

# 高速 CCTS 光双稳激光器的研究\*

李长英 忽满利 三原远\*\* 韩雁勤\*\*

(西北大学物理系, 西安 710069)

徐大纶 程 瑶

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

吴奕汉 张双生

(中国科学院半导体研究所, 北京 100084)

**摘 要** 从速率方程出发对双区共腔(common-cavity two section 简称 CCTS)光双稳激光器进行了精确的理论分析与计算, 并对其稳态特性进行了实验研究和测试, 得出了定量和定性的分析结果, 同时还首次发现当激光输出高态时又出现了一次光双稳和开关效应。经研究确认是量子阱探测器的自电光效应。并提出一种可集成双逻辑功能显示的新型网络模型器件。

**关键词** 双区共腔, 双逻辑, 双稳态, 自电光效应, 自锁, 量子阱。

## 1 引 言

光双稳因其在光逻辑上的潜在应用和包含着一些有意义的现象, 是当代高技术研究中一个急速发展的重要领域。半导体光双稳激光器因其结构简单、尺寸小、功耗低、高速度、增益高、功能多、易集成等显著特点, 在高速调制光源<sup>[1]</sup>、半导体超快激光<sup>[2, 3]</sup>、光数字放大<sup>[4, 5]</sup>、光数字编码、光信息处理以及光计算机等方面, 具有广阔的应用前景。

早在 1964 年 Lasher 从理论上阐述了双区共腔型激光器实现光双稳的可能性<sup>[6]</sup>, 近几年来, Kawaguchi 等<sup>[7]</sup>、Yariv 等<sup>[8]</sup>和王启明等<sup>[9]</sup>都对这种类型结构器件的基本特性进行了较多的研究和讨论, 但对器件从理论上进行精确计算指导其对器件稳态特性进行比较系统测量的报道不多。本文从速率方程出发对器件的吸收区和增益区的载流子运动行为进行了精确理论推导和计算, 并应用于双区共腔型器件。从器件的稳态特性测试证明: 精确的理论计算对器件的优化设计具有重要的指导意义。

## 2 原理设计与理论计算

### 2.1 原理设计

\* 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室基金资助项目。

\*\* 91 级应届毕业生。

收稿日期: 1995 年 6 月 6 日; 收到修改稿日期: 1995 年 9 月 11 日

半导体激光器的双稳特性, 是基于可饱和吸收效应<sup>[10, 11]</sup>, 色散效应, 淬灭效应<sup>[12, 13]</sup>等不同的物理机制。本文 CCTS 激光器属可饱和吸收效应类型。

### 2.1.1 器件结构

采用液相外延技术制备器件芯片, 要求增益区和吸收区有良好的电隔离, 而且芯片具有

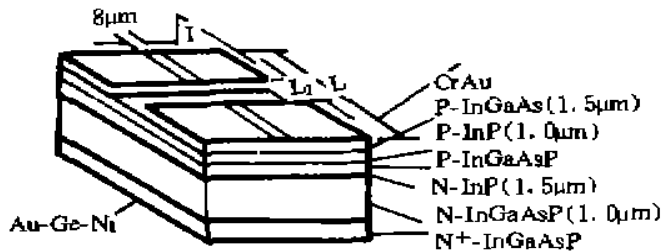


Fig. 1 InGaAsP/InP CCTS DH optical Bistable Laser structure

激光器腔长为 300 μm 两增益区的隔离电阻大于 10 kΩ。

### 2.1.2 InP H<sup>+</sup> 轰击

对 InP H<sup>+</sup> 轰击进行实验研究表明<sup>[14]</sup>, 厚约 0.4 μm 的 Au/Zn/Au 蒸发膜与厚度约 3 μm 的 Az1350J 光刻胶所组成的复合膜对注入能量约为 250 keV 的 H<sup>+</sup> 轰击提供良好的掩蔽, 在此能量下 H<sup>+</sup> 可进入 InP 内约 2.5 μm 的深度。

### 2.1.3 CCTS 激光器的 H<sup>+</sup>(质子) 轰击

2.1.3.1 断条状 Au/Zn/Au/Az 掩膜的制备 对 CCTS 器件进行 H<sup>+</sup> 轰击的目的: 1) 通过对增益区中平面掩埋异质结<sup>[24]</sup>(plane blanket Heterogeny, 缩写为: PBH) 结构两侧的 PNP 管 P 型发射区和 N 型基区进行适度 H<sup>+</sup> 轰击, 以增强其正向阻断特性以达到有效的发挥限流作用; 2) 利用 H<sup>+</sup> 轰击的高阻绝缘特性制作吸收区。

H<sup>+</sup> 轰击掩膜呈现窄条形状且越窄越好。要求对增益区和吸收区进行 H<sup>+</sup> 轰击必须同时进行, 且呈现断条状, 其中长为  $L_1$  的部份制备增益区, 间距  $L_2$  部份制作吸收区。Au/Az/Au 既是复合膜的底膜又是器件 P 侧欧姆接触金属, 因此制备高质量 Au/Zn/Au 断条具有极其重要的意义。

Au/Zn/Au 断条是蒸发经光刻后而制备的, 必须制做到整齐、牢固、窄至 5 μm 的 Au/Zn/Au 断条底膜。

断条底膜还必须降低匀胶速度, 经多次涂胶再在其上制作窄至 5 μm, 厚为 3 μm 的 Az1350J 光刻胶断条, 经坚膜后即成为同时制备增益区和吸收区的 H<sup>+</sup> 轰击掩膜。

