

面向下一代光网络的光计算技术应用思考



Optical Computing: Advancing Next-Generation Optical Network Applications

李俊杰/LI Junjie, 刘宇阳/LIU Yuyang, 霍晓莉/HUO Xiaoli

(中国电信股份有限公司研究院, 中国 北京 102209)
(Research Institute of China Telecom Corporation Limited, Beijing 102209, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202504009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20250716.0844.002.html>

网络出版日期: 2025-07-16

收稿日期: 2025-05-26

摘要: 光计算作为一种基于光子进行信息处理的新型计算范式, 凭借高并行性、低能耗和大带宽等优势, 正成为下一代光网络演进的关键支撑技术。从光计算的架构形式与系统层级双重路径出发, 系统解析其技术发展脉络, 并归纳关键支撑要素与集成模式。在此基础上, 聚焦下一代光网络中的典型应用场景, 重点探讨光计算在光信号处理、网络智能优化、通感一体及智算体系等领域的融合路径, 揭示其在构建新型信息基础设施中的潜在价值与发展方向。

关键词: 下一代光网络; 光计算; 新型信息基础设施

Abstract: Optical computing, as a novel computing paradigm utilizing photons for information processing, is emerging as a key enabling technology for next-generation optical networks due to inherent advantages including high parallelism, low power consumption, and large bandwidth. The technological evolution of optical computing can be analyzed through dual perspectives of architectural forms and system hierarchy, with critical supporting elements and integration paradigms systematically summarized. Typical application scenarios in next-generation optical networks demonstrate optical computing's integration pathways in optical signal processing, network intelligence optimization, integrated sensing-communication, and intelligent computing systems. These developments reveal significant potential value and clarify future directions for constructing advanced information infrastructure.

Keywords: next-generation optical network; optical computing; new information infrastructure

引用格式: 李俊杰, 刘宇阳, 霍晓莉. 面向下一代光网络的光计算技术应用思考 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(4): 55-63. DOI: 10.12142/ZTETJ.202504009

Citation: LI J J, LIU Y Y, HUO X L. Optical computing: advancing next-generation optical network applications [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(4): 55-63. DOI: 10.12142/ZTETJ.202504009

随着6G、云计算、人工智能等业务蓬勃发展, 下一代光网络承载着前所未有的流量增长与多样化业务需求, 正朝着超高速率、超大容量、超大规模及高度智能化方向演进^[1]。为支撑未来光网络的新兴业务及其运维, 应对数据处理和计算需求的激增, 传统电计算遭遇算力与能效的双重瓶颈。通信网络对实时性、智能化的要求不断提高, 需在更低时延下处理海量数据。这些因素促使业界重新审视信号处理方式, 推动在光网络中引入新型计算技术以突破现有瓶颈。

光计算(又称光子计算)凭借光信号承载与处理信息, 被视为突破电子计算瓶颈的有力候选方案^[2]。与传统电子计算相比, 其具备多维并行、超低时延及低功耗等显著优势。相关研究显示, 光子集成电路现已能够实现超高速人工神经

网络, 有效加速机器学习与人工智能应用, 在医疗诊断、电信网络及高性能计算等诸多领域展现出巨大潜力^[3]。

近年来, 光计算技术受到学术界和产业界的广泛关注, 相关研究与应用竞争日趋激烈。2014年前后, 多个团队提出可扩展硅光神经网络架构; 2017年, 基于硅光平台的光神经网络计算芯片初步演示成功^[4]。这些系统引入片上电子电路进行校准和控制, 解决了光学器件高敏感性、低稳定性问题, 实现多级光计算单元级联和基本非线性功能。同时, 高速调制器、低损耗波导、相变存储材料、光放大器等新型光器件不断涌现, 为构建复杂光计算系统提供元件支撑^[5-6]。在产业界, 大量初创公司从高校实验室孵化, 聚焦光计算芯片商业化落地^[7]。谷歌、Meta、微软、百度等通过投资初创

公司布局光计算，英伟达等大型企业也投入研发。面向人工智能（AI）加速的光计算芯片与板卡已研制成功并试用，有望短期内用于云端AI推理加速。例如，美国Lightmatter公司研发的硅光AI芯片采用多级马赫-曾德尔干涉仪（MZI）阵列架构，结合电子芯片构建光电混合计算系统。测试数据显示，在双向编码器表示Transformer（BERT）模型自然语言推理任务中，该系统在同等功耗条件下，计算速度是英伟达A100图形处理器（GPU）的5倍以上^[8-9]。中国初创企业曦智科技开发的光电混合架构光子计算处理器在组合优化问题求解中展现出显著优势，其计算延迟可低至3 ns，较传统GPU提升两个数量级^[9]。当前，光计算技术已实现从实验室研发到产业化应用的重要跨越。

本文系统分析光计算技术的3个技术路径——模拟光计算、数字光计算与光电混合计算，重点解析其架构特征、关键技术及应用场景。基于此，进一步聚焦下一代光网络的核心应用领域，深入探讨光计算技术的应用潜力与发展前景。

1 光计算架构、技术与场景分析

光计算技术可从架构类型、关键技术和系统集成3个维度进行分析。在架构层面，分为模拟光计算、数字光计算和光电混合计算3种类型；技术层面聚焦器件、芯片与模块的开发；系统层面则着重整体架构集成与平台化应用实现。

1.1 架构分类

1.1.1 模拟光计算

模拟光计算是利用光模拟信号的连续幅值或相位直接执

行数学运算的计算方式，其典型代表包括光学神经网络、光学矩阵计算和光学伊辛机等系统。与数字计算侧重离散逻辑不同，模拟光计算借助光学干涉、衍射等物理过程实现矩阵运算加速，具备高度并行性和极高吞吐量，在以线性矩阵运算为主导的深度学习等任务中，展现出显著的性能优势^[10]。

