

# 双稳态半导体激光器的理论分析

杜宝勋

(中国科学院半导体研究所)

## 提 要

本文对双稳态半导体激光器的滞后回线进行了理论分析。首先讨论了增益和损耗特性,然后根据阈值条件求出了基本公式。利用这个基本公式,可以定量描述滞后回线及其温度关系。我们还以 GaAs-AlGaAs 器件为例进行了典型计算。

## 一、理 论

双稳态半导体激光器的结构如图1所示。其中1—金属电极;2—N-AlGaAs限制层;

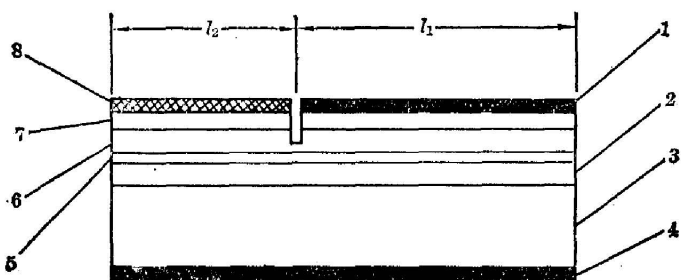


图1 GaAs-AlGaAs 双异质结构双稳态半导体激光器纵截面的示意图

Fig. 1 Section schematic of a GaAs-AlGaAs bistable semiconductor laser

3—n-GaAs 衬底层;4—金属电极;5—p-GaAs 有源层( $l_1$  是增益区,  $l_2$  是吸收区);6—P-AlGaAs 限制层;7—p-GaAs 接触层;8—氧化物绝缘层,谐振腔内的介质分为两区: I 区是增益区, II 区是可饱和吸收区。定性地说,可饱和吸收区具有两个状态;当腔内的光子密度为零时,它的吸收系数最大,即处于吸收状态;当腔内的

光子密度很大时,它的吸收系数甚小,即处于透明状态。正是这两个状态的存在,决定了器件具有双稳态工作特性。

在 II 区处于透明状态的情况下,该器件相当于普通半导体激光器。仅就这个普通半导体激光器而言,令  $j$  为名义工作电流密度,  $j_0$  为名义阈值电流密度,则腔内的光子密度为

$$s = \alpha(j - j_0). \quad (1)$$

其中  $\alpha$  为与材料性质和器件结构有关的常数。注意到增益系数与名义电流密度呈线性关系<sup>[5,6]</sup>, 把它的阈值增益系数写作

$$g_0 = \beta(j_0 - j'), \quad (2)$$

其中  $\beta$  为名义增益因子,  $j'$  为名义透明电流密度。由(1)和(2)式求出

$$g_0 = \beta(j - j' - s/\alpha), \quad (3)$$

考虑 II 区对器件的影响,把该区的吸收系数近似写作

收稿日期: 1984年8月14日; 收到修改稿日期: 1985年1月10日

$$\alpha = \alpha_0 \exp(-s/s_0), \quad (4)$$

其中  $\alpha_0$  为腔内的光子密度趋近于零时的吸收系数,  $s_0$  为与材料性质有关的特征光子密度。这时, 双稳态半导体激光器的阈值增益系数为

