

硅光：“超越摩尔”新路径，厚积薄发大未来

华西通信团队

2022年1月14日

分析师：宋辉

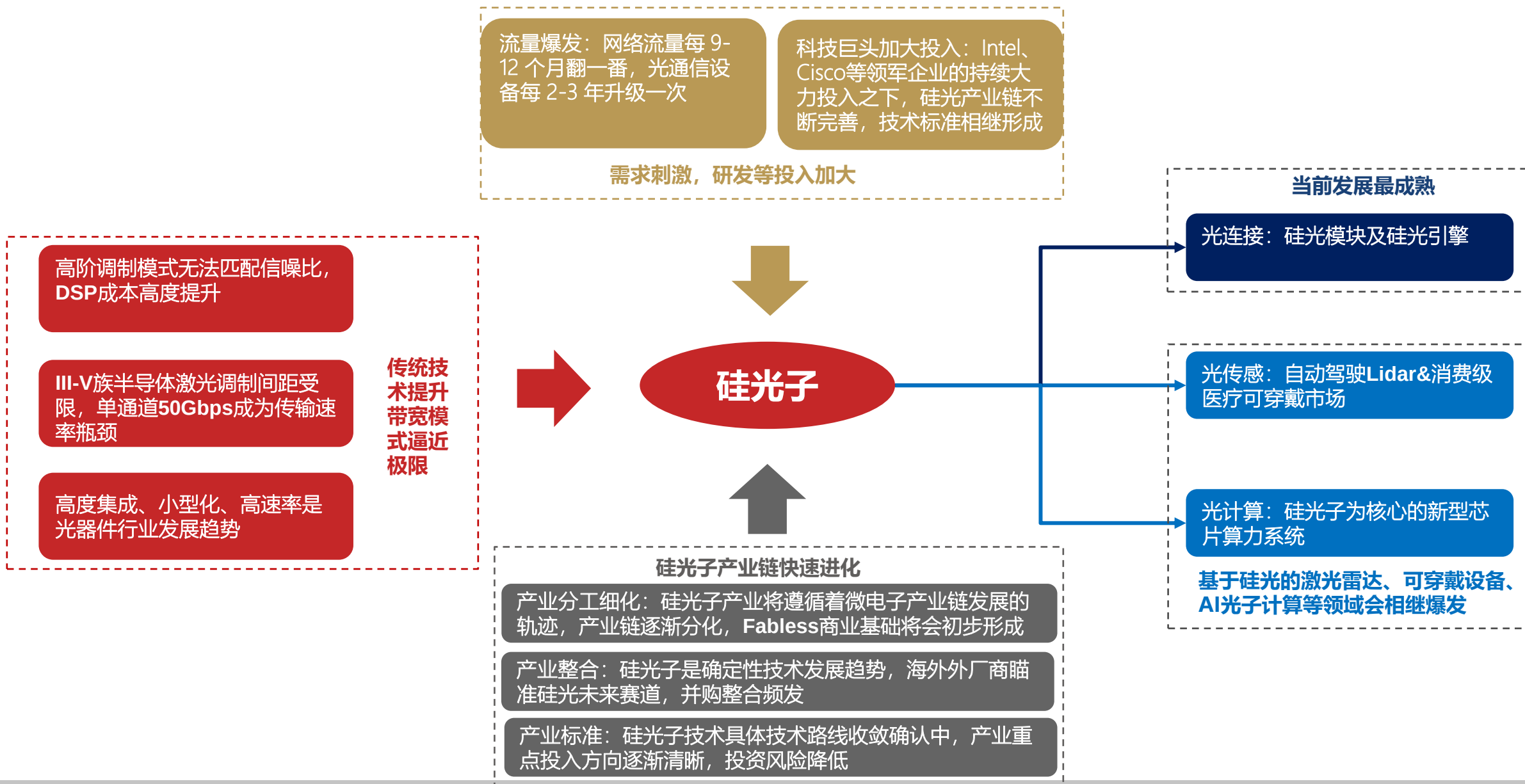
SACNO: S1120519080003

邮箱: songhui@hx168.com.cn

分析师：柳珏廷

SACNO: S1120119060016

邮箱: liujt@hx168.com.cn



- 流量爆发：全球数据中心流量从2016年的6.8 ZB增长到2021年的20.6ZB，网络流量每 9-12 个月翻一番，光通信设备每 2-3 年升级一次，“泽”字节时代流量增长依旧是ICT行业最原始驱动力。
- 传统技术面对大数据纷纷失效，硅光子技术：10nm后硅基CMOS摩尔定律失效，传统集成电路、器件提升带宽模式逼近极限；硅光有机结合了成熟微电子和光电子技术，既减小了芯片尺寸，降低成本、功耗、又提高了可靠性，成为“超越摩尔”的新技术路径。
- 硅光子是确定性技术发展趋势，海内外巨头公司瞄准硅光赛道收并购频发，科技巨头公司高度重视硅光技术。
- 硅光子具体技术路线在收敛确认中（EPIC/PIC+EIC, DSP/non-DSP），产业重点投入方向逐渐清晰，当前投资风险相较过去大幅降低。
- 当期硅光发展不成熟的关键因素在于，硅光子产业链没有像微电子产业一样完全形成Foundry厂与硅光设计公司分开的产业格局，Fabless厂商要同时考虑工艺问题，无法专注设计，产业重复投入巨大。
- 目前，硅光子商业化较为成熟的领域主要在于数据中心、高性能数据交换、长距离互联、5G基础设施等光连接领域，800G及以后硅光模块性价比较为突出，产业链进展看，海外巨头Intel、思科等通过自研或收购发展较为领先；国内上市公司光迅科技、新易盛、天孚通信、中际旭创、博创科技等从分立光模块市场纷纷切入硅光领域，但是传统光模块制造过程中封装工序较为复杂，BOM及人工成本需要投入较多，另外未来采用硅光的光电共封装（CPO）技术预计将会成为主流模式，传统光模块生产制造企业将会收到较大的技术挑战，需要持续跟踪国内光模块厂商硅光产品研发、客户验证等进展情况。
- 国内硅光光模块领域重点关注相关初创公司：熹联光芯、奇芯光电、赛勒科技、SiFotonics等。
- 未来，我们判断硅光子产业将遵循着微电子产业链发展的轨迹，产业链逐渐分化，Fabless商业基础将会初步形成，后续基于硅光的激光雷达、可穿戴设备、AI光子计算等领域会相继爆发,受益公司，包括国内初创公司曦智科技（AI光子芯片）、微源光子（硅光Lidar、可穿戴）、国科光芯（硅光Lidar）。

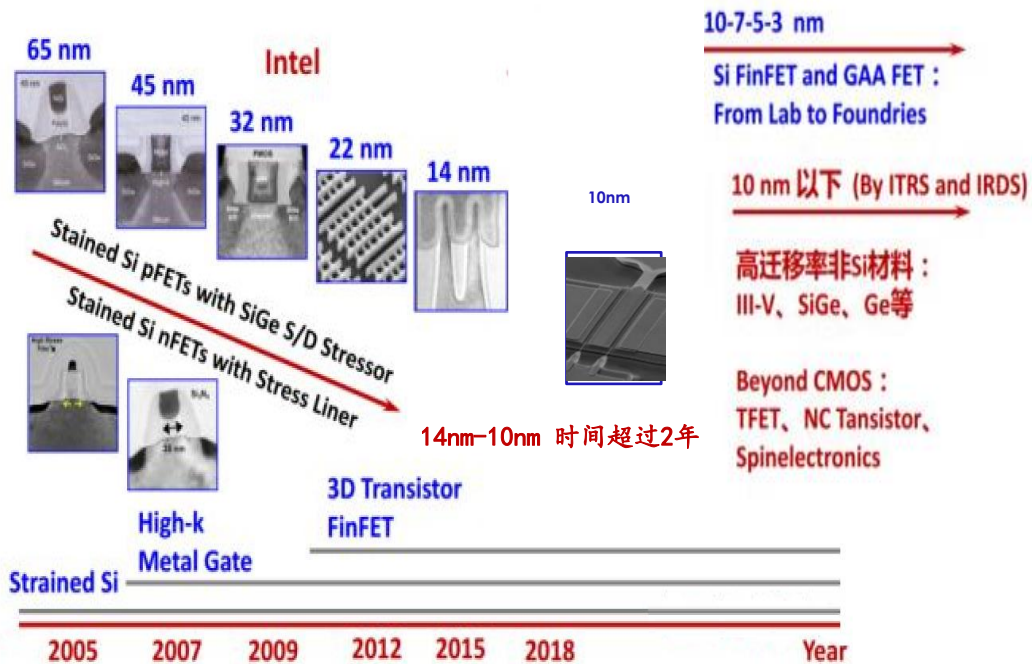


01 后摩尔时代，硅光技术“曙光初现”

后摩尔时代，硅光技术成为降低IO功耗、提升带宽的必要措施

- 随着信号速率每隔3~4年提升一倍，电信号能够传输的距离在逐渐减小。
- 基于成本上的考虑人们还在尽量延续电信号传输的寿命，但由于芯片封装和工艺制程能力不可能无限提升，IO速率不断提升导致的功耗增加最终会触碰到芯片封装的功率墙。因此，硅光技术成为降低IO功耗、提升带宽的必要措施。

图2 10nm之后硅基CMOS遇到物理极限



硅基摩尔定律失效

III-V、SiGe和Ge等高迁移率非硅材料，将会成为产业追寻的新方向。

硅基电子到光子

图1 电子IO性能受传输距离限制

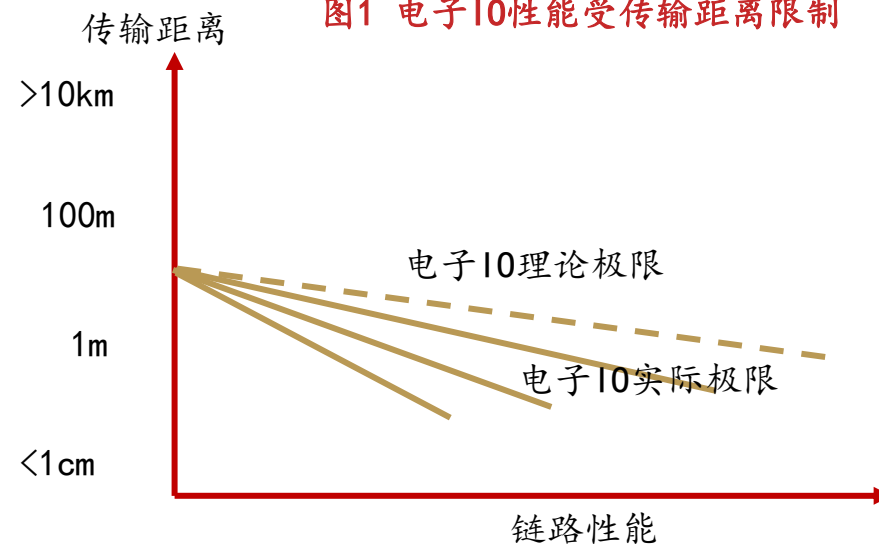
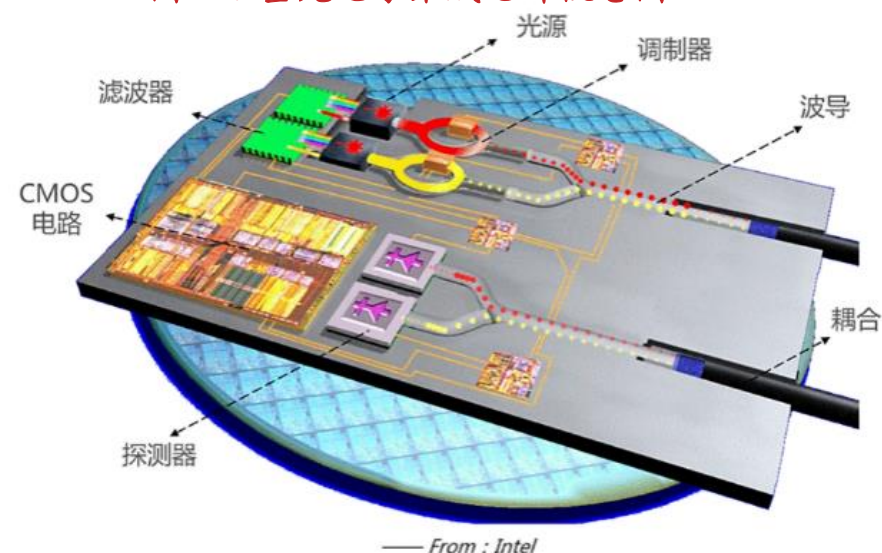


图3 硅基光电子集成芯片概念图



科技巨头高度重视硅光技术

图4 阿里达摩院2022年十大科技趋势预判



- 2021年12月，阿里巴巴达摩院发布2022十大科技趋势，分别是：AI for Science、大小模型协同进化、硅光芯片、绿色能源AI、柔性感知机器人、高精度医疗导航、全域隐私计算、星地计算、云网端融合、XR互联网。
- 其中硅光芯片做外范式重置的关键技术，显示硅光对于行业颠覆式影响。



- 同样在2021年12月，Intel研究院宣布成立集成光电研究中心。该中心的使命是加速光互连输入/输出 (I/O) 技术在性能扩展和集成方面的创新，专注于光电子技术和器件、CMOS电路和链路架构，以及封装集成和光纤耦合。
- 其中，硅上异质集成量子点激光器、由高迁移率透明导电氧化物驱动的 0.5V 硅微型环调制器、硅光子的晶圆级光学封装等成为其重点技术突破方向

图5 Intel宣布成立集成光电研究中心



海外硅光领域并购整合频发，瞄准未来赛道和核心科技

- 硅光子是确定性技术发展趋势，海外硅光并购整合频发，瞄准未来赛道和核心科技：目前硅光领域并购集中在通信领域，硅光transceiver公司大都被通信设备商收购，例如思科, Huawei, Nokia等，另外上游设计工具软件也是并购重点方向。
- 收并购情况看，硅光子具体技术路线在收敛确认中（EPIC/PIC+EIC, DSP/non-DSP），产业重点投入方向逐渐清晰，投资风险降低。

表1 硅光领域并购情况

公司	地区	工艺平台（代工厂）or 主要产品	集成方式	收购情况
思科	美国	CMOS（GF）	EIC, PIC	并购Lightwire (2012 \$271M) /Luxtera (2018 \$660M) /Acacia (2019 \$2600M)
Juniper	美国	CMOS	EIC, PIC	并购Aurion (2016 \$165M)
Nokia	欧洲	CMOS	EIC, PIC	并购Elenion (2020 ~\$160M)
Intel	美国	CMOS（Int.）	EIC, PIC	
Inphi	美国	BiCMOS（Int., TJ）	EIC, PIC	2次以上试图收购硅光相关公司
华为	中国	CMOS	EIC, PIC	并购Caliopa (2013 ~\$5M)
Ansys	美国	Photonics simulation		收购Lumerical
Synopsys	美国	Lay out		收购Phoenix

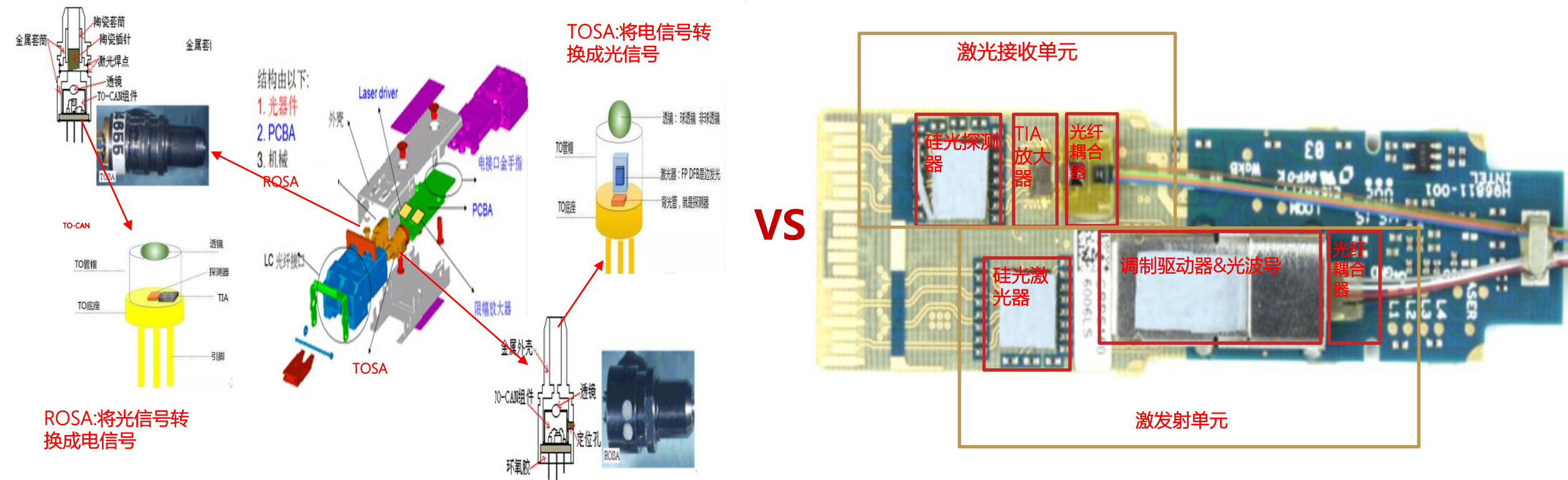


02 什么是硅光？

硅光原理：硅光子学的低成本、高速的光通信技术

- 硅光技术是一种基于硅光子学的低成本、高速的光通信技术，利用基于硅材料的CMOS微电子工艺实现光子器件的集成制备，该技术结合了CMOS技术的超大规模逻辑、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。
- 硅光技术将原本分离器件众多的光、电元件缩小集成到至一个独立微芯片中，实现高集成度、低成本、高速光传输。
- 相比较传统的分立器件光模块，硅光子器件集成度更高（不再需要ROSA和TOSA封装）更加适应未来高速流量传输处理需要。与此同时，更紧密的集成方式降低了光模块的封装和制造成本。

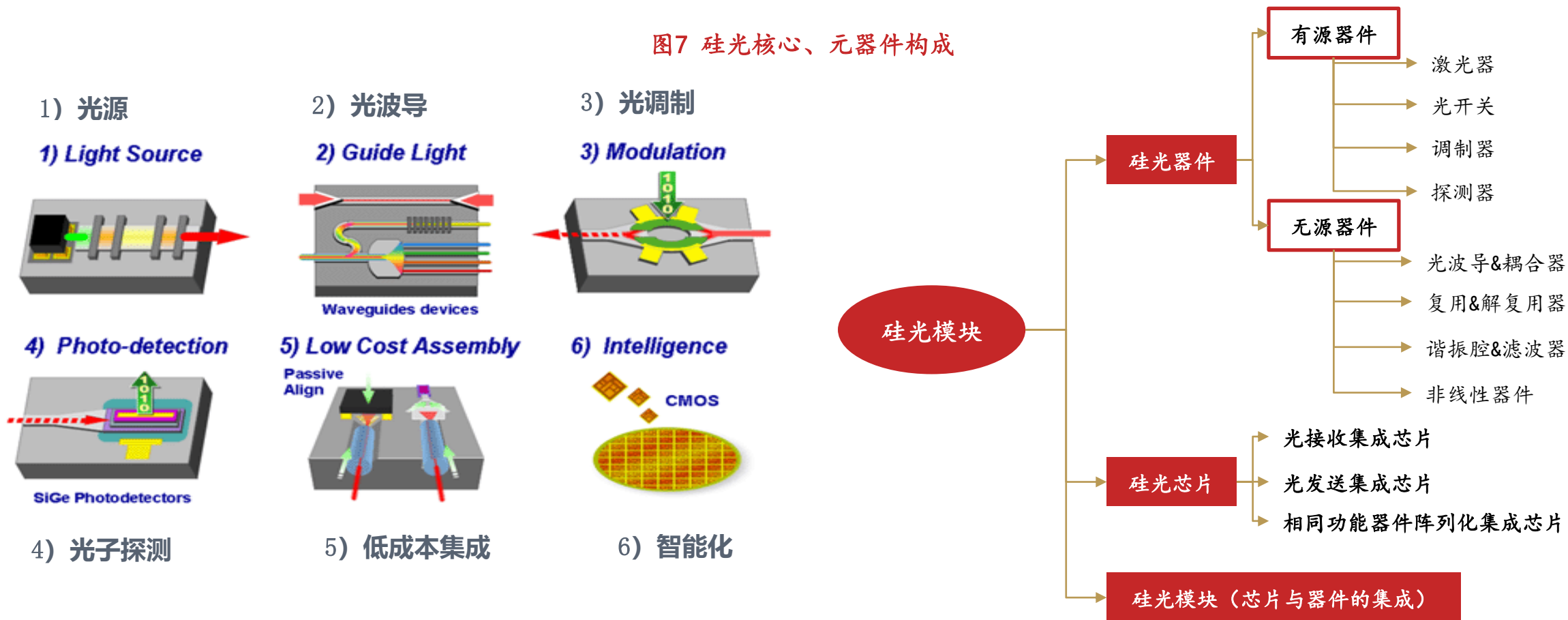
图6 分立元件光模块与硅光单片集成芯片对比：光模块元器件数量大幅减少



硅光核心元器件：光源、光波导、调制器、探测器

- 硅光子核心器件主要包括以硅半导体材料的光有源及无源器件，包括硅基激光器（负责将电信号转化成光信号）、硅基光探测器（负责将光信号转化成电信号）、硅基光调制器（负责将光信号带宽提升）、平面波导（负责光信号在硅基材料上传输）、光栅耦合器（负责与对外连接的光纤对准降低插损）等。

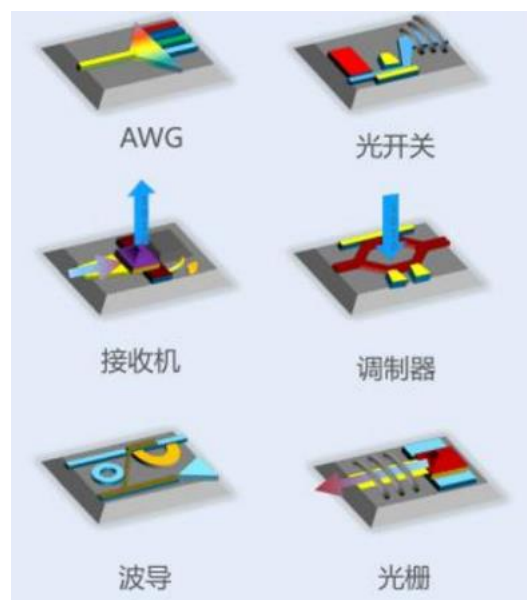
图7 硅光核心、元器件构成



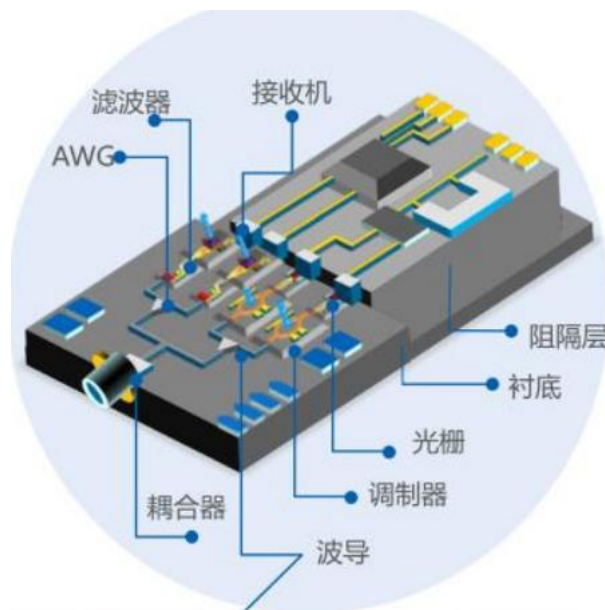
硅光优势：小尺寸、低功耗、低成本

- 硅光集成将核心部件和配件集成在一个晶片上，器件数量显著缩小，密集度有所提升；
- 硅光有机结合了成熟微电子技术和宽带光电子技术，硅光方案既降低了硅光模块、芯片等成本，又提高了可靠性。

图8 硅光优势小尺寸、低功耗、低成本



传统分离器件方案



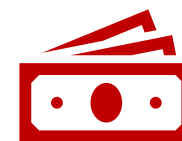
硅光集成芯片方案



小尺寸



低功耗



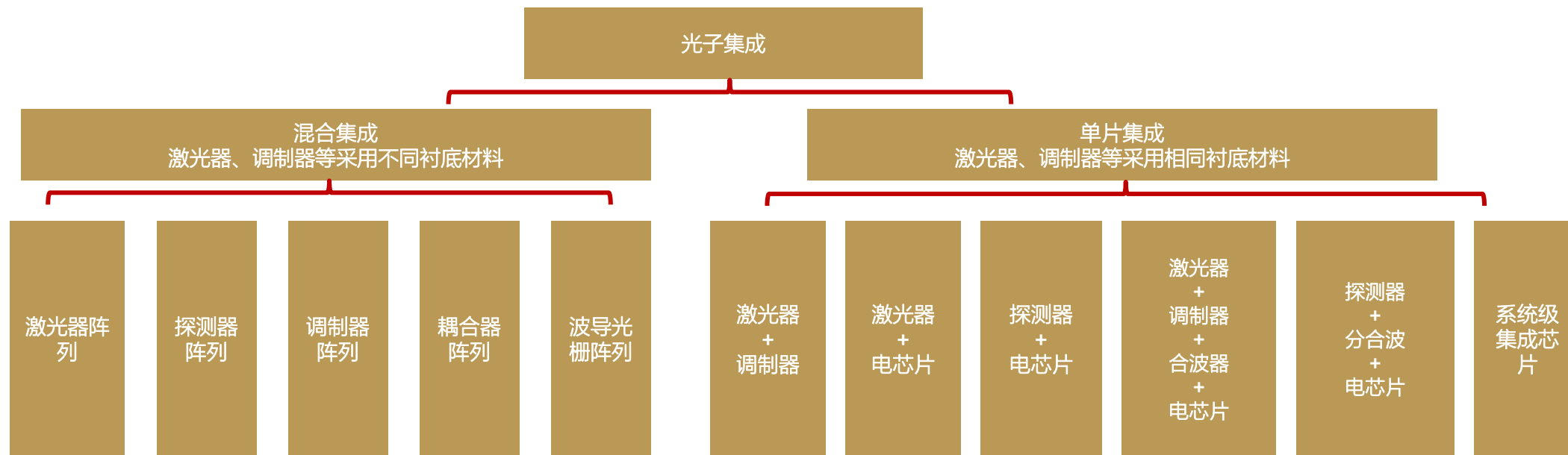
低成本

核心优势

硅光集成：混合集成是当下，单片集成是未来

- 根据集成的元器件是否采用同种材料，光子集成（Photonic Integrated Circuit, PIC）可以分为混合集成和单片集成。
- 硅光器件的演进趋势分为四个阶段：分组硅化、硅光子集成、全光电融合和可编程硅片。
 - ① 分组硅光：硅基器件逐步取代分立元器件；
 - ② **硅光子集成（当前技术阶段）：集成技术从耦合集成向单片集成演进，简化工艺流程提升效率；**
 - ③ 全光电融合：光电一体技术融合，光电全集成化，单芯片光电处理，最低延时，最佳体验；
 - ④ 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；FPGA的可编程硅片，全功能可自定义。
- 当前的硅光器件依然处于演进的初级阶段，集成技术从耦合集成向单片集成演进，简化工艺流程提升效率的第二阶段。

图9 硅光集成方案



混合集成原理

- 混合集成是将使用不同材料、不同制作工艺制造出来的元器件组合安装在同一衬底上，比如说基于硅基的集成(平面光波导混合集成，硅光等)，基于磷化铟的集成等，典型的混合集成是将有源光器件(激光器，探测器等)集成到具有光路连接或者其他一些无源功能(分合波器等)的基板上(平面光波导，硅光等)。
- 它的优势是能够实现无源光波导与有源器件之间较自由的结合。混合集成技术可以将光组件做得很紧凑，顺应光模块小型化趋势，方便使用成熟自动化IC封装工艺，有利于大量生产，是近期数据中心用光模块行之有效技术的方法。
- 然而，不同元器件间需要精密的位置调整与固定，加之不同材料在光学、机械和热特性等方面存在差异，都将增加封装的复杂性和成本，并限制集成规模。

