

## 先行进位光学并行多位全加器的研究

陈历学 胡强生 吕其昌

(哈尔滨工业大学应用物理系, 150006)

**摘要:** 将二进制数的先行进位全加器的逻辑操作引入到光计算中, 提出了用光学并行处理方法实现先行进位全加器逻辑操作的建议。信号以空间阵列方式编码, 利用空间逻辑阵列, 实现并行逻辑操作。研究了PD-LED的光电混合逻辑操作, 利用PD-LED逻辑器件, 从实验上验证了先行进位光学并行多位全加器, 获得了满意的结果。

**关键词:** 光计算, 全加器, PD-LED逻辑。

### Multi-bits optical parallel full adder by carry lookahead

*Chen Lixue, Hu Qiangsheng, Lu Qichang*

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

**Abstract:** The course of logic operations of carry lookahead adder for binary number is introduced into optical computation. The carry lookahead by optical parallel processing is proposed. The parallel logic operations of PD-LED are realized by using encoded signals with space array. The logic operations of PD-LED are studied, and experiment of optical parallel carry lookahead adder for many bits is carried out, with satisfactory results.

**Key words:** Optical computation, full adder, PD-LED logic

### 一、引言

近二十年来,光计算的研究引起了人们广泛的兴趣<sup>[1,2]</sup>。早期的光学计算主要集中于模拟运算方面,如傅里叶变换、各类矩阵乘法器<sup>[3,4]</sup>。近几年来,尤其是1979年第一个半导体光学双稳器件问世以来<sup>[5]</sup>,人们对光学数字运算产生了浓厚的兴趣,对光计算的发展前景充满了信心。全加器是数字计算中最基本、最核心的关键部件,一直是光计算研究中十分热门而又紧迫的课题。许多作者提出了各种类型的新型全加器,文献[6]利用衍射的方法构成全加器,文献[7]利用液晶电视(LCTV)构成全加器。令人遗憾的是,这些全加器大多以串行进位的逻辑操作为基础,不能充分发挥光学并行性方面的优势,其速度、结构和系统都不可能和现代的集成电路全加器竞争。二进制数全加器的先行进位方法是目前高级电子计算机中已经十分普及的一种全加器逻辑操作,当全加器位数较高时,使用大规模集成电路仍有一定困难。本文提出了一种用光学方法实现先行进位全加器的建议,以便充分发挥光的并行性优势。

## 二、基本原理

设有两个多位的二进制数  $A$  和  $B$ , 其最高位为  $n$ ,  $A$  和  $B$  相加的和用  $S$  表示, 按照先行进位的基本原理,  $S$  的和数输出逻辑式为

$$S_t = (\bar{G}_t T_t) \oplus O_{t-1} = E_t \oplus O_{t-1} \quad (1)$$

式中  $S_t$  表示第  $t$  位的和数,  $G_t = A_t B_t$ ,  $T_t = A_t + B_t$ ,  $O_{t-1}$  为第  $t-1$  位向第  $t$  位的进位,  $\oplus$  表示异或逻辑操作。  $E_t = \bar{G}_t T_t$  是本地和信号。进位函数  $O$  可以写成下述递推形式:

$$O_t = G_t + T_t O_{t-1} \quad (2)$$

从上式可以看到,  $G_t$  实际上是本地进位,  $T_t O_{t-1}$  是第  $t$  位产生的传送进位, 而  $T_t$  则是进位传送条件。由 (2) 式的递推关系知道, 只要知道  $O_0$ , 并计算出第  $t$  位以前各位的  $G$  和  $t$ , 就可以计算出第  $t$  位向第  $t+1$  位的进位函数  $O_t$ , 再通过 (1) 式即可计算出该位的  $S_t$ 。如果考虑 4 位的先行进位加法问题, 则各位的  $O_t$  函数可以写成

$$O_1 = G_1 + M_1 \quad (3a)$$

$$O_2 = G_2 + M_2 + N_2 \quad (3b)$$

$$O_3 = G_3 + M_3 + N_3 + O_3 \quad (3c)$$

$$O_4 = G_4 + M_4 + N_4 + O_4 + P_4 \quad (3d)$$

式中的  $M, N, O, P$  分别为

$$M_t = O_0 T_1 T_2 T_3 \dots T_t \quad (4a)$$

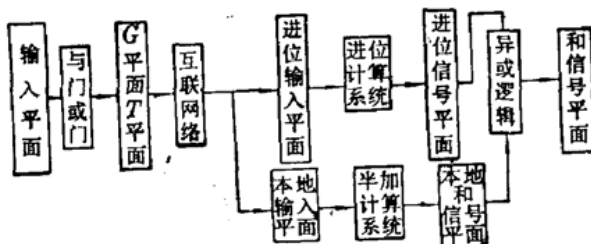
$$N_t = G_1 T_2 T_3 \dots T_t \quad (4b)$$

