

信息光子技术发展与应用 研究报告 (2024 年)

中国信息通信研究院

2024年12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。

更名声明

原“集智”白皮书更名为“集智”蓝皮书。“集智”蓝皮书将继续秉承原有的编撰理念和高质量标准，致力于提供有价值的信息和洞见。



前 言

在信息技术领域，光子是与电子并驾齐驱的基础性支撑技术，具有广泛应用潜力，在未来网络、高性能计算、智能感知、新型显示等领域前景广阔，有望成为新质生产力的强劲引擎，对改造升级传统产业、培育壮大新兴产业、前瞻布局未来产业具有重要意义。同时，在微电子集成电路发展趋势放缓背景下，光子技术不追求工艺尺寸的极限缩小，有望通过光电融合等新方式开辟“后摩尔时代”新赛道。

经过五十余年发展，信息光子已涵盖光采集、光连接(含光通信、光互连等)、光算存(含光计算、光存储等)、光呈现(含光显示、光成像等)等分支方向，整体处于科技攻关与工程研发、应用探索与场景拓展、生态培育与产业壮大协同推进的多样化发展阶段。其中，光采集、光通信、光存储、光呈现等传统方向已规模部署，在光子材料与基础工艺的持续创新支持下，不断向更高性能、更多场景应用等下一代路径发展演进。同时，芯片级光互连、光计算、新型存储等新兴方向不断涌现，构建光电混合计算、计算与互连、存内计算、通感一体、感算融合等诸多新范式，在信息化全域的重要性更加凸显。

我国及美、欧、日、韩等全球主要经济体均高度重视光子能力构建，围绕光子技术产业发展进行了系列部署，争夺“制高点”的国际竞争日益激烈。本报告对信息光子的总体发展态势、细分领域及共性基础环节的最新研究应用进展、行业热点趋势问题等开展研究分析，希望为推动我国信息光子技术产业高质量发展做出贡献。

目 录

一、信息光子技术总体发展态势.....	1
(一) 信息光子是光子学与信息科学交叉领域.....	1
(二) 全球主要经济体高度重视光子能力构建.....	3
(三) 市场规模稳定增长，发展阶段各有差异.....	6
二、光连接领域研究与应用进展.....	7
(一) 高速率是光连接领域最核心的发展诉求.....	7
(二) 多样化技术方案助力传输交换容量提升.....	12
(三) 产业规模持续增长，应用场景不断泛化.....	14
(四) 片间和片上芯片级光互连成为研究热点.....	17
(五) 未来十年功能性能与应用范畴日益拓展.....	23
三、光算存领域研究与应用进展.....	24
(一) 光电混合架构占据主流，算法不断优化.....	24
(二) 应用需找准定位，实用领域将不断扩展.....	29
(三) 产业生态尚不成熟，布局重点出现转移.....	31
(四) 存储性能不断提升，距离实用道阻且长.....	33
(五) 未来将向集成、融合、泛在等趋势演进.....	36
四、光采集领域研究与应用进展.....	38
(一) 光采集技术向集成化与分布式双向演进.....	38
(二) 车载激光雷达路径多元化集成趋势明显.....	40
(三) 生物医疗光传感前沿方向正在广泛探索.....	42
(四) 分布式光纤传感是长距场景的理想方案.....	43
(五) 未来十年关键指标与成熟程度不断提升.....	46
五、光呈现领域研究与应用进展.....	47
(一) 新型显示领域多条技术路线并行发展.....	47
(二) 数字时代新型显示应用场景不断拓展.....	50
(三) 新型显示市场空间广阔我国保持领先.....	51
(四) 成像技术从多维度突破人类视觉极限.....	53

(五) 未来五到十年 LCD 和 OLED 仍为主线.....	55
六、跨领域交叉融合研究与应用进展.....	56
(一) 计算+连接+存储新范式推动算力扩展.....	56
(二) 通感一体化光网络协同架构正在构建.....	58
(三) 感算融合全光智能技术研究正在开展.....	60
七、材料工艺共性基础研究与产业进展.....	61
(一) 光子材料多体系并存且处于不同成熟阶段.....	61
(二) 光子集成正处于转向规模发展的关键节点.....	64
(三) 集成制造和先进封装是光子集成布局重点.....	65
(四) 垂直整合、细化分工等多种制造模式并存.....	75
(五) 各材料体系与异质异构集成工艺同步演进.....	76
八、光电融合研究进展与产业影响.....	78
(一) 光子与电子技术呈现协同互补融合关系.....	78
(二) 光电融合包含功能协同和硬件一体维度.....	80
(三) 后摩尔时代重要选项深远影响产业格局.....	83
九、信息光子技术与应用前景展望.....	85
(一) 细分领域发展迅速应用场景进一步拓展.....	85
(二) 技术产业发展需要政产学研用协同推动.....	88

图 目 录

图 1 信息光子涵盖范畴.....	1
图 2 信息光子泛化为信息技术全域的硬件基础技术.....	2
图 3 信息光子赋能各类业务及应用、价值链不断延伸.....	2
图 4 全球光子产业市场规模.....	6
图 5 信息光子发展阶段与成熟度.....	7
图 6 光连接高速率发展趋势.....	8
图 7 多技术助力传输容量和交换容量提升.....	12
图 8 新型光纤需要光电芯片器件配套使用.....	13
图 9 光连接应用场景不断扩展.....	15
图 10 片间光互连典型应用场景.....	17
图 11 光连接未来五至十年发展趋势.....	23
图 12 光计算技术体系框架.....	25
图 13 基于光电混合架构的光计算系统.....	25
图 14 光计算产业链.....	31
图 15 光存储技术体系框架.....	33
图 16 光存储与电存储对比.....	34
图 17 易失性和非易失性光存储器的性能对比.....	35
图 18 光算存未来五至十年发展趋势.....	37
图 19 车载激光雷达的原理和系统结构分类.....	40
图 20 光采集未来五至十年发展趋势.....	46
图 21 全球显示市场规模.....	52
图 22 光呈现未来五至十年发展趋势.....	56
图 23 光子材料分类与典型应用领域示例.....	62
图 24 光子材料处于不同成熟阶段.....	63
图 25 主流材料体系的集成度.....	64
图 26 重点光子集成制造与先进封装工艺.....	66
图 27 异构/混合集成技术路线比较及演进趋势.....	73

图 28 巨量转移与微转印技术示意.....	75
图 29 不同光子材料平台的典型制造模式.....	76
图 30 基础工艺未来五至十年发展趋势.....	78
图 31 光电融合带来范式转变.....	79
图 32 功能维度光电融合.....	81
图 34 光电融合发展阶段.....	85
图 35 信息光子各细分领域呈现交叉融合趋势.....	88

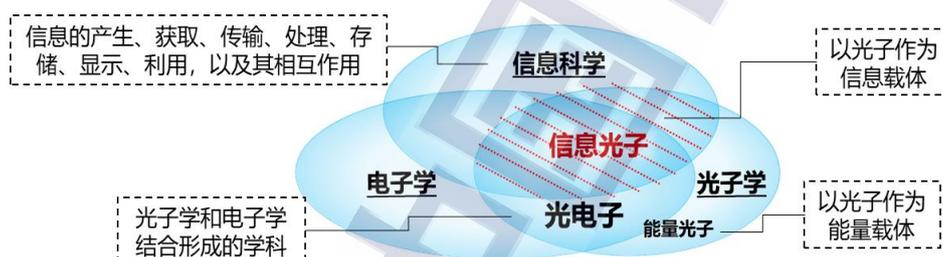
表 目 录

表 1 直调直检光模块主流技术方案.....	10
表 2 光计算与电计算、量子计算对比.....	28
表 3 光计算企业及产品情况.....	32
表 4 光采集技术分类与比较.....	39
表 5 分布式光纤传感技术比较.....	45
表 6 主流新型显示技术路线对比.....	47
表 7 国内外通感一体化光网络标准及研究进展.....	59
表 8 光子集成与集成电路技术比较.....	65
表 9 不同靶材在光显示中的典型应用.....	70
表 10 硅基微显示技术对比.....	71
表 11 光子与电子物理特性比较.....	79

一、信息光子技术总体发展态势

（一）信息光子是光子学与信息科学交叉领域

上世纪 70 年代，荷兰科学家首次提出“Photonics”概念，并将其定义为研究“以光子作为信息载体”和“以光子作为能量载体”的科学；我国在 1994 年香山会议上明确了“光子学”定义，是研究作为信息和能量载体的光子行为及其应用的科学。综上，“信息光子”是光子学中信息相关部分，是光子学与信息科学的交叉领域，将光子作为载体，通过操控光子实现信息的获取、传递、处理和呈现。

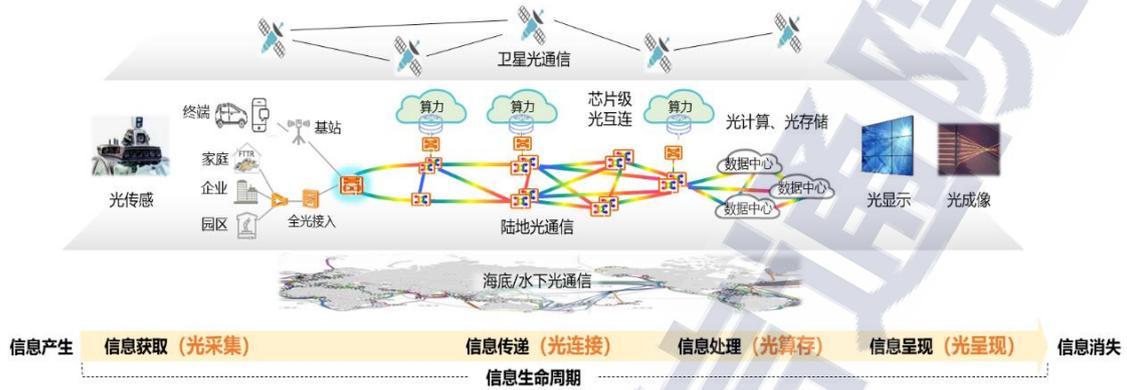


来源：中国信息通信研究院

图 1 信息光子涵盖范畴

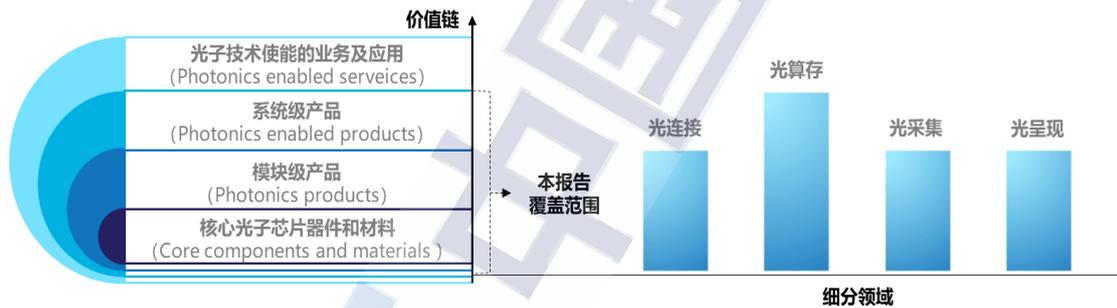
横向包含四个细分领域。信息光子贯穿信息生命周期全过程，已泛化为信息技术全域的硬件基础技术，包括光采集、光连接、光算存和光呈现四大分支，是信息基础设施和感知基础设施的重要构成部分。**光采集**包含光传感、光探测等，采用光作为信息及参量的载体进行感知与探测。**光连接**包含光通信、光互连等，采用光信号进行信息的传输。**光算存**包含光计算、光存储等，其中光计算是利用光的物理特性将信息映射至光域进行处理或数据运算的新型计算方式；光存储通过

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。
光呈现包含光显示、光成像等，采用光信号进行信息的显示与成像。



来源：中国信息通信研究院

图 2 信息光子泛化为信息技术全域的硬件基础技术



来源：Photonics21¹, SPIE², 中国信息通信研究院

图 3 信息光子赋能各类业务及应用、价值链不断延伸

纵向价值链向四个层次延伸。光连接、光算存、光采集和光呈现四大分支领域均包含核心光子芯片器件和材料、模块级产品、系统级产品，并进一步赋能上层各类业务及应用，价值链不断延伸。由于篇

¹ Photonics21 – European Technology Platform, Insights into the dynamic photonics market (2019–2022)

European prowess, emerging trends, and the path towards global photonics advancements, Photonics Industry and Market Data Report 2024, 2024.

² SPIE, Optics&Photonics Industry Report, 2022.

幅有限，本报告对光连接、光采集、光呈现、光存储的研究分析重点聚焦于核心光子芯片器件和材料、模块级产品层面；光计算为新兴发展方向，也是未来产业重点布局方向之一，为全面阐述其最新进展与发展态势，研究分析进一步扩展至系统级产品。

（二）全球主要经济体高度重视光子能力构建

我国及美国、欧洲、日本、韩国等均围绕包含信息光子在内的光学与光子技术产业发展进行了系统部署，包括出台战略政策、制定发展规划、实施国家专项推动技术研发与平台建设、培育产业生态等。

1. 美国

国家战略层面，1991 年成立光电子产业发展协会，旨在提升全球光电子市场竞争力；1998 年国防部将光子学列为美国 20 项关键技术之一；2013 年国家研究委员会发布“光学和光子学：对本国至关重要的技术”报告，将光学和光子技术视为战略性底层支撑技术。**技术研发、平台建设和生态培育层面**，2014 年成立“国家光子计划”产业联盟，支持基础研究与早期应用研究计划开发；2015 年成立集成光子制造研究所（AIM Photonics），聚集包含 IBM、英特尔、思科、Global Foundries、Synopsys、Cadence、麻省理工、斯坦福等在内的产业链各方、学术界和行业协会等百余家机构，共同推进产业链建设与光子集成工艺发展，面向原型制造和试产，AIM 目前已具备磷化铟、硅基光电子全套制造封装能力；2021 年成立“国家光学与光子学”核心小组，

提高技术人员数量、提升基础创新与制造能力。**巨头企业层面**，由谷歌、英特尔、思科、英伟达等行业巨头主导，在芯片级光互连、光电融合等新兴方向自驱式发展，以期在新一代技术中持续引领。

2. 欧盟

国家战略层面，2007 年“FP7”和 2013 年“地平线 2020”科技框架计划均将光子技术作为重点投资领域；2019 年欧洲国家电子元件和系统领导地位联合执行体年度战略计划将多项光子技术作为重点研究方向；2020 年发布《欧洲新工业战略》，支持发展包含光子技术在内的对欧洲未来工业有重要战略意义的关键使能技术。**技术研发、平台建设和生态培育层面**，通过项目协调机制“自上而下”推动产业链与生态系统构建，力争在集成制造领域占据主导地位。具体来看，2015 年启动制造光子库和技术项目，打造硅基光电子产业链；2016 年启动 JePPIX、PIX4Life、PI-SCALE、MIRPHAB 等项目，开展磷化铟（InP）和氮化硅（SiN）光子集成、柔性有机发光二极管（OLED）、中红外图像传感平台建设与技术研究；2017 年启动 PIXAPP 项目，建设光子集成封装平台；2018 年启动 OIP4NWE 项目，研究通过制造设备创新降低生产缺陷率和不稳定性，从而缩短生产周期；2021 年启动 INSPIRE 项目提升微转印技术成熟度；2023 年启动 Photonix FAB 项目布局硅基光电子和异质集成技术，为规模制造确立清晰路径。

3. 日本

日本起步较早，通过**产业联盟、国家项目、长期规划**等方式，重点布局上游元器件与材料、仪器装备等产业基础环节和光电融合等新兴方向。具体来看，从十九世纪末即开始布局光子产业，研究光学涂层、精密光学组件等光学器件；1980 年成立光产业技术振兴协会（OITDA）；2010 年实施光子融合系统基础技术开发计划（PECST），作为日本内阁府支持的尖端研究开发资助计划之一，其目标为实现“片上服务器”和“片上数据中心”；2019 年启动“登月型”研发项目，提出面向 2050 年的研发目标；2020 年电信巨头 NTT 等公司组建创新光学与无线网络联盟（IOWN），2024 年日本政府计划为其“光电融合”技术下一代半导体开发项目提供补贴。

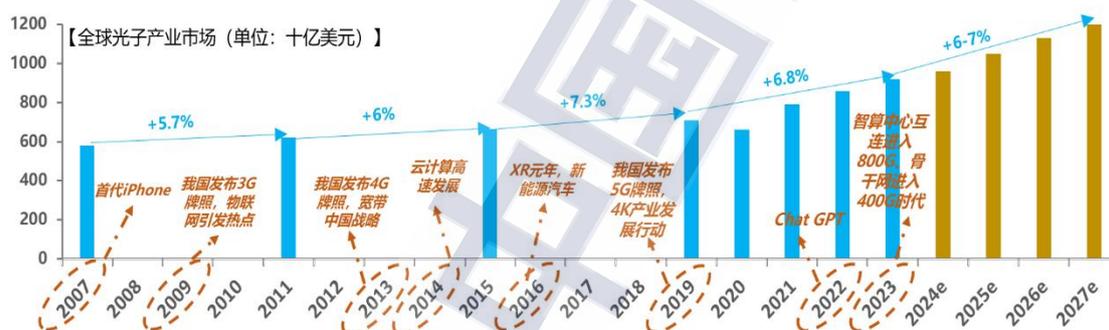
4. 韩国

韩国大力布局光显示技术产业，发展速度和规模扩张较快，并通过政策引导推动“光融合”技术发展。具体来看，2019 年制定“光融合技术综合发展计划”，部署光通信、显示、精密光学仪器、能源照明、激光加工、生物医疗、安全防卫、光学测量、光学原材料与零部件、下一代光子技术等重点方向；2010 年发布“国家光技术路线图”；2023 年发布“未来显示器研究开发推进战略”和“显示产业创新战略”，开发沉浸感、新一代自由形态、融合显示、复合显示、OLED 等优势技术，并提出 2027 年反超中国的总体目标；2024 年发布“显示产业重点支撑项目清单”，推动环保变色量子点材料和图案化工艺、高效长寿命 OLED 蓝色磷光发光材料与器件、红绿蓝（RGB）OLED

发光材料与精确干法蚀刻工艺等开展研发。

（三）市场规模稳定增长，发展阶段各有差异

全球光子技术市场规模超九千亿美元。根据 Photonics21 等数据测算，2023 年全球光子市场规模（包含信息及能量，核心芯片器件及材料、模块级、系统级产品等）约 9200 亿美元，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，光采集和光呈现市场约数千亿美元。未来几年人工智能（AI）将拉动产业的持续增长，2027 年市场规模预计可达 12000 亿美元。



来源：Photonics21³，中国信息通信研究院

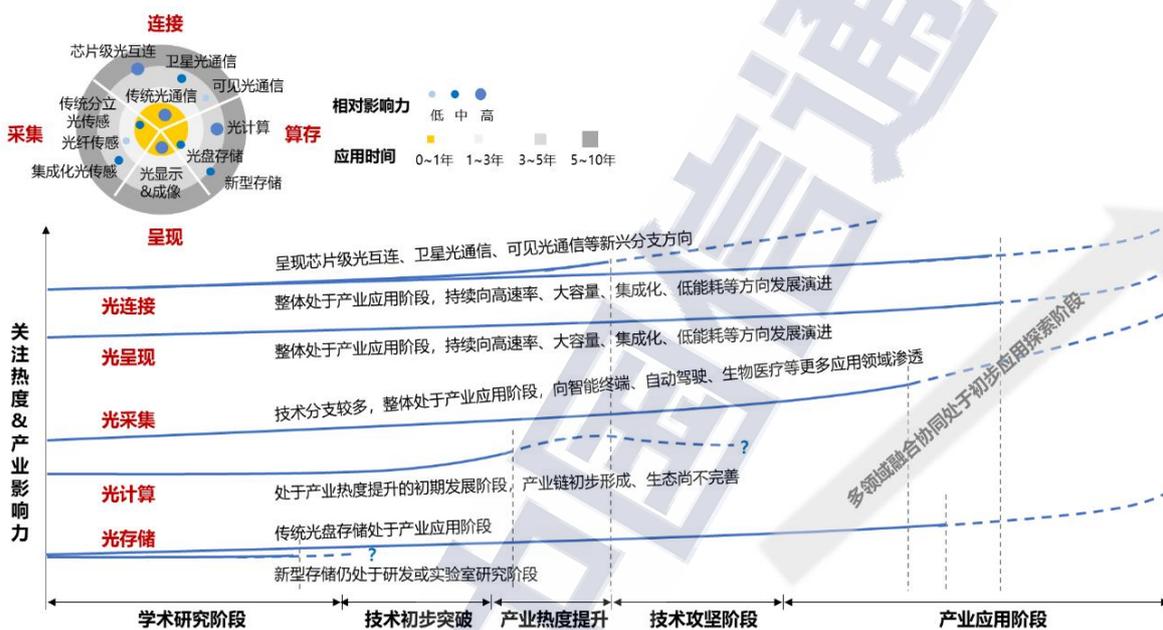
图 4 全球光子产业市场规模

信息光子各细分领域处于不同发展阶段。一是传统方向持续演进，光通信、光采集、光呈现、光存储等领域已实现规模应用，并持续向更高性能、更多场景应用等下一代方向发展演进，在拉动有效投资、促进信息消费、赋能千行百业方面作用凸显。二是新兴方向创新活跃，

³ Photonics21 – European Technology Platform, Insights into the dynamic photonics market (2019–2022)

European prowess, emerging trends, and the path towards global photonics advancements, Photonics Industry and Market Data Report 2024, 2024.

