

双区共腔双稳态激光器在光注入下的计算机模拟

王启明 李建蒙

(中国科学院半导体研究所, 北京)

1986年9月25日收到

本文对双区共腔半导体双稳态激光器在从吸收区背面及沿轴向外部光注入下的稳态及瞬态特性进行了计算机模拟, 得到稳态光开关及光放大特性, 瞬态情况下随着注入光的增强输出由近混沌状脉动到单峰快衰减张弛振荡而更强光注入时则仅存在一延迟过程。

主题词: 半导体激光器, 双稳, 计算机模拟, 光放大

双区注入模型是由 Lasher^[1] 及 Basov^[2] 提出并发展起来的。两个激光二极管通过沟槽在电学上是隔离的, 而在光学上则是共腔的。激光器的一段(增益区)注入电流 I_1 及另一段(吸收区)注入光信号 f , 两区长度分别为 l_1 、 l_2 , 总长为 l 。令: $K_1 = l_1/l$, $K_2 = l_2/l$ 。由 H. Statz 和 G. DeMars 所给出的耦合速率方程组^[3], 考虑单分子复合过程和单纵模工作, 光场及两区中各自的载流子分布均匀, 不包含噪声源, 并考虑二种方式外部注入光的情况, 可得:

吸收区背面注入: 这属于局部注入的情况, 是一种耦合效率比较高的注入方式, 即所用的外注入光被假设全部增加吸收区的载流子浓度, 所以在吸收区电子速率方程中增加了外部注入光吸收项 $g_2 f$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn_1}{dt} = \frac{j_1}{qd} - g_1 s - \frac{n_1}{\tau_1} \\ \frac{dn_2}{dt} = \frac{j_2}{qd} - g_2(s + f) - \frac{n_2}{\tau_2} \end{array} \right. \quad (1a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{ds}{dt} = (K_1 g_1 + K_2 g_2)s - \frac{s}{\tau_p} + \gamma \left(K_1 \frac{n_1}{\tau_1} + K_2 \frac{n_2}{\tau_2} \right) \end{array} \right. \quad (1b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{ds}{dt} = (K_1 g_1 + K_2 g_2)s - \frac{s}{\tau_p} + \gamma \left(K_1 \frac{n_1}{\tau_1} + K_2 \frac{n_2}{\tau_2} \right) \end{array} \right. \quad (1c)$$

轴向光注入: 这属于整体注入, 它的注入方式耦合效率可能比较低, 但注入光被耦合到输出模中, 它包含有光放大的过程, 其所注入的光全部包含在输出总光子密度 s 中, 则速率方程为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn_1}{dt} = \frac{j_1}{qd} - g_1 s - \frac{n_1}{\tau_1} \\ \frac{dn_2}{dt} = \frac{j_2}{qd} - g_2 s - \frac{n_2}{\tau_2} \end{array} \right. \quad (2a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{ds}{dt} = (K_1 g_1 + K_2 g_2)s - \frac{s}{\tau_p} + \frac{f}{\tau_p} + \gamma \left(K_1 \frac{n_1}{\tau_1} + K_2 \frac{n_2}{\tau_2} \right) \end{array} \right. \quad (2b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{ds}{dt} = (K_1 g_1 + K_2 g_2)s - \frac{s}{\tau_p} + \frac{f}{\tau_p} + \gamma \left(K_1 \frac{n_1}{\tau_1} + K_2 \frac{n_2}{\tau_2} \right) \end{array} \right. \quad (2c)$$

式中： j_1, j_2 分别为两区中各自的注入电流密度， n_1, n_2 分别为两区中各自的载流子浓度， g_1, g_2 分别为两区的增益函数， s 为总光子密度， τ_1, τ_2 分别为两区中各自的载流子寿命(取 $\tau_1 = \tau_2 = \tau$)， τ_p 为腔内光子寿命， d 为有源层厚度， q 为电子电荷量， γ 为自发发射因子， f 为外部注入光强(定义为进入单位体积内的光子数)。

