

光计算技术与产业发展研究报告

(2023 年)

中国信息通信研究院技术与标准研究所

中国信息通信研究院泰尔系统实验室

2023年10月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。

前 言

随着人工智能、大数据和云计算的快速发展，超高速和高能效计算的需求呈指数级增长。现有冯·诺依曼架构下的传统电子信号处理器难以同时实现高算力和低能耗，而光计算可突破电子计算瓶颈，成为未来探索的重要方向。光计算，是采用光作为信息处理的基本载体，以实现信息处理或数据运算的新型计算体系。光计算能够发挥光的高带宽、低能耗、抗干扰、并行等优势，适合处理人工智能、信号处理、组合优化等复杂特定任务，是新型计算架构的重要发展方向。

本报告的研究基于光计算的广义定义，从算力时代所面临的主要需求和挑战等出发，围绕经典光学与量子光学两大路线开展光计算技术与产业方面的发展现状与趋势研究。当前光计算仍处于发展的初级阶段，预计其发展可分三阶段逐步推进，当前需继续推进解决技术、产业、应用等三方面问题，建议我国从攻克关键技术难题、推动全产业链发展、开展新应用探索试点三方面寻求突破，推动实现高性能与低能耗的算力基础设施建设，助力我国数字经济持续高质量发展。

光计算技术与产业发展处于起步阶段，对于关键技术、产业发展、应用场景等方面的研究和探讨还有待进一步深化，后续中国信息通信研究院还将进一步推动光计算领域研究并持续发布相关成果。

目 录

一、 光计算发展背景.....	1
(一) 研究背景.....	1
(二) 概念与分类.....	5
(三) 发展历程.....	8
二、 光经典计算技术与产业发展态势.....	9
(一) 光电混合架构为主，专用光计算异军突起.....	9
(二) 三大趋势持续演进，体系化发展有望加速.....	13
(三) 产业链成熟度偏低，产业集群地域较集中.....	14
(四) 产学研持续一体化，三阶段推进市场应用.....	17
(五) 技术产业挑战仍存，国内外进度基本持平.....	18
三、 光量子计算技术与产业发展态势.....	20
(一) 分层式架构为主流，两技术路线并行发展.....	20
(二) 遵循三步发展规划，芯片集成是发展方向.....	24
(三) 硬件软件持续发展，相关产业链仍需完善.....	26
(四) 多国积极布局规划，政策及资金支持加大.....	31
(五) 当前我国局部领先，未来发展仍面临挑战.....	33
四、 总结与建议.....	36
(一) 光计算多领域应用前景广阔.....	36
(二) 光计算仍处发展的初级阶段.....	38
(三) 光计算预计将分三阶段推进.....	39
(四) 技术攻关协同产业应用发展.....	39
参考文献.....	41

图 目 录

图 1 全球算力规模与算力增速	1
图 2 光计算与电计算的性能对比	3
图 3 光计算分类	6
图 4 光经典计算与光量子计算的系统结构对比	7
图 5 光计算发展历程	8
图 6 光经典计算技术框架	10
图 7 光电混合计算架构	11
图 8 光经典计算产业链	15
图 9 光经典计算产业视图	18
图 10 光量子计算技术框架	21
图 11 逻辑门光量子计算发展历程	22
图 12 相干伊辛机发展历程	22
图 13 逻辑门光量子计算原理示意图	23
图 14 相干伊辛机实装置示意图	24
图 15 逻辑门光量子计算发展阶段三步走	25
图 16 芯片集成光量子计算示意图	26
图 17 光量子计算产业视图	27
图 18 光量子计算软件示意图	30

表 目 录

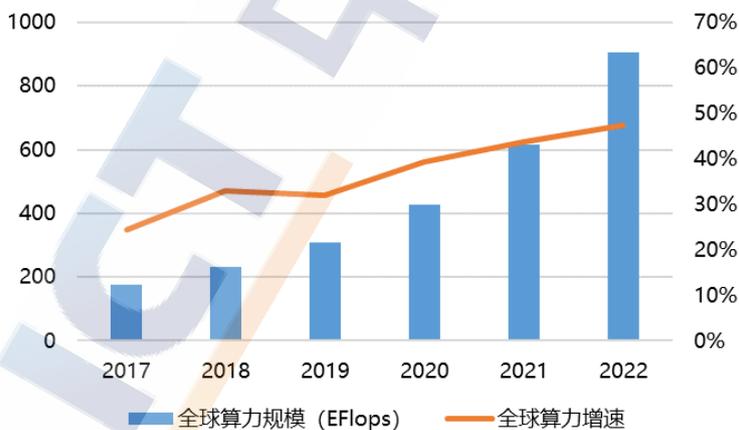
表 1 全球光经典计算企业及产品情况	16
表 2 全球光量子计算企业及产品情况	27
表 3 全球各国涉及光量子的项目规划不完全统计	31



一、光计算发展背景

（一）研究背景

全球算力规模不断扩大，下游应用市场算力需求增长强劲。据 2023 年发布的《中国算力发展指数白皮书》，2022 年全球计算设备算力总规模达到 906 EFlops，增速达到 47%¹（图 1）。伴随万物感知、万物互联以及万物智能时代的开启，据 IDC 预测数据，2025 年全球物联网设备数将超过 400 亿台，产生数据量接近 80 ZB，且超过一半的数据需要依赖终端或者边缘的计算能力进行处理。预估未来五年全球算力规模将以超过 50% 的速度增长。OpenAI 数据指出，2012 年之前，人工智能的计算速度紧追摩尔定律，算力需求每两年翻一番；2012 年以后，翻番时长则直接缩短为 3~4 个月，算力需求远超实际算力供给能力。



来源：中国信息通信研究院《中国算力发展指数白皮书（2023 年）》

图 1 全球算力规模与算力增速

算力升级面临绿色低碳发展问题。当前全球数字化转型正在加快，

¹ 中国信息通信研究院《中国算力发展指数白皮书（2023 年）》

未来相当长时间里这个大趋势不会改变。只要有数字化就需要算力支持，需要构建一个泛在的、低成本的、可靠的算力体系。但是算力基础设施的耗能较大，以数据中心为例，2020 年我国数据中心耗电量突破 900 亿千瓦时，碳排放量达 0.6 亿吨。据中国信息通信研究院测算，到 2030 年我国数据中心耗电量将超过 3800 亿千瓦时，如果不采用可再生能源，碳排放量将超过 2 亿吨，算力基础设施的绿色低碳亟待关注¹。从长远来看，整个社会需要算力与连接构成的“数字底座”，也需要清洁能源与绿色技术构建的“绿色底座”，二者要协同发展。

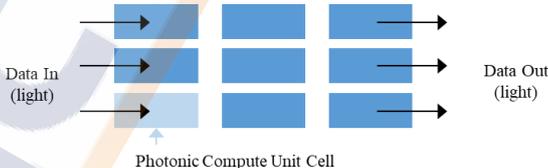
基于冯·诺依曼架构的传统电子计算机的局限性日渐凸显。目前电子计算硬件采用的处理器的逻辑单元和存储单元是分立的冯·诺依曼结构，数据需要在处理器和存储器之间来回传输，频繁的潮汐性数据读写使得计算速率下降的同时增加了单次计算的功耗，带来的带宽瓶颈和功耗瓶颈严重限制了冯·诺依曼架构的计算能效，即“内存墙”

“功耗墙”问题。据曦智科技数据，在过去的 20 年中，硬件的算力提升了 9 万倍，但 DRAM 带宽及网络带宽只提升了 30 倍。据 Intel 数据，在半导体工艺的 7nm 时代，数据搬运功耗达到 35pJ/bit，占总功耗比例 63.7%。此外，随着摩尔定律的放缓甚至失效，集成电路的晶体管数量正在逼近物理极限，当前电子微处理器的时钟速率仅为几个 GHz，已经不能满足超高速、低延迟的海量数据处理的需求。因此，为应对万物智能时代海量应用创新和重大技术革新对算力供给的百千倍递加需求，探索更多维度、更多要素的协同创新成为支撑绿色算

¹ 李洁,王月.算力基础设施的现状,趋势和对策建议[J].信息通信技术与政策, 2022(3):5.