光计算、芯片级光互连、新型存储等新兴方向不断涌现，构建新范式、开辟新赛道。三是细分领域交叉融合，如“计算+互连”融合、“存内计算”、“通感一体”、“感算融合”等正处于前沿研究、产品研发或应用探索初期发展阶段。



来源：中国信息通信研究院

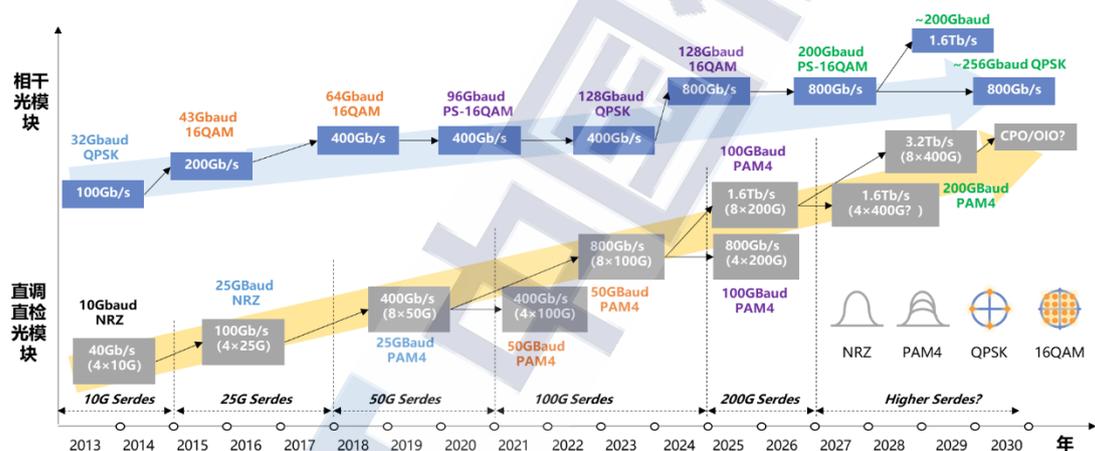
图 5 信息光子发展阶段与成熟度

二、光连接领域研究与应用进展

（一）高速率是光连接领域最核心的发展诉求

速率迭代周期缩短，数据/智算中心应用主导驱动芯片需求。近年来人工智能快速发展，以 ChatGPT 为代表的大模型开发和应用取得巨大进展。大模型训练推理需高性能计算支撑，单一计算设备已无法满足持续增长的算力需求，分布式架构通过多个节点并行训练，不同节点之间需频繁同步模型参数，对光连接性能提出大带宽、低时延、

无丢包等更高挑战。同时，数据/智算中心内部网络架构趋向扁平化，连接密度及交换容量大幅增长。在数据流量激增和网络架构演进双重驱动下，光连接技术持续向高速率、大容量、高可靠、低能耗、低时延、智能化等方向发展演进，其中高速率是最核心发展诉求。高速率早期由城域和干线电信网络引领驱动，但迭代速度较慢，约 10 年更新一代；当前，数据/智算中心互联已成为最主要应用场景，市场规模约为电信网络的 1.5~2 倍，早期为 3~4 年更新一代，AI 影响下迭代周期将进一步缩短。



来源：中国信息通信研究院

图 6 光连接高速率发展趋势

直调直检光模块采用非归零（NRZ）或四电平脉冲幅度调制（PAM4）码型，通常应用于数十公里及以内的中短距离，典型场景包括数据/智算中心内部的服务器与交换机之间，以及电信网络的客户侧连接。当前，数据中心交换容量正由 51.2Tb/s 向 102.4Tb/s 过渡，400Gb/s 光模块已实现规模部署，逐步向 800Gb/s 演进；智算中心先

进智算芯片和服务器容量提升，驱动 800Gb/s 光模块成为主流，并向 1.6Tb/s 及更高速率迈进。在技术方案方面，**基于单通道 100Gb/s 的 800Gb/s 光模块基本成熟**，800G VR8（30m/50m）、SR8（100m）、DR8（500m）、DR8+（2km）、2×FR4（2km）、2×LR4（10km）等规格均已实现量产，优先实现对 400Gb/s 光模块的平滑替代。其中，800G VR8、SR8 以多模砷化镓（GaAs）VCSEL 方案为主；800G DR8、800G DR8-2 以 InP 外调制激光器（EML）方案为主，硅基光电子方案采用共享光源，功耗优于 InP EML 方案，但耦合工艺相对复杂；800G 2×FR4/LR4 方案可充分复用 400G FR4/LR4 产业链，成熟度较高，采用数字信号处理（DSP）芯片集成模拟驱动可进一步降低功耗。**基于单通道 200Gb/s 的 800Gb/s、1.6Tb/s 光模块加速研发**，相比基于单通道 100Gb/s 的 8×100Gb/s 方案，由于通道数量减半，成本和功耗更具优势，未来将成为 800Gb/s 光模块主流方案。其中，800G VR4/SR4 规格 GaAs VCSEL 方案具有低功耗优势，传输距离和可靠性正在优化和论证中，预计 2025~2026 年可初步实现商用；800G DR4/DR4+/FR4/LR4 规格即将量产，FR4-500 规格已在 IEEE802.3 完成标准立项。1.6T DR8/DR8+ 同样基于单通道 200Gb/s，国内外主流光模块厂商即将实现量产；美国光模块头部厂商 Coherent 计划推动波长间隔为 10nm 的 1.6T FR8 样品；1.6T LR8 规格由于受色散、四波混频等影响，技术方案尚未收敛。

表 1 直调直检光模块主流技术方案

模块类型		传输距离	速率	主流技术方案	状态
8× 100G	800G VR8	30m/50m	53.125GB PAM4	VCSEL	量产
	800G SR8	60m/100m		VCSEL	量产
	800G DR8	500m		EML+PIN、硅光	量产
	800G DR8+	2km		EML+PIN	量产
	800G 2×FR4	2km		EML+PIN	量产
	800G 2×LR4	10km		EML+PIN	量产
4× 200G	800G VR4/SR4	TBD	106.25GB PAM4	VCSEL	论证中
	800G DR4	500m		直驱 EML	样品，即将量产
	800G FR4-500	500m		直驱 CWDM EML	标准已立项
	800G DR4+	2km	113.4375G B PAM4	直驱 EML+PIN	样品，即将量产
	800G FR4	2km		直驱 CWDM, EML+PIN	样品，即将量产
	800G LR4	10km		直驱 LWDM, EML+PIN	样品，即将量产
8× 200G	1.6T VR8/SR8	≤100m	106.25GB	VCSEL	论证中
	1.6T DR8	500m	PAM4	直驱 EML+PIN	样品，即将量产
	1.6T DR8+	2km	113.4375G B PAM4	直驱 EML+PIN	样品，即将量产
	1.6T 2×FR4	2km		直驱 CWDM, EML+PIN	样品，即将量产
	1.6T FR8	2km		直驱 CWDM-10, EML+PIN	样品， 量产时间待定
	1.6T LR8	10km		EML	论证中

来源：中国信息通信研究院

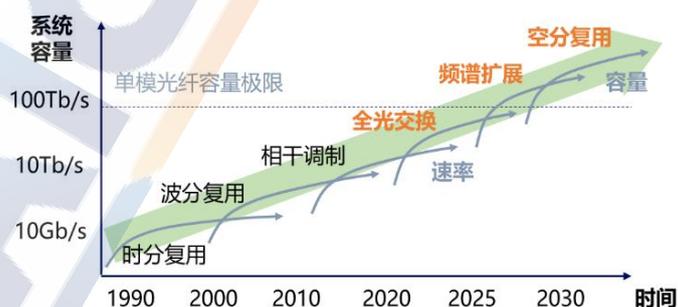
相干光模块采用正交相移键控(QPSK)或正交振幅调制(QAM)码型，通常应用于数十公里及以上较长传输距离，典型场景包括干线网络、城域网络和数据/智算中心之间互联等。在干线和城域网络中，100Gb/s QPSK 仍是当前广泛应用的主流速率，2024 年是国内 400Gb/s QPSK/16QAM 开启规模部署的元年，下一代 800Gb/s 和 1.6Tb/s 则成为业界标准推动和产品研发的热点。当前，800Gb/s 相

干光模块已包含两代产品，第一代基于 100GBd 64QAM，主要面向数据中心之间（DCI）中短距应用；第二代基于 140GBd 16QAM，可与 400Gb/s 超长距共产业链，为业界技术研究和产品研发重点，主要面向 DCI 互联和城域网络。1.6Tb/s 相干光模块整体处于预研阶段，领先厂商如美国 Ciena 已发布产品，主流方案包括基于 200GBd 32/64QAM 结合概率星座整形、基于 240GBd 16QAM 等，面向 DCI 互联和城域网络。根据市场需求及技术成熟度，1.2Tb/s 相干光模块或将作为过渡型产品优先于 1.6Tb/s 实现商用，第一代产品基于 140GBd 64QAM 码型，与 800Gb/s 共产业链，传输距离数十公里；未来基于 200GBd、240GBd 相干 DSP，可由 1.6Tb/s 向下兼容至 1.2Tb/s 速率，实现更远传输距离，应用场景向城域网络扩展。

基础光电芯片角度，无论直调直检或相干光模块，其接口速率均远超前于光电芯片器件本身的波特率，通常采用多通道复用和高阶调制方式提升速率。例如，基于 50/60GBd 量级的光电芯片平台可支持单通道 50Gb/s NRZ、100Gb/s PAM4、400Gb/s DP-16QAM，四通道 400Gb/s PAM4，八通道 800Gb/s PAM4，为当前应用主流。通道数量决定光模块的尺寸、功耗和成本，业界将始终瞄准最少通道的技术方向，已开始向 100GBd 及以上光电芯片平台演进升级。除新型编码调制技术和先进信号处理算法的进步外，光电芯片的波特率主要取决于材料带宽特性，III-V 族、硅基光电子、薄膜铌酸锂等竞相发展，光子集成、先进封装技术快速演进，均为带宽提升提供有力支撑。

（二）多样化技术方案助力传输交换容量提升

频谱扩展是短期内提升系统容量的有效方式，需底层材料协同创新。在干线和城域网络中，随着单通道速率由 100Gb/s 提升至 400Gb/s，频谱宽度相应扩展，相当于高速公路单车道宽度增加、车道数量相应减少。为实现 400Gb/s 速率 80 通道配置要求，系统频谱需从传统 C 波段（6THz）扩展至 C+L 波段（12THz），即加宽高速公路，以实现系统容量（单通道速率×通道数量）的有效提升。多波段一体化光电芯片器件是近期推进重点，要求各类光电芯片器件在不同波段范围内具备优异性能，需要底层芯片及材料技术、系统级自动均衡技术等协同创新。例如，C+L 波段一体化需新型铟铋共掺光纤放大器，S 波段需新型掺铥光纤放大器；激光器、调制器和探测器方面，InP 材料适合单波段，硅基光电子波段扩展能力较强、但带宽提升空间有限，薄膜铌酸锂兼具高带宽和波段扩展优势。未来，预计频谱将进一步向 E、S、U 等波段扩展，实验室研究中 E+S+C+L 多波段系统单纤容量已达 301Tb/s，传输距离 150km，但成熟商用仍有诸多难点需要克服。



来源：中国信息通信研究院

图 7 多技术助力传输和交换容量提升

以空分复用和空芯光纤为代表的新型光纤成为单纤容量倍增的可行路径。空分复用光纤方面，2023年中国信息通信科技集团利用19芯单模多芯光纤实现总传输容量4.1Pb/s光传输系统。同年，日本情报通信研究机构在欧洲光通信会议上报道了基于38芯3模的空分复用光纤，可实现22.9Pb/s光传输系统⁴。空芯光纤方面，具备超宽频段（>1000nm）、超低时延（由5us/km下降至3.46us/km）、低非线性（降低3~4个数量级）、低损耗等诸多优势，具有重塑产业范式的巨大潜力。2024年微软与南安普顿大学联合宣布已实现双层嵌套管结构空芯光纤的损耗低于0.11dB/km，突破0.14dB/km传统光纤损耗极限⁵。新型光纤的实际应用还需要配套光电芯片器件，业界正在开展相关产品研发与标准推动，仍有部分关键问题尚未解决。



来源：中国信息通信研究院

图 8 新型光纤需要光电芯片器件配套使用

波长选择开关、阵列光开关等全光交换技术以大颗粒交换提升系

⁴ <https://www.nict.go.jp/en/press/2023/11/30-1.html>

⁵ Y, Chen, et al., Hollow Core DNANF Optical Fiber with <0.11 dB/km Loss[C], OFC, 2024, Th4A.8.

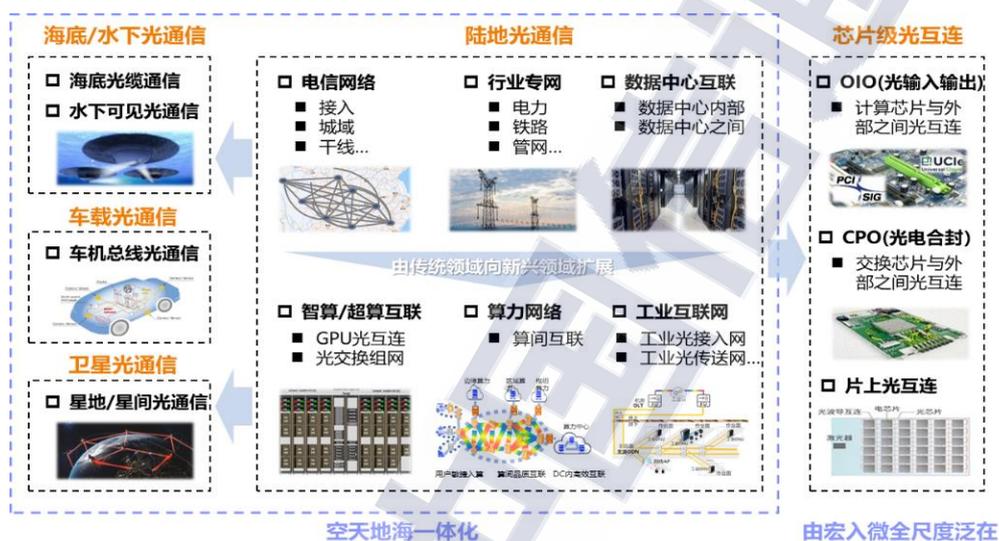
统容量。波长选择开关（WSS）核心器件为硅基液晶（LCOS），通过像素控制实现波长选路，目前32维已成熟商用，逐步向48维、64维、80维和120维，以及多波段一体化路径演进。**阵列光开关（OCS）**包含MEMS、LCOS、硅基光电子三类方案，MEMS方案的矩阵规模更大、插入损耗更低，但重构时间较长；硅基光电子方案的重构时间最短，但在矩阵规模和插入损耗方面有待优化。谷歌智算中心已规模部署136×136端口阵列光开关，以解决集群灵活配置、扩容等迫切需求，减少电光转换带来的时延和功耗；英伟达也正在开展相关试验。

（三）产业规模持续增长，应用场景不断泛化

全球光器件市场规模将显著增长，我国企业与美国平分秋色。根据 Omdia 数据，2023 年全球光连接用光器件（包含光模块及芯片）市场规模约 124.07 亿美元，在数据/智算中心互联等需求驱动下，2024 年市场规模将显著增长。从区域分布来看，增长动力主要来源于北美，谷歌、英伟达在人工智能集群中已规模部署 800Gb/s 光模块、即将迈入 1.6Tb/s 时代；亚马逊、Meta 即将部署 800Gb/s 光模块。我国已开始 400Gb/s 光模块批量部署，800Gb/s 应用尚处探索阶段。在全球光模块器件企业市场份额方面，我国企业与美国平分秋色，多家企业位列全球 TOP10。

光连接由传统长距传输技术泛化为 ICT 全尺度连接技术。陆地光通信由电信网络、行业专网和数据中心互联等传统领域向智算/超算互联、算间互联、工业互联网等领域拓展，并进一步由陆地向空间、

水下、车内、以及芯片级等范围延伸，助力构建空天地海一体化协同网络，应用领域和连接范围不断扩展。在空间，激光通信可为星-星、星-地之间提供高指向性、高带宽连接手段；在水下，可见光通信将成为继声波、射频之后的又一重要水下连接技术；在车内，车载光总线将成为车辆电子化、智能化连接技术极具竞争力的选择。



来源：中国信息通信研究院

图 9 光连接应用场景不断扩展

卫星光通信是卫星星座间和星地间互联的必然选择。卫星光通信技术正处于起步并加速发展阶段，当前主要应用于卫星互联网星座的星间链路构建，并将进一步向星地链路拓展，应用于卫星遥感数据回传等场景。美大型互联网星座研究和产业化进展领先，以星链为代表的卫星互联网项目规模不断扩大，目前已实现 100Gb/s 星间链路商用，并持续向更高速相干方案演进。受卫星间距离远和激光束散角小等限制，激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，是待解决的核心技术难点之一。此外，为降低星座发射与建设成本、提升稳定性，要求激光通信终端及内部各类芯片器件具备较强的集成化小型设计与高可靠空间适应性。

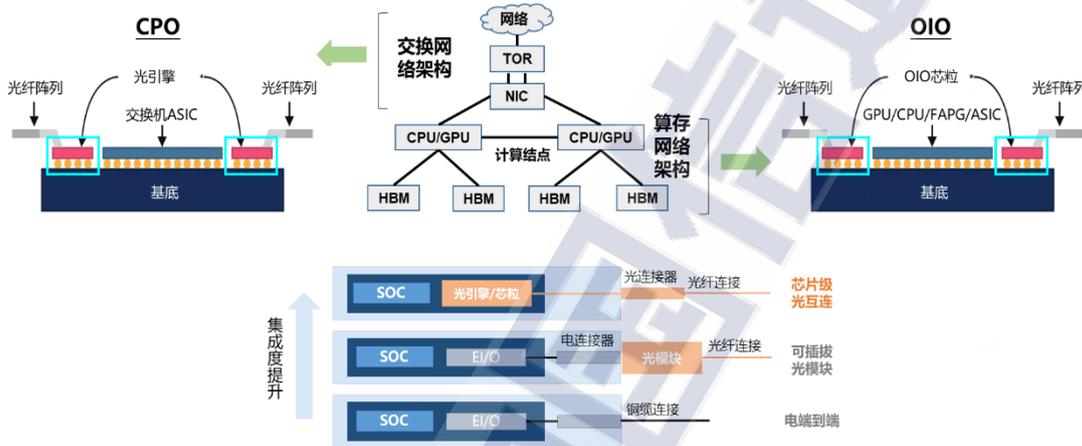
可见光通信技术取得多项进展，水下可见光通信成新热点。传统的可见光通信基于375~780nm波段范围，兼具照明、通信和控制定位等功能，易与现有基础照明设施相融合，具有不受无线电干扰、无电磁辐射、高度保密性等优势，应用于无法使用传统无线通信的场景。业界通过采用氮化镓（GaN）等新型材料研制的大带宽窄脊短腔激光器，已能够将高速可见光光源带宽从1GHz提升到5.9GHz，单一芯片支持通信速率超过20Gb/s。此外，水下可见光通信成为热点，采用450~550nm蓝绿光作为通信载体，目前实验系统最高传输速率达15Gb/s，可应用于海底资源探索、海洋环境监测等领域。

自动驾驶时代车机通信为车载光通信提供发展契机。车载通信正从分布式架构转向基于中央计算的集中式架构，对车机总线提出三方面需求：一是由于引入大量传感器、AI处理器，带宽需求达到10Gb/s级别、传输时延及确定性需求达到 μs 量级；二是车辆向新能源、智能化、自动驾驶方向演进过程中需要车机总线尽可能降低重量，满足集成化、可靠性要求；三是电子组件的增加需考虑电磁干扰影响，避免其干扰车内电子控制单元，以上需求对车载光通信发展带来契机。目前，车载光通信存在基于IEEE 802.3cz的光纤以太网和基于无源光网

络（PON）技术的全光网两种方案，后者传输效率更高，但车规级光模块器件规范化问题有待解决，耐高温、高响应度、高速率的车规级激光器、探测器、跨阻放大器等光电芯片器件供应链亦需构建。

（四）片间和片上芯片级光互连成为研究热点

1. 片间光互连



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 10 片间光互连典型应用场景

片间光互连以光电合封（CPO）和光输入输出（OIO）为研究热点。芯片级光互连成为信息技术发展的重要方向，与电布线相比，光连接功耗更低，尤其在高频（ $>10\text{GHz}$ ）和长距情况下优势更加明显。交换网络场景中的片间光互连聚焦 CPO 技术，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，以期对可插拔光模块的替代。算存网络场景中的片间光互连聚焦 OIO 技术，将光芯片与计算/存储芯片封装在一起，与外部其他芯片之间形成连接，是新型通用输入/输出（I/O）解决方案，以期对传统电 I/O 的替代。CPO 和 OIO

分别从实现方式和功能角度提出概念，当前均以异构集成方式为主，均可实现集成度、带宽密度的提升，以及比特能耗下降。

CPO 低能耗特性助力数据中心绿色升级。传统技术采用可插拔光模块实现交换机之间高带宽数据传输，交换机面板端口密度是限制带宽提升的重要因素之一；同时，当信道速率达到 112Gb/s 及以上时，交换芯片与可插拔光模块之间较长的信号传输距离导致功耗和延迟增加。CPO 技术可提供高带宽、高能效和低延迟解决方案，根据博通数据，CPO 系统功耗相较可插拔光模块可降低 50% 以上；有仿真表明全对全通信模式下，CPO 系统通信完成时间最多可减少 40%。

硅基光电子集成方案成为 CPO 主流路线。从光芯片器件硬件角度，CPO 包含 VCSEL 阵列和硅基光电子集成两种方案。其中，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。VCSEL 阵列方案在短距信号互连场景中成本与功耗优势较为明显，基于该方案 IBM 在 2023 年实现了基于 56Gb/s NRZ 信号的 16 通道 CPO，发射端功耗为 2.7pJ/bit，接收端理论仿真值为 1.5pJ/bit，系统整体功耗 4.2pJ/bit⁶；英特尔于 2024 年发布了基于 64Gb/s NRZ 信号的 4 通道 CPO 发射机样机，整体链路功耗为 1.3pJ/bit⁷。

⁶ Kuchta D M. Developments of VCSEL-based transceivers for Co-Packaging[C]//Optical Fiber Communication Conference. Optica Publishing Group, 2023: M4E. 6.

