

电负反馈半导体激光器半经典理论*

张建平 李 玲 叶培大

北京邮电学院无线电工程系

1988 年 12 月 5 日收到

本文建立了电负反馈半导体激光器的半经典速率方程模型, 导出此类激光器的 FM 噪声功率谱密度, 从而证明电负反馈技术可压窄激光器线宽。在反馈带宽之内激光器的频偏功率比 (CPR) 减小 $(1 + H)$ 倍, 而带宽以外则不受影响, 因此这类激光器可用作直接调制 FSK 相干传输系统光源。由于激光器直接频率调制时相位延迟的限制, $1/f$ 型 FM 噪声是限制谱线压缩的主要因素。

一、引 言

半导体激光器由于其体积小、功耗低, 可以直接调制等优点被广泛地用作光纤通信系统的光源。但普通半导体激光器是多纵模运转, 即使是分布反馈 (DFB) 半导体激光器其谱线宽度也难以满足相干光纤通信和相干检测的要求^[1]。近年来, 国内外广泛开展了对半导体激光器模谱特性的研究, 以获得性能更好的相干光源。所用方法可分为两类, 一类是耦合腔型^[2-4](光反馈), 通过提高激光器谐振腔 Q 值, 达到压窄谱线的目的。这类方法可把谱线宽度压缩到 1 kHz 以下^[2], 但易受外部条件的影响, 机械振动或温度变化使得谱线宽度也随之起伏。另一类是用 FM 噪声作负反馈以控制半导体激光器的注入电流, 减小线宽(电负反馈)^[5,6]。由于鉴别 FM 噪声方法的不同, 电负反馈技术又分为两种, 一种类似于 FSK 系统中的相干解调, 加本振光源进行光混频, 然后对中频信号限幅放大, 最后由鉴频器提取 FM 噪声^[5]; 另一种则用光学元件(如 F-P 腔)直接鉴频提取噪声^[7]。前者需要一个线宽非常窄, 频率稳定的本振源, 而这本身就很不易做到, 相比之下后者简单得多, 电负反馈技术与光反馈技术相比, 无需改变半导体激光器的腔结构, 所以结构简单、稳定。

Yamamoto 等人对电负反馈技术原理作了全量子分析^[6], 最近 Ohtsu 等人用网络分析方法对电负反馈半导体激光器系统中各部件的性能要求进行探讨, 指出在不使用光电集成器件和高速放大器下的极限线宽压窄率为 630^[7]。本文避免复杂的量子力学计算, 建立了电负反馈半导体激光器的半经典速率方程模型, 推导出电负反馈激光器的 FM 噪声功率谱密度。频偏是半导体激光器的重要参数之一, 直接强度调制系统希望频偏小, 而直接 FSK 调制则希望频偏大, 用 CPR (chirp-to-power ratio, 频偏功率比) 可以表征频偏特性^[4,6]。从速率方程模型求得在小信号近似条件下的 CPR。讨论由于半导体激光器

* 国家自然科学基金资助的课题。

相频特性限制, $1/f$ 型噪声对谱线压窄的影响。

二、FM 噪声功率谱

1. 速率方程模型

图 1 是电负反馈半导体激光器示意图。从激光器发出的光经过 F-P 标准具后, 其光强随着谐振频率的抖动而起伏, 经光电二极管转变为电信号, 再由放大器放大后注入半导体激光器。由于半导体激光器可直接调频的特性从而抵消其 FM 噪声, 以压窄谱线。

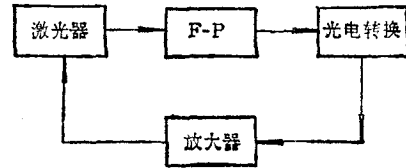


图 1 电负反馈半导体激光器示意图

为建立适合于电负反馈激光器的速率方程模型, 可用熟悉的速率方程组^[8]作为出发点。

$$\frac{dE(t)}{dt} = \left[+j\omega_0 + \frac{1}{2} \left(G(n) - \frac{1}{\tau_p} \right) \right] E(t), \quad (1)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{n(t)}{\tau_s} - G(n)|E(t)|^2, \quad (2)$$

