

# 单量子阱半导体激光器在输出反馈损耗调制方式下的双稳特性

晏绪光 蒋剑良

(杭州电子工业学院物理教研室, 杭州 310037)

**提要** 利用速率方程求出了输出反馈损耗调制型双稳半导体激光器输出光强稳态解的解析表达式。利用双区共腔 GaAs/AlGaAs 单量子阱半导体激光器, 观测到半导体激光器在输出反馈损耗调制方式下的光双稳特性。比较速率方程解的理论计算曲线和实验观测到的双稳特性曲线后发现, 两种双稳特性曲线随反馈损耗调制系数等器件参量变化的规律完全一致。

**关键词** 单量子阱, 半导体激光器, 损耗调制, 双稳

## 1 引言

双稳半导体激光器具有光开关、记忆、光脉冲整形和放大等功能, 是光信息处理、光计算和全光通信的关键部件, 十多年来一直受到人们的重视。利用双区共腔(CCTS)或多区共腔半导体激光器的双稳特性, 可以用来处理光信号。利用这种半导体激光器的自脉冲行为, 可以产生超短光脉冲, 用于全光时钟提取和时钟恢复。双区共腔半导体激光器和放大器还可用作可调谐窄带滤波器、频率鉴别器、光波长转换器和光探测器<sup>[1]</sup>。双区共腔双稳半导体激光器的研究工作虽然进行了很长时间<sup>[2~4]</sup>, 但双稳宽度的调节和控制都比较困难, 至今已报道的 CCTS 器件, 有的利用改变温度的方法控制饱和吸收光强, 从而改变双稳宽度<sup>[5]</sup>, 使用起来很不方便。有的通过改变吸收区固定偏置电流的方法调节双稳宽度, 但双稳宽度的改变量较小<sup>[2]</sup>。以前, 我们曾提出光输出反馈损耗调制型双稳激光器的半经典理论<sup>[6]</sup>, 并利用 Ar<sup>+</sup> 激光器观测到这种运转方式下的双稳特性<sup>[7]</sup>。最近, 我们利用双区共腔 GaAs/AlGaAs 单量子阱半导体激光器, 观测到半导体激光器在输出反馈损耗调制方式下的光双稳特性。理论和实验表明, 在这种运转方式下, 双稳宽度的调节方便, 且可在很大的范围内改变, 是一种较为实用的双稳方案。

## 2 速率方程的稳态解

单量子阱双区共腔半导体激光器在输出反馈损耗调制方式下工作的器件结构如图 1 所示。激光器的激光腔内分成增益区和吸收区两部分。假定两区内载流子浓度各自均匀分布, 腔内光子密度处处均匀, 则增益区和吸收区注入载流子浓度和腔内光子密度应满足下述速率方程:

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{j_1}{ed} - \frac{n_1}{\tau} - \xi a(n_1 - N)S, \quad n_1 > N \quad (1a)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{j_f}{ed} - \frac{n_2}{\tau} - \xi a(n_2 - N)S, \quad n_2 < N \quad (1b)$$

$$\frac{dS}{dt} = [r_1 \xi a(n_1 - N) + r_2 \xi a(n_2 - N)]S - \frac{S}{\tau_p} \quad (1c)$$

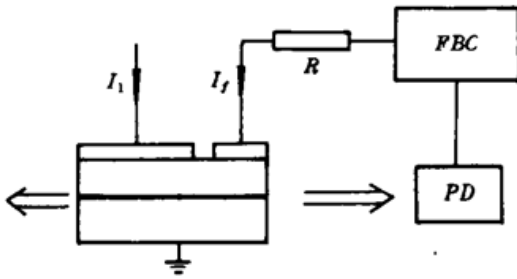


Fig. 1 Diagram of a SQW CCTS semiconductor laser with an output-feed-back loss-modulation scheme