⁷ Mondal S, et al. 18.2 A 4x64Gb/s NRZ 1.3 pJ/b Co-Packaged and Fiber-Terminated 4-Ch VCSEL-Based Optical Transmitter[C]//2024 IEEE International Solid-State Circuits Conference . IEEE, 2024, 67: 340-342.

CPO 产业链由交换机巨头牵引。CPO 由于与交换机强绑定，技术实现需全面的硬件平台和工艺设计能力，从可插拔光模块到 CPO 的转换对企业研发实力提出较高要求。当前，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，思科、博通等交换机巨头具有较强话语权。产品研发方面，2020 年以来 CPO 样机相继发布、容量不断提升，当前聚焦于 51.2 Tb/s 交换机，例如博通在 2024 年展示了 51.2Tb/s CPO 交换机及 6.4Tb/s FR4 光引擎。CPO 大量商用时间节点预计在未来 3~5 年，根据 Yole 预测，CPO 全球市场规模到 2033 年将增长至 2.87 亿美元⁸。

CPO 国内外标准体系初步建立。标准化进展与技术产业发展程度密切相关。国际方面，光互连论坛（OIF）、板载光学联盟（COBO）、联合开发基金会（JDF）、国际光电委员会（IPEC）等国际组织针对 CPO 进行了系列部署。国内方面，中国计算机互连技术联盟 2023 年发布团体标准《半导体集成电路光互连接口技术要求》，中国通信标准化协会已立项行业标准《光电合封用外置光源模块》。整体来看，当前 CPO 框架、外置光源、接口、测试规范等关键标准已发布或在研，标准体系初步建立。

OIO 成为算存架构中的重要互连方案。高性能计算工作负载不断推动现有系统架构极限，随着规模持续扩大，计算芯片之间需建立更高带宽密度的连接。针对高性能计算系统，业界认为未来 4~6 年内影

⁸ <https://www.yolegroup.com/product/report/co-packaged-optics-for-datacenter-2023/>

响最大的技术为光互连,其能力将在未来两年内迅速提升至 10Tb/s 以上,比当前电互连提升 10 倍。根据 Lockheed Martin 数据,相比于传统商业解决方案,OIO 可将数据传输带宽提升 7 倍,功耗降低为 1/5,尺寸降低为 1/12,大幅提升互连性能,满足高性能计算场景需求,为资源池化提供保障。

OIO 产业链由计算巨头牵引。OIO 产业链包含设计、光芯片器件商、计算/存储芯片商、服务器厂商和制造代工厂等环节,英特尔等计算巨头具有较强话语权。Ayar Labs 在该领域积累深厚,2023 年演示了与英特尔 FPGA 集成的 OIO 解决方案,可实现双向 4Tb/s 数据传输;英特尔 2024 年发布了与中央处理器 (CPU) 3D 共封的 OIO 芯片,双向带宽 4Tb/s;国内企业 2023 年发布了适用于外设组件互连快速总线 (PCIe) 和计算快速连接 (CXL) 协议的光互连产品。整体来看,OIO 当前已有小批量出货,业界相关专家认为其互连能力将在未来 2 年内增长至 10Tb/s 以上,相比电互连实现 10 倍提升。根据咨询机构 Yole 预测,OIO 全球市场规模到 2033 年将增长至 23 亿美元⁹;预计其商业生态完全爆发时间在 5 年以后。

OIO 标准研制尚处初期。OIO 的标准化工作刚刚启动,目前主要基于电互连领域向光学方向拓展,标准体系框架尚未形成。连续波波分复用多源协议 (CW-WDM MSA) 组织定义了一组 O 波段波长网格,以实现激光器之间的互操作。外设组件互连特别兴趣组 (PCI-SIG)

⁹ <https://www.yolegroup.com/product/report/co-packaged-optics-for-datacenter-2023/>

2023 年宣布成立 PCIe 光学工作组，研究为 PCIe 规范引入光学传输接口的可能性，或将开发适用于光学接口的新的外形尺寸。通用芯粒互连快速总线（UCIe）规范对物理层、适配层、协议层以及晶粒到晶粒接口进行定义，制造商可基于 UCIe 实现芯粒间的光互连。CXL 规范规定了内存缓存一致性，允许 CPU 和加速器之间共享内存资源，有效支撑计算与存储资源的池化解耦。OIF 2023 年启动节能接口项目，对 CW-WDM 以及 PCIe、UCIe、CXL 等光学接口启动研究。CW-WDM MSA、PCIe、UCIe 以及 CXL 等协议对物理层和软件层的标准化将助力实现不同硬件和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，OIO 融入现有电互连链路仍存诸多挑战有待攻克。

2. 片上光互连

大规模集成电路需要高密度、长距离布线，引发带宽、能耗、时延等瓶颈问题，片上光互连是重要解决思路，可支撑实现大量长距通道，若扩展至整个晶圆，则可实现晶圆级光互连网络。

研究重点包括光子器件、交换机制、拓扑结构和路由算法等。激光器、调制器和探测器是光互连系统的重要单元器件，可利用多种复用方式，如波分复用、偏振复用、模分复用等进一步拓展带宽，而多种复用方式的综合运用，如波长、偏振、模式混合复用等也是片上光互连的重要发展趋势。此外，互连架构不仅决定片上网络中不同节点的互连方式，同时影响路由器的端口和网络链路数量，进而影响网络

的时延、功耗和可靠性等性能。因此，选择和设计合适的片上拓扑结构，对性能提升具有重要意义。

片上光互连尚处于发展早期阶段。学术产业界持续开展片上光互连研究，呈现多项标志性成果，例如美国加州伯克利大学 2015 年研制出片上微处理器，使用光实现处理与存储单元间的双向互连通信，每个方向可提供 2.5Gb/s 带宽¹⁰。国内企业 2023 年发布相关产品，通过硅基光电子芯片上的 U 型波导传输信号，可实现电芯片上 64 核间全通道广播。Openlight 2024 年发布 53Gb/s 光互连链路成果，其中发射机采用 Tower Semiconductor 异质集成工艺，将 III-V 族芯片粘合至硅基光电子晶圆，接收机采用 Global Foundries 光电单片集成工艺¹¹。

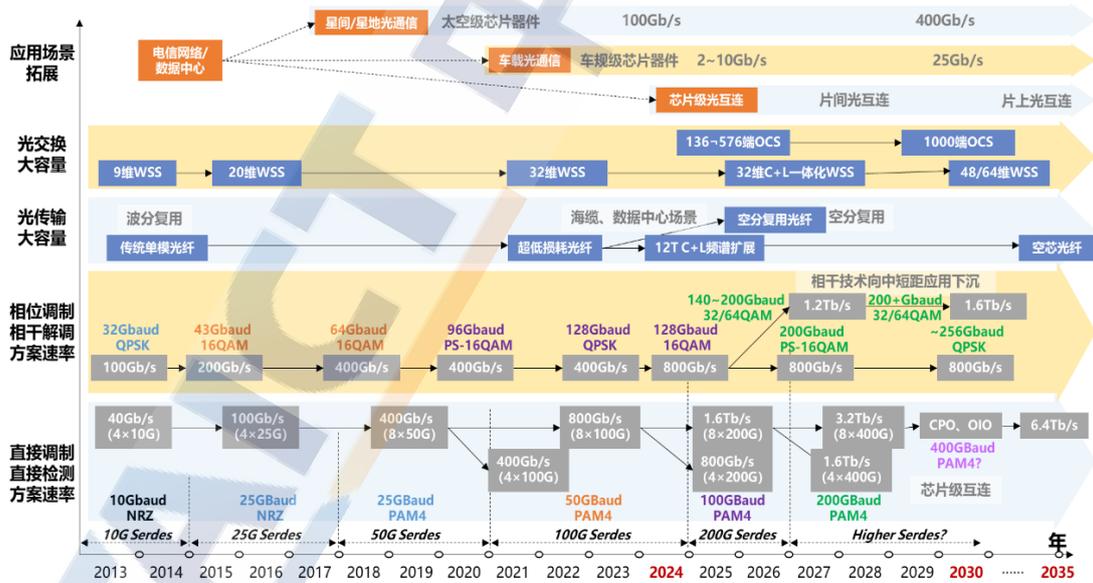
片上光互连将逐步向晶圆级迈进。晶圆级光互连为新兴前沿技术，可连接几十个异构处理器单元（XPU）或高带宽内存（HBM），带宽密度、能效和延迟性能更优，与晶圆级电互连相比可覆盖更长布线距离。欧洲 IMEC 在该领域积极探索，一是面向未来的晶圆级多 XPU 计算系统，提出用于 300mm 晶圆的超低损耗 SiN 波导技术，测试结果显示 1310nm 波长下长达 56cm 的环回波导损耗仅为 0.15dB/cm；二是实现了顶部光芯片与底部晶圆之间的低损耗倏逝耦合，1310nm 波长下损耗低于 0.5dB。

¹⁰ Sun C, Wade M T, Lee Y, et al. Single-chip microprocessor that communicates directly using light[J]. Nature, 2015, 528(7583): 534-538.

¹¹ Szczerba K, Piels M, Guzzon R, et al. 53 Gbps Optical Link with Co-designed DSP and Integrated EAM Driver, Heterogeneously-Integrated Transmitter, and Monolithically-Integrated Receiver[C]//2024 IEEE Silicon Photonics Conference (SiPhotonics). IEEE, 2024: 1-2.

（五）未来十年功能性能与应用范畴日益拓展

应用场景方面，随着数据/智算中心的快速发展以及 5G-A/6G 持续推进，光连接需求不断增长，并逐步由模块或板卡极光互连向片间/片上光互连演进，应用范畴也由陆地向卫星、车载、水下等领域延伸。在高速率方面，直调直检光连接当前处于 800Gb/s 速率，预计未来 1~2 年进入 1.6Tb/s 速率，2030 年 3.2Tb/s 将走向规模应用。干线网络相干光连接当前处于单波 400Gb/s，预计 2030 年主流应用将达到单波 800Gb/s，2035 年后进一步向单波 T+b/s 挺进。同时，相干技术由干线/城域向百 km 及以下中短距应用下沉，预计 2030 年将达单波 T+b/s。在大容量方面，未来 2~3 年，WSS 将实现 32 维 C+L 波段一体化、OCS 将实现 300~500 端口；未来 5 年，WSS 将实现 48/64 维、OCS



来源：中国信息通信研究院

图 11 光连接未来五至十年发展趋势

将实现 1000 端口。同时，12THz C+L 即将迈入规模部署，未来 5~10 年将进一步通过更宽频谱拓展、空分复用系统和空芯光纤等方式实现传输容量提升。

三、光算存领域研究与应用进展

（一）光电混合架构占据主流，算法不断优化

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，并通过光电特性等光学操作来实现信息处理或数据运算的新型计算方式。广义上的光计算基于光的波动性和粒子性特性，包含光经典计算和光量子计算在内；狭义上的光计算特指基于光的波动性进行信息处理或数据运算，本报告侧重于狭义光计算研究。

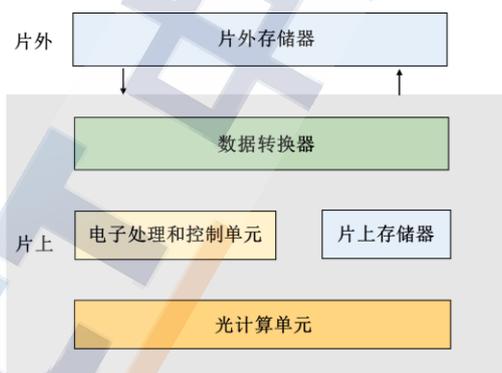
光计算按照所处理的数据形态可分为通用数字光计算和专用模拟光计算，后者为热点方向。数字光计算基于非线性单元中的非线性效应形成经典的逻辑门，构建类似传统数字电子计算原理的计算系统，通过光逻辑门的组合执行基本或复杂的计算功能，例如：二进制加法、减法、解码、编码等。常用的非线性单元有半导体光放大器、高非线性光纤、色散位移光纤、光子晶体光纤、周期性极化反转铌酸锂波导等。数字光计算的优点是通用性强、精度高，缺点是占用大量底层硬件资源、容错能力低。模拟光计算利用干涉、折射等物理特性，呈现“传输即计算，结构即功能”的计算架构，采用相对较少的单元即可完成计算任务，可节省大量硬件资源、容错能力更强，但物理结构通常为特定且专用，计算的通用性差、精度较低。如图 12 所示，光计

算的技术体系包括基本原理层、硬件层、工具框架层、功能层和应用层等，整体框架和内部构成仍在进一步完善过程中。



来源：中国信息通信研究院

图 12 光计算技术体系框架



来源：中国信息通信研究院

图 13 基于光电混合架构的光计算系统

光电混合架构的光计算是当前主流。光计算系统一般将光计算单元与微电子单元集成在一起，部分控制、存储等操作需在微电子单元中实现。基于光电混合架构的光计算系统如图 13 所示，光计算单元：

利用光执行核心运算；存储器结构：片上存储器和片外存储器用于存储数据和参数；电子处理和控制单元：控制操作以及配合光计算进行一些辅助计算；数据转换器：用于光 and 电之间接口的模数/数模转换。该架构结合光与电的双重优势，将现有电计算的灵活性与光的带宽和速度相结合，并一定程度上保留光的低能耗特性。

算法结合光子集成技术进步创新优化。光计算的应用创新和优势体现与算法息息相关，当前研究热点包括光神经网络和光子搜索等算法。**光神经网络算法**通过光学卷积、光学线性矩阵乘法、光学非线性函数等基本算子，可实现光脉冲/光学循环/光学卷积/可扩展回路神经网络、光学多层感知机等。光神经网络训练方法主要包括三种：一是硬件感知异地训练，在数字计算机上训练，同时模拟光学硬件行为；二是物理网络训练，使用实际光学硬件进行前向传播，使用数字模型进行反向传播；三是原位训练，即在线训练，直接在光学硬件上执行完整训练。光神经网络算法的典型应用包括图像识别、图像边缘检测、医疗图像分类、元音识别、光学逻辑门计算、光纤非线性补偿等。**光子搜索算法**包括遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法、梯度优化算法、直接二元搜索算法等，用于解决各种优化问题。同时，基于光子集成和制造工艺进步，实时训练能力提升，收敛速度加快、识别准确率更高，算法的集成度和实用性大幅改进，推动光计算应用落地。

神经网络推理与训练为光计算当前研究热点。人工神经网络作为 AI 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

用于各类应用场景。光神经网络技术研究包含**前馈神经网络**、**循环神经网络**、以及**脉冲神经网络**三种典型结构。基于**前馈神经网络**进行的光计算研究主要集中在光学线性加权总和、光学线性卷积、光学非线性激活函数和光学系统上的在线训练等方面。线性计算的主流方案包括马赫-曾德干涉（MZI）、波分复用（WDM）和平面光转换（PLC）三种，其中，MZI/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，在吞吐量方面明显占优，更有可能实现高并行性的大规模光学线性计算。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。在线训练需要在物理结构上执行学习和推理过程，对器件要求较为严苛，介于离线训练和在线训练之间的过渡方法如物理感知训练方法等受到关注¹²。**循环神经网络**的典型代表之一是蓄水池神经网络，基于蓄水池神经网络的光计算研究主要集中在全光学类的蓄水池计算和光电类的蓄水池计算方向。**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等。

光计算在硬件和算法层面均存技术挑战。硬件层面，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

¹² 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.

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，需要大规模集成光电技术支撑。**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学硬件。算法层面，**适合特定算法**：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、低比特模型的计算。**片上训练问题**：光学神经网络的高效、稳定片上训练仍不成熟。**软件堆栈问题**：需开发针对光子人工智能硬件优化的编译器和编程模型。

表 2 光计算与电计算、量子计算对比

分类	计算架构	原理	处理方式	计算能力	处理速率/算力提升方式	适用领域
电计算	冯·诺依曼	电子流动	串行	中	增加逻辑门数量等	通用数字
光计算	非冯·诺依曼	光波动性	并行	强	增加矩阵规模、复用维度等	专用模拟
量子计算	非冯·诺依曼	物质粒子性	并行	很强	增加量子比特数量并提升保真度等	专用模拟

来源：中国信息通信研究院

光计算与电计算、量子计算既有关联性又有差异性。光计算与电计算的架构分别为非冯·诺依曼和冯·诺依曼架构，处理方式、适用领域和计算能力各不相同，光计算更适合专用模拟计算，其相对于电计算的优越性已在伊辛问题和最大割/最小割问题的解决上得到验证。光计算与电计算的关联性方面，光计算通常在特定场景中应用，可作为协处理器为电计算提供“补充、加速”。另一方面，光计算与量子计

算均基于非冯·诺依曼架构，同样面向特定场景的专用计算。广义的光计算包含基于波动性的光经典计算和基于粒子性的光量子计算，系统结构基本类似，均包括光发射、光处理、光探测等部分。差异性方面，光计算与量子计算在原理、算力提升方式等方面存在不同。

（二）应用需求找准定位，实用领域将不断扩展

应用需求扬长避短找准定位。光计算在短期内仍定位为电计算的“辅助”，可视作低精度计算“积木”。通用数字光计算受非线性器件材料等因素影响发展缓慢，而专用模拟光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，在能耗方面的优势会减弱，因此适用于低比特模型计算。同时，当前模拟光计算基于光电混合架构，无法完全脱离电子技术而独立存在。基于光、电计算特点，用光计算全面取代电计算是不合理且不必要的，光计算的应用需求找准定位，在处理神经网络推理、组合优化、科学计算、密码等涉及大量运算工作负载、且不需要精确解的特定任务时，可借助大规模并行和低时延优势，超越经典电子计算。

光计算多领域应用前景广阔。光计算可以在人工智能、图像处理、生物医药、金融投资等多个应用领域发挥重要作用。**人工智能领域**，光子技术十分适合用于以并行方式进行的矩阵乘法运算。在大模型人工智能蓬勃发展的时代，光子技术与人工智能的深度融合将为高性能算力探索新模式、新架构。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。

图像处理领域，通过全光卷积运算进行多种卷积操作，如空间微分、去噪、边缘检测和边缘增强等，能够实现对光学图像和生物样本（如染色体分子、洋葱细胞和口腔表皮细胞等）不同的放大倍数和空间分辨率的处理操作。**生物医药领域**，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。光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极高灵敏度，已于 2017 年展示其首款商用产品，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。**金融投资领域**，光计算可应用于风险价值计量和银行账户欺诈识别等金融业务场景，已有结果表明光计算风险价值计量模型的推理速度比采用传统 CPU 蒙特卡洛算法得到相似结果快数百倍，欺诈识别问题转化成的光子伊辛问题求解算法比传统图形处理器（GPU）展现出上百倍的速度优势。

光计算未来有望进一步发挥其“赋能增量”作用。应用方面，光计算在神经网络推理、组合优化、科学计算以及密码学等算力应用领域可基于低端电芯片获得较高算力甚至部分代替电计算，从而减轻对于高端电芯片的需求程度。供应链方面，光芯片特征尺寸一般为百纳米量级，对于先进工艺制程的要求不高，且可与其他信息光子产业共享产业链。光计算有望发挥赋能增量作用，为传统计算提供“涡轮增压”，进而实现更好的整体性能。

（三）产业生态尚不成熟，布局重点出现转移

市场规模增速可观但产业链成熟度仍需进一步提高。根据 Yole 数据，2034 年光计算市场将达 30 亿美元，2027-2034 年复合增长率超过 50%¹³。光计算所用单元器件与光连接类似，可基于传统光连接芯片器件产业基础，但仍存一定差异，光连接芯片器件产业链各环节发展相对成熟，参与竞争的企业数量众多，技术成熟度已满足批量生产需求；光计算涉及光电融合等问题，技术难度高，且需由光计算企业全程把关产业链相对封闭，成熟度有待进一步提升。当前阶段，光计算的产业主体包括初创企业和行业巨头，初创企业侧重技术层面，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；行业巨头从需求出发，重点发力业务发展中特定问题计算。



来源：中国信息通信研究院

图 14 光计算产业链

产业分布主要位于美国、欧洲、中国等。美国方面，Lightmatter、Luminous Computing、Fathom Computing 等初创企业积极进行光计算

¹³ Optical Computing 2024, Yole intelligence, September 2024.