对速率方程组(1)、(2)式进行归一化，取归一化参数为： $T = \frac{t}{\tau}$ ， $J_i = j_i / \frac{qd\bar{n}'}{\tau}$ ， $N_i = \frac{n_i}{\bar{n}'}$ ， $G_i = \tau_p g_i$ ($i = 1, 2$)， $S = s / \frac{\bar{n}'\tau_p}{\tau}$ ， $F = f / \frac{\bar{n}'\tau_p}{\tau}$ ， $c = \frac{\tau}{\tau_p}$ 。且增益函数取折线近似：

$$g_i = a_i(n_i - \bar{n}') \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

令： $\xi = a_2/a_1$ ，则：

$$\begin{cases} G_1 = (\tau_p a_1 \bar{n}') (N_1 - 1) \\ G_2 = (\tau_p a_2 \bar{n}') (N_2 - 1) = (\tau_p a_1 \bar{n}') \xi (N_2 - 1) \end{cases} \quad (4a)$$

$$(4b)$$

式中： a_i 为增益对载流子浓度变化的斜率， \bar{n}' 为透明载流子浓度。速率方程归一化后为：

$$\text{背向注入: } \begin{cases} \frac{dN_1}{dT} = J_1 - N_1 - G_1 S \\ \frac{dN_2}{dT} = J_2 - N_2 - G_2 (S + F) \end{cases} \quad (5a)$$

$$(5b)$$

$$\begin{cases} \frac{dS}{dT} = c \{ [K_1 G_1 + K_2 G_2 - 1] S + \gamma [K_1 N_1 + K_2 N_2] \} \end{cases} \quad (5c)$$

轴向注入：

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dT} = J_1 - N_1 - G_1 S \\ \frac{dN_2}{dT} = J_2 - N_2 - G_2 S \end{cases} \quad (6a)$$

$$(6b)$$

$$\begin{cases} \frac{dS}{dT} = c \{ [K_1 G_1 + K_2 G_2 - 1] S + F + \gamma [K_1 N_1 + K_2 N_2] \} \end{cases} \quad (6c)$$

下面计算中所用到的参数取为^[4]： $K_1 = 0.8$ ， $K_2 = 0.2$ ， $\tau_p = 10^{-12}s$ ， $\tau = 10^{-9}s$ ， $a_1 = 1.6 \times \frac{c}{n} = 1 \times 10^{-6}s^{-1}cm^3$ ， $\bar{n}' = 1.35 \times 10^{18}cm^{-3}$ ， $\tau_p a_1 \bar{n}' = 1.35$ ， $\tau_p a_2 \bar{n}' = 1.35\xi$ ， $C = 10^3$ ， $f = \frac{qd\bar{n}'}{\tau} = 2.8 \times 10^3 Acm^{-2}$ ， $\xi = 6$ ， $J_2 = 0$ ， $\gamma = 10^{-9}$ 。

计算结果及讨论

(1) 稳态情况

对方程组(5)或(6)式取其中 $F = 0$ ，可得稳态 $J_1 \sim S$ 关系，从中得到 $J_{1,\text{th}} = 3.4$ ($J_{1,\text{th}}$ 定义为在光输出从低态跃向高态时的第一区注入电流 J_1 的值)， $J_{1,\text{th}} = 2.9$ ($J_{1,\text{th}}$

定义为在光输出从高态回到低态时的第一区注入电流 J_1 的值)。

a) 背向注入

令方程组(5)式左端对 T 的微商为零, 并与(4)式联立可得稳态方程为:

$$\text{令: } A = \tau_p \sigma_1 n'$$

$$F = \frac{AK_2 \xi S - \gamma K_1 \frac{J_1 + AS}{1 + AS} - AK_1 S \frac{J_1 - 1}{1 + AS} - S - J_1(\gamma K_2 + AK_2 \xi S)}{A \xi \left(\gamma K_1 + \gamma K_2 \frac{J_1 + AS}{1 + AS} + AK_1 S \frac{J_1 - 1}{1 + AS} + S \right)} \quad (7)$$

