

可编程光学二值双轨逻辑门

张子北 刘立人

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 基于双轨逻辑, 本文提出一种可级联的并行二值逻辑门。所有十六种二值逻辑运算可以采用偏振半波相延编程来实现。也提出了用电光晶体实现实时编程的方法。本文中给出了实验结果。

关键词: 数字光计算, 光逻辑, 双轨逻辑, 并行处理

Programmable optical binary dual-rail logic gate

Zhang Zibei, Liu Liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: Based on the dual-rail logic, a cascadable parallel binary logic gate was proposed. All 16 binary logic operations can be implemented by this gate which can be programmed by halfwave phase retard of polarization. The electrooptical effect is proposed to program the logic function in real time and the experimental results are also presented.

Key words: optical digital computing; optical logic gate; dual-rail logic; parallel processing.

一、引言

与电子学系统相比, 光学系统具有高速和并行处理等优点, 所以, 光计算是一个引人注目的研究领域。对于光学二值计算机, 一个重要的基本问题是构造能实现布尔逻辑操作的并行逻辑门。二值逻辑操作本质上是对信息的一种非线性处理。根据非线性处理方法上的不同, 可将这些方法分作两类: (1)使用非线性光学器件实现逻辑操作; (2)使用非线性空间编码实现逻辑操作。第二类方法的优点是非线性由逻辑单元转移到空间编码, 从而保留了光学系统通讯等诸多优点。过去, 人们提出了许多利用空间编码来实现逻辑操作的系统, 阴影投影系统(Shadow-casting)^[1]和空间滤波系统^[2, 8]是最重要的两种系统。以上两种系统的缺点是逻辑操作输出结果均用光强表示, 与输入具有不同的编码形式, 因此, 很难实现级联。可级联的门对数字光计算具有十分重要的意义^[4], 级联性意味着一个门具有驱动其它相同门的能力。通过连接可级联的逻辑单元, 就可以产生光学逻辑回路。

在我们以前的工作中, 曾经提出一种基于双轨逻辑^[5]编码的多重成像并行逻辑处理系统^[6], 该门的输入、输出能够具有相同的编码形式, 因此, 可以实现级联。本文中, 我们提出一

种新的光学系统，与以上多重成像系统相比，多重成像系统的两个输入均为散射屏，光经第一个散射屏成像到第二个散射屏上，第二个散射屏再成像为输出。由于两次散射，系统的光能损耗很大。而且由于是两级成像系统，结构不够紧凑。本文提出的系统是基于光的分束、合束原理，光能损耗远低于上述系统。如果用组合棱镜结构，我们可以使该系统的结构十分紧凑。通过电光晶体进行偏振调制，我们还可以实现逻辑操作的实时可编程。