成果商业转化；微软推出了用于纯模拟域迭代的光电混合计算系统 AIM，以解决大量资金交易的追踪问题。欧洲方面，英国 Optalysys 和法国 Lighton 基于相关高校研究成果，较早入局。我国亦有多家初创企业加入国际光计算产业竞争行列。整体来看，光计算处于发展初期阶段，我国与美欧进度基本一致。

表 3 美欧光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	可编程光互连芯片	Passage	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 超级计算机	2021 年
		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

布局重点向光互连领域转变或拓展。由于当前光计算应用未大范围铺开，技术层面仍存在一定挑战，近两年产品推出节奏放缓。例如 Optalysys 原计划 2023 年发布互补金属氧化物半导体（CMOS）硅光集成计算芯片，但截至目前尚无更新进展；Lighton 则从光计算领域转向为生成式 AI 构建商业化基础模型。仍处活跃状态的公司布局重点向光互连领域转变或拓展，瞄准生成式 AI 大模型训练/推理时的数据传输瓶颈问题。例如，Luminous Computing 从光计算向芯片间光互

连转变，Lightmatter 和部分国内企业由单纯光计算向光互连延伸。

（四）存储性能不断提升，距离实用道阻且长

鉴于光子的玻色子性质，光子之间的相互作用较弱（受控的量子级条件除外），光存储需依赖光与物质的相互作用来存储信息。**传统光存储**是通过激光与介质相互作用，使介质的物理性质发生变化的方式进行信息存储，包括视频高密光盘（VCD）、数字化视频光盘（DVD）、蓝光光盘等形式，已经得到规模商用。光存储与硬盘、磁带等其他商用存储方式相比容量较小，目前最高单盘可达 500Tb，但能耗低、寿命长、安全性高，适合低访问频次、高重要性数据存储。在计算机 I/O 和路由领域，内存瓶颈已经成为在存储领域引入光技术的主要驱动力，光子集成技术的快速发展以及芯片级光互连的渗透进一步推动了对光随机存取存储器等可集成到计算体系中的**新型光存储器**的研究，新型光存储是本部分的研究重点。如图 15 所示，**新型光存储技术体系**。

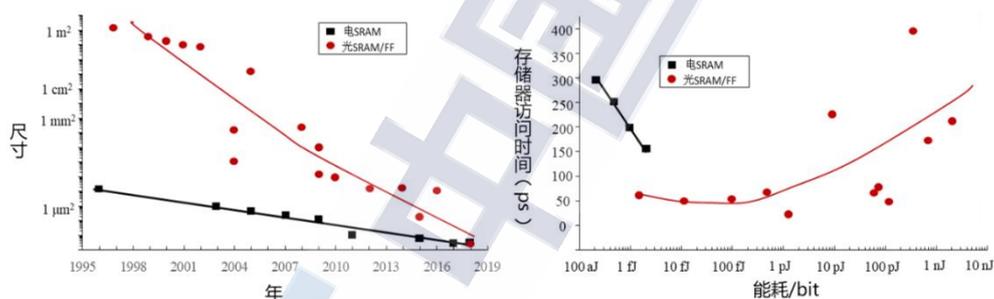


来源：中国信息通信研究院

图 15 光存储技术体系框架

包括基本原理层、硬件层、工具框架层、功能层、应用层等，整体框架和内部构成仍在进一步完善过程中。

新型光存储性能不断提升，发展速度快于电存储。新型光存储具有超快读出、多路复用、非线性响应和模拟/神经形态计算场景中超高带宽等诸多优势，展现出超越当前数字存储的巨大潜力。新型光存储研究已取得较大进展，例如 1995 年到 2019 年期间，光存储器尺寸下降了 12 个数量级，而同期内电存储器尺寸仅下降 3 个数量级；光存储器能耗下降了 5 个数量级，从 pJ/bit 下降到 fJ/bit，同时访问时间减少，而电存储器难以实现访问时间和能量效率的同步优化。



(a) 光/电存储元件的尺寸对比 (b) 光/电存储元件的存储器访问时间与能量效率对比

来源: Optical RAM and integrated optical memories: a survey¹⁴

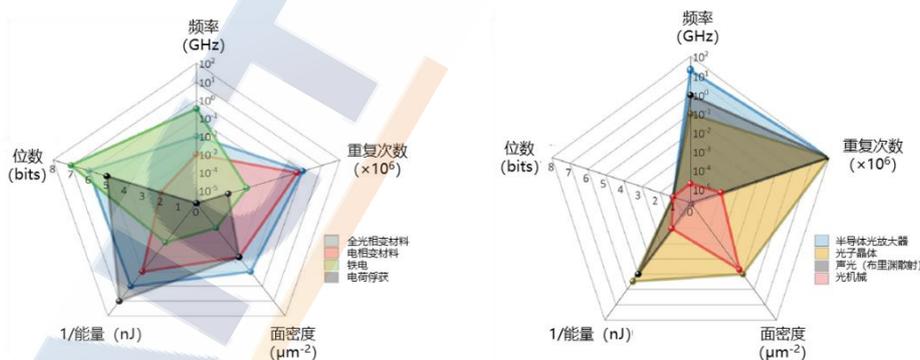
图 16 光存储与电存储对比

新型存储多技术方案竞相发展，尚未实现商用化。基于可扩展光子集成技术，得到实验证明的新型光存储实例不断增加，包括基于相变材料的非易失性存储、其他非易失性存储、易失性存储、光机械存储等。新型光存储发展势头正猛，但各技术方案均存在一定挑战，当

¹⁴ Theoni Alexoudi, et al. Optical RAM and integrated optical memories: a survey[J]. light: science & applications, 2020, article number: 91

前处于实验室研究阶段，尚未商用化。易失性和非易失性光存储器各有优势，二者的性能对比如图 17 所示，非易失性单元在位数和能量方面表现较好，易失性单元在频率、重复次数、面密度方面表现较好。

类型	技术方案	挑战限制
基于相变材料的非易失性存储	W/Ti 加热器集成光学回路	加热器尺寸大
	全光纤存储器件	制造与规模扩大较为复杂
	波导集成超表面	网络规模扩展受限于方向耦合器效率
	PIN 加热器集成光开关	开关速度慢
	P++掺杂硅电阻加热器光开关	相变材料区域加热器占比大，增加功耗及尺寸
	单脉冲可编程存储单元	开关区域有限扩展复杂，不适用于透明相变材料
其他非易失性存储	基于铁电 BTO 的存储器件	只能作为相移器，尺寸大
	电荷俘获光存储器件	尺寸大、功耗大
易失性存储	耦合光放大器开关	
	掩埋 InGaAsP 光子晶体	需要偏置以及稳定的温度控制
光机械存储	基于激发布里渊散射的光存储	信息存储易失，最大保留时间几十 ns
	双稳态光机械悬臂	最终开关速度受限于机械谐振频率



来源：Photonic (computational) memories: tunable nanophotonics for data storage and computing¹⁵

图 17 易失性和非易失性光存储器的性能对比

¹⁵ Lian, C. et al. Photonic (computational) memories: tunable nanophotonics for data storage and computing[J]. Nanophotonics, 2022, 11: 3823–3854. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0089>

应用潜力巨大但仍存较多挑战。对大规模集成、新型材料平台、制造水平以及存内计算等方面的持续研究，将推动新型光存储在电存储不擅长的一些特定场景得到应用。例如，用于实时决策的高速并行神经形态计算，以及用于补偿光网络中非线性失真的超快速信号处理等。此外，光存储器的引入能够减少光电转换过程，因此一些需要光输入信号的场景，如激光雷达、图像处理、光通信和光计算等也将获益。然而，新型光存储距离实用仍面临诸多挑战，光 I/O 和电路元件是限制带宽的主要因素，因此最大化光存储器的带宽优势还需进一步开发相关的无源和有源器件；另一个挑战是器件尺寸较大，波导受导光机理限制比电子元件的尺寸大得多，需通过复用更多波长、采用多级存储和更高维数的纳米光子结构等提高存储密度。

（五）未来将向集成、融合、泛在等趋势演进

光算存技术趋于集成化、智能化。过去五年，光神经网络、光学加密研究以及新型光存储机理研究取得了长足进步；当前光神经网络算法研究、光电集成计算芯片与光存储器件研制成为热点。预计五年后将在计算芯片架构优化、光存储器件优化等方面取得突破，未来逐步迈向大规模光电融合计算系统，聚焦可重构平台开发以及大规模光存储阵列研制等方向。

光算存产业趋于融合化、多元化。未来几年，光计算矩阵规模将不断扩大，从最初的 7×8 有望进入 256×256 时代；同时，光计算产品类型不断增加，产品化计算板卡已实现初步部署，基于相变材料的计

四、光采集领域研究与应用进展

（一）光采集技术向集成化与分布式方向演进

光采集是用于收集和处理光信号实现对目标物探测或物理量感知测量的技术。根据工作原理的不同，光采集可分为光电探测、激光传感和光纤传感三类。**光电探测**利用光电效应将光信号转换为电信号，实现对光强度或照度、距离、位置和速度等各种物理参数的测量，典型的光电传感器包括光敏电阻器、光电二极管、光电三极管、光电子管和光电开关等。**激光传感**通过发射激光束并接收其反射或散射回来的光，测量目标物体的距离、速度等参数，按照功能的不同可分为激光雷达、激光位移传感器、激光测距仪、激光速度传感器、激光干涉仪等，核心部件激光器可按照工作介质的不同分为固体激光器、气体激光器、液体激光器和半导体激光器等。**光纤传感**采用光纤作为传感单元，将温度、压力、位移和应变等物理量通过光纤内散射、干涉和反射转换为光信号的变化进行探测，光纤传感可进一步细分为点式、准分布式和分布式。

应用需求多样化，集成式、分布式多向演进。基于多元化的应用场景，随着微电子、光子及纳米技术的不断进步，三类光采集技术逐步向大规模、多功能、高精度、微型化、低成本、高可靠的集成式和分布式多向演进。具体而言，激光传感和光电传感通常面向小范围、高精度测量场景，**集成式**是重要演进趋势，在减小系统体积的同时，可实现成本降低和可靠性提升。与激光传感和光电传感不同，光纤传

感多面向长距离、大跨度感知场景，基于单根光纤即可实现光纤沿线空间和时间上高精度与大动态范围的**分布式**传感，低成本、长距离分布式测量是光纤传感独有的技术优势。此外，集成式与分布式并非相互对立的两种趋势，为交叉包含关系，例如分布式光纤传感系统中端侧收发芯片器件亦呈现集成化趋势。表 4 为三种光采集技术在工作原理、传感介质、转换参量、固件形态和演进趋势方面的典型差异。

表 4 光采集技术典型分类与比较

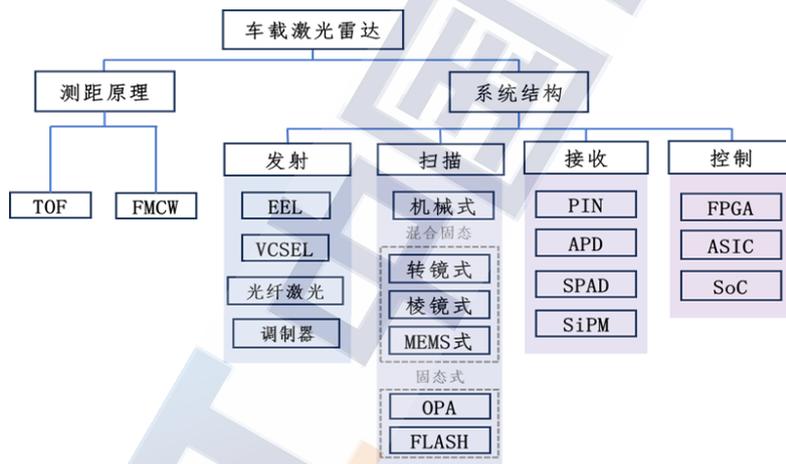
分类	激光传感	光电探测	光纤传感
技术原理	主动激光探测	被动光-电转换	光纤内散射、干涉、反射等
传感介质	激光器（空间+光纤）	光-电探测/转换芯片	光纤
转换参量	激光强度、相位、光谱等	电流	光强度、偏振、相位、时延等
固件形态	光源	点探测+集成阵列	分布式+点探测
典型应用场景	中短距应用场景		中短距或线性长距应用场景

来源：中国信息通信研究院

光采集技术在持续迭代更新下不断催化新应用。目前，各类光传感器件与系统在信息通信、工业自动化、医疗健康、环境监测、电子仪器仪表、航天航空、物联网与智慧城市、能源与基础设施等众多领域展现出广阔应用前景和巨大发展潜力。根据 Yole 预测，仅以硅基光电子为例，激光雷达、光学陀螺仪、消费健康、免疫测定等传感类新型应用，未来几年的市场规模均呈现快速增长态势。由于光采集领域产品种类众多，本部分主要选取当前业界研发热度较高的车载激光雷达、生物医疗光传感和分布式光纤传感作为研究重点。

（二）车载激光雷达路径多元化集成趋势明显

车载激光雷达是光采集在集成化发展方向的典型代表。车载传感器中，激光雷达的环境感知精度较高，可获取目标的距离、角度、反射强度、速度等参数，协同配合摄像头、超声波雷达、毫米波雷达等其他传感器，可有效感知路面、车流、行人等外界信息，是实现智能驾驶的关键基础。为适配车规级标准，车载激光雷达对小尺寸、低功耗、低成本和高可靠需求迫切，随着线数增加集成趋势日益明显，业界正基于 III-V 族、硅基光电子、氮化硅等集成平台开展产品研发。



来源：中国信息通信研究院

图 19 车载激光雷达的原理和系统结构分类

车载激光雷达包含发射、扫描、探测、处理模块，涉及不同芯片器件。发射模块的激光器按结构可分为边发射激光器（EEL）、垂直腔面发射激光器（VCSEL）及光纤激光器。扫描模块的扫描部件按结构可分为机械式、混合固态式和固态式，当前混合固态式主要有转镜式、棱镜式、机电系统（MEMS）或振镜式三种方案，固态式主要有扫

描式的光学相控阵（OPA）和泛光面阵式（FLASH）两种技术方案。接收模块按探测器类型可分为 P-I-N 型光电二极管（PIN）、雪崩光电二极管（APD）、单光子雪崩二极管和硅光电倍增管（SiPM）等。控制模块的信息处理芯片可分为现场可编程门阵列（FPGA）、应用特定集成电路（ASIC）和系统级芯片（SoC）等，如图 19 所示。

车载激光雷达按测距原理包含两种技术路线。时间飞行法（TOF）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，是车载中长距激光雷达市场的主流方案。**调频连续波法（FMCW）**采用相干探测技术，相比 TOF 具有更高的信噪比和更强抗干扰能力，但对扫频激光器的性能要求较高，信号解调和非线性扫描补偿算法复杂，规模商用需要集成化助力实现性能提升与成本降低。从现阶段技术和产业发展趋势来看，乘用车载激光雷达短期内将以 TOF 和混合固态扫描作为主流方案，并逐步向 FMCW 和固态扫描方案发展，未来预计将向纯固态方向演进。

市场规模快速增长，我国企业占据优势地位。随着性能提升和成本降低，激光雷达应用于乘用车辅助驾驶的规模将快速增长，同时在无人驾驶出租车、无人驾驶卡车等 L4、L5 级别自动驾驶场景中深化应用。根据 Yole 预测，2029 年全球车载激光雷达市场将从 2023 年的 5.38 亿美元增长至 36.32 亿美元，年复合增长率 38%¹⁶，国内多家厂商在乘用车和自动驾驶出租车激光雷达领域占据主要市场份额。

¹⁶ <https://www.yolegroup.com/product/report/lidar-for-automotive-2024/>

（三）生物医疗光传感前沿方向正在广泛探索

集成式光传感和柔性光传感在生物医疗领域得到广泛关注。集成式光传感可用于检测化学和生物目标的光谱、折射率、温度及浓度等传感，不仅满足小尺寸、无损介入要求，且生物兼容可植入，在现代医疗辅助领域得到广泛关注。随着硅基光电子及多材料异质异构集成技术的发展演进，将高密度光子器件与微电子电路集成在一个模块甚至芯片内，可进一步增强检测功能、实现传感器尺寸缩小和成本降低。柔性光传感具备优异的光学和生物力学性能，不仅可集成于仿生手、机械臂上，提供不同手指运动的触觉映射，赋予机器人触觉感知能力，还可作为可穿戴设备贴敷于皮肤表面进行健康监测，以及植入生物体内进行医疗诊断和治疗，兼具高精度、抗电磁干扰和生物相容等优势，可进一步拓展光子技术的应用范畴。

学术和产业界正深入探索生物医疗光传感前沿方向。一是生物光子探针¹⁷，如基于病毒、细胞、活体组织等不同生命体的生物光子探针，利用高生物兼容性的光子器件可实现在活细胞及复杂生物体内对生物信号及过程进行实时检测。二是光纤生物传感器¹⁸，使用特殊处理的光纤对生物样本进行检测，例如采用黑磷单层涂覆层的神经元特异性烯醇化酶标识物生物传感器，可应用于超敏感癌症诊断。三是表面等离子体共振传感¹⁹，可通过探测由分子间相互作用引起的共振角

¹⁷ <https://www.nature.com/articles/s41377-021-00561-2>

¹⁸ <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116088>

¹⁹ <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111505>

度变化来检测生物分子，具备高灵敏度和实时性。四是智能感知²⁰，结合人工智能、大数据等技术，光传感器被赋予智能感知和处理能力，未来将有力推动生物检测、器官芯片、非药物调控等领域的高速发展。

（四）分布式光纤传感是长距场景的理想方案

光纤具备多重光敏物理效应，是分布式光传感的理想承载介质。

当光纤受到外界环境（如温度、应力、磁场、电场、震动等）影响时，光纤内光信号的物理参数（如强度、相位、偏振态等）会受到相应调制，调制后的光信号可由探测系统解调出被测物理量。具体而言，基于光纤弹光效应、倏逝场效应、热光/热膨胀效应、法拉第旋光效应、泡克尔斯/克尔效应和散射效应可分别对外界应力、折射率、温度、磁场、电场、震动等进行感知。

光纤传感按照检测原理的不同可分为点式、准分布式和分布式。

点式光纤传感利用光纤材料的光敏特性，对小范围内监测选定点附近的参量变化进行传感，典型的点式光纤传感技术包括光纤气体传感器、光纤三维形状传感器、光纤陀螺仪、光纤光栅、光纤表面等离子激元共振传感等。**准分布式光纤传感**将空间上呈一定规则分布的光纤传感器耦合到一根或者多根光纤总线上，通过寻址、解调，检测出被测量的指标及空间分布，光纤总线仅起到传输光的作用，典型的准分布式光纤传感技术包括阵列光纤光栅、阵列光纤气体传感器等。**分布式光纤传感**是利用光纤的散射效应对整个光纤沿线在空间和时间上进行传