式中  $n_1, n_2, S$  分别为增益区注入载流子浓度、吸收区注入载流子浓度、腔内光子密度,  $j_1$  为增益区注入电流密度,  $d$  为有源层厚度,  $e$  为电子电荷,  $\tau, \tau_p$  分别为非平衡载流子自发辐射复合寿命、腔内光子寿命,  $N$  代表为获得增益所需的注入载流子浓度,  $\xi$  为激活区内激光的模场限制因子,  $a$  为腔内增益常数(由光学跃迁截面决定);  $r_1, r_2$  分别为增益区、吸收区长度与总腔长的比值( $r_1 + r_2 = 1$ );  $j_f$  为吸收区的反馈损耗调制电流密度, 且满足下式:

$$j_f = \beta \frac{\eta I_o + I_i}{1 + (\eta I_o + I_i)/I_s} \quad (2)$$

其中  $\beta$  为反馈损耗调制系数,  $\eta$  为输出激光的反馈系数,  $I_o, I_i$  和  $I_s$  分别为输出激光强度、外输入光信号强度和光探测器的饱和光强。为简单起见, 速率方程中忽略了自发辐射对激光强度的影响。式(1a)右边第三项代表光放大, 式(1b)右边第三项代表光吸收, 在式(1c)中, 光放大和光吸收对腔内光子密度的影响与相应区域的长度有关。

由方程组(1)可以导出稳态下的激光强度为

$$I_o = h\nu v_p S = h\nu v_p \frac{\tau_p}{ed} [r_1 j_1 - (J_0 - r_2 j_f)] \quad (3)$$

其中  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为激光振荡模的频率,  $v_p$  为激活介质中光的群速度,  $J_0$  为无反馈损耗调制时激光器的阈值电流密度, 且

$$J_0 = \frac{ed}{\tau_p} \cdot \frac{1 + \xi a N \tau_p}{\xi a \tau} \quad (4)$$

利用  $J_0$  将注入电流密度归一化, 由(3)式和(2)式可得

$$I_o = A - \left[ 1 - B \frac{\eta I_o + I_i}{1 + (\eta I_o + I_i)/I_s} \right] \quad (5)$$

其中,  $A = r_1 j_1 / J_0$  表示归一化泵浦强度,  $B = r_2 \beta b / J_0$  为规格化反馈损耗调制系数,  $I_o = I_o / b, I_i = I_i / b, I_s = I_s / b$  分别为规格化激光强度、规格化外输入光信号强度、光探测器的规格化饱和光强。上述各式中

$$b \equiv h\nu v_p J_0 \frac{\tau_p}{ed} \quad (6)$$

式(5)的物理意义可以表达为输出光强为泵浦强度扣去损耗, 在表示损耗的方括号中, 1 表示无反馈调制电流时的损耗, 由于注入反馈损耗调制电流, 腔内总损耗将减小。

利用式(5), 可以求出规格化激光输出强度  $I_o$  的解析表达式为

$$I_o = \frac{[(B\eta - 1)I_s - (1 - A)\eta - I_i]2\eta}{\pm (1/2\eta) \{ [(B\eta - 1)I_s - (1 - A)\eta - I_i]^2 - 4\eta[(1 - A)(I_s + I_i) - BI_s I_i] \}^{1/2}} \quad (7)$$

适当选择参数  $B$ ,  $\eta$ ,  $I_s$ ,  $I_i$  的数值, 可以求出激光输出强度  $I_o$  随泵浦强度  $A$  变化的曲线。同样, 适当选择参数  $B$ ,  $\eta$ ,  $I_s$  和  $A$  的数值, 还可以求出激光输出强度  $I_o$  随输入光信号强度  $I_i$  变化的曲线。计算结果表明, 在输出激光强度  $I_o$  和泵浦强度  $A$  之间, 以及  $I_o$  和输入光信号强度  $I_i$  之间均存在双稳特性曲线。且双稳宽度和输出激光强度将随参量  $B$ ,  $\eta$ ,  $I_s$  等的取值不同而变化。图 2(a), 图 3(a), 图 4(a) 分别为参量  $B$ ,  $\eta$ ,  $I_s$  变化时, 输出激光强度  $I_o \sim$  归一化泵浦强度  $A$  双稳特性的理论计算结果。

