

LiNbO₃ 交叉型波导光触发器

明 海

(中国科学技术大学物理系, 合肥)

梅垣真佑 田中俊一

(日本东京大学)

提 要

利用在集成光路中串联的两个 LiNbO₃ 交叉型光波导调制器, 代替 KDP 晶体普克尔效应调制器, 构成两个混合双稳态器件, 制成光学 T 触发器 (flip-flop), 并给出实验结果。

关键词: 交叉型光波导; 光学 T 触发器; 混合双稳态器件。

一、前 言

数字光计算的基本功能元件是逻辑门和记忆元件。从理论上来说, 一个数字光计算系统完全可以由逻辑门和光学触发器 (flip-flop) 构成。门元件用于组合逻辑操作, 触发器用于时序逻辑操作并具有记忆功能。Okumura 等^[1]用双稳态激光二极管和发光二极管组成光学变换器和门元件实现 R-S 和 J-K 触发器的操作, Fatehi 等^[2]提出用液晶光阀进行 R-S 和 D 触发器的操作。Vmegaki 等^[3]用 KDP 电光晶体调制器组成的双稳态器件实现 T 触发器动作, 由于在晶体调制器上必须加几千伏的高压, 所以构成的光学双稳装置的响应速度不快。本工作改善了触发器的工作特性, 使系统小型化。

二、原 理

光学 T 触发器原理示意图如图 1 所示, 它主要由两个混合光双稳态器件组成, 每一个双稳态器件由 LiNbO₃ 交叉型波导调制器和反馈回路构成。第一个 LiNbO₃ 交叉型波导调制器输出的光信号, 一路 $P_{out,1}$ 由光二极管接收后转变为电信号, 经运算放大器放大后反馈到 LiNbO₃ 交叉型波导调制器的电极上, 另一路 $P'_{out,1}$ 输入第二个波导调制器, 第二个波导调制器的输出 $P_{out,2}$ 的一部分同样反馈到第二个 LiNbO₃ 交叉型调制器的电极上, 另一部分经过 RC 延迟电路反馈到第一个双稳态器件, 通过调整 RC 电路可以改变延迟时间。

双稳态器件是用 Z 切割钛 (Ti) 扩散 LiNbO₃ 交叉型波导调制器制成, 钛扩散的时间为 5 小时到 10 小时, 其结构如图 2 所示。波导的宽度 $W=7.5\mu\text{m}$, 交叉区长度 $L=4\text{mm}$, 交叉角 $\phi=0.2^\circ$, LiNbO₃ 交叉波导表面有一层约 2000 Å 厚的 Al₂O₃ 保护层, 其上镀有如图 2 所示的宽度为 $7\mu\text{m}$ 的电极, 电极间隔也是 $7\mu\text{m}$, 加在电极间的电压不能太高, 一般在

