

双区共腔双稳态激光器电注入下特性的计算机模拟

王启明 李建蒙

(中国科学院半导体研究所,北京)

1986年9月10日收到

本文对双区共腔半导体双稳态激光器在电注入下的稳态及瞬态特性进行了计算机模拟,这种模型产生双稳和自脉动现象的机制是不均匀电注入本征可饱和吸收特性,我们研究了与可饱和吸收有关的几个参数 γ 、 ξ 、 J_1 、 J_2 对双稳及自脉动现象的影响。

主题词: 半导体激光器, 双稳, 计算机模拟

双区注入模型是在1964年由 Lasher^[1] 最早提出的。1968年 Basov^[2] 成功地发展用来解释同质结激光器中观察到的光脉动现象,这是一个基本的模型,它的许多概念至今仍被普遍引用。近几年来,不少作者^[3-6]从实验上研究了基于双区注入共腔结构激光器的双稳态特性。

双稳态激光器具有开关、记忆、限幅、放大以及模式锁定等一系列新特性,可能会开拓光电子学的多功能应用范围。双稳态激光器可能提供一种简单可用的光放大器件和高稳频光振荡器。无疑这是目前发展超长距离相干光通讯感兴趣的课题。光开关和记忆特性则为发展光逻辑运算的基本要素。因此,对双稳态激光器的深入研究有其重要的意义。

不少作者相继开展了双稳态激光器的理论和计算机模拟的研究, Kawaguchi^[3] 等人以单模速率方程、双分子复合过程为基础用计算机模拟了各种参数对双稳态激光器的稳态及瞬态特性的影响,同时指出了二段区域(即增益区和吸收区)自发辐射差异的重要性。但他对二段区域采用了同一抛物线方程的增益函数。王守武等人^[9]则同时基于多模速率方程、双分子复合过程和严格的增益函数对之进行了计算机模拟,结果表明除了开始的瞬间存在模竞争的过程,即使在整个瞬态响应中,单模的特性仍是保持的。

本文以单分子复合、单模速率方程为基础,用近似的线性增益函数对双稳态激光器的特性进行计算机模拟研究。我们取不同的等价增益因子以便简化计算过程,而又能着重了解器件的外部工作条件及其内部参数对激光器的稳态和瞬态特性的影响。

器件结构如图1所示。两个激光二极管之间有沟槽,在电学上是隔离的,而在光学上

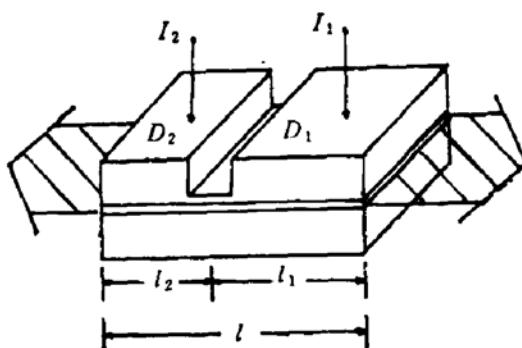


图1 器件结构

则是共腔的。 D_1, D_2 分别注入电流 I_1, I_2 , 这是一个人为制造的不均匀注入模型, 两个区的长度分别为 l_1, l_2 , 总长度 l . 令: $K_1 = l_1/l$, $K_2 = l_2/l$,

则:

$$K_1 + K_2 = 1. \quad (1)$$

一、方程的导出

对激光二极管进行如下简化假设时^④: (a) 激光器在阈值以上单模工作, (b) 光场及两区中各自的载流子分布均匀, (c) 不包含噪声源. 可得速率方程组如下:

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

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

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

式中: j_1, j_2 分别为两区的各自注入电流密度, n_1, n_2 分别为两区中各自的载流子浓度, g_1, g_2 分别为两区的增益系数, τ_1, τ_2 分别为两区的载流子自发复合寿命 (取 $\tau_1 = \tau_2 = \tau$), τ_p 为腔内光子寿命, d 为有源区厚度, q 为电子电荷量, γ 为自发发射因子.