二、原 理

系统的结构如图 1 所示。其基本单元为一个半透半反镜和一个全反镜的组合。一束光从半透板方向入射时可被分为两束光。反之，两束光入射可合成一束光。一个逻辑门由四组基本单元构成。逻辑门的输入分别为二维图案 A 和 B 。透过(白)表示逻辑“1”，不透过(黑)表示逻辑“0”。用单色垂直偏振平行光照明由 A 和 \bar{A} 编码的模板。这里，使用双轨制形式对输入进行空间编码。编码后的图案由原变量图案和它的反转图案组合而成。经第一个基本单元的分束，输入 A 和 \bar{A} 被分成四个子图案： A 、 \bar{A} 、 $A\bar{A}$ 和 $\bar{A}\bar{A}$ 。在控制信号平面 1 上，有四个可控半波片 $P_1 \sim P_4$ 分别用来控制四个子图案的偏振状态。根据选择系数 $S_1 \sim S_4$ ，可以设定四个可控半波片 $P_1 \sim P_4$ 的状态。 $S_i = 0$ ， P_i 有半波位相延迟； $S_i = 1$ ， P_i 无位相延迟。用矢量 $P_1 \sim P_4$ 表示通过可控半波片后四个子图案的偏振态，用 i, j 分别表示水平偏振和垂直偏振。考虑到入射光是垂直偏振，如果有半波位相延迟，经可控半波片后光的偏振方向旋转 90° ，变为水平偏振 ($P_i = i$)；如果无位相延迟，则偏振态保持不变 ($P_i = j$)。用 P_1A 、 P_2A 、 $P_3\bar{A}$ 和 $P_4\bar{A}$ 表示四个子图案，经第二个基本单元合束，四个子图案合成两个： $P_1A + P_3\bar{A}$ 和 $P_2A + P_4\bar{A}$ 。两路光分别通过第二个输入模板上的 B 和 \bar{B} 部分，通过模板后，两路光可表示为 $P_1AB + P_3\bar{A}\bar{B}$ 和 $P_2A\bar{B} + P_4\bar{A}B$ 。第三个基本单元将上面两个图案又分成四个： $P_1AB + P_3\bar{A}\bar{B}$ 、 $P_1A\bar{B} + P_3\bar{A}B$ 、 $P_2A\bar{B} + P_4\bar{A}B$ 和 $P_2AB + P_4\bar{A}\bar{B}$ 。控制信号平面 2 上，偏振片 K_1 控制两路光 $P_1AB + P_3\bar{A}\bar{B}$ 、 $P_2A\bar{B} + P_4\bar{A}B$ 的偏振方向，偏振片 K_2 控制另外两路光 $P_1A\bar{B} + P_3\bar{A}B$ 、 $P_2AB + P_4\bar{A}\bar{B}$ 的偏振方向。设 $K_1 = j$ 、 $K_2 = i$ 为偏振片 K_1 、 K_2 相互正交的偏振方向。我们采用偏振矢量表达式，偏振光通过偏振片可用点积形式表达。经控制信号平面 2 之后，四个子图案可表示为： $(K_1 \cdot P_1)AB + (K_1 \cdot P_3)\bar{A}\bar{B}$ 、 $(K_2 \cdot P_1)A\bar{B} + (K_2 \cdot P_3)\bar{A}B$ 、 $(K_1 \cdot P_2)A\bar{B} + (K_1 \cdot P_4)\bar{A}B$ 和 $(K_2 \cdot P_2)AB + (K_2 \cdot P_4)\bar{A}\bar{B}$ 。最后，通过输出平面 C 得到逻辑运算的结果。

