

# 用光电混合双稳态回路构成的 光学多值逻辑门

刘树田 吴 杰 李淳飞  
(哈尔滨工业大学应用物理系, 150006)

**摘要:** 利用双稳态激光二极管(BILD)或双稳态发光二极管(BILED)回路首次得到了光学多值逻辑。实验上演示了补、与、或、循环和阈等基本的三值逻辑函数,并给出了三路选择开关线路的设计。

**关键词:** 光学多值逻辑,光电混合双稳态回路

## Multiple-valued optical logic implementation via opto-electronic bistable circuits

*Liu Shutian, Wu Jie, Li Chunfei*

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin)

**Abstract:** Multiple-valued optical logic implementation have firstly been demonstrated by using bistable laser diode (BILD) or bistable light emitting diode (BILED) circuits. Experimental results have demonstrated the basic ternary logic functions: complement, minimum, maximum, cycle and literals. A circuit design of ternary  $T$ -gate or triplexer has also been proposed.

**Key words:** multiple-valued optical logic, optoelectronic hybrid bistable circuit

光电混合的光电子逻辑回路近年来日益受到人们的重视<sup>[1~3]</sup>。本文提出一种用组合型混合光学双稳态(BILED)回路构成光学多值逻辑的方法。实验得到了三值逻辑 POST 代数中的五种基本逻辑运算,即补(COMPLEMENT)、与(MINIMUM)、或(MAXIMUM)、循环(CYCLE)和阈(LITERALS)。并给出了三值  $T$  门即多路选择开关(MULTIPLEXER)的设计。

与二进制逻辑相比,多值逻辑的逻辑变量载有更多的信息量。因而用多值逻辑门完成逻辑运算可节省所需的逻辑门及联接线的数量<sup>[4]</sup>。正如布尔代数作为二进制逻辑运算的理论基础一样,多值逻辑也有相应理论框架,其中 POST 代数是常用的一种。考虑基数为  $R=3$  即三值逻辑时的情形,其逻辑变量  $x \in \{0, 1, 2\}$ 。三值逻辑 POST 代数中的几个基本逻辑(基数  $R=3$ )如下:

补:  
与:  
或:  
循环:  
阈:

$$\bar{x} = 2 - x,$$

$$\text{Min}(x, y) = x, \text{ 若 } x \leq y,$$

$$\text{Max}(x, y) = x, \text{ 若 } x \geq y,$$

$$\text{Suc}(x) = x + 1, \text{ (mod 3)}$$

$$a x^{nb} = \begin{cases} 2 & \text{若 } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

多路选择开关或  $T$  运算:

$$T(x, y, z; K) = \begin{cases} x & \text{若 } K = 0 \\ y & \text{若 } K = 1 \\ z & \text{若 } K = 2 \end{cases}$$

其中, 补、与、或逻辑运算基本上等价于二进制逻辑的非、与、或运算。循环逻辑可实现逻辑变量的状态间转换。阈逻辑给出了逻辑变量处在不同状态时的状态函数, 如果  $a = b = K$ , 则阈逻辑给出了  $x$  处于 0, 1, 2 时状态函数  $J_0(x), J_1(x), J_2(x)$ 。而  $T$  运算则可实现控制变量  $K$  取不同值时不同变量的选择输出。

考虑实现多值逻辑, 必须考虑如下两个问题: (1) 能否存在单元元件能够对多值输入作出多值输出的响应; (2) 单元元件能否方便地相互联接。光电子逻辑回路中元件间相互联接是方便的, 我们用由两个 BILED 回路并联构成的三稳态回路作为光电子学三值逻辑设计的单元元件, 见图 1(a)。图中 LED 为 GaAsP 红光发光二极管, PD 为硅光电三极管 3DU32,  $T$  为晶体管。  $f_1$  和  $f_2$  分别为两个双稳态回路的光反馈系数。输出的幅值由偏压  $V$  和电阻  $R_s, R_i (i=1, 2)$  来控制。BILED<sub>1</sub> 和 BILED<sub>2</sub> 的开启阈值分别由电阻  $R_{i1}$  和  $R_{i2}$  来控制。如  $R_{i1} > R_{i2}$ , 则  $P_{on1} < P_{on2}$ , 其中  $P_{on1}$  和  $P_{on2}$  分别为 BILED<sub>1</sub> 和 BILED<sub>2</sub> 的开启阈值。由于电路的分流而形成的两个电流饱和状态随着 BILED<sub>1</sub> 和 BILED<sub>2</sub> 在不同阈值下的开启而形成输出的三稳态, 见图 1(b)。

