

可编程实时光电混合阈值逻辑处理器

刘树田 吴杰 李淳飞

(哈尔滨工业大学应用物理系, 150006)

摘要: 提出一种可编程实时光电混合阈值逻辑处理器, 讨论了该处理器在数字光计算及光信息处理中的应用。

关键词: 阈值逻辑, 光计算, 光电混合逻辑回路

Programmable real-time optoelectronic hybrid threshold logic processor

Liu Shutian, Wu Jie, Li Chunfei

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

Abstract: A programmable real-time optoelectronic hybrid threshold logic processor is presented and the applications to digital optical computing and optical signal processing are discussed.

Key words: threshold logic, optical computing, optoelectronic hybrid logic circuit

一、引言

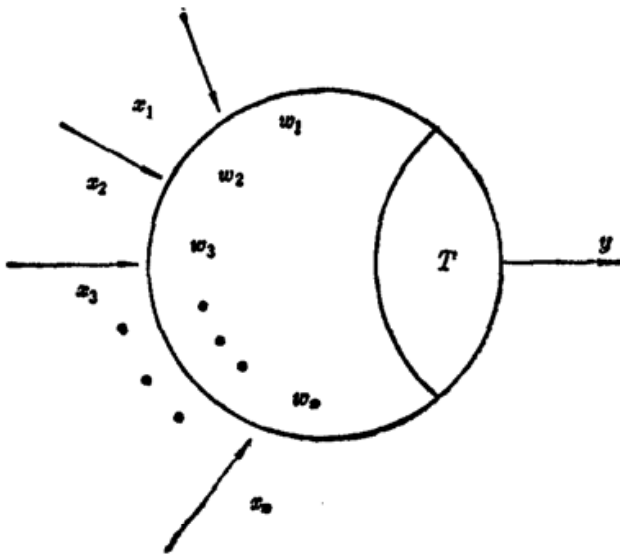
在光计算研究中, 模拟人脑神经逻辑处理过程的光学神经网络最为引人注目^[1]。由于人脑的逻辑处理具有高度并行、模糊、多值、加权、取阈、反馈等诸多特点, 所以十分必要探索用光学方法实现比二进制基元逻辑(vertex primitives)具有更强功能的逻辑, 如模糊逻辑、多值逻辑、二进制及多值阈值逻辑。近年来, 人们已在不同的光学系统中实现了光学多值逻辑运算^[2~4]。虽然 Arrathoon 等人曾经建议用波导的方法实现光学阈值逻辑^[5], 但迄今为止仍很少有简单的实现光学阈值逻辑的方法。本文首次提出一种利用发光二极管(LED)和光电三极管(PD)构成的光电混合阈值逻辑处理器。该处理器可由光信号进行可编程实时的控制, 并能得到两种加权值和阈值, 即权重和阈值均可正可负。故该逻辑处理器本身构成了一个逻辑完备集。这种逻辑处理器结构简单, 可靠性好, 更重要的是它与现今大规模集成化的电子学相容, 可以直接在 GaAs 基片或 GaAs/Si 基片上进行光电子-微电子混合集成, 因而有希望应用于光计算及数字光信息处理中。

二、光电混合阈值逻辑处理器

图 1 所示是一个阈值逻辑门的示意图。它有 n 个二进制输入变量 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 每

个变量都伴随着一个相关的权重 $w_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。输出 y 与一个期望的阈值 T 有着如下的关系^[3]：

$$y = \begin{cases} 1, & \text{当 } \sum_{i=1}^n w_i x_i \geq T, \\ 0, & \text{当 } \sum_{i=1}^n w_i x_i < T. \end{cases} \quad (1)$$



即仅当输入变量的加权和大于或等于阈值时，输出 y 为 1，否则为 0。如果一个开关函数 $f(x)$ 是一个阈值逻辑函数，即可由单个阈值逻辑门产生，那么总可以找到一个权重-阈值集 $\{w_1, w_2, \dots, w_n; T\}$ 使其满足 (1) 式。数学上，如果 $\{w_i, T\}$ 取值于整个实整数集，则一个阈值逻辑门便构成了一个逻辑完备集，即所有的逻辑函数均可由有限个阈值门来完成。加之阈值逻辑门具有比二进制基元逻辑门更大的输入量，因而可以大大节省逻辑单元的数量和传输线。