以 J_1 为参数求得 S 与 F 的关系如图 1 所示。图中 M 为放大系数(即当注入光 F 达到某一值 F_{th} 时, 输出光 S 产生跃变, 从低态 S_L 跳到高态 S_H 时, 则定义 M 为: $M = \frac{S_H}{F_{th}}$)。

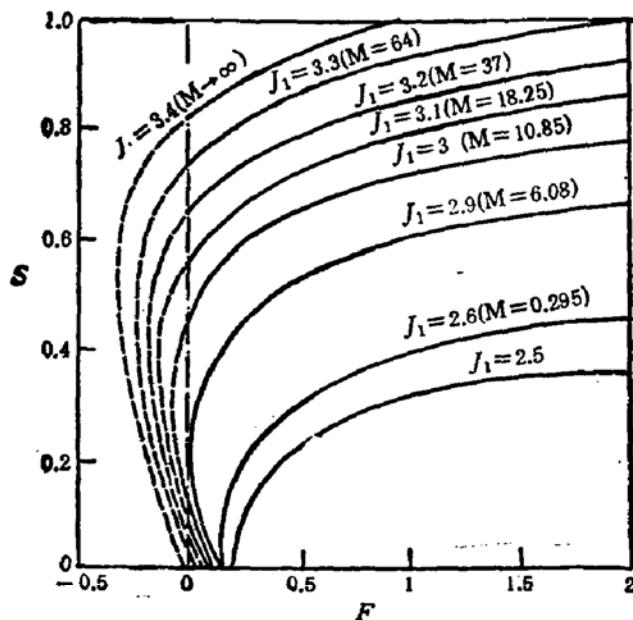


图 1 背向注入下光输入强 F 与光输出 S 的稳态关系 (J_1 为参数)

从图中可以看到当 J_1 增加时, 产生跳跃所需要的 F_{th} 相应地减小, 这是由于 J_1 增大, 增益区 D_1 中产生的自发辐射光子增多, 则使得腔 Q 值增加, 即调 Q 范围变小, 所以这时所用的外部注入光 F_{th} 就相应减小。从图中还可观察到 J_1 减小时, 输出光 S 也相应地减小, 这是因为 F 的增加只使吸收区载流子浓度增加, 而输出光 S 的强弱由增益区 D_1 决定的, 即 D_1 的注入电流 J_1 越大, 输出光就越强。当 J_1 小到某一值(如计算中的 $J_1 = 2.5$)时, 即使有很大的注入光双稳现象也不复存在, 这是由于输出光 S 产生双稳现象的跃变是由增益区 D_1 中的超量存储电荷的释放而产生的, 当 J_1 小时相应的存储电荷减少, 所以产生的跃变相应减弱, 当 $J_1 = 2.5$ 时, 增益区 D_1 中已无法产生超量存储载流子用来产生跃变, 而注入光 F 只是调节吸收区中的载流子或者是起了光泵浦的作用, 所以输出为和普通激光器相似的结果甚至未能达到激射。

通过上面的计算可得出此类器件可以制成光增强记忆器件。

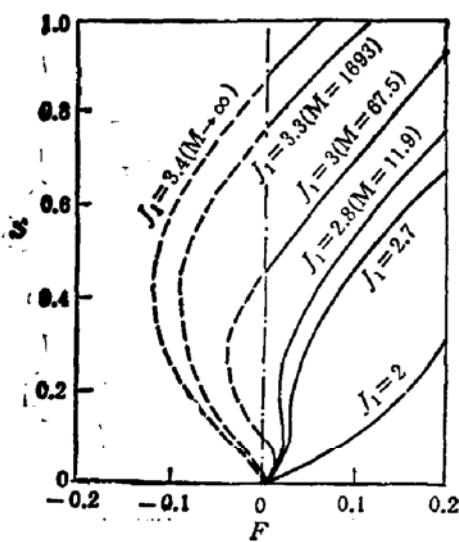


图2 轴向光注入下,注入光强 F 与输出光强 S 的稳态关系 (J_1 为参数)

