

## 光电子学和光电子产业专题系列介绍

### 光计算发展的动态和前景

刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

本文综述了光计算的主要研究领域和发展动态, 介绍了光计算的意义目的, 发展方向和技术特点。

随着科学工程技术的高速发展, 对于计算技术提出了愈来愈高的要求, 迫切需要处理大量二维和三维数据, 如天气预报、核研究、结构工程以及一切包含大量矩阵运算的问题。通常的电子计算机的设计依据于冯诺依曼 Von Neumann 的基本原理, 即以时间上串行结构来减少互连数目。因此“瓶颈”效应, 时钟歪斜, 互连带宽和交叉干扰等固有限制使计算机的容量和运算速度的发展受到限制。进一步发展计算机的唯一途径是由串行结构改为并行结构。40 年来电子计算机由真空管向超大规模集成电路发展, 门速度提高了三个量级而运算速度提高了七个量级。这正是逐步采取了部分并行结构的结果。光计算具有内禀并行处理特性, 高速、大容量和无交叉干扰的特点, 已经成为突破当今电子计算机局限性的最有效途径之一。

事实上光计算研究几乎与电子计算机同时起步。早至 40 年代, 冯诺依曼就考虑过使用光学元件的数字计算的可能性。如果当时已发明了激光器的话, 或许第一台数字计算机就使用了光学。60 年代激光的问世兴起了傅里叶光学为基础的模拟光计算的研究。在一些有价值的应用中如匹配滤波, 所处理的带宽超过了电子处理能力。在 60 年代, 数字光计算的研究处于停顿状态, 因为当时限于技术条件不能看出数字光学处理的优越性。70 年代光学传输和非线性材料取得重大进展, 同时也由于电子计算机的固有缺陷随运算速度提高而明显暴露出来,

因此数字光计算重新引起广泛注意。80 年代是光计算研究大发展的年代, 光计算已受到世界上各先进工业国家的高度重视。美国、西欧、日本及苏联都制定了庞大的研究计划, 其规模之大, 范围之广, 深度之深是空前的。非常值得注意的是光计算的研究已从大学实验室转向工业界。许多大电子公司对光计算倾注了极大热情, 这在日本尤为明显。因而一些大公司已经成为国际光计算研究的先导。例如美国的 AT&T 贝尔实验室在 1990 年 1 月宣布研制成功了一台并行阵列运算的数字处理器, 并预言五年内可投入使用。

光计算是一项有巨大应用前景的战略性高技术研究。它的成功将是计算技术的一次革命性进展, 无疑将极大推进科学研究、工程技术和国民经济的发展。另一方面, 激光器的发明导致了光电子技术的划时代发展, 开创了光通讯、光存储等一系列新技术领域。光计算研究不仅要应用这些高技术, 而且提出了更高和更新的要求。光计算研究必将进一步推动整个光电子领域的发展, 光计算的成功将标志着人类开始从电子时代迈进光子时代。

从技术上看, 光计算已全面在光学、微电子学、计算机学、生物物理学和材料学等各领域及其交叉领域中展开。内容涉及基本器件到系统各方面。目前主要困难表现为: 全光通用性计算机的体系结构尚不明确; 光电混合处理的专用性计算机尚在研制中; 关键器件如光双稳器

件和空间光调制器还未达到实用化程度。但是，近些年来由于光电子器件的突破，已使光计算任务从初期的设想进入到有明确主攻方向的新阶段。预计今后十年是关键时刻。重点是实现几种专用光计算机和实用化器件和部件，并打开市场。

光计算正处于飞速发展之中，国际上专家尚无编写专著。由于篇幅所限，本文仅介绍最新和最重要的光计算研究领域。

### 一、数字光计算

数字光计算通常指以光学手段实现的数字

量的运算的软件和硬件的通称。技术路线上以阵列光学非线性器件为基础，构想通用性或专用性全光计算机。

#### 1. 光双稳和开关器件

光学双值逻辑器件是全光计算机最基本器件。图1表示了利用光双稳器件用作存贮器和光非线性阈值器件作逻辑门的原理（这是由迴线范围不大的双稳器件演变而成）。一般而言，这些非线性光学特性的产生必须具有光非线性效应和正反馈两部分组成。图2总结了目前最有应用前景的光学双稳器件。

