

# 分支光波导光学双稳态装置

孙雨南 钟保安

(北京邮电学院应用物理系)

## 提 要

本文报道了作者采用实验室制备的 Ti 扩散 LiNbO<sub>3</sub> 分支光波导调制器样品构成的光学双稳态装置 (BOD)。对这类装置的稳态特性进行了理论上的分析与计算,并从实验上观察了装置的稳态特性,两者的结果有较好的一致性。

## 一、分支光波导调制器样品的制备

分支光波导调制器是利用分支波导将导模光束分成两束,在这两个分支臂上通过电场来调制其位相,然后使两束光迭加实现光强调制。理论计算表明,它的输出、输入光功率  $P_{out}$ 、 $P_{in}$  与外加电压  $V$  有下列关系<sup>[1]</sup>:

$$P_{out}/P_{in} = 1 + M \cos\left(\pi \frac{V + V_b + V_0}{V_\pi}\right), \quad (1)$$

其中  $M$  是调制度,  $V_b$  为直流偏置电压,  $V_0$  是由于波导两臂的结构不对称而引入的两臂中导模场的初相差所对应的电压,  $V_\pi$  是调制器的半波电压。图 1 是我们设计研制的分支光波导调制器的结构示意图,两分支臂波导宽为  $W_1 = 5 \mu\text{m}$ , 输入(出)波导宽  $W_2 = 10 \mu\text{m}$ , 电极间隙  $d = 10 \mu\text{m}$ , 电极长度  $l = 4.0 \text{mm}$ 。

采用  $y$  向切割 LiNbO<sub>3</sub> 晶体作衬底,溅射约  $450 \text{\AA}$  厚的 Ti 膜波导图形,在  $990^\circ\text{C}$  温度下扩散 7 小时,然后蒸发铝电极,制得调制器样品。

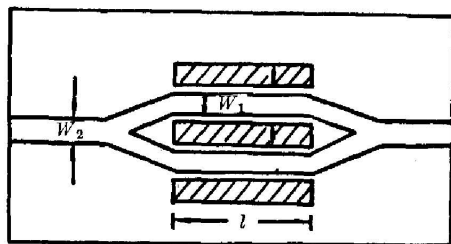


图 1 分支光波导调制器的结构示意图  
Fig. 1 Sketch of the branched optical waveguide modulator construction

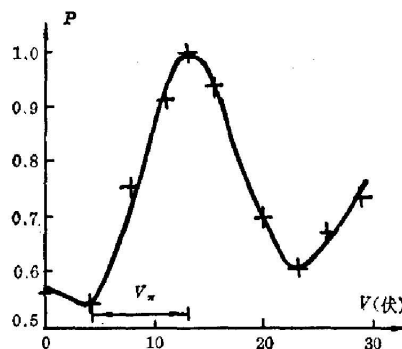


图 2 实验测量的归一化输出功率与电压  $V$  的函数关系曲线  
Fig. 2 Measured curve of normalized optical output power vs voltage

用  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  棱镜耦合观测了分支光波导的导波模式。测量了输出光功率与电压的函数关系曲线,如图 2 所示。从曲线中可以得到调制器的半波电压  $V_{\pi} \approx 9.0 \text{ V}$ , 最大调制深度  $\eta_{\max} \approx 46\%$ 。

## 二、分支光波导(BOD)的稳态特性分析

光电调制器的透射率  $T(V)$  是其调制电压  $V$  的非线性函数, 它与输入、输出功率  $P_{\text{in}}$ 、 $P_{\text{out}}$  的关系为  $P_{\text{out}} = P_{\text{in}} T(V)$ 。而调制电压  $V$  由输出功率  $P_{\text{out}}$  和反馈系统所决定,  $V = \alpha P_{\text{out}}$ , 其中  $\alpha$  是被检测的输出功率  $P_{\text{out}}$  与电压  $V$  之间的变换因子, 它包括反馈系统的分光镜、检测器到放大器的所有因素在内。如再考虑到偏置电压  $V_b$ , 则输出功率  $P_{\text{out}}$  与透射率  $T(V)$  之间应满足下列隐式方程:

$$P_{\text{out}}/P_{\text{in}} = T(V_b + \alpha P_{\text{out}}) \quad (2)$$

一般来说, 若已知透射率曲线  $T(V)$  (实验测量曲线或解析表达式), 则可用图解法求解 (2) 式, 并得到  $P_{\text{out}} \sim P_{\text{in}}$  图中的回滞线<sup>[2, 3]</sup>, 如图 3 所示。