²⁰ <https://doi.org/10.1002/aisy.202100067>

感，光纤既是传感单元又是信息传输通道，可获得被测量沿光纤在空间和时间上变化的分布信息。点式光纤传感和准分布式光纤传感技术通常涉及光纤微纳结构或特种光纤的应用，适合小范围中短距高精度传感，例如高温、高压、高辐射等特殊环境下的物理参量测量。分布式光纤传感可直接基于普通单模光纤实现长距离多参数测量，其优势是可基于光纤现网实现低成本、大范围、高精度测量，同时支持光网络的通感一体化，提升网络质量和运维效率。

分布式光纤传感基于不同工作原理，可感知不同参量。分布式光纤传感根据原理的不同，可分为基于瑞利散射、拉曼散射、布里渊散射和偏振态检测的传感²¹。具体到应用场景，在光网络智能运维方面多采用光时域反射法（OTDR）实现对光纤链路的损耗、断点、缺陷和失效检测；在油气管线监测、地震监测、智慧交通及周界安防等领域，通常采用相位型光时域反射法（ Φ -OTDR，又称分布式声波传感，DAS）；桥梁隧道等土木结构应力应变检测多采用布里渊光时域反射法（BOTDR，又称分布式温度应力传感，DTSS）；火灾预警、工业极端温度测量等多采用拉曼光时域反射法（ROTDR，又称分布式温度传感，DTS）；偏振态检测法主要适用于海底光缆地质环境探测。布里渊光时域分析法（BOTDA）、光频域反射法（OFDR）以及布里渊光学相关分析法（BOCDA）由于系统相对复杂或核心元器件成本高昂，现阶段暂未成熟商用。此外，还有一类特殊的光纤传感技术称为光学

²¹ <https://link.cnki.net/urlid/42.1266.TN.20240419.1435.002>

干涉法，利用多路光进行干涉从而将相位信息转换为强度信息进行探测，可感知环境温度、压力、振动、应变、弯曲和扭转等参量变化，具有结构简单、灵敏度高、成本低等诸多优点。常见的光学干涉系统有马赫-泽德干涉仪（MZI）、迈克尔逊干涉仪（MI）、法布里珀罗干涉仪（FPI）和萨格纳克干涉仪（SI）等²²。各类技术比较详见表 5。

表 5 分布式光纤传感技术比较

类型	光学参量	典型系统	传感参量
光纤光栅	透/反射谱	—	温度、应变、折射率、浓度等
瑞利散射	强度	OTDR	光纤长度、平均损耗等
	相位	Φ -OTDR	震动、声波等
	偏振	POTDR	震动、偏振模色散等
	频率	OFDR	高精度、高分辨率插损和回波损耗等
布里渊散射	频移	BOTDR	温度、应变等
	频移	BOTDA	温度、应变等
	相关峰	BOCDA	温度、应变等
拉曼散射	强度	ROTDR	温度
偏振态检测	偏振	SOP	温度、振动、应变、弯曲等
光学干涉	相位、强度	—	温度、压力、振动、应变、弯曲等

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

我国是全球光纤传感器的主要应用市场。产业化方面，根据 QY Research 预测，2024 至 2030 年全球光纤传感器的年复合增长率为 11.3%，我国已成为最主要应用市场。产业链上游主要包括光收发芯片器件、特种光纤、配套器件等。OTDR、DAS 等传感设备的关键器件多家国内外企业均可实现量产，不存在明显技术障碍。

²² <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aat4458>

（五）未来十年关键指标与成熟程度不断提升

	当前	2030年	2035年			
车载激光雷达	产品形态	机械式和半固态	半固态与全固态共存	全固态占据主导	集成式	
	距离	100m	200m	300m		500m及更远
	成熟度	Level2	Level3	Level4		Level5
	探测原理	时间飞行法TOF	时间飞行法TOF与调频连续波FMCW共存	调频连续波FMCW占主导		
	重点问题	固件升级与算法优化	软硬件可移植性增强	多传感器融合及智能组合件		车、路、云一体化（智能网联）
生物医疗	波段	近红外	近红外与中红外	可见光与紫外	紫外至中红外全波段	分布式
	材料平台	硅光、氮化硅	磷化铟、GaSb、硅光异质集成	聚合物、表面等离子体、超材料、2D等新型材料		
	检测量	浓度、PH、折射率、光谱	细胞级标记物	大分子及分子簇	小分子及分子动力过程	
	典型应用	光化学检测及植入式设备	生物光子探针及光纤生物传感器	柔性光传感及可穿戴	智能光生物传感	
光纤传感	应用场景	电力石油专网、周界安防	结构健康、环境监测、军事	智慧城市	电信网络通感一体化	电信网络通感算一体化
	关键技术	OTDR DAS DTSS DTS SOP	阵列光栅 OFDR 光学干涉	AI+分布式传感	特种光纤分布式传感	
	探测距离及分辨率	~50km (~1m RES)	~200km (~5m RES)	~500km (~5m RES)	~50km (~0.1m RES)	~2000km (~1m RES)
	阶段挑战	窄线宽光源	大容量信号处理 噪声抑制	智能事件判别	系统轻量化	通信传感网络规模化部署

来源：IPSR-I Roadmap2024²³，中国信息通信研究院

图 20 光采集未来五至十年发展趋势

光采集在各类场景中的应用将不断拓展深化，相关性能要求和演进趋势与应用需求息息相关。图 20 展示了智能汽车、生物医疗和光纤传感三大典型应用场景或技术方案中，光采集技术未来五至十年的发展趋势。车载激光雷达作为自动驾驶智能感知的关键传感器之一，产品形态将由半固态向全固态式发展，有效探测距离逐步增加，光源方案不断升级，在性能不断提升的同时成本进一步降低。随着新能源汽车市场快速增长，激光雷达在乘用车前装搭载的比例将逐步提升。生物医疗光传感技术将广泛应用于内窥成像、无损检测及远程医疗等场景。其集成材料平台由硅基光电子向 III-V 族半导体、聚合物、二维材料等延伸拓展，支持多波段探测，灵敏度和分辨率也将显著提高，为医疗诊断提供更为精准的数据支持。光纤传感技术将持续提升精度、

²³ MIT, PhotonDelta. Integrated Photonics System Roadmap – International (IPSR-I Roadmap), 2024

分辨率和传感距离，阵列光纤光栅、AI+分布式传感、特种光纤传感等新型方案有望规模商用，未来应用场景也将逐步扩展到智慧城市、环境监测、光网络通感一体化等领域。

五、光呈现领域研究与应用进展

（一）新型显示领域多条技术路线并行发展

新型显示多主流技术路线并行发展。显示技术是通过图像显示系统，将计算机存储、运算的中间过程或最终结果以图像的形式进行呈现，涉及图像的输出与可视化，应用于显示面板和显示屏等。早期显示技术以阴极射线显像管电显示为主，后续逐渐被 LED 光显示所替代，现阶段已进入以液晶显示（LCD）、OLED 显示、Micro-LED 显示、激光显示、电子纸显示等为代表的新型显示时代，几种主流新型显示技术路线各具优劣势，处于并行发展态势。

表 6 主流新型显示技术路线对比

对比项目		LCD 液晶显示	OLED 显示	Micro-LED 显示	激光显示	电子纸显示
技术成熟度		☆☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆	☆☆☆	☆☆
能源效率		☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆☆
画质	分辨率	☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆
	色域	☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆
	对比度	☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆
最大亮度		☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	☆☆

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

LCD 液晶显示发展成熟度高成本低，技术创新有效支撑显示性

能持续提升。LCD 液晶显示技术从上世纪七十年代初发展至今已经历长足发展，具备高清晰度大屏幕显示能力、以及制造工艺成熟和低成本等优势，在当前全球显示面板市场中占比最高。LCD 液晶显示已在手机、电视机、笔记本电脑等领域实现广泛应用，为适配新型应用需求技术方案不断演进，如 Mini-LED 背光技术、曲面 LCD 显示技术、UB Cell 显示屏技术、异形/轻薄化/窄边框外观技术、透明 LCD 显示技术等已进入规模量产或工程研发阶段。LCD 液晶显示在分辨率、刷新率等关键性能方面持续突破，在多分区 Mini-LED 背光和量子点等新型技术加持下，画质也将进一步提升。预计在未来相当长一段时间内，LCD 液晶显示仍将是新型显示领域的主流方案。

OLED 显示向全尺寸渗透，蒸镀工艺为当前主流，新型印刷工艺
适配演进。OLED 显示基于自发光技术，具有高对比度、快响应速度、低能耗和轻薄化等优势，在透明屏、柔性屏等领域具有应用前景，市场占有率仅次于 LCD。OLED 显示包含蒸镀和印刷两类工艺，其中，蒸镀工艺较为成熟，又细分为白光（WO）LED 和精细金属掩膜版（FMM）-OLED 两种技术方案，大尺寸应用倾向 WOLED 蒸镀方案，采用白光 OLED 作为发光元件；中小尺寸应用倾向 FMM-OLED 蒸镀方案，通过 FMM 将各层功能性材料采用全蒸镀工艺进行像素级成膜。印刷工艺为新型工艺技术，采用喷墨打印方式将功能层材料通过墨水的形态精确输送至对应像素，实现全彩显示，适用于各种尺寸应用，产品结构和制备工艺相对简单。OLED 蒸镀工艺的核心设备为蒸镀机，

价值较高并主要由日本企业垄断；印刷工艺可避开蒸镀设备，我国正在该领域进行技术、专利等布局积累，并已形成一定优势。

Micro-LED 显示性能优异备受关注，但制造工艺要求严苛成熟度较低。 Micro-LED 显示是以微米量级为周期，在薄膜场效应晶体管（TFT）或 CMOS 背板上高密度组装像素的 LED 演进技术，具有发光效率高、亮度高、响应时间短和可靠性好等优势，预计将成为继 LCD 和 OLED 显示之后的下一代主流显示技术。Micro-LED 显示技术研究始于 2000 年左右，2014 年后热度提升，国内外头部企业纷纷布局。由于需要使数百万甚至数千万颗微米级 LED 晶粒保持长期稳定可靠工作，Micro-LED 显示对产业链各环节均提出严苛技术要求，制造工艺面临全新挑战，巨量转移、背板、驱动芯片以及检测修复等关键技术正在攻关中、有待进一步成熟。

激光显示大屏应用优势显著，三基色光源和混合光源双路线同步发展。 激光具备有方向性好、单色性好、亮度高等特性，用于光显示可实现大尺寸、超高清、宽色域、高观赏舒适度和高保真的图像再现。激光显示基于漫反射显示原理，模拟人眼观测自然万物、接收光为屏幕反射光而非直射光；同时激光显示为全像素反射，像素之间无边缘效应，有效降低单位面积光强，对人眼伤害程度较小。根据光源的不同，激光显示包含三基色激光光源和混和光源两种技术路线，前者是基于红、绿、蓝三基色激光，结合投影或平板技术的路线；后者是激光与非相干光组合构成显示用三色光源，又包括激光+荧光光源、激

光+LED 光源等方案。

电子纸显示效果与传统纸张类似，包含多技术路径具备低碳护眼优势。电子纸显示即反射式显示，通过反射环境光实现图像显示，无需背光源和自发光，拥有类似传统纸张的观阅体验。电子纸显示的主要技术路径包括电泳、电润湿、电浆、胆固醇液晶、反射式液晶等，其中，电润湿是当前唯一可兼容彩色视频主流信息播放的技术路径，有望实现电子纸黑白准静态到彩色动态显示的转变。电子纸显示能耗极低，根据相关统计，电泳显示、电润湿显示在单色刷新时的功耗分别为 $\leq 1.03\text{mW}/\text{inch}^2$ 、 $2.66\text{mW}/\text{inch}^2$ ，在彩色刷新时的功耗分别为 $\leq 16.58\text{mW}/\text{inch}^2$ 、 $17.66\text{mW}/\text{inch}^2$ 。

（二）数字时代新型显示应用场景不断拓展

数字化时代，“万物皆有屏、万物皆显示”，新型显示已成为信息交互的重要端口，应用场景从电视机、显示器、智能手机、笔记本电脑四大传统领域日益向车载、可穿戴、虚拟现实和生物医疗等延伸拓展，改变人类信息获取方式，重塑沟通、学习与娱乐体验。

车载显示屏幕技术不断升级迭代。车内空间作为现代生活的“第三空间”，对提升生活质量具有显著影响。车载显示是“人车交互”的重要接口，可应用于车载娱乐和智能驾驶辅助系统，正伴随智能化浪潮加速到来，逐步向多屏化、大屏化、个性化等趋势发展，通过 LCD、Micro-LED、激光显示等实现折叠屏、卷曲屏、隐藏显示屏、透明显示、抬头显示等新型车载显示屏幕，带来不断升级的应用体验。

多形态柔性显示屏适配可穿戴设备。智能可穿戴设备集成了多媒体、传感器和无线通信等技术，可实现用户交互、生活娱乐、健康监测等丰富功能，按照产品形态包含智能耳机、智能眼镜、智能手表、智能手环、智能头盔等。LCD、OLED 柔性显示技术基于柔性材料，可将显示屏制作成弯曲、可折叠、滑卷等多种形式，以适配不同智能可穿戴设备的个性化、多样化需求。

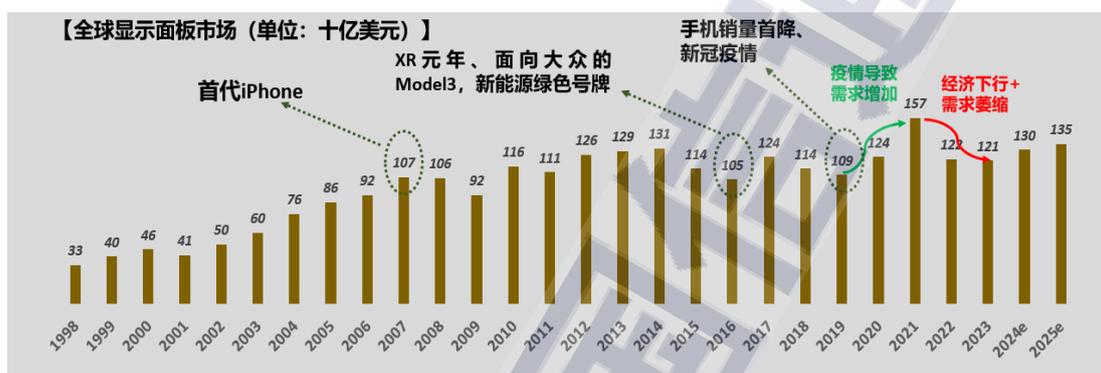
近眼显示技术是实现虚拟现实的关键。沉浸感是虚拟现实的核心体验之一，高性能显示技术可提供高分辨率、高帧率和低延迟的图像，对于创建逼真虚拟环境至关重要。近眼显示技术通过 Micro-LED、Micro-OLED 等实现立体视觉，可改善用户使用虚拟现实设备的观看真实感与舒适性体验，对虚拟现实技术发展水平具有重要影响。

医疗显示器在医疗健康域作用凸显。医疗显示器是专用于医学图像显示的设备，需具备高分辨率、高对比度、精准色彩还原等特性，为诊断过程中准确、清晰呈现医学图像提供保障。影像诊断方面，医疗显示器可用于 X 射线片、计算机断层扫描、磁共振成像等；手术导航方面，医生可通过实时影像显示，确保手术的精准性与安全性；医学教育方面，学生可通过医疗显示器学习解剖结构、病变特征等。

（三）新型显示市场空间广阔我国保持领先

新型显示具有千亿级市场规模，人工智能将进一步拉动增长。近二十余年来，全球新型显示面板市场经历了互联网（PC/TV）和移动互联网（手机/平板）时代，并逐步进入后移动互联网时代（新型手机

/虚拟现实/智能汽车等)，全球市场几度波动，并在 2021 年达到最高点。近两年，受宏观经济下行和消费需求萎缩影响市场规模呈下降趋势，2023 年约为 1210 亿美元。随着人工智能快速发展，在数据分析、图像和语音识别、自然语言处理等方面对新型显示赋能，拓展应用场景、提升交互体验，预计未来两年将成为拉动市场增长的主要动力。



来源: Omdia²⁴, 中国信息通信研究院

图 21 全球显示市场规模

美日欧长期主导产业链上游，韩国在产业链中游与我国旗鼓相当。产业链上游技术壁垒和行业集中度高，美日欧占据先发优势和主导地位。美国 UDC、康宁、3M 等掌握有机发光材料、玻璃基板、增亮膜等国际话语权；日本 Canon Tokki 垄断全球 OLED 蒸镀设备；高端液晶以德国 Merck、日本 Chisso、DIC 和 ADK 等为主；小分子 OLED 材料的核心专利由美国 Kodak 掌握，高分子 OLED 材料的核心专利由英国 CDT、美国 UniAx 掌握。产业链中游全球主要显示面板供应商集中于中韩，我国企业在 LCD 市场占据优势，在中小尺寸 OLED 市

²⁴ <https://omdia.tech.informa.com/>

场与韩国企业激烈竞争市场份额接近²⁵。

我国新型显示技术实现领跑，并加速构建完整产业链条。我国已成为全球新型显示最重要的研发和生产基地，除了较成熟的 LCD 和 OLED 技术外，积极布局新兴方向，在全球 Micro-LED 显示专利申请量 Top15 创新主体中数量过半，激光显示专利申请量全球第一，电子纸显示领域拥有多家头部企业。同时，在产业链上游液晶材料、玻璃基板、偏光片、OLED 显示发光材料、柔性显示材料等关键原材料，以及蒸镀机、面板后道检测设备、自动光学检测仪等制造装备领域加大研发力度，并已取得一定进展。

（四）成像技术从多维度突破人类视觉极限

光电成像是利用光电效应对物体进行成像或图像增强与转换的技术，涉及图像的捕获、转换和处理，应用于照相机、望远镜、显微镜等领域。光成像技术的本质是在灵敏度、分辨率、空间、时间、光谱等维度扩展人眼视觉极限，其中基础光子材料和光电芯片器件对成像技术实现和性能提升具有关键作用。

光电成像技术在灵敏度方面提升人眼夜视能力。微光成像技术可在低照度条件下实现人眼夜间隐蔽观察，在夜间侦查瞄准、辅助驾驶、导航制导等军事应用具有重要作用²⁶。微光成像技术的核心构成部分是图像增强器，通过光电倍增技术实现信号增强，包含真空像增强器

²⁵ Omdia, OLED Display Market Tracker –1Q24 Analysis

²⁶ 陈钱. 先进夜视成像技术发展探讨[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(02):9-16.