由非线性吸收或折射材料和标准具构成的双稳器件是纯光学器件，其他是电光效应器件。

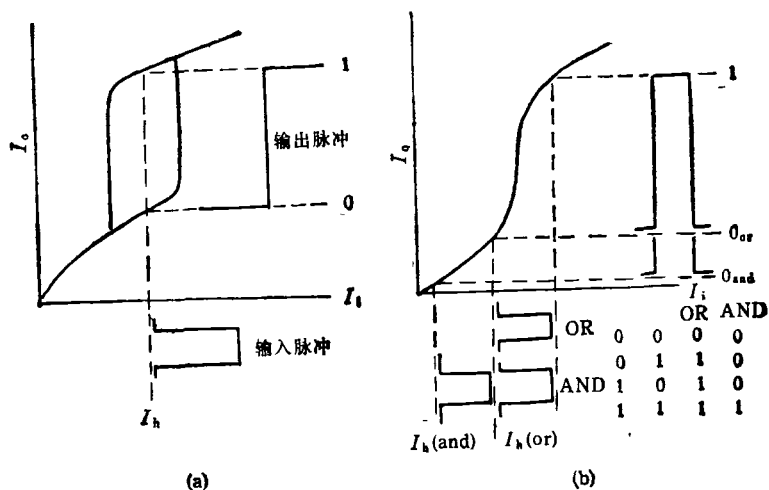


图1 光双稳用于存贮和光阈值用于逻辑运算的示意图

类型	效应	结构	特点
Etalon	与光功率有关的折射率	块状或多量子阱 MIRROR	全光 严格波长控制
SEED	与电场有关的吸收和外反馈	P多量子阱N	CR限止响应速度 可集成
VSTEP DOES LED/ HPT	光三极管作用和外反馈	P-N-P-N	宽波段 可集成
Bistable Laser	饱和吸收	11-12 P-P-N	光增益 波长变换

图2 半导体光学双稳器件举例

Etalon: 标准具, SEED: 自电光效应器件; VSTEP: 垂直表面传输电子器件; DOES: 双异质光电子开关; Bistable Laser: 双稳激光器; Mirror: 反射镜

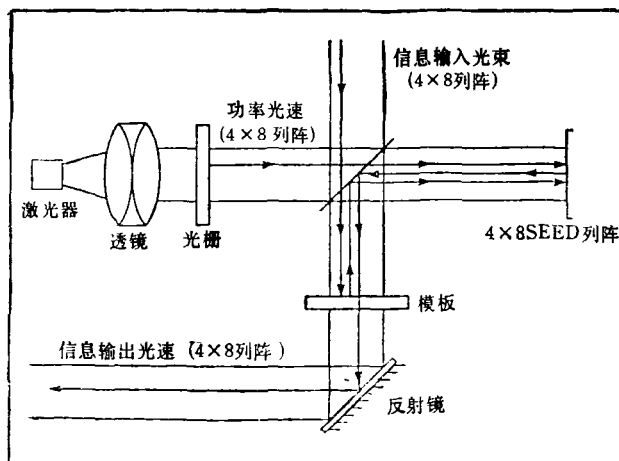


图3 列阵 NOR 逻辑门

大多采用 III—V 族半导体。半导体标准具已可做到微米级单个器件的大规模列阵。另有一种基底热吸收的 ZnSe 窄带干涉滤光片称之为 BEAT。此外还有 BILD/BILED 器件，即双稳激光二极管或发光二极管。在 GaAs 导带电子两个最低跃迁的 GaAlAs/GaAs 量子阱结构器件 (QWEST) 也是重点研究对象。

目前最突出的器件是对称自电光效应器件 (S-SEED) 器件，由两个 SEED 器件串接而成，它们相互提供电反馈。特点是对输出的一对光束的功率比具有双稳性质，此外还具有时控增量效应。已有  $64 \times 32$  列阵样品，单个器件  $5 \mu\text{m}$  见方，开关能量  $1 \text{ pJ}$ ，速度  $1 \text{ ns}$ 。

## 2. 光学数字处理器

具有非线性光学特性的器件本身就可以构成逻辑门。但是由逻辑门构成数字处理器，逻辑门必须具备级联性，即前一个门的输出可以作为后一个同样的门的输入。这必须满足两个条件：逻辑门的输入和输出有相同的逻辑值的光学编码方式；单一门的损耗不大（最好有增量）。事实上上述器件都具有级联性。

