

证券研究报告
通信/行业深度报告
2025年6月24日

光通信：AI算力中心的神经网络

证券分析师：唐仁杰 S0370524080002

行业评级：增持（首次）

摘要

- **单一芯片算力无法满足AI训练需求：模型所需算力与单芯片算力之间的巨大差距。**例如GPT-3每次训练迭代需约4.5 EFLOPS计算，但单卡GPU仅提供数十TFLOPS级算力，差距高达百万倍。为突破计算墙，使用数十甚至上百GPU进行并行计算（分布式训练）。AI算力集群受制于“通信墙”：通过分布式训练部分解决了算力墙和存储墙后，通信墙随之凸显。大模型并行需要大量节点间通信（如AllReduce梯度同步、AlltoAll等），通信性能直接决定训练效率
- **算力基础建设方面，截至2024年，中国算力总规模为280EFLOPS，2020年至2024年期间年复合增长率为20%。**根据弗若斯特沙利文预测，中国算力规模将从2024年的280EFLOPS增长至2029年的648.3EFLOPS，2024-2029年期间仍维持18.3%的年复合增长率。需求方面，AI创新浪潮下，云端智能平台及数字基础设施解决方案市场规模持续增长：**预计2029年，中国云端智能平台、数字基础设施规模将分别增长至1.8万亿、1.3万亿元。**
- **从国内算力基础设施市场规模来看，网络资源市场规模占比仅次于算力资源。**中国算力基础设施规模从2020年的3,397亿元增长至2024年的6,144亿元。2024年，国内计算资源市场规模为3858亿元，为基础设施占比最大项。网络资源市场规模为1516亿元，仅次于计算资源，约占基础设施市场规模比例为24%。
- **铜互连技术成熟、成本较低，用于服务器机箱内部、机架内等短距离高带宽连接场景。**在人工智能数据中心（AIDC）中，GPU、CPU等加速器之间以及服务器与Top-of-Rack交换机之间的短距离互连传统上大量采用铜质连接，其优势在于无需复杂的光电转换、初始投入成本低且安装维护相对简单。然而，随着芯片通信速率逼近极限，铜介质信号传输面临固有瓶颈，高频下电阻与介电损耗导致信号完整性下降和严重的传输损耗，这不仅限制了带宽和距离，还将相当一部分信号功率转化为热量。光互连是利用光纤等介质传输光信号的互连方式，通过光收发模块将电信号转换为光信号进行高速远距离传送。**光互连克服了铜互连在频宽和距离上的物理限制，光信号在光纤中传输损耗极低、抗电磁干扰，能够在更高频率下保持信号完整，适合远距离、大带宽数据通信**
- **AI集群大小已经突破了单个数据中心的物理占用空间所能实现的极限，推动了对多站点AI集群（Scale-out）的需求。**Scale up和Scale out通过增加更多的算力资源来实现更大的承载能力。区别在于Scale up从软件角度来看是一台计算，互连必须非常可靠，且尽可能减小延迟。但当数据速率增加至200Gbps时，达到铜缆物理极限。而Scale out通过多层交换机组成，其任务被拆分成多个计算资源，因此横向扩展实际上是一个大规模网络，且距离较远。所以，随着高速率、低延迟且距离增大的需求逐渐增大，无论是Scale-up还是Scale-out，光互连的必要性大幅提升。
- **数据中心正经历高速化、智能化、低功耗与低成本的核心变革，驱动光通信及硅光技术成为不可逆的大趋势。**800G规模化商用部署已启动，交换机芯片吞吐量将从2023年的51.2Tb/s跃升至2025年的102.4Tb/s，并加速向800G/1.6T升级；与此同时，光互连功耗贡献首次超越交换机芯片（400G模块初期功耗10-12W，目标8-10W），迫使行业采用低功耗调制器与光引擎-交换机芯片共封装方案
- **光模块市场近年来稳步增长，主要得益于对高速数据传输以及人工智能、云计算及5G等数据密集型应用的需求。**2020年至2024年期间，全球光模块销售收入从112亿美元增至178亿美元，复合年增长率为12.2%。数据中心和云计算快速发展的带动下，高速光模块尤其是800G及以上的光模块发展迅猛。800G光模块作为最先进的量产技术，2020年至2024年的复合年增长率高达188.1%，**预计2024年至2029年将保持19.1%的稳步增长。与此同时，代表下一代预研技术的1.6T光模块在更高带宽需求、更低功耗要求及人工智能驱动数据处理的需求推动下将迎来爆发式增长，预计2024年至2029年的复合年增长率将达到180.0%**
- **相关公司：**我们认为，随着AI算力中心集群扩张，无论是Scale up还是Scale out方案均对高速率、低功耗连接有更高要求，高速率、短、中长距离光连接及硅光、CPO封装需求随着数据中心基础设施建设加速放量，有望带来更大市场。关注高速光模块及适配CPO方案的激光器、调制器及无源器件核心器件设计、生产厂商：**华工科技（000988.SZ）、联特科技（301205.SZ）、源杰科技（688498.SH）、光库科技（300620.SZ）、新易盛（300502.SZ）**
- **风险提示：**高速光模块技术发展路线较多，各细分市场如调制器材料、光源技术路线不确定性较大；AI算力中心建设周期较长，存在明显周期性；AI技术路线变化导致算力中心Capex不及预期；海外需求影响较大，且部分组件依赖海外巨头，地缘冲突导致企业盈利受损；各公司前期研发成本较高，技术门槛较高导致利润不及预期



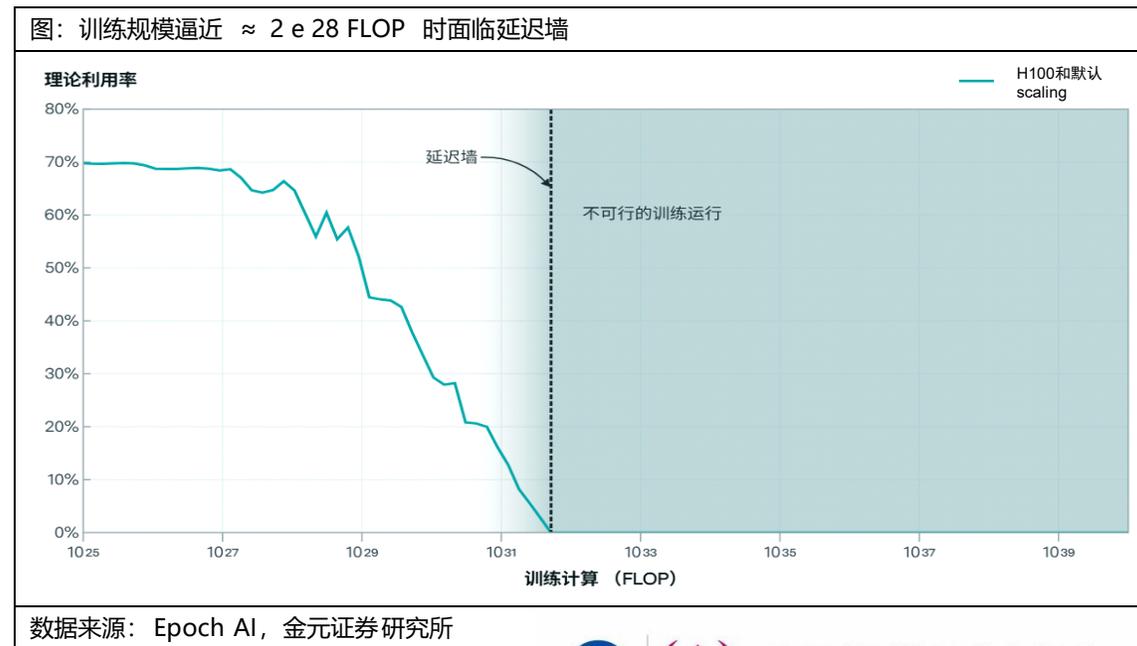
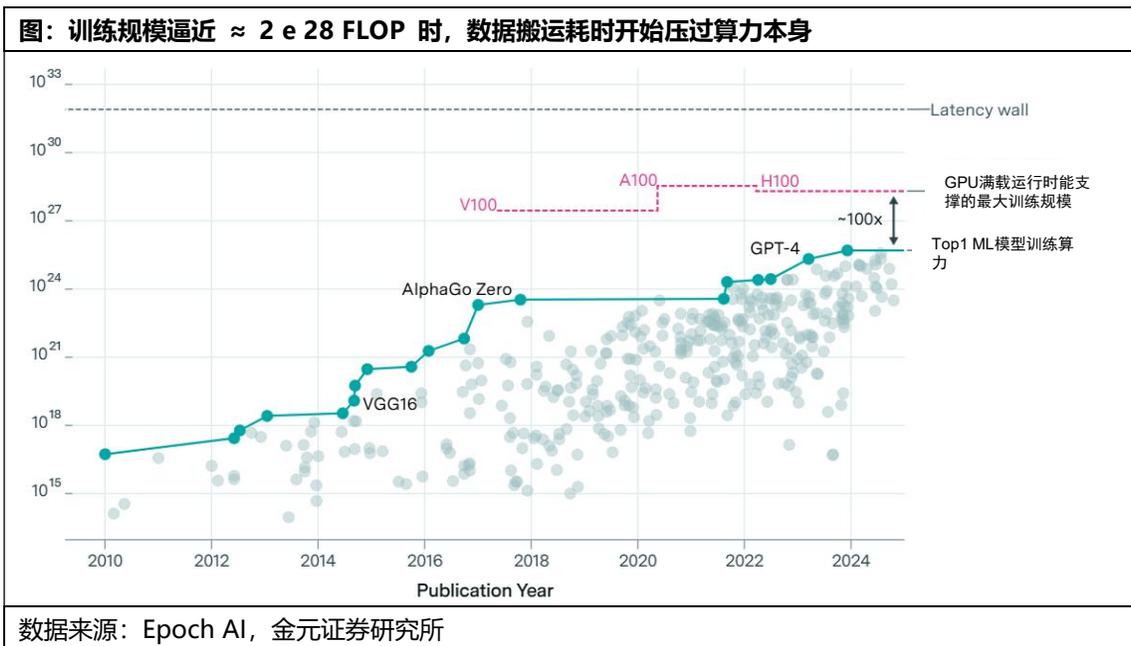
目录

- 一、AI算力中心的挑战-“通信墙”
- 二、AI催化下，中国算力基础设施维持高增长
- 三、AI基础设施构成：网络资源重要性仅次于算力资源
- 四、AIDC的“神经网络”互连结构
- 五、铜互连 vs 光互连
- 六、高速光模块加速渗透，价值量持续提升
- 七、直接调制光模块vs相干光模块
- 八、发射端核心器件：激光器、调制器
- 九、光通信中的无源器件：连接器、分路器、波分复用器
- 十、接收端核心器件：光探测器
- 十一、光电互连的结合体：CPO和O10
- 十二：相关公司

风险提示：高速光模块技术发展路线较多，各细分市场如调制器材料、光源技术路线不确定性较大；AI算力中心建设周期较长，存在明显周期性；AI技术路线变化导致算力中心Capex不及预期；海外需求影响较大，且部分组件依赖海外巨头，贸易冲突影响企业利润；各公司前期研发成本较高，技术门槛较高导致利润不及预期；政治、政策不确定性因素及其他宏观因素

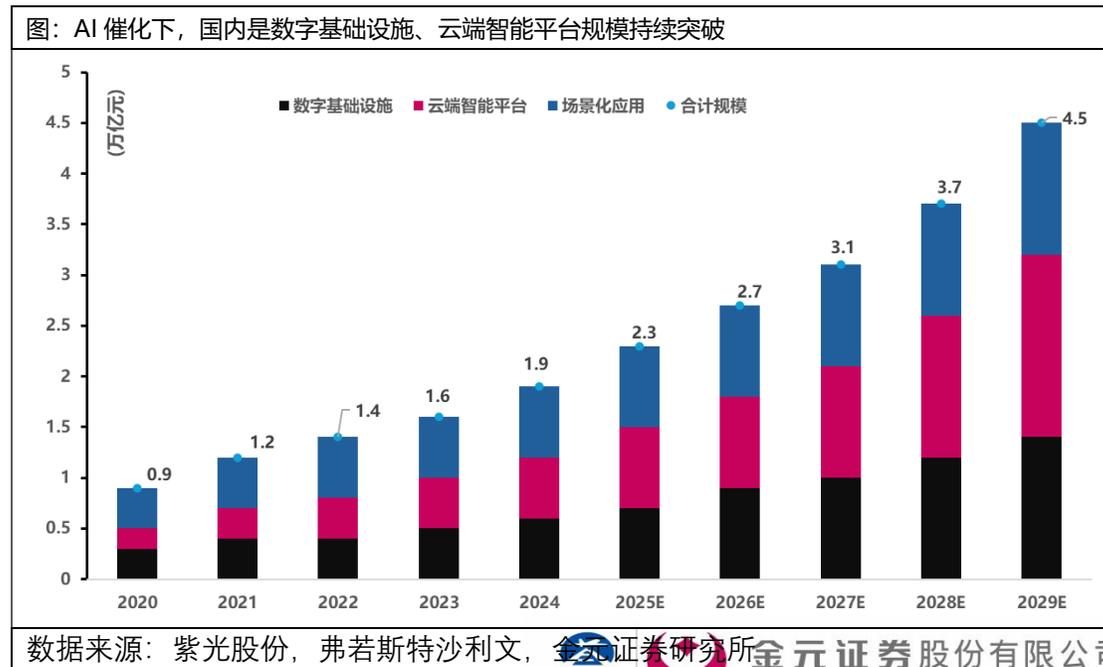
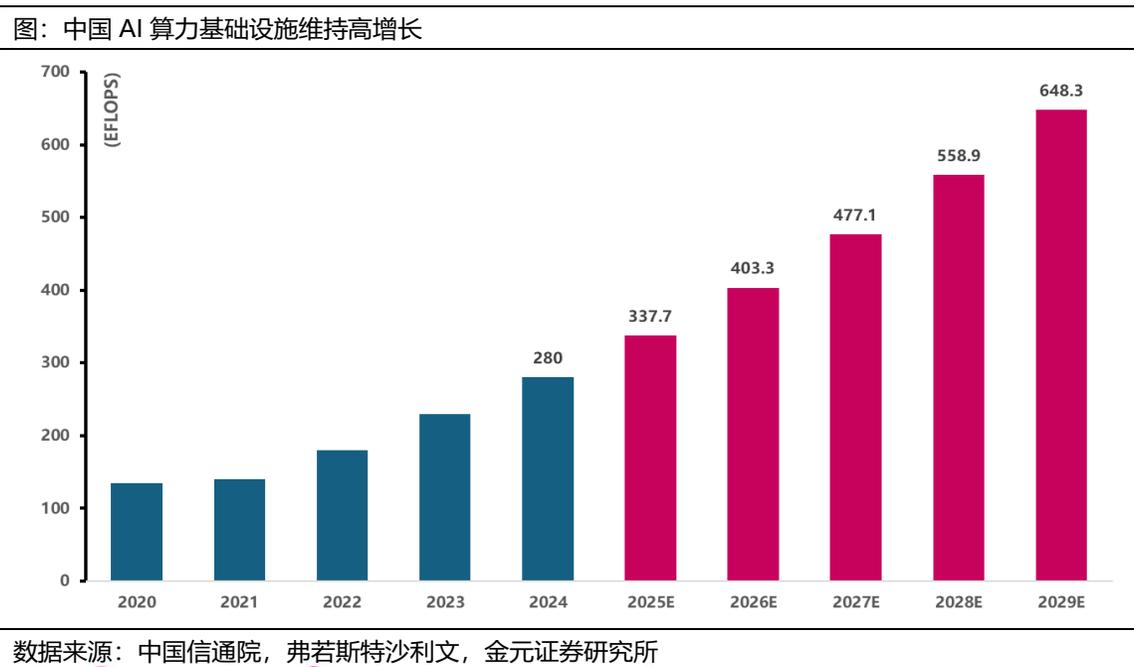
AI算力中心的挑战- “通信墙”

- **单一芯片算力无法满足AI训练需求**：模型所需算力与单芯片算力之间的巨大差距。例如GPT-3每次训练迭代需约4.5 EFLOPS计算，但单卡GPU仅提供数十TFLOPS级算力，差距高达百万倍。为突破计算墙，使用数十甚至上百GPU进行并行计算（分布式训练）。**AI算力集群受制于“通信墙”**：通过分布式训练部分解决了算力墙和存储墙后，通信墙随之凸显。大模型并行需要大量节点间通信（如AllReduce梯度同步、AlltoAll等），通信性能直接决定训练效率
- **存储墙是芯片级带宽瓶颈，而通信墙则是AIDC整体带宽瓶颈**：存储墙则源于内存容量与带宽不足，通过HBM、先进封装实现芯片级带宽扩张。而当通过分布式训练时，通信墙随之凸显。大模型并行需要大量节点间通信（如AllReduce梯度同步、AlltoAll等），通信性能直接决定效率。算力规模 > 通信能力 随着大模型训练从几百张 GPU 扩展到数万张甚至跨园区集群，梯度同步、参数交换等通信量呈指数级暴涨。**基于Epcho AI研究发现，当训练规模逼近 $\approx 2 \times 10^{28}$ FLOP 时，数据搬运耗时开始压过算力本身，利用率急剧下滑，被业界称作“Latency/Communication Wall”**



AI催化下，中国算力基础设施维持高增长

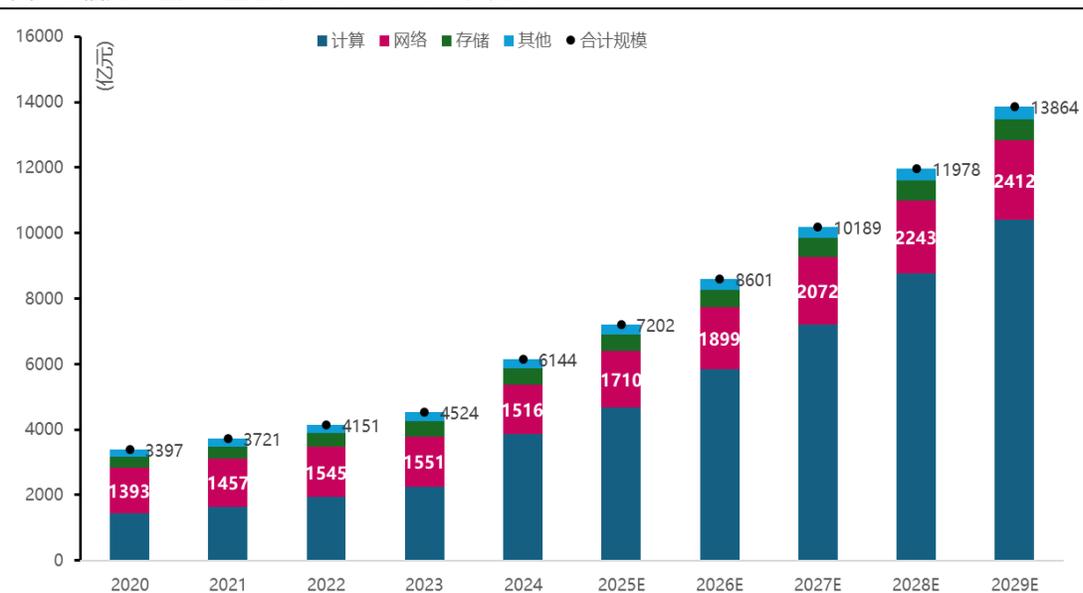
- 大模型训练和应用已成为近年来推动全球数字基础设施市场发展的重要驱动因素之一。随着以Transformer架构为核心的、具有更强智能能力的基座大模型不断涌现，全球领先的人工智能企业正加速围绕大模型展开激烈竞争，力求在模型性能、参数量级与推理效率方面实现突破。网络需求方面，从400G到800G，甚至是1.6T速率的网络交换机，正成为支持大模型训练的重要基础设施。
- 在算力基础建设方面，截至2024年，中国算力总规模为280EFLOPS，2020年至2024年期间年复合增长率为20%。根据弗若斯特沙利文预测，中国算力规模将从2024年的280EFLOPS增长至2029年的648.3EFLOPS，2024-2029年期间仍维持18.3%的年复合增长率。
- 需求方面，AI创新浪潮下，云端智能平台及数字基础设施解决方案市场规模持续增长：预计2029年，中国云端智能平台、数字基础设施规模将分别增长至1.8万亿、1.3万亿元。



AI基础设施构成：网络资源重要性仅次于算力资源

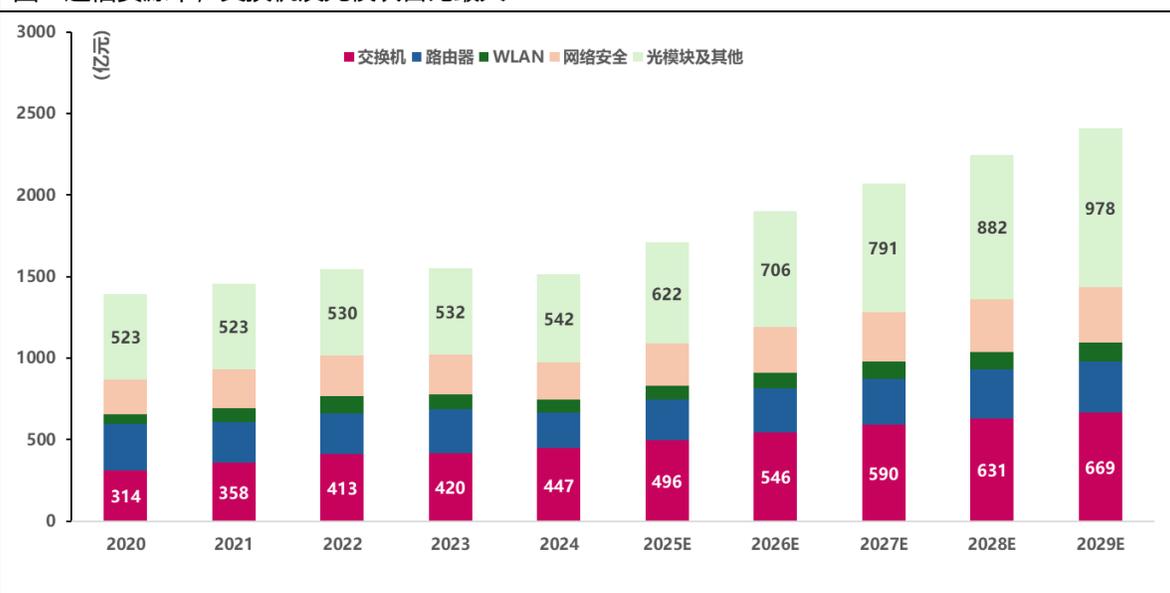
- 从国内算力基础设施市场规模来看，网络资源市场规模占比仅次于算力资源。中国算力基础设施规模从2020年的3,397亿元增长至2024年的6,144亿元。2024年，国内计算资源市场规模为3858亿元，为基础设施占比最大项。网络资源市场规模为1516亿元，仅次于计算资源，约占基础设施市场规模比例为24%。
- 网络资源中，主要包括交换机、路由器、WLAN、光模块等产品：交换机市场从2020年的315亿元增长至2024年的447亿元，预计2029年将达到669亿元。光模块及其他通信资源预计将达到978亿元。

图：通信资源占算力基础设施比重仅次于计算资源



数据来源：紫光股份，弗若斯特沙利文，金元证券研究所

图：通信资源中，交换机及光模块占比最大

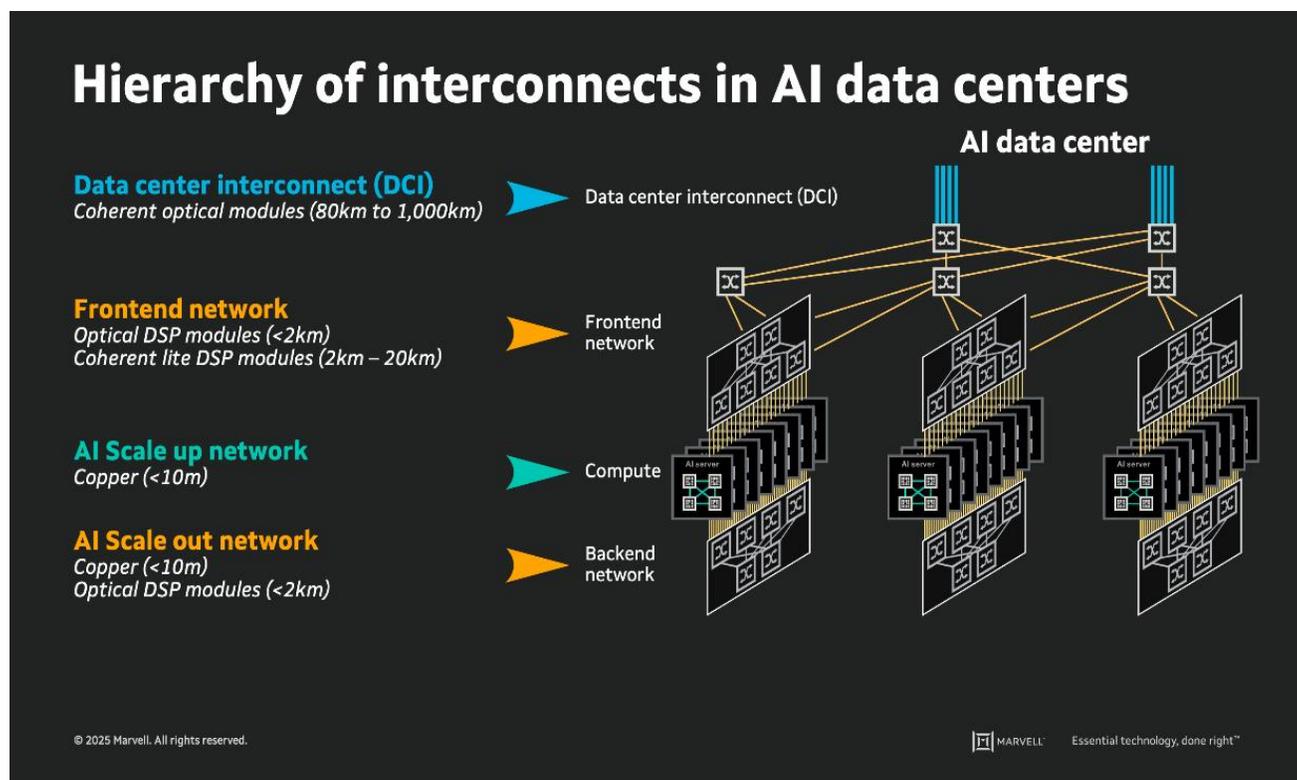


数据来源：紫光股份，弗若斯特沙利文，金元证券研究所

AIDC的“神经网络”互连结构

- **数据中心互连 (DCI - Data Center Interconnect)**：主要连接地理分布的数据中心，通过相干光模块的长距离优势，使用高阶调制 (如QPSK/16 QAM) 和数字信号处理 (DSP)
- **前端网络 (Frontend Network)**：连接数据中心内部核心计算资源与外部接入层。使用短距/中距光模块，适用硅光集成方案
- **AI纵向扩展网络 (AI Scale-up Network)**:单个AI服务器节点内部的加速器互联 (如GPU/TPU间通信)
- **AI横向扩展网络 (AI Scale-Out Network)**：跨服务器节点的分布式计算协同

图：AIDC 多层互连结构



数据来源：Marvell，金元证券研究所

铜互连 vs 光互连

- **铜互连技术成熟、成本较低，用于服务器机箱内部、机架内等短距离高带宽连接场景。**在人工智能数据中心（AIDC）中，GPU、CPU 等加速器之间以及服务器与Top-of-Rack交换机之间的短距离互连传统上大量采用铜质连接，其优势在于无需复杂的光电转换、初始投入成本低且安装维护相对简单。然而，随着芯片通信速率逼近极限，铜介质信号传输面临固有瓶颈，**高频下电阻与介电损耗导致信号完整性下降和严重的传输损耗，这不仅限制了带宽和距离，还将相当一部分信号功率转化为热量**
- 光互连是利用光纤等介质传输光信号的互连方式，通过光收发模块将电信号转换为光信号进行高速远距离传送。光互连克服了铜互连在带宽和距离上的物理限制：光信号在光纤中传输损耗极低、抗电磁干扰，能够在更高频率下保持信号完整，适合远距离、大带宽数据通信

图：AIDC中铜互连、光互连需求

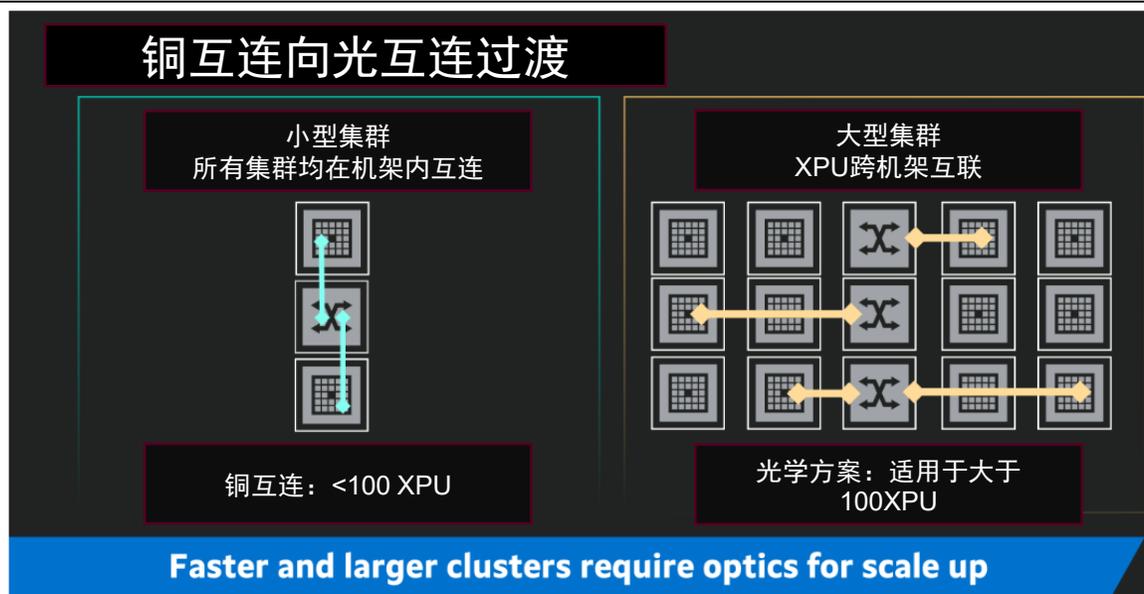
场景	介质	关键考量
机柜内 / GPU-to-GPU NVLink	被动 DAC 或 ACC	极低延迟 (N s)、可靠性、成本；距离 ≤ 2 m
机柜间 (Top-of-Rack \leftrightarrow Spine)	AOC 或短波 SR4/DR4 光模块	≤ 100 m、便于布线、功耗可接受
端口密度 ≥ 51.2 T 交换机	CPO / OSFP-X (800 G-1.6 T)	IO 功耗已接近芯粒核心，光电共封装可节省板级功耗 25-30 %
长距离 (跨建筑 / 城际)	相干 DWDM/ZR 光模块	≥ 10 km，铜线不可行

数据来源：金元证券研究所

铜互连 vs 光互连

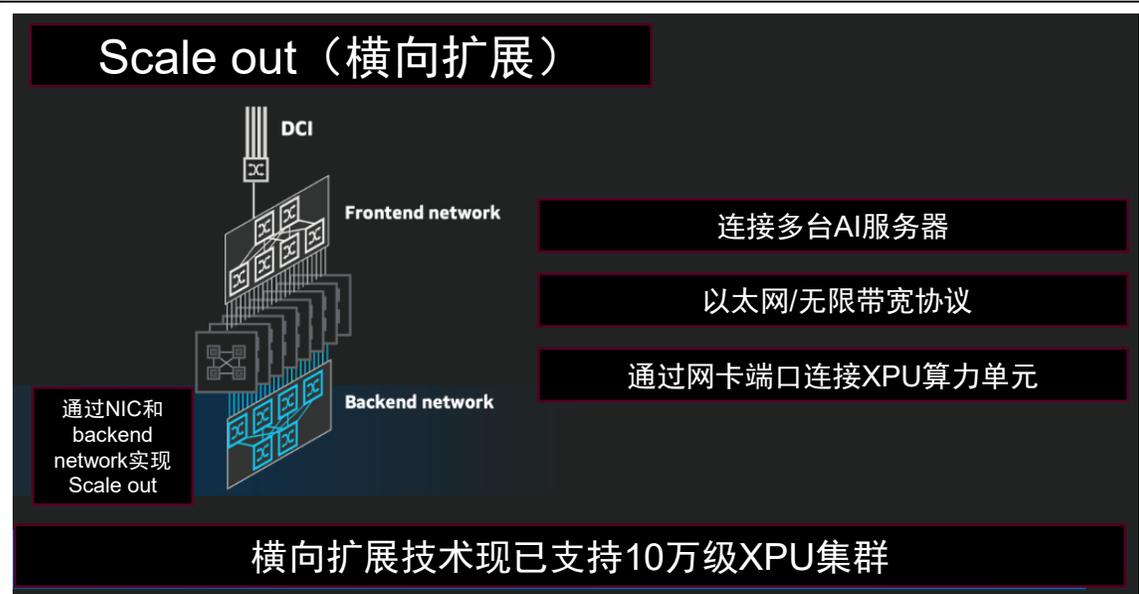
- **Scale up (纵向扩展) / Scale out (横向扩展)**，**光互连的重要性突出**。Scale up 和Scale out通过增加更多的算力资源来实现更大的承载能力。区别在于Scale up从软件角度来看是一台计算，互连必须非常可靠，且尽可能减小延迟。但当数据速率增加至200Gbps时，达到铜缆物理极限。
- 而**Scale out通过多层交换机组成，其任务被拆分成多个计算资源，因此横向扩展实际上是一个大规模网络，且距离较远**。所以，随着高速率、低延迟且距离增大的需求逐渐增大，无论是Scale-up还是Scale-out，光互连的必要性大幅提升。Nvidia DGX SuperPOD已通过Scale out实现32,768 GPU集群，而Meta的AI Research SuperCluster (RSC) 正向100,000 GPU级突破

图：数百个 XPU 互连超过了铜互连范围，光互连驱动更大的纵向扩展域是趋势



数据来源：Marvell，金元证券研究所

图：光互连是实现 DCI 互连的核心解决方案

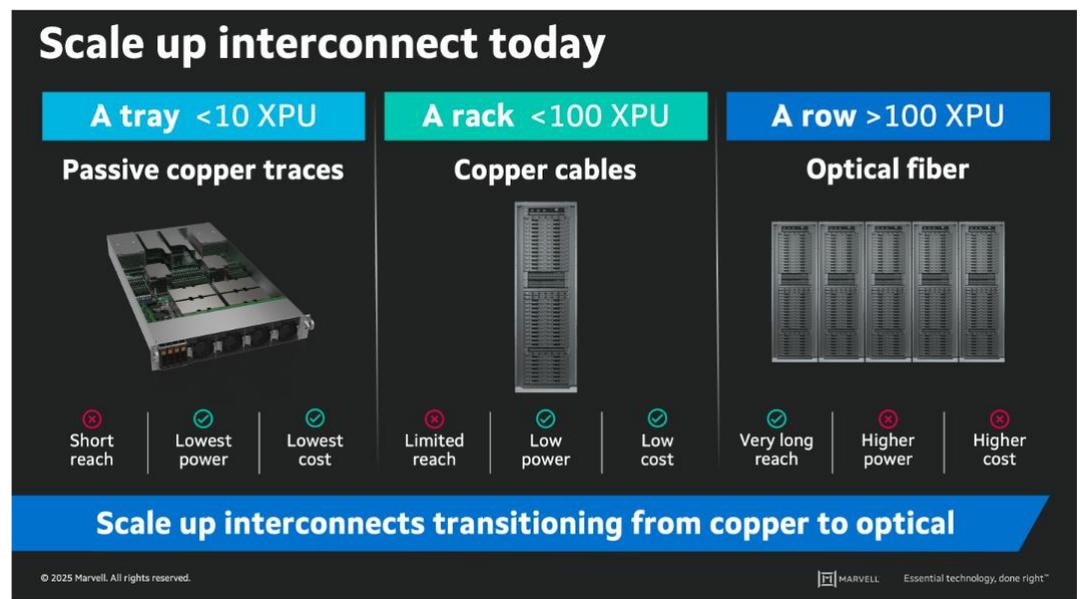


数据来源：Marvell，金元证券研究所

铜互连 vs 光互连

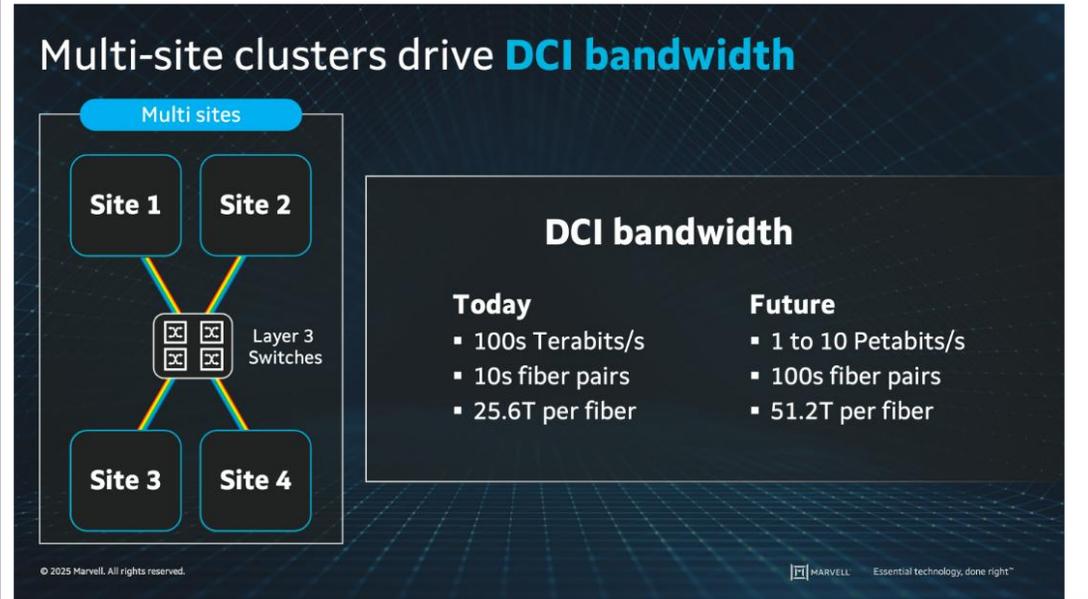
- **铜缆达到极限：**从托盘移动到机架 (<100 XPU)，铜缆在机架内将服务器连接在一起。可以是非常高效、低功耗、低成本，但覆盖范围有限。对于 100 Gbps 链路来说已经足够了。但是，当数据速率增加到 200 Gbps 时，铜缆虽然理论速率极限高，但是仅限于极短距离。集成DSP及Retimer芯片的AEC有源铜缆虽然能达到单通道112Gbps，但是成本优势下降（集成DSP）。随着纵向扩展网络扩展到 1,000K XPU 集群，集成光学器件将逐渐取代当今的无源铜互连
- **用于横向扩展的互连**需要具有高度弹性、即插即用、向后和向前兼容、可维护和可互作，提供非常高的带宽和长距离，适合连接更多机架和计算资源。AI 集群大小已经突破了单个数据中心的物理占用空间所能实现的极限,推动了对多站点AI集群的需求，这些集群可以在多个数据中心之间分配工作负载。与Scale up一样，铜缆的距离限制也使得光互连解决方案在DCI领域替代铜缆。

图：随着 Scale up 对高速率及 XPU 数量需求，光互连将替代铜缆解决方案



数据来源：Marvell，金元证券研究所

图：DCI 对长距离、高带宽的需求，使得光互连替代传统铜缆



数据来源：Marvell，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

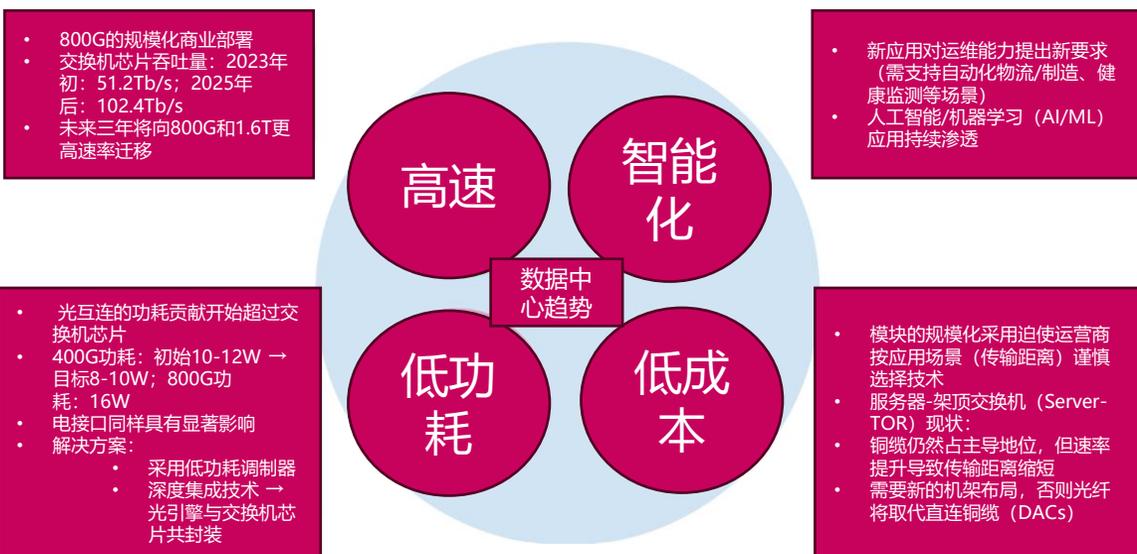


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO.,LTD.

铜互连 vs 光互连

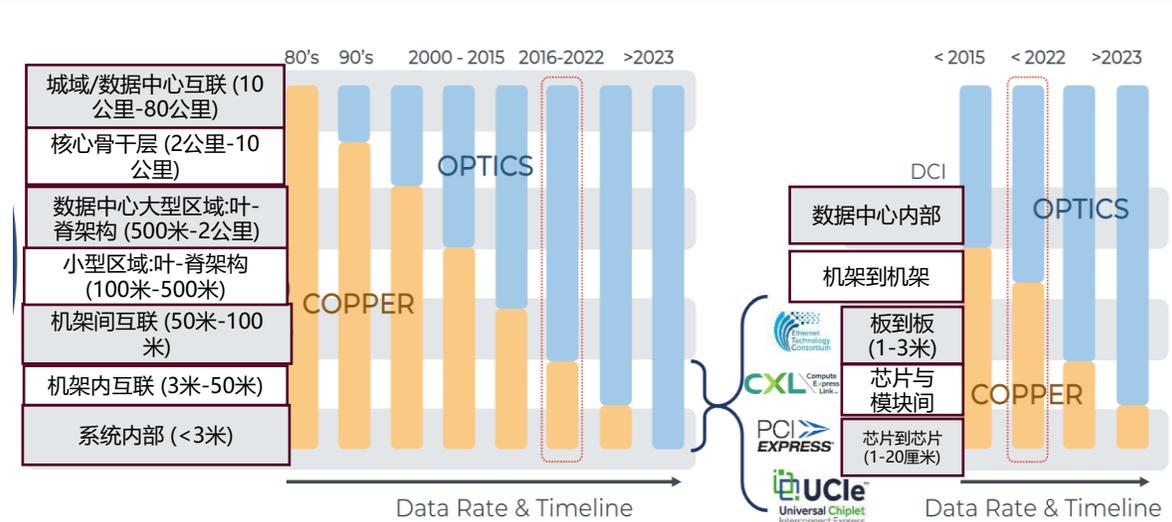
- **数据中心正经历高速化、智能化、低功耗与低成本的核心变革，驱动光通信及硅光技术成为不可逆的大趋势。**800G规模化商用部署已启动，交换机芯片吞吐量将从2023年的51.2Tb/s跃升至2025年的102.4Tb/s，并加速向800G/1.6T升级；与此同时，光互连功耗贡献首次超越交换机芯片（400G模块初期功耗10-12W，目标8-10W），迫使行业采用低功耗调制器与光引擎-交换机芯片共封装方案
- **在高速传输倒逼下，铜缆因速率提升导致距离严重缩短，光纤替代直连铜缆（DACs）正成为机架布局的必然选择。**叠加AI/ML等新场景对运维能力的严苛要求，硅光技术凭借其高集成度、低功耗及与光子器件的深度适配性，将成为突破数据中心性能瓶颈、支撑未来十年技术演进的底层引擎。

图：数据中心高速需求、智能化、低功耗、低成本需求



数据来源：Yole, 金元证券研究所

图：光通信加速渗透

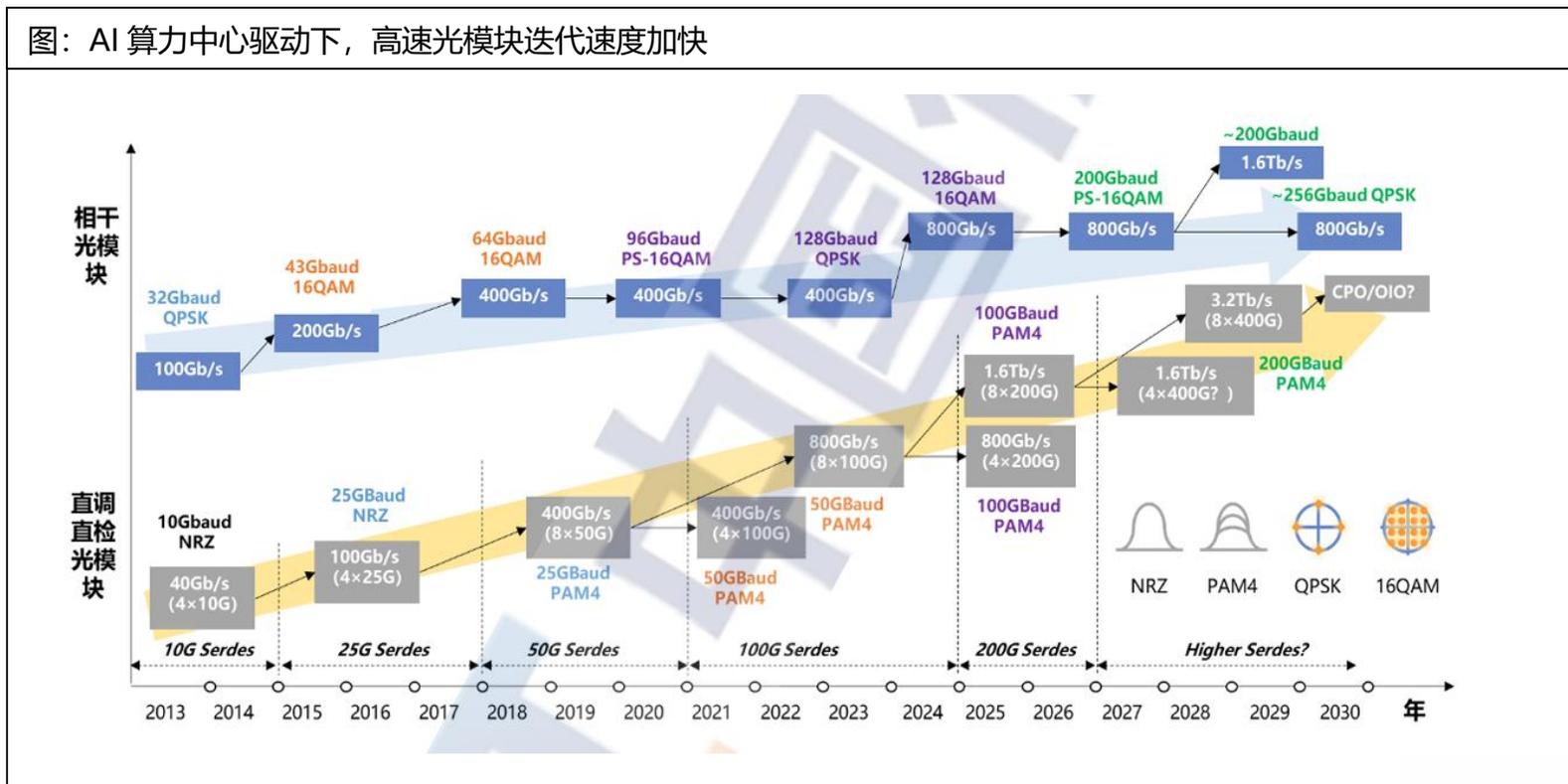


数据来源：Yole, 金元证券研究所

高速光模块加速渗透，价值量持续提升

- 高速率无疑是光连接的核心，且当前速率迭代周期缩短。分布式架构通过多个节点并行训练，不同节点之间需要频繁同步模型参数，对光连接性能提出大带宽、低延迟、无失真等更高要求。同时，算力中心内部网络架构趋于扁平，连接密度及交换容量大幅增长。
- 高速率需求早期是由城域网和骨干网驱动，但迭代速度较慢，10年迭代一代，但由于AI训练的时效性需求，且市场规模大于电信网络，导致光连接的迭代速度加快。

图：AI 算力中心驱动下，高速光模块迭代速度加快

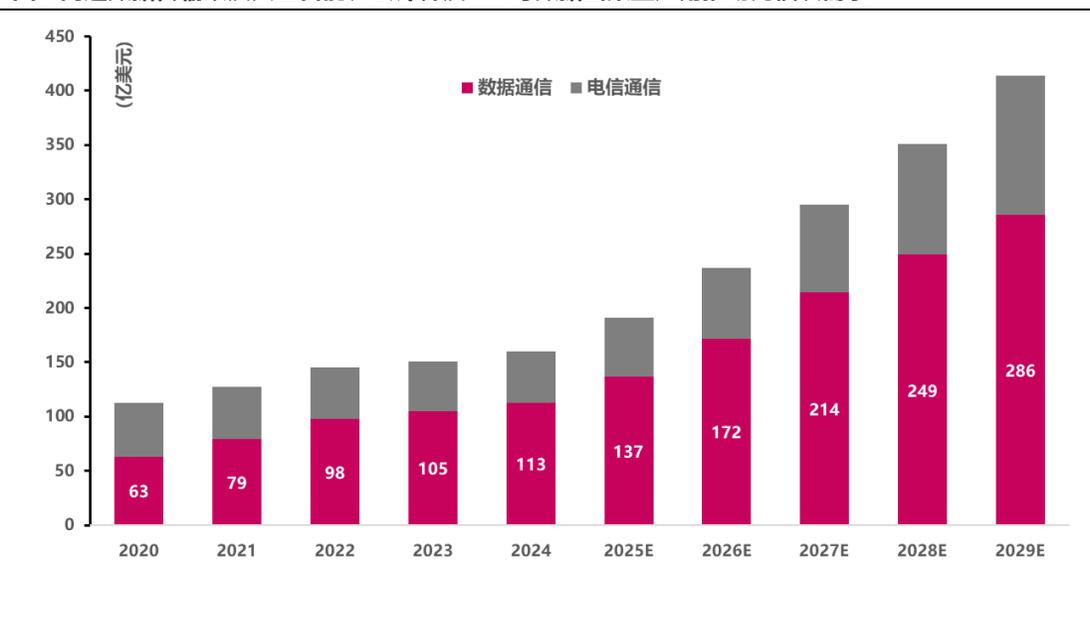


数据来源：中国信通院，金元证券研究所

高速光模块加速渗透，价值量持续提升

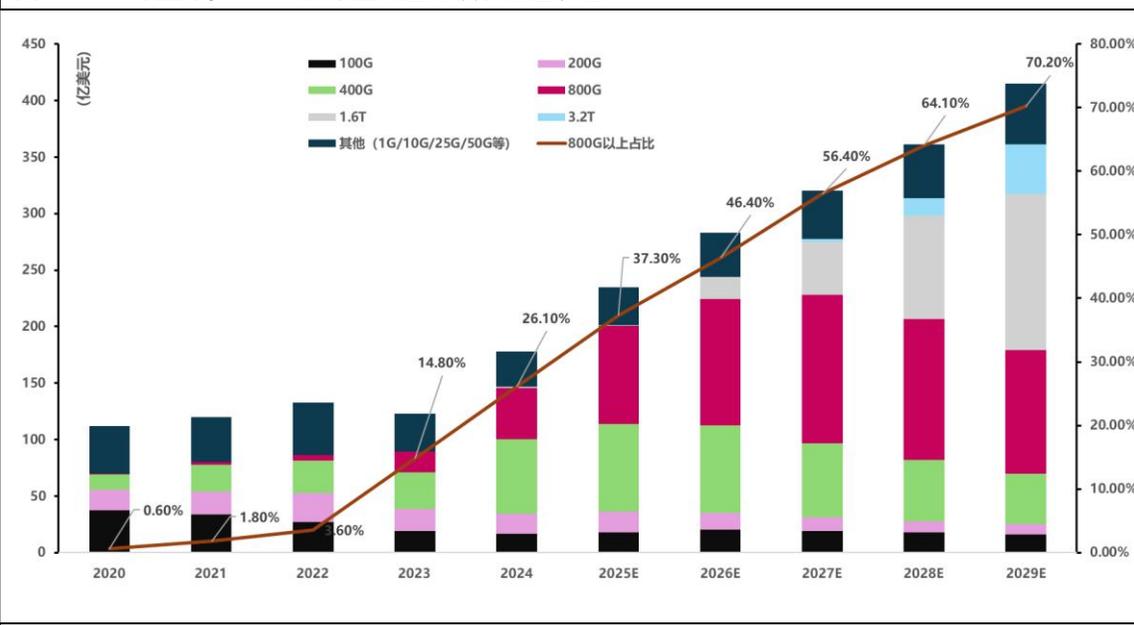
- 训练与推理规模指数级膨胀，使网络而非算力成为AIDC的首要瓶颈；只有更高速、更节能、更高密度的光模块才能撑起 GPU/加速器之间的“海量东拼西接”
- 光模块市场近年来稳步增长，主要得益于对高速数据传输以及人工智能、云计算及5G等数据密集型应用的需求。2020年至2024年期间，全球光模块销售收入从112亿美元增至178亿美元，复合年增长率为12.2%。数据中心和云计算快速发展的带动下，高速光模块尤其是800G及以上的光模块发展迅猛。800G光模块作为最先进的量产技术，2020年至2024年的复合年增长率高达188.1%，预计2024年至2029年将保持19.1%的稳步增长。与此同时，代表下一代预研技术的1.6T光模块在更高带宽需求、更低功耗要求及人工智能驱动数据处理的需求推动下将迎来爆发式增长，预计2024年至2029年的复合年增长率将达到180.0%。

图：高速数据传输以及人工智能、云计算及 5G 等数据密集型应用推动光模块需求



数据来源：LightCounting, 金元证券研究所

图：2023 年至今，800G 及以上高速光模块加速渗透



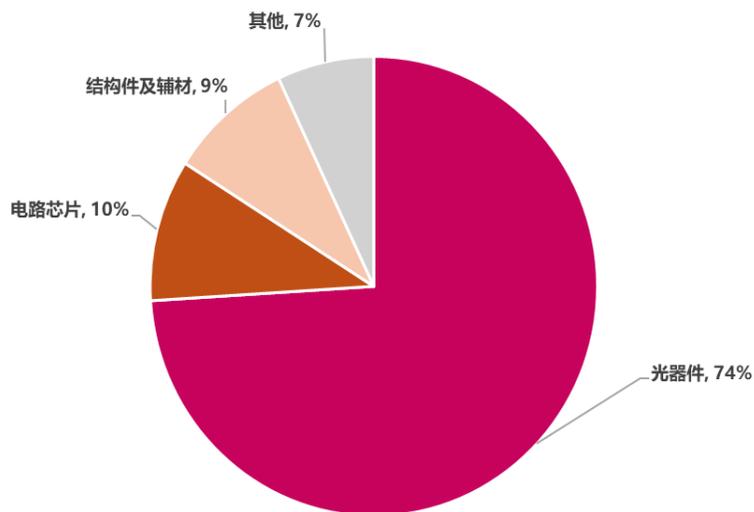
数据来源：LightCounting, 金元证券研究所



高速光模块加速渗透，价值量持续提升

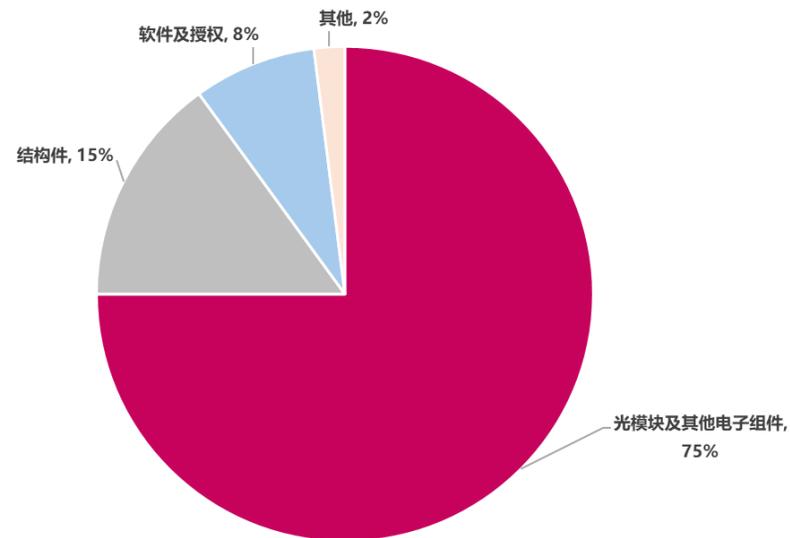
- 光模块原材料主要包括光器件（如TOSA、ROSA及其他光器件）、电路芯片、PCB及其他（结构件与辅材）。其中，光器件占光模块总成本约74%。光器件具体包含：TOSA（光发射次模块）、ROSA（光接收次模块），其他光器件：光学滤波器、尾纤（Pigtail）等。同时，采用不同的光模块技术（如硅光集成 vs. 分立器件）会显著影响各类光器件的成本结构占比。
- PON设备的成本构成中光模块及其他电子组件占75%，结构件及其他：占25%（含机箱、软件授权、防雷器件）

图：光模块成本中，TOSA、ROSA等光器件占74%



数据来源：弗若斯特沙利文，金元证券研究所

图：PON设备中，光模块及其他电子组件占比高达75%



数据来源：弗若斯特沙利文，金元证券研究所

直接调制光模块vs相干光模块

- **直接调制光模块的发射端使用激光器输出的光强来携带数据信号。**当前直接调制光模块多用PAM4编码（每波特携带2位），较OOK（开关键控）的编码方式多增加1比特。直接调制光模块多应用于数十公里以内，典型的应用场景是算力中心内的服务器与交换机之间。基于单通道100Gb/s的800Gb/s的光模块技术已经较为成熟，800GVR8（30m/50m）、SR8（100m）、DR8（500m）、DR8+（2km）、2xFR4（2km）、2xLR4（10km）等规格已经量产。**单通道200Gb/s的800Gb/s、1.6Tb/s光模块当前正在加速落地，由于通道数减半，成本、功耗有一定优势。**
- **800G VR8、SR8多以砷化镓（GaAs）VCSEL作为光源，在超短距离连接上有功耗优势。**800G DR8、800G DR8-2以InP外调制激光器（EML）为主，硅基光电子在共享光源下具有功耗优势，但耦合工艺相对复杂。
- **相干光模块采用正交相移键控（QPSK）或者正交振幅调制（QAM）来实现高阶调制，增大每波特所携带的比特数。**通常情况下，更适合十公里以上的较长传输距离，典型应用场景包括骨干网、城域网、以及数据中心之间的互连。当前800Gb/s的相干光模块包含两代产品，第一代基于100GBd 64QAM，主要面向数据中心之间（DCI）中短距离互连；第二代基于140GBd 16QAM可以与400Gb/s超长距共用产业链，主要面向DCI互连和城域网络
- **相干接收端的结构相对复杂：**核心是一个本振激光器（LO）产生参考光，与接收信号光混合作用于90°光学混频器（干涉仪结构）中，分别输出对应I路和Q路的干涉光信号，干涉后的光信号经由高速平衡探测的光电二极管转换为射频电信号（通过平衡接收可抑制直流分量和公共模式噪声），得到包含幅度和相位信息的电信号分量。典型DP-QPSK接收需要4对平衡探测器（对应两个偏振×I/Q两路），从而同时获取光场的同相分量(I)和正交分量(Q)。**相干模块主要由光学子系统和DSP数字处理子系统组成**，光学部分包括可调谐窄线宽激光器（ITLA）、相干驱动调制器（CDM，包括驱动芯片和IQ调制器MZM）以及集成相干接收机（ICR，含本振激光耦合的混频器和线性放大TIA等）；数字处理部分包括高速模数/数模转换器(ADC/DAC)、功耗巨大的高速DSP芯片以及前向纠错(FEC)等，用于对信号进行解调和数字补偿。
- **短距离GPU互联（机架内部/数据大厅内）：**在大型AI训练集群中，成百上千颗GPU之间需要高速互联，形成高带宽的计算通信网络。这类互联通常发生在同一数据中心内部，从服务器到交换机或机架到机架，距离从几米到几十米（典型TOR交换机连接）甚至上百米不等。**此范围内光纤链路损耗和色散较小，更经济的直接调制光模块即可胜任高速连接任务。**
- **长距离DCI互联（数据中心之间）：**当AI应用需要在不同园区乃至不同城市的多个数据中心之间交换海量数据时，链路距离可能从几十公里到上百公里。远距传输超出直接探测技术的能力范围——即使采用高功率EML激光器和中继放大，直接调制PAM4在数十公里光纤后也难以保持足够的信号质量。**因此，在数据中心互联(DCI)场景普遍转向相干调制方案**



直接调制光模块vs相干光模块

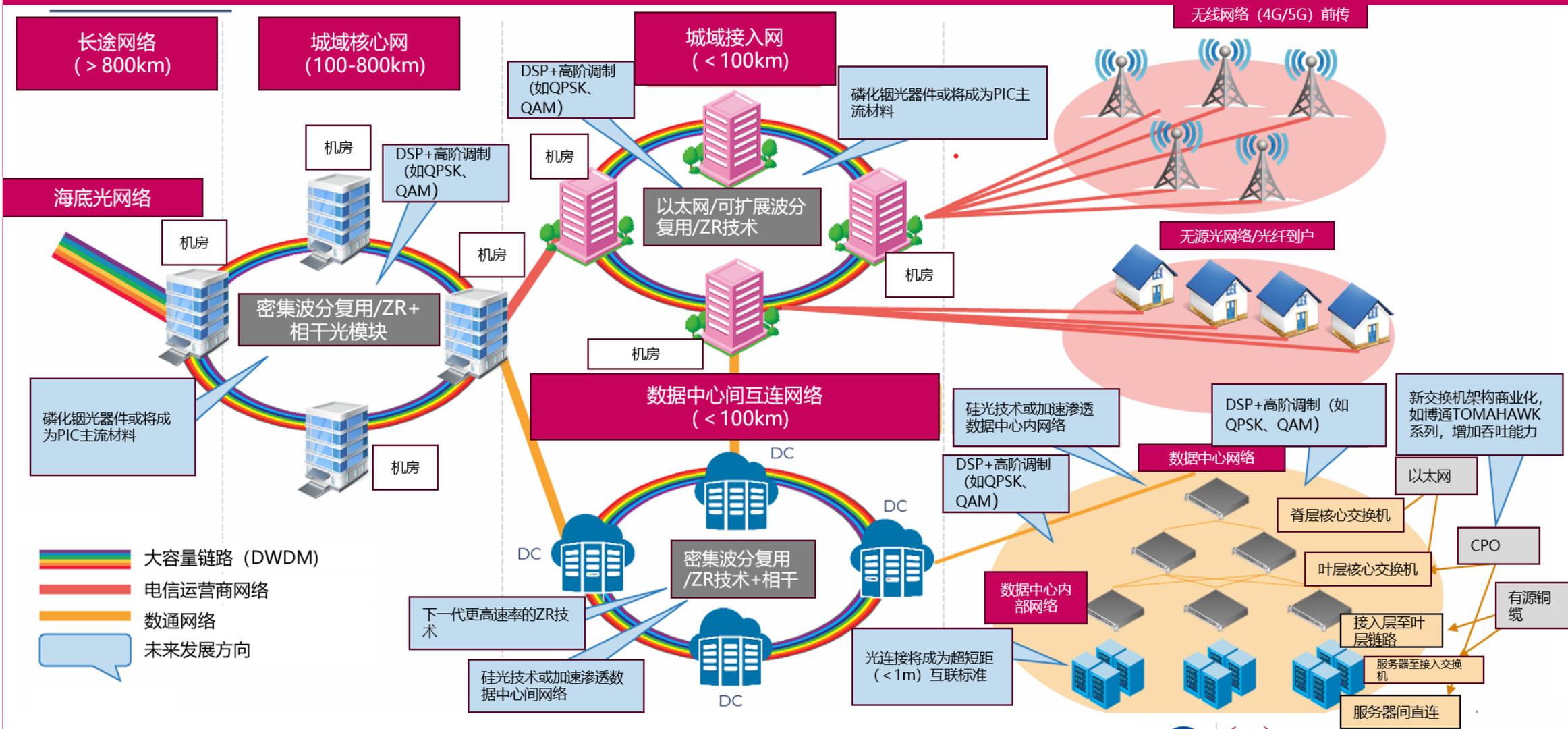
图：不同模块类型直接调制光模块

模块类型		传输距离	速率 (GBaud)	主流技术方案
8×100G	800G VR8	30m/50m	53.125GBd PAM4	VCSEL
	800G SR8	60m/100m		VCSEL
	800G DR8	500m		EML+PIN、硅光
	800G DR8+	2km		EML+PIN
	800G 2×FR4	2km		EML+PIN
	800G 2×LR4	10km		EML+PIN
4×200G	800G VR4/SR4	TBD	106.25GBd PAM4	VCSEL
	800G DR4	500m		直驱 EML
	800G FR4-500	500m		直驱 CWDM EML
	800G DR4+	2km	113.4375GBd PAM4	直驱 EML+PIN
	800G FR4	2km		直驱 CWDM, EML+PIN
	800G LR4	10km		直驱 LWDM, EML+PIN
8×200G	1.6T VR8/SR8	≤100m	106.25GBd PAM4	VCSEL
	1.6T DR8	500m		直驱 EML+PIN
	1.6T DR8+	2km	113.4375GBd PAM4	直驱 EML+PIN
	1.6T 2×FR4	2km		直驱 CWDM, EML+PIN
	1.6T FR8	2km		直驱 CWDM-10, EML+PIN
	1.6T LR8	10km		EML

数据来源：中国信通院，金元证券研究所

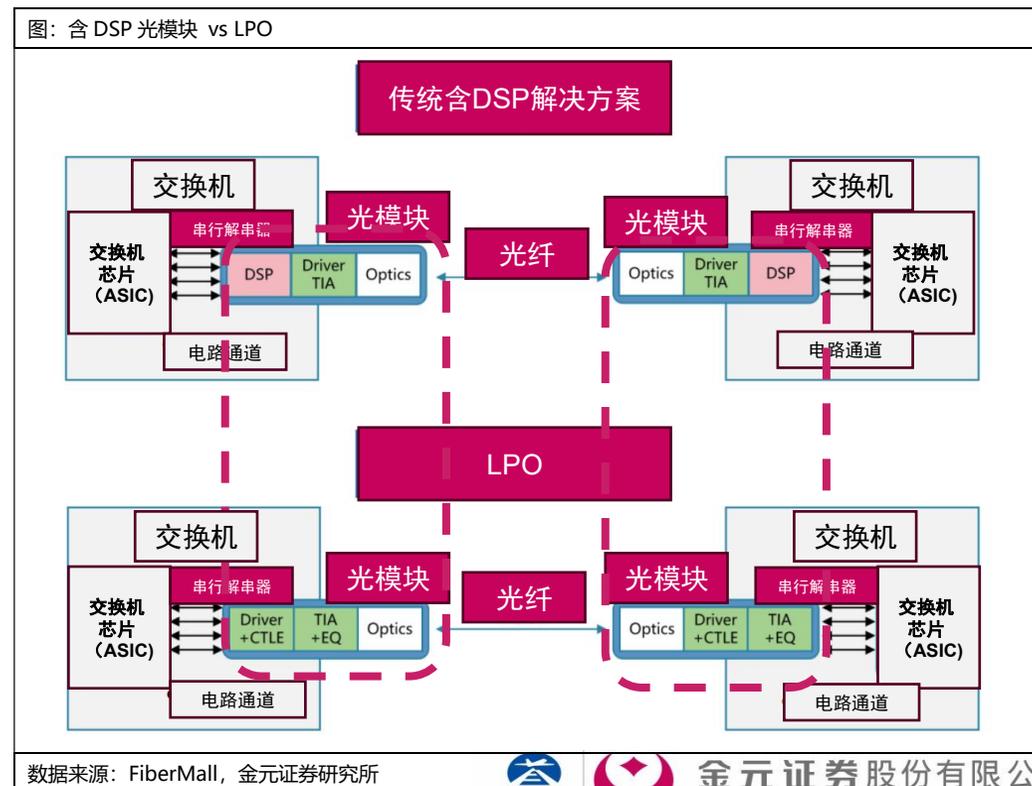
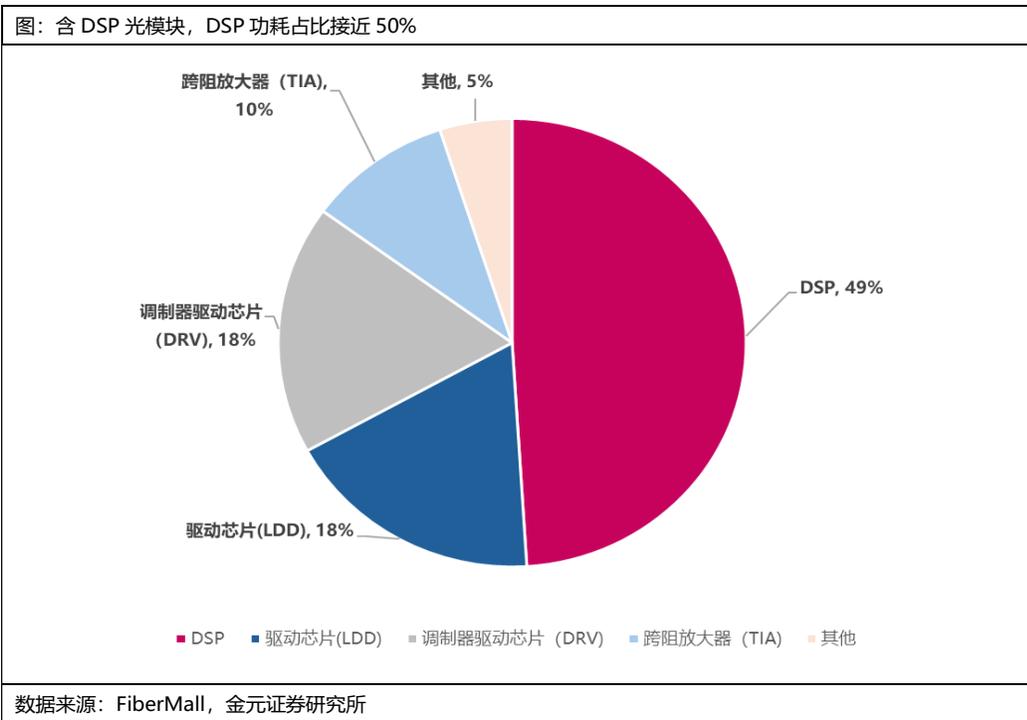
直接调制光模块vs相干光模块

图：通信网络距离及技术要求

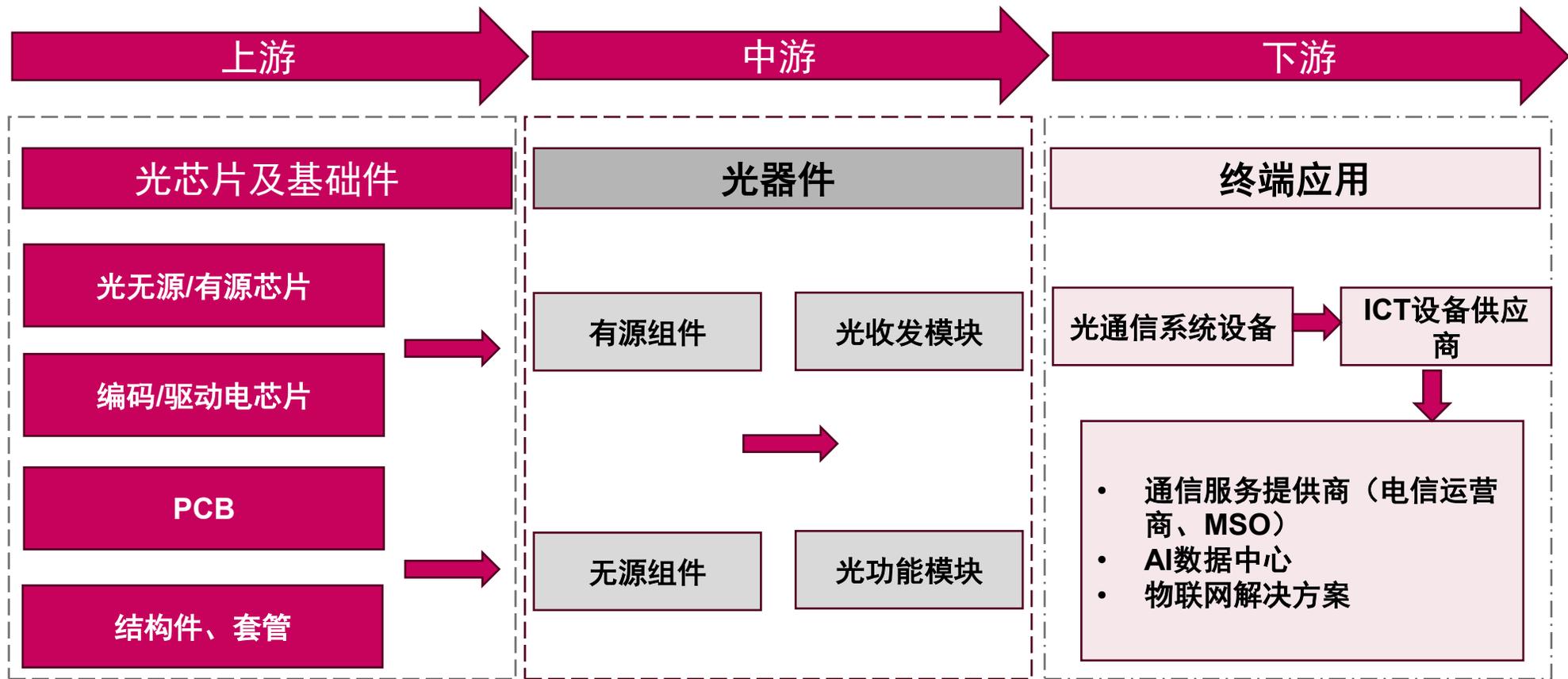


直接调制光模块vs相干光模块

- LPO (Linear-drive Pluggable Optics) 去除模块内的DSP/CDR功能，将相应的信号处理任务移至交换机等主设备侧，由主控芯片承担复杂的恢复和均衡。**传统高端光模块（如400G/800G）采用PAM4调制并内置DSP，通过DAC→激光器发射，光电探测后经TIA→ADC，再由DSP完成时钟恢复、均衡和误码校正。LPO光模块内部仅保留高线性度的激光驱动器(LDD)和跨阻放大器(TIA)，并在电路中集成CTLE（连续时域线性均衡器）等模拟均衡功能，以补偿链路损耗**LPO去除功耗较高的DSP芯片后，光模块功耗显著下降。**例如，一款400GbE传统DSP光模块功耗可达7-9W，而对应LPO模块仅需2-4W。据Macom数据，含DSP功能的800G多模光模块功耗可超过13W，而采用线性直驱的800G模块功耗低于4W，降幅达70%
- DSP芯片在光模块BOM成本中占比20-40%，取消DSP后，LPO方案成本降低显著。**虽然为Driver和TIA增加了均衡功能（CTLE+EQ）使器件成本略增，但总体仍较传统方案节省。例如800G光模块中去掉DSP可省约50-60美元



光芯片产业链全景



光芯片产业链全景

- **基底层**：GaN、GaAs、InP等晶圆材料提供光电特性基础
- **组件层**：
 - **有源组件**（如EEL激光器、VCSEL、LED）实现光/电信号转换
 - **无源组件**（如WLO透镜/滤光片）等，主要功能是调控光路传输
- **模块层**：整合组件形成电光调制器、医用激光模块等功能单元
- **系统层**：驱动消费电子（AR/VR头显/智能手机）、汽车（激光雷达）、医疗（内窥镜成像）、国防航空（红外制导）等领域终端应用。

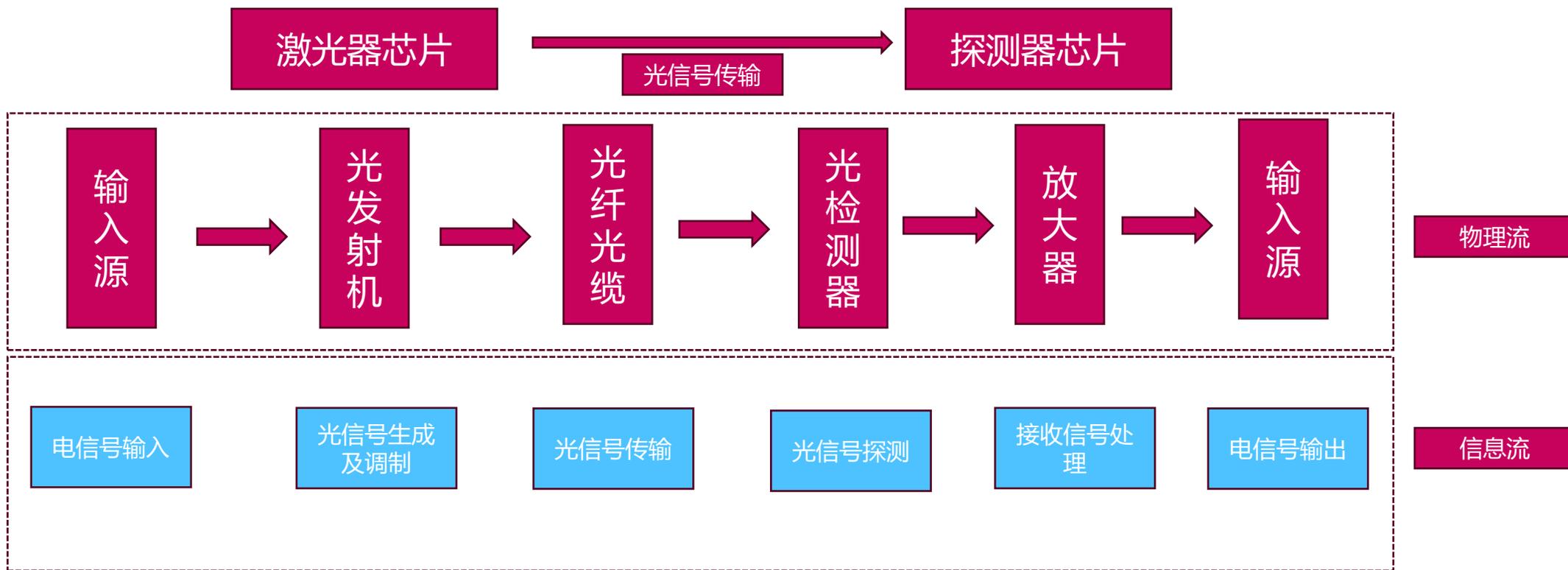
图：光芯片不仅仅局限于光通信应用



数据来源：Yole，金元证券研究所

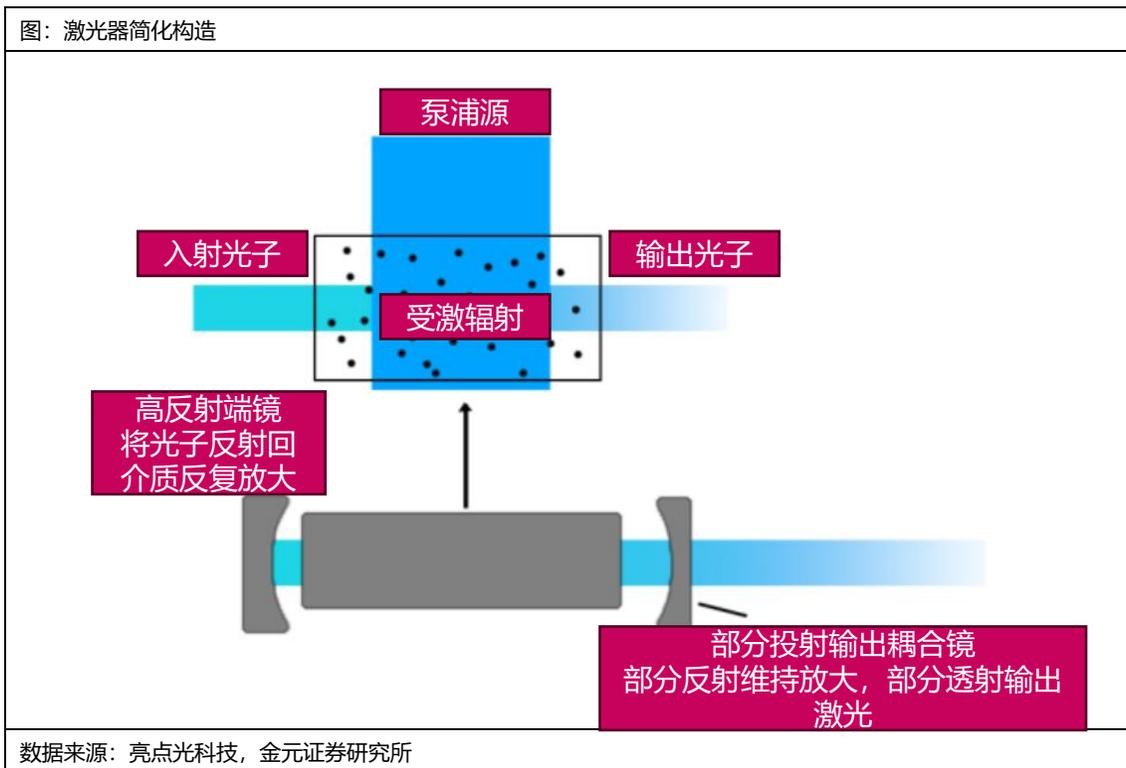
光芯片在通信系统中的应用

- 高速光芯片是光通信核心之一。光芯片系实现光电信号转换的基础元件，其性能直接决定了光通信系统的传输效率。光纤接入、4G/5G 移动通信网络和数据中心等网络系统里，光芯片都是决定信息传输速度和网络可靠性的关键。光芯片可以进一步组装加工成光电子器件，再集成到光通信设备的收发模块实现广泛应用。



发射端核心器件：激光器、调制器

- 光模块激光器是在光通信系统中将电信号转换为光信号的核心器件，其工作基于半导体激光器芯片实现受激发射原理。半导体激光器由增益介质、泵浦源和光学谐振腔构成。在激光器芯片内，电流作为泵浦源注入半导体增益介质（典型为Ⅲ-V族化合物半导体，如砷化镓GaAs或磷化铟InP），激发大量载流子跃迁至高能级；这些载流子受谐振腔反馈来回振荡诱导受激辐射，从而产生相干单色光输出。谐振腔通常由高速率半导体多层膜反射镜构成，使腔内光振荡并筛选出特定频率的激光。最终，激光器输出稳定的激光光束，其强度或相位可随电信号变化而被调制，完成电-光信号转换



图：激光器基本构成

元件名称	功能	类型
增益介质	增益介质是激光器中用于放大光的材料。它通过粒子数反转和受激辐射的过程来放大光。充当粒子数反转的介质决定激光辐射性能。	固体激光器：如Nd:YAG（掺钕钇铝石榴石），用于医疗和工业应用。 气体激光器：如CO ₂ 激光器，用于切割和焊接。 半导体激光器：如激光二极管，用于光纤通信和激光指针。
泵浦源	泵浦源为增益介质提供能量，以实现粒子数反转（粒子数反转的能量源），从而使激光操作成为可能。	光学泵浦：使用强光源（如闪光灯）泵浦固体激光器。 电气泵浦：通过电流激发气体激光器中的气体。 半导体泵浦：使用激光二极管泵浦固体激光介质。
谐振腔	谐振腔由两个镜子组成，用于反射光，增加光在增益介质中的路径长度，从而增强光放大。提供激光放大的反馈机制选择光的光谱特性和空间特性	平面-平面腔：用于实验室研究，结构简单。 平面-凹面腔：常见于工业激光器，提供高质量的光束。 环形腔：用于特定的环形激光器设计，如环形气体激光器。

数据来源：金元证券研究所



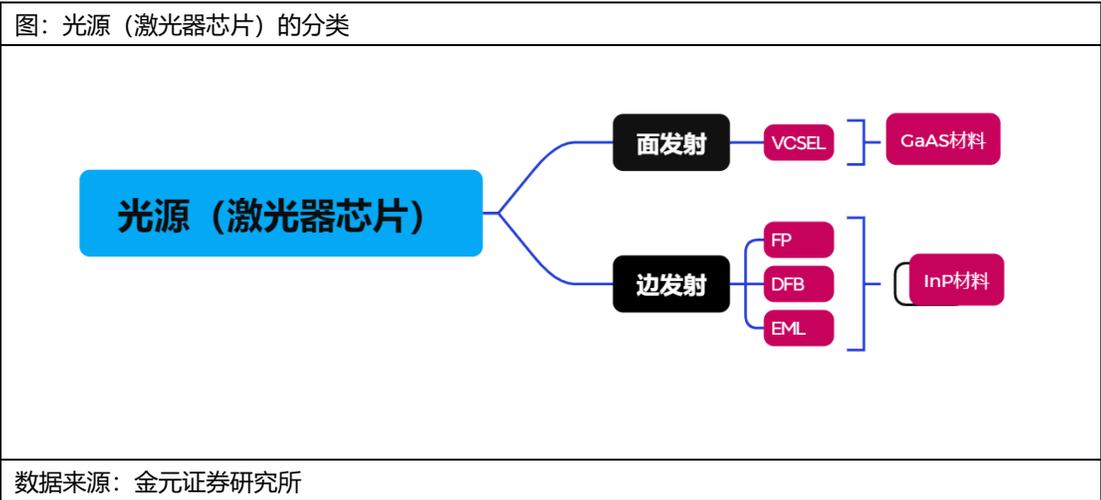
发射端核心器件：激光器、调制器

- 根据材料划分，激光器芯片可分为GaAs材料系的VCSEL（垂直腔面发射激光器）以及基于InP材料系的FP、DFB、EML激光器芯片基于光的发射基于激光的发射方向与半导体芯片表面的空间关系可以划分为面发射及边发射。
- VCSEL通常工作波长850nm（GaAs基），用于多模光纤短距连接，每通道25G~50G速率，通过并行多芯光纤传输，是数据中心机架内或机房内短距离互联的解决方案；DFB可直接调制（即随驱动电流开关），属于典型直接调制激光器(DML)。其性能较FP大幅提升，常用于10km以内中长距离光链路，如数据中心CWDM4（2km）和LR4（10km）光模块、城域网和FTTx接入；EML激光器相当于DFB+EAM的组合，EML相较直接调制DFB具备更高带宽、更低啁啾，在高速长距离传输中信号质量更佳

图：不同激光器芯片对比

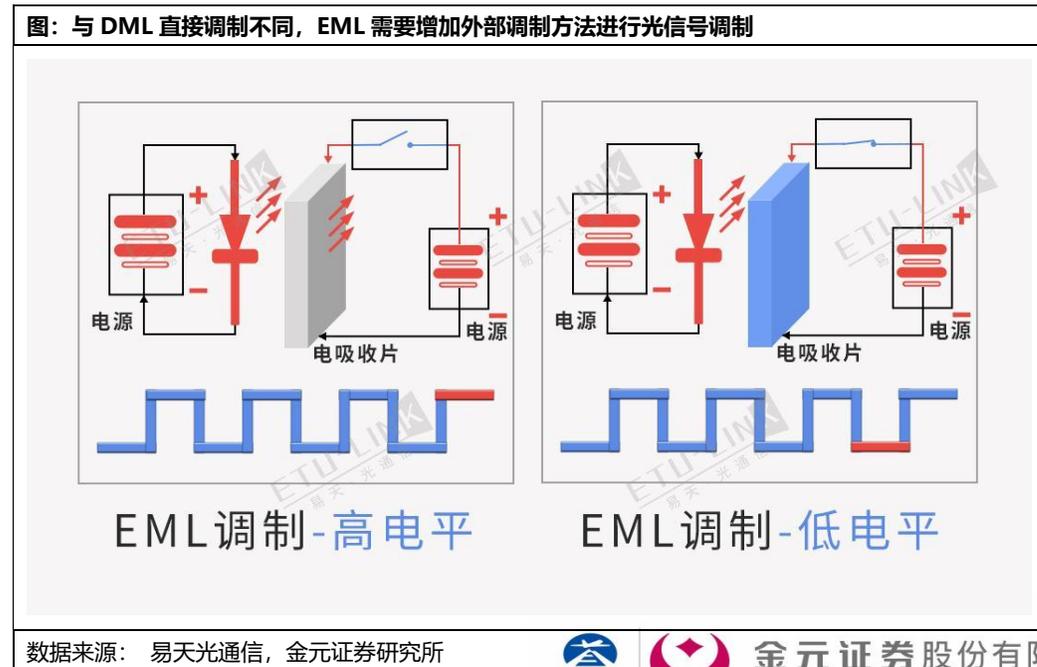
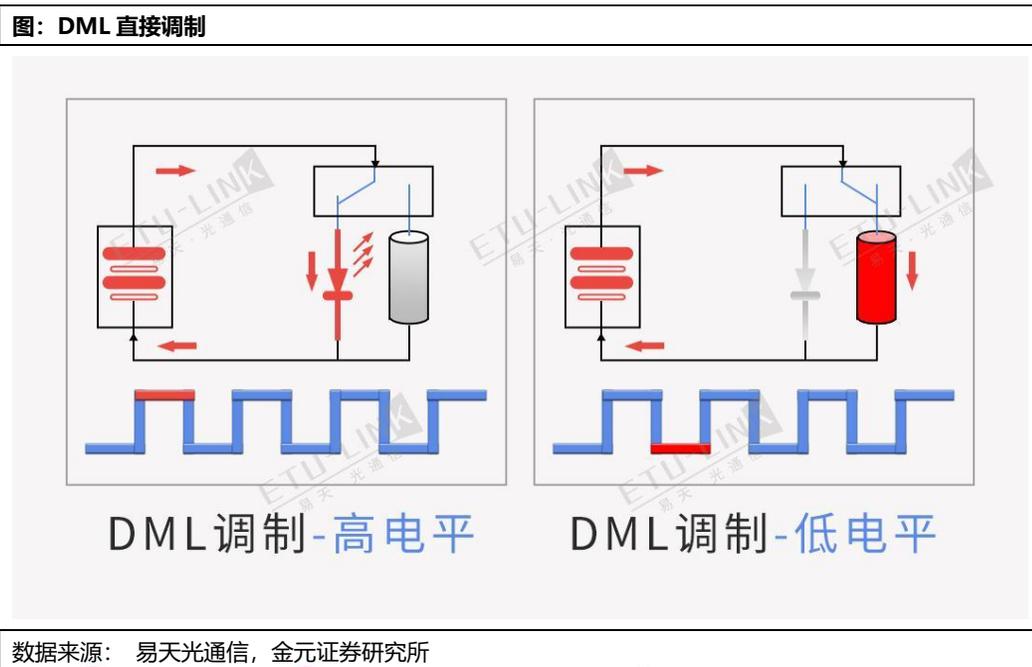
激光器类别	工作波长	特性	应用场景
VCSEL（垂直腔面发射）	800-900nm	线宽窄，功耗低，调制速率高，耦合效率高， 传输距离短 ，线性度差	500米以内的短距离传输，如数据中心机柜内部传输、消费电子领域(3D感应面部识别)
FP（法布里-珀罗）	1310-1550nm	调制速率高，成本低， 耦合效率低 ， 线性度差	主要应用于中低速无线接入短距离市场，由于存在损耗大、传输距离短的问题，部分应用场景逐步被DFB激光器芯片取代
DFB（分布式反馈）	1270-1610nm	谱线窄，调制速率高，波长稳定，耦合效率低	中长距离的传输，如FTTx接入网、传输网、无线基站、数据中心内部互联等
EML（DFB+EAM，电吸收调制）	1270-1610nm	调制频率高 ， 稳定性好 ， 传输距离长 ， 成本高	长距离传输，如高速率、远距离的电信骨干网、城域网和数据中心互联

数据来源：金元证券研究所



发射端核心器件：激光器、调制器

- 光模块发射端承担电-光转换，包括将电信号编码调制、驱动激光器发光并耦合入光纤。其主要功能是将输入信号（数据源）的电信号转化为光信号（发射信号）
- 在发送端，原始高速数据通常需要进行线路编码和调制。现代光模块多采用PAM4等多电平调制，以在有限带宽下传输更高比特率。高端模块还使用前向纠错（FEC）编码来弥补信道损耗。短距场景下（如500m以内SR/DR），常用直接调制方式（DML）。
- 电吸收调制激光器（Electro-Absorption Modulated Laser, EML）的调制原理主要依赖于量子限制斯塔克效应（Quantum-Confined Stark Effect, QCSE），在强电场作用下，半导体材料中的能带结构发生倾斜的现象。这个现象会导致材料对特定波长光的吸收特性发生变化，从而实现光信号的调制。EML将激光源与调制器封装在单芯片上，具备更高带宽、更小啁啾、更大消光比的优势，传输性能远优于DML，适用于更高码率和更远距离



数据来源：易天光通信，金元证券研究所

数据来源：易天光通信，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

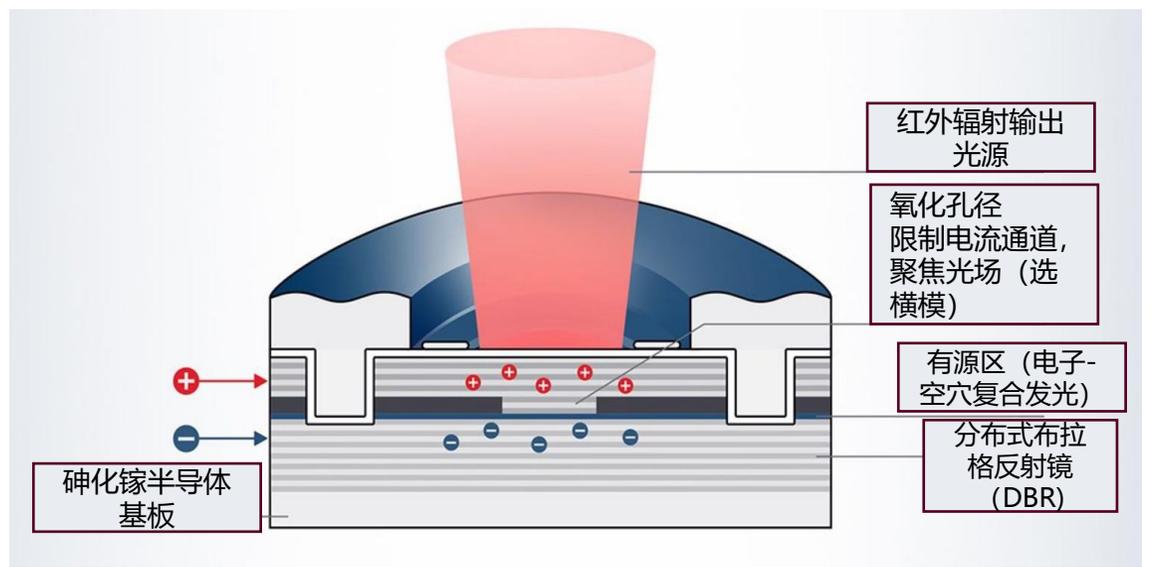


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO.,LTD.

发射端核心器件：激光器、调制器

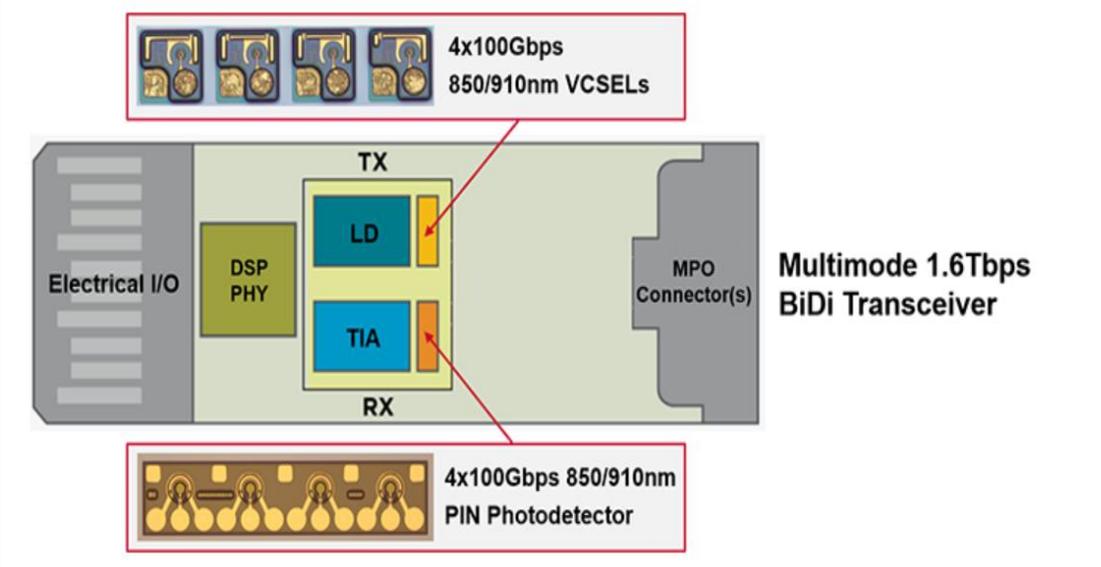
- VCSEL是在垂直于晶圆表面的方向上形成谐振腔，激光从芯片顶部垂直射出。其结构包含上下两个高反射率分布式布拉格反射镜(DBR)和夹在中间的有源增益层。由于光沿垂直方向出射，VCSEL芯片可以在晶圆上成矩阵阵列，易于大规模制造和测试。**VCSEL具有低阈值电流、单纵模输出、圆形光斑易耦合、多模高速调制等优点，其缺点是输出功率和单器件调制速率相对有限，传输距离较短（一般500米以内）**
- **VCSEL通常工作波长850nm（GaAs基），用于多模光纤短距连接，是数据中心机架内或机房内短距离互联的主流方案。**此外VCSEL阵列也是3D传感（如手机人脸识别）的光源。最新技术已推进单通道速率至106Gb/s VCSEL，并正演进到212Gb/s（新易盛OFC2025演示了基于4×212Gb/s VCSEL并行通道的1.6T OSFP多模光模块）

图：VCSEL 激光器原理图



数据来源：TRUMPF，金元证券研究所

图：基于 VCSEL 为激光器芯片的多模光模块

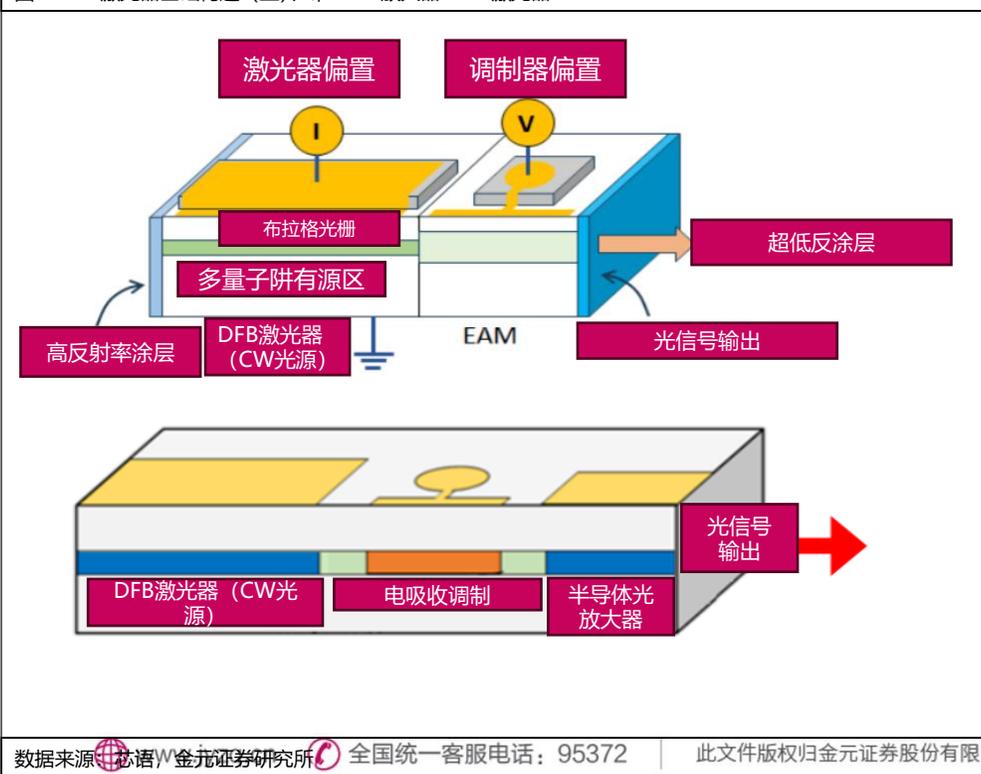


数据来源：博通，金元证券研究所

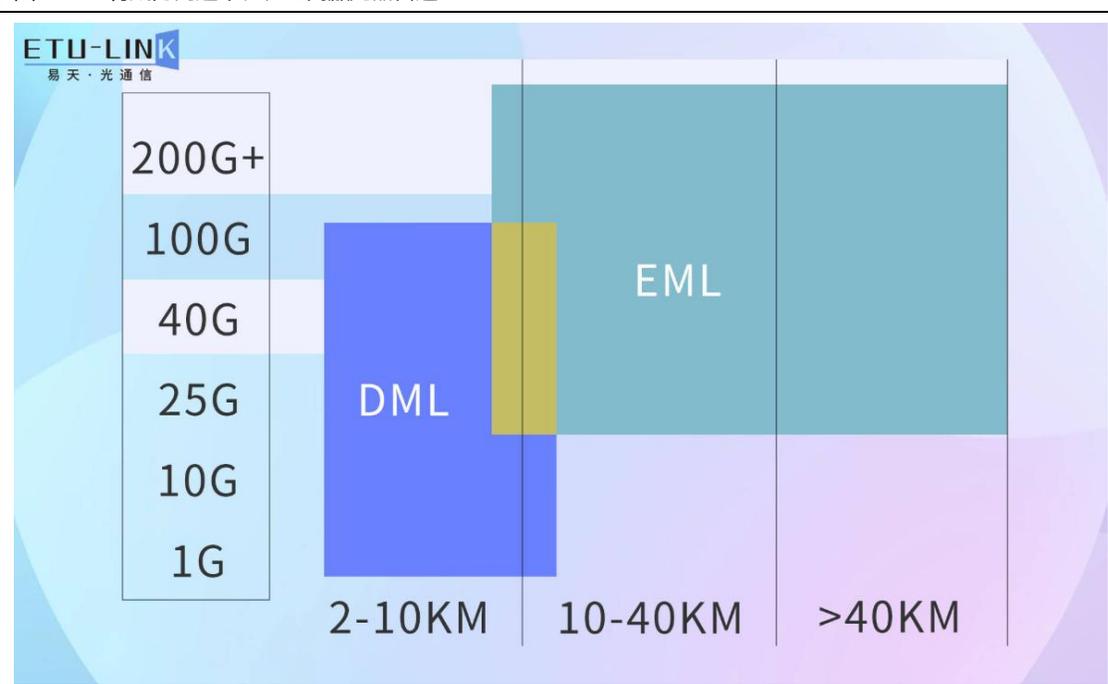
发射端核心器件：激光器、调制器

- EML目前是高速率、长距离光模块的首选光源，广泛应用于25G/50G单波的100G LR4、200G/400G LR、ZR光模块等。尤其在AI数据中心和电信骨干中，为满足高速训练集群和数据中心互联需求，800G以及未来1.6T光模块优先采用单波长100G或200G速率的EML方案由于调制和激光生成分离，EML相较直接调制DFB具备更高带宽、更低啁啾（频率对电流的敏感度，导致信号失真），在高速长距离传输中信号质量更佳。
- EML实际上是DFB激光器+集成电吸收调制器(EAM)的组合器件。它采用DFB部分产生连续光（CW），再通过后级EAM以高速电信号外调制光强，实现光信号编码。EAM的多量子阱结构中施加反向电压，可动态改变材料对特定波长光的吸收系数，从而调制出射光强。为了进一步的增加光的输出功率并且降低功耗，通过将SOA集成到EML中，实现了更高的光输出功率和低功耗

图：EML激光器基础构造（上）、带SOA放大器EML激光器



图：EML 将成为高速率、长距离激光器首选



数据来源：易天光通信，金元证券研究所

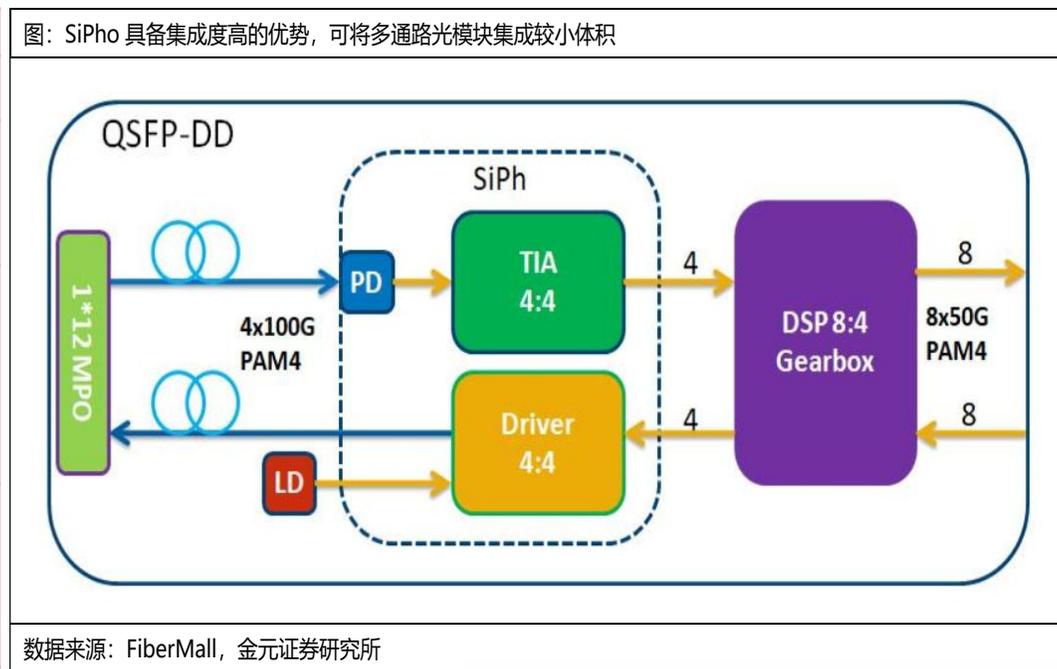
发射端核心器件：激光器、调制器

- 硅光子 (Silicon Photonics, 简称SiPho) 技术是利用硅基材料和CMOS工艺, 将光学器件和电子元件集成在同一芯片上的新一代光电子技术。通过在硅或硅基衬底 (如SOI硅覆硅、SiGe外延等) 上制造波导、调制器、探测器等光子器件, 硅光子芯片可以在单片上完成光信号的产生、调制、传输和检测。**由于硅在通信波长1.1-1.6μm范围内近乎透明, 可作为低损耗的光波导材料, 并兼容现有CMOS制程, 硅光子器件能够实现超高速率、低功耗的数据传输, 同时具备大规模集成与低成本制造的潜力**
- 由于硅本身为间接带隙材料, 无法直接产生激光, 常采用外置的分布反馈(DFB)或分布布拉格反射器(DBR)等半导体激光器作为光源, 通过硅波导耦合进入芯片内部。硅光子集成芯片的结构中, 各子组件通过硅波导互连, 光路集成度高。

图：硅光SiPho与传统激光器方案对比

技术方案	制程材料与激光器	封装方式	单通道带宽能力	功耗表现	集成度	成本趋势
硅光子集成模块	硅基SOI晶圆 + 外置InP连续激光	硅基CMOS工艺制造光芯片; 激光器通过光纤或硅基板耦合封装进模块	≥100G/通道 (可WDM多通道并行)	随通道速率提升相对低 (减少长距离电互连损耗)	高: 无源器件+有源器件单片集成, 密度高	大规模量产潜力降成本, 但当前工艺良率问题使成本仍受限
InP激光器方案 (传统DFB/EML)	InP族III-V半导体 (直接带隙材料), 集成激光器 (DFB/EML)	激光器+调制器通常在InP芯片上集成或混合集成, 需精密耦合封装进TOSA组件	25-50G/通道常见, EML方案可提升至~100G/通道	中等, 单通道功耗尚可但多通道组合功耗较高	中等: InP可集成激光/调制但规模受材料限制	高: III-V材料稀缺且工艺复杂, 组件需要精密耦合, 成本较高
VCSEL多模方案	GaAs族III-V半导体 (850nm VCSEL激光)	VCSEL阵列焊接于芯片, 上挂多模光纤耦合, 短距离并行封装	10-25G/通道主流 (实验室已达50G+, 200G VCSEL亦有发布)	低: 短距离下VCSEL激光效率高, 驱动功耗较低	低: 每个VCSEL为独立激光器, 可二维阵列但无波分复用	低: VCSEL芯片小、易于批量生产, 成本远低于同速率单模方案

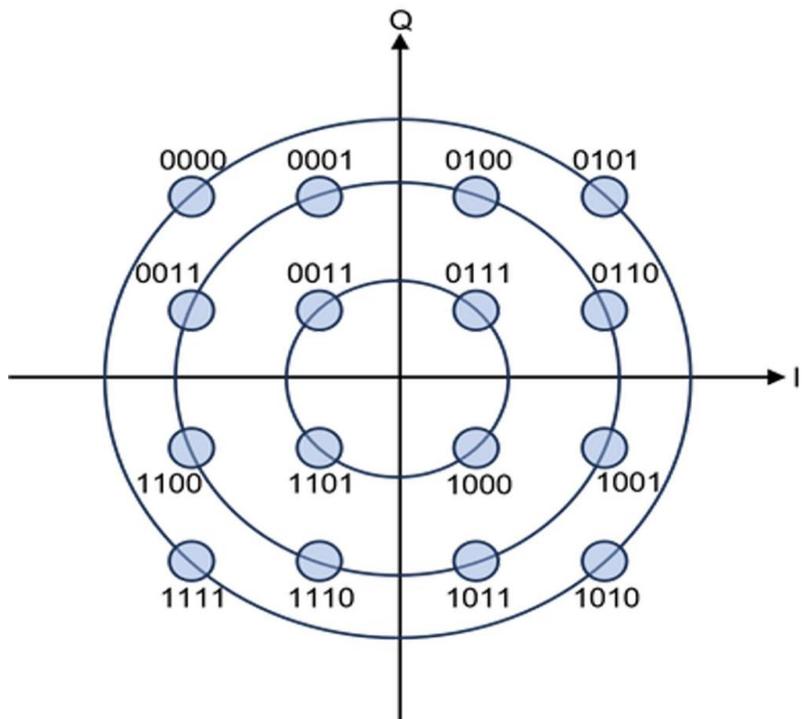
数据来源: 金元证券研究所



发射端核心器件：激光器、调制器

- 相干调制光模块通过更高级的光信号处理来突破直接调制的限制。在发射端，相干模块使用窄线宽的连续波激光作为载波，将数据信号调制到光的幅度、相位以及偏振态上。典型实现是采用双偏振正交调制：将光分成两个正交偏振(X和Y)，每路偏振再经过一个IQ调制器（由两个马赫-曾德干涉调制器组成）分别调制出正交的I路和Q路信号。光的幅度和相位在两个偏振上被精密地控制，实现诸如QPSK（四相相移键控）或16QAM（16阶正交幅度调制）等高级格式。相比于PAM4（每波特携带2bit）调制方法，例如DP-16QAM调制可实现每波特映射4bit信息，再乘以双偏振，单波长即可承载数百Gbps的数据

图：16QAM 调制方法，每波特可携带 4bit



数据来源：Cisco, 金元证券研究所

图：相干调制与直接调制（PAM4）对比

指标	相干调制 (Coherent Modulation)	PAM4调制 (PAM4 Modulation)
调制复杂度	利用幅度和相位进行调制，需要复杂的信号处理和精密元件。	仅利用幅度电平进行调制，简化设计并降低成本。
频谱效率	频谱效率更高，能够在每个符号中编码更多比特（例如 QAM-16, QAM-64）。	频谱效率适中，每个符号编码 2 比特。
信号处理需求	需要先进的数字信号处理器 (DSP) 来管理信号损伤和处理复杂调制。	对 DSP 要求较低，但需要有效的纠错机制来处理对噪声的敏感性。
应用场景	适用于长距离、大容量链路，传输距离可达数千公里。	适用于短到中距离传输，常见于数据中心和企业网络。
成本与功耗	成本和功耗较高，原因在于需要高级元件和处理需求。	成本和功耗较低，适用于成本敏感的环境。

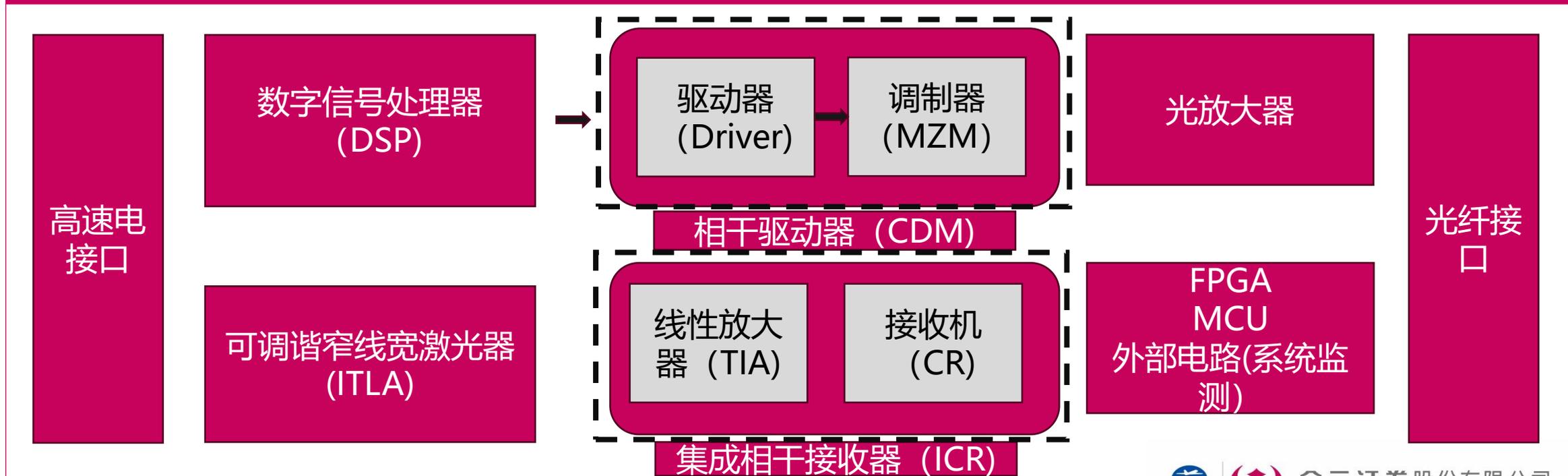
数据来源：金元证券研究所



发射端核心器件：激光器、调制器

- 虽然相干光模块在距离和容量方面有显著优势，但是采用双偏振正交调制及高阶调制对激光器芯片（光源及调制器）要求更高。相干调制需要发射端具有高线性、高带宽的调制器和驱动器，以及超窄线宽、低相位噪声的激光器，以保证调制信号的质量。由于不再仅依赖光强（直接调制），光谱利用率大幅提高，同时对光纤色散等损伤具备更强的耐受和补偿能力。
- 相干模块发射端主要由光学子系统和DSP数字处理子系统组成：光学部分包括可调谐窄线宽激光器（ITLA，既可用作发射载波，也可提供本振光源）、相干驱动调制器（CDM，包括驱动芯片和IQ调制器MZM）。为了降低体积和对准复杂度，相干器件高度集成化，例如将IQ调制器与偏振复用器封装为集成光发射组件，将整个偏振分束+混频+探测封装为集成相干接收组件ICR等

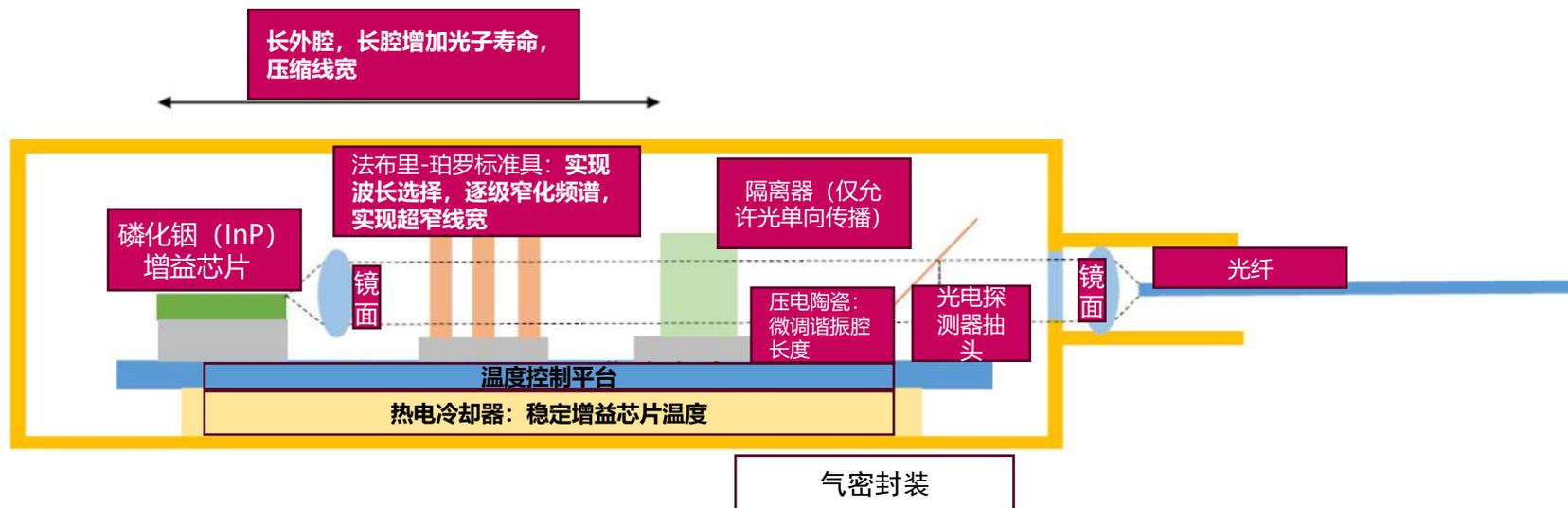
图：相干光模块组件构成



发射端核心器件：激光器、调制器

- 可调谐窄线宽激光器 (Integrable Tunable Laser Assembly, ITLA) 是一种小型化的外腔激光器，能够在宽波段内精确地调整输出频率，同时保持极窄的激光线宽。ITLA通常采用III-V半导体增益芯片结合外部光学谐振腔的设计，以获得超低相位噪声和宽调谐范围。
- 激光的相位稳定性由其线宽决定，线宽越窄，相位抖动（相位噪声）越小，传输高阶调制信号时误码率越低。在相干光通信中，信息以光信号的相位和幅度编码，因此对激光源的相干性要求极高。腔可调谐激光器示意图。
- ITLA内置增益芯片，双向谐振腔（镜面或滤波器）经过多次往返反馈后放大形成激光输出。通过改变滤波器（如棱镜、光栅或微环谐振腔）的折射率或位置，可选择性地调节谐振频率，从而实现激光频率的可调谐

图：ITLA激光器内部结构



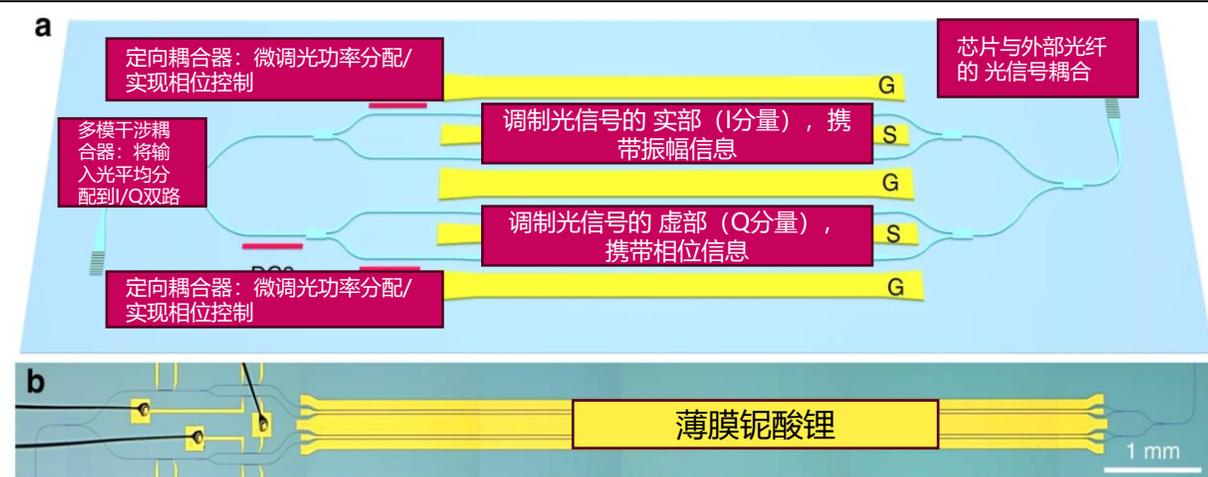
数据来源：PURE PHOTONICS，金元证券研究所



发射端核心器件：激光器、调制器

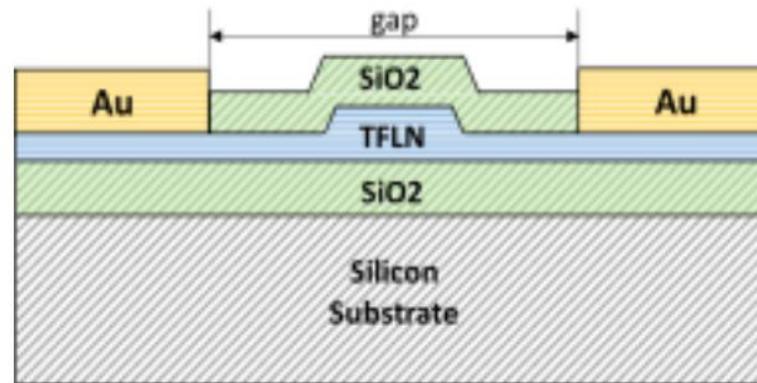
- 相干驱动调制器 (Coherent Driver Modulator, CDM) 是集成了高速驱动电子芯片和光学IQ调制器 (常见为马赫 - 曾德尔调制器, MZM) 的器件, 用于将数字信号 (I/Q分量) 转换为光学信号的振幅和相位变化。典型的CDM包含一个四通道驱动器IC (分别驱动两极化下I和Q两路的正负电极) 和两级嵌套的Mach-Zehnder IQ调制器
- CDM中使用的IQ调制器平台主要有传统LiNbO₃ (铌酸锂)、薄膜LiNbO₃和硅基光子学等三类。传统块晶LiNbO₃调制器稳定可靠, 但芯片尺寸通常较大 (芯片长度可达数厘米), 驱动电压较高 ($V\pi$ 常在3~7 V), 电光带宽受限 (~35 GHz)。相比之下, 薄膜铌酸锂调制器由于采用高折射率对比度的波导结构, 在保持铌酸锂高线性度和低色散的同时, 极大缩短了器件长度并降低了 $V\pi$, 且具备明显的带宽优势

图: IQ 调制器内部结构



数据来源: 《High-performance coherent optical modulators based on thin-film lithium niobate platform》, 金元证券研究所

图: 薄膜铌酸锂横截面结构

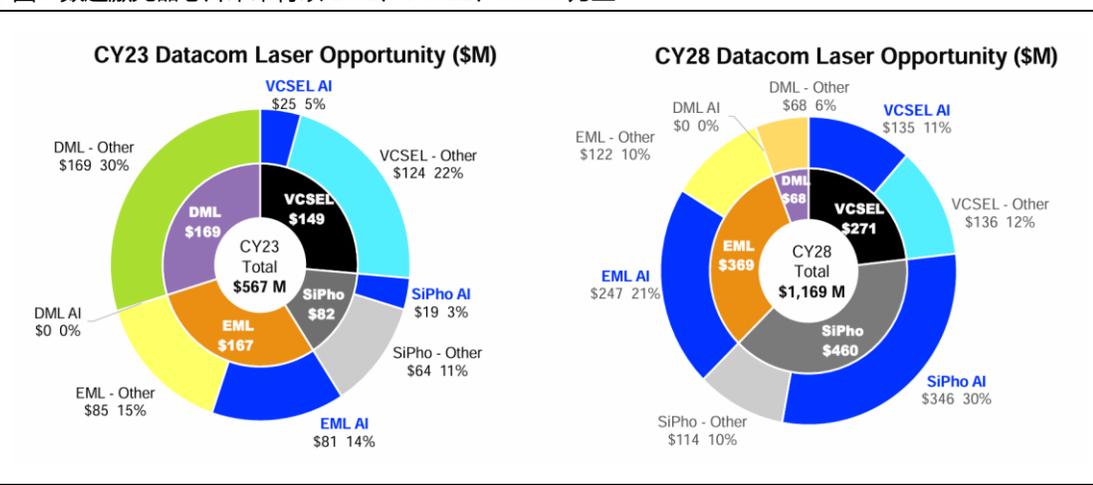


数据来源: OPTO CHIP, 金元证券研究所

发射端核心器件：激光器、调制器

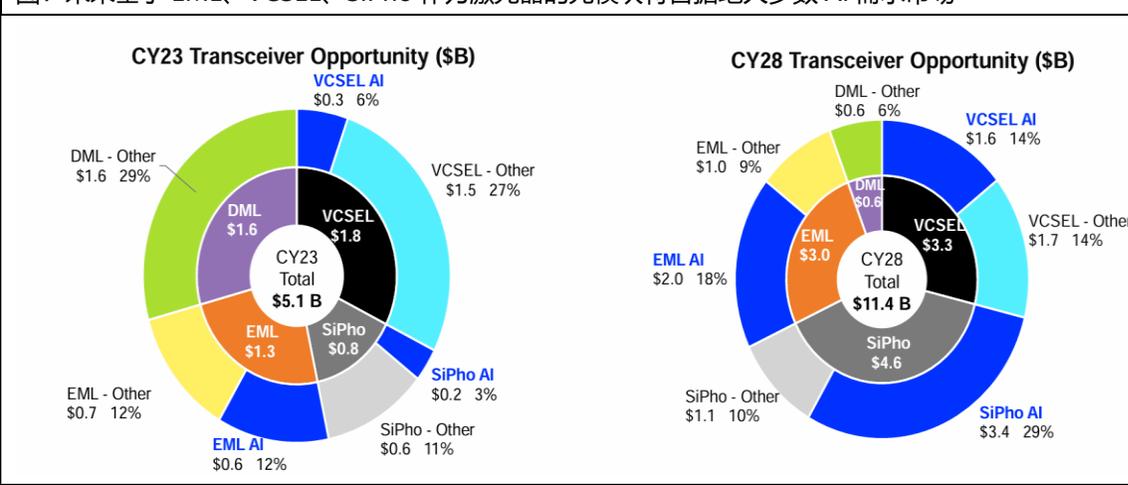
- Coherent预测，未来基于VCSEL及EML激光器的光模块占比将持续上升，硅光技术或成为主流。
- 我们认为基于不同的场景化需求，不同激光器将基于速率、功耗及距离角度做出选择：
 - **VCSEL：AI 时代的“超短距骨干”**：阵列化 + 低功耗：VCSEL 天生为面发射，可在封装顶部排布 8/16 条光通道，单通道功耗可低至 < 50 mW。200 G/lane 正在成形。Coherent 在 OFC 2025 展示 1.6 T-SR8 光模块，采用 200 G VCSEL 与多模接收阵列
 - **EML：中距离的功耗杀手**：500 m–2 km 中距“甜蜜点”；200 G/lane 正在成为 1.6 T-DR8 等模块的主力。
 - **SiPho Laser：长距 / 高度集成平台**：基于薄膜铌酸锂的IQ调制器完美适配硅光技术。“LN-on-Silicon”或成为主流。在现成 SiPho 流程上直接键合 TFLN 晶圆，不破坏 CMOS 光罩，与EML/VCSEL共平台集成时更易实现波导级贴近，有望显著降低 CPO-/LPO-级链路的功耗。

图：数通激光器芯片未来将以 EML、VCSEL、SiPho 为主



数据来源：Coherent, 金元证券研究所

图：未来基于 EML、VCSEL、SiPho 作为激光器的光模块将占据绝大多数 AI 需求市场

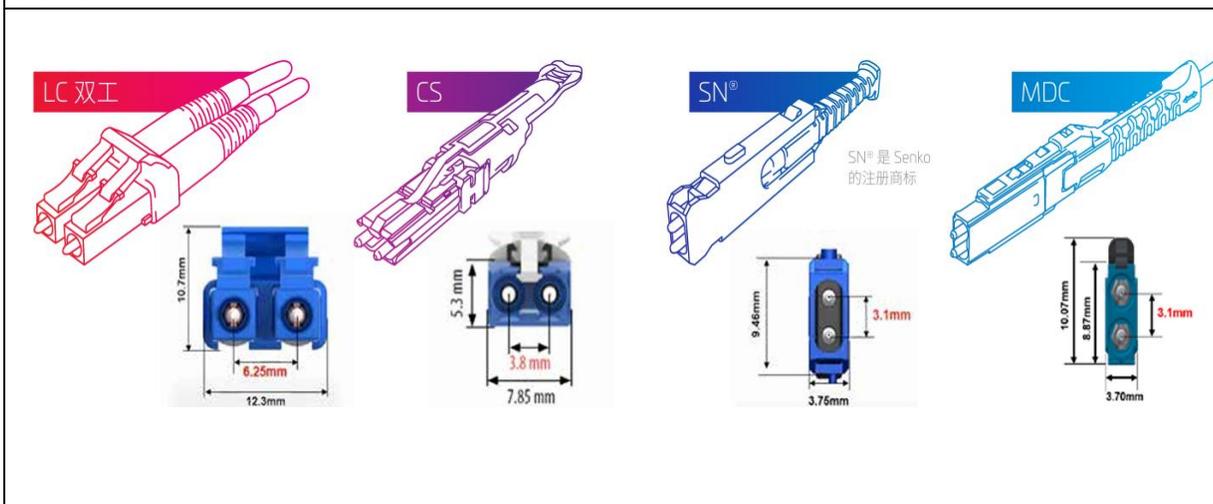


数据来源：Coherent, 金元证券研究所

光通信中的无源器件：连接器、分路器、波分复用器

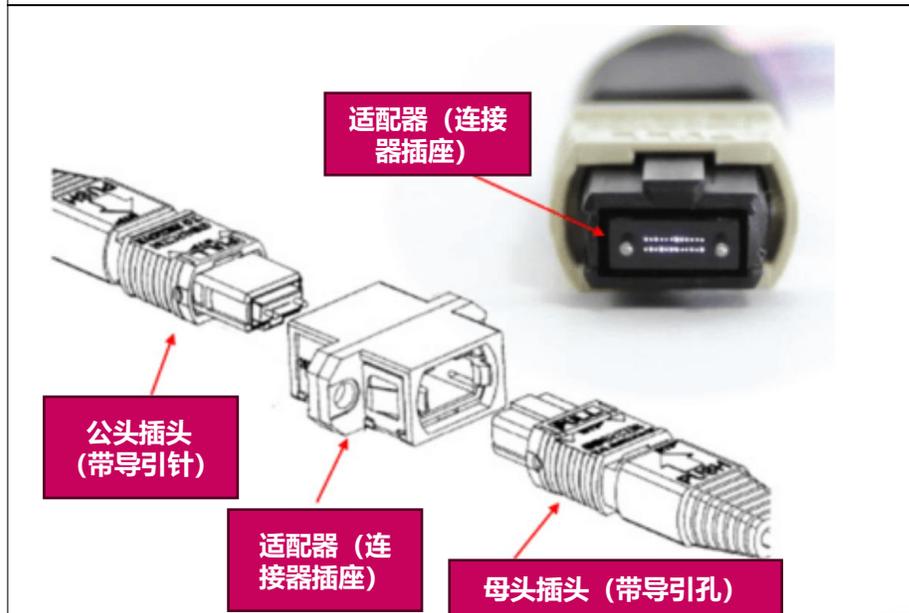
- 光纤连接器用于将两根光纤的端面精密对准并接合，使发射端光纤输出的光功率最大限度耦合进入接收端光纤，同时尽量减少连接引入的损耗和反射。光连接器的原理基于光在光纤中的全反射传输，要求两个光纤纤芯严格对准、紧密贴合，以避免漏光或引入较大反射。
- 微小的错位都会导致光能泄露或反射，引起插入损耗 (Insertion Loss) 上升或回波损耗 (Return Loss) 下降。因此光连接器被视为高速光通信网络中极其精密的组件，对连接性能有决定性影响。典型光纤连接器主要由套圈（插芯）、连接器本体和耦合/固定器件。其中套圈 (Ferrule) 是连接器的核心部件，通常采用高精度氧化锆陶瓷制成圆柱插针，用于精准固定和保护光纤端面
- 按照光纤芯数，连接器可分为单芯连接器和多芯连接器。单芯连接器使用1.25 mm或2.5 mm直径陶瓷插芯，典型有FC（螺纹锁紧，耐振动）、SC（方形插拔，常用在局端和FTTH）、ST（圆形卡口，早期LAN应用）和LC（小型插拔，密度约为SC的一半，用于数据中心）。多芯连接器则包含MPO/MTP系列，使用阵列式MT插芯，一次可连接多达8、12、16、24芯乃至更高芯数光纤，极大提升面板端口密度

图：单芯连接器



数据来源：COMMSCOPE, 金元证券研究所

图：多芯 MPO 连接器



数据来源：FiberMall, 金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

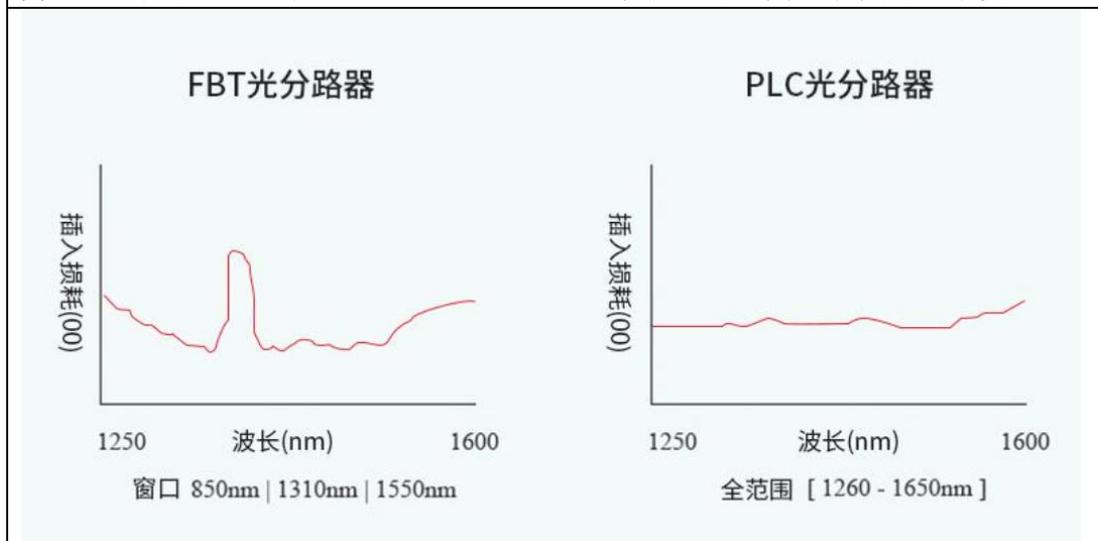


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

光通信中的无源器件：连接器、分路器、波分复用器

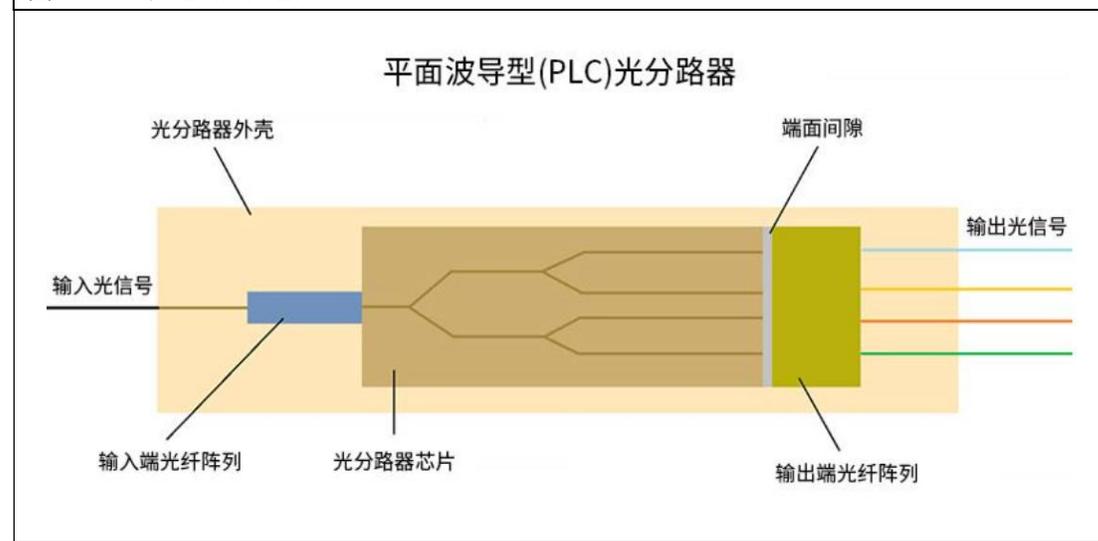
- 光分路器是一种将一路输入光功率按比例分配到多个输出的无源器件，也可反向将多路光合成一路。常用的是 $1 \times N$ 或 $2 \times N$ 光分路器，将一根（或双根）输入光纤的信号平均或非平均地分成 N 路输出。
- **基于光功率的耦合分束：按照实现方式不同，主要有熔融拉锥式和平面波导式（PLC）两大类。**熔融拉锥式（FBT Coupler）通过将两根（或多根）裸光纤在高温下拉细、熔融黏合，利用模式耦合效应在一定锥区长度内将光功率按比例耦合分出。这种方法工艺简单但一致性和分光比稳定性受限，常用于小分路数（如 1×2 、 1×4 ）以及分光比固定需求。平面光波导型分路器（PLC）则采用光集成技术：在硅石英基板上制作Y分支波导阵列，将光功率逐级均分。例如，用一块PLC 1×8 芯片即可将输入光均匀分为8份。
- PLC分路器具有分光均匀、频带宽、体积小等优点，能做成 1×32 、 1×64 甚至更高分路数，广泛应用于PON（无源光网络）及需要多路广播的场景。

图：PLC 光分路器的工作波长在 1260nm~1650nm 之间，波长可调节，支持更多应用环境使用



数据来源：光通信之家，金元证券研究所

图：PLC 光分路器简化结构



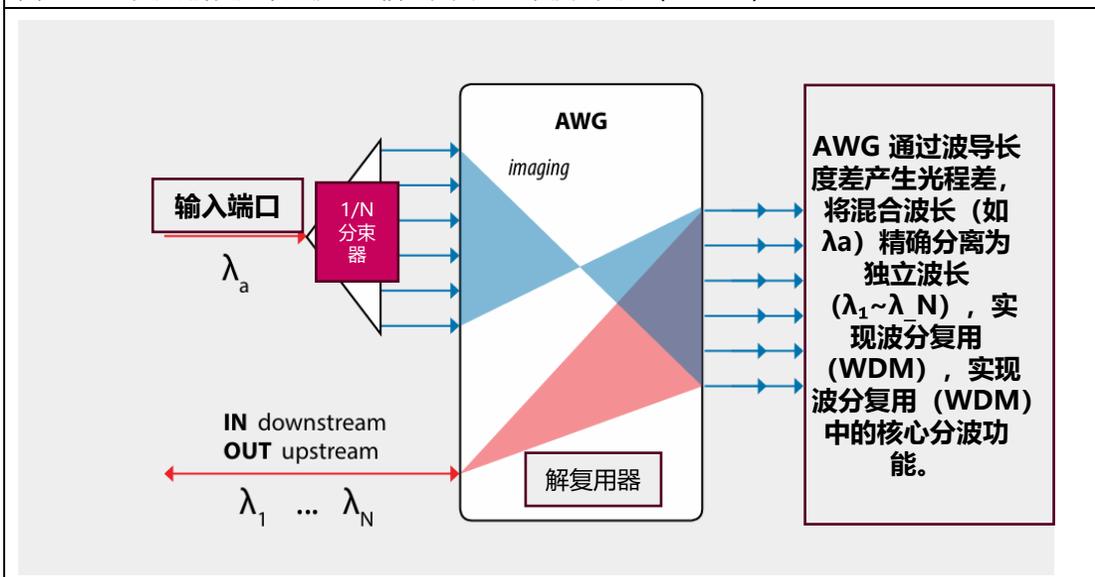
数据来源：光通信之家，金元证券研究所



光通信中的无源器件：连接器、分路器、波分复用器

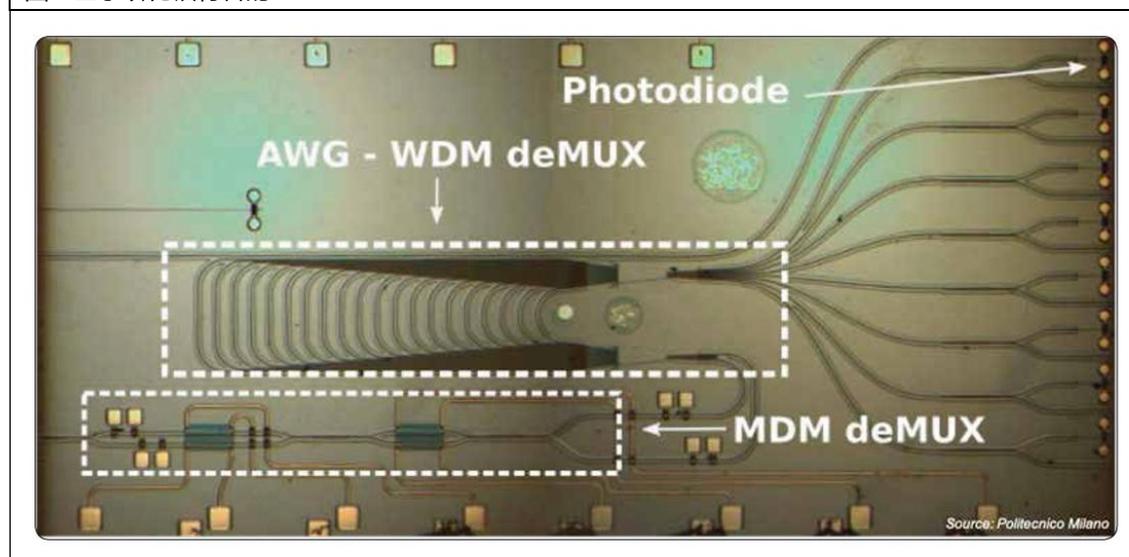
- **波分复用器是一种将不同波长的光信号在一根光纤上合路传输或分路还原的器件。**以密集波分复用 (DWDM) 为例，多个间隔一定频率 (如100 GHz、50 GHz) 的激光信号被复用器汇聚到单纤发送，到远端由解复用器分离回各自波长，实现一纤多波长传送。WDM复用/解复用器件形式多样，包括薄膜滤波器 (TFF) 型、阵列波导光栅 (AWG) 型、光纤光栅+环形器型等。
- 以AWG为例，其芯片包括输入/输出耦合区 (自由传播区) 和阵列波导区。不同波长的光在阵列波导中产生波前相移，经过输出阵面时，由于光程差不同，各波长光在某些输出波导方向发生相长干涉，对应地集中到特定输出，从而达到按波长空间分离的效果
- **WDM器件可用于数据中心内部或之间的长距离高速连接 (DCI)。**例如两座相距几十公里的数据中心之间，往往通过相干DWDM系统互联，此时一对复用/解复用模块 (通常为AWG) 汇聚多波长 400G/800G 信号在一根光纤上传输

图：AWG 复用/解复用不同波长光信号，实现密集波分复用 (DWDM)



数据来源：SENKO，金元证券研究所

图：基于磷化铟材料的 AWG



数据来源：SENKO，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

接收端核心器件：光探测器

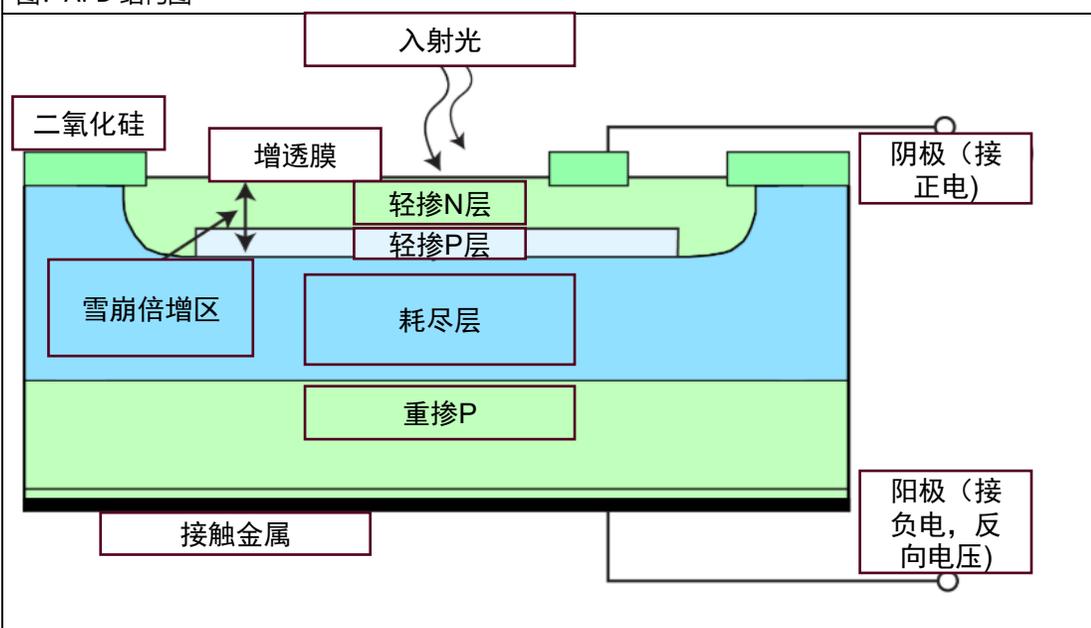
- 光探测器 (PD) 将入射光转换为电流信号，是接收灵敏度的决定因素。** 常用PD有PIN光电二极管（线性响应快，但无增益）和APD雪崩二极管（内部倍增电流提高灵敏度）。短距高速模块多采用高速PIN-PD阵列，其带宽可达50~100 GHz以匹配PAM4速率。长距场景则常用APD以获得更高光增益，但APD需高偏压且噪声较大。随着波长升级到O波段（1260-1360 nm）甚至C波段，InGaAs基PIN/APD主导。
- APD在PIN结构的基础上，在P区或I区中设计有高电场雪崩增益区。入射光产生的载流子在高场区发生碰撞电离（雪崩倍增），每个光子生成多个电子-空穴对，从而提升有效响应度和灵敏度。APD需加较高的反向偏压来实现内部增益，但也导致噪声增大。一般而言，**APD具有更高的带宽和更强的低光级检测能力，适用于远距离或低信号功率场合，而PIN结构在短距离低成本应用中占主导**

图：不同光探测器对比

参数	硅(Si) PIN	锗(Ge) PIN	InGaAs PIN	InGaAs APD	锗(Ge) APD
响应波段	400-1000 nm	800-1800 nm	900-1700 nm	900-1700 nm	800-1800 nm
850nm响应度	0.5-0.6 A/W	≈0.26 A/W	≈0.2-0.3 A/W	≈0.3-0.5 A/W	≈0.3 A/W
1310nm响应度	无响应	0.70 A/W	0.85-0.95 A/W	0.8-1.0 A/W ×增益	0.75 A/W ×增益
1550nm响应度	无响应	0.85 A/W	0.95-1.1 A/W	1.0-1.2 A/W ×增益	0.90 A/W ×增益
典型增益	无	无	无	×10-20	×8-15
暗电流	0.1-1 nA	1-10 μA	0.5-5 nA	10-50 nA	0.5-5 μA
噪声特性	最低 (热噪声主导)	最高 (暗电流噪声大)	极低 (johnson噪声)	高 (雪崩倍增噪声)	高 (暗电流+倍增噪声)
带宽能力	≤10 GHz	≤5 GHz	≥25 GHz	≥20 GHz	≤10 GHz
成本	(最低)			(最高)	
核心优势	850nm最优、低成本	宽光谱覆盖	长波段高响应+低噪声	超高灵敏度 (弱光探测)	宽光谱+中等增益
致命缺陷	仅适用短波长	噪声高、温漂大	850nm效率低	噪声高、电压复杂	噪声高、性能落后

数据来源：金元证券研究所

图：APD 结构图

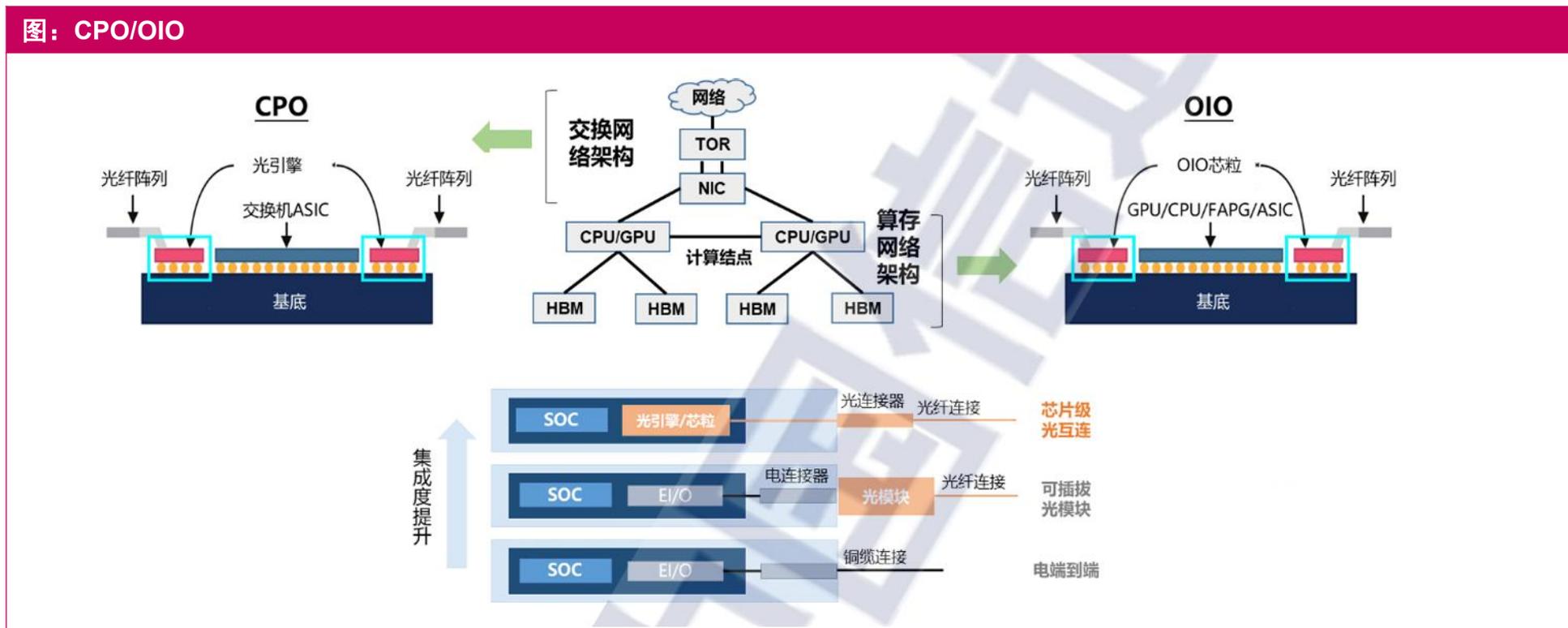


数据来源：SENKO，金元证券研究所

光电互连的结合体：CPO和OIO

- **CPO的核心思想**是将光收发器直接靠近或集成到交换/处理芯片封装内，以“短距离电互连+光输出”的方式替代传统“长距离PCB走线+可插拔光模块”。片间光互连以光电合封（CPO）和光输入输出（OIO）为主，与电布线相比，光连接功耗更低，尤其在高频（>10GHz）和长距情况下优势更为明显。
- **交换网络聚焦CPO技术，算存网络聚焦OIO技术。**CPO将光芯片与交换芯片封装，与外部其他芯片形成连接，而OIO技术在算存网络中，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（IO）解决方案，形成对传统IO方案的替代。当前的实现方式，无论CPO还是OIO都是以异构集成方式为主。

图：CPO/OIO



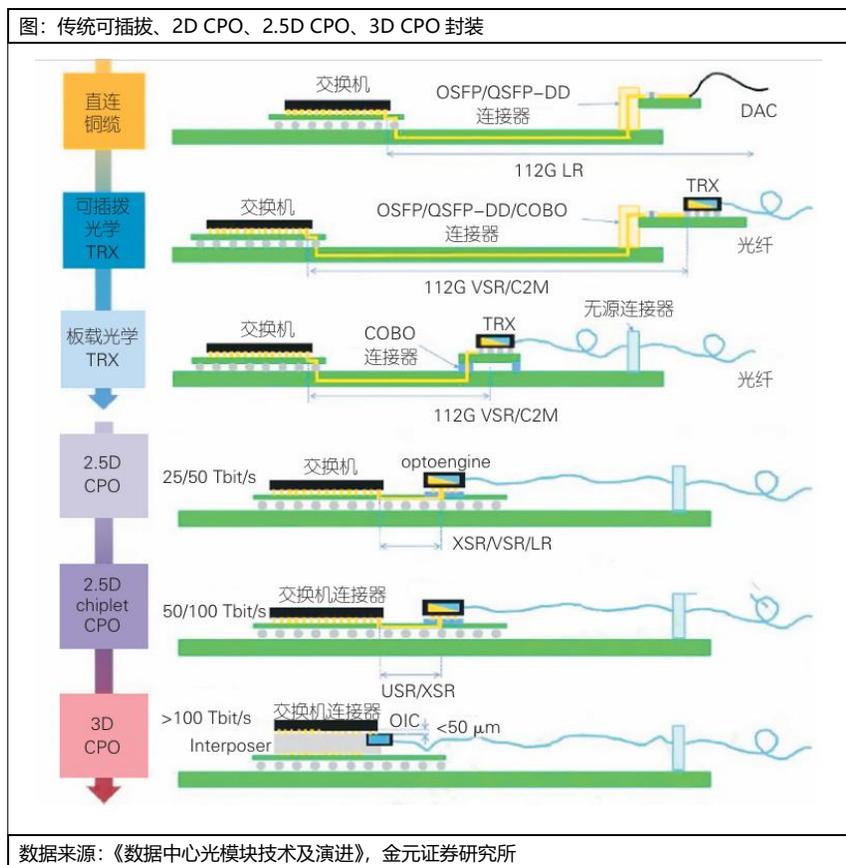
数据来源：中国信通院，金元证券研究所



光电互连的结合体：CPO和OIO

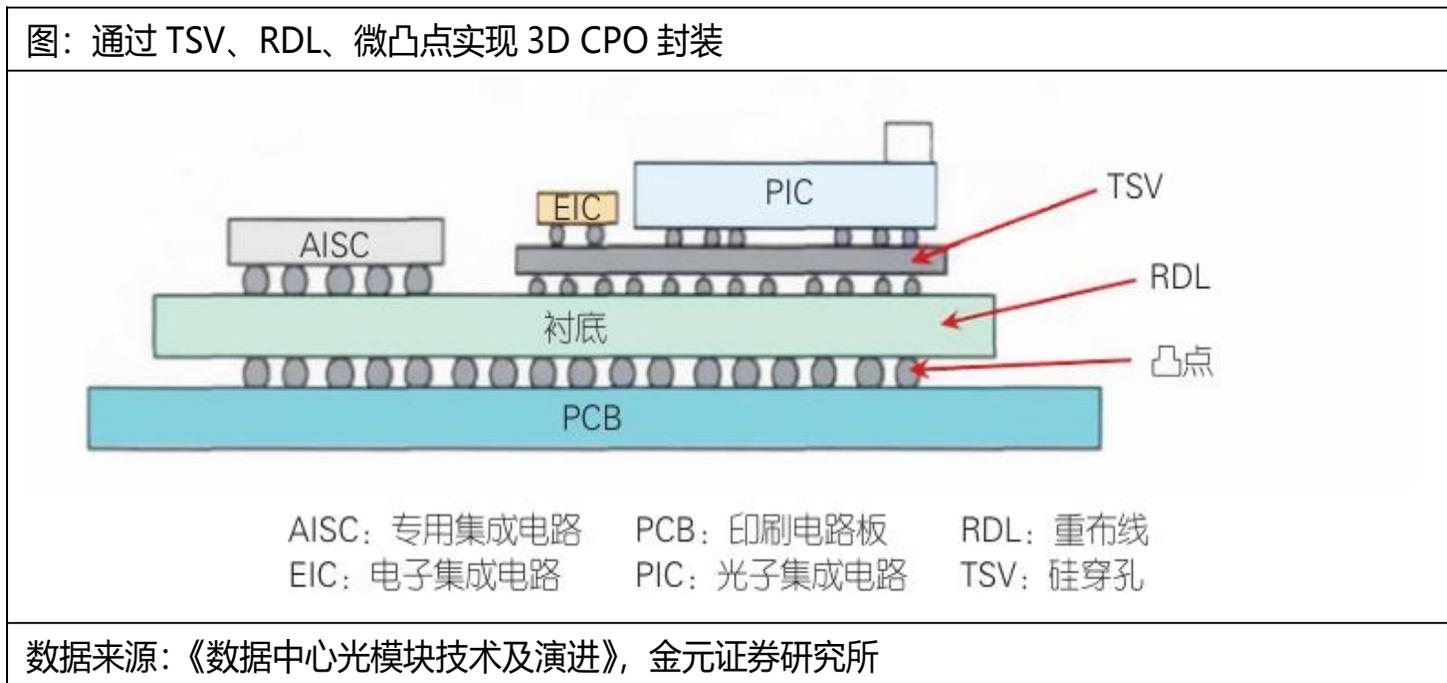
- 诸如此前所述，数据中心互连需求包括高速率、低功耗、低成本等。CPO就是在成本、功耗及高速率互连的光电封装解决方案。CPO将光模块（光引擎）不断向交换机芯片（ASIC）靠近，缩短芯片与模块之间的走线距离，最终实现光引擎和电交换芯片的整体封装。CPO通过将硅光子模块和超大规模CMOS芯片紧密封装，在功耗和系统成本及互连层面进一步优化。
- 与芯片封装趋势一致，CPO封装形态也包括从2D封装走向3D。2D封装将PIC（光子集成电路）与IC平面放置在基板或PCB上，通过引线键合或基板底层布线来实现互连。2D封装的优点在于封装难度低且灵活度高，可实现异质集成。当然，与电芯片FC（Flip Chip）类似，2D封装也可通过FC来替代传统引线间隔。2.5D封装则是通过中介层来实现PIC和IC互连，2.5D封装发展出现了玻璃转接板替代硅转接板趋势。3D封装则是通过通孔技术实现垂直互连，有更短互连距离、更高互连密度、高频率、低功耗、高集成度等优点。

图：传统可插拔、2D CPO、2.5D CPO、3D CPO 封装



数据来源：《数据中心光模块技术及演进》，金元证券研究所

图：通过 TSV、RDL、微凸点实现 3D CPO 封装



数据来源：《数据中心光模块技术及演进》，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



首都机场集团
Capital Airport Group



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

光电互连的结合体：CPO和OIO

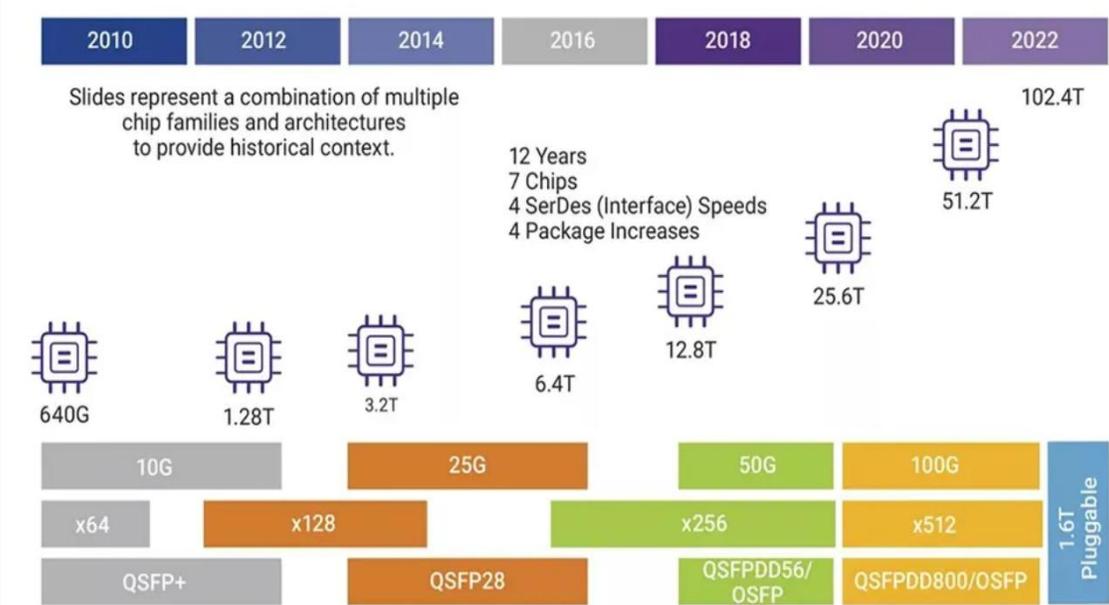
- CPO主要由交换机巨头主导。** 由于CPO不再使用传统可插拔式光模块，而是将光模块与交换机电芯片ASIC直接互连，与交换机绑定在一起，技术实现需要全面的硬件平台和工艺设计能力。2020年以来，CPO样机相继发布、容量也不断提升。2024年博通展示了51.2Tb/s CPO交换机以及6.4Tb/s FR4光引擎。2025年博通发布Tomahawk 6交换机，将带宽容量提升至102.4Tb/s，且支持CPO技术灵活连接方案

图：CPO 结构使得光引擎与交换机 ASIC 深度捆绑，交换机巨头主导 CPO 市场



数据来源：XILINX, 金元证券研究所

图：交换机带宽至 102.4Tb/s，未来通过 CPO 集成光引擎实现高速、低成本、低功耗目标

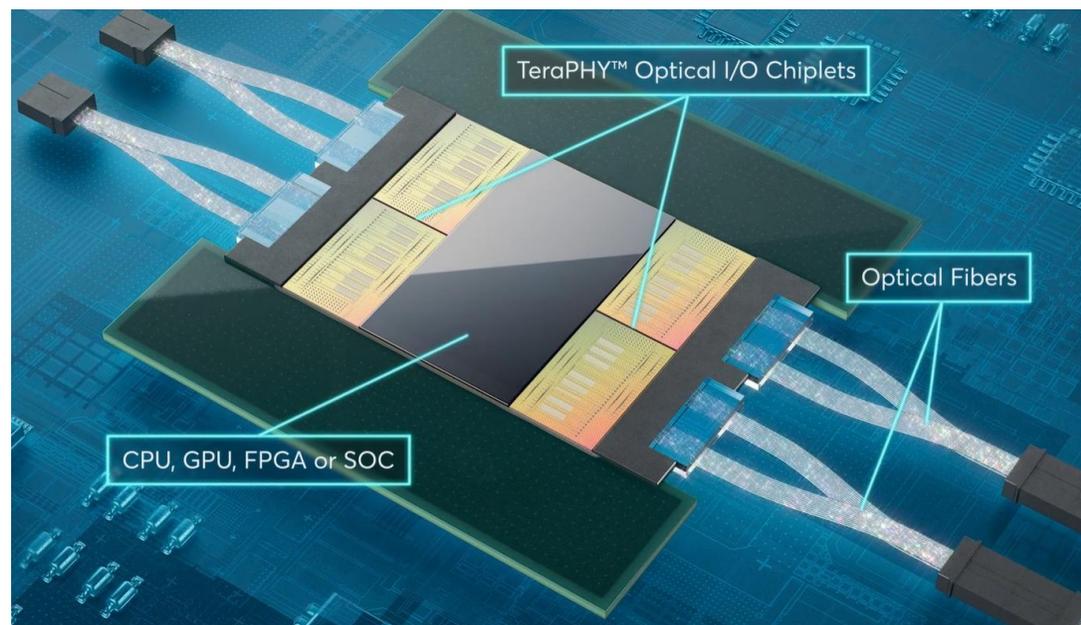


数据来源：OCP, 金元证券研究所

光电互连的结合体：CPO和OIO

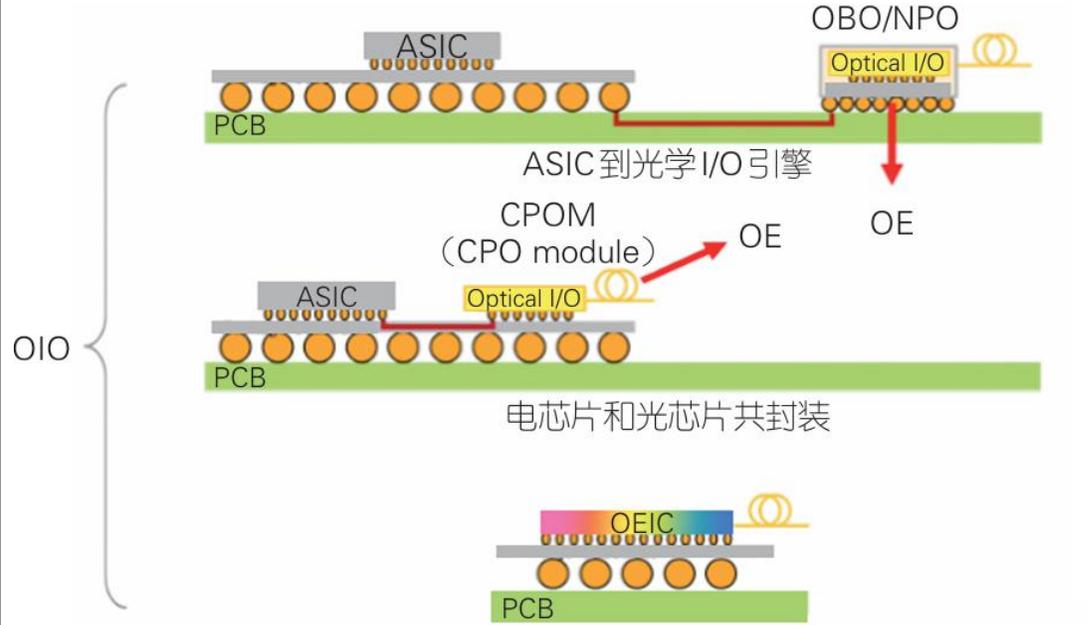
- OIO是算存架构的互连方案。随着算力规模持续扩大，计算芯片与其他芯片（如存储芯片）需要建立更高带宽密度的IO连接。OIO可将数据传输带宽提升7倍，功耗降低1/5，尺寸降低1/12，大幅提升互连性能，满足计算芯片内、计算芯片封装体内互连及高性能计算场景需求。
- Ayar Labs再该领域积累深厚，2023年演示了与英特尔FPGA集成的OIO解决方案，实现双向4Tb/s数据传输；英特尔2024年发布的CPU通过3D共封的OIO芯粒，双向带宽4Tb/s，国内企业2023年发布了适用于外设组件互连快速总线（PCIe）和计算快速连接（CXL）协议的光互连产品。
- OIO标准当然仍处于初期，连续波波分复用多源协议（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。

图：OIO 实现芯片级光互连，实现高带宽、低功耗互连



数据来源：Ayar Labs, 金元证券研究所
www.jyzq.cn 全国统一客服电话：95372

图：OIO 连接方案



数据来源：《数据中心光模块技术及演进》，金元证券研究所



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

相关公司

- **相关公司：**我们认为，随着AI算力中心集群扩张，无论是Scale up还是Scale out方案均对高速率、低功耗连接有更高要求，高速率、短、中长距离光连接及硅光、CPO封装需求随着数据中心基础设施建设加速放量，有望带来更大市场。
- **无论是传统可插拔解决方案还是CPO集成，激光器（高速电光转换，如高功率CW光源）、接收器、调制器（高速调制，如薄膜铌酸锂，及实现高阶调制，如QPSK）、AWG（实现波分复用）均必不可少，关注高速光模块及适配CPO方案的激光器、调制器及无源器件核心器件设计、生产厂商：**
 - **华工科技（000988.SZ）：**800G放量在即，1.6T光模块验证。公司高功率激光器模块市占率较高，且聚焦CPO解决方案。公司在OFC 2025发布首款适配下一代AI训练集群的3.2Tb/s液冷共封装超算光引擎，单片集成32通道，能效低至5pJ/bit，较传统可插拔模块功耗降低近70%。通过液冷散热方案，其实测集群电源使用效率（PUE）从1.25W降至1.12W，单机架算力密度提升40%。
 - **联特科技（301205.SZ）：**薄膜铌酸锂调制器适配1.6T光模块，性能对标国际厂商，支持单通道200G传输。2024年3月，公司发布了基于Sipho MZM技术的800G光模块，包括集成DSP模块和LPO模块。在OCP上重点推出了800G 2DR4 LRO、800G DR4和1.6T OSFP 1600等产品
 - **源杰科技（688498.SH）：**国内光芯片龙头，已建立了包含芯片设计、晶圆制造、芯片加工和测试的IDM全流程业务体系，生产流程自主可控。数据中心CW硅光光源产品逐步放量，公司CW 70mW激光器产品实现批量交付，产品采用非制冷设计，具备高功率输出和低功耗特性。100G PAM4 EML、CW 100mW芯片已完成客户验证，200G PAM4 EML完成产品开发并推出
 - **光库科技（300620.SZ）：**公司持续强化连接器产品布局，开发应用于CPO的系列微光学连接器。加快超高带宽薄膜铌酸锂调制器 130GB/200GB CDM 器件及芯片、PAM-4 单波 200G/400G 芯片的研发和客户验证，推广 CDM 器件和芯片在相干市场的小批量应用，加速开拓 PAM-4 芯片产品数通市场
 - **新易盛（300502.SZ）：**公司为国内少数实现400G/800G光模块批量交付的企业，全面掌握高速光器件芯片与封装技术，产品覆盖：基于VCSEL/EML、硅光及薄膜铌酸锂的400G/800G/1.6T全系列；400G/800G ZR/ZR+；支持100G/lane与200G/lane的400G/800G LPO光模块



风险提示

- 高速光模块技术发展路线较多，各细分市场如调制器材料、光源技术路线不确定性较大
- AI算力中心建设周期较长，存在明显周期性
- AI技术路线变化导致算力中心Capex不及预期
- 海外需求影响较大，且部分组件依赖海外巨头，贸易冲突影响企业利润
- 各公司前期研发成本较高，技术门槛较高导致利润不及预期
- 政治、政策不确定性因素及其他宏观因素



投资评级说明

金元证券行业投资评级标准：

增持：行业股票指数在未来6个月内超越大盘；

中性：行业股票指数在未来6个月内基本与大盘持平；

减持：行业股票指数在未来6个月内明显弱于大盘。

金元证券股票投资评级标准：

买入：股票价格在未来6个月内超越大盘15%以上；

增持：股票价格在未来6个月内相对大盘变动幅度为5%~15%；

中性：股票价格在未来6个月内相对大盘变动幅度为-5%~+5%；

减持：股票价格在未来6个月内相对大盘变动幅度为-5%~-15%；。

免责声明

本报告由金元证券股份有限公司（已具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格）制作。本报告所载资料的来源及观点的出处皆被金元证券认为可靠，但金元证券不保证其准确性或完整性。该等信息、意见并未考虑到获取本报告人员的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。投资者应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，并应同时考量各自的投资目的、财务状况和特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专业财务顾问的意见。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，金元证券及/或其关联人员均不承担任何法律责任。投资者需自主作出投资决策并自行承担投资风险，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

本报告所载的信息、材料或分析工具仅提供给阁下作参考用，不是也不应被视为出售、购买或认购证券或其他金融工具的要约或要约邀请。该等信息、材料及预测无需通知即可随时更改。过往的表现亦不应作为日后表现的预示和担保。在不同时期，金元证券可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。

金元证券的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。金元证券没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。金元证券的自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

在法律许可的情况下，金元证券可能会持有本报告中提及公司所发行的证券头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行业务服务。因此，投资者应当考虑到金元证券及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突。投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一信赖依据。

本报告的版权仅为金元证券所有，未经书面许可任何机构和个人不得以任何形式转发、翻版、复制、刊登、发表或引用。