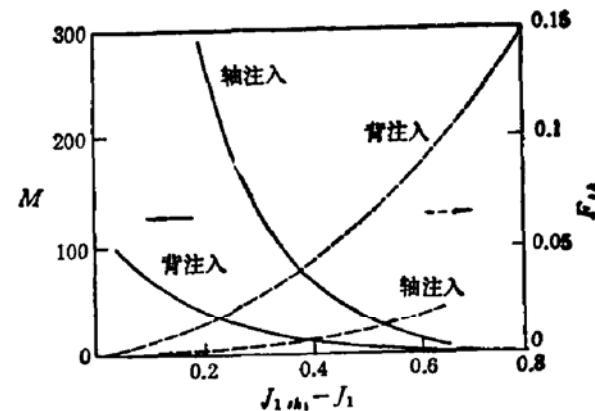
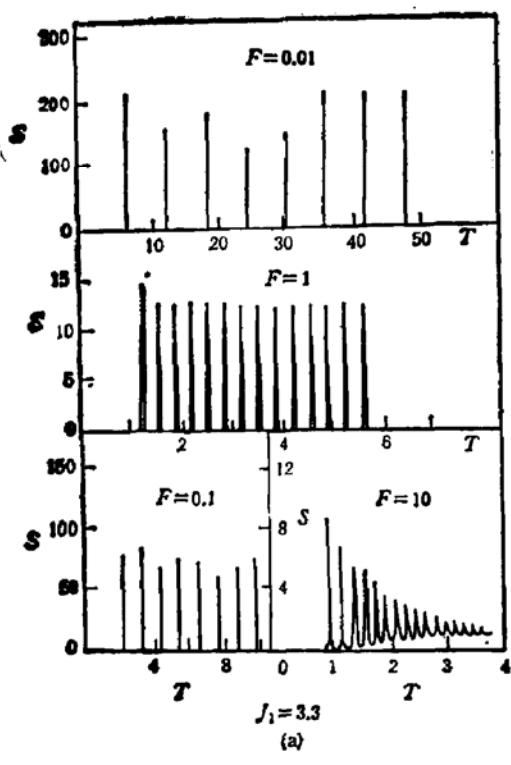
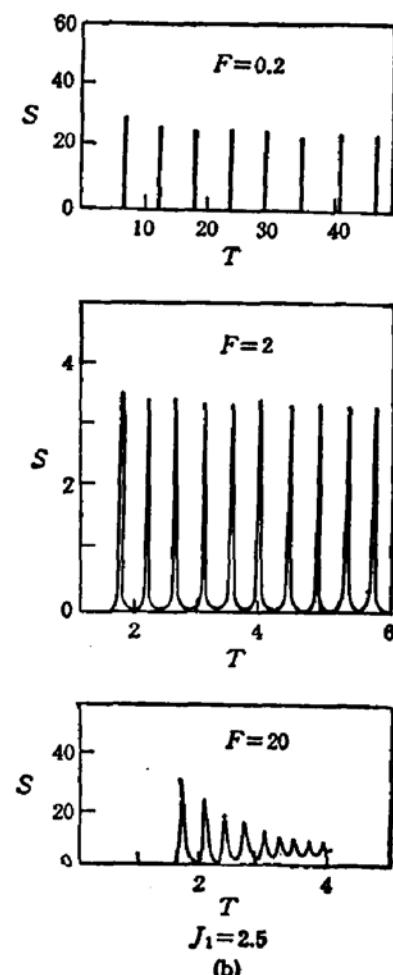


图3 两种不同注入方式下的放大系数 M 与注入光阈值 F_{th2} 和注入电流 $J_{1,th1}-J_1$ 的关系 ($J_2 = 0$, $\xi = 6$, $\gamma = 10^{-3}$)



(a)



(b)

图4 背向注入下瞬态特性,其中 F 为外注入光强

b) 轴向光注入

令方程组(6)式左端对 T 的微商为零, 并与(4)式联立可得稳态方程:

$$F = \left[1 - AK_1 \frac{J_1 - 1}{1 + AS} - AK_2 \xi \frac{J_1 - 1}{1 + A\xi S} \right] S - \gamma \left[K_1 \frac{J_1 + AS}{1 + AS} + K_2 \frac{J_1 + A\xi S}{1 + A\xi S} \right] \quad (8)$$