模拟光计算可细分为相干光计算和非相干光计算两种形式。相干光计算借助激光相干性的幅值和相位信息，通过干涉实现精准加权求和，如基于MZI阵列的光矩阵乘法器；非相干光计算则以光强度（功率）作为计算量，常通过光电探测将光强转为电信号读取计算结果。相干方案精度高，但对相位稳定性要求严格；非相干方案结构简单，更易集成。近年来的研究聚焦于在片上集成光路中实现大规模光学矩阵运算单元。例如，平面集成式光子神经网络（PNN）架构广泛采用MZI、微环谐振器（MRR）、相变材料（PCM）等器件构建阵列，实现矩阵向量乘法等线性计算^[5]。清华大学团队提出的“太极”分布式光芯片结合光学干涉与衍射两种机制，集成了上百万个等效的“神经元”，在保持可重构通用计算能力的同时实现了大规模并行计算，系统能效可达到160 TOPS/W（每瓦特万亿次运算）^[11]，如图1（a）所示。利用微环阵列可对不同波长的光信号施加独立的幅度权重，以实现多波长并行的矩阵计算。2023年，上海交通大学团队基于可调谐微环阵列研制了高阶光子张量处理芯片（PTFP），基于波长、空间等维度实现了更复杂的张量运算，加速深度学习计算^[12]，如图1（b）所示。自由空间光学也是模拟光计算的重要路径之一，例如利用空间光调制器（SLM）和透镜构建光学傅里叶变换和卷积计算器，或构造空间全光神经网络。自由空间互连式PNN可支持规模庞大

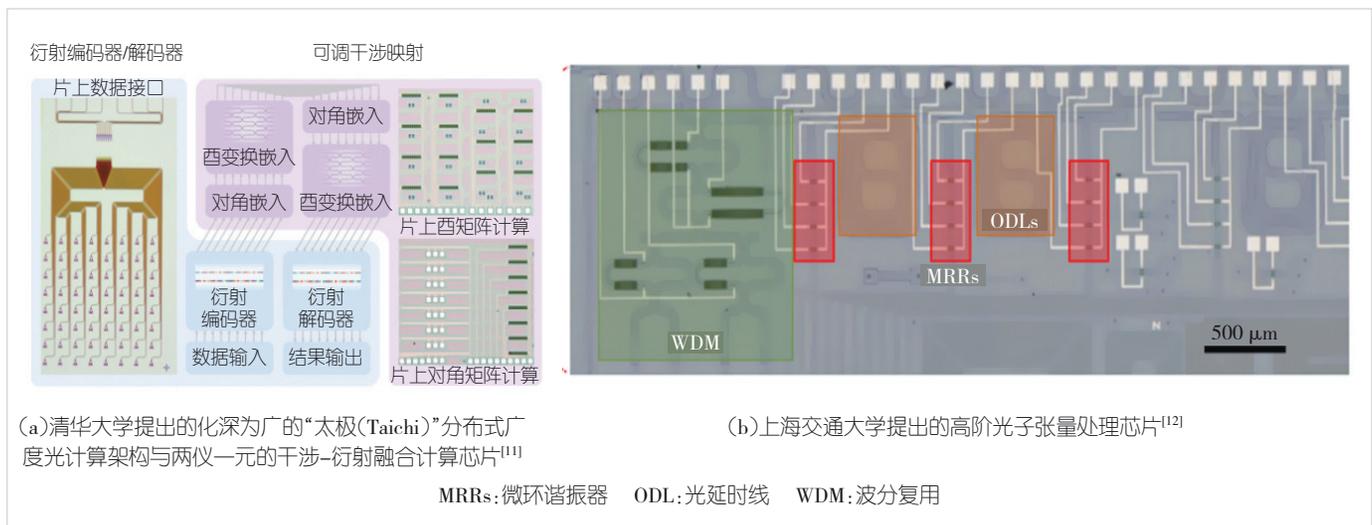


图1 典型技术方案与实现

的矩阵运算，但体积较大且难以集成，适合作为实验验证和特定高端应用（如超高速信号处理）的方案^[13]。

此外，光学伊辛机作为模拟光计算的重要方向，针对组合优化离散问题展示出强大潜力。伊辛问题求解可映射为光学系统的能量极小化过程，通过模拟自旋相互作用的光学器件网络快速收敛到最优或次优解^[7]。例如，利用光纤环路延迟和非线性增益介质构建的相干伊辛机（CIM），可在硬件上直接模拟伊辛模型的演化以高效寻优。在2015年，斯坦福大学与东京大学联合团队提出了测量反馈型相干伊辛机方案，通过高速光电探测和反馈电路模拟伊辛模型演化过程，并于2016年成功利用该系统求解了典型非确定性多项式难题（NP-hard）——最大割问题。华中科技大学在2025年提出的单芯片集成光电耦合伊辛计算机取得了重要突破。该系统采用差分驱动微环调制器（MRM）实现高效非线性响应（4 mW/spin），通过Sagnac结构光矩阵实现实对称耦合，可在150 ns内完成四自旋问题的地面态求解，芯片面积仅为0.01 mm²^[14]。上述研究表明，此类光学计算系统在求解网络路由优化、资源调度等组合优化难题时，相比传统电子计算能实现指数级的加速和更优的能耗表现。因此，在需实时求解复杂网络优化的场景（如网络动态路由计算）中，光学伊辛机有望成为传统算法的重要补充。

模拟光计算在精度和容错性方面仍面临挑战。模拟信号易受噪声和器件不稳定性影响，因此如何在大规模光计算系统中保持计算精度成为关键问题，而这通常需要借助混合集成的电子控制电路对光学单元进行校准补偿^[5]。此外，模拟光计算实现非线性激活功能往往需要引入光电转换或光学非线性器件，如利用光电二极管+放大电路实现整流线性单元函数（ReLU）激活，或采用饱和吸收体、相变材料等实现纯光学的阈值响应。目前，基于锗硅探测器和微环调谐的光控激活器等片上可编程的光学非线性单元已实现突破，能够实现低至毫瓦级阈值的ReLU和Sigmoid函数，有效缓解了多层光网络中信号级联衰减的问题。随着器件工艺的进步和光电融合设计的优化，模拟光计算的精度和稳定性有望逐步提升。

