

光 计 算 技 术 进 展

王之江

(上海光学精密机械研究所)

现代科学技术的发展对计算工具提出了越来越高的要求,所需处理的信息量已远远超出现有电子计算机的能力。虽然电子计算机在科学和工程的计算与管理中起了极其重要的作用,但也有一定局限,特别是在多维信号的处理方面,速度太慢。这主要是因为,现有电子计算机中大多使用“串行”结构,存在冯·诺依曼“瓶颈”(Von Neuman bottleneck)问题;现有电子计算机中信号的传输速率受 RC 常数的限制,估计在大规模集成电路中只有光速的 0.5%,随着系统时钟周期的缩短和脉宽的变窄,迫使信号的上升和下降所需的带宽加宽,使处理机不得不使用体积大、成本高的同轴互连系统。突破当今电子计算机这些局限性的有效途径之一就是采用全新的光计算技术。虽然它目前只是一株刚刚破土的嫩芽,但已显示出极强的生命力。

光计算技术采用光波作信息载体。首先,信息的传播速度是光速。第二,光计算技术能充分发挥光的内禀并行性,光计算系统中的各部分,如输入/输出,数据的存储,数据的处理等,都能是并行的结构。第三,光模拟计算技术中,运算可随信号的传播同时进行,速度极高。在数字光计算技术中,采用光开关作为基本器件。目前光开关的开启时间已能达到 1 PS (10^{-12} 秒)以下,比目前已实用化的电子开关快 1000 倍。人们在理论上证明光开关的极限开启时间可以做到 FS (10^{-15} 秒)以下。光开关的研制只是刚刚开始,它有着巨大的潜力。第四,电信号在一定的距离内会相互干扰,而光信号可以无干扰地沿各自的通道传输。

鉴于光计算具有上述潜在优点,国际上在 10 多年前就已在多方面进行光计算的探索。初期的大量工作主要在图象的相干处理上,表明多种图象处理功能(如增强、消模糊、相减、识别、综合孔径雷达数据的处理、傅里叶变换、卷积、相关等)可以用各种滤波处理实现,但是相干处理的致命弱点是存在难以消除的相干噪声,这严重地限制了它的实际应用。后来人们发展了非相干处理,它利用空间光调制器和其它器件实现各种处理(模拟代数运算、方向滤波、图象编码等),它的特点是降低光速的相干性,抑制相干噪声。此外,还可以利用白光的多色性。但有些处理要求的光源太小或谱宽太窄,实际使用比较困难。另一方面,在非相干处理中负数运算和复数运算不能直接实现,非相干处理与相干处理相比灵活性较差。为了弥补这一不足,光电图象混合处理系统得到很大发展,并开辟了许多实际应用领域。它既在一定程度上发挥了光的并行性,同时又增加了系统的灵活性,提高了处理精度。但混合系统由于存在大量的光电信号互换,光电互换器件的响应速率较慢,光学计算的高速性仍然没有充分发挥,这还有待进一步研究。

在进行各种光学模拟信息处理研究的同时,非线性光学的发展促进了数字光计算技术的研究。最近几年多种数字光学逻辑器件和互连器件,如声光逻辑器件、集成光学逻辑器件、半导体空间光调制器、动态全息互连、集成光波导互连等,都相继研究成功。尤其是 1982 年,半

导体光双稳开关从低温转入室温下工作,它的开启时间已达到PS以下,开关功耗与电子开关相当,尺寸已做到 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 以下。目前数字光计算技术的发展极为迅速,数字光计算机的研究已受到各国的广泛重视。提高器件的各种性能,寻找更佳的器件和互连方法,探索光计算机的结构和算法已成为当前数字光计算技术研究的主要内容。

一、光计算器件

光计算器件主要有声光器件、集成光学器件、光双稳器件及实时空间光调制器件。从信息载体的物理属性来看,它们可以分为声光、电光和纯光器件。如果从另一角度来看,则可以分为高精度模拟运算器件和数字逻辑运算器件两大类。高精度模拟运算器件大多是有有一定功能的专用小系统,它的特点是速度快,一般可以比现有电子计算机的运算速度快三个数量级以上,精度一般与 8-bits 相当,常用声光和电光材料制作。数字逻辑运算器件的基本元件是光学双稳逻辑开关和以此构成的各种逻辑回路,它们种类较多,性能上的差别也很大,目前半导体光双稳开关的性能较好,是发展最快的领域。