力升级的重要举措。

光计算突破电子计算瓶颈，成为未来探索的重要方向之一。为突破电子芯片的一系列弊端，相关研究者们开始考虑从“电”向“光”的转化。如图 2，光子器件在进行计算时，相比电子器件具有以下优势：1）光具有波长、波导模式、相位、振幅和偏振等多个物理维度资源，具有天然的并行计算能力，可以成倍地提高算力；2）电信号在金属导线中传输必然伴随热量的产生，而光在计算时没有欧姆加热，因此其能耗远小于电子计算；3）与电子器件相比，光子器件有更大的带宽，因此在宽带模拟信号的处理上远胜于电子器件；4）电子器件具有电阻电容（RC）效应，因此会在计算中产生延时，而光学器件则基本没有延迟，具有更快的响应时间；5）光子没有自相互作用，这意味着它们可以在没有相互干扰的情况下传输。这些优异的特性使得光计算极具发展前景。在特定场景中，利用光计算替代传统电子计算将是解决摩尔定律困境以及冯·诺依曼架构瓶颈问题，即解决当前算力与功耗问题的极具潜力的途径之一。



	光	电	性能提升
延迟	100ps	100ns	10^3
带宽	20GHz	2GHz	10
功耗	1 μ W	1mW	10^3
面积	2500 μ m ²	2500 μ m ²	1

来源：Lightmatter HotChips 2020¹

图 2 光计算与电计算的性能对比

¹ Lightmatter, Hotchips 会议报告《Silicon Photonics for Artificial Intelligence Acceleration》，2020。

发达国家积极推动光计算研究与应用不断发展。美国方面，2019 年美国国防部高级研究计划局（DARPA）启动“未来计算系统”项目，以研究具备深度学习能力、高算力和低功耗的集成光子芯片。2022 年 4 月，国会宣布将拨款 2500 万美元，用于制造和测试光量子计算技术。欧洲方面，欧盟地平线 2020 研究和创新计划资助的项目之一 PHOQUSING，正致力于开发基于集成光子技术的将经典过程和量子过程结合起来的混合计算系统。2022 年 9 月，德国航空航天中心启动 100 量子比特的光量子计算机研发项目。日本方面，日本电话电报公司正与东京理工大学合作资助一个为期五年的项目，研究相干伊辛机的实际应用。在如何为智能时代提供更强大的算力上，领先国家已在思考下一波的发展浪潮，光计算正是颇具潜力的选项之一。

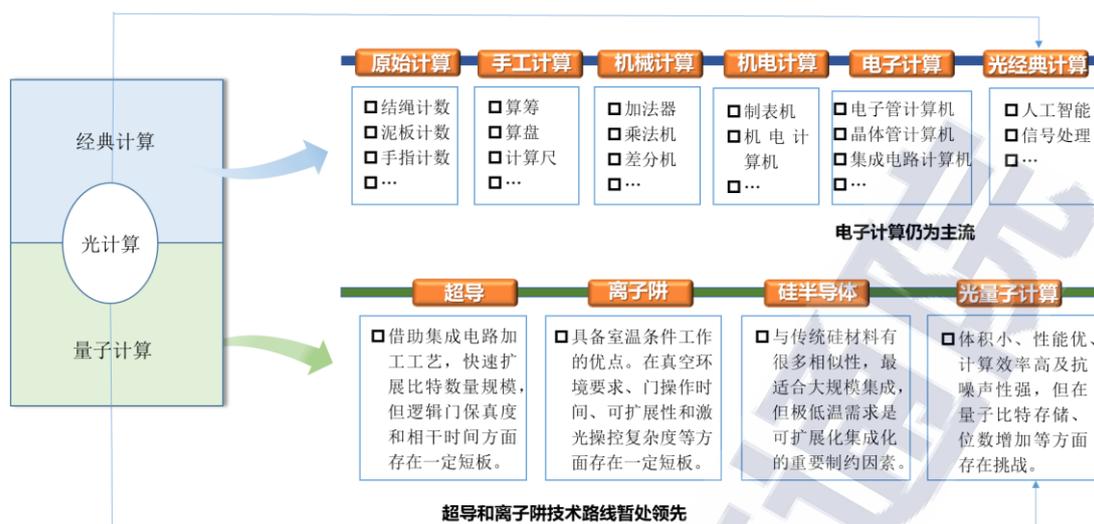
近年来我国相继出台一系列重大制度和政策，支撑光计算技术和产业发展。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》提出要系统布局新型基础设施建设，加快 5G、工业互联网、大数据中心等建设，推动算力产业生态日渐完善。科技部“十四五”重点专项申报指南中，信息光子技术、高性能计算、物态调控、光电混合 AI 加速计算芯片成为重要内容，包括光电混合 AI 加速计算芯片、量子计算、基于固态微腔光电子芯片、光学神经拟态计算系统和 PB 级超低功耗纳米光存储等技术的研发。中央网络安全和信息化委员会发布的“十四五”国家信息化规划，提出要加强集成电路、神经芯片、硅基光电子集成光量子芯片等关键前沿领域的战略研究布局。我国对光计算及相关光芯片的重视程度正在

逐年提升。

（二）概念与分类

光计算是采用光作为信息处理的基本载体，基于光学单元构建光学系统，通过必要的光学操作，从而实现信息处理或数据运算的新型计算体系^[1]。从广义上来看，光计算是指基于光的波动性、粒子性等特性进行信息处理或数据运算的一类计算体系。从狭义上来看，光计算是指基于光的波动性进行信息处理或数据运算的一类计算体系。本报告的研究是基于光计算的广义定义。

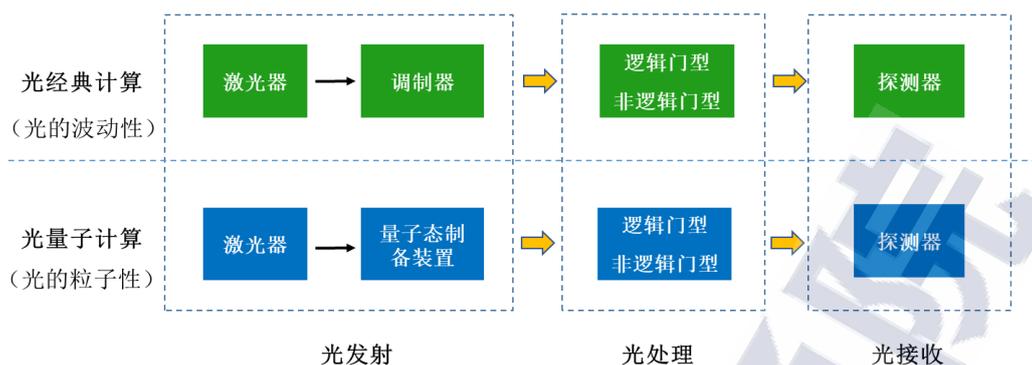
光计算按照物理实现的方式可分为基于经典光学的计算（以下简称光经典计算）和基于量子光学的计算（以下简称光量子计算）（图 3）。经典计算从原始计算、手工计算、机械计算、机电计算、电子计算逐步发展到光计算，光经典计算可利用光的波动特性如折射、衍射等规律来实现计算功能。量子计算有超导、半导体、离子阱、光学等多种技术方案，光量子计算是以光子作为量子比特进行计算，通过对光子进行量子操控及测量来完成计算。光具有波粒二象性，光经典计算基于光的波动性包括干涉、散射等，而光量子计算基于光的粒子性，包括量子态的叠加、纠缠等。



来源：中国信息通信研究院

图 3 计算的发展和分类

光经典计算和光量子计算的计算原理不同，但系统结构基本类似（图 4），包括光发射部分、光处理部分、光探测部分等。1）光发射部分：光经典计算包括激光器和调制器，而光量子计算包括激光器和量子态制备装置。2）光处理部分：两种计算方式均可以分为逻辑门型和非逻辑门型两大类。光经典计算利用折射、散射、非线性效应等，基于马赫增德尔干涉仪（MZI）、微环等结构进行计算；光量子计算利用量子叠加、量子纠缠效应等，将经典光学器件进行量子应用。3）光接收部分：光量子计算需采用灵敏度更高的探测器，如雪崩二极管、超导纳米线探测器等，而光经典计算对探测器的灵敏度要求略低。



来源：中国信息通信研究院

图 4 光经典计算与光量子计算的系统结构对比

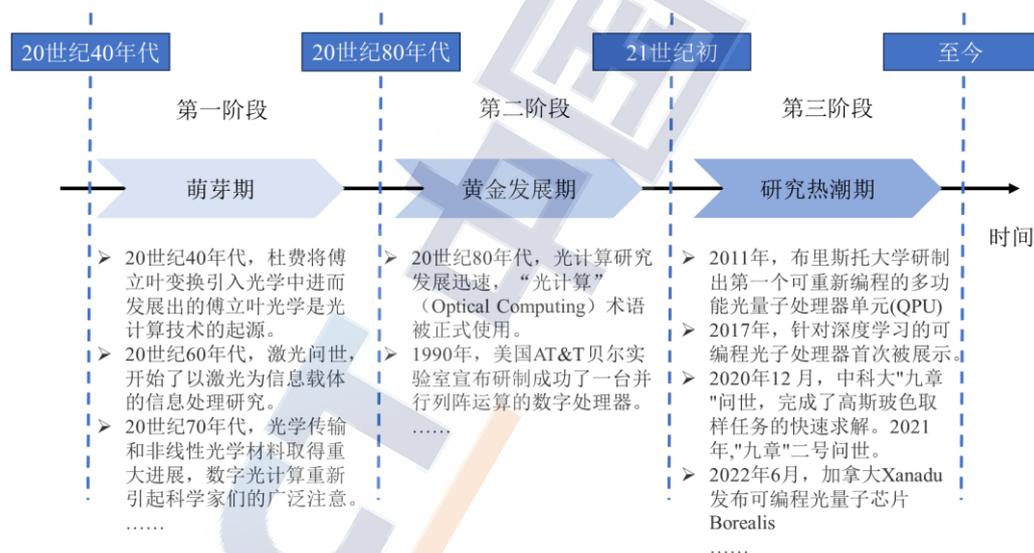
光计算按照所处理的数据形态可分为通用的数字光计算和专用的模拟光计算。数字计算是对物理世界进行抽象和逻辑拆解，将一个任务切割成无数个标准化的小单元来完成。优点是通用性强、精度很高，缺点是占用大量底层硬件资源、容错能力很低。数字光计算利用光和光学器件组合形成经典的逻辑门，构建类似传统数字电子计算原理的计算系统，通过复杂的逻辑门组合操作实现计算。而模拟计算不需要抽象和拆解，只需要模仿和还原一个真实的物理结构，用相对较少的单元就可以完成任务，可以节省大量的硬件资源，但由于每个物理结构都是特定且专用的，因此计算的通用性差。相较于数字计算，模拟计算的精度更低，但容错能力更强。模拟光计算利用干涉、折射等物理特性，体现一种“传输即计算，结构即功能”的计算架构，典型例子之一是傅立叶运算，用传统计算机进行傅立叶变换非常消耗计算量，而光通过透镜的过程本身就是一次傅立叶变换的过程，计算的时间短、耗能少。

