

# 半导体激光器的张弛振荡

邓生贵

(中国科学院半导体所)

## Relaxation oscillation of semiconductor lasers

Deng Shenggui

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

摘要: 本文用数值分析方法研究了半导体激光器的小信号和大信号注入特性, 指出了两者的根本区别。

关键词: 半导体激光器, 输出特性

### 一、引言

对半导体激光器的输出特性曾有过广泛的研究, 利用偏流注入直接调制激光器的输出特性通常采用小信号近似理论来说明<sup>[1~4]</sup>, 在大信号注入情形下直接调制激光器的计算机数值解<sup>[5]</sup>和大信号注入下激光器的输出特性<sup>[6]</sup>也有报道。本文着重讨论大信号注入和小信号注入激光器输出特性的根本区别。

### 二、激光器的速率方程

分析半导体激光器动力学的出发点是求解由 Stutz 和 DeMars 建立的联立速率方程<sup>[7]</sup>

$$\frac{dn}{dt} = j_e / ed - n / \tau_e - gs \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = j_p / ed + gs - s / \tau_p + \beta n / \tau_e \quad (2)$$

这里  $n$  是导带中电子密度;  $s$  是光子密度;  $j_e$  是注入的电流密度;  $j_p$  是注入到振荡模式中的光流密度;  $d$  是有源区的厚度;  $\tau_e$  是电子寿命;  $\tau_p$  是光子寿命;  $g$  是受激发射增益系数;  $\beta$  是自发发射的光子数进入激光模式中的比率。

这些方程式仅在下列条件下适用: (a) 激光器在阈值以上单模工作; (b) 激光器的有源区载流子均匀分布, 从而有均匀的粒子数反转而无扩散效应和空间烧孔效应。

假设增益系数  $g$  是载流子密度  $n$  的线性函数

$$g = g(n) = a(n - n_1)$$

这里  $n_1$  是透明载流子密度,  $a$  是比例系数。且有

$g_{th} = 1/\tau_p$ ,  $g_{th}$  是阈值时的增益系数。又设阈值电子密度为  $n_{th}$ , 令

$$T = t/\tau_e, \quad j_{th} = edn_{th}/\tau_e, \quad j_1 = edn_1/\tau_e,$$

$$J = (j - j_1)/(j_{th} - j_1), \quad K = \tau_e/\tau_p,$$

$$N = (n - n_1)/(n_{th} - n_1),$$

$$S = Ks/(n_{th} - n_1), \quad H = (j_p + \beta j_1)/(j_{th} - j_1).$$

代入(1)和(2), 得到归一化速率方程组:

$$\frac{dN}{dT} = J - N - NS \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dT} = K[H + (N - 1)S + \beta N] \quad (4)$$

解出方程组即可得到电子密度  $n$ 、光子密度  $s$  和振荡谱的瞬态值。

在稳态情形下:  $dN/dT = 0$ ,  $dS/dT = 0$ ,  $J = J_0$ ,  $H = 0$ , 由上列方程组可求得电子和光子密度的稳态值

$$N_0 = \{(J_0 + 1) - \sqrt{(J_0 + 1)^2 - 4(1 - \beta)J_0}\} / 2(1 - \beta) \quad (5)$$

$$S_0 = \{(J_0 - 1) + \sqrt{(J_0 + 1)^2 - 4(1 - \beta)J_0}\} / 2 \quad (6)$$

速率方程组是一非线性方程组, 在叠加小信号情形下可将其线性化,  $J = J_0 + \Delta J$  ( $\Delta J \ll J_0$ ),  $H = H_0 + \Delta H$  ( $\Delta H \ll H_0$ ),  $N = N_0 + \Delta N$  ( $\Delta N \ll N_0$ ),  $S = S_0 + \Delta S$  ( $\Delta S \ll S_0$ ), 忽略二次小量, 得

$$\frac{d(\Delta N)}{dT} = \Delta J - (1 + S_0)\Delta N - N_0\Delta S \quad (7)$$

$$\frac{d(\Delta S)}{dT} = K\{\Delta H + (N_0 - 1)\Delta S + (S_0 + \beta)\Delta N\} \quad (8)$$

