

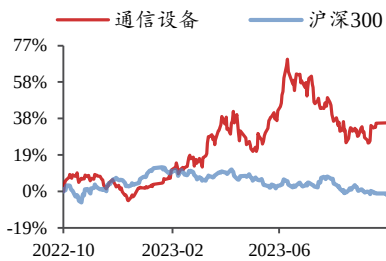
通信设备

2023 年 10 月 11 日

投资评级：看好（维持）

——行业深度报告

行业走势图



数据来源：聚源

相关研究报告

《光模块系列深度（一）：光电之门，踏浪前行——行业深度报告》-2023.9.20

光模块系列深度（二）：降本降耗趋势显著，聚焦技术创新

任浪（分析师）

renlang@kysec.cn

证书编号：S0790519100001

张越（联系人）

zhangyuel@kysec.cn

证书编号：S0790123090001

● 算力时代下光模块降本降耗趋势愈发凸显

算力需求提升带动网络带宽成倍提速，数据中心能耗呈指数型增长。据咨询机构 Tirias Research 建模预测，到 2028 年数据中心功耗将接近 4250MW，比 2023 年增加 212 倍，数据中心基础设施加上运营成本总额或超 760 亿美元。

数据中心的能耗主要体现在 IT 设备。IT 设备占数据中心整体的能耗达 45%，其中服务器类约占 50%，存储系统约占 35%，网络通信设备约占 15%。

高性能交换芯片和光模块的使用导致网络设备功耗大幅增加。根据 Cisco 的数据显示，2010-2022 年全球数据中心的网络交换带宽提升了 80 倍，相对应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。

● LPO 线性直驱成为短距离场景下针对 DSP 功耗问题的重要解决方案

LPO 是对含有 DSP 设计的高速热插拔以太网模块的改进。LPO 通过使用性能提升的 TIA、Driver 芯片，剔除高速率可插拔模块携带的 DSP，带来模块功耗下降。LPO 的主要壁垒在于电芯片，应用场景局限于短距离连接场景。目前全球主要的电芯片供应商为 Macom、Semtech 以及美信，应用场景主要限于短距离（50m 内）的连接场景。

目前国内的布局 LPO 的厂商主要为剑桥科技和新易盛。剑桥科技与电芯片龙头 Macom 建立了供应链合作关系，预计 2023 年下半年首批基于硅光的 LPO 400G/800G 产品实现小批量出货。

● CPO 是超高速场景下的颠覆性降耗技术，海外龙头布局领先

数据中心带宽的增长导致高频电链接距离问题愈发突出。为了保障信号的高质量传输、优化 SerDes 功耗，交换芯片和光模块之间的封装距离需要进一步缩短。

3D 封装是目前 CPO 技术研究的热点和趋势。3D 封装可以实现更短的互连距离、更高的互连密度、更好的高频性能、更低的功耗以及更高的集成度。博通称采用 CPO 的结构可以节约 40% 的功耗和 40% 的每比特成本。

国内企业进入 CPO 领域较晚，在产品开发进度及技术研究方面相对海外存在明显的差距。目前还没有 CPO 相关的产品推向市场，高端产品主要产品集中于 400G/800G 的硅光模块。

● 薄膜铌酸锂有望成为高速率场景下高效调制器的重要选择

薄膜铌酸锂目前国内还处于研发阶段，离产业化还有距离。基于混合集成思路，在硅片上局部键合薄膜铌酸锂制作调制器，有望充分利用铌酸锂材料高电光系数的特性，实现成本与性能的兼顾，成为未来高速率场景下的重要方案。

● **受益标的：**剑桥科技、新易盛、中际旭创、光迅科技、锐捷网络以及光库科技等。

● **风险提示：**电芯片及光芯片的供应链风险；云厂商资本开支不及预期的风险等。

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

目 录

1、 倚靠半导体工业而生，算力时代下降本降耗趋势愈发凸显.....	4
1.1、 内部结构解析：基于 IC 工艺，围绕 TOSA/ROSA 构建的光电转化体系.....	4
1.2、 算力时代下光模块降本降耗趋势凸显.....	13
2、 LPO 线性直驱：有望在短距离场景下发挥潜力.....	16
3、 CPO：超高速场景下的颠覆性技术，海外龙头布局领先.....	17
4、 薄膜 LiNbO3 调制器：高速率场景下结合硅光或大有可为.....	25
5、 受益标的.....	27
6、 风险提示.....	27

图表目录

图 1： 信息流包括光信号的产生/调制/处理/探测等.....	4
图 2： 光模块可按照速率、距离等进行分类.....	5
图 3： 光模块主要由 TOSA、ROSA、功能电路等组成.....	5
图 4： Finisar 设计的光模块内部解剖图.....	5
图 5： 4x25Gps QSFP28 光模块基本原理框图.....	6
图 6： Maxim 为光模块设计的 MCU 内部架构包括内核、时钟、存储等.....	6
图 7： DSP 除了能提供 CDR 的数字时钟恢复功能外，还可去除噪声、非线性干扰等.....	7
图 8： DSP 在发射端和接收端进行各种信号的补偿.....	7
图 9： 非相干光通信（上）和相干光通信（下）的区别主要在调制和检测方式.....	8
图 10： CDR 从信号中提取数据序列，恢复出相应的时钟时序信号.....	9
图 11： 直接调制下直接控制电流的开通和关断.....	9
图 12： 外调制将开关移至激光器外面，可用于长距离传输.....	9
图 13： TOSA 的基本结构主要包括激光器、隔离器等（To-Can 封装形式）.....	10
图 14： LD 工作原理基于半导体的 PN 结.....	10
图 15： EEL 和 VCSEL 在腔体结构上存在差异.....	11
图 16： 激光器芯片按照出光结构可分为面发射和边发射.....	11
图 17： ROSA 的基本结构包括 PD、TIA、LA 等.....	12
图 18： PD 二极管的基本结构与类型.....	12
图 19： 光器件元件和光/电芯片占光模块成本主要部分.....	12
图 20： DFB、APD、TIA 占光器件成本的主要部分.....	12
图 21： 算力和带宽高速发展带动数据中心功耗大幅提升.....	13
图 22： 典型数据中心的能耗主要分布于 IT 和制冷设备.....	13
图 23： IT 设备分为服务器、存储器、网络设备以及其他.....	13
图 24： 商用交换芯片容量处于每两年翻一番的快速增长.....	14
图 25： 交换机密度每两年翻一番.....	14
图 26： 光模块功耗随着速率的提升大幅增长.....	14
图 27： 热插拔模块速率越高对应的单位 bit 功耗越低.....	14
图 28： 交换芯片容量提升导致 SerDes/光模块的功耗也大幅提升.....	15
图 29： 降低光模块功耗的方式主要从四个方面改进.....	15
图 30： 800G 热插拔光模块的功耗主要分布于激光器和 DSP.....	16
图 31： 含 DSP 的高速率光模块功能图.....	16
图 32： 取消 DSP 的 LPO 光模块功能图.....	16

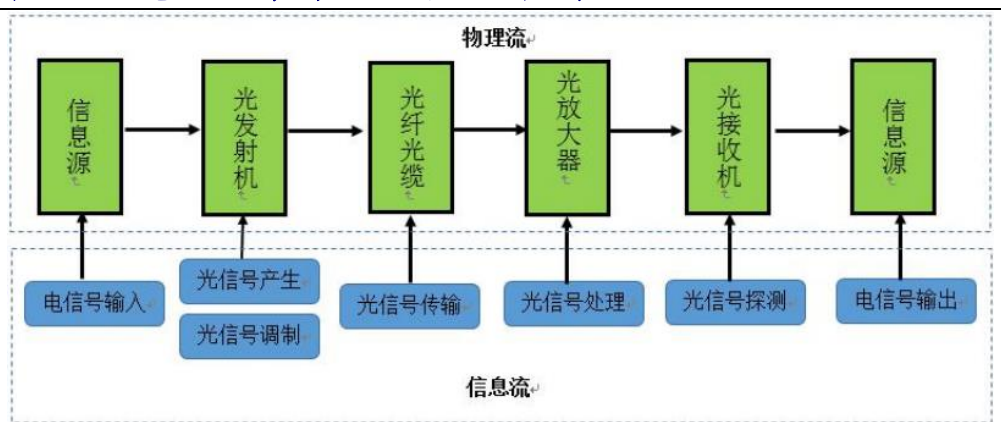
图 33: 英思嘉与剑桥科技发布的基于硅光的 LPO 400G 光模块方案将于 2023 年 Q3 开始小批量供货	17
图 34: 不同光芯片衬底材料的特性	17
图 35: 光放大器和探测器的区别主要在于波导刻蚀的深度和 PN 结施加压力的方向	18
图 36: InP 芯片的加工流程主要分为四步	18
图 37: 根据波导刻蚀的深浅可分为深刻蚀、浅刻蚀等	18
图 38: 全球 InP 芯片产业链主要包括 PDK、设计&检测、晶圆代工、封装以及模组制造几个环节	19
图 39: 光引擎离 switch 越近, 光信号距离越短, SerDes 的功耗越小	20
图 40: CPO 的优势体现为低功耗、低延时、低成本, 但在热管理以及良率等方面还存在问题	20
图 41: 可插拔、嵌入式、共封装光模块结构对比	21
图 42: 光电互连封装技术的发展过程, 未来或通往 3D CPO	21
图 43: 台积电 COUPE 技术封装结构	22
图 44: Acacia 基于陶瓷基板的 CPO 技术图	22
图 45: 2.5D 封装方案示意图	22
图 46: Acacia 基于陶瓷基板的 CPO 技术图	22
图 47: 基于带 TSV 的 PIC 转接板的 CPO	23
图 48: Acacia 基于陶瓷基板的 CPO 技术图	23
图 49: 基于硅中介层的 TSV 主要制备工艺包括 7 个步骤	23
图 50: 传统铌酸锂调制器体积大, 基于硅基底的薄膜铌酸锂可解决体积难题	25
图 51: 根据不同材料体系光模块的市场份额变化, 传统铌酸锂材料占比逐步下滑	26
图 52: 铌酸锂调制器按照驱动类型可分为单臂单驱和单臂双驱等	26
图 53: 薄膜铌酸锂晶圆制备工艺包括离子注入、薄膜键合、退火剥离和平坦化	26
表 1: 光通信器件按照物理形态可分为芯片、有源/无源器件与光模块子系统	4
表 2: VCSEL 激光器适合于短距离传输, EML 适合长距离传输	11
表 3: APD 更适用于长距离传输	12
表 4: 全球主要代工厂加工的光芯片性能对比	19
表 5: 硅光 MPW 流片成本与 InP 对比	20
表 6: CPO 海外龙头具有先发优势, 布局进展相对国内较快	24
表 7: CPO 国内尚处于开发阶段	25
表 8: 重点公司盈利预测与估值	27

1、倚靠半导体工业而生，算力时代降本降耗趋势愈发凸显

1.1、内部结构解析：基于 IC 工艺，围绕 TOSA/ROSA 构建的光电转化体系

光通信器件指应用于光通信领域的光电子器件以及配套集成电路。光通信器件按照在信息流中的不同作用可以分为五大类，包括光信号的产生、调制、传输、处理以及探测。光收发模块在信息流中对应着光信号的产生、调制和探测；光分路器和光放大器对应着信号处理。光通信器件按照物理形态的不同分为芯片、光有源器件、光无源器件、光模块与子系统四类。其中有源光收发模块的产值在光通信器件中占比最高，其性能主导着光通信网络的升级换代。