鉴于光经典计算与光量子计算在计算原理和产业发展等方面存在较大不同，本研究报告将针对光经典计算和光量子计算这两大类分

别展开技术与产业发展态势的分析讨论。

（三）发展历程

光计算的发展历程大致可分为三个阶段^[2]：如图 5，第一个阶段为 20 世纪 40 年代到 80 年代，光计算概念提出，相关的科学研究开始萌芽；第二个阶段为 20 世纪 80 年代到 21 世纪初，光计算进入黄金发展期，基于各种形式的光计算层出不穷；21 世纪初至今，光计算发展进入第三阶段，从由于需求不足而研究热度稍降再到与新型应用领域结合的再次复苏，掀起研究热潮。光计算已经成为当前解决大规模复杂计算的重要解决方案。



来源：中国信息通信研究院

图 5 光计算发展历程

在第一阶段，光计算的发展最早可以追溯到上世纪 40 年代。1946 年，杜费将傅立叶变换引入光学中进而发展出的傅立叶光学是光学计算技术的起源。60 年代激光问世，开始了以激光为信息载体的信息处理研究。美国密西根大学创造性地利用光学傅里叶变换方法，借助于

凸透镜完成了综合孔径雷达数据处理实验，奠定了并行光学模拟信息处理的基础。70 年代光学传输和非线性光学材料取得重大进展，同时也由于电子计算机的固有的某些缺陷随运算速度提高而明显地暴露出来，数字光计算逐渐引起科学家们的广泛注意。

在第二阶段，80 年代光计算研究发展迅速，“光计算”这一术语被正式使用。随着世界上第一个光电传感器问世，越来越多的光计算器件得到研发。各国科学家提出了大量光计算技术，包括以模拟光计算代表的光学模式识别、逻辑光计算、光学神经网络、光互连、光学全息存储等。1990 年，美国 AT&T 贝尔实验室宣布研制成功了一台并行列阵运算的数字处理器。而人工智能技术的加速发展也为光计算注入了更多的发展动力。

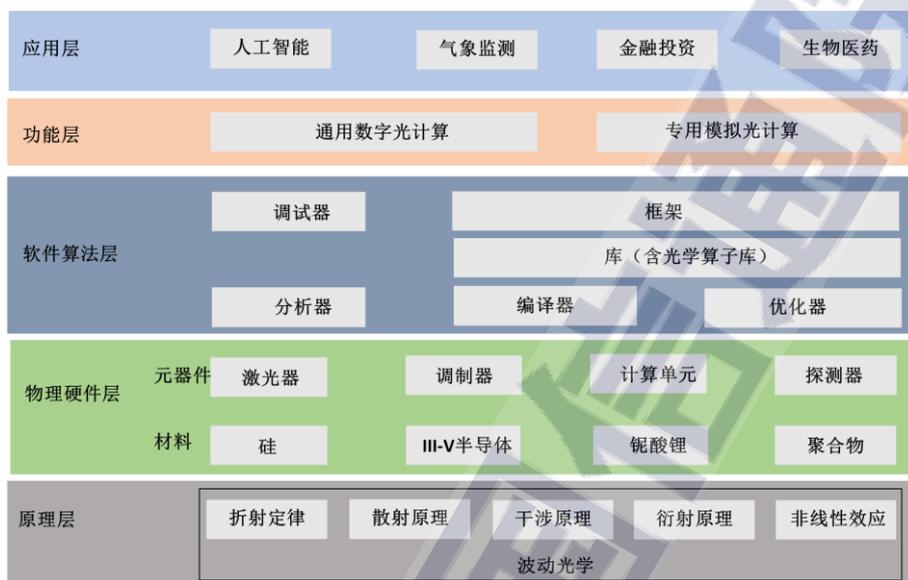
在第三阶段，自 21 世纪初，由于光计算所具备的超高的计算速率与当时各类应用中的计算需求普遍脱节，光计算的高速运算能力反而无法得到更多运用，因此光计算曾一度处于发展迟缓的状态，逐渐淡出人们的视野。但是随着基于硅基的摩尔定律逐渐面临失效，而与此同时，人工智能的大数据处理需求又日益增长，寻找新的计算平台迫在眉睫，光计算领域重新活跃起来。这一阶段中的光计算，因利用光的不同特性进行计算又被分为光经典计算和光量子计算两条路径并行发展前进。

二、光经典计算技术与产业发展态势

（一）光电混合架构为主，专用光计算异军突起

光经典计算技术框架包括原理层、物理硬件层、软件算法层、功

能层、应用层等。光计算仍处于发展演变过程中，其技术框架如图 6 所示。当前无论是物理硬件还是软件算法都需进一步优化，应用方面也需进一步探索。



来源：中国信息通信研究院

图 6 光经典计算技术框架¹

光电混合架构的光计算是当前主流，其计算的实现依托于传统微电子单元与光计算单元两个部分^[3]（图 7）。**传统微电子单元：**结构与普通电子计算机中的相应结构类似。一些不适用于光电计算的操作，如时域延迟、数据存储和非线性运算等，仍需要在微电子单元中实现，如计算与逻辑单元、控制单元、寄存器、缓存器等。**光计算单元：**光计算核心是光计算单元的关键，作为微电子处理器的性能突破和功能扩展，用来实现高速计算。该结构包含发射部分、处理部分和接收部分。发射部分包括激光器、调制器等，处理部分包括与光计算相关的 MZI、微环等光器件，接收部分主要为光电探测器，光放大器可选。

¹ 中国信息通信研究院 A2 课题《光计算关键技术及产业发展研究》，2021.

光电混合计算结合光和电的优势，例如可将输入的数字信号转成模拟电信号驱动光芯片上的光调制器，利用光信号完成计算后，光信号再转成电信号进行非线性运算，之后返回计算结果，将现有电计算的灵活性与光学方法的带宽和速度相结合，并从某种程度上保留光学方法低能耗的特性。



来源：中国信息通信研究院

图 7 光电混合计算架构

通用光计算主要基于逻辑门实现，发展较为缓慢。通用计算的设备是基于数字信号的，而数字信号处理技术的基本组成单元是各种逻辑门。各种光逻辑门的组合能够用来执行基本或复杂的计算功能，例如：二进制加法、减法、解码、编码，还用于构建二进制计数器，随机存取存储器单元和触发器。光逻辑门的实现主要基于半导体器件和光纤中的非线性效应^[4]。常用的非线性器件有半导体光放大器、高非线性光纤、色散位移光纤、光子晶体光纤、周期性极化反转铌酸锂波导、硅基纳米线波导、硅基微环谐振腔等；常用的非线性效应包括交叉增益调制、四波混频、自相位调制、交叉相位调制、交叉偏振调制；

相关的结构包括马赫—曾德尔干涉仪、Sagnac 干涉环、太赫兹光非对称解复用器、非线性光环镜、超高速非线性干涉仪等。光逻辑门方案仍存在诸多问题，例如系统不够稳定、不易集成、系统成本高等，且光逻辑门所依赖的非线性材料和结构不可避免地为器件的设计和制造带来较大困难，大多数的光逻辑门研究尚处在实验室研究阶段，距离商用还有一段时间。受以上影响，当前通用光计算的发展较为缓慢。

专用计算成为新的发展热点，应用聚焦人工智能与信号处理。人工智能方面，人工神经网络作为人工智能最重要的模型之一，因具有良好的泛化能力和鲁棒性而被广泛应用于各类场景之中。目前，光子神经网络技术的研究包含了前馈神经网络、循环神经网络以及脉冲神经网络这三种典型结构^[5]。基于前馈神经网络进行的光计算研究主要集中在以下四个方面进行：光学线性加权总和、光学线性卷积、光学非线性激活函数和光学系统上的在线网络训练。基于蓄水池神经网络（一种典型的循环神经网络）的光计算研究主要集中在两个方向，一种是全光学类的蓄水池计算，另一种是光电类的蓄水池计算。脉冲神经网络的训练和物理实施方面还存在较多困难，暂未得到广泛应用。大多数关于脉冲神经网络的研究工作仍然集中在理论分析和简单结构的验证上，包括脉冲神经网络的训练算法和光学硬件实现。**信号处理方面**，全光通信技术在光域进行数字信号处理操作，因此它能有效地避免传统光-电-光交换方式中的电子速率瓶颈的限制。全光数字信号处理主要包括全光波长转换、全光信息转换、全光信号再生等光域数字信号处理技术等^[6]。光信号处理呈现如下几个发展趋势：1) 从二