$$O_t = G_2 T_3 T_4 \dots T_t \quad (4c)$$

$$P_t = G_3 T_4 T_5 \dots T_t \quad (4d)$$

## 三、光学并行全加系统

我们建议的先行进位光学并行全加器的光计算系统的方框图如图 1(a) 所示。输入的四位二进制数按照图 1(b) 的方式排列, 它实际上是二组后  $A, B$  数, 分别输入到与门和或门阵列求出  $G, T$  信号平面阵列。  $G, T$  信号经过一互连网络后产生进位输入平面信号阵列和本地输入平面信号阵列。进位输入平面阵列输入到进位计算系统中, 按照 (3) 式和 (4) 式求出进位信号平面阵列  $O$ 。本地输入平面信号阵列输入到半加计算系统, 按照  $E_t = \bar{G}_t T_t$  计算出本地和信号平面阵列。进位信号平面阵列  $O$  和本地和信号平面阵列同时输入到异或逻辑阵列中, 计算得到



(a) 先行进位光学并行全加器方框图

$A_4$	$A_3$	$A_2$	$A_1$
$B_4$	$B_3$	$B_2$	$B_1$
$A_4$	$A_3$	$A_2$	$A_1$
$B_4$	$B_3$	$B_2$	$B_1$

(b) 二进制数输入平面

图 1

和信号平面阵列  $S$ 。

先行进位光学并行全加器光计算系统最关键的是按照(3)式到(4)式的进位操作系统。为了充分体现光学在并行性方面的优势,我们提出了如图2(a)的先行进位光学并行进位系统。进位操作的输入信号按照图2(b)的方式排列,形成一个 $4 \times 14$ 的平面阵列,称作进位输入平面。进位输入信号平面阵列的排列原则是使每一个方框内的信号能方便地进行(4)式的逻辑运算,以便求出 $M$ 、 $N$ 、 $O$ 、 $P$ 的逻辑值。进位输入平面信号阵列经过一个与门阵列,对每一个方框内的信号进行与逻辑运算,得到 $M$ 、 $N$ 、 $O$ 、 $P$ 值,操作结果是一个 $4 \times 4$ 的平面阵列,再输入一个 $G$ 线阵,构成一个 $5 \times 4$ 的信号平面阵列,称作中间信号平面阵列,即一个由 $G$ 、 $M$ 、 $N$ 、 $O$ 、 $P$ 组成的平面阵列,如图2(c)所示。中间信号平面阵列的每一个方框内的信号对应于方程(3)式右端的各项。中间信号平面阵列再经过一个或门阵列,对每个方框内的信号按照(3)式进行或门操作,结果得到各位的进位信号 $O$ ,称为进位信号平面,如图2(d)所示,图中已输入了一个最低位的进位信号 $O_0$ ,并输出一个最高位的进位信号 $O_4$ ,作为下一个高4位的全加器的最低位进位信号。

另外一个平行计算通道是并行半加器通道,即计算本地和信号平面阵列 $E = \overline{G}T$ 。计算 $E$ 的方框图如图3(a)所示。从互连网络中产生一个如图3(b)的本地输入平面信号阵列,经过

