

CHARLES & KWOK | Multi-Asset Research | 行业深度研究

报告编号：CK-2026-OPT-001 | 发布日期：2026 年 5 月 | 首席分析师：Chuck Guo

# 算力过剩之后

## AI 连接系统：下一个万亿级重构

算力不再是核心约束，连接系统的结构性重构已然开始。

首席分析师：Chuck Guo | Charles & Kwok Multi-Asset Research

参与分析师：CJ Muse (Cantor Fitzgerald) · Tim Savageaux (Northland Capital) · Karl Ackerman (BNP Paribas)

本报告仅供专业投资者参考，不构成任何形式的投资建议。请参阅报告末尾免责声明。

## 投资要点

01

### 定价背离：光互连板块的系统性低估

全球光互连上市公司总市值合计低于美光（Micron）单一公司市值，而其所在赛道正处于历史性重构的起点。这一定价背离的修复路径，是本报告的核心命题。

02

### 瓶颈迁移：连接系统取代算力成为 AI 的新约束

GPU 利用率数据表明，AI 集群规模扩展至数千块 GPU 后，GPU 间通信开销已与计算本身相当。算力的边际效益受制于连接系统的物理瓶颈，而非 GPU 本身。

03

### 铜光共存：非简单替代，而是场景分化

铜缆在 Scale-up（GPU 短距离互连）场景仍具成本与可靠性优势，光纤在 Scale-out（机柜间长距离）场景则不可替代。两者将在不同场景下长期并行，而非简单替代。

04

### CPO 节奏：终局形态，但 2026 年以验证为主

CPO（Co-Packaged Optics，共封装光学）是光互连的终局形态，已获 NVIDIA 与 Meta 官方背书。然而大规模商用受制于制造良率与运维复杂度，预计 2026 年以小批量验证为主，2028 年后方进入规模化阶段。

05

### 过渡机会：2026 年的确定性在 LPO/NPO 与 1.6T 放量

2026 年最具确定性的收入增量并非来自 CPO 概念标的，而在于 1.6T 可插拔光模块放量、LPO/NPO 过渡方案部署，以及 PCB/ABF 基板与硅光代工产能扩张。

06

### 价值重构：利润池从模块封装向芯片与封装迁移

CPO 将利润中心从传统光模块封装，迁移至 ELS 外部激光源、硅光 PIC 代工（SOI 工艺）、先进封装与平台级公司。跨阶段供货能力是长期确定性的核心。

## 一、算力不是瓶颈，连接才是

### 1.1 一个关键数据：8,000 块 GPU，实际利用率仅 38%

2024 年，Meta 在内部 AI 基础设施研究中披露：其大规模训练集群在扩展至数千块 GPU 后，实际 GPU 利用率持续低于 40%。制约因素并非 GPU 本身的计算能力，而是 GPU 之间的通信开销已超过计算本身。

值得关注的是，上述现象并非孤例。Anthropic、Google DeepMind 等机构的工程团队在多个技术论坛中描述了相同的规律：集群规模越大，GPU 的等待时间占比越高，有效计算时间占比越低。

堵车问题：算力被浪费在哪里？

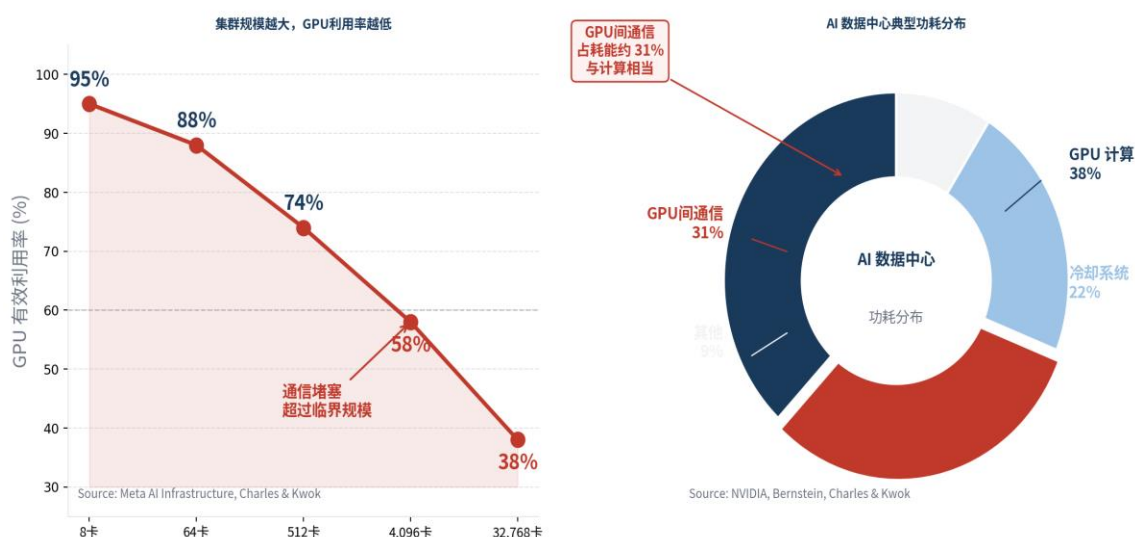


图 1：集群规模扩大导致 GPU 利用率下降（左）；AI 数据中心典型功耗分布（右）资料来源：Meta AI Infrastructure, NVIDIA, Bernstein, Charles & Kwok

### 1.2 通信瓶颈的形成机制

大模型训练依赖两种核心并行方式：张量并行（Tensor Parallelism）与专家并行（Expert Parallelism, MoE 架构）。两者均要求 GPU 之间进行高频、大规模的中间计算结果同步，即 AllReduce 操作。

其根本原因在于，AllReduce 的通信量随 GPU 数量的增加呈超线性增长。当集群规模从百卡扩展至万卡，新增算力虽呈线性扩张，但 GPU 间需同步的数据量增长远超线性。超过临界规模后，继续增加 GPU 不再提升训练效率，反而加剧通信拥塞。

#### 连接瓶颈的三组关键数据

- AI 训练集群中，GPU 间通信开销约占总能耗 31%，与计算本身（38%）处于同一量级
- 单个 1.6T 光模块（Optical Transceiver）功耗约 30W，其中 DSP 芯片消耗约 18W
- NVIDIA 测试数据：CPO（Co-Packaged Optics）交换机较传统光模块节省 70%通信功耗

- 2025 年五大云厂商（Google / Microsoft / AWS / Meta / Oracle）前 9 个月资本开支合计超过\$300B，创历史峰值

### 1.3 铜缆的三大物理约束

当前数据中心架构中，GPU 间短距离互连依赖铜缆，长距离传输依赖光纤与光模块。铜缆具备成本低、稳定性高的优势，然而在 AI 集群的规模与功耗密度下，已面临三大不可逾越的物理约束：

- 带宽上限：铜缆最高传输速率受材料物理极限制约，无法跟随 AI 每代翻倍的带宽需求（400G → 800G → 1.6T → 3.2T）
- 距离衰减：铜缆有效传输距离不超过 2 米，超出后信号严重衰减。AI 数据中心机柜间距离通常达数十至数百米，铜缆在此尺度下物理上不可行
- 功耗爆炸：GPU 单卡功耗从 H100 的 700W 升至 GB300 的 1,000W 以上。在此功耗密度下，集群中数万根铜缆的传输能耗已占数据中心总能耗逾 30%

光纤的物理特性恰好针对上述三点形成优势：单纤带宽为铜缆数十倍（通过 WDM 波分复用可进一步倍增），有效传输距离达数公里，传输功耗近乎可以忽略不计。

**"未来五年内，所有 AI 数据中心的互连方案将全面转向光学。这不是行业预测，而是物理定律的必然结论。" —— 业内工程师共识**

需要指出的是，铜缆并不会在短期内全面退出。在 GPU 与 GPU 之间的极短距离互连（Scale-up 网络，通常低于 2 米）场景下，铜缆凭借低成本与高可靠性仍具比较优势，且通过 CPC（Co-Packaged Copper，共封装铜缆）技术正在延续其生命周期。光纤的不可替代性，主要体现于机柜间及更长距离的 Scale-out 网络场景。

## 二、一条被系统性低估的产业链

### 2.1 从插拔到共封装：技术演进路径与价值迁移

光互连（Optical Interconnect）并非单一的技术替代事件，而是光学元件持续向 GPU 靠近的结构性迁移过程。每一阶段的技术演进均伴随明确的价值重新分配，理解这一演进路径是把握产业链利润结构的核心前提。

#### 第一阶段：可插拔光模块（Pluggable Optical Transceiver）——当前主流，2025–2026 年加速放量

可插拔光模块是当前数据中心最主流的光互连形态，外形尺寸约与 U 盘相当，插接于服务器或交换机背板。GPU 输出的电信号须经主板铜走线传输 30–50 厘米至背板光模块，完成电→光（E/O）转换后，经光纤高速传输至目的端。

模块内部集成五大核心器件：激光器（Laser，须采用 InP 磷化铟材料，硅基材料因能带结构限制无法直接发光）、调制器（Modulator，EML 为激光器与调制器的单片集成形态）、探测器（Photodetector，PD）、DSP 数字信号处理器（占模块物料成本约 35%，由台积电以硅基工艺代工），以及微米级精度的光纤耦合组件（FAU，Fiber Array Unit）。

当前主流规格为 **800G**，2026 年正快速向 **1.6T** 切换；1.6T 出货量 2026 年目标达 200 万只，同比增幅约 150%。

#### 第二阶段：LPO / NPO 过渡方案——2026 年确定性较强的近期机会

LPO（Linear Pluggable Optics，线性可插拔光学）的核心改变在于移除功耗最高的 DSP 芯片，以线性驱动替代，可将功耗降至传统光模块的约三分之一，同时保留可插拔的现场维护便利性。NPO（Near-Packaged Optics，近封装光学）则将光引擎前移至交换芯片旁的 PCB 板上，距离更近，但仍保持可拆卸性。

需要指出的是，Bernstein 研究预测至 2030 年 LPO 出货量可能超越 CPO。LPO / NPO 并非被 CPO 替代的过渡形态，而是独立存在的大规模市场。

#### 第三阶段：CPO（Co-Packaged Optics，共封装光学）——终局形态，2027 年起逐步放量

CPO 将光学元件直接集成于芯片封装内部，电光转换距离由 30–50 厘米缩短至数毫米，通信功耗较传统可插拔方案再降约 70%。CPO 架构的两大核心器件如下：

- 硅光 PIC（Silicon Photonics PIC，光子集成电路）：将调制器、光波导、探测器集成于 SOI（Silicon-On-Insulator，绝缘层上硅）晶圆上。关键约束：硅基材料能带结构决定其无法直接发光，光源须由外部独立提供。
- ELS（External Laser Source，外部激光源）：独立可换的激光模块，须采用 InP（磷化铟）材料。采用外置可换设计的原因在于：InP 激光器发热量大、使用寿命有限，若集成于封装内部，单一器件失效将导致整套价值数万美元的 GPU 芯片报废。

值得关注的是，CPO 催生了 ELS 这一全新器件品类。现有主要激光器厂商（Coherent、

Lumentum) 的产能绝大部分已通过长期协议 (LTA) 锁定于 EML (电吸收调制激光器, Electro-absorption Modulated Laser) 的供应, 而 CPO 所需的 CW (Continuous Wave, 连续波) 激光器工艺路线有别, 产线无法直接转换。这一"工序错配"是 ELS 供给稀缺性的根本来源。

## 2.2 产业链六层结构：分工精细，瓶颈分散

与 GPU 产业链高度集中于 NVIDIA 的格局不同, 光互连产业链分工极为精细, 瓶颈极为分散。尤为重要的是, 产业链内部存在两套完全独立的工艺体系——硅基工艺 (DSP 芯片, 台积电代工) 与化合物半导体工艺 (激光器, InP / GaAs 材料, 独立专用产线) ——两者之间的技术壁垒几乎无法跨越。

产业链层级	核心功能	代表公司	关键瓶颈
① 平台架构层	定义 AI 数据中心架构标准, 主导技术路线选择	NVIDIA, Broadcom, Cisco	架构定义权
② 光器件与模块层	激光器、调制器、探测器、模块组装	Coherent (COHR), Lumentum (LITE), AAOI	InP 产能极度稀缺
③ 互连芯片层	DSP、CPO 控制器、重定时器	Broadcom (AVGO), Marvell (MRVL), Credo	双寡头格局稳固
④ 代工制造层	硅光 PIC 代工 (SOI 工艺)、化合物半导体代工	Tower Semi (TSEM), TSMC, Fabrinet	TSEM 70%产能锁至 2028
⑤ 先进封装与测试层	CPO 混合集成、可靠性验证	TSMC COUPE, POET, AEHR Test	CPO 量产良率关键卡点
⑥ 上游材料层	SOI 衬底、InP 衬底、光纤、外延层	Soitec, AXT, IQE, Corning (GLW)	Soitec 垄断 SOI 供应 (95%)

## 三、资本已经在投票

### 3.1 NVIDIA 的 72 亿美元：锁定下一个约束环节

NVIDIA 历史上鲜少对上游供应商进行大规模战略投资，Jensen Huang 通常倾向于将资本配置于自身研发或回购。然而，2026 年上半年，NVIDIA 连续完成三笔针对光互连上游的战略性投资：

时间	投资对象	金额	战略意图
2026 年 3 月 2 日	Lumentum (LITE)	\$20 亿	锁定 InP EML / CW 激光器优先供货权至 2027–2028 年
2026 年 3 月 2 日	Coherent (COHR)	\$20 亿	锁定全栈光器件及模块产能，附带数十亿美元采购承诺
2026 年 5 月 6 日	Corning (GLW)	\$32 亿	于北卡罗来纳州及德克萨斯州新建三座专属光学工厂，连接产能扩张 10 倍

历史参照：NVIDIA 上一次采取类似行动，是在 HBM 产能趋紧期间对存储上游的战略布局。此轮对光互连上游合计 72 亿美元的定向投资，其信号意义在于：NVIDIA 已将光互连列为下一个可能制约 AI 集群扩张的关键约束环节。

**NVIDIA 对光互连上游的 72 亿美元定向投资，其信号意义等同于宣告：光互连是 AI 基础设施的下一个结构性约束。**

### 3.2 五大云厂商：超过\$3,000 亿资本开支指向同一方向

上述投资决策并非孤立事件。五大云厂商（Google、Microsoft、AWS、Meta、Oracle）2025 年前 9 个月合计资本开支超过\$3,000 亿，历史性地超越此前任何完整财年的峰值水平。资本的绝大部分流向 AI 基础设施建设，而连接系统在 AI 基础设施总投入中的占比正持续上升。

### 资本正在大规模涌入 AI 基础设施

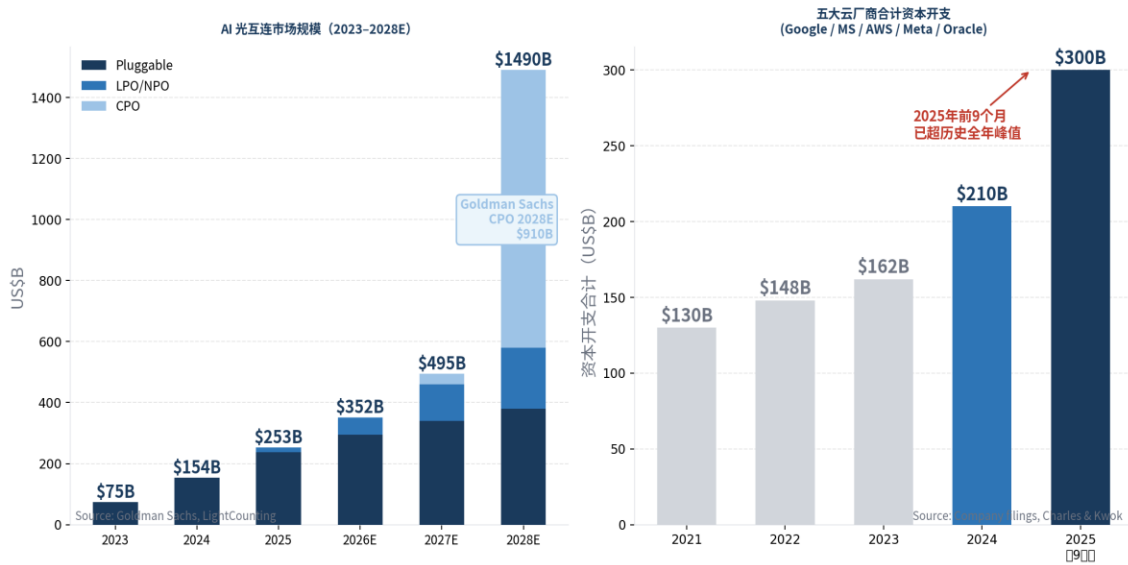


图2：光互连市场规模预测（左）；五大云厂商合计资本开支（右）资料来源：Goldman Sachs, LightCounting, 公司财报, Charles & Kwok

### 3.3 市场已率先完成定价修复：核心标的股价表现

以下股价表现基于公开市场数据整理，反映的是已然发生的市场事实，而非前瞻性预测。

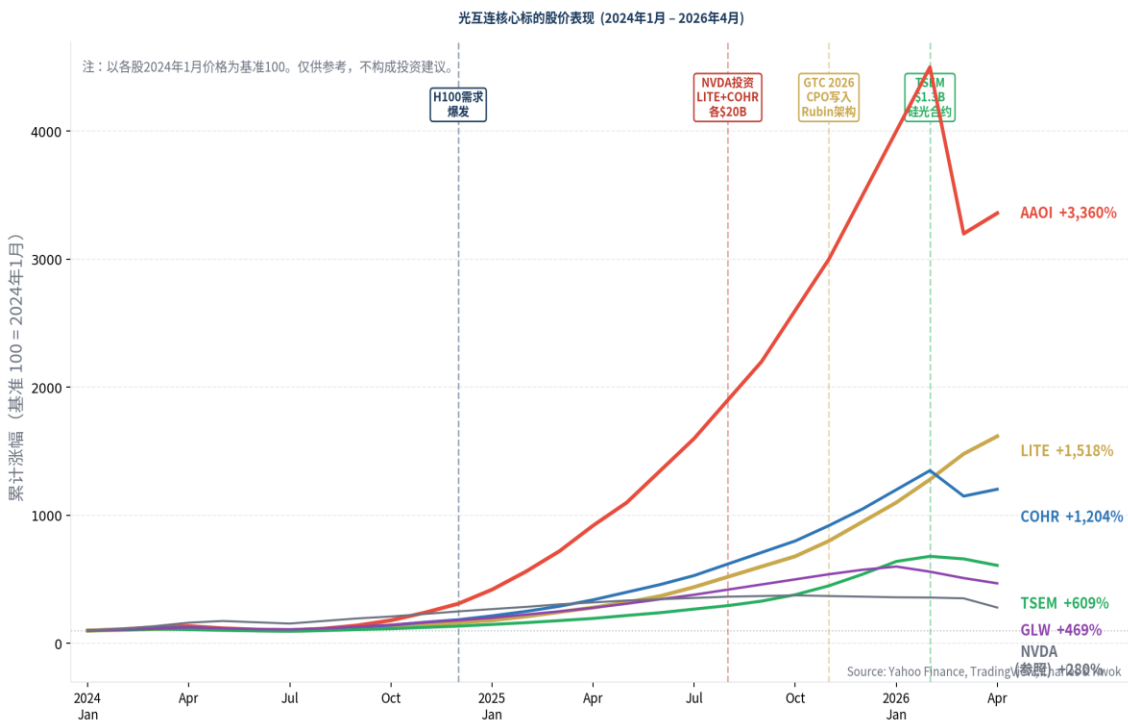


图3：光互连核心标的的股价表现（2024年1月-2026年4月，以2024年1月价格为基准100）注：仅供参考，不构成投资建议。资料来源：Yahoo Finance, TradingView, Charles & Kwok

若干关键数据值得重点关注：

- **AAOI (Applied Optoelectronics)**：区间涨幅达+3,360% (\$5 → \$173)。这一美国本土垂直整合光模块厂商，在 1.6T 订单规模化及美国制造叙事双重驱动下，实现了估值体系的根本性重构。
- **LITE (Lumentum)**：区间涨幅达+1,518% (\$55 → \$890)。NVIDIA \$20 亿战略入股公告披露当日，单日涨幅超过 20%。
- **TSEM (Tower Semiconductor)**：区间涨幅达+609% (\$35 → \$248)。这家以色列特种代工厂凭借硅光 PIC 代工领域的核心工艺优势，在 CPO 叙事兴起后获得市场的系统性重新定价。
- 上述涨幅均发生于 NVIDIA 自身同期涨幅约 280% 的背景之下，光互连板块整体跑赢 AI 核心算力标的的幅度达数倍。

光互连核心标的个股表现 | 2024年1月 - 2026年4月



Source: Yahoo Finance, TradingView, Charles & Kwok | 仅供参考，不构成投资建议

图 4: 光互连核心标的的个股表现 | 资料来源: Yahoo Finance, TradingView, Charles & Kwok | 仅供参考

## 四、CPO：利润池的结构重组

CPO 并非单纯的节能技术方案，其深层影响在于从根本上重写光互连产业链的利润分配逻辑。我们认为，理解这一价值迁移路径的意义，不亚于理解 CPO 技术本身。



Source: Bernstein, Charles &amp; Kwok

图5：CPO 如何重构光互连价值链 | 资料来源：Bernstein, Charles &amp; Kwok

### 4.1 价值迁移：受益环节与承压环节

传统可插拔光模块时代，产业链价值高度集中于三个环节：激光器（约 25%）、DSP 芯片（约 35%）、模块封装（约 25%）。CPO 时代，上述分布将发生根本性重组：

- **DSP 芯片（承压）**：CPO 架构下，光引擎与交换芯片间距仅数毫米，复杂纠错编码的必要性大幅降低，DSP 将被显著简化乃至移除。这一趋势构成 DSP 设计公司的中长期结构性压力。
- **模块封装（承压）**：可插拔光模块作为独立产品形态将被 CPO 替代，传统光模块组装厂的核心价值随之稀释。
- **硅光 PIC 代工（受益）**：CPO 架构强制采用 SOI 工艺的硅光 PIC，TSEM 凭借 PH18 平台的工艺领先性及超过 50 家客户的深度绑定，70% 产能已锁定至 2028 年。
- **ELS 外部激光源（受益，新品类）**：CPO 催生的全新器件类别。大厂产线被 EML 长期合约锁定，溢出需求将流向独立供应商，Sivers (SIVE) 等小型专业供应商存在显著弹性。
- **Switch ASIC 与平台层（最终受益）**：NVIDIA、Broadcom 掌握架构定义权，CPO 的普及只会进一步强化平台级公司的护城河深度。

### 4.2 CPO 的真实商用节奏：需要校正的市场预期

市场上流传的“CPO 2026 年大规模爆发”叙事需要审慎校正。Bernstein 的深度研究及中际旭创（全

球最大光模块厂商之一)的直接表述,提供了最具参考价值的节奏判断:

### CPO 规模化商用的三大障碍

① 可靠性门槛:可插拔光模块发生故障,现场热换仅需数分钟。CPO 的光引擎集成于交换机内部,一旦出现故障须整机返厂,停机成本对云服务商而言不可接受。

中际旭创明确表述:"目前尚无任何云厂商客户计划于 2026–2027 年大规模部署 CPO。"

② 过渡方案的有效性:LPO 可将功耗降至传统光模块的三分之一,NPO 进一步缩短光引擎与芯片的距离。在 CPO 可靠性尚未充分验证的前提下,云厂商具备充分理由优先部署过渡方案,而非直接跨越至 CPO。

③ Scale-up 场景的铜缆优势:GPU 间短距离互连场景下,铜缆的成本与可靠性优势目前仍无可比拟的替代方案。LightCounting 预测:2029 年 1.6T 连接市场中,铜缆份额仍将接近 50%。

*我们的节奏判断:2026 年以交换机侧 Scale-out 场景为主的小批量验证,2027 年 CPO 从样品阶段走向客户实际部署,2028 年后进入规模化放量。Goldman Sachs 2028 年\$910B 的 CPO 预测代表乐观情景的天花板,而非 2026 年的基准预期。*

## 五、节奏比方向更重要

光互连是 AI 基础设施的下一个主战场，CPO 是终局形态——方向的确信毋庸置疑。然而在这一赛道上，节奏判断的重要性不亚于方向判断：入场过早可能面临数年等待期，入场过晚则可能错失弹性最大的窗口期。



图 6：三年期行业观察路线图 | 资料来源：Charles & Kwok Research

### 5.1 2026 年：布局确定性，而非押注远期期权

2026 年最具确定性的收入增量，并非来自最纯粹的 CPO 概念标的，而在于 CPO 规模化前必须率先完成升级的基础设施环节：

- 1.6T 可插拔光模块放量：2026 年出货量目标约 200 万只（同比增幅约 150%），ASP（Average Selling Price，平均售价）显著提升，直接受益标的包括 LITE、COHR、AAOI
- LPO / NPO 过渡部署：800G LPO 已进入量产阶段，1.6T LPO 处于开发阶段。功耗降至三分之一的特性使其成为云厂商 2026–2027 年功耗优化的优先选择
- PCB / ABF 基板升级：Rubin 平台采用 44 层 midplane 多层板及 M8 级低损耗覆铜板，AI 服务器单台 PCB 价值量由约 \$100–150 提升至约 \$300。ABF 基板受 T-glass（低热膨胀系数玻纤布，日东纺近垄断供应）短缺影响，ASP 每季度环比涨幅约 5–7%
- 硅光代工产能预定：TSEM \$1.3B 硅光合约（预计 2027 年交付）签署本身即为产能稀缺的直接信号

### 5.2 2027 年：CPO 进入客户实际部署阶段

需要持续跟踪的关键指标：

- NVIDIA Quantum-X / Spectrum-X Photonics 的真实客户部署规模及反馈

- Broadcom Tomahawk 5-Bailly CPO 交换机的客户扩展名单
- CoreWeave、Lambda Labs、Meta、Google 等超大规模用户的 CPO 采购决策
- ELS (External Laser Source) 供应链是否进入稳定批量供货阶段

### 5.3 2028 年后：架构级期权的兑现窗口

这一阶段对应真正的架构级期权：CPO 从交换机侧 (Scale-out) 向 GPU 封装侧 (Scale-up) 延伸，光 I/O 开始重塑 AI 计算的底层架构。NVIDIA Feynman 平台 (预计 2028 年) 可能是上述转变的起点信号。

### 5.4 三个最难绕开的结构性瓶颈

无论最终主导路线是 CPO、LPO 抑或传统可插拔方案的持续升级，以下三个环节在任何情景下均无法绕开：

环节	稀缺性来源	代表公司	当前状态
SOI 衬底	Soitec 全球市场份额约 95%，为三大硅光代工厂唯一认证供应商	Soitec (SOI.PA)	每颗硅光 PIC 均须采用 Soitec SOI 晶圆，供应商无可替代性
硅光 PIC 代工	PH18 SOI 平台已绑定超过 50 家设计客户，工艺迁移成本极高	Tower Semi (TSEM)	70%产能合约锁定至 2028 年；\$1.3B 新签合约已公告
InP 激光器产能	EML 产线已被长期合约锁定，CPO 所需 CW 激光器工艺路线有别，产线无法直接转换	LITE, COHR, SIVE	LITE CEO 公开表示：公司自身亦须从公开市场采购 CPO 激光器

## 附录：关键技术中英文对照

英文缩写	英文全称	中文名称	简要说明
<b>CPO</b>	Co-Packaged Optics	共封装光学	将光引擎与交换芯片封装于同一基板，大幅降低功耗与延迟
<b>LPO</b>	Linear Pluggable Optics	线性可插拔光学	移除 DSP 芯片、以线性驱动替代的低功耗可插拔光模块
<b>NPO</b>	Near-Packaged Optics	近封装光学	光引擎前移至交换芯片旁侧 PCB，可拆卸但更靠近芯片
<b>ELS</b>	External Laser Source	外部激光源	CPO 架构中为硅光 PIC 提供光源的独立可换激光模块
<b>PIC</b>	Photonic Integrated Circuit	光子集成电路	将调制器、光波导、探测器等光学元件集成于芯片上
<b>SOI</b>	Silicon-On-Insulator	绝缘层上硅	硅光 PIC 所采用的特殊晶圆结构，用于限制光在顶层传导
<b>DSP</b>	Digital Signal Processor	数字信号处理器	光模块内负责纠错、编码、消噪的信号处理芯片
<b>EML</b>	Electro-absorption Modulated Laser	电吸收调制激光器	将发光与调制功能集成于单颗芯片的高速激光器
<b>FAU</b>	Fiber Array Unit	光纤阵列单元	将激光精准对准光纤入口的微米级精度耦合组件
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing	波分复用	在单根光纤中同时传输多路不同波长光信号的技术
<b>InP</b>	Indium Phosphide	磷化铟	制造高速激光器与探测器的核心化合物半导体材料
<b>ASP</b>	Average Selling Price	平均售价	产品平均成交价格，反映定价权与产品结构变化
<b>Scale-up</b>	Scale-up Network	纵向扩展网络	GPU 与 GPU 之间的高速短距离互连网络
<b>Scale-out</b>	Scale-out Network	横向扩展网络	机柜间及更大范围的跨机柜互连网络
<b>LTA</b>	Long-Term Agreement	长期供货协议	客户与供应商之间锁定产能与价格的多年期合约
<b>TAM</b>	Total Addressable Market	总可寻址市场	某一产品或服务在全球范围内的最大潜在市场规模

## 免责声明

本报告由 Charles & Kwok Multi-Asset Research & Strategy（以下简称“本机构”）编制，仅供机构投资者及专业投资者参考使用，不构成任何形式的投资建议或买卖邀请。本报告所载信息均来源于公开渠道，本机构对其准确性、完整性不作任何明示或暗示的保证。

本报告中的意见和预测均基于本机构分析师于报告发布日的判断，不保证反映此后任何日期的情况。市场情况随时可能发生变化，本机构不承诺更新报告中所载资料、意见及预测。股价数据及涨幅均基于公开市场信息整理，历史表现不代表未来收益。投资者应自行评估本报告所载资料，并在必要时寻求独立的专业意见。

本报告版权归 Charles & Kwok 所有。未经本机构书面授权，任何机构或个人不得以任何形式对本报告进行修改、复制或转发。

© 2026 Charles & Kwok Multi-Asset Research & Strategy. All rights reserved.

首席分析师：Chuck Guo | Charles & Kwok Multi-Asset Research | 报告编号：CK-2026-OPT-001 | 发布日期：2026 年 5 月