(一) 声光器件

声光器件的基本原理是声光效应。当频率为 $2\text{KHz} \sim 20\text{MHz}$ 的超声波作用在声光介质上时,声光介质产生弹性形变,形成折射率周期性变化的相位光栅,光通过它时就产生衍射。当所加的超声波改变时,衍射效率也随之变化。因此只要改变所加超声波就可以改变它的光强输出。

可是,声光器件的应用研究直到 60 年代初才广泛受到重视。到 70 年代末和 80 年代初,声光技术在时间、空间积分器、相干外差检测、雷达信号处理、频谱分析等领域成功地获得应用。各种声光运算器件也相继研究成功。目前主要的声光器件有声光匣、二维声光空间光调制器、各种声光代数运算器等。声光器件的调制频率已达到了千兆 Hz 的量级。尤其是各种声光代数运算器件,它们已能实现各种主要的并行代数运算,例如:矢量-矩阵乘法,矢量-矢量内积和外积,二进制数字加减乘法等。它们具有并行高速的优点,对精度为 $1/256$ 的模拟运算,一般至少可以做 10^{10} 次/秒量级以上的加乘运算,有的甚至能达到 10^{15} 次/秒加乘运算。数字声光运算系统可对 32-bits 的二进制数做 533×10^6 次/秒浮点加、乘运算,与超级电子计算机相当。

从计算数学的理论可以知道,有许多计算问题可以归结为矩阵运算,如线性代数方程组的求解,最小二乘法问题和特征值问题,线性规划等,而这些计算问题在模式识别、数字图象处理、科学计算等各个领域中有着极为重要的应用。声光代数处理器的出现,为解决这类问题提供了强有力的工具。

目前声光器件正在向着更深入更广泛的应用方向发展,许多重要的问题还有待更进一步的研究。例如:怎样利用 $1/256$ 精度的声光器件构成任意精度的数值运算系统。在这方面已做了大量工作,基本上可以分为两类。其中之一是从二进制数的运算着手,它没有完全摆脱数字电子计算机中概念的影响,现在人们还只是进行一些理论探讨和原理性实验研究。另一类是从全新的观点出发,把器件结构和算法紧密结合,充分利用单个模拟声光器件的精度,采用保留进位的方法实现数字运算。数字式矢量-矩阵乘法器就是这种器件。但这种器件串起来作多次运算时,速度就大大降低,它需要和电光器件相配合。这就涉及另一个很重要的问

题: 声光、电光器件如何有机地结合到一起, 由于这两者各有其特点, 结合到一起还有一定困难。

(二) 集成光学器件

集成光学器件是目前光计算技术和光通讯技术中应用较广的一类电光器件, 而且仍存在着极大的潜力。现在, 集成光学技术已能把光源、光波导、电子器件、电光器件和接收器等都集成在同一片子上, 制成高速低功耗的各种运算器件和各种开关逻辑器件。集成光学回路中信号以光速传播, 有时运算操作是随着光的传播同时进行的, 而且集成光学器件可以和光纤耦合, 输入/输出极为方便。集成光学器件内部既可用串联方式, 又可用并联方式, 因此它可以充分发挥光的并行性这一优点, 现有的许多器件都采用单指令流、多数据流的结构。另一特点是它和电子器件交换信息极为方便。但也由于集成光学器件一般都是光电混合型, 电/光、光/电转换速度较慢, 严重地限制着器件向更高速发展。

集成光学逻辑器件的最基本元件是相干调制器和耦合波导开关, 它们的组合可以实现多种逻辑功能。这种逻辑门的时间延迟一般都比较短, 但由于运算结果要进行光电转换, 速度受到极大限制。如果需要构造一个器件去完成复杂的运算, 则应尽量减少电光互换的次数, 这样就可以减少转换时间所占的比重。Taylor 曾在 1978 年研制出逻辑门延迟为 20~40PS 的组合器件, 但目前实用化的光电互换器件的转换时间仍在 ns (纳秒 10^{-9}) 量级。

