

光 学 互 连

王 诚 陈 岩 松

(中国科学院物理研究所)

摘 要

芯片的集成度增大必将导致大规模集成电路和系统在传输上的困难,电磁性与平面分布引起严重的信号相互干扰和损耗,这样必然影响到数据的运行速度,限制数据的存储。本文通过同用于高速运行的电子系统的常规电互连的比较,介绍了光学互连的特点以及在不同水平、不同方面的应用。光学互连最有价值的应用在于对时钟分布问题的解决,即引导单一信号到达芯片的不同部位。而更为复杂的问题是对于数据传输问题的解决,即提高数据传输的速度和并行性能。

随着现代科学技术和生产力的发展,人们感到现有的电子计算机已不能满足需要,从而开始追求研制一种具有超高速度和超大容量的计算机。由于光学计算是以光速进行,并且具有二维数据并行处理的特点,所以它将是人们所追求的新一代计算机的基础之一。光学互连作为实现光学计算的并行性的技术手段,是光学计算的重要内容之一,近来已越来越受到人们的重视。

其实,光学互连的提出还有更具有现实意义的背景,那就是超大规模集成电路的干扰问题和光通信的联网问题。随着电子技术中集成度的大幅度提高,电导线连接将产生严重的电磁干扰,这使得电子计算机的运算速度和容量受到限制。因此,人们设想用光学互连代替其中的电导线连接,从而克服上述障碍。

本文试图把近年来国外有关光学互连的研究情况向读者作一介绍,以促进此项工作的研究和发展。

一、电子计算机中的电学互连问题

随着半导体芯片集成度的增大和尺度的减小,它在计算机中的功能将受到限制,这种限制主要来自各门器件间的互连。假设芯体上所有元件及其空间均缩小 d 倍,则通道长度、晶体管

开关时间的延迟也相应地缩小 d 倍。但是,因连线截面的减小而导致的电阻增大以及电容的减小,使 RC 时间不变^[1],这样芯体中信号的传输速度主要决定于互连延迟。这是电子计算机提高运行速度所面临的主要问题之一。

在信号的长程传输中,由于电阻、电容和它们的平面分布性质所产生的电磁作用^[2],各芯片之间的电导线连接将对系统时钟信号的传输产生影响。一般地讲,时钟驱动器输出电压的传递时间正比于负载电容与驱动器固有电容之比,不同的负载电容将使时钟脉冲得到不同的展宽;另外,即使对于同样长度的导线,由于它们的分布状态的不同,使得特征信号的传输延迟产生差别。这就是所谓的“时钟偏差”问题^[3]。

在大规模集成电路的芯片上,虽然可以做 10^5 — 10^6 个门器件,但由于互连线路电磁干扰的限制,却只能有 10^3 量级的端点可供外连。按照 Rent 定则^[4],可供连接的端点数 M 与门器件数 N 之间的关系为

$$M = N^{2/3}. \quad (1)$$

对于超大规模集成系统,此关系修正为

$$M = 7N^{0.31}. \quad (2)$$

由此可见,传输数据率由于可供端点的限制而受限制。另一方面,由于互连线路中来自电阻、电容的相互干扰和损耗,使得用提高频

率增加带宽的方法来提高数据率的传输很快达到极限^[5]。因此，上述限制就构成了高速数据处理中的所谓的“瓶颈效应”问题，即由于处理速度的限制引起数据的堆积。

二、光学互连的分类及应用

光学互连方法就当前的发展状况，主要应用于两个方面。一是单一信号向不同区域、不同器件的传输，如时钟问题；二是多输出、高速度、高并行的信号传输，如数据传输问题。下面结合光学互连的结构、种类和应用，讨论时钟问题和数据传输问题。

1. 时钟问题

设计高速度计算机线路时，遇到的最主要困难就是时钟偏差，即线路不同部分在不同时间接受到相同状态的时钟信号。

由于光能够独立地、互不干扰地在三维空间以并行方式传输信息，所以将光学互连用于计算机时钟系统，可以较好地解决时钟偏差问题。如图1所示^[6]，时钟信号通过一个全息片从一个激光二极管变换到硅片上的光探测器

