

光模块：时代的跨越，从云计算迈向 AI

华泰研究

2024 年 2 月 19 日 | 中国内地

专题研究

时代的跨越：云计算带来的“白银时代”，AI 孕育的“黄金时代”

云厂商在 2010s 逐步成为以太网光模块市场最重要的客户群体，为产业带来了诸多深远的影响：1) 更广阔的市场需求；2) 更快的迭代演进节奏；3) 行业竞争格局的重塑，国产厂商跟随优质客户快速崛起。随着 ChatGPT 以及 AIGC 拉开 AI 时代新序幕，光模块产业有望再一次迎来波澜壮阔的发展。我们判断产业将会发生如下积极变化：1) 市场空间的进一步扩张；2) 迭代周期有望由此前的 3~4 年缩短至 2 年左右；3) 竞争格局方面，在迭代周期缩短、技术门槛提高背景下，预计头部厂商市场地位保持稳固。建议关注：中际旭创、天孚通信、华工科技、太辰光。

云厂商自 2010s 发展为光模块行业最重要的客户群体

云厂商在过去十余年间逐步超过了电信、企业客户，成为光模块市场最大的客户群体，根据 LightCounting，2022 年云厂商在全球以太网光模块市场销售额中的贡献已达 67%。在云厂商需求的带动下，全球光模块出货金额从 2010 年的 7 亿美元增长至 2022 年的 51 亿美元，对应期间的 CAGR 达 18%。另一方面，相比于电信、企业客户，云厂商对于光模块的需求以更高的速率、更短的迭代周期为特征，2022 年全球 200G 及以上速率光模块的需求中，谷歌、亚马逊、Meta 三家厂商的份额合计占比超 85%。其中谷歌在过去十余年中保持着 3~4 年一代的升级周期，引领着高速光模块的迭代。

云数据中心带来更庞大的东西向流量，催生光模块需求提升

我们认为云厂商对光模块的需求特征，背后指向其数据中心的流量特点。由于分布式计算、虚拟化等技术的引入，云数据中心比传统数据中心具有更高的东西向流量。在移动互联网兴起以及企业上云的时代背景下，2010s 全球数据中心东西向流量经历迅速增长，根据思科统计，2010 年至 2016 年全球数据中心东西向流量由 887PB 增长至 5143PB，对全球数据中心总流量增量贡献达 75%。相应地，云厂商快节奏地推动数据中心内部带宽的提升，例如引入更高速的服务器网卡、交换机、光模块等；同时，云数据中心内部网络架构由传统三层架构转向叶脊架构，带来光模块需求量的进一步提升。

未来展望：AI 或开启光模块产业的“黄金时代”

展望 AI 时代光模块产业的发展，我们认为与云计算时代的相似点为：更大的东西向流量有望带来高速率光模块需求的释放。AI 训练网络中 GPU 间通信流量的显著增长背景下，高速光模块市场规模有望再上新台阶；而不同点包括：1) AI 时代，高速光模块被大量部署在训练网络，由于训练网络不与用户侧发生直接连接，带宽由端侧的工作负载、时延要求等因素决定，因此光模块的上量节奏更快；迭代周期方面，随着英伟达 GPU 产品迭代周期的缩短，光模块速率升级周期预计提速。2) 竞争格局方面，在 AI 数据中心中，随着光模块的可靠性要求提高、迭代周期缩短，头部厂商市场地位预计稳固。

投资建议

复盘过去 10 余年，移动互联网的兴起叠加云计算的快速发展为光模块产业注入了长久的发展动力；展望未来，我们认为 AI 将开启光模块产业的新一轮成长周期，有望长期为产业带来积极变化。我们看好切入海外头部云厂商供应链的光通信厂商发展机遇，建议关注：【光模块】中际旭创、华工科技；【光引擎&光器件】天孚通信、【MPO】太辰光。

风险提示：全球 AI 算力侧投入不及预期，光模块行业竞争加剧。

通信

通信设备制造

增持 (维持)

增持 (维持)

研究员

SAC No. S0570523070003
SFC No. BUC499

王兴

wangxing@htsc.com
+(86) 21 3847 6737

研究员

SAC No. S0570523080006

高名彦

gaomingyao@htsc.com
+(86) 21 2897 2228

联系人

SAC No. S0570122080148

王珂

wangke020520@htsc.com
+(86) 21 2897 2228

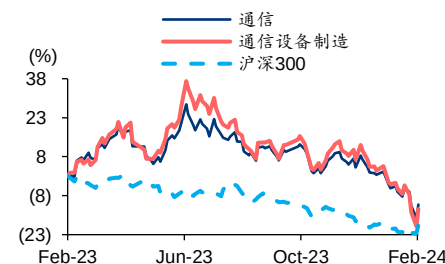
联系人

SAC No. S0570123070042

陈越兮

chenyuexi@htsc.com
+(86) 21 2897 2228

行业走势图



资料来源：华泰研究

重点推荐

股票名称	股票代码	目标价 (当地币种)	投资评级
中际旭创	300308 CH	177.76	买入
天孚通信	300394 CH	123.12	买入
华工科技	000988 CH	34.77	买入
太辰光	300570 CH	36.79	增持

资料来源：华泰研究预测

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

正文目录

核心观点	4
与市场不同的观点	5
光模块历史启示：云计算带来“白银时代”	6
2010s 云厂商逐步成为以太网光模块市场最重要的客户群体	6
“移动互联网兴起+企业上云趋势”是云厂商过去需求增长的核心驱动力	7
云计算的发展加速了数据中心流量（尤其是东西向）的攀升	9
“网络架构升级+端口带宽提速”是解决数据中心流量瓶颈的唯二法门	11
“多重优势+产业转移”使得过去十余年国内光模块厂商快速崛起	15
光模块未来展望：AI 有望开启“黄金时代”	16
缩放定律指引下，AI 训练侧投入或仍将保持提升	16
AI 时代数据拥有更庞大的东西向流量，更严格的低时延要求	18
端口吞吐量提升+胖树网络架构，高速率光模块需求快速增长	19
AI 时代光模块迭代周期缩短，1.6T 有望于 2024 年导入	22
竞争格局展望：头部厂商市场地位预计稳固	24
重点推荐公司	25
风险提示	26

图表目录

图表 1：全球以太网光模块出货金额及同比增速	6
图表 2：全球 100G 及以上以太网光模块出货金额及同比增速	6
图表 3：2016 年光模块下游市场结构（按金额）	6
图表 4：2022 年光模块下游市场结构（按金额）	6
图表 5：云厂商对各种速率光模块的需求结构（按金额）	7
图表 6：电信运营商对各种速率光模块的需求结构（按金额）	7
图表 7：企业客户对各种速率光模块的需求结构（按金额）	7
图表 8：2010~2019 年全球年下载量 top10 移动 App（不含游戏）	8
图表 9：2023 年全球社交平台用户喜爱度排名	8
图表 10：2010s 全球数据中心流量经历迅速增长	8
图表 11：2010s 企业上云是明确的产业趋势	9
图表 12：东西向、南北向流量在网络拓扑图	9
图表 13：云数据中心内部的带宽需求约 DCI 需求的 30 倍以上	10
图表 24：博通的交换机 ASIC 芯片速率保持两年一代的升级周期	13
图表 25：谷歌在数据中心内部所使用光模块速率的升级历程	13
图表 26：2016 年全球 100G 光模块需求迎来释放（单位：百万美元）	14
图表 29：全球前十大光模块供应商变动情况（2010-2022）	15
图表 30：2021-2022 年各厂商在细分光模块市场上份额	15
图表 31：中国厂商在光组件和光模块市场上份额	15

图表 32: AI 大模型参数规模持续快速提升 (单位: 亿)	16
图表 33: 多模态大模型尚处于发展初期阶段	17
图表 34: 微软 Azure 及其他云服务的收入中, AI 服务贡献的收入呈现快速增长趋势	17
图表 35: 2024 年 2 月 OpenAI 发布最新的文生视频模型 Sora	18
图表 36: 模型效率与计算节点数之间关系	19
图表 37: 端到端时延构成情况	19
图表 38: 英伟达 GPU 服务器搭载的网卡速率持续升级	19
图表 39: 传统三层网络架构的带宽逐层收敛	20
图表 40: Fat-Tree 架构	20
图表 41: 英伟达 InfiniBand 网络架构组成	20
图表 42: TPU v4 4×3 方式 6 个面的链接形式	21
图表 43: GH200 内存容量大幅提升	21
图表 44: 巨型内存 AI 工作负载下 GH200 性能表现突出	21
图表 45: GH200 网络架构	22
图表 46: GH200 光模块需求测算	22
图表 47: 数据中心前端网络与后端网络的对比	23
图表 48: 英伟达产品迭代路线图	23
图表 49: 重点推荐公司一览表	25
图表 50: 重点推荐公司最新观点	25

核心观点

2010s 在移动互联网兴起以及企业上云等时代背景下，云厂商逐步超越电信、企业客户，成为全球光模块市场最为主要的需求方，为光模块产业带来了诸多深远的变化。我们在本篇报告中梳理了过往十余年里云计算的快速发展为光模块产业带来的变化、分析了其背后的原因，并对 AI 时代光模块产业的发展做出展望（如无特殊说明，本报告中提及的“光模块”均指以太网光模块，区别于用在长距离传输的相干光模块等品类）。我们认为：

云厂商对光模块的需求特征，背后指向其数据中心的流量特点。由于分布式计算、虚拟化等技术的引入，云数据中心比传统数据中心具有更高的东西向流量。在移动互联网的快速发展叠加企业上云的驱动下，全球数据中心东西向流量经历了迅速增长。相比于传统数据中心，云厂商更快节奏地推动数据中心内部带宽的提升，通过：1）引入更高速率的服务器网卡、交换机、光模块等，标志性事件为云数据中心于 2015~2016 年开启了 100G 以太网的部署；2）数据中心内部的网络架构由传统三层架构转向叶脊架构，带来光模块需求量的进一步提升。2022 年全球 200G 及以上速率光模块的需求中，谷歌、亚马逊、Meta 三家厂商的份额合计占比超 85%。另一方面，国产光模块厂商凭借自身的成本优势、研发能力、交付能力以及满足客户要求的快速响应能力，逐步切入到全球头部云厂商的供应链体系，跟随着优质客户在全球光模块市场中的地位取得大幅提升。

展望 AI 时代光模块产业的发展，我们认为会与云计算时代有如下相似点以及不同点：

相似点：更大的东西向流量带来高速率光模块需求的释放。缩放定律（Scaling Law）的指引下，AI 大模型的参数量持续攀升，带来了 AI 训练网络中 GPU 间通信（例如 All Reduce 等）流量的显著增长。同时基于对 GPU 利用率的追求，卡间通信的时延性要求也有进一步提升。云厂商通过如下方式提升 GPU 集群节点间的通信带宽：1）提升端口吞吐量，如英伟达在 DGX H100 服务器中采用了 CX-7 网卡，速率达到了 400G，较此前云厂商的通用服务器所主流使用的 50G、100G 网卡有较大升级，并配套引入了 800G 端口交换机、800G 光模块等；2）优化组网架构，如英伟达的 AI 训练网络采用了胖树架构，相较于叶脊架构有更小了阻塞比，根据我们正文中的测算，该架构下 800G 光模块的需求量与 H100 的规模呈线性相关。

不同点：1）高速率光模块的迭代周期和上量节奏背后的驱动力发生变化。云计算时代，光模块在数据中心内部主要部署于前端网络中，前端网络所需要的带宽很大程度上由用户侧的需求决定，因此光模块的部署规模也视用户端使用情况渐进式上量；而 AI 时代，大量的高速光模块被部署在训练网络中，由于训练网络属于后端网络，其不与用户侧发生直接连接，带宽由端侧的工作负载、时延要求等因素决定，因此光模块的上量节奏更快；迭代周期方面，随着英伟达 GPU 产品（2024 年的 B100；2025 年的 X100）迭代周期的缩短，光模块速率升级周期预计提速，例如从 800G 迈向 1.6T 仅历时 2 年，扭转了此前云计算时代升级周期放慢的趋势。

2）竞争格局方面，预计头部厂商市场地位保持稳固。我们认为在 AI 数据中心中，随着光模块的可靠性要求提高、迭代周期缩短，带来行业技术门槛有望显著提升，光模块龙头厂商产品的高度可靠性、领先的研发实力及交付能力等优势有望在 AI 时代进一步凸显，我们预计头部厂商市场地位保持稳固。

与市场不同的观点

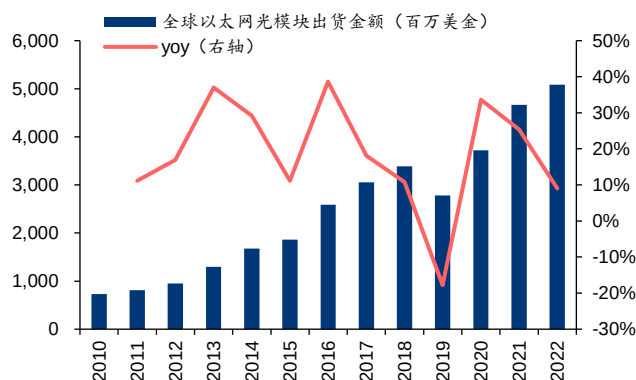
- 1) 市场担忧 AI 网络对于光模块的需求或于 2024 年见顶。我们认为：①AI 大模型的迭代仍在快速迈进，其中如多模态大模型尚处于发展早期阶段，**在缩放定律的指引下，各厂商对于大模型训练的投入强度仍有望保持提升**。此外，随着 AI 大模型的不断发展，“对齐”（Alignment）等领域亦有望产生额外的算力需求；②**AI 商用进展正在持续推进，逐步使 AI 产业形成闭环**。我们认为未来 AI 推理侧需求的释放，尤其是随着多模态大模型的推进，图片生成、视频生成等应用的不断发展或对于 AI 推理网络吞吐量、通信带宽等要求进一步提升，有望带来高速光模块需求的充分释放。③随着 AI 应用的不断涌现，云计算侧基础设施有望释放持续的升级需求，以支持更大规模，更高性能的计算场景。**当前 800G 光模块主要用于 AI 训练网络中，我们认为云计算侧对于 800G 光模块的需求也将随着 AI 应用的发展而提升。**
- 2) 市场担忧光模块市场竞争格局恶化。**我们认为在 AI 时代，高速光模块行业的门槛或进一步提高，预计头部厂商市场地位保持稳固**。AI 大模型训练周期长、中断次数多，如何降低平均无故障时间是大模型训练中面临的最大挑战之一。从网络设备硬件的角度来看，光模块的可靠性尤为关键，因为光模块作为 AI 训练网络中最易出现的故障点，很大程度上决定着大模型训练效率的高低。我们认为在 AI 数据中心中，随着光模块的可靠性要求提高、迭代周期缩短，光模块龙头厂商产品的高度可靠性、领先的研发实力及交付能力等优势有望进一步凸显，我们预计头部厂商市场地位保持稳固。