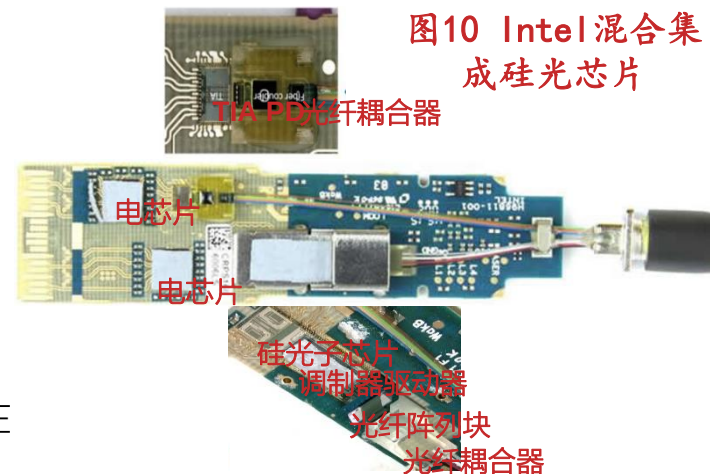


图10 Intel混合集成硅光芯片

图11 硅光混合集成方案、硅光子+InP激光器方案

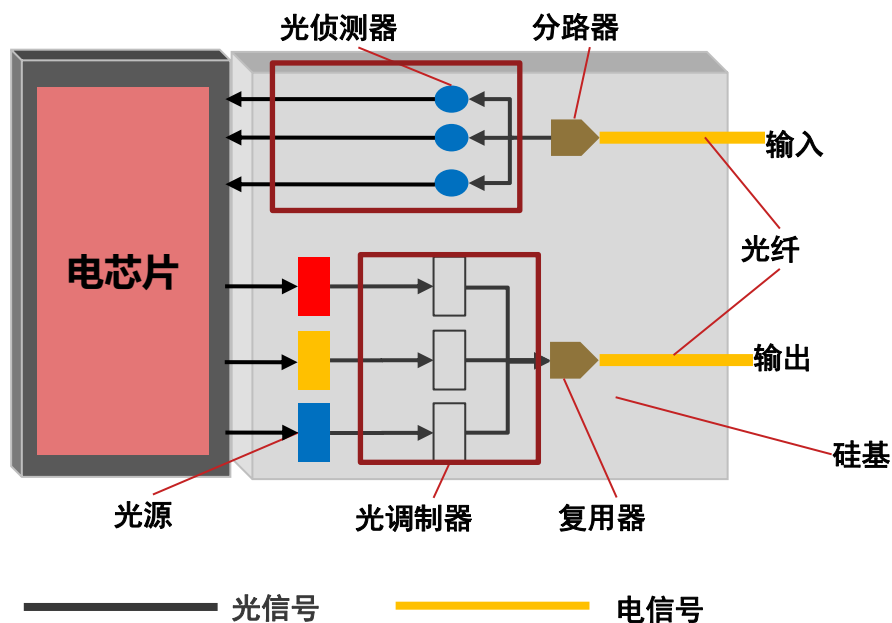
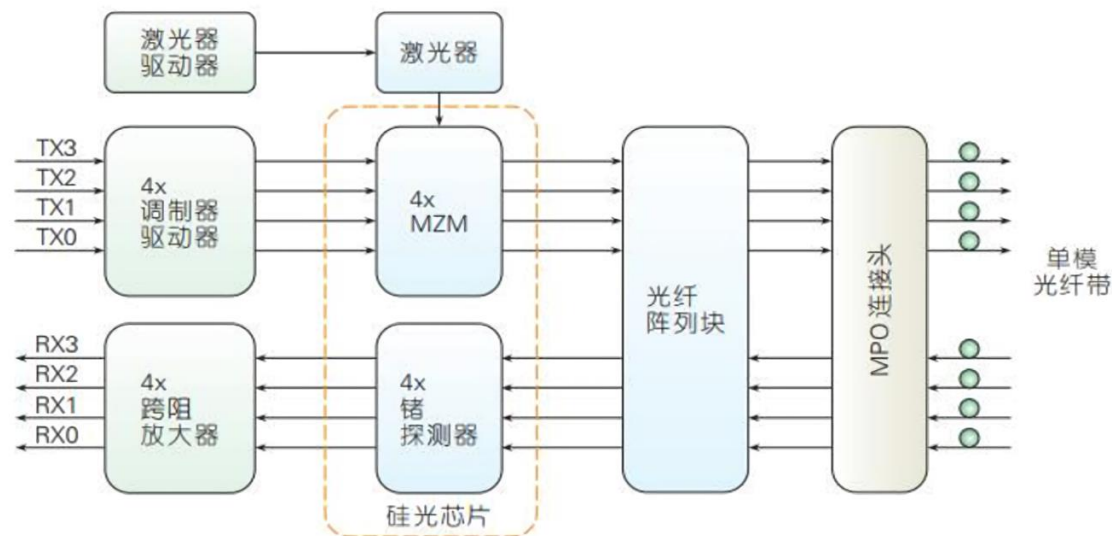


图12 Intel 硅光混合集成方案：调制器+探测器



单片集成原理

- 单片集成是经过相同制作工艺，将不同元器件集成在同一衬底上的一体化技术，实现起来有较大技术难度，但具有结构紧凑、尺寸小、功耗低、可靠性强等优势，是PIC的发展方向。
- 利用硅光集成技术发展高折射率、尺寸和高集成度的高速光模块是当前研究者主要目标。目前，本领域技术人员已经在硅光平台上实现了高速率的硅光调制器，高速率检测器，低损耗传输波导和波分复用等硅光器件。
- 右表对比了两种集成形式以及分立器件组合的差异，单片集成具有低损耗、易封装、高可靠性、集成度高的优点，但集成难度大。目前在光通信系统中混合集成使用较多，但单片集成也已经进入量产。

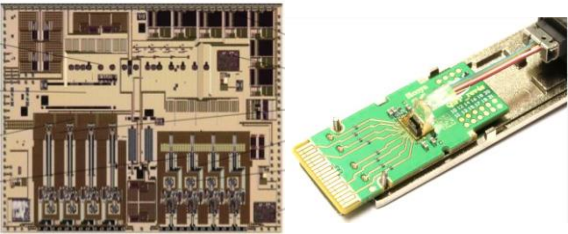


图13 Sicoya单片集成硅光芯片及光模块

图14：硅光单片集成方案

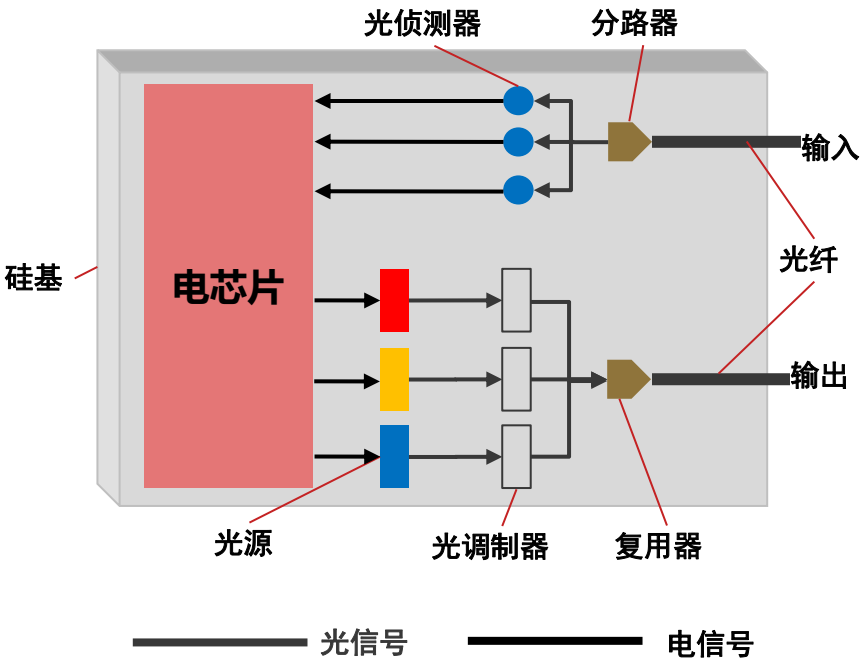


表2：硅光集成方式差异

	分立器件组合	混合集成	单片集成
集成不同材料难度	+	++	+++
低耦合损耗	+	++	+++
高可靠性	+	++	+++
易封装	+	++	+++
小尺寸	+	++	+++
低功耗	+	++	+++

资料来源：Sicoya，华西证券研究所整理



03

硅光替代分立光器件核心驱动：
流量&技术进步&边际成本

数据流量高速增长是硅光技术需求的原生动力

- 数据时代流量迅速增长对光通信性能提出更高要求，要求光通信行业做出变革，提高光通信产品的适应性和技术性。
- 数据中心以太网交换机芯片处理高速率流量需求不断提高：云数据中心的大型化将极大提升光模块的使用量，同时对光模块的传输距离有了更高的要求，同时驱动了光模块工作速率不断升级。
- CSP 和云提供商（如 Facebook、Apple、Google、AWS 和 Microsoft）正转向超大规模数据中心，Capex支出持续提升以支持客户的高带宽需求。
- 伴随VR、无人驾驶等应用渗透率增加，网络数据流量有望再次迎来高速增长，整体底层数据中心投入有望加速，相关光模块和服务器需求也有望起量。

图15 全球移动数据增长2017-2022

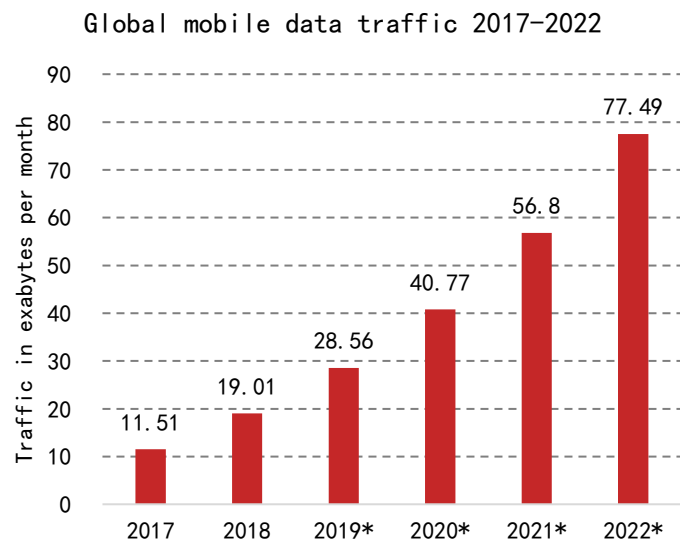


图16博通交换机芯片数据处理能力每2年翻一番

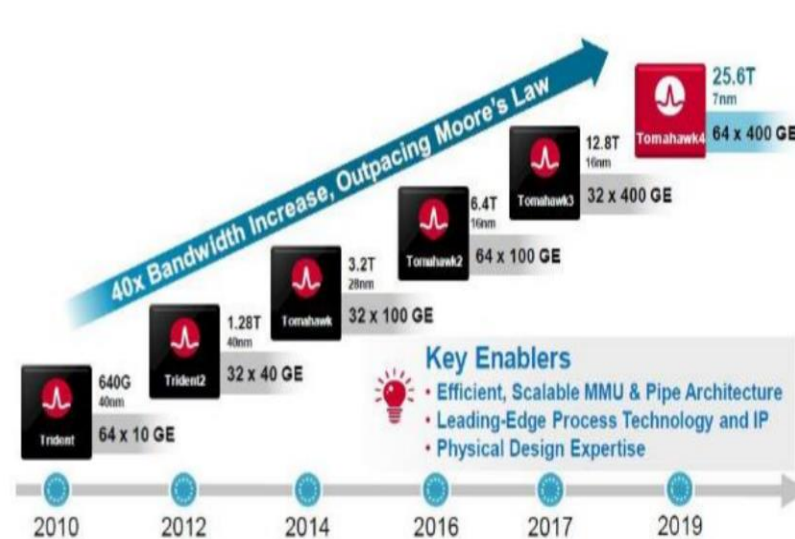
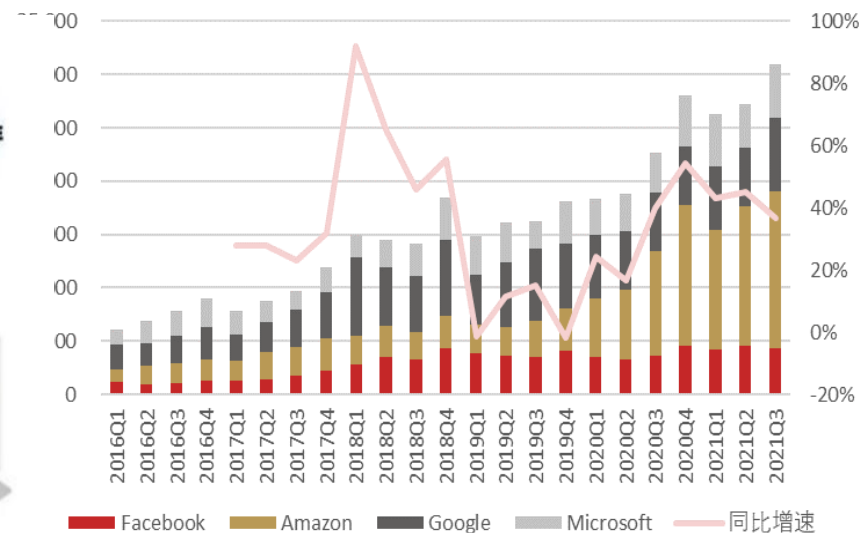


图17 海外互联网厂商资本开支



光器件发展趋势：高度集成、小型化、高速率

- **叶脊网络架构进一步增加光模块需求**：传统三层结构IDC网络架构有利于解决南北向数据传输问题（IDC内部与外部之间），然而伴随着虚拟化、云计算、超融合系统等应用，使得东西向数据流成为主要流量，为了数据中心利用率以及效用最大化，越来越多的数据中心采用了叶脊类型的网络架构，以叶脊架构为例，光模块总量是机柜数的**46倍**（传统传统三层架构光模块总量是机柜数的**9倍**）。
- **高密度**：为了满足流量高速增长的需求，提高交换机和服务器单板传输容量，意味着可以部署更少的交换机，光模块封装越小，意味着可以部署更少的交换机，以节约机房资源。

图18 传统数据中心三层架构与脊叶架构对比

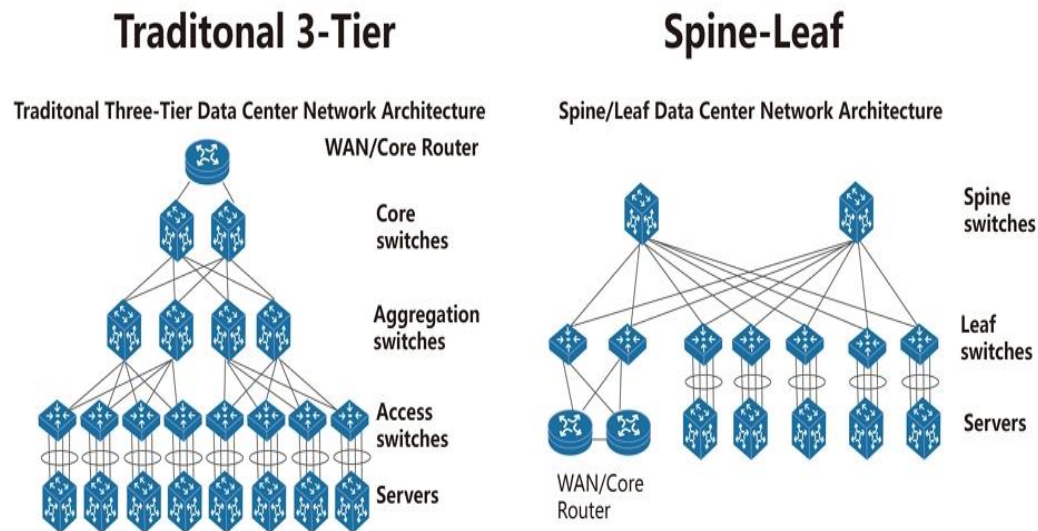
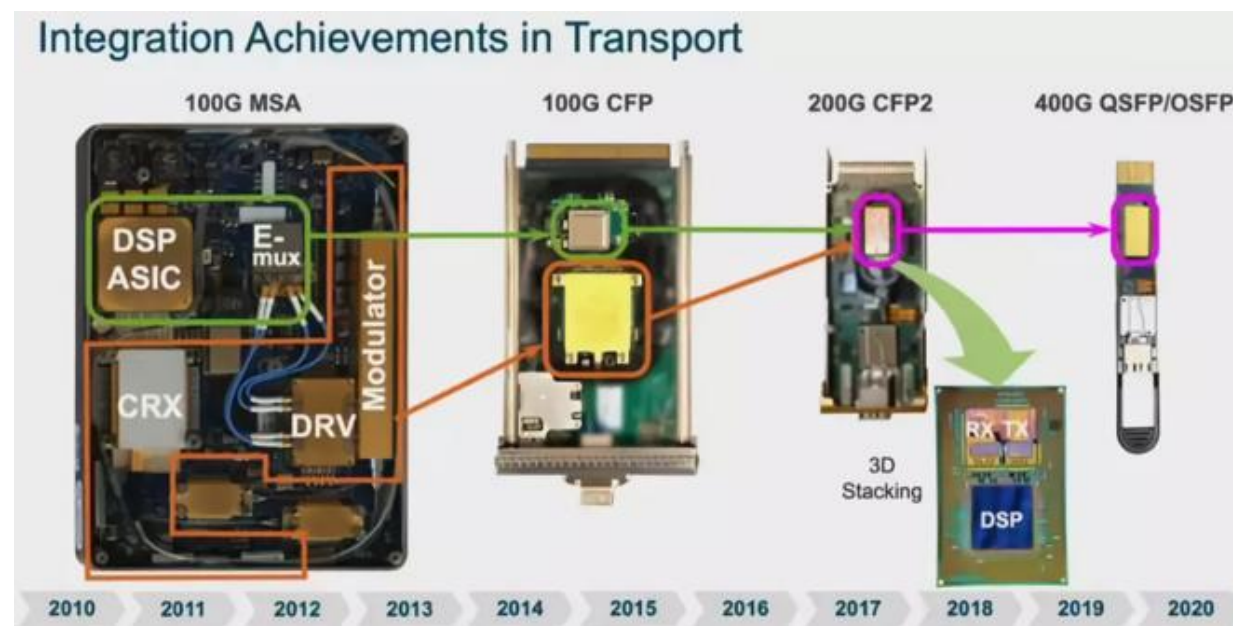


图19 光通信集成发展历程、光模块封装类型



光器件发展趋势：高度集成、小型化、高速率

- **低功耗：**数据中心耗电量大，低功耗一方面是为了节约能耗，另外一方面是为了应对散热问题，因为数据中心交换机背板插满了光模块，若散热问题无法妥善解决，将会影响到光模块的性能和密度的提高。
- **迭代周期短：**未来数据中心流量将呈爆发式增长，为适配更高速的设备，驱动光模块不断向更高速率升级，并呈加速态势。10G速率端口迭代到40G速率端口经历了5年，40G速率端口升级到100G速率端口经历了4年，而100G速率端口到400G速率端口或仅需3年时间。

图20 光模块封装越来越小，功耗越来越低



表3 光模块速率迭代越来越快

部署年代	2008 - 2014	2013 - 2019	2017 - 2021	2019 -
园区，超大数据中心	40G LR4	40G LR4/100G CWDM4	100G CWDM4	400G FR4
机房内部	40G SR4/4x10G SR	40G eSR4	100G SR4	400G DR4
机架内部	CAT6	10G AOC	25G AOC	100G AOC
服务器网卡速率	1G	10G	25G	100G

资料来源：极术社区，华西证券研究所整理

光通信提升带宽传统模式逼近极限

- 光模块提升带宽的方法有两种：
 - 提高每个通道的比特速率，提升比特速率有两个方法：1、直接提升波特率；2、保持波特率不变，使用复杂的调制解调方式（如PAM4、QPSK, QAM16, QAM64等）。
 - 增加通道数，增加通道数量也包括两种方法：1、提升并行光纤数量；2、采用波分复用（CWDM、DWDM）；
 - 在千兆、万兆时期，技术瓶颈还没到，直接就可以提升波特率，但到了10G以上，无论是电还是光，提升波特率变得越来越难，10G到40G，提升的是通道数，从40G到100G，提升的是单通道的波特率（光芯片升级10G-25G）。而从100G到400G：采用了PAM4等更高的调制方式

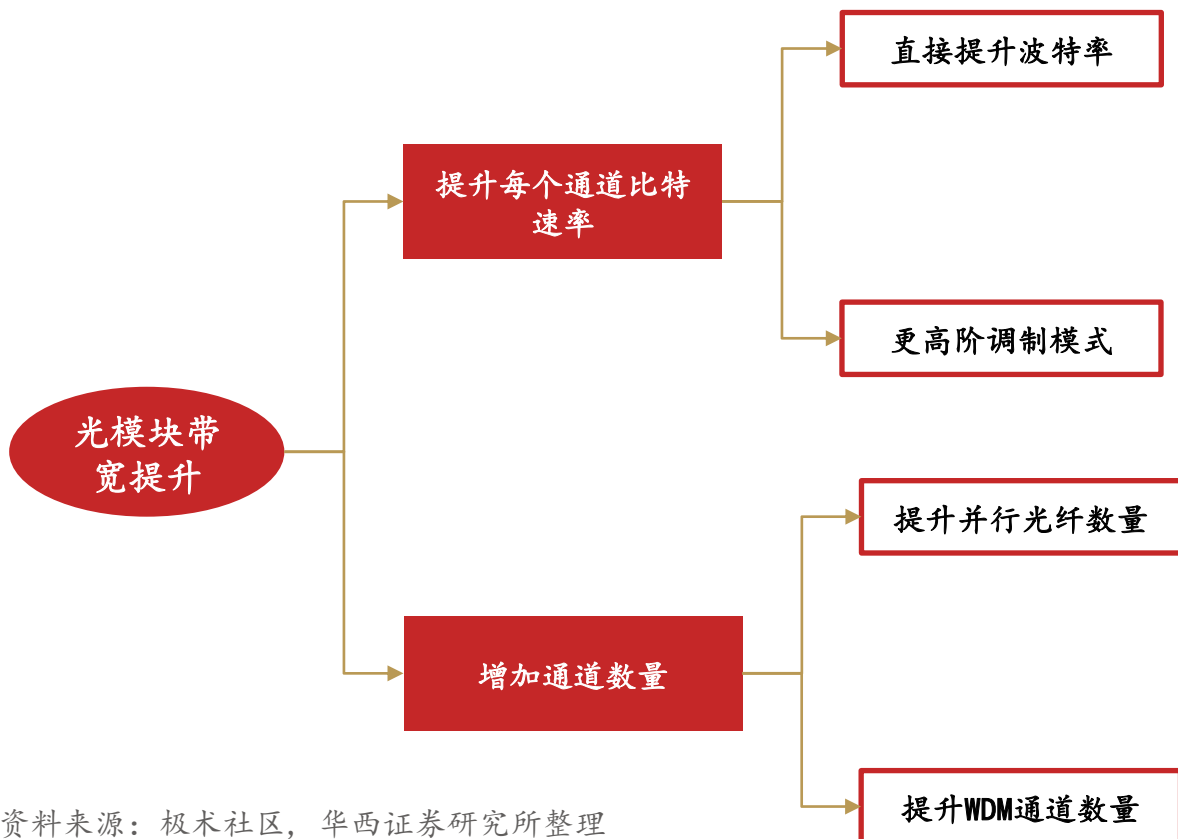


图21 NRZ调制与PAM4调制波形对比

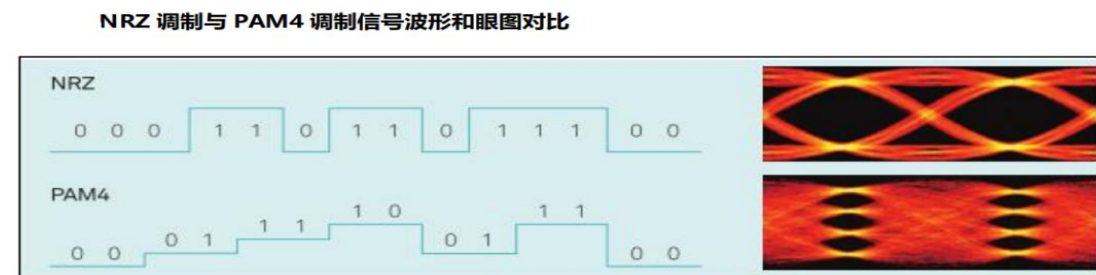


表4 波分复用技术对比

分类	全称	波长间隔	波长	间隔大小
CWDM	稀疏波分复用	间隔大	1270nm-1610nm	间隔20nm
DWDM	密集波分复用	间隔小	1528nm-1623nm	间隔0.8nm或0.4nm

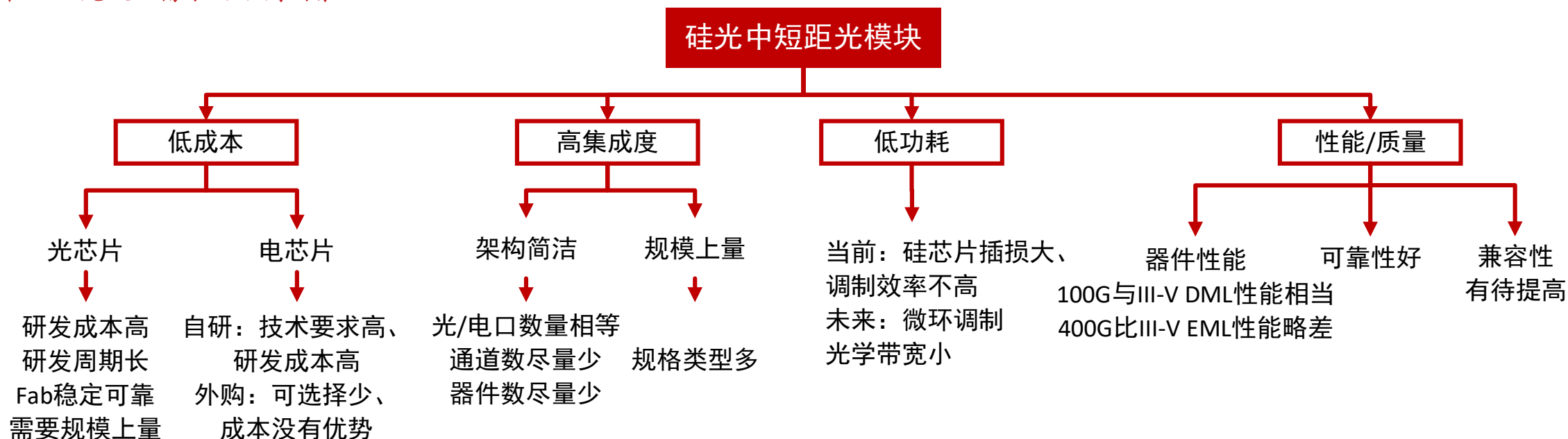
分离器件光模块技术演进瓶颈，硅光性价比提升

超大规模云数据中心对400 Gb/s及以上光网络连接的需求，数据中心交换机速率正依摩尔定律不断加倍。数据流量高速增长，成为硅光技术需求的原生动力，但目前光模块仍面临如下问题：

- 三五族半导体激光调制间距受限，50Gbps成为成为单通道传输速率瓶颈；
- 随着速率提高，光芯片成本递增，电芯片DSP复杂度提高
- 分立器件尺寸受限，集成度成最大问题

