

# The Development and Trends of Photonic Computers

Weiyue Zhang<sup>1</sup>, Wenchan Dong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>No. 1 Middle School Affiliated to Central China Normal University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Email: 851175945@qq.com

Received: Jan. 7<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 21<sup>st</sup>, 2019; published: Jan. 28<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Firstly, we analyze the current predicament of the development of electronic computer, and then propose the performance advantages of photonic computers compared with traditional electronic computers. Then we introduce the related concepts and research status of photonic computers, and analyze the development trends of photonic computer research in the future.

## Keywords

Photonic Computers, Photonic Components, Integrated Optical Circuit

---

# 关于光子计算机的发展概况及趋势

张惟玥<sup>1</sup>, 董文婵<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华中师范大学附属第一中学, 湖北 武汉

<sup>2</sup>华中科技大学, 光学与电子信息学院, 湖北 武汉

Email: 851175945@qq.com

收稿日期: 2019年1月7日; 录用日期: 2019年1月21日; 发布日期: 2019年1月28日

---

## 摘要

本文首先分析目前电子计算机发展存在的困境, 从而提出光子计算机相对于传统电子计算机的性能优势, 再介绍光子计算机相关概念以及研究现状, 分析了光子计算机研究未来的发展趋势。

## 关键词

光子计算机, 光子元件, 集成光路

---



## 1. 引言

随着科技发展的日新月异,人们对计算机的运算速度要求越来越高,而传统的电子计算机受限于电学带宽难以实现运算速度的突破,发展已经面临严峻挑战[1]。过去数十年,随着摩尔定律的发展,半导体芯片制造工艺在逐步提升,从1971年英特尔公司实现第一个微处理器时采用10微米的工艺,到2015年商用的14纳米工艺,晶体管的尺寸已经缩小了三个量级。随着尺寸进一步减小,一方面制造工艺越来越复杂,导致发展速率放缓;另一方面晶体管之间的铜互连线尺寸和间距随之减小,从而引入更大的电阻和电容,限制了传输速率,增大了功耗。事实上,电子微处理器的主频近十多年已经没有什么明显提升,核间、芯片间等短距电互联如今也受到了带宽和功耗的限制,特别是在下一代数据中心和百亿亿次级超算系统中,形势更加严峻[2]。

为了突破电子计算机发展瓶颈,实现计算机低功耗、高性能的运算需求,人们将研究方向转向了光子计算机[3]。光子学技术在计算机中的应用包含两个层次,一个层次是利用光子作为传输信息载体的光互连技术,另一个层次是直接在光域实现信息的处理和运算[4]。利用光互连实现了片上信号处理模块与存储模块的数据传输,从机架间的光学连接,到板间,再到芯片间,甚至芯片内,光互联向越来越短的连接尺度发展已经成为必然趋势。这也意味着在光传输和电处理之间将会有更频繁的光/电或者电/光转换,这样的转换又会带来额外的能耗与速率瓶颈,因此有必要直接采用光运算来实现信息处理。本文介绍的主要是在光域实现信息处理和运算的光子计算机。

光子计算机中采用光子作为传输信息和处理信息的载体,主要因为光信号自身具有超高速、大带宽、抗干扰等优势[5]。相应的光子计算机相比于电子计算机的性能优越性主要体现在:1)实现超高速运算,由于光子的传播速度是电子速度的千倍量级,光子计算机有潜力实现比电子计算机快千倍的运算处理速度;2)实现并行处理,利用波长、相位、偏振态等多维度并行处理,有潜力实现大容量处理器;3)光路可交叉互连,不同光信号间彼此没有干扰;4)光传输和光交换时的能量消耗和发热量较低,相比于电子计算机具有低功耗的优势。光子计算机的诸多优势使其近年来成为研究热点,引起人们广泛关注。

本文首先介绍了光子计算机的相关概念,包括逻辑功能的产生机理、集成平台的类别以及相应特点,分别从光子计算机的整机角度和功能器件角度分析了研究现状,然后提出了光子计算机未来的两大发展趋势:借鉴传统电子计算机思路和借鉴光学神经网络思路,最后进行总结和展望。

## 2. 光子计算机概况

### 2.1. 光子计算机相关概念

光子计算机中采用光信号进行数字运算、逻辑操作、信息存储和处理的新型计算机[6]。光子计算机的逻辑操作主要包括与门、或门、非门等基本逻辑功能,以全光全加器和全减器、全光编码器、全光数字选择器为代表的组合光子逻辑器件,以及另外一些实现全光缓存器、移位寄存器以及各种类型触发器的时序光子逻辑器件。逻辑功能的产生方案按照机理主要分为三类:光学非线性效应、热光效应或电光效应、线性逻辑。1)光学非线性效应主要是在不同非线性器件中基于不同信号间的相互作用来实现不同逻辑功能,主要的非线性器件包括高非线性光纤、半导体光放大器、周期极化铌酸锂波导等。这些器件包含非常丰富的非线性效应,可以针对不同调制格式实现快速运算。但基于非线性的光学逻辑目前最大