光模块历史启示：云计算带来“白银时代”

2010s 云厂商逐步成为以太网光模块市场最重要的客户群体

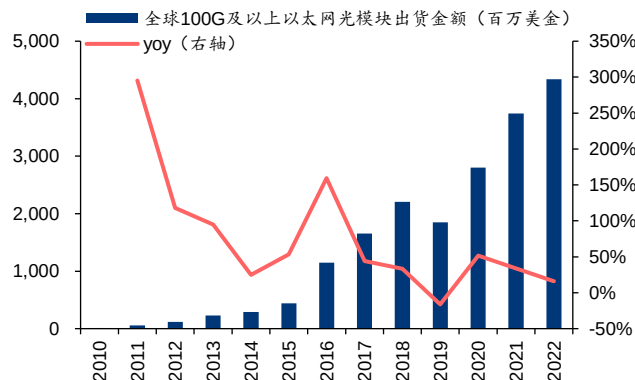
以太网光模块市场在过去十几年里经历了快速扩张。根据 LightCounting 的统计，全球以太网光模块出货金额从 2010 年的 7.29 亿美元增长至 2022 年的 50.82 亿美元，对应期间的 CAGR 为 18%；其中高速率产品贡献了绝大部分的增量，全球 100G 及以上速率的光模块出货金额由 2010 年的 0.14 亿美元攀升至 2022 年的 43.39 亿美元，对应期间 CAGR 为 62%，高速光模块市场规模持续扩张的背后是云厂商需求的推动。

图表1：全球以太网光模块出货金额及同比增速



资料来源：LightCounting，华泰研究

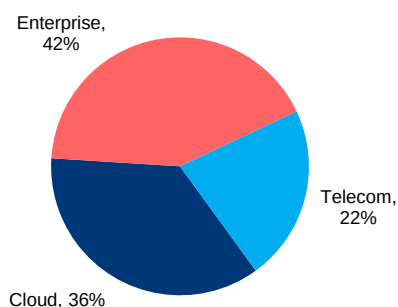
图表2：全球 100G 及以上以太网光模块出货金额及同比增速



资料来源：LightCounting，华泰研究

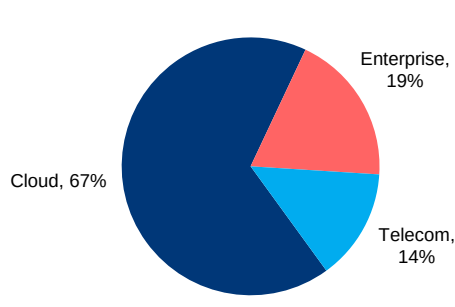
光模块行业下游客户结构的变迁：从企业主导转向云厂商主导。2007 年前后，谷歌在其数据中心内开始部署 10G 光模块，拉开了云厂商对光模块采购需求的序幕，彼时光模块最大的下游市场为企业数据中心（即传统数据中心）。根据 LightCounting 于 2023 年 7 月发布的《Mega Data Center Optics》中的数据，2016 年全球以太网光模块的销售中，企业客户贡献了 42% 的份额，仍位居第一位，其次分别为云厂商、电信运营商，分别贡献了 36%、22% 的份额。2022 年，云厂商在全球光模块市场的销售额中占比攀升至 67%，超越了企业与电信领域，成为光模块下游第一大客户群体。

图表3：2016 年光模块下游市场结构（按金额）



资料来源：LightCounting: Mega Data Center Optics，华泰研究

图表4：2022 年光模块下游市场结构（按金额）

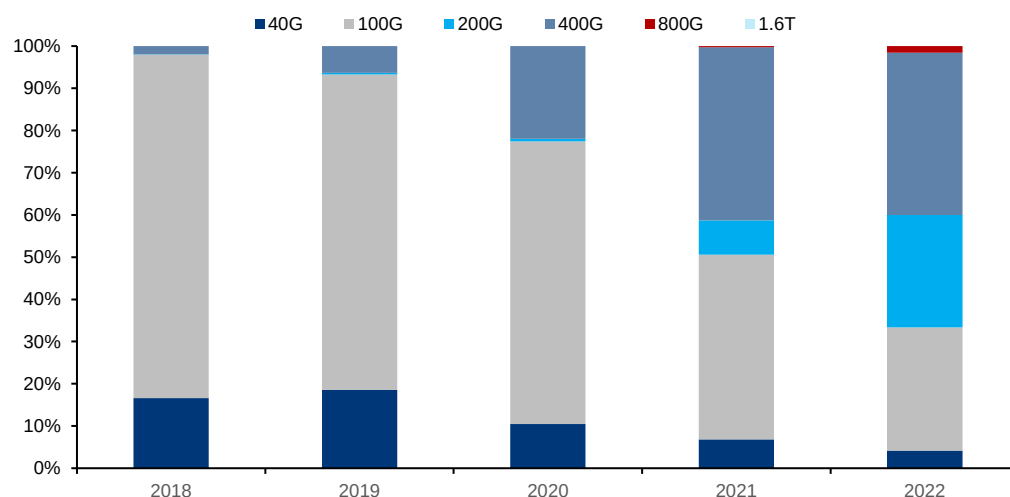


资料来源：LightCounting: Mega Data Center Optics，华泰研究

云厂商需求特征：更高的速率、更短的迭代周期。相比于企业、电信市场客户，云厂商除了对光模块需求量更大以外，其数据中心中通常采用了更高速率的光模块，且升级迭代的周期更短。根据 LightCounting 的统计，2016 年云厂商在数据中心内部开始批量部署 100G 光模块，2018 年 100G 光模块占云厂商需求金额的比重已达 81%。2018~2019 年以谷歌、亚马逊为首的云厂商开始在数据中心内导入 400G 光模块，2022 年云厂商数据中心内 200G、400G 光模块已成为主流，合计占其当年需求金额的比重为 67%。另一方面，2022 年全球 200G 及以上速率光模块的需求中，谷歌、亚马逊、Meta 三家厂商的份额合计占比超 85%

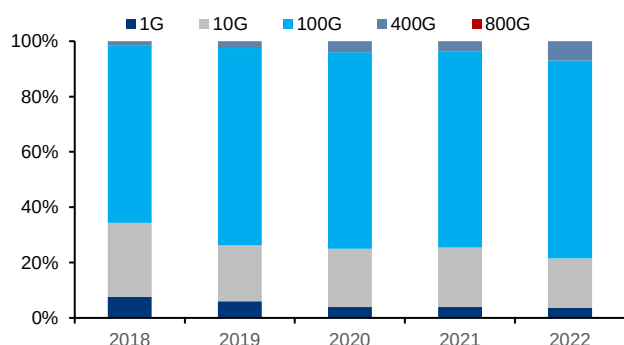
电信市场方面，2018 年已主要采用 100G 光模块，占其当年需求金额的比重约 64%；2022 年仍主要采用 100G 速率，占其当年需求金额的比重为 71%。企业客户方面，2018 年主要使用 10G 光模块，占其当年需求金额的比重为 42%，同期已开始少量部署 100G 光模块；至 2022 年企业数据中心内 100G 光模块的需求占比 40%，成为主流，更高速率的产品仍未批量部署。

图表5：云厂商对各种速率光模块的需求结构（按金额）



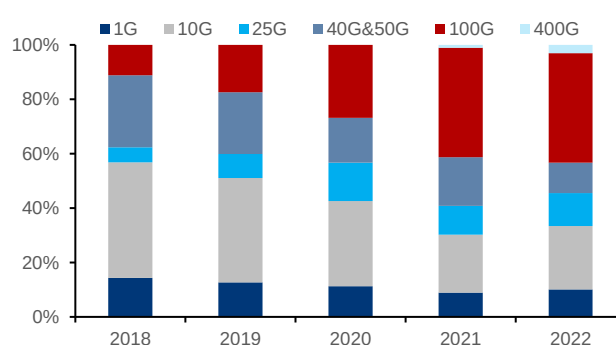
资料来源：LightCounting: High-Speed Ethernet Optics, 华泰研究

图表6：电信运营商对各种速率光模块的需求结构（按金额）



资料来源：LightCounting: High-Speed Ethernet Optics, 华泰研究

图表7：企业客户对各种速率光模块的需求结构（按金额）

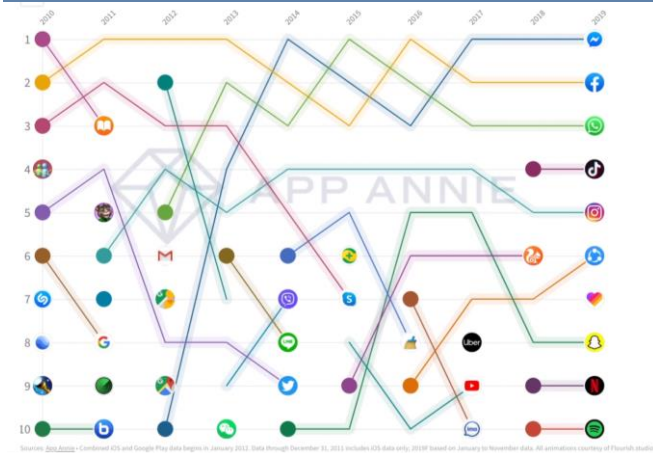


资料来源：LightCounting: High-Speed Ethernet Optics, 华泰研究

“移动互联网兴起+企业上云趋势”是云厂商过去需求增长的核心驱动力

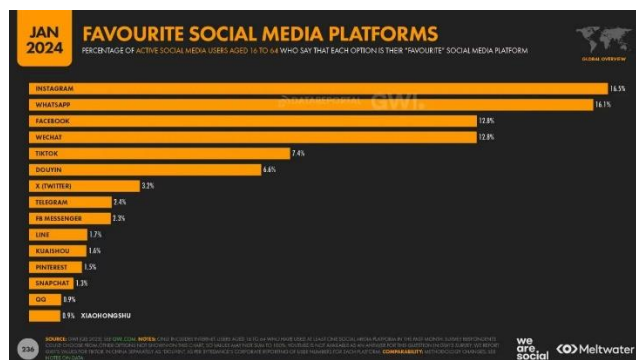
移动互联网经历蓬勃发展，网络带宽需求不断提升。在智能手机的普及、3G/4G/5G 网络技术的不断发展、上网流量单位成本的快速下降等多重因素的推动下，2010s 移动互联网经历了蓬勃发展，全球网络活跃用户数量持续攀升；另一方面，从移动 App 类别的发展来看，从最初的搜索（Google）、社交（微信、Facebook）、长视频（YouTube）等逐步丰富至图片分享（Instagram）、短视频（抖音、TikTok）、网络直播（抖音、小红书）等。以上发展趋势均对网络带宽提出了更高要求，其中云计算作为移动互联网的核心技术底座之一也得到了充分发展，云基础设施呈现持续升级的态势。

图表8：2010~2019 年全球年下载量 top10 移动 App（不含游戏）



资料来源：data.ai，华泰研究

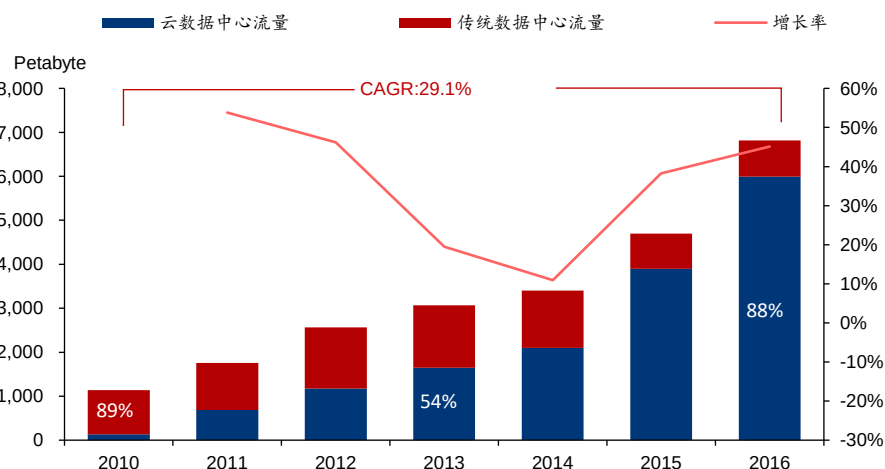
图表9：2023 年全球社交平台用户喜爱度排名



资料来源：Meltwater, We are Social，华泰研究

全球数据流量经历迅速增长，云计算所承载的比重持续提升。过去十余年中，随着移动互联网、物联网等产业的快速发展，数据量和数据应用不断增长，全球数据中心的流量迅速攀升。根据思科于 2011 至 2018 年发布的全球云指数系列报告，全球数据中心合计流量由 2010 年的 1141PB 增长至 2016 年的 6819PB，期间的 CAGR 达 29.1%。从结构来看，2010 年全球数据中心流量中，云计算承载的比重为 11%，传统数据中心占比为 89%；2013 年云计算占比首次超过传统数据中心，达到 54%；发展至 2016 年，云数据中心承载的流量占比已经达到 88%。

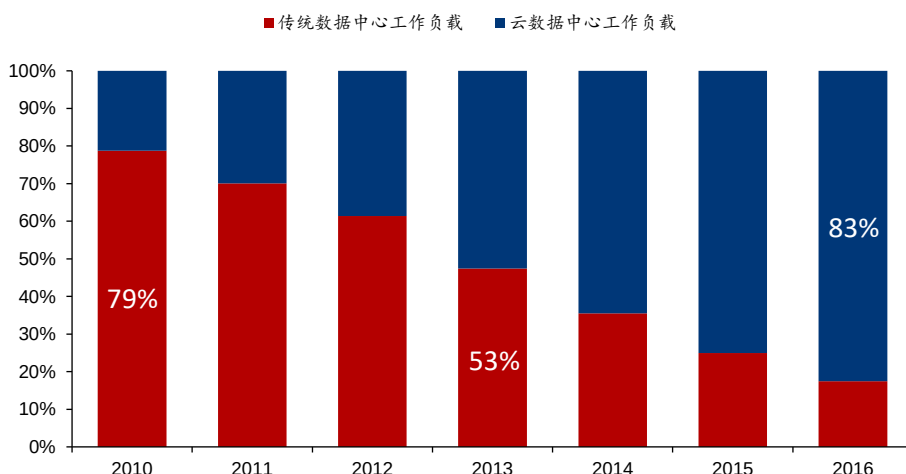
图表10：2010s 全球数据中心流量经历迅速增长



资料来源：Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology，华泰研究

企业“上云”是 2010s 明确的产业趋势。根据文献《大规模数据中心内云计算网络演变的研究及分析》，云计算采用虚拟化、分布式计算、分布式存储、资源管理等技术，将弹性、可共享、可伸缩性的软硬件资源池化，再通过网络等方式向客户提供按需自助、可计量的服务。云计算作为一种 IT 基础设施交付和使用模式，具有灵活、按需自服务、高扩展性、低成本等特点，能有效降低企业的运营成本，节省投资。2010s 企业上云为全球明确的产业趋势，根据思科发布的全球云指数系列报告，2010 年 79% 的工作负载部署在传统数据中心，云数据中心工作负载占比仅 21%；2013 年云数据中心工作负载量超过传统数据中心，达 53%；截至 2016 年，已有 83% 的工作负载部署在云数据中心。我们认为在该趋势的演进下，云厂商逐渐成为了主导光模块、交换机等云网基础设施市场的客户群体。

