

与光探测器单片集成双稳半导体激光器的特性

晏 緒 光 稲場文男

(杭州电子工业学院) (日本東北大学電気通信研究所)

1989年3月3日收到

利用光输出反馈泵浦方式,首次观测到 PD/LD 单片集成型光学双稳态。电路简单、稳定性好; 双稳范围的宽度可根据需要在很大范围内调节。利用半导体激光器的速率方程理论计算了这类双稳激光器的稳态行为,发现实验结果和理论计算符合的很好。

主题词 集成、双稳、半导体激光器

一、引言

由于光学双稳装置可用作光开关、记忆、放大、以及光数字信息处理系统,是光通讯和光计算机的基本元件,因而近十年来受到人们的极大关注。至今已经实现光学双稳运转的器件不下数十种。其中性能较佳的有 A. Migus 和 H. M. Gibbs 等人研制的 GaAs-AlGaAs 多重量子阱非线性 Fabry-Perot 谐振腔式光学双稳装置,用作光学或非门时,室温下的关时间为 1 微微秒,但该门的恢复时间为几个毫微秒^[1]。另外 W. F. Sharfin 和 M. Dagenais 利用半导体激光放大器作为非线性 Fabry-Perot 腔,观测到室温下的开关时间 < 1 毫微秒、所要求的输入光能 $< 1 \text{ fJ}$ (即 < 7000 个光子)^[2],说明主动式光学双稳装置在处理微弱光信号时具有突出的优点。但是,至今所报道的光学双稳装置,有的仅仅观察到双稳现象;有的虽已用于光开关等实验,但其双稳特性(比如双稳范围的宽度和输出光信号的大小)不能由外部光学元件或电路参数调整和控制,因而所有这些器件都远未达到实用化阶段。

一个实用化的光学双稳装置必须具有好的稳定性、可靠性和重复性;还应根据所处理的光脉冲信号的强弱要求器件的双稳范围宽度以及输出光信号的大小可以调节和控制;另外还要求器件结构简单、容易制作(包括能制成由大量双稳元件构成的列阵器件、以便于光学信号的并列处理);当然还要求响应时间越快越好,价格也须便宜才行。

本文作者之一早年建议,采用光输出反馈泵浦方式或光输出反馈损耗调制方式,一个通常的激光器能够显示光学双稳特性^[3,4]。最近我们采用光输出反馈泵浦方式,首次在实验上观测到一个与光探测器单片集成的双稳激光二极管 (Integrated Bistable Laser Diode, 简称 IBILD) 显示出可控性良好的光学双稳行为。其控制电路简单,通过改变电路参数、双稳范围的宽度可以控制并在很大范围内调节,同时输出光强也可随意改变。

二、实验结果

我们所采用的与光探测器单片集成的双稳激光二极管(IBILD)的结构和电路如图1所示。IBILD是一个 $1.5\mu m$ 的InGaAsP分布反馈式激光二极管/光电探测器单片集成装置(DFB-LD/PD、型号SB67B-3)。激光二极管LD的阈值电流为 $55mA$ 。光电探测器PD和晶体三极管T，用作反馈泵浦回路。PD能同时接收来自LD的激光输出以及外来光输入信号。 V_A 为电源电压。 R_1 和 R_2 用于控制LD和PD的电流。本装置的操作原理可解释如下：当流经LD的电流达到阈值时，LD开始起振，光电探测器PD检测到LD的激光输出后产生光电流。此光电流经三极管T放大后流过LD，于是LD的泵浦电流增大，导致LD的激光输出增强。随着LD光输出的增强，PD的光电流进一步增大；这使得激光输出更加增强，直至使PD饱和。这个快速的正反馈过程使得激光器LD的输出很快从零输出状态跳变到一个有限强度的输出状