进制调制格式（OOK，DPSK）逐渐向先进高级调制格式（m-PSK，m-QAM）发展；2）从单信道操作逐渐向多信道（WDM，MDM）操作发展；3）从初级单一功能向复杂多功能发展；4）引入新的辅助材料（如石墨烯）从器件层面改善工作性能。

（二）三大趋势持续演进，体系化发展有望加速

硅光有望成为实现集成光计算系统的主要材料平台。硅光因其 CMOS 工艺兼容、集成度高等优势，有望成为集成光计算系统的主要平台。典型的硅基光计算案例包括 2x2 MZI 阵列提供矩阵·矢量积实现矩阵运算、光波导延迟线实现蓄水池计算、多模干涉仪和相移阵列或等离子激元实现傅里叶变换、微环/亚波长超材料实现积分计算等。未来基于光电混合集成、异质集成等工艺，可实现不同功能单元的更高效集成，进一步提升系统的集成度。

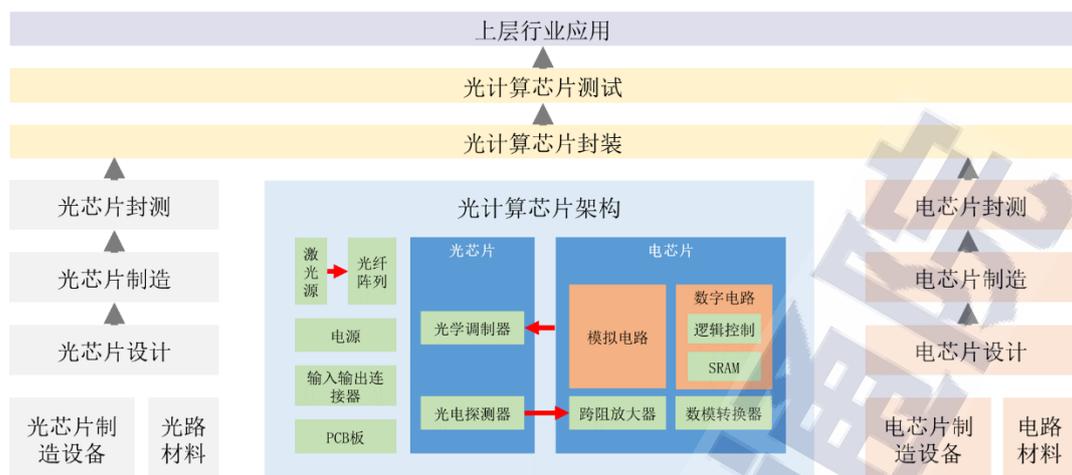
基于现有商用软件生态开发光计算工具。基于现有商用软件生态开发光计算的适用算法、工具等，一方面可加快开发速度和提高开发效率，避免重复“造车轮”的低效行为，另一方面由于用户对成熟商用软件具有较强的用户粘性，利用现有软件生态可提升用户认可度和接纳度。对于光计算而言，一般上层软件基于商用软件 Tensor Flow、PyTorch 等框架，模块内嵌特定算子通过 API 被大厂软件工具调用，构成大厂软件工具的光学算子库。

光计算协同光互连构建光电混合计算新范式。计算系统主要有三个计算要素：数据处理、数据传输与数据存储，光芯片可用于加速前两项计算要素。在“光电混合计算新范式”中有一半的重点是解决数

据互连问题。计算、控制和存储单元之间的大容量互连和硬件系统 I/O 等，可通过光互连来实现有效通信。超大规模光电混合集成是实现大容量大带宽计算功能的底层技术。“光电混合晶圆级计算平台”解决方案可通过晶圆级片上光互连，实现任意互连拓扑、低延迟及低能耗。同时，为打破“内存墙”可设立远端资源池，并通过高效率的光互连，直接接入晶圆级计算平台内部的光网络，最终实现所有计算资源的最优配置^[7]。

（三）产业链成熟度偏低，产业集群地域较集中

产业链仍处于发展起步阶段，成熟度偏低。光经典计算产业规模偏小，产品种类偏少且产量有限，大多为企业自行研发制造。就集成芯片类光计算而言，虽然它基于传统光电芯片技术与产业基础，但仍存在一定差异：传统芯片产业链各环节发展成熟，参与竞争的企业数量众多，技术成熟度也已满足大批量生产需求；光计算芯片涉及光电融合等问题，技术难度高，需由光计算企业全程把关，产业链相对封闭。当前光计算产品技术路线以光电融合的方式为主，芯片内部包含光芯片、电芯片及其他外围器件，组合封装为完整的光计算芯片产品。产业链上游由光芯片和电芯片两部分组成，从芯片制造材料、制造设备等原材料和设施，到芯片设计、芯片制造、和芯片封测等环节，都分别包含光和电两条子产业链。光芯片和电芯片分别制造完成后，加上外围器件再进行组合封装，成为完整的光计算芯片，实现光和电的协同工作。经过完整的生产流程，最终生产出的光计算芯片可以提供给产业链下游的企业客户，实现在各行业领域的算力应用（图 8）。



来源：中国信息通信研究院

图 8 光经典计算产业链

光经典计算产业主要位于美国、欧洲、中国等。其中美国代表性企业包括：Lightmatter、Luminous Computing、Fathom Computing 等（表 1）。美企业技术多沿袭自高校，以上代表性初创企业技术都来源于麻省理工学院等。欧洲方面，英国的 Optalysys 沿袭剑桥大学研究成果，研发实力强劲；法国在光计算领域也出现了初创企业 Lighton。此外，我国企业也不断发力，曦智科技、光子算数等企业纷纷加入国际光计算产业竞争行列。

企业研发进度呈现两种状态，部分公司出现业务转变或拓展。全球约有近 10 家较为典型的初创企业已经形成以光计算为核心的主营业务，主打产品为基于光芯片的光计算加速器，并配套开展软件、系统、原型机的研制与开发。当前企业研发进度呈现两种状态。一是光计算业务停滞，如 Fathom Computing 暂无商用消息，Lighton 从 2020 年起专注于为生成式 AI 构建并商业化基础模型；二是光计算业务积极推动，如 Lightmatter、Optalysys、光子算数等积极推出光计算新产品，为传统电计算提供光学协处理加速。Lightmatter 的 AI 推理加速

芯片 **Enviser**，已开始应用于人工智能背景下的推理过程。**Optalysys** 的 **FT:X 2000** 光学处理器主要的应用场景包括无人驾驶、医学图像分析以及安全系统等，而即将推出的全同态加密加速器芯片预计将有效解决全同态加密过程中的速度与功耗问题，应用于电子商务、政府数据管理、人工智能等领域。光子算数的计算加速卡可实现定制化任务计算加速，用于时间序列分析、机器学习推理等过程，已初步部署于企业业务机房。与此同时，部分公司业务出现由光计算向光互连转变或拓展趋势，如 **Luminous Computing** 的重点从光计算向芯片间光互连转变，**Lightmatter**、曦智科技由单纯光计算向光互连领域拓展。

表 1 光经典计算企业及产品情况

国家	企业	产品类型	产品名称	商用情况	商用时间
美国	Lightmatter	AI 推理加速芯片	Enviser	已商用	2021 年
		可编程光互连芯片	Passage	已商用	2022 年
		深度学习软件工具套件	Idiom	已商用	2022 年
	Fathom Computing	基于分立器件的光计算原型机	/	样品阶段	/
	Luminous Computing	光学 AI 芯片	/	样品阶段	/
欧洲	Optalysys	光学处理器	FT:X 2000	已商用	2019 年
		全同态加密加速器	Enable	研发阶段	/
	LightOn	光学协处理器	/	集成于 Jean Zay 超级计算	2021 年

				机	
		云平台	LightOn Cloud	已商用	2018 年
		本地软件	LightOn Appliance	已商用	2018 年

来源：中国信息通信研究院

（四）产学研持续一体化，三阶段推进市场应用

高校、初创企业、行业巨头协同推动产学研持续一体化。包括微软、IBM 和 NTT 等在内的国际知名公司和基于高校研究成果孵化的初创公司均投入大量资源，聚焦于推进该领域的发展，但侧重点有所不同。行业巨头主要从需求侧出发，研究方向聚焦于针对其主要业务领域中存在的特定计算需求，利用光计算系统实现加速和性能优化。如微软推出了用于纯模拟域迭代的光电混合计算系统 AIM，用于加速复杂金融交易问题的迭代计算；IBM 则基于 PCM 材料的集成光子器件实现了基于光域计算集成系统的流量分析和信号异常检测等。对于初创公司，如孵化于 MIT 的 Lightmatter 和孵化于巴黎高师的 Lighton 等，则主要从技术层出发，通过构建相关光学系统，实现卷积、向量乘法、矩阵乘法等算子的光域加速，与 FPGA 或 ASIC 相结合，构建用于通用计算架构的光学协处理器。这些初创企业受到科技巨头、金融机构的高度重视，获得大量融资基金用于产品商业落地，如 2023 年 6 月，Lightmatter 宣布筹集了 1.54 亿美元的 C 轮融资，7 月 Optalysys 宣布筹集了 2100 万英镑的 A 轮融资。总体来看，高校、初创企业、行业巨头多方协作，结合各环节力量，构建产学研一体的产业模式（图 9）。