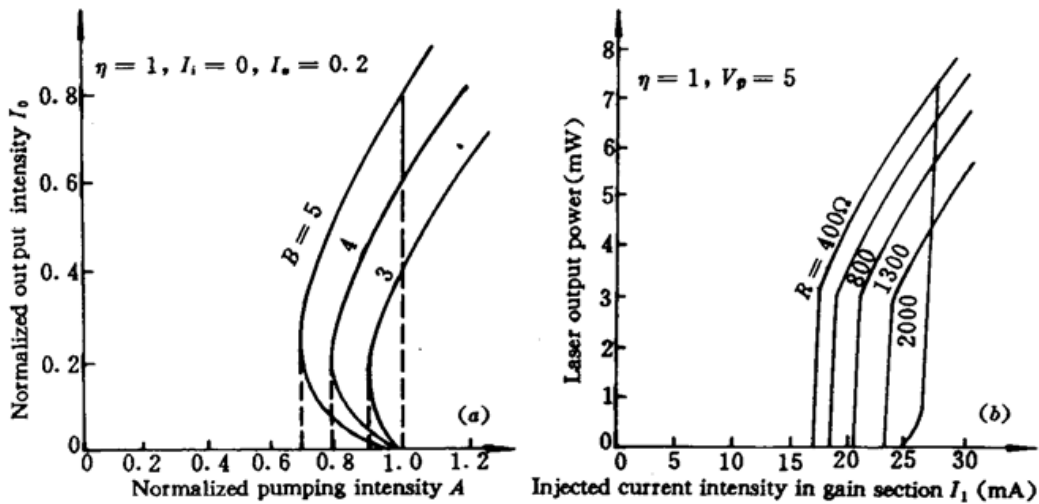


Fig. 2  $I_o \sim A$  bistable characteristics for different feedback loss-modulation coefficients  $B$ .

(a) theoretical calculation; (b) experimental measurement

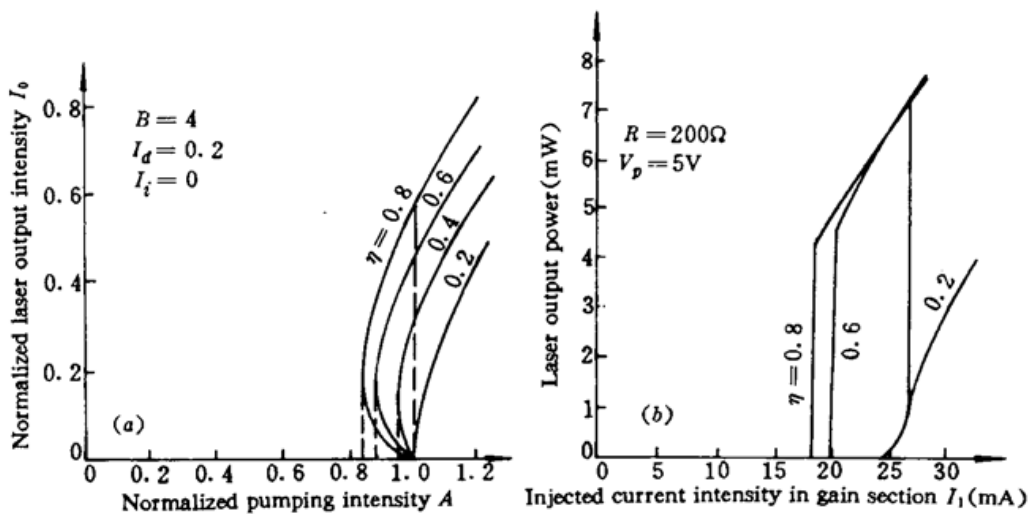


Fig. 3  $I_o \sim A$  bistable characteristics for different feedback coefficients  $\eta$

(a) theoretical calculation; (b) experimental measurement

### 3 实验结果

实验采用低阈值脊形波导 GaAs/AlGaAs 单量子阱半导体激光器, 由中国科学院半导体所提供。量子阱宽、垒宽分别为 10.0 nm, 垒铝含量  $x = 0.22$ 。激光器的电极为条形, 宽  $5 \mu\text{m}$ ; 腔长  $400 \mu\text{m}$ , 增益区和吸收区长度比为 6:1, 两区隔离电阻  $> 100 \text{ k}\Omega$ , 波长为 850 nm。

