

# 光纤耦合光双稳半导体激光器的研究

钟立晨 唐运新 秦 鹰 郭奕理

(清华大学无线电电子学系)

**提要:** 介绍一种紧凑的、能以较低输入光功率工作的光学双稳器件, 由光电检测器、光纤定向耦合器和半导体激光二极管组合而成的。描述了工作原理, 解释所观测到的一些效应, 例如滞后回线、微分增益以及记忆功能。

## Optical fiber coupled optical bistable semiconductor lasers

Zhong Lichen, Tang Yunxin, Qin Ying, Guo Yili

(Department of Radio and Electronics, Qinghua University)

**Abstract:** A compact, low input power optical bistable device, combined with photodetector and optical fiber directional coupler and semiconductor laser diode, was presented. The principle is described graphically to explain the observed effects such as hysteresis, differential operational gain and memory functions.

### 引 言

虽然现代光纤通讯已进入实用化阶段, 不过目前的信号处理仍限制在电路中进行, 还不能充分利用光纤所特有的将近 1 THz 的高速率传输信息的巨大潜力。关键在于目前尚无实用的可在光路中进行信号处理的一系列光学数值元件<sup>[1]</sup>。一种有前途的光学数值信号处理元件就是光学双稳器件<sup>[2]</sup>。

从实用化角度来看, 以半导体激光器和集成半导体工艺为基础的光双稳半导体激光器(BILD)<sup>[3]</sup>有很多优点: 它是有源器件, 具有增益特性; 对输入光强和波长的限制小, 甚至可以使用非相干输入光工作; 集成半导体

激光器在工艺上和光集成相容。

理论和实验都已证明, 具有阈值的激光振荡可以类比成非平衡二级相变, 在适当条件下激光的二级相变可以转变成光双稳的一级相变。一种办法是在半导体激光器的光腔中引入可饱和吸收体, Yariv 和 Kawaguchi 等的 BILD 便属此种类型<sup>[4]</sup>。另一种方法是 Inaba 方案, 即输出反馈泵浦法。后一种方案容易作实验, 有灵活多变的特点, 而且具有实用意义<sup>[5]</sup>。

本文的 BILD 属 Inaba 方案。目前, 我们用分立元件作实验, 光路全部用光纤耦合, 其特点是灵活多变、紧凑、数据稳定, 这些已在实验中得到证实。

收稿日期: 1985 年 8 月 15 日。

## 工作原理和器件结构

我们的 BILD 是由一个激光二极管、一个光纤定向耦合器和一个 PIN 光电二极管构成。图 1 是实验光电路的结构图。PD 表示硅 PIN 光电检测二极管和宽带线性电流放大器的总体；LD 是有光纤接头的 GaAlAs 双异质结激光二极管，工作波长为  $0.83\mu\text{m}$ ，阈值电流为  $65\text{mA}$ 。硅 PIN 光电二极管的响应时间小于  $1\text{ns}$ ，光敏面直径  $\phi=1.0\text{mm}$ ，工作波长为  $0.9\mu\text{m}$ 。LED 是有光纤接头的 GaAlAs 双异质结发光二极管。S 是 XC-14A 型脉冲信号发生器，工作频率在  $50\text{MHz}$  以内连续可调，它是 LED 电激发的三角波信号源。C 是光纤定向耦合器。它的一个输入端和 LD 耦合，二个输出端分别同 PD 和光电检测器 D 耦合，从而提供了反馈光路和 BILD 的输出光路，耦合比为  $1:1.4$ 。光电检测器 D (包括放大器在内) 把输出光信号变成放大的电信号加到日立 V-1050F  $100\text{MHz}$  双线示波器的  $y$  信道。输入光的电信号直接取自 LED 电路上的匹配电阻 R，该电信号最后加到示波器  $x$  信道。E 和 F 分别表示输入和反馈光纤的端面，它们由精密调节架控制，同 PIN 的光敏面直接耦合。调节 F 端面到硅 PIN 光敏面的距离便可改变反馈光路的衰减系数  $f_2$ 。为了简洁，图 1 中把 BILD 部份用虚线方框围了起来。