图表11：2010s 企业上云是明确的产业趋势

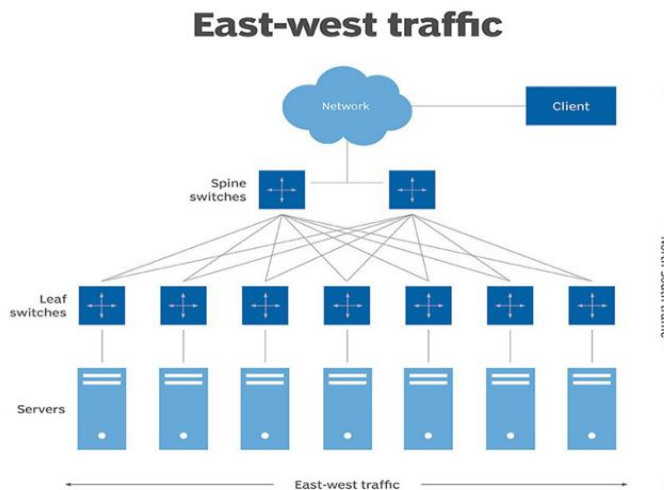


资料来源：Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology，华泰研究

云计算的发展加速了数据中心流量（尤其是东西向）的攀升

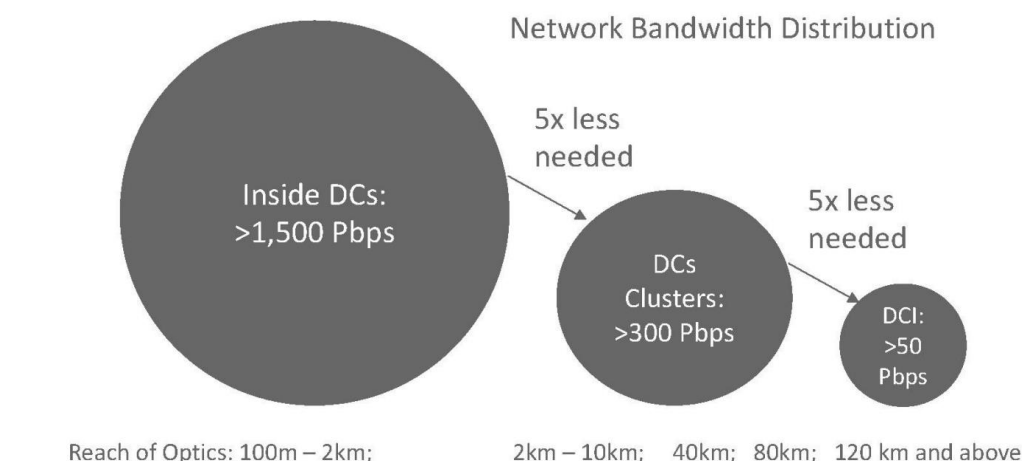
在云计算时代，流量模式发生了较大变化，由传统数据中心中的南北向流量模式转变为了云数据中心的東西向流量模式。东西向流量指数据中心内部的数据传输，由于网络拓扑图中数据中心内部流量通常横向绘制，“东西向”说法由此而来。南北向流量则描述进出数据中心的数据流，通常涉及数据中心与外部客户端之间的通信。根据此前 Facebook(现 Meta) 于 2013 年的统计，用户在朋友圈一个“点赞”动作，会发起到数据中心 1KB 的 HTTP 请求，而在数据中心内部则放大为 930KB 的并行操作，包括 88 次 Cache 查找 (648KB)，35 次数据库查找 (25.6KB) 和 392 次后端 RPC 调用 (257KB)。

图表12：东西向、南北向流量在网络拓扑图



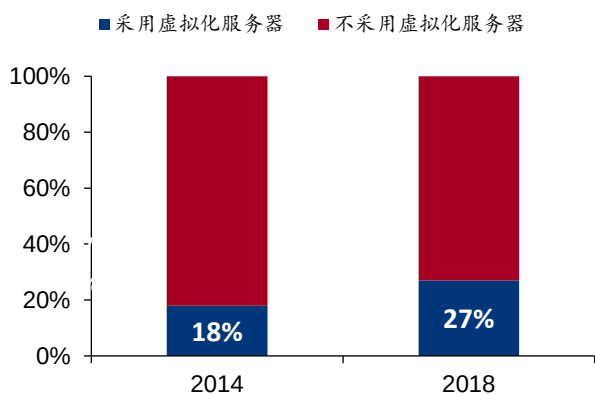
资料来源：TechTarget，华泰研究

更大的数据中心东西向流量叠加应用端的快速发展，驱动云厂商需要向数据中心内部匹配更大的互联带宽。根据 LightCounting 于 2021 年发布的报告《LightCounting Mega Data Center Optics》中的模型，云计算数据中心内部的带宽需求约为 DCI（数据中心互联）的 30 倍以上。我们认为相比于传统数据中心，云数据中心因为有着更大规模的東西向流量，是导致云厂商通常需要更多的、更高速率的光模块的核心原因，同时随着移动互联网用户侧需求的持续增长，也带来了云数据中心内部光模块向更高速率的演进。

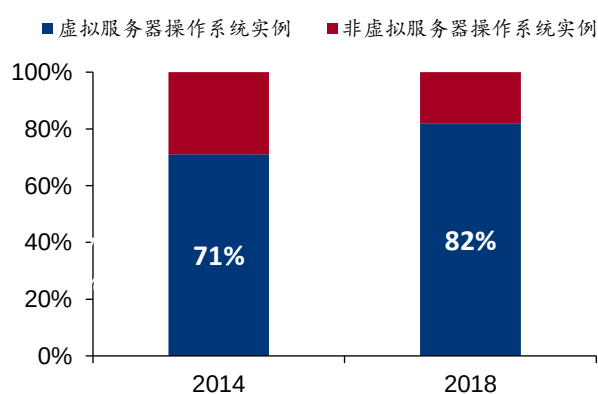
图表13：云数据中心内部的带宽需求约 DCI 需求的 30 倍以上


资料来源：LightCounting，华泰研究

分布式计算+虚拟化技术，带来云数据中心更大的东西向流量。根据文献《云数据中心的软件定义网络的研究》中的分析，云计算数据中心的东向流量更大主要的原因包括：1) 分布式计算模式的引入。云计算采用分布式计算，如大数据处理、大规模搜索引擎等，数据中心内不同的服务器间需要相互协作。因此，不同的服务器之间存在着大量数据流量；2) 虚拟机动态迁移。虚拟化技术被广泛地应用于云计算数据中心，虚拟机的动态迁移成为数据中心中的重要场景。虚拟机动态迁移指可以将一个运行中的虚拟机在保障虚拟机所承载业务连续性基础上，从一台物理主机移动到另外一个。在迁移过程中，业务数据、配置数据等在虚拟机间的流动也带来“东西向”流量的增加。

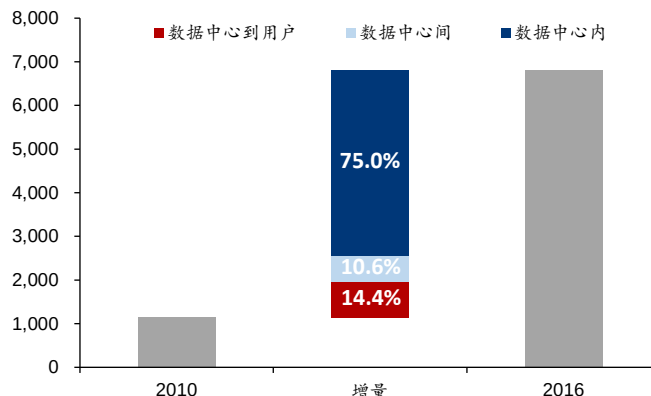
图表14：2014/2018 年存量 x86 服务器中虚拟化渗透率


资料来源：Gartner: x86 Server Virtualization, Worldwide, 2012-2018，华泰研究

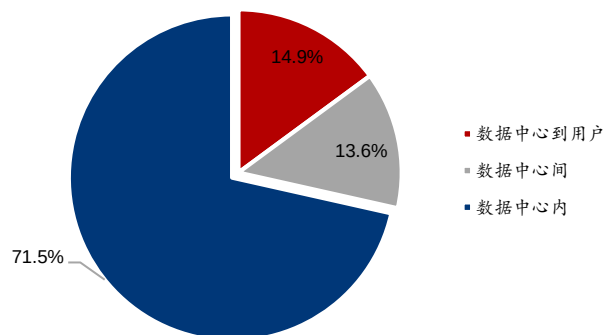
图表15：2014/2018 年存量 x86 服务器中虚拟操作系统实例占比


资料来源：Gartner: x86 Server Virtualization, Worldwide, 2012-2018，华泰研究

东西向流量占数据中心总流量的比重超 70%。根据思科云指数系列报告，2010 年至 2016 年全球数据中心东西向流量由 887PB 增长至 5143PB，期间 CAGR 达 34%；在 2010 年至 2016 年全球数据中心的流量增量中，东西向流量的贡献达 75.0%。根据思科于 2018 年的预测，2021 年全球数据中心内部流量占总流量 71.5%，处于主导地位；而数据中心间/数据中心至用户端的流量占比仅分别为 13.6%/14.9%。

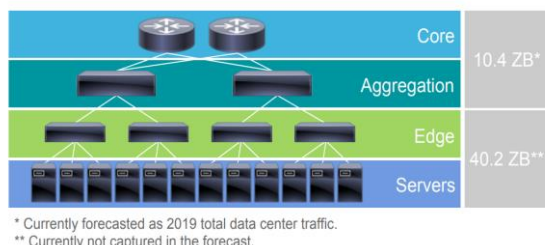
图表16：2010~2016 年数据中心流量增量的 75%由东西向流量贡献


资料来源：Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 华泰研究

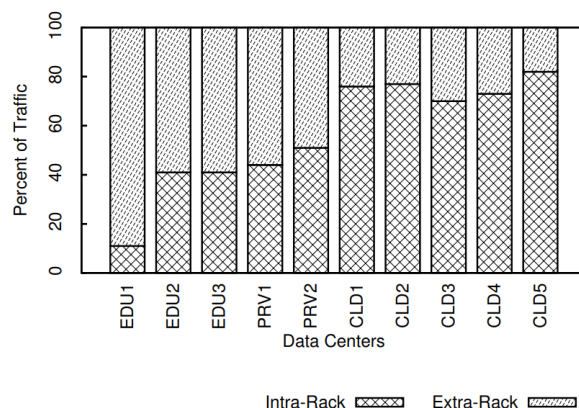
图表17：Cisco 预测 2021 年数据中心内部流量占比达 71.5%


资料来源：Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 华泰研究

云数据中心的**东西向流量**主要集中于机架内。值得注意的是，上文中思科所统计的数据中尚不包括机架内的流量。Theophilus Benson 等人于 2010 年发表的论文《Network Traffic Characteristics of Data Centers in the Wild》中分析了传统数据中心（企业、学校等）以及云数据中心内部流量特征的差异，一个鲜明的对比即云数据中心的机架内所产生的数据流量占比平均达近 75%，而传统数据中心则不足 50%。我们认为换句话说而言，在传统数据中心的内部流量中，机架内流量与机架外流量大致相等；而云数据中心的机架内的数据流量接近机架外流量的三倍，即如果考虑到机架内流量，云数据中心的**东西向流量**的占比会较传统数据中心有进一步明显提升。

图表18：Cisco 的统计中尚不包括机架内流量，而这部分规模更大
Data Center Infrastructure and Data Volumes —2019, Current Architecture


资料来源：Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology(2016 年 11 月)，华泰研究

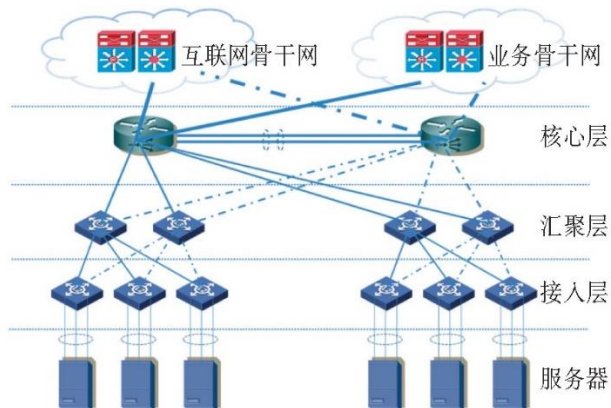
图表19：云数据中心内部流量中，机架内流量占比高于传统数据中心


资料来源：Network Traffic Characteristics of Data Centers in the Wild (2010 年 11 月)，华泰研究

“网络架构升级+端口带宽提速”是解决数据中心流量瓶颈的唯二法门

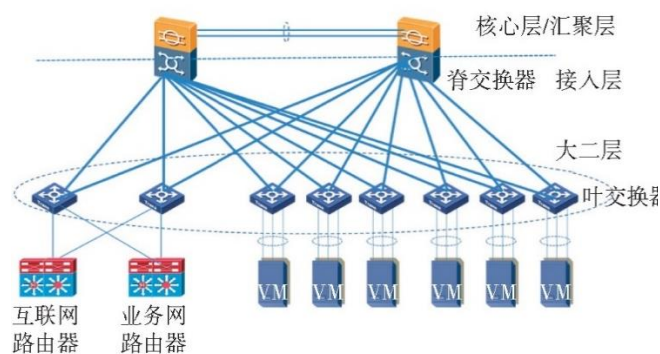
叶脊网络架构渗透率提升，带来更多光模块需求。云时代背景下，云数据中心的网络架构由传统的三层架构向大二层架构或叶脊(Spine-Leaf)架构演进。传统数据中心的三层设计在过去很适南北向流量的传输。但是对于高东西向流量需求的云数据中心，三层结构存在高延迟、可扩展性受限等问题。云时代数据中心的叶脊架构形成了一个类似于叶脊的拓扑结构，每个叶子(Leaf)交换机都连接到每个脊柱(Spine)交换机，东西向流量只需经过两个物理跳转，从而降低了延迟和丢包率。在叶脊网络架构下，由于每台脊交换机都与所有叶交换机相连，带来连接端口呈倍数增加，这也带来了云数据中心中光模块需求量的显著提升。