图1：信息流包括光信号的产生/调制/处理/探测等



资料来源：中国光电子器件产业技术发展路线图（2018-2022 年）

表1：光通信器件按照物理形态可分为芯片、有源/无源器件与光模块子系统

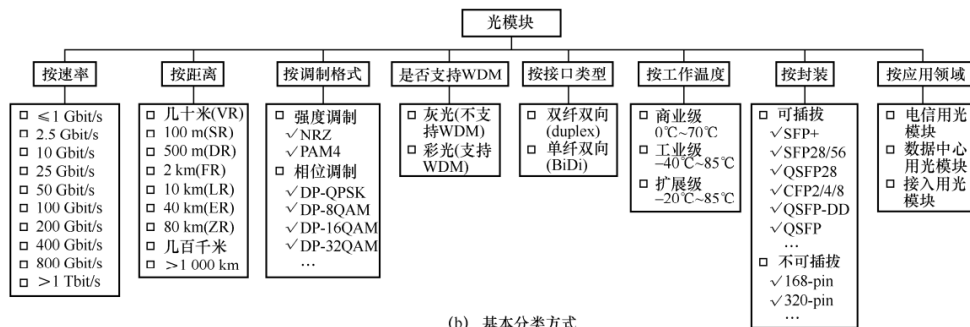
产品分类	典型产品
芯片	InP 系列（高速直接调制 DFB 和 EML 芯片、PIN 和 APD 芯片、高速调制器芯片、多通道可调激光器芯片）
	GaAs 系列（VCSEL 芯片、泵浦激光器芯片）
	Si/SiO ₂ 系列（PLC、AWG、MEMS 芯片）
	SiP 系列（相干光收发芯片、高速调制器芯片、光开关芯片；TIA、LD driver、CDR 芯片）
	LiNbO ₃ 系列等
光有源器件	激光器（VCSEL、DFB 直调激光器、EML 外调激光器）
	光调制器（相位调制器、强度调制器、PMQ 调制器）
	光探测器（PIN、APD）
光无源器件	集成器件（相干光收发器件、阵列调制器）等
	光隔离器、光分路器、光开关、光连接器（MPO）、光背板、光滤波器等
光模块与子系统	光收发模块（10G/25G/100G/400G/800G）
	光放大器模块（EDFA、Raman）
	动态可调模块（WSS、MCS、OXC）
	性能监控模块（OPM、OTDR）

资料来源：中国光电子器件产业技术发展路线图（2018-2022 年）、开源证券研究所

光模块是实现光信号输入过程中光电转换和电光转换功能的光电子器件。所有

信息通信信号初始状态都是电信号（模拟/数字），否则 IC 芯片无法处理。要实现光纤通信，信号发射端需要将电信号转换为光信号，通过光纤传输到远端。信号接收端，光探测器接收到光信号，并转化成可处理的电信号。**光模块可按照速率、距离、封装方式等多种类型进行分类。**从封装来看，光模块有多种封装形式，适配不同尺寸、功耗和速率需求。目前光模块的封装以可插拔形式为主，具备小尺寸、低功耗的优势，部分长距高速相干领域追求高性能，仍采用不可插拔形式。**随着交换容量增大、端口密度变大、功耗增加等挑战日益严峻，LPO/CPO 成为行业重要的技术创新。**

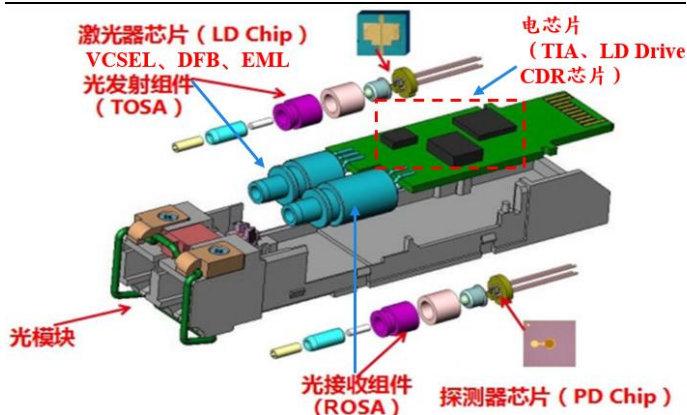
图2：光模块可按照速率、距离等进行分类



资料来源：《高速光模块关键技术方案及标准化进展》，吴冰冰，2022

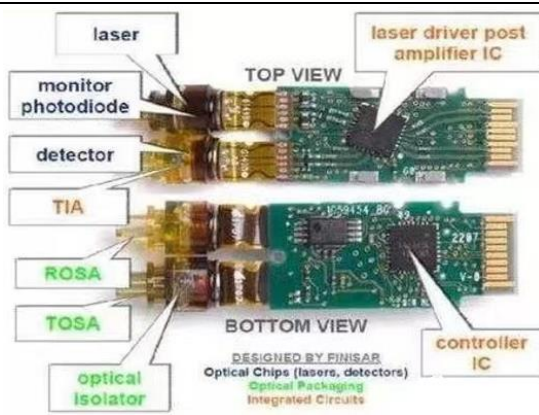
光模块的结构使得其具备光电转换的功能。光模块通常由光发射器件（TOSA，含激光器）、光接受器件（ROSA，含光探测器）、功能电路、光（电）接口、导热架、金属外壳等部分组成。从发射端来看，驱动芯片对原始电信号进行处理，然后驱动半导体激光器（LD）发射出调制光信号；从接受端来看，光信号进入接收端端后，由光探测二极管（PD）转变为电信号，经前置放大器后输出。功能电路集成了时钟、数据恢复芯片以及激光器驱动芯片等。

图3：光模块主要由 TOSA、ROSA、功能电路等组成



资料来源：5G 承载光模块白皮书、开源证券研究所

图4：Finisar 设计的光模块内部解剖图

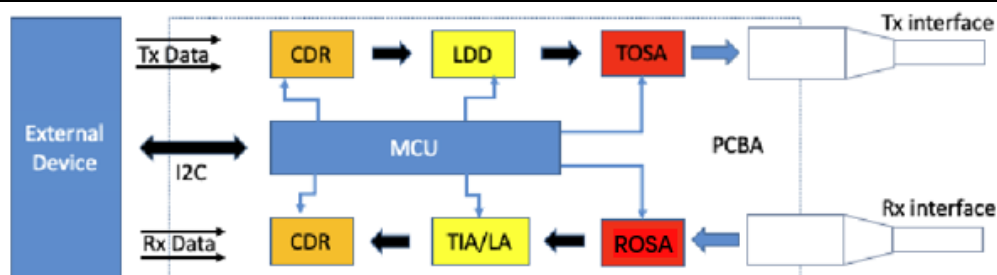


资料来源：ittbank 公众号

电芯片、主控芯片、TOSA、ROSA 在光/电转换过程中起着重要的作用。以 4x25Gbps 光模块通信方案为例，通过 MCU 控制芯片与电接口利用 I2C 引脚进行数据交互，将 4 路速率高达 25Gbps 的电信号发送给时钟和数据恢复芯片 CDR；然后 MCU 控制芯片将经过 CDR 处理后的 4 路电信号发送给驱动激光器，使得 4 通道的驱动激光器能够驱动 TOSA 组件，从而让 TOSA 组件发出一路速率为 100Gbps 的光信号；通过光纤传输达到光接口的 100Gbps 光信号进入到 ROSA 组件中；MCU 控制芯片与电接口进行数据交换，让 ROSA 组件将这一路 100Gbps 光信号转换成 4 路 25Gbps

的电信号发送给 TIA; TIA 将这 4 路电流信号处理成一定幅度的电压信号, 经过 CDR 处理后通过电接口输出。

图5: 4x25Gps QSFP28 光模块基本原理框图

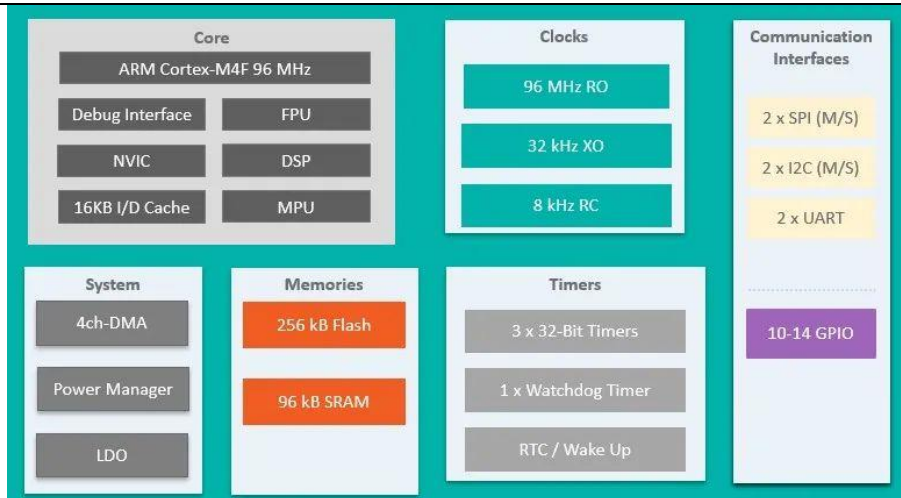


资料来源:《100G 超高速光收发模块关键技术》, 熊光浩, 2022

(1) 微控制单元 MCU

MCU 是主打控制功能的单片机, 负责对光模块的芯片进行调控。MCU 把 CPU 的频率与规格做适当缩减, 并将内存、计数器 (Timer)、USB、A/D 转换、UART、PLC、DMA 等周边接口, 甚至 LCD 驱动电路都整合在单一芯片上, 形成芯片级的计算机。CPU 内核通过存储器的程序控制外设, 外设通过中断系统联系 CPU 内核, 二者通过总线传输信号、数据以及地址等信息。存储器通常包括 ROM 和 RAM, 外设部分包括串口控制模块、SPI 模块、I2C 模块、A/D 模块等。

图6: Maxim 为光模块设计的 MCU 内部架构包括内核、时钟、存储等



资料来源: 美信半导体官网

MCU 的工作原理是逐条执行预存指令的过程, 不同类型的单片机有不同的指令系统。为了让一个单片功能自动完成某项具体任务, 需要将所要解决的问题编成一系列的指令, 并且这些指令必须是由一个单独的函数来识别和执行的。一系列指令的集合就变成了程序, 这些程序需要预先储存在内存中。MCU 在执行程序时要将这些指令逐个提取并执行, 必须拥有能够跟踪指令所在存储单元的功能, 这个部分就是程序计数器 PC。当程序开始运行时, PC 将会被分配到程序中每一条指令的存储单元, 并一一执行该项指令。PC 中的内容自动增加, 增加量由这个指令长度决定, 每一条都指向下一条指令的起始地址, 保证指令顺序执行。

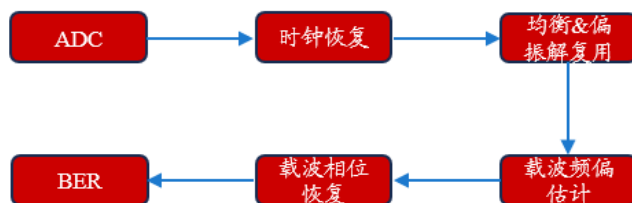
(2) 通用数字信号处理器 DSP

DSP 相对 MCU 更侧重于运算和数字信号处理, 而 MCU 侧重于多种数据的处

理控制。DSP 的实时运行速度可达每秒数千万条复杂程序指令，比 16 位 MCU 单指令执行时间快 8-10 倍。DSP 为了提高信号处理算法的效率，加入了很多指令，在设计结构上将数据总线和地址总线分开，使程序和数据分别存储在两个空间。