目前最成功的数字处理器是由 Bell 实验室演示的。由  $4 \times 8$  单元的反射型 S-SEED 列阵组成 NOR 逻辑门模块，如图 3 所示。所有光学元件是为了满足两个光的垂直入射读写和反射输出的空间互连而设置的。整个处理器用

四个模块以流水线型体系串联而成。运算次数  $10^6/\text{s}$ 。尺寸一米见方。采用平面光学技术可缩小到  $2 \times 3$  英寸。

比较成功地应用光学非线性器件的处理器还有：使用 BEAT 器件的细胞逻辑处理器和使用 VSTEP 器件的双轨逻辑平行处理器。

## 3. 并行处理体系结构

电子计算机的并行体系目前主要是多处理器。所有从电子计算机中发展出来的并行体系事实上都被考虑过用于光计算。但是因不能充分发挥光学并行特性而具体应用的并不多。已采用的有流水线型和细胞逻辑以及余数运算和修正符号数字计算等。

从光学角度研究体系结构，早期提出过基于双轨逻辑的函数逻辑块以及互连网络。以后提出了符号替代逻辑。也就是用另外一个二维图案替换一个像中一种二维图案。重复使用这种技术并采用不同的替代规则可实现布尔逻辑，双值运算，细胞逻辑和图灵自动机。基此又发展出了单一替代规则的通用符号替代系统。

## 4. 光学互连网络

并发性处理系统是由众多的处理器和存储器模块互连而成。数据的并发性处理可极大提高处理速度，也可看作为一种并行处理体系。使用互连网络可以方便地构成处理器之间、存储器之间甚至处理器和存储器之间的通讯。因此，

近当年来光学互连网络得到极大发展。

已有的纵模制网络、Clos 网络、Banyan 网络、Benes 网络和洗牌网络等等均被光学实现并使用光学元件如分束器、光栅和反射镜等。上述网络属多级规则网络，光学实施方案属空变操作。但是，光学系统只能在空不变操作时有大的空间带宽积。因此从光学本身的要求发展出了一种新的 Crossover 网络，拓扑上其等效于完善洗牌等多级网络。

图 4 是一种最新的铌酸锂光开关阵列。特点是表面波导由扩散 Ti 形成，而在波导交叉部局部掺铁产生高光折变灵敏度。二维空间光调制器控制光栅的写入，使所需的结点产生能量转换。

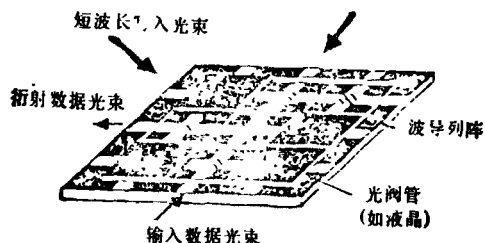


图 4 空间光调制的铌酸锂波导开关阵列

图 5 是完善洗牌网络的排列结构。反复使用洗牌网络可以实现傅里叶变换、多项式计算和分类等。应当注意为实现任意互连方式在结点上需要有比较和交换器件。

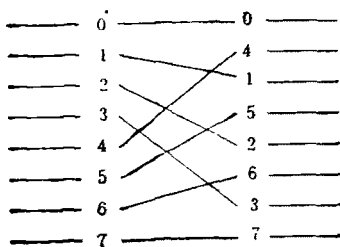


图 5 八个输入的完美洗牌网络排列

### 5. 数字光计算的支撑硬件

为制造出一台全光计算机，除了光逻辑门和光互连器之外尚需支撑硬件和组装方式。

列阵照明器是关键支撑硬件，因为列阵逻辑门要求列阵照明作为时钟信号或维持偏置光

束。传统光学方法是采用双值光学相位衍射光栅。为高速运转，也需使用锁模激光器。另一种方案是微米级半导体激光阵列。

组装方式包括基本运算单元的模块化和散包装化。上述 S-SEED 逻辑门已模块化。显然，堆栈式平面微光学元件将起重大作用。微光学元件包括有渐变折射率、外延生长和衍射式等几种。另一可选择的方法是平面光学技术，即光束在一光学平板内反复传播，光学平板两反射面上刻制所需的平面衍射光学元件，见图 6。这些方法具有长期稳定、抗污染和抗环境变化的优点，并可采用成熟的微电子工艺制作方法。

