CAICT 中国信通院

集智 蓝皮书 No.202506

信息光子技术发展与应用研究报告

（2025 年）

中国信息通信研究院

2025年11月

版权声明

前　言

光子技术以光子作为信息和能量的载体，实现信息的获取、传递、处理和呈现，以及能量的转换与释放，是引领新一轮科技革命和产业变革、促进经济增长的基础性、战略性高新技术。尤其与人工智能、先进计算等新一代信息技术深度交织的信息光子，近年来成为全球主要国家高度重视、全力布局的重点方向。

当前，信息光子技术产业正加速发展，并进入重要战略机遇期。一方面，需求侧与人工智能、先进计算、移动通信、未来网络、泛在终端、生物医疗等深度交织，应用边界不断拓展，“渗透能力”和“辐射作用”持续增强。另一方面，供给侧新材料、新结构、新工艺、新机理创新活跃，芯片级光互连、光交换、光计算、新型传感与显示等方向亮点成果不断涌现，并构建了算连存一体、通感一体、感显融合等诸多新范式，尤其与微电子结合的光电融合成为新赛道，市场潜能日益提升，在信息化全域的重要性更加凸显。

2024 年，中国信息通信研究院首次发布《信息光子技术发展与应用研究报告》，成为管理部门和业界各方掌握信息光子领域发展态势的重要参考。本报告以 2025 年信息光子发展新动态为基础，针对重点细分领域及共性基础环节的研究应用进展、信息光子与人工智能双向赋能及光电融合等行业热点问题、未来发展趋势及路标等开展研究展望，希望为凝聚行业共识、推动我国信息光子技术产业高质量发展持续做出贡献。

目 录

图 目 录

表 目 录

一、信息光子技术体系与总体态势

（一）信息光子技术体系涵盖横纵向多类要素

光子技术贯穿信息生命周期全过程。信息光子是光子学与信息科学的交叉领域，将光子作为信息载体，通过操控光子实现信息的获取、传递、处理和呈现。按照信息产生至消失的周期过程，如图 1 所示，信息光子技术包含光传感、光连接、光算存、光显示四大细分领域，是信息基础设施和感知基础设施的重要构成部分。

来源：中国信息通信研究院

图 1 光子技术贯穿信息完整生命周期

光连接以光纤、大气或波导等作为媒质，基于电光/光电与光学等特性进行光信号的发送、调制、传输、交换和接收，实现信息传递。根据应用场景等不同，光连接包含光通信与光互连（或光互联），前者主要面向电信、卫星、海洋、汽车等场景；后者主要面向数据中心和智算中心之间及内部等场景。**光算存**包含光计算与光存储，其中光计算是利用光的物理特性将信息映射至光域进行处理或数据运算的新型计算方式，又分为数字光计算与模拟光计算。光存储基

于光致效应原理，例如通过激光与介质相互作用、使介质物理性质发生变化来实现信息的存储，又分为传统光盘存储与面向计算系统的新型集成存储。**光传感**通过对光的强度、偏振、相位、频率或光谱等参量进行获取和分析，并将参量变化转换为温度、应力、震动、电磁场等传感信息，又包含光电探测、激光传感和光纤传感等。**光显示**通过图像显示系统，将计算机存储、运算的中间过程或最终结果以可见光图像的形式展现出来，涉及图像的输出和可视化，包括多种技术路线。

来源：中国信息通信研究院

图 2 信息光子关键技术体系

信息光子的关键技术体系涉及横向多领域、纵向产业链和交叉融合等多类要素。信息光子的关键技术体系如图 2 所示，**从横向来看**，不同细分领域的关键技术和发展趋势存在差异，如光连接侧重高速率、大容量，光算存侧重并行化、大规模，光传感侧重高精度、

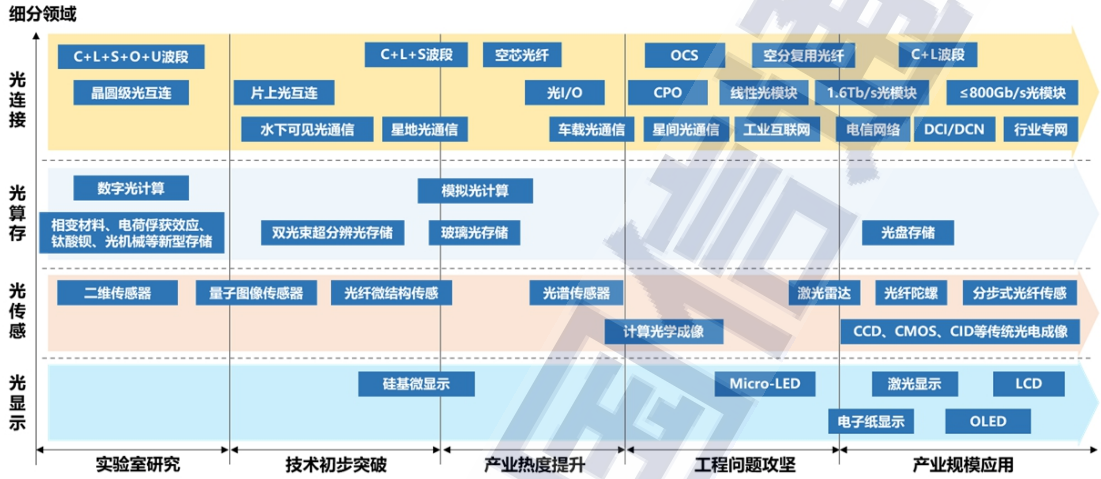
多元化，光显示侧重高分辨率、沉浸式，同时，各细分领域又呈现低能耗、低时延、高集成、高可靠和智能化等共性趋势特征。**从纵向来看**，一方面，信息光子产业链关键环节包含上游光子材料与制造工艺，中游芯片器件与模组，下游系统设备，以及基础配套的仿真设计软件、装备仪表等。另一方面，从信息光子支撑使能的各类上层应用来看，与智能、绿色、生物技术创新等新一轮科技革命方向紧密协同，尤其人工智能相关应用已成为拉动信息光子技术产业发展的“主力引擎”。**从交叉融合角度来看**，既包含信息光子各细分领域之间的跨领域融合，也包含信息光子与微电子之间的光电融合，全新技术范式正在构建。

（二）市场规模稳定增长，呈多样化发展阶段

全球光子技术产品的市场规模持续增长。在人工智能、移动通信、智能传感、泛在终端等应用需求驱动下，全球光子市场规模（包含信息光子及能量光子，核心材料、芯片器件、模块级和系统级产品等）已超过 8000 亿美元，并将逐步向万亿美元迈进。尤其信息光子技术的应用边界不断拓展，已渗透至电信网络、数据中心和智算中心、生物医疗、智能汽车、手机电视、头戴设备、机器人、飞行器等泛在化领域。其中，光算存市场规模约数十亿美元，光连接市场约数百亿美元，光传感和光显示市场均为数千亿美元。

信息光子各细分领域处于多样化发展阶段。一方面，传统方向持续演进，光通信、光盘存储、光传感、光显示等领域已实现规模

应用，并持续向更高性能、更多场景应用等纵深和宽广方向延伸发展。另一方面，新兴方向创新活跃，芯片级光互连、大规模全光交换、新型光纤、光计算、新型存储、生物传感、计算成像、硅基微显示等新兴方向不断突破，构建新范式、开辟新赛道。



来源：中国信息通信研究院

图 3 信息光子发展阶段与成熟度

光连接领域，电信网络、数据中心之间互联（DCI）、数据中心内部互联（DCN）等光通信与互连技术整体处于产业成熟应用阶段，并持续向更高速率、更大容量、更低能耗、更低时延方向高速迭代。同时，光连接技术开始向芯片级光互连、卫星光通信、车载光通信等领域延伸。芯片级光互连当前阶段以光电合封（CPO）、光输入输出（光 I/O）为代表的芯片级光互连为主，处于产业热度提升、部分技术仍在攻坚的阶段，片上和晶圆级光互连则处于更早期的学术研究阶段。卫星光通信和车载光通信整体处于当前处于产业热度提升和工程问题攻坚阶段，即将在向产业应用阶段迈进。

光算存领域，**光计算**技术的优越性已经在伊辛问题和最大割/最小割问题的解决上得到验证，目前处于技术突破迈向商业探索导入期的过渡阶段，尤其在光子器件的规模制造、以及与标准电子系统的复杂集成等方面仍存挑战。**光存储**技术领域，一是传统光存储如蓝光光盘的单盘容量日益提升，技术成熟并已实现广泛应用；二是多维复用和超分辨等高密度光存储技术，如 5 维玻璃光存储、双光束超分辨光存储等处于实验室原型或应用试验阶段；三是多种新型光存储技术方案，如基于相变材料、电荷俘获效应、钛酸钡、光机械等竞相发展，但均处于早期实验室研究阶段。

光传感领域，激光雷达早期已广泛应用于测绘、工业等领域，近年来正在向车载领域延伸。光纤传感已在能源、基础设施监测和地质灾害预警等方面取得局部应用，当前正在向电信网络、海缆等领域渗透。电荷耦合元件（CCD）、互补金属氧化物半导体（CMOS）、电荷注入元件（CID）等传统光电成像技术已深度应用于照相机、望远镜、显微镜等，并在分辨率、灵敏度等方面持续提升。新兴的计算光学成像技术，是光传感迈向智能化的重要驱动力。

光显示领域，器件维度，目前液晶显示（LCD）、有机发光二极管（OLED）已成熟量产并实现大规模应用；激光显示、电子纸显示在特定场景取得局部应用；微型发光二极管（Micro-LED）将 III-V 族半导体微缩到微米级并巨量转移到驱动背板，在成本、修复效率和检测精度等方面仍存挑战，处于“技术验证、小批量试产和高端

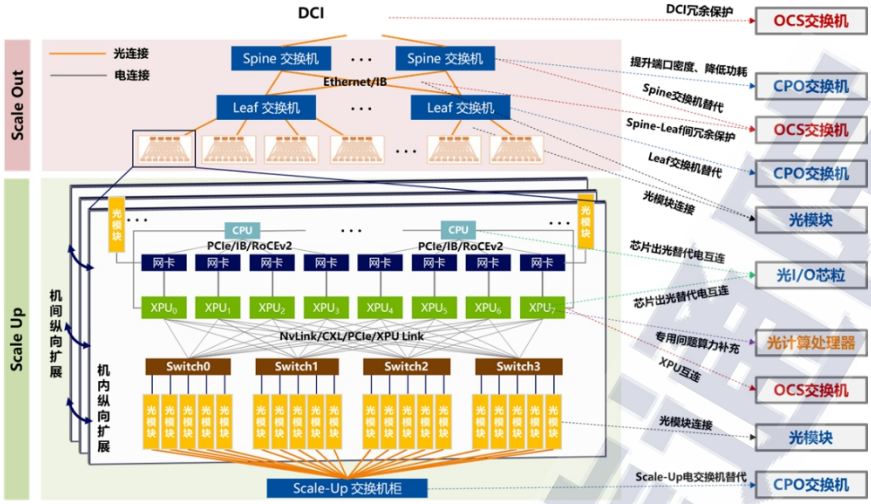
场景示范”的发展阶段；新型硅基微显示当前处于技术研发突破阶段。应用维度，光显示整体处于像素极致化与形态自由化之间寻找成本拐点的阶段，三维、柔性、沉浸式、极大极小等显示技术正在快速发展。

交叉融合领域，信息光子跨领域融合方面，光通感一体化处于应用探索阶段，光计算互连融合处于技术初步突破及产品研发阶段，光存内计算、光感算融合则处于前沿研究阶段。光电融合方面，产品种类较多，整体处于多样化发展阶段。

（三）信息光子与人工智能互哺发展双向赋能

1.信息光子对人工智能发展支撑

光连接与光计算全面支撑智算中心发展。人工智能技术发展催生算力需求与日俱增，单一计算设备性能提升面临瓶颈，分布式架构成为主流，在海量数据交互与计算带来的高速率、大容量、低时延、低能耗、强算力需求驱动下，信息光子技术快速演进，未来将以超高速、大容量、低时延和低能耗光连接为基础，结合并行化、集成式光计算的融合突破，全面支撑人工智能发展。



来源：中国信息通信研究院

图 4 信息光子在智算中心的典型应用

传统和新型光连接产品协同发力，支撑算力集群高效扩展。一是光模块成为算力集群必要构成部分，支撑跨机架高速连接需求。人工智能算力集群需大量光模块进行计算节点间的有效连接，以实现算力调度汇聚，使计算规模延伸至机架之外。在英伟达典型架构中，多图形处理器（GPU）与光模块的数量比例约为 1:2.5；在华为 CloudMatrix“384”超节点架构中，GPU 与光模块的数量比例高达 1:18。**二是**线性光模块、芯片级光互连和全光交换新型产品应运而生，为满足低能耗、大容量的连接交换需求提供有力支撑。其中，**线性驱动和线性接收光模块**在传统光模块基础上去除全部或部分数字信号处理功能，依靠高性能 SerDes、以及高线性度和具备均衡能力的驱动器、跨阻放大器芯片实现相关功能，从而降低能耗和时延。光电合封、光输入输出（I/O）**芯片级光互连**将光芯片与交换或算存

电芯片共封装，颠覆传统光模块产品形态，进一步降低能耗和时延。基于大规模阵列光开关的**全光交换机**开始进入数据中心和智算中心内部，通过全部或部分替代传统电交换机，实现光电协同组网。**三是**新型光纤可进一步提供大容量、低时延连接能力。空分复用光纤、空芯光纤具备大容量、低时延等显著优势，在容量和时延敏感的数据及智算中心场景存在应用需求。

光计算为高性能算力扩展探索新模式。光计算在矩阵运算、神经网络训练等人工智能场景中，相较经典计算效率可大幅提升，作为专用处理器为经典计算补充加速，为高性能算力扩展探索除集群路线以外的新模式、新架构。

2.人工智能对信息光子提质增效

人工智能助力信息光子产业链各环节效率提升。一是驱动材料芯片结构创新实现智能设计。人工智能可用于优化材料掺杂元素配比、芯片光路设计、光纤结构设计等，辅助多物理场仿真与参数预测，通过生成式人工智能模拟光、电、热多场耦合效应，从而预测材料及芯片器件性能。**二是**赋能精密工艺控制实现智能制造。以 OLED 蒸镀为例，基于神经网络驱动的蒸镀参数模拟系统，可降低材料损耗率；以化合物半导体外延生长为例，业界正在开展研究探索，以期通过强化学习的人工智能技术提升材料生长效率及及性能。**三是**突破高精度集成瓶颈实现智能封测。在自动化耦合与封装、巨量转移等方面，利用人工智能视觉引导高精度贴装，可解决亚微米

级误差；在散热与信号完整性分析方面，基于人工智能可预测高密度封装的热分布与光信号串扰。**四是**提高效率和准确性实现智能检测。采用人工智能视觉质检替代传统人工目检，并通过大量标注数据训练学习光子芯片、器件及模块设备等各类产品的特征模式，进而判断产品是否存在缺陷，分析缺陷类型与程度，可大幅提高检测效率和准确性。

人工智能助力信息光子应用水平大幅提升。一是光连接方面，智能化、易运维是新一代光通信网络的重要特征，一方面通过建立光网络数字孪生，构建零接触式自动化网络，可实现光网络资源的灵活调配、动态管控，提升运维效率、降低人力成本。另一方面，引入大小模型协同的多智能体体系，可实现光网络“规、建、维、优、营”全生命周期的自智能力，助力光连接从“被动管道”向“主动智能体”转型升级。**二是光传感方面**，面向海量传感数据，事件模式识别需要高效算法支撑，随着深度学习和人工智能技术的快速发展，可有效支持从大数据中学习复杂抽象的深层特征，从而提取特征信息，助力光传感技术持续向更高精度与准确率、快响应、智能化等趋势发展演进。此外，还可通过智能体提升传感信号解读能力，实现复杂场景下的多参数联合感知。**三是光显示方面，**人工智能正在重构新型显示的技术演进逻辑和价值创造模式，从被动输出界面向主动智能感知转变。例如，搭载多模态交互算法的柔性折叠屏，可依据用户眼动轨迹调节显示亮度；智能座舱内的增强现实抬

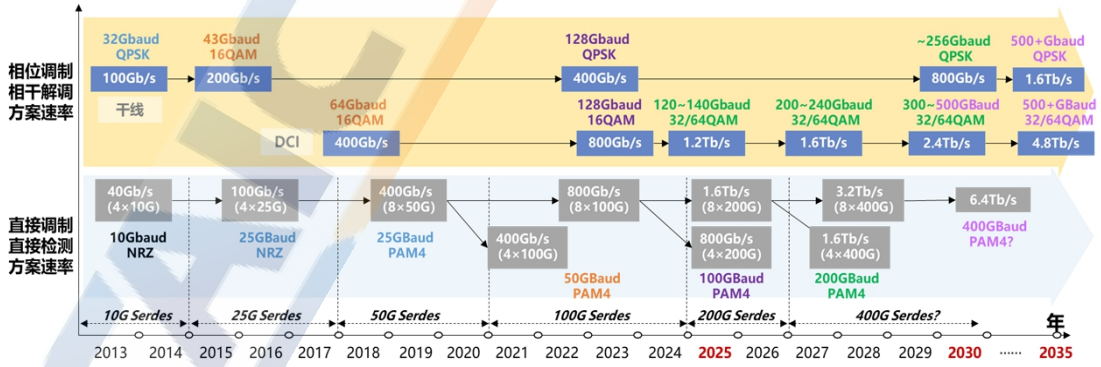
头显示通过视觉感知引擎，将导航信息与实景道路动态融合；人工智能大模型驱动商用显示屏实时生成个性化内容，降低运营成本；深度学习技术通过大数据建立更加精准和高效的三维模型，从而实现对复杂场景的更准确快速的重建。