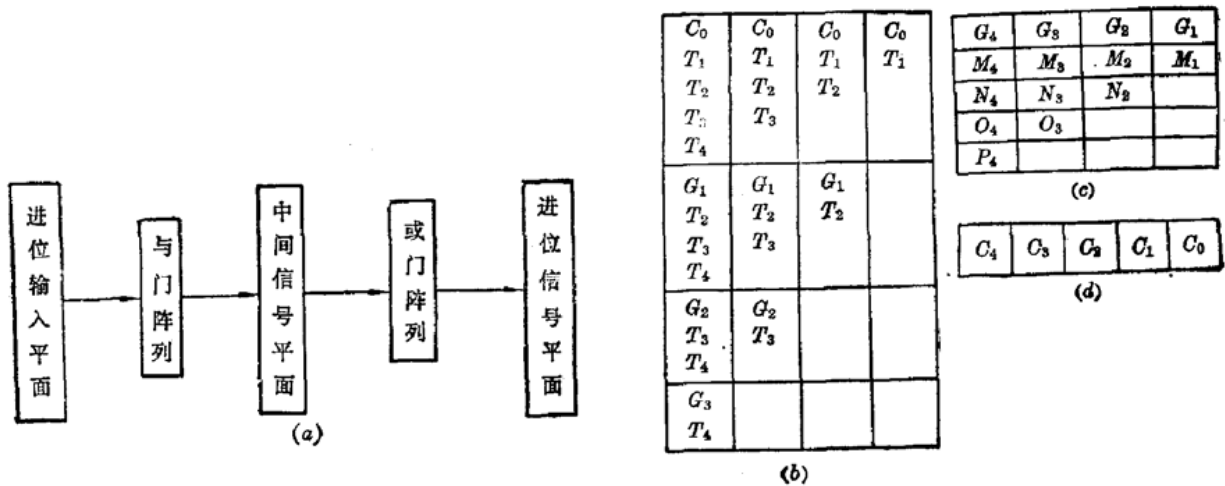


图2 先行进位光学并行进位计算系统

(a) 进位计算方框图; (b) 进位输入平面; (c) 中间信号平面; (d) 进位信号平面

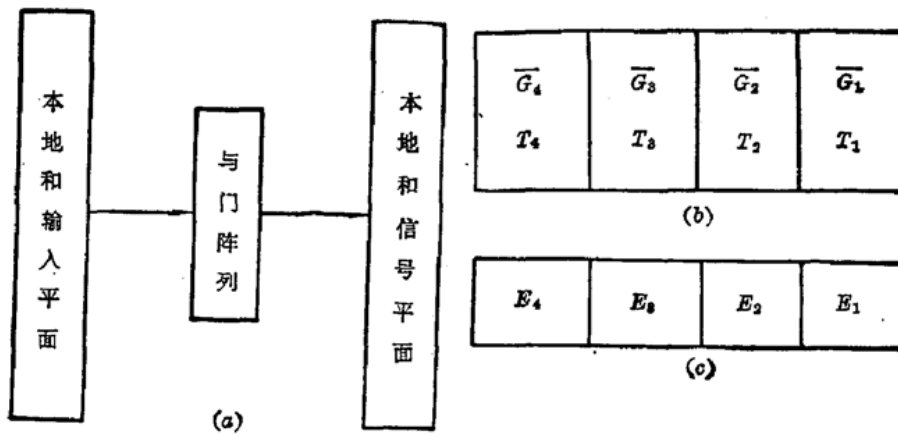


图3 半加计算系统

(a) 半加计算系统方框图; (b) 本地输入平面; (c) 本地和信号平面

一个与门阵列之后,对每一个方框内的信号进行与逻辑操作,得到如图 3(c)的  $E$  信号阵列。

### 四、PD-LED 逻辑器件

要实现上述先行进位光学并行全加器需要适当的阵列逻辑器件。光学双稳态阵列逻辑器件是一种高速逻辑器件, GaAs 半导体光学双稳态平面阵列已达到  $100 \times 100$  单元/cm<sup>2</sup> 的水平,但由于其阈值过高,目前在光计算系统中尚难付诸使用。为此,在模拟实验中我们选用了 PD-LED 混合光电阵列逻辑器件。文献[8]利用 PD-LED 实现了各种逻辑门单元,这些逻辑门的基本思想在于利用反馈过程使 LED 的输入输出特性非线性化,其结构较为复杂。最近一些研究表明<sup>[9]</sup>,利用探测器(PD)感光时的导通特性及发光二极管(LED)点燃时的阈值特性,也可以实现各种逻辑操作。

在 PD-LED 逻辑操作中,我们将输入信号  $A$  和  $B$  用 LED 的亮暗来表示,逻辑操作结果也用 LED 的亮暗来表示,当 LED 亮时表示逻辑真值为 1,当 LED 暗时表示逻辑真值为 0。

图 4 给出了几种比较典型的 PD-LED 逻辑操作。图 4(a) 利用光电探测器(PD)与发光二极管(LED)串联,实现与逻辑操作,当输入信号  $A$  和  $B$  皆为 1 时,  $PD_A$  和  $PD_B$  皆产生较大的光电流,足以点燃 LED,而当  $A$  和  $B$  其中一个为零时,对应的一个 PD 处于关闭状态,LED 熄灭,实现了  $A$  和  $B$  的与逻辑操作。图 4(b) 利用  $PD_A$  和  $PD_B$  并联之后再与 LED 串联,当  $A$  和  $B$  中其中一个为 1 时,  $PD_A$  与  $PD_B$  的并合电流可以点燃 LED,完成  $A$  和  $B$  的或门逻辑操作。图 4(c) 将  $PD_A$ 、 $PD_B$  串联之后再与 LED 并联,当  $A=B=1$  时,PD 路上的光电流急剧增加,LED 上的电流较小,造成 LED 熄灭的状态,完成了  $A$  和  $B$  的与非逻辑运算。图 4(d) 是一个异或逻辑,当  $AB=1$  或  $AB=0$  时皆不可以点燃 LED。图 4(e) 和 (f) 分别是多路输入的和门和或门逻辑器件。图 4(g) 是逻辑考贝复制器件,可以将某一逻辑值复制成多路的输出。

