

件表现出非寻常的特性,即在栅压作用下,每当在库仑岛内增加一个电子,晶体管就开关一次.另外,库仑岛内能量的量子化对电导振荡也有重要影响,它不但可以解释电导振荡幅度的随机性,而且对振荡周期也有一定影响.

迄今为止,单电子晶体管工作原理问题还有很多谜没有解开,比如人们不理解为什么一个如此简单的库仑作用项相减公式就能很好地说明单电子晶体管的工作原理?在解释中对库仑岛内电子间的相互作用采用了简单的电容模型.但是在所研究的栅压范围内,岛内的电子大约只有100个左右,电子数目仅相当于一个大原子,这种情况电容模型是不适用的.但是,人们猜想这里面可能还有什么秘密没有被发现,或许还掩盖着更令人吃惊的物理现象,这些问题还有待于研究.

三、单电子晶体管的应用

对于一个重要的科学发现,不可能一开始就准确地估计出它的应用前景,因为未来的发展常常出人预料.就器件本身的特点分析,单电子晶体管有可能用于高速微波电路或微波系统中,因为在现代亚微米器件中,电子在器件中的

输运时间常常是可忽略的,限制器件工作速度的是电容充放电时间,而单电子晶体管的电容大约只有 10^{-16}F ,所以可望获得更高的速度^[10].如果器件能够在更高的温度下工作,它有可能应用于多值逻辑电路中.另外,人们估计如果这种器件能够在技术上发挥重要作用,它很可能不是作为分立元件使用,而是在芯片内部形成相互耦合的列阵作为集成元件使用.

- [1] M. A. Kastner, *Rev. Mod. Phys.*, **64**(1992),849.
- [2] F. Capasso (ed), *Physics of Quantum Electron Devices*, New York, (1989),1.
- [3] Scott-Thomas et al., *Phys. Rev. Lett.*, **62**(1989), 583.
- [4] U. Meirav et al., *Phys. Rev. B*, **40**(1989),5871.
- [5] S. J. Wind et al., *Microelectronic Engineering*, **13** (1990),411.
- [6] D. V. Averin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990), 2446.
- [7] H. V. Houten et al., *Phys. Rev. Lett.*, **63**(1989), 1893.
- [8] Y. Meir et al., *Phys. Rev. Lett.*, **66**(1991),3048.
- [9] C. W. J. Beenaker, *Phys. Rev. B*, **44**(1991),1991.
- [10] L. P. Kouwenhoven et al., *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991),1626.

未来计算系统中的光互连

陈雷 陈益新 张永涛

(上海交通大学应用物理系,上海 200030)

论述了光互连网络对巨型计算机和智能计算机发展的重要作用,指出了光互连网络是解决目前电子计算机中通信“瓶颈”的关键.讨论了采用光互连取代电互连的物理依据,强调了光互连网络的高效、快速和大容量特性.最后分析了我们正在研究的光学交叉开关(crossbar)互连网络的几个关键参数和初步实验结果.

一、光电混合计算的必要性

巨型计算机(supercomputer)是现代科学

技术,特别是国防尖端技术和高技术的迫切需要,如核武器设计、空间技术、气体动力学、长期天气预报、石油勘探、粒子束模拟计算、实时图像识别、人工智能等.随着集成电路技术的发展,依靠提高主频来提高系统性能难度越来越

大,主频1ns被公认是一个工程极限,目前已达到2—4ns,要再提高就十分困难了^[1]。目前比较一致的看法是,巨型机的发展趋势是大规模并行机(massive parallel machine)。这不仅在技术上成为可能,而且在经济上也是可行的。

