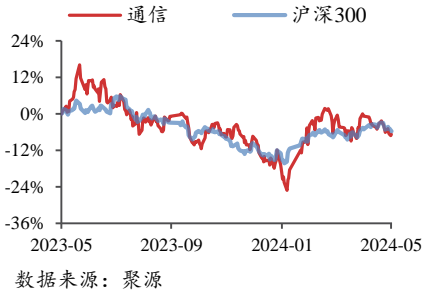


通信

2024年05月31日

投资评级：看好（维持）

行业走势图



相关研究报告

《我国第三个超万颗规模星座披露，重视卫星互联网产业链投资机会—行业点评报告》-2024.5.28

《国产算力卡性能良好，重视国产算力投资机会—行业周报》-2024.5.26

《英伟达业绩超预期，AI算力逻辑不断强化—行业点评报告》-2024.5.23

AI 高速率时代，硅光子迎成长机遇

——行业深度报告

蒋颖（分析师）

jiangying@kysec.cn

证书编号：S0790523120003

● 硅光子技术具备高速率、高集成度、低成本等特点，应用领域广泛

硅光子技术是基于硅和硅基衬底材料，利用现有 CMOS 工艺进行光器件开发和集成的新一代技术，是实现光子和微电子集成的理想平台。随着传统微电子、光电子技术逐步步入“后摩尔时代”，硅光产业链逐步完善，已初步覆盖了前沿技术研究机构、设计工具提供商、器件芯片模块商、Foundry、IT 企业、系统设备商、用户等各个环节，硅光子技术作为平台型技术，其高速率、高集成度、低成本、低功耗、小型化等特点正逐步凸显，正被广泛应用于光通信、光传感、光计算、智能驾驶、消费电子等多个领域。

● AI 高速光通信时代，硅光子优势逐步凸显

AI 发展如火如荼，驱动光通信网络朝着 1.6T、3.2T 等更高速率持续迭代升级，有望给硅光光通信产业带来成长机遇。在数通市场，高速光模块加速迭代升级，硅光渗透率有望提升；在电信市场，相干光模块持续升级，硅光光模块需求或将增长；在 CPO 领域，硅光子技术作为 CPO 的核心技术之一，有望充分受益于 CPO 的发展需求，并成为各大厂商的战略布局重心；在 OIO 领域，随着 AI 技术对算力的持续需求，芯片间数据传输不断增大，OIO 的技术优势有望不断凸显，作为 OIO 理想平台的硅光子技术也有望得到进一步发展。

● 硅光子技术在非通信领域快速发展，市场前景广阔

硅光子技术的 CMOS 工艺兼容、高集成度、波导特性在众多领域存在应用可能，如智能驾驶、光计算、消费电子等方向有很大的发展空间。智能驾驶方面：在激光雷达降本量产的需求下，硅光固态激光雷达或成未来发展方向；光计算方面：硅光有望成为实现集成光计算系统的主要材料平台；消费电子方面：硅光在生物医疗、可穿戴设备等消费电子领域也有着较大应用潜力。

● 硅光应用加速发展，重视产业链投资机会

（1）**硅光光器件/光模块厂商**：随着 AIGC 发展，硅光子技术在高速光通信时代有望迎来发展热潮，对传统光通信产业格局或带来深远影响，一方面硅光器件/模块厂商有望充分受益于产业发展，另一方面，硅光芯片具有较高产业壁垒，头部厂商的深度布局有望迎来新一轮产业演化；（2）**硅光 CW 光源供应商**：硅光光源集成作为目前硅光子技术一大技术难题，目前外置 CW 光源是硅光光模块的主流方案，且可进一步应用于 CPO 等场景，随着光通信速率需求的不断提升，硅光光模块的通道数也随之增长，CW 光源需求量有望得到进一步发展；（3）**硅光工艺配套厂商**：从硅光工艺流程看，硅光与微电子技术逐步趋同，随着硅光子技术进一步普及及发展，需重视配套工艺设备、软件厂商投资机会。

● **受益标的**：中际旭创、天孚通信、新易盛、亨通光电、华工科技、光迅科技、博创科技、剑桥科技、铭普光磁、源杰科技、长光华芯、仕佳光子、杰普特、罗博特科、炬光科技、光库科技、赛微电子、云南锗业、天通股份、凌云光、聚飞光电等。

● **风险提示**：AIGC 发展放缓，配套硅光产品不及预期的风险；硅光工艺升级不及预期的风险；硅光非通信领域发展不及预期影响；存在贸易壁垒的风险。

目录

1、 硅光子技术：后摩尔时代重要技术平台.....	4
1.1、 硅光子技术是微电子/光子集成的理想平台	4
1.2、 硅光 PIC 核心构成：光子的产生、路由、调制、处理和探测.....	9
1.2.1、 激光器：负责将电信号转化成光信号.....	9
1.2.2、 调制器：负责将光信号带宽提升.....	10
1.2.3、 光探测器：负责将光信号转化成电信号.....	11
1.2.4、 （解）复用器件：负责将不同波长携带的多路数据合并或分开.....	12
1.2.5、 光波导：负责光信号在硅基材料上传输.....	12
1.2.6、 耦合器：负责与对外连接的光纤对准降低插损.....	13
1.3、 硅光子工艺流程：硅光子产业充分受益于微电子 CMOS 工艺发展.....	14
1.4、 硅光子技术逐步成熟，数据中心应用有望率先规模落地.....	16
2、 AI 高速光通信时代，硅光子优势逐步凸显.....	20
2.1、 1.6T 高速光通信时代提速到来，硅光光模块或迎产业加速期.....	20
2.1.1、 数通市场：1.6T 高速光模块时代加速到来，硅光渗透率有望提升.....	22
2.1.2、 电信市场：相干光模块持续升级，硅光光模块需求有望得到提升.....	27
2.2、 CPO：硅光 CPO 或成为未来高速光通信发展方向.....	31
2.3、 OIO：硅光子技术是片间互联的重要解决方案.....	35
3、 硅光子在智能驾驶、光计算等多领域应用潜力大.....	38
3.1、 智能驾驶：硅光固态激光雷达技术路线是未来激光雷达发展的优选方向.....	38
3.2、 光计算：硅光有望成为实现集成光计算系统的主要材料平台.....	40
3.3、 消费电子：硅光子技术高集成度契合消费电子的空间需求.....	43
4、 受益标的梳理.....	44
5、 风险提示.....	56

图表目录

图 1： 硅光子集成芯片基于硅材料的 CMOS 微电子工艺实现光子器件的集成制备.....	4
图 2： 硅光子技术已逐渐进入产业化阶段.....	6
图 3： 硅光子技术集成度不断提升.....	7
图 4： 硅光集成技术从混合集成向单片集成演进.....	8
图 5： PIC 包括光的产生、路由、处理、探测、调制.....	9
图 6： 硅光子平台核心器件众多.....	9
图 7： 片上光源仍是硅光芯片的一大技术挑战.....	10
图 8： 硅光调制器常见构型：MZM、微环调制器、布拉格光栅调制器.....	11
图 9： Ge-Si 光探测器主要有横向和垂直 PIN 结构型.....	11
图 10： 常用硅基（解）复用器件结构多样.....	12
图 11： 光波导在硅基光子集成回路中常用于路由.....	13
图 12： 硅光耦合器通常使用端面耦合以及光栅耦合两种方式.....	13
图 13： 硅光产品整体生产流程包括设计、制造、封装三大过程.....	14
图 14： 硅光子设计环节主要负责硅光产品的电路图与内部结构的规划.....	14
图 15： 硅光子工艺流程开发可基于标准 CMOS 工艺.....	15
图 16： 内部式与开放式 Fab 两种制造模式并行.....	15
图 17： 硅光应用场景不断拓展.....	17
图 18： 硅光市场前景广阔.....	17
图 19： 硅光应用领域广泛.....	17
图 20： 硅光产业链不断完善.....	18
图 21： 硅光光模块与传统光模块原理架构基本相似.....	20
图 22： 传统光模块采用分立式结构.....	21
图 23： 硅光光模块实现多种光电器件的硅基集成.....	21
图 24： 传统光模块生产关键工序.....	21
图 25： 硅光子技术较 III-V 器件更适用于高速场景.....	22
图 26： 以太网光模块市场规模有望不断增长.....	22

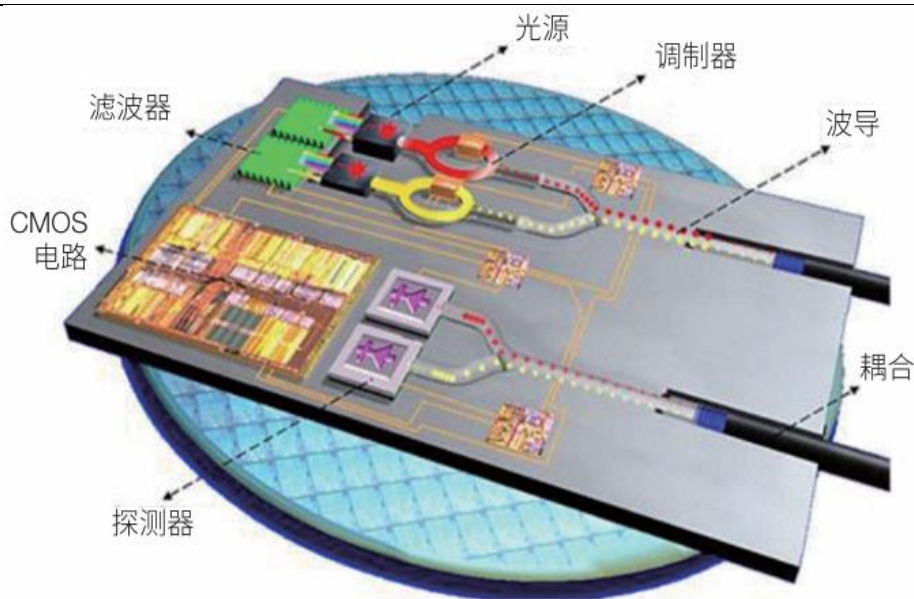
图 27: 全球数据中心市场规模稳步上涨 (亿美元)	23
图 28: 2024 年 Q1 海外云巨头 (亚马逊、谷歌、苹果、微软、Meta) 资本开支同比增长 (亿美元)	23
图 29: 传统三层网络架构向 Spine-Leaf 架构转变	24
图 30: DGX GH200 驱动 800G 光模块需求	24
图 31: 交换机密度每两年翻一番	24
图 32: 光模块功耗随着速率的提升大幅增长	24
图 33: Intel 引领 100G 硅光数通光模块大规模商用	25
图 34: Intel 100G PSM4 QSFP28 结构示意图	25
图 35: 硅光光模块市场规模有望不断扩大	27
图 36: 2022 年数通及电信光模块市场份额	27
图 37: 相干光通信基于相干调制和外差检测技术	28
图 38: 400G 相干技术有 400ZR、OpenROADM、OpenZR+ 三种标准	28
图 39: OpenZR+MSA 应用范围更为广阔	28
图 40: 相干光模块(单盘)功能示意图	29
图 41: Acacia 硅光相干光模块集成度不断提升	30
图 42: SiFotonics 相干硅光 PIC 示意图	30
图 43: CPO 低功耗方案或成未来发展方向	31
图 44: CPO 技术演化	31
图 45: CPO 核心 PIC 多采用硅光方案	32
图 46: Tofino 2 2020 Gen 采用硅光引擎	33
图 47: Broadcom 已交付 51.2Tbps CPO 以太网交换机	33
图 48: CPO 市场前景广阔	33
图 49: OIO 是一种芯片的光互连解决方案	35
图 50: OIO 典型结构	36
图 51: OIO 性能效率优于 CPO	36
图 52: TeraPHY 和 SuperNova 典型链路	36
图 53: TeraPHY 采用硅光微环调制器	36
图 54: Intel 展示 FPGA 间通过 OIO 实现信号互连	37
图 55: 三星提出 HBM 与 Logic 芯片间 OIO 互联	37
图 56: ASE、AMD、Intel、微软等十大行业巨头联合制定 UCle	37
图 57: 乘用车前装雷达发货量迅速提升	38
图 58: Aeva 硅光 FMCW 激光雷达	39
图 59: Mobileye 硅光 FMCW 激光雷达集成芯片	39
图 60: 光计算多方面性能优于电计算	40
图 61: 光经典计算和光量子计算结构系统结构相似	40
图 62: 光经典计算技术框架	41
图 63: 欧美企业积极布局光经典计算	41
图 64: 光量子计算技术框架	42
图 65: 多国企业积极布局光量子计算	42
图 66: Apple Watch 有望搭载基于硅光子技术的无创血糖监测功能	43
图 67: 硅光产业链受益标的梳理	44
表 1: 硅基光子集成回路平台应用广泛	5
表 2: 硅光子技术多环节不断发展突破	16
表 3: 海内外企业积极布局硅光子技术	18
表 4: 硅光赛道并购频频	25
表 5: 国内光模块公司积极推进硅光光模块应用	26
表 6: 海内外厂商积极 CPO 技术	34
表 7: 硅光方案激光雷达成本较低	39
表 8: 受益标的的估值信息表	55

1、硅光子技术：后摩尔时代重要技术平台

1.1、硅光子技术是微电子/光子集成的理想平台

硅光子技术是基于硅和硅基衬底材料，利用现有 CMOS 工艺进行光器件开发和集成的新一代技术。硅光子技术是利用硅和硅基衬底材料（如 SiGe/Si、SOI 等）作为光学介质，通过集成电路工艺来制造相应的光子器件和光电器件（包括硅基发光器件、调制器、探测器、光波导器件等），这些器件用于对光子的激发、处理和操纵，实现其在光通信、光互连、光计算等多个领域的应用。

图1：硅光子集成芯片基于硅材料的 CMOS 微电子工艺实现光子器件的集成制备



资料来源：王子昊等《硅基光电异质集成的发展与思考》

硅光子技术是实现光子和微电子集成的理想平台。在当前“电算光传”的信息社会下，微电子/光电子其技术瓶颈不断凸显，硅基光电子具有和成熟的 CMOS 微电子工艺兼容的优势，有望成为实现光电子和微电子集成的最佳方案。

从需求发展来看，光电子和微电子集成源动力来自于微电子/光电子各自的发展需求，微电子方面，深亚微米下电互连面临严重的延时和功耗瓶颈，需要引入光电子利用光互连解决电互连的问题；光电子方面，面对信息流量迅速增加下的提速降本需求，需要借助成熟的微电子加工工艺平台，实现大规模、高集成度、高成品率、低成本的批量化生产。

从技术特点来看，硅光子技术结合了集成电路技术的超大规模、超高精度制造的特性和光子技术超高速率、超低功耗的优势，以及基于硅材料的本身特性，硅光子技术主要具有高集成度、高速率、低成本等优点：

(1) **高速率：**硅的禁带宽度为 1.12eV，对应的光波长为 1.1 μm ，硅对于 1.1-1.6 μm 的通信波段（典型波长 1.31 μm /1.55 μm ）是近乎无损透明，具有优异的波导传输特性，可以很好地兼容目前的光通信技术标准，同时利用光通路取代芯片间的数据电路，在实现大容量光互连的同时也保持着低能耗和低散热，高效地解决网络拥堵和延迟等问题；

(2) **高集成度：**硅基材料具有高折射率和高光学限制能力，可将光波导弯曲

半径缩减至 5 μm 以下，基于成熟的 CMOS 工艺制作光器件，可实现硅光芯片更高的集成度及更多的嵌入式功能，其集成密度相比于传统的硅基二氧化硅（PLC）和磷化铟（InP）光芯片有望提高百倍以上，同时光芯片尺寸缩减也随之带来有低成本、低功耗、小型化等独特优势；

(3) 低成本：硅材料作为世界上储量第二的材料，硅基材料成本较低且可以大尺寸制造，硅光芯片的生产制造也基于 CMOS 和 BiCMOS 等集成电路工艺线，可以实现规模化量产，在芯片成本有较大的下降潜力。

表1：硅基光子集成回路平台应用广泛

材料种类	优点	缺点	器件	应用领域
硅 (Si)	兼容 CMOS 工艺； 晶圆尺寸大，低成本； 光学损耗低 热稳定性； 良好的波导性能； 易于集成	温度系数大； 可承受的光功率小； 对制造工艺要求高；	无源器件； 调制器； 探测器；	数据中心、高性能计算 等大容量、短距离传 输； 信号处理； 神经网络深度学习； 生物传感、成像； 光探测与测距；
氮化硅 (SiN)	兼容 CMOS 工艺； 晶圆尺寸大，低成本； 温度系数小； 承受光功率大； 热稳定性； 低传播损耗； 高折射率；	加工难度大，需要特殊的蚀刻 和沉积技术； 不能太厚，限制了某些应用	无源器件	激光雷达； 光通信、光纤传感； 光学断层成像；
二氧化硅 (SiO ₂)	兼容 CMOS 工艺； 晶圆尺寸大，低成本； 低传输损耗； 集成性强； 性能稳定； 工艺容差大； 与单模光纤模场匹配；	非线性系数、电光系数低，调 控难度大； 折射率变化较小； 波导弯曲半径过大；	无源器件	激光雷达； 光通信、光纤传感；
磷化铟 (InP)	直接带隙材料，自发辐射效应； 性能稳定； 可实现光子集成回路的所有器件；	工艺复杂，成本高； 通过异质集成技术才能与硅基 平台集成；	无源器件； 激光器； 调制器； 探测器； 光放大器；	电信、数据中心等中长 距离传输； 3D 感测；
铌酸锂 (LN)	电光系数大； 光学透明窗口大； 居里温度高； 大带宽； 低功耗；	与其他材料体系混合才能实现 光子集成；	无源器件； 激光器； 调制器； 探测器； 光放大器；	光量子计算； 大数据中心； 人工智能； 粒子传感；
薄膜铌酸锂 (LNOI)	高带宽； 低插损； 低功耗； 线性度好； 高可靠性； 高消光比；	晶圆级刻蚀工艺不成熟； 器件尺寸不具优势；	无源器件； 激光器； 调制器； 探测器； 光放大器；	骨干网长距传输； 超高速数据中心；
砷化镓 (GaAs)	直接带隙材料的自发辐射效应； 高电子迁移率； 与其他材料形成异质结构，设计灵 活性高； 高功率性能；	高成本； 晶圆尺寸小于硅晶圆； 高功率下需进行热管理； 不兼容 CMOS 工艺； 脆性材料的加工封装难度大	无源器件； 激光器； 调制器； 光放大器；	数据中心短距传输； 3D 感测；

资料来源：讯石光通讯网、光库科技官网、源杰科技官网等、开源证券研究所

从发展历程来看，硅光子技术从最初在 1969 年由著名的贝尔实验室提出以来，经历了 3 个主要的发展阶段：

1969-2000 年的原理探索阶段，受限于工艺和技术的限制，硅光子技术的发展只集中在硅基有源器件和无源器件的实验室研究阶段；

2000-2008 年的技术突破阶段，以 Intel 为首的企业与学术机构就开始重点发展硅芯片光学信号传输技术，期间 2004 年 Intel 研制出第一款 1Gb/s 速率的硅光调制器，人们看到硅芯片中“光进铜退”的可能性，其他各类硅光器件如探测器、激光器、无源器件等也陆续获得突破；

2008-2014 年的集成应用阶段，以 Luxtera、Intel、和 IBM 为代表的公司不断推出商用级硅光子集成产品，如 Intel、Luxtera 的硅光光模块，Acacia 的相干光模块等；

目前，硅光子技术已逐渐进入应用拓展阶段：硅光子集成平台被广泛应用于多领域，比如在通信领域，已基本建立了面向数据中心、光纤传输、5G 承载网、光接入等市场的一系列硅光产品解决方案；在新型微处理器技术上，DARPA、Intel、Ayar Labs 等国外研发机构正在致力于实现硅光芯片与高性能微电子芯片的融合，并已验证了集成硅光 I/O 芯片的新一代 FPGA、CPU 和 ASIC 芯片；在光计算领域，Lightmatter、Lightelligence 等公司积极推进应用于 AI 神经网络运算的硅光芯片；研究人员已研制出集成度最复杂的硅光量子芯片；在智能驾驶领域，硅光固态激光雷达或成下一代激光雷达的重要革新。

图2：硅光子技术已逐渐进入产业化阶段



资料来源：中国通信学会《硅基光电子集成技术前沿报告（2020年）》等、开源证券研究所

硅光子技术由分组硅光向着可编程芯片方向发展。从技术演进来看，硅光子技术发展可分为四个阶段，由于受限于硅材料本身的光电性能，仍存在无法高密度集成光源、集成低损耗高速光电调制器等问题，目前硅光子技术主要集中在第二阶段——硅光子集成阶段：

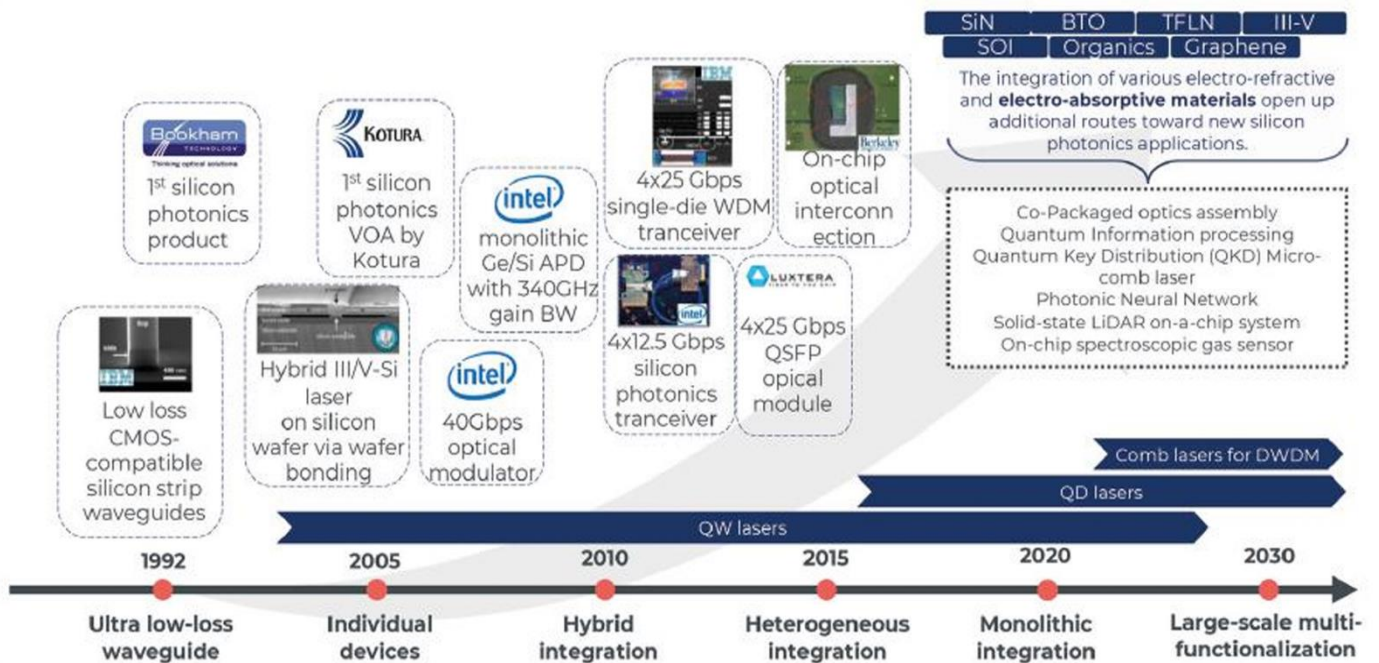
第一阶段，分组硅光：硅基器件逐步取代分立元器件，即将硅做出光通信底层器件，并实现工艺标准化；

第二阶段，硅光子集成：集成技术从混合集成向单片集成演进，实现部分集成，即通过不同器件的组合集成不同的芯片；

第三阶段，全光电融合：光电全集成化，实现合封的复杂功能；

第四阶段，可编程芯片：器件分解为多个硅单元排列组合，局针化表征类；该种通过编程来改变内部结构的芯片，可自定义全功能。

图3：硅光子技术集成度不断提升



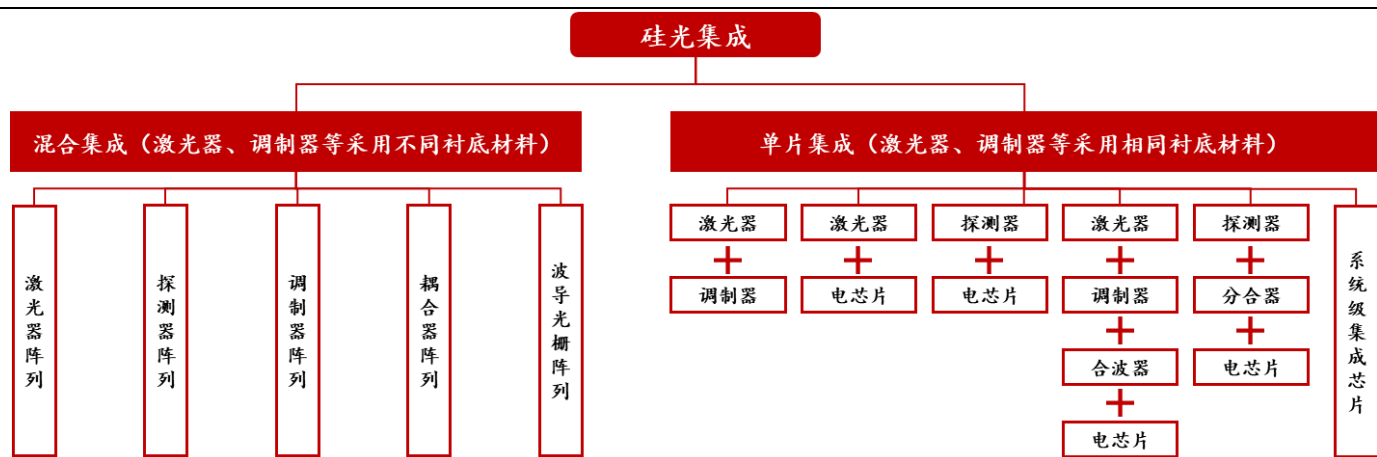
资料来源：讯石光通讯网、开源证券研究所

从工艺角度来看，硅光子集成分为单片集成和混合集成，目前混合集成使用较广，但是单片集成性能更优，是未来发展趋势。

单片集成：将光子学组件直接集成到同一块硅芯片上，包括光源、光调制器、波导、耦合器等光学元件，从而形成一个紧凑的光学电路。单片集成方式的优势在于可以减小尺寸、提高集成度、降低制造成本。