式中 $E(t)$ 为激光器谐振腔内光场; $n(t)$ 为载流子密度; J 为注入电流密度; ω_0 为自由运转时的激光器谐振频率; τ_s 为载流子寿命; $G(n)$ 为增益; τ_p 为光子寿命。设 $E(t)$ 为

$$E(t) = E'(t) \exp\{j(\omega t + \varphi_i(t) + p(t))\} \quad (3)$$

式中 ω 为激光器振荡频率; $\varphi_i(t)$ 表示 FM 噪声项; $p(t)$ 为电负反馈引入的相位调制项。由半导体激光器调制特性可知^[9], 相位调制项正比于 F-P 标准具输出的误差信号, 因而 $p(t)$ 可表示为

$$p(t) = \int_0^t \int_0^\infty h(\tau) \left[\frac{d\varphi_i(t' - \tau)}{dt'} + \Gamma'(t' - \tau) \right] d\tau dt', \quad (4)$$

$h(\tau)$ 为反馈回路脉冲响应, $\Gamma'(t)$ 为反馈回路引入的噪声项^[12]。把 (3) 式代入 (1) 式, 并把其虚部和实部分开得

$$\frac{dE'(t)}{dt} = \frac{1}{2} \left(G(n) - \frac{1}{\tau_p} \right) E'(t), \quad (5)$$

$$\frac{d\varphi_i(t)}{dt} = \omega_0 - \omega - \Delta\omega, \quad (6)$$

式中已令 $\Delta\omega = dp/dt$ 。(2)–(6) 式构成电负反馈激光器速率方程模型。

2. FM 噪声功率谱

引入新变量 $I = V|E'(t)|^2$, I 为谐振腔中的光子数, V 为模体积。在一级近似下有^[10]

$$\begin{aligned} G(n) &= G_0 + \left(\frac{\partial G}{\partial n} \right) \Delta n + \left(\frac{\partial G}{\partial I} \right) \Delta I \\ &= G_0 + G_n \Delta n + G_I \Delta I, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\omega_0(n) = \omega_0(n_0) + \frac{1}{2} \alpha G_n \Delta n, \quad (8)$$

α 为谱线展宽因子, G_I 反映增益饱和效应^[10]. 令 $N = \Gamma V n = N_0 + \Delta N$, $I = I_0 + \Delta I$ 和 $\varphi_i = \varphi_0 + \Delta \varphi_i$, 其中 Γ 为限制因子, N_0, I_0, φ_0 均为稳态值. 由(2),(5)和(6)式容易得到

$$\Delta \dot{I} = \frac{G_N I_0}{\Gamma V} \Delta N - \left(\frac{R_s}{I_0} + G_I I_0 \right) \Delta I + F_I(t), \quad (9)$$

$$\Delta \dot{\varphi}_i = \dot{\varphi}_i = \frac{\alpha G_N}{2 \Gamma V} \Delta N - \Delta \omega + F_{\varphi_i}(t), \quad (10)$$

$$\Delta \dot{N} = - \left(\frac{1}{\tau_s} + \frac{G_N I_0}{V} \right) \Delta N - (G_0 \Gamma + G_I I_0) \Delta I + F_N(t), \quad (11)$$

式中 R_s 是自发辐射速率^[10], $F_I(t), F_{\varphi_i}(t), F_N(t)$ 是为研究噪声特性而加上的 Langevin 力, 它满足^[10]

$$\langle F_i(t) \rangle = 0, \quad (12)$$

$$\langle F_i(t) F_j(u) \rangle = D_{ij} \delta(t - u), \quad (13)$$

$i, j = I, \varphi_i, N$, D_{ij} 是扩散系数. 对(9),(10)和(11)式作 Fourier 变换得

$$i\Omega \Delta \tilde{I}(\Omega) = \frac{G_N I_0}{\Gamma V} \Delta \tilde{N}(\Omega) - \left(\frac{R_s}{I_0} + G_I I_0 \right) \Delta \tilde{I}(\Omega) + \tilde{F}_I(\Omega), \quad (14)$$

$$\tilde{\varphi}_i(\Omega) = \frac{\alpha}{2} \frac{G_N}{\Gamma V} \Delta \tilde{N}(\Omega) - H(\Omega) \tilde{\varphi}_i(\Omega) - H(\Omega) \tilde{F}'(\Omega) + \tilde{F}_{\varphi_i}(\Omega), \quad (15)$$

$$i\Omega \Delta \tilde{N}(\Omega) = - \left(\frac{1}{\tau_s} + \frac{G_N I_0}{V} \right) \Delta \tilde{N}(\Omega) - (G_0 \Gamma + G_I I_0) \Delta \tilde{I}(\Omega) + \tilde{F}_N(\Omega), \quad (16)$$