的劣势在于非线性效率一般比较低, 会导致较高的功耗, 因此也阻碍了基于非线性效应的复杂逻辑功能的实现。不过, 通过优化器件结构, 选择非线性系数更高的新材料等方法, 有望实现运算功耗的降低。2) 基于热光效应或者电光效应来控制微环谐振峰的漂移, 改变光信号的传输路径, 相当于形成了光开关, 可以实现不逻辑功能, 也称为“导向逻辑”。导向逻辑的特点就是探测光只需要在微环中传输, 没有非线性导致的损耗, 各个开关可以同时工作从而没有开关时间的累积, 因此, 导向逻辑可以实现相对较大的器件规模, 但同时运算的信号速率受限于微环的品质因子。3) 利用线性光学效应实现不同的逻辑功能。要求相互作用的信号之间存在并且能够保持相干的特性, 利用信号间的干涉作用实现各种逻辑功能。线性逻辑的优势在于损耗非常小, 并且没有导向逻辑那样的速率限制, 在一些结合短距离互联结构中, 如能获得稳定的干涉性能, 发展前景良好。缺点在于灵活性较差, 往往只能处理特定的调制格式信号。

集成光路是实现光子计算机的基石。集成光路借鉴了集成电路的思想, 目的是将多种传统的分立光学器件微型化后做在一块芯片上。集成光路相比于由分立元器件搭建的光路具有体积小、性能稳定的优势。集成光路包含很多光波导器件, 可分为无源器件和有源器件两大类。无源光波导器件主要包括棱镜、透镜、反射镜、光分束器和检偏器等波导几何光学器件和波导型定向耦合器、滤波器、光隔离器, 衰减器、光开关等; 而有源光波导器件主要包括激光器、电光调制器和光电探测器等。

集成光路可以根据工艺平台分为无源平台和有源平台两种。无源平台主要以硅为代表, 近年来硅基光子学迅猛发展主要因为硅既是光子材料, 也是电子材料。利用硅作为集成光器件衬底, 一方面可以利用现有的集成电路工艺制作光器件, 有助于降低成本; 另一方面, 硅材料对通信波段的光吸收很小, 有利于降低器件损耗, 且硅和二氧化硅材料之间的折射率差大, 增强了光器件对光场的限制, 有助于减小硅基光集成器件尺寸, 从而提高芯片的集成密度。光与电通过兼容的互补金属氧化物半导体制造工艺相结合, 有望充分发挥两者的优势。但硅本身也存在劣势, 一方面由于硅是间接带隙材料, 难以直接制作出高效光源; 另一方面由于硅晶体中心对称的结构, 难以产生线性电光效应, 因而无法实现传统电光调制器。有源平台主要以磷化铟为代表, 优势在于易于实现光信号产生、放大和探测。近年来, 以欧洲磷化铟基集成器件联合研究平台为代表的众多研究机构致力于对磷化铟基单片集成器件的研究, 并通过建立元器件库来制定标准化的单片集成器件制作工艺, 简化设计, 采用多项目晶圆流片方法制作大量不同的集成器件, 从而大大降低了每个磷化铟基集成器件的制作成本, 使得磷化铟基集成器件越来越吸引研究人员的关注。

## 2.2. 光子计算机研究现状

早期, 美国贝尔实验室科学家宣称实现了世界上第一台光学处理机, 该处理机由四个阵列构成, 每个阵列包含 32 个光学开关, 这些开关类似于电子集成电路中的晶体管, 实现开启和关闭的作用, 这项研究工作验证了利用激光进行通信、而用光开关进行信息处理的可行性。此外, 该光学处理机可以同时处理多个光束, 反映了光学计算机非常适用于并行处理。

上海大学计算机工程与科学学院金翊教授团队研发的三值光学计算机开创了以计算机原理和光特性为出发点, 以构造整机为目标, 以应用为动力的研究分支[7]。三值计算机中存储和运算数据具有三值性, 光的物理状态以“暗态”和“亮态”来表达, 其中“亮态”又分为两个正交偏振态。2017年, 该团队首次实验完成了三值光学计算机原型机的并行运算测试, 标志着光学计算机在高性能运算上的优势与潜力[8]。

此外, 南加州大学近年提出了“光学图灵机”的概念, 目标是针对高速光通信链路中的处理需求, 开发超高速的线上光学运算, 实现包括数据包处理、网络安全、大数据过滤等功能。而美国德克萨斯大学奥斯汀分校在基于有源和无源纳米光子器件实现光运算和光互联进行了相关研究, 设想芯片内和芯片

间的光互联, 构想包含了集成的激光器、调制器阵列、探测器阵列、片上路由、基于光逻辑的处理器以及电学存储节点的芯片, 相对于电学逻辑, 没有开关时间的累积, 整个计算过程就在光的传输过程中完成。

除了上述研究者从构造整机的角度所做的研究工作, 在光子计算机所需功能性器件的研究方面也正朝着高速、多功能、小尺寸、低功耗等方向发展[9]。在模拟运算研究方面, 以光学微分器和积分器为代表, 可以实现工作带宽高达 THz 的超快运算。目前人们主要利用小尺寸的集成器件比如微环和微盘等来实现模拟运算, 采用热极或者电极对集成器件进行调节, 实现微分方程求解以及实现希尔伯特变换等。