近几年来, 集成光学器件有了很大发展。1979 年, Goldberg 和 Lee 在实验室验证了一种集成光学半加器, 他们利用 LiN_2O_3 电光调制器件和 CdS 光探测器构成了整个逻辑回路。1982 年, R. G. Dokhikyan 等报道了 4-bits、调制速率为 200 MHz 的集成光 A/D, 但最后结果给出的是灰度码。1984 年 S. S. Karinski 等人报道了他们把灰度码转换成二进制码的逻辑回路和整个集成光电 A/D 的实验结果。现在集成光学器件不但有加法、减法、乘法、除法等, 而且有集成的光电矢量矩阵运算器件。并行电光、光电开关和耦合器件已得到广泛应用。集成的高精度模拟(与 8-bits 相当)矢量-矩阵乘法器采用全并行的结构, 对 $N \times N$ 维的矩阵和 N 维的矢量乘法运算, 只需 0.2ns 的时间就可以完成, 当 N 较大时电子线路就无法达到那样高的速度。矩阵-矩阵乘法也可以利用这种器件来完成, 所需时间为 $(0.2N)$ ns。另外矩阵-矩阵的乘法运算还可以用集成光学收缩列阵来完成, 由于这不是全平行的结构, 所以 $N \times N$ 维的两个矩阵相乘需 $[0.2(2N-1)]$ ns 但所用器件大大减少。

虽然在今后的光计算技术发展中各种逻辑开关会被光双稳器件代替。但是集成光学器件在开关之间和芯片之间的互连中将起极其重要的作用。

(三) 光学双稳性器件

光学双稳性是利用非线性光学效应与光学反馈共同作用产生的一种光学现象, 光学双稳性器件具有最基本的开关功能和逻辑功能。

最早在理论上提出光学双稳态是 1969 年, 即在 Fabry-Perot 腔(简称 F-P) 中放入饱和吸收介质, 该介质的吸收系数随光强的增加而减少, 从而获得光学双稳态。直到 1975 年, Gibbs 等人首次在充钠蒸汽的 F-P 中观察到了光学双稳特性。1982 年室温下的半导体双稳器件研制成功, 由于这已接近于实用, 因而推动了光学数字计算技术的发展。

在半导体材料中, 可用于制作光双稳的材料有 InSb、GaAs、InAs、CdHgTe、InP/InGaAsP、GaAs/AlGaAs、Te 等。这些材料都具有较大的非线性效应, 可集成, 且可以和电子器件方便地

集成在一起。特别是 MBE (分子束外延) 技术的发展, 研制出了量子阱结构器件, 使原来只能在低温下才能观察到的激子效应, 在室温下也能观察到, 从而使半导体光双稳器件能在室温下工作。半导体光双稳的响应速度都很快, 据说现已做到开启时间等于 0.1PS。

由 GaAs/GaAlAs 制作的多层量子阱是一种较好的光学双稳材料。多层量子阱的层数一般为 50 至 300, GaAs 或 GaAlAs 的层厚为 50 至 100Å。层数增加可以使吸收峰向短波长方向移动, 用此方法能使半导体双稳器件同 GaAs/GaAlAs 激光器的出射波长相匹配, 这就可用半导体激光器代替可调谐染料激光器作光源, 实现光双稳操作。

GaAs/GaAlAs 多层量子阱器件的开关能量一般为几个 $fJ/\mu m^2$, 开关时间可以做到 PS 量级, 是目前总体性能最好的光双稳器件。它可以很方便地集成。国外已制成 100×100 的逻辑开关阵列, 每个元件的尺寸为 $9 \times 9\mu m^2$, 这种阵列的工作频率为 10GHz, 处理信息的速率为 10^{-14} 秒, 制造这一阵列的科研人员认为 1000×1000 的阵列的制造也是较容易的, 因此更高速处理信息的数字光学元件是可以得到的。

另一种较为重要的光双稳器件是由 InSb 材料制成的, InSb 光双稳态和多稳态现象最早是在 1979 年观察到的, 当时是把它放入 F-P 中, 以 CO 激光器作光源, 波数范围为 $1930cm^{-1}$ 至 $1660cm^{-1}$ (InSb 的吸收带在 $5^\circ K$ 时为 $1900cm^{-1}$, $77^\circ K$ 时为 $1840cm^{-1}$)。当时 InSb 薄片的厚度 $< 500\mu m$, 所需输入功率为几十个毫瓦, 工作温度为 $77^\circ K$ 。另外也有人用共振焦耳热效应(加磁场)在 InSb 材料上观察双稳现象。近几年来, 用 InSb 已制成了 $10\mu m$ 波长的双光子吸收(可在室温下工作)的开关器件, 并用它制成了世界上第一个由光回路构成的可编程数字计算系统。