2.1.3.2 吸收区的 H<sup>+</sup> 轰击 吸收区是实现 CCTS 器件双稳态运行的首要条件: 既要求具有足够大的隔离电阻, 又不允许使谐振腔有任何损伤, 吸收区应制备在有源区上方 P-InP 限制层内, 注入深度视其厚度而定, 需将顶层 P-InGaAsP 腐蚀掉以增加注入深度增强隔离效果。设横向隔离电阻为  $R$ , 则与 H<sup>+</sup> 轰击区长度为  $L$ , 宽度为  $S$ , 轰击前沿终止于有源上方高为  $h$  时有如下关系式:

$$R = PL_e/Sh$$

当  $P \cong 0.17 \Omega\text{cm}$ ,  $L_e \cong 50 \mu\text{m}$ ,  $S \cong 4 \mu\text{m}$ ,  $h \cong 1 \mu\text{m}$ ,  $R$  高达 21 kΩ。当  $S \cong 6 \mu\text{m}$ ,  $h \cong 2 \mu\text{m}$ ,  $R \cong 7 \text{k}\Omega$  时, CCTS 器件显示出优异的隔离特性。

2.1.3.3 增益区的 H<sup>+</sup> 轰击 对增益区进行掩蔽 H<sup>+</sup> 轰击主要是提高制管成品率, 以增强 V/I、P/I 特性。H<sup>+</sup> 轰击的部位既在宽度约 2 μm、厚度约为 0.2 μm 的 InGaAsP 有源区、P-InP

低串电阻和热阻以及平行于 p-n 结平面方向完整的折射率波导结构, 用质子轰击构成条形结构, 其宽度为 8 μm, 质子轰击深度以不进入源区为宜。如图 1 所示可见, 激光器的增益区由对称的两部组成, 其中腐蚀槽长约为 25~30 μm 作为吸收区,

限制层、P-InGaAsP 顶层及其上 Au/Zn/Au 电极层得到完全掩蔽的条件下仅对两侧的限流结构进行轰击。轰击的能量主要由复合掩膜厚度以及有源区距离上表面的距离决定, 为达到增加轰击深度, 需将 PHB 两侧的 P-InGaAsP 顶层腐蚀掉; 同时也必须兼顾两区的性能为要求, 特别注意必须消除“沟道效应”及  $H^+$  束流的控制, 以防热损伤。

芯片在  $H^+$  轰击时去掉了 AZ1350J 光刻胶, 在吸收区的 Au/Zn/Au 电极层及 P-InGaAsP 顶层已被有选择腐蚀而显露出了表征良好生长质量的 P-InP 生长纹; 在增益区突起部分为 PBH 结构, 两侧平坦部位为闸流管结构, 在突起部分的中轴线上, Au/Zn/Au 为电极条。在该区部分已蒸上一层 Cr/Au 膜, 以便键合, 而吸收区的 Cr/Au 膜已被套刻掉。

## 2.2 理论计算

从图 1 所示以 AlGaAs/GaAs 为例, 设总腔长为  $L$  的 CCTS 半导体激光器的厚度和电阻率各为  $d_4$  和  $\rho_4$  的上顶层(P<sup>-</sup>-GaAs)到厚度和电阻率为  $d_3$ ,  $\rho_3$  的上限层(P-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As)内刻出一定深度的沟道, 把条形电极沿纵向分开长度各为  $L_1$  和  $L_2$  两区, 并在电极间加电压为  $V_1^+$  和  $V_2^+$ , 并令  $V_1^+ > V_2^+ \geq 0$ , 使厚度为  $d$  的有源层(P-GaAs)也沿纵向形成载流子浓度各为  $n_1(y, t)$  和  $n_2(y, t)$  的增益和吸收两个电学相对独立的光学上共腔的区段。如果忽略沟道对 P-GaAs 层中光波导过程的影响, 则可近似地认为该层及其反射率各为  $R_1$ ,  $R_2$  的两端面形成双区共有的统一谐振光腔, 而具有共同的光场分布。这种双区共腔结构模型的示意和所取坐标系如图 2 所示。

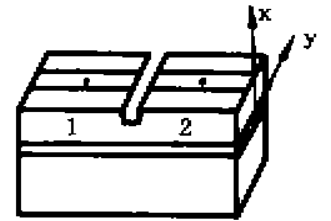


Fig. 2 CCTS DH laser structure and coordinate system

在  $t$  时刻的  $n_1(y, t)$  和  $n_2(y, t)$  可由双区段的载流子速率方程决定<sup>[15,16]</sup>

$$\frac{\partial n_l(y, t)}{\partial t} = \frac{J_l^{(L)}(y, t)}{q_d} + D \frac{\partial^2 n_l(y, t)}{\partial y^2} - \left\{ \frac{n_l(y, t)}{\tau_{nr}} + B^* [n_l(y, t)] \right\} - \frac{P_0 T_0 g_l(y, t)}{h\nu d} |E(y, t)|^2, \quad L = 1, 2, \quad (1)$$

P-GaAs 有源层在室温状态的增益函数近似为

$$g_l(y, t) = a[n_l(y, t) - n_c], \quad L = 1, 2 \quad (2)$$

对于  $\mu_n \gg \mu_p$  ( $\mu_n$  为 GaAs 的电子迁移率,  $\mu_p$  为空穴迁移率) 在激射时所需大注入条件下, 电子与空穴浓度 ( $n \approx p$ ) 近似相等, 双极性扩散系数  $D^*$  与空穴的扩散系数  $D_n$ ,  $D_p$  的关系数为<sup>[17,18]</sup>

$$D^* = \frac{n\mu_n D_p + P\mu_p D_n}{n\mu_n + P\mu_p} \approx \frac{\mu_n D_p + \mu_p D_n}{\mu_n + \mu_p} \cong \mu_p \left( \frac{D_n}{\mu_n} + \frac{D_p}{\mu_p} \right) \quad (3)$$

式中  $q_0$  为电子电荷,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为激光辐射频率,  $\tau_{nr}$  为载流子非辐射复合寿命,  $B^*$  为自发辐射复合系数,  $a$  为受激复合截面,  $n_c$  为透明载流子浓度。