而对分支光波导调制器构成的 BOD, 则应该用解析式 (1) 代替隐式 (2) 直接计算。由实验测得的最大调制深度  $\eta_{\max}$  可推算出调制度  $M = \frac{\eta_{\max}}{2 - \eta_{\max}} \approx 29.9\%$ 。将  $M$  和  $V_{\pi}$  代入 (1) 式, 以  $V_b$  为参变量, 可以画出一组  $P_{\text{out}} \sim P_{\text{in}}$  曲线图。图 4 以  $V_{\text{out}} (= \alpha P_{\text{out}}) \sim V_{\text{in}} (= \alpha P_{\text{in}})$  为坐标, 画出了四条不同偏压下的曲线, A、B、C、D 四条曲线分别对应  $V_b + V_0 = (-12 \text{ V}, -14 \text{ V}, -23 \text{ V}, -26 \text{ V})$  四种不同情况。

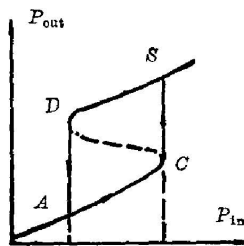


图 3  $P_{\text{out}} \sim P_{\text{in}}$  函数曲线

Fig. 3 Curve of  $P_{\text{out}}$  vs  $P_{\text{in}}$

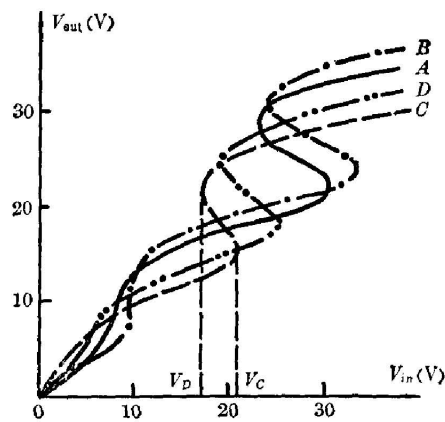


图 4 BOD 的  $V_{\text{out}} \sim V_{\text{in}}$  计算曲线

Fig. 4 Calculated BOD curve of  $V_{\text{out}}$  vs  $V_{\text{in}}$

图 3 中 C、D 为极值点, 也是稳定与非稳定状态的分界点, 称为临界点。它们应满足

$$\left( \frac{dP_{\text{in}}}{dP_{\text{out}}} \right) \Big|_{P_{C,D}} = 0 \quad (3)$$

根据 (1) 和 (3) 式可以得到临界点  $V_{C,D} (= \alpha P_{C,D})$  与偏压  $V_b$  的关系

$$V_b + V_0 = -\frac{V_{\pi}}{\pi} \sin^{-1} \left( \frac{V_{\pi}}{\pi M V_{C,D}} \right) - V_{C,D} \pm \left[ (M V_{C,D})^2 - \left( \frac{V_{\pi}}{\pi} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

取  $V_b + V_0 = -23 \text{ V}$ , 用计算机对此超越方程数值求解得到  $V_C = 20.9 \text{ V}$ ,  $V_D = 17.1 \text{ V}$ , 与图 4 结果相符。

提高偏压  $V_b$ , 回滞线面积减小, 当两临界点重合时, 回滞线消失成为一条临界曲线, 若继续提高  $V_b$ , 则不再出现回滞线, 此时的偏压称为临界偏压  $V_{bc}$ 。两临界点应重合于  $T(V)$  曲线的拐点, 它满足:

$$\left. \frac{dP_{in}}{dP_{out}} \right|_{P_{r,c}} = \left. \frac{d^2 P_{in}}{dP_{out}^2} \right|_{P_{r,c}} = 0. \quad (5)$$

对分支光波导 BOD, 根据(1)式和(5)式可得

$$V_{bc} + V_0 = \left[ 2k - \left( \frac{1}{2} \right) - \left( \frac{1}{\pi M} \right) \right] V_{\pi}, \quad (6)$$

其中  $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。取  $K=0$ , 则  $V_{bc} + V_0 = -14.1 \text{ V}$ , 与图 4 中曲线 B 的下部情况基本相符。

图 4 中 C、D 曲线是  $V_b < V_{bc}$  的情况, 有回滞线产生。曲线 A 是  $V_b > V_{bc}$  的情况, 其下部为单调饱和曲线, 而其上部仍有回滞现象。

总之, 对于分支光波导 BOD, 其临界偏压  $V_{bc}$  完全是由分支光波导调制器的特性 ( $M$  和  $V_{\pi}$ ) 决定的; 其回滞线面积的大小是由两个临界点位置决定的, 因此, 回滞线面积对给定的调制器来说是由偏压  $V_b$  决定的, 而对不同调制器, 则还与调制器的特性 ( $M$  和  $V_{\pi}$ ) 有关。