本文只讨论静态特性。LD 和 PD 的光-

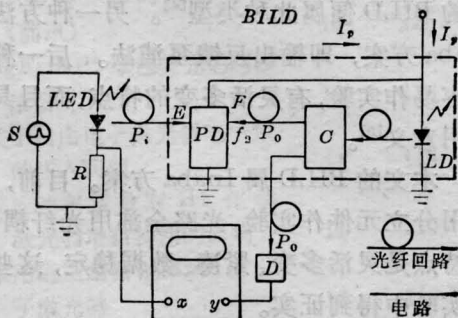


图 1 光纤耦合 BILD 的光电路结构图

电流特性曲线，简单地用折线表示，实际上是把非线性特性给线性化了。利用简单的作图法很容易得到双稳性所特有的滞后回线以及微分增益曲线<sup>[5]</sup>。若  $P_0$  是 LD 输出光强， $P_i$  是 LED 给出的非相干输入光强， $I_p$  是 PD 给出的光电流，那么

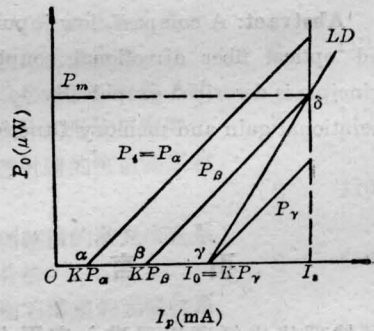
$$P_0=0 \quad \text{当 } I_p < I_0$$

$$P_0=\alpha(I_p-I_0) \quad \text{当 } I_p \geq I_0 \quad (1)$$

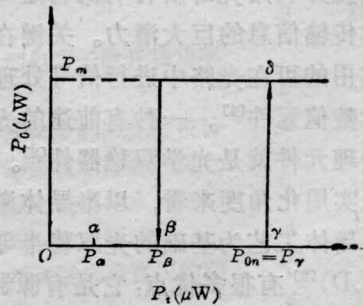
$$I_p=K(P_i+f_2P_0) \quad \text{当 } P_i+f_2P_0 < P_s$$

$$I_p=I_s=KP_s \quad \text{当 } P_i+f_2P_0 \geq P_s \quad (2)$$

其中  $\alpha$  和  $K$  分别是 LD 和 PD 的光-电变换系数，并且  $K=GK'$ ， $G$  是放大器电流增益， $K'$  是 PIN 的光-电变换系数。 $P_s$  是 PIN 管饱和光强， $I_s$  是与  $P_s$  相对应的 PD 的饱和光电流。 $I_0$  是开启光电流，定义为  $I_0=I_{th}-I_b$ ，其中  $I_{th}$  是 LD 的阈值电流， $I_b$  是直流偏置电流。图 2(b) 在  $P_0-P_i$  平面上给出了滞后回线，其中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  各点分别与图 2(a)



(a) 确定工作点的图解



(b) 输入-输出特性

图 2

中在  $P_o-I_p$  平面上相应点对应。产生滞后回线的关键是利用了 PIN 管的饱和非线性特性, 即(2)式的特性。由作图很容易知道  $aKf_2 > 1$  时可产生双稳性,  $aKf_2 < 1$  时只能得到微分增益特性。若  $P_{on}$  是开启输入光强,  $P_{off}$  是关闭输入光强, 回线宽度  $\Delta P = P_{on} - P_{off}$ , 显然, 光电流  $I_o = KP_{on}$ ,  $I_{off} = KP_{off}$ , 所以  $\Delta I = K\Delta P$ 。  $\Delta I$  是用光电流表示的回线宽度。在实验上测量光电流更方便。从图 2, 我们很容易得到下述关系:

$$aKf_2 = \frac{\Delta I}{I_s - I_o} + 1 = \frac{\Delta P}{P_s - P_{on}} + 1 \quad (3)$$

(当  $aKf_2 > 1$ )

$$G_p = \frac{aK}{1 - aKf_2} \quad (4)$$

(当  $aKf_2 < 1$ )