混合集成：将硅芯片与其他材料的光学组件结合在一起，即将电子器件（硅锗、CMOS、射频等）、光子器件（激光/探测器、光开关、调制解调器等）、光波导回路集成在一个硅芯片上。其中，硅芯片主要负责电子部分的处理，而其他材料的光学元件则负责光的生成和调制。混合集成的优势在于可以利用硅芯片的电子器件和其他材料的优异光学特性，实现更高效的光通信和传感应用。目前，硅光子技术主要采用基于 SOI（绝缘衬底上硅）衬底的制造平台，已能实现探测器与调制器的单片集成。

图4：硅光集成技术从混合集成向单片集成演进

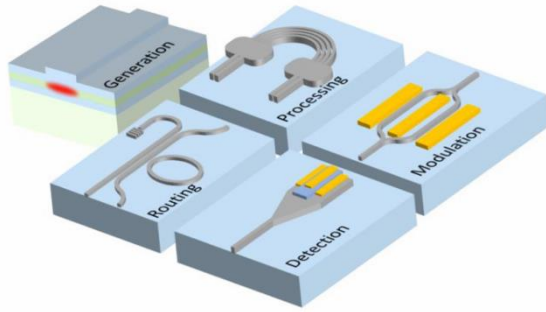


资料来源：张平化等《数据中心光模块技术及演进》

1.2、硅光 PIC 核心构成：光子的产生、路由、调制、处理和探测

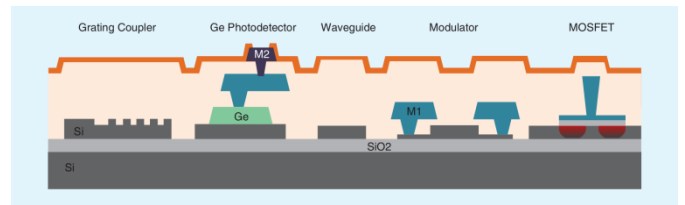
在硅光的光子集成电路（PIC）中，主要包括光的产生、路由、调制、处理和探测。其核心器件主要包括：激光器（负责将电信号转化成光信号），光调制器（负责将光信号带宽提升），光探测器（负责将光信号转化成电信号），（解）复用器件（负责将不同波长携带的多路数据合并或分开）、光波导（负责光信号在硅材料上传输），光栅耦合器（负责与对外连接的光纤对准降低插损）等。

图5：PIC 包括光的产生、路由、处理、探测、调制



资料来源：韩溪林《基于硅光微环的调制和复用器件研究》

图6：硅光子平台核心器件众多



资料来源：宋泽国等《400G FR4 硅光收发模块的研究》

1.2.1、激光器：负责将电信号转化成光信号

由于硅材料间接带隙的能带结构使得它无法实现高效率的片上光源，目前光源技术仍是硅光芯片的一大技术难题，硅基光源按照集成方式同样可以分为混合集成和单片集成两种方式。混合集成包括片间混合集成、片上倒装焊混合集成、片上键合异质集成，混合集成方案工艺较为成熟，但成本高、难以大规模集成；单片集成是直接在硅材料上生长特定材料作为激光器增益介质，性能有待提高，但是一直被认为是硅光子片上光源的终极解决方案，能够与硅光子工艺同步缩小线宽、提高集成度，有望实现大规模光电子集成回路。

片间混合集成技术：与目前产业化应用最广泛的透镜耦合最为接近，但本质上还属于微封装技术，在多个光源耦合的应用中需要耗费大量时间在精密耦合对准工艺上，同时无法进行大规模光源的集成；

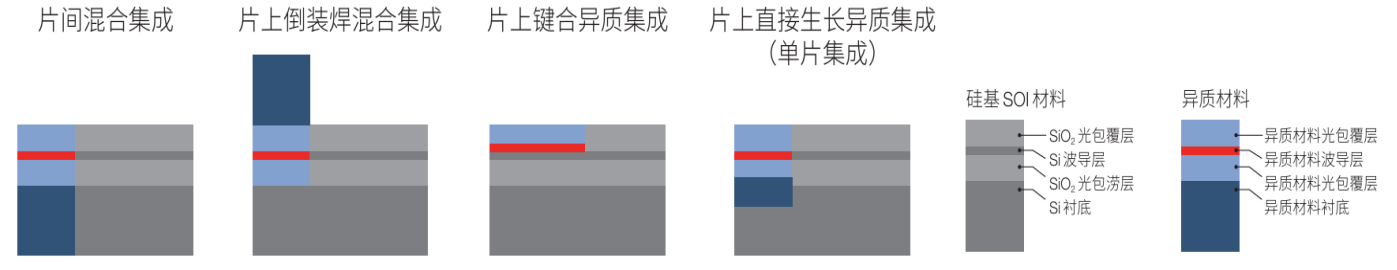
片上倒装焊混合集成：采用倒装焊或贴装工艺，将预制好的 III-V 族材料激光器放在硅光子芯片表面并通过焊球进行电连接，解决了可以集成光源的问题，但硅光芯片需要刻蚀开槽精确控制激光器耦合高度，同时仍需要解决高精度耦合问题，产业尚未得到广泛应用；

片上键合异质集成技术：将 III-V 族材料外延层集成至硅波导等硅光器件上方，由 III-V 族材料产生的光可通过倏逝波耦合的方式进入硅光子回路，该技术可实现 III-V 族材料与硅光芯片的大规模集成，但开发难度大，产品良率难以控制；目前只有 Intel 公司通过使用其原有的 CMOS 产线和 III-V 族化合物半导体产线实现了片上键合异质集成技术路线的产品化并完成量产，其他多家公司（如美国惠普、美国 Skorpios 等公司）也在布局该方案；

单片集成（片上直接生长异质集成技术）：通过在已制作好的硅光晶圆上开槽，利用选区外延的方法生长 III-V 族材料，随后通过 III-V 族工艺制造光源。该方法类似键合异质集成的流片过程，但不需要复杂的芯片到晶圆键合工艺，是最接近于

CMOS 集成工艺的异质集成技术。该技术虽然适合晶圆级大规模量产工艺，但对硅基 III-V 族外延技术有着很高的材料生长要求，需要解决一系列诸如硅基异质材料外延、片上光源耦合及片上光源老化等难题；目前该技术仍处于学术研究阶段。

图7：片上光源仍是硅光芯片的一大技术挑战



资料来源：王子昊等《硅基光电异质集成的发展与思考》

1.2.2、调制器：负责将光信号带宽提升

光调制器是将调制信号加载到光波导上的器件，在光模块中是完成电信号到光信号转换的关键器件，硅光调制器也是硅光集成器件中的核心器件之一。目前硅基调制器的 3 dB 带宽可以达到 67 GHz 以上，可以支持单波 200 Gbit/s 以上速率的调制和传输。

根据调制方式，硅光光模块中的电光调制属于外调制方式，即激光器的注入电流恒定，激光器输出连续光，调制信号加载到外调制器上，在电场的作用下，外调制器进行光强和相位的调制；

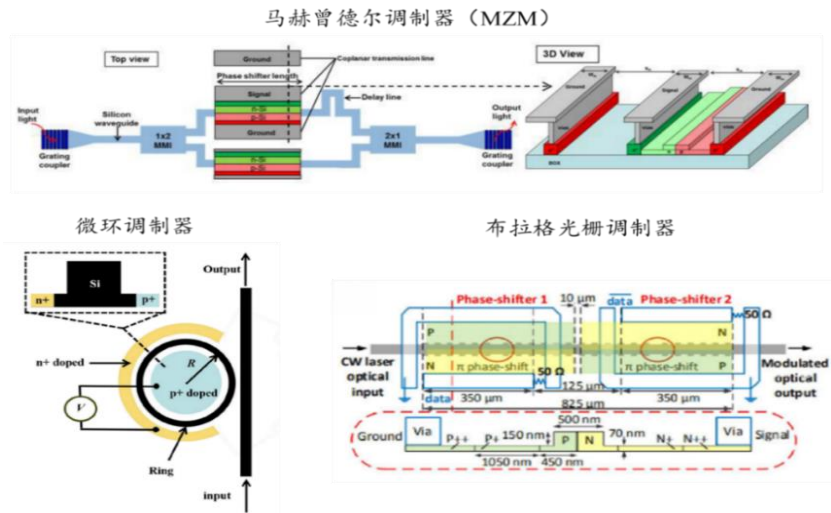
从机制上来看，不同于传统光模块中的基于量子限制斯塔克效应（QCSE）的电吸收调制器（EAM），由于硅的材料特性，目前硅光调制器多基于等离子体色散效应，即通过外加电场对载流子浓度进行操控并以此来改变材料折射率，常见的等离子体色散效应包括载流子注入、载流子积累和载流子耗尽机制，其中载流子耗尽型 PN 结由于能够同时实现高速率和调制效率，研究热度逐步上升；

从结构上来看，较为常用的硅光调制器包括马赫-曾德尔调制器（MZM）、微环调制器（MRM）、布拉格光栅调制器。MZM 利用折射率的变化操控两个光波的相对相位，并通过相长或者相消干涉的原理实现对光波幅度的调制；微环调制器和布拉格光栅调制器是在有谐振结构的调制器中用折射率的变化操控谐振条件改变谐振波长，使得调制器可以在给定波长下实现谐振状态的切换。

马赫-曾德尔调制器是近十年来研究最多的硅光调制器之一，一般被认为是提高下一代数据中心光网络、5G 光模块速率的主要方案。MZM 最大优点是工作带宽是全带宽，并因此得到了广泛的应用，但由于基于干涉调控，尺寸较大，实际应用中长度一般大于 2 mm，另外反向偏置的载流子耗尽型调制器功耗较高；

微环和布拉格光栅基于谐振，尺寸可以相对较小，微环调制器凭借其高品质因子(Q 值)的环形谐振腔结构，可以实现极高的集成度与低能耗，适合用于光波分复用系统，但是微环调制器高 Q 谐振腔要求较窄的光学带宽（典型如 100pm），制造误差容忍度小，温度敏感性较高，同时微环调制器的谐振峰是周期性的，调制器级联时不同信道之间容易串扰；布拉格光栅调制器是单模谐振，因此在工作波长附近仅有一个谐振峰，信道之间不易串扰，但布拉格光栅调制器中光栅固有的反射光会对入射端口其余器件造成不良影响，因此很大程度上失去了外调制优势。

图8：硅光调制器常见构型：MZM、微环调制器、布拉格光栅调制器



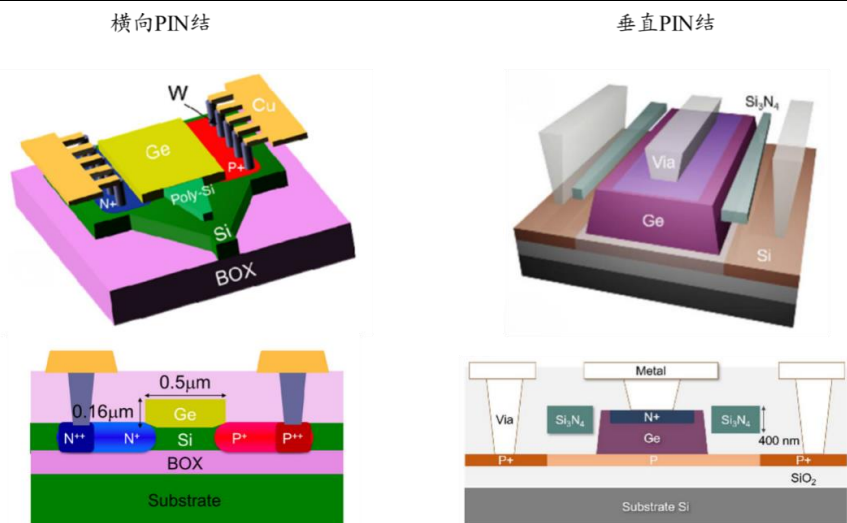
数据来源：马春良《基于反对称布拉格波导光栅的硅光调制器研究》、开源证券研究所

1.2.3、光探测器：负责将光信号转化成电信号

光探测器（PD）的功能是将输入光信号转换为输出电信号，在光模块中可用在接收端和发射端的 MPD。由于硅材料对波长大于 1.1 μm 的光是透明的，并非有效的吸收材料，所以需要借助外延生长锗、III-V 族键合、表面态吸收、等离子吸收等手段在硅材料上制备符合通信波段的光电探测器。

Ge-Si 光探测器由于具有带宽大、结构紧凑、CMOS 工艺兼容等特性，更适合大规模集成，是现在的主流方案。从结构上来看，Ge-Si 光探测器有横向 PIN 结和垂直 PIN 结两种结构，在垂直 PIN 结构中，电流必须通过 Ge / Si 界面，界面缺陷会降低响应度并增加暗电流。对于横向 PIN 结构，P 区和 N 区都在 Ge 的顶部，避免电流穿过 Ge / Si 界面，但需要更大的外部电压以便及时输运载流子出本征区。根据《高速光调制器及其芯片研究》，目前最大带宽的 Ge-Si 光电探测器是由德国 IHP 开发的基于横向 PIN 结构，可实现 1550nm 下 265 GHz 带宽，响应度为 0.3 A/W。

图9：Ge-Si 光探测器主要有横向和垂直 PIN 结构型



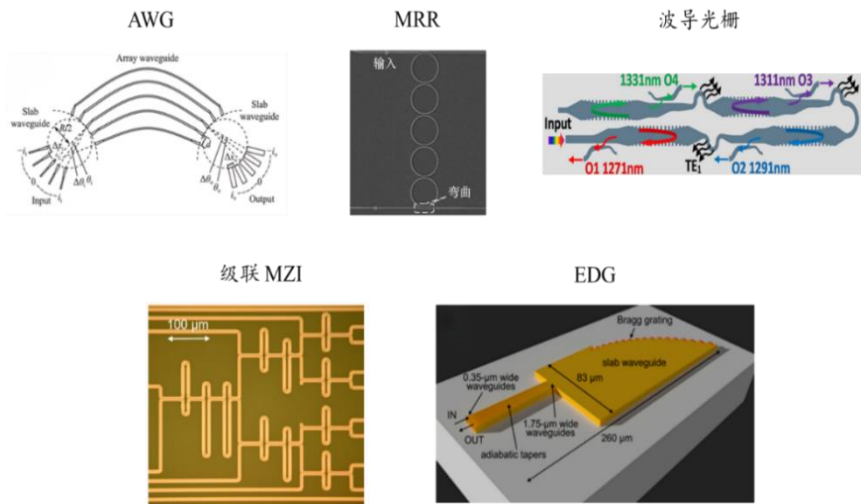
数据来源：夏鹏辉《高速光调制器及其芯片研究》、开源证券研究所

1.2.4、（解）复用器件：负责将不同波长携带的多路数据合并或分开

（解）复用器件是波分复用技术中实现不同波长携带的多路数据合并或分开的关键器件。波分复用及解复用是将两种或多种不同波长的光信号，在发射端经过复用器合束后，合进同一根光纤中进行传输，然后在接收端，经解复用器将不同波长的光信号进行分离的技术。采用波分复用及解复用技术，可以拓展光互连的通信容量，并减少光纤的使用量从而降低成本。

实现波分复用器件的基本原理是利用光束干涉。在 SOI 平台上，常见的(解)复用器的类型有阵列波导光栅(AWG)、级联马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型滤波器，微环谐振腔(MRR)型滤波器、阶梯衍射光栅(EDG)和波导光栅等。AWG、EDG 从结构和原理上较为相似，可实现并行多通道，其中 AWG 可以级联使用，适合多波长、大容量的密集波分复用系统；MRR 型复用器适用于尺寸小、通道间隔小的波分复用系统；级联 MZI 型复用器可实现高斯型滤波和平带滤波，可以通过灵活调节分光比和相位延时从而补偿工艺容差等因素导致的信道偏离问题；波导光栅的特点是无自由谱范围影响、波长选择特性和平带滤波特性，适合超宽带、大通道间隔的粗波分复用系统。

图10：常用硅基（解）复用器件结构多样



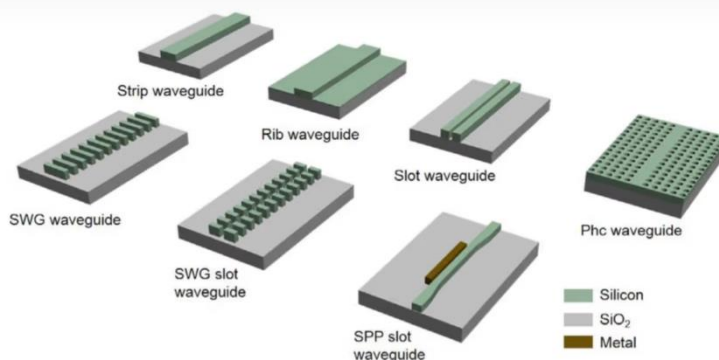
数据来源：夏鹏辉《高速光调制器及其芯片研究》、开源证券研究所

1.2.5、光波导：负责光信号在硅基材料上传输

光波导在硅基光子集成回路中常用于路由，类型有条形波导、脊形波导、弯曲波导。光波导分为核心层和包层，核心层硅材料和包层二氧化硅材料之间存在高折射率差异，该差异一方面使得硅波导的尺寸非常紧凑，另一方面也导致光在波导中的传输损耗对波导的表面粗糙度较为敏感。

在实际应用中，如何减少硅波导损耗是硅光器件性能的一大挑战。硅光波导的传输损耗主要和光刻工艺相关。比如在硅光子平台上，对于 C 波段(1530~1565 nm)和 O 波段(1260~1360 nm)，用于单模传输的条形波导的高度为 220 nm，宽度为 410~500 nm，采用 193/248 nm 光刻分辨率制备的波导，其传输损耗为 1~2 dB/cm，目前，可通过高分辨率浸没光刻、氢气热退火的方法来减小传播损耗。另一方面除了直波导，弯曲波导的尺寸和损耗也非常重要，由于散射损耗、辐射损耗、模式失配损耗和材料吸收损耗等因素，通常弯曲波导的半径不应小于 5 μm。

图11：光波导在硅基光子集成电路中常用于路由



数据来源：Jian Wang & Yun Long 《On-chip silicon photonic signaling and processing: a review》

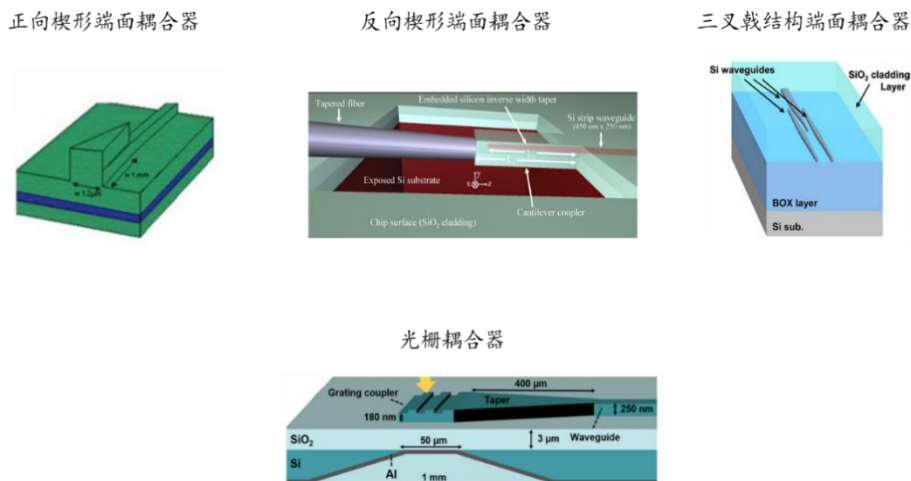
1.2.6、耦合器：负责与对外连接的光纤对准降低插损

硅基波导光学耦合技术主要用于解决硅基集成光电芯片上的光信号同外部光信号互连的问题，是硅基光电芯片封装的关键技术。实际应用中，单模光纤和光波导之间的高效耦合也是制约硅光子芯片规模化应用的一个难题。光波导中的模场尺寸通常小于 1 μm，单模光纤中的模场直径一般是 8~10 μm，两者模场尺寸间的差异导致了较低的耦合效率和较大的耦合损耗。通过设计不同结构、不同材质的光耦合器件，使片上硅波导的光模场同单模光纤的光模场耦合相匹配从而达到最优的光耦合效率，通常使用端面耦合以及光栅耦合两种方式。

端面耦合是通过应用端面耦合器，使得光信号直接在硅基波导的横截面和光纤的横截面直接相耦合。端面耦合器的优点是耦合损耗小、光学带宽大，而且能够在不改变光路的情况下进行对准，但在制备上工艺难度大、制作容差小，需要特殊的端面抛光。端面耦合器一般有正向楔形、反向楔形、三叉戟结构，目前常用的结构为反向楔形；

光栅耦合器是通过光栅的衍射效应把光耦合至光波导，优点是尺寸小、对准容差大，可以放置在芯片的任意位置，有利于晶圆级测试，缺点是偏振敏感、波长敏感、插入损耗大，不适合光子集成。

图12：硅光耦合器通常使用端面耦合以及光栅耦合两种方式

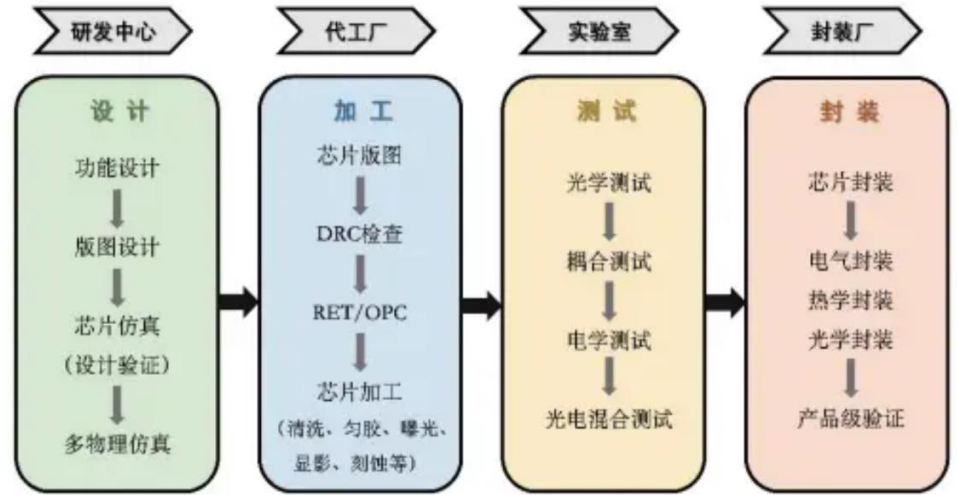


数据来源：夏鹏辉《高速光调制器及其芯片研究》、开源证券研究所

1.3、硅光子工艺流程：硅光子产业充分受益于微电子 CMOS 工艺发展

硅光产品整体生产流程包括设计、制造、封装三大过程。硅光子集成技术作为利用 CMOS 工艺的一个新兴技术方向，从设计方法、设计工具和流程、基于工艺平台的协同设计等方面很大程度上参考和借鉴了微电子的相关技术，这使得在实际生产中，硅光芯片的设计者能比较便利地享受晶圆厂成熟工艺的流片服务，同时硅光子学并不需要最先进的纳米光刻技术，可以使用光刻水平较低的老式代工厂带来成本效益。整体流程上主要经过设计、制造和封装，近年来在制造和设计技术瓶颈逐渐取得突破，封装成为出货量和良率受制的主要因素。

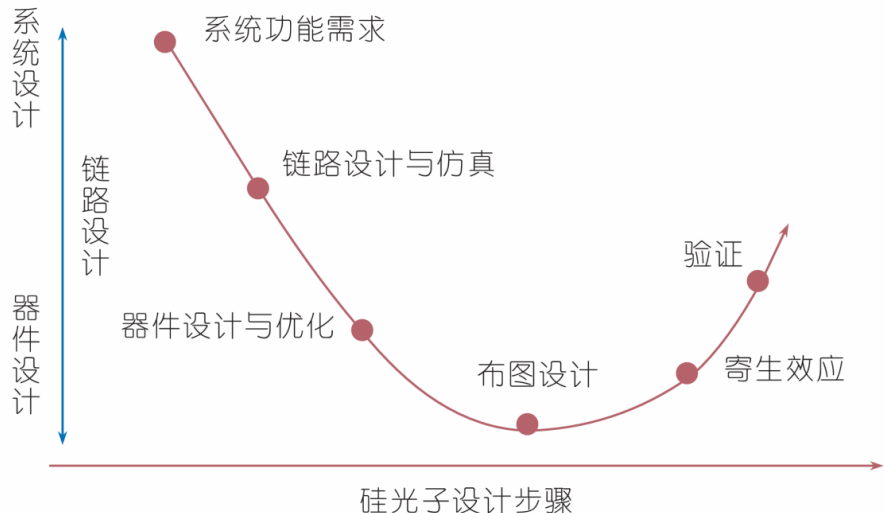
图13：硅光产品整体生产流程包括设计、制造、封装三大过程



资料来源：徐芳露等《硅光芯片——后摩尔时代的高速信息引擎》

设计环节主要是负责硅光产品的电路图与内部结构的规划。行业内模仿微电子设备设计方式，融合光学仿真与工艺设计套件（PDK），推出简化光电开发环境（EPDA）。类似于 EDA 的流程，硅光子设计也是从系统功能需求出发。基于功能分析和分解，设计出光子链路，并仿真获得其可实现的功能性参数；进一步地，通过物理仿真与优化，获得组成光子链路的器件结构及布图设计；然后基于器件的物理模型分析链路集成中的寄生效应并验证链路功能性，修正设计其结构参数。

图14：硅光子设计环节主要负责硅光产品的电路图与内部结构的规划

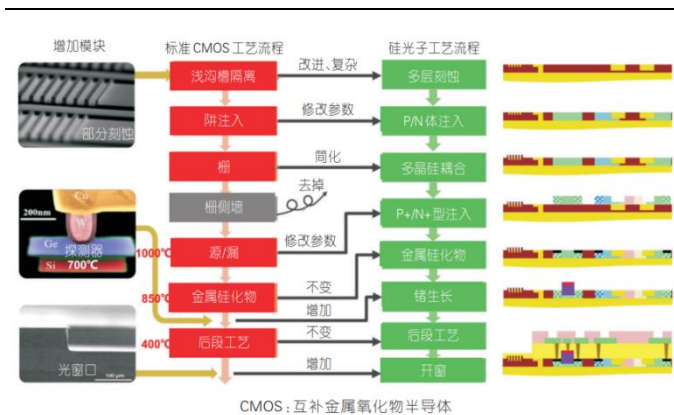


资料来源：郭进等《硅光子芯片工艺与设计的发展与挑战》

制造和封装环节主要负责将晶圆加工成硅光芯片，并完成相应器件的封装和测试。硅光子器件尺寸跨度从几十微米到约 100nm，特征波导的尺寸为 500nm 左右，合适的工艺节点大概为 0.13 μm 及以下。比利时 IMEC、新加坡 IME、美国 AIM Photonics 都是采用 200mm、0.13 μm 来加工硅基光电子器件。由于硅光子器件特征尺寸和最小尺寸相较于微电子大很多，且对尺寸和工艺误差较为敏感，因此相较于标准 CMOS 工艺具备一定工艺特殊性，流程上至少增加 3 个工艺模板，并针对硅光子器件进行大量的工艺参数优化设计。