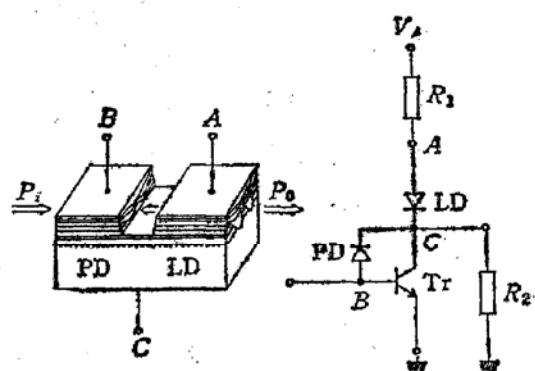


图1 集成双稳半导体激光器(IBILD)
结构和电路图

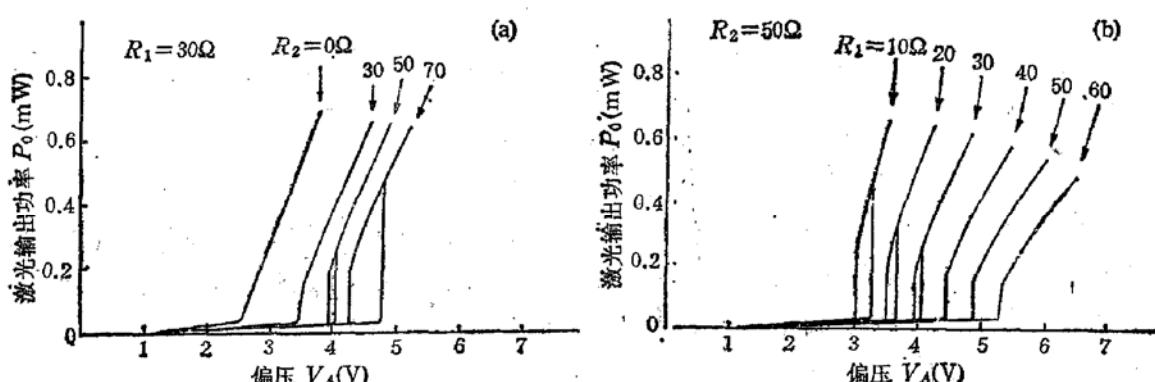


图2 IBILD的激光输出功率(P_o)~偏压(V_A)双稳特性

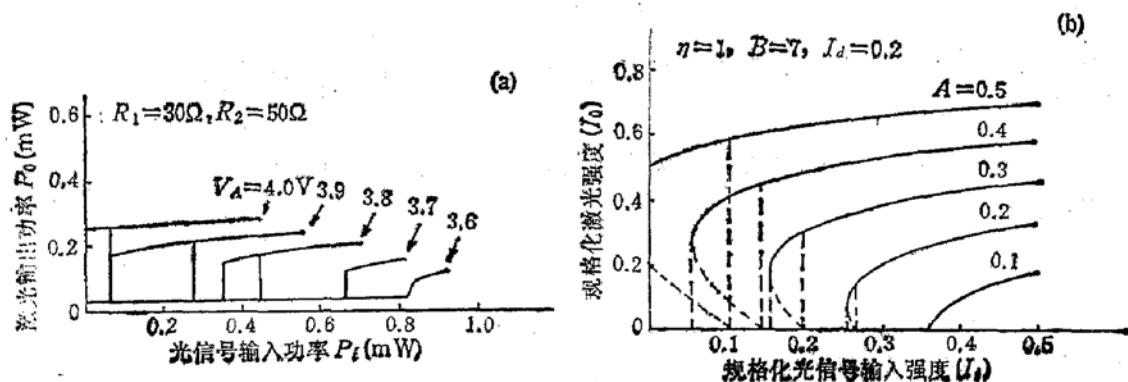


图3 IBILD的激光输出功率~光信号输入功率双稳特性

(a) 实验测量 (b) 理论计算

态。反之，随着 LD 光输出的减弱，开始时 LD 能维持振荡，当激光输出强度减弱到小于 PD 的饱和光强时，光电流明显地减少，然后相反的过程发生。LD 的光输出由于强烈的正反馈而从另一有限值跳回到零输出状态。因此我们能够得到一个双稳回线(hysteresis)，即观测到光学双稳输出特性。

图 2 显示了用 $x-y$ 记录仪测得的集成型双稳半导体激光器的‘激光输出功率 P_0 ~偏压 V_A ’双稳特性。图 3(a) 显示了此装置的‘激光输出功率 P_0 ~光信号输入功率 P_i ’双稳特性。由图 2 和图 3(a) 可知，该双稳激光器的双稳范围宽度和输出光强可以通过改变电阻 R_1 、 R_2 的阻值以及电源电压 V_A 的大小来调节和控制。

三、双稳特性的速率方程理论

以前，我们曾建立了输出反馈泵浦型双稳激光器的半经典理论^[5]，并且指出这种输出反馈泵浦方式适用于任何种类的激光器。但是对于半导体激光器来说，虽然我们仍可保留二能级系统的概念，但由于这些能级是分布在由态密度函数所描述的一个能量范围内，且能态的被占据几率由费米-狄拉克统计分布而不是用简单的二能级模型的玻尔兹曼分布来描述，因而情况要复杂的多。最近我们将半导体激光器的速率方程理论应用于本文中的输出反馈泵浦型集成双稳半导体激光器，得到了和实验数据完全符合的计算结果。对于这种双稳半导体激光器，激活区的注入载流子浓度 n 以及光子密度 S 所满足的速率方程可以改写成^[6]：

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J_p + J_t}{ed} - \frac{n}{\tau} - \xi a S(n - N), \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \xi a S(n - N) - \frac{S}{\tau_p}, \quad (2)$$