目前,大规模并行机从互连来分有两种^[2]:一是处理器和处理器连接,每个处理器都与少量其他处理器连接,其网络结构可以是网状或超立方体等。这种类型也就是所谓分布内存机,每个处理器都有一个大容量的本机内存,如Connection Machine,Intel iPSC/860,NCUBE2和Touchstone都是一些商品化的产品。另一种是处理器和内存连接,每一个处理器都可以通过多级互连网络访问大容量共享内存的任意部分,处理器之间的通信是通过对共享内存的读和写进行的,这也就是所谓共享内存机,Alliant FX/2800, BBN TC 2000, Concurrent 3280E, Encore 91, FPS System 500及Sequent Symmetry是一些已商品化的产品。无论哪一种,这其中的关键是需要高效、快速、大容量的互连网络,以实现处理器和处理器或处理器和内存之间中间结果的信息交换或者说通信。互连网络已成为巨型机的核心,决定着性能价格比。

另外,在智能计算机方面,能像人脑一样进行学习和判断的神经计算机,它的核心并不是逻辑运算,而是互连网络的构成。就电子器件的开关速度而言,比人脑神经细胞的反应速度至少快一百万倍^[3]。作为生物开关的神经细胞,其响应时间一般为毫秒级或更大。根本的区别在于人脑神经系统具有巨量并行处理单元和互连。现有研究表明,一个神经网络大约有一千亿个神经细胞,每个神经细胞有高达一万个触突(synapse)与周围相连接。这充分说明人脑的智能不是由神经细胞的反应速度,而是由高度互连的巨量神经细胞的并行处理能力所决定的。近年来,人工神经网络已成为世界范围的研究热点,这不仅为智能计算机的发展开辟了新的途径,对其他学科也将带来巨大影响。

在传统的电互连网络中,由于任何连接导线都不可避免地存在着一定的电阻 R 和电容

C ,因而存在着 RC 延时,而且随着器件工作频率的提高, RC 延时往往超过了晶体管的开关时间,这就造成了互连带宽的提高受限于连接导线,并且电信号的传输速率只有光速的千分之几,产生时钟扭歪现象(clock skew)。另一方面,由于VLSI尺寸的缩小,还会造成连接导线拥挤,没有足够的空间来排列,彼此之间的耦合干扰也增大,当线度减小到所预计的极限量级时(0.1 μm),这个问题将变得更严重。总之,伴随着集成电路技术中的器件尺寸减小,芯片尺寸增大,频率的提高以及系统结构方面的大规模并行技术的采用而来的是数据流量的巨增,而电互连由于在带宽、互连密度、时钟扭歪、能耗、抗干扰性等方面的限制,无法解决这一矛盾。

用光互连来解决这个计算机中通信的“瓶颈”在80年代初提了出来^[4]。光互连是以光子取代电子作为信息载体来实现功能单元之间的信息交换。光互连的分类从层次来看可分为:芯片内之间的互连,芯片之间的互连,电路板之间的互连,计算机之间的互连。从互连所采用的信道来看,可分为:光纤互连,波导互连,自由空间互连。光纤互连适用于电路板之间或计算机之间这个层次上的连接,可以利用光纤通信的成功经验,比较容易实现,已经进行了好几种互连方案的实验工作^[5-7]。与电互连相比其优点是长度-带宽积高、扇出量大、系统的功耗低等,采用分立的光源和探测器。波导互连可以提供高密度互连通道,适用于芯片内或芯片之间这个层次上的连接,用集成光源和探测器,连接用集成光路,这种互连目前还不很成熟^[8,9]。自由空间光互连适用于芯片之间或电路板之间这个层次上的连接,可以使互连密度接近光的衍射极限,不存在信道对带宽的限制,宜于实现重构互连。自由空间光互连主要有全息光学元件(HOE)、空间光调制器(SLM)、透镜和反射镜几种,是目前的一个研究热点。纯光学计算机在短期内是无法与电子计算机竞争的,而采用电子处理、光子互连和通信这种光电子混合计算系统是当前技术已可能实现的一种优化结构。