目前内部制造工厂 (Foundry, Fab) 与开放式 Fab 两种制造模式并行，内部 Fab 以 IBM、Intel 为代表，除激光芯片外，设计、硅基芯片加工、封测均由公司自身完成。开放式 Fab 模式由实验室提供设计方案，由大规模流片代工厂实现制造、封装过程。

图15：硅光子工艺流程开发可基于标准 CMOS 工艺



资料来源：郭进等《硅光子芯片工艺与设计的发展与挑战》

图16：内部式与开放式 Fab 两种制造模式并行

- 内部的Fab: IBM、Intel
 - 开放式Fab: ePIXfab、中科院微电子所等
- 定制化流片方案
MPW: 费用按面积分摊

MPW代工厂	国家	工艺	关键尺寸参数
IMEC	比利时	130nm	200mm wafer, 220nm Si, 2μm BOX
IHP	德国	130nm	200mm wafer, 220nm Si, 2μm BOX
LETI	法国	-	200mm wafer, 310nm Si, 0.8μm BOX
VTT	芬兰	-μm	200mm wafer, 3μm Si, 0.3~3μm BOX
IME A*STAR	新加坡	180 nm	200mm wafer, 220nm Si, 2μm BOX
Global Foundries	美国	90 nm 45 nm in 2019	300mm wafer, 220nm Si, 2μm BOX
AIM Photonics	美国	90 nm	300mm wafer, 220nm Si, 2μm BOX
中科院微电子所	中国	180 nm	200mm wafer, 220nm Si, 2μm BOX

数据来源：面包板、开源证券研究所

1.4、硅光子技术逐步成熟，数据中心应用有望率先规模落地

硅光子集成技术具有广阔的市场前景，但目前仍然面临诸多挑战：

(1) **硅光器件的性能问题。**目前的硅光子技术已可以替代很多传统的光器件，但还有一些需要克服的技术难题，比如如何减少硅波导的损耗、如何实现波导与光纤的有效耦合、如何克服温度对于功率和波长稳定性的影响等。这些技术难题会影响到硅光子技术的普及以及在数据中心场景中的应用。

(2) **测试流程和方法。**与常规的大规模集成电路芯片不同，光电芯片本身成本高、制造流程多、工艺复杂、废品率高，因此需要先在晶圆上进行测试和筛选，然后再和其他电芯片进行集成，以避免残次芯片造成的不必要的后期封装成本。

(3) **缺乏标准化方案。**硅光芯片在各个环节都缺少标准化方案，例如：设计环节需要使用专用的 EDA 工具，制造与封装环节缺乏提供硅光工艺晶圆代工服务的厂家。这使得硅光子技术大规模产业化变得更加困难。

但总体来看，硅光子技术近年来的高速发展已给诸多行业带来了重大的技术革新。随着传统微电子、光电子技术逐步步入“后摩尔时代”，硅光产业链逐步完善，硅光子技术作为平台型技术，其高速率、高集成度、低成本、低功耗、小型化等特点逐步凸显，正被广泛应用于光通信、光传感、光计算等多个领域，硅光子技术正逐步迎来历史机遇期。

表2：硅光子技术多环节不断发展突破

	已取得的进展	尚需克服的难点	突破点
材料体系	12 寸 SOIGe, Sn, -V, YIG	硅基的多材料兼容生态系统, Silicon+	针对硅基光电子器件的 SOI 材料
硅基光源	混合集成光源	硅基单片集成光源隔离器/环形器	量子点激光器
无源器件	各种无源功能器件	超低损耗波导, 统一标准工艺/温度/偏振不敏感器件 g	波导&器件标准化
高速调制	高速硅基调制器(>50G)	高效率、大带宽, 小尺寸, 低功耗	新的调制材料或机理
高速探测	Ge/Si 探测器	波导型 APD、单光子探测 PD、大饱和功率 PD	SiGe 材料及器件的协同设计
耦合封装	Grating Coupler/Inverted Taper	高效率被动耦合自动化、低成本封装	设备自动化新技术, 如:PWB
集成技术	多种集成方案(前端、后端、混...	CMOS 兼容的光电单片集成(材料、工艺、设计兼容性)	产业驱动 CMOS 工艺线对硅光工艺和新材料兼容

资料来源：易飞扬通信官网、开源证券研究所

从产品应用来看，数据中心可能是硅光子大规模应用的首选场景。硅光子技术在光通信、光传感、光计算等领域有着较强的应用潜力，特别是作为光通信技术，有望充分受益于 AIGC 的发展，硅光子技术在数据中心的芯片侧的 OIO、设备侧 CPO、设备间光模块以及数据中心间的相干光通信都有望迎来进一步发展，市场前景广阔。

图17：硅光应用场景不断拓展



资料来源：中国通信学会《硅基光电子集成技术前沿报告（2020年）》

光通信方面，目前硅光产品主要应用在数据中心和相干传输两个领域，在数通市场，随着 AI 快速发展带来高速光模块的大量需求和加速迭代，降本降耗的需求也在逐步提升，同时传统光模块的头部供应商加速硅光领域布局，硅光光模块有望迎来加速突破，另一方面，硅光正成为交换机侧 CPO 与 C2C 侧 OIO 中的核心技术；在电信市场，相干模块和全光网络 ROADM 系统；

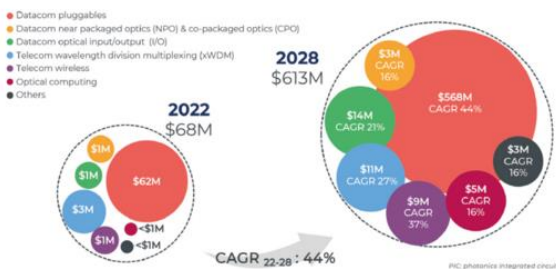
光传感方面，在激光雷达降本量产的需求下，硅光固态激光雷达或成未来发展方向；另一方面硅光在生物医疗、可穿戴设备等消费电子领域也有着较大应用潜力；

光计算方面，硅光高度契合光经典计算和光量子芯片技术需要，有望成为 AI 神经网络、量子技术的技术平台。

总的来看，硅光子技术正迎来产业机遇期，市场前景广阔。根据 Yole Group 的《2023 年硅光子技术》估计，2022 年硅光子 PIC 市场价值为 6800 万美元，预计 2028 年将超过 6 亿美元，2022-2028 年复合年增长率为 44%(CAGR2022-2028)。

图18：硅光市场前景广阔

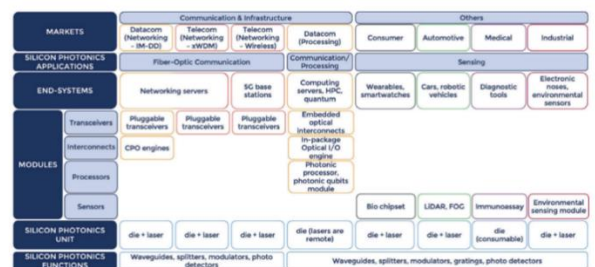
2022-2028 silicon PIC dies revenue growth forecast by application
(Source: Silicon Photonics 2023, Yole Intelligence, November 2023)



数据来源：讯石光通信网

图19：硅光应用领域广泛

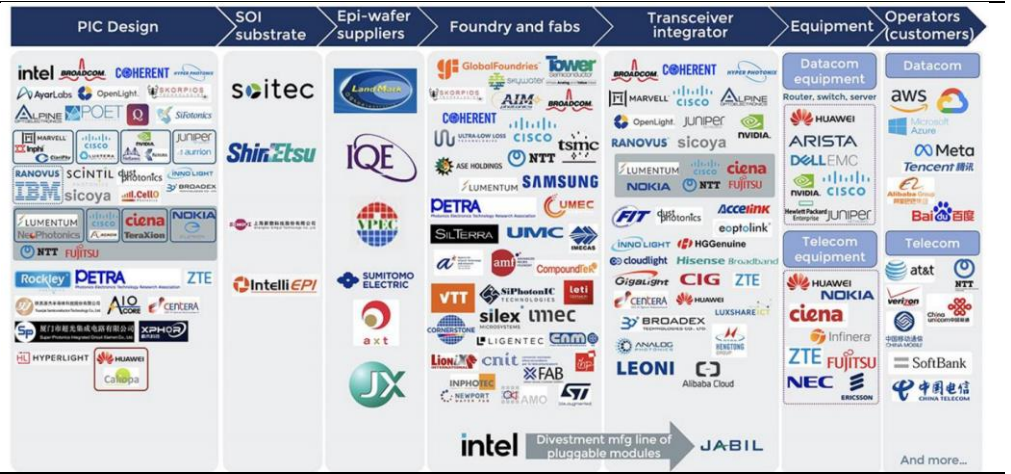
2023 SILICON PHOTONICS MARKET AND APPLICATIONS OVERVIEW
(Source: Silicon Photonics report, Yole Intelligence, 2023)



资料来源：讯石光通信网

从产业链来看，硅光产业链不断完善。目前，硅光子技术产业仍在发展，产业链不断构建，已初步覆盖了前沿技术研究机构、设计工具提供商、器件芯片模块商、Foundry、IT企业、系统设备商、用户等各个环节。

图20：硅光产业链不断完善



资料来源：Yole

从发展模式来看，全球企业积极推动硅光子技术发展。2010年左右，硅光子技术的研发体制开始由学术机构推进转变为厂商主导。硅光子技术主要有以下几种发展模式：一是国家项目支持，如美国2014年发布“国家光子计划”，出资打造集成光子工艺研究院，随后在2015年投资6.1亿美元成立集成光子学创新机构AIM Photonics，组织产业链各环节共同打造标准化的集成光子平台。全球其他相关研究项目和机构，如欧盟Leti硅光光模块量产研究计划等。二是Intel、IBM等IT巨头的投入，Intel、IBM从2003年左右开始致力于硅光子技术研究，进行了长期、巨额投入。三是小型初创公司早期靠风险资金进入，后期被大企业并购再持续投入，该模式已成为硅光子的一种重要发展模式。四是一些新崛起的初创公司，如Acacia、SiFotonics等。

表3：海内外企业积极布局硅光子技术

厂商名称	发展现状
Marvell	公司2020年收购Inphi，基于Inphi前几代COLORZ光学模块技术基础，于2024年发布其最新的硅基光电子平台。同年在OFC上展示3D硅光(SiPho)引擎，具有32通道200G电气和光学接口，能以多太比特的速度连接下一代人工智能(AI)集群和云数据中心
Lumentum	作为全球领先的光学元件供应商，公司2023年收购中国香港光模块制造商Cloud Light Technology(云晖光电)，2024年在OFC上推出1310nm DFB激光器，该激光器专为共封装光学器件(CPO)和硅光子800G和1.6T收发器应用而设计
SiFotonics	作为最早开始探索硅光子技术的公司之一，目前已在数据中心硅光PIC及光引擎、硅光相干PIC及组件等方面推出400G/800G硅光集成发射芯片、硅光IC-TROSA等多种产品。2024年在OFC上展示了其研发和量产应用于800G/1.6T AI/DC，100G/400G/800G相干和25G/50G PON的全系列硅光新产品
Sicoya	2024在OFC上展示了400G/800G/1.6T硅光产品及单通道200G硅光方案
Cisco	公司先后收购Lightwire、Luxtera、Acacia等三家硅光公司深度参与硅光子技术布局，其中Luxtera在2015年就已发布100G-PSM4硅光子芯片，是最早推出商用级硅光集成产品商之一；Acacia是首家提出将硅芯片作为多个离散光子功能集成平台的相干模块供应商，2024年推出硅基800G相干可插拔产品，其基于Delphi DSP的可插拔模块预计于2024年第二季度上市。Cisco与Inphi合作推出51.2Tb/s交换机，并在2023年OFC上展示了基于硅光子的CPO路由器和800G硅光光模块
Juniper	公司2016年收购Aurrion以发展硅光业务，在2019年OFC上推出基于硅光子技术的100G QSFP28和400G QSFP-DD封装的两款光模块，2022年与Synopsys建立开放的硅光子学平台
Ciena	公司2016年收购TeraXion的高速InP和硅光子技术以及相关专利，2023年推出

	WaveLogic 6, 采用 3nm CMOS、高带宽硅光子学和基于磷化铟的电子光学等先进技术	
AMD	公司 2022 年完成对赛灵思的收购, 与 Ranovus 联合发布基于硅光引擎的 CPO 器件, 在硅光子集成领域有申请相关专利	
TSMC	公司携手博通、英伟达等大客户共同开发硅光子及共同封装光学元件, 已组建由约 200 名专家组成的专门研发团队, 专注于利用硅光子技术开发未来芯片。公司硅光工艺平台已由 COUPE 升级成 COUPE 2.0	
NVIDIA	公司 2020 年完成对 Mellanox 的收购, Mellanox 曾收购硅光子器件公司 Kotura, 具备较强的技术积累; 2022 年, 公司与 Ayar Labs 合作开发将硅光互连用于 GPU 与 NVSwitch 之间的数据传输。公司和台积电进行合作以研发硅光子技术	
Intel	2023 年公司剥离硅光光模块部门, 由 Jabil 承接相关业务, 保留硅光芯片部门。2024 年在 OFC 上展示了硅光子学 Tx 和 Rx Ics。公司基于硅光子技术网络平台, 目前已在光学收发器领域推出 400G FR4 QSFP-DD、200G FR4 QSFP56、100G DR/FR/LR QSFP28 等多款产品并已实现批量出货	
Coherent	2023 年推出高功率 CW DFB 激光二极管, 为传输容量介于 400G 到 1.6T 的硅光子收发器提供支持	
Broadcom	2024 年向客户交付了业界首款 51.2Tbps 共封装光学(CPO)以太网交换机。该产品将八个基于硅光子的 6.4-Tbps 光学引擎与博通同类最佳的 StrataXGS Tomahawk5 交换芯片集成在一起。同年于 OFC 上展示了基于 200G 硅光子调制的 CW 激光器	
中际旭创	2022 年全球光模块厂商中排名第一, 在硅光领域研发和布局多年, 目前已推出了搭载自研硅光芯片的 400G 和 800G 硅光光模块; 2023OFC 上展示其基于 5nm DSP 和先进硅光子技术的第二代 800G 模块; 2024 年在 OFC 上演示面向人工智能和数据中心应用的 800G/1.6T 硅光高性能强度调制直检和相干检测光模块解决方案	
新易盛	2022 年收购 Alpine, 深入参与硅光光模块以及硅光子芯片技术的市场竞争; 2024 年在 OFC 展示其 800G OSFP DR4 LPO, 收发器采用硅光子学 PIC, 以 200Gb/s 的速度传输 4 个并行通道	
华为	2012、2013 年陆续收购英国光子集成公司 CIP 和比利时硅光子公司 Caliopa, 2019 年后累计投资包括熹联光芯微源光子、长光华芯、芯视界在内的 10 余家光芯片产业链相关企业	
华工科技	2024 年在 OFC 上正式推出 1.6T-200G/λ 高速硅光光模块方案, 采用了自研的单波 200G 硅光芯片, 并且与薄膜铌酸锂调制器和量子点激光器兼容	
罗博特科	公司 2020 年参股 ficonTEC 进入光模块设备领域, 目前正着手收购 ficonTEC 全部股份, 以提供高速硅光光模块封装与测试设备, 在硅基光芯片方面可提供镜检、测试及贴装设备	
光迅科技	2018 年联合研制成功 100G 硅光收发芯片并于 2020 年实现量产; 2024 年 OFC 上联合思科成功推出 1.6T OSFP-XD 硅光光模块	
国内	博创科技	2018 年联合研制成功 100G 硅光收发芯片并于 2020 年实现量产; 2024 年 OFC 上联合思科成功推出 1.6T OSFP-XD 硅光光模块
赛丽科技	公司 2021 年成立, 以化合物半导体材料为基础, 利用硅基 CMOS, MEMS 平台和 Chipllet, TSV 等先进封装技术实现光电芯片高度集成, 产品广泛应用于汽车电子, 高速数据通信, 生物传感器等。目前已推出基于硅基 CMOS 兼容的调制器以及 5DIPS 光引擎	
猎奇智能	2024 年 OFC 上, 公司展示了其 800G 硅光光模块封装工艺设备, 其 HP-EB3300 高精度共晶贴片设备在满足常规 COC 需求之外还支持硅光应用±3 微米的高精度封装	
亨通光电	公司与 Rockley 合作布局硅光业务, 2017 年两者共同成立江苏亨通洛克利生产硅光光模块, 2020 年亨通洛克利发布第一款样品版 400G QSFP-DD DR4 硅光光模块, 2022 年发布量产版 400G QSFP-DD DR4 硅光光模块, 并且基于硅光子技术成功推出国内第一台 3.2T CPO 工作样机	
熹联光芯	2021 年完成对 Sicoya 的并购, 并基于 Sicoya 硅光子技术自主设计研发了 400G QSFP-DD ZR、800G OSFP DR8、800G OSFP 2xFR4 等光模块产品以及 400G DR4、800G 2*FR4 硅光引擎, 主要应用于以太网、数据中心及云计算等	
阿里云	公司与 Elenion、海信宽带在硅光领域深入合作, 2019 年推出基于硅光子技术的 400G DR4 光模块, 但公司主要从网络系统角度研究和规划模块技术, 并不擅长基础器件的生产	

资料来源: 各公司官网、讯石光通信网、开源证券研究所

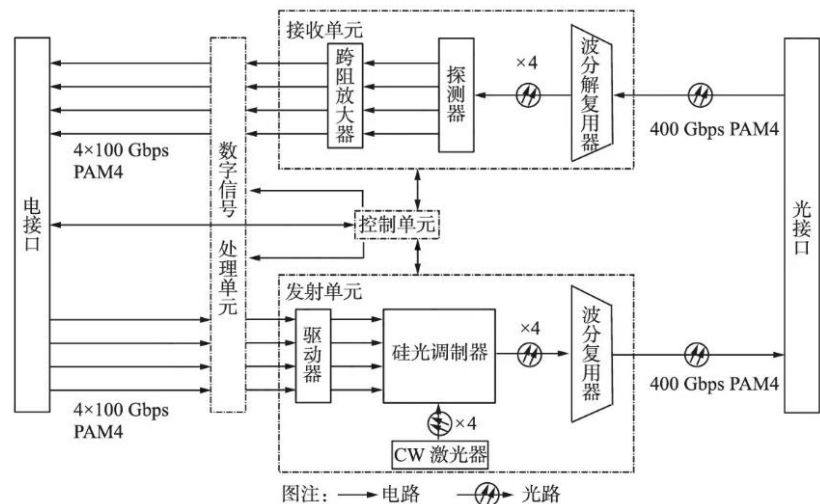
2、AI 高速光通信时代，硅光子优势逐步凸显

2.1、1.6T 高速光通信时代提速到来，硅光光模块或迎产业加速期

硅光光模块具有高集成度、低功耗、低成本、小型化等优点。硅光光模块与传统光模块相比，其工作原理基本相似，主要区别集中于基于 CMOS 制造工艺进行硅光芯片集成所带来的器件和技术差异。

(1) 从原理架构来看，在实际光模块应用中，硅光光模块主要由控制单元、数字信号处理单元、发射单元以及接收单元几大功能模块组成。**数字信号处理单元**通过数字信号处理芯片（DSP）来对抗于补偿信号失真，降低系统误码率；**发射单元**采用硅光子技术方案，区别于传统 EML 方案，目前硅光方案中光源和调制器分开，激光器负责出光，硅光调制器负责调制光信号，实现电/光信号转换；接收单元主要由波分解复用器、探测器和跨阻放大器构成，探测器将波分解复用器分束过后的多路高速光信号转换为高速电流信号，再经过跨阻放大器（TIA）处理放大，输出至数字信号处理单元；**控制单元**使用微控制单元（MCU）芯片对模块内各电芯片寄存器进行读写，实现对模块的诊断和监控。

图21：硅光光模块与传统光模块原理架构基本相似

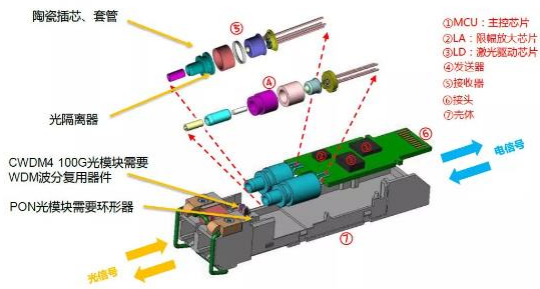


数据来源：宋泽国等《400G FR4 硅光收发模块的研究》

(2) 从器件方案来看，不同于传统光模块的分立式结构，目前在实际硅光光模块中，除激光器外，大部分已实现了多种光电器件的硅基集成，如各种硅基无源器件（波导、合分波器）、锗硅探测器、硅调制器等。

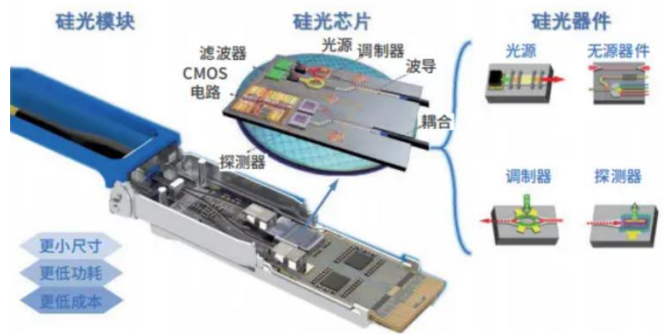
其中**激光器部分**，目前硅光光模块多采用外置 CW 激光器，一方面较 EML 激光器芯片可获得成本上的优势，另一方面外置激光器方案与硅光芯片的耦合带了新的挑战；**调制器部分**，随着光模块速率提升，不同于 EML 方案中的 EA 调制，硅光光模块多采用 MZM 方案，可更为方便地通过增加通道数来提高带宽，或带来工艺和成本上的优势；**其他无源器件部分**，除隔离器和连接器外，硅光芯片替代了大部分传统光模块中的无源器件，传统器件中的透镜和大型组件都被取代，陶瓷、铜等材料用量大幅降低，晶圆、硅光芯片等电子材料占比提升，价值向硅光芯片、硅光引擎转移，整体有望进一步实现工艺简化和成本控制，同时硅光器件更高的集成密度带来了芯片尺寸的大幅缩减，相较于传统光模块具备小型化优势。

图22：传统光模块采用分立式结构



资料来源：中科院微电子研究所

图23：硅光光模块实现多种光电器件的硅基集成



资料来源：徐芳露等《硅光芯片-后摩尔时代的高速信息引擎》

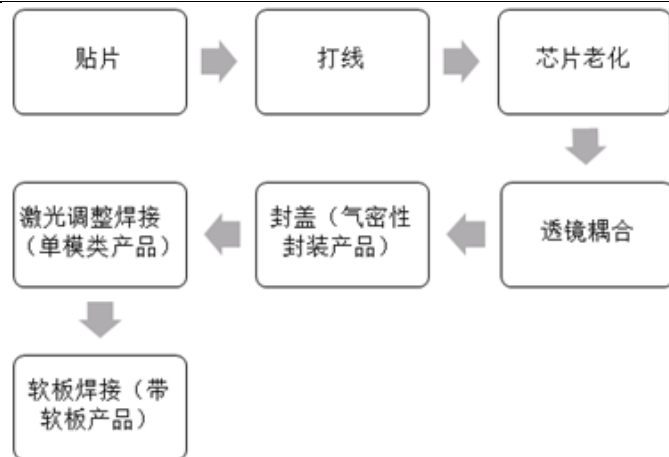
(3) 从工艺制造来看，硅光芯片技术较为成熟，从芯片到光模块，但封装工艺上仍存在较多技术难点，封装良率和成本仍有待优化。

传统分立式光模块的制造过程中需要依次封装电芯片、光芯片、透镜、对准组件、光纤端面等器件，部件物料多，工序较为复杂，封装过程自动化率较低，测试中需要手工将光模块一个个进行对准耦合测试，需要投入较多人工成本，但整体工艺成熟度较高；

目前基于硅光工艺已经能够加工芯片级器件，可以利用传统半导体产业非常成熟的硅晶圆加工工艺，在硅基底上利用蚀刻工艺可以快速加工大规模波导器件，利用外延生长等加工工艺，能够制备调制器、接收器等关键器件，最终实现将调制器、接收器以及无源光学器件等高度集成，硅光芯片体积大幅减小，材料成本、芯片成本、封装成本均有望进一步优化，同时可以通过晶圆测试等方法进行批量测试，测试效率有望提升，但各主流厂商的设计和工艺路线存在多种技术路线，尚未形成统一的方案形成主流技术聚焦，从而更大程度的发挥 CMOS 工艺的规模效应，进而实现成本和良率的持续优化；

硅光光模块封装难度大，良率低，其中硅光接口封装处于初期阶段，主要瓶颈在于光电子芯片和光纤阵列组建的光接口封装，其对准与封装的精度要求高，封装效率低，现阶段的封装技术难以实现高质量，低成本的封装，产品良率限制了硅光光模块的大规模量产；此外，硅光芯片可获得量产化资源少，尽管硅光芯片与 CMOS 工艺兼容，但成熟的 CMOS 资源不对外开放或者没有硅光流片经验。

图24：传统光模块生产关键工序

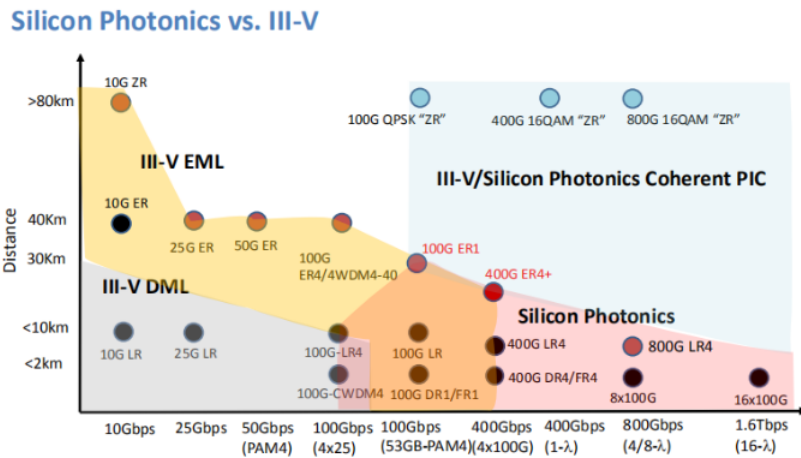


资料来源：光纤在线官网

(4) 从产业链角度来看，目前硅光产业主要包括三大类器件产品：硅光器件、硅光芯片和硅光光模块。其中，硅光器件、硅光光模块与传统光模块产业链相似。而硅光芯片则是作为高度集成的单芯片而非传统的分离多器件组合，因此主要在芯片产业链上有所差异。