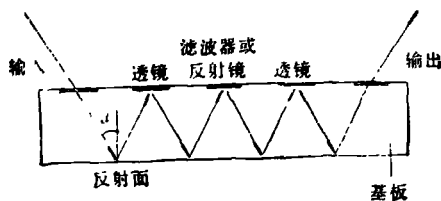


图 6 平面光学 4f 成像系统

## 6. 图案变换并行光逻辑

并行逻辑的光学实现基本上有两种方法：基于物理机制和基于图案变换。图案变换的方法不需要光学非线性器件，但空间编码的实时实现一直是要解决的问题。图案变换原理有两种：Theta 调制空间滤波和阴影投影。

### 二、光电子计算机

光电子混合处理可结合光学的并行特性和电子学的灵活性，因此是种较为现实的发展光计算机的途径。技术路线上先设想可能的整体结构，然后研究单元技术。

#### 1. 光电分列混合处理体系

多通道(或二维)读写的光盘和页定位的全息存贮 (POHM) 具有很大的存贮容量，因此可构成超级计算机。一种可能的构成是：单一电子计算机使用光存贮；多计算机采用光存贮和光互连；光存贮和光互连及光处理结合的数字电子计算机。这种结构中，光学处理和电

子学处理是分不开的，其间由光电转换器件连接。

## 2. 光电交叉混合处理体系

光学和电子学相混合的三维处理方案也是较为理想的并行处理体系。可选择的基本方案有两种。一种是以光子作为传输介质，光电子列阵中的电子运算结果调制通过的光束，互连可采用光盘全息（见图 7）。另一种以电子作为传输介质，光检测列阵和发光器列阵作为输入和输出的转换器件，其间是并行布置的电子线路（见图 8）。

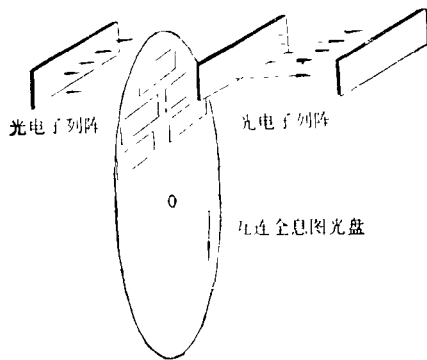


图 7 光盘全息互连光电子列阵

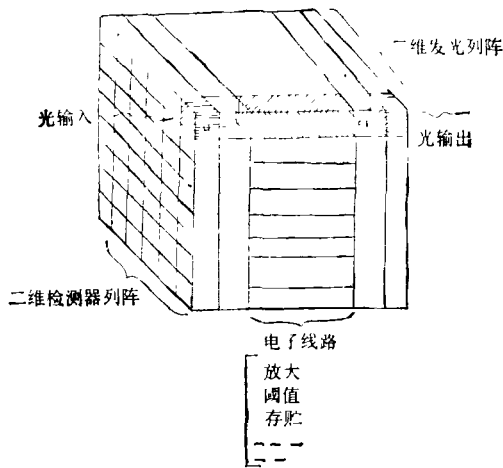


图 8 三维光电子集成像处理系统

## 3. 光电混合图象处理

数字计算的并行体系的图象处理一直是光计算的重要研究内容。大多数方案采用光电混合处理，空间光调制器是关键性输入输出和运算器件。主要体系和已实现的结构有：

物理

(1) 特征空间变换。如矩变换、Hough 变换、Mellin 变换、Chord 变换和傅里叶变换。特点是不用更改滤波器而能计算出输入图象的某种特征并提供取向和分类信息。

(2) 数学形态学。这是一种循环式近域操作处理。因能发挥光学并行性而目前发展较快。实现方法有光学和光电混合处理甚至用符号替换。

(3) 细胞逻辑列阵。原则上是输出象与其附近的象点和前一时刻的输出有关，其关系由一定的逻辑运算决定。这是目前主要的光计算并行体系之一。实现方法包括用 BEAT 器件，用空变逻辑门和洗牌网络互连，用全息互连等。并且基于数学形态学的概念建立了并行双值像代数学算法。它由三种基本操作和五种基础像组成，可产生任意的像变换。

