其原因在于LD的振荡频率被锁定在注入光的频率上,当对LD直接调频时,由于LD的频率不能变化,为了满足锁定态,其相位就不得不变化,这样就产生了LD的PM^[1,3]。

为了便于分析LD的PM,下面进行一些数值计算。所需参数如下: $L=200 \mu\text{m}$, 振荡波长为 $1.3 \mu\text{m}$, $R=0.32$, $G_0=10^4 \text{s}^{-1}$, $N_0=2 \times 10^8$, $\tau_p=2 \times 10^{-12} \text{s}$, $\tau_s=2 \times 10^{-9} \text{s}$, $f_d=125 \text{GHz}$, $\alpha=6.6^{[7-9]}$ 。

图1给出了在归一化泵浦率 $Q=I_b/I_{th}=1.1$ 情况下的PM特性, I_{th} 为阈值电流。曲线1均表示普通单腔LD进行调频时的

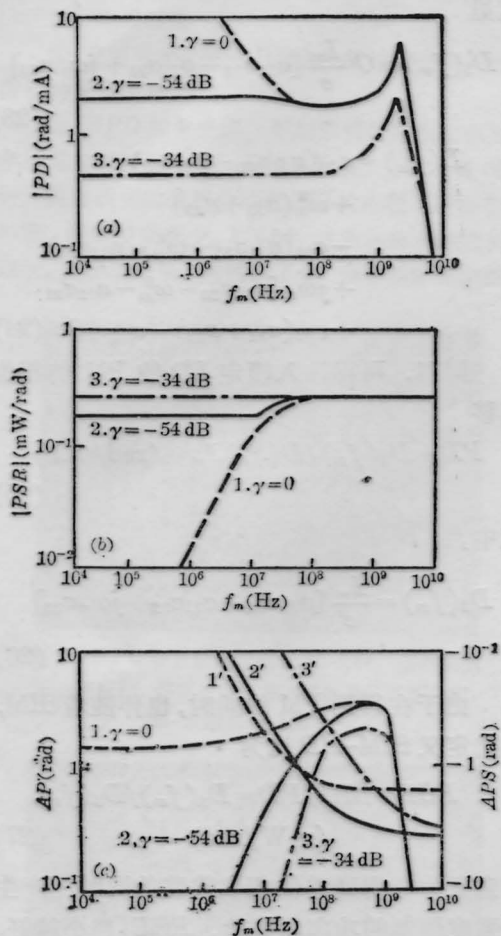


图1 注入锁定调相

PD 等, 曲线 2 和 3 则表示 $r = -54\text{ dB}$, $r = -34\text{ dB}$, $\varphi_L = 0$ 时的情况。 $r = 0$ 表示无外部光注入。

由图 1(a) 可见, 当 LD 未被注入光时, 在低频端, 其相位偏移很大, 而在接近张弛谐振峰时, 出现一个极小值, 然后开始谐振, 并随着频率的增加迅速下降。另外, 注入锁定可以改善 LD 的 PM 特性, 也即, 可以在较宽的频率范围内, 获得较宽的平坦 PM 特性。其原因是注入锁定对不同的调制频率下的 PM 特性影响是不同的 (参见 (25) 式)。在低频端, 它对 PD 的抑制较强烈, 而在较高频率时抑制 PD 的能力较差 (接近或超过了锁定带宽), 从而获得了平坦的 PM 特性。图 1(a) 还指出: 注入较小的光功率可获得较大的

PD ; 但注入较大的光功率又能获得较宽的平坦 PM 特性, 这与 [4] 的实验结果是吻合的。

图 1(b) 给出了与图 1(a) 同样情况下的 SIM- PD 比。在注入较小光功率的情况下, $|PSR|$ 的值, 也即单位 PD 产生的 SIM 较小。这是由于此时注入锁定对 LD 的 PM 特性影响相对较小, 而无光注入时 PD 较大, 由 (27) 式, 这时单位 PD 产生的 SIM 较小。所以, 在对 LD 进行注入锁定 PM 时, 应综合考虑 PD 、SIM 抑制和较宽平坦的 PM 特性几方面的要求, 视具体情况来决定注入光功率的大小。

在图 1(c) 中, 给出了 PD 和 PSR 的幅角。曲线 1、2、3 表示 PD 的幅角, 取值为图 1(c) 左边, AP ; 1'、2'、3' 表示相应的 PSR 的幅角, 取值为图 1(c) 右边 APS 。由图 1(c) 可了解到, 注入锁定改变了 PD 的幅角, 而且, 由于 PD 与 PSR 反相, 说明 PD 与 SIM 也反相。

图 2 说明了锁定相位 φ_L 对 LD 的 PD 和 SIM 的影响, $r = -31\text{ dB}$, $Q = 1.5$ 。可看到, 并非在 $\varphi_L = 0$ 时能获得最大的 PD 。对 (25) 式进行分析可知, 在低频端 $|PD| \propto$