总的来说，从应用场景来看，在不同速率和距离的与传输距离下，硅光子技术相比 III-V 器件竞争优势有演进的过程。在单通道波特率低于 25G，短距离传输 (<10km)，III-V DML(直调激光器)的性价比较优；随着传输速率及距离增加，EML 因其优异高速调制频响，低驱动电压，低啁啾，成为主要光电器件，特别是单通道速率到 50G 波特率以上。随着大数据中心对联结带宽的不断升级，多通道技术成为必须，高集成高速硅光芯片成为性价比更优越的选项。目前出货的硅光光模块产品主要分为两大类：短距离数据中心光模块；中长距离的电信相干模块。

图25：硅光子技术较 III-V 器件更适用于高速场景

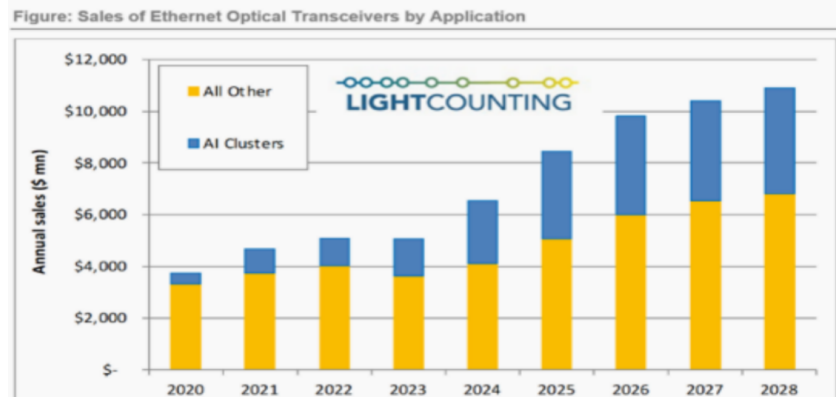


数据来源：讯石光通信网

2.1.1、数通市场：1.6T 高速光模块时代加速到来，硅光渗透率有望提升

从市场需求来看，数据中心及电信市场的硬件设备需求增长与技术升级持续促进光模块市场发展，其中 AI 的快速发展进一步拉动算力需求，光通信网络是算力网络的重要基础和坚实底座，光模块作为光纤通信中负责实现电/光信号转换的核心组件，整体光模块产业链有望充分受益 AI 算力发展。根据 Lightcounting 预测，2024-2028 年，用于人工智能集群的以太网光模块销售总额将达到 176 亿美元。

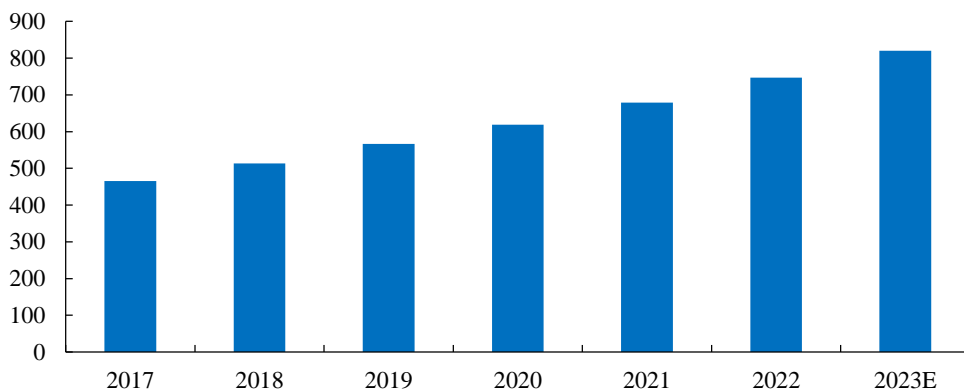
图26：以太网光模块市场规模有望不断增长



数据来源：Lightcounting

全球数据中心市场规模稳步上涨。近年来，由于物联网、云计算、人工智能等技术的发展，数据中心成为企业存储、处理和管理大量数据的关键基础设施，加之全球范围内包括视频流媒体、社交媒体、电子商务等用户对于在线服务和内容的需求不断增加，驱动全球数据中心规模扩张。根据中国信通院数据，2017-2021 年全球数据中心市场规模从 465.5 亿美元增长至 679.3 亿美元，五年内的年均复合增长率为 9.91%，预计 2023 年全球数据中心市场规模将进一步增至 820.5 亿美元。据 IDC 预测，2025 年，全球数据量有望达到 175ZB。

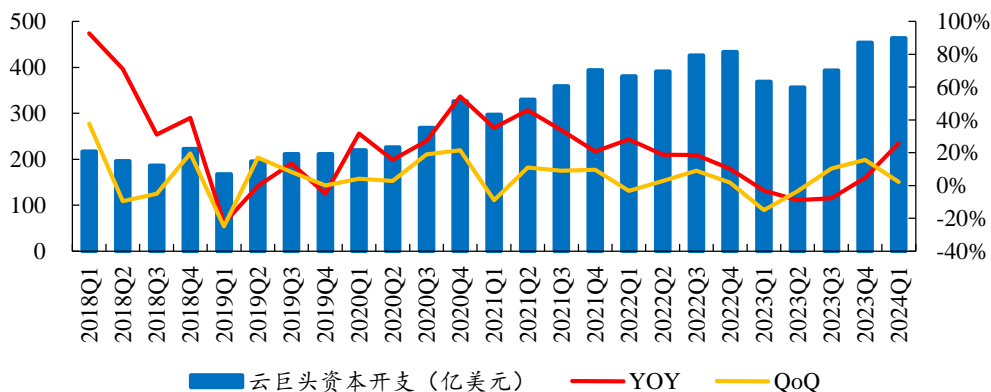
图27：全球数据中心市场规模稳步上涨（亿美元）



数据来源：中国信息通信研究院、开源证券研究所

海外云巨头高度重视人工智能投入。据 Dell'Oro 统计数据，2022 年全球数据中心的资本支出增长了 15%，到 2026 年全球数据中心资本支出预计将达到 3,500 亿美元。2024Q1 海外五大云巨头（亚马逊、谷歌、苹果、微软、Meta）资本开支为 463 亿美元，同比增长 25.7%，环比增长 2.1%。同时，这些公司均表示将继续加大对 AI 领域的投资力度，如亚马逊加速基础设施投入以支持 AI 持续发展，持续迭代训练 Llama 等，力求保持 AI 的领先地位；谷歌在 2024 年 2 月发布了 Gemini 1.5 Pro，构建了如 Gemma 开放模型、Imagen 视觉等模型，并持续投入 AI 基础设施建设，已发布第五代 TPU 以及自研 Axion CPU 以支持下一代 AI 发展；微软预计资本开支将持续大幅增长，持续扩大 AI 基础设施以支持云需求的增长，其 Azure AI 保持用户量和单用户支出双增长，Azure Arc 已有 3.3 万用户，同比增长 1 倍以上，Copilot 已在约 2.25 亿 Windows 10 和 11 电脑上应用，环比增长 1 倍以上。

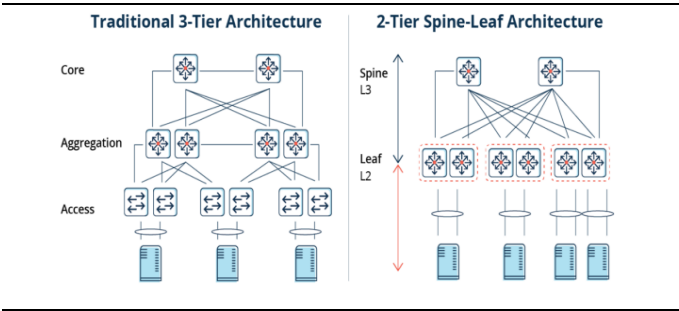
图28：2024 年 Q1 海外云巨头（亚马逊、谷歌、苹果、微软、Meta）资本开支同比增长（亿美元）



数据来源：Wind、开源证券研究所

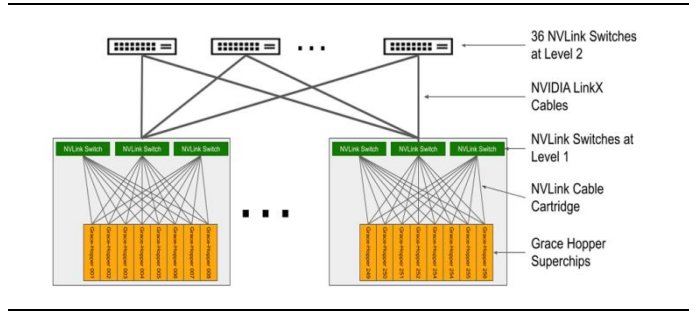
数据中心网络架构升级拉动光模块需求上升。（1）云计算需求推动网络架构迭代升级。传统数据中心计算网络逐步向 Spine-Leaf 数据中心网络架构转变。由于 Spine-Leaf 数据中心网络架构连接端口众多，信息传递中使用的光模块数量随之提高，传统三层数据中心网络架构所需光模块数量约为机柜数的 9 倍，而 Spine-Leaf 网络架构下光模块数量约为机柜数的 44 至 48 倍。（2）DGX GH200 驱动 800G 光模块市场需求扩张。英伟达发布的 DGX GH200 超级计算机中引入 NVLink 与 NVLink Switch 方案，搭载 256 颗 Grace Hooper 超级芯片，每台 NVLink Switch 交换机含有 32 个 800G 接口，铜线方案下两层 Fat-Tree 拓扑结构中第一层并不涉及光模块的使用，第二层中 36 台交换机共需 $36 \times 32 \times 2 = 2304$ 颗 800G 光模块；综上所述，256 个 GH200 与 800G 光模块对应数量关系为 1: 9。

图29：传统三层网络架构向 Spine-Leaf 架构转变



资料来源：Aruba

图30：DGX GH200 驱动 800G 光模块需求



数据来源：NVIDIA

整体来看，光模块向着高速率、低成本、低功耗的方向发展，硅光光模块或迎发展机遇：

（1）数据中心高速率光模块加速发展。自 2019 年后全球数据中心产业开始步入算力中心阶段，根据 Cisco 数据，2010-2022 年全球数据中心网络交换带宽提升了 80 倍，特别是近期 AIGC 的快速发展带来网络架构的升级和 GPU 的加速迭代，进一步带动设备间更高的带宽需求，从光模块带宽需求来看，目前已进入 800G 光模块的放量阶段，从数据中心交换芯片的演化角度来看，目前进入每两年翻一番的快速增长阶段，预计 2025 年有望实现 102.4T 的容量，对应 1.6T 光口，进一步加速 1.6T 光模块升级。

（2）高速光通信时代降本降耗需求凸显。根据 Cisco 数据，2010-2022 年全球数据中心的网络交换芯片功耗提升约 8 倍，光模块功耗提升 26 倍，交换芯片 SerDes 功耗提升 25 倍。随着高速率光模块进一步放量，传统可插拔光模块方案的成本及功耗不断增加，降本降耗的需求不断提升，相较于传统光模块方案，硅光、LPO、CPO 等技术方案或迎来发展机遇期。

图31：交换机密度每两年翻一番



资料来源：菲魅通信官网、开源证券研究所

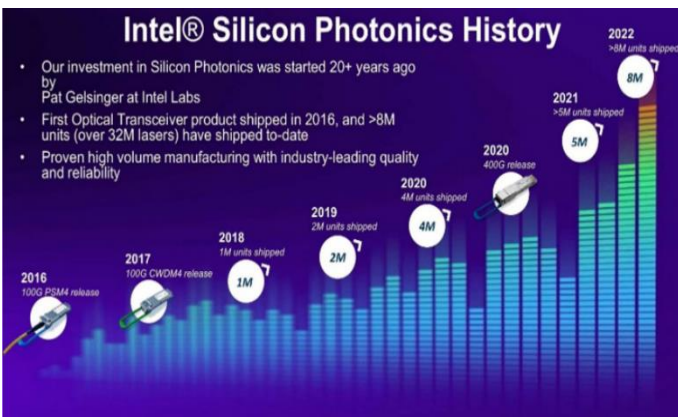
图32：光模块功耗随着速率的提升大幅增长

应用场景	封装方式	速率		功耗
		速率	速率	功耗
数据中心	ZR-DCI	400G (2022)	800G (2024)	10-12W
		1600G (2026)	3200G (2028)	15-18W
		400G (2022)	800G (2024)	20-24W
		1600G (2026)	3200G (2028)	35-40W
		400G (2022)	800G (2024)	16-20W
		1600G (2026)	3200G (2028)	20-24W
	ZR++	400G (2022)	800G (2024)	30-36W
		1600G (2026)	3200G (2028)	TBD
		400G (2022)	800G (2024)	20-24W
		1600G (2026)	3200G (2028)	30W
		400G (8x50G)	800G (8x100G)	40W+
		1600G (8x200G)	3200G (16x100G)	TBD
封装方式	QSFP-DD	400G (8x50G)	800G (8x100G)	25W
		1600G (8x200G)	3200G (16x100G)	33W
		400G (8x50G)	800G (8x100G)	33W
	OSFP-XD	1600G (16x100G)	3200G (16x200G)	40W
		400G (8x50G)	800G (8x100G)	33W
		1600G (16x100G)	3200G (16x200G)	40W

数据来源：菲魅通信官网、开源证券研究所

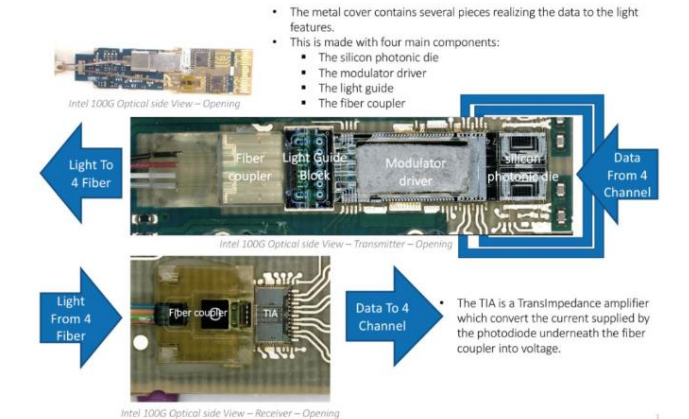
从供给端来看，硅光子技术逐步进入主流光模块市场。Intel 2016 年推出 100G PSM4 QSFP28 硅光光模块，该款硅光光模块包含两个独立的模块，每个模块拥有多颗芯片。拆解其中的发射器，我们可以发现：以倒装芯片形式，通过键合技术将多个 InP 激光器和 CMOS 芯片集成在主硅片上。硅基 PIC 芯片包含 4 个 MZM，同时使用一个激光器作为光源给 4 个调制器供直流光，PIC 芯片同时集成锗硅光探测器（PD），并一般把 4 进 4 出的 8 个光纤接口做成光栅耦合阵列和光纤阵列块一次性耦合，减少封装步骤。2016 年-2017 年 100G PSM4 和 CWDM4 光模块实现量产，英特尔在 2018 年获得了可观的市场份额，并使硅光子技术获得其他竞争者的重视。但受限于硅光集成整体产业化水平不高，晶圆级测试产业链尚不成熟，硅光芯片良率较低，硅光子方案较传统分立光模块方案优势较小，在 200G、400G 时代硅光光模块尚未形成规模化应用。2023 年，英特尔在业绩说明会上表示将剥离可插拔光模块业务，后续由 Jabil（捷普）接管。

图33: Intel 引领 100G 硅光数通光模块大规模商用



资料来源: Lightcounting

图34: Intel 100G PSM4 QSFP28 结构示意图



数据来源: 中科院微电子研究所

全球企业积极布局硅光子技术，硅光赛道并购频频。传统通信设备巨头及各类细分行业有竞争力的企业积极布局硅光子技术，国外企业如 Intel、Acacia 等均已推出多款基于硅光子技术的器件产品并率先实现量产，Cisco 于 2012 年、2018 年、2019 年共出资 35.31 亿美元先后收购了 Lightwire、Luxtera、Acacia 三家知名硅光公司，诺基亚于 2020 年收购 Elenion，Lumentum 于 2023 年收购云晖光电，整体上仍处于领先地位；国内企业则普遍较晚进入该领域，主要通过并购或与外企协作的模式来切入硅光市场，如华为于 2012 年、2013 年先后收购了 CIP Technologies 和比利时硅光厂商 Caliopa，熹联光芯于 2021 年完成对德国 Sicoya GmbH 并购，新易盛于 2022 年收购 Alpine。

表4: 硅光赛道并购频频

厂商	并购时间	被并购公司
思科 (Cisco)	2012 年	Lightwire
	2018 年	Luxtera
	2019 年	Acacia
华为	2012 年	CIP Technologies
	2013 年	Caliopa
Juniper	2016 年	Aurrion
诺基亚 (Nokia)	2020 年	Elenion
熹联光芯	2021 年	Sicoya GmbH
新易盛	2022 年	Alpine
Lumentum	2023 年	Cloud Light

资料来源: 新浪财经、Lumentum 官网、开源证券研究所

国内光模块企业加速硅光光模块研发，高速时代硅光光模块或迎规模应用转折点。目前 800G 光模块已在全球范围内逐步进入商用部署阶段，2021 年 12 月 13 日，1.6T 光接口 MSA 产业联盟宣布成立，宣告 1.6Tb/s 光模块或将成为全球竞争的下一个热点。国内光模块公司如中际旭创、光迅科技、新易盛、华工科技、博创科技、剑桥科技、铭普光磁、亨通光电陆续推出 400G/800G 硅光光模块产品，在 OFC2024，中际旭创演示面向人工智能和数据中心应用的 800G 和 1.6Tbps 硅光光模块解决方案；光迅科技联合思科推出 1.6T OSFP-XD 硅光光模块；新易盛的 800G OSFP DR4 LPO 模块采用 4 通道 200Gb/s 的硅光子集成芯片；博通演示用于 200G 硅光子(SiPh)调制的高效高线性连续波(CW)激光器；SiFotonics 展示最新研发和量产应用于 800G/1.6T AI/DC, 100G/400G/800G 相干和 25G/50G PON 的全系列硅光新产品；Sicoya 展示了 400G/800G/1.6T 硅光产品及单通道 200G 硅光方案；猎奇智能参展交流 800G 硅光光模块封装工艺设备。

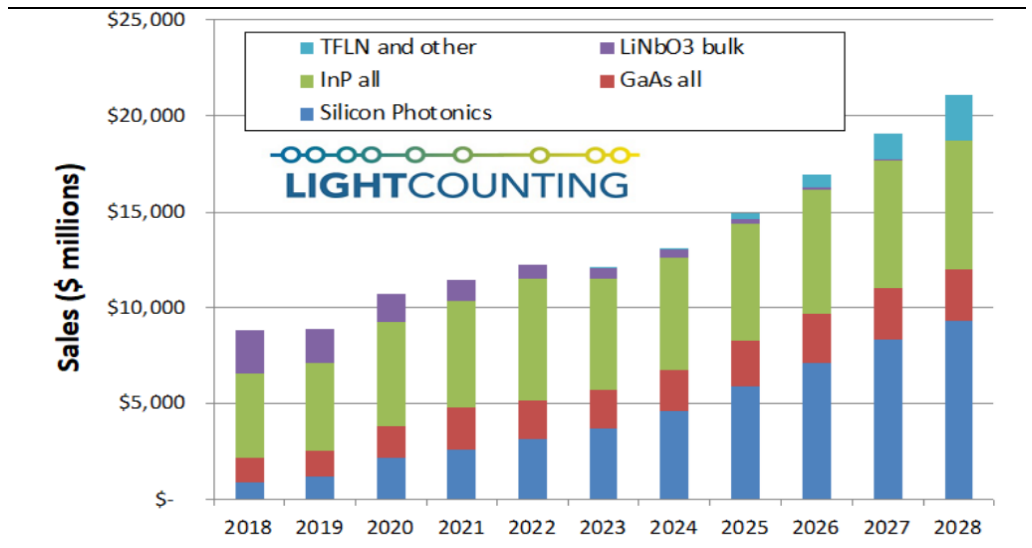
表5：国内光模块公司积极推进硅光光模块应用

上市公司	硅光光模块布局简介
中际旭创	2022 年全球光模块厂商排名第一； 已推出搭载自研硅光芯片的 400G 和 800G 硅光光模块； 800G 硅光光模块目前处于送测阶段；
光迅科技	2022 年全球光模块厂商排名第五； 200G/400G/800G 硅光芯片及硅光光模块已具备量产能力； 已展示与国家信息光电子创新中心等联合推出的 1.6Tb/s 硅光芯片；
华工科技	2022 年全球光模块厂商排名第八； 已成功自研 400G 和 800G 的硅光芯片； 800G 硅光光模块于 2022 年第三季度正式推向市场；
新易盛	2022 年全球光模块厂商排名第七； 产品已涵盖基于硅光解决方率的 800G、400G 光模块产品；
博创科技	400GDR4 硅光光模块已经批量出货，正在研发 800G 硅光光模块；
剑桥科技	400G 硅光光模块已通过了部分客户验证，800G 硅光产品正在客户测试中；
铭普光磁	自研的硅光 800GDR8 硅光光模块已通过行业通用的示波器检测；
亨通光电	OFC2023 现场展示基于最新硅光方案的 400GDR4 硅光光模块，目前处于客户测试认证阶段，同时正在研发 800G 硅光光模块。

资料来源：财联社、开源证券研究所

一般认为硅光子技术与传统分立技术之间的成本平衡在 400G，随着光模块向 800G 及更高速率演进，受制于传统光芯片的价格和供货能力等问题，硅光子的成本优势有望逐渐显现，短期内 400G、800G 硅光光模块市场份额有望得到提升，同时长期来看，我们认为随着硅光子技术及整体产业链的进一步成熟，硅光光模块规模有望进一步扩大，特别是在 1.6T、3.2T 等高速时代，硅光光模块低成本、多通道大带宽的技术优点有望得到进一步凸显，硅光光模块的渗透率有望得到进一步提升。根据 Lightcounting 的预测，光通信行业已经处在硅光子技术规模应用的转折点，使用基于硅光光模块市场份额有望从 2022 年的 24% 增加到 2028 年的 44%。据 Yole 预测，硅光光模块 2022 年市场规模约为 12.4 亿美元，2028 年市场规模有望合计达 72.4 亿美元。

图35：硅光光模块市场规模有望不断扩大

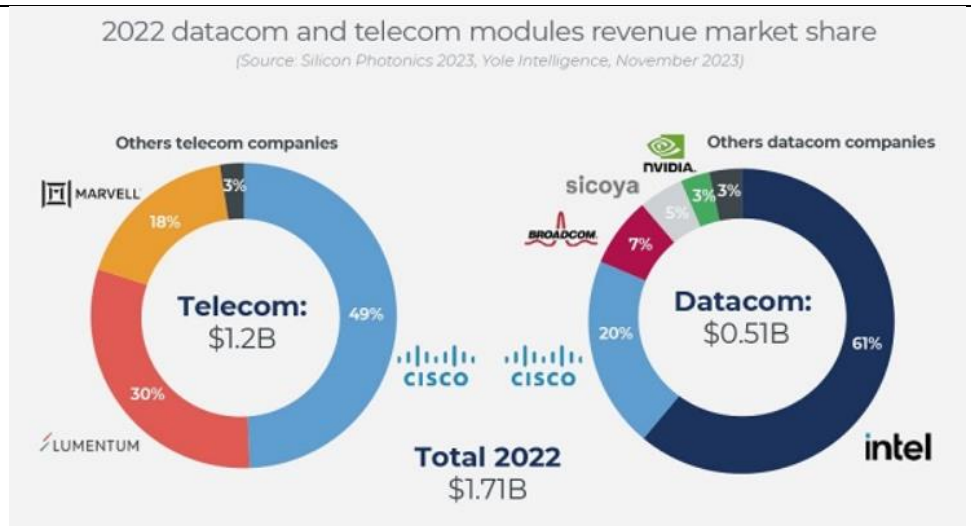


数据来源：Lightcounting

2.1.2、电信市场：相干光模块持续升级，硅光光模块需求有望得到提升

电信光模块市场前景广阔。根据 Yole 报告，电信市场作为硅光第二大应用领域，其市场规模有望从 2022 年的 400 万美元增长到 2028 年的 2000 万美元，其中思科(Acacia)占据了近 50%的市场份额，其次是 Lumentum(NeoPhotonics)和 Marvell(Inphi)，电信硅光子市场主要由相干可插拔 ZR/ZR+模块驱动。

图36：2022 年数通及电信光模块市场份额

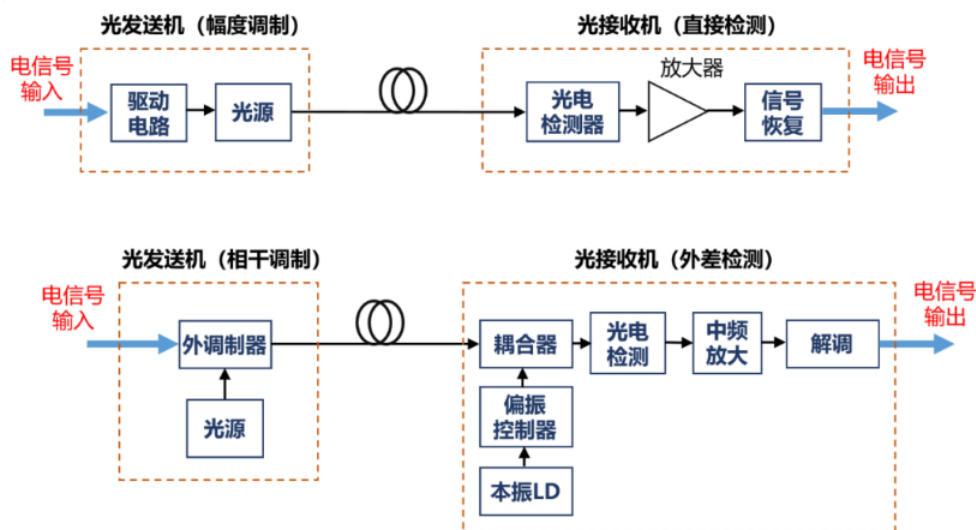


数据来源：讯石光通信网

相干下沉推动相干光模块迭代发展。相干光通信是指充分利用光纤通信的带宽，在光纤通信系统中采用外差或零差检测方式，从而显著提高接收灵敏度和选择性，具有混频增益、灵敏度高及可调性等优势。与非相干光通信相比，相干光通信更加适用于超长距离的光传输。随着单通道传输速率的提高，现代光通信领域越来越多的应用场景开始用到相干光传输技术，相干技术从过去的骨干网 (>1000 km) 下沉到城域 (100~1000km) 甚至边缘接入网 (<100km)。另一方面在数通领域，相干技术也已经成为数据中心间互联 (DCI) 的主流方案 (80~120km)。随着相干光链路用量的快速增长，相干收发单元从原先和线卡集成方式、MSA 模块逐步向

