

半导体激光器的光学可双稳静态工作特性的分析

钟立晨 郭奕理

(清华大学无线电电子学系)

提要: 本文给出了半导体激光器光学可双稳静态特性的分析。使用电子和光子密度的非线性速率方程,得到了光学可双稳半导体激光二极管(BILD)光输出的一种简单模型。该模型强调物理机制以及和双稳性有关的参数,给出了态方程,并解释了BILD的主要特征。在 P_0-P_i 特性中具有很大滞后回线的双稳性是BILD的突出特点。

Steady-state characteristic analysis for bistable laser diodes

Zhong Lichen, Guo Yili

(Department of Radio and Electronics, Qinghua University, Beijing)

Abstract: In this paper we analyze the steady-state characteristics of bistable semiconductor laser diode (BILD). A simple model for optical output of BILD is obtained using nonlinear rate equations for electron and photon densities. This model emphasizes the physical mechanisms and parameters responsible for the bistability, gives the state equation and explains the main features of BILD. Bistability with a very large hysteresis in P_0-P_i characteristics is an outstanding feature of BILD.

一、引言

光双稳器件是在光路中可以实现光学数值信号处理的一种器件,它是现代光纤通讯和未来的光计算机的关键元件。当前,光双稳性和光双稳器件的研究已经向实用化方向跨进了。利用半导体激光二极管实现双稳性的器件,一般称之为光双稳半导体激光器,记为BILD。和全光学型双稳器件相比,BILD有很多优点:它是有源器件,具有增益特性;

对输入光强和波长限制小,甚至可以使用非相干输入光;集成半导体激光在工艺上和光集成相容,因此实现微型化的条件已具备。

我们的BILD,在实验中的结构是由半导体激光二极管、光纤定向耦合器和光电检测二极管组成的。目前,使用分立元件作实验。全部光路都用光纤耦合,整个实验装置工作非常稳定,这也是我们实验的特点。在[1]中,我们使用简化的线性模型实验研究了BILD的光双稳性,并观测到光双稳的特征

收稿日期:1985年11月29日。

滞后回线、光微分增益特性以及光存贮功能。但是,为了进一步研究 BILD 的动态特性,这种简化模型已嫌不够。本文利用半导体速率方程研究了器件的静态特性,并得到了 BILD 的态方程。这为下一步研究瞬态特性,特别是临界慢变准备了必要条件。稳态特性的研究也使我们器件的物理过程有了深入了解。为了探讨器件的物理过程,本文做了必要的近似处理以便得到分析解。本文未做精确的数值解。

图 1 是 BILD 的结构原理图,实验光电路的细节请见[1]。图 2 给出了该器件输入-

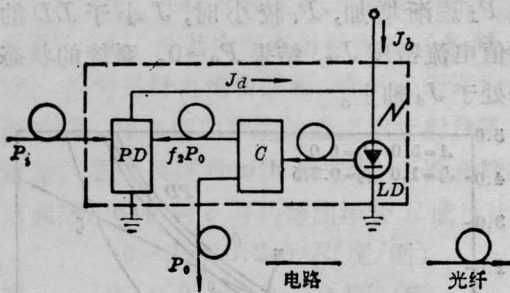


图 1 由激光二极管(LD)、光电检测器(PD)和光纤定向耦合器(C)组成的 BILD 的示意图

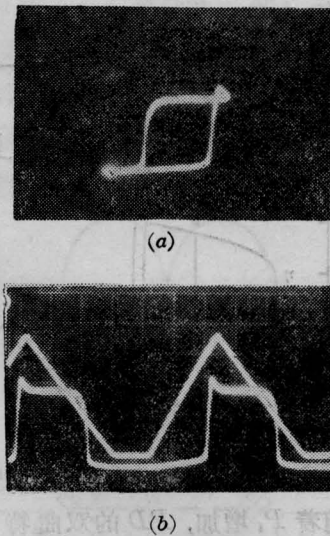


图 2 观测到的 BILD 光学特性的典型示波图象

(a) 双稳性, 纵坐标为光输出(P_o), $100 \mu\text{W}/\text{div}$, 横坐标为光输入(P_i), $20 \mu\text{W}/\text{div}$; (b) 输入光学三角波 P_i 和输出光学方波 P_o , 纵坐标为光强(任意单位), 横坐标为时间, $5 \mu\text{s}/\text{div}$