和固态像增强器。实现高灵敏度、高分辨率成像是微光成像技术发展的主要趋势，未来微光成像技术将通过结合光电转换的光强直接成像，与基于计算成像的信号反演成像不断优化性能。

光电成像技术在空间方面拓展人眼视见范围。非视域成像技术可对人眼视线范围之外的场景进行成像，极大拓展传统成像的空间范围，在军事、医疗等领域具有广阔应用前景。被动非视域成像使用消费级成像设备采集光学信息；主动非视域成像主要基于条纹相机、单光子雪崩二极管（SPAD）、增强电荷耦合器件（ICCD）、飞行时间相机等成像设备开展研究²⁷，具有精度高、分辨率高、对环境鲁棒性强和能够进行三维重建等优势，是业界探索研究最广泛的技术方向。

光电成像技术在分辨率方面超越人眼分辨能力。人眼的分辨率极限为 $100\mu\text{m}$ 左右，超分辨成像技术可打破光学衍射限制实现纳米级分辨能力，助力探索微观世界。典型的超分辨成像技术包括受激发射损耗显微镜、结构光照明显微镜和单分子定位显微镜等。高数值孔径物镜、激发光源、可调谐光学元件、高灵敏探测器（如电子倍增电荷耦合器件 EMCCD、科学互补金属氧化物半导体 sCMOS 相机）、光束整形器件、非线性光学晶体、光栅或衍射光学元件等光学元器件，有效支撑了超分辨成像技术发展，满足各类科学研究和工业应用需求。

光电成像技术在时间方面超越人眼速度局限。超高速摄像机基于先进的 CMOS 光学探测器，具有高感光灵敏度和快速成像能力，能

²⁷ 肖涵. 非视域成像系统的研究进展[J]. Applied Physics 应用物理, 2023, 13(05), 213-222

够以每秒数千甚至数万帧的速度捕捉图像，远超人眼每秒数十帧的动态图像感知速度。高速摄像机可用于记录快速发生的事件或在极短时间内的变化过程，例如记录子弹飞行、爆炸发生、液体滴落等瞬间，在科学和军事等领域发挥价值。

光电成像技术在光谱方面突破可见光范围。人眼只能看至约 380nm~780nm 范围的光，非可见光成像技术基于光学探测器，可捕捉可见光波段以外的辐射，在不同场景中实现应用。例如，紫外光能量较高，可引起物体内部粒子激发、电离或能级跃迁，从而产生特定信号，为成像提供依据，可应用于材料缺陷、裂纹和异物检测、医学成像等领域；红外成像通过将物体发射的热辐射转换为电信号来生成图像，可应用于夜视、环境监测等领域；X 射线可穿透物体并通过成像揭示内部结构，可应用于医学影像等领域。

（五）未来五到十年 LCD 和 OLED 仍为主线

光显示技术未来五到十年的技术发展预计仍将以 LCD 和 OLED 两大技术路径为主线，LCD 进一步向芯片微缩化、显示全彩化和场景泛在化等方向演进，OLED 进一步向尺寸扩大和绿色低碳方向演进。应用场景方面，光显示目前已覆盖众多行业，呈现“万物皆显示”趋势，未来五到十年将由需求牵引一是持续向适人化和三维化方向发展，通过轻、薄、可挠曲的柔性显示等技术适配任意形态产品，实现多元化外型；二是与 AR/VR 功能集成的集成显示技术，提供真实、沉浸视觉效果，加速元宇宙等新型应用生态构建；三是业界学术界将不断

探索能够提供真实三维呈现效果的新兴显示技术。**光成像技术**发展经历了基于透镜、反射镜等光学元件的传统光学成像方式，到基于电荷耦合器件（CCD）、电荷注入器件（CID）和 CMOS 等感光元件的数字化成像演变过程，逐步向智能化方向发展。未来五到十年，将重点聚焦计算光学成像、元成像、自适应光学成像等新型成像方式，持续向无损、多模态等趋势演进。



来源：IDC²⁸，Omdia²⁹，中国信息通信研究院

图 22 光呈现未来五至十年发展趋势

六、跨领域交叉融合研究与应用进展

（一）连接+计算+存储新范式推动算力扩展

存储瓶颈可从连接和计算两方面弥补。近年来，处理器和存储器的性能发展速度严重不均衡，存储器访问速度无法与 CPU 数据处理速度相匹配，从处理单元外的存储器提取数据，搬运时间通常比运算

²⁸ <https://www.idc.com/>

²⁹ <https://omdia.tech.informa.com/>

时间长 2~3 个数量级，消耗大量能源，“内存墙”、“功耗墙”问题严重制约了计算系统整体性能提升。存储的本质是以对空间的使用换取计算时间的缩短，在算力、运力大幅提升的情况下，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，光计算+光互连、存算一体（含近存储运算）等新型解决方案应运而生。

光互连引领高性能计算进入新时代。一方面，片上光互连可使光计算模块与电计算芯片有效协同，提升单节点算力。另一方面，片间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实现。多家国内外光计算企业已考虑为其计算产品引入光互连，业务范围由单纯光计算向光互连延伸拓展。例如，将 CXL 与光互连技术结合，实现服务器作为主机读写挂载于 CXL 2.0 交换机后的内存资源，突破传统 CXL 互连方案中铜缆传输距离有限的瓶颈。未来，利用光互连将计算系统与更多内存单元有效连接，可进一步提高资源共享效率。

存算一体适用于大数据量和大规模并行场景。存算一体架构是将存储器靠近处理器或存储器内置处理器进行数据处理或计算，这种计算与存储融合方式能够减少传输和 I/O 操作，优化计算与存储间的协同工作，从而消除冯·诺依曼架构的“内存墙”瓶颈，在深度学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。光存储器可用于数字域或模拟域的计算架构。在数字域中，二进制相变存储器可用于数字计算的非易失性光存储，其全光或电光方案均已得到证明，形成

处理和存储更为紧密的计算架构，缓解数据搬运瓶颈。在模拟域中，具有多电平或连续可调响应的模拟存储器，允许在同一单元中同时存储和执行算术和/或逻辑操作，通过存内计算方式突破相关瓶颈。

（二）通感一体化光网络协同架构正在构建

“通感”一体化高效协同架构体系和产业生态正在构建。光纤是光通信网络信息传输的关键介质，铺设区域和密集度快速增长。光纤除构建通信网络外，兼具多参量的状态感知能力，将光纤传感与通信相结合，可实现大规模、高密度的通感一体化光网络。同时，基于本地计算独立感知的传感系统已无法支撑各类新型应用对感知的极致需求，光网络具有高带宽、长距离、低时延和高可靠的数据传输能力，可有效辅助实现多节点协作感知，拓宽感知广度，从而形成大带宽低时延通信、实时状态感知的通感一体化高效协同、互惠增强架构。

通感一体化技术已在多领域展现巨大应用潜力。例如，在电信领域，通感一体化技术助力智能运维，实现对网络中光纤光缆资源的物理损伤、环境变化等监测，降低运维成本、提升服务质量；在油气管道和电网行业等能源领域，实现对管道泄漏、腐蚀、非法入侵等监测，以及电网线路覆冰、风舞、雷击等预警，保障能源安全。另一方面，依托已广泛部署的光网络资源，可实现地震、海啸等地质环境灾害预警和城市车流、道路故障等城市动态监测。

光网络通感一体化包括基于分布式光纤传感和基于相干信号 DSP 解调两种主流技术方案。分布式光纤传感方案在组网方面可通过

波分复用、频分复用（FDM）、空分复用（SDM）等技术整合到已部署运营的相干网络中，或通过载波调频方式整合到基于直调直检技术的现网中，实现通信信号与传感信号的共传。相干信号 DSP 解调方案可充分利用系统设备中的 DSP 芯片，在同一波长上实现通信业务和感知业务共存，既有网络架构无需进行额外调整，是通感一体化光网络的理想解决方案，但特征提取算法复杂度高、对 DSP 芯片提出新型要求，学术界和产业界正在研究攻克。

表 7 国内外通感一体化光网络标准及研究进展

分类	标准化组织	标准名称
国际 标准	ITU SG15 Q6	G.dfos 用于地面光传输系统的分布式光纤传感系统 (Distributed fibre optic sensing system for terrestrial optical transmission system)
	ITU SG15 Q8	G.9730.1 专用科学观测海缆系统 (Dedicated scientific sensing submarine cable system)
		G.9730.2 科学观测和可靠通信海缆系统 (Scientific monitoring and reliable telecommunications submarine cable systems)
	ITU SG15 Q2	G.sup.VHSP 点对多点无源光接入系统要求和每波长 50 Gbit/s 以上的传输技术以及传感考虑 (Point to multipoint passive optical access system requirements and transmission technologies above 50 Gbit/s per wavelength and sensing considerations)
	IPEC	通感一体光传输系统 (The integrated sensing and optical transmission system)
国内 标准	CCSA TC6 WG1	《通感一体化光网络架构及关键技术》研究课题
	CCSA TC6 WG3	《光纤光缆线路维护技术 第 3 部分：基于光传感技术的光缆识别》标准项目
	CCSA TC6 WG4	《通信传感用光模块》研究课题
		《通信传感一体用集成相干接收组件》研究课题
		《通信传感一体用窄线宽集成激光器组件》标准项目
		《通感一体用光器件研究》研究课题

来源：中国信息通信研究院

通感一体国内外标准化工作有序开展。ITU-T、国际光电委员会（IPEC）、中国通信标准化协会（CCSA）等国内外标准组织正在针对光网络通感一体化开展标准研究，已立项系列标准和标准类研究课题。目前，成熟光纤传感产品通常基于 1550nm 波长，与光网络结合后，需重新规划传感信号和光网络波分复用系统的波长分配，传感产品的波长范围需进行改变，窄线宽光源、光放大器及波分复用器等芯片器件均需进行相应的研发优化。

（三）感算融合全光智能技术研究正在开展

传感和计算由分离范式向一体化方向演进。传统端侧视觉智能技术大多为感算分离范式，光感知和电计算在硬件上相互独立，先通过光传感器采集信号，转换为电信号后再进行计算，一方面处理速度低，较难满足实时图像处理需求；另一方面系统尺寸和功耗较大，应用场景受限。美国和日本提出了“视觉芯片”概念，集图像采集、并行传输和并行处理能力于一体，可采用硅通孔技术将采集、处理和存储芯片以垂直堆叠方式进行连接，实现先进的三维集成视觉芯片。清华大学 2024 年进一步提出“感算一体全光智能计算架构”³⁰，研制并行化全光感算阵列芯片，以“光入-光出”实现全光机器视觉，处理速度提升至纳秒量级，支持每秒千亿像素规模的自然光场处理。其工作原理为在光域内直接对图像处理和分析，图像在传输过程中始终保持光的

³⁰ Wei Wu, Tiankuang Zhou, and Lu Fang. Parallel photonic chip for nanosecond end-to-end image processing, transmission, and reconstruction [J]. Optica, 2024, 11(6):831-837.

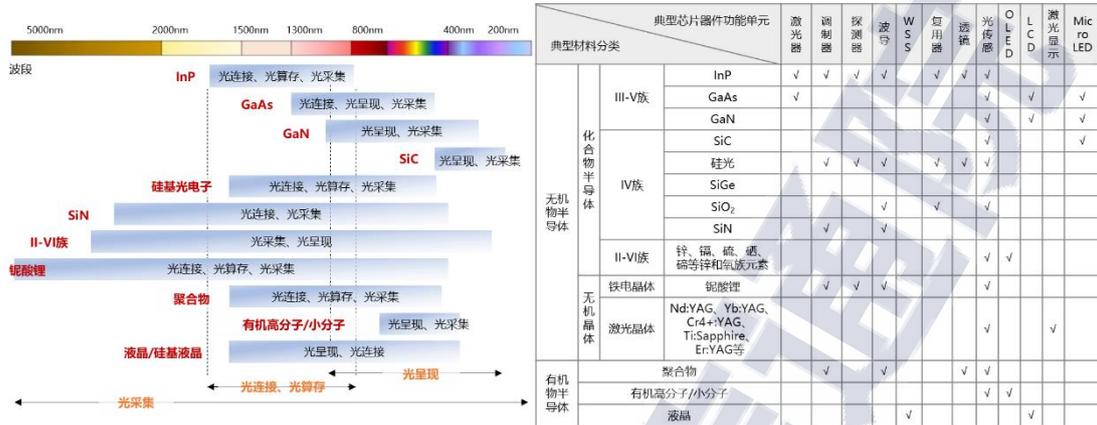
形式，无光电转换，避免信息的损失和误差；且光子技术的并行能力可同时传输和处理大量数据，从而提高处理速度。

七、材料工艺共性基础研究与产业进展

（一）光子材料多体系并存且处于不同成熟阶段

光子材料可分为化合物半导体、无机晶体和有机物半导体三类，处于多体系并存状态。化合物半导体方面，磷化铟（InP）适合制作高性能边发射激光器（EEL）、探测器和调制器，并被视为光有源和无源芯片集成的最佳平台，缺点是成本高、外延工艺复杂、标准化程度较低。GaAs 在光子领域适合短波长应用，如制作 VCSEL、泵浦激光器、LED 等，具有高频、低能耗特性，但功率特性较差。GaN 的禁带宽度大、击穿电压高，适合制造高电压、高功率器件，缺点是异质外延工艺复杂。硅基光电子在硅基衬底上利用微纳工艺制作光器件，具备小尺寸、高集成优势，缺点是发光效率低、耦合工艺复杂。SiN 具有低损耗、小尺寸和高集成优势，适合制作光波导等无源器件。二氧化硅（SiO₂）/玻璃具有低损耗、工艺简单和低成本优势，是平面光波导分路器、阵型波导光栅的主要材料，缺点是尺寸大、器件种类少且以无源为主。无机晶体方面，体材料铌酸锂在 100Gb/s 长距相干光调制器中已获得广泛应用，薄膜铌酸锂（TFLN）将传统体材料铌酸锂薄膜化，兼具优异的电光调制特性和集成化优势，是高带宽、低损耗、高集成调制器的新型平台和热门方案。有机物半导体方面，聚合物具有高热光/电光系数、高带宽、低功耗、工艺简单等优势，适合制作光调

制器件，缺点是损耗大、稳定性差。



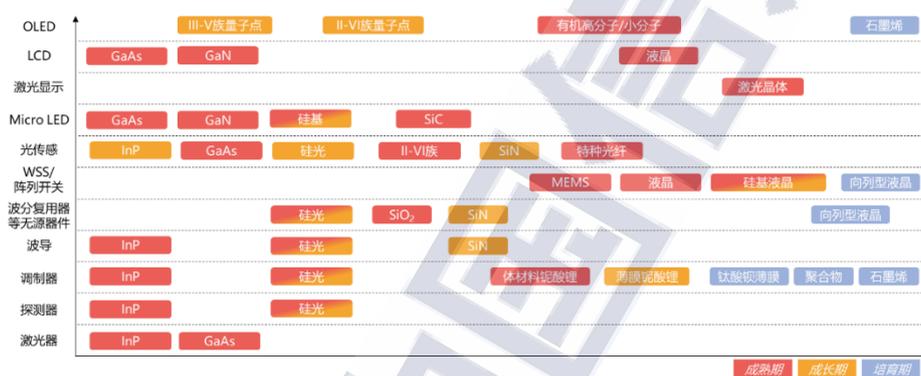
来源：中国信息通信研究院

图 23 光子材料分类与典型应用领域示例

硅基光电子和 InP 在应用领域、功能单元全面性方面占优。 每种光子材料的物理特性和适合制作的芯片器件种类不尽相同，目前尚无一种材料能够低成本、高性能地实现全部芯片器件达到技术收敛，且未来相当长时间内仍将处于多体系并存状态。其中，硅基光电子和 InP 横跨连接、算存、采集多应用领域，覆盖丰富的芯片器件种类，InP 具备更优异性能，硅基光电子可基于成熟 CMOS 工艺、利于规模制造和成本降低，与其他硅基材料的兼容性更好。根据应用需求，如追求单一性能更优的分立功能单元，可选择特定材料；若将更多功能单元集成，硅基光电子和 InP 是较好选择。

光子材料处于成熟期、成长期和培育期不同发展阶段。 III-V 族、II-VI 族、SiO₂/玻璃、体材料铌酸锂、液晶、有机高分子/小分子等处于**成熟期**，目前已实现规模商用，并在同类产品中占据主流。硅基光

电子、薄膜铌酸锂等处于**成长期**，硅基光电子虽已有部分量产化产品，但在同类产品中尚未成为主流；薄膜铌酸锂预计于未来 1~2 年进入商用。钙钛矿（如钛酸钡薄膜）、二维材料/超材料等新型材料可实现光信号的灵活控制与高效转换等，当前处于**培育期**，以实验室研究验证为主。由于成熟期和成长期光子材料的潜力仍未充分发掘，新型材料的产业路径尚不清晰。



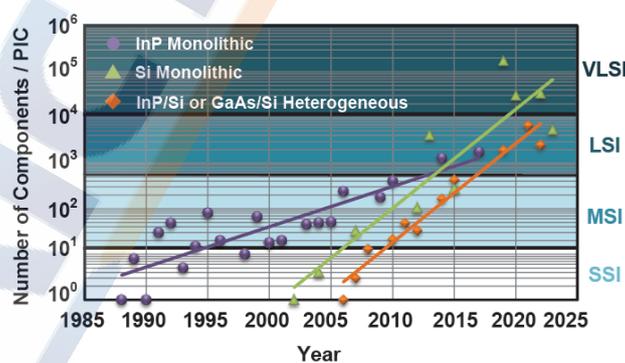
来源：中国信息通信研究院

图 24 光子材料处于不同成熟阶段

配套电芯片材料主要包括硅基、锗硅（SiGe）和 GaAs 等。光子芯片器件通常需要电芯片配合才能正常工作，如驱动器、跨阻放大器、线性放大器等模拟电芯片，以及数字信号处理、数据时钟恢复等数字电芯片。硅基材料基于集成电路 CMOS 工艺，具有低功耗、高集成、低成本优势，但高频损耗和噪声较大，适合制作数字电芯片和中低速模拟电芯片；GaAs 适合制作模拟电芯片，具有宽禁带、高频、抗辐射和耐高压等特性；SiGe 基于 BiCMOS 工艺，适合制作高速模拟电芯片，具备高功率、低噪声优势，但功耗较高集成度低。

（二）光子集成正处于转向规模发展的关键节点

光子集成当前正处于转向规模发展的关键节点。光子集成(PIC)是将相同或不同功能的分立光芯片器件集成在一起，目前中小规模PIC技术已经成熟并取得广泛商用；大规模PIC集成度在实验室研究中可达 $10^4\sim 10^5$ ，但在光源、工艺兼容、规模制备等方面仍存在诸多挑战，且由于市场规模、技术代价和经济效益等因素尚未实现规模商用。随着大数据、人工智能、万物感知和新型显示时代的到来，光连接、光算存、光采集和光呈现四大应用领域对更高性能、更小型化、更低功耗和更优成本的需求日益迫切，将驱动PIC快速发展，形成技术进步与市场规模提升相互促进的正反馈模式。与上世纪六十年代传统电子向微电子过渡的情况相似，PIC当前正处于转向规模发展的关键节点。早期的PIC平台以InP为主，近年来硅基光电子在更高集成度、CMOS兼容大规模制造和低成本方面优势凸显，未来以硅基光电子为基础平台，聚合不同材料体系的异质异构集成极具发展前景。



来源：Roadmapping the Next Generation of Silicon Photonics³¹

图 25 主流材料体系的集成度

³¹ Sudip Shekhar, et al. Roadmapping the Next Generation of Silicon Photonics[J]. Nat Commun, 2024, 15(1):751.

与微电子集成电路 CMOS 工艺相比，光子集成在工艺流程和复杂程度上相似，但在功能结构单元、材料体系、标准化程度、发展规律和提升维度等方面存在明显差异，如表 8 所示。

表 8 光子集成与集成电路技术比较

	光子集成	集成电路
原理特性	<p>侧重光子与物质、光子与电子之间的互相作用，例如：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 光源（受激/自发辐射）：电子-空穴复合产生光子，是否发光及波长范围与材料能带结构相关； ➢ 光探测（受激吸收）：吸收光子产生电子-空穴对，转换为电压/电流信号； ➢ 光调制：利用电光效应、电吸收效应、等离子色散效应等实现光信号强度、相位、偏振等调制； ➢ 光波导：利用材料折射率差异控制光信号导行方向，实现对光传输路径的控制。 	<p>侧重电子之间的互相作用：</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 通过电压控制电流，完成基础逻辑处理； ➢ 通过逻辑门布局、控制和走线，实现电芯片功能。
功能和结构单元	<p>类别较多：包含光源、调制、探测、波导等不同基础功能单元，采用不同材料、组份、物理效应等实现；为低成本适配不同应用场景，同一基础功能单元有多种结构类型，如光源有 EEL、VCSEL、LED 等，调制有 MZI、微环等；探测有 PIN、APD 等。</p>	<p>单元统一：晶体管为基础单元，相同基础单元利于规模集成。</p>
材料体系	<p>多样化：III-V 族、硅基材料、铌酸锂、聚合物等。</p>	<p>相对统一：硅基、锗硅。</p>
标准工艺	<p>标准化程度低：不同材料和功能单元制造方法不一、工艺兼容性差，标准单元库尚不完善。</p>	<p>标准化程度高：标准单元库可直接调用。</p>
发展规律	<p>不遵循摩尔定律：受衍射极限等限制，较难通过先进工艺制程实现集成度提升和尺寸缩减。</p>	<p>遵循摩尔定律。</p>
工艺提升维度	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 设计环节：包含能带结构、器件结构、载流子输运、光场与电场协同调控等诸多物理层因素，不同功能单元设计的侧重点不同； ➢ 制造环节：以激光器速率提升为例，需高质量外延、高精度加工工艺、高可靠性集成方法，并可通过多次外延、侧面外延、控制外延片导带深度和减薄程度、控制腔长或面积等多种方式实现。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 设计环节：侧重功能需求空间、单元间联结方法、与复杂算法的协同、低功耗等； ➢ 制造环节：侧重工艺制程提升。

来源：中国信息通信研究院

（三）集成制造和先进封装是光子集成布局重点

设计软件将向光电协同、多芯片和系统级仿真设计路线演进。光

子集成的产业链条包含设计工具、制造工艺、封装工艺、测试验证、原材料及装备仪表等环节。其中，光芯片设计工具电子光子设计自动化(EPDA)是在电子 EDA 基础上融合光学仿真与工艺设计套件(PDK)而形成，设计思路与流程仿照 EDA，目前已可实现集成光路自动化布线，其发展不存在明显的技术或成本障碍，未来五年将向光电协同、多芯片和系统级仿真设计的路线演进。产业化方面，国外多为 EDA 大厂通过收并购布局 EPDA，可提供端到端流程；国内 EPDA 企业数量相对较少，通过不断探索已可支持芯片级到系统级仿真，但在物理仿真尤其有源仿真方面成熟度相对较低。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 26 重点光子集成制造与先进封装工艺

集成制造和先进封装工艺是光子集成的布局重点，本报告选取其中十项重点工艺及材料进行介绍：

1. III-V 族外延及芯片工艺

III-V 族材料由于光源和光放大特性优势，在光子领域占据重要地位。InP 材料以数据通信和电信应用为主，GaAs 材料以数据通信和射频（RF）器件为主，两者逐步向 3D 传感、激光雷达等领域延伸，应用范围不断拓展；GaN 材料在 Mini/Micro-LED 显示、RF 和功率器件方面具有广泛应用。

外延为难度之首、非标准化工艺持续按需优化，日欧美企业占据优势。III-V 族衬底晶圆以 6 英寸及以下为主，为提高规模生产效率，大尺寸为发展趋势。III-V 族芯片的工艺制程为百纳米量级，核心环节包括外延、光刻、刻蚀、沉积、退火、研磨抛光、减薄等，其中外延为难度之首。外延的核心是生长不同材料的层结构，生长过程中需对每层材料的厚度及均匀性、组分掺杂水平、应力结合力等进行精确控制，并对温度环境、机台设备和特气稳定性等进行有效控制与反复适配。III-V 族芯片制备为非标准化专有工艺，具体工序和工艺实现细节、良率等在不同厂家、不同类型的产品中均存在差异，较大程度依赖“Know-How”经验。

2. 硅基光电子芯片工艺

硅基光电子融合微电子与光子优势，市场规模提升应用领域拓展。硅基光电子具备微电子的超大规模制造、高集成度、低成本，以及光子的超高速率、超低能耗等双重优势，开辟“芯”赛道，美国、欧洲等高度重视、并投入大量资金开展硅基光电子研究。硅为间接带隙材

料，不利于制作光源，通常用于光波导等无源器件，通过其他材料掺杂可制作调制和探测有源器件，与 III-V 族材料相比，硅基光电子调制和探测器在集成度、线性度、反射、增益带宽积等方面具备优势。根据 Lightcounting 数据，硅基光电子芯片的市场规模将从 2023 年的 8 亿美元增长至 2029 年的 30 亿美元以上，当前应用场景以数据中心、电信网络为主，未来将逐步向芯片级光互连、光计算芯粒、集成传感等更宽领域拓展。

硅基光电子基于 CMOS 工艺改进优化但制造水平仍有提升空间。

硅基光电子的制造工艺尽量趋同标准 CMOS 工艺，但存在必要的改动，例如衬底采用绝缘体上硅（SOI），顶硅厚度更厚；增加了部分刻蚀、Ge 外延生长和光窗成型等工艺步骤；并对部分参数进行了优化，包括增加/优化处理工艺以减小侧壁粗糙度，面向不规则图形定制化设计图形修正方案，针对不同材料/器件高度分别优化金属电极接触等。整体而言，硅基光电子制造工艺与标准 CMOS 工艺的复杂程度基本相当，关键工艺技术已初步攻克，但规模制造水平仍有提升空间，尤其在 PDK 构件、版图验证、工艺可重复性及产量、封装生态等方面，与标准 CMOS 工艺仍存在明显差距。

我国硅基光电子制造与先进水平存在差距。硅基光电子产业竞争格局正在围绕多类型参与者构建形成，包括垂直整合厂商、Fabless 初创企业、代工厂、研究机构等，产业链关键环节包括设计、衬底、外延、制造、芯片器件、模块、系统等。其中，制造以代工模式为主，

国外领先代工厂已可实现 12 英寸晶圆平台，先进工艺节点达到 45nm，具备异质异构集成、以及光电单片集成解决方案，兼具锗硅、氮化硅等材料的工艺能力，我国硅基光电子制造与先进水平存在差距。

3. 氮化硅芯片工艺

氮化硅低损耗特性显著，助力共建“大硅光”平台。氮化硅适合制作光波导等无源器件，具有低损耗特性，易与硅基光电子、薄膜铌酸锂、钛酸钡（BTO）薄膜等材料集成。氮化硅光波导包含低压力化学气相沉积（LPCVD）和等离子增强化学气相沉积（PECVD）两种主流沉积工艺路线，其中，LPCVD 路线通过高温沉积可产生标准化学计量比的 Si_3N_4 ，性能稳定、波导表面光滑，传输损耗低；PECVD 路线的沉积温度要求低于 LPVCD，工艺兼容性更好、沉积速度快，但传输损耗较大。在与其他材料异质集成时，需综合考虑工艺流程及兼容性、波导性能和制造效率等因素。产业化方面，氮化硅整体处于商用初期阶段，全球代工平台包括比利时 IMEC、新加坡 IME、荷兰 LioniX、瑞士 LiGenTec、美国 AIM、法国 CEA-Leti 等。

4. 铌酸锂薄膜及芯片工艺

国内外薄膜铌酸锂芯片制备平台以研发线为主。铌酸锂薄膜的典型制造工艺包括离子注入、键合、退火剥离、研磨抛光等，分为 LNOI、SOI 两种衬底类型，均可实现高带宽，其中 LNOI 具有更大带宽拓展空间，SOI 具有更大规模集成优势。晶圆尺寸以 3/4 英寸为主，少数领先企业已在 6/8 英寸等更大尺寸薄膜制备环节取得突破，薄膜的典

型厚度约 300nm~1200nm，对厚度均匀性要求较高。由于材料化学稳定性高、刻蚀困难，学术和产业界正在提出和验证多种波导类型与工艺方案，传输损耗等关键指标仍在优化，规模应用有待成熟。多家国内外企业和研究机构纷纷布局，开展相关工艺与 PDK 研发，并已实现高带宽强度和相位调制器等系列样品。

5. 高端靶材工艺

靶材用于溅射镀膜改善显示性能，全球竞争格局日韩领先。光显示面板制造工艺中，通过溅射镀膜技术将靶材物质溅射到显示器表面，形成均匀紧密的薄膜，在氧化铟锡（ITO）玻璃/彩色滤光片镀膜和触控屏面板镀膜环节中，靶材质量可直接影响屏幕的色彩饱和度及亮度。根据中信证券数据，全球平面显示靶材的市场规模超过五百亿元，其中 ITO 靶材全球市场由日本日矿、三井矿业、东曹、韩国三星，以及德国和美国少数企业垄断；日矿和三井矿业几乎占据高端 TFT-LCD 市场用 ITO 靶材的绝大部分市场，以及下游触摸屏面板市场。

表 9 不同靶材在光显示中的典型应用

靶材	应用	特点
ITO	透明导电薄膜	透明性好、导电性高
铬	薄膜电路和屏蔽层	导电性高、机械稳定性好
钼	液晶和 OLED 显示中用于电极和连接层	耐高温、化学稳定性强
铝	反射层和导电层	反射率优异、电阻率低
铝铜	增强导电薄膜的机械性能和热稳定性	保持良好导电性的同时提供额外的机械强度
铝钨	提升导电性能和稳定性	在传统铝靶材基础上提供改进的电学特性
铜	形成导电层，尤其用于高端显示器件	导电性高、热稳定性好

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

6. 硅基微显示

硅基微显示技术结合 CMOS 工艺减少功耗与体积，并提升显示性能。硅基微显示技术以硅基材料作为背部驱动板，包括像素电路、行列驱动、数据转换等功能模块。核心优势在于可利用成熟的 CMOS 工艺，实现在更小尺寸上集成显示单元，提升像素点密度，甚至进一步集成信息处理和存储等功能单元。典型的硅基微显示产品包括硅基 OLED、硅基 Micro-LED 和 LCOS 等，对比如表 10 所示。硅基微显示技术由于具备高分辨率、低功耗、小型化和高亮度等特性优势，在增强现实（AR）眼镜、头戴式显示器、高端大屏投影、全息成像、车载抬头显示、大容量交换调度等领域极具发展前景。

表 10 硅基微显示技术对比

硅基微显示技术	成熟度	亮度	对比度	功耗	设备尺寸	寿命
硅基 OLED	中	中	高	低	小	中
硅基 Micro LED	低	高	高	低	小	长
硅基液晶 LCOS	高	高	中	中	大	中

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

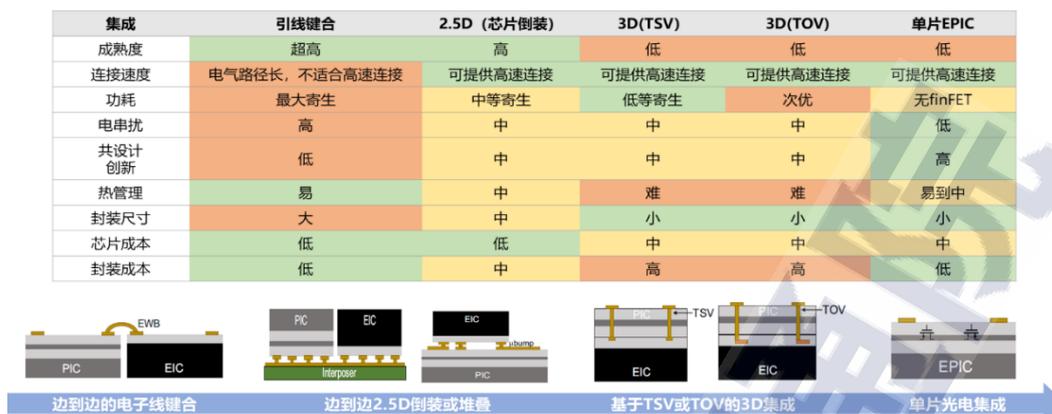
7. 异质集成工艺

硅基异质集成是光子集成发展终极目标。每种光子材料均有各自的局限性，且单一材料体系性能提升速度缓慢，光子集成开始由单材料集成向多材料异质集成演进。以硅基光电子为基础平台，与 III-V 族、氮化硅、薄膜铌酸锂，以及钙钛矿、石墨烯等新型材料异质集成，可充分发挥各种材料的优异特性，实现整体性能最优。异质集成包含晶圆级键合和异质外延生长两种主要方式。晶圆级键合将两块同质/

异质晶圆通过化学物理作用、光刻对准等方式紧密结合在一起，再制造芯片结构，主要挑战为晶圆尺寸不匹配、表面处理要求高、无法选用已知良品芯片等，预计为中短期内主流技术路线。**异质外延生长**是在已制作好的晶圆上，选区外延生长其他材料后再制造芯片结构。硅基异质外延生长是最接近传统 CMOS 工艺的异质集成路线，为长期发展目标，但实现难度较大，需材料、结构、工艺等系列基础性创新突破，预计仍需十年以上走向成熟。

8. 异构集成/混合集成工艺

异构/混合集成为重要发展方向。异构/混合集成包括光芯片与电芯片之间的集成，以及光芯片与光芯片之间的集成。如图 27 (a) 所示，**光芯片与电芯片之间的**连接方式由传统引线键合逐步向 2.5D 芯片倒装、3D 硅通孔 (TSV) /TOV 演进，2.5D/3D 集成均可缩短光电芯片间电学互联长度、减小封装尺寸和寄生效应，实现更高性能与集成度，其中 3D 集成将光电芯片在垂直方向上堆叠，可实现更短互联长度、更高集成密度和更优高频性能，但由于散热问题尚未解决，当前阶段以 2.5D 集成为主，台积电、英特尔等较早布局了 2.5D/3D 集成。如图 27 (b) 所示，光芯片与光芯片之间的异构/混合集成主要用于解决 III-V 族激光器和硅基光电子芯片的连接问题，集成结构亦由平面转向立体，包含多种 2.5D/3D 集成封装方式，其中 3D 倒装为当前主流技术方案。



(a) 光芯片与电芯片之间



(b) 光芯片与光芯片之间

来源: Roadmapping the Next Generation of Silicon Photonics³²

图 27 异构/混合集成技术路线比较及演进趋势

9. 光电单片集成工艺

光电单片集成挑战诸多仍处探索阶段。光电单片集成具有低功耗、易封装、高可靠等优势，是未来发展趋势和理想解决方案，但实现难度大开发成本高，相关工艺研究及优化虽已得到多次验证，但仍处早期发展阶段，预计短期内不会大量应用。光子与电子物理特性的差异会导致两者在单片集成协同设计时顾此失彼，针对这一问题美国 AIM

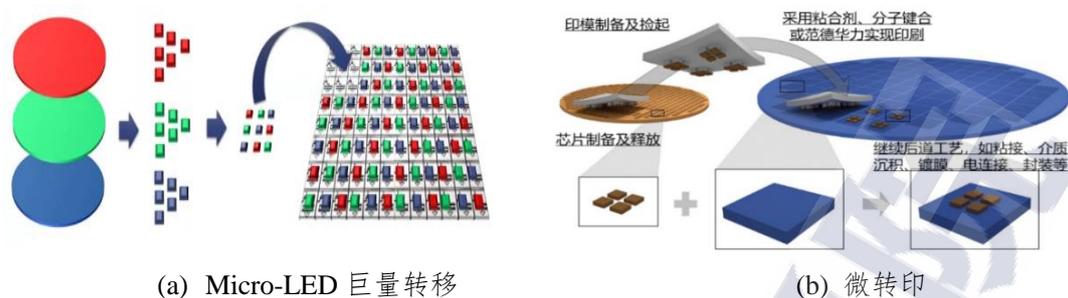
³² Sudip Shekhar, et al. Roadmapping the Next Generation of Silicon Photonics[J]. Nat Commun, 2024, 15(1):751.

等已启动构建“设计、制造、封测一体化”工艺平台，开发包含布线、模型、设计规则检查和原理图等在内的 PDK，建立有源中介层平台以支持打线、光纤贴装、倒装芯片 CMOS/球栅阵列封装（BGA）和 2.5D 激光器贴装等封装工艺，提供测量设计套件及测试服务。

10. 巨量转移与微转印

巨量转移是 Micro-LED 走向规模量产的关键工艺之一。巨量转移技术用于将大量微米量级的 LED 芯粒从生长基板高效、精确地转移到目标驱动基板上，以构建高密度显示阵列。由于涉及数十万甚至上千万颗芯粒的转移，且转移精度需满足 $< \pm 0.5 \mu\text{m}$ ，典型转移效率 ≥ 2 万片/秒，典型转移良率不低于 99.9999%，对像素错误的容忍度极低，工艺挑战性较高。巨量转移工艺追求效率与成本的双重优化，目前业界主流技术路线包括大尺寸印章转移和激光类转移等。

微转印技术类同巨量转移，兼具芯片倒装和晶圆级键合优势。微转印技术可规模并行取放不同材料、不同工艺节点和技术方案的芯粒，在硅基光电子晶圆上实现芯粒堆叠，兼具芯片倒装（良品可选、后端集成）和晶圆级键合（高产能、高效耦合）两者优势，欧洲 X-Celeprint 已启动研发。微转印技术的主要挑战在于对芯粒和基底表面处理要求非常高，针对部分特殊材料和结构工艺仍有待改进，需达到 $< \pm 0.5 \mu\text{m}$ 对准精度、每掩膜板数千器件、耦合效率 $< 0.5 \text{dB}$ /接口的高要求，目前产业链尚不完善。



(a) Micro-LED 巨量转移

(b) 微转印

来源：Yole³³，INSPIRE project&OFweek³⁴

图 28 巨量转移与微转印技术示意

（四）垂直整合、细化分工等多种制造模式并存

光子材料的工艺制造包含垂直整合（IDM）、细化分工或通用代工（Fabless+Foundry）、以及介于两者之间的 Fab-lite 三种典型模式。InP、铟酸锂、SiO₂/玻璃、有机物等材料体系以垂直整合模式为主。该类材料市场需求量相对有限、制造标准化程度低，核心制造工艺较大程度决定芯片器件性能。以 InP 材料为例，美日 IDM 头部企业通过引领高端产品研发建立市场优势，并通过系列并购重组强化产业链垂直整合能力。但随着需求规模和制造难度的不断上升，InP 亦呈现出向大尺寸晶圆拓展的趋势、以及向标准制造工艺通用代工模式转变的可能性。硅基光电子、SiN、GeSi 等材料体系以通用代工模式为主，产线建设成本高、投入大，传统集成电路代工厂可兼容硅基光电子芯片制造。GaAs、GaN 等材料体系采用 Fab-lite 模式，除光子产品外，该类材料与射频 RF 和功率器件等共产业链，市场需求量大可支撑通

³³ <https://www.yolegroup.com/>

³⁴ <https://laser.ofweek.com/2022-04/ART-8300-2400-30555944.html>

用代工厂专注于工艺研发；同时，部分企业自身聚焦关键或可完成的环节，其他环节委外加工，该模式兼具轻资产化和自主掌控产业链关键环节的优势。未来，大规模异质异构集成、光电单片集成阶段，预计将以通用代工模式为主。

	IDM模式为主	Fab-lite模式	Fabless模式为主
材料平台	■ InP、砷酸铟、SiO ₂ 、有机物	■ GaAs、GaN	■ 硅光、SiN、GeSi、LCoS
原因分析	<ul style="list-style-type: none"> ■ 需求规模低 ■ 制造标准化程度低 ■ 功能简单，核心制造工艺较大程度决定芯片性能 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 兼具轻资产化及对产业链各环节的关键技术和自主控制能力 ■ 需求规模可支撑代工平台 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 可利用CMOS制造产线 ■ 产线建设成本高、投入大
发展模式	<ul style="list-style-type: none"> ■ 企业通过系列并购重组，增强对产业链的垂直整合能力 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 自主完成关键或可完成的环节，其他环节委外加工 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 芯片企业专注设计；Foundry专注工艺，传统集成电路Foundry已兼具硅光平台

大规模异质异构集成、光电单片集成阶段，代工模式为主

来源：中国信息通信研究院

图 29 不同光子材料的典型制造模式

（五）各材料体系与异质异构集成工艺同步演进

III-V 族虽为成熟材料体系，为满足各类新型应用需求，业界仍将不断挖掘和优化其制造工艺，对外延生长厚度及均匀性、光刻与刻蚀均匀性、粗糙度等提出更加苛刻的指标要求。未来 5~10 年，InP 工艺平台的刻蚀深度均匀性预计将提高至<0.5%，侧壁粗糙度提高至<2nm，刻蚀槽窄至 50nm，介质厚度均匀性提高至<0.5%；激光器线宽和波长调谐范围到 2030 年提升至 2kHz、100nm 量级，2035 年之后进一步向 1kHz、150nm 量级挺进。

硅基光电子的工艺要求方面，从 5 年前的 8 英寸晶圆 130nm 节点演进至当前的 12 英寸晶圆 90nm 节点，预计 2030 年将普遍达到 12

英寸晶圆 45nm 节点，之后工艺节点可能会进一步升级，如 2035 年达到 12 英寸晶圆 28nm 节点。器件带宽方面，从 5 年前的 15GHz~40GHz 演进到当前的 50GHz 以上，未来通过大带宽配套电芯片拉动或异质集成还将进一步提升带宽。产品与应用方面，5 年前硅基光电子主要用于电信和数据中心领域，典型产品如 100Gb/s 可插拔光模块。当前智算中心和高性能计算应用兴起，带动 400/800Gb/s 可插拔光模块、光计算芯粒和 CPO/OIO 等新产品出现。预计 2030 年可插拔光模块速率将发展至 1.6/3.2Tb/s，片上光互连网络更加成熟，同时用户健康领域新型传感产品如智能手环将取得应用，光计算互连一体化特征明显。2035 年车载传感和生物医疗领域代表产品如激光雷达和光谱检测将进入应用阶段，晶圆级光互连网络开始成熟。未来传感领域极具潜力，片上实验室将是重要发展方向。

氮化硅的工艺要求更加优化，厚度均匀性和侧壁粗糙度将分别从 5 年前的 $\pm 3\%$ 、几个 nm 提升到 2035 年的 $\pm 0.5\%$ 、小于 0.5nm。预计 2035 年，波导损耗降低到小于 0.001dB/cm，比五年前优化 2 个数量级。应用方面从研发中试、小规模光连接到未来的大规模多领域应用，生物医疗是重要潜在发展方向。

薄膜铌酸锂芯片器件当前带宽为 70~100GHz，预计 2030 年将提升至 150~200GHz，2035 年提升至 150~200GHz；发展阶段将由目前的研发中试迈向实用，预计两年内优先在光连接领域实现小规模商用，五年内实现大规模商用，并逐步向光计算和光采集等领域拓展。

硅基光电子结合**异质异构集成技术**可大幅提升集成规模与器件性能。预计将从 2.5D/3D 集成、中等规模异质异构集成发展到 2035 年的大规模异质异构集成，并进一步实现中等规模光电单片集成。