二、实现光互连的物理依据

光学信息通道的信息流量大。首先,从物理本性上看^[10],光子不具有静质量,既可以在真空中传播,也可以在介质中传播,并且很容易通过真空和介质的界面,无论是在光波导中还是在自由空间中,光信号都以该介质中的光速传播而与接受信号的元件数目无关,传输信息的速度高。光频与微波波段相比高 10^4 ,所以它的频段很宽,即使考虑电-光、光-电转换及信道的限制,目前技术也可提供几个GHz的带宽^[11],而且光在传播过程中能量损失很小(对计算机大小而言,损耗可忽略)。其次,光学固有的并行性。光子不象电子那样带有电荷,电子之间通过电磁场而相互作用,导致电子信号很容易相互干扰或受外界影响,当频率很高时更为严重^[12]。光子之间则很难相互作用,因此光波导可以相互穿越,只要交叉角大于 10° 左右^[13],就不会有明显的交叉耦合;自由空间光束可以在三维空间互相穿越而没有明显的互作用。第三,光互连不受平面或准平面的限制,而且不仅可以在芯片边进行I/O连接,还可以在芯片内进行I/O连接。限制光互连密度主要有两个因素^[13]:对自由空间而言是可分辨的光点尺寸,对波导而言是所要求的波导尺寸。芯径为 $5\mu\text{m}$ 的单模光纤目前已很普遍,做到尺寸为 $1\mu\text{m}$ 的波导是很可能的。自由空间的传输主要受成像系统衍射的光点尺寸限制。无论是导波或非导波系统,为了避免串话,必须把光点分开几个波长的距离。即使有这种限制,从理论上讲也可制作出 $40,000$ 到 $50,000/\text{mm}^2$ 的光波导或自由空间通道,或 $5000/\text{mm}^2$ 的光纤通道。由于光学的并行性,系统的复杂度与系统的大小关系不大,即系统扩展时,复杂度增加不大。

光互连的扇出数主要受探测器的功率限制。考虑电-光和光-电转换效率、传输长度、频带等因素,可知光互连的扇出数比电互连大许多倍^[11,13,14]。对采用平行处理技术的巨型机,即使有限的广播(broadcasting)能力即一点到多物理

点的连接能力,也就是扇出能力,也可以显著地改变许多方面应用的性能,再考虑到能耗,即广播是以较低的数据传输速率进行的,性能也会有很大改进。

光学易实现可重构的互连,因为光互连不一定需要实际的“硬”连接(这一点对移动物体的连接也是很有利的),原则上,可以把互连图形信息写入到可重构的光互连部件,从而实现动态互连,而动态电互连的实现则比较困难,存在许多难以克服的因素。

用光子作为信息载体在传输方面的优越性已在光纤通信上充分显示,现在光纤系统不仅非常成功地用于通信干线和地区网络中,而且正在发展将光纤直接通到每个用户的技术;另外,在光存储和激光打印技术方面光子的作用也已显示出来。可以预见,随着光电子和集成光学器件(如光源列阵、空间光调制器和探测器列阵等)的发展以及光互连结构理论和技术的深入研究,在90年代,光互连的总体性能将会超过电互连,特别是全息光互连和使用空间光调制器的光互连结构将会取得重大突破,达到电互连无法达到的性能指标,充分显示光学在互连上的优势。

三、光学交叉互连网络分析

普通的交叉开关概念是指能够实现没有信息争用的 N 个输入、 N 个输出的任意点到点的互连开关网络。广义的交叉开关网络不仅可以实现点到点的连接,而且还具有广播(broadcasting)和汇集(funnelling)能力,具有可重构性和非阻塞性,这正是并行处理中所要求的互连网络。然而随着处理器数目的增加,电子交叉开关网络的硬件费用、体积和管脚数目(VLSI芯片的管脚数目不可能超过几百)成为限制网络规模的主要因素,另外还存在能耗、时钟分配、控制、可靠性、延迟等问题。一般认为,交叉开关阵列的设备量是 $O(N^2)$,当 N 很大时,其成本可能超过全部 $2N$ 台处理器、存储器和I/O设备的成本,比较合理的规模是 $N \leq 32$ ^[15]。IBM

也做有 64×64 的交叉开关用于 Logic Simulation Machine (LSM) 和 256×256 -bit 的交叉开关用于 Yorktown Simulation Engine (YSE)^[16], 但一是费用太高, 另一是存在长周期的可靠性问题. 光学交叉开关的提出正是基于以上的原因, 利用光学固有的并行性的特点, 在 N 比较大时实现交叉开关的互连功能.