输出特性的示波图象。其它的一些实验结果也见[1]。

二、速率方程及其静态解

用速率方程(1)~(2)式来描述半导体激光器(LD)动力学已是众所周知的方法^[2]。产生双稳性的关键是利用了光电检测器(PD)的非线性饱和特性,我们唯象而又近似地用(3)式描述它。它的正确性要靠实验来证实。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{j_b}{ed} + f_1 n_d - \frac{n}{\tau_s} - g(n)s \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = g(n)s - \frac{s}{\tau_p} + \beta \frac{n}{\tau_s} \quad (2)$$

$$\frac{dn_d}{dt} = K \frac{s_1 + f_2 s}{1 + \frac{s_1 + f_2 s}{s_s}} - \frac{n_d}{\tau_d} - f_1 n_d \quad (3)$$

其中 LD 和 PD 之间的耦合是通过 $f_1 n_d$ 和 s 项实现的。(1)~(3)式中的各种符号有如下意义;

j_b : LD 偏置电流密度;

j_p : PD 的输出光电流密度;

n : LD 的载流子密度;

τ_s : LD 的载流子寿命;

s : LD 的光子密度;

$g(n) = g_0(n - n_0)$: LD 增益, g_0 是增益系数;

n_0 : 当 $n = n_0$ 时, LD 增益为零, n_0 是一常数;

s_i : 输入光子密度;

s_s : PD 饱和时的光子密度;

τ_p : 光子在光共振腔中的寿命;

τ_d : PD 的载流子寿命;

n_d : PD 的载流子密度;

f_1 : PD 载流子对 LD 的反馈系数;

f_2 : LD 的输出光 s 向 PD 的光反馈系数;

β : 向单模光场中自发发射光子的几率;

κ : PD 的光子-载流子变换系数, 该

系数可写成 $\kappa = G\kappa'$, 其中 κ' 是光电检测器 (例如 PIN 光电二极管) 本征光电变换系数, G 是宽带电流放大器的电流增益。

假定 LD 是单模的, 不考虑噪声, 忽略掉无辐射过程, 那么上述速率方程是成立的。为了便于分析, 对方程 (1)~(3) 式做变量的无量纲处理。令:

$$\begin{aligned} T &\equiv t/\tau_s & \gamma &\equiv f_1\tau_s \\ N &\equiv g_0\tau_p n & N_d &\equiv \tau_p n_d / \tau_s s_s \\ N_0 &\equiv g_0\tau_p n_0 & P_i &\equiv s_i / s_s \\ P_0 &\equiv s / s_s & K &\equiv \tau_p \kappa \\ J_b &\equiv \frac{\tau_p}{s_s} \frac{j_b}{ed} & \alpha &\equiv \tau_s / \tau_d \\ \omega &\equiv \tau_s / \tau_p & C &\equiv (g_0\tau_s s_s)^{-1} \\ N_{th} &\equiv C(N_0 + 1) & J_d &\equiv \gamma N_d \end{aligned}$$

那么 (1)~(3) 式可简化为:

$$C \frac{dN}{dT} = J_b + J_d - P_0(N - N_0) - CN \quad (4)$$

$$\frac{ds}{dT} = \omega [P_0(N - N_0 - 1) + \beta CN] \quad (5)$$

$$\frac{dN_d}{dT} = K \frac{P_i + f_2 P_0}{1 + P_i + f_2 P_0} - (\alpha + \gamma) N_d \quad (6)$$

我们把 J_b 和 J_d 可合写成 $J \equiv J_b + J_d$ 。

今 $d/dT = 0$, 从 (4)~(6) 式便得到静态解。如果 $\gamma = 0$, 那么 PD 和 LD 间便没有耦合, (4) 和 (5) 便是描述 LD 的方程。其结果已是众所周知; LD 的阈值电流密度 $J_{th} = N_{th} = C(N_0 + 1)$; P_0 服从一个二次代数方程, 如果忽略自发发射的影响 (一般, $\beta \approx 10^{-5}$, 可令其为零), 则有如下的解:

$$P_0 = J - J_{th} \quad \text{当 } J > J_{th} \quad (7)$$

$$P_0 = 0 \quad \text{当 } J \leq J_{th} \quad (8)$$

当 $\gamma \neq 0$, $J_d \neq 0$ 时, LD 和 PD 间存在耦合, 这时 (7) 和 (8) 仍然成立。如果令无量纲 PD 饱和光电流密度 $J_s \equiv K(\gamma/\alpha + \gamma)$, 那么由 (7) 和 (8) 式以及 (4)~(6) 便得到描述静态特性的基本方程:

$$P_0 - (J_b + J_d) + J_{th} = 0 \quad (9)$$

$$1 + P_i + f_2 P_0 - \frac{J_s}{J_s - J_d} = 0 \quad (10)$$

由 (9) 和 (10), 立刻可以得到态方程

$$P_0 = A - \frac{J_s}{1 + P_i + f_2 P_0} \quad (11)$$

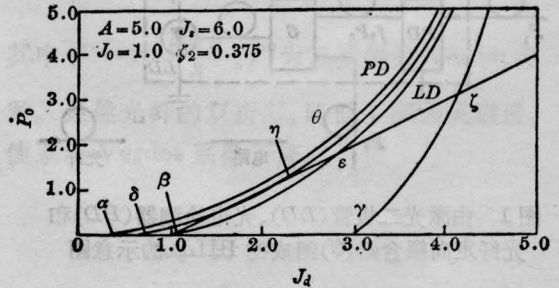
或

$$1 + P_i = \frac{J_s}{A - P_0} - f_2 P_0 \quad (12)$$

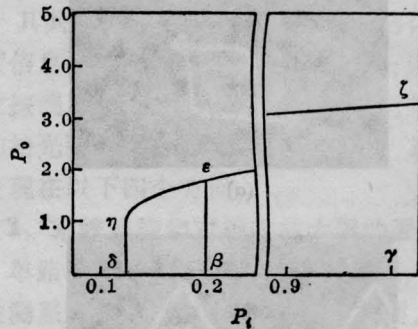
其中 $A = J_s - J_{th} + J_b$ 。

三、BILD 的静态物理过程

现在我们来讨论稳态时 BILD 的物理过程, 由图 3(a) 可见, 在 $P_0 - J_d$ 平面上, (9) 式表示 LD 的特性, 是一直线。(10) 式表示 PD 特性, 是双曲线的一支。如果让连续输入光强 P_i 逐渐增加, P_i 较小时, J 小于 LD 的阈值电流密度 J_{th} , 结果 $P_0 = 0$ 。系统的状态仍处于 J_d 轴上。



(a) 在 $P_0 - J_d$ 特性中的双稳性



(b) 在 $P_0 - P_i$ 特性中的双稳性

图 3

例如, 在 α 点与 P_i 对应的 PD 特性曲线为 $\theta\alpha$ 。随着 P_i 增加, PD 的双曲特性曲线从 $\theta\alpha$ 沿 P_0 轴平行下移到 $\epsilon\beta$ 。横轴上交点 α , 现在右移到 β , 而 β 点又恰好是 LD 直线和 PD 双曲线与横轴 J_d 的公共交点。此时 β 点的 J_d 值为

$$J_d(\beta) = J_{th} - J_b = J_0 \quad (13)$$

在 β 点 LD 直线斜率 $(dP_0(\beta)/dJ_d)_{LD} = 1$, 而 PD 曲线斜率为

$$(dP_0(\beta)/dJ_d)_{PD} = J_s/f_2(J_s - J_0)^2.$$

若定义 $A = J_s - J_0$, 则当

$$\left(\frac{dP_0(\beta)}{dJ_d}\right)_{PD} = \frac{J_s}{f_2 A^2} < 1 \quad (14)$$

成立时, β 点显然是非稳状态。系统在很小的干扰下便会从 β 跃迁到稳态的点 ε , 因为 $(dP_0(\varepsilon)/dJ_d)_{PD} > 1$ 。如果 (14) 式不成立, 例如 $\left(\frac{dP_0(\varepsilon)}{dJ_d}\right)_{PD} > 1$, β 点仍是稳态, 并不会产生双稳态的上述跃迁。所以, 当 (14) 式成立时, $P_{on} = P_i(\beta)$ 便是系统从低态 β 开启到高态 ε 的开启光强。据 (13) 和 (11) 式, 输入开启光强 P_{on} 为;

$$P_{on} = P_i(\beta) = \frac{J_0}{A} \quad (15)$$

如果 P_i 是一阶跃光强, 在 $t < 0$ 时, $P_i = 0$, 在 $t \geq 0$ 时, $P_i = P_i(\gamma)$, 那么在 $t = 0$ 时, 输入光强从 $0 \rightarrow P_i(\gamma)$, 系统也从 0 经 β 态迅速跃迁到 ζ 态。如果 $J_d(\zeta)$ 很接近 J_s , 当 $J_s \gg J_0$ 时, 我们可近似地得到