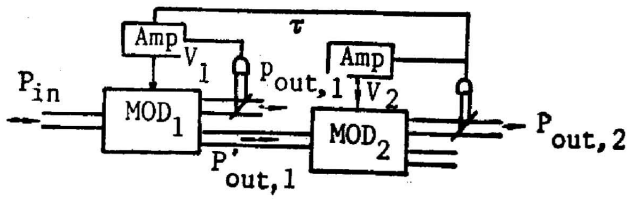


Fig. 1 System configuration

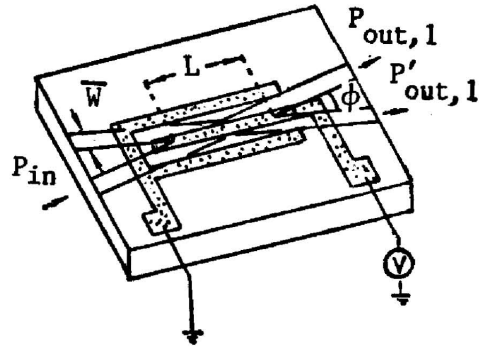


Fig. 2 Z-cut LiNbO₃ intersection waveguide

-100 V 到 +100 V 之间。对应输入 P_{in} ，有两个输出 $P_{out,1}$ 和 $P'_{out,1}$ ，当 TM 模输出时， $P_{out,1}$ 和 $P'_{out,1}$ 随加在 LiNbO₃ 交叉型波导调制器电极上的电压的改变而改变，变化曲线类似正弦曲线， $P_{out,1}$ 和 $P'_{out,1}$ 随电压 V 变化的曲线正好互补。半波调制电压可以从输出特性曲线中测出，交叉区的长度 L 愈短，则需要的半波电压愈高。

Z 切割 Ti 扩散 LiNbO₃ 交叉型波导调制器的输出和输入比为：

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = A \left\{ 1 - K \sin^2 \left(\frac{\pi}{2V_{\pi}} V + \phi \right) \right\} \quad (1)$$

这里 $0 < A < 1$ ， V_{π} 是半波电压， K 是调制常数。由于反馈，LiNbO₃ 交叉型波导调制器，电极上得到一个与输出光功率 P_{out} 成正比的电压，所以调制器电极上的总电压 V 是：