在  $L$  区段  $L_1$  和  $L_2$  在外加电极电压  $V_1^+$  和  $V_2^+$  下注入有源层的电流密度  $J_l$ , 由该区段  $t$  时刻的拉普拉斯方程及其相应边界条件求出<sup>[17]</sup>:

$$\frac{\partial^2 V^{(L)}(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V^{(L)}(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

$$J_l^{(L)}(x, y) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial V^{(L)}(x, y)}{\partial x}, \quad J_l^{(L)}(x, y) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial V^{(L)}(x, y)}{\partial y}, \quad (5)$$

$$V^{(L)}(d_3 + d_4, -\frac{S_c}{2} \leq y \leq \frac{S_c}{2}) = V_c^{(L)}, \quad V^{(L)}(d_3 + d_4, \infty) = 0, \quad V^{(L)}(x < 0, y) = 0, \quad (6)$$

$$\left[ \frac{\partial \mathcal{A}^{(L)}(x, y)}{\partial y} \right]_{y=0} = 0, \quad \left[ \frac{\partial \mathcal{A}^{(L)}(x, y)}{\partial y} \right]_{|y|=\frac{L}{2}} = 0 \quad (7)$$

$$-J_x^{(L)}(0, y) = J_x^{(L)}(y), \quad \Gamma^{(L)}(0, y) = \Gamma^{(L)}(y), \quad \Gamma_x^{(L)}(y) = \frac{1}{q_c} (F_n^{(L)} - F_p^{(L)}) \quad (8)$$

在  $t$  时刻  $L$  区段电子和空穴的准费米能级  $F_n^{(L)}$  及  $F_p^{(L)}$  通过准平衡分布下的中性条件与电子和空穴浓度相关<sup>[15, 17]</sup>, 其关系式为:

$$n_1(y, t) - n_c = p_1(y, t) = p_c \quad (9)$$

$$n_1(y, t) = N_c J_{n_2} \left( \frac{F_n^{(L)} - E_c}{KT} \right), \quad p_1(y, t) = n_v J_{p_2} \left( \frac{E_v - F_p^{(L)}}{KT} \right) \quad (10)$$

$$J_{n_2}(\eta) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{S_i^2 d\epsilon_i}{1 + \exp(\epsilon_i - \eta)}, \quad \epsilon_n = \frac{E - E_c}{KT}, \quad \epsilon_p = \frac{E_v - E}{KT}, \quad i = n, p \quad (11)$$

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_e KT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_p KT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad E_c - E_v = E_g \quad (12)$$

这与(1)式中受激复合项有关的  $E_m$  模  $y$  分量光场分布:  $E_m(x, y) = Z(x, y)Y(y)$  由  $x, y$  方向的亥姆霍兹方程及其边界条件, 并取共腔等效复介电常数  $\bar{n}_{\text{eff}}^2/\epsilon_0$  为两区的平均值求出:<sup>[15, 17, 19]</sup>

$$\frac{d^2 Y(y)}{dy^2} + [k_0^2 \bar{n}_{\text{eff}}^2(y) - \beta_z^2] Y(y) = 0 \quad (13)$$

$$Y(\pm \infty) = 0, \quad \left. \frac{dY(y)}{dy} \right|_{y \rightarrow \pm \infty} = 0, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (14)$$

$$\bar{n}_{\text{eff}}^2(y) = L_1 \bar{n}_{\text{eff}}^2(y) + L_2 \bar{n}_{\text{eff}}^2(y) = (\beta_z^2/R_0^2) + (\delta + i) \bar{n}_2 \Gamma_z \sin(y)/R_0, \quad g_{\text{eff}}(y) = 2k_0 I_m [\bar{n}_{\text{eff}}^2(y)] \quad (15)$$

$$n(y) = L_1 n_1(y) + L_2 n_2(y), \quad \beta_z^2/k_0^2 \approx (1 - B) \bar{n}_1^2 + B \bar{n}_2^2, \quad \Gamma_z \approx D^2/(1 + D^2) \quad (16)$$

$$D^2 \equiv (k_0 d)^2 (\bar{n}_2^2 - \bar{n}_1^2), \quad B \equiv \frac{D^2}{4} \left( \frac{\sqrt{9 - 4D^2} - 1}{2 + D^2} \right)^2 \quad (17)$$

式中  $\delta$  为波导参数;  $\bar{n}_1$  和  $\bar{n}_2$  分别为限制层和有源层的材料折射率。由(13)式解出本征值  $\beta_z^2$  和本征矢  $Y(y)$  得归一化光强分布  $|E(y)|^2$ , 模式折射率  $\bar{N}$ , 模式净增益  $\bar{G}(t)$ , 模式增益  $G(t)$ , 光子寿命  $\tau_{ph}$ , 表示光腔内的激光功率  $P_0$  和平均光子密度  $\bar{S}(t)/h$  为:

$$|E(y)|^2 = |Y(y)|^2 / \left[ (1/S_c) \int_{-\infty}^{\infty} |Y(y)|^2 dy \right] \quad (18)$$

$$\bar{N} = \text{Re}(\beta_z)/k_0, \quad \bar{G}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{\text{eff}}(y) |E(y)|^2 dy / \int_{-\infty}^{\infty} |E(y)|^2 dy \quad (19)$$

$$G(t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} g(y, t) |Y(y)|^2 dy}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(y)|^2 dy} = \bar{G}(t) + \alpha_m \quad (20)$$

$$\frac{1}{\tau_{ph}} = r \left( a_m + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right), \quad r \approx C/\bar{N} \quad (21)$$

$$P_s \equiv \int_{-d/2}^{d/2} \int_{-d/2}^{d/2} \frac{1}{2} \operatorname{Re} [\mathbf{E} \cdot \mathbf{H}^*] \, dx \, dy = \frac{\varepsilon_0 c \bar{N} S d |Y(y)|^2}{2 |E(y)|^2} \quad (22)$$

$$\bar{S}(t) = \frac{\varepsilon_0 \bar{N}^2}{2 h \nu S d} \int_{-d/2}^{d/2} |X|^2 \, dx \int_{-d/2}^{d/2} |Y|^2 \, dy = \frac{P_s}{h \nu S d} \quad (23)$$