### 三、BOD 稳态特性的实验观察

采用研制的分支光波导调制器样品, 按图 5 所示光路, 我们实现了混合型无镜光学双稳态实验。

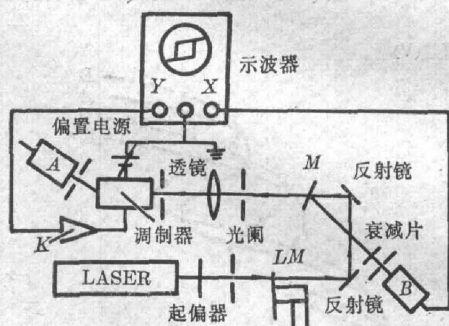


图 5 光学双稳态实验光路图

Fig. 5 Experimental arrangement for optical bistability

由 He-Ne 激光器发出的激光束经斩波器 LM 后, 光强呈三角波变化; 然后经分束镜 M 分成两束: 一束经衰减后进入光电倍增管 B, 其输出电压信号送入示波器 x 轴; 另一束经透镜会聚, 由棱镜耦合进入波导调制器, 再由棱镜耦合出来, 用光电倍增管 A 接收其  $E_{12}^o$  模的  $m$  线的一部分, 其电压信号一部分经放大器 K 放大后反馈到波导调制器的电极上, 作为调制电压; 另一部分直接送示波器的 Y 轴输入。图 6 是在各种偏置电压下示波器踪迹的照片。其中 (a)  $V_b = -25 \text{ V}$  时的回滞线; (b)  $V_b = -18 \text{ V}$  时得到的临界曲线; (c)  $V_b = -9 \text{ V}$  时的单调饱和曲线。这一结果与前面的理论分析有较好的一致性。

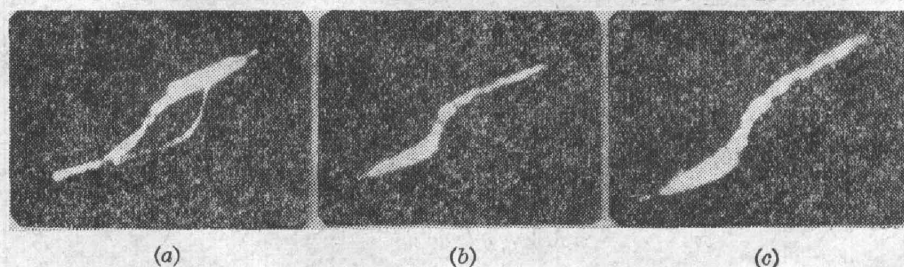


图 6 各种偏压下 BOD 输出的示波器踪迹照片

Fig. 6 Oscilloscope traces of optical output power with different bias

## 四、讨 论

(1) 实验中,当提高偏置电压  $V_b$  到  $-18\text{ V}$  以上而同时提高放大器增益到某一适当值时,也观察到了双稳特性,这一点在图 4 中亦可见到。实际上提高放大器增益与提高入射光功率  $P_{in}$  是等价的,图 4 中的  $A$ 、 $B$  曲线在  $P_{in}$  增大时,其上部确可出现回滞线,所谓“单调”或“临界”只是指  $P_{in}$  不太高时的下部而言。由图 7 可更清楚地看出,对给定的偏压  $V_b$ 、 $T(V)$  曲线在第一周期内显然不可能产生双稳特性,即第一级双稳特性消失(如  $a$  的情况),而当提高  $P_{in}$  值,即直线斜率减小时,可在第二周期内产生双稳特性,也就是出现了第二级双稳特性(如  $b$ 、 $c$  情况)。由此可见:我们的 BOD 实际上是一个多稳态装置。在实验中,当进一步提高放大器增益时,也确曾观察到三稳态等多稳态特性。

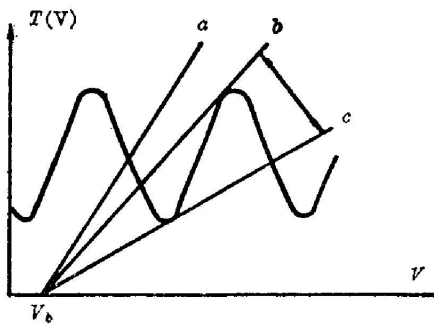


图 7 产生第二级双稳特性示意图  
Fig. 7 Sketch showing the second step of bistability

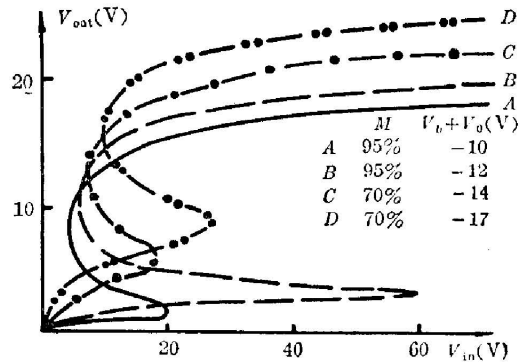


图 8  $M$  取不同值时得到的  $V_{out} \sim V_{in}$  计算曲线  
Fig. 8 Calculated BOD curve of  $V_{out}$  vs  $V_{in}$  for different values of  $M$