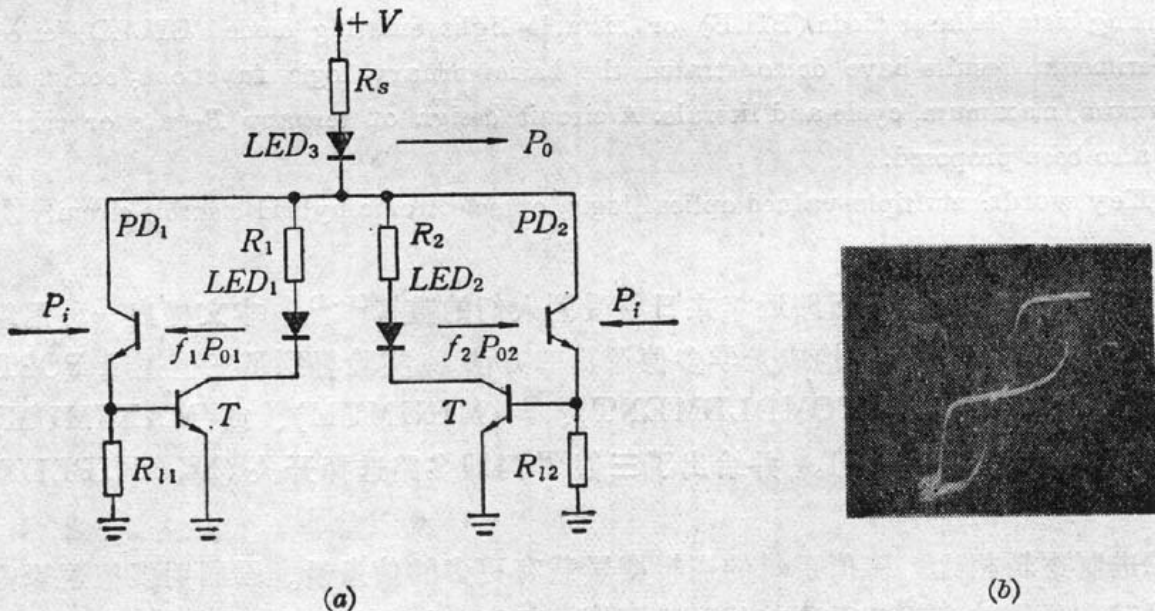


Fig. 1 (a) Schematic diagram of a tristable circuit or a photo-current mirror; (b) Output-input characteristic loop

若三稳态值分别定义为 0, 1, 2, 而且开启阈值满足如下条件

$$\begin{aligned} 0 < P_{on1} < 1 \\ 1 < P_{on2} < 2 \end{aligned} \tag{1}$$

则该回路能对一个三值信号输入作出三值输出的响应,并能给予精确地复制。这与电子学中, $I^2L$ 多值逻辑设计中基本单元电流镜(current mirror)相似,我们称图1(a)所示的三稳态回路为光电流镜(light-current mirror)。光电流镜线路在光学三值逻辑门的构成中起到决定性的作用,近乎所有的三值逻辑门都用到了光电流镜线路。下面讨论光学三值逻辑门的构成和部分实验结果。

### 1. 补门

图2(a)为三值补门的线路图,由一个光电流镜和一个发光二极管 $LED_3$ 并联构成。由于 $LED_3$ 的输出与光电流镜的输出特性相反,因而输出 $P_0$ 随一个三角波输入 $P_i$ 呈现向下的三稳态。当三值信号 $x=0$ 时,光电流镜不能开启,所有的电流将流经 $LED_3$ ,从而输出 $P_0=2$ ;当 $x=1$ ,只有一部分电流流经光电流镜,输出 $P_0=1$ ;而当 $x=2$ 时,所有的电流都流经光电流镜,故使得 $P_0=0$ ,图2(b)给出了输入输出波形。