共腔自发发射进入模式的光子密度也取两区的平均值<sup>[19, 20]</sup>, 则  $\bar{S}(t)$  的速率方程为<sup>[16, 17]</sup>

$$\frac{d\bar{S}(t)}{dt} = [rG(t) - \frac{1}{\tau_s}] \bar{S}(t) + rB^* [I_1 n_{a1}^0(t) + I_2 n_{a2}^0(t)] \quad (24)$$

$$n_{a1}^0(t) = \frac{1}{S} \int_{-d/2}^{d/2} n_1^0(y, t) \, dy \quad (25)$$

式中  $\varepsilon_0$  为真空电容率,  $c$  为真空光速,  $\nu_s$  为光腔中等效损耗,  $r$  为自发发射因子。因此, 在第一时刻  $t$  对给定两区电极电压, 为由(1)式求出两区的载流子浓度, 必须由(4)式求出注入结电流和(13)式求出光场分布。但这两者又必须求出两区载流子浓度, 而且所求出的光场和两区载流子浓度还必须满足(24)式。显然, 这是一个不必借助人为分布假设的精确自治求解过程。这对我们实际从理论上了解 CCTS 双稳激光器实际分布有重要意义。

假设注入激励电流、载流子浓度和光场人为规范均集中均匀分布在条形双区和共腔内, 则整个问题可简单表述下列方程:

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{J_i^{(i)}}{q d} - \frac{n_i}{\tau_i} - \nu a_i (n_i - n_i') S, \quad i = 1, 2 \quad (26)$$

$$\frac{dS}{dt} = [r a_i (\sum_{i=1}^2 I_{ni} - n_i) - \frac{1}{\tau_s}] S + r B^* \sum_{i=1}^2 n_i^0 \quad (27)$$

### 2.3 对稳态分析的理论根据

为了对稳态进行理论分析, 可假定载流子浓度在各区均匀分布, 光子密度在腔内处处均匀, 只对光子密度的幅度进行研究, 并假定在腔内只有单模振荡。并为简化计算可忽略复合中心作用并用单一分子复合处理。在器件处于高增益高吸收工作状态下, 双区的增益或吸收函数均作线性处理, 其斜率比为  $K$  建立的速率方程组为:

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = \frac{j_1}{q d} - \frac{n_1}{\tau} - r_1 a_1 (n_1 - n_1') S(t) \quad (28)$$

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = \frac{j_2}{q d} - \frac{n_2}{\tau} - r_2 K a_1 (n_2 - n_1') S(t) \quad (29)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = [r_1 r_2 a_1 (n_1 - n_1') + r_2 r_1 K a_1 (n_2 - n_1') - \frac{1}{\tau_s}] S(t) + r (r_1 \frac{n_1}{\tau} + r_2 \frac{n_2}{\tau}) \quad (30)$$

对方程(28)式、(29)式、(30)式进行归一化处理:

$$N_1 = \frac{n_1}{n_1'}, \quad N_2 = \frac{n_2}{n_1'}, \quad T = \frac{t}{\tau}, \quad S = \left( \frac{S}{r_1} \right) / \left( \frac{n_1}{\tau} \right) \quad (31)$$

并令  $J_1 = j_1/j_0$ ,  $j_0 = q d n_1' / \tau$  为零增益截距电流密度,  $a = (r_1 a_1 n_1') / (\frac{1}{\tau_s})$  为均匀注入条件下粒子数趋于实现反转时所需克服损耗与腔内总损耗之比。

因而可得归一化方程组为:

$$\frac{dN_i}{dT} = J_i - N_i - a(N_i - 1)S \quad (32)$$

$$\frac{dN_2}{dT} = J_2 - N_2 - k\alpha(N_2 - 1)S \quad (33)$$

$$\frac{ds}{dT} = \frac{\tau}{\tau_p} \{ [ar_1(N_1 - 1) + Kar_2(N_2 - 1) - 1]S + \gamma(\tau_1 N_2 + \tau_2 N_2) \} \quad (34)$$

在方程中各参数取值为:

$$\omega = 12 \mu\text{m}, \quad L = 300 \mu\text{m}, \quad r = 10^5, \quad v_g = \frac{c}{n_r} = 67 \times 10^{10} \text{cm/S}, \quad a = 2 \times 10^{-16} \text{cm}^2,$$

$$n' = 1.11 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}, \quad \tau = 10^{-9} \text{S}, \quad \tau_p' = 10^{-12} \text{S}, \quad \alpha \approx 1.5$$

在激光器稳态工作状态下, 方程组式(34)、(35)、(36)左边即为零;  $\frac{dN_1}{dT} = 0, \frac{dN_2}{dT} = 0,$

$\frac{dS}{dT} = 0$  下, (33)式可变为:

$$N_{20} = K\alpha S_0 / (1 + K\alpha S_0 - 0) \quad (35)$$

并代入(34)式可得:

$$\begin{aligned} N_{10} &= \{S_0[1 + ar_1 - Kar_2(N_{20} - 1)] - \gamma\tau_2 N_{20}\} / r_1(\alpha S_0 + \gamma) \\ &= \frac{S_0[(1 + ar_1)(1 + K\alpha S_0) + kar_2] - \gamma\tau_2 K\alpha S_0}{r_1(\alpha S_0 + \gamma)(1 + K\alpha S_0)} \end{aligned} \quad (36)$$