应用服务	 		
软件开发	 	 	
处理器	 	 	
支撑系统	 	 	

来源：中国信息通信研究院

图 9 光经典计算产业视图

预计未来光经典计算产业路线可分为三个阶段。第一阶段，当前至未来的 3 年内落地体现光计算优势的应用场景，如在人工智能、数据中心等场景中基于光计算实现推理和图形渲染等。第二阶段，光计算优势明确后将进入金融和能源电力市场，该市场需要更多芯片的协同，更大体量的矩阵乘法以及更成熟的软件体系。第三阶段，随着硬件和软件体系更加成熟，计划切入车载计算、移动互联网等既对算力有需求，同时也对功耗、可靠性、软件生态等有更高要求的大众市场中。

（五）技术产业挑战仍存，国内外进度基本持平

当前，光经典计算技术已成为当前研究热点，但该技术仍处于初级阶段，技术与产业发展等方面均存在诸多问题。

从技术角度来看，硬件层面存在以下三方面问题。**设计成熟度低：**当前的设计思路大多基于光电分立式设计，且相关设计也大多集中于器件而非系统层面。**集成难度大：**光计算涉及异质集成、三维集成、

光电混合集成等多种先进集成方式，当前发展尚不成熟。**系统规模小**：随着规模化的扩展，光电协同问题更加突出，当前光计算可实现的系统规模仍较小。**算法层面**存在以下三方面问题。**适合特定算法**：光芯片时钟主频高，适用于数据依赖性高，时间序列相关、语义信息深的算法。此外，当前主流的光计算为模拟计算，无法支持浮点数，即使对于定点数，当精度超过 8 比特时，模拟计算在能耗方面的优势会减小，因此适用于低比特模型计算，定位于专属处理单元的加速。**光电融合问题**：算法推理层面需要光电协同，目前并没有全光的端到端芯片处理，需要在电域进行指令控制。**混合精度问题**：混合精度计算需要开发新的工具链。

从产业发展角度来看，存在至少以下三方面问题。**路线尚未收敛**：当前技术路线众多，任一技术路线实现产品化都需要巨大投入（资金、周期等）。财政资金/资本市场难以同时支持多条技术路线完成“研发-产品-市场”的产业化短期闭环。**产品规划尚不明确**：行业处于初期阶段，产品形态/目标市场尚不明确，未能牵引研发形成聚焦突破。**产业配套服务尚不完善**：从事光计算研发的机构多为初创公司或创业团队，具有流片量少、订单不稳定、个性化强等特殊特性，产线缺乏向此类订单开放的动力，不利于产业创新生态的培育。

全球范围内的研究与投资热情增长，我国与欧美基本并跑。随着各大高校以及微软和 IBM 等产业巨头在光计算领域成果的发布，光计算技术的认可度逐步提升。5 年时间里，全球范围内布局光计算的公司从零星几家，增加到目前的数十家。我国光计算研究热情较高，

北京大学、华中科技大学等多家院所高校均涉足其中，相关学术交流也日益频繁，Deep Tech 科技创新周先进计算论坛、光电集成芯片立强论坛等均热烈讨论光计算相关主题。华为在 2019 年分析师大会上宣布投资光计算，8 月公开了一份“光计算芯片、系统及数据处理技术”的发明专利，后续与清华等高校开展光计算合作项目，进行探索性前沿研究。以曦智科技和光子算数为代表的初创公司，近三年初步应用落地，但纯商业客户较少，市场仍有待进一步开拓。

三、光量子计算技术与产业发展态势

（一）分层式架构为主流，两技术路线并行发展

构建光量子计算系统，较为公认的技术方案是将复杂系统抽象为分层体系架构，并逐层攻破。其技术框架如图 10 所示，可大致分为基础的原理层、物理硬件层、中间层、算法软件层、功能实现层及面向客户端的应用层等。与其他技术路线的量子计算平台相比，光量子计算平台具有光量子比特相干时间长、平台易扩展等优点，同时也存在光子不易存储、难操控等缺点。



来源：中国信息通信研究院

图 10 光量子计算技术框架

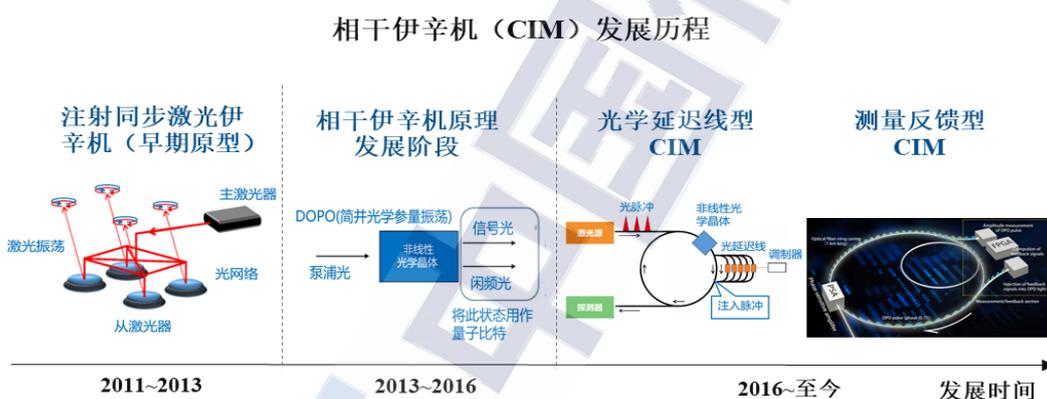
光量子计算根据逻辑门的有无，可分为逻辑门光量子计算和非逻辑门光量子计算。逻辑门光量子计算是当前主流方案，目标是构建通用光量子计算平台，发展历程如图 11 所示。非逻辑门光量子计算主要用于解决特定优化问题，是专用光量子平台，如相干伊辛机（Coherent Ising Machine, CIM），发展历程如图 12 所示。

逻辑门型光量子计算发展历程



来源：中国信息通信研究院

图 11 逻辑门光子量子计算发展历程



来源：中国信息通信研究院

图 12 相干伊辛机发展历程

逻辑门光子量子计算以光子的偏振、路径等自由度作为量子比特，通过构建光子量子逻辑门并形成光子量子线路完成对量子态的么正操作。光子量子比特的逻辑操控可利用相移器、分束器、非线性光学克尔介质等实现空间调制、路径编码，并可进一步构成通用光子量子逻辑门进行计算。图 13 是逻辑门光子量子计算原理示意图，计算过程包括三个步骤：量子光源的制备输入（初态制备）、光子量子线路对输入光源进行么正操作（初态的么正演化）、单光子探测器对输出光子进行测量（末

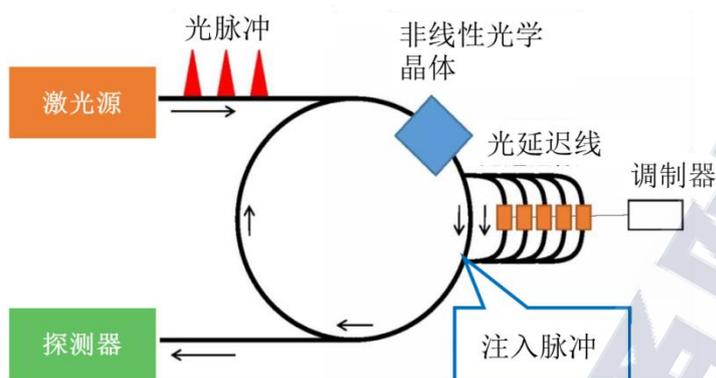
态测量)。逻辑门光量子计算优越性首次验证是由我国中科大的“九章”实现，近期最具代表性的阶段性进展是加拿大 Xanadu 在 2022 年 6 月推出的 Borealis，其完成了 216 个光子的高斯玻色采样实验^[8]。



来源：中国信息通信研究院

图 13 逻辑门光量子计算原理示意图

以 CIM 为代表的非逻辑门光量子计算平台不具备通用量子门集，CIM 是利用量子失协作为计算资源的耗散式量子计算机。图 14 是 CIM 装置示意图，CIM 基于相互耦合的光学参量振荡器网络，通过以光纤中的激光脉冲相位（相位处于 0 态和 π 态）作为量子比特进行计算，又被称之为光网络型量子计算机。CIM 适于形成超大规模的量子神经网络，可在常温、常压下工作，被用于解决组合优化类问题。CIM 起源于美国斯坦福大学，是日本量子计算机的主要研发路线，我国初创公司玻色量子也在从事 CIM 的研发。近年来，CIM 发展迅速，取得许多阶段性突破。2021 年 9 月，日本 NTT 基础研究实验室发布了具有 100,512 个简并光参量振荡器脉冲作为 Ising 自旋量子比特的 CIM^[9]。2022 年 11 月，中科院光电研究所及中科院半导体所等几个研究机构联合发布了支持 25600 个自旋量子比特的 CIM^[10]。2023 年 5 月，玻色量子发布了具有 100 量子比特的国内首台相干光量子计算机“天工量子大脑”。



