

版权所有 © 《激光技术》编辑部

一、引言

随着科学技术的发展,人们对计算机的运算速度和存储容量提出越来越高的要求。而传统的冯·诺依曼方式的电子计算机结构已难以适应科学技术对计算能力日益增大的需要,光计算机原理思想的提出最终冲破传统的电子计算机结构,开创计算技术的新纪元。但是,新一代光计算机的诞生毕竟还有一段艰苦历程才能实现。而电子计算机中超大规模集成电路(VLSI)虽然在理论上门器件的线度可以达到 $1\mu\text{m}$,芯片的运算速度可以达到每秒 10^{15} 次,但实践中还远远没有达到这个水平。这个困难主要是由于在超大规模集成电路中电信号传输所引起的,即互连困难。其表现形式为:

1. 电互连中RC时间常数的限制。为提高超大规模集成电路的集成度,使芯片上所有元件的空间线度均缩小 α 倍。这样固然可以提高集成度,缩短门器件的开关时间,以提高芯片的运算速度。然而,器件空间线度的缩小,同时伴随着器件之间互连线的空间线度的缩小,与此有关的互连电阻将增大 α 倍,分布电容将减小 α 倍,这时电连接的RC时间常数不变,最终导致VLSI电路的运算速度取决于互连延迟。

2. 端址不足问题。随着VLSI集成度的提高,芯片上所需要外连的端址数也将增加,根据Rent定则^[1],所需外连的端址数与门器件数的 $2/3$ 次方成正比,而芯片周界能够提供的端址数与门器件数的 $1/2$ 次方成正比,因此随着VLSI集成度的进一步提高,芯片周界将没有足够的端点供信号输出、输入。

3. 时钟扭曲问题。由于VLSI计算机系统中,许多单元要求同步运行,这一要求通常由传送一个称为同步信号到系统的各个部分来实现的,即所谓时钟信号。在VLSI计算机系统中,时钟信号在传输中,由于各路的传输时间不同,将使系统的不同部分在不同时刻接受相同状态的信号,即产生所谓“时钟扭曲”的问题。

4. 信号在传输过程中的交叉串扰问题。由于互连线中来自电阻、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的传输率很快达到极限^[2],并且随着VLSI集成度和运算速度的进一步增大,将导致传输线所传输的信号交叉串扰的加剧,以至于芯片无法工作。

由此可见,采用新的技术,改进互连方式必将大大扩展超大规模集成电路的功能。于是1984年美国斯坦福大学J. W. Goodman教授首先系统地提出了在VLSI中采用光互连的设想^[3]。这个问题一经提出就受到了世界各国科技界的重视^[4~10],现已发展成为一个新的研究方向。

二、光互连的分类及进展

光互连研究中,根据光信息的耦合方式进行分类,可分为导波光互连技术和自由空间光互连技术两种。

1. 导波光互连

所谓导波光互连就是光信号沿指定路径进行传输,这个指定路径的折射率与周围环境的折射率不同,比环境折射率大。导波光互连又分为光纤光互连和波导光互连两种。

(1) 光纤互连 众所周知,光纤应用于长距离的光通讯在技术上已日趋成熟,VLSI光互

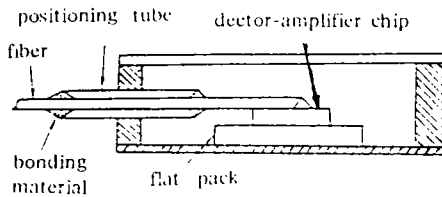


Fig. 1 Scheme for fiber-detector coupling in horizontal direction

连一经提出,人们自然会想到这两个问题的共性,而在此领域内进行了大量的工作。D. H. Hartman 采用光纤横卧对准方式实现了一个由单光源到五个探测器的实验方案^[11],其结构如图 1,光源为激光二极管,中心波长为 $0.82\mu\text{m}$,光纤直径为 $50\mu\text{m}$ 。输出端加工成 -45° 的抛光镜面,把入射光反射到位于下方的探测器上。由于光纤的圆柱外形具有一定的聚束作用,出射光束在探测器表面将聚成椭圆形光斑。这对缩小探测器面积,提高系统的操作速度十分有利。横卧式对准方式虽然提高了光纤与光探测器之间的稳定度,但是光纤在引入时占据了较大的芯片表面。因此, P. R.