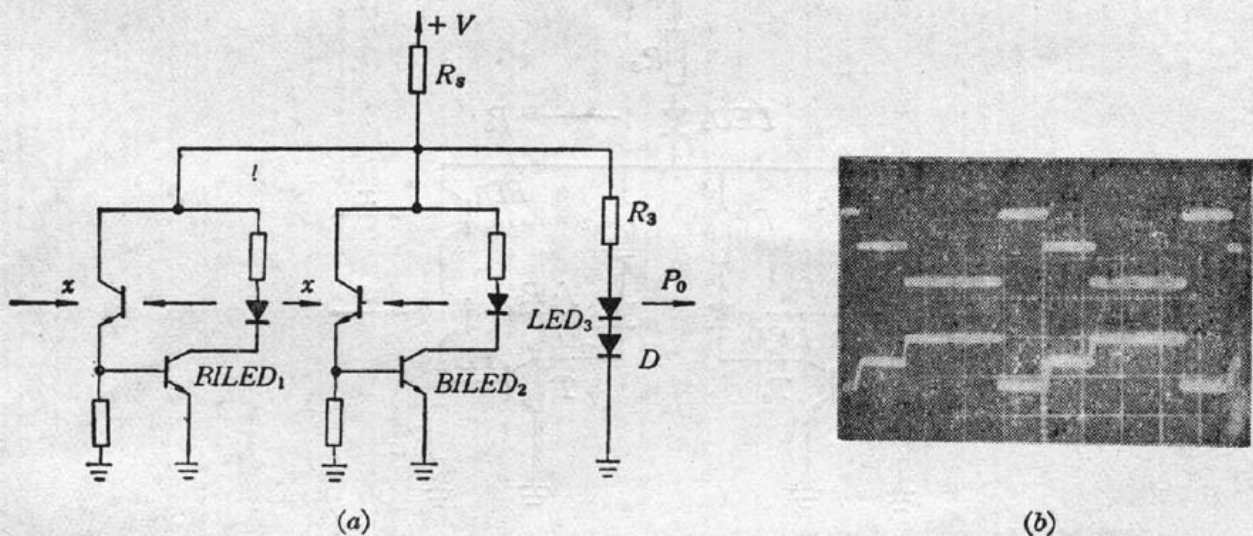


Fig. 2 (a) Schematic diagram of a ternary complement gate; (b) Input and output waveforms

幅值为1和2时光输入输出由流经LED的电流表示,分别为9.5 mA和19.0 mA。在 $P_0=0$ 时,由于加入了钳位二极管D从而使得 $LED_3$ 的光输出基本为0,此时流经 $LED_3$ 的电流为0.8 mA。

### 2. 与门

三值与门由两个光电流镜线路构成,见图3(a)。其中 $BILED_1$ 和 $BILED_3$ 、 $BILED_2$ 和 $BILED_4$ 分别构成两个光电流镜。而 $BILED_1$ 和 $BILED_2$ 、 $BILED_3$ 和 $BILED_4$ 又分别串联在一起。调节电阻 $R_{i1}(i=1, 2, 3, 4)$ 使得双稳回路的开启阈值满足条件:

$$\begin{aligned} 0 < P_{on1} = P_{on2} < 1 \\ 1 < P_{on3} = P_{on4} < 2 \end{aligned} \quad (2)$$

此时, $BILED_1$ 与 $BILED_2$ 、 $BILED_3$ 与 $BILED_4$ 分别构成了两个单元,分别受 $x$ 和 $y$ 两个信号同时控制。在输入为1和2时分别同时开启。如果 $x$ 、 $y$ 都为1, $BILED_1$ 和 $BILED_2$ 同时开启,其输出 $P_0=1$ ;如果 $x$ 和 $y$ 都为2,则 $BILED_3$ 与 $BILED_4$ 也开启,从而使输出 $P_0=2$ 。以上操作的结果完成了求 $x$ 、 $y$ 的最小值运算。图3(b)给出了实验结果。