以上两种器件都属于所谓的无源半导体光双稳器件, 另外还有一类半导体光双稳器件——有源光双稳器件。它和无源光双稳器件相比有如下特点: 1. 它的阈值光功率比较低(同样可以是非相干光); 2. 可以移掉维持光束; 3. 由于采用了放大器, 克服了无源器件从逻辑门输出功率低而不能很好驱动下一个门的潜在困难。但有源光双稳器件的速度一般都低于无源光双稳器件。

除半导体光学双稳器件外, 还有许多其它光学双稳器件, 半导体光双稳的性能占明显的优势, 是目前发展极快的一个领域。在此还值得提一下的另一种材料就是有机材料, 它的性能大多优于其它材料, 但唯有寿命短这一缺点限制了它的发展, 如果能解决寿命问题, 它也许会优于半导体光双稳材料。

(四) 空间光调制器

无论是数字光计算还是模拟光计算, 空间光调制器都起着极其重要的作用。早期的空间光调制器主要用于模拟光学处理(屏幕显示、非相干-相干光转换、图象输出、空间滤波、特征提取、实时编码等)。随着光计算技术的发展, 空间光调制器已用作互连器件和数字运算器件。但至今为止, 各种实时空间光调制器都不能令人满意, 存在着各种缺陷。

空间光调制器作为光学处理的实时器件, 从 60 年代后期起, 受到各国学者的广泛重视。国外已制成多种实用器件, 自 80 年代以来, 空间光调制器作为光计算系统可能的重要互连和运算器件得到了迅速发展, 该类器件的研究已与微电子技术相结合构成各种专用器件, 它们能发挥光计算技术的并行性与微电子技术的高度灵活性, 但响应速度都还太慢。

近几年发展的一种微通道板的空间光调制器是目前较好的一种器件。它由一个光阴极和

一个微通道板及电光材料构成。它既可以作暂存用,也可以作多种图象处理,如位相调制器、振幅调制器、强度调制器、傅里叶平面上的滤波器、输入平面上的调制器和空域处理。它的分辨率可达20条/毫米,微通道板的增益可达 10^4 。它是一种较好的弱光工作空间光调制器,灵敏度可达 $1\text{nJ}/\text{cm}^2$ 。

另外一种是全内反射电光空间光调制器。它是一维调制器,有5000个可分辨点。其速度主要受驱动扫描电子线路的限制,带宽达到32MHz(每个通道2MHz,有16个通道),每个象素点可以随机输入,目前它已广泛被用于激光印刷。还有一种就是硅基底的电寻址空间光调制器,它由可形变反射器件构成,是 128×128 列阵,每个占 $51\mu\text{m}^2$,存储时间为 $0.5\mu\text{s}$,它可以用作滤波和物平面信息处理。

除了以上一些空间光调制器以外,最近还出现了可变倍率和可旋转图象的空间光调制器及光致折射材料制成的光-光空间光调制器。但总的来说各种器件的响应速度太慢,电光型的还只做到 μs 量级,光电型的更差,只达到30ms;线性范围也太窄,目前最好的器件只达到20:1,分辨本领有待进一步提高。但在现有器件上大幅度提高性能比较困难,因此发展空间光调制器的主要方向是寻找性能更好的新材料,制作新的空间光调制器,提高响应速度和分辨率及扩大线性范围。

以上四种器件是光计算技术中最基本的器件,目前人们正努力提高这些器件的性能,扩大它们的应用范围。与此同时,新的器件还在不断出现,但总的发展方向是不变的,即高速、低功耗、高集成度(或高分辨率)。

二、光学互连

光学通讯互连是光计算技术的重要组成部分。现代电子计算机的经典通讯互连方式是通过寻址的方式把逻辑单元和存储单元连接在一起,每个逻辑单元一次只能寻址一个存储单元或其它器件,互连数和互连时间就有冲突,为了尽量简化互连,就必然降低速度。光学互连正是为了克服这一缺陷而发展起来的。光具有内禀并行性和无串音通讯这两大优点,因此光学逻辑器件可以同时寻址多个单元,一个单元又可以同时被其它几个单元寻址,利用自由空间和全息动态可编程器件,还可以实现动态可变互连。目前光学互连的方式一般可以分为自由空间互连、波导互连和全息动态可变互连。