其中， J_p 为注入电流密度， d 为激活层厚度， e 为电子电荷， τ 为载流子寿命， ξ 为激活区内激光的模场限制因子， a 为增益常数(由光学跃迁截面决定)， τ_p 为光子寿命， N 代表为了获得增益所必须的注入载流子浓度； J_t 为输出反馈泵浦所产生的注入电流密度，与激光强度有关，且满足下述方程：

$$J_t = \beta \frac{\eta I'_0 + I'_i}{1 + (\eta I'_0 + I'_i)/I'_a}, \quad (3)$$

其中 β 为反馈泵浦系数， η 为激光输出的反馈系数， I'_0 、 I'_i 和 I'_a 分别为激光强度、外输入光信号强度以及光电探测器的饱和光强。

在方程(1)和(2)中，我们忽略了自发辐射的影响。由方程(1)、(2)可以导出稳态下的光子密度为：

$$S = \frac{\tau_p}{ed} (J_p + J_t - J_0), \quad (4)$$

其中 J_0 为阈值电流密度，且

$$J_0 = \frac{1 + \xi a N \tau_p}{\xi a \tau} \cdot \frac{ed}{\tau_p}. \quad (5)$$

于是，激光强度可以写成

$$I'_0 = h\nu S v_g = h\nu v_g \frac{\tau_p}{e d} (J_p + J_i - J_0), \quad (6)$$

其中 v_g 为激活介质中光的群速度， h 为普朗克常数， ν 为激光模的频率。利用阈值电流密度 J_0 将注入电流密度归一化，由(6)式和(3)式可得：

$$I_0 = A + B \frac{\eta I_0 + I_i}{1 + (\eta I_0 + I_i)/I_d} - 1, \quad (7)$$

其中， $A = J_p/J_0$ 为相对注入电流密度，或称规一化泵浦强度； $B = b\beta/J_0$ 为规格化反馈泵浦系数； $I_0 = I'_0/b$ 、 $I_i = I'_i/b$ 、 $I_d = I'_d/b$ 分别为规格化激光强度、规格化外输入光信号强度、以及光电探测器的规格化饱和光强。上述各式中

$$b \equiv h\nu v_g J_0 \frac{\tau_p}{e d}. \quad (8)$$

由(7)式可以求出规格化的激光强度 I_0 的解析表达式为：

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{2\eta} [(B\eta - 1)I_d - (1 - A)\eta - I_i] \\ &\pm \frac{1}{2\eta} \{[(B\eta - 1)I_d - (1 - A)\eta - I_i]^2 \\ &- 4\eta[(1 - A)(I_d + I_i) - BI_d I_i]\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (9)$$

上述结果和我们以前利用半经典理论导出的输出反馈泵浦型双稳激光器的激光强度公式完全一样^[5]，只是现在式中的参量分别由半导体激光器的相应参数决定。

在文献[5]中，我们分析了公式(9)所表示的激光强度 I_0 的稳定性，并指出当条件

$$B\eta > 1 \quad (10)$$

和

$$1 > A > 1 - \frac{I_i + (\sqrt{B\eta} - 1)^2 I_d}{\eta} \quad (11)$$

满足时，可获得双稳输出。适当选择参量 A 、 B 、 η 、 I_d 的数值，我们能计算出激光强度 I_0 与外输入信号光强度 I_i 之间的依赖关系。计算结果如图 3(b) 所示。

比较实验结果图 3(a) 和理论计算图 3(b)，我们发现，双稳特性（包括激光强度以及双稳范围的宽度）随着激光器泵浦强度的增加而变化的规律完全相同。

四、结 论

利用一个半导体激光二极管/光电探测器的单片集成装置，采用极为简单的电路，即可得到稳定性和可控性良好的光学双稳输出特性。输出光强和双稳范围的宽度可以通过改变电路中电阻 R_1 和 R_2 的阻值或改变电源电压 V_A 的大小而在很大的范围内调节。随着表面辐射激光二极管列阵的研究，相信由大量双稳元件组成的二维列阵式集成型光学双稳器件的制作是可能的。

致谢：感谢日本电气公司光电子学研究所（Opto-Electronics Research Laboratories of NEC Corporation）协助制作器件 DFB-LD/PD。

参 考 文 献

- [1] A. Migus, A. Antonetti; D. Hulin, A. Mysyrowicz; H. M. Gibbs, N. Peyghambarian, J. L. Jewell, *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 70(1985).
- [2] W. F. Sharfin and M. Dagenais, *Appl. phys. Lett.*, **48**, 321 (1986).
- [3] H. Inaba, *Phys. Lett.*, **86A**, 452(1981).
- [4] H. Inaba, *J. Opt. Soc. Am.*, **B1**, 467(1984).
- [5] 垣绪光, 伊藤弘昌、稻場文男,(日本)信学技报 86, OQE86-20 (1986).
- [6] 末松安晴编著, 半導体レーザと光集積回路, 191, 株式会社オーム社出版部, 東京(1984).

Bistability of a Bistable Laser Diode Integrated Monolithically with a Photodetector

Yan Xuguang

(Hangzhou Institute of Electronic Engineering)

and Humio Inaba

(Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Japan)

Abstract

We report the first observation of bistability in an integrated bistable laser diode arising from output feedback pumping. The circuit is very simple and the reliability is excellent. The width of hysteresis loop can be controlled and adjusted in a large range according to the requirement. The steady state behavior of this kind of bistable laser has been considered based on the rate-equations of semiconductor diode laser. There is a good agreement between the experimental result and the theoretical calculation.

Key words Integration, Bistability, Laser diode