实际上,三值与门可由一个改进的光电流镜来完成,因而其结构更为简单,见图4。图中

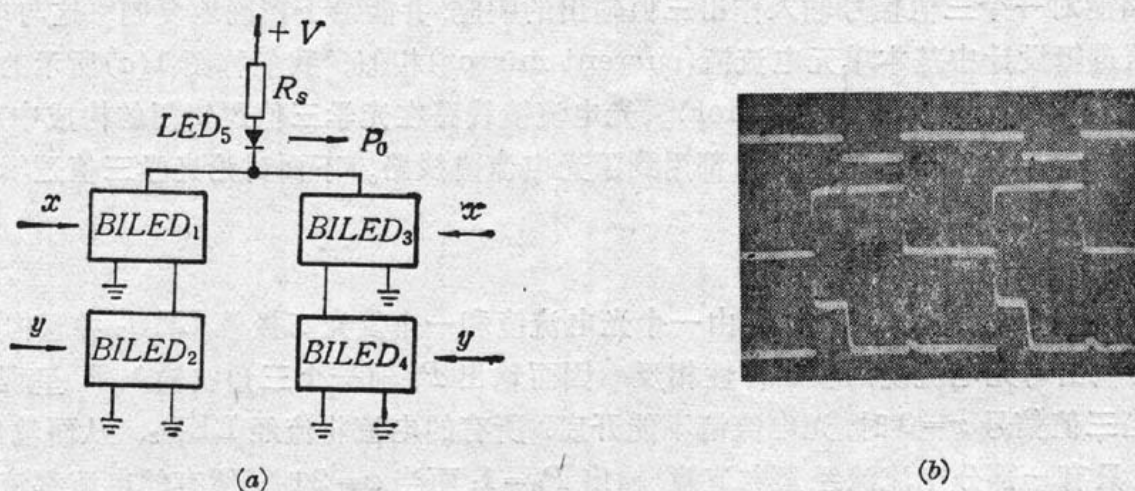


Fig. 3 (a) Block diagram of a ternary minimum gate; (b) Experimental results

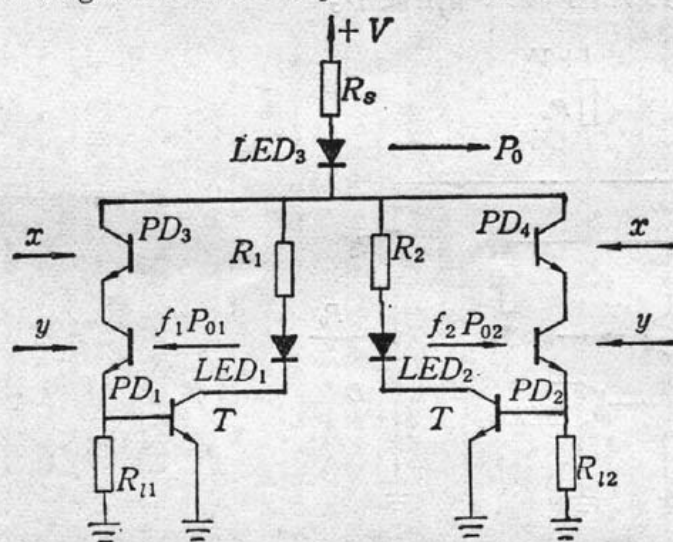


Fig. 4 Circuit diagram of the improved ternary minimum gate

我们在两个 BILED 的输入端又串联上两个光电三极管  $PD_3$  和  $PD_4$ 。因为两个串联的光电三极管的光电流只饱和于最小的输入光强, 因而只要满足条件(1), 一个光电流镜即可完成三值与门操作。