式中 $\Delta \tilde{I}(\Omega)$, $\Delta \tilde{N}(\Omega)$, $\tilde{\varphi}_i(\Omega)$, $\tilde{F}_I(\Omega)$, $\tilde{F}_{\varphi_i}(\Omega)$ 和 $\tilde{F}_N(\Omega)$ 分别为对应于 $\Delta I(t)$, $\Delta N(t)$, $\varphi_i(t)$, $F_I(t)$, $F_{\varphi_i}(t)$ 和 $F_N(t)$ 截短函数的 Fourier 变换. $H(\Omega)$ 为反馈网络传递函数. 有 $H(\Omega) = \mathcal{F}\{h(t)\}$, 注意到 $\langle F_i(u) F_j(t) \rangle = 0$, 并且令 $\gamma_s = \frac{1}{\tau_s} + \frac{G_N I_0}{V}$,

$\beta = \frac{R_s}{I_0} + G_I I_0$ 和 $\gamma_i = \frac{G_N G_0 I_0}{V}$, 不难由(14)–(16)式求得 FM 噪声功率谱

$$S_{\varphi_i}(\Omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{\langle |\tilde{\varphi}_i|^2 \rangle}{2T} \right) \\ = \frac{R}{2I_0 |1 + H|^2} \left\{ \frac{(\alpha \gamma_i)^2 \left[2I_0 + 1 + \frac{\Omega^2 + \beta^2}{(G_0 \Gamma)^2} \right]}{2I_0 [(\gamma_s + \beta)^2 \Omega^2 + (\gamma_i + \gamma_s \beta - \Omega^2)^2]} + 1 \right\} \\ + \left| \frac{H}{1 + H} \right|^2 \langle |\tilde{F}'|^2 \rangle. \quad (17)$$

同理可求得强度噪声功率谱 $S_{\Delta I}(\Omega)$ 和载流子噪声功率谱 $S_{\Delta N}(\Omega)$, 但与自由运转时相同. 电负反馈半导体激光器 FM 噪声功率谱与自由运转时相比压缩了 $|1 + H|^2$ 倍, 同时增加了一项反馈网络本身的噪声项. 当 $|H| \rightarrow \infty$, 有 $S_{\varphi}(\Omega) \rightarrow \langle |\tilde{F}'|^2 \rangle$. 因此只要增益足够高, 反馈网络引进的噪声充分小, 则线宽可压缩到远低于 Schawlow-Townes 公式的值. 图 2(a) 和图 2(b) 分别为自由运转和电负反馈之下的 FM 噪声功率谱和激