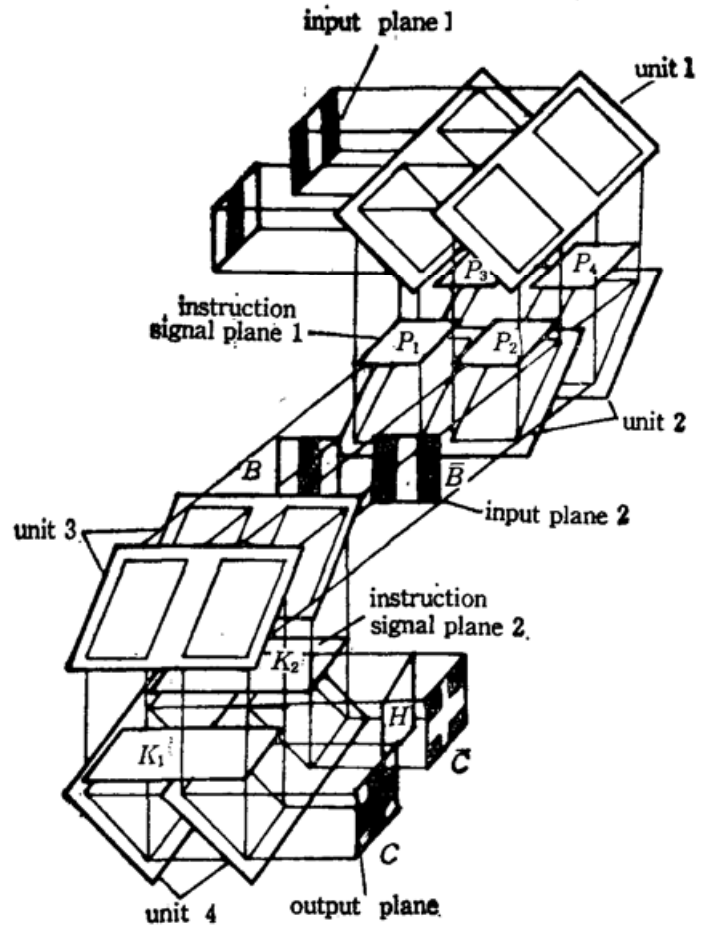


Fig. 1 Schematic diagram of the optical binary dual-rail logic system

$P_2)A\bar{B} + (K_1 \cdot P_4)\bar{A}\bar{B}$ 和 $(K_2 \cdot P_2)A\bar{B} + (K_2 \cdot P_4)\bar{A}\bar{B}$ 。第四个基本单元将四个子图案合成两个, 此时输出 C_1 和 C_2 可以写为:

$$C_1 = (K_1 \cdot P_1)AB + (K_1 \cdot P_2)A\bar{B} + (K_1 \cdot P_3)\bar{A}B + (K_1 \cdot P_4)\bar{A}\bar{B} \quad (1)$$

$$C_2 = (K_2 \cdot P_1)AB + (K_2 \cdot P_2)A\bar{B} + (K_2 \cdot P_3)\bar{A}B + (K_2 \cdot P_4)\bar{A}\bar{B} \quad (2)$$

前面已经讲述, 选择系数 $S_i=0, P_i=i; S_i=1, P_i=j$ 。因此, $S_i=0, K_1 \cdot P_i=j \cdot i=0, K_2 \cdot P_i=i \cdot i=1; S_i=1, K_1 \cdot P_i=j \cdot j=1, K_2 \cdot P_i=i \cdot j=0$ 。所以, $K_1 \cdot P_1 \sim K_1 \cdot P_4$ 可以用 $S_1 \sim S_4$ 表示, $K_2 \cdot P_1 \sim K_2 \cdot P_4$ 可以用 $\bar{S}_1 \sim \bar{S}_4$ 表示。这里, $\bar{S}_1 \sim \bar{S}_4$ 分别是 $S_1 \sim S_4$ 的反。所以, 式(1)、(2)又可以写为

$$C_1 = S_1AB + S_2A\bar{B} + S_3\bar{A}B + S_4\bar{A}\bar{B} \quad (3)$$

$$C_2 = \bar{S}_1AB + \bar{S}_2A\bar{B} + \bar{S}_3\bar{A}B + \bar{S}_4\bar{A}\bar{B} \quad (4)$$

Table 1 Sixteen possible combinations of four instruction signals $S_1 \sim S_4$ and the corresponding logic functions of C_1 and C_2

S_4	S_3	S_2	S_1	C_1	C_2
0	0	0	0	F	T
0	0	0	1	AND	NAND
0	0	1	0	$A\bar{B}$	$\bar{A}+B$
0	0	1	1	A	\bar{A}
0	1	0	0	$\bar{A}B$	$A+\bar{B}$
0	1	0	1	B	\bar{B}
0	1	1	0	XOR	EQV
0	1	1	1	OR	NOR
1	0	0	0	NOR	OR
1	0	0	1	EQV	XOR
1	0	1	0	\bar{B}	B
1	0	1	1	$A+\bar{B}$	$\bar{A}B$
1	1	0	0	\bar{A}	A
1	1	0	1	$\bar{A}+B$	$A\bar{B}$
1	1	1	0	NAND	AND
1	1	1	1	T	F