DSP 在光模块中的作用是对模拟信号进行采样、量化，把模拟信号转换成数字信号，去除光纤链路中的色度色散、偏振模色散，完成载波频偏估计、载波相位恢复等功能，具有强大的信号恢复能力，但是成本较高、延迟大、功耗高、发热明显。随着工艺节点逐步变薄，DSP 芯片的设计成本愈发高昂。2020 年 7nm 产品推出时，DSP 芯片设计成本已达 2.5 亿美元左右；预计 5nm 节点时，芯片设计成本将达到 4.5 亿美元。在高资本投入的背景下，市场竞争格局向寡头垄断演化，目前全球份额主要集中于 Inphi、Broadcom 以及华为海思三家。功耗方面，由于 DSP 引入了 ADC 与算法，功耗远高于传统的 CDR 芯片。以 400G 光模块为例，其所用 7nm DSP 功耗约为 4W，占模块整体功耗的 50%。而 DSP 降低功耗的方法有限，主要依赖于流片工艺的提升。

图7：DSP 除了能提供 CDR 的数字时钟恢复功能外，还可去除噪声、非线性干扰等

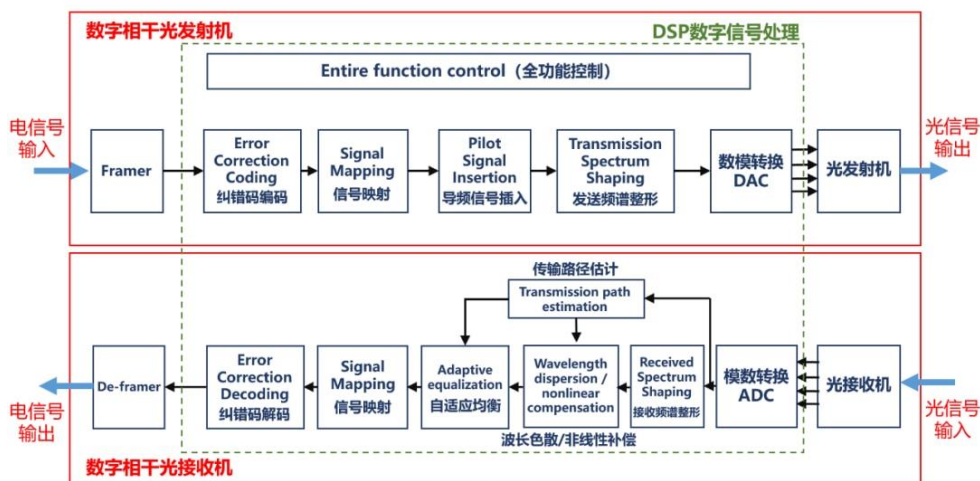


- **时钟同步**：使用插值滤波器来恢复数字时钟
- **偏振解复用**：抵消偏振信号之间的干扰，使用滤波器实现
- **自适应均衡**：处理在光纤链路传输过程中由一阶偏振模色散和光纤造成的线性损伤

资料来源：易飞扬通信官网、开源证券研究所

DSP 技术是相干通信的重要支撑，是其产业化应用的基础。当光传输速率达到 50G 以上，光纤偏振模色散影响加剧，严重影响链路有效传播距离与信号质量，此时 DSP 对抗和补偿作用就愈发凸显。而传统的非相干通信通过光路补偿器件进行色散补偿，其效果远差于 DSP。DSP 技术的成熟导入，省去了系统中原有的色散补偿模块，使得长距离传输的链路设计更加简单，降低传输成本。

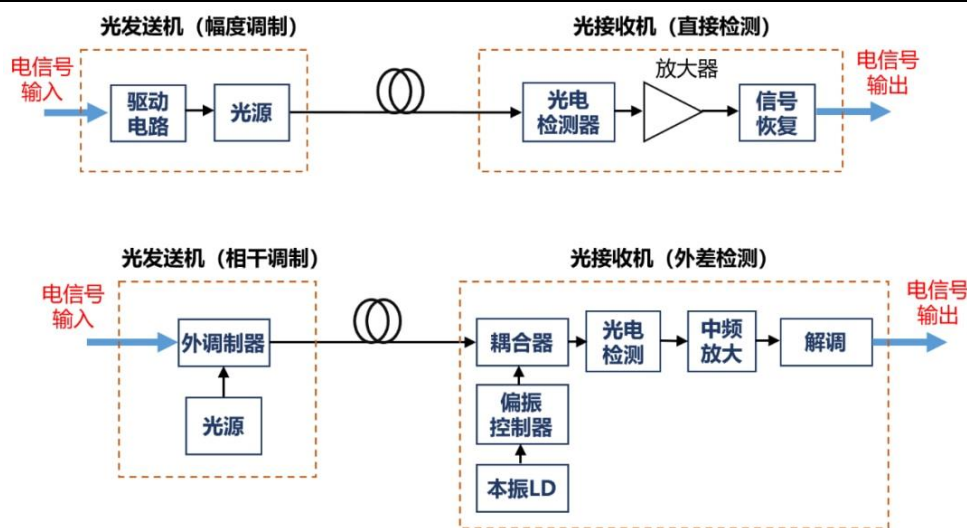
图8：DSP 在发射端和接收端进行各种信号的补偿



资料来源：电子工程世界

相干和非相干光通信的核心区别在于发送端使用的调制方式以及接收端使用的检测方式。调制方式方面，相干通信更加多元化，增强了信息的承载能力。非相干采取简单的强度调制方式，通过电流大小改变激光强度产生 0-1。而相干系统借助外调制的方式，可以进行频率调制或相位调制，如 PSK、QPSK 等，拓展了信息传输的容量。检测端，相干通信直接在接收端对微弱的信号进行混频放大，而非相干则依赖于在传输过程中使用大量的放大器。相干通信利用一束本振光与输入信号光在混频器中混频，得到与信号光频率、相位和振幅按相同规律变化的中频信号，实现信号的放大。由于本振光的功率远大于信号光功率，因此经过相干混合后的输出光电流大幅增加，提升了检测的灵敏度。凭借更加多元的调制方式以及 DSP 技术的应用等，相干光通信具有传输距离远、传输容量大的优势，应用场景包括 DCI 互联、5G 中回传以及城域网等。

图9：非相干光通信（上）和相干光通信（下）的区别主要在调制和检测方式



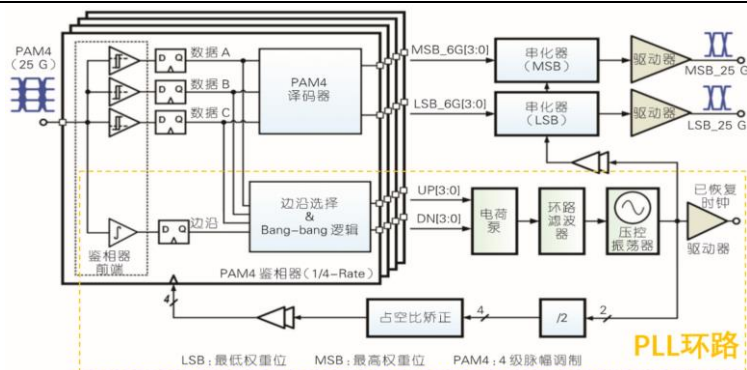
资料来源：电子工程世界

（3）时钟和数据恢复芯片 CDR

CDR 在光模块中的主要作用是从接收到的信号中提取出数据序列，并且恢复出与数据序列相对应的时钟时序信号，从而还原接收到的具体信息。时钟数据恢复主要完成两个工作，分别是时钟恢复和数据重定时，让接收端的信号与发射端信号保持一致。在光互连场景中，当单通道数据速率达到 25G 时，无论是在接收端和发射端都需要采用 CDR 电路从高损耗的信号里恢复出高质量的数据，再通过驱动电路将数据加载到光波上。

CDR 的基本组成部分包括鉴相器、电荷泵(CP)、环路滤波器、压控振荡器(VCO)等。通常 CDR 是一个有振荡器的反馈环路，通过环路调节振荡时钟的相位来跟踪输入数据中的嵌入时钟。鉴相器通过用 VCO 的输出时钟对输入数据进行采样来获得控制信号，控制信号输出到电荷泵产生控制电压来调节 VCO 的振荡频率。由此恢复高质量的时钟信号和数据。CDR 带宽是 CDR 的重要指标，主要影响光模块的数据锁定时间、抖动指标，在一定程度上决定着光模块的关键性能。若 CDR 带宽的取值较大，光模块的数据锁定时间则较短，但是抖动性能会变差；若 CDR 带宽的取值较小，此时抖动性能会变好，但是锁定时间会变长，甚至会导致个别系统单板上数据失锁。

图10: CDR 从信号中提取数据序列, 恢复出相应的时钟时序信号

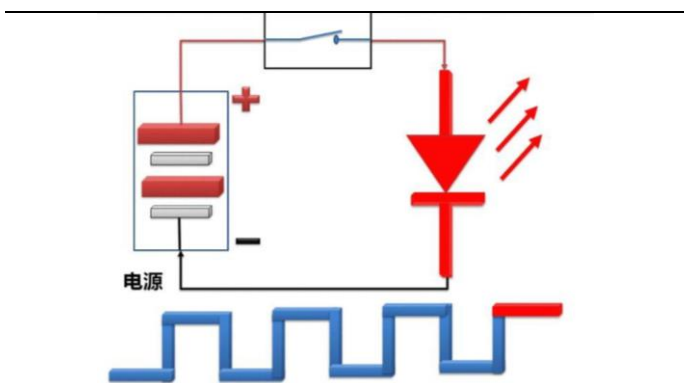


资料来源: 信赛赛思公司官网

(4) 激光器驱动 (调制) 器 LDD

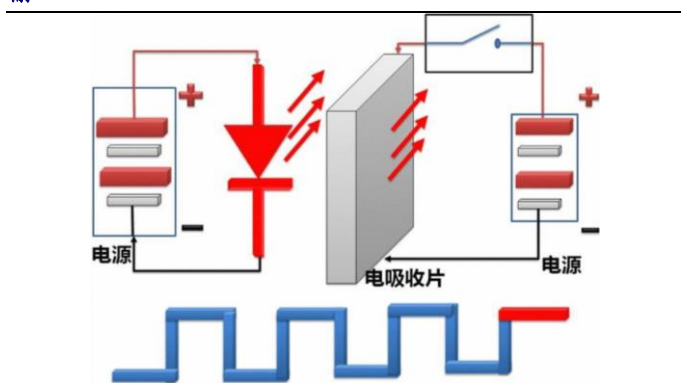
激光器驱动 (调制) 器的“驱动”体现在为激光器提供电流, 同时对电流进行调制, 把 1010 的信号用有光无光或光的幅度/相位来表征。LDD 将 CDR 的输出信号, 转换成对应的调制信号, 驱动激光器发光。根据调制方式的不同, 可以划分为外调制 (EML) 和直接调制 (DML)。直接调制下, 通过电路里的开关直接控制电流的开通和关断, 激光器的光功率和驱动电流呈正比。其优点是结构简单、体积小、工艺难度低等, 但缺点是带宽的利用率较低, 并且会有特殊的啁啾效应, 难以应用于长距离传输。外调制将电路开关移动至激光器外面, 主要有 EA 电吸收和 MZ (马赫-曾德尔调制) 两种方式。MZ 是调制发射光的相位, 电吸收则是通过材料完成调制功能。外调制能够有效解决激光器的啁啾效应, 可用于骨干网长距离传输。

图11: 直接调制下直接控制电流的开通和关断



资料来源: 菲魅通信官网

图12: 外调制将开关移至激光器外面, 可用于长距离传输



资料来源: 菲魅通信官网

直调通过输入端的电压 0-1 信号控制开关切换, 从而完成电信号向光信号的转换。在直接调制的 LDD 中存在两个电流源, 分别是控制平均光功率的偏置电流源和控制消光比 ER 的调制电流源。当调制信号为 1 时, 输入到激光器的电流为偏置电流和调制电流源, 电流大, 激光器的输出振幅大、能量高。当调制信号为 0 时, 流过激光器的电流是偏置电流, 电流小, 光强度较弱。