## 4 电子计算机光互连

光计算不仅是为了研究以光学处理为主的系统，一个重要而现实的目标是逐渐在电子计算机中替换上有明显优越性的光学部件。光互连通讯比电子方法有很大优越性，在计算机中采用光互连可摆脱集成电路的平面或准平面的约束，并可减少信号传播延迟和具有无交叉干扰的特性。因此对于提高集成电路的集成密度和运算速度将起决定性作用。光互连具有巨大经济效益的前景。

图 9 列出了最常用的光互连方式及其适用对象。系统之间用一维光纤互连。芯片内使用

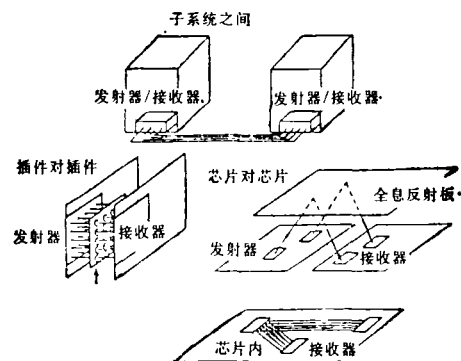


图 9 实现光学互连的几种形式

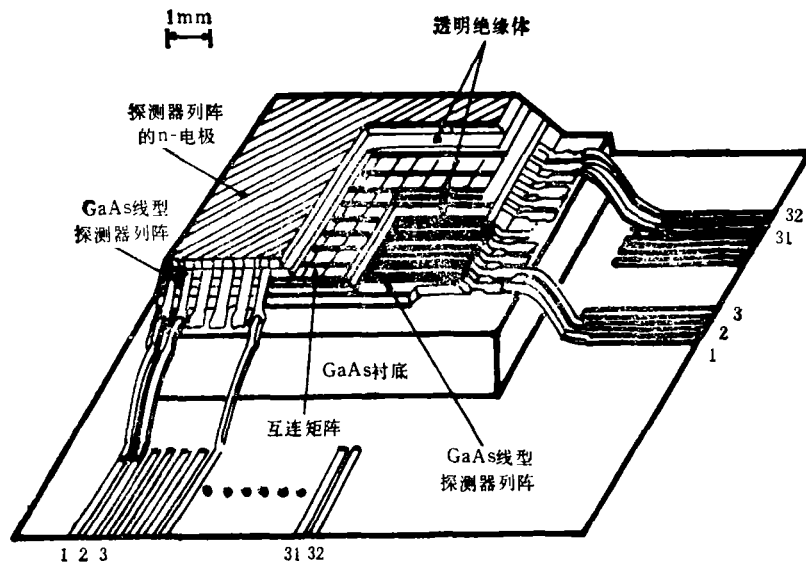


图 10 GaAs/AlGaAs 光电神经网络芯片

二维集成光学技术。插件之间用透镜列阵二维连接。芯片之间用全息元件三维自由空间互连。

### 三、神经网络光计算

一般计算机是采用算法编程操作的。生物的大脑和神经网络系统可以认为是一种与目前计算机系统完全不同的高度并行、密集和分布互连的超级计算机网络，具有适应和组织及高容错能力。神经网络光计算是近些年来最热门的研究领域之一。

至今已有 50 多种结构的神经网络模型。常用的有 13 种。典型的数学模型是 Hopfield 联想记忆网络，玻耳兹曼学习机和多层网络的反馈学习算法。神经网络的功能为关联存贮，分类或聚类。联想记忆具有使残缺图案恢复的性能。能否学习和具有何种学习规则也是网络的重要特征。更有效的数学模型取决于对生物神经网络的更深入地了解。

光学实现方法报道很多。图 10 是在 Hopfield 模型的关联存储器基础上发展出来的混合分层光电子集成神经网络芯片。由 32 个条状探测器阵列和 32 个线状发光管阵列及其间的互连矩

阵模板纵向叠加而成。芯片尺寸 7.6mm 见方。可作 32 点元的三个字符的关联存贮。单次循环工作速度  $1 \mu s$ 。神经网络特别重要的特性是学习。这种学习能力能解决以任一规则为基础的人工智能系统所解决不了的问题。目前光学神经网络的发展方向是实现学习机制。通常其核心部件是光折变晶体和光盘动态全息互连器件。