由式(33)可得

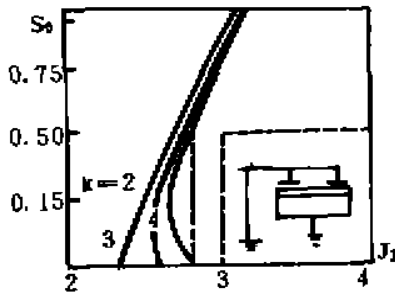
$$J_1 = N_{10} + \alpha(N_{10} - 1)S_0 \quad (37)$$

由于(37)式是一单调函数, 根据(35)式和(37)式即可获得稳态  $S_0$  和  $J_1$  的关系曲线。如图 3 所示的取不同的吸收强度  $K$  值得到的稳态  $S_0$ - $J_1$  特性曲线。

由图可知  $K$  值增加时, 双稳跨度增大。现取:

- 1) 当  $K = 2$  时, 相当谐振腔内只附加了一个损耗项, 并未引起光输出跳变, 可以与损耗较大的均匀注入激光器等同;
- 2) 当  $K = 3$  时, 可知双稳跨度很小, 可以类似于光子开关管;

Fig. 3 Characteristic Curve of  $S_0$ - $J_1$  with different  $k$



3) 当  $K = 4$  时, 双稳跨度较大, 可以类似于光双稳管。

从以上的理论分析证明: CCTS 激光器光双稳特性得到了理论的依据及本文所得双稳特性实验结果的正确性, 均处于  $K = 4$  时双稳跨度较大的双稳滞后回线。

### 3 结果与讨论

新型线路网络如图 4 所示。开启各个晶体管稳压电源,  $x$ - $y$  记录仪及 PIN 光探测器, 进行光路调试使其 LD 光双稳激光器辐射  $1.3 \mu\text{m}$  波长的光强进入 PIN 得到  $x$ - $y$  记录仪的响应, 并调节  $W_1$  电流旋钮使其电流缓慢的从小到大从大到小的变化观察记录仪扫描笔运行状态。

#### 3.1 稳态特性的测试

##### 3.1.1 DC 双稳态 $P$ - $I$ 特性

InGaAsP/InPCCTS 双稳激光器已实现室温条件下连续运转, 导通激励阈值电流最低为  $68.1 \text{mA}$ , 图 5 给出了室温连续工作的两种  $P$ - $I$  特性双稳滞后曲线。图 5(a)所示为在通态时

光输出随注入激励电流的变化而呈现线性变化；图 5(b)是在通态时光输出随注入电流的变化呈现出非线性饱和特性。

对于通态时为什么输出光表现为近饱和特性对该特性有两种可能的解释：一种认为是由于热特性劣化使外微分效率降低，但已被低频双稳实验证实不是主要因素；第二种解释认为出现近饱和特性是与侧向增益有关，即就是说质子轰击较浅，在条形电极中心附近，增益接近饱和，随着激励电流的增大，原增益分布发生畸变，有较大电流分量泄漏到低增益区和吸收区，而使外量子效率降低，通态输出光呈现近饱和状态所致。

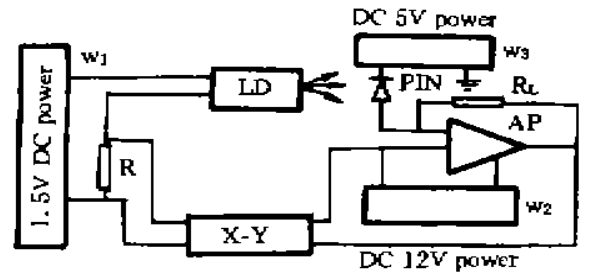


Fig. 4 Experiment working principle

- 1.  $W_1, W_2, W_3$ : Transistor regulated power supply
- 2. x-y: x-y recorder
- 3. LD: CCTS optical bistable laser
- 4. PIN: model L10 mixed PIN-FET optoelectronic detector
- 5. AP: Amplifier
- 6. A: DC. current meter
- 7.  $R_L$ : Limit resistance
- 8. P: Polarization
- 9. R: Resistance

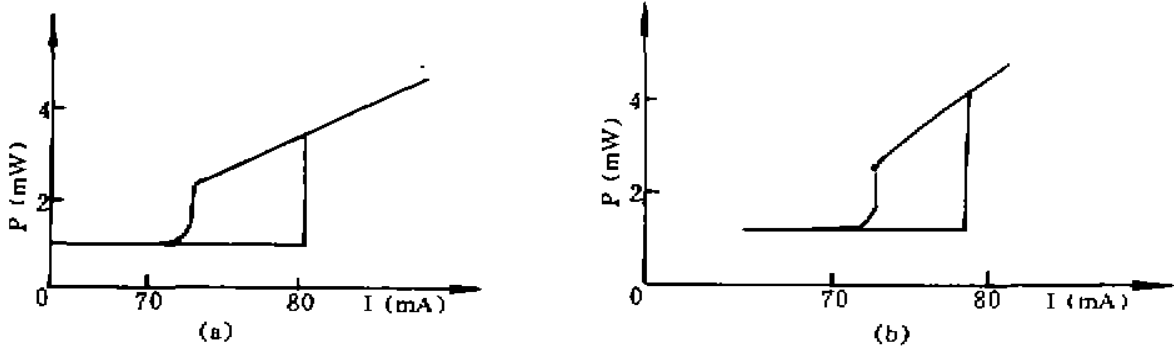


Fig. 5 Two P-I characteristic curves of optical bistable state

(a) Change of linear output optical versus current on open state. (b) Change of nonlinear output optical versus current on open state