在下面的计算中取第一区为增益区, 第二区为吸收区, 即: $g_1 > 0, g_2 < 0$. 对 DH 激光器, 增益系数可近似写成线性函数:

$$\left\{ \begin{array}{l} g_1 = a_1(n_1 - n'), \\ g_2 = a_2(n_2 - n'). \end{array} \right. \quad (3a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} g_1 = a_1(n_1 - n'), \\ g_2 = a_2(n_2 - n'). \end{array} \right. \quad (3b)$$

式中: a_1, a_2 为比例系数即增益因子, n' 为透明载流子浓度.

对速率方程组(2)式进行归一化, 取归一化参数为: $T = t/\tau$, $J_i = j_i / \frac{qdn'}{\tau}$, $N_i = n_i/n'$, $G_i = \tau_p g_i$ ($i = 1, 2$), $S = s / \frac{n' \tau_p}{\tau}$, $c = \tau/\tau_p$. 令: $\xi = a_2/a_1$

$$\text{则: } \left\{ \begin{array}{l} G_1 = (\tau_p a_1 n') (N_1 - 1), \\ G_2 = (\tau_p a_1 n') \xi (N_2 - 1), \end{array} \right. \quad (4a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 = (\tau_p a_1 n') (N_1 - 1), \\ G_2 = (\tau_p a_1 n') \xi (N_2 - 1), \end{array} \right. \quad (4b)$$

(2)式化为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_1}{dT} = J_1 - N_1 - G_1 S, \\ \frac{dN_2}{dT} = J_2 - N_2 - G_2 S, \end{array} \right. \quad (5a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_1}{dT} = J_1 - N_1 - G_1 S, \\ \frac{dN_2}{dT} = J_2 - N_2 - G_2 S, \end{array} \right. \quad (5b)$$

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

计算过程中用到的参数取为^④: $K_1 = 0.8$, $K_2 = 0.2$, $\tau_p = 10^{-12}s$, $\tau = 10^{-9}s$, $a_1 = 1.6 s^{-1}cm^3$, $n' = 1.35 \times 10^{18}$.

二、计算结果及讨论

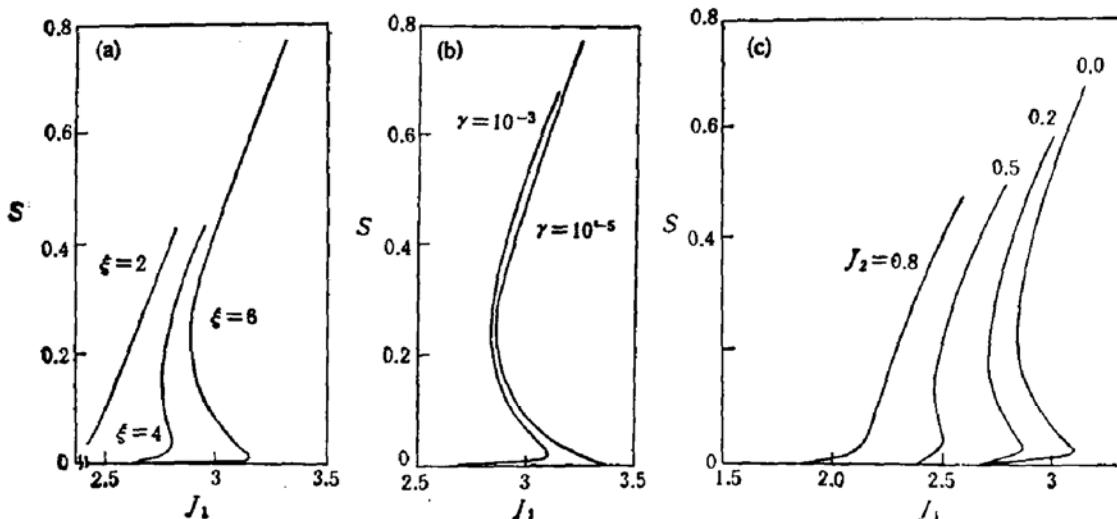
1. 稳态

(a) 结果

令方程组(5)式左端对 T 的微商为零, 即得稳态方程组, 并与(4)式联立得稳态 $S \sim J_1$ 关系式为:

$$J_1 = \frac{(1 + \tau_p a_1 n' S)}{K_1(\tau_p a_1 n' S + \gamma)} \left\{ \left[1 + \frac{(1 - \gamma) K_1 \tau_p a_1 n'}{1 + \tau_p a_1 n' S} - \frac{(J_2 - 1) K_2 \tau_p a_1 n' \xi}{1 + \tau_p a_1 n' \xi S} \right] S - \gamma K_2 \frac{J_2 + \tau_p a_1 n' \xi S}{1 + \tau_p a_1 n' \xi S} \right\}. \quad (6)$$