二、光连接领域研究与应用进展

（一）传统光模块持续演进，新型产品蓄势待发

1.传统光模块

中长距相干光模块向 Tb/s 迈进。一是干线长距光连接（>1000km）在 2024 年已启动 400Gb/s 速率的规模部署，参考历史演进经验下一代主流速率较大可能为 1.6Tb/s，届时将需要 500+GBaud 光芯片器件，800Gb/s 作为中间过渡节点有望在 2030 年得以实现。**二是**智算/数据中心之间中距光连接（80~120km）当前以 400Gb/s 和 800Gb/s 速率为主，1.2Tb/s 已得到局部商用，预计 2027~2028 年将达到单波 1.6Tb/s、2030 年或将达到单波 2.4Tb/s，未来逐步向 3.6Tb/s、4.8Tb/s 演进。



来源：中国信息通信研究院

图 5 相干和直调直检光模块演进趋势

短距直调直检光模块加速演进并呈现新型距离需求。传输速率方面，数据中心和智算中心内部光互连（≤10km）在北美已规模部署 800Gb/s 光模块，随着 XPU 单通道速率提升至 200Gb/s，光模块未来 1~2 年将进入 1.6Tb/s 时代，2030 年 3.2Tb/s 速率将走向规模应用。传输距离方面，在标准 SR（对应 100m 传输距离）规格基础上，国际光电委员会（IPEC）正在推动 400GE eSR4 和 800GE eSR8 标准项目，旨在通过技术创新、光纤优化等方式将单通道 100Gb/s 多模光模块的传输距离拓展至 150m。

光模块技术方案随速率提升不断调整，相干技术进一步下沉。在 100Gb/s 速率，不同技术方案的分工较为明确，基于垂直腔表面发射激光器（VCSEL）的直调直检方案适用于 100m 及以内距离，基于直接调制激光器（DML）的直调直检方案适用于 500m、2km 距离，基于外调制激光器（EML）的直调直检方案适用于 10km、40km 距离，相干方案适用于 80km 及以外距离。在 400Gb/s 速率，DML 方案在 500m、2km 距离的市场空间被 EML 和硅基光电子方案挤压。在 800Gb/s 速率，EML 和硅基光电子方案一步向 100m 及以内距离延伸，同时，相干技术开始向 10km、40km 应用下沉。1.6Tb/s 速率，单通道 200Gb/s VCSEL 实现难度较大，传输距离或将进一步压缩，高带宽薄膜材料迎来用武之地。3.2Tb/s 时代，VCSEL 实现单波 400Gb/s 速率存在瓶颈或将退出直调直检方案，相干技术也将进一步下沉。

来源：芯思杰、中国信息通信研究院

图 6 不同规格光模块的技术方案

2.新型光模块

线性光模块通过去除部分硬件和功能以降低能耗与时延。根据英伟达预测，人工智能集群所需的网络连接带宽将增加 32 倍，使用传统光模块系统成本将增加 1 倍、能耗增加 20~25%。线性驱动可插拔光模块（LPO）与线性接收可插拔光模块（LRO）新型方案应运而生。LPO 去除了收发两端的数字信号处理（DSP）等重定时组件；LRO 保留了发送端电信号重定时和数字均衡功能，将接收端光信号转化为模拟电信号后直接输出，以实现能耗、时延和成本的降低。

业界广泛开展线性光模块的产品研发与演示验证。LPO 方面，2024 年，新华三与十余家厂商开展了 LPO 与传统光模块的互联互通验证；2025 年，光互联论坛（OIF）进行了单通道 100Gb/s LPO 与 LRO、传统光模块之间的互通展示，阿里云宣布规模部署 400Gb/s DR4 LPO 光模块。**LRO 方面，**2023 年 Credo 公司率先推出专为 LRO 架构设计的 800Gb/s DSP 芯片，并在 2024 年联合 Wistron 公司的

51.2Tb/s 交换机进行演示。Marvell 先后推出支持 LRO 应用的 800Gb/s、1.6Tb/s DSP。MaxLinear 亦在 2024 年宣传其为 LRO 架构设计的 DSP。近两年，多家国内企业相继发布了 800Gb/s 和 1.6Tb/s 速率的 LRO 样品。

LPO 标准化工作有序推进。光接口方面，LPO 多源协议组织（MSA）于 2024 年成立，并于 2025 年发布《Specification for 100 Gb/s per Lane Linear Pluggable Optics Single-Mode Optical Data Transmission》v1.0 版本，面向 100Gb/s、200Gb/s、400Gb/s 和 800Gb/s 速率，描述单通道 100Gb/s LPO 光模块的链路系统概况，并对模块功能、接口特性、主机优化方法等进行了规定。**电接口方面**，OIF 的 CEI-112G-LINEAR-PAM4 项目于 2021 年立项，对电接口特性、主机和模块测试等进行了规定，该规范即将发布、并被纳入 CEI 5.3 实施协议的修订版中。**测试方法方面**，2023 年 IPEC 立项 LPO 测试方法项目，侧重研究 LPO 与传统光模块的测试方法差异，并在 2025 年开展了单通道 200Gb/s LPO 模块的测试验证以有效支撑标准制定。

LRO 标准体系正在加速构建。发送端方面，LRO 由于保留了重定时功能，光接口支持与传统光模块的互联互通，符合 IEEE 802.3 相应速率和距离规格的光接口标准；同时，电接口也可采纳单通道传统光模块的相关标准。**接收端方面**，LRO 信号的时钟恢复、均衡和解码均由交换芯片完成，故接收链路性能同时依赖于光模块、系统设备中的无源链路和交换芯片 SerDes，接口标准与传统

光模块存在差异。目前，单通道 100Gb/s LRO 接收端电接口标准“Implementation Agreement for 112 Gb/s Retimed Tx Linear Rx (RTLR)” 正在 OIF 制定，2025 年 8 月已发起该标准的草投，并确立了单通道 200Gb/s LRO 电接口标准 EEI-224G-RTLR 基线。

单通道 100Gb/s 线性光模块即将起量，下一代单通道 200Gb/s 的产品预研已经启动。综上，单通道 100Gb/s 的 LPO、LRO 光电接口指标已较为明确，当前处于小批量测试验证阶段，随着互通性和兼容性的突破提升，预计未来 1 至 2 年开始起量。同时，LPO、LRO 将进一步向更低功耗、更高速率发展，当前单通道 200Gb/s 已处于探索评估和样品试制阶段，如 2025 年国内企业展出了 1.6Tb/s LPO 光模块。

（二）新型光器件与光纤支撑传输容量跨越提升

1.频谱扩展

400Gb/s C+L 多波段一体化光收发芯片取得突破，未来将向更高速率和更宽频谱演进。我国在 400Gb/s 干线网络部署中已采用频谱扩展技术，C+L 多波段一体化的相干光收发芯片器件、集成可调谐激光器组件等已实现突破。未来，系统将持续向更高速率和更宽频谱演进，S+C+L 预计是下一代产品方向。目前，日本 NTT 公司已实现 S 波段的 400Gb/s 相干光收发芯片；希烽光电、光库科技、Hyperlight 已研制出 C+L 波段的 800Gb/s、1.6Tb/s 相干光收发芯片；相关实验室研究已实现了覆盖 O、E、S、C、L、U 6 个波段的超宽

频谱系统，单纤传输容量高达 402Tb/s，传输距离 50km[1]，但距离规模商用仍有较多挑战。

光芯片器件的带宽、频谱扩展等能力与所采用的光子材料息息相关。如图 7 所示，磷化铟为直接带隙半导体材料，可用于制造激光器、探测器和调制器等，并兼具高功率电驱动特性，当前，磷化铟调制器带宽已突破 110GHz、并有望突破 150GHz，电驱动芯片带宽已突破 200GHz，但该材料的波段扩展能力相对有限。硅基光电子的波段扩展能力较强；但受限于硅为间接带隙半导体以及无二阶非线性效应，该材料无法发光且带宽有限（典型值<60GHz）。薄膜铌酸锂（TFLN）凭借大带宽、强波段扩展、低功耗和温度稳定性等优势，在调制器领域具备竞争优势，在几类新型薄膜材料中有望最早迈入商用。此外，薄膜钽酸锂（TFLT）、锆钛酸铅（PZT）、钛酸钡（BTO）等新型材料亦展现大带宽调制潜力，国内外正开展相关研究。

材料		磷化铟	硅基光子	薄膜铌酸锂
材料特性	折射率差	小	大	中
	带宽	110GHz	60GHz	110GHz (产业) 170GHz (学术) >300GHz (理论潜力)
	损耗	高	高	中
	发光特性	强	弱	弱
	扩展频谱	弱	强	强
	功耗	中	中	低
	温度稳定性	差	差	好

图例：优势、居中、劣势

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 7 三种光子材料的特性比较

[1] B. J. Puttnam , R. S. Luis , I. Phillips, et al.. 402 Tb/s GMI data-rate OESCLU-band Transmission, OFC 2024. PDP Th4A.3

C+L 多波段一体化的光放大模块仍然存在技术瓶颈。根据工作机制和增益介质的不同，光放大技术主要包括稀土掺杂光纤放大、半导体光放大（SOA）、基于增益介质非线性效应的参量放大三类。其中，稀土掺杂光纤放大器又包括掺铒光纤放大器（EDFA）、掺铋光纤放大器（BDFA）、掺铥光纤放大器（TDFA）、掺镨光纤放大器（PDFA）等。参量放大器又包括光纤拉曼放大器（FRA）、硅基拉曼放大器（SRA）、光纤布里渊放大器（FBA）、光纤参量放大器（FOPA）和硅基参量放大器（SOPA）等。各类放大技术的增益谱宽如图 8 所示。目前，业界已具备分立的 6THz C 波段、6THz L 波段光放大模块，但基于分立产品的组合应用存在增益带隙死区问题，12THz C+L 多波段一体化的光放大模块尚无成熟方案，需采用铒、铋共掺技术，目前增益水平和均衡性较差。未来，支持 O、E、S、U 等更多波段是光放大模块的演进方向，业界正在研究探索。

来源：Journal of Optics[2]

图 8 各类光放大技术的增益频谱

[2] Erik Agrell, Magnus Karlsson, Francesco Poletti, et al. Roadmap on optical communications[J]. Journal of Optics, Volume 26, Number 9. DOI:10.1088/2040-8986/ad261f.

2.新型光纤

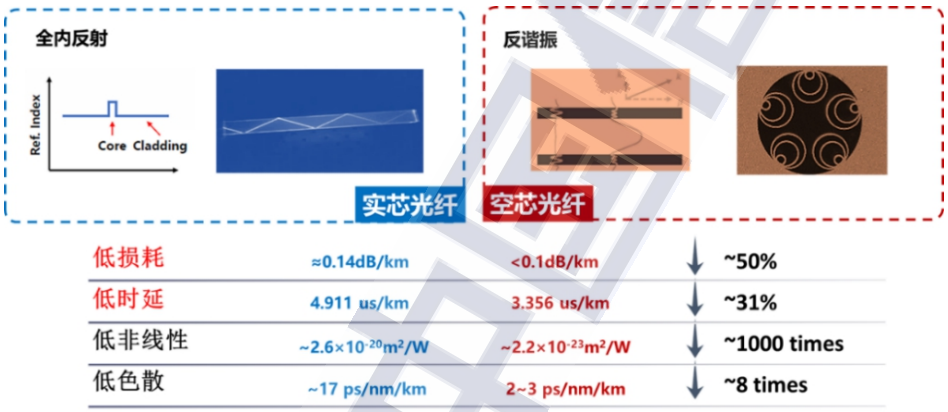
传统光纤受本征特性影响，单纤传输容量极限为 100Tb/s 量级，空分复用（SDM）光纤和空芯光纤可突破传统单模光纤的容量瓶颈，并具备低时延特性，是国内外研究重点。

弱耦合多芯光纤为空分复用光纤的主要发展方向。空分复用光纤包含纤芯复用和模式复用两种，根据信号耦合强度不同又分为强耦合光纤和弱耦合光纤，其中弱耦合多芯光纤可将纤芯间的耦合串扰控制在较低水平，技术复杂度相对较低且易与现有系统兼容，是空分复用技术的主要发展方向。近年来，国内外开展了系列多芯和少模多芯空分复用传输系统实验，典型进展如基于弱耦合模式的 24 芯 10.3km 传输、7 芯 990.64km 传输、4 芯 12053km 传输等，最高传输容量已达 5.29Pb/s，我国与国际先进水平基本同步。

空分复用光纤短期聚焦海缆和数据中心/智算中心应用场景。空分复用光纤由于熔接时间长、熔接损耗高，在长距离陆地传输应用中暂不具备规模商用条件，更适合在物理空间高度受限的海缆和数据中心/智算中心互联场景。未来，需进一步提升高性能连接器件、空分集成放大器、增益平坦滤波器、多路信号处理和多芯光开关等配套芯片器件的成熟度，并积极推动相关标准化工作，加快形成标准体系。

空芯光纤具有重塑产业范式的巨大潜力，性能指标不断提升。相比传统实芯光纤，空芯光纤具有低时延、宽频谱、低损耗和低非

线性效应等优势，是解决传统光纤物理瓶颈的颠覆性方案。反谐振结构是空芯光纤的主流结构，如图 9 所示，近期在损耗方面取得显著进展。2024 年，基于双嵌套反谐振无节点光纤将损耗降低至 0.11dB/km[3]，空芯光纤损耗首次低于传统实芯单模光纤（0.1397dB/km）；2025 年，我国企业进一步刷新空芯光纤传输损耗 0.05dB/km 的记录。未来几年，空芯光纤将持续向超宽频谱、超低损耗方向演进。



来源：长飞光纤光缆

图 9 空芯光纤与传统光纤的特性比较

国内外积极推动空芯光纤传输系统的应用示范。2020 年 Lumenisity 部署了全球首根 10km 空芯光纤光缆，应用于金融证券交易场景。2022 年，微软收购了在空芯光纤具有深厚技术积累的英国 Lumenisity，并于 2024 年底宣布未来两年内部署 15000km 空芯光纤。我国运营商、系统设备商、光纤光缆厂商协同推进空芯光纤试点应用。整体来看，空芯光纤传输系统实验正朝着更大容量和更远距离

[3] Y, Chen, et al., Hollow Core DNANF Optical Fiber with <0.11 dB/km Loss[C], OFC, 2024, Th4A.8.

方向发展，具备满足千公里量级 300~400Tb/s 传输容量的潜力，如考虑同时同频全双工技术，容量有望进一步提升至 3~10 倍，届时将达到单纤单芯单模 Pb/s 容量、千公里量级的大容量、长距离传输能力。

空芯光纤技术发展正处于关键窗口期，未来应用场景广阔。空芯光纤当前仍处于发展初期阶段，同时也是快速迭代演进的关键窗口期。**一方面**，空芯光纤目前尚不具备大规模工业化拉制能力，单次拉丝长度仅数十公里，相比单模光纤上万公里的拉丝长度存在明显差距；光纤结构、关键参数等尚未收敛，与之配套的宽频谱放大、高功率注入等技术有待突破。**另一方面**，空芯光纤由于中空特性，光纤检测技术仍不成熟，在工程部署中亦面临熔接、气密性、水密性等问题，铺设效率较低。在应用场景方面，基于空芯光纤的传输系统可将传输时延降低约 1/3，预计将优先在对时延敏感的数据中心和智算中心互联、金融专线等率先应用。未来，随着拉丝长度、成本、工程运维等问题逐步解决，空芯光纤或将在干线、城域网全面部署，带动系统传输性能的跨越式提升。此外，空芯光纤还可用于可见光波段信号传输，以及高功率激光传能等更广泛的应用场景。

（三）全光交换技术进入数据中心/智算中心内部

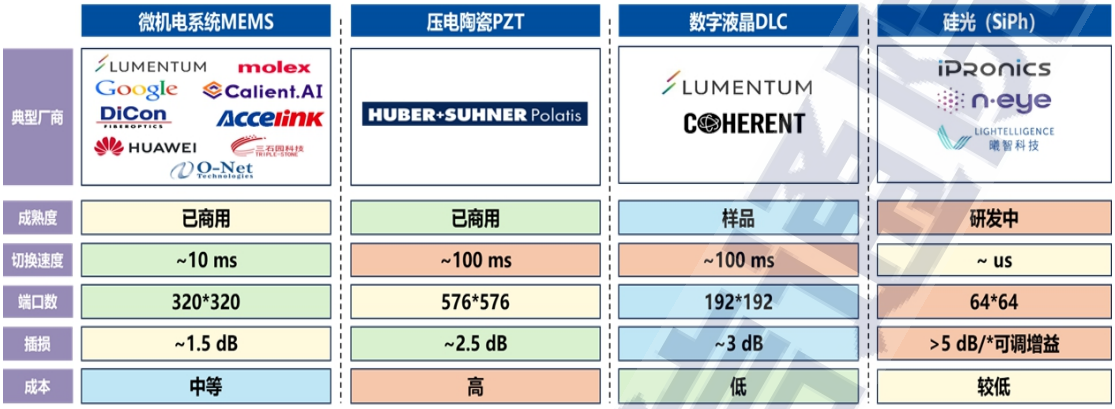
全光交换可与传统电交换技术混合组网。随着智算集群规模不断扩大，基于大端口阵列光开关的全光交换技术在谷歌的引领带动下成为业界关注焦点。全光交换可实现任意空间维度的调度，具备快速切换、带宽无关和无阻塞交换能力，典型组网架构如 N × N、N

×M、Ncc 任意连接。在数据中心和智算中心内部，全光交换可与传统电交换发挥各自优势，进行光电协同组网，例如需要灵活调度的短期突发型小颗粒流量交由电交换处理，长期稳定型大颗粒流程交由光交换处理，从而在保证灵活性的同时，实现能耗优化、时延降低与带宽扩展，支撑人工智能大规模分布式训练和智算中心的高效运行。