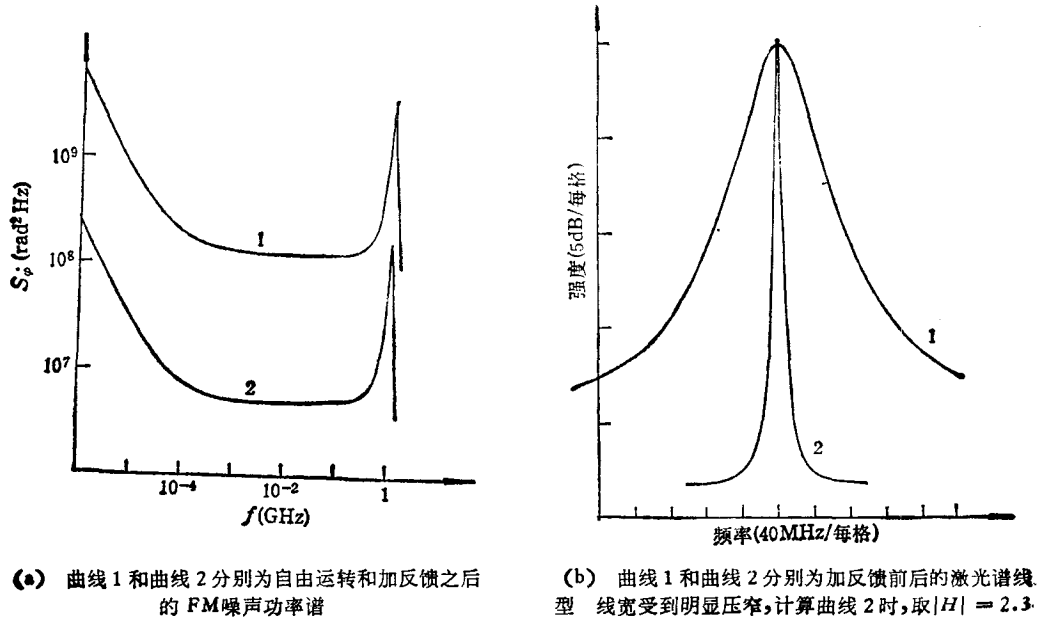


图 2 功率密度和激光谱线型

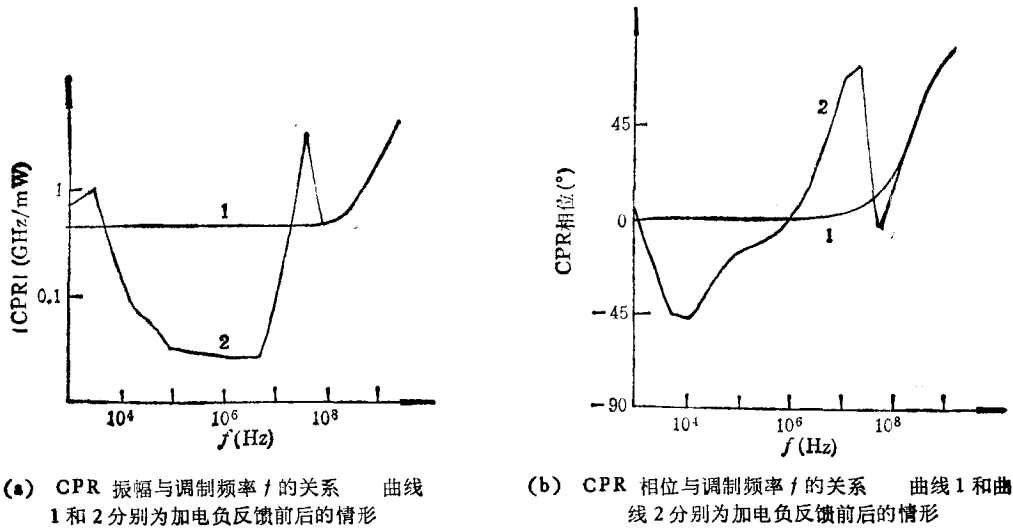


图 3

光谱线型,图 2 中忽略了环路的时延及它自身引进的噪声,但考虑了 $1/f$ 型噪声并设环路的带宽为无穷大. 结果与 Yamamoto 用全量子理论分析一致^[6].

三、电负反馈对频偏的影响

所谓频偏(chirping)是在脉冲或调制运转状态下,激光器瞬时谐振频率随脉冲或调制波形作相应变化. 如引言所述,在光通信中这是一个重要的参数. 本节从上节建立的速率方程模型出发,用小信号近似求得 CPR.

设电负反馈激光器受到调制,注入电流有一增量 ΔJ , 则 $I(t) = I_0 + \Delta I$, $N(t) = N_0 + \Delta N$, $\varphi_i = \varphi_0 + \Delta\varphi_i$, 由(2),(5)和(6)式可得

$$\Delta \dot{I} = -\left(\frac{R_s}{I_0} - G_I I_0\right) \Delta I + \frac{G_N I_0}{\Gamma V} \Delta N, \quad (18)$$

$$\Delta \dot{\varphi}_i = \dot{\varphi}_i = \frac{\alpha}{2} \frac{G_N}{\Gamma V} \Delta N - \Delta\omega(t), \quad (19)$$

$$\Delta \dot{N} = -\left(\frac{1}{\tau_s} + \frac{G_N I_0}{V}\right) \Delta N - (G_0 \Gamma + G_I I_0) \Delta I + \frac{\Delta J}{ed} \Gamma V. \quad (20)$$