Fig. 1 Schematic diagram of threshold gate

图 2(a) 为一个光电混合阈值逻辑处理器的

回路^[4]的变形。在实验中我们将光反馈去掉，以加快逻辑门的响应速度。发光二极管的输出作为逻辑门的输出 y 。每个加权输入端都含有 4 个硅光电三极管串联，其中两个为输入变量的输入端，而另外两个为权重信号的输入端。每个权重 w_i 都分别分成两部分： w_i^+ 和 w_i^- 。当 x_i 为正加权时， $w_i = w_i^+$ 而 $w_i^- = 0$ ；如果 x_i 是负加权的，则 $w_i = -w_i^-$ 而 $w_i^+ = 0$ 。阈值 T 也由两个相互串联的光电三极管来控制，同样具有正负两值。改变权重和阈值信号的光强便可以得到不同的权重和阈值。从而可以对该阈值逻辑处理器进行实时的可编程控制。

图 2(a) 为一个光电混合阈值逻辑处理器的线路图。它实际上是一个双稳态发光二极管回路^[4]的变形。在实验中我们将光反馈去掉，以加快逻辑门的响应速度。发光二极管的输出作为逻辑门的输出 y 。每个加权输入端都含有 4 个硅光电三极管串联，其中两个为输入变量的输入端，而另外两个为权重信号的输入端。每个权重 w_i 都分别分成两部分： w_i^+ 和 w_i^- 。当 x_i 为正加权时， $w_i = w_i^+$ 而 $w_i^- = 0$ ；如果 x_i 是负加权的，则 $w_i = -w_i^-$ 而 $w_i^+ = 0$ 。阈值 T 也由两个相互串联的光电三极管来控制，同样具有正负两值。改变权重和阈值信号的光强便可以得到不同的权重和阈值。从而可以对该阈值逻辑处理器进行实时的可编程控制。

为了说明该逻辑处理器是如何实现加权与取阈的，我们以只有 x_i 一个变量输入时为例。见图 2(b)。输入 x_i 入射到 PD_i^+ 和 PD_i^- 上，而权重控制信号 w_i^+ 和 w_i^- 分别入射到 $PD_{w_i}^+$ 和 $PD_{w_i}^-$ 上。电流强度 I_{di} 可以写成

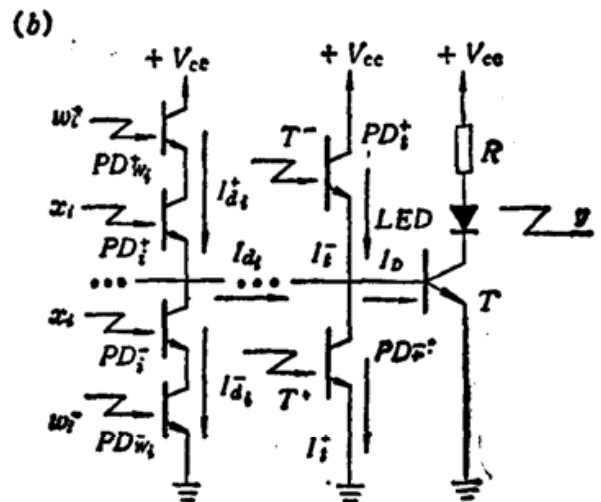
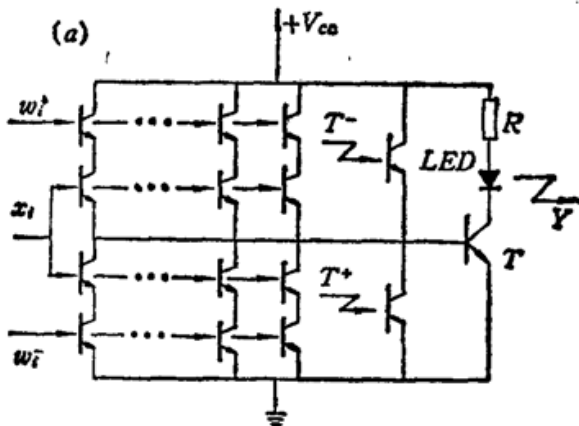