硅光模块在高速率下，仍具有器件小、稳定性强和硅材料能耗低的特性，较传统光模块具有一定优势，因此硅光方案被相当一部分数据中心所采用，硅光产业随即得到发展。

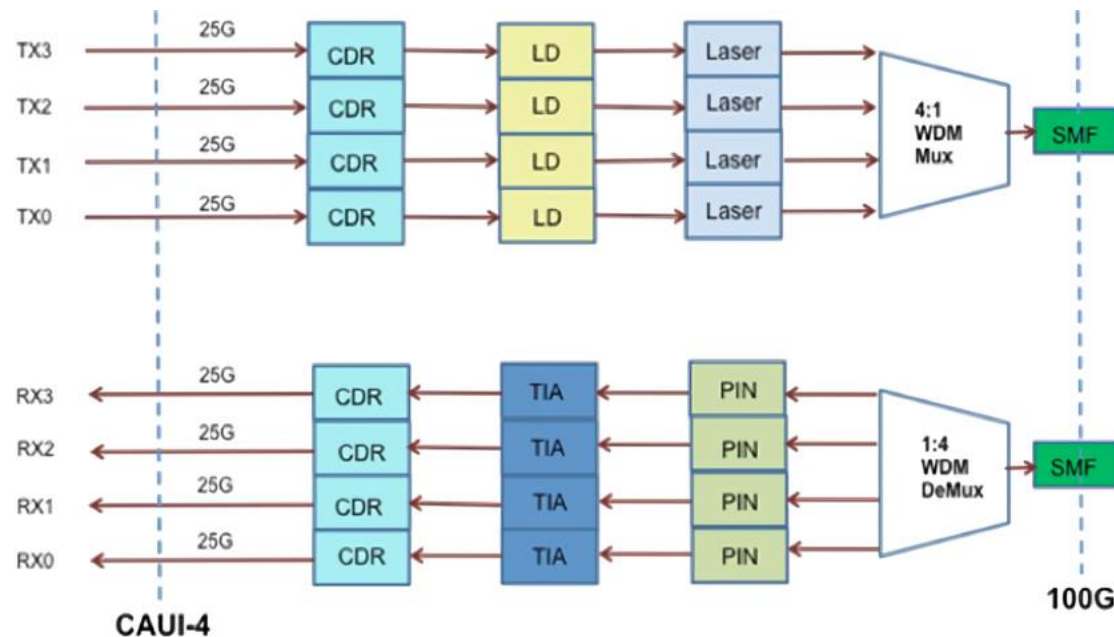
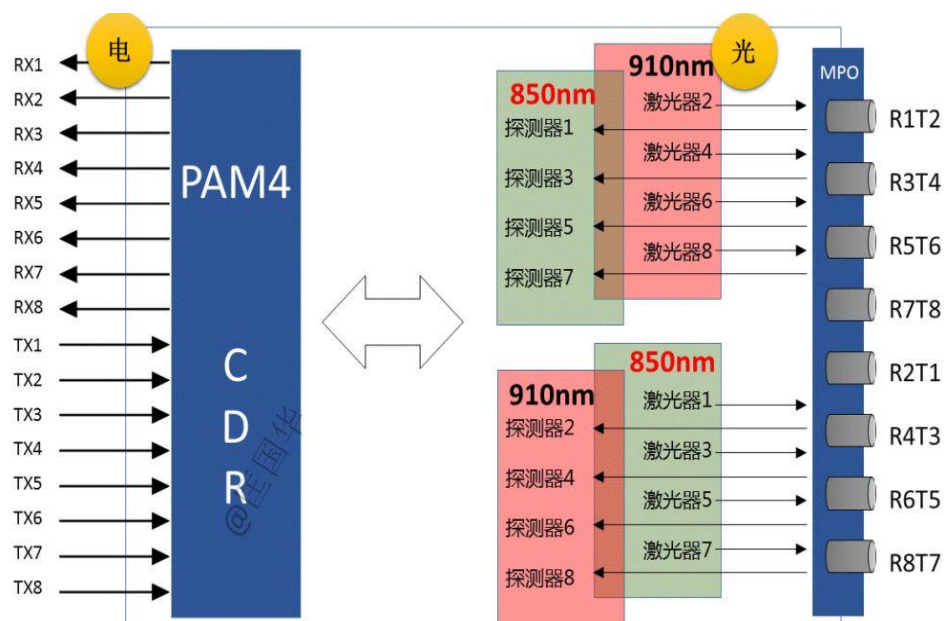
图22 硅光模块需求的不同因素



III-V族半导体激光调制间距受限，单通道50Gbps成为成为传输速率瓶颈

- 基于传统三五族（III-V）的直接带隙半导体材料磷化铟（InP）基分布反馈激光器（Distributed Feedback Laser, DFB）的高速光模块，由于其本身材料的限制，很难实现超过50G以上的调制间距，并且随着速率提高，激光器成本也大幅度提高，从而提高了整体光模块产品的成本。
- 利用硅光集成技术发展高折射率，尺寸和高集成度的高速光模块，实现了高速率的硅光调制器，高速率检测器，低损耗传输波导和波分复用等硅光器件，并且将各个功能器件的相互集成，成功实现了单路25G/50G的信息传输。
- 单路速率到极限后，提高芯片速率的方法有：**增加并行通道数**，如波分复用WDM或多路光纤PSM；

图23 PAM4 PSM并行结构、波分复用示意图



高阶调制模式无法匹配信噪比，DSP成本高度提升

➤ 高阶复杂调制，如PAM4、QPSK，QAM16，QAM64等，以提高比特率；以及更高的符号速率等。

1) 高阶复杂调制，无法匹配光源信噪比，传输损耗增大：进一步提高系统容量可以采用高阶调制格式如8QAM（8-level quadrature-amplitude modulation）或16QAM，但是高阶调制需要更高的OSNR（Optical-Signal-to-Noise Ratio 光信噪比）。对于同样的符号速率，16QAM所需的OSNR比QPSK高近7dB，这意味着在同样的光纤、光放大器和跨段距离的条件下，采用16QAM虽然可以把容量提高一倍，但无电中继的传输距离会降低5倍。有许多技术可以提高16QAM的传输距离，如采用拉曼光放大器、低损耗和低非线性光纤、编码调制技术、非线性补偿技术等等。

表5 不用调制码型性能对比

调制方式	4SC-PM-QPSK	2SC-PM-8QAM	2SC-PM-16QAM
速率 Gb/s	400	400	400
单载波谱宽度 GHz	32	43	32
C波段系统容量 Tbit	8@50GHz	16@50GHz	16@50GHz
传输距离 km	3500（长途干线）	1500（干线）	1000（城域/IDC0

2) DSP成本高度提升，商用化难度提升：光通信系统速率越高，电芯片成本在系统中的比例就越高，其中DSP芯片成本制约占主。DSP的复杂程度直接影响了光模块的成本与功耗。在100G时代，电芯片相关厂商有Macom、semtech，sillconlabs，Maxim等，商业化程度较高；而400G时代电芯片则主要是Inphi、Broadcom、MaxLinear、Macom，供应商较少，规模效应未显。

表6 DSP在短距光通信不同调制方式下性能对比

调制方式	接收敏感性	相对强度噪声	带宽	数模/模数效果	均衡性	DSP复杂性
PAM4	++	+	+	+++	++	++
CAP16	++	+	++	++	++	++
DMT	+	+++	+++	+	+++	+

分立器件尺寸受限，集成度成最大问题

- 传统的光通信模块主要是由 III-V 族半导体芯片、高速电路芯片、无源光组件及光纤封装而成。但随着晶体管尺寸不断变小，电互连面临诸多局限，高速率下分立器件尺寸已无法进一步缩小，并且25Gbps 已经接近传统铜电路极限。
- 如果采用PAM4调制，速率可进一步提升至50Gbps，但要实现400G需要构建8条并行通道，这样一方面器件尺寸无可避免会增大，器件集成度无法得到保证；另一方面高损耗使得调制效果弱化，通信效率受到较大削减，因此在数据中心内部及芯片层面光芯片部署增加是必然选择。
- 目前100G模块封装形式主要基于CFP， CXPL以及CPAK，其外形相似，均可支持热插拔，但密度有所不同；400G则主要基于CFP8、OSFP以及QSFP-DD，其中.QSFP-DD封装由于其优秀的向后兼容性、小尺寸等优点获得当前较多厂商的青睐。
- 然而，传统分立器件组合下，光模块离交换芯片远，电学损耗大；另外由于交换机前面板空间有限，对于高密度的要求难以满足，交换机和模块的散热也因此受到影响。

表7 100G、400G光模块封装形式

100G/120G光模块应用于数据中心&以太网						
光模块	CXP	QSFP28	CFP	CFP2	CFP4	CPAK
链路速率	12x12G 10x12G	4x25-28G	40/100G	40/100G	40/100G	40/100G
应用	无线带宽， 以太网	无线带宽， 以太网	以太网， 数字传输， OTN	以太网， 数字传输， OTN	以太网， 数字传输， OTN	以太网， 数字传输， OTN
热插拔	√	√	√	√	√	√
尺寸 (宽x长x高，mm)	21x29	18x52x8.5	82x145x14	41x104x13	22x92x10	34.8x101.2x 11.6
电气装置	12xQDR 无线带宽或 CPPI	CPPI-4	CAUI， XLAUI，SFI- S，SFI-5.2	CAUI-4， CAUI	CPPI-4	CAUI-4， CAUI
连接头	84 pads	38 pads	148 pads	104pads	56 pads	N/D
最大功率	6W	3.5W	8-32W	3-18W	1.5-6W	N/D
适用时间	应用中	2015	应用中	应用中	2015	2013

资料来源：飞速通信，菲魅通信，华西证券研究所整理

400G光模块封装形式				
名称	CDFP	CFP8	OSFP	QSFP-DD
应用场景	电信	电信	数据中心、 电信	数据中心
模块尺寸(LxW)mm	107.5x41.5	102x40	107.8x22.6	89.4x18.4
交换机密度 (Port/1RU)	16	16	36	36
电信号(Gb/s)	16x25G	8x50G	8x50G	8x50G
传输介质	MMF, SMF	MMF, SMF	MMF, SMF	MMF, SFM
QSFP兼容性	NA	NA	需要适配器	需要适配器
热容	12-20w	12-20w	12-15w	12-15w
支持800G	否	否	是	否

400G以上的速率受限于激光器芯片速率及成本

- 光通信中主要涉及到的芯片包含光芯片和电芯片。光芯片是光模块中完成光电信号转换的直接芯片，又分为激光器芯片和探测器芯片；电芯片一方面实现对光芯片工作的配套支撑，如 LD(激光驱动器)、TIA(跨阻放大器)、CDR(时钟和数据恢复电路)，一方面实现电信号的功率调节，如MA(主放)，另一方面实现一些复杂的DSP(数字信号处理)。光芯片的成本占比通常在40%-60%，电芯片的成本占比通常在10%-30%之间。
- 在光芯片中，比较核心的是激光器芯片。常见的激光器芯片主要包括 FP、DFB、EML、VCSEL 等类型，分别对应着不同的应用场景：
 - ① 按照调制类型可分为直接调制和外调制。直接调制是电路直接控制激光开关，一般仅由单颗激光器构成；外调制是由外电路控制激光开关，一般由两部分构成，分别是激光器和调制器。FP、DFB 和 VCSEL 属于直接调制的类型，EML 是外调制的类型。EML 一般是由 DFB 外加调制器 EAM 共同构成。
 - ② 按照发光类型分为面发射和边发射。其中 VCSEL 属于面发射类型，FP、DFB 和EML 属于边发射的类型。
 - ③ 按照腔面类型分为垂直腔面和水平腔面。其中 VCSEL 属于垂直的腔面类型，FP和 DFB 属于水平的腔面类型。
- 在PAM4调制下，VCSEL、FP和DFB均受制于50Gbps速率，而EML最大速率虽然可以突破50Gbps，但其成本高昂，中短距离方案中成本占比过大。

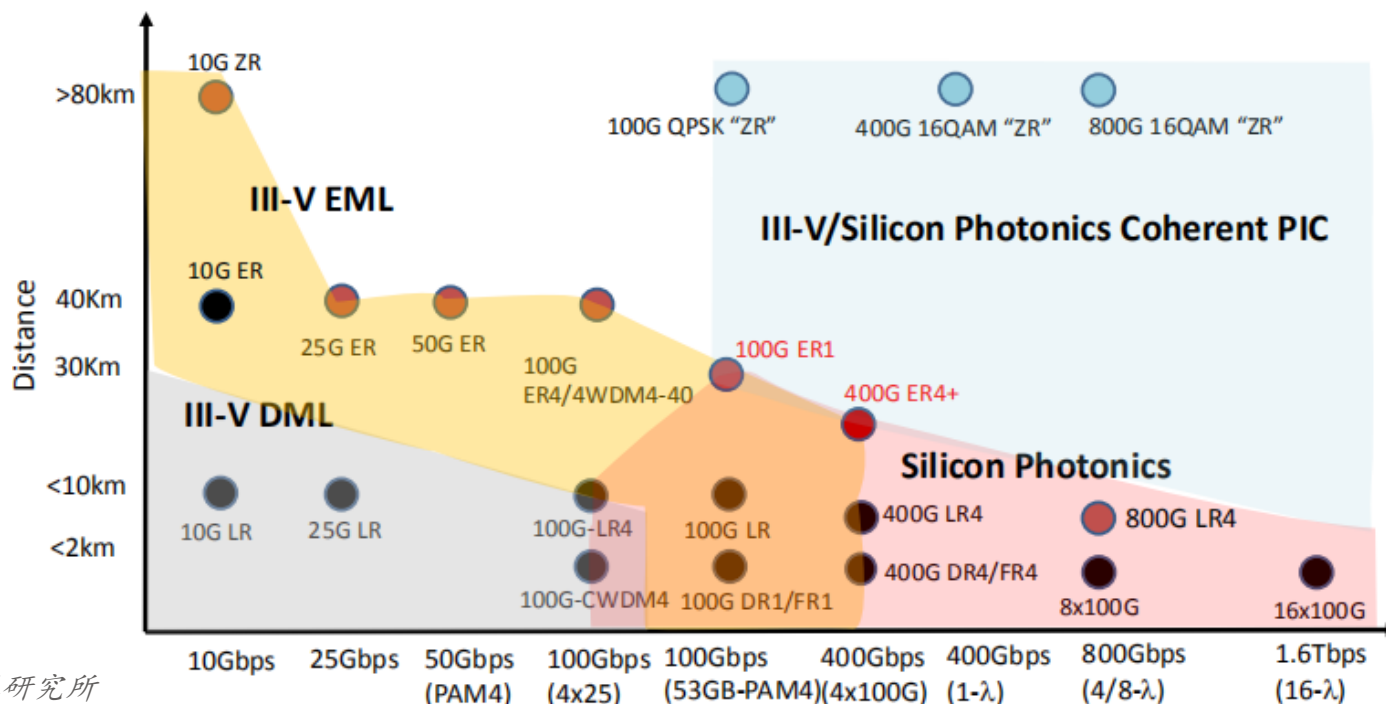
表8 不同光芯片材料、激光器对比	
芯片材料类别	具体产品类型
InP 系列	高速直接调制 DFB 和外调制 EML 芯片、PIN 与 APD 芯片、高速调制器芯片、多通道可调激光器芯片
GaAs 系列	高速 VCSEL 芯片、泵浦激光器芯片
Si/SiO2 系列	PLC、AWG、MEMS 芯片
SiP 系列	相干光收发芯片、高速调制器、光开关等芯片；TIA、LDDriver、CDR 芯片
LiNbO3 系列	高速调制器芯片

	VCSEL	FP	DFB	EML
工作波长	800nm-900nm	850nm-1310nm	850nm-1310nm	1310nm-1550nm
价格（美元）	1.5-3	3-4	8 左右	60 左右
线宽	0.35nm	>1nm	<0.04nm	<0.04nm
模式	多模			
缺点	实现高速率有困难，不支持单模	带宽有限	对外延工艺和光栅制作的工艺要求比较高	需要温度控制，耗电量大
优点	线宽窄，功耗低，调制效率高，成本低	调制效率高	波长稳定性好	调制效率高、稳定性好
应用场景	短距光通信，3D 感应等	中距离通信	长距离通信	高速率，超长距离通信
最大速率	50G PAM4	50G PAM4	50G PAM4	50G 以上
400G 方案	8*50G PAM4		8*50 PAM4	4*100G

400G以上硅光技术相比III-V器件竞争优势明显

- 传统III-V分立器件在400G以下性能较好，技术成熟：在单通道波特率低于25G，短距离传输(<10km)时，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，特别是单通道速率到50G波特率以上，激光集成EML (电吸收调制器芯片)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。
- 硅光技术在400G以上场景有望成为性价比选择：随着大数据中心对连接带宽的不断升级，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。从用4x25G 为代表100Gbps大数据中心光互联时代开始，以Intel、Luxtera的硅光产品开始崭露头角，开始规模化进入市场。与分立的EML器件相比，硅光芯片通过与电芯片混合集成提供更优性能，以集成架构提供更低物料成本，同时可以实现更简洁的模块设计，支持更高的生产效率。当前，100G已进入成熟应用，400G (4x100G)正在进入规模商用，同时800G(8x100G) 也已开始在大规模人工智能及高密度交换机互联开始试商用。硅光解决方案因其强劲竞争优势，承载着业界的期望。

图24 硅光与III-V族光模块在不同距离与比特率下的应用



传统激光器芯片速率、成本受限，中长距场景硅光通信方案有望突围

垂直腔面发射激光器（VCSEL）

- **高速率实现困难**：数据通信用VCSEL通常是850nm波长，多模；其特点是低成本（生产加工，测试成本），低功耗，容易耦合（光斑接近圆形），容易阵列化，因此可用板上芯片封装技术（CoB）来实现大规模集成光模块。由于VCSEL在实现高速率有一定困难，目前看来实现400G方式为8x50G PAM4。
- **100米以下占主，多模光纤成本高**：VCSEL在低于100米的应用（接收光光模块及有源光缆）占主导地位，并且可以进一步集成实现更多路的板载光学模块（OBO）。然而VCSEL需要多模光纤，成本较单模光纤高，数据通信系统厂家需要准备多模（100米以下）和单模（大于100米）两种光纤。

电吸收调制激光器（EML）

- **性能优异**：EML是指电吸收调制器（EAM）与DFB激光器的集成器件，属于外调制方式，因此波长啁啾低，信号传输质量高，容易实现高速率调制（50G以上波特率），在10公里以上的中长距离中已经得到广泛应用。EML具有容易实现集成化及小型化，低调制电压，高消光比，高调制速率等优点，实现400G仅需要4x100G即可。
- **成本高昂，温控耗电**：在应用环境相对来说比较宽松的数据通信市场来说，EML显得比较昂贵。另外传统EML都需要温控，这就会导致光光模块的整体耗电上升。可喜的是对环境变化不太敏感uncooled EML已经问世，使得在一定范围温度条件下不需要温控，或者简单温控可以正常工作，部分解决了成本和功耗的问题。相信在数据通信领域，uncooled EML可以向下延伸到2km的应用领域，将会是400G光光模块产品中有力选项之一。

直接调制式激光器（DML）

- **波长漂移，不利于长距离传输**：DML的原理是通过调制激光器的注入电流来实现信号调制。由于注入电流的大小会改变激光器有源区折射率，造成波长漂移（啁啾）从而产生色散，DML不利于长距离传输。
- **带宽有限，消光比难以提高**，且调制电流大时激光器容易饱和。
- **多用于低于25G率和低于10公里的传输距离**：只能以8x50G PAM4的形式来实现400G，需要光器件必须有良好的线性度，这对DML来说相对困难。另外，如果DML仅可以实现25G波特率，那么即使可以PAM4调制，也这会造成光模块成本及功耗上升，封装也困难，同EML和硅光相比不是有强竞争力的方案。
- **4x100G仍需时间**：已有公司使用DML已经实现50G波特率的PAM4调制，若加上倒装焊等新工艺以及混合DML有望实现50G波特率 PAM4的调制集成技术，从而实现4x100G，但仍需要时间。

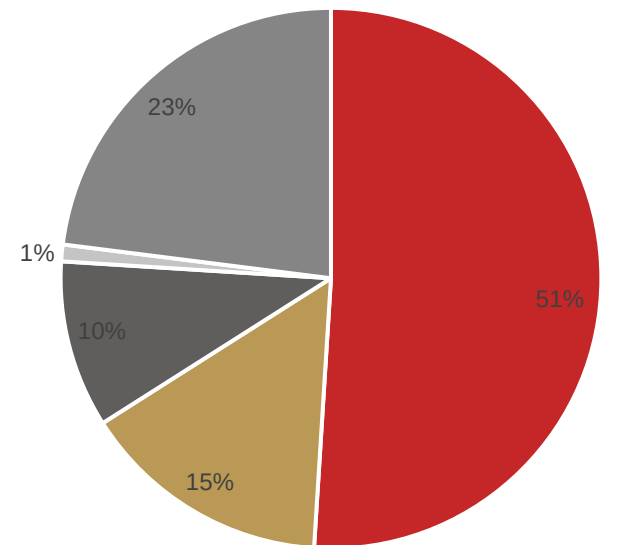
硅光（SiP--Silicon Photonics）

- **目前仅硅调制器技术成熟，集成度高**：硅光技术从远景来看，最终会走向全光电集成，但目前比较成熟的是硅调制器。由于是外调制，信号传输质量较高，容易实现高速率，加之体积小，集成度高等，非常适合于2公里以下的数通信应用。
- **损耗较大、工艺复杂限制规模商用**：然而目前在市场上硅光的应用并不是那么成功（小于全体市场的10%），主要原因是从激光器到硅波导的耦合效率及调制器本身的损耗较高，封装比较复杂，整体工艺不成熟等。
- **400G以上、中长距有望突围**：但在400G以上速率，由于传统直接调制式激光器DML已经接近带宽的极限，EML的成本又比较高，对硅光来说将会是一个很好的机会，用硅光实现400G多是4x100G的形式。但若想在100米以下的应用取代VCSEL，必须解决功耗（高插损从而需要大功率激光器）及封装等问题。

硅光对传统光模块产业链影响

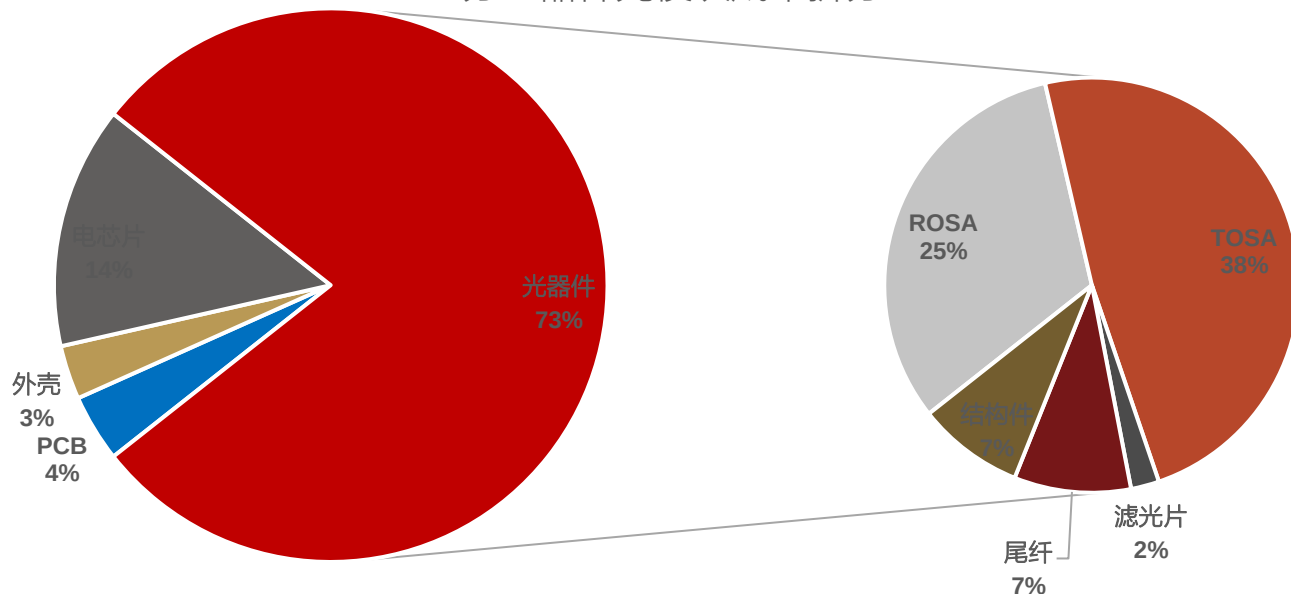
- 传统光模块采用分立式结构，制造过程中需要依次封装电芯片、光芯片、透镜、对准组件、光纤端面等器件，部件物料多。
- 硅光模块将激光器、调制器、探测器等光/电芯片都集成在硅光芯片上，传统器件中的透镜和大型组件都被取代，陶瓷、铜等材料用量大幅降低，晶圆、硅光芯片等电子材料占比提升，价值向硅光芯片、硅光引擎转移。
- 由于传统光模块制造过程中封装工序较为复杂，需要投入较多人工成本，而硅光芯片高度集成，组件与人工成本也相对减少，对于下游封装厂或制造商的要求在降低，尤其是2024年后，采用硅光集成技术的光电共封装（CPO）技术预计将会成为主流模式，传统光模块生产制造企业将会面临较大的技术挑战。

光模块成本结构比例



■ 光芯片及组件 ■ 集成电路芯片 ■ 结构件 ■ 电力 ■ 其他

分立器件光模块成本拆分



- 相比传统分立式器件，硅光材料成本、芯片成本、封装成本均有望进一步优化。
- 硅光技术可以通过晶圆测试等方法进行批量测试，测试效率显著提升。



04 典型厂商硅光产品布局汇总

欧美先发领先，中国初步发展

- 硅光技术自世纪初以来就在英美国家中受到重视。如英特尔和加州大学芭芭拉分校在硅光领域已经实现了完成十多年的产研合作，在很多关键性的问题取得重大突破，欧洲也开展了一系列项目来拓展硅光技术的深度与广度，目前已经取得一定成效。
- 我国硅光产业处于初步发展的阶段，得益于过去的产业发展和政策重视，初步形成研发基础，但在产业环节中的技术深度和成熟度还不能与欧美比较，国内设计的高端硅光子芯片基本都要依赖国外流片，无法在国内实现生产。
- 综合来看，我国硅光技术发展状况距离欧美国家尚有一定差距。但伴随着近年来硅光厂商的发展，这一格局有望得到改善。

国内技术发展状况

2002

开始推出“光电子产业化专项”“国家重点研发计划光电子与微电子器件及集成重点专项”等项目

2005

973计划、863计划持续支持硅光基础项目创新

2008

北大硅基发光理论和半导体所的硅基量子点外延生长，谐振腔增强型光电二极管、光开关阵列获得长足进展

2019

目前国内企业在硅光领域取得一定突破。

表9 欧洲硅光项目开展情况

时间	项目名称	项目目标
2004年	PICMOS项目	验证硅回路上InP键合器件的全光链路
2008年	WADIMOS项目	延续PICMOS项目，进一步验证光网络
2010年	HELIOS项目	关注光电子集成的电信设备
2013年	SEQUOIA项目	节能硅发射器使用III-V族半导体量子点和量子点材料的异质集成项目
2013年	IRIS项目	利用硅光子技术，创建大容量和可重构WDM光交换机
2013年	PLAT4M项目	打造硅光子技术的整个产业链

Acacia（思科收购）——布局独到的技术创新型公司

- Acacia是一家美国的硅光模块生产厂商。该公司产品的特点是高性能；低能耗（AC1200 Flex目前实现了业界600G的最低功耗）；配套软件合理；内置的DSP芯片开发水平高，计算能力出色；器件体型小。其两款产品（AC1200 Flex、可插拔模块CFP2-DCO）被权威评测机构Lightwave’s innovation review评为满分产品。
- Acacia主要布局于电信传输（中远距离相干光通信）和数据中心间传输。根据公司官网的动态和产品，我们预计未来Acacia将会布局边缘数据中心（ZR）和相干光长距离通信领域。
- 根据Facebook公开的资料，数据中心间传输（东西向）成为数据中心传输发展新趋势，而ZR技术将为东西向通信提供良好的解决方案。
- Acacia布局独到，技术优势明显，我们预计若硅光技术得到推广，则该公司将会在特定通信领域占据相当的市场份额。但目前出货量将成为制约Acacia进一步发展的主要因素。

表10 Acacia硅光相干产品情况

产品	传输距离	传输容量	应用范围
AC1200 Flex（最新）		2*600 Gbps	数据中心间，长途网络和潜艇
AC400 Flex	12000公里	100-400 Gbps	数据中心间，长途网络和潜艇
可插拔模块CFP2-DCO	2500 公里	200 Gbps	数据中心间和长途网络
AC100-CFP	2500公里	100 Gbps	城域网，数据中心和长途网络

Acacia（思科收购）——封装、耦合技术进一步完善

- 从结构来看，Acacia实现了收发端集成一体化，除激光器以外的其它器件均实现了在硅片上的集成。光器件主要包括：端面耦合器，偏振分束旋转器(PBSR)，分束器，可变光衰减器(VOA)，载流子耗尽型调制器，热相移器(PS)和锗探测器(PD)。
- Acacia由专用材料的传统封装向新一代硅基封装和主流封装技术逐步进发，2017年，Acacia实现了该相干光模块的BGA(ball grid array)封装，该项具备封装成品率高，可将失效率 200×10^{-6} 再减小到两个数量级；设备简单，焊点的中心距一般为1.27mm，可以利用现有SMT工艺设备；引脚数量大；共面损坏小等优势；且不需要传统连接器和光学封装，改善了带宽和信号完整性。
- 端面耦合方案的大致思路是在每一个die上添加一个基于光栅耦合器的测试光路，光通过chip CB中的光栅耦合器进入test circuit, 随后通过edge coupler耦合进chip BB中的实际光路中，这样有助于实现最终的晶圆测试，提升工作效率，但不足在于该方案会牺牲一定的芯片面积。