实验结果如图 2(b), 图 3(b) 和图 4(b) 所示。实验中, 通过改变反馈回路中限流电阻  $R$  的阻值, 可以改变光电流放大倍数, 从而改变反馈损耗调制系数  $B$  的大小。 $R$  变小, 电流放大倍数增

大,  $B$  增大。由图 2(b) 可以看出, 随着反馈损耗调制系数  $B$  的增大, 双稳跨度和激光输出强度越来越大。与图 2(a) 中双稳特性随反馈损耗调制系数  $B$  而变化的规律完全相同。为了改变反馈系数, 可在半导体激光器输出端和光探测器之间插入可变衰减滤光片, 改变滤光片的透过率即可改变反馈系数  $\eta$ ; 或者, 改变光探测器受光面积, 亦可改变反馈系数  $\eta$ 。为了改变光探测器的饱和光强, 可以改变光探测器的负偏压。由图 3(b) 和图 4(b) 可以看出, 随着反馈系数  $\eta$  或光探测器的负偏压  $V$ , (即光探测器的饱和光强  $I_s$ ) 的增大, 双稳跨度越来越大。由图 4(b) 还可看出, 随光探测器负偏压的增大, 激光输出强度越来越大。这些变化趋势和相应图中的理论计算结果完全一致。

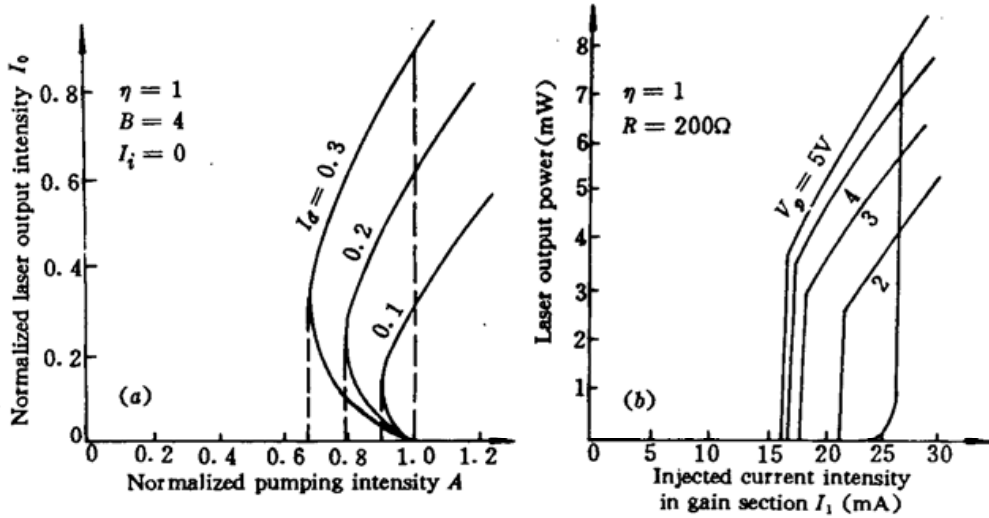


Fig. 4  $I_o \sim A$  bistable characteristics for different saturation intensities  $I_s$  of the photodetector  
(a) theoretical calculation; (b) experimental measurement

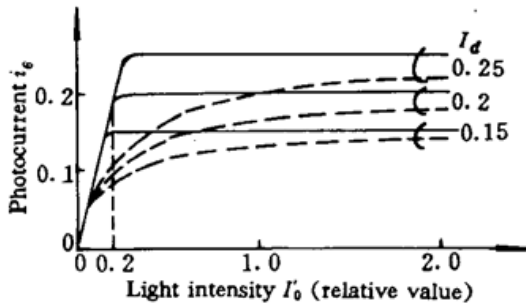


Fig. 5 Saturation characteristics of a photodetector  
Solid lines; experimentally measured saturation characteristics of the photodetector;  
Dashed lines; theoretical calculation result of photocurrent of PD  
(Photocurrent  $I_e = i_{e0} \frac{I_0}{1 + I_0/I_s}$ )