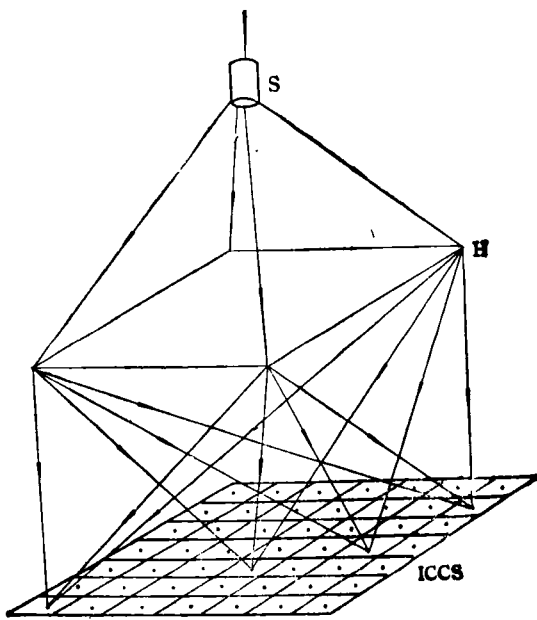


图1 光学时钟分布

S为光源；H为全息片；ICCS为集成芯片面

上，这里芯片被分成一些功能元胞。在这种系统中，时钟偏差就是芯片面上不同分布的探测器响应时间的差别。

按介质材料分类，光学互连可分为折射率波导和自由空间两大类。折射率波导互连以光纤或集成光波导为传输介质。光纤互连通常用于长程连接，它的主要问题是光纤、探测器的准直问题，光纤分离器的均匀问题以及光纤弯曲问题等。而集成光波导的长处是小型化和用于短程互连，但它的灵活性不好。

在自由空间中的光学互连分为聚焦和非聚焦两种，如图2、3所示^[7]。

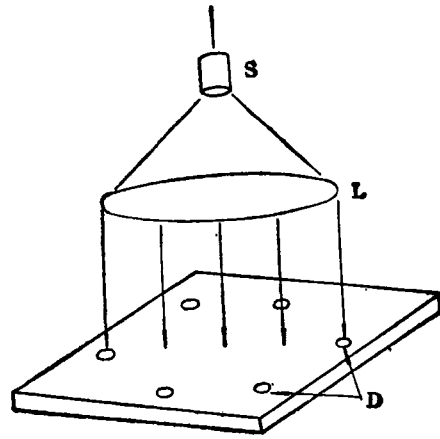


图2 非聚焦时钟结构

S为光源；L为透镜；D为探测器

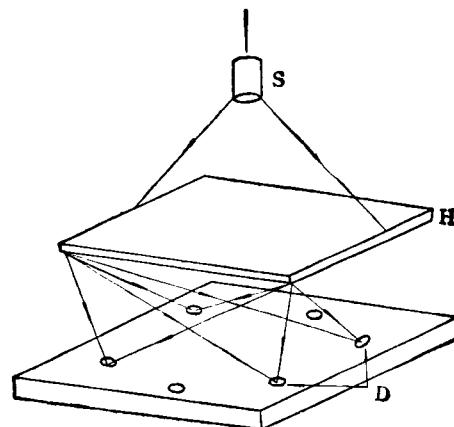


图3 聚焦式的时钟结构

S为光源；H为全息光学元件；D为探测器

非聚焦方式原则上可以全部消除时钟偏差,但光的利用率低,投射到探测器平面上的光只有少部分被探测器所接收。再者,未被探测器接收的那部分光将诱发杂散电信号,影响到芯片的正常运行。对于聚焦方式的互连,其灵活性很好,可以实现任何互连形式,但存在着准直问题以及光源谱带扩展所导致的汇聚能量的发散。

J. W. Goodman 通过一系列模拟系统研究了光学互连时钟系统的一些特性^[6]。文章指出,时钟系统如果说还存在某些偏差的话,那就是芯片上晶体管的微小偏差所造成的。

2. 数据传输问题

时钟问题主要出现在信号的长程传输情况中,而更一般的情况是数据群的传输问题。

在大规模集成系统中,芯片上的门与门之间的连接往往决定着运行速度的快慢,这种连接上的限制使得大量数据只能依次地或部分并行地处理,这样就造成数据堆积,运行速度减慢。而使用光学互连可构成多端点连接,在数据处理上可实现大容量、高速度。如图 4^[7]所示,在门阵列和互连元件的空间带宽允许范围内,芯片上可以进行大量的门器件之间的互连。

