半导体激光器的光注入调试

史　一　京

（中国科学院半导体研究所）

随着对半导体激光器的外腔及光注入作用的广泛研究，观察到了许多用光子密度速率方程不能够解释的现象。虽然有人利用修改了的 Ven der Pol 方程解释了一些现象，但都是从唯象逻辑出发，而非严格的理论推导。本文从光的波动论出发建立了描述光和载流子相互作用的方程。由于方程中包含了光波的位相，故可用来分析注入光与激射光的干涉，从而研究注入光的调制作用与光放大。分析结果表明：利用光注入有可能使调制频率得到提高。

当有电场为 $\varepsilon_1(xt)=E_1e^{i(w_1t-k_1x+\varphi)}$ 的弱光沿谐振腔的轴（x 方向）射到激光器内时，激射光强将受到扰动，设被扰动的某一受激模式的电场为：

$$\varepsilon(x,t)=E(t)\cos kx e^{i\omega t} \tag{1}$$

由波动方程及光子密度与电场的关系式可推得：

$$\frac{dE}{dt}+\frac{1}{2}\left(\Gamma-\frac{c}{n}gN\right)=0 \tag{2}$$

$$\frac{dN}{dt}=\frac{j}{ed}-\frac{N}{\tau_s}-R_s \tag{3}$$

其中 $\Gamma=\frac{c}{n}\left(\alpha+\frac{1}{L}\ln\frac{1}{R}\right)$，$R_s=\frac{cgN\epsilon}{n\hbar\omega}\overline{|\varepsilon(xt)+\varepsilon_1(xt)|^2}$。$\epsilon\overline{|\varepsilon(xt)+\varepsilon_1(xt)|^2}$ 表示对合电场的功率密度的快速变化成分在空间与时间上的平均，表示电子空穴对的受激复合率的变化只能跟上光强的缓慢变化成分。

在小注入（$E_1\ll E(t)$）时，可近似地将 $E(t)$，N 写为 $E(t)=E_0+\Delta\tilde{E}$，$N=N_0+\Delta\tilde{N}$. E_0，$N_0=j_{th}\tau_s/ed$ 为稳态时的值，ΔE，ΔN 为微扰项。将它们代入（2）、（3）式中，并略去二级小量，可求得：

$$\Delta\widetilde{E}=Ce^{-at}\cos\omega_0t+\Delta E\cos\left(\Delta\omega t-\frac{\Delta kL}{2}+\varphi+\psi\right) \tag{4}$$

在推导（4）式时，我们利用了 $\omega_0{}^2\gg(2a)^2$ 的近似。定义 $\Delta E/E_1$ 为振幅调制效率 η，由 ΔE 的表示式可推得：

$$\eta=\frac{\omega_0{}^2}{\sqrt{(\Delta\omega^2-\omega_0{}^2)^2+(2a\omega_0)^2}} \tag{5}$$

由（5）式可知，当 $\Delta\omega=\omega_0$ 时 η 极大，即发生共振。对一般的 GaAs 激光器来说，ω_0 为数十千兆周。另外，由于注入光的调制作用，在激射光谱上受激模式谱线两侧应有两边带，这已经在实验上被观察到了。

利用上述方程对外腔（$\omega_1=\omega$）进行分析，可得出激光器的输出功率 P 为：

$$P=AE_0{}^2\left(1+\sqrt{R_{eff}}\cos\frac{4\pi L_{ex}}{\lambda}\right) \tag{6}$$

其中 R_{eff} 为外腔的有效反射系数。由（6）式可知，P 以 $\lambda/2$ 为周期随外腔长度 L_{ex} 呈周期变化，这也正是实验上观察到的结果。另外，用上述理论对电流调制和无光注入时的弛豫振荡进行分析，得到的结果也与以往的结果相一致。