自由空间互连就是利用各种折反射器件改变光在空间的传播方向实现器件之间或逻辑元件之间或芯片之间的光学连接。目前用于这种互连的器件大多是经典光学元件(或全息元件)和空间光调制器。经典光学元件就是通常所用的球面镜、棱镜、柱面镜、偏振片、波片等。

1983年,Hiroaki Tajima等人研制出一种能把多个处理器和多个存储器系统连接起来的高速互连系统。它仅由一个光学柱面镜构成,极其简单。今年年初Adolf W. Lohman建议用棱镜和透镜实现数字式光学快速傅里叶变换系统中的互连,其中两束光的置换也可用双折射棱镜及波片代替。

经典光学元件成本都比较低,可传输的信息量极大,但难以集成。它的作用是对空间传播的光束进行位相调制。实时空间光调制器也同样能达到这一目的。经典光学元件适用于芯片之间的连接,实时空间光调制器在互连中则具有更广的应用范围。

波导互连主要是利用光波导和光纤实现光计算器件之间的连接。根据所用的材料,现有

的光波导有：铁电体上溅射 III-V 族半导体、在 SiO_2 基底上热溅射玻璃波导等。其中 GaAs 最有可能制成高集成度的互连器件，并有可能和目前正在发展中的 GaAs 大规模集成电路相结合形成超高速光电混合系统。由于在 LiNbO_3 上较易制造复杂结构，所以现在用得较多。波导互连的一个限制就是它不能严重弯曲，否则将增加损耗。

目前光波导是芯片内器件之间连接的重要器件，但有些问题还有待更进一步研究。其中最主要的就是如何使光波导、光双稳器件和电子器件集成到芯片上。

光纤和光波导的原理基本相同，但光纤更适合于处理器之间的通讯，因为处理器之间的互连数目相对来说比较少。互连带宽比较宽。尤其是远程处理器之间信号的传送，光纤更能显示它的优点。

全息动态可变互连就是将所有器件中的任何一个输出传送至任一个器件的输入，它是光学互连中一个极其重要的发展方向。用于这两种互连的器件主要有计算全息和实时全息元件。

近年来，另一种引人注目的新元件，即动态可编程互连器件研制成功，它是可编程全息互连器件。它主要是利用光致折射材料制作的空空间光调制器件。这种实时全息材料可以擦除后重新编程。只要用光波均匀照射在上面，光强达到一定值，原来的全息图就被擦除。现在需要研究的关键是寻求恢复时间更短的新材料，希望它存贮密度高，并有大的电光(或光光)系数等特性。

总之，光学互连是光计算技术的关键。尽管目前已有多种互连器件，但对它的研究还只是刚刚开始，有必要寻求新的、更佳的互连器件和互连方法。

三、光计算机结构和算法

光学计算机结构可以分为两大层次。首先是整机结构，它以基本的子系统或有一定功能的信息处理单元为基元，以最优的方式相配合，完成光学计算机所应完成的各种功能。其次是基本器件和专用子系统的结构，它以光学逻辑门和互连器件为基元，能完成某些独立的简单功能或这些功能的组合。

光学计算机结构和电子计算机相比应具有许多特点：1. 光学计算机的结构要充分发挥光的并行性；2. 光学计算机采用光学无串音互连；3. 光学计算机的结构和算法的研究合为一体，结构和算法相互依赖，相互影响，相互促进和发展；4. 光学计算机中应使用光学并行存储技术，存取速度应比目前发展的光学串行存储技术——“光盘”快几个数量级。

(一) 光计算机的整体结构和算法

光计算机的整体结构和算法必须充分发挥光计算的优点。到目前为止，光计算机的整体结构思想还很模糊。如何发挥光的并行性？是否有可能完全发挥光的并行性？在哪一层次开始实现并行处理？这些问题都还有待解决。

近年来，国际上极为重视光计算机结构和算法的研究，曾有不少科研人员对此问题作过探讨，提出过一些设想。例如：有些人认为可以模仿人脑的一些功能来设计光电混合型计算机的结构，他们指出通常计算机不过是模仿人脑的计算能力，而光电混合型计算机将在此基础上具备更强的信息处理能力和更高的计算速度。在这种计算机中，存储相应于人脑的记忆，输入图象信息的器件对应人体的感官，它的存取过程相应于人脑的关联回忆，他们还认为这种光电