1.1.2 数字光计算

数字光计算是一种采用光子来表示二进制信息并实现逻辑运算与数字信号处理的技术方案。该技术旨在构建与电子计算机逻辑门阵列类似的全光逻辑电路体系，以实现通用数字计算功能。

数字光计算展现出显著优势：光的开关响应速度极快且无需电容充放电过程，构建稳定的全光逻辑门电路可能实现

超越互补金属氧化物半导体（CMOS）技术的高速并行数字处理能力。然而实际发展面临诸多挑战，核心瓶颈在于全光非线性效应和反馈控制的有效实现^[9]。早期研究主要利用光学非线性效应（如四波混频、增益饱和等）实现全光开关和触发器，但面临材料非线性阈值高、集成困难等问题。为提高与硅光工艺的兼容性并降低损耗，中山大学等团队提出基于多模干涉（MMI）的集成光学逻辑门方案，通过精确设计波导结构使干涉输出匹配预期逻辑结果，实现了硅基集成多种基本逻辑门^[16]。近年还出现了基于线性光学的新型全光逻辑实现途径：利用衍射型深度神经网络（D²NN）训练超表面光学元件，实现对输入光信号的任意可编程线性变换，从而完成与逻辑门等价的映射。东京大学团队利用定制超表面构建了具有完备逻辑功能的衍射光学层，能在图像平面上对256个像素并行执行逻辑运算，并通过更换衍射层在硬件上动态重构AND（与）、OR（或）、XOR（异或）等16种逻辑功能^[17]。类似地，还有研究利用空间光调制器实现可重构的全光逻辑门，并基于光子晶体波导、等离子纳米波导、热调谐MZI阵列等不同机理演示了多种光学逻辑门。图2总结了部分全光逻辑门的范式，包括透镜阴影投影法、SLM方法、衍射神经网络、光子晶体、等离子槽波导、热光MZI阵列等路径。这些成果表明，全光数字计算在器件层面是可行的。尤其在光通信领域，数字光计算可用于光学信号处理和网络路由等应用。例如，以光逻辑门直接解析分组头信息、执行错误检测等，从而减少光电转换开销，实现真正的全光网络。

当前数字光计算与通用可编程计算机仍存在显著差距，主要瓶颈在于缺乏高效的光存储和时序控制机制^[4]。电子计算中依赖触发器和存储器保持逻辑状态，而纯光系统中光子难以静止存储，现有光学缓存和随机存取存储器尚未成熟。尽管光学缓存、光子晶体存储等方案被提出，但其读写速率和集成度仍远逊于电子存储器。此外，全光电路要实现复杂逻辑往往需要多级门阵列和反馈回路，面临光路损耗、信号放大和噪声累积等严峻挑战。目前全光逻辑演示多限于固定功能或小规模系统，可编程能力较弱。因此，数字光计算短期内更适合作为专用光信号处理加速器（如高速全光开关矩阵、光学加密/编码器件等），尚难取代通用中央处理器（CPU）与GPU。

1.1.3 光电混合计算

鉴于纯光模拟与纯光数字方案均存在局限性，当前研究趋势正转向光电混合计算架构。该架构将光计算单元与电子器件紧密结合，充分发挥二者优势，构建切实可行的混合系

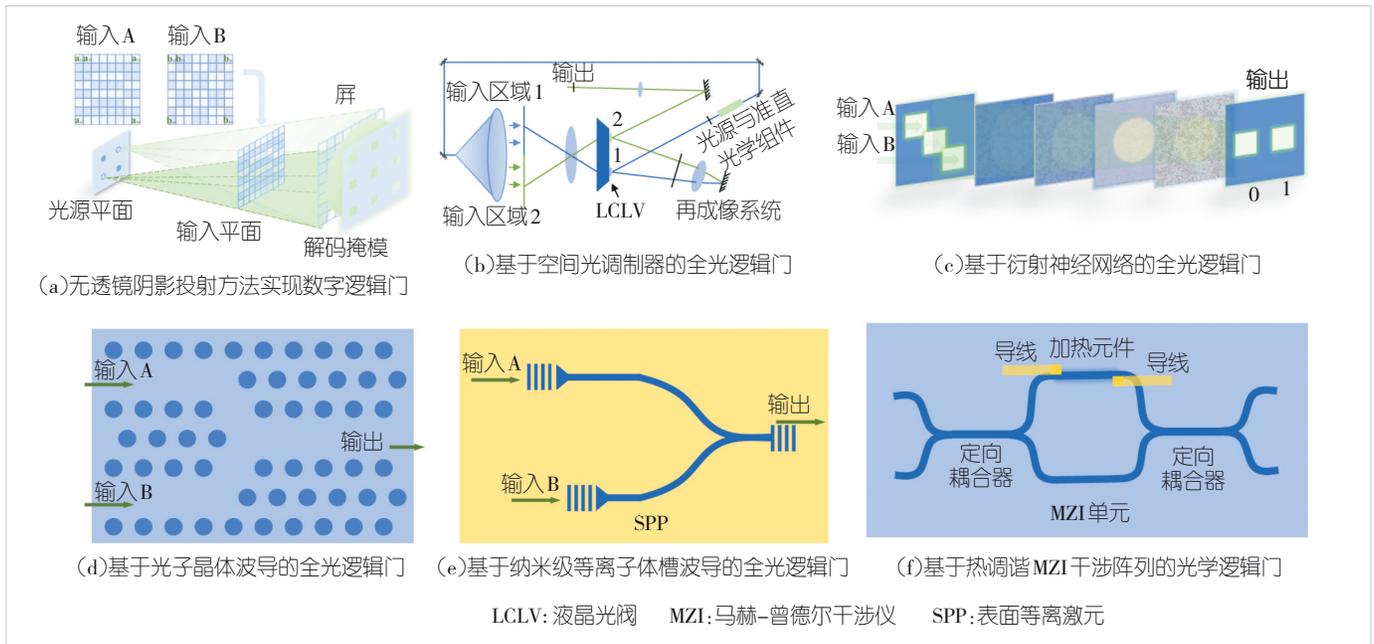


图2 全光逻辑门的范式^[6]