$$g_{th} = g_0 - K\alpha, \quad (5)$$

其中  $K = l_2/l_1$ ,  $l_1$  为 I 区的长度,  $l_2$  为 II 区的长度。把 (3) 和 (4) 式代入 (5) 式中求出

$$g_{th} = \beta(j - j' - s/a) - K\alpha_0 \exp(-s/s_0). \quad (6)$$

若将谐振腔端面上的透射损耗和介质材料内部的自由载流子吸收等用吸收系数  $A$  来表示, 根据阈值条件  $g_{th} = A$ , 由 (6) 式求出

$$j = j' + (A/\beta) + (K\alpha_0/\beta) \exp(-s/s_0 + s/a), \quad (7)$$

这就是双稳态半导体激光器的基本公式。

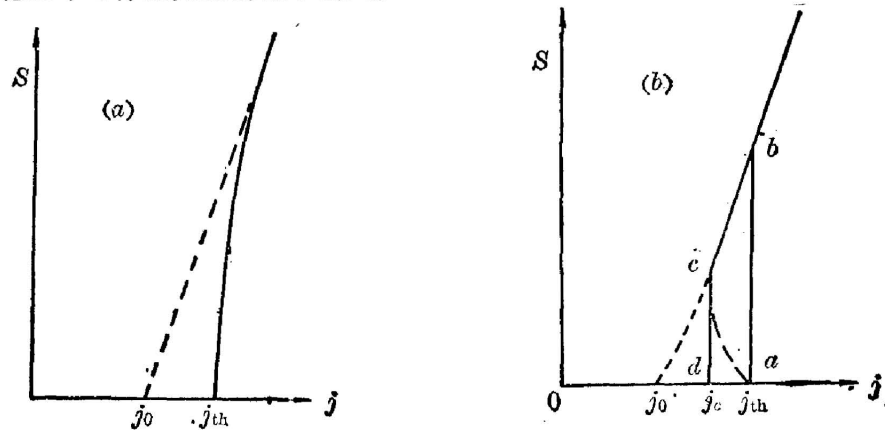


图 2 两种输出特性曲线的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two types of output characteristics

(a) only monostable state above threshold  $dj/ds|_{s=0} > 0$ ; (b) bistable state occurred below threshold  $dj/ds|_{s=0} < 0$  Hysteresis:  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$

根据 (7) 式画出的输出特性曲线如图 2 所示; (a) 表示  $dj/ds|_{s=0} > 0$  的情况, 它只具有阈值以上的单稳态工作特性; (b) 表示  $dj/ds|_{s=0} < 0$  的情况, 它还具有阈值以下的双稳态工作特性。显然, 曲线 (a) 和 (b) 的渐近线 (虚线) 表示前面讲到的那个普通半导体激光器的输出特性, 它与横坐标轴的交点就是其名义阈值电流密度

$$j_0 = j' + A/\beta. \quad (8)$$

图 2(b) 表示在阈值以下具有滞后回线  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ , 根据  $dj/ds|_{s=0} < 0$ , 求出具有滞后回线的条件是  $K\alpha_0/\beta > s_0/a$ 。这时, 器件的工作情况如下: (i) 当  $j$  由零增大到  $j_{th}$  时, 器件立即由  $a(j_{th}, 0)$  态跳到  $b(j_{th}, s_b)$  态。由 (7) 式求出:

$$j_{th} \simeq j' + A/\beta + s_b/a, \quad (9)$$

$$s_b \simeq aK\alpha_0/\beta. \quad (10)$$

(ii) 当  $j$  由  $j_{th}$  减小到  $j_c$  时, 器件立即由  $c(j_c, s_c)$  态跳到  $d(j_c, 0)$  态。c 点是输出特性曲线的极值点。由 (7) 和 (10) 式求出:

$$\exp(s_c/s_0) \simeq s_b/s_0, \quad (11)$$

$$j_c \simeq j' + A/\beta + s_c/a + s_0/a. \quad (12)$$

最后由 (9) 和 (12) 式求出滞后回线宽度  $\Delta j = j_{th} - j_c = (s_b - s_c - s_0)/a$ 。

## 二、讨 论

在阈值以上有速率方程

$$j - j_0 - q(c/n)As = 0, \quad (13)$$

其中  $q$  是电子的电荷,  $c$  是真空中的光速,  $n$  是介质的折射率。由(7)、(8)和(13)式求出:

$$a = n/qcA_0. \quad (14)$$

关于特征光子密度  $s_0$ , 目前尚无可用的数据, 只能根据典型样品的实验结果来作出估计。令  $I_0$ 、 $I_c$  和  $I_{th}$  分别是对应于  $j_0$ 、 $j_c$  和  $j_{th}$  的电流, 则由(8)、(9)和(12)式求出:

$$(I_c - I_0)/(I_{th} - I_0) = (s_c + s_0)/s_{b0}. \quad (15)$$

再令  $x = s_c/s_0$ , 则由(11)和(15)式求出:

$$(I_c - I_0)/(I_{th} - I_0) \simeq (1+x)\exp(-x); \quad (16)$$

$$s_0 \simeq s_{b0} \exp(-x). \quad (17)$$

例如: 典型的 GaAs-AlGaAs 双异质结构埋层条形器件, 有源层厚度  $d \simeq 0.25 \mu\text{m}$ 、有源层宽度  $\omega \simeq 3 \mu\text{m}$ 、 $l_1$  和  $l_2$  分别为  $150 \mu\text{m}$  和  $100 \mu\text{m}$ , 室温工作的实验结果是  $I_0 \simeq 11 \text{ mA}$ 、 $I_c \simeq 15 \text{ mA}$  和  $I_{th} \simeq 23 \text{ mA}$ , 由(16)式求出  $x \simeq 2.33$ ; 取  $n = 3.6$  和  $A = 100 \text{ cm}^{-1}$ , 由(14)式求出  $a \simeq 7.25 \times 10^6 \text{ A}^{-1}$ ; 再取  $\alpha_0 = 450 \text{ cm}^{-1}$  和  $\beta = 0.044 \text{ cm} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ , 由(10)式求出  $s_{b0} \simeq 4.94 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ; 最后, 由(17)式求出  $s_0 \simeq 4.81 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , 因而  $s_0/a \simeq 663 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ;

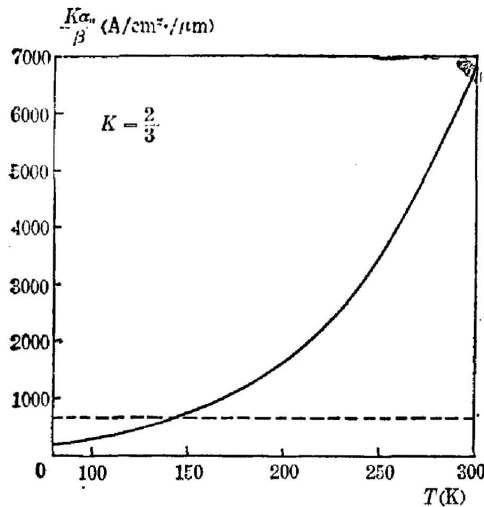


图3 根据计算结果画出的  $\frac{K\alpha_0}{\beta}$  与温度  $T$  的关系(实线)和典型 GaAs-AlGaAs 器件的  $\frac{s_0}{a}$  (虚线)。两者的交点表明临界温度近似为 145 K

Fig. 3 Calculated curve of  $\frac{K\alpha_0}{\beta}$  versus temperature  $T$  (solid line) and  $\frac{s_0}{a}$  in a typical GaAs-AlGaAs laser (dash line)

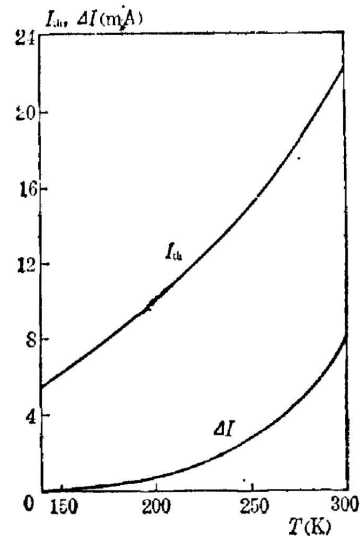


图4 根据计算结果画出的典型 GaAs-AlGaAs 器件的阈值电流  $I_{th}$  和滞后回线宽度  $\Delta I$  与温度  $T$  的关系

Fig. 4 Calculated curves of threshold current  $I_{th}$  and hysteresis width  $\Delta I$  versus temperature  $T$