这事实上以积之和的方式表示了 C_1 和 C_2 的逻辑操作公式。由于 C_1, C_2 相应乘积项(最小项)的选择系数互补, 所以 C_2 是 C_1 的补, 即 $C_2 = \bar{C}_1$ 。两输出 C_1 和 C_2 有不同的偏振态, 因此, 在 K_2 后放置一半波片 H 。最后, 两输出具有与输入相同的偏振态。由于输出与输入的形式相同, 均为双轨形式, 因此, 该系统是一个可级联的系统。表 1 给出了 $S_1 \sim S_4$ 十六种可能的取值组合及相应输出 C_1 和 C_2 的逻辑功能。另外, 用电光晶体作为可控半波片可以用电控实现逻辑操作的实时可编程。当加半波电压时, 电光晶体(KDP)的折射率感应主轴旋转 45° , 入射光的偏振方向旋转 90° ; 不加电压时, 入射光的偏振方向不变。

我们用组合棱镜结构可以使以上系统的结构更加紧凑, 如图 2 所示。逻辑门由三个组合棱镜组成。组合棱镜 OP_1 和组合棱镜 OP_2 的结构相同, 皆由一个直角棱镜和一个斜方棱镜组成, 如图 3(a)所示。组合棱镜 OP_3 由一直角棱镜和一 Dove 棱镜组成, 如图 3(b)所示。在以上棱镜的胶合面上都镀有半透半反镜。在组合棱镜 OP_1, OP_2 之间, 有四个可控半波片 $P_1 \sim P_4$ 。在组合棱镜 OP_3 之后, 有两个偏振片 K_1, K_2 及一个半波片 H 。

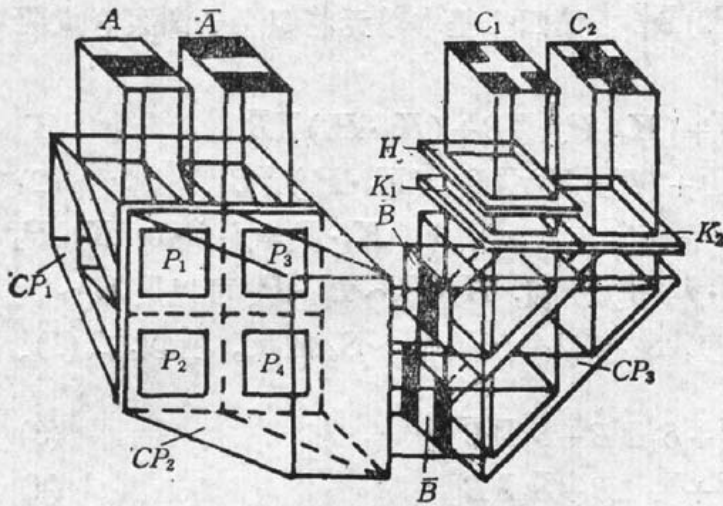


Fig. 2 Schematic diagram of the optical binary dual-rail logic system

CP_{1-3} : composite prisms; $P_1 \sim P_4$: controllable halfwave plates; $K_1 \sim K_2$: polarizers; H : halfwave plate

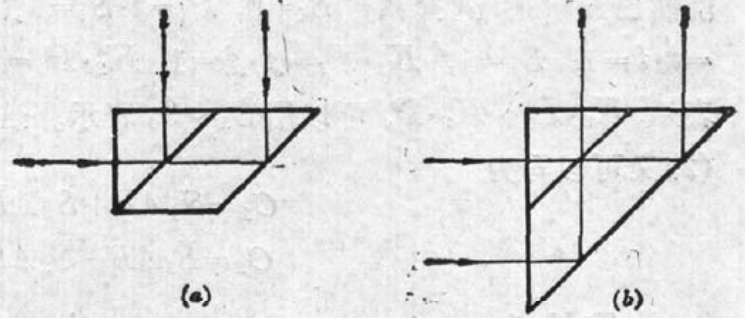


Fig. 3 Diagram of the composite prisms
(a) structures of CP_1 and CP_2 ;
(b) structure of CP_3