统。在光电混合计算中，核心思路是让光子承担大规模并行的线性计算，以充分发挥其高速、低功耗的优势；而电子器件处理存储、控制以及非线性计算等任务，为系统提供成熟可靠的补充。

光电混合计算已成为当前光计算原型的主流实现方案。例如，硅光神经网络芯片通常在片上集成光调制矩阵阵列和光电探测器，同时配套CMOS电路实现对各光调制单元的调控、漂移补偿以及对探测信号的后续非线性处理。Light-matter公司的光计算加速器正是基于此思路的典型产物，其核心是一个可等效执行矩阵乘法的多级MZI光子芯片，外围结合高性能数字电子芯片，从而实现“光计算+电读取/控制”的协同工作。从体系结构上看，光电混合计算本质上是一种异构计算范式，即在同一系统中融合不同物理机制的计算引擎，各司其职完成复杂任务。为提升这类架构的性能，学术界正探索更紧密的光电融合设计，包括共封装光学(CPO)系统(将光引擎与电芯片高密度互连封装)以及“存算一体”光电单元(将光学计算单元与非易失光存储集成)等。

未来可扩展的光子计算机可能采取的混合路线是：在电子器件擅长的领域仍保留电子方案，将最耗时耗能的矩阵运算等部分交由光子高效完成。《Nature Photonics》中的综述指出，实现大规模神经形态光计算需要高度紧密的光电子融合，包括混合光学-电子存储架构，以根据应用灵活选择易失/非易失、数字/模拟的存储方案^[4]。换言之，光计算的未来并非取代电子计算，而是与之融合共生，构建光电协同的新型计算形态。通过发挥光的优势并弥补其短板，光电混合计算为光计算技术走出实验室、服务实际应用提供了现实途径。

表1针对上述3种架构进行了对比，不同光计算架构在运算机制、应用目标与当前产业落地路径上呈现明显差异。模拟光计算侧重于高通量AI推理，数字光计算探索全光逻辑通用处理，混合计算则在工程可行性与系统兼容性上具备突出优势。

1.2 关键技术分析

为了支撑上述光计算的各类架构，需在器件、芯片与模块三大领域进行技术创新。

表1 典型光计算架构类型对比分析

架构类型	运算机制	优势	挑战	应用场景
模拟光计算	干涉、衍射、衰减模拟线性运算	超高并行性、大吞吐量、极高能效	精度受噪声影响、缺乏非线性机制	智能推理、图像识别、伊辛优化
数字光计算	全光逻辑门执行二进制运算	高速、可构建通用逻辑	缺乏光存储、非线性控制难	光通信逻辑、加密处理
光电混合计算	光做矩阵乘法、电处理控制与非线性	可重构、易部署、工程可实现	光电协同复杂、封装和热控困难	智能加速、边缘计算

1.2.1 器件

器件层面涵盖了光计算所需的各类光子器件和关键材料，是构建上层计算功能的基础。

高速光调制器和相位调制器通过输入电子信号调控光信号的幅度或相位，实现计算系数或数据的编码。常用的方案包括基于电光效应的硅基MZI调制器、铌酸锂调制器，以及依赖热光效应的微环调制器等。这些调制器需具备高带宽、低插损和低功耗，以满足大规模阵列集成需求。

激光光源为光计算提供载波信号，其中多波长平行光源（例如光频梳或多路激光阵列）可有效提升频谱并行度。近期发展的片上集成可调谐激光阵列技术，为单芯片集成稳定的多波长光源^[15, 18]提供了可能。

光学互连和波导实现光信号在芯片内外的传输与分配，其中低损耗、高密度的硅波导以及三维光纤耦合技术保障了光计算模块间高效通信。光探测器（如锗硅光电二极管）完成光信号至电信号的转换，用于数据读出或反馈控制。其关键性能指标包括高响应度、低噪声和高速响应，部分光计算架构还要求探测器具备模拟域非线性函数的直接执行能力。

光计算系统不仅依赖核心器件，还需光学非线性元件（如饱和吸收器、非线性光纤、光放大器等）以实现阈值逻辑或信号放大，以及可重构光学元件（如相变存储材料、可调谐滤波器等）用于动态调整计算参数。此外，高精度的光学封装、散热与控制组件也是其重要组成部分。

总之，光计算系统的性能上限由器件成熟度直接决定。尽管光子器件在速度和并行度上具有天然优势，但在尺寸、工艺成熟度和集成复杂度等方面仍需改进。推动器件向更小型化、低功耗和易于大规模制造方向发展，是光计算的长期任务。

1.2.2 芯片

芯片级聚焦于将多种光子器件集成，构建可执行特定计算功能的光计算芯片或光子电路^[19-20]。

典型的芯片级实现通常基于硅光子或III-V材料平台，集成矩阵运算单元（如MZI阵列或微环阵列）、光源耦合、光探测阵列等，构成完整的计算加速器。例如，麻省理工学院等机构研制的光学矩阵乘法芯片包含了 $N \times N$ 的干涉仪网络，可对输入向量与片上编程的矩阵进行并行乘积运算。芯片级设计需综合考虑光路布局 and 电子电路布局，以减少光传输损耗和串扰，并实现有效的热控和校准。硅光子技术因可兼容CMOS工艺，被认为是构建高速、低延时光计算芯片的理想平台，在AI高算力场景中具有重要的潜在应用价值。