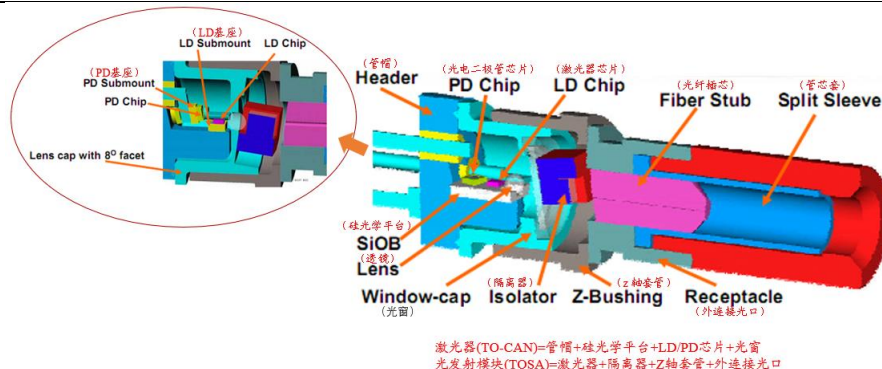
直接调制结构在短距离传输时具有优势, 但出于调制带宽的限制不太适应于高速率长距离的传输。直接调制通过直接注入电流来实现信号调制, 注入电流的大小会改变激光器有源区的折射率, 造成波长漂移而产生色散, 限制了传输距离。并

且直接调制的带宽有限，调制电流过大时激光器容易饱和，难以实现较高的消光比。

(5) 光发射组件 TOSA

TOSA 主要由激光器 (LD)、光隔离器、耦合透镜、MPD、多路复用器 (MUX) 等构成。激光器驱动器将电信号发送给 LD，LD 将电信号转换为光信号后通过光隔离器、透镜等光器件，将光信号耦合至光纤中，实现电信号转换。为了节约成本，MPD、隔离器和 MUX 不是必备项，其中 MUX 仅在需要波分复用的光模块中搭载。

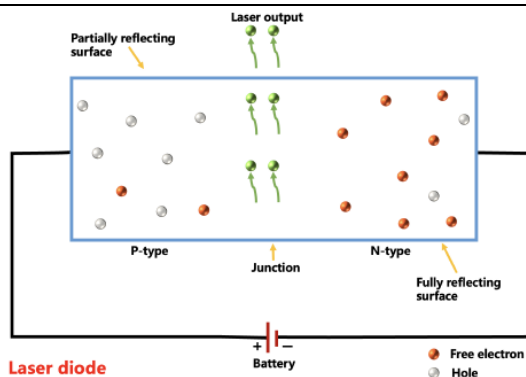
图13: TOSA 的基本结构主要包括激光器、隔离器等 (To-Can 封装形式)



资料来源:《Introduction of optical devices used in Communication system》、开源证券研究所

LD 的发光原理依赖于二极管的异质结构。LD 由本征、P 型和 N 型半导体组成。N 型半导体掺杂了 5 价原子，自由电子数量多于空穴；P 型半导体掺杂了 3 价原子，空穴数量多于自由电子，是多数载流子。在 P 区和 N 区之间会形成一个空间电荷区，即 PN 结。基于材料的发光特性，LD 主要使用砷化镓掺杂构成。普通二极管的半导体层多由砷化镓或者硅半导体掺杂组成，但由于硅二极管在能量的复合过程中释放的不是光，因此 LD 主要为砷化镓二极管。LD 产生相干光束的原理是光吸收、光自发发射以及光受激发射三种现象。当 LD 被外部能源刺激时，自由电子会从 N 层移动到 P 层。一部分直接与低能级的价电子相互左右，使价电子受激到高能级状态。另一部分与低能级的空穴复合，释放光子。光通过 LD 反射端溢出形成窄光束激光。

图14: LD 工作原理基于半导体的 PN 结

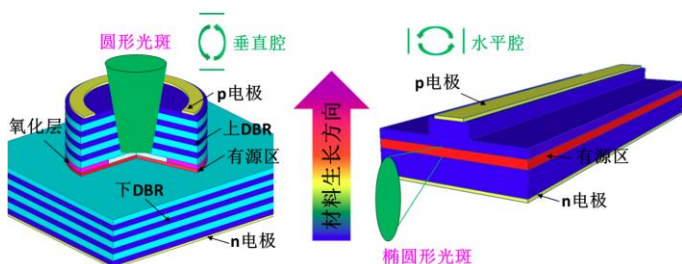


资料来源:《100G 超高速光收发模块关键技术研究》，熊光浩，2022

LD 按照出光结构可进一步分为面发射芯片和边发射 (EEL) 芯片。面发射芯片包括 VCSEL 芯片，边发射芯片包括 FP、DFB 和 EML 芯片。EEL 在芯片两侧镀光学膜形成谐振腔，光子经谐振腔选模放大后，将沿平行于衬底表面的方向形成激光，最终激光从侧面发出。VCSEL 在芯片上下两面镀光学膜形成谐振腔，腔体与衬底垂直，光子经选膜放大后垂直于芯片表面发射激光。谐振腔主要起到储存、提纯激光

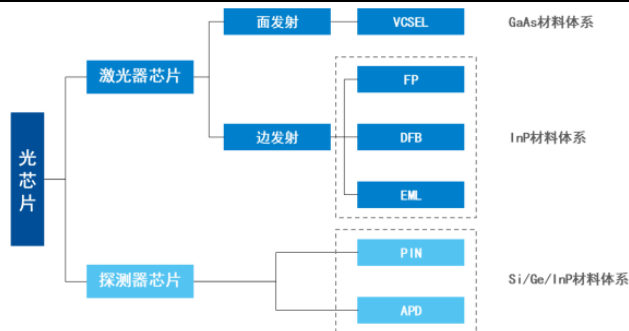
的作用，通常由两块反射镜构成，也可以用耦合器构成各种环形谐振腔。光子在反射镜之间来回反射，不断在增益介质中引起受激辐射，产生高强度的激光。

图15: EEL 和 VCSEL 在腔体结构上存在差异



资料来源：电子发烧友网

图16: 激光器芯片按照出光结构可分为面发射和边发射



资料来源：源杰科技招股说明书

FP 主要应用于低速率短距离传输，结构和制造工艺简单，成本较低。DFB 以 FP 为基础，布拉格光栅集成到激光器内部的有源层中，在谐振腔内形成选模结构，实现单纵模输出，主要用于高速中长距离传输。EML 集成了 EAM（光吸收调制器）和 DFB，属于外调制激光器，具有大调制带宽、低频率啁啾的特点，更好地解决了色散的问题，信息传输质量高，能够实现高速率长距离传输。

表2: VCSEL 激光器适合于短距离传输，EML 适合长距离传输

产品类别	工作波长	产品特性	应用场景
VCSEL	800-900nm	线宽窄，功耗低，调制速率高，耦合效率高，传输距离短，线性度差	500 米以内的短距离传输，如数据中心机柜内部传输、消费电子领域
FP	1310-1550nm	调制速率高，成本低，耦合效率低，线性度差	主要应用于中低速无线接入短距离市场，由于存在损耗大、传输距离短的问题，部分应用场景逐步被 DFB 激光器芯片取代
DFB	1270-1610nm	谱线窄，调制速率高，波长稳定，耦合效率低	中长距离的传输，如 FTTx 接入网、传输网、无线基站、数据中心内部互联等
EML	1270-1610nm	调制频率高，稳定性好，传输距离长，成本高	长距离传输，如高速率、远距离的电信骨干网、城域网和数据中心互联

资料来源：源杰科技招股说明书、开源证券研究所

衡量 TOSA 性能的主要参数为光发射功率和消光比。发射光功率影响信号传输距离。激光器将电信号转换为光信号，用 MUX 复用器合波成一束高速光信号，通过适配器传输至发射光纤，该光信号的强度为光功率。光功率越高，表明发射机性能越好，光信号能传输更远的距离。**消光比影响误码率。**TOSA 发出的光信号有两种状态：逻辑 1 为高光功率，逻辑 0 为低光功率，消光比为高电平的平均功率与低电平的平均功率比值。消光比越大，在接收端就能更好的区分 0、1 电平，从而接收到的光信号质量就越好。

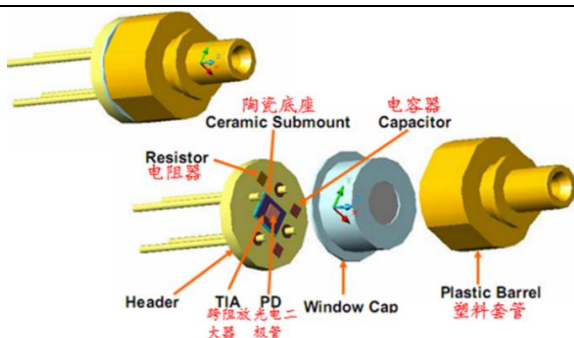
(6) 光接收组件 ROSA

光接收组件（ROSA）主要由 PD（Photo Diode）、TIA（跨阻放大器）、LA（限幅放大器）、耦合透镜、光学接口、电气接口以及金属外购组成。解复用器 DEMUX 将收集的光信号进行分波处理，不同波长的光将会被 PD 转换为电信号，再经过 TIA 和 LA 放大整形后发送给外部控制芯片。由于 PD 产生的电流较小，需要利用 TIA 将

其输出的电流放大成功能电压，方便后续的电信号处理。TIA 因接收的电流大小不同，导致电压的增幅值不同，为了保证后续电信号的稳定，需要通过 LA 进行信号整形，将 TIA 输出的不同幅值电压处理成等幅的电压信号。

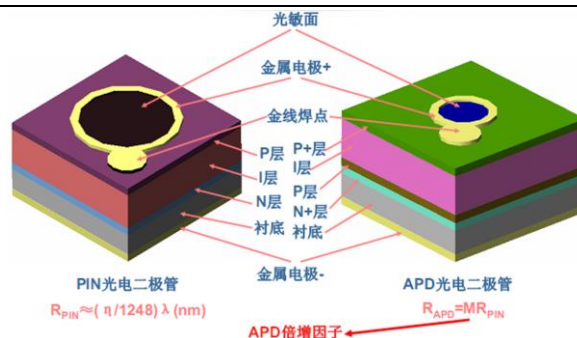
根据 PD 结构的差异，可以进一步划分为 PIN 和 APD 型光电探测器。PIN 二极管通过在 P 型和 N 型半导体之间增加一层轻掺杂的 N 型本征层，以展宽耗尽层，提高转换效率。APD 相较 PIN 具有更高的接收灵敏度。通过在 PIN 二极管结构中增加雪崩区，使得光生载流子以碰撞电离的方式在其耗尽区内激发出新的电子-空穴对，新产生的载流子通过内电场加速，导致更多的碰撞电离产生，最终获得雪崩效应。

图17: ROSA 的基本结构包括 PD、TIA、LA 等



资料来源:《Introduction of optical devices used in Communication system》

图18: PD 二极管的基本结构与类型



资料来源:《Introduction of optical devices used in Communication system》

表3: APD 更适用于长距离传输

产品类别	工作波长	产品特性	应用场景
PIN	830-860/1100-1600nm	噪声小，工作电压低，成本低，灵敏度低	中长距离传输
APD	1270-1610nm	灵敏度高，成本高	长距离单模光纤

资料来源: 源杰科技招股说明书、开源证券研究所

衡量 ROSA 性能的核心指标是灵敏度和接收光功率。灵敏度。保证误码仪在一定误码的条件下，接收端所能接收到的最小光功率称为灵敏度。在高速率传输中，灵敏度越小，光模块性能越强。接收光功率。在一定的误码条件下，接收端能够接收到从光源发出光信号的强度，称为接收端光信号。