(2) 本实验所观察到的双稳特性不够理想,主要指回滞线面积不够大,形状不够矩形。主要原因在于实验中采用的分支光波导调制器的调制度  $M$  (或  $\eta_{max}$ ) 不够大。前面曾提到,回滞线面积不仅与偏压  $V_b$  有关,而且与调制器特性 ( $M$ 、 $V_x$ ) 有关,但 (4) 式是一隐式方程,不能直观得到临界点与  $M$  的关系,为此用计算机对  $V_x = 9.0\text{ V}$  时,  $M = 95\%$  和  $M = 70\%$  的情况作了计算,结果如图 8 所示。

显而易见,在  $V_x$  和  $V_b$  相同的情况下,提高调制器的调制度  $M$ ,会大大增加回滞线面积。此外,适当提高  $M$  还将为实际使用带来一些益处。如将图 8 和图 4 进行比较可见,当  $M$  值较大时,改变  $V_b$  将对回滞线的形状产生较大的影响。同时,在  $M$  较大情况下,即使入射光功率较低,亦可产生双稳行为。因此,提高  $M$  值将在实际使用中一方面更易于调节,另一方面还可降低对入射光功率的要求。再如,由 (6) 式取  $k=0$ ,可得  $M=95\%$  和  $70\%$  时的临界偏压分别为  $-7.5\text{ V}$  和  $-8.6\text{ V}$ ,可见提高  $M$  值还可使反向偏压减小,这就降低了对偏置电源的要求。但是也应当看到,  $M$  的增大也会引起开关功率和开关能量的增加,因而对调制器的  $M$  值应作适当选择。本实验所使用的光波导调制器的  $M$  不够高,主要是微加工精度未达到要求,致使波导结构对称性不够理想,从而使两分支臂中导模光场强不平衡,引起  $M$  下降。相信提高微加工精度将能使  $M$  值得到提高<sup>[4]</sup>。

## 五、结 束 语

我们利用分支光波导调制器构成了无镜型 BOD; 分析了它的稳态特性, 观察了不同偏压下获得的回滞曲线、临界曲线以及单调饱和曲线, 与理论上的分析及计算结果有较好的一致性。我们的工作还有待继续深入, 如波导器件的插入损耗的测量、BOD 暂态特性的实验观测等等。另外, 调制器的调制深度还不够高, 如能进一步提高微加工精度, 可望得到改善。本实验采用棱镜耦合, 损耗大、效率低; 检测器采用了光电倍增管, 其反馈回路加有放大器, 这不仅损坏了器件特性, 又使系统不易调节。若能改用端面直接耦合, 用雪崩光电二极管 (APD) 检测, 用电阻  $R$  反馈, 或进一步采用合适的材料将调制器和检测器单片集成或混合集成, 则将大大改进器件性能, 更接近于实用。

在制备波导调制器样品的实验中, 得到本系专业物理教研室和微电子教研室的周虚、李德龙、张菊芹、姚素琴等同志的大力支持和帮助, 在此谨向他们表示衷心的感谢!

### 参 考 文 献

- [1] 孙雨南, 钟保安; 《北京邮电学院学报》, (待发表)。
- [2] E. Garmire *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**, No. 5 (Mar), 320.
- [3] 李淳飞; 《物理》, 1982, **11**, No. 11 (Nov), 666.

## Bistable optical devices using branched optical waveguide

SUN YUNAN AND CHUNG BAOAN

(Department of Applied Physics, Beijing Institute of Posts and Telecommunications)

(Received 11 April 1983; revised 17 June 1983)

### Abstract

This paper represents a bistable optical device (BOD) using Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> branched optical waveguide modulator which is fabricated in authors' laboratory. The steady characteristic is analyzed and calculated theoretically. From the experimental results, half wave voltage  $V_{\pi} \cong 9.0$  V and maximum modulation depth = 46% are obtained. The calculated band width is about 5.5 GHz. The bistable hysteresis curves, critical curves, and the dull saturated curves are observed. They agreed well with the theoretical analyses and calculated results. The improvements for this device are discussed.