近年来，全球已研发出多款原型光计算芯片，包括用于

简单图像分类、算力达数十GMAC/s（每秒执行的十亿次乘积累加运算）的硅基神经网络芯片，以及光子卷积加速器芯片、光学张量处理芯片等。这些芯片在手写数字识别数据集（MNIST）等任务上取得了接近90%的推理准确率，算力达到传统同规模电子网络的数倍到数10倍。尽管目前光计算芯片多为专用加速器，功能相对单一，但其在实际任务中的可行性已得到初步验证^[15, 21]。

随着工艺改进和设计优化，未来的光计算芯片有望实现更高的计算密度。例如，有研究引入多维复用（波长复用+模式复用+偏振复用），使一款 8×8 MZI网络的矩阵计算芯片在执行矩阵-矩阵乘法加速时，等效算力达到40 GMAC/s，是相同规模传统电子网络的2倍。芯片级的进展表明，在几平方毫米的光片上实现光万亿次级别计算已成为现实，为上层模块和系统提供了功能完备的基本单元。

1.2.3 模块

模块级是指将一个或多个光计算芯片与辅助电路、封装光学等集成为可供系统直接使用的光计算模块或板卡，类似于CPU主板、GPU加速卡，但其核心计算单元为光计算芯片。

模块级设计关注电源、控制接口、散热以及与现有数字系统的对接。光计算芯片通常需要精密光纤耦合、激光光源供给、温度稳定控制等，因此将其制成标准化模块可极大方便系统集成。目前已有公司推出面向数据中心服务器的光计算加速卡，采用外围组件互连高速通道（PCIe）等接口直接插入主机，作为AI推理加速器使用。这些模块一般包含光计算芯片（或多个芯片）、驱动电路板、光源（可能通过光纤引入或板载激光器）、光电转换及控制应用特定集成电路（ASIC），以及必要的固件软件。通过标准化模块，光计算可以像GPU那样被现有计算机系统调用，例如协助处理深度学习推理、实时信号处理等任务。

模块级的重点在于兼容性和易用性，即如何将光计算能力透明地提供给用户应用，无需用户了解底层光学细节。这涉及开发相应的软件栈、编译工具，将神经网络模型映射到光计算单元上执行^[22]。此外，模块级还要解决多芯片协同问题。一个模块可能集成多个光芯片或多个并行光通道，以获得更高吞吐量；如何高效调度这些资源并保证模块间通信低延迟，是当前面临的重要工程挑战。

尽管如此，当前已有少量光计算模块进入测试阶段，表明光计算正迈出实验室，向产品化又进了一步。

表2展示了光计算关键技术的对比，从器件到模块的推进顺序反映了其产业化落地的进程。其中，器件与芯片是性

能的基础，而模块构成了部署单元。整体上看，光计算正从低层硬件创新逐步走向高层系统集成与服务平台构建，为通信网络的多层级算力融合提供了坚实基础。

1.3 系统及平台集成

基于上述技术与架构，光计算需考虑如何融入实际网络并创造价值。其融合方式通常可分为计算系统与光计算的融合应用（系统层面），以及上层平台与光计算的融合应用（平台层面）。

1.3.1 系统

系统级着眼于光计算在完整计算系统中的引入和部署形态，包括光计算与现有计算/网络基础设施的融合方式。例如，在数据中心的服务器和加速集群中部署光计算板卡，形成“CPU+GPU+光计算加速器”异构计算服务器；或者在超算系统中，引入光计算节点构成部分功能单元，实现更高性能和能效比的系统设计^[23]。

从系统架构角度出发，光计算单元的网络互联协同至关重要。在高速互联计算集群里，可借助光互连网络，让多个光计算加速器直连，凭借光的低延迟、高带宽特性，构建分布式光计算系统。在边缘计算场景中，光计算芯片可嵌入网络设备（如路由器、基站）内，作为本地AI处理单元，打造出“计算+通信”融合的智能网络节点。当系统级部署光计算时，接口与编排是关键。需制定明晰的接口协议，使上层软件能便捷调用光计算资源，并将其纳入系统资源管理与调度体系。可采用容器或虚拟化技术，将光计算加速呈现为可编排服务；或研发新操作系统支持，把光计算纳入异构计算调度体系。

目前，光计算硬件尚处于原型阶段，尚未实现系统级大规模部署的成熟应用。但学术界已开始探讨相关模型，例如利用光计算加速数据中心网络中的繁重任务（如AI推理服务），建立“光计算云”；或在超级计算系统中，将光子加速模块用于特定迭代算法以提升整体性能。可以预见，随着单节点光计算性能的提高和可靠性的增强，系统级采用光计算

将有望从小规模试验走向大规模推广。在许多国家，互联网数据中心和超算中心也在关注采用光子加速技术来降低能耗，提升性能。

1.3.2 平台

平台级是指在更宏观的信息基础设施和应用平台中融合光计算能力。例如，未来企业构建的“算力网络”或“智能云网”平台，可以将光计算模块作为算力池的一部分，通过网络进行统一调度，为用户提供更高效的计算服务。

在这一层级，光计算不再被视为单一设备，而是作为整个信息平台的组成要素参与资源编排。例如，在面向智能城市的云平台中，后台拥有中央处理器（CPU）/GPU 集群以及若干光计算加速阵列。通过调度策略，将某些高耗能AI任务（如视频分析、机器视觉）分配到光计算阵列执行，以降低延迟和功耗；而其他任务则交由通用CPU/GPU处理，以保证灵活性。

在未来边缘云平台中，分布在各地的边缘节点可能搭载光计算加速器，用于实时处理本地数据，然后通过高速光网络回传或协同决策。这种架构需要新的平台软件支持，包括异构算力的统一编程接口、分布式任务拆分与调度算法，以及能根据任务特性智能选择最优计算资源（光还是电）的中间件。宏观来看，平台级视角意味着要从战略层面规划光计算在网络架构中的位置。例如，在哪些节点部署光计算单元、如何与现有的光传输系统对接、怎样提供面向业务的服务接口等。这一层级往往与国家或行业的发展战略相关，如“东数西算”工程强调将计算任务在全国范围内高效调配，“算网融合”要求计算资源和网络资源的一体化编排。在这些顶层规划中，光计算有望作为绿色高效算力的重要组成部分被纳入，从而支持国家在人工智能、边缘计算、碳中和等方面的宏大战略需求。