$$V = GP_{out} + V_b \quad (2)$$

式中 G 为输出光转换成电压的变换常数， V_b 是偏置电压，用 (2) 式除以 P_{in} ，整理后得：

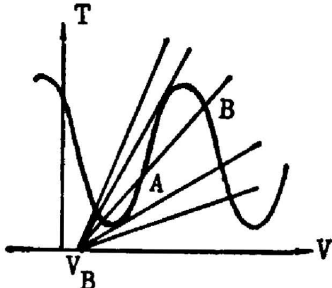


Fig. 3 T-V curve

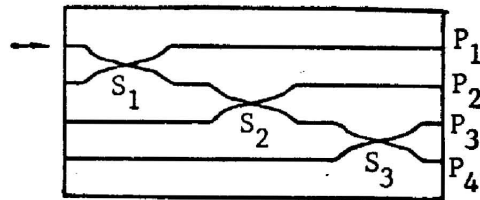


Fig. 4 Integrated circuit of LiNbO₃ intersection waveguide

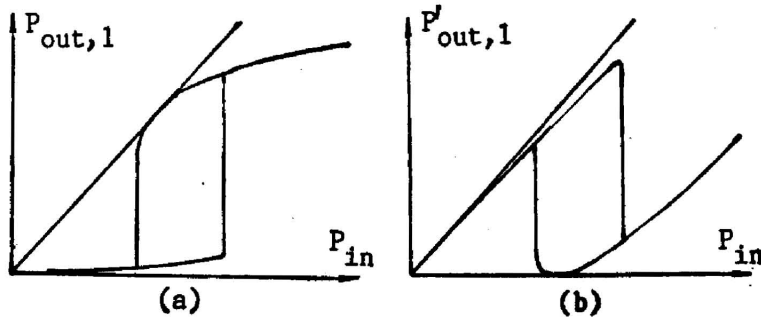


Fig. 5

(a) Usual BOD hysteresis; (b) Complementary BOD hysteresis

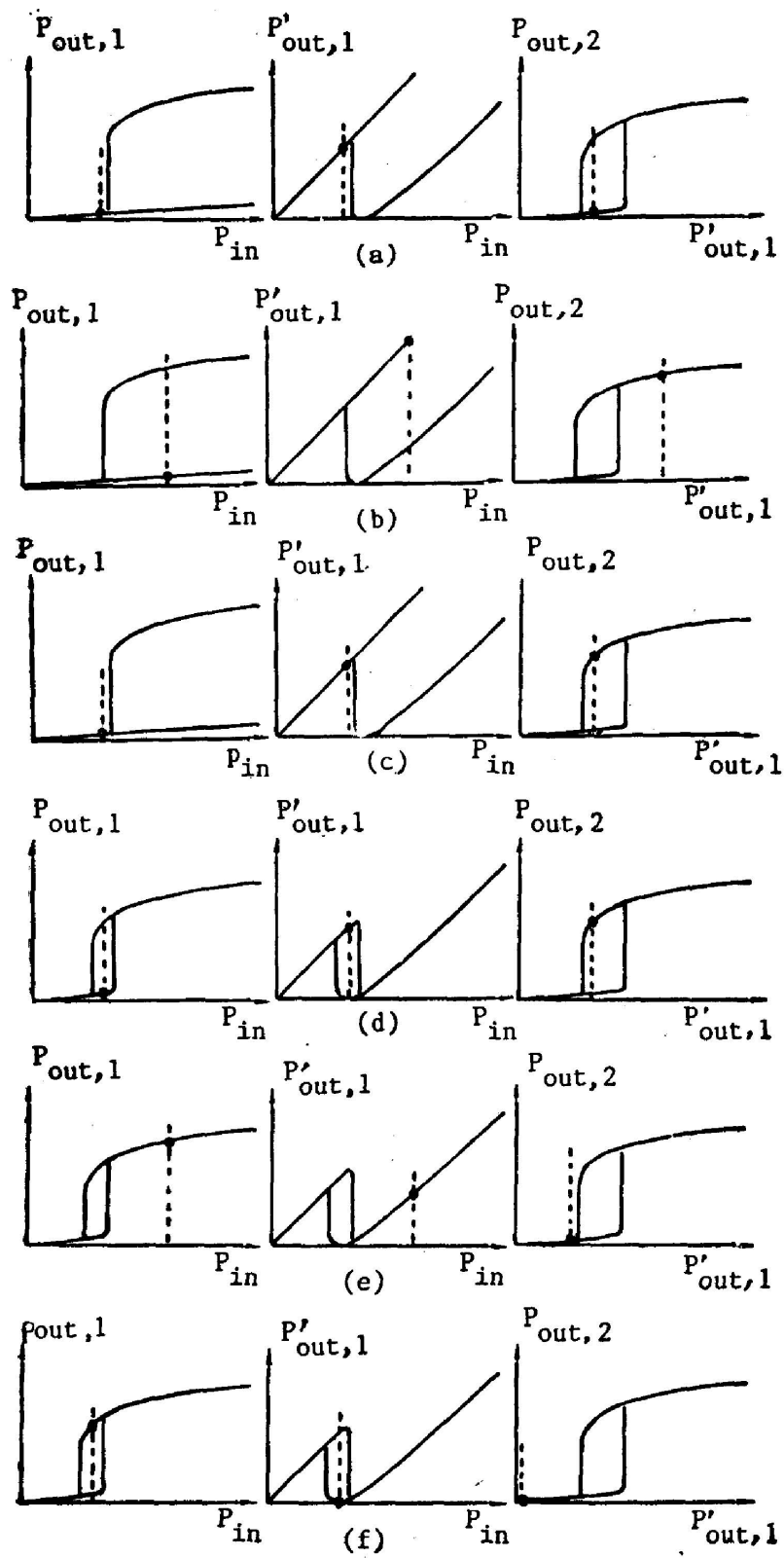


Fig. 6 Serial illustration of T flip-flop operation

$$T = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{1}{GP_{\text{in}}}(V - V_b), \quad (3)$$

由方程(1)与方程(3)联立, 则可决定 LiNbO₃ 交叉型波导调制器的工作状态。图 3 表示输出与输入比 T 与电压 V 的关系曲线, 在某些特定 V 值变化范围内, 随着输入 P_{in} 的变化, T 将表现为 V 的多值函数。