$$J_d(\zeta) \approx J_s \frac{P_i + f_2 A}{1 + P_i + f_2 A}$$

$$P_0(\zeta) \approx A - \frac{J_s}{1 + P_i + f_2 A}$$

由该结果, 我们看到, 只当 $(1 + P_i) \gg J_s > \zeta_2 A$ 时, $J_d(\zeta) \rightarrow J_s$, $P_0(\zeta) \rightarrow A$ 。一般 $P_0 < A$ 。当 P_i 减小时, 例如 $P_i \leq P_i(\beta)$ 时, PD 双曲线和 LD 直线有两个交点, 其中一个在高态, 是稳态; 另一个在高态和低态之间是非稳态。因为系统现在的初态是高态, 也即是稳态, 所以并不因 P_i 减少而产生跃迁, 当 P_i 再行减小, 使两个交点相汇成一点 η (在点 η , PD 双曲线和 LD 直线相切), η 点已是非稳态, 在微小的干扰下, 系统会迅速从 η 点跃迁到低态 δ 。与 η 点相对应的输入光强 $P_i(\eta)$ 是系统关闭光强 P_{off}

$$P_{off} = P_i(\eta) = 2\sqrt{f_2 J_s} - f_2 A - 1 \quad (16-1)$$

$$P_0(\eta) = A - \sqrt{\frac{J_s}{f_2}} \quad (16-2)$$

图 3(b) 给出了与图 3(a) 中 α 、 β 、 γ 及 ζ 、 ε 、 η 、 δ 各点相对应的、在 $P_0 - P_i$ 平面上特征的双稳态回线。

定义 $\Delta P_i = P_{on} - P_{off}$ 为回线宽度。由 (15) 和 (16-1) 式得;

$$\Delta P_i = P_{on} - P_{off} = F^2 A - 2\sqrt{J_s} F + J_s/A \quad (17)$$

若系统性质 A 和 J_s 都固定时, 回线宽度 ΔP_i 随反馈系数的平方根 $F = \sqrt{f_2}$ 改变。当回线宽度 $\Delta P_i = 0$ 时, 由 (17) 式知;

$$F(\Delta P_i = 0) = \sqrt{J_s}/A \quad (18)$$

注意, (17) 式只有一个实根 $F(\Delta P_i = 0)$ 。图 4 给出了 ΔP_i 和 F 的抛物线关系。当 F 从较大值减小到 $\sqrt{J_s}/A$ 时, ΔP_i 沿抛物线右边一支减小到零。当再行减小 F 时, 左边用虚线表示的分支实际上只表示光学微分增益特性存在时 f_2 取值范围, 相应的 ΔP_i 已无意义。右边实线表示的分支说明了双稳性存在时 f_2 的取值范围。中间 $F = \sqrt{J_s}/A$ 的纵轴是两区分界线。

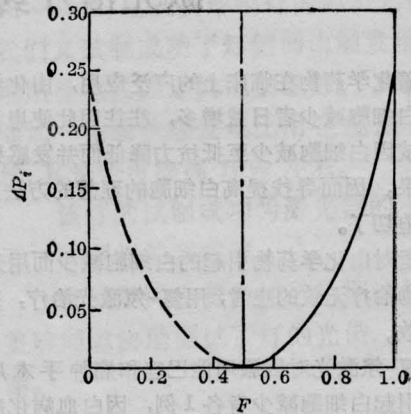


图 4 滞后回线的宽度 ΔP_i 对 F 的关系

图 5 在 $P_0 - P_i$ 平面上给出了态方程 (12) 所描述的状态。图中与系统性质有关的参数取值如下; $J_s = 6$, $J_b = 2$, $J_{th} = 3$, $A = 5$ 。