来源：中国信息通信研究院

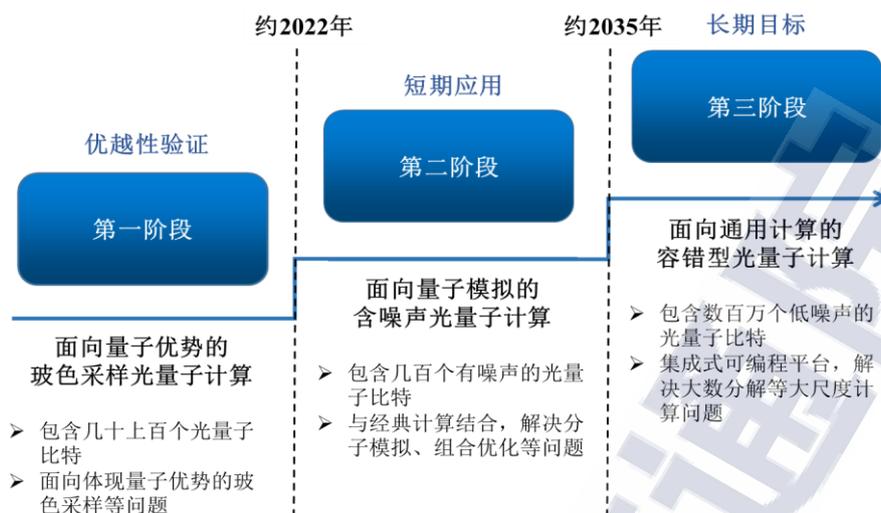
图 14 相干伊辛机实装置示意图

现阶段，CIM 与逻辑门光量子计算平台相比，量子比特数占优，或在短期内更具应用前景。目前，逻辑门式光量子平台的比特数处于数百位水平，而 CIM 已实现数万个自旋量子比特，CIM 在量子比特数上的压倒性优势，或有望使 CIM 更早进入落地商用。

（二）遵循三步发展规划，芯片集成是发展方向

逻辑门光量子计算是构建通用光量子计算平台的主流技术方案，其发展可大致分为三个阶段，如来源：中国信息通信研究院

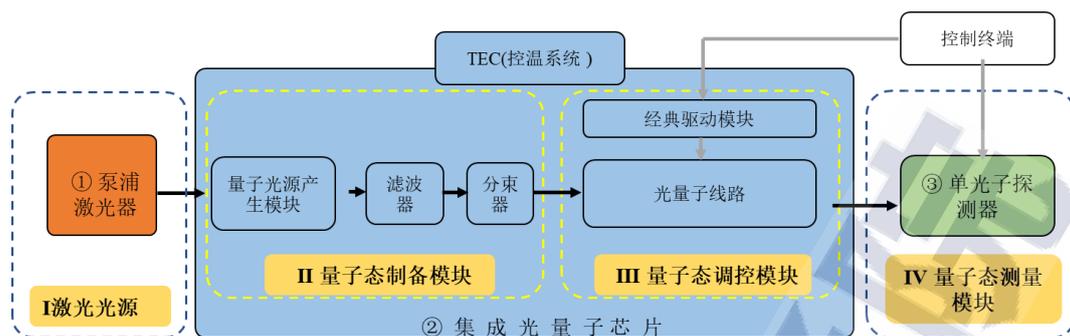
图 15 所示。光量子计算的第一阶段主要任务是验证光量子计算的优越性，被用来解决诸如玻色采样这类单一性问题。含噪声中规模光量子计算包含数百个有噪声的光量子位元，适合解决分子模拟、组合优化、机器学习等特定问题。这一阶段的光量子位元因没有经过纠错，只能在有限的相干时间内执行不完美操作，在具体执行时，会与经典计算有机融合，形成互补混合型的架构来处理问题。通用容错型光量子计算机是发展的终极目标，将包含数百万个容错的光量子比特，可根据任务需求进行编程计算。



来源：中国信息通信研究院

图 15 逻辑门光量子计算发展阶段三步走

逻辑门光量子计算根据平台搭建方式的不同，可分为分立式和集成式两种。分立式光量子计算平台通过使用分立的光学元件构建光量子线路，实现高斯玻色采样等单一目的的计算，如“九章”平台。分立式平台相较于集成式平台更易于实现，但缺点是空间占用大、难于扩展，主要用于单一目的的计算，不适合作为实现未来通用光量子计算的技术路线。集成式光量子计算相较于分立式平台，具备体积小、易扩展等优点，可用于解决玻色子采样、量子模拟、量子仿真等问题，是未来实现通用可编程光量子计算的主流技术路线。集成式平台通过将经典的集成光子技术和器件进行量子应用，利用单光子源作为量子信息载体输入，结合晶片尺度的制造工艺，在氮化硅、铌酸锂等材料上将各类光学元件进行集成，构建具备信息处理能力的光量子线路，实现芯片集成式光量子计算，如图 16 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 16 芯片集成光量子计算示意图

现阶段，逻辑门光量子计算的优越性已得到验证，短期内发展目标将集中在对含噪声中规模集成光量子计算的技术研究及应用方面。逻辑门光量子计算硬件平台依托传统的光芯片技术，发展迅速，未来有望完成大规模集成，其集成芯片化已成为必然趋势。2023 年 4 月，北京大学等单位联合发布超大规模集成硅基“光量子计算芯片”——“博雅一号”，集成约 2500 个元器件，首次实现了片上多光子高维度量子纠缠态的制备与调控。

（三）硬件软件持续发展，相关产业链仍需完善

现阶段光量子计算仍处于实验室研发的初级阶段。核心参与者不多，科研与市场活跃度呈现增长趋势，未来将有更多企业/科研机构加入。光量子计算产业视图如图 17 所示，包括底层组件支撑系统、光量子处理器整机、软件开发及应用服务四个环节。从产业链来看，光量子计算硬件设备供应及软件开发商主要以国际公司为主，中国企业也具有一席之地。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 17 光量子计算产业视图

光量子计算企业主要集中在欧美地区，我国近年来成立部分企业。光量子企业发展模式主要分两类，一类遵循软、硬件协同发展，如 Xanadu、Quandela、图灵、玻色等；另一类是重点发展硬件处理器的设计封装，如 Photonic Inc、Wave Photonics 等（表 2）

表 2 全球光量子计算企业及产品情况

国家	企业	成立时间	产品类型	产品名称	发布时间
美国	PsiQuantum	2016 年	百万量级的通用硅光量子计算机	/	/
加拿大	Xanadu	2016 年	可编程光子量子计算机	Borealis	2022 年
			软件	Xanadu Quantum Cloud	2021 年
				Strawberry Fields	2021 年
			模拟器	Lightning	2022 年
	Photonic Inc	2016 年	硅基光量子芯片设计制造	/	/

英国	Wave Photonics	/	集成光量子电路封装	/	/
	ORCA Computing	2019 年	可扩展光量子计算机	/	/
	Tundra Systems Global	2014 年	光量子处理器系统	/	/
法国	Quandela	2017 年	光量子计算平台	MOSAIQ	/
			软件	Perceval	/
			光源设备	PROMETH EUS	/
荷兰	QuiX Quantum	2019 年	集成式光量子处理器	12-qumodes	2021 年
				20-qumodes	2021 年
丹麦	Sparrow Quantum	2016 年	光量子计算技术组件	单光子芯片	/

来源：中国信息通信研究院

光量子计算关键硬件组件包括量子光源、单光子探测器以及光量子芯片，其中光量子芯片是核心，是各企业研发重点。近年来，多个光量子计算企业通过与芯片制造商合作或自建芯片试线研发光量子芯片。美国 PsiQ 与全球领先半导体制造商 GlobalFoundries 合作研发基于硅光集成光量子系统 Q1。加拿大 Xanadu 与 Imec 合作开发了基于超低损耗氮化硅波导的下一代量子比特。Xanadu 与 GlobalFoundries 合作制造了 300 mm 硅光器件。我国成立了无锡光子芯片联合研究中心，用于研发高端光子芯片工艺技术。总体而言，光量子计算的芯片产业正以循序渐进的逐步发展。

光量子软件正处于架构探索和迭代发展的起步阶段，根据功能不同可大致分为两类：光量子计算编译软件和光量子计算应用开发软件，

如图 18 所示。**光量子计算编译软件**位于光量子计算硬件平台上层，既是光量子技术软件发展的助推器，亦是应用服务开发的支撑平台，自下而上包括光量子指令集、量子中间语言（QIR）和编程框架。光量子计算指令集是面向光量子处理器的特定量子指令集，通过一系列光量子处理器可以识别并执行的物理指令来控制光量子操作时序等底层信息。QIR 通过将高级编程语言转化为量子计算机可识别语言，实现二者之间的有效通信，是实现经典-量子混合算法的关键一环。同时，QIR 是量子硬件平台无关语言，它将量子指令或门集信息留给目标计算环境，以便后续量子指令的优化生成。目前，光量子指令集及量子中间语言尚处于发展初期，国内外光量子计算初创企业及相关科研结构正积极投入布局。**光量子计算应用开发软件**是面向量子模拟、量子金融、组合优化等各类应用场景研发的应用软件。服务商可通过向用户提供光量子软件开发工具包和光量子计算云平台进而为用户提供解决方案。量子软件开发工具包是用来开发量子算法的工具，可用于使用经典编程语言的量子模拟器；光量子计算云平台为用户提供访问量子计算机的途径，用户可通过量子云平台在真正的量子计算机上测试他们的代码。现阶段这类软件的研发及发布主要由国内外从事光量子计算研发的科研团队及企业主导。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 18 光量子计算软件示意图