综上所述，从架构、技术与应用层级3个维度展开的分析来看，光计算技术各层级的现状和挑战存在差异。在关键技术层面，器件、芯片、模块整体处于技术攻关和工程化起

表2 光计算关键技术对比分析

技术	功能作用	代表器件/方案	关键技术指标	主要挑战
器件	构成基本计算与调控单元	光调制器、微环谐振器、光探测器等	带宽、响应时间、插损、尺寸	微纳加工精度、材料稳定性、低功耗一致性
芯片	集成基本计算功能的最小系统单元	MZI矩阵、微环阵列、张量处理核	算力密度、误差率、封装密度	热漂移补偿、信号完整性、封装耦合
模块	提供标准接口与辅助功能的计算板卡	光计算主板、PCIe卡、边缘插卡	模块功耗、接口兼容性	光电接口标准不统一、系统级散热与耦合

MZI: 马赫-曾德尔干涉仪 PCIe: 外围组件互连高速通道

步阶段。器件和芯片层科研创新比较活跃，但成熟商用尚需时日；模块层则需要实际工程来体现价值。在应用场景方面，系统层已有原型验证，展现特定领域应用前景；平台层属前瞻性探索，短期内落地难度大，但从长远看潜力巨大。

2 面向下一代光网络的光计算应用分析

光计算的兴起既是机遇也是挑战。下一代光网络将不再仅仅是传统的传输管道，而是面向 AI 时代、实现网络与智能深度融合的关键基础设施。光计算作为利用光子进行超高速、低功耗信息处理的技术，有望成为推动光网络智能化演进的重要途径，使网络从以传输为中心转变为集传输、计算、感知于一体的智能网络。

从光计算的具体应用场景来看，其未来潜在应用方向主要分为以下几方面：光电信号处理、网络智能优化、通感一体以及智算体系建设。

2.1 光电信号处理

光计算可用于直接处理高速光信号，从而提升光网络中信号传输和处理的效率与性能。在骨干网和城域网中，当前的信号处理主要依赖高速数字信号处理（DSP）芯片和电交换设备。然而随着速率攀升，电子 DSP 的功耗和复杂度急剧上升，已成为限制系统性能提升的瓶颈。因此，利用光计算器件直接对传输中的光信号进行均衡、滤波、纠错等处理，可减少光电转换和数字 DSP 负担。例如，全光神经网络可用于非线性噪声抑制和光性能监测等。这类应用可望通过在光域完成复杂运算来降低节点处理延迟和能耗^[24]。

目前，在光节点中采用波长变换、光再生等光学处理手段来卸载电子信号处理，已有效提高了网络性能。这表明，光计算用于信号处理可进一步改善传输质量和效率：比如全光的信道均衡与纠错，可以在不增加电子开销的情况下提升信号传输可靠性。因此，在高速率、大容量传输场景下引入光计算型信号处理单元，有潜力缓解电子瓶颈，使光网络支持 Tbit/s 级的信号以更低延迟、更高可靠性传输，从而满足未来业务对带宽和实时性的要求。

2.2 网络智能优化

通信网络的规划和资源调度涉及大量复杂的组合优化问题，例如路由和波长分配（RWA）、业务调度、流量工程等。这些问题在大规模网络中非常复杂，传统电子计算往往难以实时求解。例如，中国电信拥有全球最大的基于可重构光分插复用器（ROADM）的全光骨干网，该网络包含近 700 个节点，系统带宽超 1 200 Tbit/s，总长度达 40×10⁵ km。

在如此庞大的干线网络中，实现极速、精确、高效的网络规划与资源调度是一项非常艰巨的工程。

光计算擅长并行处理大规模计算任务，在解决这类网络优化问题上具有独特优势。研究表明，对于不要求精确全局最优解的复杂计算任务（如神经网络推理或组合优化），光计算凭借大规模并行和低时延特性，有望超过经典电子计算的效率。面向实际网络，可考虑引入“光计算资源编排器”，利用光子处理器快速求解网络优化模型^[19]。

网络的路由规划、资源分配是复杂的组合优化问题，传统算法在网络规模增大时计算耗时长且难以实时优化。光学伊辛机等模拟计算设备可用于求解网络最优路由、流量工程等 NP-hard 问题，在较短时间内逼近最优解。例如，将网络拓扑映射为伊辛模型，由光计算加速求解，可用于动态线路调度或多约束路由计算，加速自优化网络的决策过程。又如，基于光子的等值模拟退火或伊辛模型计算器，可在极短时间内得到接近最优的网络资源分配方案，从而实时优化光纤链路的路由选择、频谱分配或多接入边缘计算任务的调度。这样的光计算网络优化引擎将使网络控制决策速度大幅提升，提高网络对动态业务变化的响应能力和资源利用效率。

随着网络规模和算力网络协同需求的增长，光计算有望成为未来智能网络的大脑之一，支撑更自优化、更高效的网络运营。

2.3 通感一体

未来网络（如 6G）强调通信与环境感知的融合，即利用同一套网络基础设施同时提供通信服务和环境/态势感知。“通感一体”光网络目前已成为研究热点，其协同架构需要能够处理海量感知数据并与通信过程实时联动。