Prucnal 等人研究了光纤直立的对准方式^[12],其结构如图 2 所示。这种结构使探测器可以在芯片的任意位置,而不需将外连信号送到芯片周界上,这样大大提高了互连的灵活性。然而,无论是横卧式还是直立式,一根光纤只传输一路光信息,这对提高互连密度不利。因此 1990 年,美国宾州大学的 S. D. Wu 等人提出了应用光折变光纤实现一根光纤多通道互连的设想^[13]。从上述几项研究工作可见,光纤互连在要求同时实现交叉互连情况下,技术上难度较大,为避免引起光信息过多的辐射损失,光纤不允许弯曲过大,这就需要较大的三维空间来保证光信息的耦合,增大了芯片封装尺寸和技术难度。尽管如此,光纤耦合的互连方式在允许有较大的互连尺寸的场合,如晶片与晶片之间,电路板与电路板之间等,仍不失为一种有前途的光互连方式,最近光纤光互连的研究大都集中在这一领域。

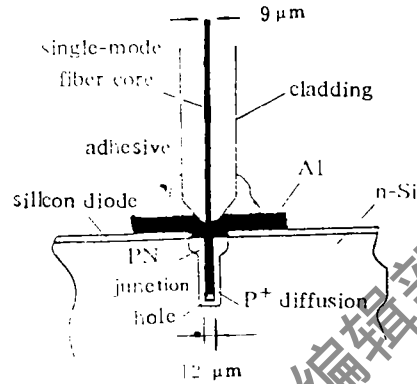


Fig. 2 Schematic for fiber-detector coupling in vertical direction

(2)波导光互连 波导光互连使光信息在波导内传输,波导紧贴在集成电路芯片表面,不需额外的三维空间,其工艺又与现有的 CMOS 工艺兼容,光对准也容易解决,因此,它的确是一种有前途的光互连技术。许多人在波导光互连的研究中作了工作,较为完整的是 1989 年由日本人 Y. Yamada 等人作的硅基底硅波导光互连工作^[14]。在硅基底上用活性离子蚀刻的方法制作 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 平面波导,光波导线路采用反射星状耦合网络。用混合集成的方法将光源、光探测器、光波导线路集成在硅基底上,实现了光互连的原理实验,其数据传输率和时钟频率分别为 340Mb/s 和 250MHz 。另外,1991 年美国加州物理光学公司的 R. T. Chen 等人提出采用聚合物波导实现光互连的设想^[15],所采用的聚合物材料为 pure photo-lime gelatin。这种材料的优点为:低损耗小于 1dB/cm ,较宽的透光频带 $10.3\mu\text{m} \sim 0.27\mu\text{m}$,很好的温度稳定性 $-100^\circ\text{C} \sim 180^\circ\text{C}$;他们采用局域敏化技术实现多通道互连。到 1992 年他们采用这种聚合物波导实现了数据传输率为 60GHz 的光互连实验^[16],整个互连距离为 55cm ,误码率小于 10^{-10} 。为在波导中实现动态互连,1991 年美国加州工学院 D. T. Brady 等人提出应用光折变材料制作波导实现动态互连的设想^[17]。他们所采用的材料为 LiNO_3 晶体,光全息记录波长为 5145\AA ,再现波长为 6328\AA ,TE 模的衍射效率为 5% 。从目前国际上研究状态来看,仍然处于原理实验阶段。