实际实验使用的光集成块是用于 1×4 光开关的 LiNbO₃ 交叉型光波导集成块, 其结构如图 4 所示。光集成块全长 40 mm, 两端的 LiNbO₃ 波导均相互平行, 间隔为 $125 \mu\text{m}$, 光集成块中有三个串联的 LiNbO₃ 交叉型波导 S_1 , S_2 和 S_3 。因为光 T 触发器只需两个 LiNbO₃ 交叉型波导调制器, 所以第三个 LiNbO₃ 交叉型波导 S_3 闲置着。采用这种光波导集成块, 可以避免两个 LiNbO₃ 交叉型波导调制器间耦合困难的问题, 使装置小型化, 并提高光 T 触发器系统的稳定性。

第一个 LiNbO₃ 交叉型光波导调制器构成的双稳态的滞后回线如图 5 所示。图 5a 中 $P_{\text{out},1}$ 对应的滞后回线是通常的双稳态特征曲线, 图 5b 是 $P'_{\text{out},1}$ 对应的逆滞后回线, 假定 LiNbO₃ 交叉型光波导调制器没有内部光能传输损失, 则 $P'_{\text{out},1} = P_{\text{in}} - P_{\text{out},1}$, 这时, 两个特征曲线正好互补。光 T 触发器工作时, 第二个 LiNbO₃ 交叉型波导调制器构成的双稳态呈现的是正常的滞后回线。另外, 经过延迟时间 τ 后, 与第二个 LiNbO₃ 交叉型波导调制器输出 $P_{\text{out},2}$ 成正比的电压反馈到第一个波导调制器的电极上。这时, 加在第一个 LiNbO₃ 波导调制器电极上的电压 V_1 应为:

$$V_1 = G_1 P_{\text{out},1} + V_b + G_2 P_{\text{out},2}. \quad (4)$$

其中 G_1 , G_2 分别为两个 LiNbO₃ 交叉型波导调制器的输出光转换成电压的变换常数。

当一系列光脉冲输入光 T 触发器系统时, 其响应关系曲线可用图 6 表示。左图表示第一个光波导调制器输入功率 P_{in} 和输出功率 $P_{\text{out},1}$ 的关系; 中图表示第一个光波导调制器输入功率 P_{in} 和输出功率 $P'_{\text{out},1}$ 的关系; 右图表示第二个光波导调制器的输入功率 $P'_{\text{out},1}$ 和输出功率 $P_{\text{out},2}$ 的关系, 用黑点表示动作点。从图 6a 到图 6d 表示从第一个开关脉冲输入之前, 到开关脉冲输入时间 τ 后的情况, 整个系统从“OFF”态变换到“ON”态。当第二个光脉冲在上述状态下输入系统时, 第一个双稳态的工作点跳到低端, 如图 6e 所示。当第二个光脉冲结束时, 第二个双稳态工作点在低端, 如图 6f 所示。系统返回到开始的“OFF”态, 从而完成了一个周期的光 T 触发器的动作^[9]。

三、实验和结果

LiNbO₃ 交叉型波导光触发器的实验装置如图 7 所示。对于 $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光, 通过 LiNbO₃ 交叉型波导, 输出的是多模光斑, 不能用于构成波导双稳态器件。所以采用 $1.06 \mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 连续激光器或波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的半导体激光器作光源, 但为了调整方便, 仍采用红色的 He-Ne 激光导向, 并用红外摄像机和 TV 监视, 从 LiNbO₃ 交叉型波导输出的光斑模式及其光束耦合情况。从 Nd:YAG 激光器射出的光经分束器 H_2 后, 变成两束, 其中一束光通过斩波器变成脉冲光, 两束光于半反射镜 H_3 处重合后, 形成连续的光脉冲, 通过 10 倍的显微物镜 L_1 耦合到 LiNbO₃ 交叉型光波导。使用 Nd:YAG 连续激光器的