以 ξ 、 γ 、 J_1 、 J_2 为参数进行计算, 其结果如图 2 所示。图 (2a) 为 ξ 对双稳现象的影响, 图 (2b) 是考虑 γ 变化时, 双稳现象的变化, 可见 γ 越小, 双稳越明显。图 (2c) 观察到 J_2 改变时, 双稳的变化, 得到双稳现象随 J_2 增大而减弱。



(a) ξ 对双稳现象的影响, 其中: $\gamma = 10^{-3}$, $J_2 = 0$.

(b) γ 对双稳现象的影响, 其中: $\xi = 6$, $J_2 = 0$,

(c) J_2 对双稳现象的影响, 其中: $\gamma = 10^{-3}$, $\xi = 6$.

图 2 各个参数对双稳现象的影响, 其中 $K_1 = 0.8$, $K_2 = 0.2$.

(b) 讨论

由于定义 $\xi = a_2/a_1$, 而 a 是增益函数相对载流子浓度的变化率, 则 ξ 大, a_2 相对于 a_1 大, 而 $g_2 < 0$, 所以相应的吸收变化加快, 即吸收增强。由于本模型双稳现象的产生起源于本征可饱和吸收, 所以吸收越大, 要达到饱和所需的外注入就越大, 由于此时腔内光子密度增加, 相应退饱和时的外注入电流就要小, 所以双稳区域电流变化范围增大。如图所示, ξ 大则双稳明显。当两个增益函数的变化率相差不大时(如计算中的 $\xi = 2$), 双稳现象消失。

γ 反映自发射光对激射模贡献的百分比, 在注入过程中, 吸收区的载流子积累是由

增益区自发发射光被吸收区吸收而产生的。所以 γ 越小，则需要越大的增益区注入电流 J_1 （即产生更大的 N_1 ）来发出更强的自发发射光，所以相应地电流跨度增大，双稳现象越明显，如图(2b)。

当吸收区注入电流 J_2 增加时，它要达到激射所需要吸收的光子就相应地减少，即增益区注入在比较小时即可达到激射，双稳现象越不明显。当 J_2 足够大时（计算中的 $J_2 = 0.8$ ）双稳现象消失，而成为普通激光器。如图(2c)所示。

由此可见通过外部改变吸收区的偏置，可以控制双稳激光器输出特性。 ξ 的改变则有赖于带尾结构的设计与控制，杂质带尾结构可能是获得更好特性的途径之一。

2. 瞬态

模拟结果表明类同于均匀激光器对双区共腔双稳态激光器，在施加阶跃注入电流时，光输出会出现张弛振荡或自脉动等瞬态现象。自脉动的产生与 J_1 、 J_2 、 ξ 、 γ 等参数有关。

现把 G 改写成电流形式：

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 = \tau_p \beta_1 (j_1 - j') = (\tau_p a_1 n')(J_1 - 1), \\ G_2 = \tau_p \beta_2 (j_2 - j') = (\tau_p a_1 n') \xi (J_2 - 1). \end{array} \right. \quad (7a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 = \tau_p \beta_1 (j_1 - j') = (\tau_p a_1 n')(J_1 - 1), \\ G_2 = \tau_p \beta_2 (j_2 - j') = (\tau_p a_1 n') \xi (J_2 - 1). \end{array} \right. \quad (7b)$$

且 $G_1 > 0$, $G_2 < 0$ 。

现对方程组(5)用变步长龙格-库塔法进行数值求解，其结果如下：

(a) J_1 对自脉动的影响

我们计算了 $J_2 = 0.5$, $\gamma = 10^{-30} \approx 0$ 时， J_1 取 2、3、4、5、7 时的情况，得到 $J_1 = 2$ 时未达到阈值不激射， $J_1 = 3$ 时产生自脉动（如图(3a)所示）， $J_1 > 3$ 时自脉动开始衰退（如图(3b)）， J_1 越大衰退越快。