但在图 3(b) 中, 当  $\eta$  变化时, 激光输出强度基本不变, 而理论计算曲线的激光输出强度随  $\eta$  的增大而增强。产生这种差别的原因是由于实际光探测器的饱和特性和理论计算中所采用的 PD 的饱和特性曲线模型稍有差别, 如图 5 所示。图 5 中, 实线表示光探测器的实测饱和特性, 虚线表示 PD 饱和特性的理论曲线。理论模型的光电流  $i_e$  与接收光强  $I_0$  之间的关系由公式

$$i_e = i_{e0} \frac{I_0}{1 + I_0/I_s}$$

表示, 式中  $I_s$  为 PD 的饱和光强。光电流  $i_e$  随入射光强  $I_0$  的增大而增大, 最终趋于饱和值。但对于实际光探测器, 当入射光强由零开始增大时, 光电流几乎随光强的增加而线性增大, 当入射光强达到饱和值时, 光电流也达到饱和值, 之后几乎不再变化。因而, 当反馈系数  $\eta$  变大时, 虽然光探测器接收到的光强增大, 但对于同一条实验光电流曲线, 饱和光电流相同, 故反馈调制

电流也相同。因此激光输出强度也相同。但对于同一条理论光电流曲线, 当反馈系数  $\eta$  变大时, 若其他条件(如反馈回路的放大倍数等)不变, 则由于光探测器接收到的光强变大, 因而光电流增强, 即加到激光器上的反馈调制电流增强, 因而输出激光强度变大。

半导体激光器运转在输出反馈损耗调制方式下, 能够产生双稳特性的物理机制可以解释如下: 当增益区注入电流密度增大到阈值时, 激光器开始起振, 产生激光。由于激光输出到光探测器而产生反馈损耗调制电流, 使吸收区损耗减少, 导致阈值降低, 激光振荡增强, 因而反馈调制电流更大, 损耗进一步减小。这种强烈的正反馈过程, 可以使激光输出从起振时的零输出状态跳变到某一有限的高输出状态。反之, 当注入电流由较大数值减小时, 类似的正反馈过程可以使激光器从高输出状态跳回到零输出状态, 从而得到双稳输出。

## 4 结 论

理论计算和实验结果表明, 输出反馈损耗调制型双稳半导体激光器的双稳特性(包括双稳跨度和激光输出强度的大小)可以通过反馈损耗调制系数  $B$ 、反馈系数  $\eta$ 、光探测器的饱和光强  $I_s$  等器件参量来调节和控制。

与可饱和吸收型双区共腔双稳半导体激光器相比, 输出反馈损耗调制型双稳半导体激光器具有器件参量便于调节的优点, 且双稳宽度的调节范围比前者大得多, 因此更具实用性。如果改变反馈注入电流的大小, 使吸收区工作于吸收(损耗)和增益两种状态, 则双稳跨度的调节范围更大。一般的双区共腔双稳半导体激光器的开关速度决定于增益区和吸收区内的载流子寿命。而输出反馈损耗调制型双稳半导体激光器的开关速度取决于光电反馈回路的响应时间。如采用高速 pin/HEMT(高电子迁移率三极管)组合元件, 则输出反馈损耗调制型双稳半导体激光器的开关速度和传统的双区共腔双稳半导体激光器的开关速度将有相同的数量级。