上述理论结果表明,  $K\alpha_0/\beta$  的取值是决定滞后回线宽度的主要因素。对于给定的器件,  $K$  值保持不变,  $\beta$  和  $\alpha_0$  都是温度  $T$  的函数, 因而滞后回线宽度是随温度变化的。这样一来, 必然有一个滞后回线存在的下限温度, 称为临界温度。

图 3 中的实线表示  $K=2/3$  时  $K\alpha_0/\beta$  与  $T$  的关系, 而虚线表示  $s_0/a = 663 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ , 两者的交点表明这个典型器件的临界温度近似为 145 K。这里,  $\beta(T)$  是引用文献[5]的结果,  $\alpha_0(T)$  是根据文献[7]中 77 K 和 297 K 的数据按指数变化规律估计的, 我们还假定  $s_0$  不随温度变化。

图 4 是根据计算结果画出的这个典型器件的阈值电流  $I_{\text{th}}$  和滞后回线宽度  $\Delta I = I_{\text{th}} - I_0$  随温度  $T$  变化的曲线。在计算中, 假定内部量子效率  $\eta_i = 0.65$ , 还引用了文献[5]中  $j'(T)$  的数据。可见, 滞后回线宽度随温度升高而增大, 然而它的增大是以阈值电流升高为代价的。

显然, 在温度保持不变的情况下, 改变  $K$  值也能改变滞后回线宽度。就这个典型器件而言, 求出  $K$  的室温临界值(下限)约为 0.065, 即在  $l_1 \approx 150 \mu\text{m}$  的情况下必须取  $l_2 > 10 \mu\text{m}$ 。

最后必须指出的是, 利用 II 区的控制电流来调节吸收系数, 也能改变滞后回线宽度。令  $j_{\text{II}}$  是名义控制电流密度, 则在  $j_{\text{II}} < j'(T)$  的情况下可以写出<sup>[8]</sup>:  $\alpha(T, j_{\text{II}}) \approx \alpha_0(T) [1 - j_{\text{II}}/j'(T)]$ 。也就是说, 在温度保持不变的情况下, 滞后回线宽度随着控制电流的增大而减小。就这个典型器件而言, 求出  $j_{\text{II}}$  的室温临界值(上限)为  $3700 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ , 它对应的控制电流为 4.3 mA。

### 三、结 论

根据我们的理论分析, 可以作出如下结论:

- (1) 滞后回线存在的条件是  $K\alpha_0/\beta > s_0/a$ ;
- (2) 滞后回线宽度的增大是以阈值电流升高为代价的;
- (3) 滞后回线宽度随温度的变化是很灵敏的;
- (4) 可以利用控制电流来改变滞后回线宽度。

### 参 考 文 献

- [1] G. J. Lasher; *Solid-state Electronics*, 1964, **7**, No. 10 (Oct), 707.
- [2] M. I. Nathan, et al.; *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**, No. 2 (Feb), 473.
- [3] Ch. Harder, et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**, No. 2 (Jan), 124.
- [4] H. Kawaguchi; *IEE Proc.*, 1982, Part I, **129**, No. 4 (Apr), 141.
- [5] F. Stern; *IEEE J. Q. E.*, 1973, **QE-9**, No. 2 (Feb), 290.
- [6] 杜宝勋;《半导体学报》, 1982, **3**, No. 6 (Nov), 458.
- [7] F. Stern; *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**, No. 12 (Dec), 5382.
- [8] 黄照等;《半导体学报》, 1983, **4**, No. 5, 449.

## Theoretical analysis of bistable semiconductor lasers

DU BAOXUN

*(Institute of Semiconductor, Academia Sinica)*

(Received 14 August 1984; revised 10 January 1985)

### Abstract

A theoretical analysis of hysteresis is presented on bistable semiconductor lasers. First, characteristics of gain and loss are discussed, followed by deduction of the basic formula according to threshold conditions. The formula is then used in a quantitative description of the hysteresis and its dependence on temperature. As a typical example, calculation are carried out for a GaAs-AlGaAs device.