式中  $G_p$  是光学微分增益。实验中可预先选定  $I_o$  和  $I_s$  (也就预先选定了  $P_s, G, I_{th}, I_b$ ), 如果反馈光路耦合较强, 适当调节  $f_2$  便可使(3)式满足, 在示波器上可直接观测到宽度为  $\Delta P$  的滞后回线。如果  $f_2$  较小, 在示波器上只能看到微分增益特性。

### 实验结果

图 3 是 BILD 的输入输出特性的示波图象。图 3(a) 是示波器以 X-Y 模式工作时得到的, (b) 是光输入和输出强度对时间的关系。为了便于比较, 当  $f_2$  改变时, 其它参数以及输入三角波始终保持不变。图中三角波的频率为 33 kHz。从输出方波前后沿可以看出开启和关闭的(上升和下降)时间约  $1 \mu s$ 。图 3-1 给出了 BILD 的微分增益工作模式。随着  $f_2$  增加(减小光纤的 F 端面到 PIN 管光敏面距离), 工作模式便从微分增益过渡到双稳态。图 3-2(a) 给出了典型的滞后回线, 图 3-2(b) 给出了输出方波同输入三角波的时间关系。随着  $f_2$  进一步增加, 图 3-3 说明回线的宽度也变大了。图 3-4 给出了临界最大的回线宽度, 此时  $\Delta P = P_{on}$ 。在微分增益的模式下, 我们还观测到增益曲线的斜率(即

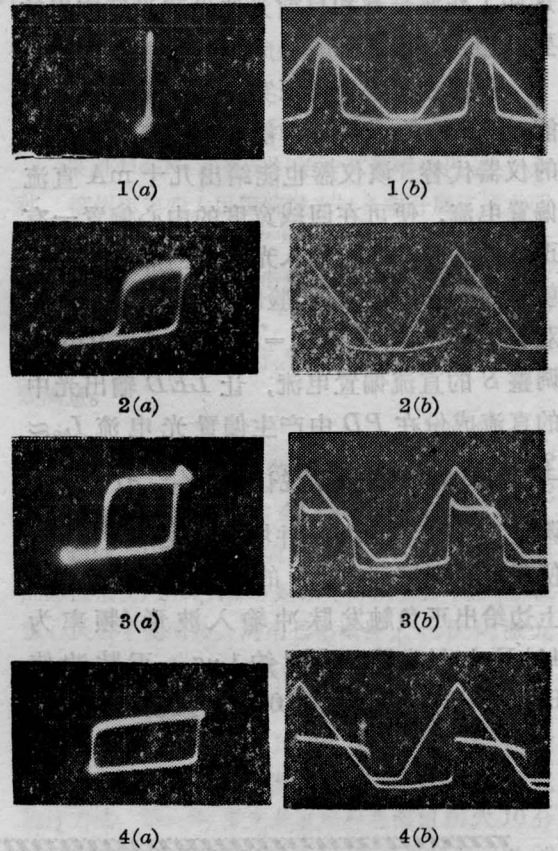


图 3 输入-输出特性对反馈系数  $f_2$  的关系

$G_p$ ) 会随  $f_2$  减小而变小。

以上实验结果都能很好地用(3)式和(4)式来解释。(3)式已说明回线宽度  $\Delta P$  会随  $f_2$  增加, (4)式也说明  $f_2$  减小时,  $G_p$  会变小。实验中保持下述各量不变:  $I_s = 44 \text{ mA}$ ,  $I_o = 11 \text{ mA}$ ,  $G = 3.8 \times 10^3$ 。在双稳态模式下,  $\Delta P$  随  $f_2$  会增加到一临界值  $P_{on}$ , 此时  $\Delta I = I_o$ , 我们得  $aKf_{2c} = I_s / (I_s - I_{on})$ , 如果  $aK$  已知, 由此可以计算出  $f_{2c}$  值。在我们的实验中  $f_{2c} \approx 0.07$ 。如果再进一步增加  $f_2$ , 回线形状要发生严重畸变。

实验中 PIN 二极管饱和光电流一般调节在  $10 \mu A$ , 输入光功率相当于  $40 \mu W$ 。输出光功率可达  $200 \mu W$  或更大, 这同 LD 特性和  $I_s$  参数选择有关。上述实验证明, 我们的 BILD 可用非相干光源 LED 来驱动, 对输入光波长要求并不严格, 输出光已被放大。