面向数据中心和智算中心存在三类应用场景。一是部分或全部替代数据中心和智算中心的脊（Spine）层电交换机，实现速率透明的低功耗数据交换。**二是**部署于传统数据中心的 Spine 层与叶（Leaf）层之间，增强拓扑灵活性与冗余保护，支持路由备份的快速切换，该场景倾向采用≤64×64 的小端口 OCS 方案，实现网络故障的秒级自动恢复。**三是**应用于智算中心的 3D Tours、Dragonfly 架构，该场景倾向采用大端口 OCS 方案，以扩大集群规模、优化架构设计。

阵列光开关包含四类主流技术路线。如图 10 所示，**微电子机械系统（MEMS）**技术通过驱动微反射镜运动，精确调控光程差以实现开关功能，具备低损耗、低串扰、大端口等优势，切换速度和成本相对适中。**压电陶瓷（PZT）**技术通过电压驱动陶瓷形变，带动反射镜移动，精确调制光程差实现光束偏转，在端口规模方面占据优势，但切换速度较慢、成本较高。**数字液晶**技术利用电场调控液晶分子取向，改变折射率以动态调制光程差实现光束偏转，在端口规模和插入损耗方面相对适中，缺点是切换速度较慢。**硅基光电子**技术基

于集成波导的电光效应动态调制光程差实现端口切换，优势是切换速度快、集成度高尺寸小，但在端口规模和插入损耗方面有待优化。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 10 阵列光开关器件主流技术路线

面向规模商用，全光交换需进一步提升成熟度和流量控制能力。OCS 目前在技术实现、样品推出等方面已实现初步突破。国际上，谷歌已在 Spine 层规模部署全光交换机，支撑其分布式大模型训练；控制方案方面，先基于流量工程对全局流量（特别是跨 POD 流量）统计分析，再依托拓扑工程结合软件定义网络（SDN）控制器，对 OCS 以天或者周为时间进行切换。此外，英伟达也在开展相关试验。国内方面，中国电信已完成全球首个基于光电协同技术的数据中心新型组网架构试验，字节跳动也在开展相关研究。面向更大范围的规模商用，全光交换技术需进一步提升 OCS 端口数量和成熟度；同时，由于大颗粒交换灵活性有限，还需同步强化流量控制能力并降低运维复杂性。

（四）高集成、低能耗芯片级光互连正快速发展

CPO 与光 I/O 通过光电共同封装的形式，能够构建片间光互连，形成交换和算存网络中多节点算力提升新方案。CPO 与光 I/O 分别从结构以及功能角度提出概念，当前均以异构集成/先进封装方式实现，二者均可实现集成度、带宽密度的提升以及比特能耗的下降，无本质区别。不过，交换网络场景中使用的芯片级光互连技术通常称为 CPO，算存网络场景中使用的芯片级互连技术通常称为光 I/O。

1.CPO

交换网络场景聚焦 CPO 技术，硅基光电子集成方案为主流路线。CPO 将光芯片与交换芯片封装在一起，与外部其他芯片之间形成连接，以期形成对光模块的替代。CPO 包含 VCSEL 阵列和硅基光电子集成两种实现方案。**硅基光电子集成方案**具有无需气密封装、高带宽、易集成等优势，为当前研究热点和业界主流路线，相关研究持续开展。博通于 2024 年推出 51.2Tb/s CPO 交换机，配备 6.4Tb/s FR4 光引擎，与传统光模块方案相比能耗节省超过 70%。英伟达于 2025 年 3 月提出硅光 CPO 交换机方案，其中面向 Infiniband 网络、容量 115Tb/s 的 Quantum-X Photonics 交换机将于今年下半年出货；面向以太网、容量分别为 102.4Tb/s 与 409.6Tb/s 的两款 Spectrum-X Photonics 交换机计划 2026 年下半年上市；8 月公开 1.6Tb/s CPO 硅光引擎，基于台积电 3D 堆叠工艺。我国企业于 2025 年发布 CPO 外置光源，以及支持液冷的 3.2Tb/s CPO 光引擎。**VCSEL 阵列方案**在短

距信号互连场景中能耗优势较为明显，日本古河电工于 2025 年展示了其最新进展，单块集成电接口板可容纳 8 个光引擎，并在 25~56GBaud 范围内实现了低至 4.5pJ/bit 能耗。同等条件下，VCSEL 阵列方案相比硅基光电子集成方案的失效率更高，因而可靠性风险更大。

当前 CPO 产品研发主要围绕增强可制造性与推进生态系统开放展开。增强可制造性方面，一是开展可靠性试验，博通提供了 TH5-Baily CPO 的测试结果，功耗约 5W/800Gb/s，且超过 1200 小时无链路抖动。二是可拆卸连接，单根光纤故障可能会影响整个系统，目前已形成三种主要的光纤组件拆卸策略：使用短跳线的中板光学可拆卸、封装边缘可拆卸、以及芯片边缘可拆卸等。就此，英特尔提出了面向高良率和光纤数无关的可拆卸光纤组件方案。三是高效光学耦合，康宁基于高密度低损耗传输需求提出了多芯光纤耦合、以及玻璃互联和波导互联方案。四是具备更强兼容性，博通的 Tomahawk Ultra 交换机可与符合 TH5 的 LPO 光模块、以及 Bailly CPO 光引擎等结合使用。**推进生态系统开放方面，**一是探索更具灵活性的插接方式，目前博通和英伟达采用焊接式 CPO、电损耗更低；插接式会增加 1dB 电损耗，但该方式的生态更为开放，Meta 和微软等均提倡创建开放生态系统。美国相干公司亦指出高性能插座可提供 CPO 和共封装铜（CPC）连接选项。二是提升外围组件开放性，除了光芯粒本身，CPO 系统还包括外置光源、连接器等多组件，这些组件也是开放系统的可能切入点。

全球 CPO 市场规模持续增长，我国企业或面临转型压力。根据 Yole 预测，2024 年全球 CPO 市场规模为 4600 万美元，预计 2030 年将达到 81 亿美元，复合年增长率高达 137%。CPO 产业链包含设计、激光器与光引擎等光芯片器件商、交换机厂商、制造代工厂等环节，英伟达、博通等交换巨头具有较强话语权。我国在电交换环节发展滞后，而 CPO 光引擎和外围电路设计均需基于电交换芯片，目前相对国际先进水平处于落后局面，未来 CPO 在单通道 400Gb/s 时代有望成为主流方案之一，亟需推动相关技术研发突破。我国光模块器件企业正通过研发大功率外置光源、高密度连接器、以及与交换机厂家合作研制光引擎等方式发力 CPO 方向。

包含框架、外置光源、接口和测试在内的 CPO 标准体系逐步建立。国际方面，OIF 于 2020 年启动 CPO 框架实施协议伞形项目，之后相继发布 3.2 Tb/s CPO 模块、外置光源小型可插拔模块（ELSFP）、ELSFP 管理接口等实施协议，并于 2025 年建立下一步工作清单。2020 年底，板载光学联盟（COBO）成立 CPO 工作组，并于 2022 年发布 CPO 交换机设计白皮书。联合开发基金会（JDF）发布了 3.2Tb/s CPO 的产品需求、CPO 外置光源和 CPO 组件等白皮书。IPEC 已于 2022 年启动研究项目，并于 2024 年 9 月发布 ELSFP 标准。**国内方面**，中国计算机互连技术联盟已发布团体标准，中国通信标准化协会（CCSA）正在开展行业标准《光电合封用外置光源模块》的研究制定。

2.光 I/O

光 I/O 已成为算存架构中的重要互连方案，包含硅基光电子和 Micro-LED 两类技术路线。高性能计算工作负载不断推动现有系统架构的极限，随着规模持续扩大，计算/存储芯片之间需建立更高带宽密度的连接。光 I/O 将光芯片与计算/存储芯片封装在一起，以期形成对电 I/O 的替代。**硅基光电子路线**以美国 Ayar Labs 公司为典型代表，其在 2025 年发布的光 I/O 硅基光电子芯粒专门面向 AI Scale-Up 架构，为首个使用通用芯粒互连技术（UCIe）协议的光 I/O 芯粒，可实现 8Tb/s 双向带宽，其中每通道带宽为 32Gb/s。**Micro-LED 路线**以 Avicena 公司为典型代表，其采用 512 个 Micro-LED 构成阵列式发射器，无激光器设计规避了温度控制、隔离器、端面镀膜等复杂环节，总带宽可达 3Tb/s。

多波长光源在波长数量及输出功率方面持续进步。2025 年，英特尔报道了其新一代激光器性能，与上一代产品相比输出功率提高 50%，达至 15dBm，8 波长激光阵列通道间隔控制无需调谐，16 波长激光器阵列正在研发中。Ayar Labs 公司的激光器支持连续波波分复用（CW-WDM）多源协议规范，已实现 16 波长，在 16 根光纤共计可传输 256 载波，功率均高于 3dBm。Xscape 公司能够根据客户要求生成具有可配置间距的 4、8、16 波长，其中 16 波长每波长输出功率可达 14dBm，4 波长每波长输出功率可达 20dBm。2025 年 8 月，高塔半导体与 Xscape 公司联合发布面向智算中心的片上光泵浦

多波长激光平台，支持粗波分和密集波分波长，已成功流片并向客户开放验证套件。

光 I/O 上升势头明显，大带宽、低能耗与高集成为主要发展方向。国际方面，Ayar Labs 为光 I/O 领域的执牛耳者，已获得英特尔、AMD、英伟达等多巨头投资，主要产品为 TeraPHY 光 I/O 芯粒与 SuperNova 多波长光源；英特尔 2024 年发布了与中央处理器（CPU）3D 共封的光 I/O 芯粒，双向带宽 4Tb/s；其他光 I/O 参与者还包括 Celestial AI、三星、Xscape、Nubis、Lightmatter 等。国内方面，2025 年国内企业推出 XPU-光 I/O 原型系统，将光引擎与计算芯片在同一基板上合封。目前，光 I/O 已有小批量出货，受 Scale-Up 场景驱动上升势头明显，技术创新方向聚焦于更大带宽、更低能耗与更高集成度，目前主要基于 16 波长、单通道 25GBaud 非归零（NRZ）调制开展研究，后续将通过增加波长数量、提升波特率、采用高阶调制及偏振复用等手段持续优化。

光 I/O 标准化基于电互连领域向光学拓展，体系框架尚未形成。UCIe 2024 年推出 2.0 版本的技术规范，相关技术改进可以使电互连更加顺畅地向光互连迁移。外设组件互连特别兴趣组（PCI-SIG）2023 年宣布成立 PCIe 光学工作组，在 2025 年 6 月发布的 PCIe 7.0 规范中，新增支持光纤介质。OIF 的计算光学接口（COI）项目自 2024 年下半年启动，正在开发高能效、低时延光学接口，以支持使用 PCIe、NVLink 和 UALink 等协议的人工智能 Scale-Up 链路。CW-WDM MSA

定义了一组 O 波段波长网格，以实现激光器之间的互操作。UCIe、PCIe、NVLink、UALink、CW-WDM MSA 等协议对物理层和软件层的标准化将助力实现不同硬件与软件框架间的无缝集成，但现有协议框架对光学接口的适配性有待进一步研究，如接收端探测、光电信号不一致等问题，光 I/O 融入现有电互连链路仍存在诸多挑战。

光 I/O 比 CPO 的性能要求更高而产业化标准化进度更为滞后。据产业数据，同样能效情况下，光 I/O 的边带宽密度比 CPO 的大一个数量级；相同误码率情况下，光 I/O 的延迟是 CPO 的 1/30~1/20，如表 1 所示。相对于 CPO，光 I/O 的产品样机更少，标准研制的启动时间更晚，且主要基于计算领域标准向光学方向拓展。

表 1 CPO 与光 I/O 对比

技术	CPO	光 I/O
封装形态	光引擎和电芯片封装于同一基板或衬底	
封装对象	交换芯片	算存芯片
相对延迟	1	1/30~1/20
波分复用	有或无	有
相对带宽密度	1	~10
落地难度	中	大

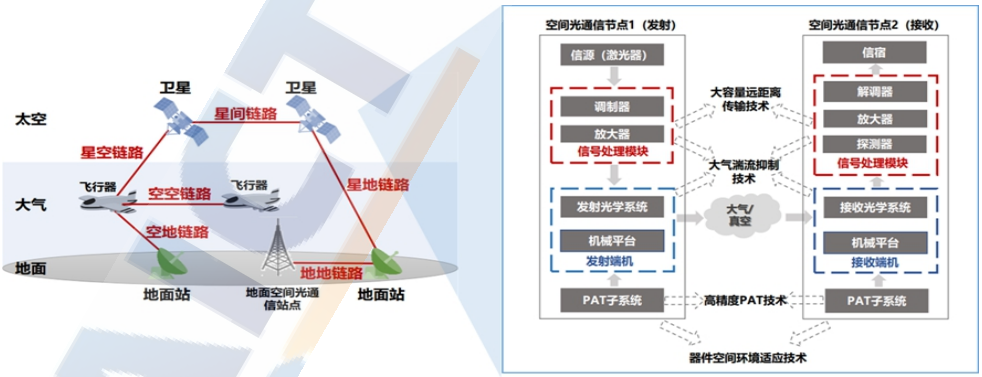
来源：中国信息通信研究院

（五）应用场景多样化发展，渗透能力不断增强

经过长期发展，光连接已由传统光通信泛化为信息通信领域的全尺度连接技术，连接距离贯穿数千公里至厘米级及以内，除数据中心和智算中心外，应用场景进一步向卫星通信、车载通信等领域拓展。

1.卫星光通信

卫星光通信是空间光通信的重要发展方向。空间光通信是基于光在大气或真空环境传输信息的技术，卫星、地面站、船舶、飞行器上均可搭载光通信终端，建立太空、大气、地面范围内“星间、星空、星地、空空、空地、地地”等立体空间网络体系，如图 11 所示。相比于传统射频微波通信，空间光通信具备以下优势：一是高速率，可实现数百 Gb/s；二是频谱宽，常用频率范围 190THz～560THz，频谱资源无需申请；三是抗截获能力好，激光束散角小、不易被捕获；四是抗干扰能力强，不易受相近波段信号干扰；五是通信终端体积小、重量轻、能耗低、灵活性与可扩展性强。同时，由于直接在空间传播信息，空间光通信存在易受到大气条件影响和障碍物阻挡等缺点。随着全球卫星互联网规模不断扩大，卫星光通信处于加速发展阶段，是空间光通信领域的重点研究方向。



来源：中国信息通信研究院，中国通信标准化协会

图 11 空间光通信架构及光通信传输系统示意[4]

[4] 崔潇,等.空间光通信关键技术及应用研究[EB/OL].中国通信标准化协会.

卫星光通信四大关键技术正在逐步突破。一是大容量远距离传输，随着地面信号接入需求的增长，空间传输数据量也相应增加，由早期的 1Mb/s 量级演进至 10Gb/s 甚至数百 Gb/s。同时，卫星光通信还需考虑传输带宽容量、发射与接收终端间距离、传输稳定性和灵活性等因素，未来将向支持根据任务需求灵活调整速率、距离、波长等参数的自适应方向发展。**二是**高精度瞄准捕获跟踪（PAT），PAT 系统负责实现光信号的高精度、快速瞄准捕获跟踪，受卫星间距离远和激光束散角小等限制，光通信终端间的快速稳定跟瞄是保障星间稳定建链的关键，涉及光学、信号处理、机械等多环节，技术复杂度高，是当前阶段待解决的核心技术难点之一。**三是**大气湍流抑制，云层遮挡、气溶胶、大气湍流、地表风和湿度等大气条件对星地链路的传输性能具有较大影响，业界已开展相关研究并提出了物理层和协议层的多种大气影响抑制方案。**四是**器件空间环境适应，光芯片器件将受到真空、太阳电磁辐射、高能粒子辐射、等离子体、微流星体、行星大气和磁场等影响，需开展反射镜表面性能防护、机械部件防冷焊、日凌下热控、杂散光抑制、抗辐照等技术研究。例如在激光器发光腔面镀Y_2O_3-ZrO_2膜、在探测器外壳镀抗辐射Al_2O_2膜提升抗辐射能力；光纤放大器可采用退色心、预辐射载氢和改进光纤制作工艺等抗辐射技术。

全球卫星光通信产业生态逐渐活跃。美国在卫星光通信领域起步较早，目前已实现规模商用。在星座运营方面，SpaceX 星链计划已成为

全球卫星互联网产业化的代表性项目，从 2021 年发射的 V1.5 版本起搭载光通信终端，实现了 100Gb/s 星间链路；V2 版本具备 100Gb/s、200Gb/s 星间链路能力；V3 版本将具备更高速率的星间链路能力。亚马逊 Kuiper 项目已实现 100Gb/s 星间链路。此外，霍尼韦尔和卫星运营商 Skyloom 开展合作，建设光通信终端制造产线。**加拿大、欧洲、日本**也在积极推动卫星光通信发展。在星座运营方面，加拿大 Telesat 计划部署星座 Lightspeed；法国 Eutelsat 与英国 OneWeb 于 2022 年合并为 Eutelsat OneWeb。在光通信终端方面，德国 Tesat-Spacecom、Mynaric 等具备领先优势，并与美欧日研究机构紧密合作。**我国**产学研用各方正积极开展相关芯片器件和终端研发，并推动链路组网仿真、上星验证和星座规划等工作，已开展星间 10Gb/s、100Gb/s 点对点试验，但尚未实现规模组网部署，预计未来 5 年有望步入商用。