图表20: 数据中心传统三层网络架构



资料来源:《叶脊架构在数据中心的应用》, 华泰研究

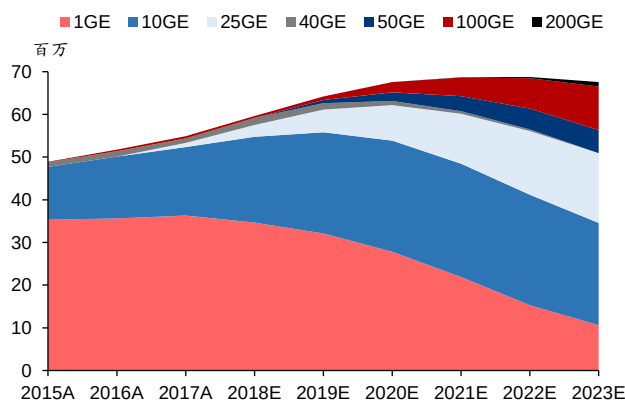
图表21: 数据中心叶脊网络架构



资料来源:《叶脊架构在数据中心的应用》, 华泰研究

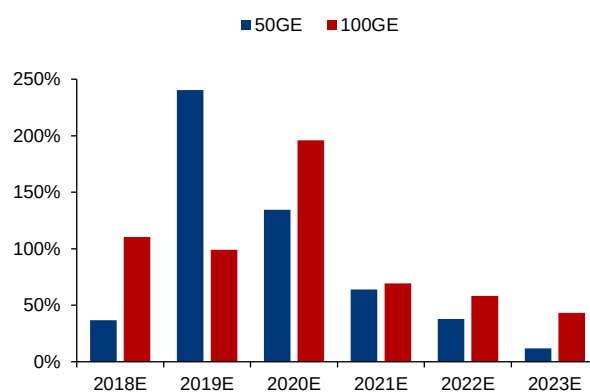
服务器网卡端口带宽的升级, 是数据中心内部网络提速的“起点”。数据中心东西向流量的快速增长, 驱动服务器所搭载的网卡带宽提升。根据 Data Center Knowledge 于 2018 年 9 月 18 日发布的一篇报道, 2010 年常见的网卡速率是 1GE, 其后五年内 1GE 和 10GE 网卡共同占据市场。2014 年谷歌、微软、Arista 网络、博通和 Mellanox 等公司成立 25G 以太网联盟, 推动 IEEE 于 2016 年制定了 IEEE 802.3by 25G 以太网标准。数据中心可通过四个 25G 通道实现 100G 网络, 相比于 10G/40G 网络, 25G/100G 网络拥有更高的网络带宽、实现光纤复用、端口向下兼容等优势, 被云厂商视为下一代升级主流。2016 年至 2020 年间, 通用服务器网卡速率从 10GE 演进到 25GE, 并快速推进到如今的 100GE。因为服务器网卡在数据中心内部的网络中属于接入层, 故其带宽的升级会相应地带动交换机、光模块速率的提升。

图表22: 不同速率网卡发货量趋势



资料来源: Crehan Research Long-range Forecast, 华泰研究

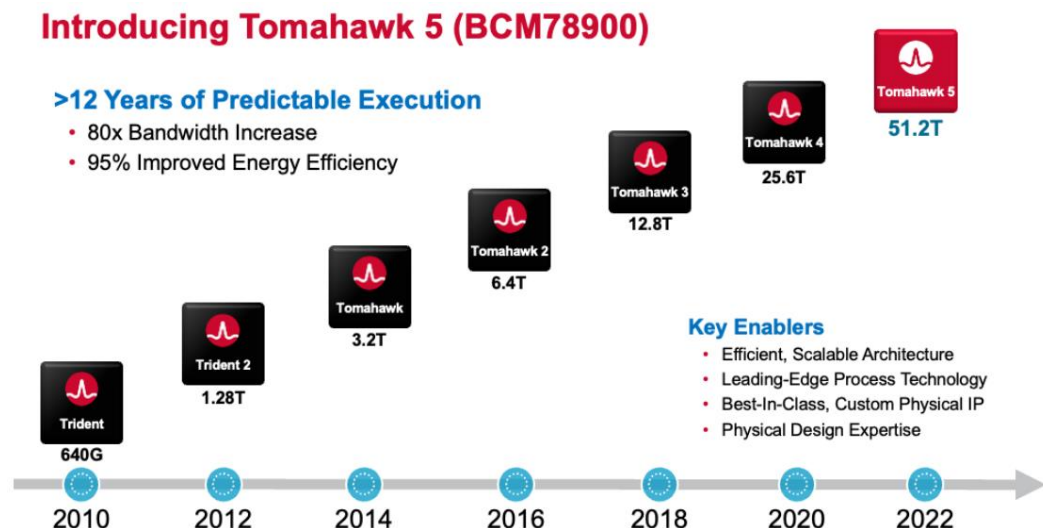
图表23: 50GE 网卡与 100GE 网卡增长率趋势



资料来源: Crehan Research Long-range Forecast, 华泰研究

交换机 ASIC 芯片保持两年一代的升级周期。云厂商数据中心内部流量的快速增长带来服务器网卡升级背景下, 所匹配的交换机速率需要同步升级。以博通为大型云厂商提供的 Tomahawk 系列 ASIC 芯片（脱胎于博通的 Trident 产品线）为例, 2010 年以来保持着两年一代的升级周期。2022 年 8 月, 博通宣布推出 Tomahawk 5 芯片, 带宽达到 51.2T, 较其 2010 年时期产品的 640G 带宽已提升了 80 倍。

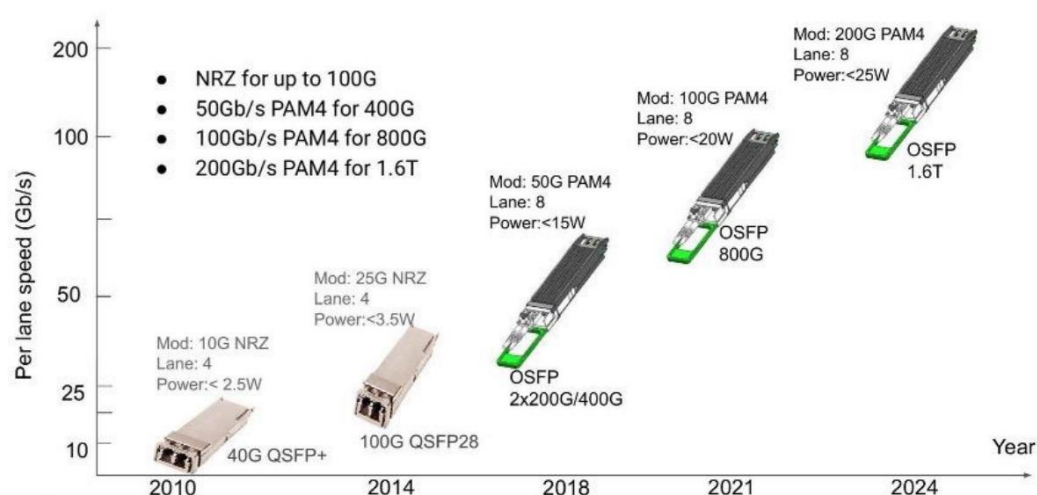
图表24：博通的交换机 ASIC 芯片速率保持两年一代的升级周期



资料来源：Broadcom 官网，华泰研究

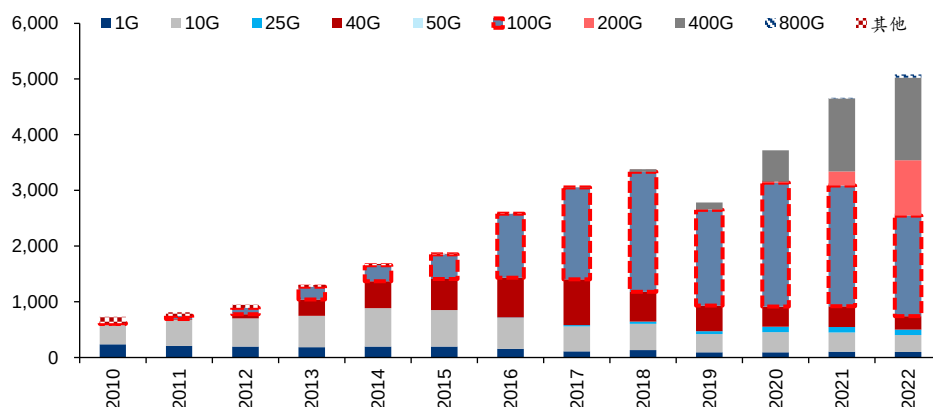
光模块速率保持持续提升态势。随着服务器网卡、交换机带宽的持续迭代升级，光模块速率也向着更高速率发展。云厂商随着自身业务的扩张，保持着较快光模块更迭周期。以谷歌为例，2010 年以来谷歌保持着 3~4 年一代的升级周期（该周期略长于交换机 ASIC 芯片，我们认为或因交换芯片从产品推出到成熟量产，存在 1~2 年的时间差；另一方面，云厂商或不会采购每一代交换机芯片，存在跳代升级的情况），根据 LightCounting，2010 年谷歌率先在数据中心内部小批量部署 40G 光模块，至 2024 年有望开始小批量部署 1.6T 光模块，是全球高速率光模块迭代的引领者。

图表25：谷歌在数据中心内部所使用光模块速率的升级历程



资料来源：LightCounting，华泰研究

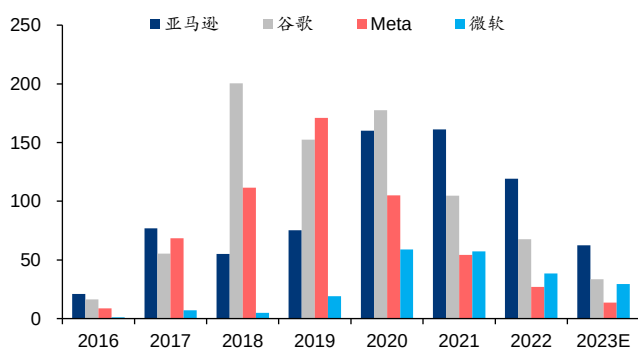
2016 年云厂商对 100G 光模块的需求集中释放。100G 光模块是云厂商光模块升级历史中的标志性产品之一。随着 25G 服务器网卡、100G 交换机，以及 100G 光模块上游关键原材料技术的成熟，2016 年云厂商数据中心内部开启了 100G 光模块的集中部署，推动当年全球 100G 光模块采购金额同比增长 159%至 11 亿美金，占当年总体光模块市场的比重同比提升 21pct 至 44%。在此后的 2017~2018 年，云厂商对于 100G 光模块的采购金额仍保持增长。2019 年在下游客户去库存背景下，100G 光模块价格明显下滑，导致采购金额呈现波动。而随着 2020 年价格的企稳，100G 光模块市场重回增长。另一方面，随着 2018~2019 年谷歌、亚马逊陆续开启 400G 光模块的部署，为光模块市场注入了新的增长动力。

图表26：2016年全球100G光模块需求迎来释放（单位：百万美元）


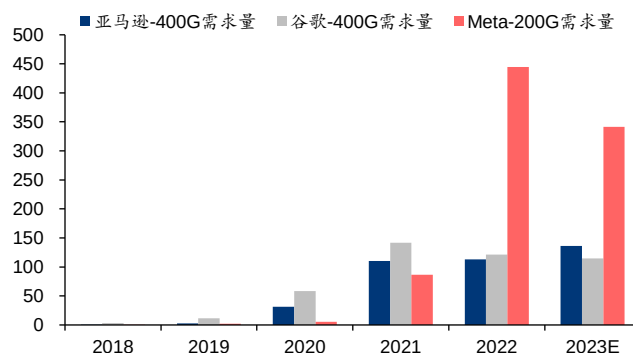
资料来源：LightCounting，华泰研究

从北美各家云厂商对光模块的历史需求量特征来看，谷歌、Meta 对历代产品的部署周期通常更短，其中谷歌通常是新一代光模块的先行者（如上文所述），我们认为这或与谷歌数据中心内部采用光交换机方案有关，在进行光模块的升级换代时不需要光交换机的重大升级做配合，因此上量节奏可以更快；而亚马逊对每一代光模块的部署节奏更持久，即从批量部署（年需求量达到 1 万只）开始至需求达到峰值的时间更长，我们认为或与其基于性价比的考虑，以及其数据中心内部交换机等配套网络设备的迭代周期有关。我们认为不同云厂商需求的“错峰”，有望在一定程度上熨平光模块总体需求的周期波动幅度。

从具体数据来看，例如 100G 光模块时代，根据 LightCounting 数据，谷歌、Meta、亚马逊同时自 2016 年开始批量部署，至 2018 年谷歌需求达峰（201 万只），2019 年 Meta 需求达峰（171 万只），2020/2021 年亚马逊需求达峰（160/161 万只）；200G/400G 时代，谷歌于 2018 年批量部署 400G，2021 年需求达峰（142 万只）；亚马逊于 2019 年批量部署 400G，至 2023 年预计需求量仍处于上升通道；Meta 于 2019 年批量部署 200G，至 2022 年需求达峰（445 万只）。历史上微软对以太网光模块的采购需求相对较少，我们认为或与微软的单一数据中心的规模多以中小型为主有关，但也由此带来了较大的 DCI 需求，如微软是目前全球 400GZR 光模块市场最大的客户之一。