独立的、标准化的可插拔光收发模块形式演进。根据新思界产业研究中心发布的《2023-2027年相干光模块行业深度市场调研及投资策略建议报告》显示，全球相干光模块市场规模也明显增长，2022年全球相干光模块市场规模在20亿美元左右，预计到2025年将达到50亿美元左右。

图37：相干光通信基于相干调制和外差检测技术



资料来源：IT之家、开源证券研究所

目前应用于城域、骨干网络的相干光模块正在朝着高速化、小型化、低功耗、可插拔、互联互通、标准化方向发展：

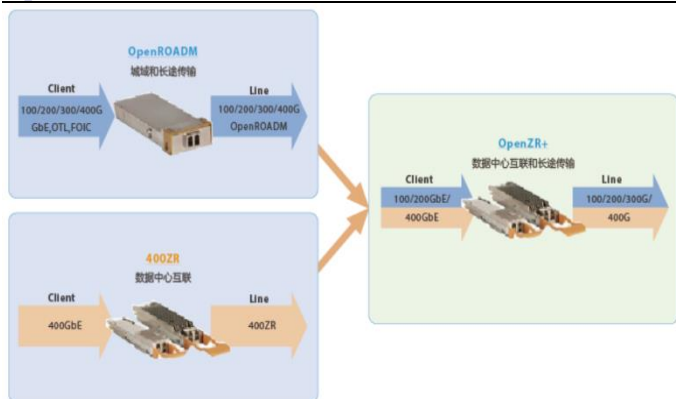
高速化：从100G/200G到400G，再向800Gbps速率演进；

小型化：从100GMSA的封装形态向CFP/CFP2DCO/ACO封装形态转变，当前又提出了400GOSFPDCO和QSFP-DDDCO等封装标准；

低功耗化：考虑整体系统功耗要求例如QSFP-DD封装的相干光模块产品功耗不能高于15W；

互联互通的标准化：传统上各设备厂家使用自行开发的专用接口板，使用私有的高阶调制方式及FEC算法，不同厂家接口之间无法互通；相干光模块的互联互通是业界正在努力的方向。

图38：400G相干技术有400ZR、OpenROADM、OpenZR+三种标准



资料来源：中兴官网

图39：OpenZR+MSA应用范围更为广阔

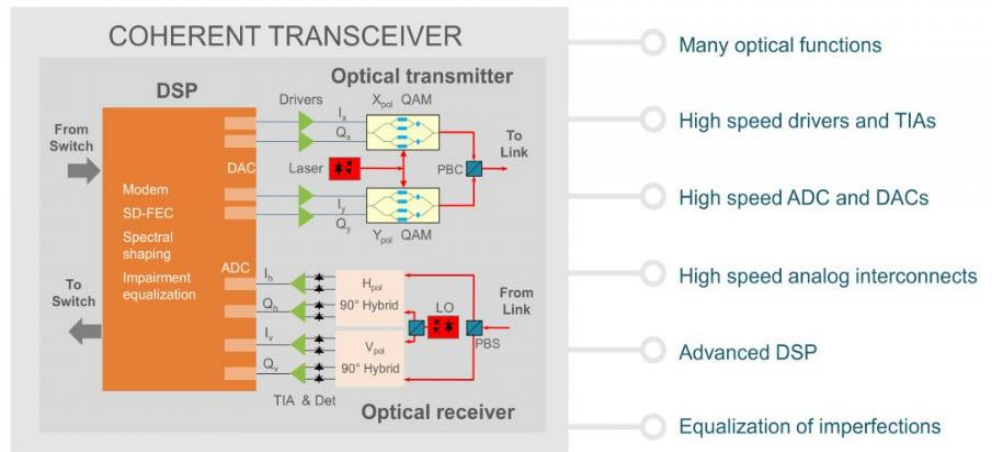
标准	OIF-400ZR	OpenROADM MSA	OpenZR+MSA
目标应用	边缘、DCI	城域、长距传输	边缘DCI&城域网
客户侧接口	仅支持400GbE	100~400GbE&OTN	100~400GbE
传输距离	<120km	>120km	>120km
封装类型	QSFP-DD/OSFP	CFP2 or other	QSFP-DD/OSFP
FEC类型	CFEC	oFEC	oFEC
模块功耗	<15W	未定义	<20W

数据来源：中兴官网

硅光相干光模块具备产量成本优势。相干光模块中的核心芯片可以分为光芯片和电芯片两大类。光芯片，包括双偏 IQ 调制、激光器、相干光混频器、平衡探测器；电芯片，包括调制器驱动器(driver)，跨阻放大器(TIA)，DSP 芯片。从芯片制造技术上来讲，现在电驱动都是基于 Si 或 SiGe 材料用 CMOS 标准工艺流程做的，核心部分 DSP 芯片由于功耗和性能的要求，需要采用比较先进的 7nm 节点工艺制程。光芯片则可以分为两大类，一类是基于 III-V 族材料如 InP 的，包括激光器，调制器，探测器(GaAs)。二是基于 Si 基的，包括 Si 基调制器，相干接收机等。

其中，InP 平台更擅长做有源器件，而硅光在无源器件集成上存在优势，从性能来看，目前 InP 要强于硅光，InP 材料具备较强的光发射能力，可以有效集成激光器，其次是光调制，InP 也具有更高的调制速率和更低的功耗。但是硅光具有大规模生产的优势，具有低成本和高可靠性的预期，在功能性、集成度和降低封装复杂度上面也更具优势。总的来看，硅光有望在硅基 ITLA、IC-TROSA、DSP 集成共封装器件等方面形成更广泛的应用。

图40：相干光模块(单盘)功能示意图

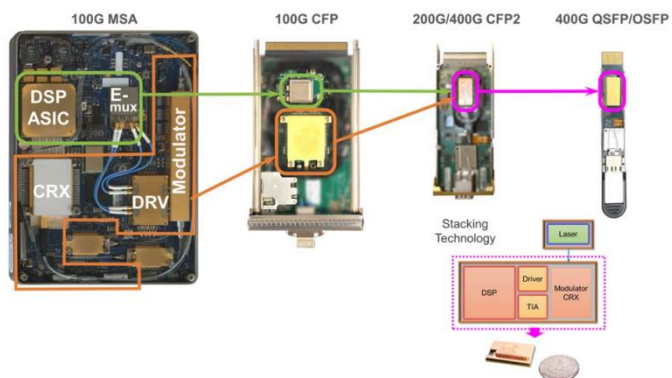


资料来源：Acacia

多厂商积极推进硅光相干光模块发展。在硅光电信应用领域，成立于 2009 年的 Acacia 是远距离硅光相干光模块的领军企业，2021 年被思科完成收购，其主要产品包括 DSP 芯片、硅光芯片，以及基于这两者的相干光收发模块，Acacia 拥有业内最广泛的经过现场验证的 400G MSA 相干可插拔产品组合，基于 Greylock DSP 交付了超过 250,000 个端口，其中包括 10,000 多个 Bright 400ZR+ 端口，2024 年推出最新硅基 800G ZR+模块支持最近发布的 OpenROADM 规范，其中包括可互操作的 PCS 传输能力。

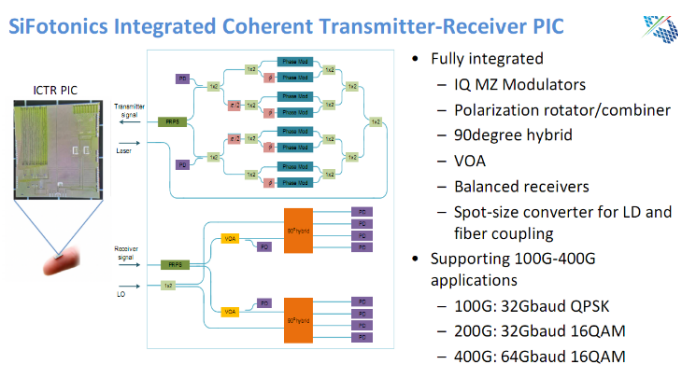
SiFotonics 已展示最新研发和量产应用于 800G/1.6T AI/DC, 100G/400G/800G 相干和 25G/50G PON 的全系列硅光新产品。Adtran 最新推出的 FSP 3000 M-Flex800 将用于跨边缘、城域和核心网络的大容量传输解决方案。昂纳科技在 ECOC 2022 上演示基于自研硅光 COSA 和 nano-ITLA 的 400G ZR 相干模块，在 OFC 2024 上，中际旭创展示搭载自研硅光芯片、Marvell Orion 相干 DSP 的 800G ZR/ZR+光模块产品。

图41: Acacia 硅光相干光模块集成度不断提升



资料来源: Acacia 官网

图42: SiFotonics 相干硅光 PIC 示意图

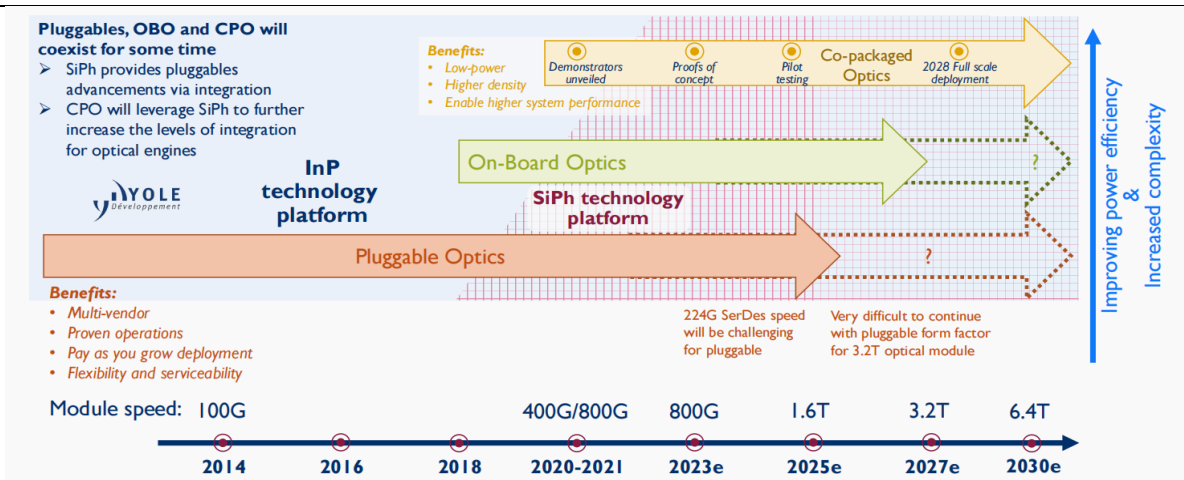


资料来源: 讯石光通讯网

2.2、CPO：硅光 CPO 或成为未来高速光通信发展方向

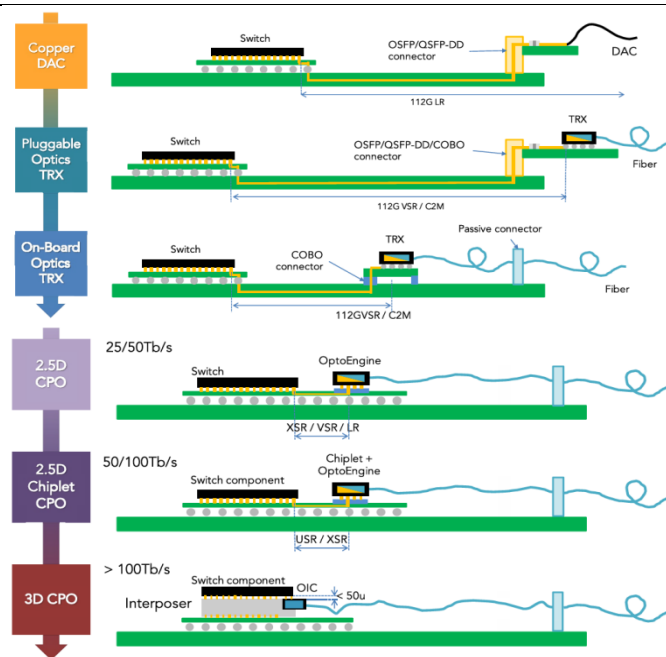
CPO 有望替代传统可插拔光模块。传统光电互连采用的板边光模块，走线较长，寄生效应明显，存在信号完整性问题，且模块的体积较大、互连密度低、多通道功耗较大。共封装技术将光收发单元与 ASIC 芯片封装在一个封装体内，通过将光子器件和电子器件封装在同一个载板上，进一步缩短了光信号输入和运算单元之间的电学互连长度，在提高光模块和 ASIC 芯片之间的互连密度的同时实现了更低的功耗。CPO 相较于可插拔光模块，带宽密度提升一个数量级，能量效率优化 40% 以上。目前基于硅基材料的光电芯片共封装技术发展最为迅速，理想情况下，CPO 可以逐步取代传统的可插拔光模块，将硅光子模块和超大规模 CMOS 芯片以更紧密的形式封装在一起，从而使系统成本、功耗和尺寸都得到进一步优化。

图43：CPO 低功耗方案或成未来发展方向



资料来源：Yole

图44：CPO 技术演化



资料来源：Cyriel Minkenberg 等《Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges》

CPO 方案众多，其中核心 PIC 多基于硅光方案。从物理结构分类，CPO 可分为 3 种技术形态：2D 平面 CPO、2.5D CPO 和 3D CPO。

2D CPO: 基于 2D 封装的 CPO 技术是将光子集成电路 PIC 和集成电路 EIC 并排放置在基板或 PCB 上，通过引线或基板布线实现互连。2D 封装的优点是易于封装、灵活性高。电子集成电路和光子集成电路都可以使用不同的材料、不同的工艺单独制作。根据芯片和基板互连方式不同，基于 2D 封装的技术发展出了基于引线键合的 CPO、基于倒装的 CPO、基于扇出型晶圆级封装技术的 CPO 3 种技术路径。

2.5D CPO: 2.5D 封装将 EIC 和 PIC 均倒装在中介层 (Interposer) 上。通过中介层上的金属互连 PIC 和 EIC，中介层与下方的封装基板或 PCB 板相连。根据所用转接板的材料不同，基于 2.5D 封装的技术发展出了基于玻璃转接板的 CPO、基于硅转接板的 CPO 和基于嵌入式多芯片互连桥接。

3D CPO: 3D 封装技术将光电芯片进行垂直互连，可以不仅能实现更短的互连距离、更高的互连密度和更好的高频性能，还能实现更低的功耗、更高的集成度和更紧凑的封装。基于 3D 封装的 CPO 技术是目前 CPO 技术研究的热点和趋势。

图45: CPO 核心 PIC 多采用硅光方案

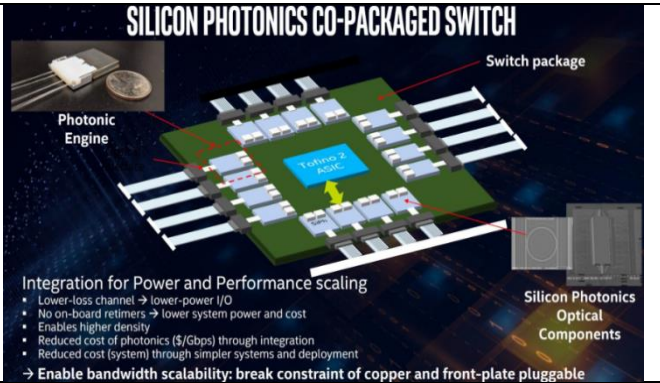


资料来源: 卞玲艳等《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》、开源证券研究所

交换机与光模块公司在积极推进 CPO 技术。在“OFC 2020”会议上, Intel 推出首款 CPO 样机, 由 1.6Tbit/s 的硅光引擎与 12.8Tbit/s 的可编程以太网交换机集成。在“OFC 2021”会议上, Ranovus 发布了 Odin 品牌模拟驱动 CPO 2.0 架构。在“OFC 2022”会议上, Marvell 展示了其首款 CPO 样机, 带宽为 1.6Tbit/s; Ranovus 基于 AMD 的 Xilinx 计算加速平台进行 CPO 2.0 的联合展示。在“OFC 2023”会议上, Broadcom 和 Marvell 分别发布了 51.2Tbit/s 的交换芯片。在“OFC 2024”会议上, Broadcom 宣布已向客户交付了业界首款 51.2Tbps CPO 以太网交换机—Bailly, 该产品将八个基于硅光子的 6.4-Tbps 光学引擎与博通 StrataXGS Tomahawk5 交换芯片集成在一起, 使光互连的功耗降低了 70%, 硅面积效率提高了 8 倍; 联发科宣布

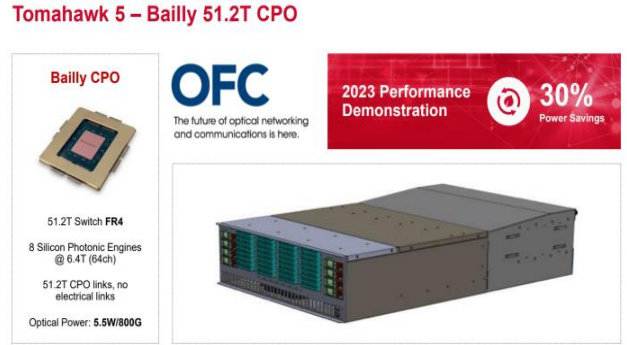
与 Ranovus 合作推出新的 CPO 解决方案；Lumentum 推出了专为 CPO 和硅光子 800G 和 1.6T 收发器应用而设计的超高输出功率 1310nm DFB 激光器。

图46: Tofino 2 2020 Gen 采用硅光引擎



资料来源: servethehome

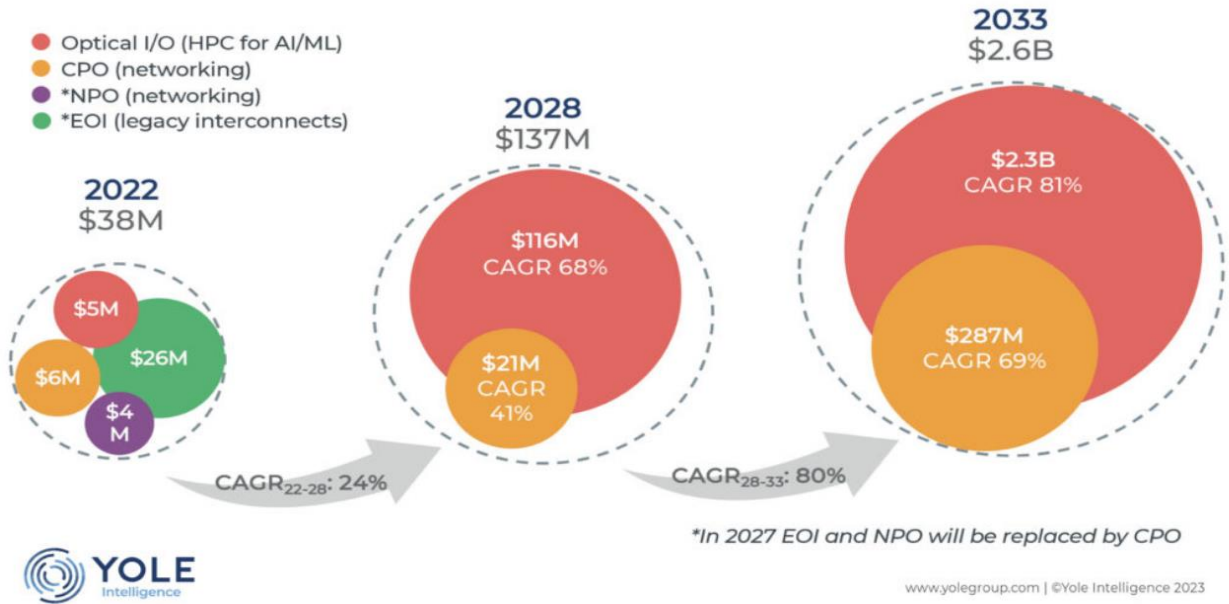
图47: Broadcom 已交付 51.2Tbps CPO 以太网交换机



资料来源: Broadcom 官网

CPO 商用在即，市场前景广阔。根据 Lightcounting 预计，CPO 出货预计将从 800G 和 1.6T 端口开始，于 2024 至 2025 年开始商用，2026 至 2027 年开始规模上量，主要应用于超大型云服务商的数通短距场景。全球 CPO 端口的销售量将从 2023 年的 5 万增长到 2027 年的 450 万。2027 年，CPO 端口在 800G 和 1.6T 出货总数中占比接近 30%。Yole 报告数据显示，2022 年 CPO 市场产生的收入达到约 3800 万美元，预计 2033 年将达到 26 亿美元，2022-2033 年复合年增长率为 46%。

图48: CPO 市场前景广阔



资料来源: Yole

硅光子技术有望充分受益于 CPO 发展。目前 CPO 仍处于产业化初期，技术工艺上，CPO 在封装工艺、仿真技术、可靠性、标准化等方面仍然面临诸多挑战；产业发展上，CPO 的技术路线优化本质上是对整个网络架构的优化，需要数据中心整体产业链的协同推进；参与厂商上，当前 CPO 产业链包括设计、光引擎供应商、激光器供应商、交换机厂商、硅光代工厂、设备商等。我们认为，CPO 作为新型光电互连技术，在 AI 光通信迅速发展的背景下，CPO 或是实现高速率、大带宽、低功耗的必经之路，有望成为光通信行业必备技术，特别是对目前基于可插拔光模块

方案的产业链影响，CPO 已然成为学术和产业界的研究重点，以及对传统光模块厂商的综合考验。其中硅光子技术作为 CPO 的核心技术之一，有望充分受益于 CPO 的发展需求，并成为各大厂商的战略布局重心。

表6：海内外厂商积极 CPO 技术

		厂商名称	发展现状
国外	Intel		在 ISSCC2024 上，Intel 展示了其在 CPO 领域的最新进展“A 4×64Gb/s NRZ 1.3pJ/b Co-Packaged and Fiber-Terminated 4-Ch VCSEL-Based Optical Transmitter”，通过利用 VCSEL 阵列和 driver 芯片等实现了低功耗的高速信号传输
	Acacia		2020 年推出 400 G 硅光光模块方案，先将分立光器件集成为 PIC（Photonic Integrated Circuit）芯片，再与自研 DSP 电芯片集成在 SOI（Silicon-On-Insulator）上，最终外接激光器封装成光模块
	Cisco		在 OFC 2023 上，Cisco 进行了 CPO 演示，Cisco CPO 路由器配备了一整套基于硅光子学的共封装光学瓦片，驱动 64x400G FR4，也基于带 CPO 基板的 Cisco Silicon One G100 ASIC。此外，Cisco 也与芯片制造商 Inphi 在 CPO 技术领域展开合作，计划未来推出基于 CPO 技术的 51.2 Tbps 交换机
	Marvell		2022 年推出基于 2.5D CPO 技术的 12.8 Tbps Teralynx 7 交换机；2023 年，推出由超低延迟 Marvell Teralynx 10 51.2 Tbps 交换芯片和业界首款 PAM4 1.6 Tbps 光电平台 Marvell Nova 组成的新平台；2024OFC 上，展示其 3D 硅光（SiPho）引擎，该硅光引擎利用先进的 3D 封装和其他 Marvell 技术，将数百个组件集成到单个设备中，组件集成和更大的带宽输入/输出（I/O）密度，为生产针对不同用例和封装（从可插拔到未来的 CPO）进行优化的宽范围光学互连提供了一条途径
	Broadcom		2022 年在 OFC 上发布首款 CPO 交换机，将 25.6 Tbps Tomahawk 4 交换机芯片和光学部件共同封装；2023 年，推出了最新的交换机产品 Tomahawk StrataXGS 5，采用了 CPO 技术将交换机芯片和 100 G PAM4 接口共同封装在一起，达到了 51.2 Tbps 的交换容量，功耗仅需 5.5 W，拥有 800 Gbps 的速率，由于采用光学共封装技术，光学连接所需的功率降低 50% 以上；2024，博通向其客户交付了业界首款 51.2 太比特/秒（Tbps）共封装光纤（CPO）以太网交换机 Bailly，并在 2024OFC 上展示了其 Bailly 51.2T CPO 以太网交换机系统以及 6.4T 光引擎与包含 HBM、logic、PHY 的多芯片模块共同封装
	光迅科技		2023 年的 OFC 上领先发布了可以支持 3.2 T CPO 光引擎的自研光源模块，为后续推出 CPO 产品做技术铺垫；2024 年，光迅科技在 OFC 大会上与 OIF 联合展示了 CPO 交换机多端口兼容 ELSFP
国内	亨通光电		2021 年，亨通光电和英国 Rockley 合作推出了国内首台 3.2 T CPO 工作样机
	锐捷网络		2021 年，发布了首款基于 112G SerDes 交换芯片并由 16 个 1.6Tbps CPO 模块组成的 25.6 Tbps CPO 交换机；2022 年，将 CPO 模块从 1.6 Tbps 升级到 3.2 Tbps，发布了 51.2 Tbps 的 CPO 交换机
	中际旭创		2021 年开始进行关键技术的预研，持续打造先进光子芯片产业化技术平台和 2.5D、3D 混合封装平台；2022 年底，旭创技术研究院正式发布一款应用于共封装光学的高密度光学连接器
	天孚通信		2022 年 OFC 上展示了为 400G/800G 光模块配套应用的光引擎产品，2023 年 OFC 上展示了为 1.6T/800G 光模块配套应用的光引擎产品，2024 年 OFC 上展示了为 1.6T/800G 光模块配套应用的 Mux TOSA、Demux POSA、Lensed FAU 等光引擎产品和解决方案

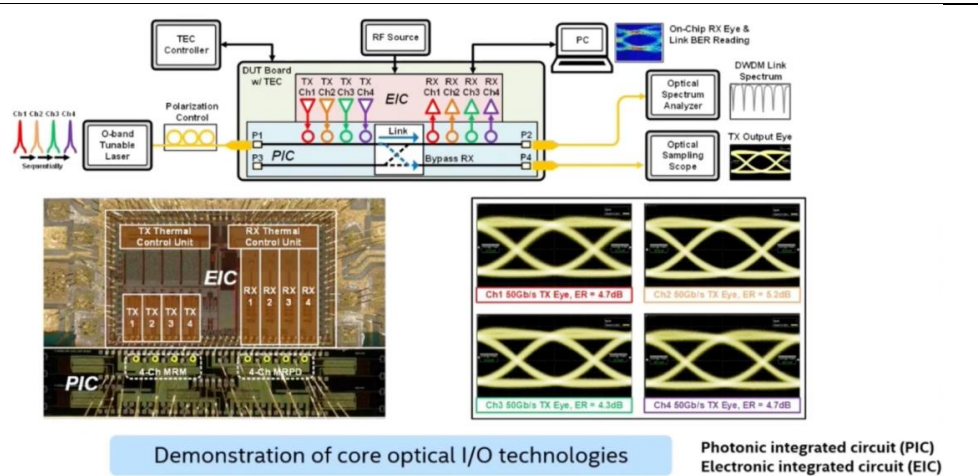
资料来源：芯智讯官网、讯石光通讯网、各公司官网、开源证券研究所

2.3、OIO：硅光子技术是片间互联的重要解决方案

光互连有望解决片间互联的瓶颈问题。芯片间通信主要采用片间互联技术（如 PCIe、以太网、RapidIO、SPI 等），随着芯片制程的逐步缩小，芯片的互连线也需要越来越细，互连线间距缩小，电子元件之间引起的寄生效应也会越来越影响电路的性能，因此互连线引起的各种效应成为影响芯片性能的重要因素。特别是随着 AI 对数据中心等通信基础设施的传输效率提出了更高的要求，传统技术方案中铜 I/O 正在接近物理极限，将难以支持数据中心服务器的密度提升，同时其集成度低、功耗高的问题也逐渐显现。光互连不同于传统互连材料如铝、铜、碳纳米管等，不易受到互连线材料的物理极限影响；在制造工艺上，光子芯片和电子芯片虽然在流程和复杂程度上相似，但光子芯片对结构的要求不如电子芯片严苛，一般是百纳米级，降低了对先进工艺的依赖度，因此，在 AI 高速通信时代，光互连有望成为片间互联的理想选择。