Fig. 2 (a) Circuit of optoelectronic threshold logic processor; (b) A part of the circuit of Fig. 2 (a) which only consists of input x_i

$$I_{di} = I_{di}^+ - I_{di}^- \quad (2)$$

假设所有的光电三极管都是相同的,并且工作在线性放大区,则输出光电流 I_d 与输入光强 P_i 成正比,即 $I_{di} = K P_i$,其中 K 为光电转换常数。由于光电三极管 PD_i^+ 与 PD_{wi}^+ (PD_i^- 与 PD_w^-) 是相互串联的,则 I_{di}^+ (I_{di}^-) 仅与信号 x_i 和 w_i^+ (w_i^-) 的光强中最小的一个成正比。即

$$I_{di}^\pm = K \min(P(x_i), P(w_i^\pm)) \quad (3)$$

其中 $\min(x)$ 是最小值函数, $P(x_i)$, $P(w_i^\pm)$ 分别是 x_i , w_i^\pm 的光强度。我们实现加权与取阈值的方法不同于将逻辑变量的幅值倍乘一个因子 w_i 。从式(3)中我们看出,若 $P(w_i^\pm)$ 远小于 $x_i=1$ 时的光强幅值,则在 $x_i=1$ 时 I_{di}^\pm 仅与 $P(w_i^\pm)$ 有关,即有如下表达式:

$$I_{di}^\pm = \begin{cases} K P(w_i^\pm), & \text{对 } x_i=1 \\ 0, & \text{对 } x_i=0 \end{cases} \quad (4)$$

因而在 $P(x_i)|_{x_i=1} \gg P(w_i^\pm)|_{w_i^\pm=1}$, 我们可以令 $P(x_i)|_{x_i=1} = q P(w_i^\pm)|_{w_i^\pm=1}$, 即将 $x_i=1$ 时的光强幅值分成 q 等份。如果 x_i 的加权值为 $\pm r$ ($1 \leq r \leq q$), 则 $P(w_i^\pm) = r P(w_i^\pm)|_{w_i^\pm=1}$ 。例如在 $x_i=1$ 时, $P(x_i) = 50 \mu\text{W}$, 而在 $w_i^\pm=1$ 时, $P(w_i^\pm) = 5 \mu\text{W}$, 则 $q=10$ 。如果需要对 x_i 取加权值为 5, 则 w_i^\pm 信号的光强度便为 $25 \mu\text{W}$ 。当然此处 q 的数值可以任意选择,但要求 $P(w_i^\pm)|_{w_i^\pm=1}$ 要大于三极管的饱和阈值光强。一般地这一饱和阈值非常小,约为 $0.5 \mu\text{W}$, 因而权重值可以在很大的范围内选择。

设图 2(a) 中有 m 个正加权输入和 $n-m$ 个负加权输入,那么,经过取阈值之后的电流为

$$I_d = \sum_i^m K \min\{P(x_i), P(w_i^+)\} - \sum_{j \neq i}^{n-m} K \min\{P(x_j), P(w_j^-)\} \pm K P(T) \quad (5)$$

这里 $\pm K P(T)$ 取负值时, $T = T^+$, 取正值时, $T = -T^-$ 。考虑到如上所述最小饱和阈值光强的影响, 阈值光信号的强度 $P(T)$ 可修正为 $P(T^+) = P(T) - 0.5 \mu\text{W}$, $P(T^-) = P(T) + 0.5 \mu\text{W}$ 。这实际上相当于在 PD_i^- 上加入 $P(H) \approx 0.5 \mu\text{W}$ 的恒定维持光信号 H 以克服饱和阈值光强。此时阈值逻辑输出为 $y=1$, 而且仅当 $I_d \geq 0$ 。选择不同的权重和阈值, 可以得到多种逻辑函数。

图 3(a)~(f) 是输入变量数 $n=3$ 时的实验结果。实验中输入信号由三个直接被信号发生器产生的三个同步方波电压信号驱动的发光二极管提供。其峰值电压为 10 V, 限流电阻为 220