近年来，国内外企业均开始积极布局光量子计算软件。2018 年，全球首款专用光量子计算软件 FeynmanPAQS 由上海交大金贤敏教授团队自主研发成功并发布。FeynmanPAQS 作为光量子芯片设计辅助系统与光学模拟系统，被用来配合光量子计算机 TuringQ Gen1 形成软硬一体的用户体验。加拿大 Xanadu 推出了 Xanadu Quantum Cloud (XQC) 云平台服务和 Strawberry Fields 应用程序库，使企业和研究人员可以使用 Xanadu 的光子量子计算机。量子计算软件公司 Quantum Computing Inc. (QCI) 在 2022 年 5 月收购了光量子计算硬件公司 QPhoton，加速光量子计算体系的可访问性。目前光量子计算软件仍处于初级发展阶段，相关产品仍在不断更新研发中。高质量光量子软件的存在既可以使用户能够更好的使用光量子硬件平台，同时也是促进光量子计算不断发展进步的一个重要因素。

(四) 多国积极布局规划，政策及资金支持加大

近年来，光量子计算领域逐渐引起政、企、研、用等多方重视，全球多国纷纷通过制定项目规划，加大投融资等举措支持以光量子计算为代表的多条量子计算路线的科研及产业发展，如表 3 所示。

表 3 全球各国涉及光量子的项目规划不完全统计

区域	国家/组织	项目规划	发布时间
欧洲	欧盟	《战略研究和产业议程(量子旗舰)》	2022 年
	英国	《国家量子技术计划》	2013 年
		“光量子集成电路封装(QPICPAC)项目”	2022 年
		《国家量子战略》	2023 年
	德国	“光量子项目”（企业合作类，5000 万欧元）	2022 年
		量子技术行动计划	2023 年
荷兰	“光子集成电路项目”（总投入 11 亿欧元）		
北美	美国	《量子互联路线图》	2022 年
		《芯片和科学法案》（其中 2500 万美元投给 PsiQ 和格芯）	2022 年
	加拿大	《量子光子学传感与安全研发计划》	2014 年
		《国家量子战略》（4000 万加元投给光子企业 Xanadu）	2023 年
亚洲	日本	《量子科学技术（光·量子技术）的新推进方策》	2017 年
		《光·量子跃迁旗舰计划（Q-LEAP）》	2018 年
		“光量子计算机研发计划”（总投入 2000 亿日元）	2021 年
		《量子技术创新战略（最终报告）》	2020 年
		《量子未来社会展望》	2022 年
	韩国	《量子科技发展战略》	2023 年
	新加坡	“国家量子计算中心(NQCH)”和“国家量子无晶圆厂(NQFF)”	2022 年
澳大利亚	澳大利亚	《国家量子战略》	2023 年

来源：中国信息通信研究院

欧洲在光子集成方面有丰富的经验，可以利用光子集成为量子技术创建全球量子供应链。在由欧盟资助的量子旗舰计划中，集成光量子已被公认为量子通信供应链的基础技术，研究重点是开发优化光量子材料、架构和器件，并集成到光量子电路中。英国方面，自 2013 年开始实施的英国国家量子技术计划建立了量子通信中心和量子计算与模拟中心，这两个中心都有关于集成光量子技术和光量子集成电路技术的工作计划。德国方面，2022 年由德国初创企业 Q.ANT 牵头，联合 14 家合作伙伴共同开展了光量子项目，旨在加快可在常温下运行的光量子计算芯片研发。荷兰方面，2022 年 4 月，荷兰政府通过国家基金并联合私营企业向光子集成电路产业投入 11 亿欧元，以加速光子芯片技术创新研究。

北美通过政策支持、加大投资等方式支持集成光量子计算的技术研发和制造。美国方面，能源部于 2020 年确定光量子设备组件的优先发展机会，包括量子光源、光量子存储器、单光子探测器等。同时，由于光量子系统可以与国防量子传感器更好地结合，美国防部更为青睐光量子计算发展。美国政府在 2022 年向格芯(GlobalFoundries)及 PsiQuantum 联合拨款 2500 万美元以支持光量子芯片开发。加拿大于 2014 年提出的量子光子学传感与安全研发计划，重点推进科学研究和量子应用的发展。2023 年 1 月，加拿大宣布启动国家量子战略，其中 4000 万加元被投资给光量子企业 Xanadu。

亚洲多国高度重视光量子技术产业发展。我国一直大力支持光量子技术的发展，自 2015 年以来，我国科技部等主要的资助机构以及各

地方机构，为集成光量子研发提供了约 5000 万元人民币。新加坡在大约 15 年前建立了量子技术中心，并提出了国家量子工程计划，为重点研究项目提供资金。研究目标包括基于波导和光纤的超大规模光子集成平台、硅量子光子学等方向。日本政府将光学和量子技术视为优先研发领域，并制定了长期国家战略《2020 年量子技术创新战略》，着眼于技术的产业化和创新。

澳大利亚在传统光子学的研究及产业方面具有良好基础，光谱学、网络安全和量子计算领域初创公司的出现促进了光量子计算的发展。澳大利亚有几个专注于光子学和量子技术的大型卓越中心，各政府机构投入了大量资金。澳大利亚在光量子领域的研究优势在于集成量子光子电路的制造，其相关研究人员数量正在稳步增长，澳大利亚完全有能力将这些技术推向市场，并培养新一代科学家和工程师。

（五）当前我国局部领先，未来发展仍面临挑战

光量子计算发展正处于初期阶段，技术研究、应用探索和产业生态保持平稳发展态势。技术研究方面，光量子计算硬件物理平台的比特数频频刷新纪录，相关物理器件持续研发跟进，光量子电路集成芯片化也在不断推进中。应用产业方面，关于光量子计算算法和应用的探索也在不断深入，在量子化学、生物医药等组合优化问题方面的探索可能率先诞生“杀手级”应用。量子计算软件系统研究取得较大进展，量子云计算应用和产业生态建设加速发展，科技巨头相互竞争态势更加明显。

科研方面，我国率先实现光量子计算优越性验证，在全球范围内

占有一席之地。2020 年 12 月，中科大潘建伟院士团队在“九章”平台上成功实现了高斯玻色采样实验，实现光量子计算优越性的首次论证。2021 年，该团队对九章进行扩展，从 76 个光子扩展到 113 个光子，再次验证了光量子计算的优越性。继我国之后第二个在光量子计算平台上实现量子计算优越性的团队是来自加拿大的 Xanadu。2022 年 6 月，Xanadu 推出了可编程平台 Borealis，并在该平台上进行了高斯玻色采样实验，在 36 μs 内探测了 216 个光子序列。“九章”和 Borealis 各有优劣势，“九章”采用的是分立式光量子器件，Borealis 是集成芯片式平台。在可编程性及光子数方面，Borealis 优于“九章”；在净透射率和干涉仪深度方面，“九章”优于 Borealis。

我国在光量子器件性能提升以及光量子芯片的研发方面保持良好发展态势，并在探测器领域保持国际领先优势。关于光子源的制备，我国研究团队处在领先地位，中科大潘建伟团队自 2013 年首创量子点脉冲共振激发技术后，一直引领高性能量子点单光子源的发展。纠缠光源方面，2023 年 6 月，中科大郭光灿院士团队基于自发四波混频过程实现了量子纠缠光源的低温集成，此成果为光量子器件的片上集成和低温条件下的应用奠定了基础^[11]。在探测器方面，我国赋同量子的尤立星团队研发的超导纳米线单光子探测器（SNSPD）在国际上处领先水平，该团队于 2020 年 11 月推出的基于氮化铌材料的 SNSPD，其探测效率达 98%；2022 年 8 月，该团队在国际电工委员会（IEC）牵头制定的首个单光子探测器国际标准获批发布。在集成光量子芯片研制方面，芯片衬底材料的测试找寻、芯片互联结构的搭建等均在积

极探索中，我国北京大学、浙江大学等多个团队致力于此。2023 年 4 月，北京大学等团队合作研制了超大规模集成硅基“光量子计算芯片”——“博雅一号”，实现了片上多光子高维度量子纠缠态的制备与调控^[12]。国外光量子集成芯片研发团队较为有代表性的是 PsiQuantum 和 Xanadu。此前，PsiQuantum 与 GlobalFoundries 合作生产了 300mm 晶圆的硅基光量子芯片，并在芯片上集成了单光子源和光子探测模块。Xanadu 与 GlobalFoundries 于 2022 年 3 月建立合作，旨在研制含纠错能力的光量子芯片，首批全功能设备预计将于 2023 年底准备就绪。

企业方面，近年来国内外多家光量子初创公司相继成立，其中以欧美企业居多，实力较强。国外的光量子企业主要分布在美国、加拿大以及欧洲等地，实力较为突出的当属加拿大的 Xanadu 和美国的 PsiQuantum。Xanadu 已推出多款硬件、软件以及模拟器产品；PsiQuantum 自 2016 年创立之初就以建立 100 万量子比特的容错光量子计算机为目标，估值达 31.5 亿美元。我国的光量子科技公司有图灵量子、玻色量子两家，虽起步稍晚，但发展迅速，目前已有软、硬件产品推出（见表 2），彰显了一定的企业实力。

综上所述可知，我国光量子计算基础科研及部分光量子器件发展与国际先进水平基本持平，产业发展略逊色于起步较早的美、加等国。光量子计算未来发展仍有许多棘手问题尚待解决。在硬件方面，最为典型的棘手问题当属容错光量子逻辑门的构建问题，眼下虽涌现出了一些较为认可的理论方案，如利用表面码构建逻辑比特，但距离实验实现尚需时日。实现容错可编程的通用光量子计算至少是十年以上的