3. 或门

图 5(a) 给出了由两个并联的光电流镜构成的三值或门的线路简图。光电流镜的构成与

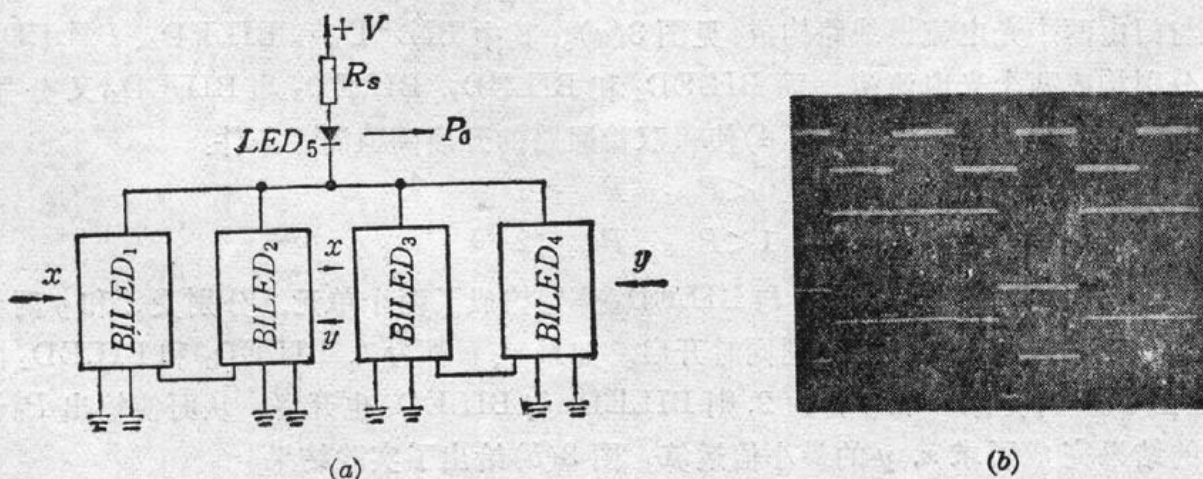


Fig. 5 (a) Block diagram of a ternary maximum gate; (b) Experimental results

上述相同,同时  $LED_1$  与  $LED_2$ 、 $LED_3$  与  $LED_4$  又分别并联在一起。因而  $BILED_1$  和  $BILED_2$ 、 $BILED_3$  与  $BILED_4$  分别构成了两个单元,分别完成幅值大于或等于 1 的或运算和幅值等于 2 的或运算。即一旦  $BILED_1$  开启,由于光反馈的存在  $BILED_2$  也随之开启。 $BILED_3$  和  $BILED_4$  的动作与  $BILED_1$  和  $BILED_2$  相同。若两个光电流镜满足条件(2),则当  $x=1$  或  $y=1$ ,只有  $BILED_1$  和  $BILED_2$  开启,输出  $P_0=1$ ;而当  $x$  或  $y=2$  时,所有的  $BILED$  均开启,输出  $P_0=2$ 。图 5(b)给出了实验结果。

#### 4. 循环门

图 6(a)为向右移一位的循环门的线路简图。由  $BILED_1$  和  $BILED_2$  构成的光电流镜与另外一个  $BILED_3$  并联,一个三值光信号  $x$  和一个幅值为 1 的维持光同时输入,  $BILED_3$  的开启阈值满足如下条件:

$$2 < P_{on3} < 3 \quad (3)$$

因而在光电流连续两次上跳到 2 之后,  $BILED_3$  的开启使得电流从光电流镜中全部分出流经  $BILED_3$ (如果  $BILED_3$  的电阻相对光电流镜充分小)。图 6(b)为向右循环一位的实验结果。输入信号为  $x=(210)$ ,输出  $P_0=(021)$ 。