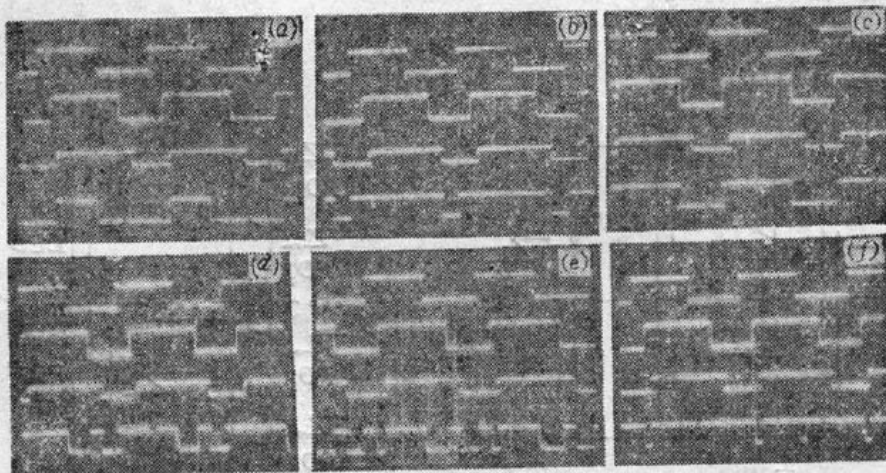


Fig. 3. Experimental results for input variables number $n=3$, the upper three waveforms indicate x_1 , x_2 and x_3 , respectively; the bottom waveform shows the output Y
 (a) AND; (b) OR; (c) MAJORITY; (d) $f(x) = x_1 + \bar{x}_2 x_3$; (e) $f(x) = x_1 x_3 + \bar{x}_2 (x_1 + x_3)$;
 (f) $f(x) = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + x_3$

Ω 。加权信号 w_i^{\pm} 和阈值 T 也由发光二极管提供。通过切换开关和改变可变电阻来改变其正负和幅值。驱动源电压与主回路同为 $V_{cc}=4.5\text{V}$ 。对应于 $w_i=1$ 和 2 时的串联电阻分别为 $1.2\text{k}\Omega$ 和 600Ω 。图 3(a), (b) 是 $w_i=1$ 时分别取 $T=1$ 和 3 时所得到的与、或逻辑。图 3(c) 为 $w_i=1$ 而 $T=2$ 时得到的“多数表决”(MAJORITY) 逻辑, 当 x_1, x_2, x_3 中有两个以上为 1

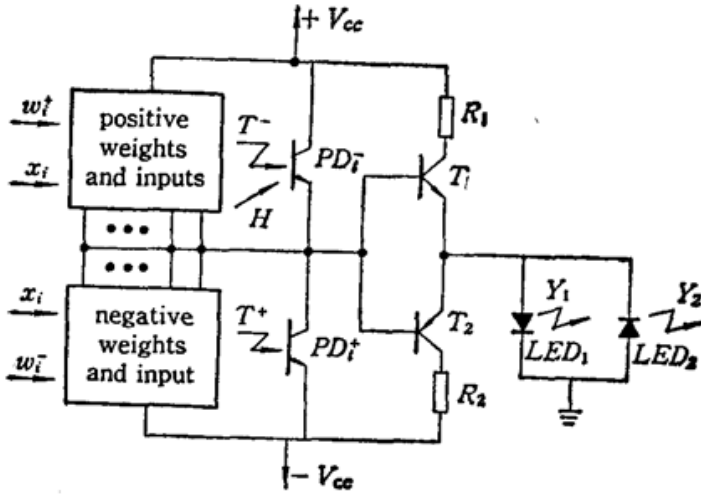


Fig. 4 Schematic diagram of threshold logic processor with double output Y_1 and Y_2 , where $Y_1=f(x)$ and $Y_2=\bar{f}(x)$

时, 输出为 1 。同样 $w_i=-1$ 而 $T=-2$ 时, 我们也得到了“少数表决”(MINORITY) 逻辑。显然, 只有在输入权重不同时, 才能得到更丰富的逻辑函数。如对于权重-阈集 $\{2, -1, 1; 1\}$ 可产生 $f(x)=x_1+\bar{x}_2x_3$; 对于 $\{1, -1, 1; 1\}$ 可产生 $f(x)=x_1x_3+\bar{x}_2(x_1+x_3)$; 而对于 $\{-1, -1, 1; -1\}$ 则可产生 $f(x)=\bar{x}_1+\bar{x}_2+x_3$ 。见图 3(d)~(f)。以上的实验结果仅是一个单个阈值逻辑门能得到的逻辑函数中的一小部分。应该指出图 3(a)~(f) 中三个输入信号的组合仅给出所有 8 种组合中的 6 种, $(0, 1, 0)$ 和 $(1, 0, 1)$ 两种组合方式没有包含在内。但