混合计算机必须具备高级的智能,如图形识别、信息提取、学习、模仿、推理等功能。还有一些人认为首先用全光的方法模仿并行数字电子计算机的结构,然后在此基础上作适当的改进。这种想法有一些优点,可以在一定程度上发挥光的并行性,但它没有充分利用光的并行性,没有摆脱数字电子计算机的影响。

(二) 专用子系统的结构和算法

最典型的专用子系统是代数运算子系统,它包括各种矩阵乘法系统和线性微分方程求解系统。其中矩阵运算系统又有许多种,例如:矢量——矩阵运算系统,矩阵——矩阵运算系统等。矩阵运算系统的共同特点是利用线性器件构造出高精度数值运算的专用子系统,原理比较简单。这些子系统与现有电子计算机配合后可以大大提高运算速度,实时地处理电子计算机所难以解决的问题。

另外还有一些专用子系统,它们主要用于逻辑运算。其中有 Alan Huang 设计的逻辑功能块和无透镜阴影逻辑运算子系统等。Alan Huang 的逻辑功能块由多个与门构成,制造比较简单,它可以对16种逻辑运算实行编程。这种功能块既需输入信号,还要互补信号。如果用两个这样的器件就可构成功能/互连器件。无透镜阴影逻辑运算子系统也同样可以实现图象的并行逻辑运算,且整个系统比上述功能块简单,但它的缺点是要对输入图象编码。

目前这些专用子系统已大量用在工业和国防超高速自动控制 and 实时图象识别及多维信号的处理之中。它和电子计算机相结合可以弥补电子计算机的某些不足,很有发展前途。

四、对我国发展光计算技术的建议

数字电子计算机的问世曾对科学技术产生了巨大的影响。数字光计算机能使计算速度再提高4~6个数量级,可以预料它的出现必将对科学技术产生更深刻的影响。现在世界上各大国都开始重视光计算技术的研究。在美国,Arizona大学成立了光学回路公司,美国国防远景规划局在发展光计算、超大规模集成电路的光互连、高性能光电子器件等方面都有重要的计划。在欧洲,英国、比利时、西德等制订了欧洲光双稳联合研究计划。研究工作分别在 Herriot-Watt 等8所大学进行。日本也成立了由75名成员组成的光计算组织。世界上23位光计算专家预言,速度大大超过电子计算机的第一台光计算机将在1995年研制成功。

我们应密切注意这一动向。光计算技术与电子技术相比有许多优越性,它所涉及的高技术很多,还有一些重要问题尚未解决。它常常跨越多个学科,与最基本的材料科学息息相关。我国在光计算材料和器件方面有一定基础,当然与国际上先进国家相比还有一定差距,因此首先应在现有基础上加强材料和器件的研究,尤其是半导体光双稳器件、集成光学器件、动态互连用全息材料等,它们是发展光计算技术的基础。

从短期实用的角度来看,在研制基本材料和器件的同时,应着重开展以下三方面的研究:

1. 发展有广泛应用前景的各种高精度光学模拟代数运算系统和光学傅里叶变换系统,这些研究国内开展得比较早,有一定的技术基础,可望在5~10年后投入应用。

2. 研制大规模集成电路中的动态可变光学互连器件。随着计算机运算速度的提高,这种光学互连器件将在大规模集成电路中充分发挥它的特长。目前国外已在这方面做了相当多的工作,我们应紧紧跟上。

3. 光纤通信中信号的处理现在大部分用电子器件来完成,这就需要电光和光电转换。如

果把信号的处理器件换成集成光学元件,则一方面可以利用光的并行性,另一方面有可能省去电光互换,提高信号的处理速度,简化信号处理系统。

从长远的目标出发,还必须加强光计算机结构和算法的研究。虽然室温下光双稳器件的研制成功使人们清楚地看到,光计算机的研制成功已为期不远,但是光计算机中采用光信号,必须有自身的结构和算法,以充分发挥它的特点。目前国外已把这一研究课题放到极其重要的位置,他们认为从现在起,随着技术上的进一步发展,光计算机是否能研制成功,就看新结构和算法何时出现。国内在这方面也已开始起步,但这一课题涉及的学科较多,特别是哲学、逻辑学、计算数学、电子计算机结构以及物理学的某些分支学科,应该注意培养新生力量,吸收多方面的人才。