从成本角度来看，光模块成本受光/电芯片以及控制芯片的影响较高。根据华拓光通信的数据，光器件占光模块成本的比重为 73%，具体包括光器件元件 (46%) 和 DFB/APD 芯片 (27%)。控制芯片占光模块成本的比重为 18%，仅次于光器件。光器件的成本结构中，DFB 占比最高，达 48%；其次为 APD/TIA，合计占比 32%。

图19: 光器件元件和光/电芯片占光模块成本主要部分

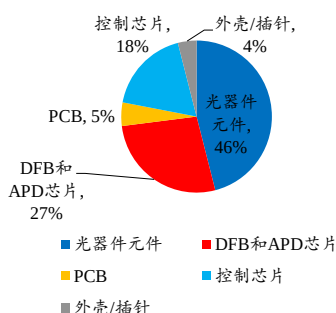
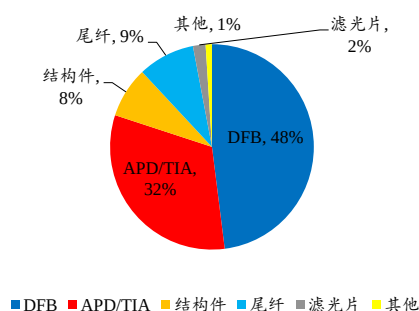


图20: DFB、APD、TIA 占光器件成本的主要部分



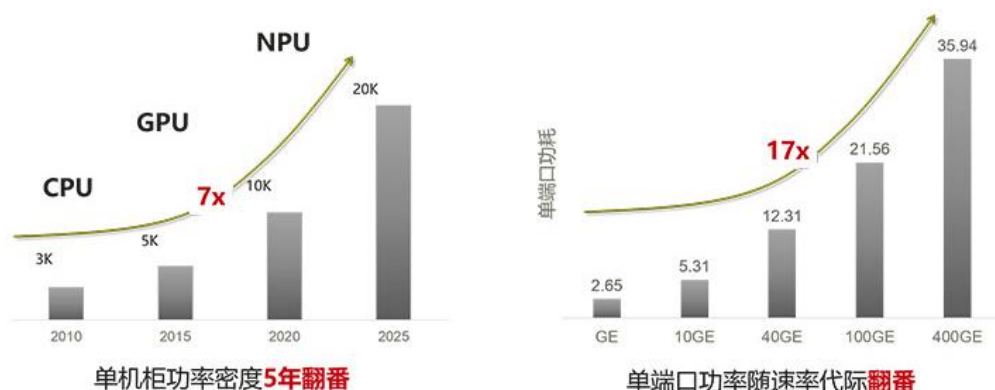
数据来源：华拓光通信、开源证券研究所

数据来源：华拓光通信、开源证券研究所

1.2、算力时代下光模块降本降耗趋势凸显

数据中心的高能耗问题由来已久，算力背景下该问题愈显突出。工信部数据显示，2023 年我国数据中心耗电量预计将达到 2,667.92 亿千瓦时，占社会总耗电量的 3%。在此背景下我国多地区发布了对数据中心能效指标 PUE 的限制。在工信部印发的《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023 年）》中要求，到 2023 年底新建大型及以上数据中心 PUE 需降低到 1.3 以下。算力需求提升带动网络带宽成倍提速，数据中心能耗呈指数型增长。根据 Digital Information World 发布的最新报告，数据中心为训练 AI 模型产生的能耗将为常规云工作的三倍。据咨询机构 Tirias Research 建模预测，到 2028 年数据中心功耗将接近 4250MW，比 2023 年增加 212 倍，数据中心基础设施加上运营成本总额或超 760 亿美元。

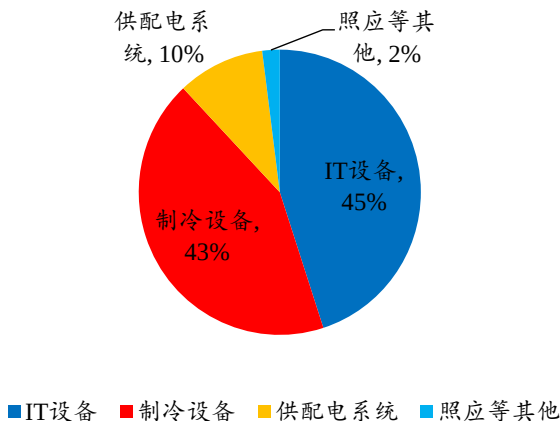
图21：算力和带宽高速发展带动数据中心功耗大幅提升



数据来源：华为官网

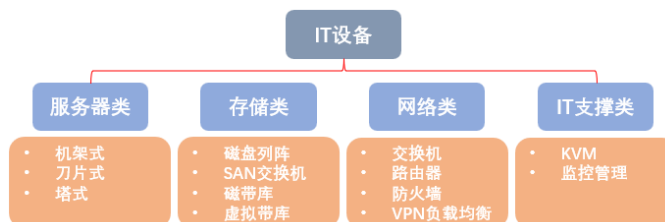
数据中心的能耗主要体现在 IT 设备和制冷设备。IT 设备主要包括服务器和网络设备等。服务器承载了计算和存储业务，搭载了 CPU、内存等硬件。网络设备包括交换机、路由器以及防火墙等。IT 设备占数据中心整体的能耗达 45%，其次为制冷系统，占比达 43%。具体到 IT 设备，其中服务器类约占 50%左右，存储系统约占 35%，网络通信设备约占 15%。

图22：典型数据中心的能耗主要分布于 IT 和制冷设备



数据来源：人民政协网、开源证券研究所

图23：IT 设备分为服务器、存储器、网络设备以及其他

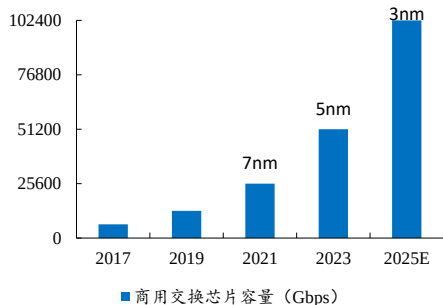


资料来源：中国通信电源委员会公众号、开源证券研究所

数据中心带宽提升，带动高性能交换芯片和高速率光模块的应用。数据中心交
请务必参阅正文后面的信息披露和法律声明

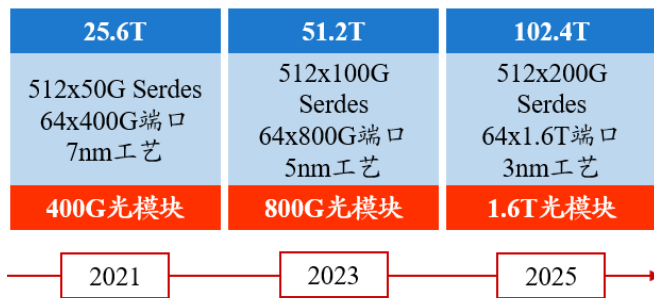
换芯片的演变趋势基本处于每两年翻一番的快速增长,25.6T 交换芯片用 7nm 工艺,51.2T 则需要选择 5nm 工艺节点,预计 2025 年 3nm 工艺节点可实现,并支持交换芯片实现 102.4T 的容量。对于光接口而言,25.6T 交换芯片对应 64 个 400G 光模块,已于 2021 年实现。2023 年随着 64 个 800G 模块的推出,支持交换机升级到 51.2T。对于 102.4T 的交换容量,则需要 1.6T 光模块,光口每波长速率达到 200G。

图24: 商用交换芯片容量处于每两年翻一番的快速增长



数据来源: 菲魅通信官网、开源证券研究所

图25: 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

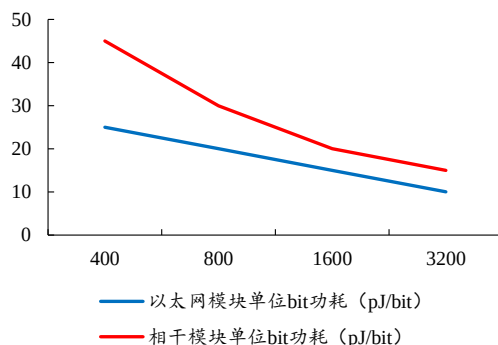
高性能交换芯片和光模块的使用导致网络设备功耗大幅增加。光模块速率的提升带来功耗大幅增加。400G 早期功耗为 10-12w, 预计长期功耗为 8-10w, 800G 功耗约为 16w。以英伟达 QM9700 交换机为例, 具有 64 个 400G 端口, 若满载光模块, 单台交换机对应的功耗就高达 640w 以上。

图26: 光模块功耗随着速率的提升大幅增长

	数据中心	ZR-DCI	ZR++
400G (2022)	10-12w	16-20w	20-24w
800G (2024)	15-18w	20-24w	30w
1.6T (2026)	20-24w	30-36w	40w+
3.2T (2028)	35-40w	TBD	TBD

数据来源: 菲魅通信官网、开源证券研究所

图27: 热插拔模块速率越高对应的单位 bit 功耗越低

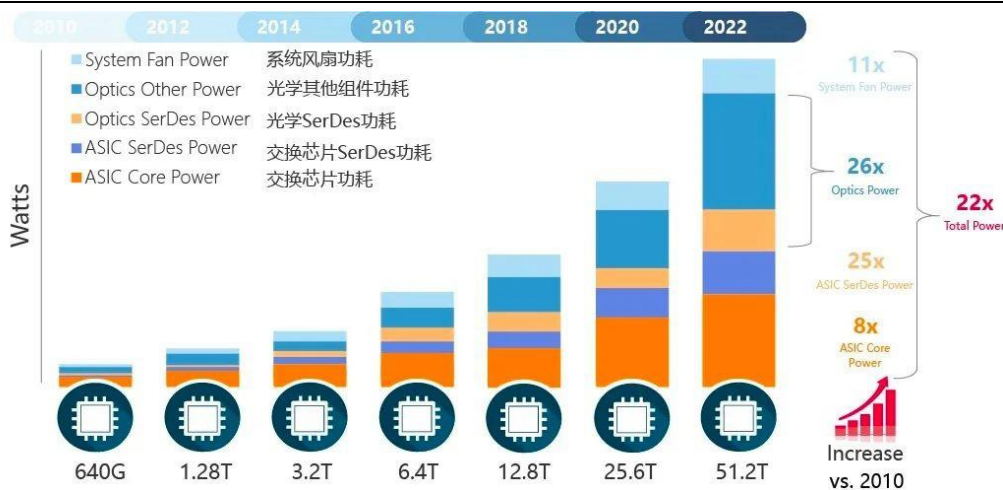


数据来源: 菲魅通信官网、开源证券研究所

交换芯片数据吞吐量提升带动 SerDes 速率的提升, SerDes 功耗也呈上升趋势。SerDes 是网络设备的核心器件, 负责光模块和网络交换芯片的连接。将交换芯片输出的并行数据, 转换成串行数据进行传输。在接收端, 再将串行数据转换成并行数据。在 102.4Tbps 时代, SerDes 速率需要达到 224G, 芯片 SerDes 功耗预计会达到 300W。受 PCB 材料工艺的限制, 当 SerDes 速率增加时, 为了保障信号的高质量传输, 信号传输距离将会相应缩短。当 SerDes 速率达到 224G 时, 最多只能支持 5-6 英寸的传输距离, 这使得交换芯片和光模块之间的封装距离需要进一步缩短。

综上所述, AI 算力的发展导致高性能交换芯片、高速率 SerDes 及光模块的渗透率加速提升, 带来数据中心网络设备的功耗大幅提升。设备厂商 Cisco 的数据显示, 2010-2022 年全球数据中心的网络交换带宽提升了 80 倍, 背后的代价是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。