输入信号这种排列方式却是能给出所有组合情况最多的一种, 因而可以认为图 3(a)~(f) 的结果直接反映了逻辑运算真值表。

一个阈值逻辑门可以具有多个二进制输出 y_1, y_2, \dots, y_m , 在权重相同的情况下, 每个输出端给出不同的阈值。这需要将输入的加权和复制成 m 份, 在加阈值时要求互不影响。图 4 的回路是一个具有两个输出的特例。它有两个放大三极管, 其输出特性恰好相反, 一个为 NPN 三极管 T_1 , 而另外一个为 PNP 三极管 T_2 。用两个发光二极管 LED_1 和 LED_2 作为其输出端。 $-V_{cc}$ 为负偏压。对于 LED_2 的输出, 只有在负的权重输入和大于负阈值时才能有为 1 的结果。原理上, 当 $\sum_{i=1}^n w_i x_i = T$ 时, 两路输出 y_1, y_2 都应为 1 , 此时若输出 y_1 对应的权重-阈集为 $\{w_1, w_2, \dots, w_n; T\}$, 则对应于 y_2 的权重-阈集应为 $\{-w_1, -w_2, \dots, -w_n; -T\}$ 。但由于三极管 T_1, T_2 的截止特性, 而又不能同时对一个阈值加以修正, 即只能在 T^- 或 T^+ 输入端加以修正 H 。故简单地, y_1 与 y_2 的输出存在着互为相反的结果, 即 $y_1 = \bar{y}_2$ 。如果将阈值偏置的 H 维持光去掉, 则还要存在 $y_1 = y_2 = 0$ 的状态。我们在讨论中还要分析这种结构的逻辑器件的应用。

三、讨 论

阈值逻辑不仅是实现多变量布尔代数中逻辑函数的有效方法, 而且它对于数字图像处理、模式识别、模糊函数的分类以及神经网络等等都有着广泛的应用。目前的光学神经网络模型, 如 Hopfield 模型^[7], 所依赖的实质上是阈值逻辑。所有各个神经元之间互相加权反馈输入并取阈输出, 才能完成简单的联想记忆和学习等功能^[8]。因而阈值逻辑可直接应用于神经网络

络的研究。实际上,图 2(b) 可以看作一个简单的光电混合神经元,它可以使兴奋(EXCITATORY)权重输入与抑制(INHIBITORY)权重输入直接相减,因而该神经元本身具有取阈功能。相比之下,现在的神经网络中取阈所需要的电子器件和电子计算机显得过于复杂。另外,该神经元也可以具有 +1 和 -1 双极二进制输出(BIPOLAR BINARY OUTPUT)(见图 4)。大规模集成化技术和自由空间光互联技术将会使这种神经网络模型更加吸引人。

二维并行逻辑处理也是光计算研究的主要课题之一^[9]。光学阈值逻辑同样有希望应用于该领域。图 4 结构的两个变量输入的阈值逻辑处理器,级联上一个或门便可以完成 16 种布尔逻辑函数。一般讲 y_1 可完成除异或(XOR)和异或非(NXOR)外的 14 种逻辑。如果在图 4 中将阈值偏置去掉,即允许 $y_1=y_2=0$ 的状态存在,输出 y_1 和 y_2 在 $w_1=1, w_2=-1, T=0$ 时分别给出 $x_1 \cdot \bar{x}_2$ 和 $\bar{x}_1 \cdot x_2$ 关系,因而加入一个或门级联之后,或门的输出 $y=y_1+y_2$ 直接给出 XOR 逻辑。同样在 $w_1=w_2=1, T=1$ 时, y 直接给出 NXOR 逻辑。这样的逻辑处理器可以作为二维并行逻辑处理中的一个逻辑单元(PIXEL)。它可以直接由光信号控制实现实时的可编程的空间不变和空间变化(space-invariant and space-variant)的逻辑处理。

参 考 文 献

- 1 Special Issue on Optical Computing, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., Vol. 1, 693(1988)
- 2 R. Arrathoon, S. Kozaitis, *Opt. Eng.*, **25**, 29(1986)
- 3 M. M. Mirsalehi, T. K. Gaylord, in digest of Topical Meeting on Optical Computing, Optical Society of America, Washington, D. C., 1985, WB1
- 4 刘树田, 吴杰, 李淳飞, 中国激光, **18**, 691(1991)
- 5 R. Arrathoon, M. H. Hosson, *Opt. Lett.*, **9**, 143(1984)
- 6 S.C. Lee, *Modern Switching Theory and Digital Design*, Prentice-Hall, Inc., 1978, ch. 4. 115
- 7 J. J. Hopfield, Proc. Natl. Acad. Sci., USA79, 2554(1982)
- 8 D. Psatis, N. Farhat, *Opt. Lett.*, **10**, 98(1985)
- 9 S. Fukushima, T. Kurokawa, *Opt. Lett.*, **12**, 965(1987)