这些工作波长都和目前光通讯和光纤应用的要求相容。

我们在实验上还证实 BILD 具有存贮功能。图 1 中的  $S$  用一台能产生正负触发脉冲的仪器代替, 该仪器也能给出几十 mA 直流偏置电流, 便可在回线宽度的中心偏置一有正负触发光脉冲的输入光强, 当然负光脉冲就是光的脉冲减弱。实验时先使 BILD 调整在双稳态模式下, 选定  $I_b = 54 \text{ mA}$ ,  $I_0 = 9 \text{ mA}$ , 调整  $S$  的直流偏置电流, 让 LED 输出光中的直流成份在 PD 中产生偏置光电流  $I_{bp} \approx \frac{2}{3} I_0 = 6 \text{ mA}$ , 也就是说让  $I_{bp} \approx \frac{1}{2} \Delta I$ 。适当调整  $f_2$  (即改变  $\Delta I$ ), 并增加触发脉冲幅度, 便很容易观测到 BILD 的光记忆功能。图 4 上边给出正负触发脉冲输入波形 (频率为 44 kHz), 触发脉冲宽度约  $1 \mu\text{s}$ 。正脉冲使 BILD 开启到高态, 在  $10 \mu\text{s}$  后又被负脉冲关

闭到低态。开启上升时间约  $1 \mu\text{s}$ 。触发脉冲能量约为  $10^{-10} \text{ J}$ 。

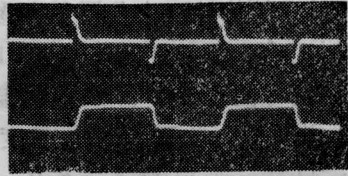
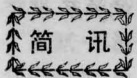


图 4 光存贮的示波图象

### 参 考 文 献

- [1] P. W. Smith; *B. S. T. J.*, 1982, No. 8, p. 1075.
- [2] E. Abraham, S. D. Smith; *Rep. Prog. Phys.*, 1982, **45**.
- [3] *O plus E*, 1984, No. 9, 74~78.
- [4] Ch. Harder *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **39**, 382~384; H. Kawaguchi; *Electron. Lett.*, 1981, **17**, No. 20, 741~742.
- [5] Y. Ogawa *et al.*; *J. Appl. Phys.* 1981, **20**, No. 9, 646~648; 小川等; 《应用物理》, 1983, **52**, No. 10, p. 877(59)~882(64).



## 我国第一次召开自由电子激光器学术讨论会

我国第一次关于自由电子激光器的学术讨论会于 1986 年 8 月 4 日至 8 日在兰州市召开。这次讨论会是由诺贝尔奖金获得者、著名物理学家杨振宁教授倡议, 并得到国家教育委员会的积极支持, 由兰州大学负责筹办的。来自全国各地包括香港地区的 14 个单位 22 名科学家参加了讨论会, 《中国激光》编辑部也应邀派员出席了会议。

科学家们交流了自己在近几年中的研究成果; 评价了目前已有的各种自由电子激光器理论; 提出了今后的研究方向和课题。同时也就我国今后如何进一步开展这方面的研究工作提出了有建设性的建议。

与会科学家高兴地看到我国在自由电子激光器的理论和实验方面所取得的进展, 并有信心为自由

电子激光器的发展作出应有的贡献。

为了及时交流自由电子激光器的研究成果, 活跃这个领域的学术思想, 与会科学家决定今后定期召开自由电子激光器学术报告会和讨论会。下一次讨论会初定于 1987 年在成都召开。

自由电子激光器是七十年代后期发展起来的新型激光器。它突出的优点是能够输出很高的功率, 且能量转换效率很高, 输出的激光波长可以在很宽的范围连续调谐。特别引人注目的是, 它是目前获得 X 射线波段激光辐射最有实际意义的手段。因而, 自由电子激光器在国防建设、工业和科学研究上有着重要应用价值。世界各国对于这种激光器的研究和发展也都极为重视, 投入了大量的人力和物力。

(纪钟)