光计算在其中具有广阔的应用前景：一方面，光纤本身可作为分布式传感器，例如探测光缆振动以进行安防或地质监测；另一方面，光计算单元可以高速处理这些传感信号并提取有用信息，而不必完全依赖电层计算，从而实现通信信号传输与感知数据处理的同步进行。例如，在光纤通信系统中引入光通感协同优化器，利用光计算实时分析沿光纤传回的后向散射信号以探测环境变化，同时优化调整通信波形或频谱资源，以在不牺牲通信质量的前提下提高感知精度。又如，在自由空间光通信或可见光通信中，光计算可以用于快速处理光学雷达（LiDAR）或成像信息，与通信信号共同作用，实现边通信边探测目标的功能。

通过这些手段，光网络将不仅传输信息，还可感知网络所处的环境状态，为安全监测、交通管理等提供实时数据支

撑。尽管通感一体化目前仍处于研究阶段，但基于光计算有望突破实时数据处理瓶颈，助力打造面向智慧城市、智慧交通的光通信与光感知融合平台。

2.4 智算体系建设

光计算在智能算力支持方面具有广阔的应用前景，可作为AI和高性能计算任务的加速器，提升算力供给能力。光子的并行计算特性特别适合矩阵运算等AI核心计算。例如，在大型神经网络推理中，矩阵乘法是主要瓶颈之一，而光计算可以通过光学干涉实现大规模矩阵并行乘积，大幅降低延迟和能耗。

在智算数据中心互联（DCI）场景下，光计算的作用主要体现在两方面：一是支持数据中心内部的算力扩展，二是优化跨数据中心的传输效率。首先，光计算芯片有望成为未来数据中心算力池的新成员。在超大规模数据中心中，AI训练和推理任务占据了相当比重且是电力消耗大户。若在服务器内或机架级别部署光计算加速卡，可大幅提高AI任务性能/功耗比，降低数据中心电源使用效率（PUE）。目前，业界的光计算加速器已经在理论与试验上展现出显著优势。例如，中国科学院上海光学精密机械研究所与北京大学共同研制的超高并行光计算芯片，在50 GHz光学主频下，理论峰值算力可达2 560 TOPS^[25]。对于数据中心（如智算业务）而言，引入这类光计算加速资源有双重收益：既能提升云服务的AI处理能力，又可削减能耗，降低运营成本。因此，可在自有互联网数据中心（IDC）中试点试验性的光计算服务器，用于特定AI应用（如通信网络优化仿真、视频内容分析等），评估其性能和节能效果。其次，在数据中心互连网络优化方面，光计算也有用武之地。数据中心集群间的流量调度、负载均衡也是复杂的优化问题，需要实时决策。在DC-Mesh组网的链路中，如果能利用光学优化器实时计算最优流量分配，或者利用光子加速器动态压缩/加密传输数据，将提升DCI网络的效率和安全性。例如，可以构建全光数据压缩模块，对冗余数据进行光学变换和编码压缩，然后在另一端以光学方式解压，提高链路有效利用率。

另一个典型的场景是边缘计算。随着移动边缘计算（MEC）的部署，人们开始在本地汇聚点（如5G基站机房、汇聚局所）部署计算资源，以提供低时延服务。如果能够使用光计算加速器承担部分边缘AI推理或大数据处理任务，那么边缘计算节点的性能密度便能得到显著提升，同时功耗也会相应降低。例如，在视频监控与安全领域，城域网边缘节点需要实时分析海量摄像头视频，采用传统方案将视频回传至云端进行分析，这会面临带宽和时延方面的巨大压力。

但如果在边缘局所放置光计算视觉加速模块，就可以在本地对视频流进行高速并行的目标识别和异常检测，然后仅传递结果或元数据，这样可极大缓解骨干压力并实现毫秒级响应。在工业互联网、车路协同等业务中，靠近现场部署光计算单元处理本地感知数据，能够减少云往返，提高系统自治能力。

将光计算融入网络，能够高效构建算力与网络融合的新型基础设施。在信号传输优化、网络智能控制、通信感知融合和算力供给提升等诸多方面，光计算为实际网络拓展出了广阔的应用前景。此时，网络不再仅仅是传输通道，更成为提供算力服务的平台，成功打造出兼具“高速率”与“智能化”的下一代光网络，在AI和算网融合时代占据优势。

3 结束语

面向未来，光网络的内涵有望从单纯的连接拓展为计算与连接紧密协同、光网络与光计算深度融合的智能化光网络。光计算技术以其独特优势，有望成为突破现有计算瓶颈的新路径，对于支撑下一代光网络的演进具有重要意义。然而，目前光计算技术仍处于探索阶段，其未来发展充满不确定性和挑战。从技术层面看，光计算器件需要在稳定性、集成度和成本上取得突破，新的材料与工艺或许是实现高性能光计算芯片的关键；光计算系统架构需要解决光电融合与可编程性等问题，形成完善的软硬件生态。从应用层面看，光计算要真正发挥作用，还需寻找与电子计算互补且经济可行的应用场景。例如，针对光网络中的特定高价值场景（如超低时延控制、超大规模网络优化），光计算才能体现出足够的优势。

展望未来，光计算的发展路径将呈现多样化趋势。在技术演进层面，光电混合计算或将成为主流方向，即在充分利用光计算的优势的同时，通过电子电路补足控制和通用计算功能。这种折中方案在可预见的未来更具可行性，已有多项研究和产品朝该方向稳步推进。在应用拓展上，光计算有望在通信网络的细分领域逐步实现落地，如全光交换节点、实时光信号处理模块、光子AI加速卡等，完成从实验室走向商用的跨越。同时，光计算与其他新兴领域的融合也值得关注，例如与量子计算、硅光子技术和神经形态计算的交叉，将可能催生出全新的计算架构。在国家和产业层面，对光计算的投入正不断增加，科研机构和企业正协同攻关，力求在这一战略性前沿领域取得关键突破。