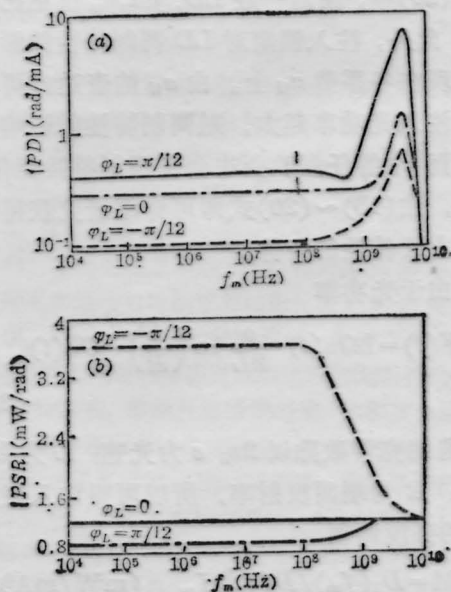


图2 锁定相位的影响

$\sin(\varphi_L + \Phi)$, $\Phi = \text{tg}^{-1} \alpha$, 当

$$\varphi_L + \Phi = \frac{\pi}{2} \pmod{2\pi}$$

时, $|PD|$ 取最大值。这里也说明了载流子变化引起折射率变化对 LD 的 PM 特性的影响。

图 3 给出了不同 α 值时的 PM 特性。 $Q=1.1$, $\varphi_L=0$, $r=-34\text{dB}$ 。 α 越大, 不仅可使 PD 增大, 且可有效地抑制 SIM, 这正是我们所需要的。上述现象可由 (25) 式解释。 α 越大, LD 的相位偏移越大, 这意味着单位 PD 产生的 SIM 越小。

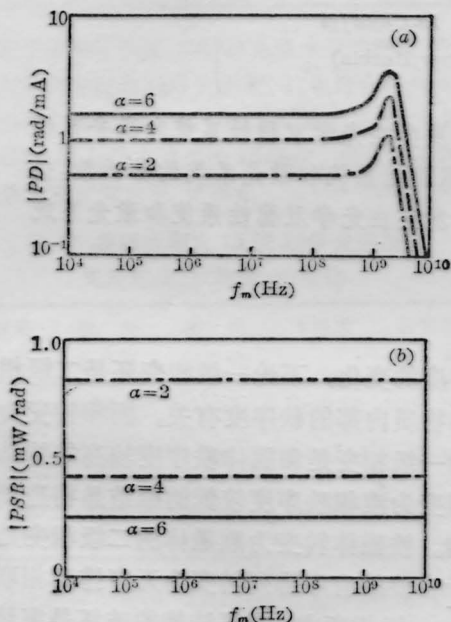


图 3 α 的影响

图 4 表明在 LD 偏置不同时, PM 特性的变化。此时, 注入光功率固定, $\varphi_L=0$, $Q=1.1$, 1.3 和 1.5 分别相应于 $r=-34\text{dB}$, -39dB 和 -41dB 。由图 4 可知, LD 的偏置越低, PD 越大, 对 SIM 的抑制也越强烈; 但偏置越高, 则可获得越宽的平坦 PM 特性, 这与图 1 的结论是类似的。其原因在于普通

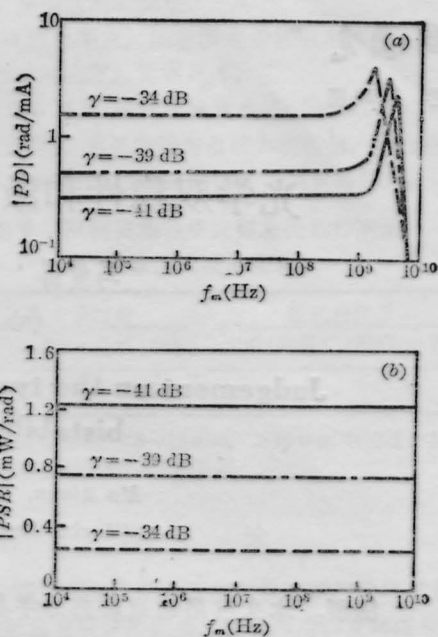


图 4 偏置的影响

单腔 LD 偏置较低时, LD 的调频(调相)性能较好; 另一方面, 当 LD 偏置较高时, 其张弛谐振峰(张弛谐振频率)出现的频率较高, 从而, 有利于注入锁定有效地获得宽的平坦的 PM 特性。

参 考 文 献

- 1 T. Kimura, *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (4); 259 (1987)
- 2 杨恩泽等, 光纤数学通信接收机(人民邮电出版社, 1984), 161-164
- 3 S. Kobayashi *et al.* *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-18** (10), 1662(1982)
- 4 G. Jacobsen *et al.* In Proc. IOOC'83, Tokyo, Japan, 388 (1983)
- 5 G. Wenke *et al.*, *Electr. Lett.*, **21**, (15); 653 (1985)
- 6 R. A. Linke *et al.*, *Electr. Lett.*, **22** (1), 30 (1986)
- 7 F. Mogensen *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-21** (7), 784 (1985)
- 8 李林林 *et al.*, 电子学报, **15** (4), 62 (1987)
- 9 李林林 *et al.*, 中国激光, **14** (9), 529 (1987)