2.车载光通信

智能座舱和智能驾驶快速发展，驱动车载光通信应用需求。智能座舱方面，功能丰富性和交互便捷性是提升用户体验的关键。**一是**车载光通信可有效支撑多屏互联、同步播放高清视频内容，其高带宽特性能够支持 4K 甚至 8K 视频的实时传输，丰富用户体验。**二是**车载光通信的低延迟特性可确保增强现实平视显示（AR-HUD）系统获取实时、准确的车辆状态和环境信息，提供导航和驾驶辅助提示，增强驾驶安全性与舒适性。**三是**车载光通信可实现座舱内摄像头、雷达、显示屏等设备的海量数据同步，支持语音控制、手势

识别、驾驶员状态监测等多模态交互功能的低延时响应。**智能驾驶方面，一是**感知层面，激光雷达、毫米波雷达和摄像头等海量传感数据可高效传输至计算平台，千兆级传输带宽能够同步处理多路 4K 视频流和激光雷达点云数据。**二是**决策层面，微秒级时延特性可提升系统响应速度，将传感器数据采集到执行指令下达的全流程时延控制在 10ms 以内，较传统总线技术提升一个数量级。随着自动驾驶向 L4/L5 级迈进，车载光通信将持续突破技术边界，满足更高的数据传输需求，为智能交通系统落地奠定基础。

表 2 三种主流技术方案比较

方案	架构类型	速率	功耗	复杂度	应用场景
以太网	点到点/星型/环形	100Mb/s~10Gb/s	中等	中等	智能驾驶域控制器、座舱控制器、T-BOX
PON	点到多点	50Gb/s	低	中等	传感器、执行器等设备集中控制和数据采集
MIPI	点到点	约 1Gb/s	低	高	摄像头模块、显示屏与处理器连接

来源：中国信息通信研究院

三类车载光通信技术方案并行发展。传统车载总线协议包括 CAN、LIN、FlexRay、MOST 等，未来车载网络将呈现分层化和多元化趋势，不同协议在特定领域继续应用，同时与车载光通信技术融合，共同构建高效、可靠的通信系统。目前，业界主流的车载光通信技术方案包括以太网、无源光网络（PON）和移动产业处理器接口（MIPI）三种，如表 2 所示。其中，以太网兼容性和拓展性强，已广泛用于车载域控制器和网关通信，是当前主流选择；PON 采用

点到多点架构，适合集中管理和实时控制，具有高速率、低功耗优势，有望成为未来重要发展方向；MIPI 主要用于连接摄像头、显示屏等设备，具备低功耗优势，但协议相对复杂、适合短距离传输，未来将继续在特定设备连接领域发挥作用。

国内外呈现不同的技术方案选择与标准化路线。国际上主要采用以太网路线，倾向于在现有成熟技术基础上进行拓展和优化，并围绕以太网技术推进相关标准制定，其中 IEEE 已发布基于石英光纤的车载以太网标准 802.3cz。相比之下，国内则结合本土汽车产业实际需求和发展趋势探索更适合本土产业生态的解决方案，更侧重于在 PON 路线开展创新，以期实现车载光通信技术的突破应用。

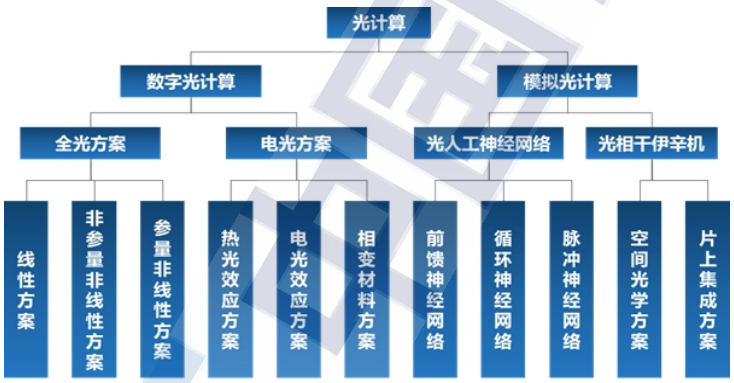
三、光算存领域研究与应用进展

（一）模拟光计算构建新范式，为当前研究热点

来源：中国信息通信研究院

图 12 光计算体系框架

不同光计算功能的技术原理及硬件方案存在差异。按照所处理的数据形态，光计算可分为通用数字光计算和专用模拟光计算，技术体系框架如图 12 所示，包含基本原理层、硬件层、工具框架层、功能层和应用层，由于业界对光计算的研究应用尚处早期阶段，其体系框架和内部构成仍在进一步完善过程中。其中，针对不同计算内容或功能，光计算的技术原理与硬件方案存在差异，如图 13 所示。基于不同原理与方案的产品在研或发布，如表 3 所示，目前已报道的最高算力为 65.5TOPS。



来源：中国信息通信研究院

图 13 光计算硬件方案

表 3 采用不同硬件方案的典型光计算产品对比

主要公司	核心产品	技术路线	最大规模	最高算力
Akhetonics	全光通用处理器（数字+模拟）	光学非线性	/	/
Opticore	光计算处理单元（模拟）	光人工神经网络（相干探测）	5×5 阵列	/
Cognifiber	全光处理器（模拟）	光人工神经网络（多芯光纤）	28 节点阵列	0.02TOPS
Luminous Computing	光学 AI 芯片（模拟）	光人工神经网络（微环滤波）	4×4 阵列	/
Lightmatter	AI 加速处理器	光人工神经网络	128×128 阵列	65.5 TOPS

	（模拟）	（MZI 干涉）		
曦智科技	AI 加速处理器（模拟）	光人工神经网络（MZI 干涉）	128 × 128 阵列	32 TOPS
光本位	AI 加速处理器（模拟）	光人工神经网络（相变材料）	128 × 128 阵列	/

来源：中国信息通信研究院

数字光计算技术挑战大，发展较为缓慢。光逻辑门构建方面，分为全光和电光两种技术路线，均存在稳定性不足、不易集成、成本高等问题，且非线性材料和器件的设计、制造难度较大，距离商用仍有距离。**规模扩展方面**，已报道的全光逻辑门位宽仅 3 bit，光电逻辑门阵列位宽 9 bit，需进一步扩展位宽以实现逻辑计算的规模应用[5]。**算力提升方面**，光的并行能力并未得到充分发掘，复用数量较少，需持续研究支持非线性并行频谱的材料、以及适配逻辑设计思路，利用多种复用方式进一步提升系统计算速度。**能效优化方面**，同等计算精度情况下，当前光计算仅在模数转换环节的能耗便已超过电计算能耗，节能优势尚不显著，需考虑采用更多无源器件、或研制超低功耗有源器件等方式优化能耗。

模拟光计算建立“结构即功能”范式，为当前业界研究热点。光人工神经网络包含光前馈神经网络、光循环神经网络、光脉冲神经网络三种典型结构。整体来看，光前馈神经网络采用单向多层结构，相邻层的神经元以相同/不同的突触权值相互连接，其特点在于网络中没有反馈。与光前馈神经网络相比，光循环神经网络由于内

[5] 李敬城,张文凯,董文婵,等.光学逻辑计算进展与挑战（特邀）[J].光学学报,2025,45(14):10-28.

部反馈回路的存在，具有记忆和联想的能力，可用于时序信息处理。光脉冲神经网络的神经元模型更接近人脑神经元，利用时间编码的脉冲序列作为人工神经网络的输入和输出，具有更强的计算能力。**光相干伊辛机**可分为空间光学和片上集成技术方案，主要用于大规模组合优化问题的快速求解。空间光学方案的典型代表如基于退化光参量振荡器的空间光学系统，借助自由空间或光纤构建自旋网络，可实现上千自旋的大规模耦合系统。片上集成方案在芯片上实现自旋耦合与演化，适用于高集成、可扩展和高稳定性的计算系统。

光前馈神经网络研究重点聚焦线性计算、非线性激活函数和训练策略三大环节。线性计算方面，主流方案包括马赫曾德干涉（MZI）、波分复用（WDM）和平面光转换（PLC）三种。PLC 方案中衍射层是系列优化设计后的结构，能够对输入光场的振幅或相位进行调制；MZI 方案通过两臂的相长或相消干涉调节输出光强，该调节过程可视为乘法运算；WDM 方案采用微环谐振器（MRR），通过控制其谐振态实现并行非相干线性运算。其中，MZI 和 WDM 方案在集成度、可重构性和扩展性方面更具优势；PLC 方案的输入为空间光信号，在吞吐量方面具备优势，更有潜力实现高并行性的大规模光学线性计算。**非线性激活函数方面，**该函数的输出和输入呈现非线性关系，使神经网络更加接近生物大脑处理信息的方式，描述更加复杂的任务。当前，受设计和制造等限制，高速高效光学非线性激活函数的实验方案较少，一般采用“光-电-光”转换方式进行替代。**训练策略**

方面，在线训练直接在器件上进行物理求导和更新物理结构参数，与离线训练相比可消除实际物理模型和数值仿真模型差异导致的误差问题，且训练时间更短，但对器件要求较为严苛。因此，物理感知训练方法等介于离线和在线训练之间的过渡方法亦受到关注[6]。

光蓄水池是光循环神经网络的典型代表，以串行结构为主。在研究初期，并行结构光蓄水池规模有限，已有报道约数百个节点，研究重心多集中于原理性验证，近年来逐渐探索实际应用，但性能相比电计算仍显不足。相对于并行结构，串行结构只需要单个非线性元件，制造简单易实现，为当前业界研究的主流方向。然而，串行结构光蓄水池本质上是对单个元件进行时分复用，得到多个“虚拟节点”执行运算，处理速度和并行性较差。未来的发展重点包括降低光学损耗以延长光在腔内的驻留时间、提升速度与带宽、实现多路并行复用处理，以及在全光域内完成输入/输出与加权运算。

基于成熟光器件的光脉冲神经元动力学特性已得到深入研究。理论建模与基于实际光器件的实验研究相互促进，涉及的光器件包括双 IQ 调制器、VCSEL 激光器、分布式反馈（DFB）激光器、法布里珀罗（FP）激光器等，在实际多样化需求场景中，需充分考量器件特性进行合理选型。光脉冲神经网络正稳步向功能更强、尺寸更小、集成规模更大、与其他平台兼容性更好等方向发展，为实现类脑智能计算提供更为坚实的基础。

[6] 张楠等. 光计算和光电智能计算研究进展[J]. 中国激光, 2024，51(18):1800003.

片上集成光相干伊辛机分为本征退火型和算法退火型两类。本征退火型依托光学或光电物理体系本身的连续动力学演化，使系统自发收敛至映射伊辛哈密顿量的低能态，器件间光学耦合对应哈密顿量中的相互作用项。2020 年，哥伦比亚大学研究人员提出了基于微环谐振腔构建的简并光学参量振荡器（DOPO）伊辛机，该方案利用四波混频产生的非线性压缩光作为二进制自旋态的物理载体，通过空间布局多个 DOPO 实现自旋扩展，计算速率可达 400 kHz[7]。**算法退火型**预先设计一套离散求解算法（如模拟退火、随机逼近等），再以专用光子硬件对其迭代过程进行加速，求解过程可拆解为矩阵-向量乘、随机扰动注入、阈值判决等基本算子。2024 年，中山大学利用片上折叠铌酸锂调制器件，实现了 16384 个自旋节点的光相干伊辛机[8]。

光计算在硬件层面仍面临三大挑战。一是设计成熟度低，当前的设计思路大多基于光电分立式设计，相关设计多集中于器件而非系统层面，光电协同基础薄弱。**二是**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，需要大规模集成技术支撑。**三是**系统规模小，为支持具有数十亿个参数的人工智能模型，需要构建更大的神经网络模型并对架构进行精心设计，将操作高效映射到光子硬件。

[7] Okawachi Y, Yu M, Jang J K, et al. Demonstration of chip-based coupled degenerate optical parametric oscillators for realizing a nanophotonic spin-glass[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 4119.

[8] Li Z, Gan R, Chen Z, et al. Scalable On-Chip Optoelectronic Ising Machine Utilizing Thin-Film Lithium Niobate Photonics[J]. ACS Photonics, 2024.

（二）算法与硬件融合发展，软件生态持续构建

算法的优化能够有效提升光计算系统性能。人工神经网络的训练算法种类较多，不同网络结构（如前馈、循环、脉冲等）和任务需求（监督、无监督、强化学习）可选用不同算法，各类训练算法的基础为基于梯度的误差反向传播。目前可与光计算硬件平台有效结合的软件算法数量较为有限，且处于早期发展阶段。**噪声感知算法、遗传算法、直接反馈对齐算法**三类算法的硬件适配性较高，普遍适用于各类光计算硬件。噪声感知算法能够模拟前向计算中因量化过程、机械振动、温度变化等而产生的精度损失，并通过训练减少有无噪声情况下的差距；遗传算法是一种全局优化搜索算法，通过群体演化的方式，在复杂、非线性、不可导甚至离散的解空间中寻找近似最优解；直接反馈对齐算法在训练时提供了网络参数有效优化的粗略方向，不依赖精确的梯度。为进一步增强光计算系统的效率和功能，研究人员采用了多种进阶算法，如**模型剪枝、知识蒸馏、集成学习、低秩适应、终身学习**等算法，相对适用于数学模型清晰的光学神经网络等计算类型。

将光子的物理特性融入算法框架能够启发新型应用。一方面，物理现象可为新的光计算方法提供基础，以探索新型的光学神经网络推理架构，例如不严格遵循生成神经网络的数学模型，而是综合考虑光学物理过程，业界提出了更加适配光学系统的噪声产生方法；**另一方面**，某些光计算系统的独特物理特性使得新型在线训练算法的实现成为

可能，甚至启发一些超越传统机器学习任务的新型应用场景[9]。

光计算软件工具生态持续构建。短期内基于 PyTorch/TensorFlow 等主流商用软件框架开发，构建光学算子库以及适配于光计算的调试器、分析器、编译器、优化器等基本组件，推动人工智能推理等应用加速落地。**中期**可能发展光计算专用软件系统，构建统一的光计算编程框架与标准。**长期**需突破在线训练、光学编译器等关键技术，形成独立完整的光计算软件栈，从“依附电生态”走向“光电共生态”。

光计算在软件算法层面仍存在诸多挑战。一是适配计算类型问题，光芯片时钟主频较高但模拟计算精度低，适用于数据依赖性高，时间序列相关、语义信息深但精度要求低、低比特模型计算。**二是**在线训练问题，光学神经网络的高效、稳定片上在线训练仍不成熟。**三是**软件栈问题，针对光子人工智能硬件优化的编译器和编程模型尚不完善。

（三）光电共建应用抽象层，探索领域不断拓展

光、电分工协作，共同构建应用抽象层。一是光电功能互补，光擅长“线性+并行”，电擅长“非线性+控制”，光计算适合计算密集型任务，电计算擅长控制密集型任务，二者可分层协作。**二是光电架构融合**，当前光计算主流架构为光电混合体系，光域完成卷积、伊辛模型采样等，作为加速器和预处理单元等。电域负责数据调度、

[9] 王豪,战子钰,付星,等.光学神经网络：硬件物理与软件算法的融合进展（特邀）[J].光学学报,2025,45(14):80-92.