方便之外,在于光束的发散角较小、输出功率大、可以用衰减片任意调整系统各部分所需要的光强、以及在 TV 监视荧光屏上能清晰地观察到从 LiNbO₃ 交叉型波导输出的光斑模式。如果用半导体激光器作光源,由于光束发散角大,可以用短焦距透镜将半导体激光准直成平行光,这时由于光束截面较大,只能用数值孔径合适的透镜,把光束耦合到 LiNbO₃ 交叉型波导。如果能把半导体激光器和 LiNbO₃ 交叉型波导光集成块一体化考虑,设计制作在同一块基片上,采用直接耦合的方案,可显示其系统小型化的优点。交叉型波导光集成块安放在一个特制的高精度的五维调节架上,必须防止灰尘落到 LiNbO₃ 交叉型波导的电极上,以免造成电极短路和损坏,在 LiNbO₃ 交叉型波导集成块的上方放置显微镜,可随时观察 He-Ne 激光束与 LiNbO₃ 波导耦合的情况。由于 Nd:YAG 和半导体激光的波长比 He-Ne 激光的波长长,对所应的相同光束耦合透镜的焦距,也应较长,所以当 He-Ne 激光在光路中耦合后,再稍稍调整耦合透镜的前后位置,就可在红外监视 TV 的荧光屏上得到清晰的单模光斑。光探测器(对 $\lambda=1.06\ \mu\text{m}$ 的激光用硅光二极管,对 $\lambda=1.3\ \mu\text{m}$ 的激光用锗光二极管)把接收的光信号 $P_{\text{out},1}$ 和 $P_{\text{out},2}$ 转换成电压信号,由运算放大器增幅后分别反馈到第一和第二个 LiNbO₃ 交叉型光波导调制器的电极上,同时一个与第二个 LiNbO₃ 交叉型波导调制器输出功率 $P_{\text{out},2}$ 成正比的电信号,通过 RO 延迟电路,延迟时间 τ 后,反馈到第一个光波导调制器的电极上。系统的输入光功率 P_{in} , 输出光功率 $P_{\text{out},1}$ 和 $P_{\text{out},2}$ 转化为电信号后,分别输到同步示波器和 XY 函数记录仪上。首先把加在 LiNbO₃ 交叉型波导调制器电极上的电压 V_1 和 V_2 分别用分导线到 XY 函数记录仪上,保持输入 P_{in} 不变,改变电极上的电压,观察输出功率的变化,分别画出 $P_{\text{out},1}-V_1$, $P_{\text{out},1}-V_1$ 和 $P_{\text{out},2}-V_2$ 的动态曲线。对用 $\lambda=1.06\ \mu\text{m}$ 的激光作光源来说,从 LiNbO₃ 交叉型波导调制器的输出和电极上电压关系的动态曲线,测出其半波电压在 0.44 V 到 0.52 V 之间,消光比在 0.95 左右。分别根据它们的动态曲线,设置合适的偏置电压 V_b 。然后通过连续改变输入光功率 P_{in} ,用同步示波器分别测量 P_{in} 与 $P_{\text{out},1}$, P_{in} 与 $P'_{\text{out},1}$, P_{in} 与 $P_{\text{out},2}$ 的滞后回线,反馈电压由 XY 函数记录仪和数字电压表测量。选择最佳的滞后回线的状态,连接好整个系统,当输入一系列连续的光脉冲时,在同步示波器上就显示出 LiNbO₃ 交叉型波导光 T 触发器的动字作。