图28：交换芯片容量提升导致 SerDes/光模块的功耗也大幅提升

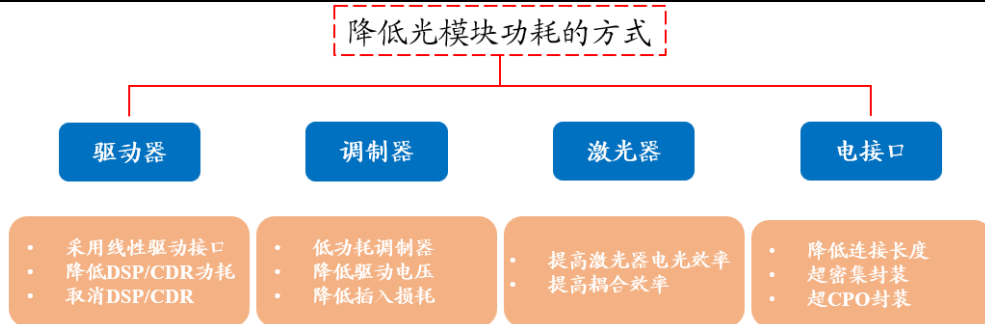


资料来源：2020 Cisco and/or its affiliates. Cisco Public

除了网络设备功耗大幅提升，服务器的散热功耗也非常可观。根据 CCID 数据统计，2019 年中国数据中心能耗中，约有 43% 是用于 IT 设备的散热，基本与 45% 的 IT 设备自身的能耗持平。服务器散热需求带动液冷行业的发展。引入液冷，可以降低数据中心能近 90% 的散热能耗。数据中心整体能耗，则可下降近 36%。

在光模块降本降耗的发展趋势下，行业围绕驱动器、调制器、激光器以及电接口四个方面去降低功耗。驱动器方面，如果采用线性驱动 LPO 技术路线，则可在数据链路中只使用线性模拟元件，无需 DSP 或者 CDR 芯片，从而降低 DSP/CDR 产生的功耗。调制器方面，薄膜铌酸锂基于其自身较低的半波电压，使得其相对于其他材料的调制器所需要的驱动电压更小，从而具备优越的低功耗特性，成为产业界尝试解决调制器功耗问题的重要途径。激光器方面，主要有提高激光器电光效率以及提高耦合效率两种途径。Lumentum 于 22 年 OFC 会议提出 CW 激光器解决方案，使用 SI-BH 结构，通过 DFB+SOA 来提高光功率，前端有 SSC 模斑转换用于降低发散角、提高耦合效率。电接口方面，缩短交换芯片和光引擎之间的连接长度，采用诸如 NPO 和 CPO 之类的超密集封装，实现更高密度的高速端口，提升整机的带宽密度。而 NPO/CPO 背后的技术，即为硅光技术，以光子和电子为信息载体的硅基光电子大规模集成技术。

图29：降低光模块功耗的方式主要从四个方面改进

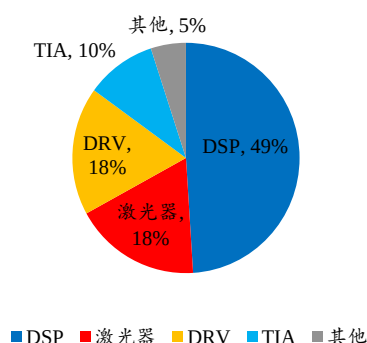


资料来源：菲魅通信官网、开源证券研究所

2、 LPO 线性直驱：有望在短距离场景下发挥潜力

LPO 是基于 linear Driver 芯片技术实现的可插拔光模块，是对含有 DSP 设计的高速热插拔以太网模块的优化和改进。目前主流的 200G/400G/800G 产品是基于 PAM4 技术加上 DSP 芯片来实现高速、高调制信号的恢复和传输。DSP 作为高速数字处理芯片，能够实现信号的恢复，降低误码率，同时还可以进行色散补偿、去除噪声以及非线性干扰等因素。但是成本较高、延时大、功耗高且发热非常明显。LPO 通过使用性能提升的 TIA、Driver 芯片，实现更好的线性度，剔除高速率可插拔模块携带的 DSP，带来模块功耗下降，但是在系统误码率和传输距离方面有所牺牲。

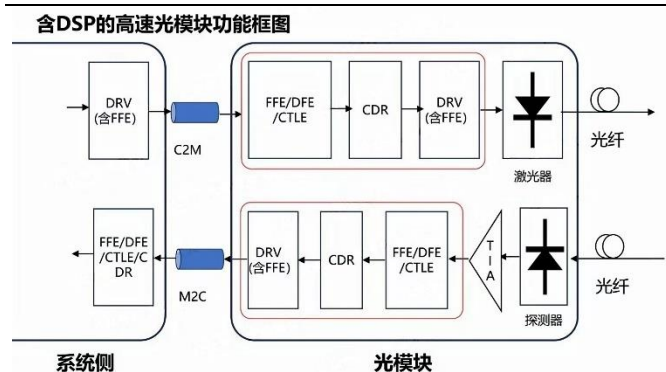
图30：800G 热插拔光模块的功耗主要分布于激光器和 DSP



数据来源：菲魅通信官网、开源证券研究所

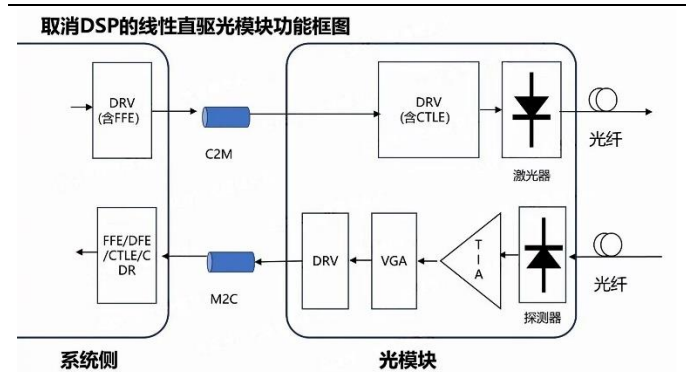
信号在交换机主芯片和光模块之间的传输会产生损耗，高频损耗大于低频损耗。交换机主芯片和光模块之间的信号传输通过 PCB 板上的铜线进行。“趋肤效应”使得金属线在传输过程中存在自然的损耗。加入 DFE、CDR 等“非线性”模块能对电信号进行修补整形，降低损耗的影响，DSP 凭借数字算法能将补偿效果做到最优。DSP 将模拟信号转化为数字量进行处理，最大程度地对信号进行整形补偿，但是结果是带来非线性工作量提升，功耗和延时随之增加。LPO “降耗”的思路是将信号非线性的修复功能交给交换机系统侧来实现，光模块自身仅保留 CTLE。连续时间线性均衡器 CTLE 对由于通道特性而衰减的信号进行增强，支持 DC 以及 AC 增益。

图31：含 DSP 的高速光模块功能框图



资料来源：菲魅通信官网

图32：取消 DSP 的 LPO 光模块功能框图



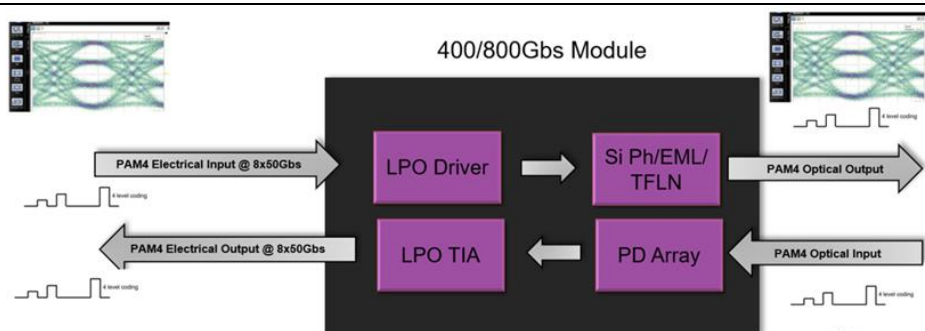
资料来源：菲魅通信官网

LPO 技术路线的主要壁垒在于电芯片，应用场景局限于短距离连接场景。目前全球主要的电芯片厂商为 Macom、Semtech 以及美信。由于 LPO 牺牲了 DSP 的高性能信号恢复能力，因此应用场景主要限于短距离（50m 内）的连接场景，比如数据

中心服务器和架顶交换机之间的连接。随着 800G 高速率光模块需求的增长，LPO 凭借在功耗以及成本方面的优势有望取得市场需求的增益。更高线性度的 TIA/Driver 给 LPO 带来信号整形能力的提升，在交换芯片侧使用更高性能的 DSP 有望降低信号在链路上传输的损耗。

目前国内的布局 LPO 的厂商主要为剑桥科技和新易盛，海外主要厂商为 Macom、Semtech、Maxim 以及 Broadcom。(1) 剑桥科技方面，公司与电芯片龙头厂商 Macom 建立了良好的供应链合作关系，预计 2023 年下半年首批基于硅光的 LPO400G/800G 实现小批量出货。剑桥科技与英思嘉共同推出的 LPO 400G 光模块方案基于硅光技术的 MZ 驱动器 ISG-D5640H 和基于 EML 技术的驱动器 ISG-5640E，适用于 400G DR4/800G DR8 的应用场景。(2) 新易盛方面，公司于 2023 年 3 月 ODC 期间推出了 800G LPO 产品系列，用于单模或多模的场景。

图33：英思嘉与剑桥科技发布的基于硅光的 LPO 400G 光模块方案将于 2023 年 Q3 开始小批量供货



资料来源：英思嘉公众号

3、CPO：超高速场景下的颠覆性技术，海外龙头布局领先

光芯片通常采用 III-V 族化合物 InP 和 GaAs 作为衬底材料，不同的材料体系由于物理效应差别较大，导致最终器件的功能也有所差异。衡量衬底材料特性的因素主要包括器件密度、波导损耗、无源器件、有源器件、是否可集成光源以及成本。器件密度决定了光芯片的尺寸，密度越高，集成度越大。有源/无源器件在某些材料体系下加工困难。光源方面，III-V 族直接带隙半导体材料具有优势，可以在单个芯片上直接集成光源。成本方面，硅材料成本最低，其他材料的价格较为昂贵。

图34：不同光芯片衬底材料的特性

	硅	二氧化硅	激光直写	Si3N4	InP	GaAs	LiNbO3
器件密度	●●●●●	●●	●	●●●	●●●	●●●●●	●●
波导的传输损耗	●●●●●	●●●●	●●	●●●●	●●●	●●●●	●●●
无源器件	●●●●●	●●●●●	●●●●	●●●●	●●	●	●●●
有源器件	●●●	●	●	●	●●●●	●●●	●●●●●
光源	●●●	●	●●	●●●●	●●	●●●●●	●●●●

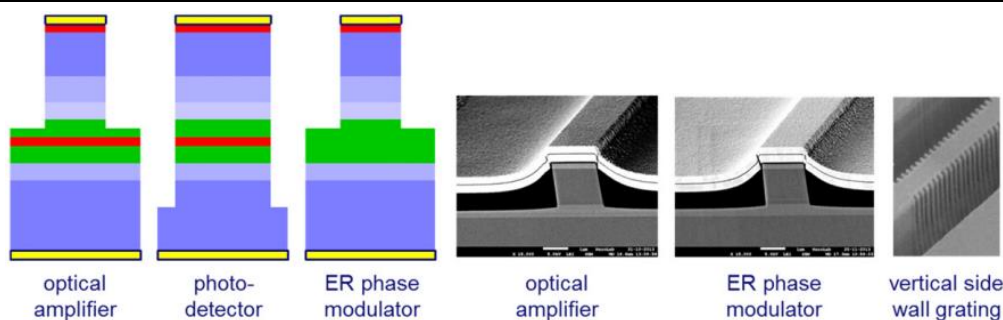
资料来源：《Silicon Quantum Photonics》，Joshua W. Silverstone，2017、开源证券研究所