图25 Acacia硅光光模块整体结构

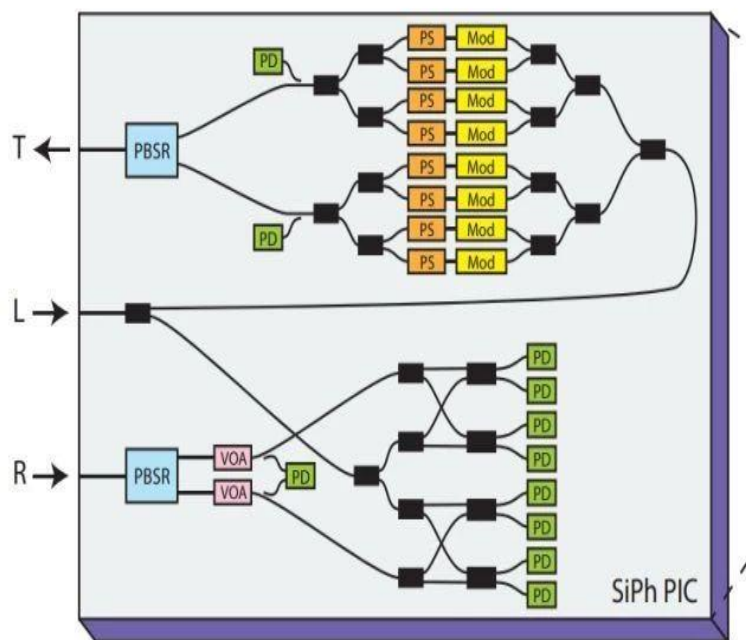


图26 BGA(ball grid array)封装

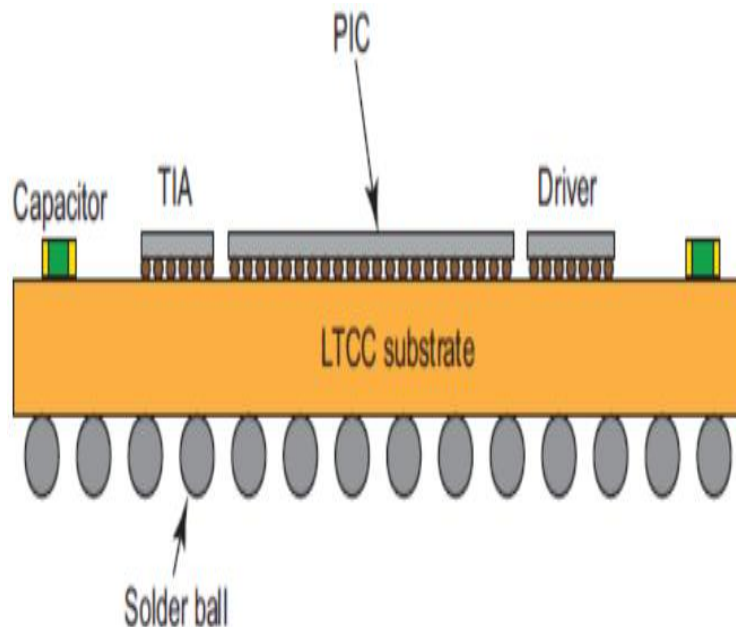
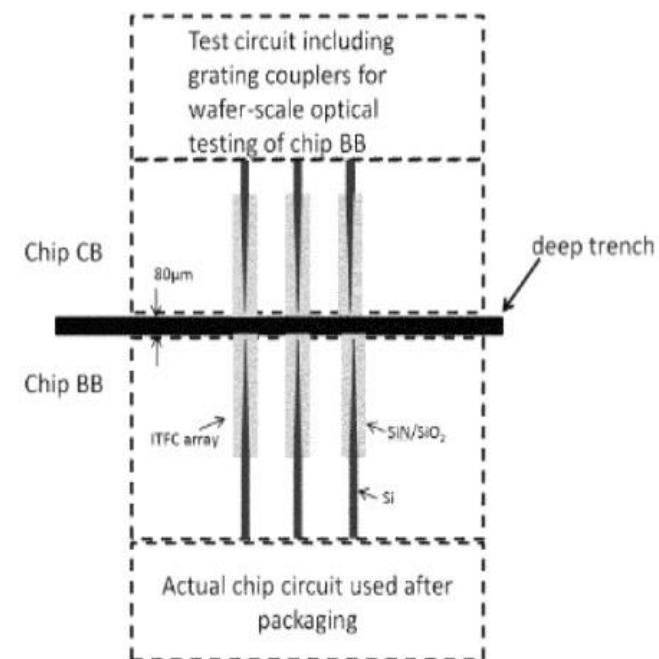


图27 用于wafer-level测试的端面耦合



Intel——商用规模和先进技术兼具的行业领头者

- Intel布局硅光领域多年，在很多关键性技术上取得了重大的突破，也为公司取得了不菲的收入。2018年公司年报中披露，当年公司的收入能够在传统业务下滑的状况实现增长，部分是依赖于硅光产品销售取得的突破。
- Intel的产品主要服务于数据中心通信，现在开始布局5G无线前传领域。Intel的产品工艺独特，性能高，且每年能实现百万个的出货量，为公司获取了较大的市场份额。
- 调制器：Intel采用基于等离子体色散效应的P-N结反偏的耗尽型调制器方案。整个调制器是一个不等臂的Mach-Zehnder干涉器，由两个1x2的MMI, 两个pn结反偏的相移器（phase shifter）构成。Intel 100G短距离PSM4光模块中运用了相应的调制方法，1个25G激光器，实现4路信号的调制和传输，比起传统4个25G激光器实现4路信号，极具成本优势。

100G PSM4 光纤收发器



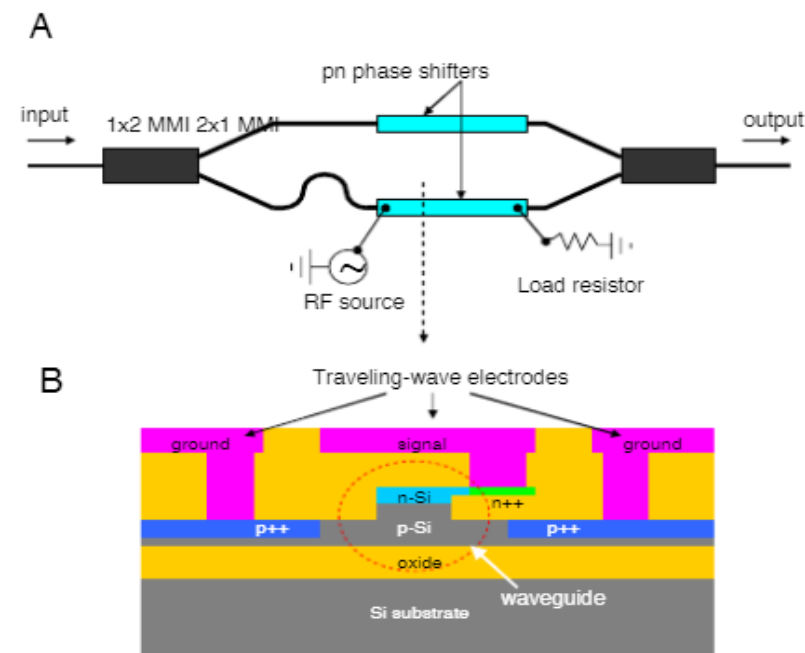
100G 光纤收发器（扩展温度）



表11 Intel硅光产品概述

产品名称	具体描述
100G PSM4 QSFP28	2016发布时占据PSM结构的主要市场，最远可达2km，应用范围为数据中心通信
CWDM4 QSFP28	高速，低能耗，通过单模光纤实现10 km链路，适应户外基站的恶劣工作环境，大致用于5G无线前传领域
QSFP-PD8*50G光模块	Intel最新400G方案，传输距离目前为100m，预计还会拓展。主要用于数据中心通信，工作温度为-20到80℃，预计2019年末出货

图28 Intel硅光调制器方案示意图



Intel——商用规模和先进技术兼具的行业领头者

- 独到的**激光器键合**方式。Intel利用键合设备和芯片倒装技术在高温高压下使用III-V增益芯片与硅光芯片通过范德瓦尔斯力固定在一起。其优点在于强度可靠；键合位置易控制，省去了对准调节的时间；不需要高功率DFB激光器和复杂封装工艺，有效降低降低成本；再者，可以通过设计光栅结构，形成DFB、DBR等不同种类的激光器。但从加工角度来看，整体工艺较Flip-chip bonding端面耦合方案更为复杂，也有热管理问题需要解决。该工艺需要多年的经验、技术积累、设备支持。目前使用该能做到小规模出货的也仅有Intel一家。
- 在片上滤波器方案选择中，Intel采用的是**阶梯光栅(echelle grating)**方案。利用光栅的衍射效应，使得不同波长的光从不同的角度出射，达到分光的目的，该方案的难点是光栅的设计与制备，如何降低插损等，对工艺的要求较高。
- 在探测器上，Intel采用的是Si-Ge探测器，通过外延生长的方式，在硅波导上方生长Ge层，进而刻蚀掺杂形成WG-PD结构。光场通过消逝波耦合的方式，从硅波导中转移到Ge探测器中。
- 综合来看，我们认为Intel深耕该行业多年，在规模出货和领先技术都具备强劲优势，且与知名大学实验室保持稳定的技术联系，预计将会是未来硅光行业中的佼佼者。

图29 激光器键合示意图

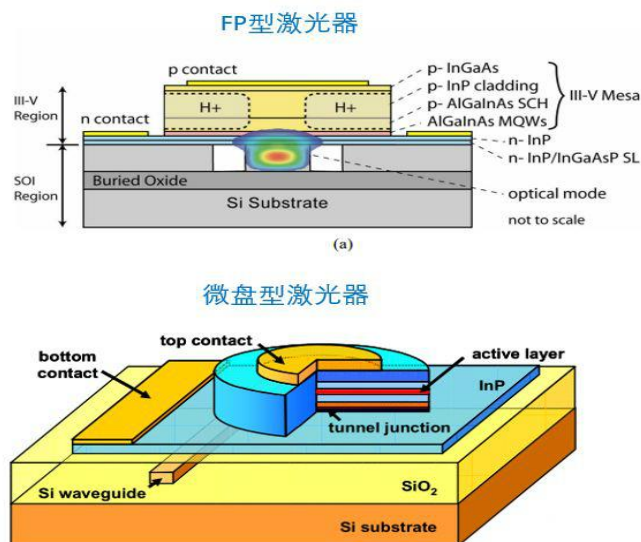


图30 阶梯光栅(echelle grating)方案示意图

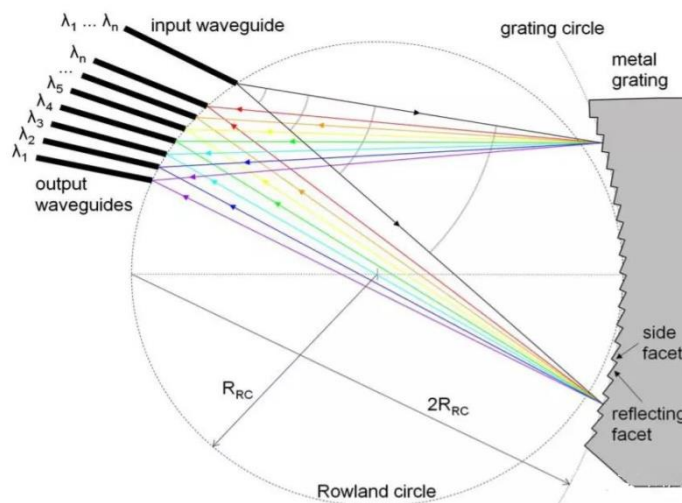
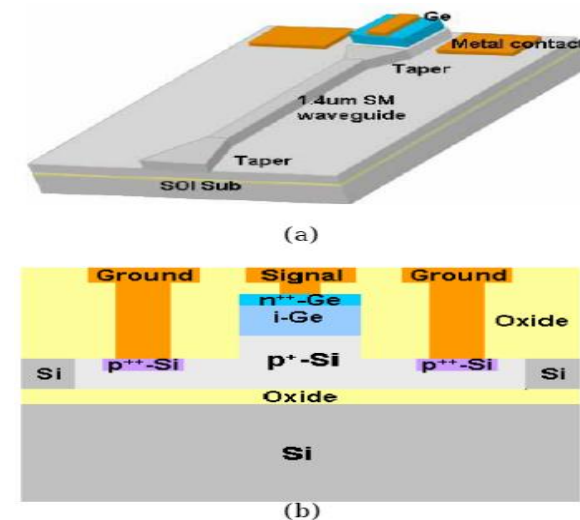


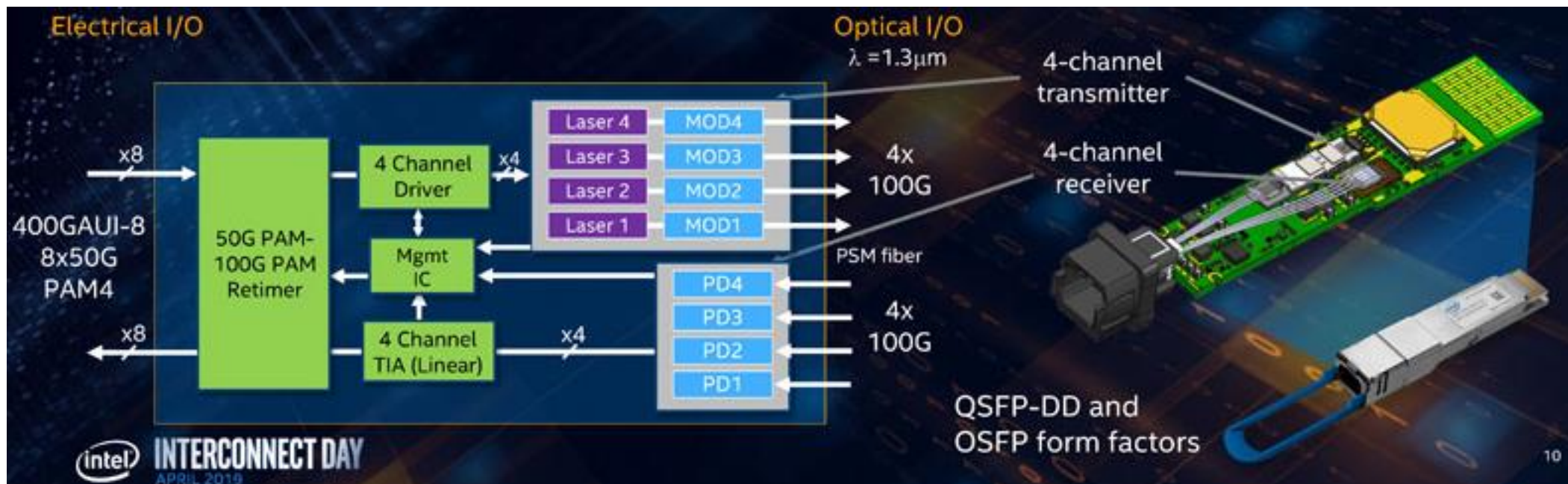
图31 Si-Ge探测器示意图



Intel —— 400G方案

- 在数据中心400G时代，基于硅光技术的光模块主要定位于500m~2km这个距离上。主要原因是：在短距离，其成本尚难以和多模的VCSEL竞争；在长距离，由于硅光芯片的插损较大，不足以支撑更长距离传输。模块类型主要为400G DR4和400G FR4两种。DR4是4路并行的106Gbps PAM4光信号，光纤为MPO接口单模光纤；FR4是4个CWDM波长的106Gbps PAM4光信号，光纤为LC接口单模光纤，需要利用Mux/DeMux进行合分波。其中，又因为硅光芯片集成多个波长的激光器和Mux/DeMux有一定的技术难度，所以目前400G硅光模块主要是400G DR4这一种规格。
- 2019年4月，Intel在其Intel InterconnectDay 2019展示了其基于硅光的400G光模块，封装形式为QSFP-DD。该DR4模块面向下一代云数据中心，服务于12.8T 以太网交换机，通过PAM4调制，实现4X100Gbps速率，传输距离可达2km。该模块在性能上能够实现较高的光调制幅度和平均光功率，但消光比稍显不足，因而我们认为该早期产品仍存在许多优化空间。英特尔预计，这款新型收发器将在2019年底量产。

图32 硅光400G DR4方案功能框图与实物



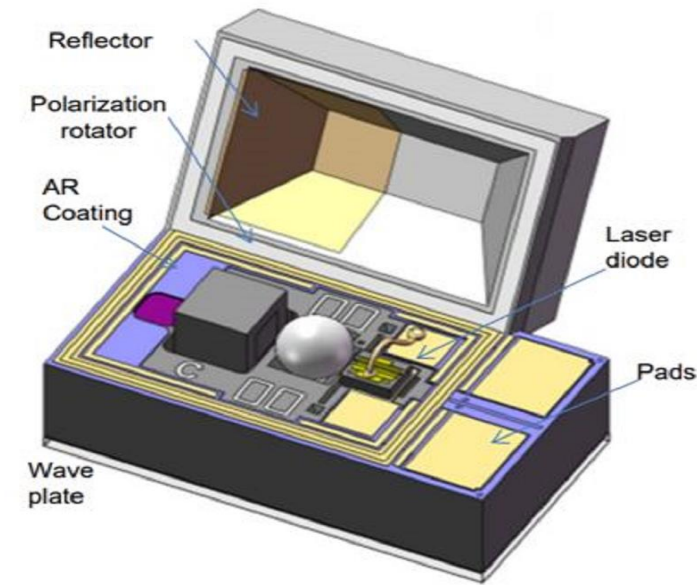
Luxtera（思科收购）——走在商用化前端的硅光公司

- Luxtera是一家专注于使用标准半导体晶圆代工厂生产光电收发器产品的硅光公司，其产品的方向主要是以数据中心，部分参与5G基础设施。该公司规模出货量业内领先，在硅器件规模化生产研发方面经验深厚，与晶圆制造加工厂商有着长久的技术合作关系，生产良率高，成本低。
- 根据公司官网研发新闻，Luxtera将会布局与PSM4一脉相承的400GDR4（短距离数据中心通信）方向。400GDR4为数据中心通信主流方式，结合公司在100G-PSM4取得的成功，我们预测Luxtera将会在未来的数据中心市场取得一定份额。
- 在激光器方面，Luxtera采用的是Flip-chip方案，即通过倒装的方式把激光器焊到硅光芯片上。但与一般的Flip-chip方案不同的是，Luxtera将其改进为micro package方案，将各个元件固定在硅盒中，通过焊接硅盒实现激光器嵌合。该方案克服了传统Flip-chip方案的对准问题，大大提高了规模生产的效率。
- 综合来看，我们认为Luxtera在规模化生产方面底蕴深厚，我们预计伴随硅光市场的扩大，Luxtera将会受益于大规模生产的技术路线。

表12 Luxtera产品情况

产品名称	速率	距离	工作温度	最大功耗	应用范围
100G-PSM4	100G	2km	0至70° C	3.5W	数据中心
2x100G-PSM4	200G	2km	0至70° C		数据中心

图33 micro package方案示意图



Luxtera（思科收购）——特有的波导光纤耦合方案

- 在波导和光纤的耦合方面，Luxtera采用的是光栅耦合器+光纤阵列（Fiber array）的垂直耦合方案，具体方案为在发射端，采用单偏振的光栅耦合器，在接收端，由于光纤中的信号光的偏振模式不确定，采用偏振分离光栅耦合器发射端和接收端的的光栅耦合器，通过同一个光纤阵列进行光学耦合，只需要进行一次光学耦合封装即可。
- 对于光纤耦合器的设计，Luxtera公司做了很多优化措施，包括：优化模场、优化埋氧层的厚度、去除后端工艺的介质层、弯曲光栅(Curved grating)等，甚至利用DSOI（double SOI substrate）去制作光栅耦合器，以减少向衬底耗散的光，增加光栅耦合器的耦合效率。
- 由于Luxtera与Intel均在耦合方面有着独到技术，我们将两种方案进行了简单的对比。Luxtera的方案，工艺制作相对简单，不需要Lens等辅助光学耦合器件，但由于光栅耦合器本身的光学带宽小，不利于制作WDM类型的光收发器，一般需要借助片外的Mux/DeMux方案。Intel的方案，工艺较GC+FA的直接耦合更复杂，且其空间光路没有保护，可能会被灰尘、水汽污染；但水平耦合方案的光学带宽很大，可以在片上集成Mux/DeMux，用于制作CWDM和LWDM的光收发器。

图34 PSM4模块的光芯片和光纤阵列耦合

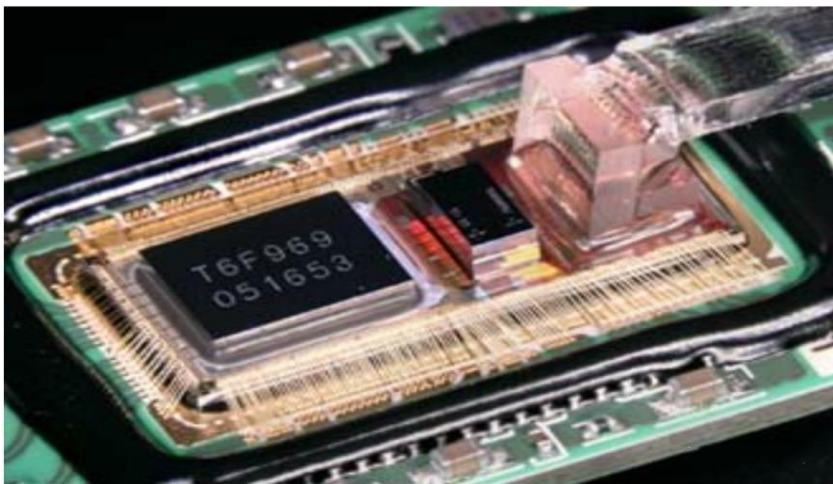


表13 Luxtera与Intel 光纤耦合比较

	方案	实现难度	光学带宽	片外的Mux/DeMux方案
Luxtera	GC+FA	Easy	30nm@1dB	Difficult
Intel	SSC+Lens+FA	Difficult	100-200nm	Easy

Mellanox（英伟达收购）—混合集成，特色耦合

- Mellanox是一家以色列的端到端的智能网络设备提供商。其硅光产品既可以支持名为InfiniBand的高速网络连接标准，也可以支持以太网连接标准，硅光收发器产品覆盖1Gb/s到200Gb/s速率。100Gb/s收发器物理介质分层覆盖SR4到LR4，而200Gb/s仅支持短距离（100m以下）应用，均可进行批量生产；与此同时，400G QSFP-DD DR4 500m 收发器也在2019年进行了展出。
- Mellanox早在2013年后收购了硅光子专家Kotura与并行光互连芯片厂商Iprtronics，后来又与光器件和模块供应商NeoPhotonics公司合作开发激光器阵列，其产品具有高容量、低成本特点，目前在硅光方面专注于为数据中心规模化提供解决方案。Mellanox的优势在于，公司拥有从模块、网卡、交换机、服务器到有源光缆、收发器的全系列200G产品，是唯一可以提供完整的200G**端到端**方案的厂家。
- 硅基光源方面，采用基于flip-chip工艺的InP混合集成方案，**在端面采用水平端面耦合的方式，其方案不需要传统的透镜、隔离器等，也不需要密封封装**，具有插损适中、工艺难度适中和容差小的特点，也进一步降低了成本。并且Mellonox据称采用更严格的误码率标准（小于10e-15），以保证端到端性能。

表14 Mellanox 100、200Gb/s InfiniBand Tranceiver 解决方案

型号	应用	速率	封装	接口	最大传输距离	波长
MMA1T00-HS	HDR	200Gb/s	QSDP56	MP0	100m	850nm
MMA1B00-E100	EDR	100Gb/s	QSFP28	MP0	100m	850nm
MMS1C10-CM	EDR/PS M4			MP0/A PC	500m	1310nm
MMA1L30-CM	EDR/CW DM4			LC	2km	1310nm
MMA1L10-CR	EDR/LR 4			LC	10km	1310nm

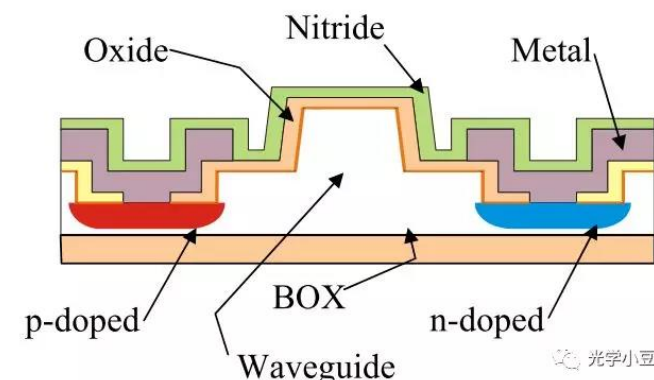
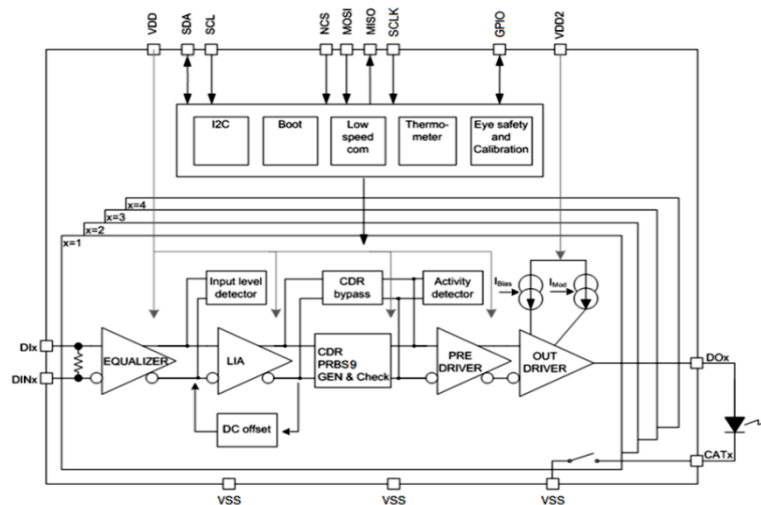
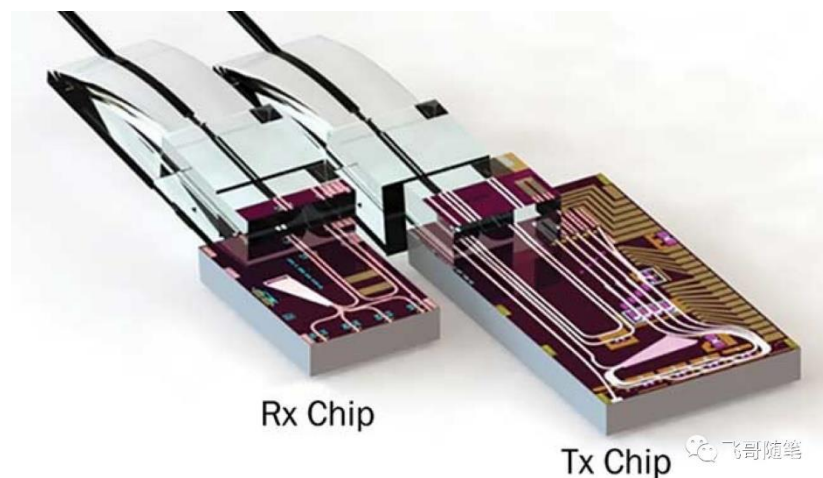
表15 Mellanox 100、200Gb/s 以太网 Tranceiver 解决方案

型号	速率	封装	应用	接口	最大传输距离	波长
MMA1T00-VS	200Gb/s	QSFP56	SR4	MP0	100m	850nm
MMS1C10-CM	100Gb/s	QSFP28	PSM4	MP0/A PC	500m	1310nm
MMA1L30-CM			CWDM4	LC	2km	1310nm
MMA1L10-CR			LR4	LC	10km	1310nm
MMA1B00-C100D			SR4	MP0	100m	850nm

Mellanox（英伟达收购）—1550nm产品线夭折

- 复用和解复用器方面，Mellanox采用刻蚀衍射光栅（EDG）实现复用和解复用，基于硅光技术制作复用和解复用器也是偏振相关的。在光模块的接收端的常是偏振不敏感的厚硅波导或是SiO₂/SiN/SiON材料制作的解复用器，耦合技术难度系数相对较低，但体积稍大不易集成。
- 激光驱动和跨阻放大器（TIA）方面，Mellanox具备4、8和12通道25Gb/s的VCSEL驱动批量出货能力，能够涵盖300Gb/s速率需求。其产品完全集成了时钟和数据恢复（CDR），具有完全可编程、功耗低的优点。然而VCSEL仅支持多模光纤，且实现高速率困难较大，在长距离高速场景上该方案成本较高。
- 调制器方面，其调制器并不是采用一般的Mach-Zehnder干涉型结构，而是一个p-i-n脊形波导结构，该方案的器件尺寸(几十微米)比MZI型调制器（几毫米）小得多，但是它的工作波长范围较小，而MZI型调制器因为基于光场的干涉，不受限于波长。早前布局1550nm电吸收式调制技术，由于在100G以上场景优势不足，且无法实现可调波长的功能，已在2018年宣布停止。2019年3月英伟达以69亿美金将其收购。
- 综合来看，Mellanox的优势在于能够提供端到端完整解决方案，且在超算领域的InfiniBand设备中具有天然的竞争优势。而在数据中心方面，Mellanox可批量提供100Gb/s，以及短距200Gb/s解决方案，对于400Gb/s以上虽有布局，但目前尚无商用化产品。