1. 光学交叉开关互连网络设计

使用空间光调制器 (SLM) 的光学交叉开关互连网络如图 1 所示, 其数学模型是 N^2 -并行

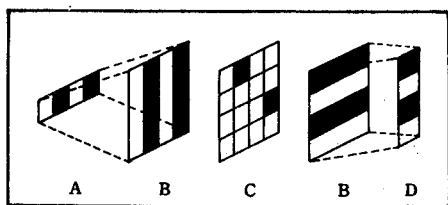


图 1 光学交叉开关互连网络

矢量-矩阵内积: $C=A \cdot B$, A, C 为 N 维行向量, B 为 $N \times N$ 矩阵. A 是输入光源, 可以是 N 个 LD 或 LED 列阵, 二进制信号 1 代表某一光强, 0 代表不发光; B 是柱面镜系; C 是空间光调制器 (光控或电控), 其中的 1 代表开态即光能通过, 0 代表关态即光不能通过; D 是输出的 N 个实时探测器. 这种 N^2 -并行矢量-矩阵内积光互连结构, 就是所说的广义光学交叉开关互连网络, 不仅具有可重构性和非阻塞性的单级网络, 而且空间光调制器的开关设置和数据传输可以是异步方式, 非常灵活、方便, 是功能最强的互连网络.

互连系统的性能除了与互连结构有关外, 还取决于光源、光学系统、开关器件和探测器等的性能, 下面分析该光学交叉开关互连网络的三个主要参数: 互连数目、重构时间和数据传输速率.¹⁾

(1) 互连数目

互连数目是互连网络所能实现的最大连接数目. 考虑最坏情况时, 互连数目 N 应小于空间光调制器的消光比 C ^[17,18]. 目前, 空间光调制器的消光比一般不超过 3000, 特别是发展比较成熟的与 CMOS 集成电路兼容的液晶光阀

(LCLV), 消光比小于 400, 这就是消光比对互连数目的限制. 我们对此进行了详细的分析, 导出了互连数目 N 与误码率 BER、信噪比 SN 以及探测器阈值的关系²⁾. 在此基础上, 我们进一步提出了采用纠错码技术降低误码率, 从而提高互连数目的方案. 结论是互连数目可以大于空间光调制器的消光比.

(2) 重构时间

重构时间是改变全部开关的时间, 即建立一个完全不同的互连路径的时间. 原则上, 重构时间应小于一个数据位的持续时间, 但在保证数据不丢失的前提下, 且每一种互连路径下传输的数据量比较大时, 重构时间大于一个数据位的持续时间也是很有意义的. 有四种控制开关列阵的方式: 顺序、行并行、随机和并行. 只有光寻址 SLM 才能实现 (N 相当大时的) 并行控制. 重构时间 T 决定于开关列阵的控制方式、互连数目 N 及每一个开关的开关时间 t_s . 顺序控制时, $T=N^2 t_s$; 行并行或随机控制时, $T=N t_s$; 并行控制时, $T=t_s$. 目前可用于光学交叉开关互连网络的声光、电光、磁光 SLM 的开关时间在 $1 \mu s - 100 ms$ 范围内, 所以重构时间比较大, 随着 SLM 性能的改进, $1 ns$ 的开关时间是可以达到的, 从而对中、大规模的互连网络来说, 重构时间在 ns (并行) 或 μs (行并行) 量级.

(3) 数据传输速率

数据传输速率是在给定误码率的互连路径中的数据位速率. 对于我们所讨论的自由空间被动光学交叉开关互连网络, 网络内不存在光信号的探测和再生, 数据传输速率决定于光源和探测器的带宽, 以及探测器所能接收到的平均光功率 (与光源功率和信道损耗有关). 分立 LD 和探测器的调制频率和响应速度分别可达 20GHz 和 40ps, 再考虑到光源功率、 N/C 比值、光学系统损耗、探测器的灵敏度等因素, 实现 1Gb/s 的数据传输速率是很容易的; 一维列阵

- 1) 陈雷等, 第五届全国纤维光学与集成光学学术讨论会暨第四届光计算学术讨论会, 厦门, (1992), 410.
- 2) 陈益新等, 第五届全国纤维光学与集成光学学术讨论会暨第四届光计算学术讨论会, 厦门, (1992), 3.