远期目标。此外，设计成熟度低、集成难度大、系统规模小等与光经典计算的共性技术问题也有待解决。在软件算法和应用探索方面，关于光量子计算的软件系统和适用范围的探索还处于起步阶段，相关软件数量有限，功能也较为局限单一，同时获得超越经典计算优势的光量子计算的实用案例尚未明确，故光量子计算的实际应用场景仍需进一步探索。产业方面，人才短缺问题明显。未来通用光量子计算机的实现，必然需要不同领域的人才通力合作，而目前的人才数量以及培养模式还不足以支撑产业的发展。未来，应加大人才培育力度，保证行业人才供给，促进光量子计算领域的持续快速发展。标准方面，光量子计算标准化工作尚处于起步阶段，主要在术语定义、光量子器件等方面开展规范性研究，目前国际标准组织 ISO/IEC JTC1、IEEE、ITU-T 和国内标准组织 TC578 主要开展术语定义类标准研究，IEC TC90 则从事光量子器件方面的标准研制。

四、总结与建议

（一）光计算多领域应用前景广阔

光计算速度的提升有望在一定程度上解决各个领域中对大数据处理的急切需求，在未来万物互联的智能社会中，光计算可以在人工智能、气象监测、金融投资、生物医药等诸多领域发挥重要作用。

人工智能领域。神经网络计算中，90%左右的时间和能耗用于进行矩阵乘法运算，驱动经典计算机的深度学习算法需要使用嵌套循环进行乘法运算，而光学技术十分适合用于以完全并行的方式进行矩阵乘法运算。此外，使用光学的硬件以光速运行，延迟只受到光学系统

的飞行时间的限制，而且能量耗散非常少，结合光的自然并行性和速度已经产生了强大的计算能力。未来随着硬件的发展以及人工智能技术的完善，这两个领域的交叉结合可能会在真正实用化应用方面产生突破，突破方向可能包括处理庞大的数据量、建立更优秀的模型、研究更准确的算法以及使用更多数据集等。

气象监测领域。气象模型非常复杂，需要强大的算力设备，随着全球气候变化加剧，通过强化算力以提升气候监测水平，成为越来越多国家的共识。2022 年，法国量子计算公司 PASQAL 宣布与化学公司巴斯夫就天气预测等应用展开合作，目的为探索如何将量子计算用于预测天气。

金融投资领域。随着多样化金融服务的普及，金融行业的经营模式、基础框架与产业模式也在经历重大变革，对于算力的要求也越来越高，目前已有多家光量子计算企业与研究机构以及金融机构均开始探索量子计算应用。但由于目前可使用的光量子系统规模较小，大部分基于已有成果是实验性的，何时应用能够落地尚需观察，光量子计算对于金融领域产生真正影响可能仍需时日。

生物医药领域。光经典计算已可用于基因序列比对，Optalysys 光协同处理技术在基因测序方面具有很高的灵敏度，于 2017 年展示了其首款商用产品，该产品的数据处理能力相比于现有的电子计算能力有较大提升。传统药物研发流程过程极为缓慢且费用极高。光量子计算能够用于模拟候选药物与体内靶点之间的相互作用，其与人工智能的相互配合，利用人工智能的自动化使数据收集的成本更低且更可靠，

有选择地评估药物特性,从而快速筛选大量药物。光计算对于生物医药领域的潜在影响主要体现在提高设计效率、提升现有材料性能、缩短上市时间以及节约研发成本等方面。目前这些方面已有一些初期研究结果,但依旧受限于系统硬件技术,目前的阶段性成果主要停留在实验验证阶段。未来随着技术的逐渐成熟,光计算在未来几十年的时间里可能对生物医药领域产生深远影响,长期潜力较大。

（二）光计算仍处发展的初级阶段

光经典计算与光量子计算均基于传统光器件技术与产业基础,具备一定的共用性,但当前发展尚不成熟,光计算在发挥巨大潜力的进程中,仍然面临着许多挑战:

关键技术尚未完全成熟,诸多方案有待验证。当前光计算尚未经历大规模应用验证,需要底层硬件和软件算法等多方面技术共同推进。硬件层面包括设计成熟度低、集成难度大、系统规模小以及容错光量子逻辑门的构建等问题。软件算法层面包括适合特定算法、光电融合、混合精度以及软件系统尚不成熟等问题。学术界与产业界需持续推进研究,进行的诸多技术探索方案有待进一步验证。

行业处于发展初期,产业化链条有待完善。当前光计算产业仍处起步阶段,市场与产品尚未定型,技术路线众多导致财政资金与资本市场难以同时支持多条技术路线产业化。产业配套服务尚不完善,从事光计算研发的机构多为初创公司或创业团队,产线向此类流片量少、订单不稳定、个性化强的订单开放动力不足。另外此赛道内公司与人才数量短缺,影响产业快速发展。

计算领域渗透率不足，新应用场景有待挖掘。鉴于光计算技术与产业发展尚不成熟的现状，用户存在成本和可靠性等较多顾虑，还未开始大量部署。光计算目前主要应用于在数据中心、高性能计算中心等场景，但渗透率明显不足。同时，工业制造、安全生产、医疗、金融等行业的数据计算与处理的大量需求还需要进一步深耕，大量的新场景等待开发。

(三) 光计算预计将分三阶段推进

当前及未来算力需求远超实际算力供给能力，光计算采用光作为信息处理的基本载体，突破现有电子计算瓶颈，成为未来探索的重要方向。

光经典计算方面，光电混合光计算是当前主流计算框架，“结构即功能”的专用模拟计算近年来成为发展热点。预计发展路线将按照三步走计划，从初步落地到拓展应用场景再到更为大众的市场中去。当前产业链整体成熟度偏低，产品种类偏少且产量有限，但全球范围内的研究与投资热情增长。

光量子计算方面，分层式架构为主流，计算平台的发展路线预计将按照三步走计划，从光量子计算优越性验证到含噪声的中规模光量子计算，而通用容错型光量子计算机是光量子计算发展的终极目标。现阶段光量子计算仍处于实验室研发的初级阶段，核心参与者不多，科研与市场活跃度呈现增长趋势。

(四) 技术攻关协同产业应用发展

针对光计算面临的问题，本报告从技术、产业、应用三个方面给

出我国光计算的发展建议。

攻克关键技术难题，促进核心技术产业化。加强光计算关键技术研发和产业化方面的人员、设备、资金等方面的投入力度，聚集优势资源集中攻坚，促进光电芯片的仿真、设计、验证等 EDA 流程优化、芯片加工工艺以及三维集成封装等光经典计算与光量子计算共性技术发展，推动解决集成度低、集成难度大、系统规模小、容错性逻辑门构建等问题，促进核心技术产业化落地。

推动全产业链建设，优化企业扶持政策。加强产学研结合，推动产业链的上下游联动。把光计算芯片纳入国家发展战略之中，推动半导体材料、光芯片器件等光经典计算与光量子计算共性产业支撑基础发展，进一步完善产业配套服务。充分发挥资本和地方投资对新型产业和技术的激励作用，设立专项基金支持产业发展，针对优秀企业给予优惠政策和奖励措施。

开展新应用试点，助推商业化落地。推动扩大光计算在数据中心、高性能计算中心等场景的应用范围，深入挖掘新型商业落地模式，落地一批应用示范。探索其在消费、教育、智能制造等业务领域的拓展能力，形成企业可持续发展的良好商业模式。

参考文献

- [1] 李修建,贾辉,杨俊波等.光计算技术基础,2013.
- [2] Pierre Ambs, Optical Computing: A 60-Year Adventure, *Advances in Optical Technologies* 2010, 372652 (2010).
- [3] Zhiping Zhou, Pengfei Xu, Xiaowen Dong. Computing on Silicon Photonic Platform. *Chinese Journal of Lasers* 47, 060001 (2020).
- [4] 方中勤. 全光逻辑门关键技术研究.北京邮电大学,2018.
- [5] Wu J ,Lin X ,Guo Y , et al. Analog Optical Computing for Artificial Intelligence. *Engineering* 10, 133-145 (2022).
- [6] 龙运. 基于硅基光子器件的光子信息处理.华中科技大学,2019.
- [7] 曦智科技. 大规模光电集成赋能智能算力网络白皮书,2023.
- [8] Madsen, L.S., Laudenbach, F., Askarani, M.F. et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. *Nature* 606, 75–81 (2022).
- [9] Toshimori Honjo et al., 100,000-spin coherent Ising machine.*Sci. Adv.*7,eabh0952 (2021).
- [10] Cen, Q., Ding, H., Hao, T. et al. Large-scale coherent Ising machine based on optoelectronic parametric oscillator. *Light Sci Appl* 11, 333 (2022).
- [11] Lantian Feng, Yujie Cheng, Xiaozhuo Qi, et al., Entanglement generation using cryogenic integrated four-wave mixing, *Optica* 10, 702-707 (2023).

- [12] Bao, J., Fu, Z., Pramanik, T. et al. Very-large-scale integrated quantum graph photonics. *Nat. Photon.* 17, 573–581 (2023).

CAICT 中国信通院

中国信息通信研究院 技术与标准研究所

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62300112

传真：010-62300123

网址：www.caict.ac.cn