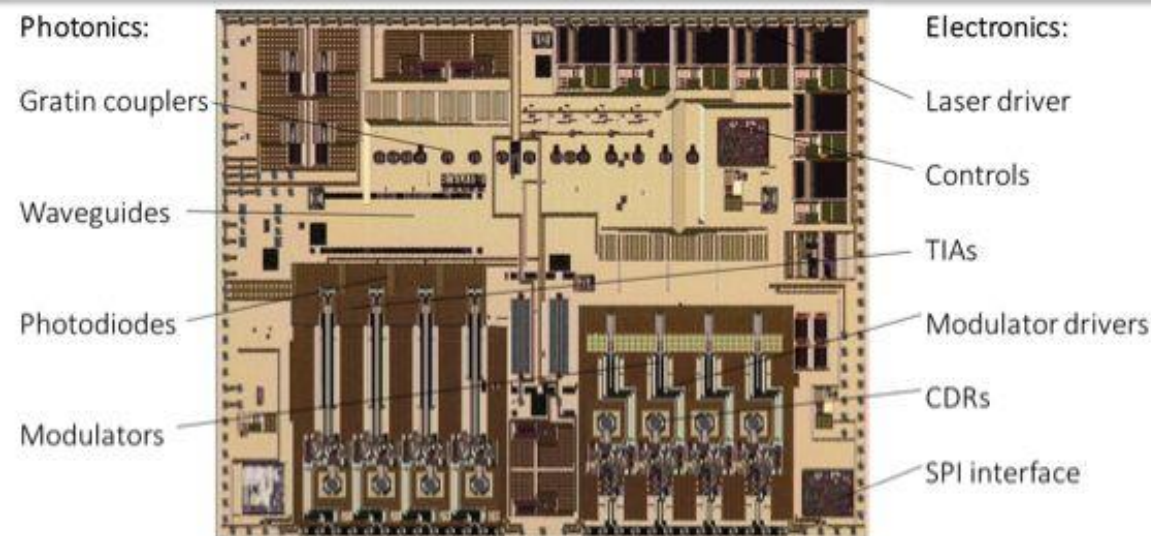
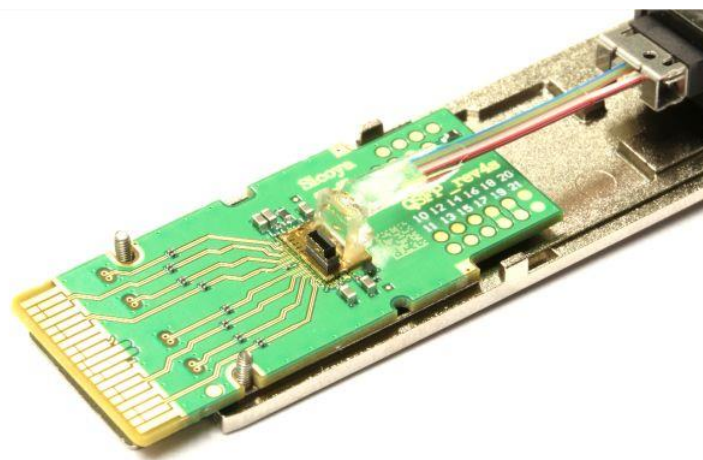
图35 复用与解复用器，Mellanox MTTV2804 驱动和跨阻放大器框图，p-i-n脊形调制结构



Sicoya（苏州熹联光芯）——单片集成的先驱

- Sicoya是一家德国的硅光创业公司，2017年以100G硅光子收发器进入市场，该收发器使用130nm的硅锗（SiGe）BiCMOS工艺制造，并声称获得客户订单。2019年，展示其EPIC光电集成的400G硅光子学技术，目标指向QSFP-DD，OSFP和COBO封装的400G数据中心市场。与此同时，Sicoya宣布在中国天津宣布建立新工厂，专注于光收发器和光引擎的组装和测试。
- Sicoya宣称其在硅光子领域有多个技术革新，可以实现低成本、低功耗和高速率。其产品的特点是所有光电器件都集成在同一个芯片上，也就是单片光电集成（EPIC），这样可以显著降低封装成本，并提高良品率；并且由于缩短了射频路径，功耗显著降低。
- EPIC芯片方面，其光器件包括：光栅耦合器Ge/Si探测器，Si调制器，各种无源波导器件等；电器件包括：激光驱动、Si调制器驱动、CDR、TIA、微控制器等。其激光器为片上外置光源，发射端和接收端的光栅耦合器，通过同一个光纤阵列进行光学耦合，只需要进行一次光学耦合封装即可。
- 综合来看，Sicoya背靠德国柏林技术大学，有着深厚的学术背景支持，专注于难度最大的单片集成技术，是一家创新驱动、定位明确的创业公司。我们认为Sicoya产品超前程度大，不易被追赶复制，具备技术护城河优势。

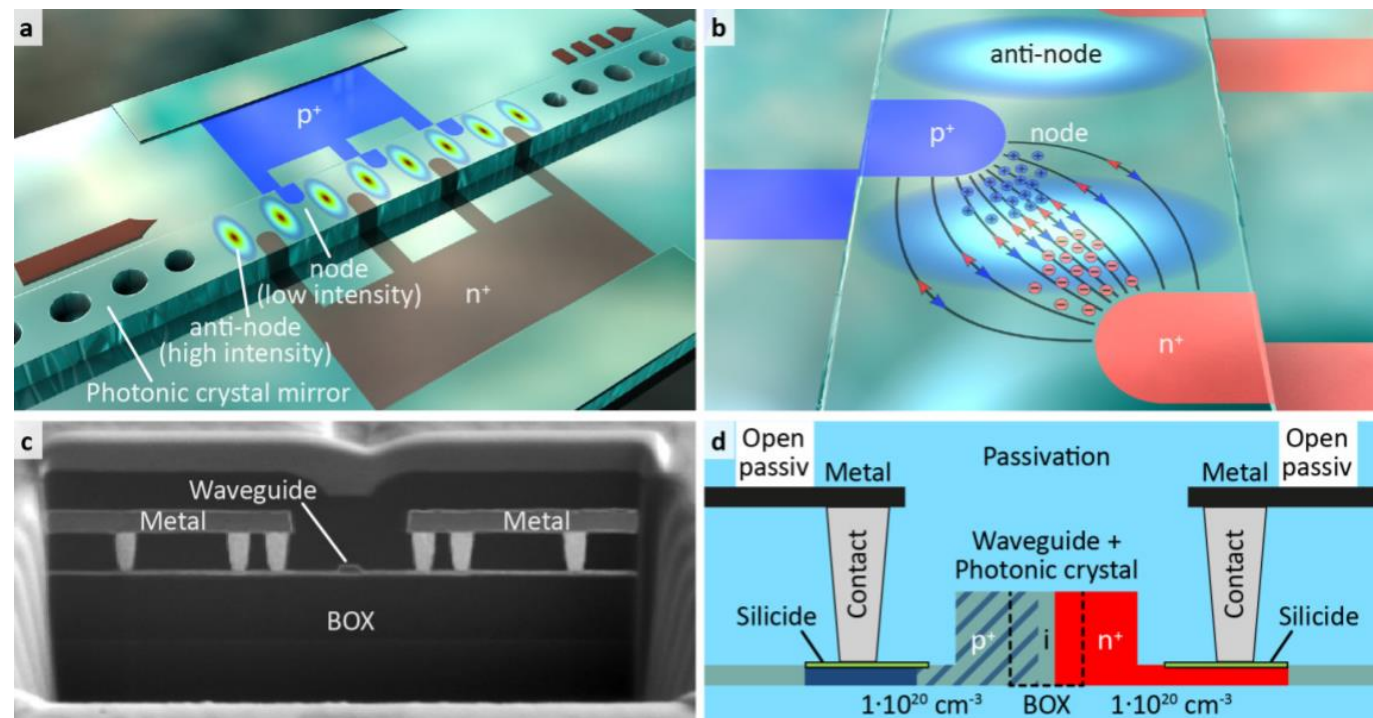
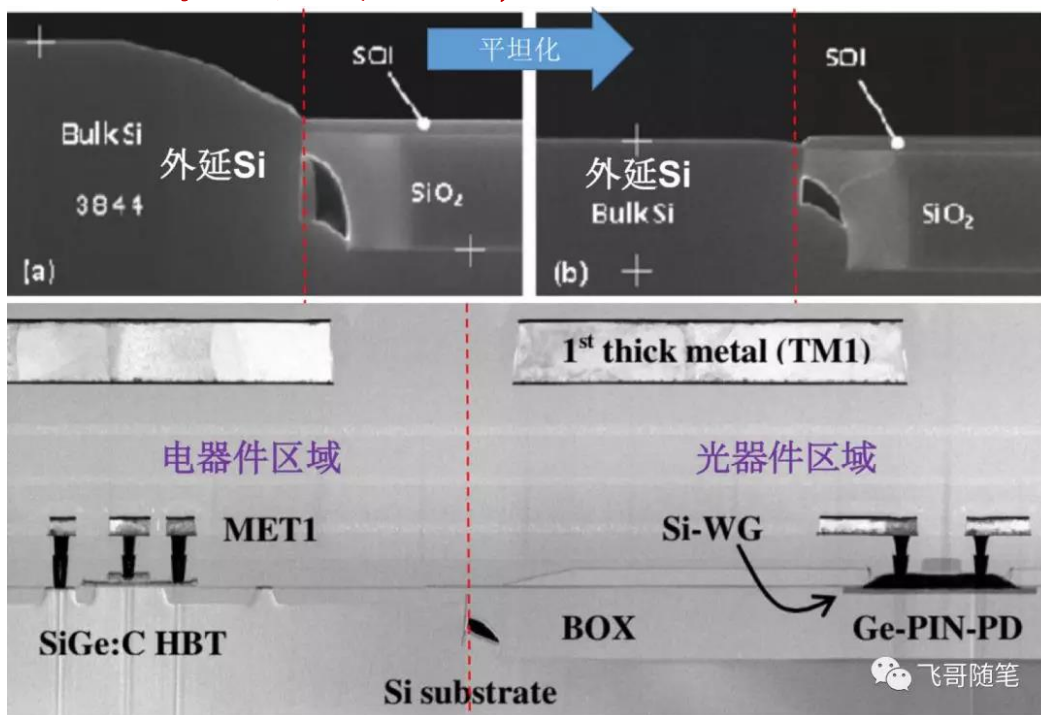
图36 Sicoya单芯片100G QSFP28收发器，100G单片集成芯片



Sicoya (苏州熹联光芯) ——单片集成的先驱

- Sicoya的芯片制作工艺基于IPH的BiCMOS工艺。其工艺的关键在于，首先将SOI晶圆的部分区域通过干法刻蚀和湿法腐蚀的工艺分别去掉顶Si和埋氧层（BOX layer），其次通过外延的方法生长体硅，再通过晶圆平坦化去掉体硅外延不平坦的地方。这样，体硅区域可以用于制作电器件，SOI区域用于光器件，实现了光电器件的单片集成，且光电器件制作时，大部分工艺可以通用。
- Sicoya公司的Si调制器，不是常规MZM调制器，而是其具有特殊设计的基于FP微腔的NMD modulator（Node-Matched Diode modulator）。这种新型的Si调制器具有尺寸小（ $100\ \mu\text{m}^2$ ），插损低（2.2dB），功耗小（56fJ/bit）等优点。尺寸小，与传统的MZM调制器相比，一是可以节省芯片面积，进一步降低芯片成本；二是RF信号的路径短，可以避免考虑传输线问题。插损低，可以降低对激光器功率的要求，也降低了功耗。

图37 Sicoya芯片的截面SEM图，NMD 调制器





05 硅光技术当前技术评估

硅光发展技术难点

- 目前，已量产的硅光模块，基于硅衬底的混合集成是**主要方式**。主要器件包括：在硅衬底表面集成激光器（III-V族半导体，以InP为主）、调制器（铌酸锂LiNbO3，具有优异的电光效应）、光探测器（Si中掺Ge）、硅波导（Si对于1.31μm / 1.55μm通信波段透明）、波分复用及解复用器、耦合器等。
- 硅光子技术取得了高速发展，技术持续突破。不过，硅光子技术仍面临以下三大问题：
 - ① **芯片良率低，成本优势不明显**：目前，传统三五族半导体芯片的良率在90%以上，而硅光芯片需要将III - V族半导体键合在硅基衬底上。由于硅光集成的工艺尚未成熟，在激光耦合等步骤上的良率较低，导致硅光模块成本难以进一步提升。
 - ② **硅波导与光纤的耦合效率低，性能优势不明显**：硅基光波导的尺寸在0.4-0.5μm量级，远小于单模光纤尺寸（纤芯直径约8μm—10μm）。尺寸上的差别将导致模场的失配，需要利用硅基波导光栅进行耦合，在耦合过程中将产生损耗。
 - ③ **设计流程分立，仿真验证效率不高**：目前硅光设计流程还比较分立，缺少紧凑模型、缺少标准链路模型、缺少必要的验证手段、软件功能单一且缺少交互、无自动化设计以及设计与工艺脱节是当前面临的主要问题。

表16 硅光集成方案比较

	优点	缺点
InP基集成	可制备激光器和放大器等器件	尺寸大、损耗大、有源无源对接难
集成光波导 (铌酸锂、光纤、有机)	稳定、与光纤兼容	成熟度低（调制器和放大器除外）
前端集成 (单片)	端面高度集成以及工艺无温度限制	面积利用率不高，硅衬底光/电不兼容，开发成本大，灵活性低
后端集成 (单片)	与CMOS工艺兼容，灵活性、面积利用较前端集成高	工艺难度大、波导制备困难、温度稳定性差
混合集成	无工艺温度限制，灵活性高，多层/多材料集成，波导在顶部	封装复杂性和成本较高

目前单元器件基本成熟，而混合、单片集成互有优劣，如何高效率、低成本地实现**多材料体系，多种功能器件的系统集成**是亟待解决的难题！

激光器集成仍待突破，损耗尚需克服

- 减少分立组件，提高芯片集成度始终是硅光方案降成本的核心。
- 硅光产品目前已经实现了将大多数器件集成到芯片上，但如何集成激光器依然是一大难题，也是制约成本降低的一大因素。由于硅本身为间接带隙材料无法直接发光，作为光源，发光效率低。因此硅基光源实现难度大，应用受限。
- 目前主流公司采用将异质材料（通常为InP）大功率激光器以各种手段集成到硅芯片上的方案来弥补这一不足。但外部光源方案较硅基光源方案需要额外耦合器件和较高难度的对准工艺，提高了生产成本。因此尽管目前已有商用化混合集成方案，但依然存在着降成本空间。
- 另一方面，激光器的损耗问题也是硅光技术需要突破的关键。目前，尽管硅材质本身具有低功耗特性，但由于工艺原因，损耗尚且无法与传统方案相比较。

图38 硅光光源通过不同的引入方案实现集成

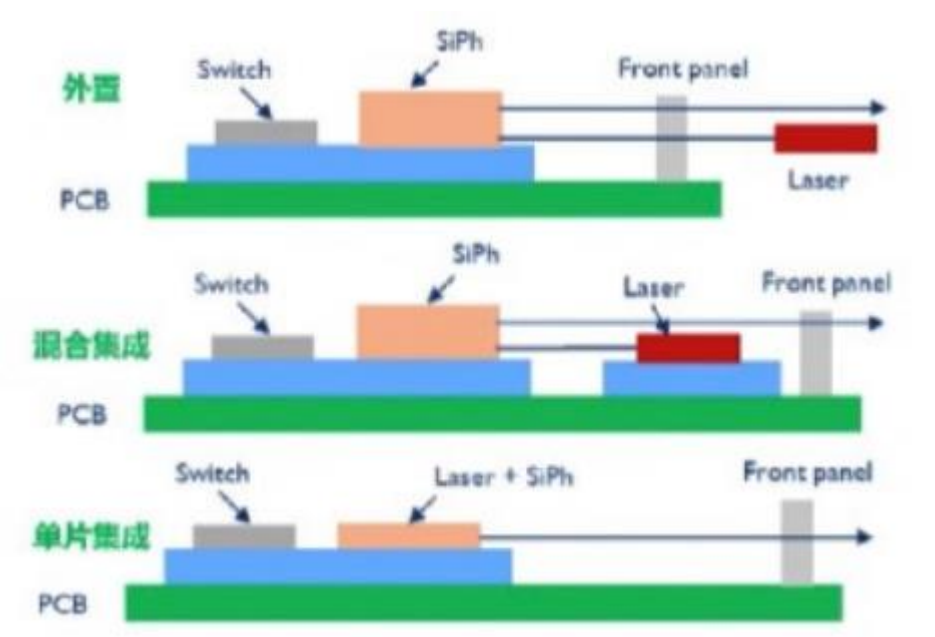


表17 硅光与传统激光器方案损耗对比

硅光方案				
流程	特制激光器	调制器	传输波导	光纤耦合器
损耗合计	2db+5.5db+0.5db+2db=10db			
传统方案				
流程	常规激光器		透镜	
损耗合计	3db			

表18 激光器仍需解决的其他难点

全温区大功率输出，提高饱和电流极限
改善散热特性
全温区、大电流条件下保持模式稳定，边模抑制比良好，同时无光谱展宽
降低空间烧孔效应
适用于非气密性封装环境

硅基调制器目前较为成熟

- 调制器是电光转换的核心器件，将外界电流、电压信号转换为光波的强度等参数，将电信号加载到光波上，从而实现信号的光学传输。
- 传统硅基调制器主要是基于等离子色散效应和QCSE效应两种原理，分为微环结构的光调制和Mach-Zehnder结构的调制两种。一方面，体积小、功耗小、集成度高，但另一方面线性度较差。由于线性度较差等原因，新型混合集成调制器应运而生。其主要包括有机物混合集成调制器、LiNbO₃混合集成调制器，在结合其他材料之后，取长补短，效益得到提升。
- 性能对比：传统材料LiNbO₃调制器发展成熟，但一般半波电压高，体积大，插入损耗高；InP基调制器性能好，易于集成但材料和工艺复杂，成本高；硅基调制器体积小，集成高，线性度相对较差；聚合物调制器带宽高，稳定性较弱。综合来看，基于硅基衬底的混合集成调制器聚合材料优势，提高调制器的整体性能，是未来的热门方向。目前硅基调制器已达到微米量级，其他方案难以企及。

图39 调制器原理

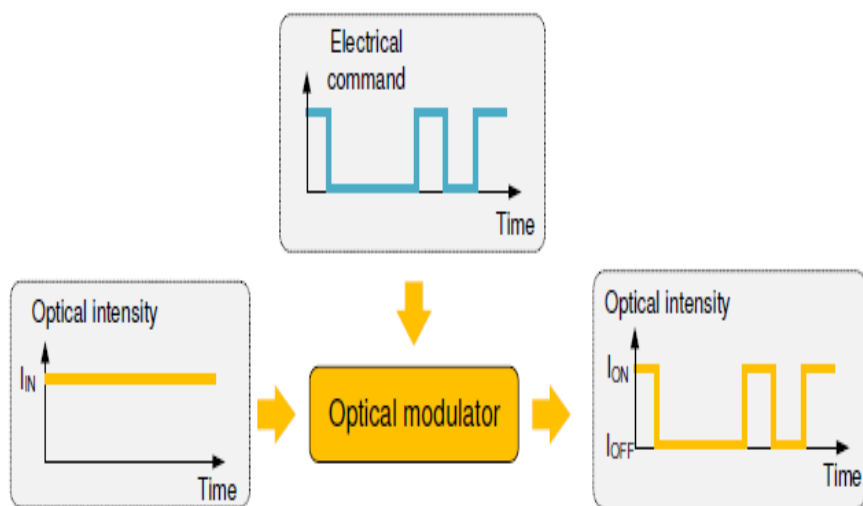


图40 有机物混合集成调制（SOH调制器）

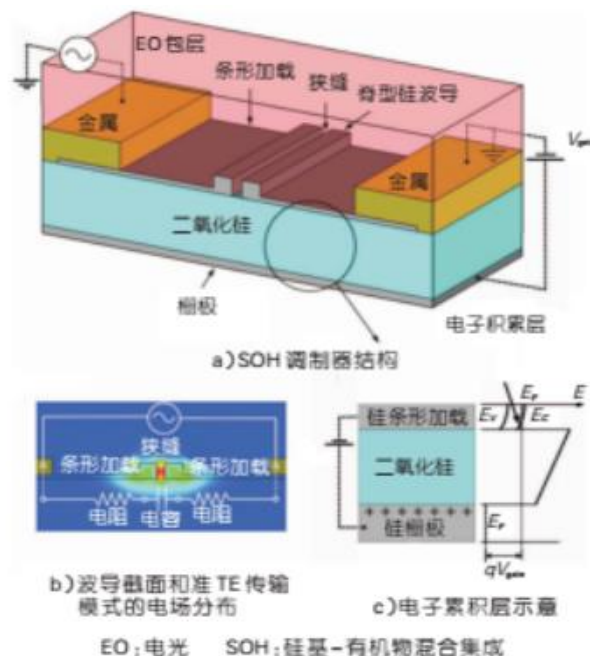
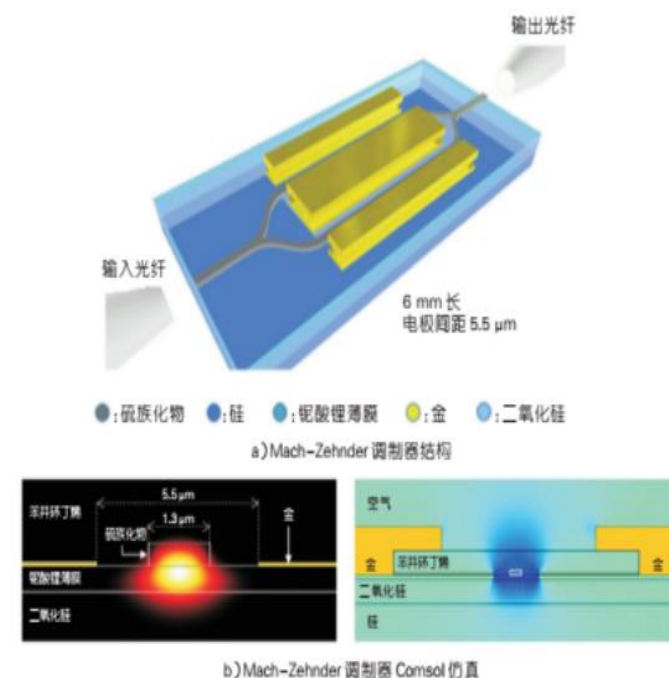


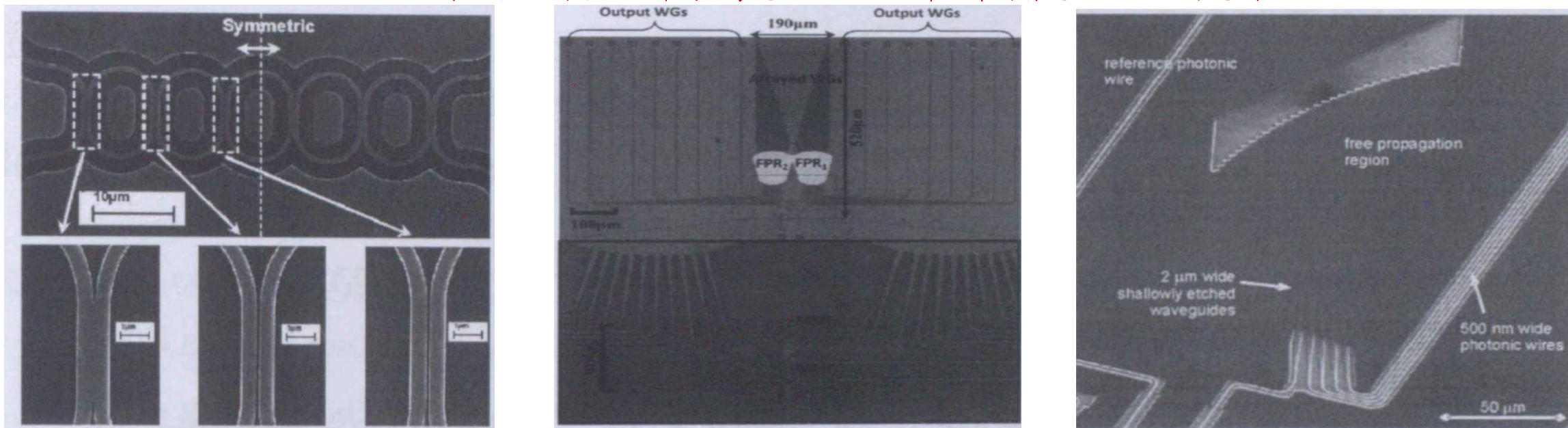
图41 LiNbO₃混合集成调制



高速环境中波分复用、解复用器件仍待成熟

- 多路复用技术是把多个低速信道组合成一个高速信道的技术，常见复用方式有波分复用、偏振复用、模式复用等。极大地拓展了光互连的通信容量。其中目前主流的复用方式为波分复用，但随着高速化需求的不断加强，其他复用方式也会得到推广。
- 实现波分复用器件的基本原理是利用光束干涉，可分为双光束干涉和多光束干涉两大类。多光束干涉器件可实现更窄带宽的滤波，易于实现多通道密集波长复用。最常见的多光束干涉波分复用器件主要有阵列波导光栅（AWG）、刻蚀衍射光栅（EDG）、微环谐振器（MRR）、平面中阶梯光栅（PEG）等。
- 微环谐振器为获得平顶通带，通常需要级联多个微环形成高阶微环谐振器。而微环相对于其他类型的复用器件，对温度敏感性更高。AWG和PEG则是基于多光束干涉原理，但目前还有较多局限，如存在插损较高、器件尺寸偏大、各通道热串扰会使器件性能严重退化等问题。
- 基于高速化趋势，我们认为目前波分复用、解复用相关器件在硅光未来应用中前景明确，但相关技术仍待成熟。

图42 微环谐振器、阵列波导光栅（AWG）、平面中阶梯光栅（PEG）示意图



光纤耦合、热管理仍待发展

- 光纤耦合：Si波导和光纤的耦合一直都是硅光技术的难点。Si波导尺寸仅有几百纳米，与单模光纤9um的芯径严重不符，直接耦合损耗过大。耦合目前主要有光栅耦合和端面耦合两种方式，模斑转换器的损耗低，带宽大。而光栅耦合器的对准容差大、耦合位置不受限制，可进行芯片级的测试，但对不同偏振需要单独设计参数。整体来看，光纤耦合技术依然有很大突破的空间，依然存在高密度多通道耦合、通道间不一致、高效自动化耦合问题。
- 热管理：可插拔光收发模块插入面板之后，内部产生的热量一小部分由周围空气的自然对流散热，大部分则是通过传导的方式散热，热量总是由温度高的一端传递到温度低的一端，模块热量向上传递至封装外壳，向下传递至主板。
传导，对流，辐射是热量在光模块和主板之间传递的主要模式，依然需要花费大量成本用于光模块的散热设计。尤其对于硅光模块来说，硅光芯片温度敏感性强，对相关仿真设计、结构优化，功耗控制提出新要求。