光源和探测器的该值小一些,大约可为50Mb/s,这也比典型的电子系统的10Mb/s大(虽然电子开关的速度达50-100ns)。目前,实验室水平的光开关的开关时间已达到0.1ps,光窄脉冲达30fs,可见光学系统的数据传输速率的潜力很大,而电子系统的数据传输速率的极限为1Gb/s。

2. 初步实验结果和分析

图2是4×4光学交叉开关互连实验系统框图。我们首先使用现有的LCLV,在此基础上再

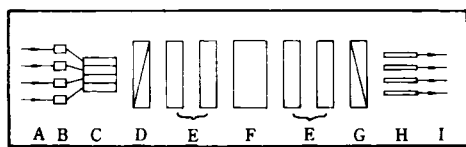


图2 4×4光学交叉开关互连实验系统框图

采用我们自己研制的Si/PLZT SLM代替LCLV,以期大幅度地减小互连网络的重构时间(可达1μs左右)。A是输入的电信号;B是半导体激光器,经自聚焦透镜准直后耦合入光纤;C是光纤调节架,光纤头加自聚焦透镜将光束准直;D是起偏棱镜;E是柱面镜和透镜组;F是液晶光阀,其控制信号由计算机产生;G是检偏棱镜;H是十元探测器阵列;I是输出电信号。初步实验结果如下:

(1) 器件

液晶光阀(LCLV)

结构参数:8×8列阵,单元尺寸1×1mm,间隔1mm,常闭及常开型,双列直插。

性能参数:

消光比:常开型——300;常闭型——150。

(测试条件:方波,±3V,300Hz,He-Ne laser)

响应时间:上升时间——50ms;下降时间——50ms。(常闭型)

驱动电压:±3V。

探测器

采用十元实时线阵光电探测器,单元尺寸1×1mm。

光源

采用He-Ne激光器(0.6328μm)和半导体激光器(0.83μm)。

(2) 系统

完全实现了2×2 crossbar互连网络的功能,即两个光源和两个探测器间的任意连接,可重构、无阻塞,串话大于10dB,4×4实验网络光路调试成功,数据传输速率实验:2MHz方波,即4MHz NRZ码实验成功。

根据理论分析可知,当消光比为300,信噪比为16dB,误码率为10⁻⁶时,互连数目大于500,采用纠错码技术,N可以大大提高;对并行控制的8×8互连网络,液晶光阀的重构时间约100ms,我们自己研制的Si/PLZT空间光调制器的重构时间可小于30μs(体材料PLZT陶瓷)或小于1μs(单轴定向PLZT薄膜);考虑到光源功率、互连数目和消光比的比值、光学系统损耗、探测器灵敏度等因素,数据传输速率大于100MHz。

目前,已提出的互连方案有许多种^[10],这方面的工作仍处于实验和摸索阶段,究竟是否能有一种方法具有绝对优势,还是各种方案各有其优势和应用场合,还有待进一步发展来证明,但使用光互连来取代(或部分取代)电互连已成为共识,需要搞光、电和计算机的科研工作者通力合作,才能取得丰硕的成果。

[1] 陆绍福,计算机世界,1992年5月27日。

[2] L. Rudolph, *SPIE*, **1505**(1991),175。

[3] 陈益新等,光计算,上海交通大学出版社,(1990),10。

[4] J. W. Goodman et al., *Proc. IEEE*, **72**,(1984),850。

[5] A. R. Dias et al., *SPIE*, **825**(1987),170。

[6] K. P. Jackson, *SPIE*, **994**(1988),50。

[7] M. K. Kilcoyne et al., *SPIE*, **1215**(1990),174。

[8] F. Lin et al., *Appl. Opt.*, **29**(1990),1126。

[9] Y. Yameda et al., *SPIE*, **881**(1988),164。

[10] 陈益新,中国计算机报,1992年5月12日。

[11] J. A. Neff, Twenty-Second Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Maper Press (1989),166。

[12] R. T. Chen, *SPIE*, **1374**(1990),162。

[13] P. R. Haugen et al., *Opt. Eng.*, **25**(1986),1076。

[14] J. W. Goodman, *Optical Acta*, **32**(1985),1489.