硅材料集成度高材料成本低，但在制备激光器方面难度较大，III-V 族材料成本高与 CMOS 工艺兼容较差，铌酸锂集成度低但光电系数高。硅光子技术是将电子器件、光子器件和光波导回路集成在同一硅基底上。优势在于相干调制以及合分波器

件的高度集成化，解决相干产品的缺陷，进而下沉到核心与汇聚层。当前硅光体系已能够实现大部分无源和有源光器件，仅在硅基光源和光放大器方面还面临困难。目前硅基光源主要采用混合集成的方式，或者将一个外部的激光器倒装在硅芯片上，也可以采用外延生长的方式在硅上生长 III-V 族材料。InP/GaAs 自发光效应好，主要用作制备激光器，目前主流光模块基本采用 InP 光芯片，但材料成本较高。铌酸锂通常采用质子交换法或钛扩散方法制备。由于铌酸锂电光系数较高，所以在调制器中的应用广泛。其相对其他材料最大的优势在于，能够高效率地进行频率转换。

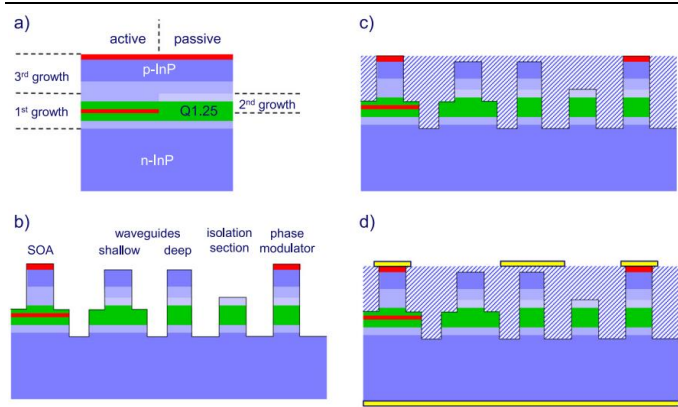
InP 芯片的加工流程主要分为四步，分别为外延生长、波导刻蚀、表面平整化以及金属互联。（1）**外延生长**。InP 芯片的波导层以外延的方式生长。外延通常分为三步，先生长有源层 active layer，再生长无源层 passive layer，最后生长 P 型掺杂的 InP 覆盖层。工艺难度在于如何控制好外延生长的均匀性，使得波导层损耗低、射频工作性能好。不同于 InP 芯片，硅光芯片从 SOI 晶片开始，直接对 220nm 的 Si 层刻蚀形成波导；（2）**波导刻蚀**。通过干刻的方法刻蚀外延层，制备出不同类型的波导。根据刻蚀的深度可以划分为深刻蚀、浅刻蚀以及刻蚀到波导层上方的包层。InP 体系的波导主要为脊形，结合外延生长的有源层，就可以制备成光放大器、调制器、探测器等有源器件；（3）**表面平整化**。在波导之间的空隙中填充材料，使整体结构稳定；（4）**金属互联**。在平整化后的表面生长电极，用于有源器件的外部信号输入。

图35：光放大器和探测器的区别主要在于波导刻蚀的深度和 PN 结施加压力的方向



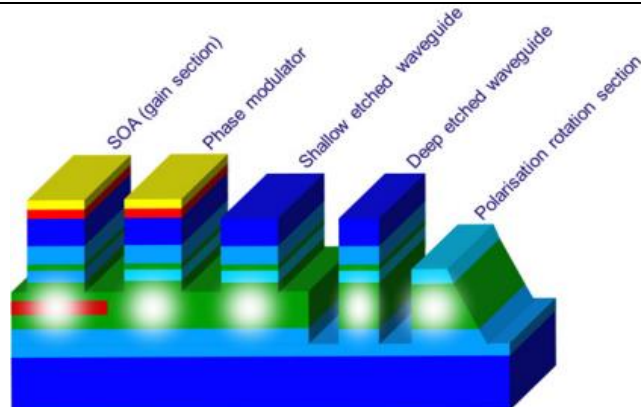
资料来源：《An introduction to InP-based generic integration technology》，Meint Smit, 2014

图36：InP 芯片的加工流程主要分为四步



资料来源：《An introduction to InP-based generic integration technology》，Meint Smit, 2014

图37：根据波导刻蚀的深浅可分为深刻蚀、浅刻蚀等

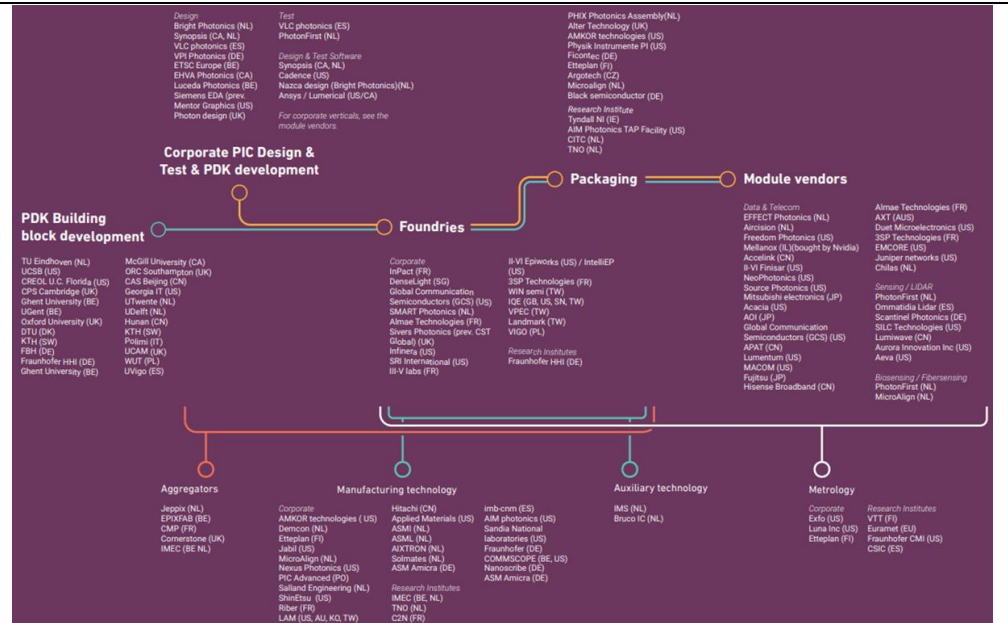


资料来源：《An introduction to InP-based generic integration technology》，Meint Smit, 2014

国内厂商主要参与 InP 芯片产业链的后段模组制造环节，设计、晶圆代工以及封装供应商主要集中于海外。磷化铟晶圆是整个链条的前段；磷化铟晶圆生产出来

后，在此基础上涂材料实现“外延”后提供给了芯片商；然后在制造商手中成为光器件，在设备商手上被研制成为光系统。

图38：全球 InP 芯片产业链主要包括 PDK、设计&检测、晶圆代工、封装以及模组制造几个环节



资料来源：PhotonDelta Global InP Map

对比全球主要代工厂加工的光芯片性能，硅光与 InP 各有利弊。波导传输损耗方面，两种材料体系相差不大，都在 1-3 dB/cm 之间；调制器方面，硅光的带宽更大，但是插损高于 InP；探测器方面，硅光带宽更高，但是响应率低于 InP。

硅光是提高集成度、实现重复性生产的关键。根据全球主要代工厂的数据，硅光单位面积的流片成本相对 InP 没有体现出优势，尽管硅光的原材料成本以及晶圆价格较低于 InP。其主要是受工艺的成熟度、封装难度以及生产良率的影响。但 InP 在晶圆尺寸上较大，单片 MPW 的流片数量较少，集成度方面存在劣势。硅光的成本优势有望在规模化后体现出来。硅光与 CMOS 工艺相兼容，有望充分利用硅制造技术的规模、成本和工艺控制等优势。在 AI 的推动下，数据中心对光模块的需求量预计大幅提升，硅光有望迎来新的产业化机遇，受到部分云计算厂商的青睐。

表4：全球主要代工厂加工的光芯片性能对比

		硅光芯片			InP 芯片	
代工 Fab		Imec	CEA-LETI	SMART	HHI	Oclaro
		ISIPP25G+	Si310-PHMP2M	TxRx 10G	TxRx 25G	TxRx 10G
波导	传输损耗 (dB/cm)	1.5-2.5	<2.5	3-4	1-2	2-3
调制器	长度/mm	1.5	1-4	2	0.5	1
/移相器	带宽/GHz	20	<25	10	(kHz)	>10
	插损/dB	6	<2.5	<2	<2	<2
	带宽/GHz	>50	30	10	40	10
探测器	响应率/(A/W)	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
	暗电流/nA	<50	<10	<20	<10	-

数据来源：《FOUNDRIES OVERVIEW》，Amit Khanna、开源证券研究所

表5：硅光 MPW 流片成本与 InP 对比

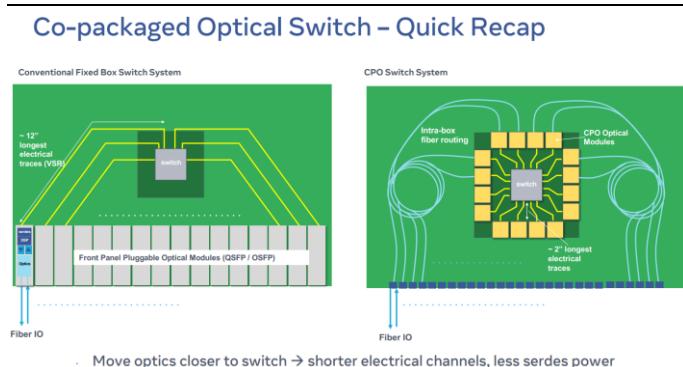
代工 Fab	硅光芯片			InP 芯片	
	Imec	LETI	SMART	HHI	Oclaro
	ISIPP25G	Si310-PH	TxRx 10	TXRx 25	TxRx 10
MPW die size mm2	2.5x2.5	1.7x3.7	2x4.6	3x6	2x6
Price EUR	10000	6610	4500	5500	12000
MPW cost/mm2	1600	1050	500	300	1000
Chips per MPW run	10	15	8	8	8

数据来源：《FOUNDRIES OVERVIEW》，Amit Khanna、开源证券研究所

随着行业对低功耗、低成本、高集成度光模块的需求愈发旺盛，硅光凭借更低的材料成本，更高的集成度成为重要的技术研发方向。根据 Equinix 预测，以一个拥有超过 10 万台服务器和 5 万多个交换机的数据中心为例，它们之间的连接需要超 100 万个光模块，花费在 1.5 亿美元至 2.5 亿美元之间，占据数据中心网络成本的 60%，超过交换机、NIC 和电缆等设备的总和。硅光模块虽然工艺难度大，封装成本较高(约 1.5-2 美元/GB)，但其成本理论上有望降至 0.3 美元/GB，在规模量产情况下发挥成本优势。