图43 光栅耦合示意图

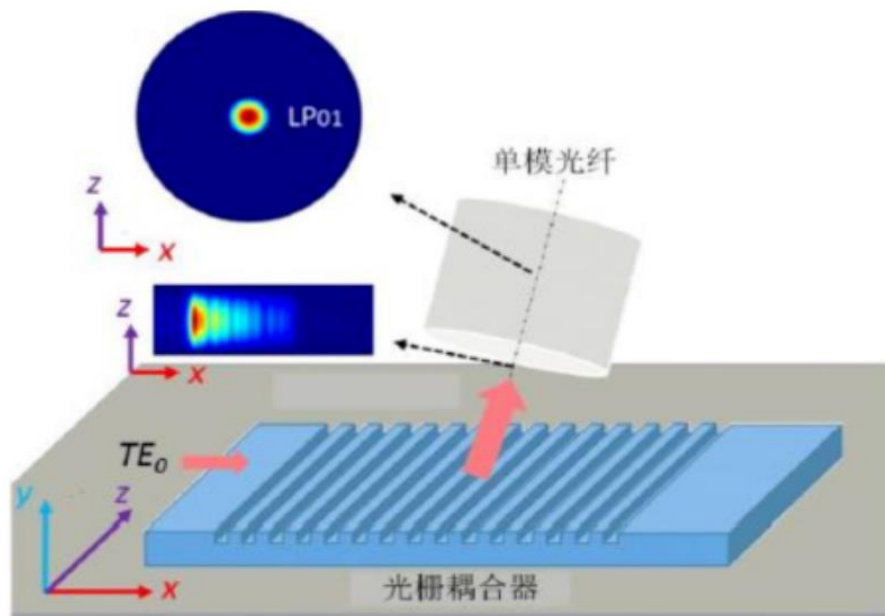
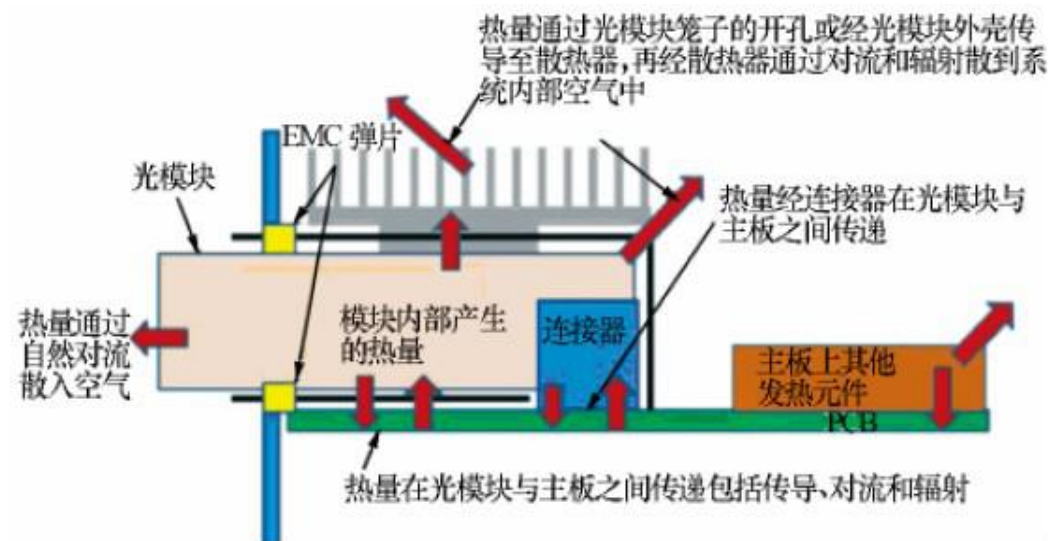


图44 光模块散热示意图



整体生产流程成型，攻坚难点尚存

- 硅光产品整体生产流程包括设计、制造、封装三大过程，其中硅光芯片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。
- 设计环节主要是负责硅光模块的电路图与内部结构的规划。近年来，行业内模仿微电子设计方式，融合光学仿真与PDK，推出简化开发环境EPDA。该软件的推出有助于硅光技术在设计环节向微电子工艺靠拢，进一步发挥出微电子工艺的规模效应。
- 制造环节主要是负责将晶圆加工打磨成硅光芯片，并完成相应器件的封装和测试。
- 目前内部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，由代工厂实现制造、封装过程。

图45 EPDA软件功能

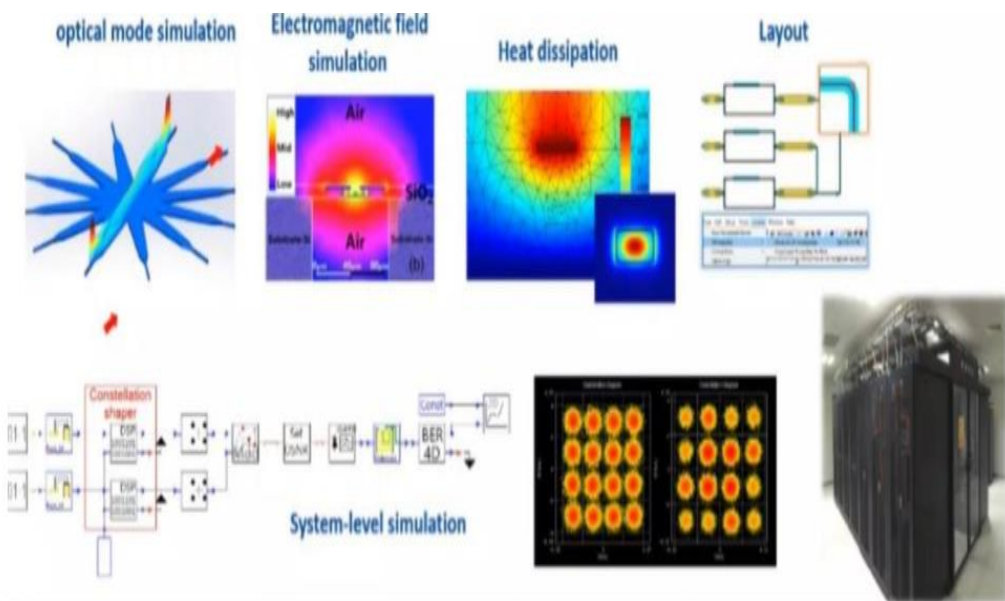


表18 主要MPW代工厂

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

技术评价：性能效益初显，大规模商用还需探索

➤ 硅光方案的优势

- 低功耗：硅材料阻抗低，驱动所需的电压小，进而功耗较为有限。
- 高集成：集成设备较分立设备而言，产品寿命长，器件的故障率低，可靠性高。
- 低成本：借鉴微电子工艺成功经验，推行规模化生产能够显著降低成本。
- 高速性：在日渐增长的通信速度要求下，传统材料已经逼近速度极限，而硅基材料依然有很大发展空间。

➤ 硅光方案的不足

- CMOS规模效应未显：目前企业仅是小规模生产与小批量商用出货，未能达到微电子器件行业进行低成本生产所需的规模。进一步体现在流片生产模式完善度低，自动化程度低，产业标准不统一，器件单元尚未标准化，废品率控制仍需加强。
- 激光器本身依赖混合集成：技术精度要求高，放大设备成本和降低生产良率，为生产附加大量额外成本。
- 颠覆性优势尚未展现：在性能、功耗和整体成本多个维度，与传统模块商处于同一竞争平台，尚未展现颠覆性优势。如晶圆测试的优势，非气密性封装技术的低成本尚未充分体现。
- 应用场景不足：光模块目前绝大部分应用场景仍局限在数据中心和电信信息传输，消费领域的应用仍有待技术研发和下游需求的开拓。

- 综上，整体来看硅光技术已经较为成熟，在部分领域已经能和传统光模块技术进行竞争，只剩下激光器、封装手段等制约成本的关键要素仍待解决，以及对CMOS经验的学习尚待加强。根据硅光行业技术发展过程，关键技术的突破仍需时间，我们预计在近几年硅光与其他方案并行竞争格局不会改变，大批量规模商用仍需探索。从长远来看，传统光模块技术逼近速度极限，而硅光方案依然具备相当的潜力空间。

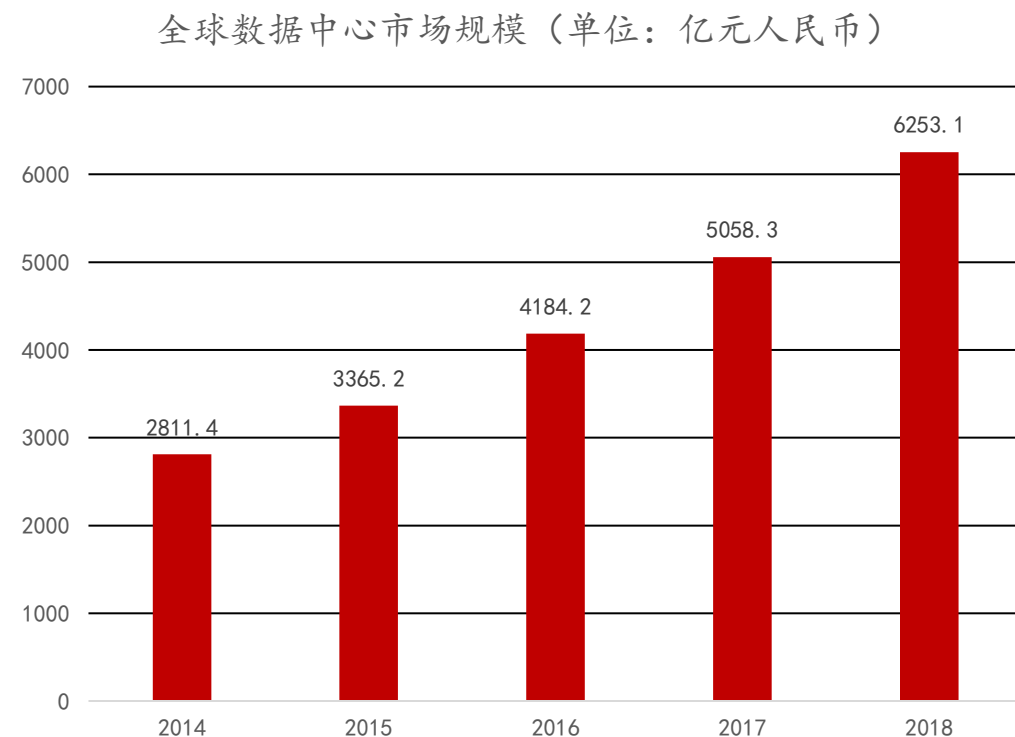


06 硅光技术在通信领域进展及市场

硅光市场：主要应用场景数据中心未来稳步向好

- 数据中心是指全球协作的特定设备网络，用来在因特网络基础设施上传递、加速、展示、计算、存储数据信息。近年来数据中心产业在全球范围内得到较快的发展，自2014年以来始终维持着较高的增长率，2018年已经实现6253.1亿元的市场规模。
- 数据中心恒温恒湿的条件，对于光模块封装要求较低，对集成规模、器件尺寸、成本方面、功率控制要求较高，硅光方案可大幅节约器件、组装成本、控制占地空间。因此在数据中心市场，硅光模块具有极强的需求匹配度，因此获得相当大的市场份额。
- 近年来数据中心市场规模稳步扩大，基于此我们预计数据中心规模会持续扩大，进而直接拉动数据中心模块的需求，硅光行业也将受益于需求增大，获得更大的市场空间。

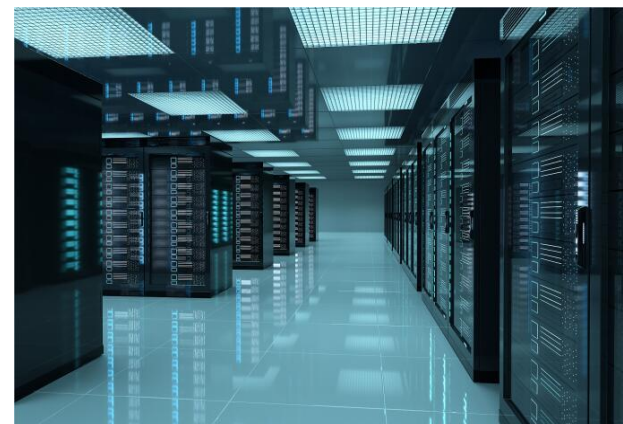
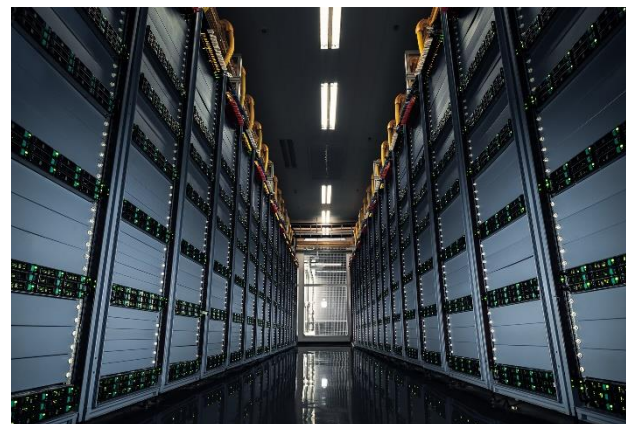
图46 数据中心市场规模



资料来源：NGOF, 科智咨询，华西证券研究所整理

表19 数据中心难题

数据中心难题	
管理问题	设备特性质量差异，稳定性弱
	设备数量多
	设备占地面积广
成本	分立式器件成本过高
性能	传统光模块在高速领域出现瓶颈



硅光市场： 5G特定市场前景可期

- 5G基建开启，硅光技术的潜在应用场景为城域短距通信，城域短距应用和量大的特点将有助于推动相关的硅光技术获得更大应用空间。
- 硅光调制器+直流大功率激光器技术在高温极端环境中具备优势。如Intel推出的CWDM4 QSFP28模块，该模块主要是面向5G无线基础设施，用以支持5G的前传带宽需求，能够在0~70℃的环境下正常运转。
- 综上，基于5G新时代对光模块的使用环境、速率新要求，结合各方案成本来看，我们认为硅光产品有望得益于5G基础设施建设的开展，获得特定市场份额，但由于成本依然维持在高位，因此难以在5G建设中得到全面性应用。

图47 5G构架图

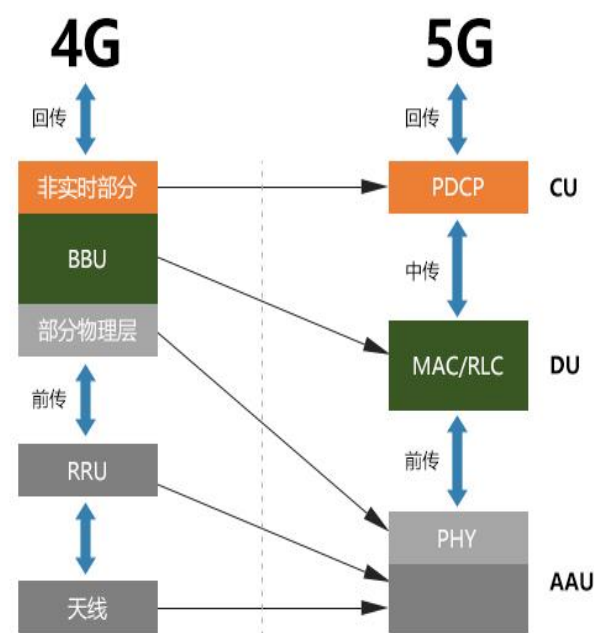


表20 前传光模块解决方案比较

前传光模块解决方案		工业级温度	节省光纤资源	规模成本低
光发射器	工业级温度激光器	√		低
	商业级温度激光器+TEC	√		高
	硅光调制器+CW激光器	√ √		中
激光器波长	单纤双向 (Bidi)		√	略高
	固定 (fixed) DWDM		√ √	高
	可调 (Tunable)		√ √	非常高
电调制/解调技术	NRZ+低带宽DFB激光器			略低
	PAM4/DMT调制			低

交换机容量2-3年翻倍，传统可插拔光模块路径力不从心

- 交换机容量2-3年翻倍，51.2T容量后传统光模块路径大概率走不通：交换机的最高密度是1RU上可插32个400G光模块，对应的容量12.8T。假设两三年后800G光模块已经成熟并且尺寸功耗够小，交换机还能变大一倍，2RU下最大也就能提供51.2Tb的容量了，基于当前的可插拔模块的路径是走不通了。
- 硅光等后光模块技术的市场需求预计会在2024年左右出现：交换机容量到达51.2T的瓶颈会在2024年左右突显，Lightcounting等机构预测以太网数据中心，2024年光芯片组开始起量，光模块需求量会在2026年下降。
- 后光模块时代两个最具竞争力的方案分别是板上光学OBO和共封装光学CPO：共封装CPO则直接把光引擎(收发模块)与电交换芯片在一个衬底上封装成一个芯片，集中解决散热问题，同时也可以省去很多的SerDes功能，节省功耗。

图48 交换机容量及光模块速率演进趋势

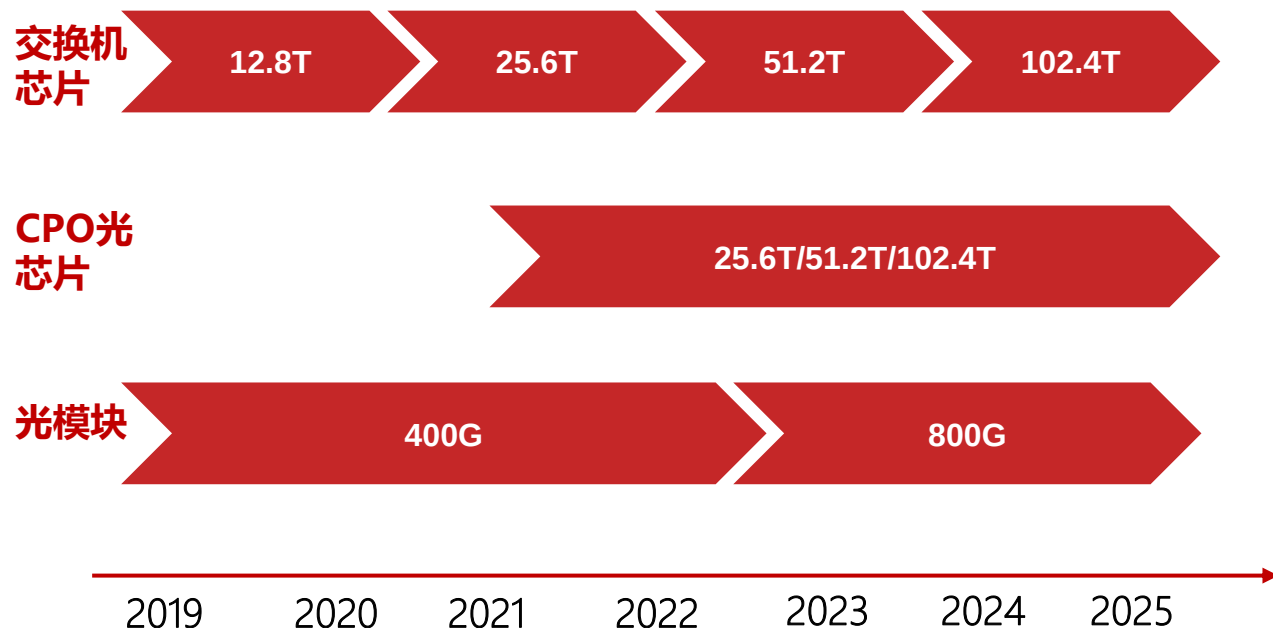
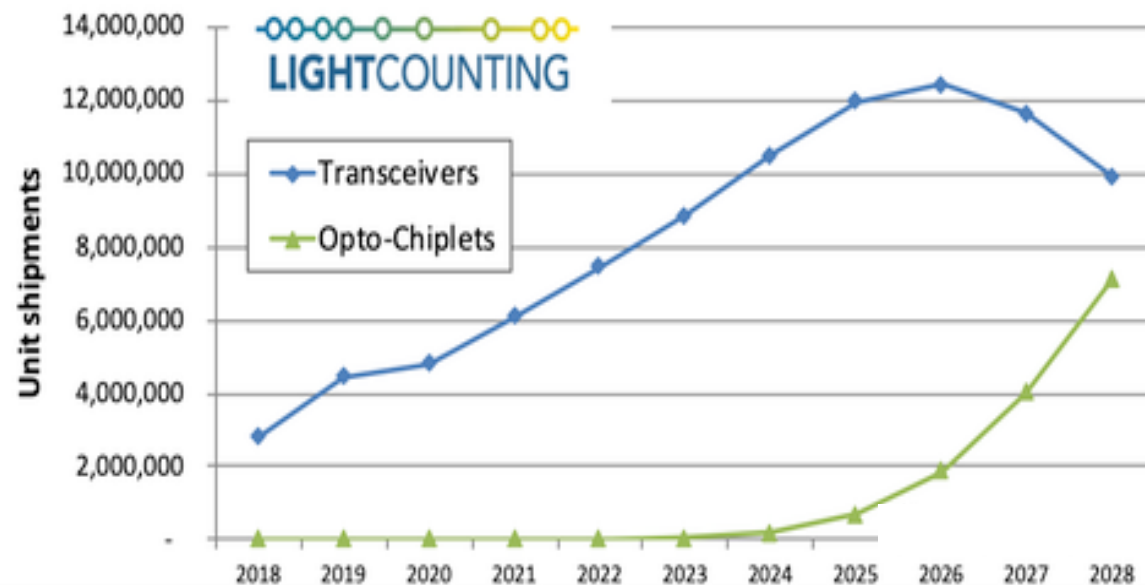


图49 光模块及光芯片组需求量预测



硅光市场：未来3-5年市场规模加速增长

- 咨询机构LightCounting对光收发器、AOC(有源光缆)、EOM(嵌入式光模块)和CPO(共封装光学)预测显示，从2016年开始，基于硅光的产品所占的份额开始上升。
- 从2018年开始，硅光市场增长速度加快，2018-2019 增速为14%，2019-2025年预计复合增长接近 45%，增速呈加快趋势。
- 预计到2026年硅光（包括共封装光学器件）市场份额将超过50%，其市场规模将达到60亿美元。

图50 光模块市场状况（单位：亿元美元）

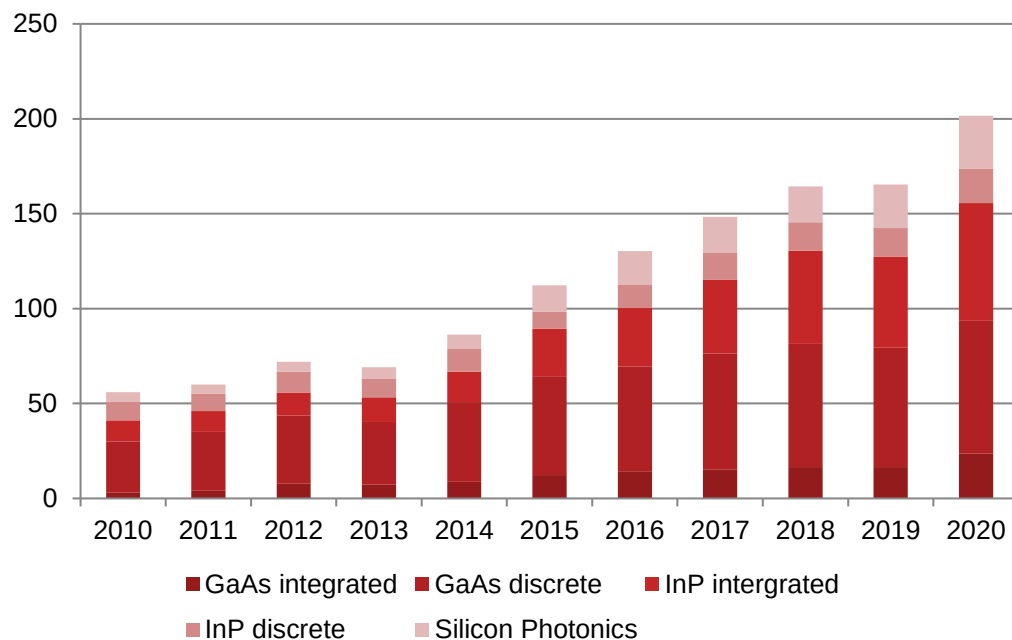
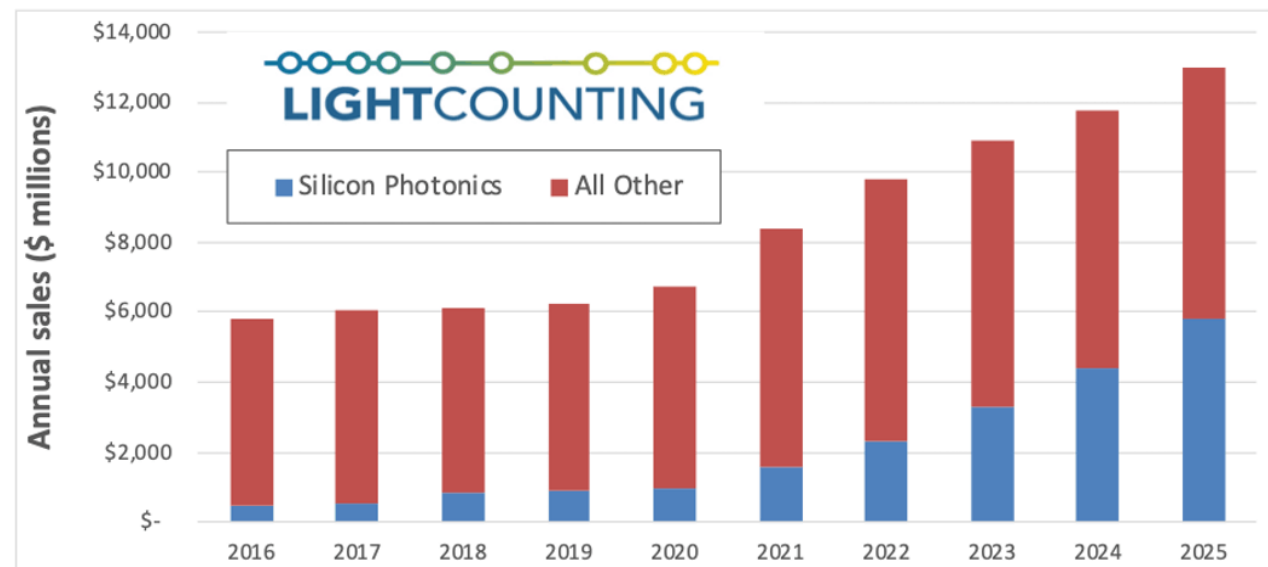


图51 光模块市场状况（单位：百万美元）



硅光市场：当前市场高度集中，大公司资本快速布局

- 硅光市场集中度高，Intel和Luxtera沉浸该行业多年，实现了硅光模块的小批量出货。尽管硅光行业出现了不少初创公司，但无论是出货数量还是成本都无法与Intel和Luxtera竞争。目前Intel和Luxtera（思科于2018年收购Luxtera）依然为市场的领导者。
- 大公司资本以及公众资本逐步流入硅光产业，有助于硅光行业未来解决商用技术瓶颈，加快实现规模商用。

图52 硅光市场集中情况

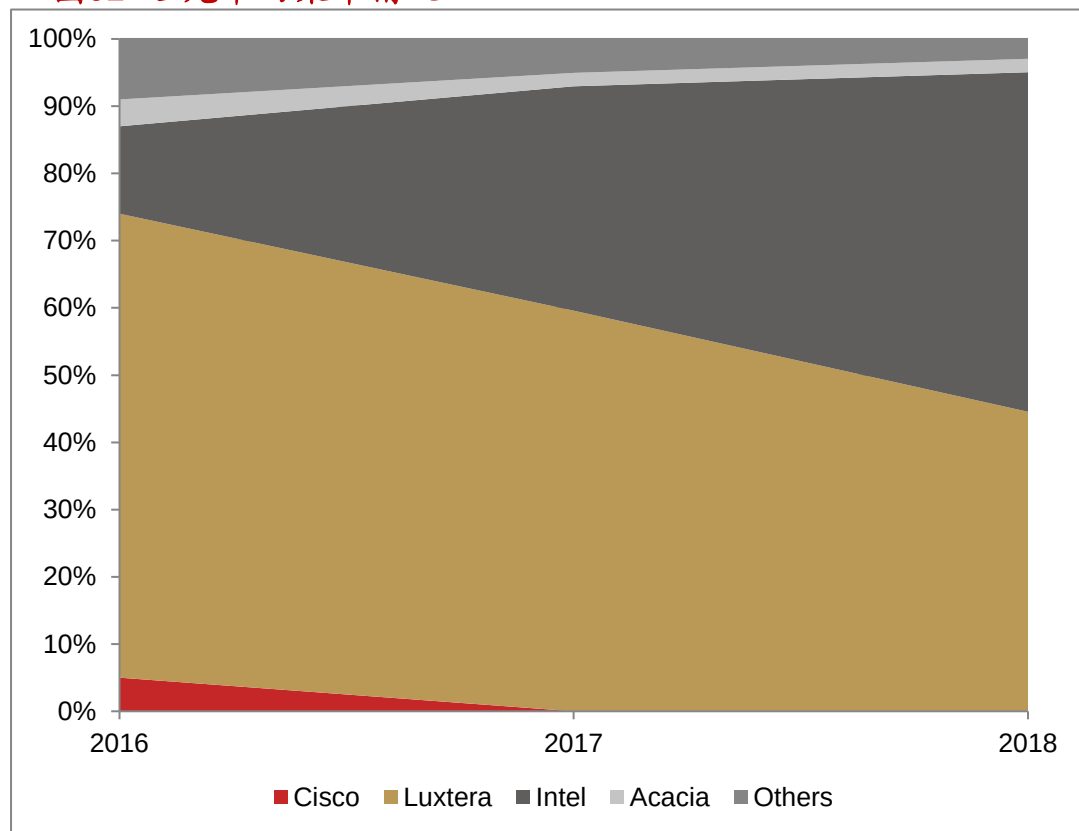


表21 国外企业状况表

企业	竞争优势	主要硅光产品
Acacia	低能耗高速传输光模块器件	硅光集成电路产品（AC100-C, AC100-CFP-M, AC100-CFP-ZR, AC100-CFP-L, CFP2-AC0以及AC400-UL）
Intel	低能耗高速传输光模块器件，数据中心领域	100G硅光收发器 PSM4硅光收发器
SiFotonics	CMOS工艺的硅基光电产品研发	TP1001芯片，CR4Q01
Mellonax	无限带宽技术 以太网领域	LinkXTM
思科	400Gbps以太网接口的硅光子技术线卡	CPAK光模块1Tb线卡，AISC产品