计算结果表明，当注入电流 J_1 较大时，自脉动不易出现，而呈张弛振荡，最终趋于稳定。关于自脉动出现的电流注入界限，由[8]中的讨论，在 J_1 、 J_2 相平面图上自脉动出现区域由下列方程组决定：

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 > 1, J_2 < 1, \text{ 或 } J_1 < 1, J_2 > 1 \end{array} \right. \quad (8a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 + \frac{K_2}{K_1} \xi J_2 = 1 + \frac{K_2}{K_1} \xi + \frac{1}{K_1 a_1 \tau_p n'} \end{array} \right. \quad (8b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 + \frac{K_2}{K_1} (1 + \xi) J_2 = \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \left[1 + \frac{K_2}{K_1} \xi + \frac{1}{K_1 \tau_p a_1 n'}\right] - \frac{1}{\xi} \end{array} \right. \quad (8c)$$

联立代入参数后得出自脉动区域为：

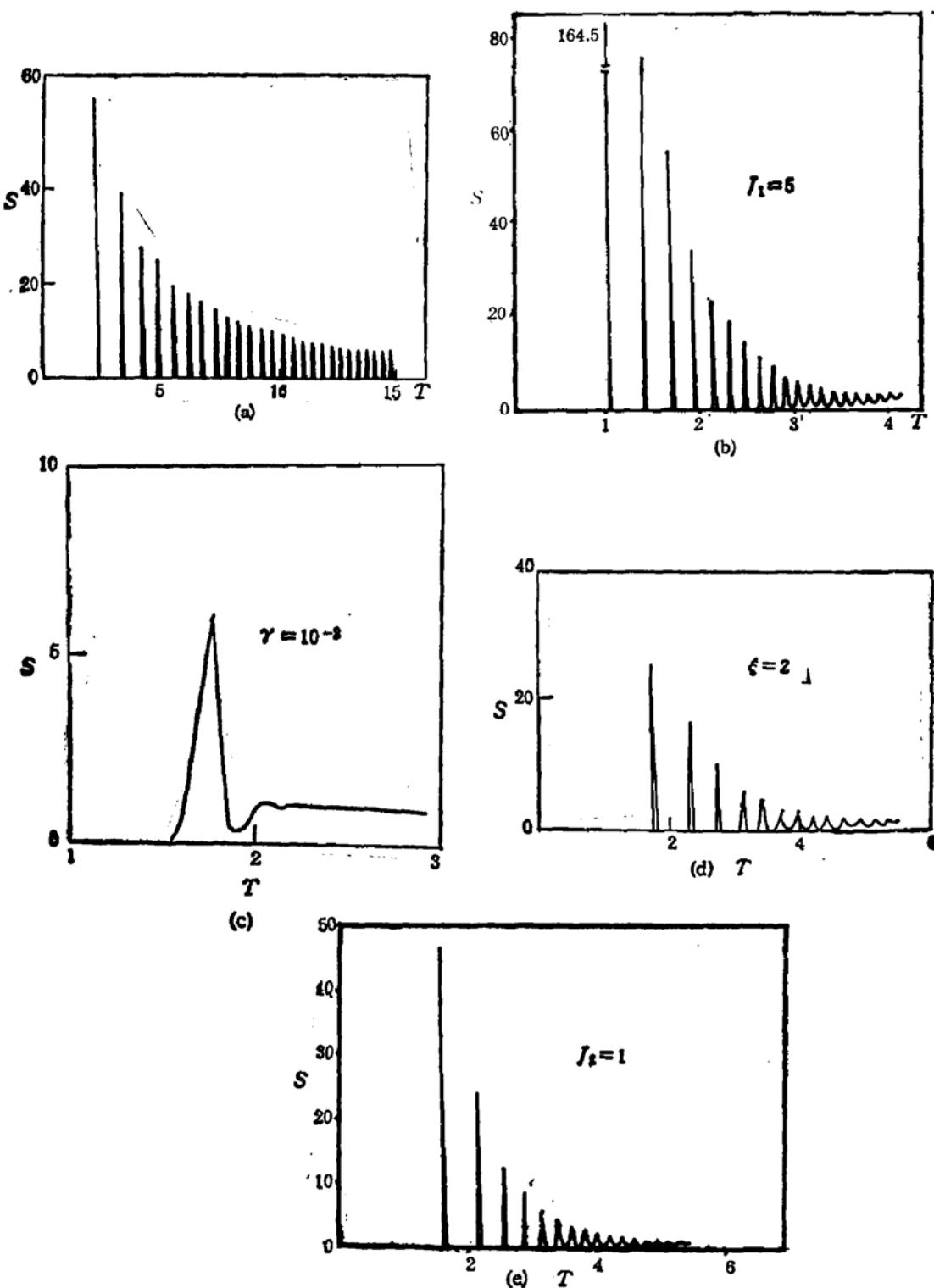
$$2.4 < J_1 < 2.8$$

与计算结果基本符合。

J_1 对自脉动的影响可定性地认为由于自脉动是 D_2 区的可饱和吸收 Ω 开关引起的，当 D_1 区注入电流过大时，使得吸收总是处于近饱和，则不可能产生重复 Ω 开关的脉动现象。

(b) γ 对自脉动的影响

取 $J_1 = 3$, $J_2 = 0.5$, $\xi = 4$, γ 分别取为 10^{-30} 、 10^{-5} 、 10^{-3} 、 10^{-2} 时的计算结果表明，当 γ 增大时，自脉动衰退，即 γ 对自脉动有抑制作用。当 γ 取 10^{-2} 时只有一个峰存在[如