非线性激活等，扮演主控、调度等角色。**三是光电生态一体**，短期内光计算以融入电计算软件生态为主要策略，在应用端实现光电统一抽象层，用户无需关心底层是光还是电，系统自适应调度资源。

应用探索从实验室演示转向场景适配和解决实际问题。一是光计算与人工智能的深度融合可为高性能算力探索新模式、新架构。近期，清华大学报道的“太极”光计算芯片能够实现自然场景千类对象识别、跨模态内容生成等人工智能复杂任务。**二是**光计算用于图像处理可实现空间微分、去噪、边缘检测和边缘增强等，对光学图像和生物样本进行不同的放大倍数、空间分辨率等处理操作。**三是**光计算可助力生物医药提高设计效率、缩短上市时间；在基因测序中，加速海量碱基序列的实时比对与分析，解决传统电子计算在宏基因组数据处理中的瓶颈。**四是**光计算的快速求解与同态加密算法加速等优势已在风险价值计量、联合风控、银行账户欺诈识别等场景中得到验证。**五是**光计算在光通信与微波射频场景中，在光域进行信号处理可有效避免“光-电-光”转换中存在的电子速率瓶颈限制和信号特征丢失问题。

表 4 光计算典型应用

应用场景	原理	发展方向
人工智能	人工神经网络矩阵乘法	更多数据集、更准确算法等
图像处理	傅里叶域滤波、格林函数、光学差分	实时处理
生物医药	高速并行计算	更快速比对筛查
金融投资	同态加密加速、伊辛问题求解	更快推理速度
光通信与微波射频	直接光域/模拟域处理	更低时延

来源：中国信息通信研究院

（四）协同产业链初步构建，产业化多形式推进

协同型光计算产业链初步构建。光计算产业链包含支撑系统、设计集成和应用服务等环节。中游的光计算处理器设计开发与系统集成公司与上游相关科研机构、制造代工厂、算力芯片与软件供应商以及下游的电信运营商、算力中心、金融机构等建立起多层次战略合作关系，正通过产业链上下游的深度协同与联合技术攻关，以期在超节点建设等关键领域实现多项突破。通过构建紧密协作体系，能够开展从核心器件到算力基础设施的全链路协同优化，提升产品兼容性与系统效能，为构建高效、开放、安全的新一代算力生态奠定坚实基础。

光计算产业化以初创企业和行业巨头为主导，多种形式推进。初创企业主要通过顶尖高校科研成果转化及科技巨头项目激励方式孵化形成，如 Lightmatter、曦智科技的原始技术来自麻省理工学院，英特尔通过 Ignite 项目孵化出 Lumai 和 Akhetonics 公司。此外，行业巨头也开展了初步尝试，如微软、IBM 利用光计算系统对其主要业务领域中存在的特定计算需求实现加速优化。整体来看，国外光计算企业主要通过与行业巨头合作等方式，推进少量产品开展试点应用；我国光计算产品研发早期主要面向研究机构和算力中心，正逐步向更宽泛领域延伸。

近三年全球光计算产品化进展略为缓慢。一是头部企业布局重点向光互连领域转变或拓展。曦智科技同时推进光计算与光互连两

大业务方向，2025 年 3 月发布可支持 128×128 矩阵规模的新一代光电混合计算卡“天枢”，以及光互连光交换 GPU 超节点光跃 LightSphere。Lightmatter 公司 2025 年在《Nature》发表研究成果，矩阵规模同样达到 128×128，能够执行自然语言处理模型双向编码器表征法（BERT）和用于图像识别的神经网络 ResNet；同年，宣布其基于 3D 堆叠光引擎成功在单根光纤中实现了 16 波长双向密集波分复用光链路传输。**二是**中部企业产品推出节奏放缓或停滞。Optalysys 公司原计划 2023 年发布面向全同态加密加速的 CMOS 硅基光电子集成计算芯片，但推迟至 2025 年发布基于该技术的区块链服务器；Lighton 公司从光计算领域转向为生成式人工智能构建商业化基础模型。**三是**新生企业尚无产品推出。近三年创立的 Lumai、Opticore 公司均处研发阶段，尚未宣布正式产品。

光计算的规模应用预计将分三阶段逐步演进。光计算尚未实现规模商用，当前处于产品研发和原型验证阶段，预计将分三步走向规模应用。第一阶段的商用产品将是在局部环节采用光计算技术的定制化专用系统；第二阶段，具有光计算处理器的通用系统开始进入市场；第三阶段，光计算处理器的市场规模将快速提升。

（五）多元路线竞相探索，多维度提升存储性能

光存储包含传统光存储和新型光存储两大类，技术体系不断完善扩展。光存储技术体系如图 14 所示，包括基本原理层、硬件层、工具框架层、功能层、应用层等。光存储基于光致效应原理，传统

光存储（光盘存储方案）涉及烧蚀、起泡、熔融、合金化等物理变化过程，新型光存储（面向计算系统的集成存储方案）包含相变、电荷俘获、铁电、光机械等方案，光存储可基于多种材料实现，如纳米荧光晶体、玻璃、相变材料、半导体、钛酸钡等。传统光存储产品已获得商用，包括视频高密光盘、数字化视频光盘、蓝光光盘等形式，且为便于检索与管理，包括缓存算法、元数据索引标签等的工具不断完善，已应用于政务灾备、公安档案、金融证券、医疗备份等领域。新型存储仍处前沿探索阶段，尚无商业化落地。

来源：中国信息通信研究院

图 14 光存储体系框架

蓝光光盘不断拓展应用场景、提升存取速度，中日企业占据市场优势。蓝光光盘由基板、记录层、反射层及保护层构成，记录层采用锗锑碲合金无机相变材料，抗电磁干扰，对温湿度等相对不敏感，较为适用于归档存储场景。由于数据访问需机械手臂取放光盘，

存取延迟不可避免。为提升访问性能，业界普遍采用存储服务器作为数据缓存，并辅以最大数量装载光驱、小文件归并/大文件拆分、文件预读、断点续传等优化技术。日本松下在全球光存储领域占据领先地位，其与 Facebook 联合推出的 freeze-ray 归档系统，专为解决数据中心“冷数据”存储难题而设计；索尼发布 Everspan 光存储系统，服务于广播电视等行业，取得显著市场份额。我国企业围绕光存储关键器件、硬件及基础软件，已打造较为完整的产业链，并推出“光-磁-电”融合存储等新方案。

业界主要从多维复用与超分辨两条技术路径探索提升光存储密度。一是多维复用光存储通过增加复用维度提高存储密度。20 世纪 90 年代，飞秒脉冲激光的出现推动了双光子三维光存储技术的发展，大幅提高了存储密度。目前，在光致折变材料、光致变色材料、光致聚合材料、掺杂玻璃等材料中均实现了多层光存储，甚至达数百层。光全息存储作为一种高密度三维光存储技术引发业界较多关注，2025 年英国 HoloMem 公司推出一种基于光学全息存储技术的新型存储方案，单盒容量可达 200TB。未来，伴随光学工程、材料学及机器学习等学科的协同推进，光全息存储正迎来新一轮跃升契机。**二是**超分辨光存储通过突破衍射极限提升存储容量。当前超分辨光存储领域发展出两条路线：一是借助波长尺度内的倏逝场完成记录的近场超分辨方案；二是在远场通过重塑点扩散函数实现分辨率提升的远场超分辨策略。由于扫描式近场操作严重拖慢数据吞吐，且

难以拓展为三维体存储，近年研究重心转向远场方案。2024 年，国内科研机构基于双光束调控聚集诱导发光超分辨光存储技术，实现 PB 量级单盘等效容量。当前，学术和产业界正在探索多焦点并行阵列及冗余纠错编码等方式来进一步提升系统整体性能。

新型光存储主要面向计算架构，当前处于研究阶段，相关实验证明实例不断增加。新型光存储聚焦可集成至计算架构的存储机制，具有超快读出、多路复用、非线性响应和模拟/神经形态计算支持等诸多优势，展现出超越当前传统存储的巨大潜力。基于可扩展光子集成技术，多种新型存储技术方案竞相发展。**一是相变材料方案基于相变效应实现光存储。**硫系、钙钛矿和过渡金属氧化物等相变材料不同晶体状态之间的转变可引发其光学性质产生变化，该机理可用于调制光的相位或振幅；同时，部分材料如 $MAPbBr_3$ 纳米颗粒等显示出其光学性质的非易失性调制特性，可用于长期数据存储。**二是电荷俘获方案基于电荷涨落实现光存储。**通过在半导体中添加掺杂，可在光模式传播的区域或与光倏逝耦合的区域注入或去除电荷调制半导体的复折射率，已出现基于光放大器和可调光子晶体的原型器件。**三是铁电方案基于泡克尔斯效应实现光存储。**经极化处理后，铁电材料的所有电畴沿同一方向取向。当施加与极化偏置方向相反的电压脉冲时，部分电畴翻转为反向铁电极化。有研究团队在基于钛酸钡的跑道型微环谐振腔中成功获得至少 10 个非易失透射态，验证了多电平存储的可行性。**四是光机械方案基于腔光力学实现光**

存储。光机械存储将声子作为光与物质耦合的中介，已在厘米级光纤和波导中通过布里渊散射实现了光脉冲的易失性存储，并在基于纳米尺度微腔器件中同样得以实现。此外，机械结构亦可通过光场调控与光子波导或谐振腔耦合的双稳纳米机械状态，以非易失方式存储信息。

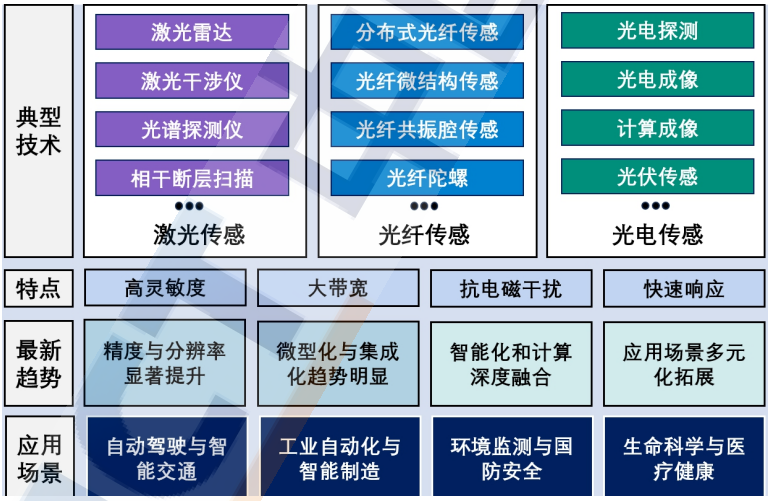
四、光传感领域研究与应用进展

（一）光传感技术正逐渐向集成化和智能化发展

光传感以光作为载体获取多维信号，已成为多学科交叉领域关键技术。光传感通过收集和处理光信号实现对目标物探测或物理量感知测量，具有高灵敏度、宽带宽、快响应、抗电磁干扰等突出优势，可实现多物理参量和多维度信息的获取。在新一代信息技术和智能化浪潮推动下，光传感已成为连接物理世界和数字世界的重要桥梁。从技术体系看，光传感主要分为光电探测、激光传感和光纤传感三大类，广泛应用于高精度测量、在位监测、环境感知、成像识别和智能控制等领域，已发展成为跨光学、电子学、材料学、计算科学等多个学科的交叉领域技术。

光传感技术正向“集成化”、“智能化”演进。光传感技术类型和应用场景众多，不同类型的光传感技术与应用场景各具特点，呈现出日益集成化与智能化的特征。具体来看，**激光雷达**作为主动式光学探测的代表技术，系统由激光传感模组、数据处理芯片、伺服反馈环路等组成，集成度持续提升，其高精度三维成像能力已成为

自动驾驶、低空交通和遥感测绘的关键支撑。**光纤传感**依托光纤本身的传输特性和灵敏性，集光电硬件、智能算法、检测软件、特定应用等多元素于一体，已在能源、基础设施监测和地质灾害预警等方面展现出独特优势，是“长距离、大范围”监测的重要手段。**光电成像**覆盖红外、紫外、可见光等多波段探测，已深度渗透到医疗、航空航天、军事安防等领域。**计算光学成像**则通过光学前端与计算后端的结合，推动光传感向智能化升级，能够实现超分辨、弱信号恢复和多维度信息重建，是光传感向智能化发展的典型方向之一。本章后续小节将分别介绍上述四类典型光传感技术进展、应用格局和未来发展趋势。



来源：中国信息通信研究院

图 15 光传感技术与应用体系与趋势

（二）激光雷达硬件架构和系统等方案逐步收敛

激光雷达已在众多应用领域展现广阔发展前景。激光雷达作为高精度三维感知的重要手段，可获取目标的距离、角度、反射强度、

速度等参数，可有效感知距离、速度等外界信息，正加速在智能驾驶、低空经济、智慧物流及智能制造等领域规模化应用，展现出广阔的发展前景。**智能驾驶领域，**激光雷达主要用于高级辅助驾驶（ADAS）及自动驾驶（L3 及以上）场景，涵盖高速领航、城市复杂路口通行、静态与动态障碍物识别等，部分高端车型已将车顶线一体化激光雷达作为安全架构核心，推动有条件自动驾驶商业化落地。**遥感测绘领域，**机载激光雷达可实现高精度地形建模、输电线路净空测量，并可用于指导灾后快速重建。**低空通航领域，**激光雷达用于障碍规避、精确定点降落与近程定位，未来将广泛应用于城市空中交通，成为电动垂直起降飞行器（eVTOL）起降区自主感知与低能见度冗余感知的关键设备。**智慧物流领域，**激光雷达可广泛应用于自动导引车/自主移动机器人导航与避障、机械臂人机协作安全防护、托盘识别与仓储管理等环节，通过点云测量实现工件定位、体积测量及路径优化。

表 5 激光雷达直接飞行时间法和调频连续波法主要特性对比

主要特性	直接飞行时间法（dToF）	调频连续波法（FMCW）
最大探测距离	150m~250m	300~500m
抗干扰性	弱	强
信噪比	较低	较高
动态范围	较低	高
多回波检测能力	较弱	较强
测速方式及性能	间接法，延迟大精度低	直接法，延迟小精度高
恶劣环境适应性	弱	强
支持全固态化	较难	容易
成本	低	短期较高

来源：中国信息通信研究院

调频连续波有望成为激光雷达未来主流方案。直接时间飞行法（dToF）和调频连续波法（FMCW）是激光雷达的两种典型工作原理。dToF 方案通过直接测量发射激光与回波信号的时间差来计算目标物体的距离信息，具有低成本和结构简单等优势，是目前激光雷达主流方案。FMCW 方案采用相干频率探测技术解调距离和速度信息，具备强抗干扰、高信噪比、高动态范围、多回波检测及直接获取速度等特性，在测距测速、抗干扰、人眼安全、信噪比等多方面性能优于 dToF，但系统复杂、开发难度大，成本相对较高，性能对比见表 5。当前，FMCW 凭借“轻量+精密”优势，应用边界正逐步扩展至低速无人配送、安防巡检、服务机器人等复杂动态识别和高精度感知场景，显现出较大市场潜力。同时，随着硅基光电子技术的发展，FMCW 激光雷达在集成化和成本控制方面具有优势，有望成为未来激光雷达的主流方案。

车载激光雷达以 VCSEL+SPAD-SoC 架构为主要演进趋势。车载激光雷达早期产品以边发射激光器（EEL）+雪崩光电探测器（APD）为主，但探测距离（<150m）和扫描速度（几万到几十万点/秒）处于较低水平，为持续提升探测距离、扫描分辨率并降低成本，近年来业界先后推出 EEL+硅光电倍增管（SiPM）、垂直腔面发射激光器（VCSEL）+SiPM、VCSEL+单光子雪崩二极管（SPAD）、VCSEL+SPAD-系统级芯片（SoC）方案，其中 VCSEL+SPAD 探测距离可达 300m 以上，扫描速率多达上千万点/秒。**在光源端，**随着

VCSEL 发光功率的提升及低成本优势，其替换 EEL 的趋势愈加明显；同时，接收端灵敏度的提升，也在一定程度上弥补了 VCSEL 的功率弱势。**在接收端，**APD 正逐渐被灵敏度和集成度更高的 SPAD 和 SiPM 取代。根据 Yole Group 统计，2024 年车载激光雷达使用的探测器件中，SiPM、SPAD 和 APD 分别占 69%、18%和 13%，并预计 SPAD/SiPM 将在 10 年内增长至 95%以上份额、成为主流方案。同时集成 SPAD、时间数字转换器和处理器等部件的 SPAD-SoC 方案，可大幅度提升时间分辨率、降低噪声与信号失真、增强灵敏度、缩短数据采集时间、提升集成度和降低功耗，成为未来车载激光雷达接收和处理端关键方案。未来几年，随着车载激光雷达技术方案的逐渐收敛，将推动供应链进一步成熟和出货量增加，价格继续降低。

激光雷达技术呈现四大演进趋势。一是高集成和轻量化为产品重点发展方向：车规级产品迭代加快，探测距离、分辨率和帧率持续提升，硅基光电子技术助力车载激光雷达向高集成度、低成本演进；机载激光雷达正向轻量化、低功耗方向发展，集成化（扫描器、惯性测量单元、相机、定位模块等）是必然方案。**二是**抗干扰能力持续增强：FMCW 激光雷达因具备强抗干扰硬件能力成为未来布局重点；多通道正交、并行扫描及随机化时频复用等新方案不断涌现，以应对车载与低空场景高密度拥塞难题。**三是**从单一硬件向系统融合发展：技术发展重心正由单一传感器性能提升转向整机冗余设计、功能安全、仿真验证体系等系统协同层面转变；激光雷达与全球导

航卫星系统、视觉惯导等多源融合在低空交通应用场景加快推进。**四是**应用规模化路径逐步明晰：车载应用率先实现规模量产，推动其在低空交通和智能制造领域加速落地，激光雷达有望成为未来泛在感知的重要基础。

（三）光纤传感成为高精度多场景感知有效手段

多类型光纤传感技术并行发展，适用场景存在差异。分布式光纤传感利用光纤本体作为传感介质，实现对温度、应变、声波、振动等物理量的连续分布式监测，具有监测距离长、空间分辨率高、环境适应性强等优势，已在油气管道安全监测、电力线路状态感知、桥梁与隧道健康监测等领域形成应用。**光纤光栅传感**依托光纤内部折射率调制形成光栅结构，可对应变和温度等参数实现高灵敏度测量，其依托超短周期、倾斜光纤光栅等新型结构，逐步拓展至精密制造、土木工程、风电叶片监测、铁路调度、航空航天复合材料健康监测等应用领域。**光纤微结构传感**通过在光纤中引入空气孔阵列或其他特殊几何结构，实现对化学气体、生物分子、压力和折射率等的高灵敏检测，在医疗健康、环境监测、化工安全等场景中取得初步应用，例如用于在线检测有害气体浓度。**光纤共振腔传感**基于微环形腔、“法布里-珀罗”腔等结构，通过光学共振效应提升测量灵敏度，在压力、温度和生物分子检测方面性能优异，尤其适合微纳尺度的集成光传感，有望规模应用于光传感网络和芯片实验室等领域。**光纤陀螺**基于 Sagnac 效应，通过光在光纤环路中的相位差来

测量角速度，具有体积小、可靠性高、抗干扰性强等优势，是惯性导航系统的重要组成部分，已广泛应用于航空航天、舰船导航、导弹制导和高铁列控等领域。

分布式光纤传感成熟度较高，北美规模最大、亚太增速领先。在光纤传感诸多技术分支中，分布式光纤传感产业成熟度相对较高，且技术体系较为完备，形成了覆盖专用光纤、解调设备、软件算法及系统集成的完整产业链，产品主要集中在光时域反射法（OTDR）、分布式温度应变传感器（DTSS）、分布式声学传感（DAS）和分布式温度传感（DTS），国内外厂商已具备量产能力；同时，相干光时域反射仪（COTDR）、偏振光时域反射仪（POTDR）、布里渊光频域分析（BOFDA）等更复杂的分布式光纤传感产品处于小批量生产或研发阶段。根据 Grand View Research 数据[10]，2024 年全球分布式光纤传感市场规模约为 15 亿美元，预计 2030 年将达 30 亿美元，其中北美地区以超过 30%市场份额居全球首位，在中国、印度和日本需求推动下亚太地区增速最快。