OIO 主要解决计算芯片之间的互联问题。OIO（In-Package Optical I/O）是一种基于芯片的光互联解决方案，与计算芯片（CPU、GPU、XPU）集成在同一封装中，旨在实现分布式计算系统中它们之间的无缝通信（跨板、机架和计算行），在相同能效情况下，OIO 的边带宽密度与 UCIe、NVlink、PCIe 等电互连相当，但传输距离远超电互连。OIO 基于光互连低延迟、高带宽和低能耗的特点，非常适用于计算结构（即内存语义结构），有望成为为机器学习扩展、资源分解和内存池定制的新数据中心架构的关键驱动力。

图49：OIO 是一种芯片的光互连解决方案



资料来源：Cadence 官网

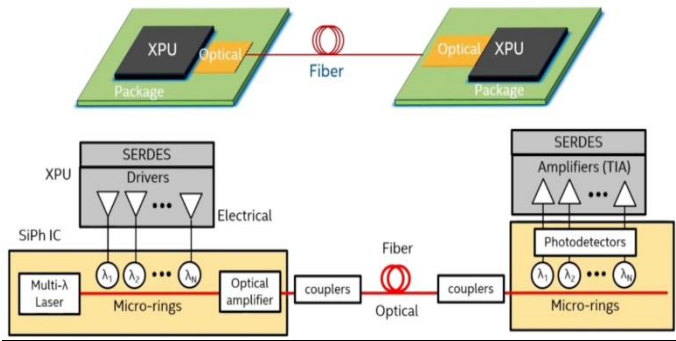
OIO 作为一种片间互联解决方案，在产品形态上，也是将光芯片与电芯片封装在同一基板上，因此与 CPO 具有一些异同点：

从封装形式上看，OIO 的 In-package Optics (IPO) 与 CPO 结构相似，不过 CPO 针对的是交换芯片，OIO 针对的是计算芯片；

从技术功能上看，CPO 主要面向大型以太网网络交换机，是可插拔光学器件的替代策略；OIO 主要面向分布式计算系统，是 electrical I/O 的替代策略；

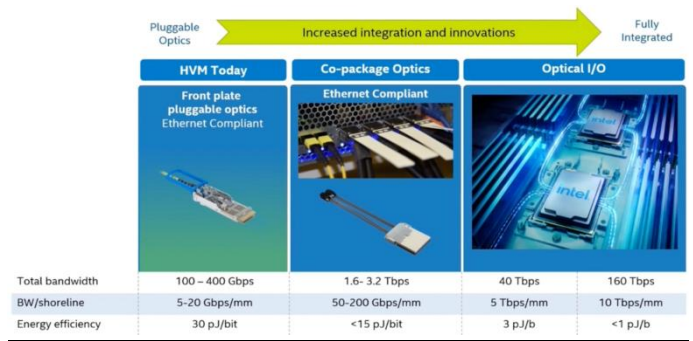
从性能效率上看，OIO 带宽密度、功耗、延迟等指标较 CPO 进一步提升，根据 Intel 的数据，单个 CPO 模块的带宽为 1.6-3.2Tbps，带宽密度为 50-200Gbps/mm，能效为 15pJ/bit，而 OIO 的总带宽为 40Tbps，带宽密度为 5Tbps/mm，能效为 3pJ/bit。

图50: OIO 典型结构



资料来源: Cadence 官网

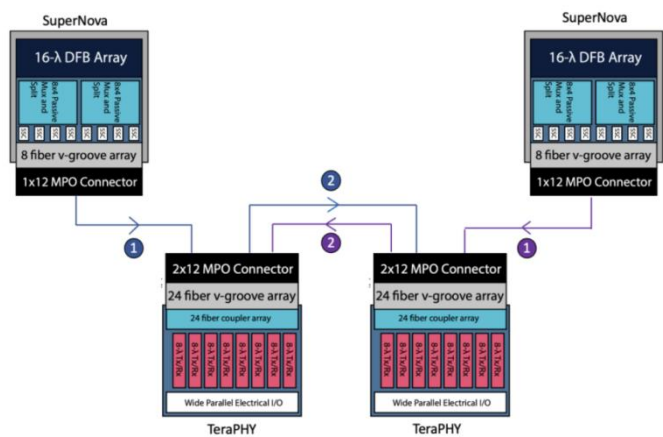
图51: OIO 性能效率优于 CPO



资料来源: Cadence 官网

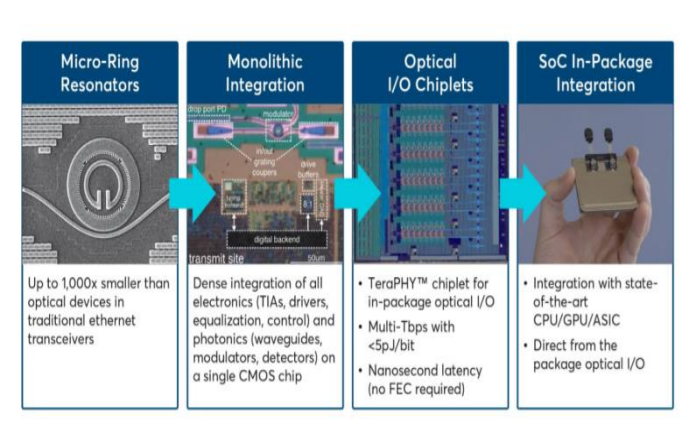
硅光方案高度契合 OIO 发展需求。硅光子技术目标就是在芯片上集成光电转换和传输模块,使芯片间光信号交换成为可能:电流从计算核心流出,到转换模块通过光电效应转换为光信号发射到电路板上铺设的超细光纤,到另一块芯片后再转换为电信号,其本身具备尺寸小、功耗低、同 CMOS 工艺兼容、可集成、成本低等优点,且由于采用与集成电路兼容的工艺制作,可方便地在电学芯片的内部引入硅基集成光路,实现光通信电路与控制电路和驱动电路的紧密集成,进一步降低成本,因此硅基光互连是实现片间光互连的理想平台。目前 OIO 领域有较强实力的企业 Ayar Labs 就是结合了硅光子技术和 Chiplet 来设计新一代片间互联产品,其产品主要包括 TeraPHY (光信号互联芯片)和 SuperNova (独立激光器),两者经常配合使用,其中 TeraPHY 硅光芯片采用体积小、功耗低的微环调制器,利用多个波长携带信号来提高带宽密度,当前产品通过 8 个光端口实现了 4096 Gbps 的双向吞吐量,每个链路支持每个光口 256Gbps,每个光口有 8 个波长,每个波长 32Gbps。

图52: TeraPHY 和 SuperNova 典型链路



资料来源: foresightnews

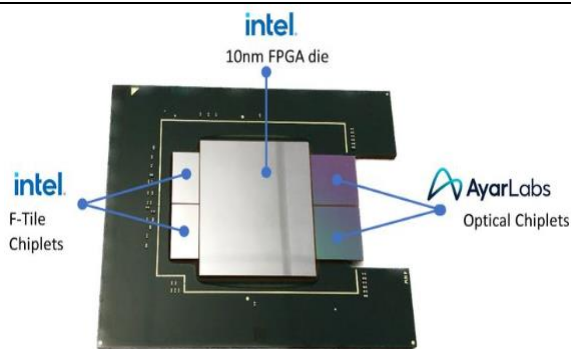
图53: TeraPHY 采用硅光微环调制器



资料来源: Ayar Labs 官网

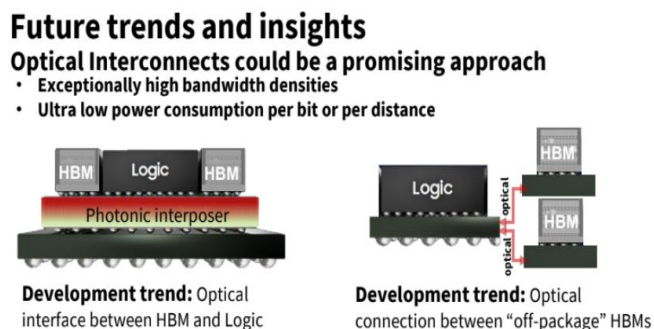
各大芯片巨头积极布局 OIO 领域。Intel 和 Ayar Labs 合作多年, Supercomputing 2023 大会上展示了将 2 颗 4Tb/s 带宽的 TeraPHY OIO chiplet 嵌入到 Intel Agilex FPGA 中,并由两个 SuperNova 光源支持每个 chiplet 上 8 根光纤的 64 个光通道的高速光通信; NVIDIA 与 Ayar Labs 合作开发基于 OIO 的下一代解决方案,同时 NVIDIA 内部也有自己的硅光团队开发相关技术; AMD 收购 Xilinx, OFC2022 会议上和 Ranovus 合作发布了一款将 Versal ACAP 和 Ranovus 的 Odin 光通信模组集成在一起的系统;在 2023 OCP 全球峰会上,三星提出了在 HBM 与 Logic 芯片间采用 OIO 技术进行数据互联,并给出了两个可能的芯片架构。

图54: Intel展示FPGA间通过OIO实现信号互连



资料来源: Intel官网

图55: 三星提出HBM与Logic芯片间OIO互联



资料来源: EDN China官网

硅光子技术有望充分受益于 OIO 发展。我们认为，OIO 目前仍处于起步阶段，其技术落地难度相对较大，需要与计算芯片联合设计仿真优化，在物理层和协议层方面都需要进一步创新。不同于 CPO 主要针对网络架构，针对计算架构的 OIO 中硅光+Chiplet 或成为主流解决方案，因此主要参与者多为头部芯片厂商及硅光初创公司/设计公司企业。总的来看，随着 AI 技术对算力的持续需求，芯片间数据传输不断增大，OIO 的技术优势有望不断凸显，作为 OIO 理想平台的硅光子技术也有望得到进一步发展。据 Yole 预测，OIO 市场有望从 2022 年的 500 万美元增长到 2033 年的 23 亿美元。

图56: ASE、AMD、Intel、微软等十大行业巨头联合制定 UCle



数据来源: UCle官网

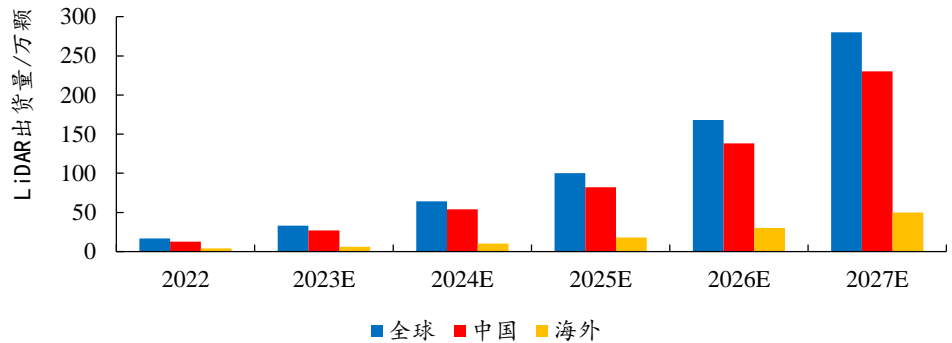
3、硅光子在智能驾驶、光计算等多领域应用潜力大

硅光子技术的 CMOS 工艺兼容、高集成度、波导特性在众多领域存在应用可能，如智能驾驶、光计算、消费电子等方向有很大的发展空间。

3.1、智能驾驶：硅光固态激光雷达技术路线是未来激光雷达发展的优选方向

车载激光雷达市场前景广阔。激光雷达是一种使用激光脉冲来测量障碍物距离的传感技术。随着技术的进步和激光雷达制造成本的降低，目前已成为自动驾驶、无人机、智能机器人等领域的关键传感技术，特别是作为自动驾驶的核心组成，其车载领域的应用具备广阔的成长空间。根据深圳自动驾驶智能研究中心、车控 CHEK 和 HiEV 联合发布的《车载前装激光雷达全球发展报告（2022）》预测，到 2027 年，全球激光雷达的发货量将接近 300 万台，年复合增长率将达到 76%，全球市场规模将达到近 60 亿元人民币。

图57：乘用车前装激光雷达发货量迅速提升



数据来源：《车载前装激光雷达全球发展报告（2022）》、开源证券研究所

硅光方案助力激光雷达降本放量。激光雷达技术方案众多，硅光芯片化集成有望助力激光雷达完成成本控制进而实现上车放量，硅光固态激光雷达或成未来发展方向。

从技术上看，自动驾驶所使用的激光雷达主要涉及探测技术和扫描技术。探测技术主要有脉冲飞行时间（ToF）和调频连续波（FMCW）两种模式；扫描技术可分为机械、半固态（如 MEMS、转镜）和全固态（如色散、Flash 和 OPA）等。不同厂商的激光雷达采用了不同的探测技术、扫描技术和激光波长。从发展趋势来看，激光波长正在从 905 向 1550 纳米演进，探测技术正在从 ToF 向 FMCW 演进，扫描方式正在从机械向半固态、全固态演进。

从产业发展来看，激光雷达要实现规模化量产上车需要满足高性能和低成本两方面，目前多数方案都是依靠各类分立器件的集成来实现雷达系统，缺点是成本高、尺寸大、功耗高、可靠性低，在大规模上车上存在挑战。通过硅光子技术实现芯片化集成，可以降低系统成本、实现规模化应用，具备高性能、低成本、小尺寸、低功耗等优点。具体方案上，硅光固态激光雷达包括硅基相控阵激光雷达和硅基光开关阵列激光雷达两种：硅基相控阵激光雷达就是将光源、光分束器、相位调制器、光转束器、探测器等集成在几平方毫米的区域，快速识别远方目标；硅基光开关阵列激光雷达是通过将激光器发射的光经过硅基上的光开关阵列传输到特定位置的光学天线，并配合天线上设置的透镜实现光束偏转。

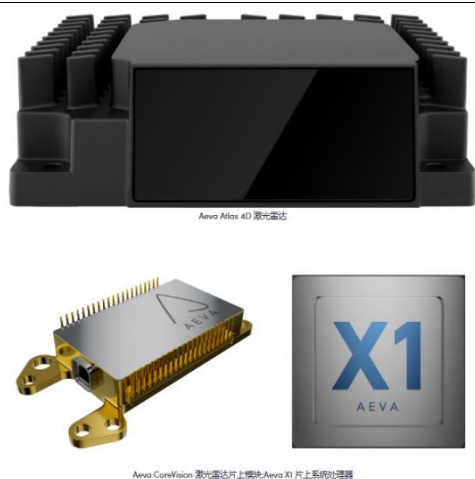
表7: 硅光方案激光雷达成本较低

激光雷达分类	优点	缺点	
机械式激光雷达	器件成熟, 已实现量产	体积大 价格高 机械部件(稳定性及耐久性差)	
MEMS 激光雷达	微机电扫描形式 体积小, 结构简单 价格较便宜	MEMS 环境适应性较差 不易通过车规标准 暂未大规模应用	
Flash 激光雷达	微机电扫描形式 体积小, 结构简单 价格较便宜	需要较高的激光能量, 可能伤到人眼 成本高 信号处理难度高, 不易民用	
全固态激光雷达	TOF 相机	无扫描结构 探测距离远 探测距离短	
	硅基相控阵激光雷达	无扫描结构 成本较便宜	技术难度大
	硅基光开关阵列激光雷达	CMOS 工艺流片 产量大 无机扫描部件 成本低 性能优异 尺寸小	起步最晚

资料来源: 王鹏飞等《硅基集成激光雷达技术》、开源证券研究所

硅光 FMCW 的解决方案获企业布局。从实际应用来看, Intel Mobileye、Aeva 正积极推进硅光 FMCW 激光雷达的应用, 2024 年 1 月 8 日, Aeva 宣布推出首款专为量产汽车应用而设计的 4D LiDAR 传感器 Aeva Atlas, 其 CoreVision 正是基于硅光构建, 利用硅光子技术取代了传统 ToF 激光雷达中的复杂光纤系统, 并以合适的成本实现量产; 在 CES 2021 大会上, Mobileye 展示了与 Intel 合作开发的硅光 FMCW 激光雷达芯片, 预计 2025 年实现上车。

图58: Aeva 硅光 FMCW 激光雷达



资料来源: Aeva 官网

图59: Mobileye 硅光 FMCW 激光雷达集成芯片

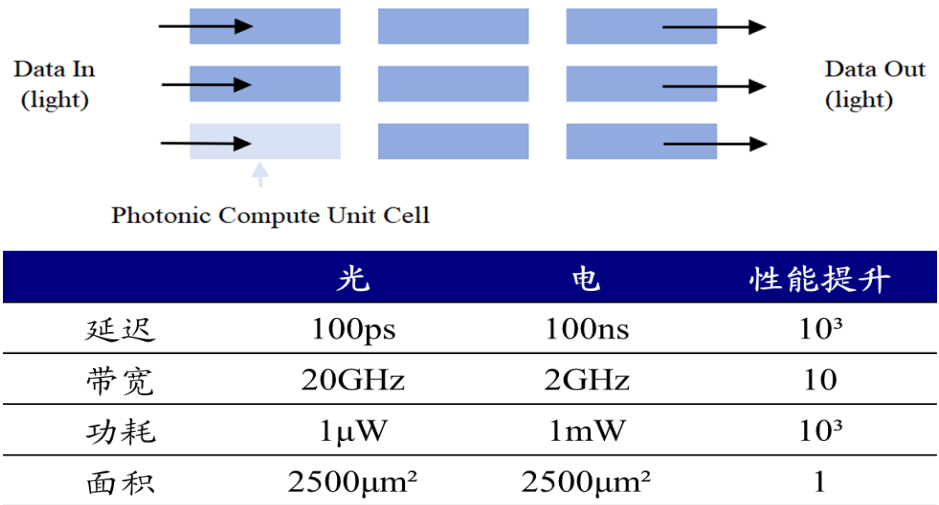


资料来源: 讯石光通信网

3.2、光计算：硅光有望成为实现集成光计算系统的主要材料平台

光计算有望突破电子计算瓶颈。光计算是采用光作为信息处理的基本载体，基于光学单元构建光学系统，通过必要的光学操作，从而实现信息处理或数据运算的新型计算体系。随着全球算力规模的不断扩大以及算力升级面临的低碳问题，光计算相较于传统电子计算机具备天然的并行计算能力、低功耗、高速低时延、抗干扰能力强等优点，在特定场景中，有望替代传统电子计算机，是解决摩尔定律困境以及冯·诺依曼架构瓶颈问题具备潜力的途径之一。21 世纪初至今，光计算已成为当前大规模复杂计算的重要解决方案，可以在人工智能、气象监测、金融投资、生物医药等诸多领域发挥重要作用，是各国积极推进的重点项目之一。

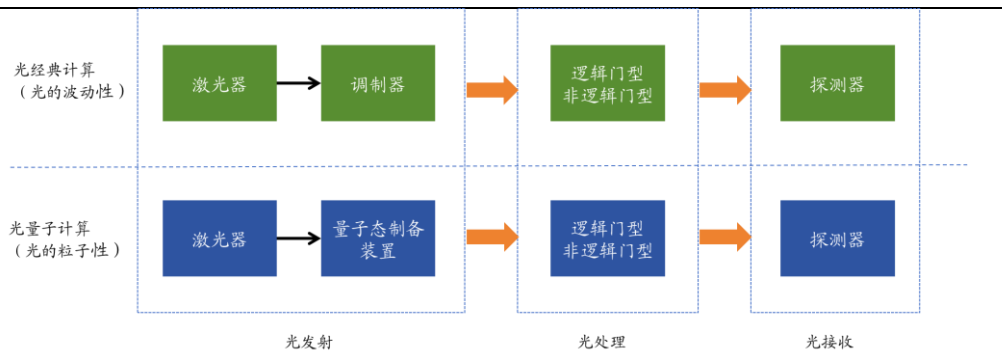
图60：光计算多方面性能优于电计算



数据来源：中国信通院《光计算技术与产业发展研究报告(2023 年)》、开源证券研究所

光计算按照物理实现的方式可分为基于经典光学的计算（光经典计算）和基于量子光学的计算（光量子计算），两者结构上一般包括：光发射部分、光处理部分、光探测部分等。（1）光发射部分：光经典计算包括激光器和调制器，而光量子计算包括激光器和量子态制备装置。（2）光处理部分：两种计算方式均可以分为逻辑门型和非逻辑门型两大类。光经典计算利用折射、散射、非线性效应等，基于马赫增德尔干涉仪（MZI）、微环等结构进行计算；光量子计算利用量子叠加、量子纠缠效应等，将经典光学器件进行量子应用。（3）光接收部分：光量子计算需采用灵敏度更高的探测器，如雪崩二极管、超导纳米线探测器等，而光经典计算对探测器的灵敏度要求略低。

图61：光经典计算和光量子计算结构系统结构相似



资料来源：中国信通院《光计算技术与产业发展研究报告(2023 年)》、开源证券研究所

光经典计算可利用光的波动特性如折射、衍射等规律来实现计算功能。在光经典计算中，光被用作信息处理的基本载体，通过光学单元构建光学系统，实现信息处理或数据运算的新型计算体系。目前光电混合光计算是当前主流计算框架，“结构即功能”的专用模拟计算近年来成为发展热点。预计发展路线将从初步落地到拓展应用场景再到更为大众的市场中去。当前产业链整体成熟度偏低，产品种类偏少且产量有限，但全球范围内的研究与投资热情增长。

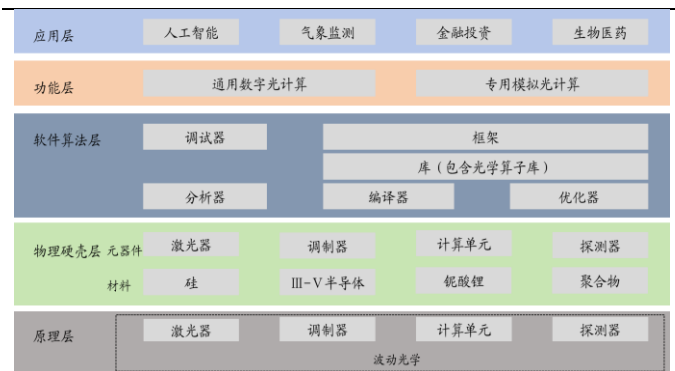
硅光是硅光因其 CMOS 工艺兼容、集成度高等优势，有望成为集成光计算系统的主要平台。典型的硅基光计算案例包括 2x2 MZI 阵列提供矩阵·矢量积实现矩阵运算、光波导延迟线实现蓄水池计算、多模干涉仪和相移阵列或等离子体激元实现傅里叶变换、微环/亚波长超材料实现积分计算等。未来基于光电混合集成、异质集成等工艺，可实现不同功能单元的更高效集成，进一步提升系统的集成度。

基于硅光平台的神经网络逐步走向商业化。各该公司采用的光计算核心原理基本相同，打造一个用于通用矩阵乘法运算（GEMM）的光子矩阵，再集成 DAC、ADC、跨阻放大器（TIA）和光电探测器（PD）等其他模拟和光电器件，来替代目前深度学习和科学计算任务中的其他 ASIC 硬件。例如，美国 AI 芯片公司 Lightmatter 推出通用光子 AI 加速器方案“Enviser”；曦智科技于 2021 年发布光子计算处理器“PACE”。

Enviser: 其光计算核心原理基本相同，打造一个用于通用矩阵乘法运算（GEMM）的光子矩阵，再集成 DAC、ADC、跨阻放大器（TIA）和光电探测器（PD）等其他模拟和光电器件，来替代目前深度学习和科学计算任务中的其他 ASIC 硬件，根据 Lightmatter 数据，配有 4 个 Enviser 光子芯片的服务器里，同时运行 BERT 机器学习模型，可实现比英伟达 DGX-A100 高三倍的推理性能和 7 倍以上的能效比。

PACE: 在 PACE 中，单个光子芯片集成了超了一万个光子器件，时钟速度达到 1GHz，在运行特定循环神经网络时，速度可以达到高端 GPU 的数百倍，pace 包含一个 64x64 的光学矩阵，由集成硅光芯片和 CMOS 芯片 3D 堆叠而成，其 3D 封装或基于 Cadence 的 Integrity 3D-IC 和 Innovus 平台打造与设计。

图62：光经典计算技术框架



资料来源：中国信通院《光计算技术与产业发展研究报告(2023年)》

图63：欧美企业积极布局光经典计算

国家	企业	产品类型	产品名称	商用情况	商用时间
美国	Lightmatter	AI 推理加速芯片	Enviser	已商用	2021 年
		可编程交互芯片	Passage	已商用	2022 年
		深度学习软件工具套件	Idiom	已商用	2022 年
	Fathom Computing	基于分立器件的光计算原型机	/	样品阶段	/
	Luminous Computing	光学 AI 芯片	/	样品阶段	/
欧洲	Optalysys	光学处理器	FT: X 2000	已商用	2019 年
		全同态加密加速器	Enable	研发阶段	/
	LightOn	光学协处理器	/	集成于 Jean Zay 超级计算机	2021 年
		云平台	LightOn Cloud	已商用	2018 年
	本地软件	LightOn Appliance	已商用	2018 年	

资料来源：中国信通院《光计算技术与产业发展研究报告(2023年)》、开源证券研究所

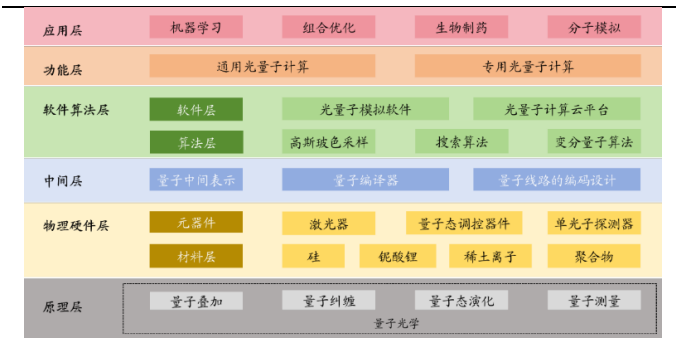
光子量子计算是以光子作为量子比特进行计算，通过对光子进行量子操控及测量来完成计算。光子量子计算是基于量子光学的计算方式，可以利用光的量子特性来实现更加高效和强大的计算功能。目前分层式架构为主流，计算平台的发展路线预计将，从光子量子计算优越性验证到含噪声的中规模光子量子计算，而通用容错型光子量子