### 3. 1. 2 温度变化稳态双稳 P-I 特性

图 6 给出了将光双稳激光器置于温度控制器中使温度阶梯变化测量其对应温度光双稳激光器辐射光功率与激励电流的相互变化所遵循的关系。

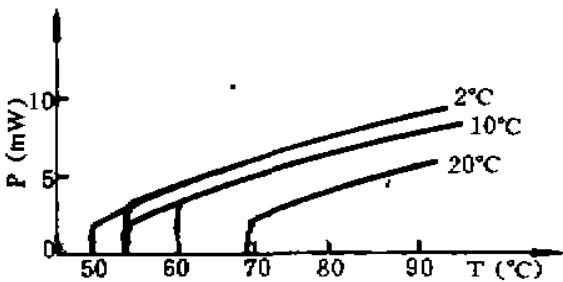


Fig. 6 Optical bistable state P-I characteristic curve with the temperature change

### 3. 1. 3 具有不同角度偏振态时的稳态 P-I 双稳特性

为测试偏振特性，用偏振片在输出光方向上进行检偏，图 7 给出了测量结果。

通过图 7 说明 CCTS 双稳激光器具有偏振特性；同时也说明该器件由于吸收区的存在使双稳激光器在偏振选择上具有强的选择特性和模式特性。

在半导体激光器中增益分布和端面反射率在选择腔模式中起主要作用。增益分布通过腔模(包括纵模横模)的增益起着选模作用；而端面反射率则通过腔模的损耗而起选模作用，而

对此特性定性地从增益函数为主要影响可解释为，由于温度的增加，使得增益区增益系数降低<sup>[22, 23]</sup>所以阈值电流上升。谱线发生频移<sup>[24]</sup>即双稳滞后回线亦发生滞移(谱线向长波长发生移动，也叫红移)。

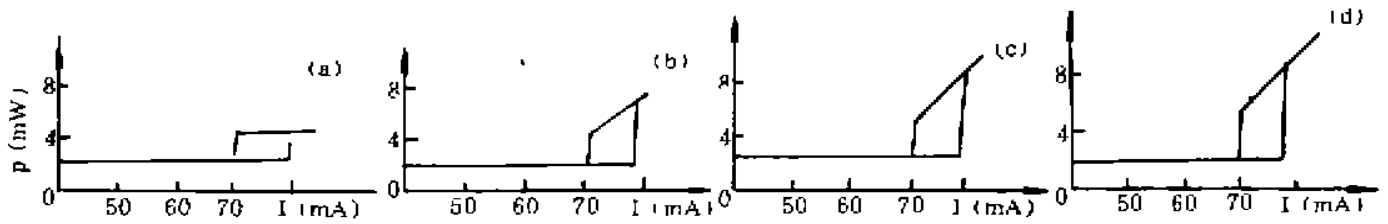


Fig. 7 Polarization characteristics

(a) output polarized direction vertical node facedirection that bistable hysteresis loop is TM model, (b) output polarized direction versus node face of include angle is 60°. The bistable hysteresis loop; (c) output polarized direction versus node face of include angle is 60°. The bistable hysteresis loop; (d) output polarized direction versus interrelation parallel that the bistable hysteresis loop is TE model

且成为主要偏振选择机制。

在 CCTS 双稳激光器中，由于存在两个电流注入区（增益区和吸收区）所以它的输出特性具有一定的特征。因吸收区是用 SiO<sub>2</sub> 隔离制成，所以吸收区注入的电流为零。由于吸收区无电流注入，所以该区只吸收增益区发射来的光并使吸收区的吸收系数发生改变，从而引起腔增益改变。当吸收区吸收了一定强度的光能后，使其该区而漂白一透明，从而产生了选模特性。

### 3.2 I-V 特性

如图 8 所示，I 与 V 的关系成非线性变化规律。这正是双稳激光器由于吸收区的存在产生可饱和效应的结果，亦是双稳激光器的机理内含，也是区别于普通半导体激光器的固有特征。

### 3.3 IR 发射光谱的温度效应特性

将 CCTS 光双稳激光器置于温度控制器中，对温度进行阶梯变化并用 WDP500-2A 型平面光栅单色仪对谱线进行监视。实验结果发现随着温度的增加上升，使得增益系数降低<sup>[23]</sup>，所以阈值电流上升，波长向长波方向移动。其测试结果如图 9 所示。

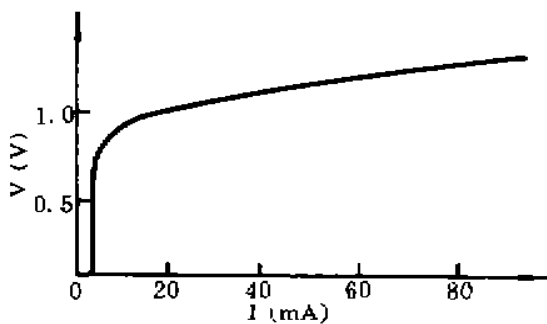


Fig. 8 Showing is  $\lambda$ -T characteristic curve

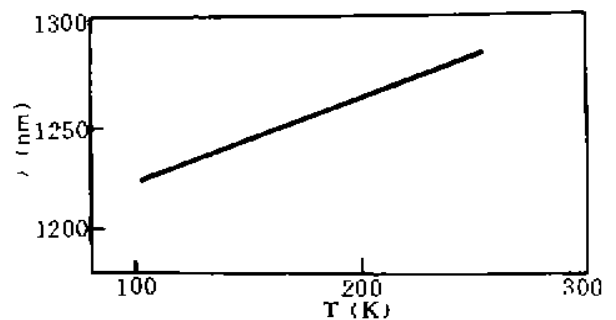


Fig. 9  $\lambda$ -T characteris curve

该特性曲线命名为：CCTS 光双稳激光器的波长温度校正工作曲线。该曲线告知人们，当在温度或气温变化时工作波长的所处位置。一般气温和温度所引起波长的变化量  $S_T$ ：