能源、工业引领规模市场，其他领域多点开花。在能源领域，随着油气管道、油井及处理设施对温度、应变等物理量连续监测的需求迅速增加，以及输电线缆和变压器对智能状态感知能力的日益普及，将占据光纤传感最大市场份额。**在工业领域，**光纤传感支持连续监测设备健康、工艺参数及环境状况，具备可扩展、可定制等

[10] https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/distributed-fiber-optic-sensor-sensing-dfos-market

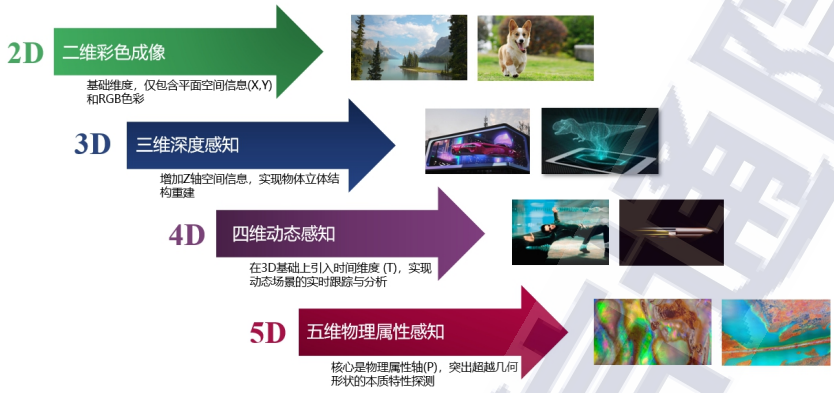
灵活性，实现与工业物联网集成以及数据要素和传感技术的深度融合，提升资产管理效率削减维护成本，预计在工业领域的渗透率将快速提升，尤其在设备健康监测及物联网应用领域。**此外**，光纤传感技术正不断拓展应用边界，在交通、生命科学与医疗、国防安全、智慧城市等领域获得新增长点，呈现多点开花局面，并处于向“全方位规模应用”跨越的关键窗口期。

（四）光电成像由二维向多维物理空间持续延伸

光电成像技术持续创新，突破人类视觉系统极限。光电成像作为光电传感技术的重要分支，其原理基于光电效应，对物体进行成像或图像增强与转换，涉及图像的捕获、转换和处理，涉及微观世界的纳米尺度和宏观宇宙的浩瀚星河，涵盖可见光到不可见光全光谱范围，已广泛应用于照相机、望远镜、显微镜等领域。随着高精度图像传感器、量子成像、高光谱成像的持续演进，光电成像不断拓展人类视觉极限，推动科学研究、工业生产、医疗健康、国防安全等深刻变革。

高精度图像传感技术正实现从二维到多维的升维跃迁。通过分辨率、灵敏度、动态范围、速度和噪声控制等性能的提升，支持对空间、时间、光谱和物理特性的多维感知，如图 16 所示。高精度图像传感的核心技术路径包括背照式与堆叠式结构以突破像素尺寸限制并提升量子效率，深光电二极管与全局快门以扩展动态范围和抑制畸变，SPAD 阵列与片上偏振栅、光谱滤光层的集成以实现多维融

合感知。同时，量子关联成像与单光子探测突破经典光学系统灵敏度与分辨率极限，为极弱光成像与超分辨成像开辟新路径。



来源：中国信息通信研究院

图 16 高精度图像传感技术维度跃升

表 6 光谱成像技术特性对比[11]

名称	多光谱	高光谱	超光谱
光谱分辨率	100nm	10nm	1nm
光谱分辨指数	10 左右	100 左右	1000 左右
光谱通道数	数个至十几个	几十至数百个	数千个

来源：中国图象图形学报

高光谱成像以纳米级光谱分辨率为核心优势，重构物质识别机制。高光谱成像通过捕获数百个窄波段光谱信息，形成兼具空间和光谱信息的“图谱立方体”，实现对材料分子结构和化学成分的精确识别，推动成像技术由“形”的感知转向“质”的解构转变。高光谱成像的关键在于是高性能二维光场窄带分解技术与高灵敏度探测阵列的有效协同，但其数据量巨大，对存储与处理提出挑战。近年来，基于深度学习的图像处理技术发展，极大助力了其在地表分类、

[11] 何明一,李强,郭英,等.高光谱图像智能分类研究综述与展望[J].中国图象图形学报,2025,30(06):2207-2238.

森林资源清查、岩矿识别等领域的应用。深度学习技术在图像重建和分析中的应用显著提升了高光谱成像在地表分类、森林资源调查和矿产识别等领域的实用性，而超光谱成像（如表 4 所示）虽然具备更高分辨率，但由于波段数量和计算压力过大，暂未形成研究主流。

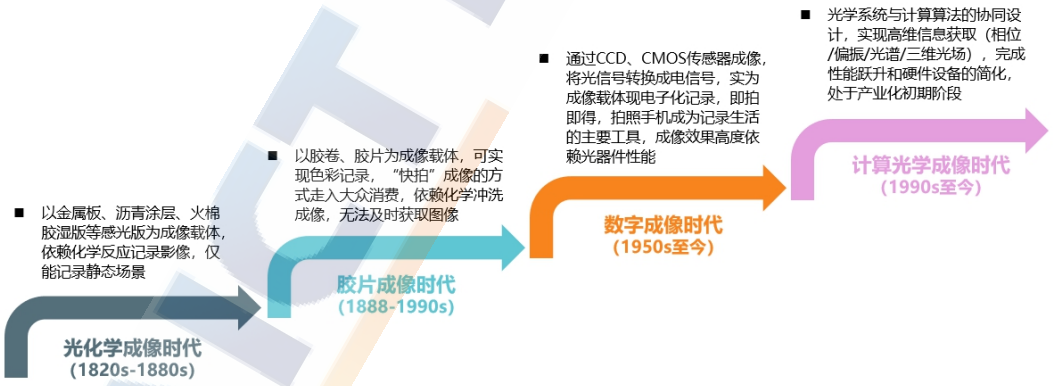
红外成像技术在多个领域展现应用价值。红外成像技术通过探测物体自身发射或反射的红外辐射或热辐射，将不可见的红外信息转化为可见的热图像或数据。红外探测器是实现红外成像的关键，主要分为制冷型探测器（如锑化铟、碲镉汞光子探测器）和非制冷型探测器（如氧化钒、非晶硅微测辐射热计）。在军事和安防领域，红外成像强化了夜视、制导与隐蔽目标探测能力；在医疗和生命科学领域，可用于精准测温、疾病筛查与病变诊断；在科学研究领域，支持宇宙热辐射观测与化学反应监测；在汽车工业领域，红外夜视系统可提高夜间和恶劣天气下的行车安全。在电子消费领域，近红外成像则已成为眼动追踪和非侵入式人机交互的重要手段。

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 17 光成像技术在不同波段的应用场景

（五）计算光学成像突破传统光学系统物理极限

计算光学成像引领第四次光学成像技术变革。如图 18 所示，光学成像技术经历了光化学成像、胶片成像到数字成像时代，目前正在向计算光学成像演进。计算光学成像核心思想是通过设计前端光学编码与后端计算重建算法的协同设计，将光学系统与图像处理作为整体进行优化，从而获取高维度、高分辨率信息，突破传统成像依赖个案式设计的局限，突破传统成像依赖个案式设计的局限。在生命科学、工业制造、消费电子及深空探测等领域展现出巨大潜力，并逐渐形成一套通用的理论框架与技术体系。典型研究方向包括相位信息提取与衍射层析结合的定量相位成像、快照式计算光谱成像以提升动态场景适应性、融合计算机视觉的三维光学传感，以及光场成像实现的数字重聚焦与合成孔径。



来源：中国信息通信研究院

图 18 光成像技术演进路线

计算光学成像技术体系繁杂，整体沿四大方向演进。一是高维物理信息的获取与重建。相位维度上，结合定量相位成像与光强衍

射层析，可在不依赖复杂干涉系统的前提下实现高通量、高精度相位重建；光谱维度上，计算光谱成像通过光学调制与反演算法实现快照式获取，显著改善传统方案的低光通量与长成像时间问题，适配动态场景；三维维度上，融合计算机视觉与光学编码（如结构光、ToF、散斑/相干编码等）成为重点方向；光场维度上，通过角度/焦面/编码元件采集并以计算重建四维光场，可实现数字重聚焦、合成孔径与光场显微等功能。**二是突破传统成像性能极限**。空间分辨率方面，相干合成孔径、多帧超分辨与稀疏/压缩感知等方法在既定物理孔径下实现有效超分辨；时间分辨率方面，主动式超快成像利用编码脉冲与解调/反演框架，可捕获纳秒至皮秒级瞬态过程，显著超越常规成像器件对超快现象的观测能力。**三是成像系统的精简化**。以“以算代光”为理念，用编码掩膜、相位板、超表面等降低光学复杂度与体积；无透镜/片上成像在近场与显微场景表现突出，通过计算重建替代部分光学功能，但面向宏观场景仍受分辨率、衍射与信噪比限制，相关应用处于持续探索中。**四是成像系统的智能化**。将深度学习与物理先验融合，实现快速、稳健、可推广的重建；引入自适应采样与闭环感知以提升信息效率与鲁棒性；通过端/边/云协同与专用加速器保障实时性，使系统由“被动记录”走向“任务导向的理解与决策”

五、光显示领域研究与应用进展

（一）多元技术演进与新应用驱动显示技术发展

光显示主流应用市场中，LCD 和 OLED 仍占主导。LCD 技术发展较早，产业体系成熟、工艺稳定性高，在电视、桌面显示器及公共显示屏等大尺寸显示场景和成本敏感的应用场景占据主导地位。近年来 Mini-LED 分区背光技术结合量子点显著提升对比度、峰值亮度与色域，成为当前 LCD 显示的主要技术跃迁路径，然而 LCD 的分区背光虽增对比，但会引入光晕控制与均匀性等方面挑战。OLED 技术凭借主动发光机理，柔性超薄、高对比度、广视角和快速响应等优势，在智能手表、智能手机等中小尺寸，并对显示形态和品质有较高要求的高端显示领域表现突出。然而，OLED 显示技术在寿命/烧屏、蓝光子材料效率与大尺寸成本上仍有工程权衡。

微显示技术在新型、高端应用领域占据重要地位。微显示技术主要包括硅基液晶（LCoS）、数字光处理（DLP）、硅基有机发光二极管（OLEDoS）及微发光二极管（Micro-LED）等。依托成熟半导体工艺，微显示技术在微型化、高像素密度、高集成度、及低功耗等方面具备优势，可有效平衡效率与体积之间的矛盾，尤其在高性能近眼显示终端和车载抬头显示设备（HUD）中具备应用潜力，也为光显示技术面向下一代人机交互界面和可穿戴设备的发展提供基础支撑。

表 7 光波导主要技术路线[12]

技术路线	几何光波导（以阵列波导为主）	衍射光波导			混合光波导（PWG）
		表面浮雕光栅波导（SRG）	体全息光栅波导（VHG）	偏振体全息光栅波导（PVG）	
技术原理	依靠光的反射进出光波导的耦合结构	依靠光的衍射进出光波导的耦合结构			结合 Birdbath 和传统波导优点，采用偏振折返光学
制造工艺	传统光学冷加工镀膜/贴合/切割	纳米压印、刻蚀等、激光全息干涉			传统光学冷加工镀膜/贴合/切割
产业成熟度	高	高	较低	低	低

来源：中国信息通信研究院

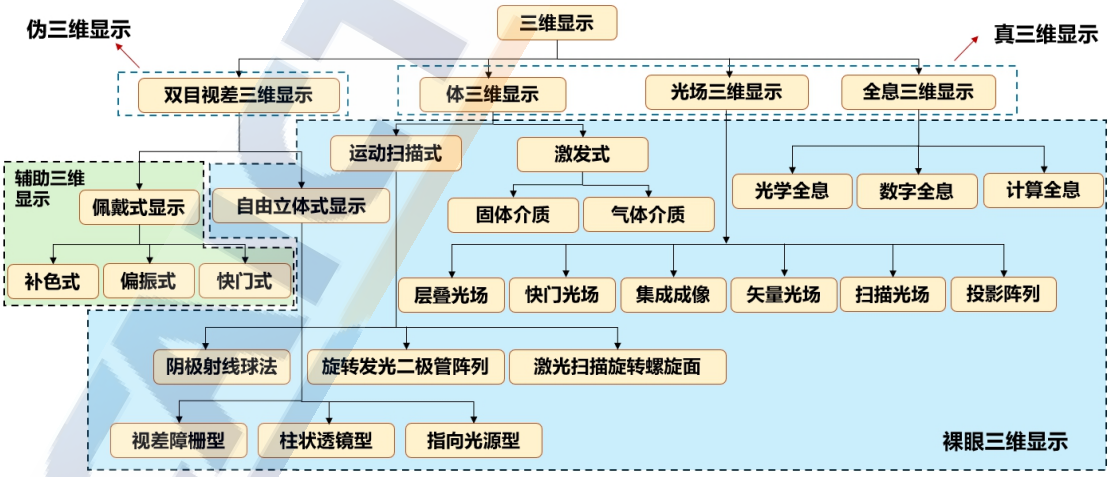
光学材料、微纳超结构表面加工与仿真设计进步支撑光波导性能提升。作为光场传输与重构的核心载体，光波导的几何精度、折射率调控及低损耗特性可决定光显示系统的信息容量、能效极限与形态自由度。通过亚波长尺度的结构设计与表面耦合调制，光波导能够在微米级厚度内完成大视场角光束的扩瞳、折叠与定向出射，将传统复杂光路压缩至片上传输，实现显示模组的轻薄化、可折叠乃至透明化演进。然而，在耦合效率与色散控制方面仍存在瓶颈。为应对这些挑战，探索二维扩瞳、折射率工程、体相衍射及表面衍射结构设计等多种技术，以提升光场利用率和成像质量。同时，波导级复用技术可在同一平面内并行引导多波段、多视角光场，为超高分辨率与空间三维显示提供可扩展的带宽通道。未来，光波导将成为近眼显示、车载全息投影及大尺寸全屏指纹等下一代光显示供的重要实现路径。

[12] Wellsenn XR，从离轴透镜到光波导

光显示产业正经历结构性转变。传统主力市场如智能手机、电脑、电视等增速放缓，需求趋于饱和，而三维显示、柔性显示（尤其在可穿戴设备领域）、近眼显示、以及极大极小显示等新兴领域展现出强劲的增长势头，是驱动光显示产业持续发展的关键增量。

（二）三维显示成为下一代视觉交互的核心技术

三维显示可显著提升视觉体验，应用范围广泛。随着二维显示接近分辨率极限（如 8K 画质下人眼难以分辨像素颗粒），仅靠提升清晰度已难以带来显著体验突破。三维显示通过模拟人眼立体视觉的生理机制（双目视差、调节与会聚）以及心理暗示（遮挡、光影等），突破平面限制，呈现真实的深度信息，从而带来沉浸感与立体感。其应用前景涵盖医疗成像、军事仿真、教育培训、科研探索、工业设计、车载显示等，并有望成为三维互联网和沉浸式数字生活的关键基础。



来源：中国信息通信研究院

图 19 三维显示技术路线

三维显示多条技术路线同步发展。三维显示技术依据原理可分为双目视差、光场、全息和体三维显示四类。**双目视差显示**通过向双眼提供差异图像营造立体感，技术成熟、成本较低，已广泛应用于头显和大屏，但存在视觉疲劳问题，需辅以眼动追踪与畸变矫正。**光场显示**通过调控光线方向与角度重建物体，具备连续视点和自然景深优势，适合近眼与裸眼场景，苹果、Meta 等企业积极布局，目前受限于视场角、分辨率与数据处理能力。**全息显示**基于波前再现的原理，可完整再现深度信息，是最理想的三维显示形态。但动态全息受限于空间光调制器性能，处于早期发展阶段。**体三维显示**通过在立体空间中直接激发体像素构成图像，适合展示内部结构，计算负担小，但通常显示尺寸有限、难以表现遮挡与透明效果，应用范围受限。

表 8 不同三维显示技术提供深度信息对比

分类	线性透视	遮挡	阴影	纹理	先验知识	双目视差	运动视差	聚焦	遮挡变化
双目视差	有	有	有	有	有	有	无	无	无
光场显示	有	有	有	有	有	有	有	无	有
全息显示	有	有	有	有	有	有	有	有	有
体三维显示	有	无	无	无	有	有	有	有	有

来源：中国信息通信研究院

微纳超结构表面光学为新一代三维显示提供创新路径。微纳超结构表面光学通过纳米结构设计和超表面调控，可突破传统光学在

体积、精度与集成度方面的局限，实现对光波前、相位与振幅的精准调控[13]。基于纳米光栅、衍射光学元件及超表面等平面光学元件，可在像素级别对光线进行高自由度调制，精确重建三维物体的全光场信息。微纳超结构表面光学元件具有体积小、集成度高等优势，能够有效协同传统三维显示中难以兼顾的空间分辨率、角分辨率和视场角之间的矛盾，从而在高帧率、大视角、高清晰度等多个维度同时提升显示性能。

多领域协同创新推动三维显示技术发展。三维显示技术的发展离不开光学设计、人机交互、显示面板、三维内容制作、人工智能、网络计算等多个领域的支撑与创新。例如，三维显示往往伴随大量数据，高性能数据压缩算法可以实现更高速稳定的数据传输和存储，高速传输技术确保这些数据在短时间内快速、稳定地传输到显示设备。三维内容制作技术是连接三维硬件能力与用户沉浸体验的桥梁，若缺乏高质量三维内容，即便三维显示设备在硬件性能上达到极高水准，也无法真正发挥其价值。

[13] 付博妍, 毕千惠, 郑诗雨, 彭于娟, 王漱明, 曹汛, 王振林, 祝世宁. 基于多维光场调控的超构表面先进成像与显示（特邀）[J]. 光学学报, 2024, 44(14): 1400001.