由于不考虑噪声特性,在 $\Delta\omega(t)$ 中忽略反馈环路自身噪声项 $\Gamma(t)$. 运用和上节相同的 Fourier 变换方法,不难得

$$\text{CPR} = \frac{\tilde{\varphi}_i/2\pi}{\Delta \tilde{I}} = \frac{\alpha}{4\pi(1+H)} \left(j\Omega + \frac{R_s}{I_0} - G_I I_0\right). \quad (21)$$

图 3(a) 和图 3(b) 分别为 CPR 振幅 $|\text{CPR}|$ 和相位随调制频率的变化曲线. 计算上述曲线时,引用了 Ohtsu 等人给出的网络传递函数 $H(\Omega)$ 实验测量结果^[7]. 在反馈带宽以内 $|\text{CPR}|$ 减小 $|1+H|$ 倍,带宽以外则不受影响. 但在反馈网络带宽两端由于激光器直接调频时的相位延迟及网络时延形成正反馈,因而 $|\text{CPR}|$ 有所增加.

对光反馈耦合腔半导体激光器, $|\text{CPR}|$ 减小 $F = (1+A+B)$ 倍,线宽则压窄 F^2 倍,其中 A, B 为反馈参数^[11]. 从(17)和(21)式也看到类似的结果,但物理机制完全不同. 耦合腔激光器靠的是提高谐振腔 Q 值,而电负反馈半导体激光器则是由于反馈带宽内负反馈抵消了部分调制注入电流. 光反馈耦合腔激光器由于频偏小,一般不适用于 FSK 直接调制系统光源,电负反馈激光器则不然. 相干传输 FSK 系统其调制速率一般均超过 100 MHz,而反馈带宽只需稍稍大于激光器自由运转时的线宽值 (< 50 MHz)^[12],因而对调制频率附近的频偏没有影响. 电负反馈技术为直接调制 FSK 相干检测系统提供了谱线窄、频偏大的光源.

四、 $1/f$ 型噪声对线宽的影响

$1/f$ 型噪声在 FM 噪声功率谱 100 KHz 以下的频段中是主要的噪声源,而且它与激光器的输出功率无关^[13]. 尽管它对高速率相干传输系统的误码率没有明显影响,但对相干检测系统却有不可忽视的作用^[14].

据我们所知在已发表分析电负反馈激光器的文献中均没有考虑 $1/f$ 型噪声. 由于半导体激光器直接调频时的相频特性限制了反馈网络低频截止频率 f_c 和网络增益^[7],因此反馈带宽之内的残留噪声和带宽之外的 $1/f$ 型噪声必要限制谱线宽度的压窄.

FM 噪声功率谱可表示为

$$S_{\dot{\varphi}_i}(\Omega) = S_{\dot{\varphi}_i}(\Omega) + \frac{K}{|1+H|^2 \Omega}, \quad (22)$$

式中等号右端第一项 $S_{\dot{\varphi}_i}(\Omega)$ 由(17)式表达,第二项表示 $1/f$ 型噪声, K 的取值范围为 $10^{11} - 10^{13} \text{rad}^2 \text{Hz}^{-1}$, 其典型值为 10^{12} ^[13]. 图 4 是用常规计算激光器光谱线型方法^[13,15], 由

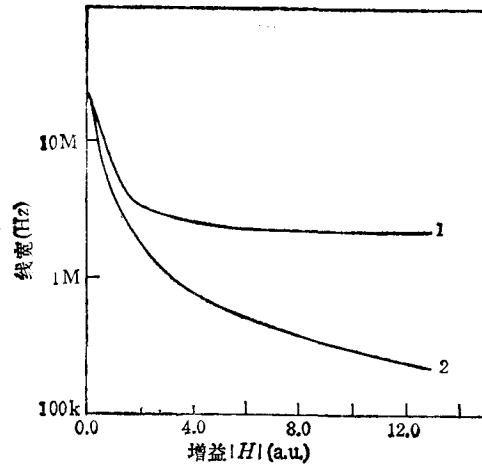


图4 激光器线宽与反馈网络增益 $|H|$ 和 f_c 的关系曲线 曲线1为 $f_c = 50\text{KHz}$; 曲线2为 $f_c = 1\text{KHz}$