**致谢** 感谢中国科学院半导体所提供双区共腔 GaAs/AlGaAs 单量子阱半导体激光器。

## 参 考 文 献

- 1 H. Kawaguchi. Progress in optical functional devices using two-section laser diodes/amplifiers. *IEE Proc. J. Optoelectronics*, 1993, 140(1): 3~15
- 2 Ch. Harder, K. Y. Lau, A. Yariv. Bistability and pulsations in cw semiconductor lasers with a controlled amount of saturable absorption. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, 39(5): 382~384
- 3 王启明, 吴荣汉, 赵建和等. GaAs/GaAlAs 光双稳激光器稳态及动态特性的实验研究. *半导体学报*, 1990, 11(1): 28~34
- 4 李建蒙, 朱龙德, 王启明. CCTS 结构 GaAs/AlGaAs 单量子阱双稳态激光器. *半导体学报*, 1990, 11(6): 481~483
- 5 Hai-feng Liu, Takeshi Kamiya, Baoxun Du. Temperature dependence of bistable InGaAsP/InP lasers. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1986, QE-22(9): 1579~1586
- 6 晏绪光, 郑 令. 光输出反馈损耗调制型双稳激光器的半经典理论. *量子电子学*, 1993, 10(3): 204~213
- 7 晏绪光. 光输出反馈损耗调制型双稳激光器特性与器件参量之间的关系. *激光杂志*, 1994, 15(3): 102~107

## Bistability of a SQW Semiconductor Laser with an Output-feedback Loss-modulation Scheme

Yan Xuguang Jiang Jianliang

(Hangzhou Institute of Electronic Engineering, Hangzhou 310037)

**Abstract** An analytical expression of the steady-state laser output intensity of a bistable semiconductor laser of output-feedback loss-modulation has been obtained from rate-equations. Using a CCTS GaAs/AlGaAs SQW semiconductor laser, we have observed the bistability arising from output feedback loss modulation in the semiconductor laser. Comparing the theoretical curves of bistability obtained from the rate-equations with the experimental patterns of bistable characteristics, we found that there is a good agreement between the two kinds of bistability curves when the device's parameters (for example, feedback loss-modulation coefficient *et al.*) are changed.

**Key words** SQW, semiconductor laser, loss-modulation, bistability

## 铜激光治疗结膜血管瘤 36 例疗效显著

自 1990 年以来,我院采用中国科学院上海光机所生产的 CVL-10 型铜蒸气激光器治疗结膜血管瘤 36 例,获得显著疗效。其中,睑结膜 13 例,球结膜 14 例,睑、球结膜 9 例。瘤体面积均在  $0.5 \sim 1.5 \text{ cm}^2$ 。采用的铜蒸气激光波长为  $578.2 \text{ nm}$ ,功率为  $0.9 \sim 1.1 \text{ W}$ ,功率密度为  $7.2 \sim 8.8 \text{ W/cm}^2$ 。光纤头距瘤体  $0.5 \text{ cm}$ ,进行均匀扫描,直到隆起的瘤体迅速萎缩消失,表面形成白色凝固膜为止。瘤体在  $1 \text{ cm}^2$  以内可 1 次完成治疗。经临床观察,治疗后瘤体完全消失,局部结膜颜色基本正常者,即治愈率高达  $88.8\%$ 。总有效率达  $100\%$ 。

铜激光治疗结膜血管瘤的机理考虑为:(1)生物组织对不同波长的激光具有选择性吸收的特性,铜激光输出的黄光,波长  $578.2 \text{ nm}$ ,接近血红蛋白吸收峰  $577 \text{ nm}$ ,用于治疗血管病变时,光能主要为血红蛋白选择性吸收,结膜血管瘤的病理显示,是由大小不等、形状不规则的血管窦和毛细血管构成,因而当光子与瘤体内含铁血红蛋白分子作用后,血红蛋白变性,血浆蛋白凝固,导致血液粘稠度增高,血管闭塞,瘤体迅速萎缩;(2)根据血管的光学特性和热扩散的理论,一般异常血管的热弛豫时间大约为  $0.3 \text{ ms}$ ,而铜激光的脉冲时间为  $30 \text{ ps}$ ,远远小于热弛豫时间,能使激光的生物热效应约束在毛细血管内,使瘤体得到治疗而周围的正常组织又不被破坏,从而达到理想的治疗目的。

(中国人民解放军第 211 医院 张利军 张永丰 徐艳平 孙秀英  
哈尔滨 150080 收稿日期:1996 年 5 月 30 日)