从而得到解析解

$$\Delta N = A \exp[-(\sigma - i\omega_n)T] \quad (9)$$

$$\Delta S = B \exp[-(\sigma - i\omega_n)T] \quad (10)$$

其中  $A$ 、 $B$  是与初始条件有关的系数。从解的形式看出, 无论电子密度  $\Delta N$  还是光子密度  $\Delta S$ , 它们都是呈张弛振荡, 其振荡角频率  $\omega_n$  和衰减系数  $\sigma$  分别为

$$\omega_n = \omega_0(1 - \xi^2)^{\frac{1}{2}},$$

$$\omega_0 = \{K[1 + S_0 - N_0(1 - \beta)]\}^{\frac{1}{2}},$$

$$\sigma = \omega_0 \xi, \quad \xi = [1 + S_0 + K(1 - N_0)]/2\omega_0.$$

### 三、速率方程的数值解

为了比较大信号注入与小信号注入下激光器的输出特性, 我们用龙格-库塔法求解这个速率方程组。

注入阶跃电流  $J$ 、 $\Delta J$ , 取表 1 中的参数值, 得到的结果示于图 1 和图 2。从图中可见, 无论  $N$ 、 $S$  或者  $\Delta N$ 、 $\Delta S$  都呈衰减的张弛振荡, 其振荡频率如图 3 所示。

表 1 数值计算中使用的参数

$J_0$	$\tau_e$ (ns)	$\tau_p$ (ps)	$\beta$
1.2	2	1	$10^{-3}$
大信号 $J$	1.3 1.5 1.8 2.0 2.2 2.5		
小信号 $\Delta J$	0.1 0.3 0.5 1.0		

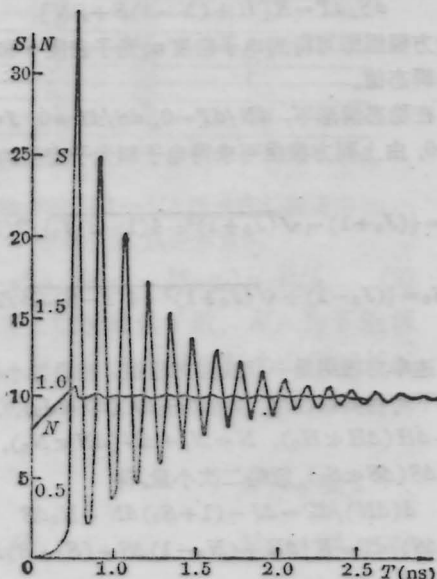


图 1 电子密度  $N$ 、光子密度  $S$  与时间  $T$  的关系

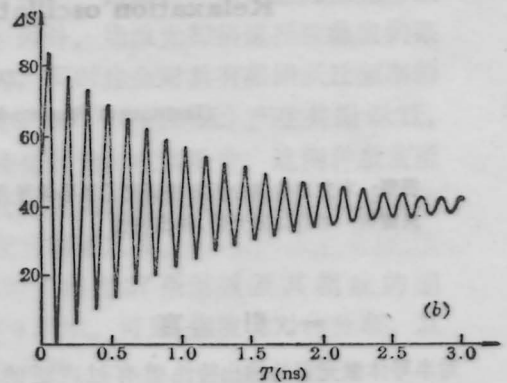
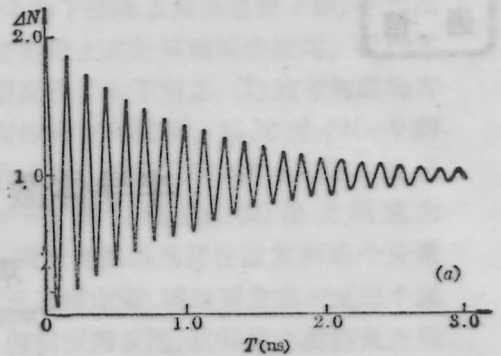


图 2

(a)  $\Delta N$  与  $T$  的关系; (b)  $\Delta S$  与  $T$  的关系

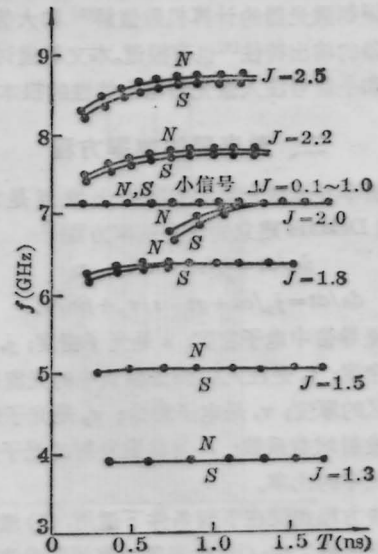


图 3  $N$ 、 $S$  振荡频率与  $T$  的关系

从图 3 看出, 大信号情形下光子密度  $S$  和电子密度  $N$  随时间的增加其振荡频率  $f$  逐渐增加, 最后趋于一常数  $f_p$ , 且  $f_p$  还随注入电流  $J$  的增大而增加; 而按照小信号理论光子密度  $\Delta S$  和电子密度  $\Delta N$  只