三、实 验

图4为输入图案 A 、 \bar{A} 和 B 、 \bar{B} 。每一图案的尺寸均为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。 A 和 \bar{A} 及 B 和 \bar{B} 的中心距离为 15mm 。半透半反镜及全反镜的尺寸均为 $20\text{mm} \times 40\text{mm}$ 。用 He-Ne 激光器扩束照明。图5为 A 和 B 的一些逻辑结果。图5(a)为 $A \cdot \text{AND} \cdot B$ 及 $A \cdot \text{NAND} \cdot B$ ，图5(b)为 $A \cdot \text{XOR} \cdot B$ 及 $A \cdot \text{EQV} \cdot B$ 。

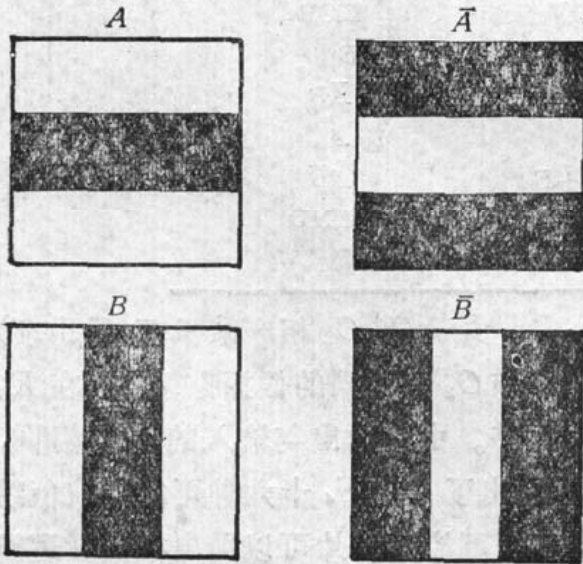


Fig. 4 Diagram of two input patterns and their complementary patterns

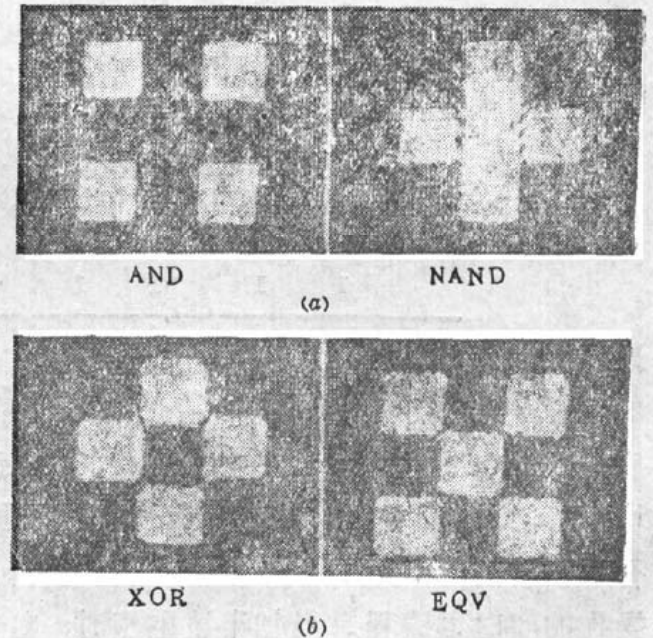


Fig. 5 Experimental results

参 考 文 献

- 1 J. Tanida, Y. Ichioka, *J. Opt. Soc. Am.*, **73**, 800(1983)
- 2 H. Bartelt, A. W. Lohmann, E. E. Sicre, *J. Opt. Soc. Am.*, **A1**, 944(1984)
- 3 J. Weigelt, *Opt. Eng.*, **26**, 28(1987)
- 4 M. E. Prise N. Streibl, M. M. Downs, *Opt. Quantum. Electron.*, **20**, 49(1988)
- 5 A. Huang, *Proc. IEEE*, **72**, 780(1984)
- 6 L. Liu, X. Liu, *Opt. Commun.*, **82**, 446(1991)