总体而言，面向下一代光网络的光计算技术应用仍处于孕育阶段，但其潜在价值巨大。一方面，它为突破网络中电子计算的瓶颈提供了新思路；另一方面，它为网络功能演进

(如智能化、通感算一体化) 提供了新的技术手段。未来几年内, 我们有望看到光计算在局部场景的试点应用和关键技术的逐步成熟。未来, 随着技术的演进和应用的拓展, 光计算或将成为下一代网络体系中不可或缺的一环, 有望从边缘试点走向规模部署, 在光电信号处理、网络智能优化、通感一体以及智算等各类场景中发挥价值。

参考文献

- [1] Omdia. Road to 2030: AI and the future of network services - traffic outlook and Implications [R]. 2024
- [2] 中国信息通信研究院. 光计算技术与产业发展研究报告(2023年) [R]. 2023
- [3] 中国信息通信研究院. 信息光子技术发展与应用研究报告(2024年) [R]. 2024
- [4] SHASTRI B J, TAIT A N, FERREIRA DE LIMA T, et al. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing [J]. Nature photonics, 2021, 15(2): 102 - 114. DOI: 10.1038/s41566-020-00754-y
- [5] 毕岩峰, 吴星宇, 张璐矾, 等. 模拟光计算的发展与应用 [J]. 科学通报, 2024, 69(34): 5028 - 5041. DOI: 10.1360/tb-2024-0692
- [6] 李敬城, 张文凯, 董文婵, 等. 光学逻辑计算进展与挑战 [EB/OL]. (2025-03-24) [2025-04-23]. <https://www.opticsjournal.net/Articles/g241964/EarlyPosting>
- [7] 梁林俊, 鲁楠, 王扬. 光计算技术发展与应用研究 [J]. 信息技术与政策, 2023, 49(6): 40 - 46. DOI: 10.12267/j. issn. 2096-5931.2023.06.006
- [8] Lightmatter. Products [EB/OL]. [2025-05-12]. <https://lightmatter.co/products/enviser/>
- [9] STONE L. Lightmatter announces enviser, a photonic accelerator for AI [EB/OL]. (2021-03-15) [2025-05-22]. <https://aibusiness.com/verticals/lightmatter-announces-enviser-a-photonic-accelerator-for-ai>
- [10] HUA S, DIVITA E, YU S, et al. An integrated large-scale photonic accelerator with ultralow latency [J]. Nature, 2025, 640(8058): 361 - 367. DOI: 10.1038/s41586-025-08786-6
- [11] 马国庆, 周常河, 朱镕威, 等. 光计算的发展趋势: 模拟或数字? [J]. 中国激光, 2023, 50(5): 1-13. DOI: 10.3788/CJL221209
- [12] XU Z, ZHOU T, MA M, et al. Large-scale photonic chiplet Taichi empowers 160-TOPS/W artificial general intelligence [J]. Science, 2024, 384(6692): 202 - 209. DOI: 10.1126/science.adl1203
- [13] XU S, WANG J, YI S, et al. High-order tensor flow processing using integrated photonic circuits [J]. Nature communications, 2022, 13(1): 7970. DOI: 10.1038/s41467-022-35723-2
- [14] WETZSTEIN G, OZCAN A, GIGAN S, et al. Inference in artificial intelligence with deep optics and photonics [J]. Nature, 2020, 588(7836): 39 - 47. DOI: 10.1038/s41586-020-2973-6
- [15] WU B, ZHANG W, ZHANG S, et al. A monolithically integrated optical ising machine [J]. Nature communications, 2025, 16(1): 4296. DOI: 10.1038/s41467-025-59537-0
- [16] 黄莹. 基于片上神经网络的硅基集成光子计算芯片 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023
- [17] LI Z, CHEN Z, LI B. Optical pulse controlled all-optical logic gates in SiGe/Si multimode interference [J]. Optics express, 2005, 13(3): 1033 - 1038. DOI: 10.1364/opex.13.001033
- [18] MASHIKO R, NARUSE M, HORISAKI R. Diffraction casting [EB/OL]. [2025-04-20]. <https://researching.cn/ArticlePdf/m00090/2024/6/5/056005.pdf>
- [19] 韩溪林, 于潇, 易淑兰, 等. 片上“通感算一体化”光子网络助力打造高智能化警用无人机集群 [J]. 警察技术, 2025(1): 76-79. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9875.2025.01.020
- [20] 成骏伟, 江雪怡, 周海龙, 等. 光电智能计算研究进展与挑战 [J]. 中国激光, 2022, 49(12): 1219001. DOI: 10.3788/CJL202249.1219001
- [21] 王俊, 杨晓飞. 光子芯片研究进展及展望 [J]. 世界科学, 2020(12): 29 - 31
- [22] 陈蓓, 张肇阳, 戴庭舸, 等. 光学神经网络及其应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(6): 0600001. DOI: 10.3788/LOP222304
- [23] 符庭钊, 孙润, 黄禹尧, 等. 片上集成光学神经网络综述(特邀) [J]. 中国激光, 2024(1): 403-418
- [24] 淡一航. 面向光学计算的可集成光子器件及系统研究 [D]. 北京: 北京邮电大学
- [25] 陈宏伟, 于振明, 张天, 等. 光子神经网络发展与挑战 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 80 - 91. DOI: 10.3788/CJL202047.0500004
- [26] YU X, WEI Z, SHA F, et al. Parallel optical computing capable of 100-wavelength multiplexing [EB/OL]. (2025-05-17) [2025-05-22]. <https://elight.springeropen.com/articles/10.1186/s43593-025-00088-8>

作者简介



李俊杰, 中国电信股份有限公司研究院副院长, 教授级高级工程师, 中国电信股份有限公司光传输专业首席专家; 长期从事光传输与光网络等技术研究与应用; 发表论文 50 余篇。



刘宇韬, 中国电信股份有限公司研究院工程师; 主要从事光通信与光网络等前沿技术研究与应用; 发表论文 50 余篇。



霍晓莉, 中国电信股份有限公司研究院传输网络研究中心总监, 教授级高级工程师, 中国电信股份有限公司二级首席专家; 长期从事光传输网络技术研究与应用; 发表论文 40 余篇。