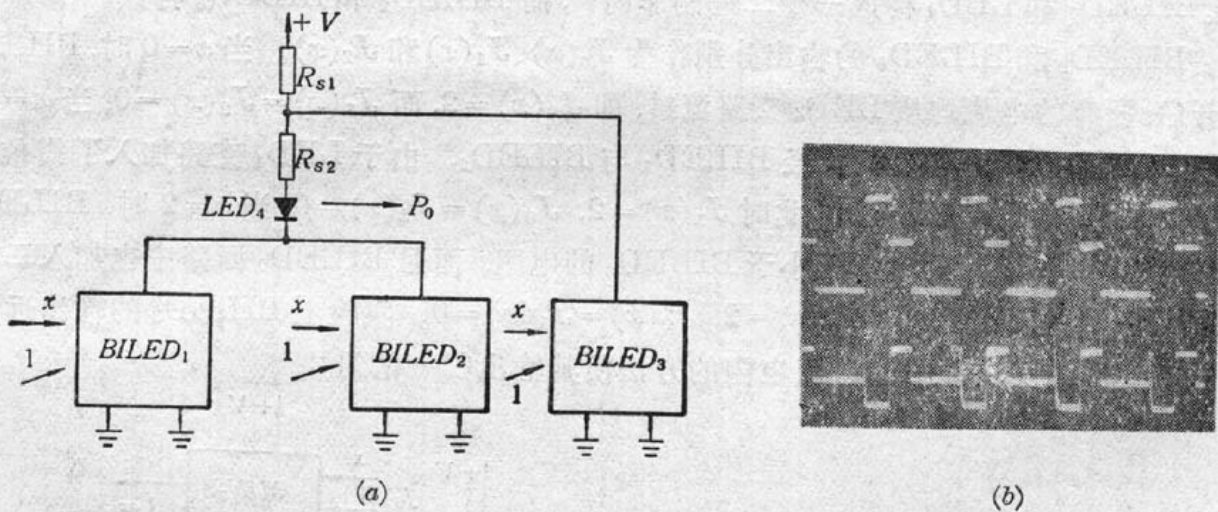


Fig. 6 Schematic diagram of a one-step-right cycle gate

信号  $x$  也可以向左环循一位,即  $0 \rightarrow 2$ ,  $1 \rightarrow 0$ ,  $2 \rightarrow 1$ 。根据定义可知向左循环一位与向右循环两位是等效的,故可通过图 6(a)所示的循环门两次来完成向左循环。但也可以由一个向右循环一位的循环门来完成。图 7(a)为该循环门的简图,在光电流镜中加入另一个  $BILED_4$  回路,同时外部维持光幅值改为 2。 $BILED_4$  的开启阈值满足条件

$$3 < P_{on4} < 4 \quad (4)$$

因而在  $BILED_4$  开启之后,又有一部分电流流经光电流镜,使得  $P_0=1$ 。操作的最终结果实现了  $x$  向左循环一位的运算。

应该指出,如果维持光 2 由另外一个信号  $y$  取代,则图 7 所示线路同时也是一个不带进位信号的加法器。当  $x+y \leq 2$  时,光电流镜的输出直接给出其相加的结果;当  $x=1$ ,  $y=2$  或  $x=2$ ,  $y=1$  时,  $BILED_3$  开启,输出  $P_0=0$ ;当  $x=y=2$  时,  $BILED_4$  开启,从而又使输出  $P_0$  为 1。因而实现了  $x$  与  $y$  的算术相加。注意到  $BILED_4$  开启时并未将  $BILED_3$  的输出减小到 0,因而  $BILED_3$  的输出  $P_{03}$  可作为输入信号输入到另外一个  $BILED$  回路,而该回路的阈值很小,并其输出幅值为 1,因此它可以作为进位输出,这样便构成了一个一位三值半加器,