### 四、空间光调制器

空间光调制器可作为输入输出器件，运算器件，变换和阈值器件，在以光学信息处理为基础的光电混合处理的光计算中是关键器件。它的作用是改变输入光波振幅、相位或偏振态的分布。基本结构为光记址和电记址两种。图 11 表示单个像素的示意图。

光记址类器件主要品种有：液晶光阀，PROM (PMZ)，变形镜器件，微通道板器件，PLZT 器件，光双稳列阵和  $\alpha$  硅铁电液晶等。电记址类主要品种有 TITUS 管、磁光器件、铁电液晶器件和多量子阱器件等。光计算要求的空间光调制器的工作特性应有高分辨率 ( $>100$

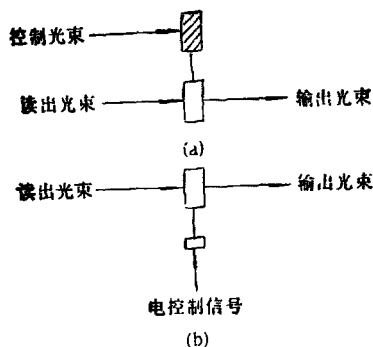


图 11 空间光调制器一个像素的示意图  
(a) 光记址; (b) 电记址

线对/mm), 大尺寸( $>1000 \times 1000$  像素), 高速度(兆帧/s), 高灰度级( $>100$ ), 高消光比( $>1000:1$ )及低价. 铁电液晶器件具有较好的综合性能.

具有光电探测器、集成电路和电光调制器或发光管的集成光电子列阵广义上可归入空间光调制器. 可用以构成三维光电混合计算机. 结构上有 Si/PLZT, FLC/Si 和 GaAs MQW 几种. 这是极重要的关键器件发展方向.

除前面所述之外, 光计算的重要研究内容还包括: 以矩阵运算为主的代数处理器, 集成光学器件和非线性波导技术, 有机高分子材料和器件, 光折变材料和应用, 光学人工智能和数据库等. 由于篇幅所限不作介绍. 这些工作或者在较早的已有的光计算系统中起着重大作用, 或者作为今后的探索方向. 其中以声光器件收缩型结构运算的系统已成为最重要的光计算体系之一.

综上所述, 光计算研究具有如下特点: (1)

属于多学科交叉和知识密集的国际前沿课题; (2)是一种必须在综合性高技术的基础上进一步发展的更高层次的高技术基础研究; (3)由于其应用前景, 对光电子技术的推进作用和向光子技术的发展方向而具有深远的战略意义.

光计算的主要研究方向为: (1)以高速列阵光双稳器件构成并行逻辑运算并向通用性计算机发展; (2)以低速运算器件和广泛互连的方式构成光电混合处理专用性图象处理计算机; 从神经网络向智能生物计算机发展; (3)使用光学技术的电子计算机.

光计算的技术工艺基础将是集成光电子技术. 这种光计算专用的集成光电子技术包含两个发展方向: (1)可集成的以光电效应为基础的双稳和非线性器件. 电子非线性要求较低的光功率消耗. (2)纵向三维堆栈而成的混合分层的光电子集成电路. 电处理器和光处理器可以分层排列也可以在同一层上同时具有电处理器和光处理器, 这可充分发挥光的并行特性和电的灵活处理特性.

- [1] J. Tsujiuchi et al. (ed.), *Optical Computing*, Proc. SPIE, 1359, (1990)
- [2] Technical Digest, 1990 International Topical Meeting on Photonic Switching, (Kobe, Japan, 1990).
- [3] B. Arrathoon (ed.), *Digital Optical Computing 2*, Proc. SPIE, 1215 (1990)
- [4] H. J. Caulfield and G. Gheen (ed.), *Selected Papers on Optical Computing*, Proc. SPIE, 1142 (1989).
- [5] *Optical Computing*, 1989 Technical Digest Series, 9, (1989)
- [6] S. Ishihara ed. *Optical Computing in Japan*, Nova Science Publishers, (1990).
- [7] J. L. Horner ed. *Optical Signal Processing*, Academic Press, Inc., (1987).