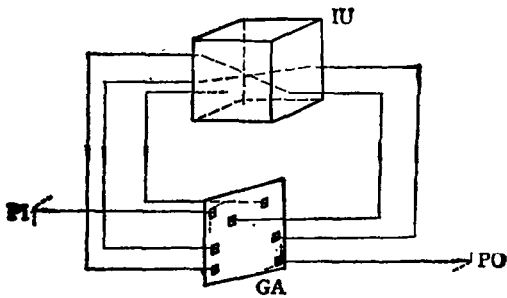


图 4 顺序光学逻辑系统的功能块示意图
IU 为互连单元; GA 为门阵列; PI 为平行输入;
PO 为平面输出

按互连方式,光学互连有两种基本结构:空间变互连和空间不变互连。

空间变互连的结构如图 5 所示。

全息片放于象平面位置上,每个门都对应

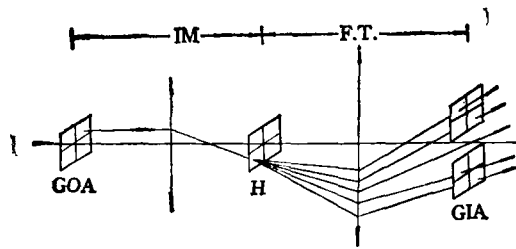


图 5 空间变互连系统

GOA 为门输出阵列; GIA 为门输入阵列; H 为全息片; IM 为成像系统; F. T. 为傅里叶变换系统

着一个亚全息片,每个亚全息图同所有门输入阵列相联系。亚全息图的个数等于门输出阵列元的个数 N ,整个全息片的空间带宽积为 N^2 量级,这种互连结构所连结的门器件的总数量一般为 10^{10} 。

空间不变互连的结构如图 6 所示^[8]。

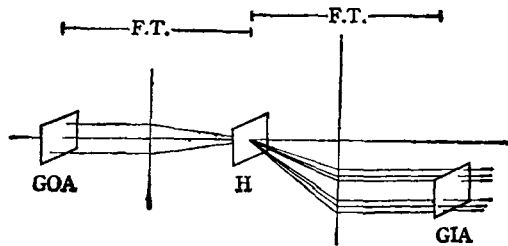


图 6 空间不变互连系统

GOA 为门输出阵列; GIA 为门输入阵列; H 为全息片; F. T. 为傅里叶变换系统

全息片放于傅里叶变换面上,它对应着所有的门输出。它的空间带宽积为 N 量级,此种互连一般可达到 10^8 量级的门器件。但是,在这种互连结构中总是有一些门器件处于不工作状态^[8],因此效率不高。

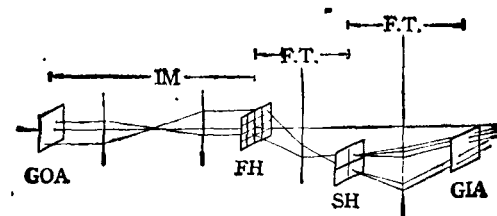


图 7 混合式的互连系统

GOA 为门输出阵列; GIA 为门输入阵列; FH 为第一全息片; SH 为第二全息片; IM 为成像系统; F. T. 为傅里叶变换系统

将空间变与空间不变两种互连方法结合起来,构成如图7所示的混合互连方式。

在这种结构中,全息片的空间带宽积可达 MN 量级,其中 N 为第一全息片的亚全息图个数, M 为第二个全息片的亚全息图个数。

采用光学互连进行数据传输,在原则上将不受端点数目和干扰的限制。Goodman描述了一系列的芯片间的光学互连技术^[9]。互连系统的光源是半导体激光二极管,探测器是半导体光电二极管,调制器则一般采用计算机产生的全息片。