[15] 刘重庆, 并行处理机与应用, 上海交通大学出版社 (1990),181.

[16] A. A. Sawchuk et al., *Computer*, No. 6(1987),50.

[17] A. A. Sawchuk et al., *SPIE*, **625**,(1986),143.

[18] M. Fraces et al., *SPIE*, **963**(1988),223.

纳米材料结构研究与正电子寿命谱学

彭郁卿

(中国科学院上海原子核研究所;中国科学院核分析技术开放研究实验室,上海 201800)

从纳米材料的结构特点、重要性和所使用的现代实验手段出发,简要地介绍了已被广泛采用的正电子寿命谱学的基本原理、实验方法和数据分析,给出了微结构分析、温度稳定性、压力效应和动态观察等方面的研究工作,指出了研究纳米材料的微结构对基础学科和技术应用都非常重要,正电子寿命谱学是研究纳米材料的有用工具.

一、纳米材料结构的特点和研究意义

一般认为,颗粒直径在1—100nm范围内的粉体称为超细粉(ultrafine powder),由这种超细粉构成的材料称为纳米材料(nanocrystalline material).由于这类材料的结构独特,性能奇异,在基础物理学方面有重要意义,而且有着诱人的应用前景,因此受到世界各国科学家的重视,形成了极高的研究热潮.

纳米材料的主要特点之一是界面占有可与颗粒相比的体积百分数,亦即界面所占的体积分数特别大.当材料中的颗粒平均直径为5nm时,界面所占的体积分数高达50%左右!而且界面数特别多,界面的取向又是随机的,它们的结构也相当复杂,已经发现,许多纳米材料的界面基本上包含三类缺陷:大小接近单空位尺寸的自由体积,多空位大小的微空洞,多个界面围成的空洞.这些结构特点影响着甚至决定了纳米材料的许多物理和化学性能.例如,CaF₂晶体在室温下可以弯曲100%;室温下的纳米TiO₂陶瓷表现出很高的韧性^[1].因此,研究这类材料的结构就显得十分重要.

目前,已经用了许多现代实验方法和技术(如扫描隧道显微镜、电子显微镜、各种谱学、X射线衍射与中子衍射等)表征纳米材料的结构

以及其他许多性能,其中用正电子寿命谱学已经获得了许多有用结果,例如关于界面缺陷的鉴别及浓度比较,各类缺陷的尺寸和数量随环境条件的变化等,并且认为,纳米材料中的缺陷是其重要结构元素.正电子寿命谱方法自身又具有许多独特的优点,其中之一就是它对结构缺陷及其变化十分敏感,而且对样品的状态、组分、几何形状等没有严格的限制,这就使它可以广泛应用于各种研究对象,因此它不失为研究纳米材料的有用工具.

二、正电子寿命谱学简介^[2]

1. 物理基础

正电子(e⁺)与负电子(e⁻)类似,它们互为反粒子,两者有相同的质量、自旋和电荷量,但所带电荷的符号相反,因而磁矩同值异号.正电子的最大特点是它在介质中不能独立存在,一旦遇到电子便会与之结合而产生湮没,并发射 γ 射线,而且有发射单 γ 、双 γ 和三 γ 的多种可能(参看图1),但发射双 γ 的几率最大,在材料科学研究中主要利用这一湮没方式.

正电子在材料中的寿命(τ)与湮没位置的电子密度(n_e)直接相关,其关系式为

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\pi r_0^2 n_e c}, \quad (1)$$