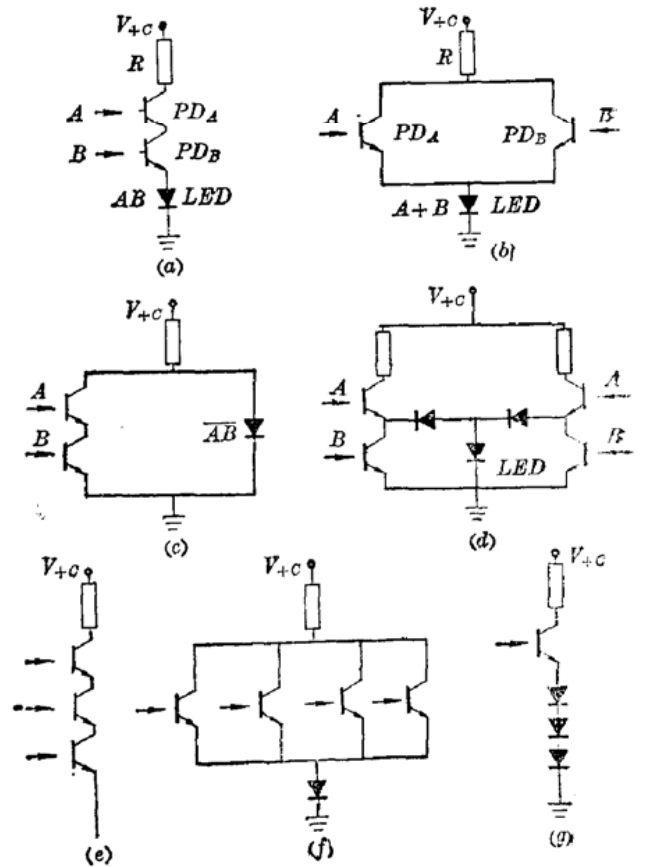


图 4 各种 PD-LED 光电混合逻辑

### 五、实验结果

利用图 4 的各种单元逻辑器件,容易构成各种阵列逻辑器件,用于实现前述的先行进位光学全加器。为简单起见,选择两个两位二进制数  $A_2B_1$ 、 $B_2B_1$  的加法进行实验,其各种逻辑值如表 1 所示。由于只考虑两位数的加法运算,可令  $C_0=0$ ,  $S_3=C_2$ 。

图 5 给出 3 部分实验结果以及数据排列位置对照表。每一个加粗的框内对应于某一数据

平面的结果, 包括  $A$ 、 $B$  的二重输入平面、 $GT$  平面、进位输入平面、中间信号平面、 $C$  平面、本地输入平面、 $E$  平面、 $S$  平面等。图 5 依次给出了 11+00、11+01、11+10、11+11 等的实验结果。实验中, 发光管(LED)采用国产 BT102 型红色发光二极管, 光电探测器(PD)采用型号为 3D051 的光电三极管, 发光管的直径为 2mm, 光电三极管的直径为 3mm, 响应速度最高可达  $10^{-3} \mu s$  数量级。

表 1 二个二进制数的各种逻辑值

A		B		G		T		C		E		S		
$A_2$	$A_1$	$B_2$	$B_1$	$G_2$	$G_1$	$T_2$	$T_1$	$C_2$	$C_1$	$E_2$	$E_1$	$S_3$	$S_2$	$S_1$
1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1
1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0