图表27：北美云厂商对于 100G 光模块采购需求回顾（万只）


资料来源：LightCounting，华泰研究

图表28：北美云厂商对于 200G/400G 光模块采购需求回顾（万只）


资料来源：LightCounting，华泰研究

“多重优势+产业转移”使得过去十余年国内光模块厂商快速崛起

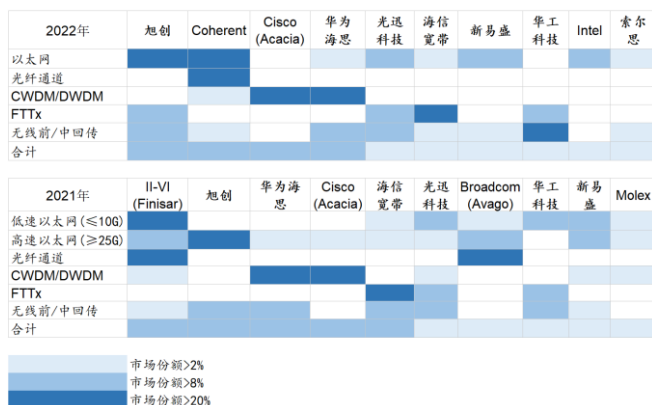
切入头部云厂商供应链，近十年来国产厂商在全球光模块市场中崛起。近十年来，国产光模块厂商凭借自身的成本优势、研发能力、交付能力以及满足客户要求的快速响应能力，逐步切入到全球头部云厂商的供应链体系，跟随着优质客户在全球光模块市场中的地位取得大幅提升。据 LightCounting 数据，2010 年全球光模块销售额前十大供应商中，国产厂商仅有武汉电信器件一家上榜，而 2022 年上榜中国厂商达到 7 家，分别为旭创（和 Coherent 并列第一）、华为海思（第四）、光迅科技（第五）、海信宽带（第六）、新易盛（第七）、华工科技（第八）、索尔思（第十，被华西股份收购）；中国厂商在光组件和光模块市场上份额从 2010 年的 15% 上升至 2021 年的 50%。其中中际旭创排名自 2021 年起与 II-VI（现 Coherent 公司）并列全球第一位。

图表29：全球前十大光模块供应商变动情况（2010-2022）



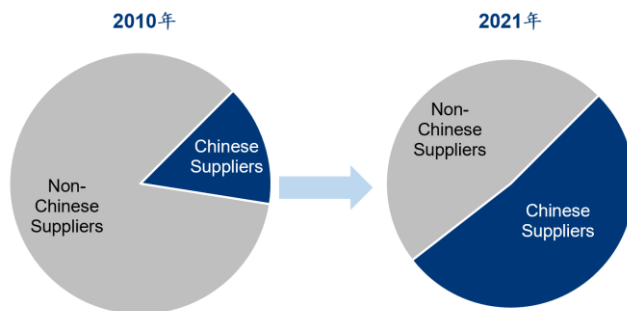
资料来源：LightCounting，华泰研究

图表30：2021-2022 年各厂商在细分光模块市场上份额



资料来源：LightCounting，华泰研究

图表31：中国厂商在光组件和光模块市场上份额



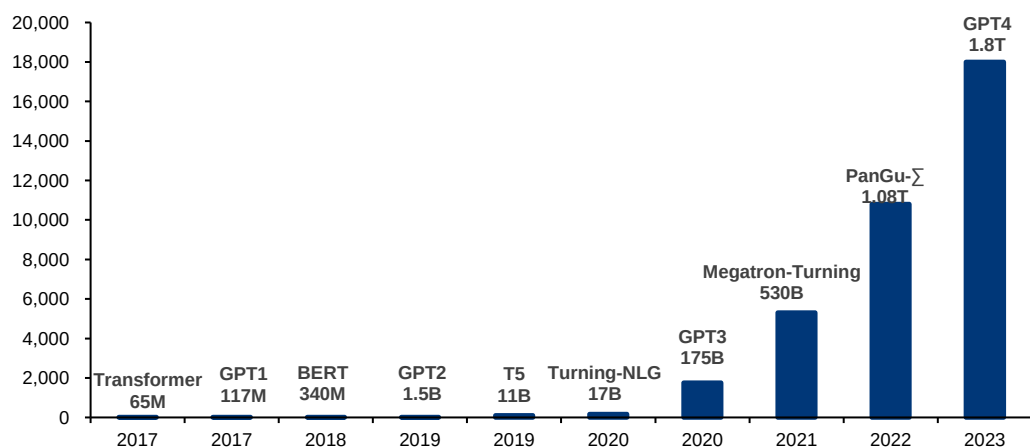
资料来源：LightCounting，华泰研究

光模块未来展望：AI 有望开启“黄金时代”

缩放定律指引下，AI 训练侧投入或仍将保持提升

缩放定律的指引下，AI 大模型参数规模持续快速提升。2020 年，OpenAI 首次提出了缩放定律（Scaling Law），核心结论之一是 AI 大模型的性能会随着参数数量、数据集大小和计算量的增加而提高，这意味着通过提高模型的参数量、扩大数据集规模，模型的性能可以获得有预测性的提升；另一方面，谷歌的研究表明，当模型的参数量小于某一规模时，在部分复杂任务中的表现接近随机，而当规模超过某个阈值后，模型的性能会显著提升，这种现象即“涌现”。在缩放定律的指引下，AI 大模型的参数规模呈现持续提升的趋势，根据华为发布的《星河 AI 网络白皮书》，在过去的 6 年时间里，AI 大模型参数量从最初 Transformer 的 6500 万增长到 GPT4 的 1.8 万亿，增幅超过 2 万倍。

图表32：AI 大模型参数规模持续快速提升（单位：亿）

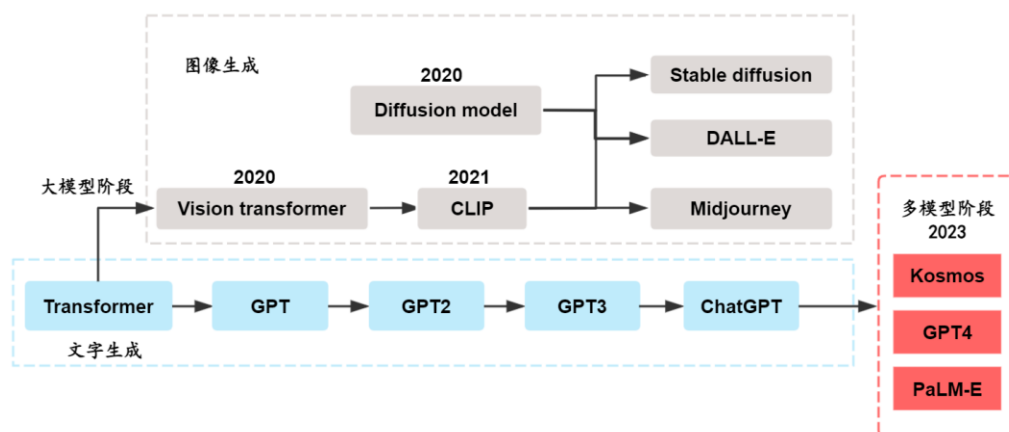


资料来源：华为《星河 AI 网络白皮书》，华泰研究

AI 大模型训练侧所需算力正经历快速增长。根据文献《Estimating Training Compute of Deep Learning Models》，AI 大模型训练侧所需算力与参数规模*数据集规模呈正相关。随着 AI 大模型参数规模以及训练数据集的不断增长，GPU 单卡算力的发展速度显著落后于模型发展的算力需求，因此 GPU 大规模集群逐步成为了大模型训练的核心算力底座。市场担忧在 AI 应用尚未出现爆款之前，大模型训练侧对于算力的需求或于 2024 年见顶，进而导致光模块需求呈现明显周期性。我们认为：1) 大模型的迭代仍在快速迈进，如多模态大模型尚处于发展早期阶段，各厂商对于大模型训练的投入强度仍有望保持提升，训练端光模块的需求有望持续饱满；2) AI 商用进展正在持续推进，逐步使 AI 产业形成闭环。我们认为未来 AI 推理侧需求的释放，以及对于云计算侧需求的带动，均有望成为光模块市场新的增长动力。

多模态大模型尚处于发展初期阶段，预计将带来更庞大的算力需求。当前单模态模型通常只能处理单一类型的数据，限制了提取的信息量和多样性；而多模态模型可以同时处理来自不同来源（例如语言、图像、音频等）的信息，并对它们进行联合理解和生成，能够克服单一模态在任务特异性、数据限制和交互限制等方面的局限性，提高模型的性能和泛化能力，对于 AGI 的实现有重要意义。多模态大模型的算力需求或显著高于纯文本模态模型，根据半导体产业分析机构 SemiAnalysis 于 2023 年 8 月发布的预测，谷歌训练新一代多模态大模型 Gemini 所需的算力或是训练 GPT-4 算力的 5 倍以上。我们认为多模态是 AI 大模型未来发展的大势所趋，且当前尚处于初期阶段，预计未来多模态模型的训练侧仍将推动算力需求的进一步释放。

图表33：多模态大模型尚处于发展初期阶段

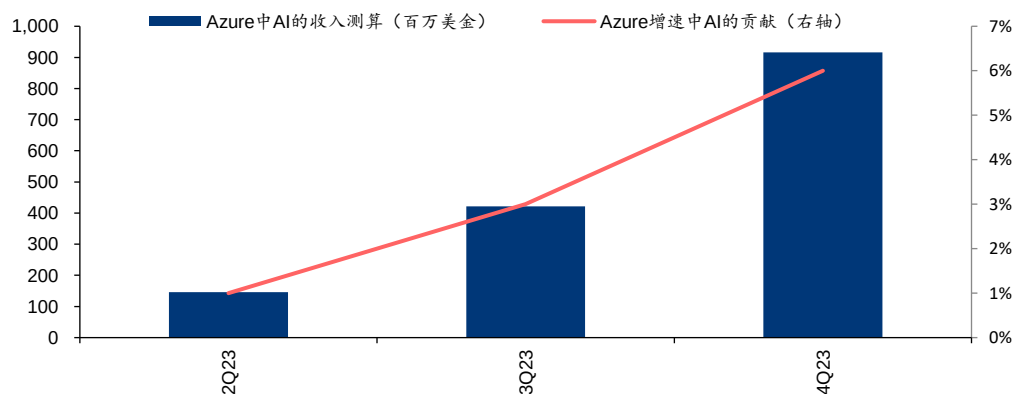


资料来源：华为《星河AI网络白皮书》，华泰研究

此外，AI“对齐”亦有望带来额外的算力需求。我们认为未来随着AI大模型不断发展，监管领域也会释放出对于算力的需求。对齐（Alignment）即确保AI追求与人类价值观相匹配的目标，确保AI以对人类和社会有益的方式行事，不对人类的价值和权利造成干扰和伤害。随着AI大模型的快速迭代，产业界也在致力于设计解决方案来指导或控制AI大模型的潜在风险，以防止其失控。OpenAI曾在2023年7月表示，将动用现有算力的20%以研究对于AI的对齐机制，例如训练另一个智能体来协助评估、监督AI，从而实现超级对齐；2023年11月上海交大生成式AI研究实验室（GAIR）发表的论文《Generative Judge For Evaluating Alignment》中，也提到了用AI监督AI的思路，其开源了一个130亿参数规模的大模型Auto-J，该模型能以单个或成对的方式，评估各类模型在解决不同场景用户问询下的表现，旨在解决普世性、灵活性和可解释性方面的挑战。

AI商用进展持续推进，推理侧需求有望释放。除AI训练网络对于光模块需求有望保持高位以外，我们认为AI推理侧需求也有望随着AI应用的落地而涌现。根据微软在业绩说明会中披露的数据，2Q23~4Q23（对应微软财年的4QFY23~2QFY24）微软Azure及其他云服务的收入同比增速中，AI服务的贡献分别达1%、3%、6%，则根据我们的测算，2Q23~4Q23微软Azure及其他云服务的收入中，AI服务贡献的收入分别达1.5、4.2、9.2亿美元，呈现快速提升态势。另一方面，未来随着多模态大模型的推进，图片生成、视频生成等应用的不断发展或对于AI推理网络吞吐量、通信带宽等要求进一步提升，有望带来高速光模块需求的进一步释放。

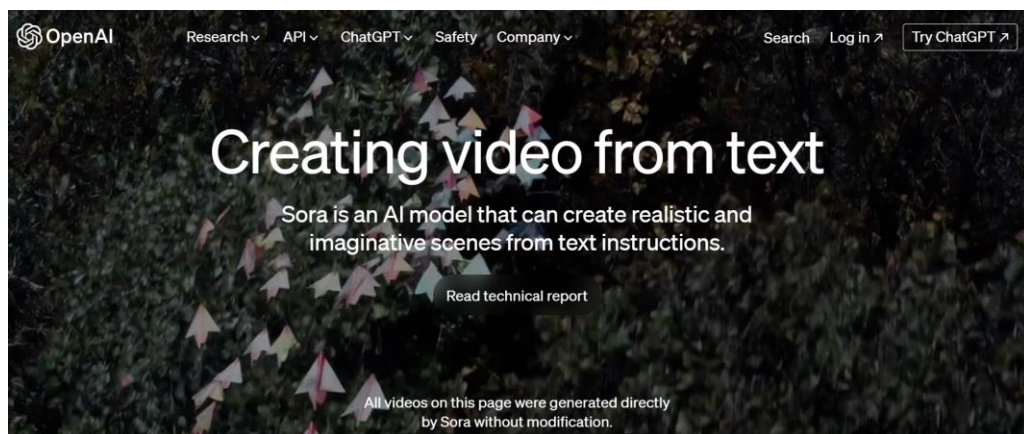
图表34：微软 Azure 及其他云服务的收入中，AI 服务贡献的收入呈现快速增长趋势



资料来源：微软财报，华泰研究

AI 应用的涌现，有望带动 AI 所需云基础设施的升级。如今在云平台上开发 AI 大模型应用已经成为各大科技厂商的共识。在 2023 年 12 月召开的创原会·2023 技术创新峰会上，中国信通院云大所副总工陈屹力表示，云计算天然可以整合、调度异构算力，向 AI 大模型提供灵活、弹性、高效的算力服务，令底层多元算力“物尽其用”，成为 AI 大模型强大的算力支撑底座；另一方面，云原生可有效提升应用部署所需资源的复用率，使用户无需为闲置资源付费，有效降低 AI 大模型的创新成本。因此，从 2023~2024 年来看，云厂商在 AI 侧基础设施的投资或对云计算侧投资造成一定“挤占”；而长期来看，在 MaaS（模型即服务）不断发展的趋势下，随着 AI 应用的不断涌现，AI 所带来的云计算侧基础设施有望释放持续的升级需求，以支持更大规模，更高性能的计算场景。当前时点 800G 光模块主要用于 AI 训练网络中，我们认为云计算侧对于 800G 光模块的需求也将随着 AI 应用的发展而提升。