(a) 瞬态 $S \sim T$ 曲线, 其中: $J_1 = 3$, $J_2 = 0.5$, $\xi = 4$, $\gamma = 10^{-30}$ (b) J_1 对自脉动的影响 ($J_1 = 0.5$, $J_2 = 0.5$, $\xi = 4$, $\gamma = 10^{-30}$)。 (c) γ 对自脉动的影响 ($J_1 = 3$, $J_2 = 0.5$, $\xi = 4$) (d) ξ 对自脉动的影响 ($J_1 = 3$, $J_2 = 0.5$, $\gamma = 10^{-30}$) (e) J_2 对自脉动的影响 ($J_1 = 3$, $\xi = 4$, $\gamma = 10^{-30}$)

图3 参数对瞬态特性的影响 ($K_1 = 0.8$, $K_2 = 0.2$)

图(3c)]. 图(3a)为 γ 取 10^{-30} 的结果。由于 γ 越大, 自发发射光子在吸收区被吸收的贡献比例就越大, 减弱了重复 Q 开关的调制深度, 所以自脉动不明显。当 γ 大到某一定值时

(如 $\gamma = 10^{-2}$), 甚至连张弛振荡也被抑制, 只出现一个瞬时过冲光强的单峰脉冲, 随后趋于稳态输出。这或许可为产生 PS 光脉冲提供一种方法, 但 γ 的控制比较困难, 我们可以采用背景恒定光照以达到上述目的。

(c) ξ 对自脉动的影响

对 $J_1 = 3$, $J_2 = 0.5$, $\gamma = 10^{-20}$ 时, ξ 分别取 1、2、3、4、6 的计算结果表明当 $\xi < 4$ 时无自脉动产生, 而 $\xi \geq 4$ 时产生自脉动并且 ξ 越大, 自脉动越明显。 $\xi = 2$ 时的结果如图(3d)所示, 图(3a)画出了 $\xi = 4$ 的结果。因为 ξ 越大, g_2 相应的调制深度越大, 则自脉动越明显。

(d) J_2 对自脉动的影响

对 $J_1 = 3$, $\gamma = 10^{-20}$, $\xi = 4$ 时, J_2 分别取 0、0.2、0.5、0.7、1.0、1.5 的计算结果表明当 $J_2 \leq 0.5$ 时自脉动存在, 图(3a)表示了 $J_2 = 0.5$ 的结果, 且 J_2 越小自脉动越强。 $J_2 > 0.5$ 时无自脉动, 图(3e)绘出 $J_2 = 1$ 的结果。因为 J_2 大, 则吸收区已近饱和, 自脉动很难产生。