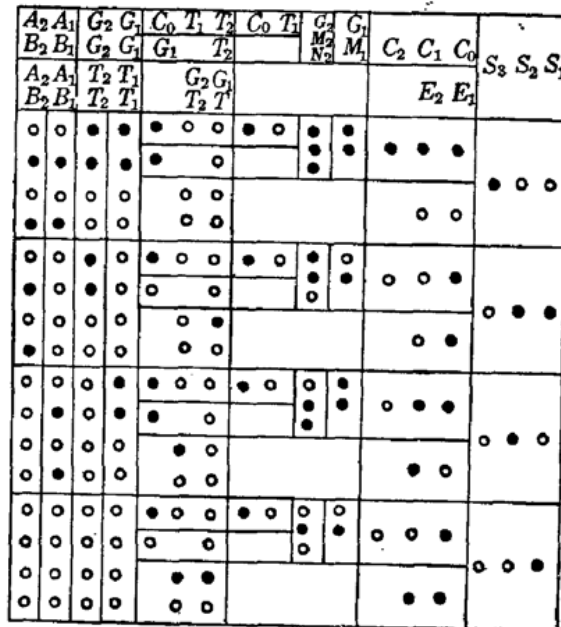


图 5 二位二进制数的先行进位光学并行全加器的实验结果

### 六、结果与讨论

本文用光学方法实现了先行进位并行逻辑操作的多位全加器。它有两个明显的优点: 一个优点是采用先行进位方法提高了运算速度。采用先行进位时, 一般只需要 4 级逻辑操作, 第一级是计算  $GT$  的逻辑操作, 第二级是计算中间平面的与门操作, 第三级是计算  $C$  的或门操作, 第四级是计算  $S$  的异或逻辑操作, 即使对于 16 位的全加器也仅需要这 4 级逻辑操作。文献 [10] 的半导体光学双稳态全加器使用了三支光学逻辑, 在 16 位串行进位的情况下将需要 48 级逻辑操作, 先行进位的速度将比串行进位提高 12 倍。另一优点是采用光学并行处理方法, 以期发挥光学并行处理方面的优势。在光计算中采用光学并行处理时遇到了数制方面的

(下转第 680 页)



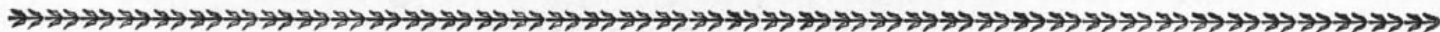
图 3

(a)一输入像;(b)、(c)一输入像的同时 OR 和 XOR 运算结果。

在本项工作中,高文琦副教授提出了有益的建议,杨凡、姚刚两位同学参与了部分实验工作.在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 R. A. Athale *et al.*; *Appl. Opt.*, **25**, 1541(1986)
- 2 Sing H. Lee, *Appl. Opt.*, **10**, 303(1976)
- 3 O. Bryngdahl, *J. Opt. Soc. Am.*, **64**, 1092(1974)
- 4 H. Bartelt *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. A*, **1**, 944(1984)
- 5 Yang Guozhen *et al.*, *Optik*, **75**, 68(1987)
- 6 Sing H. Lee, *Appl. Opt.*, **26**, 4350(1987)



(上接第 676 页)

困难。余数数制具有较好的并行处理能力,但从输入的十进制到余数制的转换以及输出的余数制到十进制的转换归结为一个巨大的线性矩阵方程的求解。二进制在并行性方面的劣势严重地影响了其在光计算中的应用。本文将先行进位引入到光计算中,部分地解决了二进制数在并行性方面的困难,有一定的前途。

本文采用的 PD-LED 混合逻辑器件具有较低的阈值,虽然其运算速度较低,大多在  $\mu s$  的数量级,和 GaAs 半导体光学双稳器件的 PS 开关速度相差甚远,但是目前光学双稳态器件的光逻辑阈值较高,阵列并行运行较困难,因此采用 PD-LED 光电混合逻辑阵列器件研究光计算的体系和结构,在光计算研究的早期阶段是有益的。

### 参 考 文 献

- 1 A. W. Lohmann, *Appl. Opt.*, **25**(12), 1543(1986)
- 2 H. J. Caufield, *Opt. News*, (12), 9(1986)
- 3 J. W. Goodman *et al.*, *Opt. Lett.*, **2**(1), 1(1978)
- 4 R. A. Heinz *et al.*, *Appl. Opt.*, **9**(15), 2161(1970)
- 5 H. M. Gibbs *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **35**(2), 451(1979)
- 6 A. W. Lohmann *et al.*, *Appl. Opt.*, **25**(18), 3047(1986)
- 7 Y. Jin *et al.*, *Opt. Commun.*, **65**(1), 11(1988)
- 8 S. T. Liu *et al.*, *Opt. Acta Sinica*, to be Published
- 9 S. Fukushima *et al.*, *Opt. Lett.*, **12**(12), 965(1987)
- 10 B. S. Wherrent, *Opt. Commun.*, **56**(1), 85(1985)