07 硅光行业产业链详细拆解及产业特征

全球硅光产业链全景：海外厂商主导，国内厂商跟随

- 硅光产业链上游主要包括PDA设计软件、晶圆、外延、制造设备和原材料供应商；中游包括设计、制造和封装厂商；下游主要是通信网络设备及其他相关设备厂商。



图53 硅光产业链全景

Systems include servers, routers, and switches
Non exhaustive list of companies

PDA设计软件：硅光子设计自动化工具

- 硅光子设计有其独特需求，EDA 工具无法满足其自动化设计需求，需要针对硅光子设计自动化（PDA）工具。
- 硅光子设计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，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，最后修正设计其结构参数。
- 链路设计仿真及验证等工序由于光子器件模型的复杂性，以对结构精确度、环境等因素的敏感性，构建物理模型非常困难

图54 硅光设计PDA软件功能图

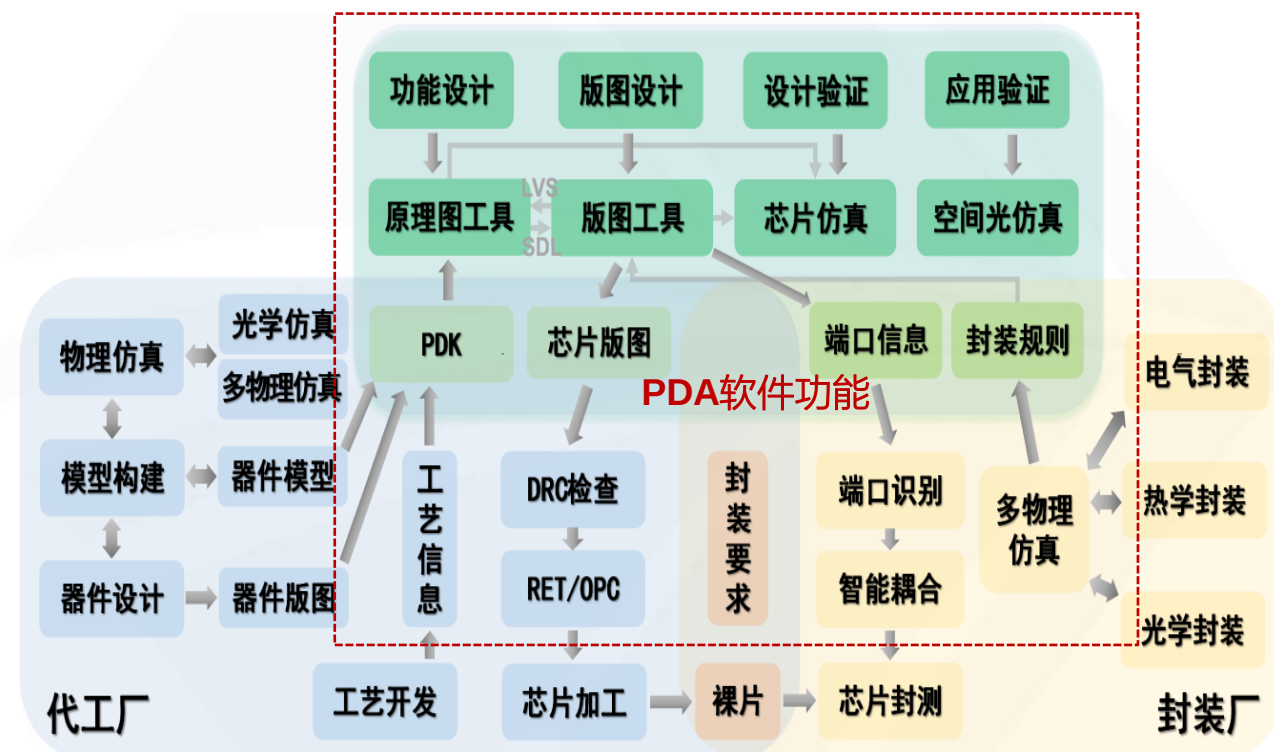
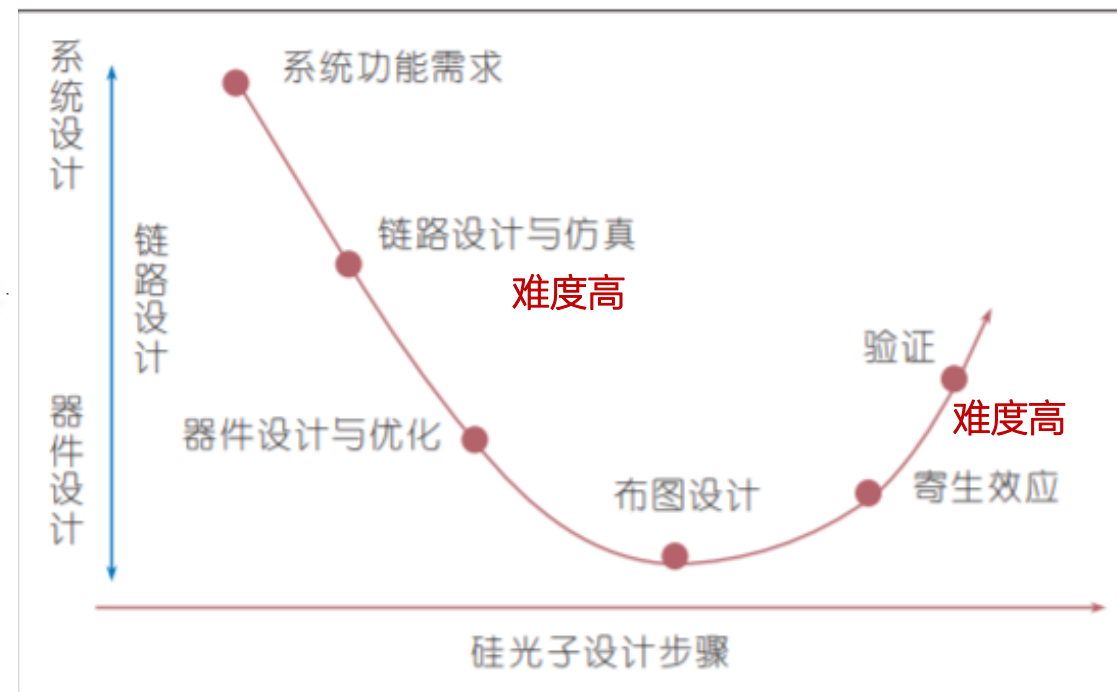


图55 硅光设计步骤



PDA设计软件:产值规模目前较小，行业收并购较为普遍

- 虽然硅光电子集成技术成为半导体行业趋势，国际厂商均已布局，PDA设计软件公司由于要与Foundry PDK深度合作，但是国内厂商起步较晚，设计、制造等供应商不多，导致我国PDA设计软件公司较少、且规模很小。
- 海外大厂PDA产品存在整合复杂难于上手、老旧架构难以跨平台、DRC(规则检查)方案成本过高等诸多问题也是我们国产PDA厂商机遇，国内代表PDA机构或企业有中科院微电子所、逍遥科技、曼光科技等。
- 受到行业发展现状，当期PDA设计软件市场规模偏小，海外多为EDA大厂多通过收并购布局PDA产业。

	器件仿真	光子线路仿真	器件版图	光子线路版图	验证	跨平台支持	产品布局策略
Intel	√	√	√	√	√		垄断、闭环
思科	√	√	√	√	√		收并购
Synopsys	√	√	√	√	√	Windows、Linux	自研+收购(Rsoft、OPTSIM等)
cadence		√	√	√	√	无 Windows	自研+合作
Mentor		√	√	√	√	无原生 Linux 支持	自研+合作 (LUCEDA)
LUCEDA	√	√	√	√	研发中	Windows、Linux	自研+合作 (Mentor)
VPI photonics	√	√					
Ansys/LUMERICAL	√	√					收购
Nazca design	研发中	研发中	√	√			
Photon Design	√	√					
中科院微电子所	研发中	√	√	√		Windows、Linux、支持云	自研
逍遥科技	研发中	研发中	√	√		Windows、Linux、支持云	自研
曼光科技						支持云	自研
华大九天							合作

SOI晶圆：硅光子时代的“隐身”英雄

- 制造硅光子芯片和器件最好、最自然的方法是使用绝缘体上硅（SOI）晶圆：SOI材料相对于SiO₂和 锑磷（InP）等材料体系具有更大的折射率差，波导尺寸可以非常小。
- 另外，从光电子材料本身的特性来看，硅材料也不是最好的选择。一方面硅基发光一直就是难题；另一面硅没有一阶线性电光效应不是最佳的调制器材料。最后硅对1.1 μm 以上波长透明，无法作为通信波段光探测器材料。
- 为了实现硅基器件性能的突破，以硅材料为基底引入多材料是硅光子的必然选择。如硅基引入 Ge 材料制作 GeSi 探测器已成为一项标准工艺。
- 产业链方面，Soitec是全球最大的Photonics-SOI衬底供应商，同时也将核心Smart Cut技术授权给新傲科技、日本信越等企业。

表22 硅光设计公司全景

参数	硅光子（SOI衬底）	混合解决方案（InP+SOI）	分立式InP
性能	优良	良好	良好
带宽扩展性及成本	优秀	有限	较差
CPO集成	兼容	有限	较差
制造复杂性	较低	高	最高
边际成本	优良（<70%）	良好（<60%）	良好（<60%）

资料来源：中兴通讯，EET，华西证券研究所整理

图56 不同硅光材料性能对比

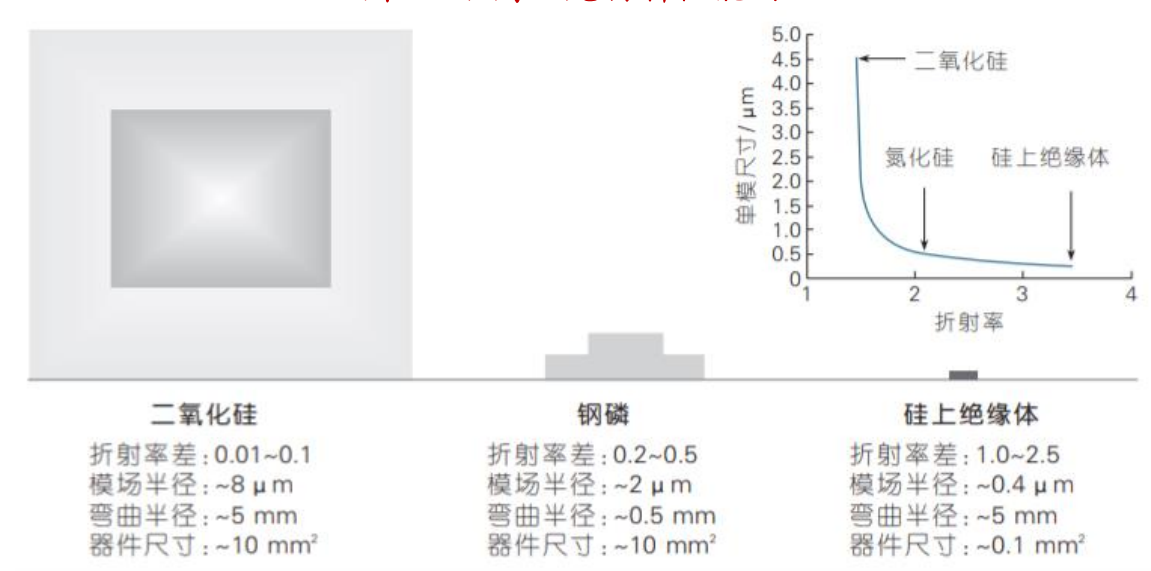
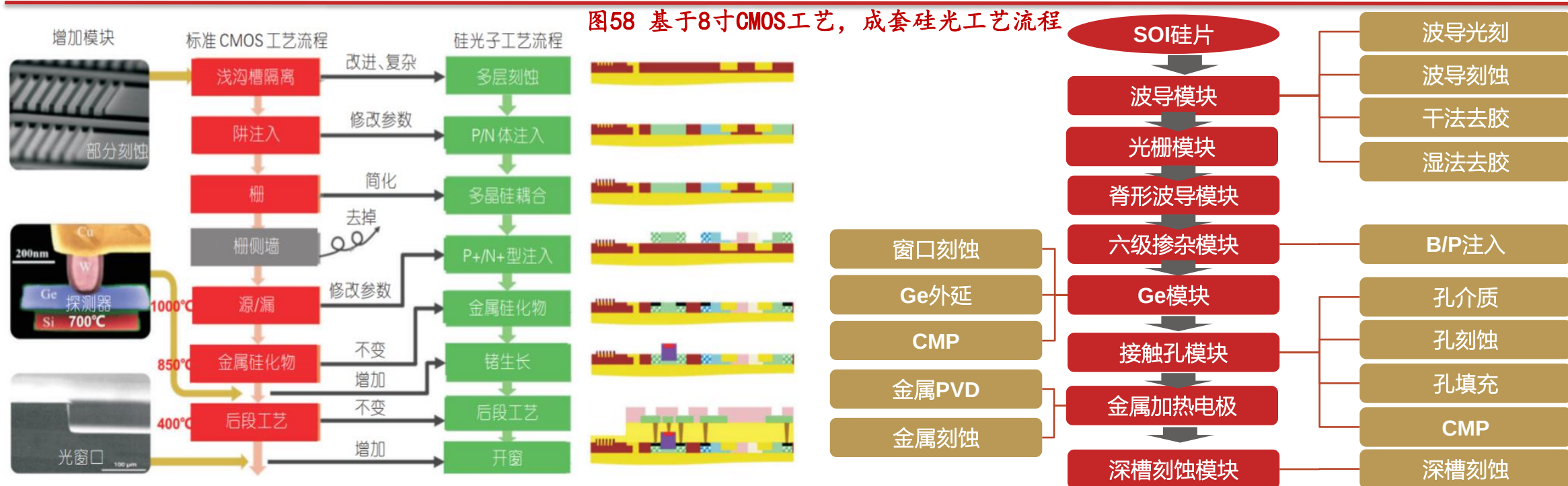


图57 硅光SOI光收发器原理



Foundry：国内硅光商业化流片平台很弱，成为产业发展的重大短板

- 硅光子集成制造关键技术工艺流程包括：外延生长、纳米加工、异质结构键合、混合集成、器件封装、高频测试等，虽然相比于传统CMOS工艺大大简化，但是也有众多不同，至少需要对标准 CMOS 工艺增加 3 个工艺模块：部分刻蚀、Ge 外延生长和光窗成型。
- 硅光工业流片平台主要是欧美企业，国内商业化能力很弱，成为制约产业链发展的重大短板：主要欧美企业包括比利时的IMEC、新加坡的AMF(前身为IME)、法国的LETI、美国的AIM photonics、美国的GlobalFoundries、新加坡的CompoundTek、以色列的TowerJazz、台积电TSMC、瑞士STMicroelectronics、德国的IHP、芬兰的VTT。国内方面，北京的中科院微电子所、合肥的38所、CUMEC等都可以对外进行硅光的MPW服务，上海微系统所也在搭建一个8寸的硅光工艺线，中芯国际也在进行硅光平台的建设。
- 硅光子器件尺寸跨度从几十微米到约100 nm，特征波导的尺寸为500 nm 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0.13 μm 来加工硅基光电子器件，国内中科院微电子所、CUMEC 等则采用0.18 μm 工艺。



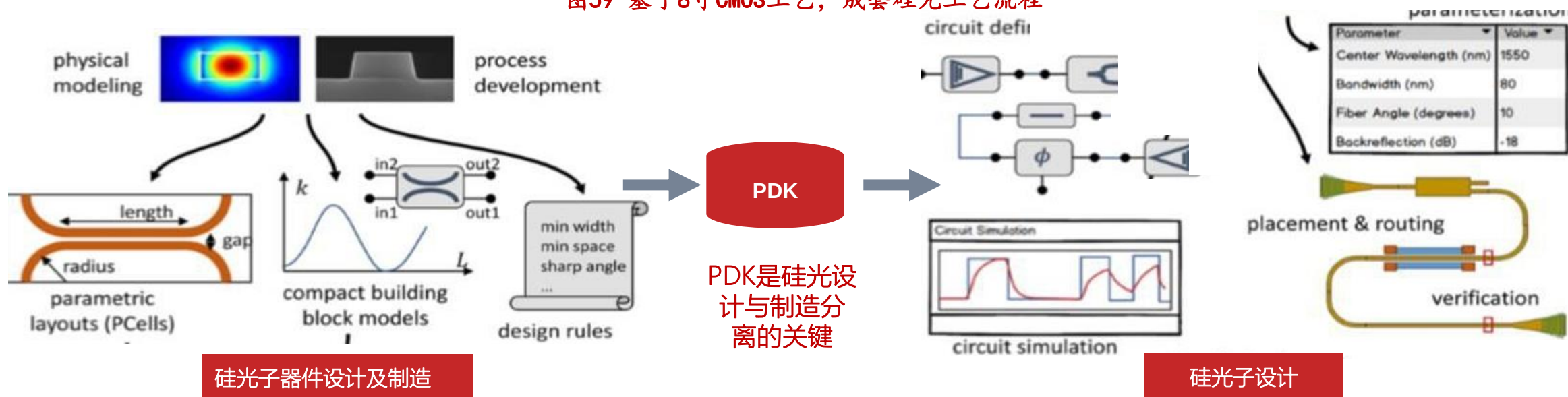
Foundry: 国内外硅光MPW商业线及中试线

	无源器件						有源器件		
	光波导 (waveguide)	光芯片边缘耦合器 (Edge coupler)	光栅耦合器 (Grating coupler)	MMI_1x2/Y分束器 (Y splitter)	MMI_2x2	交叉波导 (waveguide crossing)	热光相移器 (Thermal phase shifter)	调制器 (Modulator)	Ge探测器 (Ge Photodetector)
IMEC	√	√	√	√	√	√	√	√	√
AMF	√	√	√	√		√	√	√	√
Leti	√	√	√	√				√	√
AIM	√	√	√			√	√	√	√
GlobalFoundry	√	√					√	√	√
CompoundTek	√	√	√	√	√	√		√	√
TowerJazz	√	√	√						√
IHP	√						√		
VTT	√						√		√
中科院微电子所IMECAS	中试线（包括波导、光栅耦合、分束器、调制器、探测器等模块），是我国首个具有完整硅光子工艺流片能力的平台								
联合微电子中心（CUMEC）	中试线								
合肥38所	产业化情况未知								
上海微系统STITRI	中试线								
中芯国际	产业化情况未知								

硅光设计：国内外模式有较大差异，国内暂时落后

- 硅光的成熟度以及低集成度(相比于微电子)，硅光子产业特点就是设计和工艺高度结合，Foundry厂提供的PDK 是硅光子设计企业与Foundry厂工业结合的关键桥梁。
 - 海外市场上Intel、思科（收购Acacia等）、IBM等走的是一体化IDM模式，PDK相对封闭；但是海外硅光流片平台众多如IMEC、格芯、AMF、VTT等都具备较强商业化能力，其PDK能力较为完备，导致其硅光子设计企业走的较为靠前。
 - 国内的光子芯片企业，由于缺乏先进商业化平台系统级，工艺平台还停留在器件级的发展阶段，落后于海外的先进生产水准，同时也导致国内成熟的硅光子器件IP欠缺。
- 当期，国内硅光子公司大部分都需要自建硅光子工艺平台，才能满足“不被卡脖子”的发展需要，但是由于硅光子无统一的技术体系，不同厂家的内部具有大量的非标工艺和专用技术，会对硅光子产业化、规模化构成巨大挑战。
- 如果未来国内硅光子Foundry厂服务提供商所能够提供的基础元器件的性能已经足够好，越来越多的研究人员已经不需要再在器件层面优化，而是可以针对应用场景，研发特定功能的光学集成回路。硅光子集成系统芯片设计团队的数量必将比器件设计团队的数量增长的快，这也会推动硅基光子技术的应用和进一步发展。

图59 基于8寸CMOS工艺，成套硅光工艺流程



海外重点厂商硅光技术方案

国家	公司	波导	光源集成与耦合	激光器	调制器	探测器	复用/解复用	光纤耦合	封装	产品
美国	Luxtera	NA	Micro Package Flip-chip wire bonding 光栅耦合	片上外置光源 LaMP (InP) DFB 、VCSEL	硅基Mach-Zehnder MZI 分段电极SE-MZI	Ge/Si探测	NA	光栅耦合+光纤阵列	QSFP28	2014、2015年推出200G PSM8和100G PSM4光模块，并在100G PSM4领域占据了大部分的市场份额； 2017年9月ECOC，展示了基于QSFP28封装的CWDM2 的100G收发模块； 2018年3月，推出基于单极化光栅的100Gb/s单波模块。
美国	Acacia	220nm	Flip-chip；端面耦合	片上外置III-V光源	硅基Mach-Zehnder MZI，偏振分束旋转器 (PBSR)	Ge/Si探测	NA	单、双偏振光栅耦合	BGA	2014年OFC，实现了100G的相干收发模块； 2017年，Acacia实现了该相干光模块的BGA(ball grid array)封装. 硅光芯片、TIA和driver通过flip-chip的方式键合在LTCC底板上；同年，出货业内首款2x100G PSM4硅光嵌入式光模块，用于云数据中心，企业，和电信网络； 2018年OFC，发布BGA封装的400G相干光模块
美国	IBM	NA	光纤阵列，刻蚀V形槽 端面耦合 off-chip(光源) flip-chip(电芯片)	片上外置光源 DFB	NA	硅基异质InGaAs	MZI型 WDM	亚波长光栅型/聚合物波导 端面耦合	NA	2013推出90nm CMOS 工艺线的硅光子25Gb/sWDM系统； 2015宣布成功把硅光芯片集成到CPU相同的封装尺寸，同年展示了完全的波分复用 CMOS硅光芯片，可实现4不同波长通道25G速率的复用
美国	Intel	760 μm厚硅波导	wafer bonding晶圆键合 消逝波耦合；	InP异质混合制作DFB	硅基微环MRR 硅基Mach-Zehnder MZM	Ge/Si探测器 全Si探测器 APD雪崩二极管	EDG/AWG PEG	EDG + lens的空间光耦合/端面耦合	QSFP28 QSFP-DD	2019年4月，Intel在其Intel InterconnectDay 2019展示了基于QSFP封装的 PSM4和CWDM4 100G解决方案，并展示了其基于QSFP-DD封装的PSM4 400G光模块。 2020年3月，OFC展示了适用于数据中心的业界首款全硅集成4x100G PSM4 DR4发射器；同年，发布了基于双光子吸收的1310nm波长全硅探测器
英国	Rockley	3 μm厚硅波导	端面直接耦合(无SCC) flip chip	片上外置光源 DFB；集成EAM芯片制作外腔 DBR	III-V电吸收调制器 Ge/Si电吸收调制器	外延Ge/Si探测器	AWG	正向Taper的SSC Deep-etch湿法腐蚀V槽	QSFP28 QSFP-DD	2019年，Rockley宣布成功试制出基于自身研发的1310nm波长硅光芯片及电芯片的100G QSFP28 AOC硅光模块，产品为4个光通道每路25Gbps； 2020年3月，亨通洛克利发布面向下一代数据中心网络、基于硅基光子集成技术的400G QSFP-DD DR4光模块，采用了业界领先的7nm DSP芯片，并在2020 OFC展会上进行了现场演示。

海外重点厂商硅光技术方案

国家	公司	波导	光源集成与耦合	激光器	调制器	探测器	复用/ 解复用	光纤耦合	封装	产品
以色列	Mellanox	3 μm厚硅波导	flip-chip, wire bonding; 端面耦合	半导体锁模激光器 (MLL); FP	Ge/Si调制器 双环硅基MZI p-i-n脊形波导结构	Ge/Si探测器	AWG EDG PEG	光栅耦合	QSFP28 QSFP56QSFP-DD	2014年CLEO展示了4x25G收发器；同年OFC展出了4x25G WDM硅光集成电路； 2016年展示了100G QSFP28 PSM4 硅光收发模块； 2017年CLEO展示了垂直自动对准工艺的倒装焊100G硅光集成方案
德国	Sicoya	NA	光栅耦合器	片上外置光源 FP	基于FP微腔的 NMD硅调制器	Ge/Si探测器	\	光栅耦合	QSFP-DD	2016年展示了光电器件是完全集成在同一个芯片上的4x25G EPIC 芯片，基本实现了其宣称的“Fully Integrated Silicon Photonics Transceiver Chips”。 2019年，展示其EPIC光电集成的400G硅光子学技术，目标指向QSFP-DD，QSFP和COBO封装的400G数据中心市场。
爱尔兰	Tyndall	NA	micro optical bench; flip-chip; die bonding+wire bonding; 斜角光栅耦合	片上外置III-V 光源VCSEL	\	\	\	斜角光栅耦合	\	2013年，Tyndall的研究人员提出一种和Luxtera类似的硅基光源的解决方案。利用球透镜和三角棱镜将III-V激光器的光，通过光栅耦合器耦合到Si波导； 2016年提出通过倒装焊集成VCSEL到硅光芯片的方法； 2017年Tyndall的研究人员设计了集成有隔离器的硅基光源-micro optical bench。
加拿大	Ranovus	NA	刻蚀V形槽 端面耦合	量子点多波长 激光器（单光源）；DFB阵列	硅基微环MRR	Ge/Si探测器	\	端面耦合	QSFP-DD	2018年，推出基于QSFP-DD封装的8x100G PAM4以太网模块； 2020年3月份，Ranovus发布了硅光引擎Odin 8，每对光纤可支持800Gbps的速率，用于机器学习和人工智能。Odin平台，采用单波100G技术，单片可支持800G~3.2Tbps速率传输。

➤ 目前欧美硅光技术仍处于领先地位，供应商或在硅光领域扎根多年，如Intel、Mellanox、Luxtera，或具备深厚的研究背景，如Luxtera、Sicoya。

国内硅光（含封装）相关上市公司大都是光模块公司

证券简称	相关消息时间	硅光光模块性能	示意图
亨通光电	2020	3月10日，亨通洛克利发布400G QSFP-DD DR4模块。该模块基于硅基光子集成技术，采用了业界领先的7nm DSP芯片。模块的部分核心芯片来自于英国Rockley，该模所采用的硅基集成技术易与光纤进行耦合，从而降低了光组件及光模块的复杂性和工艺难度。同时亨通洛克利在光源、光纤阵列与硅光芯片的自动化无源耦合方案中具有自主知识产权，COB封装技术比较成熟。	
中际旭创	2021	公司一直在研发方面加大投入，加快新产品与新技术的开发和市场化进度，在硅光方面也取得新的进展。预计2022年公司将推出硅光产品。	
华工正源	2021	华工正源召开2021新产品发布会，400G 硅光产品方案亮点，采用QSFP-DD封装，自研硅光方案,采用7nm集成Driver PAM4 DSP芯片，光口侧单通道速率高达100Gbps，低功耗低、速率高等特点。	
光迅科技	2021	2021年推出 200G/400G 硅光模块，2021年销售收入千万级别。2022年规划 400G 硅光模块可以规模量产，包括数通和相干的。	
新易盛	2021	收购境外参股公司Alpine，公司拥有自主开发 nCP4硅光子技术平台，并于 2020 年底发布 400G PAM4 nCP4光引擎，可用于光模块制造商生产 400Gbps DR4 产品，以支持数 据中心应用中的高速连接。	
剑桥科技	2021	400G 硅光产品在多个客户包括数通（超算）客户做认证，进度符合预期。	
博创科技	2020	博创科技与Sicoya、源杰半导体合作，推出高性价比的400G数据通信硅光模块解决方案：400G QSFP-DD DR4 (500m)和400G QSFP-DD DR4+ (2km)。采用了业界领先的7nm DSP芯片。该硅光引擎采用2.5D封装，单片集成了MZM调制器、硅波导、探测器、Driver、TIA等多个有源和无源芯片。	
天孚通信	2021	公司完成“面向5G及数据中心的高速光引擎建设项目”的定增，项目完全达产后将新增激光芯片集成高速光引擎、硅光芯片集成高速光引擎和高速光引擎用零组件的规模量产产能。	