以 J_1 为参数求得 $S \sim F$ 关系如图 2 所示。对比图 1 可得出此种方式注入具有更高的开关灵敏度和更大的放大系数, 这是由于此时外部注入光进入腔模式并在增益区得到了放大的结果。两种不同的注入方式的放大系数 M 及注入光阈值 F_{th} 和注入电流 $J_{1th}-J_1$ 的关系如图 3 所示, 可以从图中明显地看到轴向注入的优点。

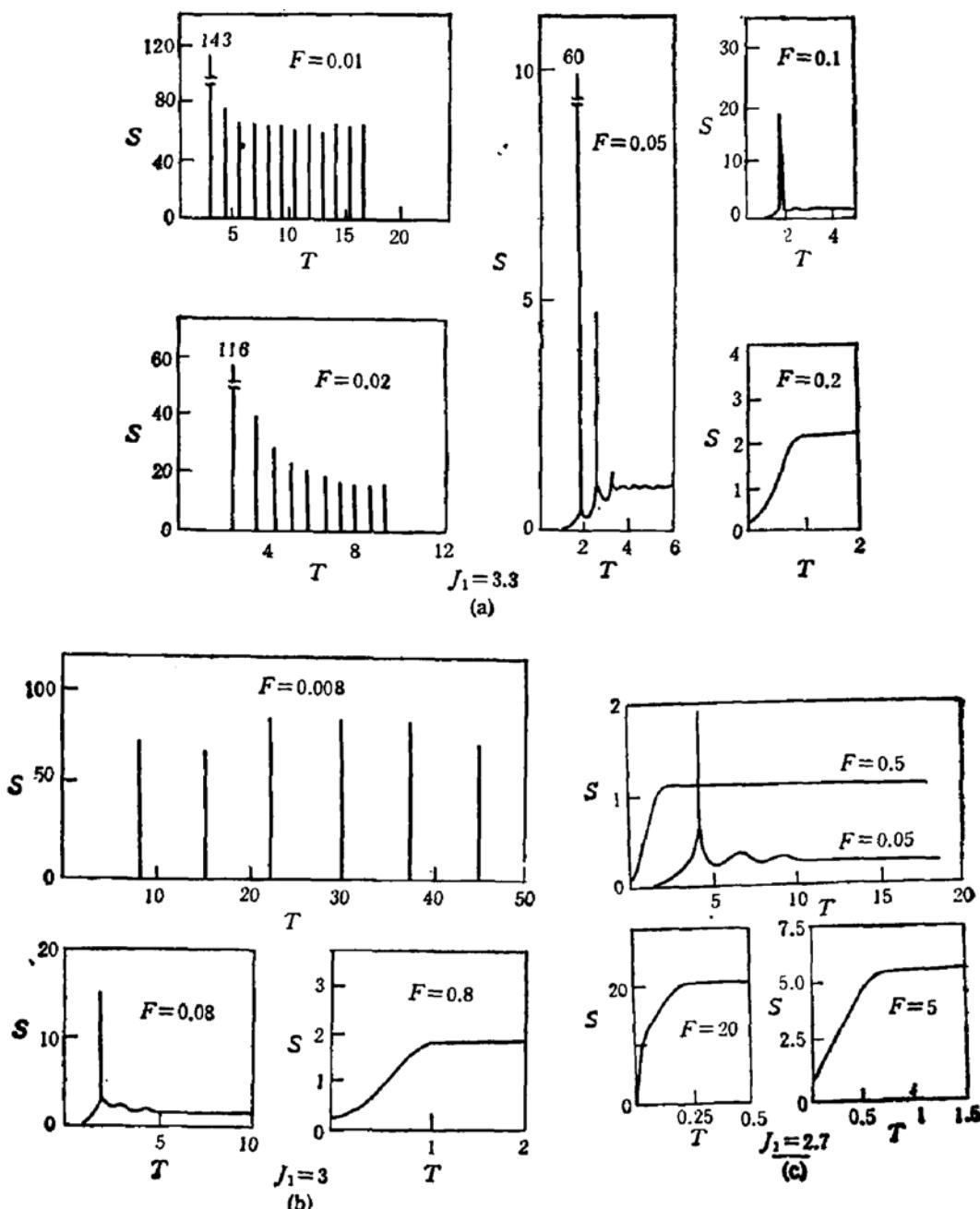


图 5 轴向注入下的瞬态特性, 其中 F 为外注入光强

(2) 瞬态情况

对方程组(5)或(6)式并结合(4)式进行数值求解，我们所用的是变步长龙格-库塔法来求解微分方程组的。以阶跃光 F 输入为参数求其翻转过程中的瞬态特性。

(a) 背面注入

对图2中 J_1 取 3.3 和 2.5 时的稳态情况来求其加入阶跃注入光信号时的瞬态特性，其结果分别如图4(a)、(b)所示。由图可见当 F 弱时，产生混沌式脉动输出，当 F 增强时输出呈规则自脉动，当 F 再增强时则呈张弛振荡后趋于稳定值。由此可见外部注入光的强弱对输出的瞬态特性有很大的影响。当 $J_2 = 2.5$ 时，由图(2)已知此时器件未有双稳特性，但却仍存在自脉动现象，可见产生双稳态的调 Q 深度比产生自脉动所要求的更强，没有双稳时仍可产生自脉动现象这是众所周知的事实。

(b) 轴向光注入

对图3中 J_1 取 3.3, 3 和 2.7 时的稳态情况来求其在以阶跃光信号注入时的瞬态特性，其结果分别如图5(a)、(b)、(c) 中所示。从图可见在弱光下出现混沌式脉动现象；增加注入光强度时，则输出呈近单峰快衰减张弛振荡；随着注入光强的继续增加，甚至连过冲单峰也被抑制则只看到一般的延迟过程。这是因为沿轴向注入时外部注入光既对增益区有贡献，也对吸收区有贡献，弱光下吸收区即对外部注入光吸收也对增益区的光产生吸收，有一定深度的内部 Q 开关效应存在，即可产生脉动输出；当外部注入光增强时使吸收区大量吸收外部注入光，激光器中已无内部 Q 开关效应存在，于是只有应有的张弛振荡过程；但当外部注入光更强时，由增益区放大后产生的强背景光使得张弛振荡除第一峰外都被抑制掉了(如图5(a)、(b)、(c)，中所示)；当外部注入光再强时，背景光强到足以把所有的振荡都抑制掉的程度，只有一般的延迟过程出现。

以上我们计算了在光注入下的稳态及翻转过程中的瞬态特性。在从背面和沿轴向外部光注入下，都有开关和放大作用存在。但轴向注入的放大作用更强，其翻转过程相比背注入要稳定得多。

通过上面的结果可知，如果控制外部注入光的强度，则有可能制成 PS 光脉冲器件。在器件应用方面也可用双稳态器件来制做光增强器件、光放大器和光记忆存储器等等，实验的工作还有待于进一步的研究。

致谢：对林世鸣同志在计算机使用方面的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] G. J. Lasher, *Solid-state Electronics*, 7, 707 (1964).
- [2] N. G. Basov, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 4, 855 (1968).
- [3] Henry Kressel and J. K. Butler, *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs*, Academic Press, New York, San Francisco, London, 1977.
- [4] 王守武、王启明、林世鸣, *物理学报*, 35, 1095(1986).

Computer Simulation for Characteristics of a CCTS Bistable DH Laser at Optical Injection

Wang Qiming and Li Jianmeng

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The results of computer simulation for stable characteristics and transient response of a CCTS bistable DH laser which is applied by the crosswise light injection or the axial injection are reported. The characteristics of light-switching and light-amplification at stable-state, and an output pulsation of chaos at weak incident light intensity, an approximately single peak with fast damped oscillation at strong light intensity and an ordinary delay process at stronger incident light intensity at transient response are obtained.

KEY WORDS Semiconductor laser, Bistable, Computer simulation, Optical amplification