计算机是光量子计算发展的终极目标。现阶段光量子计算仍处于实验室研发的初级阶段，核心参与者不多，科研与市场活跃度呈现增长趋势。

硅基集成光量子芯片为大规模光量子计算及量子信息处理实现提供了有效途径。光量子计算关键硬件组件包括量子光源、单光子探测器以及光量子芯片，其中光量子芯片是核心，是各企业研发重点。硅材料具有很强的三阶非线性效应和紧致模式约束特性，利用半导体微纳加工工艺，可以实现高密度片上集成的光量子芯片基础器件，如光波导、光分束器、光耦合器、光调制器等，总之得益于其硅基光量子芯片技术的大规模集成、可编程配置等优势，推动其在基于光学系统的量子计算、量子模拟以及量子信息处理等应用方面取得了一系列进展，在未来实现可实用化大规模光量子计算与信息处理应用方面展示出较大潜力。

多个光量子计算企业通过与芯片制造商合作或自建芯片实现研发光量子芯片。美国 PsiQ 与全球领先半导体制造商 GlobalFoundries 合作研发基于硅光集成光量子系统 Q1。加拿大 Xanadu 与 Imec 合作开发了基于超低损耗氮化硅波导的下一代量子比特。Xanadu 与 GlobalFoundries 合作制造了 300 mm 硅光器件。世界领先的量子信息公司 Inflepton2024 年宣布收购两家集成硅光子公司 SiNoptiq 和 Morton Photonics。

图64：光量子计算技术框架



资料来源：中国信通院《光计算技术与产业发展研究报告(2023年)》

图65：多国企业积极布局光量子计算

国家	企业	成立时间	产品类型	产品名称	发布时间
美国	PsiQuantum	2016年	百万量级的通用硅光量子计算机	Borealis	2022年
加拿大	Xanadu	2016年	可编程光子量子计算机	Xanadu Quantum Cloud	2021年
			软件	StrawberryFields	2021年
	模拟器	Lightning	2022年		
加拿大	Photonic Inc	2016年	硅基光量子芯片设计制造	/	/
	Wave Photonics	/	集成光量子电路封装	/	/
英国	ORCA Computing	2019年	可扩展光量子计算机	/	/
美国	Tundra Systems Global	2014年	光量子处理器系统	/	/
			光量子计算平台	MOSAIQ	/
法国	Quandela	2017年	软件	Perceval	/
			光源设备	PROMETHEUS	/
荷兰	QuiX Quantum	2019年	集成式光量子处理器	12-qumodes	2021年
丹麦	Sparrow Quantum	2016年	光量子计算技术组件	20-qumodes	2021年
				单光子芯片	/

资料来源：中国信通院《光计算技术与产业发展研究报告(2023年)》、开源证券研究所

3.3、消费电子：硅光子技术高集成度契合消费电子的空间需求

消费电子需要在有限空间内集成较多器件，对尺寸较为敏感，硅光的高集成特性契合消费电子的需求，如可穿戴设备、生物医疗等。2023年 Apple 基于硅光子技术和光学吸收谱技术的无创伤血糖仪项目取得进展，该项目通过硅光子技术和光学吸收谱技术向皮肤发射特定波长的激光，该区域血液中的血糖会吸收部分光波，传感器通过反射光使用算法计算佩戴者的血糖浓度，通过无创伤手段、连续不间断检测佩戴者的血糖水平，有利于糖尿病患者更好控制病情，该功能未来将集成至 Apple Watch 产品中。根据 Yole Group 预测，2027 年基于硅光子技术的消费医疗市场规模有望达到 24 亿美元。

图66：Apple Watch 有望搭载基于硅光子技术的无创血糖监测功能



资料来源：Apple 官网

4、受益标的梳理

我们认为，国内企业普遍较晚参与到硅光产业链，且布局领域多为光通信领域，需重点关注以下板块：

(1) 硅光光器件/光模块厂商：随着 AIGC 发展，硅光子技术在高速光通信时代有望迎来发展热潮，对传统光通信产业格局或带来深远影响，一方面硅光器件/模块厂商有望充分受益于产业发展，另一方面，硅光芯片具有较高产业壁垒，头部厂商的深度布局有望迎来新一轮产业演化；

(2) 硅光 CW 光源供应商：硅光光源集成作为目前硅光子技术一大技术难题，目前外置 CW 光源是硅光光模块的主流方案，且可进一步应用于 CPO 等场景，随着光通信速率需求的不断提升，硅光光模块的通道数也随之增长，CW 光源需求有望得到进一步发展；

(3) 硅光工艺配套厂商：从硅光工艺流程看，硅光与微电子技术逐步趋同，随着硅光子技术的进一步普及及发展，需高度重视配套工艺设备、软件厂商的投资机会。

图67：硅光产业链受益标的梳理

硅光光模块	中际旭创	天孚通信	新易盛	华工科技	光迅科技
	博创科技	剑桥科技	亨通光电	铭普光磁	凌云光
硅光芯片/CW光源	源杰科技	长光华芯	仕佳光子	聚飞光电	
硅光设备	罗博特科	杰普特	硅光器件	炬光科技	赛微电子
原材料	云南锗业	天通股份			

资料来源：开源证券研究所

1、中际旭创：国内光模块龙头企业，优先推出硅光解决方案

中际旭创是国内光模块龙头企业，公司集高端光通信收发模块的研发、设计、封装、测试和销售于一体，为云数据中心客户提供 100G、200G、400G 和 800G 等高速光模块，为电信设备商客户提供 5G 前传、中传和回传光模块以及应用于骨干网和核心网传输光模块等高端整体解决方案。凭借行业领先的技术研发能力、低成本产品制造能力和全面交付能力等优势，公司赢得了海内外客户的广泛认可，市场份额持续提升，在 Lightcounting 在最新发布的 2022 年度光模块厂商排名中，公司和行业头部企业并列全球第一。

公司持续专注于云计算数据中心及 5G 网络等核心市场，进一步加大 800G、1.6T 及以上高速率光模块、电信级光模块、硅光和相干等核心产品或技术的投入与研究，积极推动高端光通信收发模块领域的发展。公司拥有单模并行光学设计与精密制造技术，多模并行光学设计与耦合技术、高速电子器件设计、仿真、测试技术，并自主开发了全自动、高效率的组装测试平台，且在业内率先使用 ChiponBoard (COB) 光电子器件设计与封装技术。2020 年 12 月 4 日，公司在 ECOC2020 线上

展会中推出业界首个 800G 可插拔 OSFP 和 QSFP-DD800 系列光模块。2022 年，在 OFC2022 现场展示基于自主设计硅光芯片 800G 可插拔 OSFP2*FR4 和 QSFPDD800DR8+硅光光模块。2023 年，公司在 OFC2023 现场演示了 1.6T OSFP-XD DR8+可插拔光模块、基于 5nm DSP 和先进硅光子技术的第二代 800G 光模块以及 400G ZR 和 400D ZR+ QSFP-DD 相干光模块。在 OFC 2024 期间，公司演示面向人工智能和数据中心应用的 800G 和 1.6Tbps 硅光光模块解决方案，包括采用自研硅光芯片和线性 Driver/TIA 的 1.6T-DR8 OSFP 模块、搭载自研硅光芯片的相干引擎的硅光 800G-ZR OSFP 相干模块等。

2、天孚通信：国内光器件龙头企业，积极布局硅光领域

公司定位光器件整体解决方案提供商，专业从事高速光器件的研发、规模量产和销售业务。近年公司主营的光器件产品的应用领域由光通信行业向激光雷达等领域延伸拓展。在光通信板块，公司下游客户提供垂直整合一站式解决方案，包括高速率同轴器件封装解决方案，高速率 BOX 器件封装解决方案，AWG 系列光器件无源解决方案、微光学解决方案等；在激光雷达和医疗检测板块，公司依托现有成熟的光通信行业光器件研发平台，利用团队在基础材料和元器件、光学设计、集成封装等多个领域的专业积累，扩展为下游激光雷达等客户提供配套新产品，包括了基础元件类产品和集成器件产品。在 OFC 2024 大会上，公司重点展示为 1.6T/800G 光模块配套应用的 Mux TOSA、Demux POSA、Lensed FAU 等光引擎产品和解决方案。

在硅光领域，公司正积极布局适用于各种特殊应用场景的 Fiber Array，器件产品开发，以期能满足高温回流焊工艺产品，迎合硅光客户的应用需求；针对硅光类产品高功率要求，开发能适应高功率应用的 AWG 及 PLC 类器件，目前已进入小批量阶段。

3、新易盛：国内光模块领军企业，已成功推出硅光产品

公司业务主要涵盖全系列光通信应用的光模块，一直致力于高性能光模块的研发、生产和销售，产品服务于 AI/ML 集群、云数据中心、数据通信、5G 无线网络、电信传输、固网接入等领域的国内外客户。公司为云数据中心客户提供 100G、200G、400G、800G 及 1.6T 光模块产品；为电信设备商客户提供 5G 前传、中传和回传光模块、以及应用于城域网、骨干网和核心网传输的光模块解决方案。经过十多年的发展，已在本行业客户中拥有较高的品牌优势和影响力。

公司自成立以来一直专注于光模块的研发、生产和销售，公司是国内少数批量交付运用于数据中心市场的 100G、200G、400G、800G 高速光模块、掌握高速率光器件芯片封装和光器件封装的企业，已成功研发出涵盖 5G 前传、中传、回传的 25G、50G、100G、200G 系列光模块产品并实现批量交付。公司高速率光模块、硅光光模块、相干光模块、800G LPO 光模块等相关新产品新技术研发项目取得多项突破和进展，高速率光模块产品销售占比持续提升，目前已成功推出基于 VCSEL/EML、硅光及薄膜铌酸锂方案的 400G、800G、1.6T 系列高速光模块产品，和 400G 和 800G ZR/ZR+相干光模块产品、以及基于 100G/lane 和 200G/lane 的 400G/800G LPO 光模块产品。在 OFC 2024 大会上，公司展示了基于 212 Gb/s VCSEL 技术搭建的光模块传输链路经过多年来发展，公司新产品研发和市场拓展工作持续取得进展，目前已与全球主流互联网厂商及通信设备商建立起了良好的合作关系。

4、亨通光电：与英国硅光子公司合资成立亨通洛克利，较早布局硅光领域

公司专注于通信和能源两大领域，具备集“设计、研发、制造、销售与服务”一体化的综合能力，并通过全球化产业与营销网络布局，致力于成为全球领先的信息与能源互联解决方案服务商。在通信网络业务方面，公司聚焦新一代通信产业与核心技术的研发创新，积极拓展海洋通信、光模块、智慧城市等领域业务，构筑形成通信产业从产品到服务的全产业链及自主核心技术。

在光模块领域，公司致力于光模块及光互联综合解决方案的开发与制造。面向 5G 前传、F5G 全光网、数据中心互联三大应用场景，成功推出数据中心与超算应用的 400G 和 800G 光模块，核心路由器集群互联应用的 300G CXP2 AOC，F5G 应用的 XGPON、XGSPON、25G PON、NGPON2 光模块以及 5G 前传应用的 10G、25G CWDM 彩光与 DWDM 可调系列光模块。公司入选中国电信国家重点研发计划“T 比特级超长跨距光传输系统关键技术研究与应用示范”建设工程(400G 高速光模块、100G 高速光模块)项目和“低功耗高集成度高性能 100G 光传输系统研究与应用示范”建设工程(100G、400G 高速光模块)项目，成为这两个项目 100G、400G 光模块唯一提供商。400G 光模块产品可全面满足国内外数据中心需求。目前，公司 400G 光模块产品已在国内外市场获得小批量应用。800G 光模块产品在领先交换机设备厂商通过测试，将根据市场情况导入量产。在硅光方面，2017 年 12 月，公司与英国洛克利硅光子公司共同出资，设立江苏亨通洛克利科技有限公司，从事 25/100G 硅光光模块生产销售，2018 年 9 月，公司与英国洛克利硅光子公司合作的 100G 硅光子模块项目完成了 100Gbps 硅光芯片的首件试制和可靠性测试，完成了硅光子芯片测试平台搭建在 OFC2023 上，公司展示了 400G 和 800G 系列产品，包括基于最新硅光方案的 400G DR4，以及 EML 方案的 400G FR4、400G LR4 和 800G DR8 等产品。其中，400G DR4 硅光光模块为全新升级方案，基于 6nmDSP 和先进硅光子技术平台、优秀的电源设计和领先的 DSP 技术，该产品在 0-70°C 温度范围内，以低于 9W 的低功耗和低误码率性能完美支持 2 公里的传输距离应用。此外，公司在 CPO 光电协同封装的布局在国内较早，2021 年曾成功推出 3.2T CPO 工作样机。由于技术迭代，目前尚在进一步研发过程中。

5、华工科技：激光装备巨头，硅光布局加速切入光通信赛道

华工科技脱胎于华中科技大学，是“中国激光第一股”。公司目前形成了以激光加工技术为重要支撑的智能制造装备业务、以信息通信技术为重要支撑的光联接、无线联接业务，以敏感电子技术为重要支撑的传感器以及激光防伪包装业务三大业务格局。

在联接业务方面，公司拥有光通信行业领先的一站式解决方案，具备从芯片到器件、模块、子系统全系列产品的垂直整合能力，产品包括有源光器件、家庭终端、网络终端、车载光等。公司围绕 Net5.5G (AIGC)、5.5G、F5.5G、智能网联车四大应用场景，为客户提供智能“光联接+无线联接”解决方案，产品市场占有率处于行业领先地位。公司正在积极布局下一代超高速光模块的研发和生产，全面启动光电子信息产业研创园建设项目，并围绕当前 InP（磷化铟）、GaAs（砷化镓）化合物材料，积极布局硅基光电子、铌酸锂、量子点激光器等新型材料方向，自主研发并行光技术（CPO、LPO 等），同时积极推动新技术、新材料在下一代 1.6T、3.2T 等更高速产品应用。

在 AIGC、云计算、5.5G 行业应用等推动下，业务全面向高端升级，在

Net5.5G (AIGC) 业务领域，公司基本实现高端光芯片自主可控，具备硅光芯片到模块的全自研设计能力。400G 及以下全系列光模块实现规模化交付，进入海内外多家头部互联网厂商；800G 光模块实现小批量，成功卡位头部互联网厂商资源池，800G LPO 硅光光模块荣获 2023 年度 ICC 讯石英雄榜“光通信最具竞争力产品”奖；在 5.5G 业务领域，光模块产品保持全球前、中、回传市场优势地位，无线光模块系列产品发货量保持行业领先地位，客户侧 10G-400G 传输类光模块全覆盖，全球首发的 400G ZR+Pro 相干光模块产品。5G 无线高集成度板载硅光光模块实现关键技术攻克，达到国际领先水平。在 F5.5G 业务领域，10G PON 全系列产品批量交付，并完成国产方案替代，交付能力进入行业第一梯队；下一代 25G PON 产品已与客户开展联调，50G PON 产品光电技术突破，达到行业领先水平；终端领域，推出矜影 AX3000 双频千兆 WiFi6 无线路由器；ADB 大灯光源模组、Mini LED 背光模组等新产品用于智能网联车。

在 OFC2024 大会上，公司全资子公司华工正源正式推出 1.6T-200G/λ 高速硅光光模块方案，在现有 400G 和 800G 成功硅光产品研发基础上，成功推出基于单波 200G 的 1.6T 各类模块产品。华工正源的 1.6T 高速硅光光模块产品，采用自研单波 200G 硅光芯片，并兼容薄膜铌酸锂调制器和量子点激光器，拥有 8 个并行发送与接收通道；每通道运行波长为 1310nm；运行速率为 212.5Gbps，适用于 1.6T 以太网与 InfiniBand 系统的 2x800G 应用。

6、光迅科技：光器件领军企业，和思科合作推出了 1.6T 硅光光模块

光迅科技是光电子行业先行者，专注于光通信领域 40 余年，目前形成了半导体材料生长、半导体工艺与平面光波导、光学设计与封装、高频仿真与设计、热分析与机械设计、软件控制与子系统开发六大核心技术工艺平台，具备从芯片到器件、模块、子系统的垂直整合能力。公司产品涵盖全系列光通信模块、无源光器件和模块、光波导集成器件、光纤放大器，广泛应用于骨干网、城域网、宽带接入、无线通信、数据中心等领域。公司有多种类型激光器芯片（FP、DFB、EML、VCSEL 等）、探测器芯片（PD、APD）以及 SiP 芯片平台，为公司的直接调制和相干调制方案提供支持；公司拥有 COC、混合集成、平面光波导、微光器件、MEMS 器件等封装平台，为公司的有源和无源产品提供支持。

公司主要有光收发模块、有源光缆、光放大器、波长管理器件、光通信器件、子系统等产品，在云计算和企业网、无线接入、固网接入、中长距光传送网等领域为客户提供解决方案。云计算和企业网产品包括：支持不同速率（10G、25G、50G、100G、200G、400G、800G、1.6T 等）、封装（QSFP、QSFP-DD、OSFP 等）、传输距离（100m、500m、2km、10km）的以太网光模块、有源光缆、16G/32G/64G Fibre Channel 光模块产品。无线接入产品包括：4GLTE 和 5G 网络用 CPRI/eCPRI 的各种 10G、25G、50G、100G 灰光和彩光光收发模块。固网接入产品有 GPON OLT/ONU、10GPON(10G EPON、10G GPON、10G Combo PON)、25GPON、50GPON 的 BOSA 和光收发模块等。公司中长距光传送网产品可以提供光传送网端到端的整体解决方案，包括传输光收发模块、光纤放大器、光无源器件、智能光器件等。传输光模块包括 100G、400G 等速率光模块，支持 10km、40km、80km 等传输距离。光纤放大器产品包括掺铒光纤放大器、拉曼放大器和混合光放大器。光无源器件包括 AWG（阵列波导光栅）、VMUX（光功率可调波分复用器）、WDM（波分复用器）、VOA（可调光衰减器）、OPM（光性能监测功能模块）等光传送网所需的光器件。智能光器件包括 WSS（波长选择开关）、OTDR（光时域反射

仪)、相干器件等。

在 OFC2024 大会上,光迅科技与字节跳动联合展示了 800G OSFP SR8 高速光模块,与思科合作推出了 1.6T OSFP-XD 硅光光模块,速率可支持至单波 200G,与 OIF 联合展示了 CPO 交换机多端口兼容 ELSFP, LPO 模块性能及连接 OIF 展台和光迅科技展台的 NPO 与 LPO, LRO 等多技术形态间的互联互通,并发布了 OCS 全光交换机;在标准牵引方面,光迅科技联合 Intel、Nvidia, Cisco, Arista 等 12 家行业领先的芯片商、光模块厂商,交换机厂商和互联网厂商等共同发起 LPO MSA (线性可插拔光学多源协议) 联盟。

7、博创科技: PON 光模块龙头企业, 400G 硅光光模块已批量出货

公司的主营业务是光通信领域集成光电子器件的研发、生产和销售,致力于平面波导(PLC)集成光学技术、硅光子集成技术和高速模拟芯片设计技术的规模化应用,专注于高端光无源器件和有源器件的开发,在芯片设计、制造与后加工、器件封装、光学测试以及高速模拟芯片设计领域拥有多项自主研发并全球领先的核心技术和生产工艺,建立了平面光波导(PLC)、微光机电(MEMS)、硅光子和高速有源模块封装四大技术平台。

公司目前主要为全球范围内高速发展的光纤通信网络、互联网数据中心(IDC)、消费及工业互联网市场提供高质量的光信号功率和波长管理器件、高速光收发模块、有源光缆(AOC)以及源预端接跳线等产品与解决方案,其中 PLC 光分路器、密集波分复用(DWDM)器件和 10G PON 光模块占据全球领先市场份额,公司子公司长芯盛自研的应用于有源光缆(AOC)的多通道光电收发芯片占据全球领先市场份额,其旗下拥有 FIBBR 和 iCONEC 两大子品牌。主要产品应用市场包括接入、传输、无线和数据通信四大领域,面向电信市场的产品包括用于光纤接入网(PON)的 PLC 光分路器和光收发模块、用于骨干网和城域网密集波分复用(DWDM)系统的阵列波导光栅(AWG)和可调光功率波分复用器(VMUX)、用于无线承载网的 25G 前传和 50G 中回传光收发模块、用于光纤放大器系统(EDFA)的 MEMS 可调光衰减器(VOA)以及广泛应用于各种光器件中的光纤阵列等。公司面向数据通信市场的产品包括用于数据中心内部互联的 25G 至 400G 速率的光收发模块、有源光缆(AOC)和高速铜缆等。公司的光收发模块制造平台包括传统的分立式封装技术和硅光子集成技术,其中硅光收发模块已经成功应用于 5G 前传和数据通信两大领域。

公司已向多家国内外互联网客户批量供货 25G 至 400G 速率的中短距光模块、有源光缆和高速铜缆,基于硅光子技术的 400G-DR4 硅光光模块已实现量产出货,目前正在积极开发下一代数据中心用硅光光模块;应用于电信领域的 50G PON 已实现客户送样,并正在进行小型化方案开发。“年产 245 万只硅光收发模块技改项目”持续推进,预计完成的日期延期至 2025 年 3 月。应用于数据通信的 800G 铜缆产品研发完成并已实现客户送样;有源 AOC 系列型号持续扩充,推出了全功能 TypeC AOC、MIPI AOC 和光隔离器等产品,开发出了 PCIe Gen4 x 4 AOC 原型产品以及超小尺寸的 uLens (2.8x2x1) AOC 芯片,该芯片可缩小模块的体积,已在内窥镜此类对模组尺寸要求严格的场合中使用。

8、剑桥科技:积极布局光模块领域,不断推进硅光研发与业务拓展

公司深耕 ICT 及光通信相关市场多年,主要从事家庭、企业及工业应用类 ICT 终端设备、高速光模块、5G 网络设备三大领域产品的研发、生产和销售。目前产

品包括智能家庭网关、Wi-Fi Mesh、Wi-Fi 7 终端、高速光模块、无线网络小基站、交换机与边缘计算设备等，公司产品已被广泛应用到世界各国主流电信运营商的网络和大型数据中心。公司重点投入研发，成功推出高性能光模块产品如 400G 和 800G 的 LPO 线性直驱光模块，并优化生产工艺提高良率。电信宽带事业部在 10G PON 产品上取得强劲增长，积极布局 25G PON 研发。无线事业部克服行业挑战，拓展客户群体，成功推出一体化基站平台，成为业界领先的小基站解决方案提供商。光电子事业部完成新一代硅光产品开发，启动多款产品生产导入和客户认证工作。

在光电子产品方面，公司在 2023 年对光模块业务进行了战略调整。公司以高速 400G 和 800G PAM4 系列光模块为核心，辅以传统 100G 光模块，形成了层次分明、重点突出的业务布局。在研发上，深入开发 400G 和 800G 的 LPO 线性直驱光模块产品；优化 800G 8×FR1 及 800G 2×FR4 产品的生产工艺，同时提升良率；推动新一代低功耗、低成本的 400G DR4/DR4+ 产品进入大规模生产阶段；对 1.6T 光模块产品进行了持续优化。2023 年，光电子事业部成功完成了新一代 800G 8×FR1 硅光产品和 800G 2×FR4 硅光产品的开发工作，并启动了客户认证测试流程。公司加大了 1.6T 光模块产品的研发投入，利完成了新一代低功耗低成本 400G QSFP-DD DR4/DR4+ 产品、新一代 100G DR1/FR1/LR1 SFP-DD 产品以及低成本 100G LR4 QSFP28 非气密产品等多个产品的生产导入和客户认证工作。在 2023 年底启动了 400G DR4 QSFP112 和 400G QSFP-DD FR4 降本方案的产品研发项目，并计划于 2024 年开始逐步进行生产导入和客户认证。此外，事业部还完成了多款 400G 和 800G 的 LPO 产品的研发工作。其中，400G DR4 LPO 和 800G DR8 LPO 产品在客户交换机的测试结果表现优异，多款 LPO 产品也已在 2023 年陆续送达客户进行送样和认证测试。在生产和工艺方面，事业部不断优化 800G 8×FR1 产品和 800G 2×FR4 的生产工艺，提高了良率，并在上海工厂逐步实现量产。同时，事业部还对 100G CWDM4、100G LR4、100G DR/FR、400G DR4、400GFR4 等多个产品进行了持续的工艺优化和降本改进，以降低成本并提升市场竞争力。其中，子公司方面，在数据中心和云计算市场领域，CIG 美国的高速光模块产品 2023 年发货保持稳定；2023 年下半年，CIG 日本圆满完成了 8×100G 光模块的新产品导入和产能提升任务，这其中包括基于 EML 激光器和硅光子技术的两种不同技术路线，针对硅光工艺所涉及的可靠性、生产效率、良率和成本等核心问题进行了深入研究和解决。

9、铭普光磁：深耕光电磁领域，积极布局硅光研发项目

公司主要从事磁性元器件、光通信产品及各类电源产品等的研发、生产、销售与服务，主要产品包括：磁性元器件、光通信产品、各类电源产品及新能源系统等。公司的客户包括通信设备制造商、通信网络运营商、汽车电子制造商、汽车整车厂、网络和终端产品的制造商及终端消费者。

在光通信方面，公司产品主要包括：光器件、光模块。光器件系列产品包括 TOSA、BOSA、TriOSA、QOSA；光模块系列产品涵盖传送网、有线接入网、4G/5G 无线网、数据中心相关产品。公司注重技术研发创新，并推动产品向小型化、低功耗、大容量方向发展，为数据中心客户提供 40G、100G、200G 和 400G 的全系列高速光模块，并且最新硅光 800G DR8 光模块 Demo 已经于 2024 年 3 月通过行业测试标准；为电信设备商客户提供 4G 和 5G 网络承载传输的光模块；以及固网接入 FTTH 应用光模块，已成功研发了 FTTR 相关产品。在硅光研发投入上，积极布局 1.6T DR8 项目、800G DR8 硅光项目、硅光集成等项目。

10、源杰科技：国内光芯片领军企业，积极布局大功率激光器芯片技术

公司聚焦于光芯片行业，主营业务为光芯片的研发、设计、生产与销售，目前公司的主要产品为光芯片，主要应用于电信市场、数据中心市场、车载激光雷达市场等领域。其中电信市场可以分为光纤接入、移动通信网络。在光通信领域中，主要产品包括 2.5G、10G、25G、50G、100G 以及更高速率的 DFB、EML 激光器系列产品和大功率硅光光源产品，主要应用于光纤接入、4G/5G 移动通信网络和数据中心等领域。在车载激光雷达领域，公司产品涵盖 1550 波段车载激光雷达激光器芯片等产品。