图表35：2024 年 2 月 OpenAI 发布最新的文生视频模型 Sora



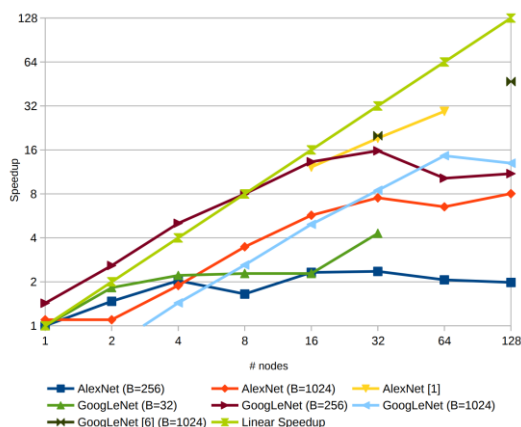
资料来源：OpenAI 官网，华泰研究

AI 时代数据拥有更庞大的东西向流量，更严格的低时延要求

AI 数据中心的東西向流量將顯著增長。在 AI 大模型分布式训练场景中，存在频繁的 All Reduce 操作，即在多个节点之间聚合和分发数据，例如目前主流训练框架之一的数据并行训练中，通过使用该通信操作来实现所有进程间梯度的同步。随着 AI 大模型参数量的持续攀升，由此也带来了 GPU 之间通信流量的显著增长。根据中国移动通信研究院发布的《面向 AI 大模型的智算中心网络演进白皮书》，以千亿参数规模的 AI 大模型为例，从机内 GPU 通信角度看，模型并行产生的 All Reduce 集合通信数据量将达到百 GB 级别；从机间 GPU 通信角度看，部分集合通信数据也将达到百 GB 级别；由于网络能力和计算能力需要高度匹配。云数据中心使用 CPU 计算，网络需求一般在 10Gbps~100Gbps；AI 超大模型训练使用 GPU 训练，算力显著高于 CPU，目前互连网络需求已达 100Gbps~400Gbps。我们认为随着 AI 时代的到来，数据中心东西向流量预计将较云计算时代显著增长。

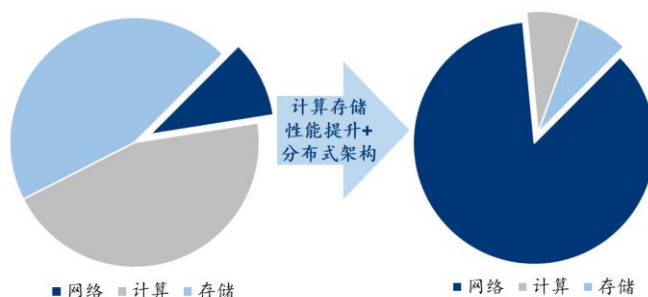
优化通信策略是提升 AI 大模型训练效率的关键。我们认为在 GPU 集群卡间流量大幅增长背景下，优化通信策略是提升 AI 大模型训练效率的关键。腾讯云副总裁王亚晨在 2023 年 6 月举办的《面向 AI 大模型的高性能网络》沟通会中提到，AI 大模型的运算实际上是一个通信过程，一部分 GPU 进行运算后需要与其他 GPU 之间交互数据，通信带宽越大，数据传输越快，等待时间就会越少，GPU 利用率越高。根据开放数据中心委员会 2021 年 9 月发布的《总线级数据中心网络技术白皮书》，来到 AI 时代的数据中心，在计算、存储器件性能大幅提升后，网络成为了数据中心内端到端的性能瓶颈。传统数据中心端到端时延中，网络时延占比明显少于计算、存储；而当计算、存储性能提升后，网络时延的占比大幅提升至 80% 以上，成为亟需升级的“短板”。

图表36：模型效率与计算节点数之间关系



资料来源：J. Keuper and F. -J. Preundt, "Distributed Training of Deep Neural Networks: Theoretical and Practical Limits of Parallel Scalability" (2016), 华泰研究

图表37：端到端时延构成情况



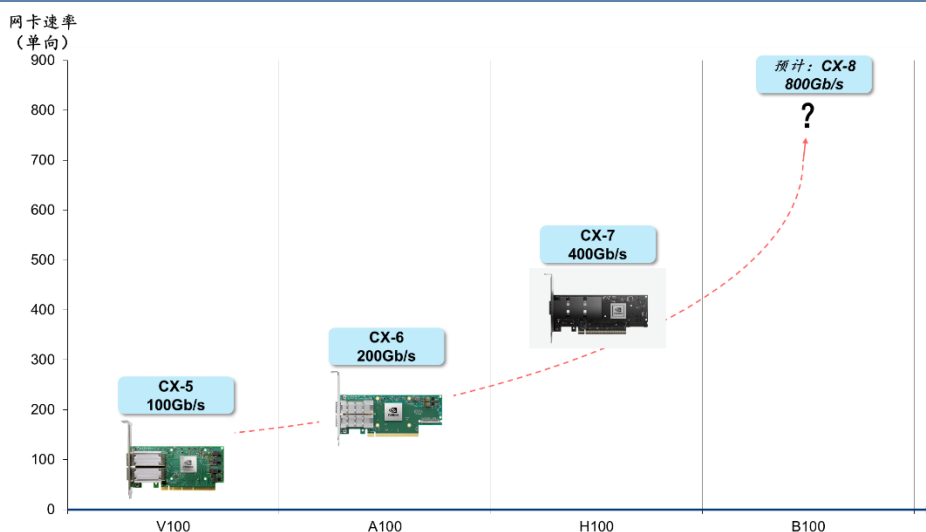
资料来源：开放数据中心委员会《数据中心网络技术白皮书》（2021），华泰研究

端口吞吐量提升+胖树网络架构，高速率光模块需求快速增长

提升端口吞吐量以及引入新的网络架构是解决节点间通信瓶颈的重要途径。在 GPU 集群中，通信主要分为两个部分：①节点内通信，指一个计算节点内 GPU 间的信息传输，如英伟达引入 NVLink 代替 PCIe，避免了服务器内部数据通过 PCIe 总线传输带来的瓶颈问题；②节点间通信，指不同计算节点之间的信息传输，节点间通信通常由网卡和网络设备组成高性能网络承载。提升端口吞吐量以及优化组网架构（减小阻塞比等）是提升节点间通信带宽的重要方式，我们认为这也是近年来 AI 训练网络中对于 400G、800G 等高速率光模块需求快速增长的核心原因之一。

AI 网络的端口吞吐量呈现持续提升趋势。以英伟达的方案为例，其通过升级服务器端口网卡速率以提升 AI 训练网络节点间带宽。英伟达的 V100 服务器中，每个 V100 GPU 搭载一张 CX-5 网卡（ConnectX-5），吞吐速率为 100Gb/s；后续发布的 A100、H100 方案中，分别搭配 CX-6、CX-7 网卡，支持的速率分别为 200Gb/s、400Gb/s，较此前云厂商的通用服务器所主流使用的 50G、100G 网卡有较大升级，而其中的 CX-7 网卡可搭配 400G 光模块，对应的交换机侧则采用了 800G 光模块。基于英伟达历代网卡速率保持翻倍提升的趋势，我们预计英伟达下一代 GPU 产品 B100 有望搭配 CX-8 网卡，支持 800Gb/s 速率。

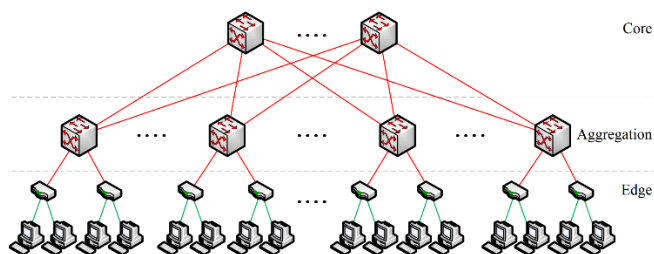
图表38：英伟达 GPU 服务器搭载的网卡速率持续升级



资料来源：英伟达官网，华泰研究

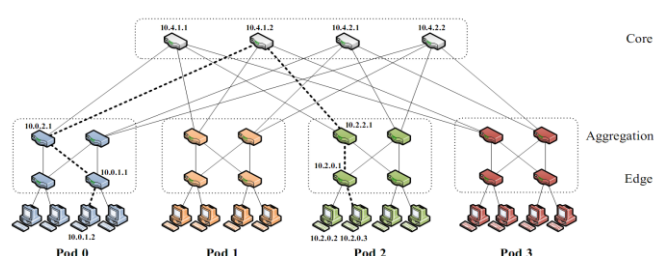
无阻塞胖树架构被引入 AI 训练网络。无阻塞胖树（Fat-Tree）架构从叶子到树根，网络带宽不收敛，其中的每个节点都需要保证上行带宽和下行带宽相等，能确保在多个层级间数据传输的均匀分布，从而促进整体通信的平滑运行，同时能灵活扩展网络规模，因此 Fat-Tree 架构较为适合用于 AI 大模型的训练网络中。

图表39：传统三层网络架构的带宽逐层收敛



资料来源：Al-Fares M, Loukissas A, Vahdat A "A Scalable, Commodity Data Center Network Architecture". ACM SIGCOMM (2008)，华泰研究

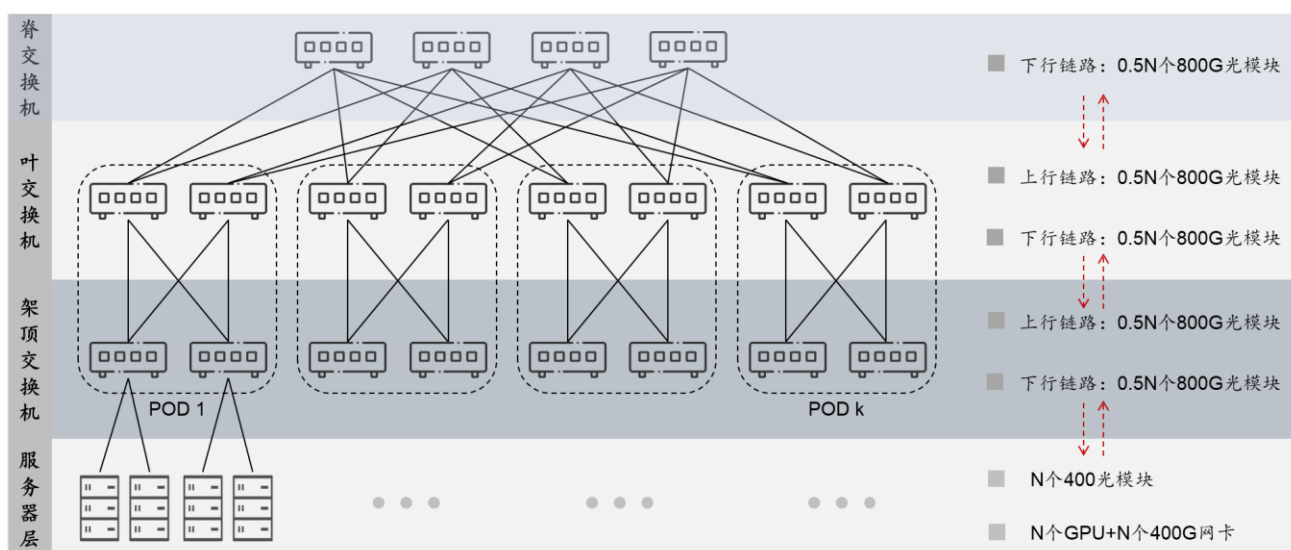
图表40：Fat-Tree 架构



资料来源：Al-Fares M, Loukissas A, Vahdat A "A Scalable, Commodity Data Center Network Architecture". ACM SIGCOMM (2008)，华泰研究

依照英伟达 IB 网络架构设计，我们测算 DGX H100 中 GPU: 400G 光模块: 800G 光模块之间的配比为 1: 1: 2.5。英伟达采用的网络架构为 IB (InfiniBand) 网络，是一种无阻塞架构（胖树），网络侧自下而上可分为架顶交换机、叶交换机、脊交换机三层架构：1) 服务器层，每台服务器中含有 8 颗 GPU，每个 GPU 与一个 400G 网卡相连，通过一个 400G 光模块输出数据。2) 架顶交换机和叶交换机层，分为上行和下行两个链路，上行/下行链路均使用 800G 光模块作为连接，为保证足够的网络带宽，IB 采用无收敛的网络架构，交换机的上行端口数与下行端口数相等，使用的光模块数也相等。3) 脊交换机层，由于是最上层架构，仅需下行链路，每个端口对应需一个 800G 光模块作为连接。综上，假设 GPU 用量为 N 个，仅服务器层用到 N 个 400G 光模块，架顶交换机和叶交换机层上行、下行链路共需 2N 个 800G 光模块，脊交换机层需 0.5N 个 800G 光模块。

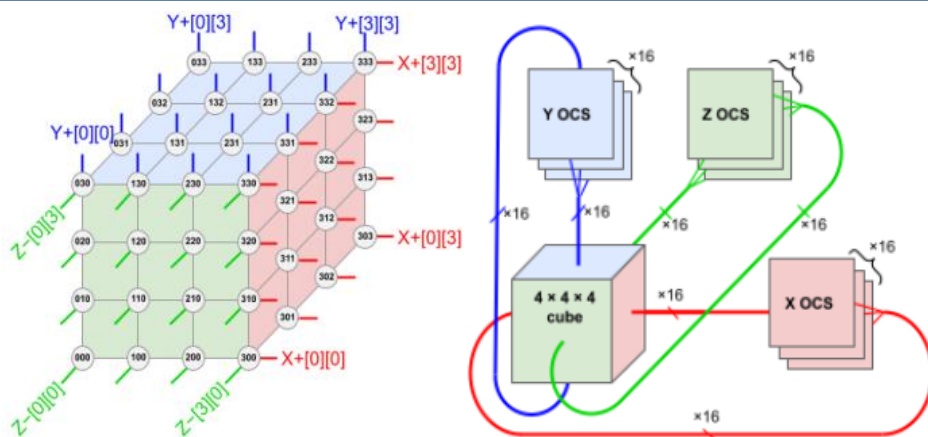
图表41：英伟达 InfiniBand 网络架构组成



资料来源：英伟达 DXG 架构白皮书，华泰研究

谷歌的 TPU 集群中光模块需求的定量测算:2023 年 4 月,谷歌研究团队发表论文提到 TPU v4 superpod 中有 4096 张 TPU v4 芯片,具体由 64 个 4x4x4 的模块组成,这 64 张 TPU 形成一个 cube 结构。光模块用量方面,TPU v4 芯片配套的是 400G 光模块,每个 cube 有 6 个面,每个面上有 16 个链接,每个链接均会采用一只光模块,对应每个 cube 需要部署 96 只 400G 光模块,而每个 cube 由 64 张 TPU v4 芯片组成,即 TPU v4 与 400G 光模块用量比例为 1:1.5。进一步地,谷歌亦发布了 TPU v5p,我们判断引入了更大的互联带宽,若仍沿用上述提到的 cube 组网结构,TPU v5p 与 800G 光模块的配比亦有望达到 1:1.5,从数量来看该配比或小于上文中 H100 的组网方案(1:2.5),但考虑到 H100 的算力约是 TPU v5p 的 4.3 倍(BF16 下,前者算力为 1979 TFLOPs,后者为 459TFLOPs),因此谷歌 TPU 集群的单位算力所匹配的对外光互联带宽更大。