2. 自由空间互连

自由空间光互连是一种光信息在空间无导波方彙传输信息的互连,信号光在传播中由成象分束元件进行分束成象进行信息的耦合。根据成象元件可分为全息光互连和微透镜互连两种。

(1)全息光互连 由于全息光学元件具有能够在同一记录介质的体积内多路传输许多成象元素,而且有较高的衍射效率,因此,全息光互连成为自由空间光互连研究的主要方式。全

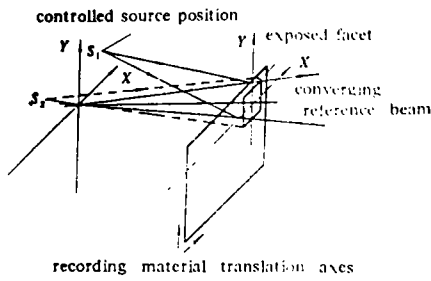


Fig. 3 Scheme of multi-facet holographic optical elements

息光互连中,全息光学元件的研制至关重要,R. K. Kostuk 和 I. W. Goodman 等人设计了一种具有很大大灵活性,可以有大量独立光信息传输的制作全息光学元件的方案^[18],其结构如图 3。制作时,用一会聚光束作参考光束,用一束由计算机控制的步进电机来控制光源位置其光强可调的光束作为物光束,依次在记录介质上记录多重面元全息图的子全息图,再现时用原参考光的共轭光反向照射该多重面元全息图的相应部位,就能在原物光束的光源处(即

芯片光探测器的位置)再现出象点,实现光学信息的传递。

光束与探测器的精确对准是全息光互连的技术关键,R. K. Kostuk 等人为解决这一问题,设计了一种对准直和波长变化不太灵敏的全息光互连方案^[19],其结构如图 4 所示。这种结

构的全息光学元件可以制作在同一玻璃基底上,因此,安装、固定对准比较方便,同时光束走向的空间高度得以减小,因此不失为一种较好的结构方案。全息光互连的研究大都是这种结构的变型。1991 年 H. J. Haumanm 等人采用类似的结构实现了板到板之间的全息互连^[20]。该实验的数据传输率为 500Mbit/s,通道数为 5,误码率小于 10^{-13} ,光损耗为 2.6dB,全息光学元件的记录波长为 488nm,再现光波长为 786nm。

由于计算全息图具有精确的扇进,扇出等特点,因而采用计算全息图作为互连元件也是光互连研究的一个重要方法,M. R. Feldman 等人在计算全息图光互连的研究中作了许多工作^[21,22]。

(2)微透镜阵列光互连 微透镜阵列光互连的研究是近两年由于

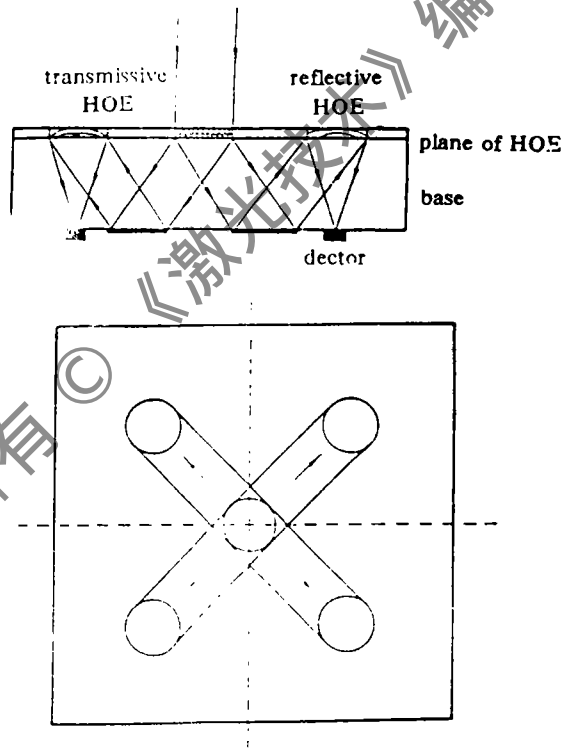


Fig. 4 A better structure of holographic optical element used in optical interconnection