国内硅光相关非上市公司面向通信、激光雷达、光计算等方向，IDM模式较多

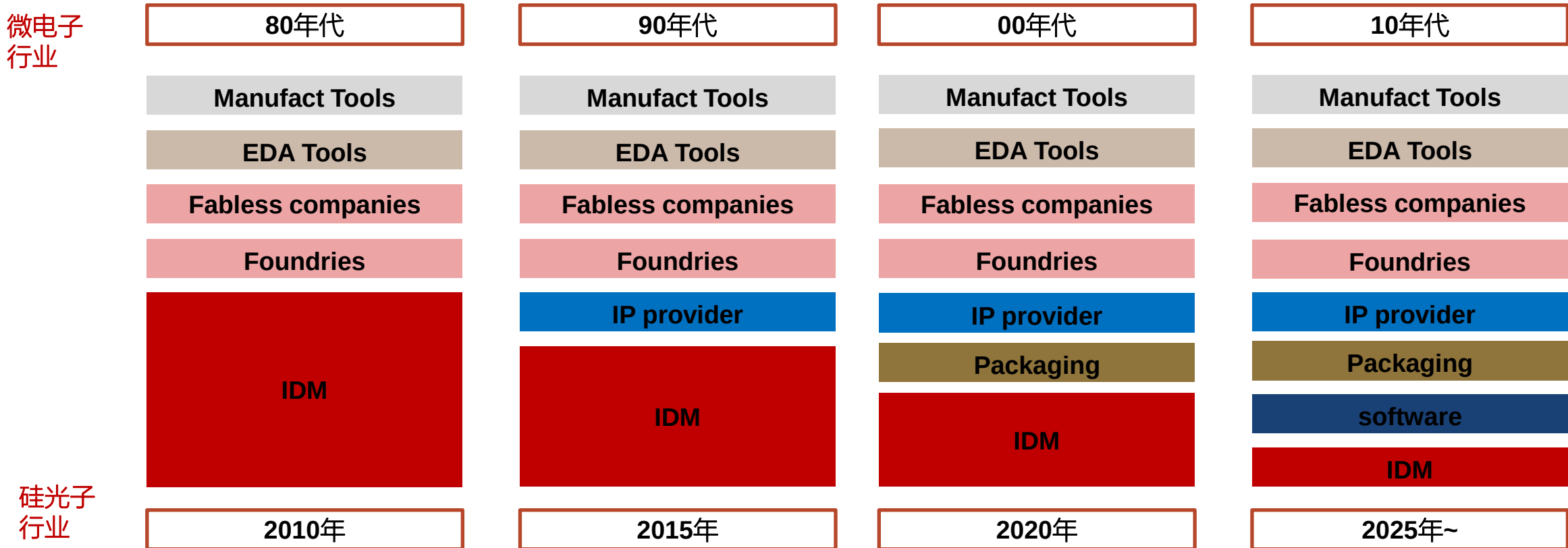
公司名称	相关消息时间	公司或硅光产品简介	估值情况
海信宽带	2021	800G QSFP-DD 光模块：基于海信宽带自主研发的硅光学封装平台，硅光MZ调制后实现单波106.25Gbps速率，采用3D封装提升产品的高频性能，具备高密度、低功耗和散热性能好等优势	
SiFotonics	2020	SiFotonics 独特的合作+自建“IDM-lite”模式将铸造公司的长期护城河	
	2020	SiFotonics正联合业内产业上下游在100G Lambda MSA 多元协议组织推动单波100G传输40公里的100G ER1 成为行业新标准，其最近开发出的100G锗硅APD结果为这项新标准提供了坚实技术可行性，这是因为在高速场景下，APD相较于原PIN方案具有更高的探测敏感性，以此可推动基于并行4通道单波PAM4的400G方案达到性能最优。	
奇芯光电	2021	海外顶尖光子集成领域产业专家团队落户中国科学院西安光学精密机械研究所，已量产的基于硅基改性材料的光子集成混合材料平台，新材料体系、芯片设计、制备工艺、芯片封测、器件开发及系统应用等全产业链垂直整合	投前估值30亿元人民币
国科光芯	2021	2021年2月，完成国际先进工艺转移协议签署，核心产品是基于硅光芯片技术激光雷达，最早实现OPA激光雷达量产，应用领域涵盖消费级、工业类、自动驾驶等多场景	
熹联光芯	2020年10月	控股Sicoya，公司PIC-BiCMOS工艺平台是全球领先的单片光电芯片集成平台，主要市场为电信与数据中心	团队+天使投资人投前估值5.4亿
微源光子	2021	公司核心学术团队多来自于北京大学，核心产业团队来自华为、IMEC、Neophotonics等，公司光子晶体激光器解决硅光芯片上无法集成激光器的核心问题，下游激光雷达、光通信、激光显示、原子钟等	
赛勒科技	2021	公司团队MIT、中国科学院、朗讯Lucent以及Finisar等，重点开发基于硅光子技术的高速率、小型化、低成本、低功耗的高速光通信芯片，下游客户主要是电信和数据中心	
曦智科技	2021	MIT科学家，行业资深工程师，掌握光子计算光子矩阵计算、片上光互联、片间光传输三大方向领先技术	



08 硅光非通信市场想象空间大

硅光子Fabless商业基础初步形成，将极大扩展硅光市场应用

- 目前由于硅光发展不成熟，硅光子产业链没有像微电子产业一样完全形成Foundry厂与硅光设计公司分开的产业格局，且硅光子集成度不高，硅光器件的IP没有完全形成与成熟，所以光器件也一般由Fabless自行设计。
- 未来随着硅光子集成度增加，硅光子Foundry服务提供商将完备提供包括先进光电器件（调制器和探测器等）的 PDK，用户可以利用这些元器件设计出更高性能的器件或者包含更多元器件的复杂硅基光子集成系统芯片。
- 硅光子产业将遵循着微电子产业链发展的轨迹，产业链逐渐分化，Fabless商业基础将会初步形成。届时硅光子电路设计公司仅需关注其应用需求进行线路设计仿真即可，将会促进硅光在包括除了在光通信以外的片上光互连，光传感，激光雷达，消费光电子等众多领域的发展，极大拓展硅光子市场空间。



硅光子最主要的三大应用领域：连接、传感和计算



连接

用于数据中心&电信领域的
光通信连接

- ①数据中心高性能光模块
- ②5G基础设施
- ③CPO及芯片到芯片的数字互联



传感

用于环境测量或识别

- ①机器人和汽车激光雷达
- ②化学分析
- ③气体探测&血液分析
- ④可穿戴生物传感



计算

用于新一代计算的量子光学

- ①光量子计算
- ②量子通信
- ③量子密钥分发

硅光子连接、传感和计算依次爆发

- 硅光子当前发展最成熟的是包含数据中心互连(DCI)收发器在内的连接领域，涉及数据中心、高性能数据交换、长距离互联、5G基础设施等。
- 随着产业链分工逐渐垂直，后续基于硅光的激光雷达、可穿戴设备、AI光子计算等领域会相继爆发。



硅光技术是后摩尔时代核心技术

- 市场规模：全球硅光市场规模为4.8亿美元（2019）→39亿美元（2025E | 预计光通信市场占1/3），复合增长40%。
- 重点关注：硅光技术是后摩尔时代核心技术之一，硅光芯片设计工具；国内产线升级和国际间产能转移；国内起量较快的细分市场。

图60 硅光技术已进入大规模集成阶段

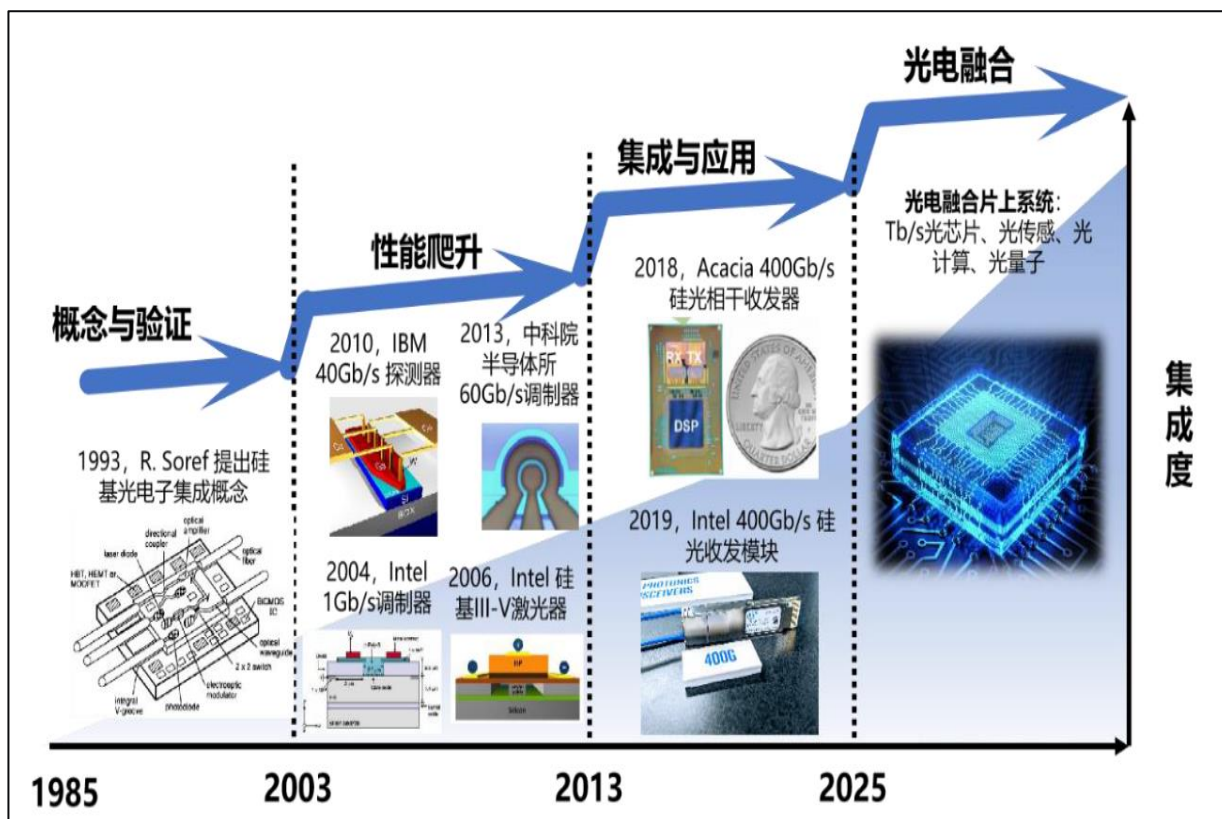
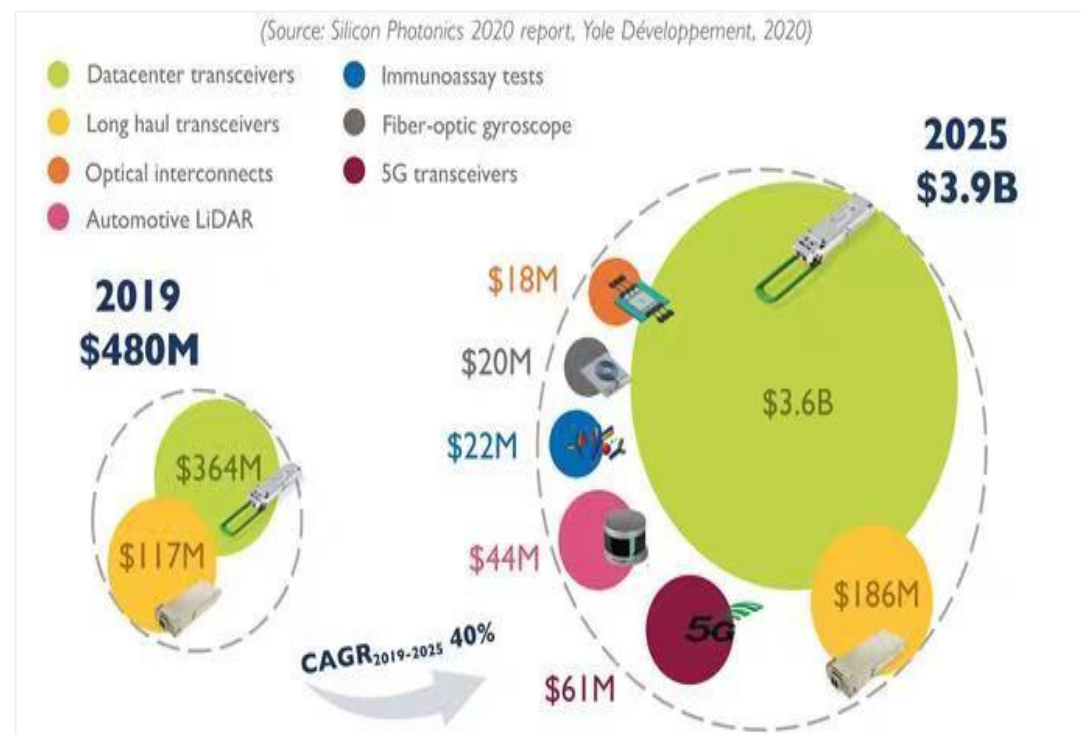


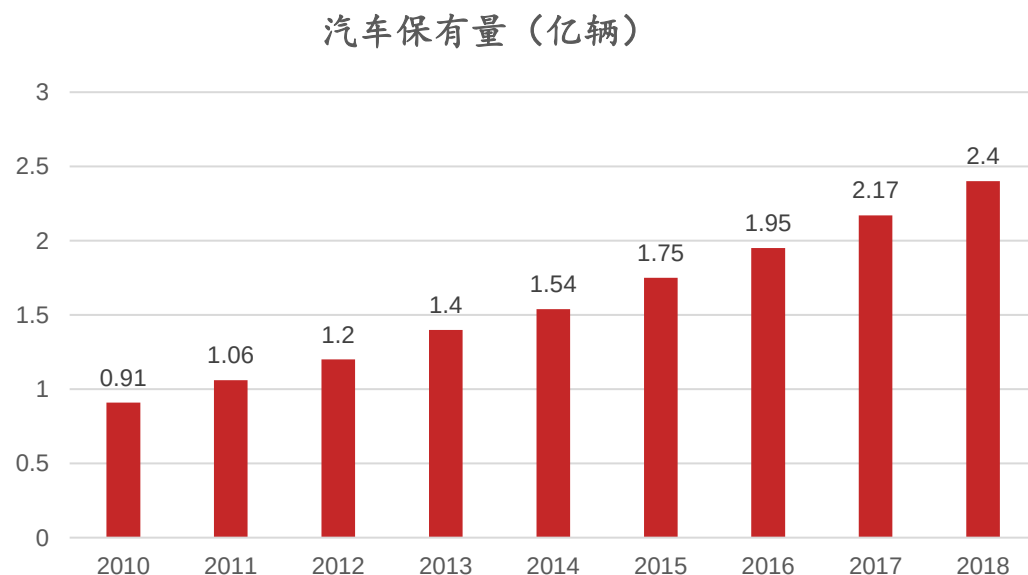
图61 全球硅光市场规模



硅光Lidar：潜在应用场景市场价值高

- 自动驾驶目前是各大公司和投资者重点关注领域。自动驾驶汽车至少需要5类感应器，其中Lidar作为感知的关键环节不可或缺。它主要负责路上状况感知，如感知行人、路面等，为智能决策提供数据来源。
- 从汽车保有量来看，2018年我国汽车保有量达到2.4亿辆，则意味着随着自动驾驶技术的推广后，Lidar有着明确且广阔的市场空间。
- Lidar（车载激光扫描仪）为硅光技术的潜在机遇。目前Lidar面临的一大困境就是，Lidar的成本居高不下，尚不能够满足商用生产的需要。硅光方案本身契合Lidar制造需求，硅材料价格和集成工艺有助于Lidar降费生产，压缩器件尺寸，缩短追踪过程提高运行效率。
- 我们认为若是硅光技术能够成功实现在Lidar领域的突破，则将大幅扩大硅光行业的应用范围与市场价值。

图62 中国历年汽车保有量



资料来源：工信部，麦姆斯咨询，华西证券研究所整理

图63 汽车激光雷达发展线路图：“模拟、机械式”到“数字、固态化”



光子计算：光子矩阵、片上互联和片间传输取得突破性进展，硅光子赋能计算

- 据OpenAI统计，自2012年，每3.4个月人工智能的算力需求就翻倍，摩尔定律带来的算力增长已无法完全满足需求，硅光芯片更高计算密度与更低能耗的特性是极致算力的场景下的解决方案。未来5-10年，以硅光芯片为基础的光计算将逐步取代电子芯片的部分计算场景。
- 高性能计算领域，受限于“I/O功耗墙”，计算资源正在快速接近电气性能的物理极限，使得“从电气I/O迁移到光互连I/O”的呼声日益高涨，因为只有硅光技术能够在片上互连、片间互连应用中实现Pb/s量级的传输速率。
- 硅光与采用 TSV 接口的 CMOS 芯片共同集成将成为必然，多家公司（如Ayar Labs公司和Lightmatter公司）正在为高光子集成做铺垫，旨在提供颠覆性的解决方案。
- 硅光互连可以赋能高要求的数字芯片阵列（如 GPU、CPU 和 ASIC 存储芯片等），改变高性能计算系统的整体架构，以实现高带宽和高能效的通信。

图64 世界第一款光子计算芯片原型板卡Prototype

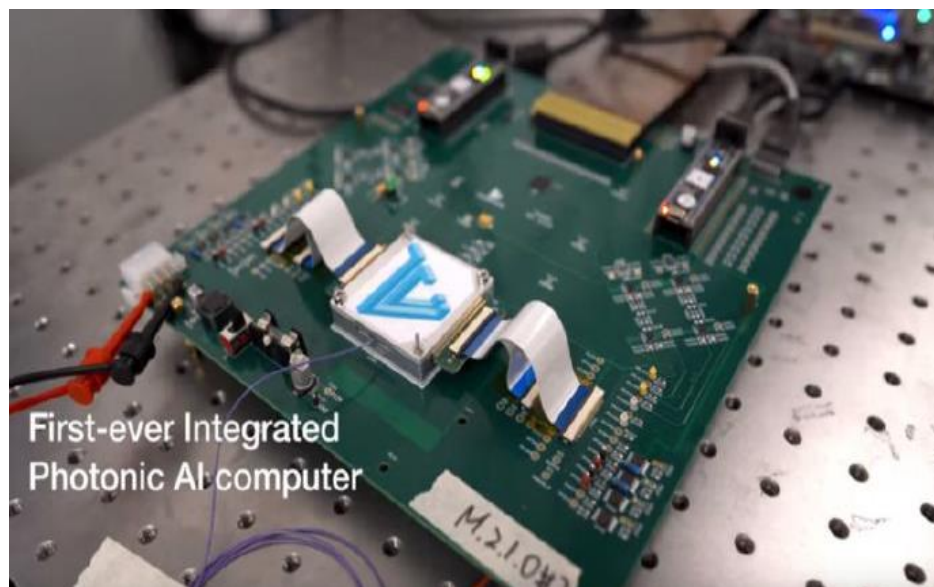
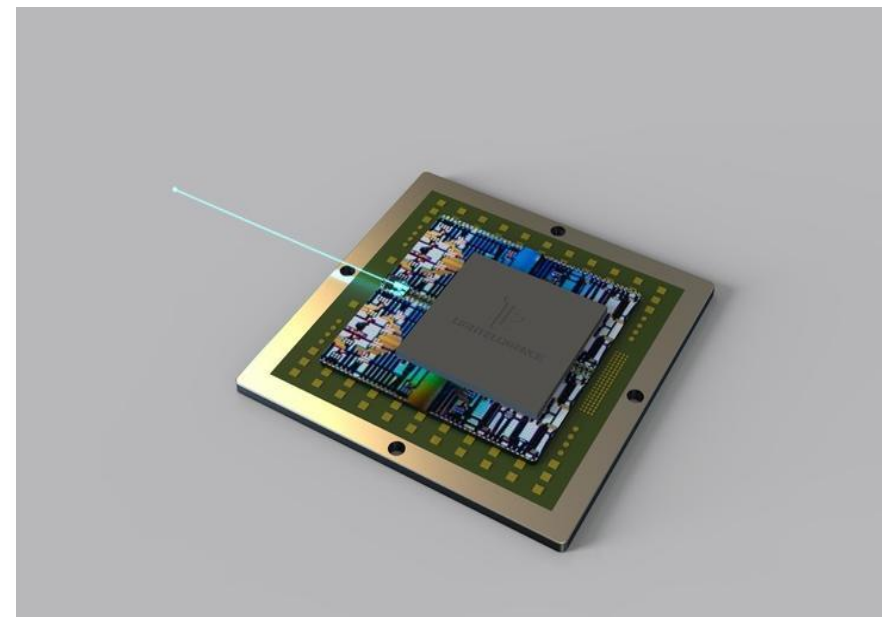


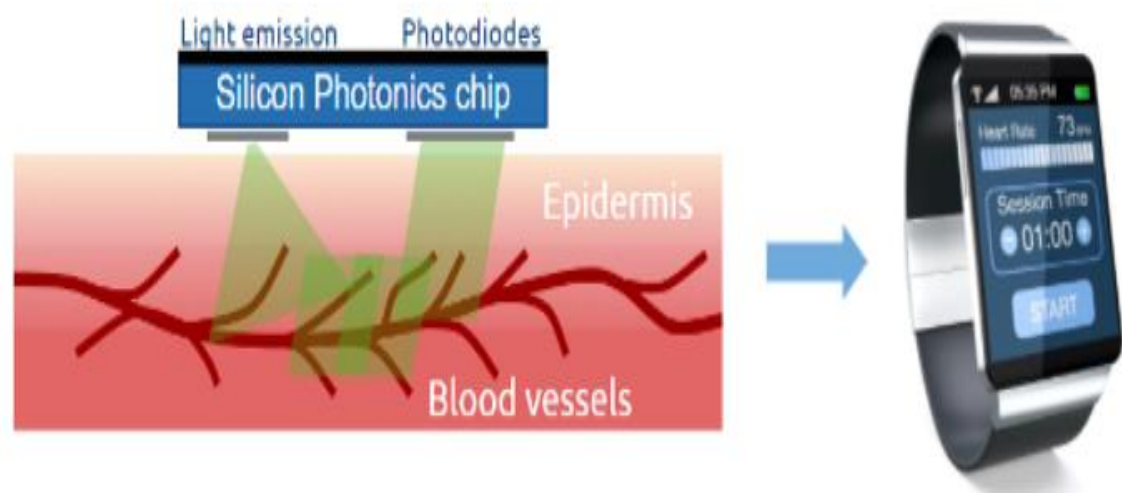
图65 曦智科技产品模型图



硅光子蓄势待发消费者医疗可穿戴市场

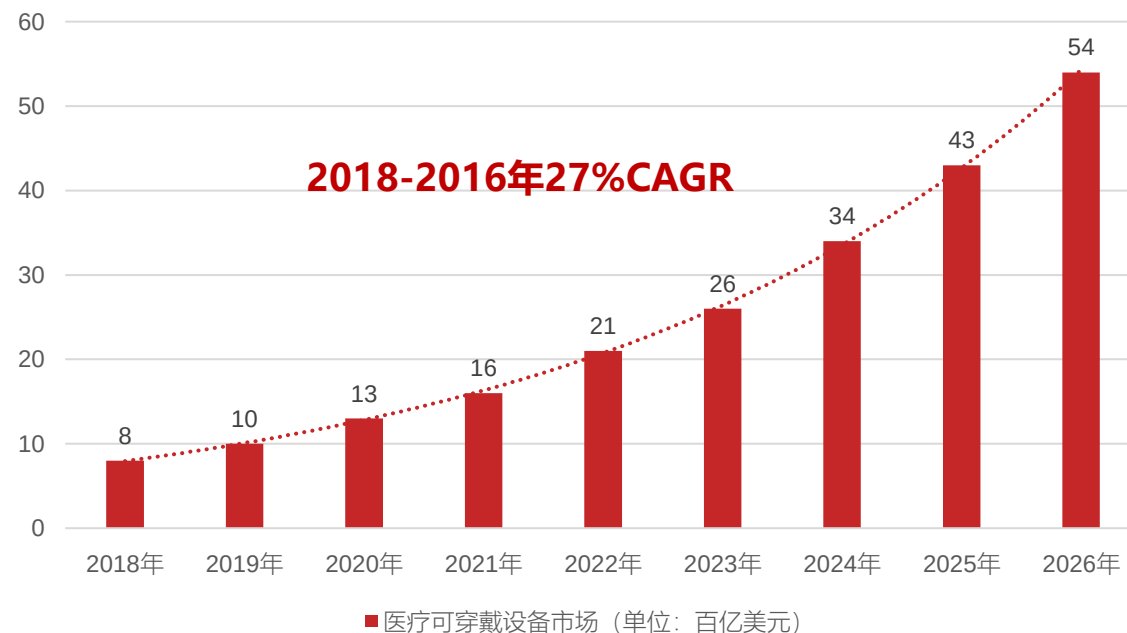
- 光可以照射到组织和血管上以监测、检测和量化生物标记，因此光子学可以赋能无创医疗监测解决方案，用于低成本、小尺寸的医疗设备和面向消费电子市场的可穿戴设备。
- 芯片级光学传感优势极为显著。而且，先进的半导体微加工技术可以实现芯片实验室组件的最小化。这些进步使硅光生物传感器在医疗诊断方面取得了重大进展。

图66 硅光子应用于无创光谱生物传感领域



Biomarkers real-time monitoring by active illumination and non-invasive spectroscopy

图67 消费级医疗可穿戴设备市场规模
医疗可穿戴设备市场（单位：百亿美元）





09 风险提示

- 数据流量增长不及预期，光模块升级需求缓慢；
- 薄膜铌酸锂等工艺成本大幅下滑，挑战硅光技术路径；
- 产业链IDM模式持续过重，硅光子设计渗透率缓慢；
- 技术标准收敛不及预期，硅光规模化市场空间小。

分析师与研究助理简介

宋 辉 3年电信运营商及互联网工作经验，5年证券研究经验，主要研究方向电信运营商、电信设备商、5G产业、光通信等领域；

柳珏廷 理学硕士，3年券商研究经验，主要关注5G相关产业链研究。

分析师承诺

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，保证报告所采用的数据均来自合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，通过合理判断并得出结论，力求客观、公正，结论不受任何第三方的授意、影响，特此声明。

公司评级标准	投资评级	说明
评级说明 以报告发布日后的6个月内公司股价相对上证指数的涨跌幅为基准。	买入	分析师预测在此期间股价相对强于上证指数达到或超过15%
	增持	分析师预测在此期间股价相对强于上证指数在5%—15%之间
	中性	分析师预测在此期间股价相对上证指数在-5%—5%之间
	减持	分析师预测在此期间股价相对弱于上证指数5%—15%之间
	卖出	分析师预测在此期间股价相对弱于上证指数达到或超过15%
行业评级标准		
以报告发布日后的6个月内行业指数的涨跌幅为基准。	推荐	分析师预测在此期间行业指数相对强于上证指数达到或超过10%
	中性	分析师预测在此期间行业指数相对上证指数在-10%—10%之间
	回避	分析师预测在此期间行业指数相对弱于上证指数达到或超过10%

华西证券研究所：

地址：北京市西城区阜成门外大街22号外经贸大厦9层

网址：<http://www.hx168.com.cn/hxzq/hxindex.html>

华西证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具备证券投资咨询业务资格。本报告仅供本公司签约客户使用。本公司不会因接收人收到或者经由其他渠道转发收到本报告而直接视其为本公司客户。

本报告基于本公司研究所及其研究人员认为的已经公开的资料或者研究人员的实地调研资料，但本公司对该等信息的准确性、完整性或可靠性不作任何保证。本报告所载资料、意见以及推测仅于本报告发布当日的判断，且这种判断受到研究方法、研究依据等多方面的制约。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及预测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息始终保持在最新状态。同时，本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者需自行关注相应更新或修改。

在任何情况下，本报告仅提供给签约客户参考使用，任何信息或所表述的意见绝不构成对任何人的投资建议。市场有风险，投资需谨慎。投资者不应将本报告视为做出投资决策的惟一参考因素，亦不应认为本报告可以取代自己的判断。在任何情况下，本报告均未考虑到个别客户的特殊投资目标、财务状况或需求，不能作为客户进行客户买卖、认购证券或者其他金融工具的保证或邀请。在任何情况下，本公司、本公司员工或者其他关联方均不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告而导致的任何可能损失负有任何责任。投资者因使用本公司研究报告做出的任何投资决策均是独立行为，与本公司、本公司员工及其他关联方无关。

本公司建立起信息隔离墙制度、跨墙制度来规范管理跨部门、跨关联机构之间的信息流动。务请投资者注意，在法律许可的前提下，本公司及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务。在法律许可的前提下，本公司的董事、高级职员或员工可能担任本报告所提到的公司的董事。

所有报告版权均归本公司所有。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处为华西证券研究所，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

THANKS