公司生产激光器芯片属于 IDM 模式，掌握芯片设计、晶圆外延等光芯片制造的核心技术，已建立了包含芯片设计、晶圆制造、芯片加工和测试的 IDM 全流程业务体系，拥有多条覆盖 MOCVD 外延生长、光栅工艺、光波导制作、金属化工艺、端面镀膜、自动化芯片测试、芯片高频测试、可靠性测试验证等全流程自主可控的生产线，在硅光方面，公司积极布局大功率激光器芯片技术，如硅光子技术中的 70mW、100mW 大功率激光器，在材料科学与产品可靠性工程的大量研发投入，实现大功率光芯片严苛操作场景下的可靠性要求；采用掩埋型激光器芯片制造平台成功开发的 70mW 大功率激光器芯片有望成为应对满足未来硅光趋势的产品。

11、长光华芯：大功率激光芯片领军企业，硅光芯片勾勒新成长曲线

公司聚焦半导体激光领域，专注于半导体激光芯片的研发、设计及制造，主要产品包括高功率单管系列产品、高功率巴条系列产品、高效率 VCSEL 系列产品及光通信芯片系列产品等，逐步实现高功率半导体激光芯片的国产化。公司目前已形成由半导体激光芯片、器件、模块及直接半导体激光器构成的四大类、多系列产品矩阵，成为半导体激光行业的垂直产业链公司。针对半导体激光行业核心的芯片环节，公司已建成覆盖芯片设计、外延生长、晶圆处理工艺（光刻）、解理/镀膜、封装测试、光纤耦合等 IDM 全流程工艺平台和 2、3、6 吋量产线，应用于多款半导体激光芯片开发，突破一系列关键技术，是少数研发和量产高功率半导体激光芯片的公司之一，同时，依托公司高功率半导体激光芯片的技术优势，公司业务横向扩展，建立了高效率 VCSEL 激光芯片和高速光通信芯片两大产品平台，另外公司业务向下游延伸，开发器件、模块及终端直接半导体激光器。

公司光通信产品市场不断拓展，已正式进入高端光通信领域。2023 年，公司推出单波 100G EML (56GBd EML 通过 PAM4 调制)、50G VCSEL (25G VCSEL 通过 PAM4 调制)、100mW CW DFB 大功率光通信激光芯片，是当前 400G/800G 超算数据中心互连光模块的核心器件。其中 100mW CW DFB 产品可用于硅光光模块方向，且具备高出光功率、高转化效率、适应高速率需求等特点：（1）高出光功率：相比业界 70mW 光源提升 1.5dB 以上，400GE DR4 硅光光模块仅需 1 颗光源就能实现，简化光模块设计，显著降低光模块成本；（2）高光电转换效率：降低 per-bit 功耗，芯片功耗优于同类产品，提升芯片长期工作可靠性，该光源兼容 800G/1.6T 等场景的光互联应用，满足高速率的持续演进诉求；（3）面向未来长期演进：该光源兼容 800G/1.6T 等场景的光互联应用，满足高速率的持续演进诉求。

12、仕佳光子：光电子芯片核心供应商，积极配套国际主要硅光光模块企业

公司聚焦光通信行业，主营业务覆盖光芯片及器件、室内光缆、线缆材料三大板块，主要产品包括 PLC 分路器芯片系列产品、AWG 芯片系列产品、DFB 激光器

芯片系列产品、光纤连接器、室内光缆、线缆材料等。公司产品主要应用于骨干网和城域网、光纤到户、数据中心、4G/5G 建设等。

针对光通信行业核心的芯片环节，公司系统建立了覆盖芯片设计、晶圆制造、芯片加工、封装测试的 IDM 全流程业务体系。并围绕光芯片进行横向拓展和纵向延伸：在横向拓展方面，公司从单一 PLC 光分路器芯片突破至系列无源芯片（PLC 光分路器芯片、AWG 芯片）、有源芯片（DFB 激光器芯片），并逐步开发 VOA 芯片、热光开关芯片、EML 芯片等，未来向“有源+无源”的光电集成方向演进，紧跟行业发展趋势；在纵向延伸方面，公司以晶圆、芯片为基础，通过封装工艺技术的不断提升，由芯片逐步向器件模块领域延伸。

在千兆宽带接入、骨干网相干通信、高速数据中心用核心光无源/有源芯片等优势产品基础上，重点对 400G/800G 光模块用 AWG、平行光组件、超高折射率差 AWG 芯片、高速激光器和硅光用连续波高功率激光器等芯片及组件，相干通信用超宽带密集波分复用 AWG 等关键技术持续优化，其中在硅光领域，公司开发出面向数据中心和人工智能算力应用硅光配套的高功率 DFB 芯片及器件，实现小批量销售，并在性能指标上突破，实现商温 200mW 输出；开发出折射率差 0.36~2.5% 二氧化硅光子芯片设计及制造技术，并开发出 Y 分支、MZI 结构、AWG 结构等多种 PDK，可对外提供技术加工服务，获国家重点研发计划项目资助；应用于光纤接入网领域硅光收发模块工程化研究已经完成项目和课题指标任务要求，处于项目验收中；完成硅光 SOI-VOA 器件开发，样品送样测试进行中。

13、杰普特：激光/光学智能设备领先企业，积极布局硅光晶圆测试系统

公司是一家集研发、生产和销售激光器、激光/光学智能装备和光纤器件于一体的国家级高新技术企业。其主营业务为研发、生产和销售激光器以及主要用于集成电路和半导体光电相关器件精密检测及微加工的智能装备。

公司主要产品包括激光器、激光/光学智能装备和光纤器件。公司的激光器产品包括脉冲光纤激光器、连续光纤激光器、固体激光器和超快激光器等。公司自主研发的 MOPA 脉冲光纤激光器在国内率先实现了批量生产和销售，填补了国内该领域的技术空白。产品主要应用于智能手机、半导体、集成电路、被动元件、动力电池、光伏材料等的精密制造和检测。公司是中国首家商用“脉宽可调高功率脉冲光纤激光器（MOPA 脉冲光纤激光器）”生产制造商和领先的光电精密检测及激光加工智能装备提供商。

在硅光方面，公司研发的硅光晶圆测试系统通过光纤列针、电子探针等方式测试硅光晶圆的光波导传输损耗、光电调制器调制性能、光电探测器光电响应性能等特性以衡量其品质，并已得到消费电子国际头部客户认可。

14、罗博特科：参股公司 ficonTEC，深度布局硅光芯片封装测试设备

公司是一家研制高端自动化装备和基于工业互联网技术的智能制造执行系统软件（R2 Fab）的高新技术企业。公司拥有完整的研发、设计、装配、测试、销售和服务体系，为光伏、电子及半导体等领域提供柔性、智能、高效的高端自动化装备及 R2 Fab 系统软件。目前公司产品主要应用于光伏电池领域。

公司致力于通过智能移动机器人及执行制造系统，解决光模块组装、测试、老化、终测、外观终检和模块包装各工艺段间的物料智能转运、物料线边库管理；原材料和成品的立体存储管理。通过 RFID 芯片技术记录和实现产品加工过程中跟踪

与追溯功能。其工厂解决方案助力光模块生产数字化、信息化和智能化，实现传统光模块生产向智能制造转型。在电子及半导体板块，积极布局高速硅光光模块封装与测试系统。

公司依托多年的战略布局，在持续深入拓展在光芯片、光电子及半导体高端装备业务布局。公司参股公司 ficonTEC 是光电产业微组装及测试解决方案供应商，光芯片的测试及贴装是其业务之一，其光电器件自动组装及测试设备广泛应用于全球集成光电应用领域，包括数通、电信、生物医疗及汽车行业的传感应用，大功率激光器装配等。通过模块式系统架构，公司提供的解决方案可以适用于从早期器件研发，到新产品导入（NPI）直至大批量生产的每一个阶段，积极参与到硅光集成产业的发展中。

15、炬光科技：具备应用于硅光学元器件加工的晶圆级同步结构化技术

公司主要从事光子行业上游的高功率半导体激光元器件和原材料（“产生光子”）、激光光学元器件（“调控光子”）的研发、生产和销售，目前正在拓展光子行业中游的光子应用模块、模组和子系统业务（“提供光子应用解决方案”）。公司重点布局汽车应用、泛半导体制程、医疗健康三大应用方向，向不同客户提供上游核心元器件和中游光子应用解决方案，产品逐步被应用于先进制造、医疗健康、科学研究、汽车应用、消费电子五大领域。

2022年12月，公司发布了具有超大矢高（Sag）的硅光学元器件。硅光学元器件的典型加工技术是刻蚀和 CNC 加工，受工艺限制因素，硅光学元器件的矢高值（Sag）往往小于 $60\ \mu\text{m}$ ，公司的晶圆级同步结构化技术加工的硅光学元器件，能够在 $0^\circ\sim 80^\circ$ 出射角下达到高达 4mm 的矢高值（Sag），最大限度地提高了硅光学元器件所能达到的数值孔径（NA），有望超越传统技术加工的硅光学元器件的极限，从而生产先进硅光学产品，例如大矢高偏心微透镜阵列、闪耀光栅、啁啾阵列或集成棱镜，以及通过精密划切技术生产小微尺寸单只硅棱镜、柱镜等短波、中波红外用途光学器件。公司的圆级同步结构化制造技术可生产最大 $300\ \times\ 300\text{mm}^2$ 的微光学晶圆，可扩展性强，且具有非常高的成本效益，适合超大批量生产，从而满足物联网、生物传感、智能终端等各类批量应用场景的需求。

16、光库科技：光纤器件领先企业，深度布局薄膜铌酸锂方案

超高速光通信调制器芯片与模块是用于长途相干光传输和超高速数据中心的核心理器件，有望跟随光网络设备市场持续保持增长。目前行业内光调制技术主要有三种：基于硅光、磷化铟和铌酸锂材料平台的电光调制器。其中，硅光调制器主要是应用在短程的数据通信用收发模块中，磷化铟调制器主要用在中距和长距光通信网络收发模块，铌酸锂电光调制器主要用在 100Gbps 以上的长距骨干网相干通讯和单波 100/200Gbps 的超高速数据中，在上述三种超高速调制器材料平台中，近几年出现的薄膜铌酸锂调制器具备了其它材料无法比拟的带宽优势。

公司是专业从事光纤器件、铌酸锂调制器件及光子集成器件的设计、研发、生产、销售及服务的高新技术企业。公司产品为光纤激光器件和光通讯器件。在技术方面，公司掌握了多项业界领先的光纤器件设计、制造和封装技术，包括铌酸锂调制器芯片制程和模块封装技术等。同时，公司的全资子公司加华微捷针对应用于相干通信及硅光光模块高耦合效率封装的光纤阵列已获得多项专利。

在数据通讯领域，公司的核心竞争力在于光学微连接组件的先进制造和封装技

术、高速光学连接组件的设计能力和对定制产品批量生产的快速转化能力。公司研发生产的高端微型光纤连接产品、微光学连接产品、保偏光纤阵列和高密度光纤阵列产品，主要应用于 40Gbps、100Gbps、400Gbps、800Gbps 等高速、超高速光模块、相干通讯模块和 WSS 产品中，并成为全球多家大型数据通讯公司的核心供应商。在光学芯片领域，公司生产的 400/800Gbps 铌酸锂相干调制器、20/40GHz 模拟调制器、10Gbps 零啁啾强度调制器等，广泛用于超高速干线光通信网、海底光通信网、城域核心网、测试及科研等领域，是目前在超高速调制器芯片和模块产业化、规模化领先的公司之一。公司开发的新一代薄膜铌酸锂光子集成技术，既可以用在相干传输形式，也可以用于非相干传输模式，与其它传统的调制器相比，具有高速率、低功耗、高信噪比等诸多优点，可望在长途骨干网、城域网、数据中心和数据中心互联市场占有重要地位。

17、赛微电子：全球 MEMS 代工龙头，积极布局 MEMS 硅光子器件

MEMS 是微电路和微机械按功能要求在芯片上的一种集成，基于光刻、腐蚀等传统半导体技术，融入超精密机械加工，并结合力学、化学、光学等学科知识和技术基础，使得一个毫米或微米级的 MEMS 具备精确而完整的机械、化学、光学等特性结构。随着万物互联与人工智能的兴起，作为集成电路细分行业的 MEMS 获得了更广阔的市场空间和业务机会。在通信领域，除 MEMS 光开关在传输领域的成熟应用外，数据中心及 AI 超级计算机对硅光子技术的采用，促进了 MEMS-OCS（Optical Circuit Switch，光链路交换器件）的兴起。

公司是全球领先、国际化运营的高端集成电路芯片晶圆制造厂商，也是国内拥有自主知识产权和掌握核心半导体制造技术的特色工艺专业芯片晶圆制造商。公司在国内外拥有多座中试平台及量产工厂，业务遍及全球，服务客户包括国际知名的光刻机、DNA/RNA 测序仪、红外热成像、计算机网络及系统、元宇宙、硅光子、AI 计算、ICT、新型医疗设备巨头厂商以及各细分行业的领先企业，涉及产品范围覆盖了通讯、生物医药、工业汽车、消费电子等诸多应用领域。公司同时正在打造先进的晶圆级封装测试能力，致力于为客户提供从工艺开发、晶圆制造到封装测试的系统化高端制造服务，努力发展成一家立足本土、国际化经营的知名半导体制造领军企业。

公司从事的主要业务为 MEMS 芯片的工艺开发及晶圆制造，同时，公司围绕半导体主业开展产业投资布局，对实体企业、产业基金进行参股型投资。公司现有 MEMS 业务包括工艺开发和晶圆制造两大类。公司积极布局 MEMS 硅光子通信芯片制造技术以及新型 MEMS 硅光子器件制造技术，形成面向硅光子通信芯片的 MEMS 工艺开发及 CMOS 晶圆再加工的 MEMS 制造能力，服务并满足来自通信、消费电子领域设计厂商的代工需求。公司全资子公司瑞典 Sillex 是全球领先的纯 MEMS 代工企业，服务于全球各领域巨头厂商，且正在瑞典持续扩充产能；同时公司控股子公司赛莱克斯北京已投入运营并持续推动产能爬坡，公司有望继续保持纯 MEMS 代工的全球领先地位。

18、云南锗业：锗业龙头，硅光上游原材料关键厂商

在硅基光电子领域中，硅-锗结合的技术被广泛研究和应用，锗（Ge）探测器是硅基光电子芯片中实现光电信号转化的核心器件。在硅基光电子芯片工艺中实现异质单片集成高性能 Ge 探测器工艺，是光模块等硅基光电子产品实现小体积、低成本和易制造的优先选择；另一方面，六方结构硅锗合金直接带隙发光、硅基锗以

及锗锡和锗铅直接带隙材料发光也是实现硅基光源的重要途径，

公司是一家拥有完整产业链的锗行业上市公司，拥有丰富、优质的锗矿资源，锗产品产销量全国第一，是目前国内最大的锗系列产品生产商和供应商。公司产品在半导体、航空航天测控、核物理探测、光纤通讯、红外光电、太阳能电池、化学催化剂、生物医学等领域都有广泛而重要的应用。

公司主要业务为锗矿开采、火法富集、湿法提纯、区熔精炼、精深加工及研究开发。目前公司矿山开采的矿石及粗加工产品不对外销售，仅作为公司及子公司下游加工的原料。公司目前材料级锗产品主要为锗锭（金属锗）、二氧化锗；深加工方面，光伏级锗产品主要为太阳能锗晶片，红外级锗产品主要为红外级锗单晶及毛坯（光学元件）、锗镜片、镜头、红外热像仪、光学系统，光纤级锗产品为光纤用四氯化锗，化合物半导体材料主要为砷化镓晶片、磷化铟晶片。公司产品主要运用包括红外光电、太阳能电池、光纤通讯、发光二极管、垂直腔面发射激光器（VCSEL）、大功率激光器、光通信用激光器和探测器等领域。

19、天通股份：钽酸锂材料核心供应商，领先布局 CCZ 设备与压电材料

公司主要从事电子材料(包含磁性材料与部品，蓝宝石、压电晶体等晶体材料)的研发、制造和销售；高端专用装备(包含晶体材料专用设备、粉体材料专用设备)研发、制造和销售。

公司在压电晶体材料方面主要从事钽酸锂(LN)、钽酸锂(LT)晶体材料的研发、生产和销售。产品包括钽酸锂、钽酸锂晶棒，4-8 寸钽酸锂、钽酸锂晶片(包含普通白片和低静电黑化晶片)。产品具有优异的压电、非线性光学、电光、热释电及光折变等性能，可用来制作各种功能器件，诸如：声表面波器件、红外探测器、高频宽带滤波器、电光调制器、高频换能器。产品广泛应用于移动通信、雷达、北斗导航、物联网及消费类电子、数据中心等领域。2023 年，公司已成功研发并量产 6 英寸声表级的钽酸锂（LT）和钽酸锂（LN）晶体和黑化抛光晶片产品，打破了国外垄断，填补了国内空白，实现技术的自主可控。

20、凌云光：视觉领域领军企业，光通信业务代理硅光产品

公司以光技术创新为基础，围绕机器视觉与光纤光学开展业务，致力于成为视觉人工智能与光电信息领域的全球领军企业。在光纤光学领域，组织硅光集成，量子测量和特种光纤熔接处理等高端产品解决方案，服务高端光通信与光纤激光科研及产业客户，从科研到产业化，助力行业发展进步。2021 年凌云光携 800G、硅光集成、全光交换、熔接一体化等多个解决方案亮相 CIOE 2021；2023 年公司表示其光通信业务代理的硅光产品可以实现 200G/400G/800G 及以上的高速光传输。

21、聚飞光电：国内背光 LED 龙头企业，参股国内硅光领军企业熹联光芯

公司是国内背光 LED 龙头企业，专业从事 SMD LED 器件、Mini/Micro LED 器件、光器件、光学膜材、不可见光的研发、生产与销售。产品广泛应用于手机、PAD、电脑、TV、电器等消费类电子产品及显示屏、照明、汽车电子、光通信、光学传感等领域。

公司参股 4.43%的苏州熹联光芯电子科技有限公司是国内硅光领域领军企业。熹联光芯成立于 2020 年 7 月 20 日，由半导体、硅光及金融等领域多位资深专家领头，在硅光领域有多年的技术积累和储备，掌握硅光领域全套核心技术（包括芯片、

引擎、模块的开发、设计、流片、加工制造），拥有硅光领域完整的自有设计器件 IP 组合，同时拥有光电一体全集成化的硅光芯片技术，核心技术能够涵盖多种产品和应用领域，从无线通信、数据通信（光引擎&光模块）、服务器网络、智能驾驶、激光雷达、生物传感等拥有多领域技术储备和商业合作，并于 2021 年 10 月份完成了对德国 Sicoya GmbH 的 100% 股权并购，以苏州为总部，以上海和柏林研发中心为双引擎，结合国内制造基地强大的量产实力，将快速实现推动硅光科技的发展。

表8：受益标的估值信息表

公司名称	证券代码	股价 (元)	市值(亿 元)	EPS			PE			评级
				2024E	2025E	2026E	2024E	2025E	2026E	
中际旭创	300308.SZ	157.27	1266.87	1.00	6.91	8.14	157.81	22.75	19.32	买入
天孚通信	300394.SZ	88.56	490.54	2.45	3.58	4.84	36.14	24.74	18.29	买入
新易盛	300502.SZ	86.73	615.71	2.07	3.00	4.15	41.82	28.92	20.91	买入
亨通光电	600487.SH	14.96	369.02	1.10	1.34	1.59	13.61	11.20	9.41	未评级
华工科技	000988.SZ	29.96	301.25	1.30	1.62	1.91	23.09	18.49	15.66	买入
光迅科技	002281.SZ	33.00	262.09	1.02	1.31	1.66	32.31	25.21	19.86	增持
博创科技	300548.SZ	21.49	61.67	0.58	0.77	0.94	36.92	27.86	22.98	未评级
剑桥科技	603083.SH	33.86	90.78	-	-	-	-	-	-	增持
铭普光磁	002902.SZ	22.38	52.86	0.36	0.61	0.00	62.94	36.82	-	未评级
源杰科技	688498.SH	129.81	110.94	0.40	0.48	0.56	322.67	267.98	230.32	买入
长光华芯	688048.SH	36.54	64.41	0.47	0.85	0.61	77.60	42.94	59.58	买入
仕佳光子	688313.SH	10.06	46.16	0.10	0.20	0.29	97.10	51.35	34.46	增持
杰普特	688025.SH	43.80	41.63	2.00	2.99	3.69	21.95	14.66	11.86	增持
罗博特科	300757.SZ	119.04	131.41	1.18	1.63	2.01	101.08	73.00	59.19	未评级
炬光科技	688167.SH	65.01	58.75	0.96	1.75	2.49	67.40	37.07	26.11	买入
光库科技	300620.SZ	39.12	97.72	0.35	0.52	0.70	112.87	75.39	55.80	未评级
赛微电子	300456.SZ	17.45	127.77	0.35	0.48	0.73	49.24	36.40	23.97	未评级
云南锗业	002428.SZ	10.23	66.81	0.04	0.07	0.10	236.81	139.18	100.59	未评级
天通股份	600330.SH	7.31	90.16	0.32	0.37	0.43	22.60	19.73	16.99	未评级
凌云光	688400.SH	17.09	79.21	0.36	0.48	0.58	47.46	35.35	29.71	买入
聚飞光电	300303.SZ	4.98	66.85	0.22	0.28	0.36	22.50	17.68	13.95	未评级

数据来源：Wind、开源证券研究所，股价为 2024 年 5 月 31 日收盘价，除中际旭创、源杰科技、炬光科技、凌云光由开源证券研究所预测外，其余标的均采用 Wind 一致预期

5、风险提示

1、AIGC 发展放缓，配套硅光产品不及预期的风险

全球企业 IT 支出和数据中心建设发展若不及预期，整体光通信升级放缓，配套硅光应用如硅光光模块、光器件、光引擎等或面临需求减弱的风险。

2、硅光工艺升级不及预期的风险

硅光工艺对量产的影响较大，若硅光工艺发展不及预期，硅光芯片的良率、一致性等性能较差，或严重影响硅光规模化生产。

3、硅光非通信领域发展不及预期影响

在光计算、光传感等非通信领域，硅光应用市场前景广阔，若相关领域发展不及预期，亦将影响硅光产品发展。

4、存在贸易壁垒的风险

目前硅光芯片生产主要集中于海外，如果未来国际环境发生不利影响，或将减少国产硅光产品需求，增加关键原材料的采购难度，影响国内硅光产业二发展。

特别声明

《证券期货投资者适当性管理办法》、《证券经营机构投资者适当性管理实施指引（试行）》已于2017年7月1日起正式实施。根据上述规定，开源证券评定此研报的风险等级为R3（中风险），因此通过公共平台推送的研报其适用的投资者类别仅限定为专业投资者及风险承受能力为C3、C4、C5的普通投资者。若您并非专业投资者及风险承受能力为C3、C4、C5的普通投资者，请取消阅读，请勿收藏、接收或使用本研报中的任何信息。因此受限于访问权限的设置，若给您造成不便，烦请见谅！感谢您给予的理解与配合。

分析师承诺

负责准备本报告以及撰写本报告的所有研究分析师或工作人员在此保证，本研究报告中关于任何发行商或证券所发表的观点均如实反映分析人员的个人观点。负责准备本报告的分析师获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户的反馈、竞争性因素以及开源证券股份有限公司的整体收益。所有研究分析师或工作人员保证他们报酬的任何一部分不曾与，不与，也将不会与本报告中具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

股票投资评级说明

	评级	说明
证券评级	买入（Buy）	预计相对强于市场表现 20%以上；
	增持（outperform）	预计相对强于市场表现 5%~20%；
	中性（Neutral）	预计相对市场表现在-5%~+5%之间波动；
	减持	预计相对弱于市场表现 5%以下。
行业评级	看好（overweight）	预计行业超越整体市场表现；
	中性（Neutral）	预计行业与整体市场表现基本持平；
	看淡	预计行业弱于整体市场表现。

备注：评级标准为以报告日后的 6~12 个月内，证券相对于市场基准指数的涨跌幅表现，其中 A 股基准指数为沪深 300 指数、港股基准指数为恒生指数、新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）、美股基准指数为标普 500 或纳斯达克综合指数。我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议；投资者买入或者卖出证券的决定取决于个人的实际情况，比如当前的持仓结构以及其他需要考虑的因素。投资者应阅读整篇报告，以获取比较完整的观点与信息，不应仅仅依靠投资评级来推断结论。

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

法律声明

开源证券股份有限公司是经中国证监会批准设立的证券经营机构，已具备证券投资咨询业务资格。

本报告仅供开源证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的机构或个人客户（以下简称“客户”）使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告是发送给开源证券客户的，属于商业秘密材料，只有开源证券客户才能参考或使用，如接收人并非开源证券客户，请及时退回并删除。

本报告是基于本公司认为可靠的已公开信息，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、工具、意见及推测只提供给客户作参考之用，并非作为或被视为出售或购买证券或其他金融工具的邀请或向人做出邀请。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，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。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。客户应当考虑到本公司可能存在可能影响本报告客观性的利益冲突，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。本报告中所指的投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。本公司未确保本报告充分考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需要。本公司建议客户应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。若本报告的接收人非本公司的客户，应在基于本报告做出任何投资决定或就本报告要求任何解释前咨询独立投资顾问。

本报告可能附带其它网站的地址或超级链接，对于可能涉及的开源证券网站以外的地址或超级链接，开源证券不对其内容负责。本报告提供这些地址或超级链接的目的纯粹是为了客户使用方便，链接网站的内容不构成本报告的任何部分，客户需自行承担浏览这些网站的费用或风险。

开源证券在法律允许的情况下可参与、投资或持有本报告涉及的证券或进行证券交易，或向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务在内的服务或业务支持。开源证券可能与本报告涉及的公司之间存在业务关系，并无需事先或在获得业务关系后通知客户。

本报告的版权归本公司所有。本公司对本报告保留一切权利。除非另有书面显示，否则本报告中的所有材料的版权均属本公司。未经本公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。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。

开源证券研究所

上海

地址：上海市浦东新区世纪大道1788号陆家嘴金控广场1号楼10层

邮编：200120

邮箱：research@kysec.cn

北京

地址：北京市西城区西直门外大街18号金贸大厦C2座9层

邮编：100044

邮箱：research@kysec.cn

深圳

地址：深圳市福田区金田路2030号卓越世纪中心1号楼45层

邮编：518000

邮箱：research@kysec.cn

西安

地址：西安市高新区锦业路1号都市之门B座5层

邮编：710065

邮箱：research@kysec.cn