$$S_T = \Delta\lambda/\Delta T \approx 0.35 \text{ nm}/^\circ\text{C}$$

由于温度的上升对禁带宽度和费米能级均有作用；随着温度的增加导致禁带宽变窄，则激射波长向长波方向移动。

### 3.4 跨度电流的温度效应特性

实验对温度变化时对跨度电流进行了跟踪测量，测试结果如图 9 所示。



该关系曲线说明由于因气温的升高导致增益系数的降低，使跨度电流增加，因此该关系曲线被命名为：CCTS 光双稳激光器的跨度电流校正工作曲线。

### 3.5 多稳态 P-I 双稳特性

在实现 CCTS 光双稳特性时首次发现多稳态效应光学双稳态现象。如图 10 所示。当注入电流由 CCTS 光双稳的跨度电流增加至 70—80 mA 时出现了多稳态效应。对于第一双稳： $I_{a1} = 45.6 \text{ mA}$ ， $I_{a3} = 49 \text{ mA}$ ，跨度  $M_1 = 3.4 \text{ mA}$  对于第一开关速度：导通时间： $\tau_{on} < 0.1 \text{ ns}$ ，关断时间： $\tau_{off} = 0.5 \text{ ns}$ ；对于第二双稳： $I_{a2} = 78 \text{ mA}$ ， $I_{a3} = 74.4 \text{ mA}$ ，跨度  $M_2 = 3.6 \text{ mA}$  对于第二开关速度：开关时间也可以很快<sup>[29]</sup>。

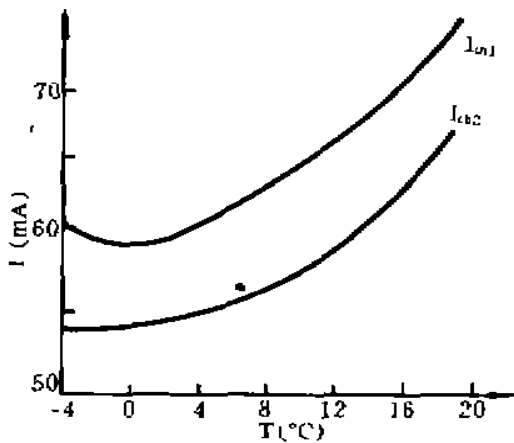


Fig. 9 I-T characteristic curve

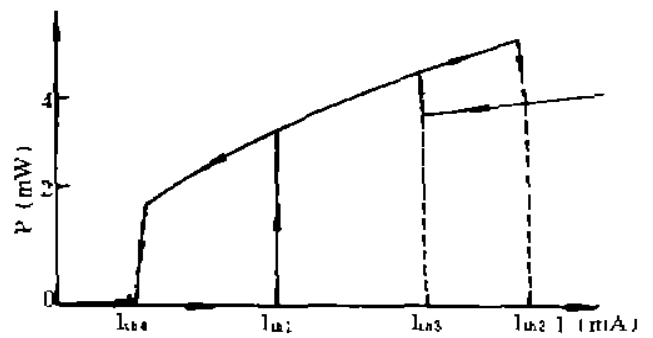


Fig. 10 Optical bistable hysteresis loop of many stabilized state

经认证第二光双稳是量子阱 PIN 探测器的自电光效应光双稳滞后回线。它是由于电场光效应得以增强产生正反馈，当这种正反馈作用达到一定强度、输出光相对于输入光形成开关和双稳输出，由图可知，当电流调置于 50 mA 时可实现第一逻辑功能显示，当偏置电流调置于 80 mA 时可实现第二逻辑功能显示。所以该器件可实现双逻辑双控制功能，但是当激励电流调置在  $I_{a3} = I_{a1}$  时则出现自锁，即双逻辑功能消失。如图 11(b) 所示。对此，作者进行分析，从图 11 可以看出：当  $T = 19.6 \text{ }^\circ\text{C}$  时， $I_{a1} = 77.4 \text{ mA}$ ， $I_{a3} = 76.2 \text{ mA}$ ，即  $I_{a1} \approx I_{a3}$ ，双光双稳滞后回线渐渐靠近；当  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  时， $I_{a1} = I_{a3}$ ，双光双稳滞后回线重合，如图 11(b) 所示。对此，作者称在  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $I_{a1} = I_{a3}$  时，即： $\sum I_{a1-3, 2, 3, 4} = 0$ ，当然在图 4 中  $R$  上无电位降时，双光双稳滞后回线消失被命名为该器件处于“自锁”状态。对其性能的测试和研究将另文发表。

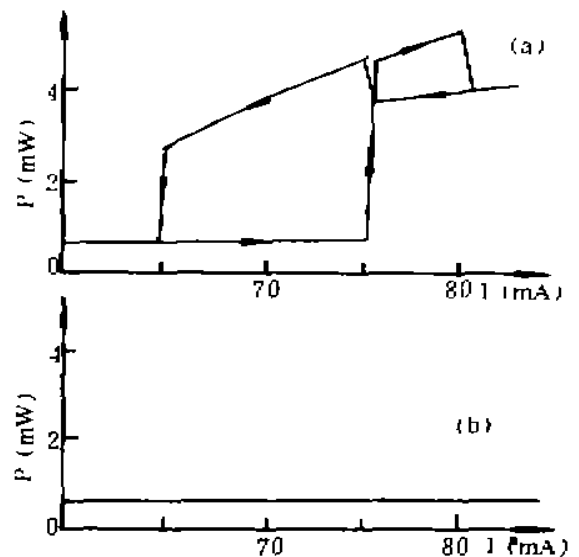


Fig. 11 Overlap and varin of two bistable curves (a) Two bistable curve begin to overlay ( $T = 19.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ); (b) Self-locking and two bistable curve vanish ( $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