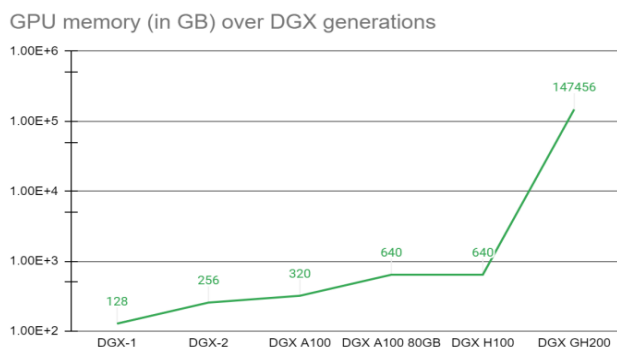
图表42: TPU v4 4×3 方式 6 个面的链接形式



资料来源:《TPU v4: An Optically Reconfigurable Supercomputer for Machine Learning with Hardware Support》, 华泰研究

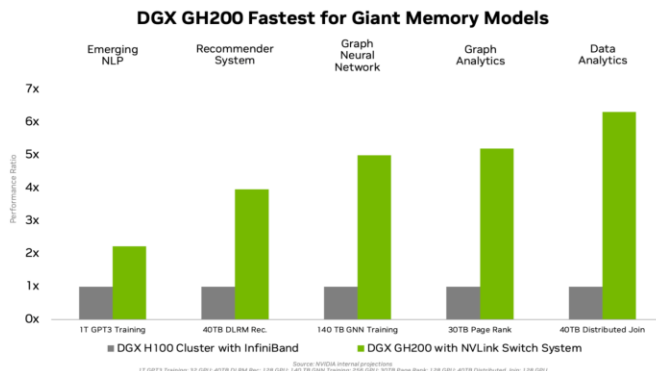
GPU 卡间的光互连带宽仍有望保持提升。继 DGX H100 之后,英伟达于 2023 年 5 月推出 DGX GH200,把 256 个 Grace Hopper 超级芯片连接为一起,可提供 1EFlops 的 FP8 Transform Engine 算力,目标使用场景为存在 GPU 内存容量瓶颈的 AI 和 HPC 应用。GH200 首次把 Grace Hooper 超级芯片与 NVLink Switch System 配对使用:1) Grace Hooper 超级芯片采用 NVLink-C2C 技术,可实现超快速的芯片到芯片、裸片到裸片互联,使得 Grace CPU 和 Hopper H100 GPU 构成一个完整的系统,并实现内存的相互访问,而不需要沿着“CPU-内存-主板-显存-GPU”的 PCIe 路线,功耗效率、带宽大幅提升。2) NVLink Switch System 使得系统中的 GPU 能够以全频宽互连,并在丛集中协同合作,可为运算密集的工作负载提供更高的频宽并减少延迟。两者配对使用,使得内存容量大幅上升,突破存储瓶颈,在巨型内存 AI 工作负载下性能表现突出。

图表43: GH200 内存容量大幅提升



资料来源: NVIDIA 官网, 华泰研究

图表44: 巨型内存 AI 工作负载下 GH200 性能表现突出

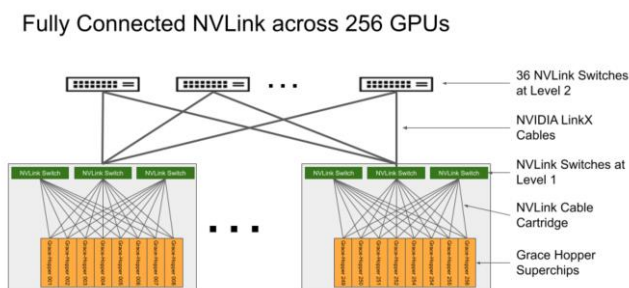


资料来源: NVIDIA 官网, 华泰研究

DGX GH200 集群中，单颗 GPU 对外互联带宽提升至 450GB（单向）。GH200 网络架构亦采用胖树无阻塞结构，包括 L1 交换机和 L2 交换机层，我们用流量法自下而上进行测算，各层级带宽情况为：1) 芯片接入层：每个 GPU 采用 18 个 NVLink，每条 NVLink 单向带宽为 25GB，即单个 GH 芯片带来 $18 \times 25\text{GB} = 450\text{GB}$ 的单向接入带宽，全部 256 个芯片带来 $256 \times 450\text{GB} = 115200\text{GB}$ 的接入带宽；2) L1 NVLink 交换机层：共有 96 个交换机，每个交换机有 32 个网络端口，下行和上行流量分别需要占用交换机 $115200\text{GB}/96/100\text{GB} = 12$ 个端口；3) L2 NVLink 交换机层：共有 36 个交换机，每个交换机有 32 个网络端口，端口容量为 $36 \times 32 \times 100\text{GB} = 115200\text{GB}$ ，和接入层流量吻合，也印证该网络架构为两级、无阻塞 Fat-Tree 结构。

依据 DGX GH200 网络架构设计，我们测算出 GPU 与 800G 光模块的比例为 1:9。1) 芯片层与 L1 层之间：使用铜缆形态连接，无光模块需求；2) L1 层与 L2 层之间：256 颗芯片带来的流量为 115200GB/s，单个 800G 光模块传输能力为 100GB/s，单向传输需要 $115200\text{GB}/100\text{GB} = 1152$ 个光模块，即 L1 层上行链路和 L2 层下行链路分别需要 1152 光模块，共需要 2304 光模块。基于以上推理，芯片接入层与 L1 层之间流量传输不需要光模块（采用背板互联方案），L1 层与 L2 层之间流量传输需要 2304 个光模块，整个网络架构需要 2304 个光模块，GPU 与 800G 光模块需求比例为 1:9。

图表 45：GH200 网络架构



资料来源：NVIDIA 官网，华泰研究

图表 46：GH200 光模块需求测算

光模块需求测算		
芯片数	256	①
单个芯片带宽	450GB/s	②
累计总带宽	115200GB/s	③=①×②
单个 800G 光模块传输能力	100GB/s	④
芯片接入层与 L1 层之间所需光模块	0	⑤
L1 层与 L2 层之间所需光模块	2304	⑥=③×②/④
芯片与光模块比例	1:9	⑦=①:⑥

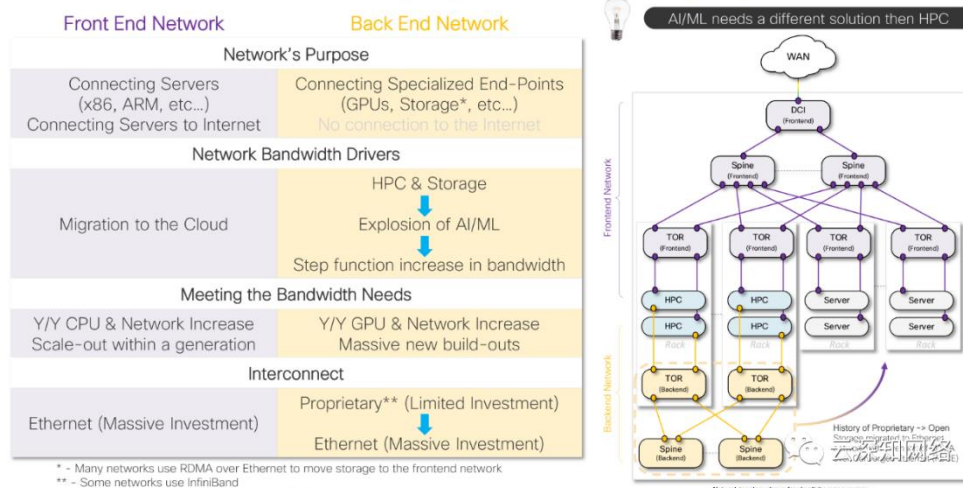
资料来源：NVIDIA 官网，华泰研究预测

AI 时代光模块迭代周期缩短，1.6T 有望于 2024 年导入

后端网络中，光模块的上量节奏预计将显著加快。云计算时代，光模块在数据中心内部主要部署于前端网络中，主要承载着数据中心内通用服务器为其他用户（数据中心内部和外部用户）提供服务的网络流量，如业务网和数据同步网。前端网络所需要的带宽很大程度上由用户侧的需求决定，光模块的部署规模也视用户端使用情况渐进式上量；而 AI 时代，大量的高速光模块被部署在后端网络中，用于将 AI 大模型训练端的大量 GPU 连接为集群。由于后端网络不与用户侧发生直接连接，所以其中光模块的上量节奏并不取决于外部用户数量的增长，而是由端侧的工作负载、时延要求等因素决定。如上文所述，如今大规模 GPU 集群成为 AI 大模型的训练算力底座，且对于时延要求较云计算时代进一步严格，因此光模块的上量节奏预计较云计算时代更快。

图表47：数据中心前端网络与后端网络的对比

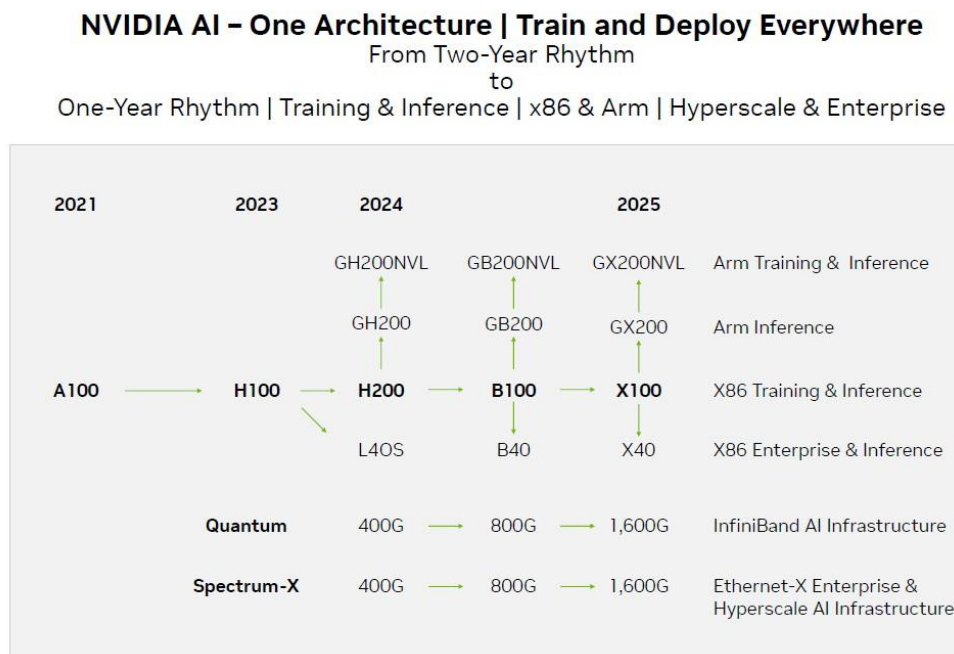
Web Scale Frontend (FE) & Backend (BE) Network



资料来源：思科，云深知网络，华泰研究

GPU 的加速迭代驱动光模块升级周期的缩短，1.6T 有望加速导入。根据 SemiAnalysis 的预测，英伟达或将于 2024 年推出新一代 GPU B100，并预计于 2025 年推出 X100，其产品的迭代周期从 2 年缩短为 1 年。我们认为随着英伟达 B100 的推出，有望带来 1.6T 光模块的加速导入。根据美国头部光模块厂商 Coherent 于 2024 年 2 月发布的 Shareholder letter，Coherent 判断 1.6T 光模块及器件(200G EML 等)将于 3Q24 形成收入。从迭代周期来看，以太网光模块从 100G 的批量部署到 400G 的批量部署间隔了 2 年、从 400G 走向 800G 则经历了 4 年，而从 800G 迈向 1.6T 仅历时 2 年，扭转了此前云计算时代升级周期放慢的趋势，有望刺激下游云厂客户需求的加快释放。

图表48：英伟达产品迭代路线图



资料来源：SemiAnalysis，华泰研究

竞争格局展望：头部厂商市场地位预计稳固

竞争格局展望：头部厂商市场地位预计稳固。市场担忧随着光模块行业竞争对手的不断加入，市场竞争格局或呈现恶化——头部厂商份额下降、价格超预期下行、行业盈利能力快速下降等。我们认为在 AI 时代，高速光模块行业的门槛或进一步提高，头部厂商市场地位预计稳固，基于如下考虑：

AI 大模型训练周期长、中断次数多，根据华为发布的《星河 AI 网络白皮书》中的举例，某个千亿大模型总训练时长为 65 天，其间故障引起的重启达到 50 多次，而真正的训练时长只有 33 天，平均无故障时间（MTBF）仅为 1.3 天。如何降低 MTBF 是大模型训练中面临的最大挑战之一。从网络设备硬件的角度来看，光模块的可靠性尤为关键。在 2023 年 9 月华为全联接大会中，华为数据通信产品线总裁王雷在星河 AI 网络主题峰会上提到，光模块是 AI 训练网络中最易出现的故障点，很大程度上决定着大模型训练效率的高低。我们认为在 AI 数据中心中，随着光模块的可靠性要求提高、迭代周期缩短，光模块龙头厂商产品的高度可靠性、领先的研发实力及交付能力等优势有望进一步凸显（如头部光模块厂商基于与大客户紧密的研发合作，有望在最新速率的光模块中取得先发优势），头部厂商市场地位预计稳固。

重点推荐公司

复盘过去 10 余年，移动互联网的兴起叠加云计算的快速发展为光模块产业注入了长久的发展动力；展望未来，我们认为 AI 将开启光模块产业的新一轮成长周期，有望长期为产业带来积极变化。我们看好切入海外头部云厂商供应链的光通信厂商发展机遇，建议关注：【光模块】中际旭创、华工科技；【光引擎&光器件】天孚通信、【MPO】太辰光。

图表49：重点推荐公司一览表

股票名称	股票代码	投资评级 (当地币种)	最新收盘价	目标价	市值 (百万)	EPS (元)				PE (倍)			
			(当地币种)	(当地币种)		2022	2023E	2024E	2025E	2022	2023E	2024E	2025E
中际旭创	300308 CH	买入	127.00	177.76	101,959	1.52	2.64	6.35	7.68	83.55	48.11	20.00	16.54
天孚通信	300394 CH	买入	108.80	123.12	42,964	1.02	1.77	3.08	3.93	106.67	61.47	35.32	27.68
华工科技	000988 CH	买入	27.82	34.77	27,973	0.90	1.09	1.41	1.80	30.91	25.52	19.73	15.46
太辰光	300570 CH	增持	32.10	36.79	7,383	0.78	0.65	0.90	1.12	41.15	49.38	35.67	28.66