从上面的计算结果得出, 希望产生自脉动时, 关键在于想办法加大吸收区的可饱和吸收, 使之从非饱和到饱和的范围大些, 这样就比较容易产生自脉动。

(e) 有直流偏置的瞬态响应

双稳态器件实际工作时, 总要有一定的直流偏置, 我们计算了直流偏置 $J_{1b} = (J_{1a1} + J_{1a2})/2$ 时的瞬态响应特性。 J_{1b} 与加脉冲的方式如图 4 中插图所示, 计算的 $J_{1b} \rightarrow 3$, $J_{1b} \rightarrow 7$ 的结果表明, 由于偏置的引入使得延迟时间 t_d 减小, 这是由于 J_{1b} 的预注入引起的。 $J_{1b} \rightarrow 3$ 的结果在图 4 中给出。

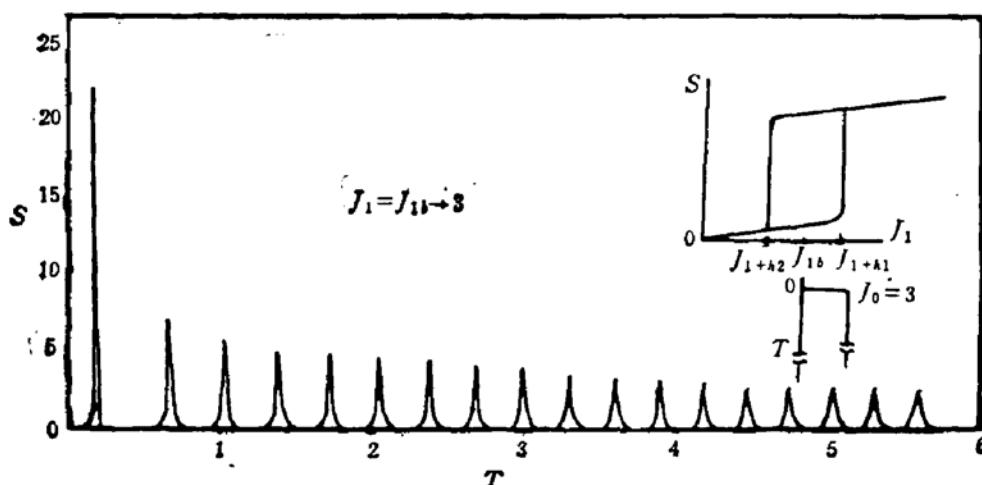


图 4 有直流偏置 J_{1b} 下的自脉动特性。
($K_1 = 128$, $K_2 = 0.2$, $\xi = 4$, $\gamma = 10^{-2}$, $J_2 = 0.5$, $J_{1b} = 2.41$)

通过上面的计算使我们了解到在双区共腔结构中, 对产生自脉动和双稳态有影响的几个参数的作用, 在器件设计中, 只要我们能控制这几个参数, 则可以得到所需要的器件, 这对器件设计是有利的。

对林世鸣同志在计算机使用方面给予的帮助表示感谢。

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] H. Kawaguchi, *IEE PROC.*, 129, 141 (1982).
- [4] H. Kawaguchi, *Appl. Phys. Lett.*, 41, 702(1982).
- [5] Ch. Harder, K. Y. Lau, and A. Yariv, *Appl. Phys. Lett.*, 40, 124(1982).
- [6] K. Y. Lau, Ch. Harder, and A. Yariv, *Appl. Phys. Lett.*, 40, 198(1982).
- [7] Henry Kressel and J. K. Bulter, *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs*, ACADEMIC PRESS, New York, San Francisco London, 1977.
- [8] 王启明, 通信学报, 6, 65(1985).
- [9] 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 Electric Injection

Wang Qiming and Li Jianmeng

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The computer simulation for stable characteristics and transient response of a CCTS bistable DH laser at electric injection is reported. The source of producing bistable behaviors and self-pulsation is intrinsic saturable absorber due to non-homogeneous injection currents for this model. Some parameters which affect self-pulsation and bistability are investigated, these parameters with relation to saturable absorber are spontaneous emission factor, input normalized currents J_1, J_2 for gain and absorbed sections, respectively.

KEY WORDS Semiconductor laser, Bistable, Computer simulation