在数字运算研究方面, 从功能的角度而言, 早期主要是利用分立的半导体光放大器中的四波混频、交叉增益调制等非线性效应实现光闸, 实现基础逻辑功能[10]。随着通信网络对容量的需求急剧增长, 基于光信号的各种新型调制格式应运而生, 一方面为了实现对调制信号的直接处理, 围绕光信号的幅度、相位和偏振等维度的逻辑运算处理方案也开始被广泛研究; 另一方面人们开始追求基于单个逻辑器件实现可重构逻辑功能。而近年来伴随着人工智能的热潮, 实现例如全光可编程逻辑阵列等可编程数字运算功能开始逐渐成为研究目标。而从器件整体角度而言, 早期研究者主要基于分立器件构建逻辑运算方案, 近年来已经逐渐被基于集成平台的方案所取代, 并有潜力实现大规模集成。

### 3. 光子计算机未来趋势

#### 3.1. 借鉴传统电子计算机思路

国内外研究者在开发光子计算机上的主流研究思路就是通过借鉴电子计算机中已经成熟的结构, 利用光学逻辑元件取代电子逻辑元件来构建光子计算机。通过光纤传导结合光子芯片运算, 减小光电转换过程带来的时间消耗和能量消耗; 还可以对光波长、频率、振幅、相位、偏振态等多维度加载信息, 用以表示更多的数据特征, 从而进行比二进制更复杂的运算, 比如多值运算。多值运算通常可以采用多进制相移键控调制格式作为运算信号, 一方面具有较大的容量, 一方面能够避免幅度相关的处理, 积累幅度噪声; 此外, 光运算需要用到非线性混频效应, 能够保留信号的相位信息, 并且支持超快的工作速率; 并且相对于电学逻辑, 没有开关时间的累积, 整个计算过程就在光的传输过程中完成。这种研究思路充分利用了光的并行性、超高速、低功耗特性, 在未来光子计算机研究领域仍具竞争力。基于该思路的光子计算机发展有赖于光子集成技术的发展, 包括单片集成和混合集成技术, 涉及到光源、线性以及非线性器件, 从而保证外界干扰带来的噪声等影响达到最小。

#### 3.2. 借鉴光学神经网络思路

人工智能是近年来非常火热的话题, 其核心就是机器学习, 神经网络是实现机器学习的算法之一。得益于日益成熟的集成光子技术, 光运算与光学神经网络相结合的研究进展较快, 目前已经在语音识别等领域取得了初步的成果。因此, 借鉴人工智能中的光学神经网络结构, 以全新的并行处理为基础结构构建光子计算机将会是有潜力的研究方向。区别于传统的冯·诺依曼结构是为顺序串行处理设计的, 基于光学神经网络结构的光子计算机研究将充分利用光的并行传输特性, 很有潜力实现性能远远超越电子计算机的新型光子计算机。

### 4. 结语与展望

从以上光子计算机研究意义和研究概况的介绍中可以看出, 该领域正在蓬勃发展, 研究者以运算速度更快、能量利用更高效、器件集成度更高为研究方向。光子集成技术的日益成熟以及光互联迈向更短距离都给光子计算机的发展迎来新的机遇, 一方面有源和无源集成平台的快速发展有利于基于集成器件

来获得更小的器件尺寸、对环境更稳定的器件性能, 从而取代基于光纤或者自由空间的光运算; 另一方面光在多维度并行处理方面的优势使得基于光信号有潜力实现低功耗的光学运算。因此, 通过充分利用光本身的优势有潜力实现低功耗、高性能的光子计算机, 光子计算机一旦研制成功, 将开启崭新的运算时代。

## 基金项目

光逻辑阵列相关课题得到国家自然科学基金重点国际合作项目的资助。

## 参考文献

- [1] 龙品. 光学计算机的发展及电子计算机的比较[J]. 电气应用, 1988(6): 50 + 34.
- [2] 侯国宁. 计算机科学与技术的发展趋势探析[J]. 中国管理信息化, 2015(10): 200.
- [3] 李博. 光子计算机的发展状况[J]. 福建电脑, 2013, 29(10): 77-78.
- [4] 刘伟. 浅谈光子计算机的现状与发展[J]. 科技创新导报, 2011(34): 10.
- [5] 杨燕妮, 刘鹏, 李川江. 浅谈光子计算机[J]. 科技视界, 2016(7): 136-137.
- [6] 比超级电脑快一百万倍的“光脑”来了[J]. 中国总会计师, 2016(2): 156.
- [7] 金翊. 走近光学计算机[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2011, 17(4): 401-411.
- [8] 杨加龙, 金翊, 欧阳山, 等. 三值光学计算机解码器的通信系统[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(2): 20-34.
- [9] 任浩辰. 光子计算机探析与构想[J]. 中国新通信, 2017(23): 26-27.
- [10] 陈少武, 等. 面向硅基光互连应用的无源光子集成器件研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2009(27): 153-156.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [oe@hanspub.org](mailto:oe@hanspub.org)