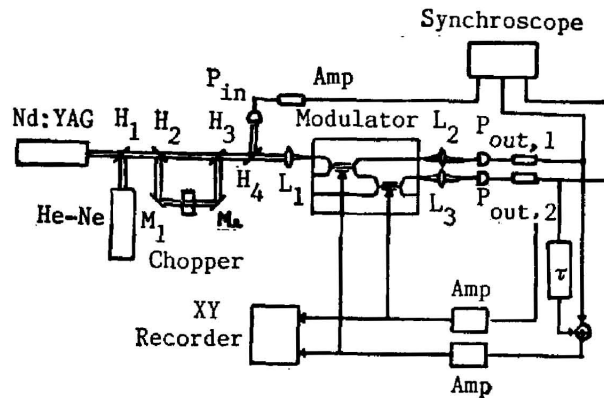


Fig. 7 Experimental setup

图 8a, 图 8b 分别为第一个 LiNbO₃ 交叉型波导调制器构成的双稳态的两个互补滞后回线,实验时所用的偏置电压图为 $-49.5\ \text{V}$ 。图 8c 是 LiNbO₃ 交叉型波导光 T 触发器的实验结果。照片的上半部表示一系列脉冲宽度为 0.5 ms、脉冲间隔为 50 ms 输入的光脉冲 P_{in} ,照片的下半部表示第二个 LiNbO₃ 交叉型波导调制器构成的双稳态的输出 $P_{\text{out},2}$ 对应输入 P_{in} 的波型。这个结果与用 KDP 电光晶体调制器制作光 T 触发器的研究相比,因为把调制器电极上的电压从几千伏降到几十伏,提高了光学双稳态的响应速度,不必再采用光学微分

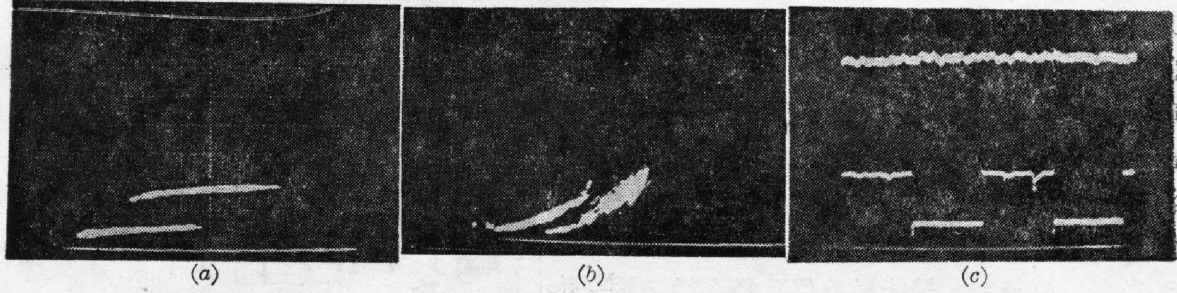


Fig. 8

(a) Usual hysteresis of 1st BOD; (b) Complementary hysteresis of 1st BOD;
(c) Experiment of flip-flop operation

器, 开关速度也从KDP 晶体调制器情况下的 50 ms 提高到现在的 0.5 ms。实验中, 由于我们只用简单光脉冲化的机械装置, 对光电二极管的响应速度并未提出要求。所以如果进一步压缩输入光脉冲的宽度, 提高光电接收器和放大器的响应速度, 可以获得更高速度的开关动作。

四、结 论

使用在集成光路中串联的两个 Ti 扩散 LiNbO_3 交叉型波导调制器制成光 T 触发器, 并获得 0.5 ms 的开关速度。如果进一步压缩输入光脉冲的宽度, 提高光电接收器和放大器的响应速度, 可以获得更高速度的开关动作。

旭冈佳美, 田原雅史同学参加了该项工作的实验。

参 考 文 献

- [1] K. Okumura *et al.*; *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**, No. 4 (Apr), 377.
- [2] M. T. Fatehi *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 13 (Jul), 2163.
- [3] S. Umegaki *et al.*; *Digest 13th Congress ICO*, (Sapporo, Japan, 1984 Aug.), p. 446.

Optical flip-flop made by LiNbO_3 intersection waveguide

MING HAI

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei)

SHINSUKE UMEGAKI AND SHUN-ICHI TANAKA

(University of Tokyo, Japan)

(Received 14 May 1987; revised 26 July 1987)

Abstract

An optical triggered flip-flop is demonstrated using two hybrid bistable optical devices consisting of series connection LiNbO_3 intersection waveguide in intergrated optical circuit. The experimental result is given.

Key words: intersection waveguide; optical T triggered flip-flop; hybrid bistable optical devices