注：数据截至 2024 年 02 月 18 日
资料来源：Bloomberg，华泰研究预测

图表50：重点推荐公司最新观点

股票名称	最新观点
中际旭创 (300308 CH)	2023 年业绩高增长，800G 光模块快速放量 根据公司 2023 年度业绩预告，公司预计 2023 年归母净利润为 20~23 亿元，同比增长 63%~88%，超过我们的预期（19 亿元），我们认为或因 800G 光模块需求的快速增长以及公司盈利能力的提升。4Q23 单季度来看，取区间中间值测算，归母净利润为 8.5 亿元，同比增长 130%，环比增长 25%。扣除股权激励费用对子公司苏州旭创单体报表净利润的影响之前，2023 年苏州旭创实现单体净利润约 22~27 亿元，同比增长 66%~103%。我们上调公司 2023~2025 年归母净利润预期分别至 21.20/50.97/61.67（前值：18.76/42.48/52.18）亿元，可比公司 24 年一致预期 PE 均值为 25x，考虑公司在数通 800G 光模块领域的领先地位，给予公司 24 年 28x PE，目标价为 177.76 元（前值：158.76 元），维持“买入”评级。 风险提示：全球 800G 光模块需求不及预期；800G 光模块价格大幅度下滑。 报告发布日期：2024 年 01 月 28 日 点击下载全文：中际旭创(300308 CH,买入)：业绩高增长，800G 光模块红利释放
天孚通信 (300394 CH)	2023 年业绩超预期，高速率产品需求持续高增 根据公司 2023 年度业绩预告，公司预计 2023 年归母净利润为 6.8~7.6 亿元，超过我们的预期（6.5 亿元），同比增长 68%~88%；扣非归母净利润为 6.5~7.4 亿元，同比增长 77%~102%。4Q23 单季度来看，取区间中间值测算，归母净利润为 2.8 亿元，同比增长 121%；扣非归母净利润为 2.7 亿元，同比增长 136%。考虑到高速率产品需求的快速释放，我们上调盈利预测，预计公司 2023~2025 年归母净利润分别为 7.01/12.15/15.51 亿元（前值：6.49/9.43/11.97 亿元），可比公司 2024 年一致预期 PE 均值为 27x，考虑到公司在光器件领域龙头地位，以及高速率产品收入的快速释放，给予公司 2024 年 40xPE，对应目标价 123.12 元（前值：119.41 元），维持“买入”评级。 风险提示：高速率产品需求不及预期；行业竞争加剧。 报告发布日期：2024 年 01 月 21 日 点击下载全文：天孚通信(300394 CH,买入)：业绩超预期，高速率产品需求高增
华工科技 (000988 CH)	盈利能力持续提升，驱动 Q3 归母净利润同比增长 45% 根据公司三季报，公司 2023 前三季度营收/归母净利润/扣非归母净利润为 72.08/8.12/7.49 亿元，分别同比-18.56%/+12.40%/+11.06%。3Q23 单季度公司营收/归母净利润/扣非归母净利润分别为 21.84/2.30/2.04 亿元，分别同比-17.06%/+44.74%/+41.00%，我们判断 Q3 公司营收承压或因小基站需求疲软，业绩同比增长主要系盈利能力的提升。我们维持 2023~2025 年归母净利润预期分别为 10.93/14.17/18.09 亿元，根据一致预期，可比公司 2023 年 PE 均值为 30x，考虑到公司全产业链布局的优势，给予公司 2023 年 PE 32x，目标价 34.77 元/股（前值 39.15 元/股），维持“买入”评级。 风险提示：光模块海外市场拓展不及预期；激光加工技术在智能制造及新能源产业中拓展进展不及预期；光通信行业竞争格局恶化。 报告发布日期：2023 年 10 月 26 日 点击下载全文：华工科技(000988 CH,买入)：毛利率持续提升，Q3 业绩快速增长
太辰光 (300570 CH)	Q3 业绩短期承压，营收平稳增长 根据公司三季报，公司前三季度营收/归母净利润/扣非归母净利润分别为 6.23/1.05/0.93 亿元，分别同比下滑 11.45%/30.32%/36.05%；3Q23 单季度公司营收/归母净利润/扣非归母净利润分别为 2.33/0.33/0.29 亿元，分别同比+2.26%/-39.97%/-45.89%。我们认为公司 Q3 业绩的同比下滑主要系公司毛利率的短期承压，以及汇兑收益的同比下降。考虑到公司盈利能力的波动，我们下调公司 2023~2025 年归母净利润预期分别至 1.50/2.06/2.57（前值：2.00/2.51/2.89）亿元，可比公司 2024 年一致预期 PE 均值为 36x，考虑到公司在密集连接产品行业领先地位，以及有望受益于 AI 算力侧基础设施建设，给予公司 24 年 PE 41x，对应目标价 36.79 元（前值：46.90 元），维持“增持”评级。 风险提示：新产品研发进度不及预期；下游市场需求不及预期。 报告发布日期：2023 年 10 月 25 日 点击下载全文：太辰光(300570 CH,增持)：Q3 业绩承压，看好长期受益于 AI 投资

资料来源：Bloomberg，华泰研究预测

风险提示

- 1) 全球 AI 算力侧投入不及预期：以 ChatGPT 为代表的 AI 大模型快速发展，全球 AI 算力需求升级，带来光模块需求增长。若全球 AI 算力侧投入不及预期，或导致光模块需求不及预期，对光模块厂商业绩增长产生一定负面影响；
- 2) 光模块行业竞争加剧：随着 AI 大模型快速发展带来算力升级，光模块下游需求持续增长，全球光模块市场规模呈现较快发展态势，若行业厂商竞争态势加剧，或导致产品的销售价格超预期下降，继而对厂商销售收入和利润率产生一定负面影响。

免责声明

分析师声明

本人，王兴、高名焱，兹证明本报告所表达的观点准确地反映了分析师对标的证券或发行人的个人意见；彼以往、现在或未来并无就其研究报告所提供的具体建议或所表达的意见直接或间接收取任何报酬。

一般声明及披露

本报告由华泰证券股份有限公司（已具备中国证监会批准的证券投资咨询业务资格，以下简称“本公司”）制作。本报告所载资料是仅供接收人的严格保密资料。本公司及其客户和其关联机构使用。本公司不因接收人收到本报告而视其为客户。

本报告基于本公司认为可靠的、已公开的信息编制，但本公司及其关联机构（以下统称为“华泰”）对该等信息的准确性及完整性不作任何保证。

本报告所载的意见、评估及预测仅反映报告发布当日的观点和判断。在不同时期，华泰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。同时，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。以往表现并不能指引未来，未来回报并不能得到保证，并存在损失本金的可能。华泰不保证本报告所含信息保持在最新状态。华泰对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本公司不是 FINRA 的注册会员，其研究分析师亦没有注册为 FINRA 的研究分析师/不具有 FINRA 分析师的注册资格。

华泰力求报告内容客观、公正，但本报告所载的观点、结论和建议仅供参考，不构成购买或出售所述证券的要约或招揽。该等观点、建议并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对客户私人投资建议。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，华泰及作者均不承担任何法律责任。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。

除非另行说明，本报告中所引用的关于业绩的数据代表过往表现，过往的业绩表现不应作为日后回报的预示。华泰不承诺也不保证任何预示的回报会得以实现，分析中所做的预测可能是基于相应的假设，任何假设的变化可能会显著影响所预测的回报。

华泰及作者在自身所知情的范围内，与本报告所指的证券或投资标的不存在法律禁止的利害关系。在法律许可的情况下，华泰可能会持有报告中提到的公司所发行的证券头寸并进行交易，为该公司提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务或向该公司招揽业务。

华泰的销售人员、交易人员或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。华泰没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。华泰的资产管理部门、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。投资者应当考虑到华泰及/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。有关该方面的具体披露请参照本报告尾部。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布的机构或人员，也并非意图发送、发布给因可得到、使用本报告的行为而使华泰违反或受制于当地法律或监管规则的机构或人员。

本报告版权仅为本公司所有。未经本公司书面许可，任何机构或个人不得以翻版、复制、发表、引用或再次分发他人（无论整份或部分）等任何形式侵犯本公司版权。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许的范围内使用，并需在使用前获取独立的法律意见，以确定该引用、刊发符合当地适用法规的要求，同时注明出处为“华泰证券研究所”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。本公司保留追究相关责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

中国香港

本报告由华泰证券股份有限公司制作，在香港由华泰金融控股（香港）有限公司向符合《证券及期货条例》及其附属法律规定的机构投资者和专业投资者的客户进行分发。华泰金融控股（香港）有限公司受香港证券及期货事务监察委员会监管，是华泰国际金融控股有限公司的全资子公司，后者为华泰证券股份有限公司的全资子公司。在香港获得本报告的人员若有任何有关本报告的问题，请与华泰金融控股（香港）有限公司联系。

香港-重要监管披露

- 华泰金融控股（香港）有限公司的雇员或其关联人士没有担任本报告中提及的公司或发行人的高级人员。
- 中际旭创（300308 CH）、华工科技（000988 CH）、天孚通信（300394 CH）：华泰金融控股（香港）有限公司、其子公司和/或其关联公司实益持有标的公司的市场资本值的 1%或以上。
- 有关重要的披露信息，请参华泰金融控股（香港）有限公司的网页 https://www.htsc.com.hk/stock_disclosure 其他信息请参见下方 “美国-重要监管披露”。

美国

在美国本报告由华泰证券（美国）有限公司向符合美国监管规定的机构投资者进行发表与分发。华泰证券（美国）有限公司是美国注册经纪商和美国金融业监管局（FINRA）的注册会员。对于其在美国分发的研究报告，华泰证券（美国）有限公司根据《1934 年证券交易法》（修订版）第 15a-6 条规定以及美国证券交易委员会人员解释，对本研究报告内容负责。华泰证券（美国）有限公司联营公司的分析师不具有美国金融监管（FINRA）分析师的注册资格，可能不属于华泰证券（美国）有限公司的关联人员，因此可能不受 FINRA 关于分析师与标的公司沟通、公开露面和所持交易证券的限制。华泰证券（美国）有限公司是华泰国际金融控股有限公司的全资子公司，后者为华泰证券股份有限公司的全资子公司。任何直接从华泰证券（美国）有限公司收到此报告并希望就本报告所述任何证券进行交易的人士，应通过华泰证券（美国）有限公司进行交易。

美国-重要监管披露

- 分析师王兴、高名焱本人及相关人士并不担任本报告所提及的标的证券或发行人的高级人员、董事或顾问。分析师及相关人士与本报告所提及的标的证券或发行人并无任何相关财务利益。本披露中所提及的“相关人士”包括 FINRA 定义下分析师的家庭成员。分析师根据华泰证券的整体收入和盈利能力获得薪酬，包括源自公司投资银行业务的收入。
- 中际旭创（300308 CH）、华工科技（000988 CH）、天孚通信（300394 CH）：华泰证券股份有限公司、其子公司和/或其联营公司实益持有标的公司某一类普通股证券的比例达 1%或以上。
- 华泰证券股份有限公司、其子公司和/或其联营公司，及/或不时会以自身或代理形式向客户出售及购买华泰证券研究所覆盖公司的证券/衍生工具，包括股票及债券（包括衍生品）华泰证券研究所覆盖公司的证券/衍生工具，包括股票及债券（包括衍生品）。
- 华泰证券股份有限公司、其子公司和/或其联营公司，及/或其高级管理层、董事和雇员可能会持有本报告中所提到的任何证券（或任何相关投资）头寸，并可能不时进行增持或减持该证券（或投资）。因此，投资者应该意识到可能存在利益冲突。

评级说明

投资评级基于分析师对报告发布日后 6 至 12 个月内行业或公司回报潜力（含此期间的股息回报）相对基准表现的预期（A 股市场基准为沪深 300 指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普 500 指数），具体如下：

行业评级

增持：预计行业股票指数超越基准

中性：预计行业股票指数基本与基准持平

减持：预计行业股票指数明显弱于基准

公司评级

买入：预计股价超越基准 15%以上

增持：预计股价超越基准 5%~15%

持有：预计股价相对基准波动在-15%~5%之间

卖出：预计股价弱于基准 15%以上

暂停评级：已暂停评级、目标价及预测，以遵守适用法规及/或公司政策

无评级：股票不在常规研究覆盖范围内。投资者不应期待华泰提供该等证券及/或公司相关的持续或补充信息

法律实体披露

中国: 华泰证券股份有限公司具有中国证监会核准的“证券投资咨询”业务资格, 经营许可证编号为: 91320000704041011J

香港: 华泰金融控股(香港)有限公司具有香港证监会核准的“就证券提供意见”业务资格, 经营许可证编号为: AOK809

美国: 华泰证券(美国)有限公司为美国金融业监管局(FINRA)成员, 具有在美国开展经纪交易商业业务的资格, 经营业务许可编号为: CRD#:298809/SEC#:8-70231

华泰证券股份有限公司**南京**

南京市建邺区江东中路228号华泰证券广场1号楼/邮政编码: 210019

电话: 86 25 83389999/传真: 86 25 83387521

电子邮件: ht-rd@htsc.com

深圳

深圳市福田区益田路5999号基金大厦10楼/邮政编码: 518017

电话: 86 755 82493932/传真: 86 755 82492062

电子邮件: ht-rd@htsc.com

北京

北京市西城区太平桥大街丰盛胡同28号太平洋保险大厦A座18层/

邮政编码: 100032

电话: 86 10 63211166/传真: 86 10 63211275

电子邮件: ht-rd@htsc.com

上海

上海市浦东新区东方路18号保利广场E栋23楼/邮政编码: 200120

电话: 86 21 28972098/传真: 86 21 28972068

电子邮件: ht-rd@htsc.com

华泰金融控股(香港)有限公司

香港中环皇后大道中99号中环中心58楼5808-12室

电话: +852-3658-6000/传真: +852-2169-0770

电子邮件: research@htsc.com

<http://www.htsc.com.hk>

华泰证券(美国)有限公司

美国纽约公园大道280号21楼东(纽约10017)

电话: +212-763-8160/传真: +917-725-9702

电子邮件: Huatai@htsc-us.com

<http://www.htsc-us.com>

©版权所有2024年华泰证券股份有限公司