来源：中国信息通信研究院

图 20 三维显示技术六大支撑技术全景图

三维显示效果与内容生态有待完善提升。一方面显示效果不足，分辨率、色彩、视角和舒适度有待提升，具体来看：一是多视角图像分配像素，导致单视角画质下降；二是全息显示受成像机制限制，面临色域狭窄、色彩表现力不足等问题；三是现有三维显示器普遍视场角有限，需在特定视角才能获得良好立体感，偏离后易出现画面质量下降或重影；四是佩戴类设备的舒适性有待提升。另一方面**内容生态滞后**，高质量三维内容制作成本高、周期长，二维转三维技术虽提供一定解决方案，但转化效果与适用范围仍然有限，不同设备间的兼容性问题也进一步限制了内容的通用性与体验一致性，故内容匮乏与制作瓶颈是制约三维显示技术普及的重要因素。

（三）柔性显示技术是新型人机融合的支撑要素

柔性显示正推动可穿戴设备、车载系统以及折叠屏和曲面屏等

消费电子的深度演进。可穿戴设备方面，柔性显示技术能够顺应皮肤、织物甚至生物曲面，实现显示界面与人体的自然融合，拓展了人体感知与交互边界，推动设备向增强机能和感知延伸的方向发展。**车载设备方面**，柔性显示凭借高抗冲击、轻量化及异形集成等优势，满足智能座舱对可靠性、空间利用与美学创新的综合需求，为未来场景自适应交互和一体化智能表面提供重要实现路径。**消费电子方面**，折叠屏与曲面屏已在消费电子实现规模化应用，其中折叠屏结合柔性 OLED 与铰链创新实现手机与平板间自由切换，曲面屏则以沉浸视觉与交互美学提升高端体验。据 Omdia 预测，至 2032 年全球可折叠 OLED 屏幕出货量将达 1.246 亿台[14]。

柔性显示材料体系的突破正重塑产业格局。可溶液加工的导电聚合物通过分子结构修饰与掺杂策略，在保持高透明度的同时可实现导电率的数量级提升，适合大面积低成本制造。**纳米纤维素透明薄膜**因高透光率、低热膨胀系数和可生物降解特性，结合复合改性可同时实现机械强度与柔韧性优化，推动超薄、超轻与环保化发展。**可拉伸发光材料**通过分子设计或微结构工程可支持在 30%以上应变条件下稳定发光，使显示器件能够耐受拉伸、扭曲等多模式形变，满足人体皮肤与可变形机器人等复杂动态界面的需求。同时，柔性基底、电极与薄膜晶体管驱动电路的持续发展仍是实现系统级柔性的关键环节。

[14] www.omdia.com

柔性显示产业仍面临可靠性、工艺和系统集成等挑战。多次弯折下的性能衰减、柔性 TFT 迁移率不足与器件寿命等一定程度上限制了规模应用；工艺层面，卷对卷与印刷电子虽然具有潜力，但良率与应力控制尚待提升；系统层面，触控、传感与驱动的一体化集成仍存在权衡。

（四）沉浸式显示塑造多维感知交互的关键入口

沉浸式显示逐渐成为跨领域人机交互的新支撑技术。文娱领域，虚拟现实（VR）/增强现实（AR）头显、CAVE 系统及全景 LED 影院带来高度沉浸的游戏、社交与观影体验，显著增强临场感和互动性。**工业领域，**沉浸式显示结合数字孪生可支持虚拟协作与实时调试，提升制造效率与决策安全。**教育医疗领域，**其通过虚拟解剖、手术规划及远程立体化教学突破了时空限制，改善培训与诊疗效果。

三类沉浸式场景光显示并行发展，技术方案存在差异。VR 显示的核心在于构建完全封闭的虚拟视觉环境，技术方案包括 Fast-LCD 与 OLEDoS 显示等。Fast-LCD 凭借较低成本与高成熟成为主流选择，OLEDoS 以高对比度、快响应速度和自发光特性，在高端 VR 设备中可提供更优的沉浸感和画面质量。**AR 显示**旨在将数字信息叠加至现实世界，目前主要依赖光波导作为导光方案并结合微显示技术来实现。其中，Micro-OLED 已广泛应用于消费级 AR 眼镜；Micro-LED 是未来户外及专业 AR 应用的重要方向；LCOS 在工业、医疗等企业级 AR 头显和光机系统中取得应用。**混合现实（MR）显示**融合 AR

与 VR 的技术特点和体验优势，可在现实环境中无缝嵌入可交互、具物理属性的数字对象，实现虚拟与真实元素在视觉、空间和行为层面的动态交互。MR 通常采用具备高速环境感知与空间定位能力的传感模块，结合高透光、可动态调光的光显示方案，以实现虚拟内容对现实光照、遮挡与空间关系的自适应匹配。

来源：中国信息通信研究院

图 21 AR、VR、XR 对显示终端的要求对比

视网膜投影显示是下一代沉浸式显示的颠覆性方向。视网膜投影显示不依赖传统屏幕成像，通过精密光学系统将图像信息直接投射至用户视网膜上，从而在极轻薄的硬件形态下实现高色域、大视场角与视觉辐辏调节冲突的大幅减弱，有望根本性解决传统 AR/VR 显示在视觉舒适度、体积与极限性能方面的瓶颈。目前存在两条主流技术路径，**一是激光扫描视网膜投影**，以 MEMS 微镜为核心，通过调制红、绿、蓝三色激光束并控制其高速扫描视网膜直接成像，

可实现大景深、高对比度和低功耗，但系统散斑噪声和眼动追踪要求较高。**二是微显示面板合成投影**，将微显示屏与复杂光学系统结合，生成准直图像并由合束光学元件投射入眼，该路径结合了微显示的高分辨率与投影光学的灵活性和眼动范围扩展能力，是业界主流研发方向，其中光学效率与系统小型化是关键挑战。

沉浸式显示短期内仍面临技术成熟度与市场接受度挑战。当前，终端设备普遍存在重量体积大、佩戴舒适性不足、分辨率与视场角难以兼顾等问题，实际体验与用户预期存在差距，加之成本高昂、高质量内容匮乏，制约了消费级市场的快速扩张。从产业化角度看，硬件方面分辨率、延迟、功耗与重量限制用户体验，眩晕感与舒适性亟需优化；工艺层面，高透光光波导的制造良率与成本，以及 Micro-LED 与 OLEDoS 的产能与良率提升仍是难点。长期来看，随着元宇宙等持续推进、数字内容生态逐渐丰富，以及下一代人机交互需求爆发，沉浸式显示终端有望在娱乐、社交、工业、教育等多领域成为关键交互入口。据 Omdia 预测，2027 年开始近眼显示屏出货量将迅速增长，到 2030 年将达 9290 万片[15]。

（五）极大极小显示技术双轨驱动拓展视觉边界

极大与极小显示不断拓宽光显示的应用范围。极大与极小显示分别对应宏观全景与微观集成需求，推动显示技术全尺度应用场景拓展。**极大显示**以超大屏幕、LED 视频墙、立体投影及交互式地面

[15] www.omdia.com

显示为代表，已广泛应用于大型体育赛事、演艺舞台、城市地标广告、智慧指挥控制中心和虚拟拍摄影棚等场景。未来，随着激光投影与可视化渲染技术的持续进步，极大显示将向高清化、立体化和交互化方向发展，结合人工智能与实时渲染能力，构建更具临场感和参与度的超大规模数字环境，支撑城市数字孪生、远程协同和沉浸娱乐。**极小显示**以高像素密度、低功耗和微型化为核心特征，目前已在 AR/VR 近眼设备、电子取景器、智能眼镜和头戴式显示器、医疗影像、工业检测等场景取得应用，正推动显示向便携化与精细化方向演进。

Micro-LED 成为极大与极小显示的重要共性解决方案。一方面，Micro-LED 依托模块化拼接与微间距化技术，能够实现无缝、无限扩展的巨型显示屏，其高可靠性、高亮度和宽色域特性，使其在高端商业显示、指挥控制中心、影视制作和户外广告等场景取代传统 LCD 和投影技术，提供更具沉浸感和视觉冲击力的大画面体验。**另一方面**，Micro-LED 技术通过晶圆级微缩化工艺实现超高像素密度（理论上超过 5000 PPI），同时具备超高亮度、纳秒级响应和低功耗特性，是 AR 眼镜、VR 头显、电子取景器和医疗内窥镜的理想选择，特别是在强光环境与高动态范围的应用中表现突出。

六、光子交叉融合研究与应用进展

（一）光计算、互连、存储一体机为远期目标

“光算连一体”从单节点、多节点双维度提升计算性能。一方面，

片上光互连可以使能节点内的电计算芯片之间、以及电计算芯片与光计算芯片之间有效协同，提升单节点算力。未来，还可扩展实现晶圆级光互连网络，支持连接更多光、电芯片，实现多种网络拓扑，以简化计算任务映射到不同芯片的过程。早期，有研究团队提出采用WDM光互连技术的片上光网络，通过硅基微环滤波器可实现8×10Gb/s的并行传输，为光计算单元间的数据交互提供高带宽物理层[16]。**另一方面**，芯片级光互连支持可重构解耦架构的数据中心资源池化与横向扩展，提升多节点算力，助力大规模高效算力网络的实现。资源池内和资源池之间通过高带宽、低延迟的互连技术，可实现资源灵活调配和算力弹性扩展。若互连与计算均在光域完成，即光计算的计算结果以光形式直接路由到远端计算/存储芯粒，能够减少频繁光电转换、提升系统性能。学术界，电子科技大学报道的基于Si_3N_4微环的集成光梳，可实现多波长相干光源生成与信号再生，可同时服务于光计算和光互连，在50km距离的实验中验证了计算与传输的协同优化[17]。产业界，已有多家国内外光计算企业的业务范围向光互连延伸。目前，光计算与光互连的结合已从概念验证进入工程攻坚阶段，正在解决大规模集成封装良率、光电协同设计工具链、算法生态等难题。

“光存算一体”技术研究与产品研制持续推进。计算与存储融合能够减少传输和I/O操作，优化计算与存储间的协同效率，在深度学

[16] Kaźmierczak A, Drouard E, Briere M, et al. Optimization of an integrated optical crossbar in SOI technology for optical networks on chip[J]. Journal of Telecommunications and Information Technology, 2007 (3): 109-114.
[17] 耿勇. 基于集成光子芯片的全光信息处理技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

习神经网络等大数据量和大规模并行应用场景中较为适用。**材料方面**，相变材料多级存储所表现的权重调控特性，同时为生物突触模拟计算提供了可行性。同时，通过相变材料与硅基光电子平台的异质集成工艺优化，可望实现8英寸晶圆级相变光子集成制造，赋能神经形态光计算。**架构方面**，现有全光存算一体系统因编程与计算共用同一组光路，权重配置与运算必须分步完成无法并行，从而限制了灵活性与扩展性。相比之下，电控光算架构以电控方式动态编程，充分发挥光计算的大算力、低能耗和高并行优势，更利于阵列规模扩展和神经网络在线训练。2023年，Zhou W等人展示了一种基于非易失性相变材料锗锑碲光波导存储器的电控光算架构[18]。**产品方面**，国内外正进行初步探索，其中我国企业基于相变材料的储存功能，推动存储与计算单元融合，于2025年完成存算一体光芯片流片，实现了128 × 128矩阵规模集成，能效比传统电芯片提升了1~2个数量级。

“光算连存一体”是打破现有计算架构瓶颈的重要路径。在算、连、存三个环节中，存力是主要瓶颈，在算力、运力大幅提升情况下，利用计算和连接能力弥补存储能力的不足是重要发展方向。通过将“算、连、存”全部或大部分操作迁移到光子领域，在同一平台上形成光算连存一体机，有望解决“计算墙、内存墙、功耗墙”叠加瓶颈。

（二）光网络通感一体化协同架构正加速构建

短期内同纤复用为主流路径，中长期需进一步攻克同波融合技

[18] Zhou W, Dong B, Farmakidis N, et al. In-memory photonic dot-product engine with electrically programmable weight banks[J]. Nature Communications, 2023,14(1): 2887.

术。通感一体化技术的实现方案分为同缆分立、同纤复用和同波融合三类。**同缆分立**在单根光缆内分别布设通信与传感光纤，实现物理隔离、互不干扰，保障系统稳定，但依赖冗余纤芯资源，在纤芯紧张区域应用受限。**同纤复用**通过波分、时分及频分复用等方式在单根光纤中同时承载通信与感知功能，大幅提升纤芯利用率，并能与成熟的分布式光纤传感技术深度融合，是当前最具规模部署潜力的方案。但该路径需攻克波长间串扰抑制与时分脉冲同步精度等技术瓶颈。**同波融合**是光网络通感一体化的理想形态，通信与感知信号在同一波长上承载，利用前向传输光信号的相位、偏振、幅度等多维属性实现数据传输与环境感知的同步，避免额外传感硬件投入。然而，该路径需突破通信-感知联合调制解调、强噪声信号分离、实时数据处理等关键技术，且对光电器件线性度及算法算力要求较高，目前处于实验室攻关阶段。

国内外标准组织加速推进通感一体标准化进程。国际方面，ITU-T SG15 Q6 工作组率先取得突破性进展，已在 DWDM 场景下完成了 G.dfos（用于地面光传输系统的分布式光纤传感系统）标准制定，并在 2025 年 10 月 SG15 全会发布 “consent” 版本。此外，TR.fsc 光通信网络前向感知技术报告已完成编制立项，聚焦于 oDSP 信号解调的通感一体化技术方案研究。国内方面，CCSA 正在开展通感一体化光网络架构及关键技术的课题研究，预计 2025 年发布成果。

（三）光感算融合大幅提升实时数据处理能力

光传感与光计算结合的感算融合概念崭露头角。随着传感和计算模块在边缘基础设施的广泛部署，高效的感知、计算融合重建至关重要。近年来，光感算融合的概念崭露头角，相关高校和研究机构针对全光图像处理、基础设施监测和交通安全等领域开展了系列研究。当前，光感算融合仍处实验室研究阶段，未来随着技术的逐步成熟有望在智能传感、智慧城市等领域发挥重要作用。

光计算可为 DAS 传感提供实时数据处理能力。DAS 光纤传感系统因其高灵敏度和远程非接触式监测特性备受关注。然而，传统电子信号处理方法在面对海量数据时，常常面临计算能力不足和功耗过高等瓶颈。2025 年，南京大学研究团队基于“时间-波长复用”机制构建了光神经网络加速器（TWM-PNNA）[19]，将光计算的优势与 DAS 系统的实时数据处理需求相结合，为感算融合系统提供了新型架构设计，将推动光计算在智能传感领域的应用发展。

（四）光感显融合体系重新定义人机交互范式

“光感显一体”推动“单向显示”向“双向交互”升级。传统显示仅能被动传输，屏幕作为信息出口既无法感知用户行为意图或环境变化。为实现基础交互，外置摄像头、指纹模组等外置传感器被引入，但存在“刘海屏”、“挖孔屏”等结构性妥协，并带来延迟与功耗激增问题。光感显一体将 Micro-PD 阵列、近红外（NIR）

[19] Fuhao Yu, et.al., Time-wavelength multiplexed photonic neural network accelerator for distributed acoustic sensing systems[J]. Advanced Photonics, 2025, 7(2): 026008-1-14.