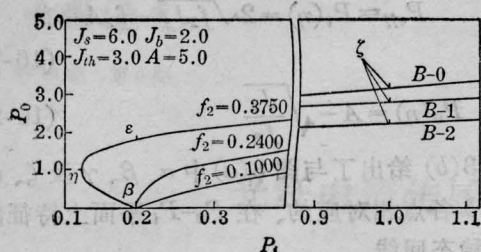


图5 态方程(12)指出当 $f_2 > J_s/A^2 = 0.2400$ 时便出现可双稳的区域

这时与 $\Delta P_i = 0$ 相对应的 $f_{20} = J_s/A^2 = 0.24$ 。当取 $f_2 = 0.375$ 时, 便得到双稳性曲线 B-0; 当 $f_2 = f_{20} = 0.24$ 时, 便得到临界曲线 B-1; 当 $f_2 < J_s/A^2 = 0.24$ 时, 便得到微分增益特性曲线 B-2。从 $f_2 > J_s/A^2$ 逐渐过渡到 $f_2 < J_s/A^2$ 时, B-0 双稳性曲线上 η 点和 β 点之间非稳态会逐渐缩小到零, η 点向 β 点靠近。当 $f_2 < J_s/A^2$ 时, 把相应的 f_2 值代入(16)式, 我们便会发现 B-2 曲线上的 η 点对应的 $P_0(\eta) < 0$, 已没有意义。但 η 和 β 点之间的距离 ΔP_i 仍可由图 4 中虚线分支决定。注意, 当 f_2 改变时, β 点总是锁定在 P_i 轴上, 但 η 点总在改变。由上述讨论可知, 双稳性和光学微分增益存在条件:

$$\left. \begin{array}{l} \text{光学双稳性存在条件 } f_2 > J_s/A^2 \\ \text{光学微分增益存在条件 } f_2 < J_s/A^2 \end{array} \right\} \quad (19)$$

四、讨 论

本文利用半导体速率方程(4)~(5)式, 在忽略掉自发发射影响的条件下, 给出了 BILD 系统稳态时的基本方程(9)、(10)式以及状态方程(11)或(12)式。利用图解法说明了器件的滞后回线产生的物理过程。特别指出了状态曲线随光反馈系数 f_2 逐渐减小, 系统如何从双稳性模式过渡到光增益模式。这些性质已为[1]中的实验所证实。这些结果对集成 BILD 的设计提供了必要的依据。回线宽度 ΔP_i 能随 f_2 做很大改变, 对 ζ_2 十分敏感, 这在实用化上很有意义。

参 考 文 献

- [1] 钟立晨等;《中国激光》, 1986, 13, No. 12, 749.
- [2] H. Kressel, J. K. Butler; "Semiconductor laser and hetero-junction", Academic Press, New York, 1977, pp. 555-565.

激光治疗药物性白细胞减少症

随着化学药物在临床上的广泛应用, 由化学药物引起白细胞减少者日益增多, 往往因此使患者中断治疗或因白细胞减少至抵抗力降低而并发感染等不良后果。因而寻找提高白细胞的理想的方法显得越来越迫切了。

笔者对由化学药物引起的白细胞减少而用升白细胞药物治疗无效的患者, 用氩-氦激光治疗, 获得显著疗效。

用氩-氦激光对因服用他巴唑和癌肿手术后大量化疗引起白细胞减少者各 1 例, 因白血病化疗引起白细胞减少者 12 例, 共 14 例治疗 22 个疗程; 男女各 7 例均 11 个疗程; 年龄最小 17 岁, 最大 52 岁; 白细胞均低于 $2600/\text{mm}^3$ (最低者为 $300/\text{mm}^3$, 低于 $1000/\text{mm}^3$ 者 10 人次*); 每疗程 6~30 次。

使用 SX-1 型氩-氦激光器, 输出功率 1~

3 mW, 光斑直径 3 mm。

照射方法: 每日照射肾俞、命门、内关、足三里各一次, 每穴照 5 分钟。

治疗结果: 有效 19 人次占 86.33%。其中显效 16 人次占 72.7% (白细胞达 $4000/\text{mm}^3$ 以上 11 人次占 50%, 增加虽不到 $4000/\text{mm}^3$ 但超过疗前 1 倍以上者 5 人次占 22.7%); 有效 3 人次占 13.63% (白细胞增加至 $3000 \sim 3999/\text{mm}^3$ 者 2 人次占 9.09%, 白细胞计数未到 $3000/\text{mm}^3$ 但较疗前增加 $1000/\text{mm}^3$ 以上者 1 人次, 占 5.54%); 无效 3 人次, 占 13.63%。

* 次表示疗程, 下同。

(广西医院附属医院理疗科 李榕伊

1986 年 4 月 1 日收稿)