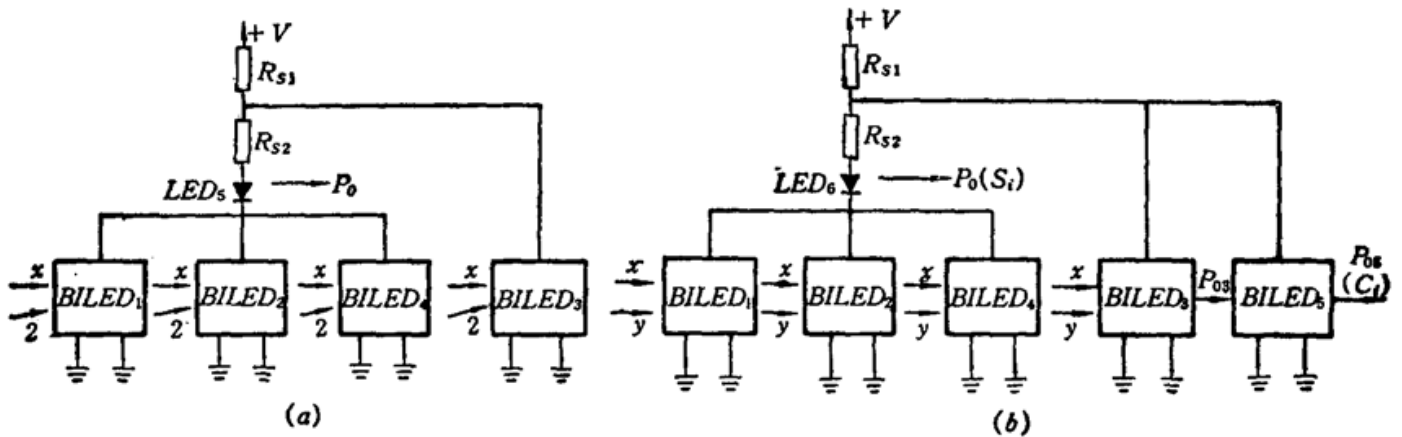


Fig. 7 (a) Block diagram of a one-step-left cycle gate; (b) Circuit design of a ternary half-adder

见图 7(b)。

5. 阈 门

符号函数  $J_0(x)$ 、 $J_1(x)$  和  $J_2(x)$  可由用 BILED 回路构成的二进制非门和异或门并联产生, 见图 8。BILED<sub>1</sub> 和 LED<sub>4</sub> 构成一个二进制非门<sup>[5]</sup>, 而 BILED<sub>2</sub> 和 BILED<sub>3</sub> 构成一个异或门。LED<sub>4</sub>、BILED<sub>2</sub> 和 BILED<sub>3</sub> 的输出分别作为  $J_0(x)$ 、 $J_1(x)$  和  $J_2(x)$ 。当  $x=0$  时, BILED 线路均未开启, 所有的电流均从 LED<sub>4</sub> 支路流过, 即  $J_0(x)=2$ , 而  $J_1(x)=J_2(x)=0$ ; 当  $x=1$ , BILED<sub>1</sub> 和 BILED<sub>2</sub> 都开启, 电流流经 BILED<sub>1</sub> 与 BILED<sub>2</sub>, 由于 LED<sub>4</sub> 支路加入了钳位二极管, 故使得 LED<sub>4</sub> 的输出减小到 0; 此时  $J_1(x)=2$ ,  $J_0(x)=J_2(x)=0$ ; 当  $x=2$  时, BILED 也随之开启, 由于 BILED<sub>3</sub> 的电阻远小于 BILED<sub>2</sub> 的电阻, 而且 BILED<sub>2</sub> 回路中也加入二极管钳位, 使得  $J_1(x)$  关闭到 0, 即  $J_2(x)=2$ ,  $J_0(x)=J_1(x)=0$ 。实验上 BILED<sub>3</sub> 的输出远大于 2, 这可由在 LED<sub>3</sub> 旁并联一个分流电阻的方法使其输出归一化到 2。