Micro-LED 等光传感单元集成于显示系统，使显示界面升维为兼具环境感知与信息输出的智能交互载体。其技术延展性已催生多领域创新应用，例如在消费电子领域，微距热成像取代超声波传感器实现全屏指纹识别，感测面积扩大 300%；在健康监测领域，AR 眼镜通过眼动脉血流监测可分析预警卒中风险。

Micro-LED 是“光感显一体”关键路径，串扰耦合为主要瓶颈。在维持微米级像素间距与超高分辨率的前提下，Micro-LED 基于低填充因子特性，单像素单元占比不足 20%以下，形成可编程的共位集成空间。这些人眼不可见的微观空隙为光电二极管阵列、近红外 Micro-LED 光源等微型传感元件的嵌入提供了物理基础，推动显示与感知功能的像素级硬件融合。然而，该架构面临光路串扰耦合瓶颈，当显示 Micro-LED 发射的可见光与传感近红外光在亚微米尺度共存时，发光单元的直接入射噪声将淹没探测器接收的环境反射信号。针对这一挑战业界正从三方面研究解决方案，一是构建氮化硅隔离墙实现物理信号分隔；二是在探测器表面引入有机滤光材料实现特定波段选择性吸收；三是通过时分复用驱动优化显示与感知周期，规避同频干扰。

七、光电融合研究进展与产业影响

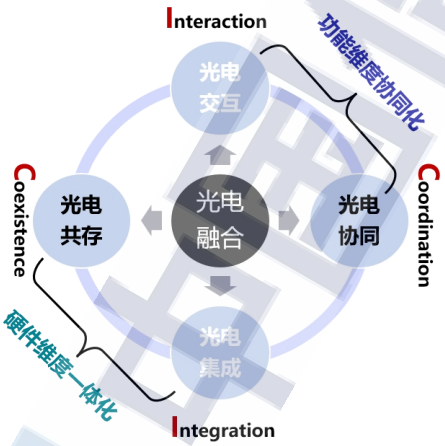
（一）光电融合实现优势互补，多应用不断深化

光子和电子演进路线趋同，融合发展可实现优势互补。由于玻色子和费米子的内在区别，光子和电子本征物理特性、传输效率、

能量损耗特性等存在差异。光子具有高带宽、低能耗优势，但自身难以实现信息领域所需的全部功能，电子具有灵活性强、数字能力和集成度高优势，但面临严峻的带宽、功耗等挑战。光子与电子技术的历史演进路线具有相似性，为光电融合发展创造了良好空间：电子技术经由宏观电气系统经离散化变为电容、电阻、电感等电子元件，再经由微型化形成微电子器件，最后经由集成化成为当前集成电路形态；光子技术由空间光学系统经离散化变为透镜、面光栅、耦合器等光学元件，再经微型化演进为波导、微谐振腔、光栅等光子器件，目前光子技术已逐步集成化，朝着光子集成电路形态发展。

光电融合包含功能协同和硬件一体两大层次。光电融合是指将光子与电子技术的优势深度融合，通过光子和电子的协同作用实现信息传输、计算和处理的新型技术范式。光电融合可解决电子技术在速度、带宽和功耗方面的瓶颈，并弥补光子技术在计算和存储等方面的不足。如图 22 所示，**功能维度协同化**主要涉及光与电一体化设计的器件互连及系统优化，其本质为信息层面的光电融合，可分为“光电协同”和“光电交互”两个部分。光电协同强调在同一器件内，光与电通过同步激励和联合调控形成高效的协同效应。光电交互则是光与电通过标准化接口在系统层面实现双向耦合，其核心特征为接口耦合和分区自治。 光电协同为光电交互提供物理基础，后者则为前者提供网络级的扩展能力。后者为前者提供网络级控制与扩展。**硬件维度一体化**涉及光与电一体化制备，主要包括光器件

与电器件的集成与封装，其本质为物质层面的光电融合，可分为“光电共存”和“光电集成”两个部分。光电共存是指光子与电子系统各自保持独立的物理形态、工作机理和信号域，共享散热、能源、机械结构等资源，通过标准化接口完成必要的数据或能量交换；光电集成是将光器件（激光器、调制器、探测器、波导等）与电器件（晶体管、互连、驱动/放大电路）在芯片或封装级通过单片、异质、三维堆叠等方式融合为单一实体。



来源：中国信息通信研究院

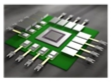
图 22 光电融合的概念层次

光电融合趋势在多个应用场景逐步凸显，成为先进计算等领域的重要发展方向。近年来，随着生物医疗、精密计量、工业控制、通信网络及先进计算对带宽、灵敏度、功耗、时延等提出更高需求，光电融合成为重要演进趋势，其应用场景日益丰富。例如，**医疗健康领域**，医用光学内窥镜、生物探针、人体可穿戴设备、辅助诊断等方面的应用依赖电子器件设备和新型光传感技术，光电融合感知

成为新模式；**精密计量领域**，基于激光的频率、绝对距离、角度、震动等物理参数测量，依靠微波级别重复频率的光学频率梳以实现电学器件可响应的光学测量；**智能感知领域**，新型光电传感依赖光学的高灵敏度和强抗干扰探测能力，结合电子信息接收、处理能力等强大基础，芯片级传感、微波光子传感等成为新趋势；**通信网络领域**，干线和城域网、数据中心/智算中心之间，需要光子技术实现超低时延的网络连接，光子技术正逐步替代电子力所不能及之环节；**先进计算领域**，光电融合技术从以光收发模块为基础的“电算光连”、以光交换为基础的光电混合组网、CPO、光 I/O、光电融合计算等方向深刻影响数据中心/智算中心内部的互联与计算趋势。

（二）光电融合重塑计算体系，多层级阶梯推进

面向先进计算的光电融合技术近年来发展迅速。受物理极限和经济因素限制，基于 CMOS 的集成电路特征尺寸持续缩减面临挑战，微电子技术已从“摩尔定律时代”进入“后摩尔时代”。以集成电路为基础的高性能计算和数据传输硬件体系除了自身朝着更先进制程的“深度摩尔”路线和更高级封装工艺的“扩展摩尔”路线发展演进之外，还将光电融合技术视为突破速率和功耗瓶颈的重要路径。在算力需求激增背景下，光电融合正推动互连和计算架构变革，极大提升系统在带宽、时延、能耗和算力等方面的综合性能。

名称	典型装置	功能概述	替代对象	对先进计算产业的意义
OCS		低时延高可靠动态重构算力互联	电交换机	OCS助力光电混合组网优化算力大规模网络互联拓扑，并充分降低功耗和时延
CPO		芯片级互联集成封装实现低功耗	光模块	充分降低现有智算/数据中心交换和互联能耗，助力未来更高速率电口方案演进
光I/O		低损光子布线扩展芯片互联距离	电I/O	为芯片级互联提供超高带宽低延迟链路，推动更大规模超级节点实现和分布式计算应用落地
光电混合计算		光电协同互补加速计算效能	纯电算芯片	提供高效率大规模矩阵运算支持，为AI计算升级加速，减轻专用AI计算负载和能耗

来源：中国信息通信研究院

图 23 面向先进计算领域的光电融合技术体系

光电融合深刻影响数据中心和智算中心的互连、交换和计算体系。从设备、模块、器件到芯片，光电融合技术正由外到内逐步深入数据中心和智算中心的各个环节，除已取得广泛应用的光模块外，目前已形成 OCS、CPO、光 I/O、光计算四大主流技术领域。**设备层面，**OCS 基于大容量端口光开关进行信号数据的控制和交换，具备快速无阻塞切换和速率透明特性，相比电交换机可极大降低交换时延和设备功耗，可与电交换机混合组网、优势互补。**模块器件层面，**CPO 通过将光芯片器件、电芯片装配在同一个插槽或封装体内，可实现集成度提升和比特能耗下降，是光模块的替代方案。**芯片层面，一是**光 I/O 等芯片级光互连技术面向计算/存储芯片低时延互连需求，用于替换计算、控制和存储单元之间的大容量互连和硬件系统电 I/O，可实现带宽增加和功耗降低。**二是**将光计算处理器与电处理器相耦合，利用光计算高并行性、低延迟和低功耗特性，结合电计算在非

线性运算、逻辑控制等方面的成熟能力，形成互补协同的计算架构，实现对传统电计算性能和效率提速。

功能协同“松融合”与硬件一体“紧融合”协同演进。如图 24 所示，光模块和板卡形态 OCS 为典型的光电“松融合[20]”，光模块取代长距电互连目前已广泛部署于智算/数据中心；OCS 在部分场景中展示了取代传统电交换的潜力，已逐步推进在智算/数据中心中的部署。。同时，“松融合”逐步向“紧融合[21]”演进，CPO 将光、电芯片器件在物理层面更紧密地耦合，芯片形态 OCS 可将光电融合推向更深层次的硬件一体阶段。此外，光 I/O、光计算等光电“紧融合”技术有望全部替代电互连、部分替代电计算，并有望通过“算连一体”重构现有计算存储体系架构。

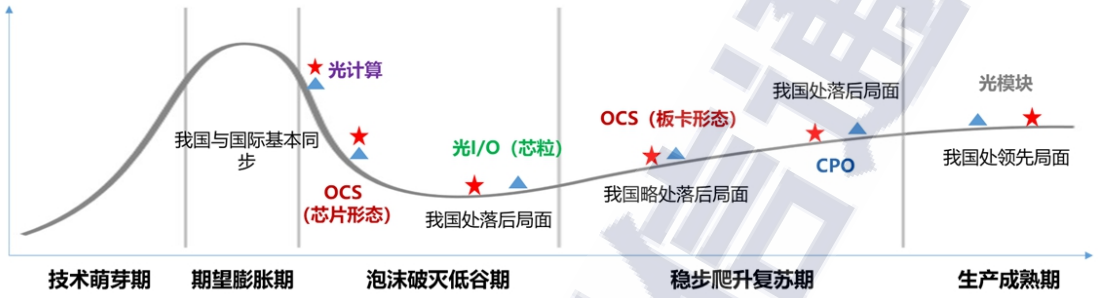
来源：中国信息通信研究院

图 24 光电融合技术演进路线及趋势

光电融合主流技术处于不同发展阶段。如图 25 所示，光模块处于生产成熟期，并持续迭代升级，我国企业在全球市场占据优势份额。CPO 处于规模商用前期阶段，光 I/O 的商用时间相对滞后，国内由于受“电生态”、先进制程和封装能力等制约，暂处落后状态。

[20] “松融合”是指光电技术在设备和系统层面进行相对独立的集成，通过接口和通信协议实现协同工作。
[21] “紧融合”是指光电技术在芯片或更小尺度上实现深度集成，形成更高效、更低功耗的系统。

板卡形态的 OCS 处于研发突破和示范应用阶段，我国与国际先进水平相比呈现略为落后状态，产品关键性能和需求应用牵引有待提升；芯片形态的 OCS 国内外均处于研发阶段。光计算整体处于应用探索阶段和产业热度降温沉淀期，我国与国际先进水平基本同步。



来源：中国信息通信研究院

图 25 光电融合发展阶段

（三）光电协同仿真设计尚不成熟，需大力推进

基于已有仿真设计工具，光电协同仿真设计有四类实现方式。一是光子设计自动化（PDA）与电子设计自动化（EDA）设计工具联合使用。现有的商业 PDA 设计工具如 Lumerical INTERCONNECT、VPI Photonics 等可提供多种光芯片链路级仿真设计验证，但缺乏开放的建模和仿真标准，且难与 EDA 中常用的 SPICE 和 Verilog-A 语言完全兼容。通过与 Cadence Virtuoso 等 EDA 平台联合仿真可实现光电协同，但效率有限，且容易出现收敛问题。**二是**在 EDA 平台中建立光子等效模型。EDA 平台具备大规模电子元件的链路级仿真能力，在其基础上建立光子元件模型是实现大规模光电协同仿真的有效途径之一。然而，光信号不遵循基尔霍夫定律，需由多个电端口

来表示光端口，当光电芯片复杂度和集成器件数量增加时，采用 SPICE 和 Verilog-A 建模仿真将会变得复杂且低效。多年来，业界针对 EDA 平台持续开展光子集成的仿真探索，但仍面临诸多挑战。**三是**计算机辅助工程（CAE）利用计算机软件进行工程仿真分析，常用于结构、流体、电磁等物理场分析，COMSOL Multiphysics 等能够分析电磁场的 CAE 软件也可用于光子集成仿真，但同样由于缺乏开放的建模和仿真标准，交互性较差。**四是** MATLAB 等通用编程软件凭借强大的矩阵运算能力，可完成光子集成模型中的复杂矩阵操作；Python 等通用编程语言也能构建光子集成模型，但功能与精度受限，难以满足流片级要求，通常用作辅助工具以补齐部分缺失功能。

高效的光电协同仿真设计需要全新模型。综上，光电协同仿真设计当前的成熟度仍然较低，通常需要跨多个平台或在 EDA 平台使用电信号来等效光信号，存在复杂低效、功能受限等问题。真正高效的光电协同仿真设计需要全新的混合信号协同仿真模型，建立统一的模型规范来描述器件输入输出特性，形成开放的光电协同仿真标准，加强智能化端到端全流程仿真设计软件研发，推进光电协同设计向高复杂度和大规模方向发展，国内外相关研究探索正不断推进。

（四）先进集成封装技术是光电融合的重要基础

头部芯片制造平台持续推动以硅基光电子为基础的异质异构先进集成封装技术。硅基光电子与微电子 CMOS 工艺兼容，具备优异的集成能力，通过异质异构集成可与 SiN、III-V 族、薄膜铌酸锂、

钽酸锂、钛酸钡、聚合物等结合，融合各类材料的优势，以整体实现大带宽、低传输损耗和高发光效率，是光子集成和光电融合的重要实现平台。全球头部芯片制造平台在战略上向光电融合先进集成封装不断迈进。台积电公布了其 2026~2028 年逻辑技术路线图，将光子集成纳入其制程生态系统，2nm 节点将支持基于硅基光电子的紧凑型通用光引擎（COUPE）。COUPE 技术将电芯片直接集成到光芯片上，底部光芯片采用 65nm 等成熟节点，顶部电芯片可采用 7nm 及以下先进节点以增强处理能力；结合 3D Fabric 等先进封装技术，可在同一衬底/基板上合封处理芯片与存储系统等，创建高性能高集成计算平台。英特尔 2025 年发布了系列关于先进集成技术的研究成果，包括基于嵌入式多芯片互联桥技术实现了光芯片与电计算芯片的异构集成，实现了现场可编程门阵列与模数转换器以及 3D 光电芯片堆叠之间的互连，并结合光纤阵列的端面耦合技术验证了复杂异构集成的可行性。

八、信息光子技术发展与应用展望

（一）未来几年迭代加速并向多元化应用场景拓展

光连接将持续向高速率、大容量、低时延、低能耗方向演进。一是高速率、低能耗方面，传统与新型线性光模块并行发展，逐步由单通道 100Gb/s 向 200Gb/s 迈进；随着功率、密度、可扩展性、带宽和距离限制等问题的解决，交换/算存网络中的互连形式将从光模块或电接口逐步向芯片级光互连延伸，尤其当单通道速率达到

400Gb/s 及以上，集成带来的高密度、低能耗技术优势将更加凸显。**二是**大容量、低时延方面，未来 5~10 年将迈向 O、E、S、U 等更宽波段的频谱拓展，以干线采用 1.6Tb/s 速率为例，如沿用正交移相键控调制（QPSK）码型并维持 80 个波长通道，将需要高达 48THz 频谱资源；空分复用光纤和空芯光纤技术在传输损耗、拉制长度等方面持续进步，将在海缆、数据中心和智算中心等场景率先实现应用；全光交换将向 Pb/s 级交换容量、纳秒级切换速度、光层智能调度演进，未来 5 年波长选择开关（WSS）将向 64 维及以上、OCS 将实现 1000 端口演进升级。

光算存将持续向集成式、一体化路线发展。异质异构集成技术的进一步成熟，一方面能够大幅提高计算系统集成度，另一方面通过集成基于其他材料的电芯片/存储器等，可助力构建光计算存储互联一体化系统。展望未来，光算存技术需要在材料、结构、机理等多方面积极创新，沿着“先协处理、再超融合”的路径，与光互连、光量子计算、先进集成封装等技术深度耦合，最终形成光电融合、泛在部署的新一代算力基础设施。

光传感将持续向高精度、集成化、智能化、多场景拓展方向演进。一是感知性能进一步提升，随着超快激光、宽带光源、新型探测器件的应用，光传感在空间分辨率、时间分辨率和灵敏度等方面将不断突破。**二是**系统微型化与集成化趋势明显。光子集成、微纳光学和新型材料推动光传感由分立器件组合向芯片级集成转型，具有更高可靠性与成本优势，如光纤传感阵列、片上光学传感芯片将

逐步应用于工程和医疗场景。**三是**智能化与计算融合成为重要方向。计算成像、深度学习和人工智能加速与传感融合，推动从“获取物理信号”向“提取高阶信息”转变，如通过计算光学成像实现对复杂场景的超分辨重建和语义识别。**四是**应用场景多元化拓展，如在智慧交通领域，光传感支持自动驾驶和车路协同；在能源安全领域，光纤传感支撑油气管道、电力输送监测；在国防安全领域，光电成像和激光雷达用于目标探测与精确制导；在医疗健康领域，光传感辅助无创检测与精准诊疗等。

光显示将持续向性能提升、场景拓展方向发展。一是性能提升方面，显示技术将不断逼近视觉感知极限，分辨率迈向视网膜级甚至超视网膜级别；显示亮度向数百万尼特演进；广色域、高对比度、精准色彩管理以及动态刷新率技术将进一步增强沉浸感和视觉还原准确性。**二是**应用场景方面，显示载体从传统的手机、电视、显示器，不断向柔性可折叠设备、透明橱窗、车载玻璃、服装纤维，甚至建筑立面与可植入医疗设备等延伸，显示功能也将从信息呈现，演进为与空间、环境、用户深度融合的交互界面和数字孪生载体。

光电融合将在先进计算和人工智能领域重点发力。随着后摩尔时代集成电路体系面临持续微缩和带宽提升瓶颈，光电融合成为突破传统电子计算与通信架构瓶颈、支撑算力规模持续增长的重要路径。先进计算、人工智能将在相当长一段时间作为主要驱动力促进光电融合技术发展，并呈现层次化演进趋势。短期内，“电算光连”、

“电算光补”将逐步渗透先进算力、人工智能领域；中期内，设备、模块器件、芯片等各层级光电融合将深度协同，构建超高速、低功耗、智感知、可规模扩展的全新算力基础设施；长远来看，光电融合将形成专门化的产业基础和生态体系，赋能更多应用领域。

（二）技术和产业发展需要“政产学研用”协同推动

近年来，在市场拉动和政策支持下，我国信息光子产业蓬勃发展，整体实力显著提升，市场规模实现赶超，产业链条基本完整，企业方阵不断壮大，已形成一批具有国际竞争力的领军企业，产业集聚效应日趋明显，并在多个细分领域迈入国际领先行列。但是，仍然存在产品链条种类繁多、技术范式不断重构、产业生态面临调整等挑战，产业发展水平仍有较大提升空间，需结合国内外发展态势把握窗口期，推动多方要素形成合力，共同打造融合创新模式，实现技术产业的协同发展。**一是**加强战略研究与统筹规划，整体谋划系统布局我国信息光子科技攻关和产业发展，制定全面的发展规划、目标与路线图，持续强化锻造我国在信息光子传统和新兴领域的发展优势。**二是**提升创新能力与产业基础，加强基础研究与协同攻关能力，推动关键技术突破、夯实共性基础支撑、加速创新成果转化，从而提升国际竞争力。**三是**深化生态建设与应用牵引，推动信息光子在各行业的广泛应用，持续通过场景打造实现信息光子对千行百业的深度赋能，为经济发展方式转变、国家信息安全保障、综合国力提升增强奠定坚实基础。

中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62305024

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn