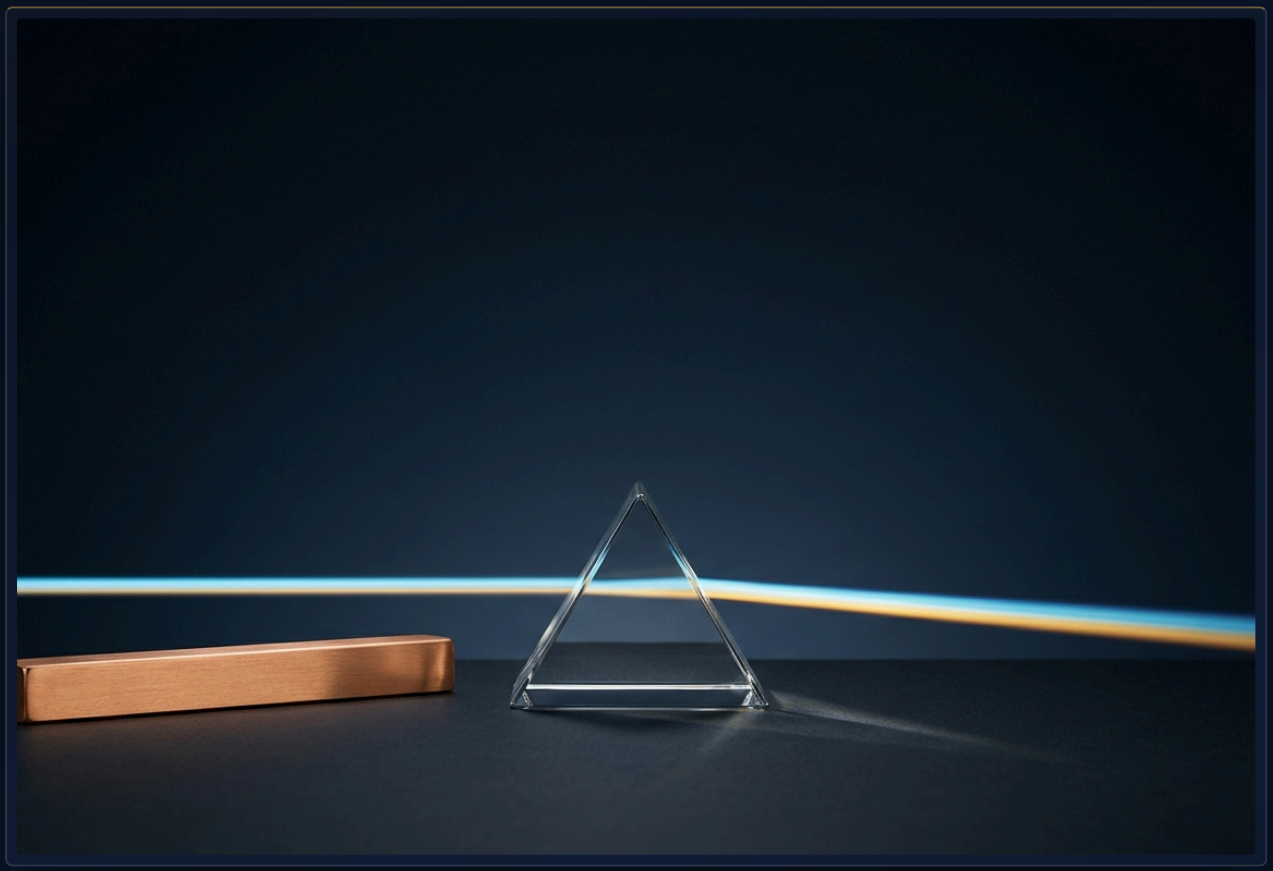
ISSUE 07 OPTICAL INTERCONNECT & M&A

07

铜退光进与光电垂直整合

AI 超节点光互连演进、全光交换架构与千亿美元并购重估



Yavin 质观 · 独立产业研究
https://zhiguanstudio.cn | 个人公开研究免费分享（非商业用途）
公众号
个人微信

00 / EXECUTIVE SUMMARY · 核心研究结论与关键指标总览

核心研究结论：铜光按物理半径分工，可插拔与共封装长期并存，磷化铟稀缺性促成千亿美元垂直整合

2 米铜缆半径	NPO 与 CPO 并行	OCS+EPS 混合组网	1.6T 主力与 USFP
单柜 NVL72 无源铜缆省电约 20kW；跨柜 NVL576 与 Atlas 960E 转向光互连	内置光源 NPO 省去约 3dB 外部插损与保偏光纤成本，并与主芯片良率解耦	脊层 OCS 削减约 40% 网络功耗承载稳态流，叶层电交换保留缓存吸收微突发	NVL576 可插拔配比增至 11.5 倍，2027 年以太网光模块规模预计达 645 亿美元

01 链路物理预算与五代演进

外置光源 CPO 历经八级耦合与调制损耗后流失约 99% 光功率（19.5–22.5 dB），依赖 300–400mW 超高功率磷化铟激光器与高溢价保偏光纤。华为 Hi-ONE（7.2T）等内置光源 NPO 省去约 3dB 外部插损并规避主芯片连带报废风险。面向 400G/lane 世代，面板侧演进出 USFP（409.6T/1U），封装内则向英伟达 3.5 pJ/bit 中介层光学 OOI 延伸。

02 全光交换边界与五年 TCO

受限于接收端时钟恢复与 PAM4 均衡器重锁定耗时（60–80 μs），OCS 无法替代叶层电交换吸收纳秒级 MoE 微突发，但在脊层可削减约 40% 网络功耗与 30% 网络资本开支（Google 将 2027 年需求上修至 5 万台）。102.4T 交换机五年期 TCO 测算显示 CPO 仅省电 8,484 美元却承担 23,700 美元整机冷备与停机成本，其核心经济价值在于供电受限机柜释放电力配额以多部署约 30% GPU。

03 Marvell 1,150亿美元并购Lumentum

2026 年 11 月 2 日双方正式签署合并协议，企业价值 1,150 亿美元，采用 1:4.500 固定比例全股票换股，交割后原股东持股比例为 67%:33%，预计 2028 年上半年完成交割。同日 Lumentum 披露 Q1 FY27 营收 12.60 亿美元（同比 +136.5%）、Non-GAAP 毛利率 53.2%、EPS 4.57 美元，Q2 营收指引升至 15.75–16.25 亿美元。交易对冲了独立 DSP 远期萎缩风险，也将触发 Cloud Light 渠道分流与中国市场监管总局反垄断审查。

04 国产龙头三季报与543亿备货

2026 年前三季度国产光互连龙头业绩集中释放：中际旭创营收 695.47 亿元、归母净利 222.38 亿元，硅光占比向 86% 提升；新易盛营收 318.50 亿元、归母净利 113.72 亿元；天孚通信毛利率达 62.6%，单台 CPO 交换机耦合配套价值超 7,000 美元；源杰科技营收 16.09 亿元、毛利率 81.70%。四大模块与器件龙头合计存货与预付款达 542.9 亿元，同时需跟踪部分企业应收账款与经营现金流背离。

00 / TABLE OF CONTENTS · 报告全局研究框架与视觉资产导航

报告章节脉络：从 Scale-Up 通信约束、光电封装演进、全光交换边界到产业链财报核验与千亿美元并购

CHAPTER 01 SUPERNODE BOUNDARY & 5D PARALLELISM

超节点规模边界与通信约束：从单柜铜互连到跨柜光电协同

- 1.1–1.2 四层互连分类、稀疏 MoE 负载与解码 TPOT 低于 20ms 的延迟约束
- 1.3–1.5 超节点规模分化、远端 HBM 延迟阶梯与 DeepSeek-V3 算法协同边界

CHAPTER 02 NPO, CPO, USFP & NVIDIA OOI ARCHITECTURES

光电转换位置与光源路线：可插拔、NPO、CPO、USFP 与中介层光学

- 2.1–2.4 外置光源 CPO 链路损耗拆解、内置光源 NPO 取舍与复合封装良率
- 2.5–2.6 400G USFP 二维接触阵列与英伟达 3.5 pJ/bit OOI 演进时钟

CHAPTER 03 OPTICAL CIRCUIT SWITCHING (OCS / dOCS)

集群全光交换演进与电分组交换的物理边界

- 3.1–3.3 集中式 MEMS OCS、分布式硅光 dOCS 与 60–80μs 重锁定瓶颈
- 3.4 稀疏 MoE 流量偏斜下脊层全光穿通与叶层电缓冲的分工机制

CHAPTER 04 PLUGGABLE LONGEVITY & 5-YEAR SWITCH TCO

可插拔模块生命周期延续、102.4T 交换机五年期 TCO 与供应链主导权

- 4.1 Rubin Ultra NVL576 可插拔配比增至 11.5 倍的拓扑原因与面板延寿方案
- 4.2–4.3 102.4T 交换机五年期 TCO 敏感度测算、供电配额机会成本与白盒解耦竞合

CHAPTER 05 VALUE MIGRATION & CHINA Q3 SUPPLY CHAIN

光互连成本结构迁移、2026 三季报备货核验与国产供应链评估

- 5.1–5.2 独立 DSP 占比收缩、耦合组件价值提升与双口径容量对账
- 5.3–5.4 国产龙头 542.9 亿元存货锁料核验、九大环节分级与五项下行风险

CHAPTER 06 MARVELL $115B ALL-STOCK ACQUISITION OF LUMENTUM

光电垂直整合案例拆解：Marvell 1,150 亿美元全股票并购 Lumentum

- 6.1 11 月 2 日正式协议条款（1:4.500 换股 / 67:33）与 Q1 FY27 12.6 亿美元实绩
- 6.2–6.3 全栈光电闭环动因、Cloud Light 渠道分流、优先股锁产与 SAMR 审查推演

VISUAL & QUANTITATIVE ASSET INDEX · 全报告图表与量化矩阵清单

17 HIGH-RES OPTICAL LINK WATERFALLS, TCO MODELS & UPDATED $115B MERGER CHARTS

- 图01–图05：四大光互连路线对比、外置光源 CPO 损耗瀑布、USFP 接触阵列与五代形态参数
- 图06–图09：硅中介层布线密度、NVLink 演进时钟、台积电 COUPE 三阶段路线与 OCS/dOCS 拓扑
- 图10–图12：102.4T 交换机五年期 TCO 拆解、CPO 良率与利润迁移、2026Q3 四大龙头备货核验
- 图13–图17：Marvell 并购 Lumentum 换股结构、Q1 业绩核验、全栈拼图、SAMR 审查与交割路标

01 CHAPTER 01 · SUPERNODE SCALE-UP BOUNDARY & PARALLELISM CONSTRAINTS

超节点规模边界与通信约束：从单柜铜互连到跨柜光电协同

1.1 四层互连网络的物理半径与能效边界

在万亿参数稀疏模型与长上下文推理集群中，传统“机内总线加机间以太网”的二元结构已无法刻画通信负载分化。现代算力集群按地址空间语义、传输距离与单比特能耗划分为四层网络：最内层 Scale-In 位于 CoWoS 或 SoIC 封装内部，在数十毫米内以 0.3–1.0 pJ/bit 能效提供 TB/s 级 HBM 吞吐。向外延伸的 Scale-Up 超节点互连域将数十至数千颗加速卡纳入统一虚拟地址空间，支持缓存行粒度的直接 Load/Store 内存访问与硬件集合通信卸载，单卡双向带宽达 900 GB/s 至 3.6 TB/s，约为后端网卡的 9 至 18 倍，单跳延迟须压在百纳秒至 2.5 微秒以内。

决定“铜退光进”分界线的核心变量正是 Scale-Up 物理半径。当 72 至 144 颗芯片紧耦合在单机柜 2 米有效半径内时，无源双轴铜缆可将能耗锁定在 5–8 pJ/bit。一旦跨越单机柜扩展至 5–100 米，高频电损耗迫使系统转向 NPO 或 CPO 光互连，能耗随之升至 7–18 pJ/bit。在超节点外部，Scale-Out 网络通过 RoCEv2、UEC 或 InfiniBand 承载消息传递语义的跨节点同步，主力采用 800G 与 1.6T 可插拔或线性光模块。而受单一园区 100–500 MW 供电配额约束的 Scale-Across 跨园区协同网络，则依赖 400G–1.6T ZR/ZR+ 相干光模块与波分复用系统，在百公里尺度依靠异步聚合容忍毫秒级光纤延迟。

EXHIBIT 01 四大光互连路线（重定时可插拔、LPO/LRO、内置光源 NPO 与外置光源 CPO）架构全景对比

维度 A：光电转换位置演进对比（Pluggable → NPO → CPO） 铜退光进 · 电走线持续缩短

演进路线	光电转换物理位置	电链路长度与插损/功耗	良率连坐与维护边界	核心产业代表方案
① **可插拔光模块** Pluggable (LPO/LRO)	机箱前面板 Cage 800G / 1.6T 热插拔	PCB 走线 **30–60 cm** 224G 插损 >20 dB · 单口 14–30 W	**零主芯片良率连坐 现场热插拔即换即修**	中际旭创 / 新易盛 / Coherent
② **近封装光学** NPO (Near-Packaged)	主芯片外围独立基板 2.5D Socket / BGA	电走线缩至 **2–5 cm** 内置光源或 ELSFP · 功耗降 **30%–45%**	**零主芯片良率连坐 可独立测试与模块替换**	**华为 Atlas 960E Hi-ONE 7.2T NPO** (5,500 颗顶 4.8 万只 800G 模块)
③ **共封装光学** CPO (Co-Packaged)	与 ASIC/XPU 同基板合封 强制全液冷 + 外置光源	电走线 **<15 mm** 端到端 **5.6–6.25 pJ/bit**	**单光引擎失效引发整颗高价主芯片报废风险**	Broadcom Bailly/TH6 NVIDIA Quantum-X / Spectrum-X

维度 B：光域拓扑重构 — ④ 全光交换（OCS / dOCS）跃迁红利 O-O-O 全光直通 · 协议速率透明

架构原理：Spine 层由 3D-MEMS 微镜或硅光干涉矩阵直接完成 **O-O-O 全光直通**，Bufferless 无缓存转发、对单波速率与调制格式完全透明。

系统级节省：整网彻底省去中间层高精度电交换芯片与成对高速光模块，跨越两代 SerDes 速率演进仍可复用光路。

全光交换两大代表产业路径

集中式 3D-MEMS OCS：Google Jupiter OCS 大规模商用，支撑万卡级拓扑秒级绕障重构。

分布式硅光 dOCS：中兴 Matrix 架构 + 曦智科技硅光光交换矩阵，面向集群级无拥塞直连。

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

1.2 稀疏 MoE 与长上下文解码驱动的通信约束迁移

推动超节点从传统 8 卡服务器向 72 卡、576 卡乃至数千卡演进的底层动因，是主力负载从稠密预训练转向万亿参数稀疏 MoE 模型与实时长上下文自回归解码。在张量并行、专家并行、上下文并行、流水线并行与数据并行构成的五维并行框架下，各阶段对互连带宽与延迟施加了不同约束：

EQUATION · CORE QUANTITATIVE & ECONOMIC MECHANISM

$$T_{\text{comm,TP/EP}} = 2 \cdot \left(\alpha_{\text{lat}} + \frac{M_{\text{token}} \cdot H_{\text{dim}}}{B_{\text{scale-up}}} \right) \leq T_{\text{compute hide}}$$

$$\text{TPOT}_{\text{decode}} = \sum_{l=1}^{L} \left(t_{\text{HBM read}}^{(l)} + t_{\text{AllReduce/AllToAll}}^{(l)} \right) < 20 \text{ ms}$$

公式释义：单步解码延迟由各层 HBM 权重读取与跨卡集合通信耗时累加决定，要将逐字生成延迟控制在 20 毫秒以内，Scale-Up 网络必须兼具高带宽与微秒级低延迟。

预训练阶段单步耗时达数百毫秒至数秒，数据并行梯度同步位于反向传播末尾，可借梯度累加在 Scale-Out 网络上被计算掩盖；流水线并行仅在相邻阶段传递激活值。真正消耗高带宽的是每层内部同步执行的张量并行集合通信与 MoE 专家分发。进入 128K–1M 长序列推理 Prefill 阶段，注意力机制的平方级计算复杂度要求启用上下文并行，在芯片间持续环状传递 KV 张量块以控制首字延迟。

真正对超节点规模构成刚性约束的是推理 Decode 阶段。自回归解码每步仅生成单个词元，算术强度跌至接近 1 FLOP/Byte，每步均需从 HBM 完整读取活跃权重与 KV Cache。要在多步推理下守住逐字延迟低于 20 毫秒的交互基线，分摊到 80–120 层模型的单层时间预算不足 150–200 微秒。若将广域专家并行的 **All-to-All** 通信置于延迟 5–15 微秒、单卡带宽 50–100 GB/s 的传统 Scale-Out 网络，通信等待便会吞噬七成以上预算。唯有构建数十至数百卡规模的 Scale-Up 超节点，在放大聚合 HBM 读取带宽的同时将单层跨卡通信压缩至数十微秒以内，才能兼顾单用户响应速度与每兆瓦总吞吐。

表 1：大模型训练、Prefill 与 Decode 阶段下 5D 并行通信原语的物理敏感度与网络层级映射表

负载阶段 / 并行维度	核心集合通信原语	单次消息粒度与通信频次	对延迟 (α) 敏感度	对带宽 (β) 敏感度	必须驻留的网络物理层级与设计约束
张量并行 (TP)	**All-Reduce / Reduce-Scatter + All-Gather**	中小包（KB–MB 级），每层前向/反向各触发 2–4 次	**极高**（阻塞关键路径，要求 **<1–2 μs**）	**极高**（需 **900 GB/s–1.8 TB/s**）	**严禁跨出单机柜铜缆 Scale-Up 域**（通常限制在 4–16 卡或 NVL72 内部）
专家并行 (Wide-EP)	非对称动态 **All-to-All** (Dispatch + Combine)	细粒度离散包（数 KB–数百 KB），每层 MoE 触发 2 次	**极高**（推理 Decode 下受制于尾延迟）	**高**（随 Top-K 与隐藏层维度线性膨胀）	**跨机柜 Scale-Up 主驱动力**（64–576 卡域，驱动 NPO/CPO 与高基数交换）
上下文并行 (CP)	**Ring P2P Send/Recv** 或 **All-to-All** (Ulysses)	大块 KV 张量（MB–数十 MB 级），随每层 Attention 流水重叠	中等（可通过分块计算/通信重叠掩盖）	**高**（长序列 **128K–1M** 下带宽消耗巨大）	驻留于 **Scale-Up 超节点内** 或高带宽 **单跳 Scale-Out 平面**
流水线并行 (PP)	点对点 **P2P Send/Recv**	中等激活张量（MB 级），仅在 Stage 边界触发	低（主要受限于 Bubble 气泡率与微批次调度）	低至中等	**天然适配跨超节点 Scale-Out 乃至跨园区 Scale-Across（OCS 理想负载）**
数据并行 (DP / FSDP)	**All-Reduce / Reduce-Scatter + All-Gather**	巨型梯度/权重块（数十 MB–GB 级），每 Step 触发	低（批量吞吐主导，对微秒级延迟不敏感）	中至高（需匹配计算 Step 时间窗口）	**标准 Scale-Out 胖树/多平面网络**（800G/1.6T 可插拔光模块主战场）

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

1.3 超节点规模分化与 2 米无源铜缆半径边界

2025 至 2027 年间主流超节点分化出 72 卡、576 卡与 4,096 卡以上三类形态，本质上由单芯制程能力、224G/448G 无源铜缆约 2 米有效半径与 MoE 专家粒度共同决定。传统 8 卡节点难以容纳万亿参数 MoE 权重与大并发 KV Cache。将 72 颗 GPU 紧耦合进单台液冷机柜（如英伟达 GB200 与 Vera Rubin NVL72），把托盘间距严格压缩在 2 米以内，构成了柜内铜互连的经济性极值：相比光学方案，无源铜缆背板单柜省电约 20 kW，连接器与线束成本不足光学方案的六分之一，并消除了热插拔模块闪断故障。Broadcom 亦验证在 2 米同轴铜缆上采用 400G PAM6 调制，可在约 7 pJ/bit 能效下将单柜铜互连总带宽推升至 2.08 Pbps。

当模型需要将 256 至 512 个路由专家按“一卡一专家”完全展开以压低权重读取耗时，或单系统需聚合数百 TB 的 HBM4 显存时，算力规模便突破单柜上限。计划于 2027 年下半年推出的 Vera Rubin Ultra NVL576 跨越 8 台机柜、总功耗达 600 kW 级，柜间走线拉长至 5–30 米。224G/448G 无源铜缆在此距离下插损超过 35–40 dB 而失效，驱动跨柜 Scale-Up 交换托盘规模化导入 CPO 与 NPO。

在数千卡区间，架构进一步随供应链条件分化。华为 Atlas 960E 跨 64 柜集成 4,096 颗昇腾 960 芯片，在单芯先进制程受限条件下，以 UnifiedBus 协议配合 5,500 颗 Hi-ONE 7.2T 内置光源 NPO 光引擎替代约 4.8 万只 800G 可插拔模块，用机柜供电与光带宽换取系统级算力对齐。Google TPU v7 Ironwood 则依托片上 ICI 互连与机柜间 3D-MEMS OCS 全光交换机，在不设外部顶层电交换芯片的架构下将 9,216 颗芯片拼接为三维环网。

表 2：全球主流 AI 超节点（SuperNode / SuperPoD）跨代际规模、互连介质与工程经济学对标矩阵

超节点标杆系统	算力芯片规模与商业状态	单卡 Scale-Up 双向带宽	聚合 Scale-Up 总带宽	聚合显存容量与带宽	物理互连介质与拓扑架构	核心优势与系统级工程代价
NVIDIA GB200 / Vera Rubin NVL72	**72 GPU** + 36 CPU（已量产 / 2026 迭代）	**1.8 TB/s** (GB200) → **3.6 TB/s** (Rubin)	**130 TB/s → 260 TB/s**	**13.5–20.7 TB** HBM3e/HBM4	**单机柜 2m 无源铜缆背板** + 9×NVSwitch 托盘（单跳全互连）	**72 卡甜点区标杆**：铜缆成本仅为光学 1/6、省电 20kW；但受限于单柜 132–250kW 散热与 2m 铜距上限
Broadcom 400G PAM6 Open Rack	**64–128 XPU**（2026 OCP 生产验证）	**3.6 TB/s (28.8 Tbps)**	**2.08 Pbps (260 TB/s)**	取决于定制 XPU 配置	**单柜 26 AWG 同轴铜缆** + Tomahawk Ultra (**<250ns, 77 BPPS**)	**铜缆延寿典范**：ESUN/SUE 开放以太网协议栈（链路效率 92%–99%），互连功耗仅 **7 pJ/b**（占整柜 3%）
NVIDIA Vera Rubin Ultra NVL576	**576 GPU**（跨 8 机柜，2027H2–2028 路线图）	**3.6–7.2 TB/s**	**>1.0–2.0 PByte/s**	跨 8 柜百 TB 级 HBM4 统一池	**柜内铜缆 + 跨柜 CPO 交换托盘 + 外置 ELSFP 光源**	**Wide-EP 万亿推理利器**：突破单柜物理边界，但需攻克 CPO 整托盘良率、保偏光纤与 600kW 供电挑战
华为 Atlas 950 / Atlas 960E SuperPoD	**8,192 卡 (950) / 4,096 卡 (960E)**（2026Q4–2027Q3）	**2.0–3.2 Tbps (250–400 GB/s)**	**13.1–16 Pbps (1.64–2.0 PB/s)**	最高 **1,152 TB** 内存，总互连带宽相当于 49,500×800G	**柜内高速铜缆 + 跨柜 5,500 颗 Hi-ONE 7.2T 内置光源 NPO**	**以光补硅典范**：用 UnifiedBus + 板载 NPO 替代 4.8 万只可插拔模块，但占地达 64 机柜（约 1,000 m²）

超节点标杆系统	算力芯片规模与商业状态	单卡 Scale-Up 双向带宽	聚合 Scale-Up 总带宽	聚合显存容量与带宽	物理互连介质与拓扑架构	核心优势与系统级工程代价
Google TPU v4 (4096) / v7 Ironwood (9216)	**4,096 卡 → 9,216 卡**（已大规模生产运行）	**1.2 TB/s** (TPU v7 ICI)	3D Torus 环网聚合超 **百 TB/s**	**1.77 PB** HBM (**192 GB**/卡 × 9216)，单卡带宽 **7.37 TB/s**	**柜内 64 卡无源铜缆 + 跨柜 48 端口 Palomar/R300 MEMS OCS**	**TCO 极值典范**：网络 CapEx **<5%**、功耗 **<3%**，OCS 动态绕过故障节点；但 3D Torus 多跳延迟高于单跳 Crossbar

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

1.4 统一虚拟编址、缓存一致性取舍与远端 HBM 延迟阶梯

评估千卡超节点需区分统一虚拟地址空间、硬件缓存一致性与池化内存三层语义。NVLink 与 UnifiedBus 提供的统一虚拟编址允许计算线程用指针指令直接读写远端显存，省去网卡驱动栈与 PCIe 绕行开销。但若在数百颗芯片间维护硬件缓存一致性，目录监听会引发广播风暴，因此主流架构均将硬件缓存一致性限制在单颗 CPU-GPU 超级芯片内部，跨卡 Scale-Up 域则采用弱一致性与软件显式同步。

即便引入光互连，物理传播延迟仍呈阶梯分布：本地 HBM 访问约 100–150 纳秒；同柜跨铜缆交换芯片升至 350–600 纳秒；跨越 30 米光纤与两级 NPO/CPO 交换托盘访问跨柜显存时，仅光纤往返飞行即占 300 纳秒，叠加两级转发、FEC 前向纠错与串并转换后，端到端延迟升至 0.8–2.5 微秒，达本地显存的 5 至 20 倍。因此千卡超节点并非平坦内存池，仍须执行拓扑感知调度：高频张量并行留在单柜铜域，专家并行收敛于相邻机柜单跳光域，低频历史 KV Cache 卸载与流水线并行再跨柜展开。

1.5 算法与通信协同的反例核验：DeepSeek-V3 对超节点刚需边界的界定

DeepSeek-V3（总参数 671B、单次激活 37B）为核验光互连超节点的真实边界提供了客观参照。该集群基于 256 台标准 8 卡 H800 服务器（共 2,048 颗 GPU）构建，机内 NVLink 双向带宽受限在 400 GB/s，机间仅为标准 8×400G InfiniBand 网络。团队通过节点受限路由将每个词元最多分发至 4 台服务器，再利用机内 NVLink 二次转发。同时借助 DualPipe 双向流水线切分，调拨 H800 内 132 个流多处理器中的 20 个专司通信编排，将跨节点 **All-to-All** 通信隐藏于计算流水之下，并配合 FP8 训练与 MLA 多头潜在注意力大幅压缩传输量与显存占用。

最终该项目仅耗费 266.4 万 H800 卡时（算力成本约 557.6 万美元）便完成 14.8 万亿词元训练。这表明在大批次预训练中，只要具备深度计算-通信重叠能力，8 卡节点配合可插拔 Scale-Out 网络仍可逼近硬件极限。跨机柜光互连超节点真正不可替代的刚需集中在三类场景：无法靠大批次流水掩盖延迟的实时低延迟解码、单芯制程受限下依靠规模外延弥补单卡差距的本土集群，以及追求零代码侵入的公有云通用 MaaS 底座。

02 CHAPTER 02 · NPO, CPO, USFP & OPTICS-ON-INTERPOSER

光电转换位置与光源路线：可插拔、NPO、CPO、USFP 与中介层光学

2.1 光电转换位置向主芯片收敛的五代演进

当单通道电速率从 112G PAM4 升至 224G 并向 448G 演进时，奈奎斯特频率抬升至 56–112 GHz，交换芯片跨越 10–15 英寸主板走线至前面板笼子的插损极易突破 35–40 dB 上限。前面板重定时可插拔模块依靠内置 DSP 补偿损耗，1.6T 模块功耗达 25–34 W（16–21 pJ/bit）；省去全部或接收端 DSP 的 LPO 与 LRO 虽将能效降至 8–15 pJ/bit，却压缩了信道损耗裕度与跨厂商互操作空间。

为缩短铜走线，光电引擎持续向主芯片封装内部迁移。近封装光学 NPO 将光引擎移至距主芯片 20–100 mm 的主机板上，通过 LGA 插座或焊接固定，插损压至 15 dB 以内并省去重定时 DSP（8–12 pJ/bit），同时保留独立测试与单颗返修能力。2.5D CPO 将硅光引擎贴装在交换芯片同一有机封装基板上，走线缩至 5–20 mm，由超短距 SerDes 直驱实现 5–7 pJ/bit 能效。台积电 COUPE 代表的 3D CPO 利用 SoIC-X 无凸块铜对铜混合键合将 6nm 电芯片垂直堆叠于 65nm 硅光晶圆之上，寄生电容压至 10 fF 以下，能效达 3–5 pJ/bit。第五代中介层上光学 OOI 则直接把光芯粒嵌入 CoWoS 硅中介层边缘，以微米级并行硅布线替代高速串行 SerDes，能耗可下探至 1–3 pJ/bit。

表 3：光电转换位置五代演进形态的物理参数、能效边界与工程痛点全景对比

架构代际与形态	光电引擎距 ASIC 距离	电气通道插损预算	典型单比特功耗 (pJ/bit)	海岸线带宽密度	核心生态代表与量产节点	致命工程痛点与物理边界
重定时可插拔 (Retimed Pluggable)	150–350 mm（前面板）	30–40 dB (CEI-224G-LR)	15–22 pJ/bit (1.6T 约 26–34W)	~50–80 Gbps/mm（受限于面板笼子宽度）	中际旭创、新易盛、Coherent、Cisco/NVIDIA **USFP**、Arista **XPO**	448G 世代铜走线损耗超限；单机柜数千模块散热与面板面积触顶
线性/半重定时可插拔 (LPO / LRO)	100–250 mm（前面板 +Flyover）	15–22 dB (CEI-224G-MR/VSR)	8–15 pJ/bit (省去 50%–100% DSP)	~50–80 Gbps/mm	新易盛、中际旭创、Arista、Broadcom	跨厂家交换机互操作性与误码率（BER）裕度窄，排查责任界定复杂
近封装光学 (NPO, 板载分离)	20–100 mm（同板 LGA/BGA）	8–15 dB (MR/VSR 直驱)	8–12 pJ/bit (7.2T 引擎约 60–80W)	~200–400 Gbps/mm	**华为 Hi-ONE (7.2T)**、中际旭创 **TeraHop**、Marvell、Broadcom VCSEL NPO	需机箱内盲插光纤或光纤洗牌盒（Fiber Shuffle），占用主板外围面积
2.5D 共封装光学 (2.5D CPO)	5–20 mm（同封装基板）	<4–6 dB (XSR/USR 超短距)	5–8 pJ/bit (TH5-Bailly 实测降功耗 >3.5x)	~500–800 Gbps/mm	**Broadcom TH5-Bailly / TH6-Davisson**、Meta、Micas	超大尺寸 FC-BGA 基板翘曲良率难控；光引擎失效导致整颗昂贵 ASIC 连坐返修
3D 异质集成 CPO (TSMC COUPE)	<2–10 mm（SoIC-X 垂直堆叠）	<2–4 dB (Bumpless 零寄生电容)	3–5 pJ/bit (省去 DSP，激光器外置)	>1,000 Gbps/mm (1–2 Tbps/mm)	**NVIDIA Quantum-X / Spectrum-X Photonics**、TSMC + SPIL	产能高度锁定于 TSMC SoIC + SPIL 闭环；外置 ELSFP 链路光损耗高达 ~99%

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

2.2 外置光源 CPO 的链路插损拆解与物理代价

光电引擎封装位置（NPO 或 CPO）与激光源位置（内置或外置）是两个相互独立的工程维度。将磷化铟激光器移出 85°C–105°C 的主芯片高热区，制成前面板可热插拔的外置光源模块 ELSFP，能够规避高温下激光器寿命衰减并保留面板快速更换能力，但在物理层付出了高昂的多级光学插损代价。

EXHIBIT 02 外置光源 CPO 八级链路损耗瀑布与内置光源 NPO 架构对比

① 外置光源 CPO 8 级光学链路损耗拆解（ELSFP → 光电探测器 PD） 终端仅余 0.6%–1.1%

传输节点与耦合步骤	插入损耗 / 损耗比	累计剩余光功率（基准 400 mW / 26 dBm）
1. 外置 ELSFP 激光源 → 2. PMF 保偏光纤 + 连接器	基准 → –1.5 dB	400 mW → **280 mW (70%)**
3. 封装边缘耦合输入 → 4. Tx 硅光芯片 (COUPE PIC)	**–2.0 dB → –8.2~–11.2 dB**	176 mW → **24–44 mW (6%–11%)**
5. Tx 可拆卸输出连接器 → 6. SMF–28 光纤(≤500m)+MPO	–1.5 dB → –2.5 dB	16–32 mW → **8–16 mW (2%–4%)**
7. Rx 可拆卸输入连接器 → **8. Rx PD 终端探测器**	**–1.5 dB → 累计约 –20 dB**	**6.4–12 mW → 2.4–4.4 mW (0.6%–1.1%)**

② 统计口径陷阱：系统端到端真实功耗 vs 裸光引擎宣传值 (pJ/bit) 0–20 pJ/bit 全口径校准



数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

从前面板 400 mW（+26 dBm）连续波激光器出射，经片上调制并抵达对端光电探测器，光信号在外置光源 CPO 链路中依次经历八级损耗：

EQUATION · CORE QUANTITATIVE & ECONOMIC MECHANISM

$$P_{\text{Rx PD (dBm)}} = P_{\text{Laser (+26 dBm)}} - L_{\text{ELS couple}} - L_{\text{PM conn}} - L_{\text{FAU in}} - L_{\text{Splitter}}$$
$$-L_{\text{Modulator}} - L_{\text{FAU out}} - L_{\text{Fiber net}} \approx +3.5 \sim +6.5\ \text{dBm}\ （单波仅剩\ 0.6\%–1.1\%）$$

公式释义：外置连续波激光历经多级耦合、片上分光与调制插损后，抵达接收端探测器的有效光功率仅余初始值的约 1%，迫使前端配置超高功率磷化铟光源与保偏光路。

逐级核算可见，连续光从 ELSFP 芯片耦合进保偏尾纤先损失 1.5–2.0 dB；穿过前面板盲插保偏连接器损失 1.0–1.5 dB，且在 250–400 mW 高功率照射下端面微尘极易诱发纤芯烧蚀；在光引擎入口 PM-FAU 从 9 微米光纤模场压缩至亚微米硅波导再损失 1.5–2.5 dB。随后除 1×4 或 1×8 分路器的固有分光外，微环或马赫-曾德尔调制器加载高频信号会吸收散射 4.0–5.5 dB；叠加出射耦合、机柜光纤洗牌盒与接收端解复用损耗后，扣除分光比的无源与调制总插损高达 19.5–22.5 dB，约 99% 光功率在途中耗散。这直接造成两项供应链刚性成本：前端必须配置仅 Lumentum 与 Coherent 可高良率量产的 300–400 mW 掩埋异质结磷化铟激光器；机箱内从面板 ELSFP 到硅光波导必须全程使用单价为普通单模光纤 80–100 倍的保偏光纤，并执行亚度级偏振轴对准。

2.3 三条光源集成路线的工程取舍：外置 ELSFP、内置光源 NPO 与晶圆级片上光源

围绕上述插损与维护权衡，产业分化出三条路线。英伟达 Quantum-X / Spectrum-X Photonics 与博通 Bailly / Davisson 坚持外置光源 CPO，宁可承担超高功率激光器与保偏光纤成本，也不让易损激光器与数万美元主芯片封死在一起，确保前面板 30 秒热插拔修复。华为 Hi-ONE（7.2T）与中际旭创旗下的 TeraHop 则推进内置光源 NPO：将连续波激光器直接倒装焊在 LGA 插槽式 NPO 光引擎内，用独立液冷冷板分支将壳温压在 45°C–55°C 以下。由于省去了面板保偏连接器、保偏跳线与入口耦合三道环节（合计省去约 3 dB 插损，所需激光功率减半），系统仅用国产成熟的 70–100 mW 常温连续波激光器与普通单模光纤即可跑通预算，同时在老化测试与拆换返修上与主芯片解耦。

第三条路线是以 Intel 4T OCI 为代表的晶圆级异质集成片上光源，利用磷化铟与硅晶圆直接键合原位生长激光器与光放大器，失效率低于 0.1 FIT。但因依赖专有化合物与 CMOS 混合产线，短期难以向纯设计公司开放代工。

2.4 可靠性、可维护性与复合封装良率的三重约束

NPO 与 CPO 的落地节奏还取决于平均无故障运行时间 MTBF、现场平均修复时间 MTTR 与复合封装良率的权衡。Meta 联合 Broadcom 对 Tomahawk 5-Bailly CPO 交换机开展的 2.25 亿等效链路小时实测实现了零激光器失效与零链路闪断，光电故障率较可插拔模块下降 65%–80%，显著减少了万卡同步训练的检查点回滚。然而在制造端，当单颗良率 95% 的 102.4T 交换芯片周围共封装 16 颗贴装良率 98.5% 的光引擎时，整体良率按乘积法则衰减：

EQUATION · CORE QUANTITATIVE & ECONOMIC MECHANISM

$$Y_{\text{CPO total}} = Y_{\text{ASIC}} \times \left(Y_{\text{OE}}\right)^{16} = 0.95 \times (0.985)^{16} \approx 74.6\%$$

公式释义：单颗交换芯片共封装 16 颗光引擎时，复合封装良率按乘积法则衰减至约 74.6%，外围单颗光引擎耦合失效即可能导致高价值主芯片连带报废。

这意味着约四分之一的复合封装体可能因外围单颗光引擎微米级偏移或回流焊热应力而连带报废。现场运维反差同样明显：可插拔模块故障可在 5–15 分钟内热插拔修复；CPO 内部调制器或耦合胶水一旦热疲劳失效，则须排空冷却液、拆下整台交换托盘或计算刀片返厂，修复时间拉长至 4–48 小时。因此多数云厂商在 2026–2028 年仍以可插拔 LRO 与插槽式 NPO 作为风险可控的主力方案。

2.5 400G/lane 世代面板演进：USFP 二维接触阵列与量产时钟

当单通道速率迈入 400G/lane、奈奎斯特频率突破 100 GHz 时，传统 OSFP 边缘金手指遭遇残桩反射与面板空间瓶颈，推动 2028–2029 年主机形态分化。

EXHIBIT 03 400G/lane 世代面板互连：USFP 二维接触阵列与两步零磨损垂直插拔结构



数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

Cisco 与英伟达于 2026 年 10 月联合定义 USFP 超高密可插拔规范，以二维平面触点阵列与两步零磨损垂直压接替代单排金手指，消除高频残桩反射，在 100W 风冷或冷板包络下将 1U 面板总带宽推升至 409.6 Tbps（密度提升 4 倍），印证英伟达在 Scale-Out 层同样保留了长周期可插拔方案；Arista 牵头的 XPO 则尝试将盲插液冷引入面板大模块。从交换芯片节奏看，2026–2027 年处于 200G/lane 成熟期，

1.6T OSFP 仍将主导 2027 年预计 645 亿美元的以太网光模块市场，400G USFP 与 CPO/NPO 的正面竞争将随 448G SerDes 在 2028 年下半年至 2029 年量产而展开。

EXHIBIT 04 **OSFP、USFP、XPO、NPO 与 CPO 五大光互连路线核心工程参数与量产窗口对标**

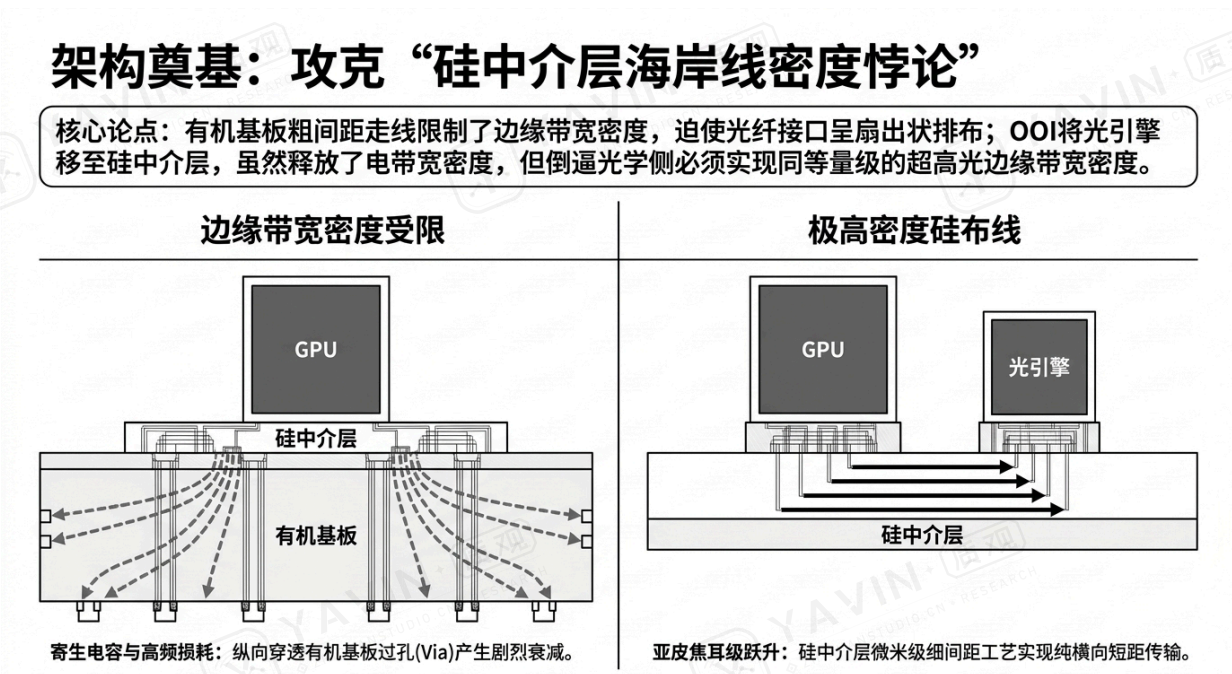
	OSFP	USFP	XPO	NPO (Open CPX)	CPO
SerDes	200G/lane	**原生 400G/lane**	200G演进400G	200G演进400G	200G演进400G
单模块容量	1.6T（XD为3.2T）	6.4T至12.8T	12.8T至25.6T	6.4T至12.8T	51.2T-200T级阵列
面板宽度	标准宽度	**兼容交换机与网卡**	OSFP **2.7倍宽**（仅限交换机）	板载超紧凑插槽	与ASIC共封装基板
散热/冷却	25-40W风冷/冷板	最高 100W（无内嵌水路）	400-500W（模块内置液冷）	系统冷板直接覆盖	共享冷板+外置激光器
实测能耗	~18-20 pJ/bit	≤15.6 pJ/bit	~10 pJ/bit（LRO）	**~4.7 pJ/bit**	**~3-5 pJ/bit**
可维护性	热插拔	热插拔	液冷快接头/高压维护	需整机下架拆解	外置激光器可插拔
量产窗口	**2026-2027绝对主力**	待2028-2029 400G芯片	2027年初200G小批量	2027-2028定制导入	**2028-2029爆发**

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

2.6 中介层上光学与 2028 全光 Scale-Up 演进

针对 GPU 芯片边缘引脚密度受限的跨柜 Scale-Up 互连，英伟达与台积电正进一步攻关第五代中介层上光学 OOI。

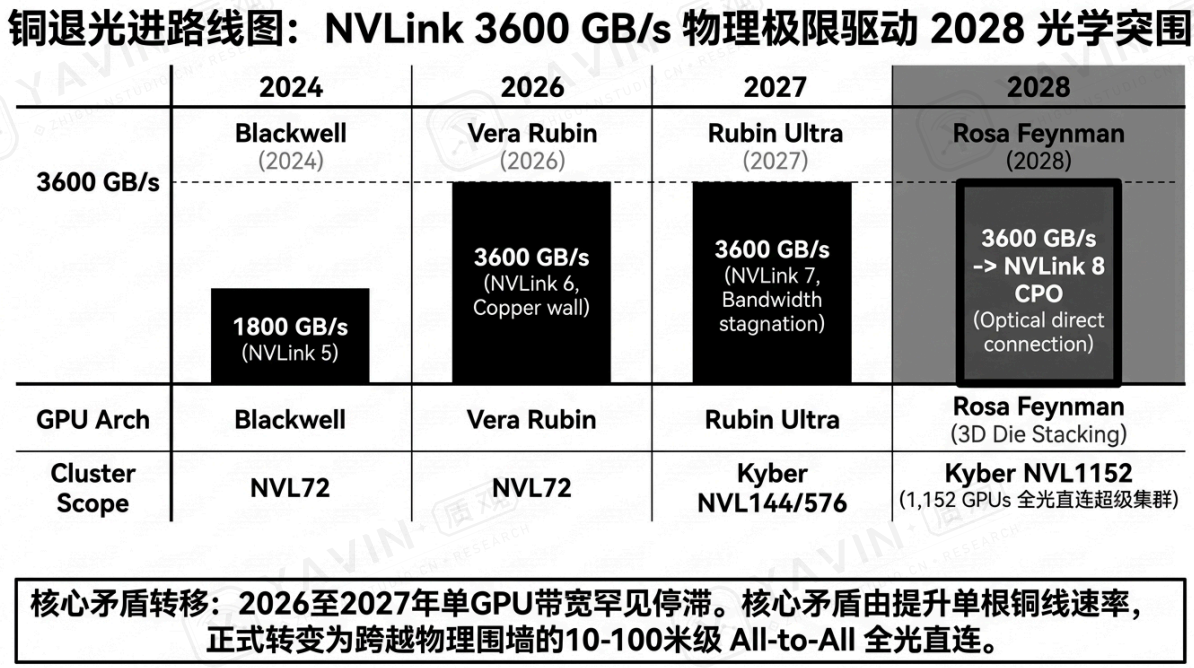
EXHIBIT 05 硅中介层边缘带宽密度对比：有机基板粗间距扇出与 CoWoS 微米级高密硅布线



数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

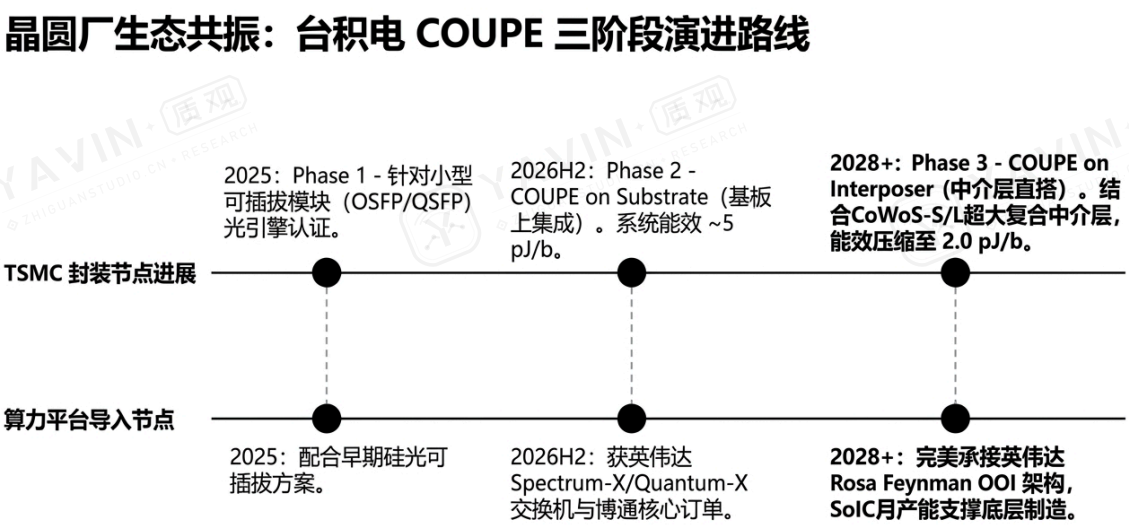
将光学芯粒直接贴装于 CoWoS 硅中介层边缘后，可利用亚微米硅走线运行 32G/64G NRZ 低速宽并行接口，省去 PAM4 SerDes、时钟恢复与 DSP；配合微环密集波分复用与半速率前向时钟，英伟达实测端到端光互连能耗降至 3.5 pJ/bit，逼近柜内短距铜缆水平。随着 Vera Rubin 世代（单卡双向 3,600 GB/s）触及 2 米同轴铜缆体积与弯曲半径上限，按台积电 COUPE 三阶段节奏推演，跨机柜 GPU Scale-Up 预计将在 2028 年后的 Feynman 世代切入中介层光直连。

EXHIBIT 06 NVLink 互连演进路线：单卡 3,600 GB/s 逼近铜缆体积上限驱动 2028 年 Feynman 世代转向光直连



数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

EXHIBIT 07 台积电 COUPE 异质光子集成三阶段演进路线图



数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

03 CHAPTER 03 · OPTICAL CIRCUIT SWITCHING & HYBRID FABRIC
集群全光交换演进与电分组交换的物理边界

3.1 三层胖树电分组交换的能耗开销与代际绑定

在传统三层胖树电分组交换 EPS 网络中，数据包从源网卡至目标节点需在叶层与脊层间经历 6 至 10 次“光—电—光”转换。在数万卡集群中，顶层脊交换机本身不贡献算力或边缘拥塞控制，却消耗全网 40%–50% 的高端光模块配比，使单比特跨网传输能耗达约 83 pJ/bit。同时电交换芯片 SerDes 与特定速率绑定，每次从 400G 升至 800G/1.6T 均须成批拆换脊交换机与中继模块，且静态连线难以按任务动态切分拓扑或隔离故障。

OCS 光路交换通过三维微机电反射镜、液晶光栅、压电直驱或硅光马赫-曾德尔干涉仪在物理层直接偏转光束，建立光纤到光纤的全光透明通道。光束穿过 OCS 无需光电转换、时钟恢复与 DSP 重定时，插损仅 1.5–3.0 dB，整机功耗不过百瓦级，且对 400G 至 3.2T 任意速率与调制格式完全透明，从而将脊层硬件折旧与端口速率升级解耦。

EXHIBIT 08 **电分组交换、集中式脊层 OCS 与节点边缘分布式 dOCS 三种拓扑架构对比**

1. EPS 电分组交换

传统 Fat-Tree

架构： Spine EPS + Leaf EPS 双层交换芯片。

物理瓶颈： 每次跨层需经历 **O–E–O 光电电光转换** 与 SRAM 缓存排队。

代价： 光模块数量随集群呈超线性膨胀，功耗与尾延迟受制于电交换芯片速率墙。

2. 集中式 OCS (Spine)

Google Palomar

架构： 以 3D-MEMS 微镜阵列或液晶波导取代 Spine 层电交换机。

物理红利： **O–O–O 全光直通**，彻底免除光电转换，与协议及未来速率解耦。

演进： 单台支撑 128×128 以上拓扑动态重构，故障绕行不丢包。

3. 分布式 dOCS (边缘)

SiPh 硅光下沉

架构： 将 MZI 马赫–曾德尔干涉矩阵直接集成至节点光模块或 Leaf 边缘。

物理红利： 构建可重构光学 Mesh / Ring，**直连光路绕开中间交换**。

意义： 为超大规模 MoE All-to-All 与长距分布式训推铺平无拥塞光路。

网络拓扑演进逻辑： 从 EPS 的“层层拆包转发”演进为 OCS 的“全光透明立交桥”，最终走向 dOCS 的“节点直连光矩阵”，消除无效 O–E–O 税。

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

3.2 集中式脊层 OCS 与节点边缘分布式 dOCS 的架构分化

全光交换沿网络位置分化为集中式脊层 OCS 与分布式边缘 dOCS 两类范式。集中式路线以 Google Palomar 与 Lumentum R300（300×300 端口）为代表：Google 自 TPU v4 起取消顶层脊电交换机，并在 9,216 卡 TPU v7 Ironwood 超节点中全面延展，由柜内铜缆环网引出光纤直连中央 MEMS OCS 阵列，按需拼接三维扭曲环网并秒级绕开故障机柜，将网络资本开支与功耗分别压在整机的 5% 与 3% 以

内。商业落地随之加速，Lumentum R300 单季营收在 FY27 Q1 突破 1 亿美元，Google 亦将 2027 年 OCS 采购计划上修 67% 至约 5 万台。

但 3D-MEMS 微镜机械偏转耗时 5–50 毫秒，仅能用于作业间粗粒度编排。为此，曦智科技 Photowave 与 Risewave、中兴通讯 Matrix OEX 光背板及学术界 InfiniteHBD（**OCSTrx**）转向分布式边缘 dOCS，将微秒级热光或纳秒级电光硅光开关阵列直接嵌入节点边缘光模块内，无需中央大端口光交换机即可跨柜动态直连目标 GPU。实测显示，同等万亿模型负载下 InfiniteHBD 硬件成本约为 NVL72 的 31%，算力利用率较受限网络提升 3.37 倍。

3.3 端到端光路切换延迟拆解：60–80 微秒接收端重锁定瓶颈

将电光开关 10–100 纳秒的本征偏转时间等同于逐包光交换存在明显工程误判，器件偏转与端到端业务无损恢复之间隔着多层系统开销：

EQUATION · CORE QUANTITATIVE & ECONOMIC MECHANISM

$$T_{\text{E2E,OCS}} = t_{\text{SDN ctrl}} + t_{\text{driver}} + t_{\text{optical actuation}} + \underbrace{t_{\text{CDR/DSP relock}}}_{\text{核心物理瓶颈：}50\ \mu\text{s} \sim 10\ \text{ms}} + t_{\text{protocol drain}} \gg t_{\text{optical actuation}}$$

公式释义：全光交换的端到端业务恢复时间远大于光开关本征偏转耗时，接收端跨阻放大器增益调整、时钟恢复与 PAM4 均衡器重锁定构成了微秒至毫秒级的主要瓶颈。

切换光路前，发送端网卡须先停发并排空在途字节（10–500 微秒）以防帧撕裂，随后驱动电路完成电压或热平衡。核心瓶颈位于接收端重获光信号之后：当光源从节点 A 切至节点 B，光纤长度、偏振态、到达功率与激光频偏均发生跳变，接收端 TIA 跨阻放大器须重新调整增益，锁相环须重抓时钟相位，200G PAM4 DSP 更需重新收敛多抽头均衡系数。标准商用模块重锁定耗时达数十毫秒；即便采用突发模式时钟恢复与预存均衡缓存，端到端恢复仍需 60–80 微秒。

表 4：五大光路交换（OCS / dOCS）器件物理流派的本征时间、端到端恢复延迟与工程边界对比

光交换技术流派	代表厂商与核心产品	光学本征切换时间	端到端链路恢复时间 (E2E)	典型插入损耗 (IL)	最大单机端口规模	最适配的 AI 集群网络层级与工作负载场景
3D-MEMS 微机电反射镜	**Google Palomar (136²)**、**Lumentum R300 (300²)**、光迅科技 (400²)	**5–25 ms**	**10–50 ms**（配合定制快速重锁定）	**1.5–2.5 dB**（极低）	**136×136 至 400×400**（高基数霸主）	**Spine 脊层重构、跨 Pod 3D Torus 编排、故障机柜秒级绕行、PP 流水线连接**
液晶偏振光栅 (DLC / LCOS)	**Coherent (II-VI)**、WSS 衍生架构	**10–100 ms**	**20–150 ms**	**1.5–3.0 dB**（无移动机械磨损）	64×64 至 128×128	**无机械磨损高可靠 Spine 替换、跨机房准静态光配线调度**
压电陶瓷直驱光束偏转 (Piezo DLBS)	**Polatis (HUBER+SUHNER)**	**0.5–1.5 ms**	**2–10 ms**	**0.8–1.5 dB**（全场最低插损，支持暗光纤启动）	32×32 至 384×384	**低损长距 Scale-Across、高功率外置光路切换与超算中心动态光交叉**

光交换技术流派	代表厂商与核心产品	光学本征切换时间	端到端链路恢复时间 (E2E)	典型插入损耗 (IL)	最大单机端口规模	最适配的 AI 集群网络层级与工作负载场景
硅光热光/电光 MZI + SOA 阵列	**曦智科技 Photowave/Risewave、InfiniteHBD OCSTrx**	**10 ns – 10 μs**	**60–80 μs**（受限于快速 CDR/DSP 锁定）	**4.0–8.0 dB**（需片上 SOA 光放大补偿）	单芯片 4×4 至 32×32（分布式拼接）	**节点边缘分布式 dOCS、Step 级动态专家组拓扑重构、高带宽域按需直连**
全自动机器人光纤配线架 (Robotic Patch)	Telescent 等	**30–120 s**	**分钟级**（纯物理机械抓手插拔光纤）	**<0.5 dB**（直连物理跳线）	>1,000×1,000	**多租户算力中心物理级安全隔离、周/月级长周期集群分区重组**

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

3.4 稀疏 MoE 流量偏斜与光电混合交换分工

60–80 微秒的恢复下限决定了纯全光网络无法独立承载全部通信。在稀疏 MoE 模型中，门控网络在纳秒尺度动态选择专家，极易引发热门专家多对一微突发拥塞。由于光子无法像电子在 CMOS SRAM 中那样静止排队缓存，无缓冲区的纯 OCS 面对瞬时微突发必然丢包或死锁。

因此旗舰集群普遍采取“脊层全光穿通加叶层电分组缓冲”的混合分工：OCS 或 dOCS 接管作业级环网定制、故障绕行、流水线与数据并行稳态大象流，以及数十毫秒窗口内的高频共现专家直通捷径，卸载 65%–80% 背景流量，削减约 40% 网络功耗与 30% 网络资本开支；机柜顶置与叶层高缓存电交换机则完整保留，依靠数百 MB 片上 SRAM 吸收纳秒级 MoE 突发并执行拥塞控制。

表 5：引入全光交换（OCS/dOCS）后对传统 AI 集群网络设备与光模块的“替代 vs. 保留”定量冲击矩阵

传统胖树网络层级与硬件组件	在光电混合（OCS + EPS）集群中的命运裁定	替代/保留比例量化实证	核心技术与商业演进影响
Spine / Core 脊层与核心层电交换机	**被集中式 OCS 大规模替代（清退重灾区）**	**替代率达 70%–100%**（Google TPU 集群 100% 取消 Spine 电交换）	直接省去顶层昂贵的 51.2T/102.4T 电交换机机框，将集群网络功耗削减 **40%**、网络 CapEx 削减 **30%**
连接 Spine 层的上下行灰光可插拔光模块	**随脊层电交换机一并被消减（单跳光穿通）**	**减少全网约 35%–50% 的中继光模块数量**	叶交换机或计算节点发出的光直接穿过 OCS 到达对端，消除中间层成对的 O-E-O 中继模块
ToR / Leaf 叶层与机柜边缘电交换机	**100% 刚性保留（吸收 MoE 突发与 Incast）**	**100% 保留**，且向更高基数（Tomahawk 6）演进	承担纳秒级包交换、SRAM 队列缓冲、动态路由兜底与细粒度集合通信同步
服务器侧 / 叶层接入端高速光模块 (800G/1.6T)	**100% 保留，且升级为高功率/低色散规格**	数量不减，**单只模块价值量与光功率预算提升 15%–25%**	为补偿穿过 OCS 带来的额外 **2–3 dB** 插损，节点侧光模块需更高发射光功率（如高功率硅光/EML）或集成 **OCSTrx** 硅光开关
跨园区 DCI 传输设备与相干光模块 (ZR/ZR+)	**完全保留并协同扩容（波长级透明调度）**	**100% 保留**，与 Piezo/MEMS OCS 组成波长交叉网络	OCS 对相干调制完全透明，可直接作为跨数据中心 DWDM 光层的低功耗空间交叉连接矩阵

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

04 CHAPTER 04 · PLUGGABLE LIFECYCLE & 102.4T SYSTEM TCO

可插拔模块生命周期延续、102.4T 交换机五年期 TCO 与供应链主导权

4.1 可插拔光模块配比扩张机制与面板延寿技术

“CPO 将令可插拔模块归零”的担忧源于两处口径误读。一是混淆了光引擎颗数与逻辑端口数：华为 Atlas 960E 用 5,500 颗 Hi-ONE NPO 替代 4.8 万只 800G 模块，看似件数减少 88.5%，实则单颗 Hi-ONE 为 7.2 Tbps 超大引擎，总光带宽达 39.6 Pbps（折合 4.95 万个 800G 等效端口），内部激光器、调制通道与纤芯消耗并未减少。二是忽视了超节点扩容引发的 Scale-Out 模块倍增：单柜 GB200 NVL72 仅需外配 216 只可插拔模块；演进至跨 8 柜的 Vera Rubin Ultra NVL576 后，尽管柜间 Scale-Up 局部导入 CPO，但为支撑 576 颗超级芯片与外部集群的无阻塞多平面互连，单系统配置的 1.6T 可插拔模块升至 2,500 只，配比扩大至 11.5 倍。

同时，前面板可插拔正通过五项改进延续生命周期至 400G/lane 世代：3nm DSP 配合硅光将 1.6T 重定时功耗压至 22–25 W；LRO 与 LPO 省去接收端或全部 DSP，降低 25%–50% 功耗与约 20% 成本；机箱内 Flyover 超低损铜缆跳线绕开 PCB 挽回 10–15 dB 插损预算；叠加 USFP 二维接触阵列与 XPO 面板液冷，持续抬升面板密度上限。

4.2 102.4T 交换机五年期系统级 TCO 拆解与敏感度边界

以 2026 年底至 2027 年部署的 102.4 Tbps（64×1.6T）交换机为基准单元，我们将初始硬件采购、含 PUE 的五年电费，以及冷备库存与液冷排障停机风险纳入同一模型，对四种光电架构开展五年期 TCO 决算：

EXHIBIT 09 102.4T 交换机五年期基准 TCO 成本结构拆解与三情景敏感度对比

① 102.4T 交换机 (64×1.6T) 五年期基准 TCO 成本结构拆解 (@ $0.10/kWh · USD K)

硬采购 + 5年电费 + 备件风险



② 四大敏感度情景下的五年 TCO 逆转边界 (USD K)

LRO vs CPO 拐点

情景假设	A 可插拔	B LRO	C NPO	D CPO	情景逆转结论
基准情景 ($0.10/kWh)	200.0	170.0	167.1	**159.6**	CPO 基准略低
敏感度1 高电价区 ($0.20)	217.0	184.0	178.0	**169.0**	高电价放大 CPO 节能
敏感度2 CPO 良率波动 (涨25%+故障翻倍)	200.0	170.0	**167.1**	**199.7**	**CPO 飙至 199.7 反超**
敏感度3 2028 模块成熟降价 30%	156.0	**134.1**	167.1	160.0	**LRO 以 134.1 全场最低**

核心经济学发现：CPO 五年省电仅 **$8.5K**（对比 LRO 省 $5.3K），却背负 **$23.7K 整机备件与停机风险**；其真正胜场只在机柜供电受限（Power-Capped）下多塞 30% GPU 的算力机会成本。

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

表 6：102.4T（64×1.6T）交换机在四种光电架构下的五年期系统级 TCO 拆解与三情景敏感度压力测试表

成本结构与敏感度分析维度	方案 A：1.6T 标准重定时可插拔 (Retimed Pluggable)	方案 B：1.6T LRO 半重定时可插拔 (Linear Receive)	方案 C：NPO 近封装光引擎 + 前面板 ELSFP	方案 D：CPO (OCI 共封装) + 前面板 ELSFP
单端口等效光互连功耗	**34.0 W** (基准)	**25.0 W (-26.5%)**	**18.0 W (-47.1%)**	**12.0 W (-64.7%)**
整机满载总功耗 (含 1000W ASIC)	**3,176 W** (风冷 PUE 1.25)	**2,600 W** (风冷 PUE 1.25)	**2,152 W** (液冷 PUE 1.15)	**1,768 W** (液冷 PUE 1.15)
1. 初始硬件采购成本 (CapEx)	**$175,800** ($35k 裸机 + 64×$2,200 模块)	**$150,200** ($35k 裸机 + 64×$1,800 LRO)	**$136,800** (液冷主板 +NPO+16×ELSFP)	**$127,000** ($95k CPO 主机 +16×ELSFP+$8k 线束)
2. 五年电力消耗成本 (@$0.10/kWh)	**$17,389**	**$14,235**	**$10,840**	**$8,905** (五年较方案 A 仅省电 **$8,484**)
3. 五年备件、液冷维护与停机风险成本	**$6,800** (5% 热插拔模块备件，分钟级自愈)	**$5,600** (5% LRO 备件，零液冷拆装成本)	**$19,500** (ELSFP 备件 +LGA 开箱液冷排障窗口)	**$23,700** (需 10:1 配整机冷备件 $12.7k + 停机损失)
五年期系统基准总拥有成本 (Baseline TCO)	**$199,989** (基准 100.0%)	**$170,035** (85.0%)	**$167,140** (83.6%)	**$159,605** (79.8%，基准略优)

成本结构与敏感度分析维度	方案 A：1.6T 标准重定时可插拔 (Retimed Pluggable)	方案 B：1.6T LRO 半重定时可插拔 (Linear Receive)	方案 C：NPO 近封装光引擎 + 前面板 ELSFP	方案 D：CPO (OCI 共封装) + 前面板 ELSFP
敏感度情景 1：高电价地区 (@$0.20/kWh)	$217,377	$184,270	$177,979	**$168,511** (高电价放大节电优势)
敏感度情景 2：CPO 良率波动 (主机涨 25%+故障翻倍)	$199,989	$170,035	**$167,140** (NPO 稳居最优)	**$199,730** (**TCO 显著上升，高于 LRO 与 NPO**)
敏感度情景 3：2028 年 1.6T 可插拔规模降价 30%	$155,709	**$134,095（全方案最低）**	$167,140	$159,605 (被成熟可插拔反超)

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

测算表明，单机省电收益远不足以抵消整机运维风险溢价。在 0.10 美元/度电价下，CPO 五年电费（8,905 美元）较标准重定时可插拔（17,389 美元）仅省下 8,484 美元，不足总 TCO 的 4.5%，却需承担 23,700 美元的整机冷备分摊与排液停机风险。若 CPO 封装良率波动导致主机溢价 25% 且失效率翻倍，五年 TCO 将升至 199,730 美元，高于 NPO（167,140 美元）与 LRO（170,035 美元）。反之，待 2027–2028 年 1.6T 模块随规模效应降价 30% 后，1.6T LRO 五年 TCO 降至 134,095 美元，在不改动机房风冷运维流程的前提下实现最低单机成本。

CPO 在高密超节点中真正的商业支点，是机柜供电上限约束下的算力机会成本。当机房单柜供电被限制在 250 kW 或 500 kW 时，用 CPO 替代高功耗模块每柜可释放 16.6 kW 以上电力余量，使云厂商在同等配电容量下多装最多约 30% 的算力卡（每柜约 20 颗 Rubin GPU）。新增 GPU 五年创造的推理与训练收入远超交换机价差，这才是供电受限超节点导入 CPO 的决定性动因。

4.3 供应链主导权分化：白盒解耦多源招标与光电垂直整合

封装演进同步重塑着供应链议价权。可插拔时代交换机与光模块接口解耦，云厂商掌控 QVL 合格供应商名录独立招标比价。而 TSMC COUPE 共封装将光引擎焊死在整机液冷托盘内，削弱了云厂商的分拆议价能力。为此，头部云厂商一面在 Scale-Out 力推 1.6T LRO、USFP 与 XPO，一面联合博通、Lumentum、Coherent 推进开放 OCI 标准与可插拔 ELSFP 外置光源，并在自研 ASIC 超节点中优先采用插槽式 NPO。

面对英伟达整机闭环与博通交换生态优势，Marvell 在 2026 年连续实施纵向并购：2 月以约 32.5 亿美元首付款收购 Celestial AI 切入硅光内存织物；11 月 2 日正式签约以 1,150 亿美元企业价值并购 Lumentum，将 200G EML、300–400 mW 超高功率激光器、ELSFP 与 R300 全光交换机收归麾下，打通从定制 XPU、光 DSP 到磷化铟发光晶圆与 OCS 的全栈闭环。

05 CHAPTER 05 · BOM VALUE SHIFT & SUPPLY CHAIN FINANCIAL AUDIT

光互连成本结构迁移、2026 三季报备货核验与国产供应链评估

5.1 跨代际 BOM 成本权重与毛利池重分配

随着速率迈向 1.6T/3.2T、形态向硅光与 CPO/NPO 演进，光互连内部 BOM 物料结构显著重排。我们将均价约 835 美元的 800G EML 可插拔模块、1.6T 硅光模块，与售价约 65,000 美元的 115.2T 液冷 CPO 交换机（含 36 颗 3.2T 硅光引擎，光学总 BOM 约 36,000 美元）进行拆解对比：

EXHIBIT 10 CPO 复合封装良率约束与光互连产业链利润池迁移模型

CPO 指数良率衰减定律：$Y_{sys} = y^N$ （$N = 16 - 32$ 颗光引擎合封）

NPO 100% 良率解耦 vs 早期 7.2T CPO 现网良率约 20%

① NPO 解耦 vs CPO 合封乘方诅咒（单引擎良率 y 与合封颗数 N） N 越大越依赖 KGD 筛选与自动耦合

架构 / 单引擎良率水平	N = 16 引擎系统良率	N = 32 引擎系统良率	产业良率边界判断
NPO 近封装解耦架构	100%（互不连坐）	100%（可单颗替换）	零主芯片连带报废风险
CPO（单引擎 y = 98%）	72.4%	52.4%	量产经济性临界线
CPO（单引擎 y = 95%）	44.0%	19.4%	7.2T CPO 现网良率约 20%
CPO（单引擎 y = 90%）	18.5%	3.4%	商业上完全不可行

② 2025 vs 2028–2030 光互连 BOM 价值池迁徙（从组装与独立 DSP 向上游物理咽喉浓缩） BOM 占比变化 (pct)

光互连全链路价值环节	2025 占比	2028–2030 占比	结构边际变化
CW 大功率光源与 6 英寸 InP 晶圆	18%	26%	+8 pct
硅光 / TFLN 调制与 COUPE 封测	12%	25%	+13 pct
FAU / MMC 盲插连接与光纤 Shuffle	13%	22%	+9 pct
晶圆级 5nm 自动光耦合与 KGD 测试设备	5%	10%	+5 pct
独立光模块 PAM4 oDSP 芯片	28%	9%	–19 pct
传统模块壳体、结构件与 PCB 组装	24%	8%	–16 pct

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

在电芯片与封测端，独立重定时 DSP 在 800G/1.6T 可插拔模块中占 BOM 的 30%–36%，而在超短距直驱的 3.2T CPO 光引擎及 LPO 模块内直接归零。成本权重转而向晶圆级三维异质封测集中：单颗约 1,000 美元 BOM 的 3.2T CPO 光引擎中，硅光与电芯片裸片仅占 20%–25%，台积电 SoIC-X 混合键合与矽品

精密微组装测试占据了 35%–40%。英伟达已推动矽品精密将 CPO 封装产能扩充 15 倍，台积电亦计划于 2028 年将硅光晶圆月产能提至 2.5 万片。

在光学组件与材料端，精密无源耦合与磷化铟有源晶圆成为主要价值增量。单只 800G 模块内 FAU 光纤阵列与透镜价值不足 100 美元。而在含 36 颗光引擎的 CPO 交换机中，保偏与单模 FAU、激光子组件封装、光纤洗牌盒及 ELSFP 耦合件使单机配套价值升至 7,000 美元以上（约占光学 BOM 的 20%）。更上游受间接带隙硅材料无法高效发光的物理限制，所有 EML 与连续波激光器均须基于磷化铟衬底与外延制造，2026–2031 年数据中心磷化铟有源光通道需求年复合增速预计达 85%。

5.2 2026—2031 全球光互连容量预测与统计口径拆解

综合 LightCounting 与 Yole Group 在 2026 年下半年更新的统计口径，未来五年全球光互连呈现总量扩张与形态分流并存的格局：

EXHIBIT 11 2027 年 1.6T OSFP 市场规模预测与上游 EML/CW 激光器供需格局



数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

按 LightCounting 覆盖以太网模块与 CPO/NPO 端口口径，全球收入由 2025 年 200 亿美元升至 2026 年 440 亿美元、2027 年预计达 645 亿美元，2031 年基准情景达 945 亿美元；2029 年 NPO 与 CPO 合并出货跨过 4,200 万端口拐点，但到 2031 年全球 4.09 亿个高速端口中，重定时可插拔仍占 48%，NPO 与 CPO 合计占 46%（Scale-Up 贡献其中 58%），LPO/LRO 占 6%。按 Yole 独立核算跨柜 CPO 光引擎口径，2031 年传统光收发模块达 1,123 亿美元，CPO 光引擎则从 2026 年 6 亿美元增至 2031 年 1,121 亿美元，其中 94% 来自 Scale-Up 互连。

表 7：全球 AI 光互连八大核心环节 2026 基准价值池、2030/2031 预测容量与实证毛利率拆解表

产业链核心细分环节	2026 年全球价值池规模 (收入锚点)	2030 / 2031 年预测价值池规模	环节实证毛利率区间 (2026 财报口径)	利润池分配权重与底层统计口径说明
1. 高速重定时可插拔光模块 (800G/1.6T/3.2T)	**~440 亿美元** (800G 出货 4000-4500万只，1.6T 约 1000-1200万只)	**2031E：$945 亿** (基准) / **$2,130 亿** (乐观)；出货 **1.982 亿只** (占总端口 48%)	**38.5% – 46.60%** (中际旭创 26Q3 单季 **46.6%**，Coherent Non-GAAP **40.2%**)	**2026 年模块厂毛利池约 $176–$200 亿**；掌握自研硅光芯片的龙头捕获全链条约 40% 毛利
2. LPO / LRO 线性与半重定时可插拔模块	2025 年 **$5.66 亿美元** (2026 年伴随 800G LPO 放量快速爬坡)	**2031E 出货 2,280 万端口** (含 1.6T 1,750 万只)；2032E 专项口径 **$54.5 亿**	省去 DSP 后单价与 BOM 同步下降，毛利率取决于硅光与线性 TIA 自给率	在 1.6T Scale-Out 对价格敏感的云厂（如 Meta/Amazon/Arista 生态）占据约 9% 端口份额
3. CPO 与 NPO 光引擎总市场 (Scale-Up + Out)	**CPO 光引擎：$6 亿美元** (Yole)；2026–2027 验证期合计 **<600 万端口**	**2031E：1.89 亿端口** (NPO 9,750万 + CPO 9,150万)；Yole 测算 CPO 光引擎达 **$1,121 亿**	晶圆级封测（TSMC+SPIL）切走光引擎 **35%–40% BOM**；NPO 整机毛利率锚定高端模块	2029 年迎 4,200 万端口规模拐点；2031 年 **Scale-Up 应用占 CPO/NPO 出货量的 58% (LC) 至 94% (Yole)**
4. 有源光芯片：EML / CW / UHP 与 ELSFP	**采购池约 $75–$125 亿美元** (Lumentum FY26 器件营收 **$20.06 亿**，UHP 年底运行率 ~$5000万)	**2026–2031 InP 光通道需求 CAGR 达 85%**；Lumentum UHP/ELS 单季于 FY27Q3 破 **$1 亿美元**	**47.4% – 71.3%** (源杰科技 DC CW **71.3%**，Lumentum 26Q4 Non-GAAP **50.4%**)	占可插拔模块 BOM 的 **30%–50%**；6 英寸 InP 产能与 200G EML 良率（初期仅 ~40%）构成全行业总阀门
5. 上游磷化铟 (InP) 单晶衬底 (3/4/6 英寸)	**AXT 26Q2 InP 单季营收 $3,070 万**，2026 年底单季运行率目标 **~$6,000 万**	**AXT 2027 年底单季目标 ~$1.3 亿美元** (2026 产能翻 3 倍+，2027 再翻倍)	**~45.0%** (AXT 毛利率在 InP 涨价与满载驱动下从一年前 8% 跃升至 **45.0%**)	衬底营收体量虽仅数亿美元，但积压订单超 $1 亿，Coherent 预付 $2,540 万抢签 3 年长协
6. 光 DSP 电芯片 (100G/200G/400G/lane)	**采购池约 $75–$100 亿美元** (仅 1.6T 芯片组 2026 年销售额即突破 **$20 亿美元**)	**2026–2028 随 1.6T 高速增长**；2029 年后在 3.2T (75% 为 CPO/NPO) 中份额被显著稀释	**~50.0% – 60.0%** (Marvell / Broadcom 垄断，占重定时模块 BOM 30%–36%)	在 CPO 与 LPO 中独立光 DSP 归零，倒逼 Marvell 斥资 $1,150 亿并购 Lumentum 向有源光与 OCS 转型
7. 精密耦合、FAU、保偏组件与子组件封装	**天孚通信 9M26 营收 47.51 亿元** (Q3 单季 19.23 亿元，无源器件 H1 暴增 77.4%)	单台 CPO 交换系统配套价值量 **≥$7,000** (对比单只 800G 模块 **<$100**)，随 1.89 亿端口放量	**53.7% – 62.6%** (天孚通信 9M26 综合毛利率 **62.6%**，净利率高達 **43.8%**)	无论是外置 CPO、内置 NPO 还是 OCS，通道密度倍增均使微米级光耦合与 PM-FAU 成为最高毛利制造环节
8. OCS 全光交换机整机与微纳光学模组	**谷歌 2026 需求 ~15,000 台**；Lumentum FY27Q1 单季 OCS 营收破 **$1 亿美元**	**谷歌 2027 需求上修 67% 至 50,000 台 (+233% YoY)**，驱动全光脊层规模化普及	Lumentum 系统与器件共振推动 Non-GAAP 营业利润率迈向 **39.5%–40.5%**	谷歌占全球 OCS 需求 80%+（Celestica 代工内部版 + 采购 Lumentum R300）；国内光迅/德科立/腾景切入模组与样机

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

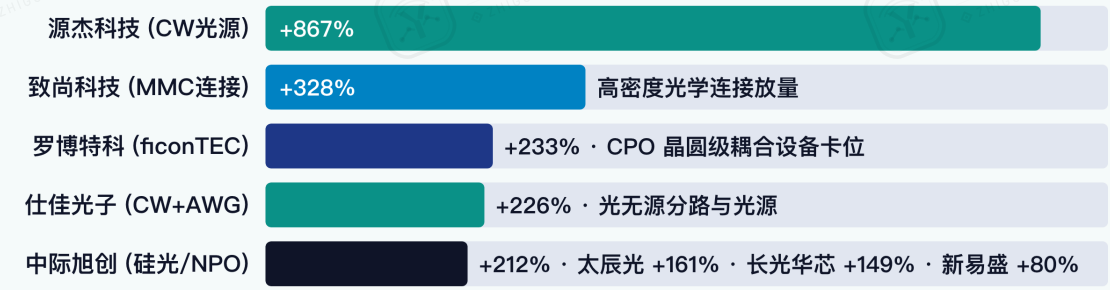
5.3 2026 年三季报核验：国产龙头盈利分化与 542.9 亿元锁料

核验产业景气与竞争壁垒的核心标尺是法定资产负债表与现金流量表。2026 年三季报显示，中际旭创、新易盛、光迅科技与天孚通信四大国产龙头在兑现利润增长的同时，账面合计持有 542.9 亿元人民币存货（494.6 亿元）与预付款项（48.3 亿元），用于锁定上游紧缺光芯片与核心物料。

EXHIBIT 12 2026 年三季报中国光通信四大龙头业绩表现与 542.9 亿元存货及预付款拆解

① 2026 前三季度 / Q3 国产光通信核心卡位标的业绩同比增速 (%)

上游 CW 光源与耦合连接设备领跑



② 国产供应链毛利率剪刀差与 2027–2030 船票诊断

订单锁定与技术卡位

核心供应链标的	核心毛利率	2027–2030 船票与预警定位
源杰科技 (70/100mW CW)	**71.3%**	CW 放量暴赚，待突破 300mW 高功率光源门坎
天孚通信 (FAU/ELS引擎)	**>60.0%**	单台 CPO ≥ $7,000，警惕 Q3 经营现金流 −37% 预警
新易盛 (40% 谷歌 NPO)	**~48.5%**	斩获谷歌 480 万只 3.2T NPO，盈利弹性显著
中际旭创 (60% 谷歌 NPO)	**~43.8%**	斩获谷歌 720 万只 3.2T NPO，长约锁料 274 亿元
太辰光 (MMC/Shuffle)	**~39.2%**	US Conec 授权 + 北美柔性光学背板放量
光迅科技 (OCS/华为NPO)	**25.5%**	传统模块毛利承压，依托 OCS + 华为 NPO 突围

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

模块龙头依靠规模交付与自研硅光芯片提升盈利能力。中际旭创前三季度营收 695.47 亿元、归母净利 222.38 亿元，毛利率提升 5.65 个百分点至 46.39%（Q3 单季 46.6%）；自研硅光出货占比由 50% 迈向 2028 年预期的 86%，逐步内化原属海外 EML 芯片厂的毛利，274.0 亿元存货与预付款对应排至 2027–2028 年的云厂订单。新易盛前三季度营收 318.50 亿元、归母净利 113.72 亿元，毛利率保持在 39.3% 以上，125.25 亿元备货支撑北美客户 1.6T 与 LPO 放量及 2027 年 NPO 批量交付。

上游光源与耦合龙头在展现高毛利的同时，需分别关注产品代际水位与现金流质量。源杰科技凭 50–100 mW 连续波激光器在硅光模块规模商用，前三季度实现营收 16.09 亿元、归母净利 10.24 亿元，毛利率达 81.70%，但 200G EML 尚处客户验证期、300 mW 超高功率芯片仍在研发阶段。天孚通信依托 CPO 光纤阵列与外置光源组件量产，前三季度营收 47.51 亿元、归母净利 20.83 亿元，毛利率达 62.6%。但 Q3 单季经营现金流净额同比下降 37.4% 至 4.61 亿元（净现比 0.52），9 月末应收账款较年初增长 73.33% 至 19.45 亿元，需跟踪 Q4 下游代工链回款转化。光迅科技前三季度营收 116.83 亿元、归母净利 12.84 亿元，11 月开工 102 亿元扩产项目并发布 400×400 OCS 样机，但受传统组装业务影响毛利率约 26.8%，且 130.86 亿元备货使前三季度经营现金流录得 -18.81 亿元。

表 8：全球及中国光互连核心上市公司 2026 最新法定财报实绩、战略锁料规模与技术卡位全景对标表

上市公司标的	2026 前三季度营收 (YoY)	2026 前三季度归母净利 (YoY)	实证毛利率 / 净利率	战略锁料规模 (存货+预付款)	核心技术卡位、CPO/NPO/OCS 进展与关键财务风险提示
中际旭创 (300308.SZ)	**695.47 亿元** (+178.13%)	**222.38 亿元** (+211.81%)	毛利率 **46.39%** (Q3 **46.6%**) / 净利率 **32.0%**	**274.00 亿元**	**全球可插拔与硅光绝对霸主**：SiPh 占比迈向 86%；TeraHop 演示内置光源 NPO（2027H2 量产）；订单排至 2027–2028；缺口在于未入围 NVIDIA 首批 TSMC+SPIL 晶圆级 CPO 核心封测名单
新易盛 (300502.SZ)	**318.50 亿元** (+92.97%)	**113.72 亿元** (+79.74%)	毛利率 **~39.3%+** / 净利率 **35.7%**	**125.25 亿元**	**海外 CSP 与 LPO 弹性先锋**：深度绑定 Meta/Amazon；年产能 2,836 万只；1.6T 与 800G LPO 加速放量；NPO 锁定 2027 批量交付、2028 放量
天孚通信 (300394.SZ)	**47.51 亿元** (+21.25%)	**20.83 亿元** (+42.18%)	毛利率 **62.60%** / 净利率 **43.8%**	**13.66 亿元** (存货+178.7%)	**CPO/NPO 精密耦合最大赢家**：切入 NVIDIA CPO 供应链（FAU/ELS/子组件量产，单台价值 **≥$7,000**）；**风险**：26Q3 经营现金流降 37.4%，应收账款激增 73.33%
光迅科技 (002281.SZ)	**116.83 亿元** (+36.94%)	**12.84 亿元** (+78.65%)	毛利率 **26.83%** (26Q1) / 净利率 **11.0%**	**130.86 亿元** (预付+818.7%)	**国产算力内循环与全栈老兵**：11月开工 **102 亿元** 扩产项目（新增 1,200 万只 800G+）；发布 400×400 MEMS OCS；**风险**：毛利率偏低，备货致 9M26 经营现金流 -18.81 亿元
源杰科技 (688498.SH)	**16.09 亿元** (+319.83% YoY)	**10.24 亿元** (+866.88% YoY)	9M26 综合毛利率 **81.70%**	加速扩充 InP 外延与芯片产线（Q3 大额转固折旧）	**国产数据中心 CW 光源领头羊**：50–100mW CW 芯片大规模商用并契合内置光源 NPO；100G EML 量产；**缺口**：200G EML 尚处客户验证期，300mW UHP 处研发验证阶段
Coherent (COHR.US)	FY26 全年 **$71.2 亿美元** (Q4 **$20.5 亿**, +34%)	FY26 GAAP **$8.05 亿** (Non-GAAP EPS +59%)	Non-GAAP 毛利率 **40.2%** / 营业利润率 **21.8%**	Q4 CapEx 翻倍至 **$5.56 亿**；预付 AXT 锁衬底	**6 英寸 InP 晶圆产能霸主**：得州与瑞典 6 英寸 InP 产能在 26Q3 提前翻倍且良率超越 3 英寸；PhotonLink 斩获 >10 个 CPO/NPO 项目，UHP 激光器 26Q4 贡献 CPO 收入
Lumentum (LITE.US → Marvell)	**FY27Q1 单季 $12.6 亿** (+136.5% YoY)；Q2 指引 **$15.75–16.25 亿**	**FY27Q1 Non-GAAP EPS $4.57**（Q2 指引 $5.90–6.20）	Non-GAAP 毛利率 **53.2%** / 营业利润率 **42.3%**	6 英寸 InP 产能锁至 2029 年，扩建日本与美国产线	**200G EML 咽喉与 OCS 霸主**：R300 OCS 与 UHP 激光器爆发；**2026年11月2日正式签署 $1,150 亿美元 EV 全股票合并协议（1:4.500 换股）**

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

5.4 国产供应链证据分级与五项边界风险

评估 2027–2030 年国产供应链九大细分环节时，须把已兑现财报收入的量产环节、送样验证品种与早期研发储备逐级区分。

表 9：2027—2030 年光互连九大细分环节国产替代可行性、时间窗口与证据强度分级矩阵

细分赛道环节	海外垄断/标杆巨头	国产核心代表企业	技术代差与国产突破真实水位评估	商业化放量时间窗口	当前证据强度评级（严格区分阶段）
1. 800G / 1.6T 硅光可插拔模块	Coherent、Lumentum (CloudLight)	**中际旭创、新易盛**、光迅科技	**全球统治级领先**：旭创 SiPh 占比向 86% 跃升，1.6T 良率与交付规模居全球第一梯队	**2026–2030 现金牛主航道**（订单排至 2028）	**★★★★★ 大规模量产与财报兑现**（旭创 9M26 营收 695 亿、净利 222 亿）

细分赛道环节	海外垄断/标杆巨头	国产核心代表企业	技术代差与国产突破真实水位评估	商业化放量时间窗口	当前证据强度评级（严格区分阶段）
2. FAU、保偏耦合、微光学与 ELS 封装	Corning、SENKO、Coherent	**天孚通信**、腾景科技、炬光科技、太辰光	**国际第一梯队**：天孚通信已切入 NVIDIA CPO 供应链负责 FAU/ELS 与激光子组件封装	**2027–2030 核心增量期**（单系统价值 **≥$7,000**）	★★★★☆ **小批量向规模量产过渡**（天孚 9M26 毛利率 62.6%，H1 无源增 77.4%）
3. 内置光源 NPO 光引擎 (Built-In Laser)	Marvell、Broadcom (VCSEL NPO)	**华为 (Hi-ONE 7.2T)、中际旭创 (TeraHop)、新易盛**	**架构同步乃至局部领先**：省去 3dB 外部插损与百倍保偏光纤，完美契合国产超节点与 CSP 解耦诉求	**2027H2–2030 爆发窗口**（Atlas 960E 2027Q2/Q3 交付；旭创/新易盛 2027–2028 放量）	★★★☆☆ **系统发布与展会实测演示 (ECOC Demo)**，2027 年转化为规模商业收入
4. 50–100 mW 中功率 CW 激光器芯片	Lumentum、Coherent	**源杰科技**、仕佳光子、光迅科技	**已攻克硅光与内置 NPO 甜点区**：源杰 50–100mW CW 在 400G/800G/1.6T 硅光及内置 NPO 中规模商用	**2025–2028 黄金替代期**（受益于硅光渗透率升至 >65%）	★★★★☆ **大规模量产兑现**（源杰 9M26 法定营收 **16.09 亿元** +319.8%，归母净利 **10.24 亿元**，毛利率 **81.70%**）
5. 100G / 200G PAM4 EML 光芯片	Lumentum、Broadcom、住友电工、三菱电机	**源杰科技**、光迅科技、长光华芯	**100G 量产追赶，200G 存在 1.5–2 年代差**：海外 200G EML 已占 EML 收入 >25%，国产刚跨过 100G 量产且系统验证需 1–2 年	**100G：2026–2027；200G：2027–2029**	★★★☆☆ **100G 批量供货；200G 处于客户送样验证阶段**
6. OCS 全光交换整机与微纳光学元件	Google (Celestica)、Lumentum、Polatis	**光迅科技、华为**、德科立 (iPhotonics 代工)、腾景科技	**元件出海 + 整机内循环**：德科立代工硅光波导模块参与谷歌下一代 OCS；光迅发 400×400 样机；高端 MEMS 微镜良率仍受限	**2026–2028 放量期**（谷歌 2027 需求上修至 5 万台）	★★★☆☆ **海外链：微光学元件/波导模组供货；国内链：样机发布与超节点导入**
7. 300–400 mW 超高功率 UHP 激光器芯片	**Lumentum、Coherent**	源杰科技 (300mW 研发披露)	**芯片端海外绝对垄断**：CPO 外置 ELSFP 要求的 25–26 dBm 超高功率与极低 FIT 失效率目前仅美日龙头可量产	**国产芯片突破需待 2028–2030+**	★☆☆☆☆ **国产芯片仅处招股书研发披露阶段，尚无海外商业批量出货记录**
8. CPO 晶圆级 3D 封测与硅光 Foundry	**TSMC (COUPE)、SPIL (矽品)**、ASE、Intel	本土晶圆厂与 OSAT 封测厂	**受制于台系先进封装生态闭环**：NVIDIA/Broadcom 将 CPO 晶圆级封测直接锁定在 TSMC SoIC + SPIL，大陆模块厂在纯 CPO 晶圆封测中被绕开	**海外闭环扩产 15 倍**；国内围绕板载 NPO 与本土超节点破局	★★☆☆☆ **结构性壁垒**：倒逼大陆龙头全力主攻 NPO、ELSFP 与可插拔高阶演进
9. 6 英寸高品质磷化铟 (InP) 衬底	Sumitomo、JX Nippon、**AXT (北京通美/金美)**	AXT 在华基地、本土独立衬底商	**特殊地缘双刃剑**：AXT 核心精炼铟与衬底产能位于中国（国内采购免出口许可，占其营收 >50%），但跨国发货受出口许可证审批节奏制约	**2026–2028 满载扩产**（AXT 产能连翻数倍）	★★★★☆ **AXT 在华产能大规模量产（26Q2 毛利率 45%），纯本土新锐仍在提升 6 英寸良率**

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

五项关键假设反证与下行风险边界

技术选型与产业跟踪还需纳入五项边界风险：其一，随着 102.4T/204.8T 高基数交换机与多平面扁平拓扑在 2027–2028 年普及，光模块占数据中心总资本开支比重预计从约 5% 回落至 2029–2030 年的 3.5%–4.0%，若下游进入投资消化期则存在周期回调压力；其二，400G PAM6 将 2 米柜内铜缆带宽推升至 2.08 Pbps，云厂倾向“柜内铜缆加柜间少量光纤”混合组网，可能放缓全光解耦斜率。

其三，若内置光源 NPO 在 2027–2028 年验证长期可靠性，非英伟达生态将压缩对 ELSFP、300–400 mW 激光器及保偏光纤的需求；其四，三维 CPO 光引擎转向“台积电键合加矽品精密晶圆封测”闭环，缺

乏硅光设计、NPO 引擎或微耦合工艺的纯组装环节在 2029 年后面临份额稀释；其五，四大龙头 542.9 亿元备货叠加部分企业应收账款高增，在 800G 向 1.6T 及 LRO/NPO 迭代窗口期需严密审计库龄与回款质量。

CHAPTER 06 · MARVELL × LUMENTUM $115B ALL-STOCK MERGER

06 光电垂直整合案例拆解：Marvell 1,150 亿美元全股票并购 Lumentum

6.1 2026 年 11 月 2 日正式协议条款与全股票换股机制

美西时间 2026 年 11 月 2 日，定制 ASIC 与光通信 DSP 厂商 Marvell Technology 与磷化铟有源光芯片及全光交换龙头 Lumentum Holdings 正式签署最终合并协议，成为半导体行业迄今规模最大的光电垂直整合交易。

EXHIBIT 13 Marvell 以 1,150 亿美元企业价值全股票正式并购 Lumentum 核心交易结构与战略闭环

正式并购企业价值 (EV)	100% 全股票换股比例	交割后股权结构与举债	Lumentum FY27Q1 实绩
$1,150 亿	1 : 4.500	67% : 33%	$12.60 亿
股权对价 $1,026 亿 (2026.11.02)	每股 LITE 换 4.5 股 MRVL (溢价 ~23.9%)	$0 零新增并购长债	+136.5% YoY · GM 53.2% · OPM 42.3%

① 买方 Marvell 战略底牌与定价反馈

锁定 6 吋 InP + 对冲去 DSP 化

保守信用纪律：账面现金约 **$40 亿**，放弃举债全换股保住投资级评级与 2nm 定制芯片研发流片预算。

光电物理闭环：拿下稀缺 **6 英寸 InP 晶圆 + OCS**，彻底对冲 CPO 时代“去独立 PAM4 DSP 化”商业威胁。

市场定价脉冲：传闻期两日回撤 **~22%** 消化摊薄忧虑后，正式条款凭零举债与高毛利实绩确立长线估值锚。

② 标的 Lumentum 稀缺壁垒与交割路径

EPS $4.57 · Q2 指引 $15.75–16.25亿

产能锁死稀缺性：200G EML 与 UHP CW 激光器产能已提前锁死至 **2028–2029 年**，毛利率跃升至 **53.2%**。

全光交换卡位：Google 3D-MEMS OCS 阵列主力供应商，直接补齐 AI 集群无阻塞光路核心拼图。

跨国审查窗口：预计 **2028H1** 跨越美欧及中国 SAMR 反垄断审查完成正式交割。

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

根据正式协议，交易总企业价值为 1,150 亿美元（股权对价约 1,026 亿美元），采用 100% 全股票换股：每 1 股 Lumentum 普通股固定换取 4.500 股新发行的 Marvell 普通股，较未受传闻影响基准价溢价约 23.9%。交割后原 Marvell 与原 Lumentum 股东分别持股约 67% 与 33%，预计在获各国监管批准后于 2028 年上半年完成交割。

选择纯股票而非现金举债，源于资产负债表杠杆约束：若配比巨额并购贷款，合并主体净杠杆率将突破 3.5–4.0 倍 EBITDA 投资级红线，每年数十亿美元利息将侵蚀研发预算。零新增并购债务保留了健康现金流，得以支撑美日 6 英寸磷化铟晶圆厂持续扩产。

EXHIBIT 14 **1,150 亿美元企业价值换股比例分配与 Lumentum Q1 FY27 法定业绩核验**

正式协议财务铁律：$0 零新增并购长债 — 彻底推翻“$150亿–$175亿高息过桥贷”市场传闻，保留合并后全部经营现金流用于 2nm XPU 与 6 英寸磷化铟扩产。

$1,026 亿股权对价 ($1,150 亿 EV) 全股票结构拆解与盈利/摊薄平衡矩阵 2026.11.02 终值口径校准

财务审视维度	官宣前市场悲观担忧（传闻期假设）	11.02 正式全股票协议定案与最新实绩
对价与融资结构	传闻以 $150–$175 亿高息债务支付部分现金，担忧侵蚀投资级信用评级与研发支出。	**100% 全股票换股（1:4.500 MRVL），零新增并购长债，交易后持股 67% : 33%。**
盈利支撑与 EPS 摊薄	市场一度计入 **10%–15%** 近期 EPS 显著摊薄，引发短线抛压。	**Lumentum Q1 GM 53.2% / OPM 42.3%，Q2 指引 $15.75–$16.25 亿（EPS $5.90–$6.20），年化净利破 $25 亿+ 迅速收敛摊薄。**
商业毛利率融合	担忧光器件 IDM 历史约 **~35%** 低毛利率拉低 Fabless 芯片 **~61%** 估值倍数。	**磷化铟晶圆短缺与 200G EML 涨价推动光芯片毛利率冲上 53%+ 平台，估值摩擦大幅收窄。**
中游模块客户关系	担忧 Lumentum 旗下 Cloud Light 与中际旭创、新易盛直接竞合引发调单。	**16–18 个月**过渡期内独立运行叠加中游大厂加速双供导入，博弈达成动态平衡。

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

签约同日 Lumentum 披露的 Q1 FY27（截至 2026 年 9 月末）法定财报印证了上游光芯片的盈利拐点：单季营收同比增长 136.5% 至 12.60 亿美元，Non-GAAP 毛利率升至 53.2%，营业利润率达 42.3%，稀释每股收益为 4.57 美元；Q2 FY27 营收指引进一步升至 15.75–16.25 亿美元（年化超 64 亿美元），Non-GAAP EPS 指引达 5.90–6.20 美元，6 英寸磷化铟激光器长单已排期锁至 2029 年。

表 10：2026 年 11 月 2 日 Marvell 正式并购 Lumentum 交易核心条款与 Q1/Q2 FY27 业绩对账矩阵

交易与财务核验维度	法定公告与实证读数（2026 年 11 月 2 日正式口径）	核心战略与财务工程含义解析
交易总估值与支付方式	企业价值 **$1,150 亿美元**（股权对价 **$1,026 亿美元**），**100% 全股票**	零新增并购杠杆，守护投资级资产负债表与后续晶圆厂资本开支弹性
固定换股比例与持股分配	**1 股 LITE = 4.500 股 MRVL**（未受影响溢价 ~23.9%）；持股 **67% : 33%**	Lumentum 股东让渡约三分之一新公司股权，深度绑定光电融合长期收益

交易与财务核验维度	法定公告与实证读数（2026 年 11 月 2 日正式口径）	核心战略与财务工程含义解析
Lumentum Q1 FY27 法定实绩	营收 **$12.60 亿 (+136.5% YoY)** Non-GAAP 毛利率 **53.2%** 营业利润率 **42.3%** EPS **$4.57**	200G EML、UHP CW 光源与 R300 OCS 三箭齐发，高固定折旧跨过拐点释放近 90% 边际营业利润
Lumentum Q2 FY27 官方指引	营收 **$15.75–$16.25 亿美元**（环比再增 ~27%） Non-GAAP EPS **$5.90–$6.20**	证实数据中心高端有源光芯片处于极度供不应求的卖方超级周期，支撑短期 EPS 增厚
预计交割窗口与分手费约束	**2028 年上半年（H1 2028）**；需跨越多国反垄断及中国 SAMR 深度审查	长达 16–18 个月过渡期内双方维持独立运营，监管行为性救济条款将重塑行业供货秩序

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

6.2 战略动因：对冲独立光 DSP 萎缩风险与补齐光电全栈闭环

轻资产芯片设计公司 Marvell 并入重资产化合物半导体 IDM 厂商 Lumentum，核心动因是对冲远期架构迁移风险。Marvell 虽占据全球 800G/1.6T 光 DSP 逾六成份额，但随着超短距直驱 CPO、中介层光学 OOI 与 LPO 渗透，独立重定时 DSP 单端口价值趋于收缩。继整合 Inphi、Innovium、XConn 与 Celestial AI 之后，纳入 Lumentum 使 Marvell 集齐了“定制 XPU、高速长距 SerDes、硅光内存织物、6 英寸磷化铟 200G EML 与 400mW 超高功率晶圆、以及 R300 全光交换机”完整拼图，具备向北美云厂交钥匙交付光互连超节点底座的能力。

EXHIBIT 15 **Marvell 光电全栈布局：整合电芯片、Celestial AI 光子织物与 Lumentum 磷化铟晶圆及 OCS**

Marvell 全栈光电互连三级跳战略演进图谱（2020—2026）

电域 PAM4 DSP → 光电封装芯粒 → 6 吋 InP 晶圆 + OCS 终局合围

Stage 1 · 电域奠基 (2020—2021)

并购 Inphi + Innovium

构筑 Spica / Nova / Ara PAM4 DSP 王牌矩阵，垄断 800G/1.6T 光模块 DSP **60%—65%** 市场份额。

补全 Teralynx 以太网交换芯片，切入大型云厂数据中心电域主干网。

Stage 2 · 架构卡位 (2025—2026)

整合 Celestial AI + XConn

囊括 Photonic Fabric 内存语义光互连芯粒（Optical Chiplet），直击 448G 封装铜墙。

补强 PCIe Gen6 / CXL / UALink 机柜内低延迟 Scale-Up 交换底座。

Stage 3 · 终局落槌 (2026.11.02)

$1,150 亿并购 Lumentum

掌握美/日/英 **6 英寸 InP 晶圆厂**、200G/400G EML、UHP CW 光源及 **R300 (300×300) MEMS OCS**。

正面迎战 Broadcom TH6-Bailly 与 NVIDIA NVLink CPO 闭环霸权。

终局版图逻辑：六年三次重磅外延完成“DSP 电处理 + 光芯粒互连 + 磷化铟激光光源 + 全光交换机”全栈闭环，确立半导体互连双寡头之一席。

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

6.3 供应链连锁反应：渠道竞合、优先股产能锁定与中国反垄断审查推演

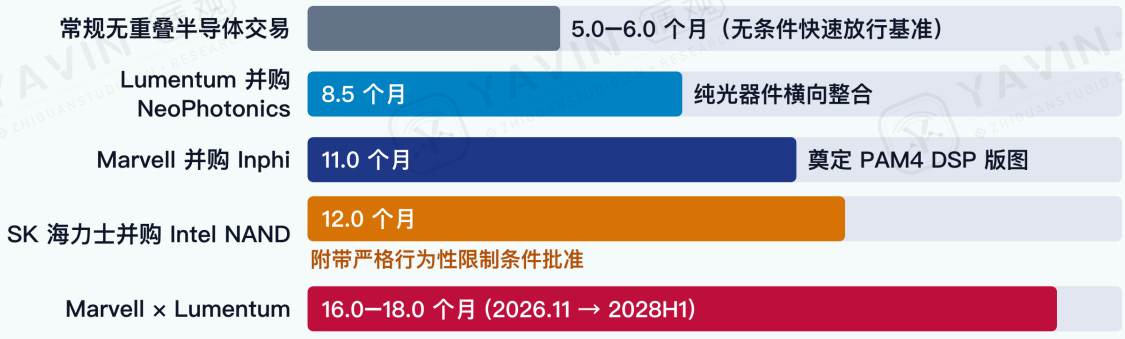
在未来约一年半的审查与整合期内，交易将在全球供应链引发三重连锁反应。其一是 Cloud Light 渠道冲突与模块厂分流：Lumentum 旗下拥有直供北美云厂的光模块商云晖科技（Cloud Light），如今核心 DSP 与 EML 供应商合二为一且自带模块业务，中际旭创、新易盛等独立模块龙头势必加速将增量 DSP 订单向博通分流并推进无 DSP 的 LPO/LRO，同时扩大自研硅光芯片配合源杰科技等国产连续波光源，并将海外高功率激光器二供份额向独立光子厂商 Coherent 倾斜。

其二是英伟达优先股锁产契约的再平衡。英伟达此前已向 Lumentum 注资 20 亿美元优先股并锁定多年期超高功率激光器排他配额以保障 CPO 交换机量产。当定制 ASIC 竞争对手 Marvell 接管 Lumentum 后，英伟达在严格行使既有契约提货权的同时，预计将把增量外置光源与微组装订单加速分散至 Coherent、Fabrinet 与天孚通信。

其三是中国市场监管总局 SAMR 的反垄断审查。双方在华营收超过申报门槛，且分别在高速 PAM4 光 DSP 与 200G EML 及高功率激光器两个相邻瓶颈市场握有较高份额。参照过往跨国半导体并购审查先例（Marvell 收购 Inphi、II-VI 收购 Finisar 附条件批准案及 Intel 收购 Tower 终止案），基准情景是历经 15–18 个月审查后附加行为性救济条件放行：要求合并主体按 FRAND 公平合理无歧视原则持续向中国企业供应高端 EML/CW 光芯片与光 DSP，禁止强制搭售或断供歧视，从而为国产硅光模块与本土 200G 光芯片完成验证预留 2 至 3 年窗口期。

EXHIBIT 16 **中国 SAMR 反垄断审查历史周期对标与行为性救济（FRAND 反搭售承诺）路径推演**

① 跨国半导体重大并购反垄断审查历时对比（月） Marvell × Lumentum 预计 16–18 个月



② 中国 SAMR 及美欧监管审查焦点与预计行为性救济条款 纵向“DSP + 激光源”捆绑防线

产业链高度耦合触发深审： Marvell PAM4 DSP（**>60%** 份额）× Lumentum 200G EML/CW 激光源 × 中国光模块厂占全球 Top 10 份额 **>60%**。

预计必须作出的三大行为性承诺： ① **FRAND 公平合理非歧视供货**，严禁借磷化铟紧缺对中国模块厂断供或差别定价；② **禁止强制搭售**（DSP + EML 捆绑）；③ 保持 Lumentum 光芯片对 **Broadcom / Credo 等第三方 DSP 的开放互操作性**。

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

EXHIBIT 17 **2026Q4—2028H1 全球光互连技术演进与 Marvell 并购 Lumentum 交割核验路标**

$1,150 亿协议签署后：2026Q4—2028H1 全球光电产业链四大跟踪路标

从并购落地到供应链重构的关键验证点

时间窗口	关键路标事件	核心观察指标与产业链实质影响
① 2026.11.02 已落槌验证	**$1,150 亿全股票协议定案**	1:4.500 换股与零新增举债落地；Lumentum Q1 营收 $12.60 亿、Non-GAAP 毛利率 53.2% 证实光芯片暴利周期。
② 2027Q1—Q2 产能与替代窗口	**Q2 指引兑现与 6 吋 InP 良率**	跟踪 Q2 指引（$15.75—$16.25 亿）完成度及 6 英寸 InP 扩产爬坡，直接决定 **源杰科技 / 长光华芯 / 仕佳光子** 替代窗口大小。
③ 2026Q4—2027 中游平衡术	**双供 DSP 导入与备货消化**	跟踪中际旭创、新易盛加速导入 **Broadcom / Credo 第二供货商 DSP**、合计 **543 亿元** 锁料消化及 Cloud Light 竞争边界。
④ 2027—2028H1 终审交割大考	**美欧与 SAMR 反垄断终审**	跟踪美国 FTC/DOJ、欧盟及中国市场监管总局对 **FRAND 非歧视供货与互操作性承诺** 的终审条件与交割节奏。

数据来源与核验口径：上市公司法定财报披露、国际通用行业统计与公开技术文献整理（2026.11）。

STATUTORY FILINGS × SYSTEM ARCHITECTURE × SUPPLY CHAIN VERIFICATION

研究方法论、数据核验口径与核心产业判断

O1 · 光功率链路预算与复合良率硬约束（OPTICAL LINK BUDGET & YIELD MATH）

严格按分贝（dB）耦合瀑布核算激光器功率与保偏光纤成本，按乘积良率方程核算多引擎共封装报废成本与现场 MTTR 运维代价。

O2 · 2026年11月2日并购协议与法定财报精准校准（OFFICIAL MERGER & Q3 FILINGS）

全量对齐 2026 年 11 月 2 日 Marvell 与 Lumentum 正式签署的 $1,150 亿美元 EV 全股票合并协议、Q1 FY27 财报实绩及 A 股光通信龙头三季报法定披露。

O3 · 双权威机构统计口径交叉核对（LIGHTCOUNTING × YOLE ALIGNMENT）

清晰辨析“高通道光引擎颗数（Units）”与“800G/1.6T 等效逻辑端口数（Ports）”的换算关系，消除市场对可插拔模块生命周期的算术误读。

O4 · 证据分级与非商业公开交流原则（EVIDENCE TIERING & OPEN RESEARCH）

严格区分“规模商业兑现”、“展会样机演示”与“早期研发披露”三级证据强度，仅供产业与学术研究免费交流。

非商业免费分享与免责声明：本报告由「Yavin 质观」基于公开技术文献、学术顶会论文、国际通用行业统计及上市公司法定披露文件独立整理，仅作个人公开研究免费交流分享，非商业用途。报告内容在任何情况下均不构成任何证券投资建议、个股评级、目标价预测或商业采购依据，读者应当独立判断并自行承担风险。