(22) 式求得的谱线宽度与反馈网络增益 $|H|$, 低频截止频率 f_c 之间的关系。为计算方便, 设 $H = |H|$, 并认为 H 在 f_c 处是阶跃的。同时为突出 $1/f$ 噪声的作用, 忽略了网络引进的噪声 $\Gamma(t)$, 且设反馈网络高频截止频率为无穷大。由图4可见, 如果 $f_c = 50\text{KHz}$, 当 $|H| > 5$ 以后激光器线宽几乎不随 $|H|$ 的增加而减小, 饱和线宽约为 2MHz ; 而当 $f_c = 1\text{KHz}$, 由于充分抑制低频 $1/f$ 型 FM 噪声, 其饱和线宽则要小得多。

由于 $1/f$ 型 FM 噪声的存在, 当 f_c 一定, 增大反馈环路增益并不能无限压窄线宽。因此, 为了充分抑制 $1/f$ 型 FM 噪声, 获得极窄的谱线, 要选择低频调制时相位迟后小的激光器, 减小网络时延, 以便尽可能地减小 f_c 和增加 $|H|$ 。

本文给出完整的电负反馈半导体激光器半经典分析。求出此类激光器的 FM 噪声功率谱密度, 从而证明电负反馈技术对半导体激光器谱线的压窄作用。求出在小信号近似下的电负反馈激光器 CPR 表达式。在反馈带宽以内 $|CPR|$ 减小 $|1 + H|$ 倍, 噪声功率谱密度减小 $|1 + H|^2$ 倍, 在反馈带宽以外则不受影响。由于半导体激光器直接调制相位延迟对 f_c 的限制, $1/f$ 型 FM 噪声是限制谱线压窄的主要因素。

感谢与惠荣庆的有意义的讨论。

- [1] T. Kimura, *IEEE J. Lightwave Tech.*, **LT-5**(1987), 414.
- [2] R. Wyatt, *Electron. Lett.*, **21**(1985), 658.
- [3] 张建平等, *中国激光*, **15**(1988), 641.
- [4] Y. Suematsu *et al.*, *Proc. IEEE*, **75**(1987), 1472.
- [5] S. Saito *et al.*, *Electron. Lett.*, **20**(1984), 703.
- [6] Y. Yamamoto *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-21**(1985), 1919.
- [7] M. Ohtsu *et al.*, *IEEE J. Lightwave Tech.*, **LT-6**(1988), 357.
- [8] R. Lang and K. Kobayashi, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16**(1980), 347.
- [9] K. Kobayashi *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18**(1982), 582.
- [10] C. H. Henry, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-19**(1983), 1391.
- [11] G. P. Agrawal *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-24**(1988), 134.

- [12] M. Ohtsu *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-21**(1985), 1905.
[13] K. Kikuchi, *Electron. Lett.*, **23**(1987), 885.
[14] K. Kikuchi, *Electron. Lett.*, **24**(1988), 1001.
[15] A. Yariv, *Quantum Electronics*, Sec. Edition, New York, (1975).
[16] D. Welford, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-21**(1985), 1749.

A SEMICLASSICAL THEORY OF NEGATIVE FEEDBACK SEMICONDUCTOR LASER

ZHANG JIAN-PING LI LING YE PEI-DA

Department of Radio Beijing University of Posts and Telecommunications

(Received 5 December 1988)

ABSTRACT

In this paper, a semiclassical rate equation model has been established and the FM noise power spectrum calculated. We show that the spectral linewidth can be narrowed by the negative electrical feedback technique. Within the feedback loop bandwidth, the chirp-power-ratio (CPR) is reduced by a factor of $1+H$, it shows that this kind of laser can be used as the light source in FSK coherent transmission system. Because of the direct modulation phase delay of the semiconductor laser, $1/f$ -type FM noise is one of the important origin of the limitation, for linewidth reduction.