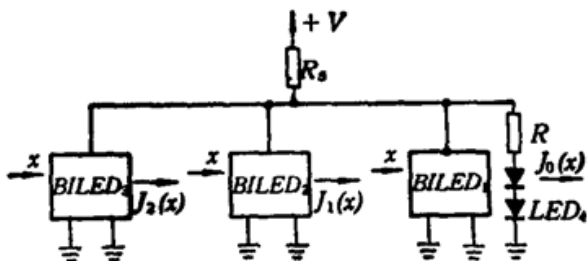


Fig. 8 Block diagram of literals gate

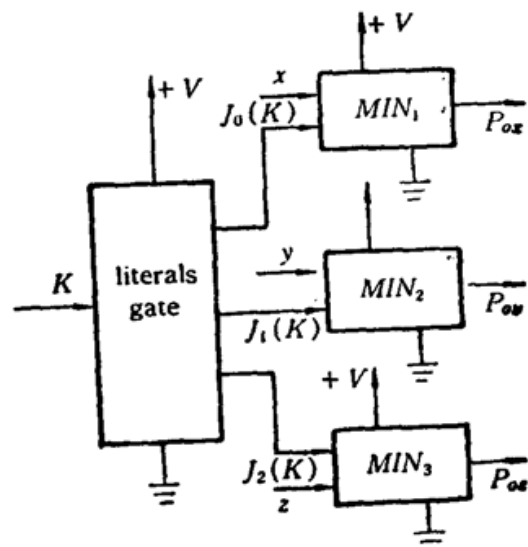


Fig. 9 Block circuit of a multiplexer or T-gate

6. T 门

我们可将 T 运算的定义重新表述为

$$T(x, y, z; K) = \text{Min}(J_0(K), x) + \text{Min}(J_1(K), y) + \text{Min}(J_2(K), z) \quad (5)$$

因此三值 T 门可由一个阈逻辑门和三个与门构成。图 9 为一个 T 门的线路框图。控制变量 (下转第701页)

$$\Delta = \frac{h_{auto} - h_{cross}}{h_{auto}} \times 100\% \quad (14)$$

式中  $h_{auto}$  和  $h_{cross}$  分别代表自相关峰的高度和互相关峰的高度。实验中用  $256 \times 256$  点的快速傅里叶变换处理  $128 \times 128$  点的二维图像(英文字母)。对于未经微分预处理的情形,“O”和“O”的鉴别力为  $\Delta=1.2\%$ ,“O”和“T”的鉴别力为  $\Delta=21.0\%$ 。而对于经微分预处理的情形,“O”和“O”的鉴别力为  $\Delta=12.6\%$ ,“O”和“T”的鉴别力为  $\Delta=48.5\%$ 。可见,鉴别力有很大的改善,并且二图像的差别越小(如“O”和“O”),鉴别力的改善就越明显。表 1 给出了计算机模拟实验的具体数据,其中相关峰高度的数据是经过归一化的。

**Table 1 correlation discrimination with original images and correlation images respectively**

Input image	correlation	correlation peak weight	discriminating force
Original image O and C	$O \otimes O$	1.000	1.2
	$O \otimes C$	0.988	
Differential image O' and C'	$O' \otimes O'$	0.719	12.6
	$O' \otimes C'$	0.627	
Original image O and T	$O \otimes O$	1.000	21.0
	$O \otimes T$	0.790	
Differential image O' and T'	$O' \otimes O'$	0.719	48.5
	$O' \otimes T'$	0.370	

### 参 考 文 献

- 1 G. G. Mu *et al.*, *Optik*, **75**(3), 97 (1987)
- 2 G. G. Mu. *et al.*, *Optik*, **76** (4), 139 (1987)
- 3 G. G. Mu *et al.*, *Opt. Lett.*, **13**(6), 434 (1988)
- 4 王肇圻,中国激光,**14** (11), 658 (1987)
- 5 秦秀香,光学技术,(6), 14(1981)

(上接第 696 页)

$K$ 通过一个阀门给出  $3K$  的三个符号函数  $J_0(K)$ 、 $J_1(K)$ 和  $J_2(K)$ ,而这三个符号函数和三个信号  $x$ 、 $y$ 和  $z$ 分别通过三个与门。根据  $K$ 的不同状态,有不同的变量输出。三值与门可用如图 4 所示的简化与门线路。

### 参 考 文 献

- 1 N. Bar-Chaim, K. Y. Lau *et al.*, *Proc. Soc. Photo. Opt. Inst. Eng.*, **466**, 65 (1984)
- 2 H. D. Law., *Proc. Soc. Photo. Opt. Inst. Eng.*, **466**, 69 (1984)
- 3 K. Okumura, Y. Ogawa *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*; **QE-21**, 377 (1985)
- 4 S. Fukushima, T. Kurokawa *Opt. Lett.*, **12**, 965 (1987)
- 5 K. Okumura, Y. Ogawa *et al.*, *Opt. Lett.*, **9**, 515 (1984)