光学互连作为克服电子计算机中电线路互连固有困难的一种手段,其前景是十分诱人的。但是,目前还存在着诸如元器件和技术方面的许多问题需要解决。例如,高效小型化的互连器件,灵活性好而又稳定的互连结构,最好能实现实时可控的可编程的互连方式。这些目标的实现,需要从事光学和计算机硬件的研究者的共同努力。

光学计算作为追求的新型计算技术而受到科学界的广泛重视。由于光学互连同光学计算中的算法密切相关,所以光学计算中的互连问题,除上述元件和技术方面的问题外,还依赖于光学计算的具体算法。但是,作为探索和知识储备,也应该在互连结构与方式,稳定性与灵活性等方面开展预研究。从另一方面看,光学互连的研究将会对光学计算中的算法研究提供启示。

- [1] K. C. Sarawat and F. Mohammadi, *IEEE Trans Electron Devices*, **ED-29**(1982), 645.
- [2] R. W. Keys, *IEEE J. Solid-State Circ.*, **17**(1982), 6.
- [3] J. W. Goodman et al., *Proc. IEEE*, **72**(1984), 850.
- [4] D. K. Ferry, *IEEE Circuits and Devices Magazine*, **7**(1985), 39.
- [5] P. R. Haugen et al., *Opt. Eng.*, **25**(1986), 1076.
- [6] B. D. Clymer and J. W. Goodman, *Opt. Eng.*, **25**(1986), 1103.
- [7] A. A. Sawchuk, *Proc. IEEE*, **72**(1984), 758.
- [8] P. Chovel et al., *Proc. 10th Optical Computing Conf.*, Soc. Silver Spring, (1983), 6.
- [9] R. K. Kostuk and J. W. Goodman, *Appl. Opt.*, **24**(1985), 2851.

金属和合金中非平衡固体相国际会议

金属和合金中非平衡固体相国际会议于1988年3月14—17日,在日本京都国际会议堂举行。这是日本金属学会举办的国际会议系列中的第五届会议。会议主席是京都大学金属科学及工艺系主任中村阳二(Y. Nakamura)教授。参加会议的共有200余人,来自15个国家。参加人数最多的是日本(160余人),其次是美国(6人)、中国(5人),其他代表来自澳大利亚、巴西、法国、西德、意大利、荷兰、瑞士、苏联、英国等国家。四天会议期间,共宣读了140余篇论文,大会组织了12个邀请报告,30个大会发言,其余则以大字报形式发表。会议讨论的专题有非平衡固体相的制备、相的形成和相图、相结构、物理及化学性能、准晶和高 T_c 超导体。制备方法专题中的“机械合金化”受到与会代表的重视,这是一种新的方法,有希望制备出块状的非晶态材料。清华大学柳百新作了题为《离子束混合导致非晶化及相关的结构相变》的报告。在理论研究方面,美国加州理工学院的W. L. Johnson提出根据“机械不稳定性”来确定合金系中非晶态形成的范围。荷兰知名学者A. R. Miedema用他七十年代提出的原子模型讨论了非晶态合金的热稳定性问题。美国卡尼

基梅隆学院的T. B. Massalski讨论了非平衡相与相图的关系。

在准晶研究方面,法国学者P. Guyot报告了在某三元合金系统中获得毫米量级的准晶。中国科学院物理研究所的赵见高发表了《准晶形成与磁性能的关系》的论文。会议期间发表的其他论文以研究三元合金系统的工作占多数。

高 T_c 超导也是这次会议的一个热门课题。北京大学尹道乐和日本筑波国立金属研究所的学者报告了用Bi和Sr代替元素Y而获得的超导体,其临界温度均在100K以上。南京大学研究生王浩代表他所在的研究组发表了关于性能良好的Y-Ba-Cu-O超导薄膜的论文。清华大学何豫生报告了《用超声衰减的方法研究氧化物高 T_c 超导材料的结构及稳定性问题》。

在会议期间,还组织了对所有论文的审稿。审核通过的论文,将在日本有关金属科学的期刊上正式发表。由日本金属学会组织的下一届国际会议将在1991年举行,主题是金属间化合物。由于中村阳二教授最近刚退休,想了解该会议的信息,可以与京都大学金属科学及工艺系的M. Yamaguchi联系。(柳百新)