表2 系数  $a_i, b_i$  之值

$J$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
2.0	2.370	-1.404	-0.413	0.279	2.730	-2.653	0.847	-0.083
3.0	0.242	-0.606	0.564	-0.180	2.047	2.240	-5.506	2.810

应有一个固定的振荡频率  $f_n$ , 它不随注入电流  $\Delta J$  而变化。仅在小的阶跃电流如  $J=1.3$  时, 由速率方程组(3)和(4)式得出的振荡频率  $f_p$ , 才为常数, 并且这个常数  $f_p$  约为  $f_n$  的一半大。当  $J$  增加到  $J \gg 2.0$  时,  $f_p \gg f_n$ 。无论  $f_p$  或是  $f_n$ , 它们都比实验上观测出的 DH 器件张弛振荡频率 (AlGaAs/GaAs 器件是 1~2GHz, InGaAsP/InP 器件是 ~3GHz) 高。

根据小信号理论, 张弛振荡的振幅与时间的关系为指数关系, 由(9)和(10)式可得

$$\ln(\Delta N) = k_1 \sigma T$$

$$\ln(\Delta S) = k_2 \sigma T$$

其中  $k_1, k_2$  为比例系数。即是说,  $\ln(\Delta N)$  和  $\ln(\Delta S)$  均与时间  $T$  呈线性关系。但图4表明并非如此, 而是由三次多项式表示它们之间的关系:

$$\ln N = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3$$

$$\ln S = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3$$

其中系数  $a_0, a_1, a_2, a_3$  和  $b_0, b_1, b_2, b_3$  随注入电流而

变化, 如表2所示。

#### 四、讨 论

在讨论半导体激光器的瞬态特性时, 小信号近似理论, 能将非线性的速率方程组线性化, 从而简化了求解速率方程组的过程, 并得到明确的解析解。这个解与小信号情形下从一般的速率方程组得到的数值解有某些近似, 但是在在大信号情形下, 从近似理论得到的解与从一般速率方程组得到的数值解有很大差别: 第一, 张弛振荡的频率不同, 按小信号理论振荡频率是固定的, 而在一般情况下则是变化的, 逐渐升高趋于常数值; 第二, 张弛振荡的衰减规律不一样, 按小信号理论, 振幅呈指数衰减, 而一般情形下则呈三次多项式规律衰减。

本工作在进行过程中曾得到北京大学物理系郭长志教授的热情指导, 本所陆建祖和刘文旭同志也曾给予协助, 作者在此表示衷心感谢。

#### 参 考 文 献

- 1 T. Ikegami and Y. Suematsu, *Electron. Commun.*, 51-B, 51(1968)
- 2 F. L. Paoli and J. E. Ripper, *Proc. Inst. Elec. Electron. Eng.*, 58, 1457 (1970)
- 3 H. Kressel and J. K. Butler, *Semiconductor Lasers and Heterojunction Leds.* (New York, 1977) Chap. 17
- 4 单永政, 杜宝勋, *半导体学报*, 2, No. (3), 197(1981)
- 5 T. Ikegami and Y. Suematsu, *Electron. Commun.*, 53-B, 69 (1970)
- 6 郭长志, *半导体学报*, 4, No. 3, 247(1983)
- 7 D. A. Kleinman, *Bell. Syst. Tech. J.*, 43, 1505 (1964)

(收稿日期: 1987年11月19日)

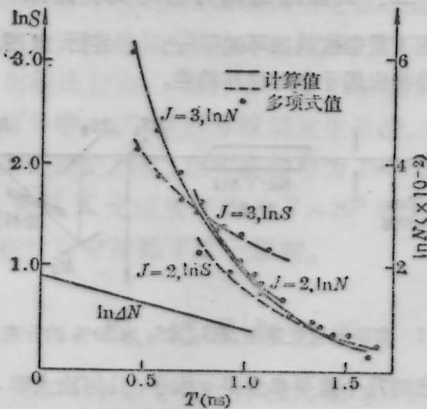


图4 电子和光子密度的对数与时间的关系