		5年前	当前	2030年	2035年	
III-V族	晶圆尺寸	InP: 3/4英寸, GaAs: 4/6英寸 GaN: GaN衬底2~4英寸, SiC衬底4/6英寸, 蓝宝石衬底4英寸, Si衬底8英寸		InP: 6英寸, GaAs: 8英寸 GaN: GaN和蓝宝石衬底6~8英寸, SiC衬底8~12英寸, Si衬底12英寸	InP: Si衬底8英寸, GaAs: 12英寸	
	InP工艺要求		外延厚度均匀性±5%	外延厚度均匀性±1%, 侧壁粗糙度<5nm	外延厚度均匀性±0.2%, 侧壁粗糙度<2nm	
	InP调制带宽	15~40GHz	70GHz	100GHz	120GHz	200GHz
	InP激光线宽/调谐范围 发光效率	100kHz 40nm 30%		20kHz 80nm 40%	2kHz 120nm	1kHz 150nm >60%
硅光	工艺要求	8英寸晶圆, 130nm节点 15~40GHz	12英寸晶圆, 90nm节点 50GHz以上	12英寸晶圆, 45nm节点 通过大带宽芯片拉动或异质集成进一步提升带宽	12英寸晶圆, 节点可能升级	
	产品演进	100G可插拔模块	400G/800G可插拔模块 光计算芯粒 OIO/CPO芯粒	1.6T/3.2T可插拔模块 光计算互连一体化 智能手环 片上光互连网络 用户健康	激光雷达 光谱检测 晶圆级光互连网络 片上实验室	
	应用领域	电信、数据中心	智算中心、高性能计算		车载传感、生物医疗 传感	
氮化硅	工艺要求	厚度均匀性±3%, 侧壁粗糙度几nm	厚度均匀性±3%, 侧壁粗糙度几nm	厚度均匀性±1%, 侧壁粗糙度<1nm	厚度均匀性±0.5%, 侧壁粗糙度<0.5nm	
	代工产品损耗 成熟时间及应用领域	最小0.1dB/cm 研发中试	最小0.02dB/cm 小规模、光连接	最小0.005dB/cm 大规模	<0.001dB/cm 生物医疗	
薄膜铌酸锂	带宽		70~100GHz	150~200GHz	200~250GHz	
	成熟时间及应用领域	实验室	研发中试	小规模(直调直检/相干)	大规模(直调直检/相干)	由光连接进入计算、传感更多领域
以硅光为基础的多材料体系	异质异构技术引入		常规 2.5D/3D	微转印 晶圆级键合 中等规模 III-V族QD/Si 异质异构集成	大规模 中等规模 异质异构集成 光电单片集成	

来源: IPSR-I Roadmap 2024³⁵, 中国信息通信研究院

图 30 基础工艺未来五至十年发展趋势

八、光电融合研究进展与产业影响

(一) 光子与电子技术呈现协同互补融合关系

光子与电子作为信息技术的两大基础性支撑，物理特性存在明显差异、各具优劣势。光子在粒子特性上属于波色子，不带电荷、无静止质量，具有高带宽、低能耗、并行性、低串扰和抗电磁干扰等优势，但难以实现信息领域所需的全部功能；电子在粒子特性上属于费米子，带有负电荷和非零的静止质量，具有灵活性好、数字能力强和集成度

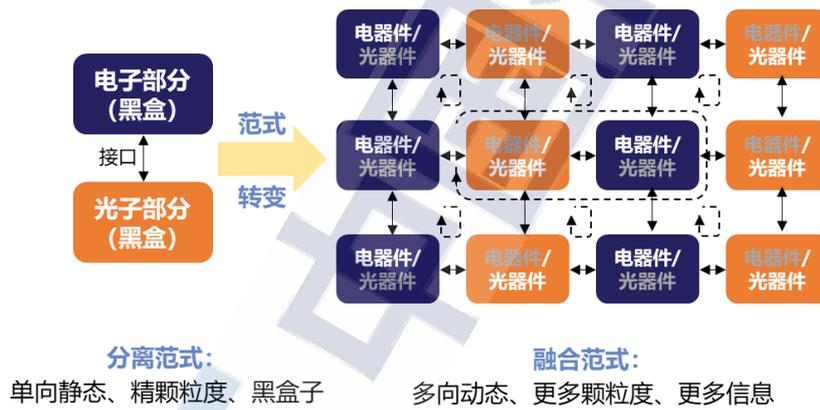
³⁵ MIT, PhotonDelta. Integrated Photonics System Roadmap – International (IPSR-I Roadmap), 2024

高等优势，但面临带宽、功耗和易受电磁干扰等挑战。

表 11 光子与电子物理特性比较

比较内容	电子	光子
粒子特性	费米子	波色子
静止质量	m_0	0
运动质量	m_e	$h\nu/c^2$
电荷	-e	0
粒子间作用	强	弱
处理方式	串行	并行
传播特性	不能在自由空间传播	可在自由空间传播
时间特性	有时间不可逆性	有一定类时间可逆性

来源：光通信研究³⁶



来源：华中科技大学³⁷

图 31 光电融合带来范式转变

融合是光子和电子技术发展需求的双向奔赴。从时间脉络来看，光子技术的发展晚于电子技术，虽然在部分领域实现了对电子的替代，但两种技术不是“非此即彼、代际演进”的完全替代关系，近年来呈现出越来越强的融合趋势。如图 31 所示，光子和电子技术由早期单

³⁶ 张新全, 肖希, 余少华. 信息光电子“微电子化”技术进展和发展探讨[J]. 光通信研究, 2023, 240(06).

³⁷ <https://www.ephic.net/>

向静态、精颗粒度、黑盒子的“分离范式”，向多向动态、更多颗粒度和更多信息的“融合范式”演进。光电融合可充分发挥光子、电子各自优势，共同推动系统级性能（速率、带宽、算力、能效等）提升，已成为信息技术创新发展和持续演进的重要路径。

（二）光电融合包含功能协同和硬件一体维度

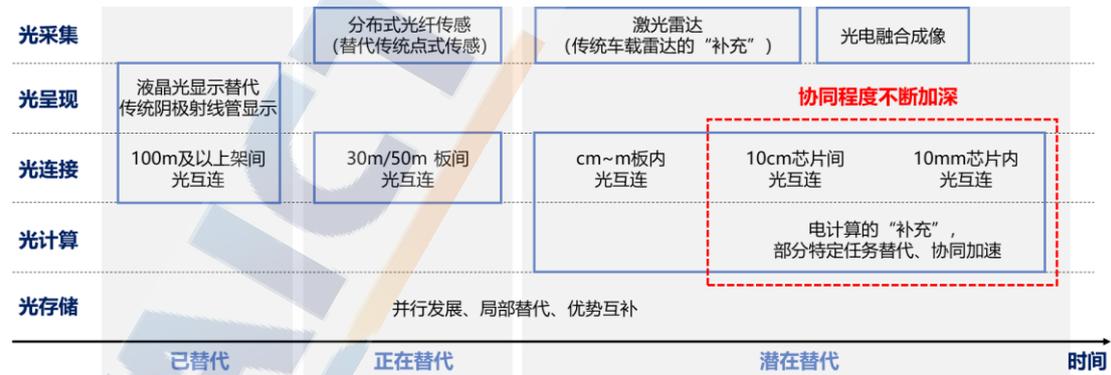
光电融合包含功能和硬件两个维度³⁸，早期光电融合以功能协同、硬件分立为主，即光子和电子以相对独立的硬件形态实现功能上的相辅相承；当前阶段，光电融合在功能协同方面持续深化，同时硬件一体成为研发热点，并逐步向“功能+硬体”深度融合趋势演进³⁹。

功能协同化方面，早期的光电融合为浅层次松散协同。例如，一是光连接率先在数百及上千公里城域和干线、百公里数据中心之间互联、数十公里及以内数据中心内部互联等领域替代铜缆电连接，实现长距离大带宽传输。二是全光交换一方面可实现波长级大颗粒调度，与小颗粒电交换分场景部署，实现系统最优的成本与功耗；另一方面通过光线路侧性能改善，可降低收发端侧电信号的处理要求，实现“非摩尔补摩尔”；三是激光雷达对目标轮廓的捕捉较为精确，但易受气候、光照、探测距离等因素影响，传统传感器具有探测距离远、全天候全天时等优势，但成像效果不佳，两者结合可在目标信息获取方面

³⁸ 张新全, 肖希. 集成电路发展与光电融合探讨[J]. 光通信研究, 2024.

³⁹ Min Tan, et al., Circuit-level convergence of electronics and photonics: basic concepts and recent advances[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2022, 15(2): 16.

实现互补。**四是**光纤分布式传感在部分线性、长距、多参量应用场景替代了传统点式传感器，提供更高测量精度和更长测量距离，推动感知基础设施能力和范围全面提升。**五是**光盘存储具备寿命长、安全性高、能耗低等优势，但存储容量较小，适合低访问频次、高重要性数据，可与电、磁存储分场景按需配合使用。**近年来，光电融合逐步向深层次紧密协同发展。**一方面，光连接由宏入微，从 100m 及以上距离逐步进入机架间、板卡间、板卡内、封装内和芯片内，连接媒质由光纤向光波导延伸，突破铜线电互连物理性能局限，驱动算力由服务器到服务器转向芯片到芯片⁴⁰；另一方面，光计算推动计算架构向非冯-诺伊曼拓展，以光电神经网络为例，由马赫-增德干涉仪构成的基本计算单元组合成为光信号处理阵列，通过相位控制可实现任意么正矩阵运算，辅以放大器和衰减器等可实现任意矩阵运算，在 AI 等领域作为协处理器对电计算“补充、加速”，共同完成计算任务。



来源：中国信息通信研究院

图 32 功能维度光电融合

⁴⁰ 张新全, 肖希. 集成电路发展与光电融合探讨[J]. 光通信研究, 2024.

硬件一体化是光电融合基础与关键。光电融合在催生新一代功能应用蓬勃发展的同时，也成为驱动新一代制造技术创新演进的源动力。硬件一体化是指通过有效的设计和工艺，将光、电芯片单元集成在同一封装内或同一衬底上，**技术路径包括异构/混合集成、光电单片集成。**其中光电单片集成是光电融合硬件一体化的理想解决方案，但技术难度大、成本高，2.5D/3D异构集成预计可更快走向实用。

硅基将成为光电融合的主流集成平台和重要技术路径。当前，微电子技术已实现大规模集成化，光子技术仍处于中小规模集成化阶段，为实现光电融合硬件一体化，光子集成技术需在集成度、标准化和大规模低成本制造等方面充分借鉴微电子技术的发展经验⁴¹。材料平台方面，光子集成虽有多种材料体系，但考虑硅基材料与集成工艺在微电子领域已有数十年发展基础，且硅基光电子可在同一衬底上实现大部分光子器件、集成度目前已达 $10^4\sim 10^5$ ，随着光电异构/混合集成、多材料异质集成等先进工艺的日益成熟，可解决光源、光放大、高带宽等问题，集成度将进一步提升，故硅基将成为光电融合的主流集成平台和重要技术路径。

国际头部企业积累深厚已掌握部分先进工艺，并成功验证相关产品，具备光电融合的基础条件。主要技术方案包括先进集成封装、RFSOI+硅光单片集成、GeSi BiCMOS+硅光单片集成。具体来看，TSMC 开发光子引擎 COUPE 平台，覆盖可见光、近红外和红外波段，

⁴¹ 张新全，肖希. 集成电路发展与光电融合探讨[J]. 光通信研究, 2024.

利用芯片堆叠技术将光电芯片 3D 集成,并将于 2026 年集成至 CoWoS 封装;提出用于计算+通信的集成光互连系统 iOIS,采用中介层作为高性能计算和网络应用的集成平台。Global Foundries 推出 GF Fotonix™硅基光电子平台,布局 90WG、45CLO 工艺,基于 12 英寸晶圆制造和工艺控制,可实现模拟与数字电芯片、硅光器件的单片集成。此外, Tower Semiconductor、英特尔、IHP 等也着力布局开发基于硅基的光电融合集成工艺。光电融合涉及产业链环节更广,除制造工艺外,协同设计也将成为克服光电融合芯片设计复杂性的关键之一。

未来,光电融合将向“功能+硬体”深度协同的方向发展演进。硬件上可通过异构/混合集成、光电单片集成等实现一体化,同时功能上也在同一封装或芯片内实现协同化,如片上或晶圆级光互连、光电深度融合计算架构等。国内外多家头部企业和知名研究机构正积极开展相关研究,例如,2023 年 10 月清华大学面向低能耗人工智能关键问题,提出光电深度融合计算架构,研究成果发表于国际顶级期刊《Nature》⁴²;2024 年 1 月日本电信运营商 NTT 与美国英特尔宣布合作开发基于光电融合技术的半导体产品等。

（三）后摩尔时代重要趋势深远影响产业格局

光电融合是后摩尔时代重要趋势,以系统优势满足信息产业新型应用需求。自上世纪六十年代以来,微电子集成电路技术快速发展,晶体管尺寸遵循摩尔定律预测的轨迹持续缩减,助力实现更高集成度

⁴² <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06558-8>

和更低功耗，目前特征尺寸已达3nm及以下。然而受物理极限和经济因素等限制，晶体管尺寸的进一步缩减面临极大挑战，后摩尔时代已然到来，其思想是将集成电路与其他技术相结合，另辟蹊径实现更丰富的功能性能。IEEE发布的国际集成电路发展路线图（IRDS）⁴³，提出光子技术是超越摩尔、系统与架构、系统外互联等方面的重要方向。光电融合是后摩尔时代重要趋势，将光子技术与集成电路相结合，可充分发挥光子电子两者优势，满足信息产业不断提升的应用需求。

超越CMOS方向为光电融合发力重点。光电融合可在功耗、带宽、时延等多方面为集成电路提供助力，不仅在当前业界着力的扩展摩尔方向锋芒初露，在超越CMOS方向亦存在诸多可能性，为未来发力重点。**扩展摩尔方向**，通过异质异构集成引入光子技术，预计早期以光互连切入，未来进一步引入光计算等，有望实现处理器芯片、存储芯片、光芯片的“巨集成”⁴⁴，整合更多功能、更大带宽、更低时延和功耗。**超越CMOS方向**，通过引入光子技术，将在新材料、新结构、新机理等多方面带来功能性能的颠覆性突破创新。

光电融合将分阶段推进，并在系统架构、产业格局等多方面产生深远影响。第一阶段（未来3~5年），光子技术市场规模将呈现数量级跃升，集成制造环节仍执产业链“牛耳”，光电融合以电为基础、将光融入，业界已具备一定基础条件，传统集成电路工艺平台更容易掌

⁴³ https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2022/2022IRDS_WP-MtM.pdf

⁴⁴ 张新全，肖希. 集成电路发展与光电融合探讨[J]. 光通信研究, 2024.

握光电融合芯片制造能力。**第二阶段（未来 5~8 年）**，随着融合程度不断加深，不仅停留于芯片层面，系统架构、设计工艺等多层面均需适应性调整。**第三阶段（未来 8~10 年）**，引入新材料、新结构、新器件、新原理、新系统等创新方案以推动持续发展。例如，业界正在研发试验石墨烯、过渡金属硫族化合物、二维光子晶体、超表面材料等多种新型材料，以持续优化关键性能、简化集成复杂度。



来源：国家信息光电子创新中心⁴⁵，中国信息通信研究院

图 33 光电融合发展阶段

九、信息光子技术与应用前景展望

（一）细分领域发展迅速应用场景进一步拓展

以光采集、光连接、光算存、光呈现为代表的光子技术具备万亿级市场空间，贯穿信息生命周期全过程，对提升国家科技实力、促进产业转型升级和推动经济社会发展具有重要战略意义。在人工智能、6G、生物医疗等各类新兴业务及应用需求牵引驱动下，以及新型光子材料与先进制造封装工艺有效支撑下，光子技术迭代将明显加速，满足更多元化场景需求，市场规模也将持续增长。

⁴⁵ 张新全，肖希. 集成电路发展与光电融合探讨[J]. 光通信研究, 2024.

光连接持续向更高性能、更多场景迭代延伸。高性能方面，以人工智能为代表的等各类业务应用驱动光连接持续向高速率、大容量、高可靠、低能耗、低时延等方向发展演进，在新材料、新设计、新工艺、新波段的协同创新推动下，光连接速率即将迈进 T+b/s 时代，并通过更宽频谱拓展和新型光纤路径实现单纤 100+Tb/s 传输容量。多场景方面，芯片级光互连、卫星光通信、水下可见光、车内光网络等新兴应用不断涌现，推动光连接逐步泛化为由宏入微的全尺度连接技术，在信息化全域的重要性日益凸显。

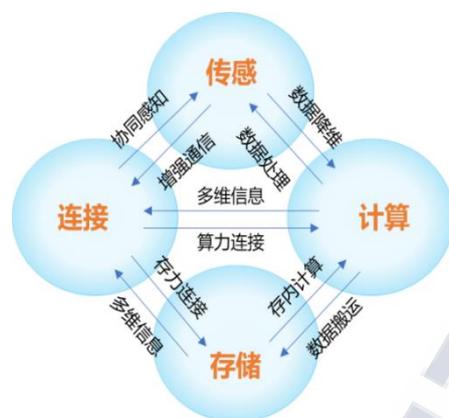
光算存持续向集成式、一体化路线发展。基于硅基光电子平台的集成光计算系统具有 CMOS 工艺兼容、集成度高等优势，将成为光计算主流技术路线，计算能力及优势已得到多次实验证明。随着异质异构集成技术进一步成熟，一方面能够大幅提高计算系统集成度，另一方面通过集成基于其他材料的电芯片/存储器等，可助力构建光计算存储互连一体化系统。展望未来，光算存技术需要在材料、结构、机理等多方面积极创新，提高产业链成熟度、培育健康产业生态，充分挖掘其在金融、能源、车载计算、移动互联网等新领域的应用潜力，由技术产业应用协同推动光算存蓬勃发展。

光采集持续向集成化、分布式路径演进。集成化方面，随着激光器、探测器、数据处理器等集成技术发展，集成光传感器进一步向高精度、高灵敏度、小尺寸、低功耗、低成本趋势演进，并衍生出微纳光传感、柔性光纤传感、多维形状传感等多种新形态，在汽车电子、

生物医疗、工业智造、资源探测等领域得到更广泛应用。分布式方面，提升空间分辨率、响应时间、传感距离等关键性能参数的同时，光传感还将实现多场景多功能融合，如通感算一体化、多机理多参数融合传感、智能感知与数据处理一体化将推动其向电力系统监控、地质资源勘探、智慧城市建设等领域加速深化部署应用。

光呈现持续向提升人类视觉体验方向升级。光显示方面，更高分辨率、更广色域和色彩准确度、更高动态范围和对比度、更快刷新率和响应时间等显示性能持续提升；光成像方面，成像精度、空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率不断提升，信息维度日益丰富；显示与成像技术的结合将实现更具沉浸、真实和交互感的呈现体验。光呈现技术的升级迭代依赖材料、工艺、装备等多环节协同进步，与传统 CMOS 工艺相结合，可进一步提升光呈现器件的集成密度、缩小像素点距，从而实现更复杂、更清晰的呈现系统。

交叉融合方面，一是信息光子各细分领域的跨域融合交叉创新趋势凸显，“计算+连接”、“存内计算”、“通感一体”、“感算融合”等新范式不断构建，满足分立领域无法支撑的极致需求，加速系统级创新与新应用裂变。**二是光电融合成为后摩尔时代重要选项**，预计将由集成电路巨头引领发展，并在扩展摩尔和超越 CMOS 方向重点发力。信息光子各领域之间、以及光电之间的融合协同处于初步研究或应用探索阶段，预计未来几年将逐步渗透深化。



来源：中国信息通信研究院

图 34 信息光子各细分领域呈现交叉融合趋势

（二）技术产业发展需要政产学研用协同推动

信息光子分支领域众多，五十余年以来传统方向持续演进、新兴方向不断涌现，整体处于成熟与新兴技术、传统与未来产业交织融合的多样化发展阶段。在全球技术产业发展中，美、欧、日、韩等主要经济体均高度重视光子能力构建，围绕包含信息光子在内的光学与光子技术产业发展进行了系统部署，包括出台战略政策、推动技术研发、建设工艺平台、培育产业生态等。美国在高速光电芯片、硅基光电子工艺平台、锗硅工艺平台、先进封装与异构集成、制造装备、有机发光材料等产业基础环节，以及芯片级互连、卫星光通信、高性能光传感、光电融合等新兴方向占据主导地位。

经过长期努力，我国在信息光子领域已取得跨越式发展，未来五到十年，仍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，“政产学研用”各类主体共同打造融合式创新，实现信息光子技术产业的协同发展。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。立足“固本拓新、走实向深”，持续强化锻造我国在信息光子传统及新兴方向的发展优势。**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、加速创新成果转化，夯实共性基础支撑，显著提升国际竞争力。**深化生态建设与应用牵引**，推动信息光子技术在各行业的广泛应用与深度融合，持续通过应用场景打造牵引形成新质生产力、进一步赋能千行百业，为加速推进新型工业化和中国式现代化建设提供新模式、新引擎。

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