**结 论** 通过对 CCTS 光双稳激光器的理论分析、逻辑功能的研究和对其稳态性能的实验测试数据证明, 该 CCTS 光双稳激光器具有以下特性:

- 1) V-I 特性曲线显示非线性效应, 具有可饱和效应特征; 它是光双稳激光器区别于普通半导体激光器的显著特点;
- 2) 它的开关速度约为 100 PS, 所以它是 PS 级光双稳半导体激光器;
- 3) 当 CCTS 光双稳激光器与量子阱 SEED PIN 型探测器进行级联可实施三逻辑三控制功能的显示;
- 4) CCTS 光双稳激光器与量子阱 SEED PIN 型探测器可集成新型网络模型器件, 该器件集 CCTS 光双稳激光器、PIN 探测器、SEED 调制器于一体, 可实现三逻辑功能的运行。

### 参 考 文 献

- [1] D. Z. Tsang, J. N. Walpole *et al.* Q switched semiconductor diode lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, QE-19(2): 145~156
- [2] H Ito, N. Ondern, Use of unidirectional data flow in bit-level systolic. *Electron. Lett.*, 1981, 17(15): 541~545
- [3] Wang Qiming, Liu Wenxu, Zhao Jianhe *et al.*, 11th IEEE International Semiconductor Laser Conference, Boston, U. S. A., 1989: 134
- [4] 王启明, 吴荣汉, 李建蒙等, 半导体双稳激光器在光注入下的实验研究. *半导体学报*, 1988, 9(1): 109~112
- [5] U. Ohlander, P. Blixtand, O. Sahlen, Subnano second switching of bistable tandem lasers by subpicosecond optical triggering uif onlander peter blixt and olof sahlen. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 53(14): 1227~1229
- [6] G. J. Lasher, Analysis of a proposed bistable injection laser. *Solid State Electronics*, 1964, 7: 707~716
- [7] H. Kawaguchi, Optical bistable-switching operation in semiconductor lasers with inhomogeneous excitation. *Proc. IEEE Pt I*, 1982, 129(12): 205~350
- [8] J. Katz, S. Margalit, C. Harder *et al.*, The intrinsic electrical equivalent circuit of a laser diode. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, QE-17(1): 4~7
- [9] 王守武, 王启明, 林世鸣等, 双稳激光器的不稳定性本质研究. *物理学报*, 1986, 35(8): 1095~1102
- [10] H. Kawaguchi, Lasers with inhomogeneous excitation. *IEE Proc. I. Solid-State and Electron Dev.*, 1982, 129(4): 141~148
- [11] K. Y. Lau, Ch. Harder, A. Yariv, Dynamical switching characteristics of a bistable injection laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, 40(3): 198~200
- [12] H. J. Westlake, Assessment of switching speed of optical bistable in semiconductor laser amplifiers. *Electron Lett.*, 1986, 22(10): 541~545
- [13] P. Glas, R. Moller Bistable operation of a GaAs-AlGaAs diode laser coupled to an external resonator of narrow spectral bandwidth. *Opt. & Quant. Electron.*, 1982, 14: 375~389
- [14] 张权生, 吕 卉, 杜 云等, InGaAsP/InP PBH 双区共腔双稳激光器的 H<sup>+</sup> 轰击掩膜研究. *半导体学报*, 1993, 14(9): 563~564
- [15] 郭长志, 丁 凡等, 电极条形双区共腔半导体双稳激光器静态和瞬态行为的精确理论计算. *半导体学报*, 1990, 11(8): 570~577
- [16] 郭长志, 丁 凡, 半导体条形 DH 激光器中本征自脉动的精确理论. *半导体学报*, 1988, 9(6): 621~629
- [17] 郭长志, 半导体激光模型理论. 北京, 人民邮电出版, 1988
- [18] W. B. Joyce, Carrier transport in double-hetero-structure active layers. *J. Appl. Phys.*, 1982, 53(11): 7235~7239
- [19] N. G. Basov, 0-1-dynamics of injection lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1968, QE-4(11): 855~859
- [20] 王守武, 王启明, 林世鸣, 单腔双接触结构激光器双稳特性研究. *半导体学报*, 1986, 7(2): 136~146
- [21] 王启明, 吴荣汉等, 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

[22] 李建荣, 彭怀德, 王启明. 共腔双稳态激光器的实验研究. 半导体学报, 1987, 8(2): 222~224

[23] 吴荣汉, 段海龙, 王启明等. GaAs/GaAlAs 多量子阱自电光效应光学双稳态. 半导体学报, 1991, 12(2): 120~124

[24] 赵嵩山, 马 磐, 周 宁等. 1.55  $\mu\text{m}$  GaInAsP/InP DFB-DC-PBH 激光器. 半导体学报, 1989, 10(9): 712~715

## Study of High-Speed CCTS Optical Bistable DH Laser

Li Changying      Hu Manli      Wan Shengyuan      Han Yanqin

(Department of Physics, Northwest University, Xian 710069)

Xu Dalun      Cheng Zhao      Wu Ronghan      Zhang Quansheng

(National Laboratory for Transient Optics Technology, Xian Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Xian 710068)

Wu Ronghan      Zhang Quansheng

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084)

(Received 6 June 1995; revised 11 September 1995)

**Abstract** Based on the rate equation, CCTS optical bistable laser is accurately analysed and calculated, the characteristic of its stable state is experimentally studied and tested. We also found for the first time that when the laser output high state, another optical bistable and switch effect will occur. It is attributed to the self-electro-optical effect of the multiquantum well PIN detector. A new integratable biological functional net model device is indicated.

**Key words** two-section common-cavity, duple logics, Bistability, self electrooptic effect, self-lock quantum well