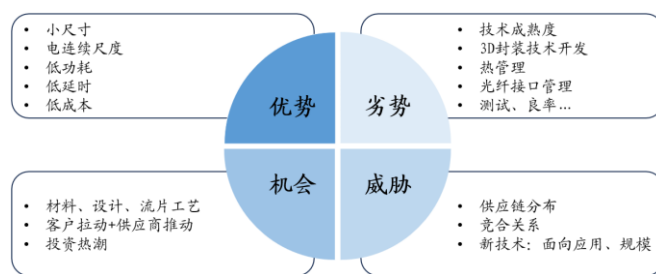
CPO 的出现主要是为了解决高频电链接距离的问题。数据中心带宽的增长导致 SerDes 速率不断提升，功耗随之增加。为了保障信号的高质量传输，优化 SerDes 功耗，信号传输距离将会相应缩短，即交换芯片和光模块之间的封装距离需要进一步缩短。除此之外，随着数据中心内部流量的不断增长，每根光纤的传输容量也在不断提升，而数据中心光纤的单芯容量只有 100-400G，要做到大规模的数据吞吐意味着需要不断增加通道的数量，CPO 可以提高集成度。根据数据显示，通过采用 CPO 技术，光学连接所需的功率有望降低 50% 以上。

图39：光引擎离 switch 越近，光信号距离越短，SerDes 的功耗越小



资料来源：Beyond 400 G Project Priorities for Data Center Networks

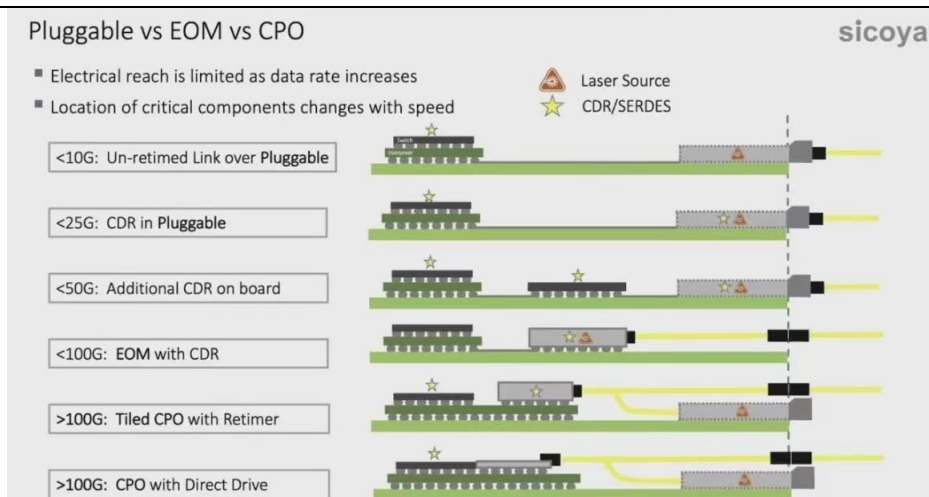
图40：CPO 的优势体现为低功耗、低延时、低成本，但在热管理以及良率等方面还存在问题



资料来源：菲魅通信网、开源证券研究所

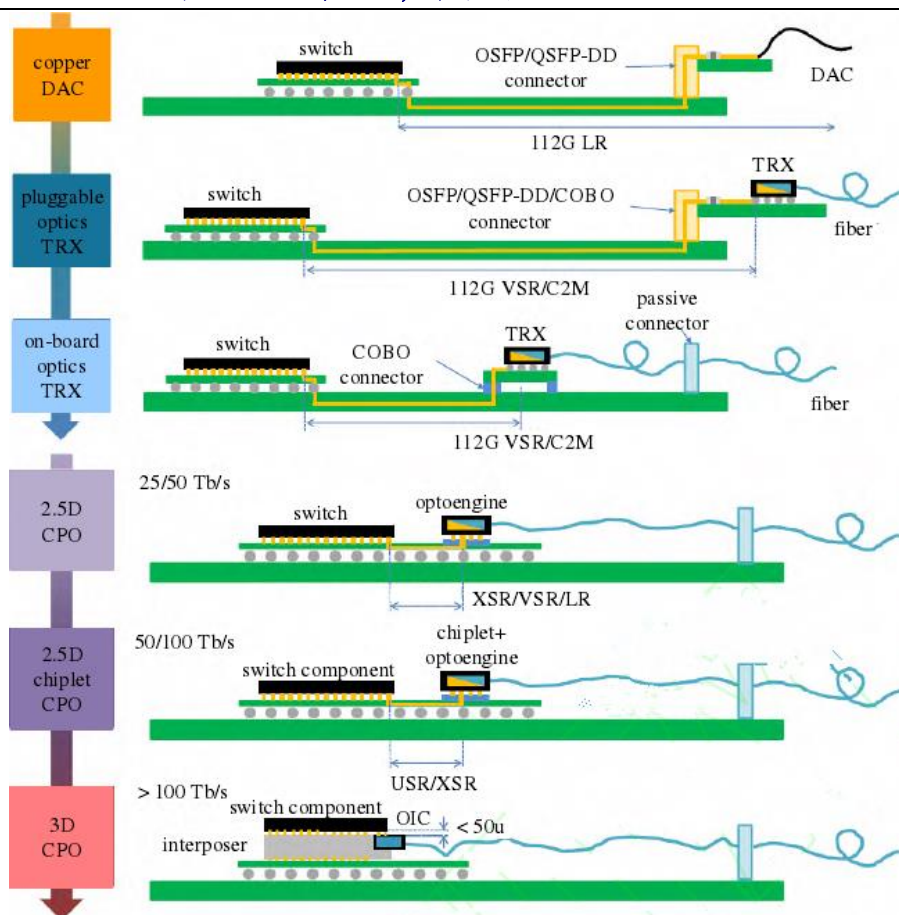
CPO 作为新型光电子集成技术，基于先进封装技术将光收发模块和控制运算的 ASIC 芯片异构集成在一个封装体内，形成具有一定功能的微系统。先进封装技术是一种采用先进的设计思路和先进的集成工艺技术，如硅通孔、重布线、倒装、凸点、引线键合等对芯片进行封装级重构，能有效提升功能密度。下游行业对高容量（更多通道更高速率）、低能耗、低成本、可靠性的追求，带动光模块的光电互连封装技术不断创新演化。从最初的 AOC 有源光缆、可插拔光模块，到 PCB 板载光模块，到如今广泛探讨的 CPO 封装，都是在适应不断增长的数据量要求。

图41：可插拔、嵌入式、共封装光模块结构对比



资料来源：《Development and Manufacturing of an Integrated Photonic Transceiver Product》，Dr. Sven Otte

图42：光电互连封装技术的发展过程，未来或通往 3D CPO



资料来源：《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》，卞玲艳，2023

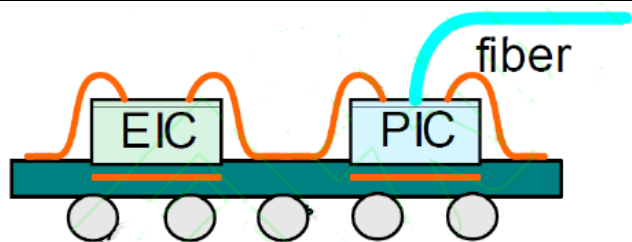
按照物理结构 CPO 可分为 3 种技术形态：2D 平面 CPO、2.5D CPO 和 3D CPO。

(1) 2D 封装

基于 2D 封装的 CPO 技术是将 PIC 和集成电路并排放置在基板或 PCB 上，通

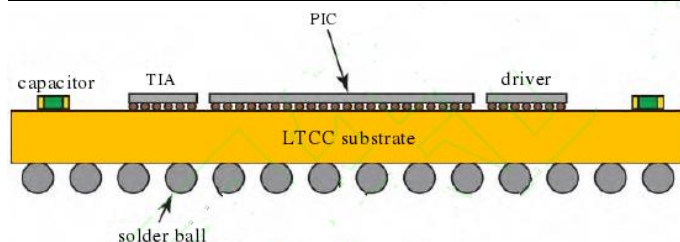
过引线或基板布线实现互连。2D 封装的优点是易于封装、灵活性高，EIC 和 PIC 都可以使用不同的材料、利用不同的工艺单独制作。根据芯片和基板互连方式不同，基于 2D 封装发展出了基于 Wire bonding 的 CPO、基于倒装的 CPO、基于扇出型晶圆级封装技术的 CPO 三种技术路径。台积电在 2021 年推出了紧凑型通用光子引擎 COUPE 技术，将 EIC 和 PIC 放置在同一基板上，通过引线键合的方式在基板上实现互连。Acacia 于 2017 年利用 CPO 技术设计了一款相干模块，将 PIC、驱动器芯片和 TIA 倒装焊在一个 11 层的低温共烧陶瓷基板上，相对于 PCB 大大节省空间。信号通过陶瓷基板内部走线互连，具有较短的路径和良好的电学性能，相比于在 PCB 上走线大幅减少了传输损耗。

图43：台积电 COUPE 技术封装结构



资料来源：《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》，卞玲艳，2023

图44：Acacia 基于陶瓷基板的 CPO 技术图



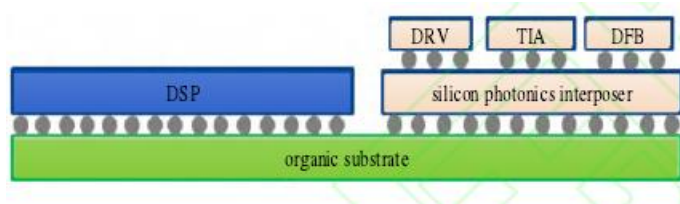
资料来源：《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》，卞玲艳，2023

（2）基于 2.5D 封装的 CPO 技术

2.5D 封装是将 EIC 和 PIC 均倒装在中介层（interposer）上，通过 interposer 上的金属互连 PIC 和 EIC，interposer 再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三种技术路线。

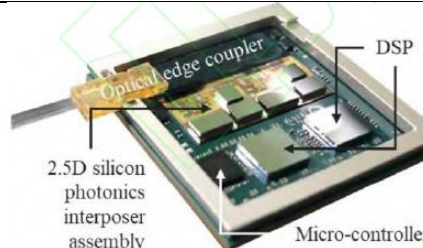
玻璃材料由于具有高透光性、低损耗的电气互连特性和出色的尺寸稳定性，很适合作为 CPO 的转接板。硅转接板采用硅晶圆加工技术，可以制作更小线宽的互连线，布线密度高，可以实现光电芯片的高密度引脚互连。美满科技在 2022 年推出了一款基于 2.5D CPO 技术的交换机，它将驱动芯片、TIA、激光器等倒装在有 TSV 的硅光转接板上，再将转接板和 DSP 放到同一块有机基板上形成光引擎，然后将 16 个光引擎和交换芯片 Marvell Teralynx7 在 PCB 上互连形成交换机，可达到 12.8Tbps 的交换速率。2017 年新加坡微电子所基于 2.5D 硅转接板 CPO 技术实现了多通道硅基集成光模块，电芯片和光芯片倒装在硅基转接板上，再通过引线键合与下面的 PCB 实现互连。该模块实现了单通道超过 50G 的传输速率，通过多通道实现了超过 400G 的速率。

图45：2.5D 封装方案示意图



资料来源：《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》，卞玲艳，2023

图46：Acacia 基于陶瓷基板的 CPO 技术图



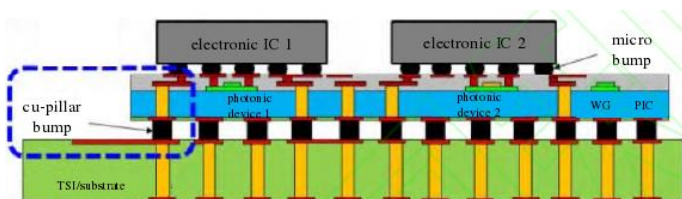
资料来源：《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》，卞玲艳，2023

(3) 基于 3D 封装的 CPO 技术

3D 封装技术通过将光电芯片进行垂直互连，可以实现更短的互连距离、更高的互连密度、更好的高频性能、更低的功耗、更高的集成度以及更紧凑的封装，是目前 CPO 技术研究的热点和趋势。

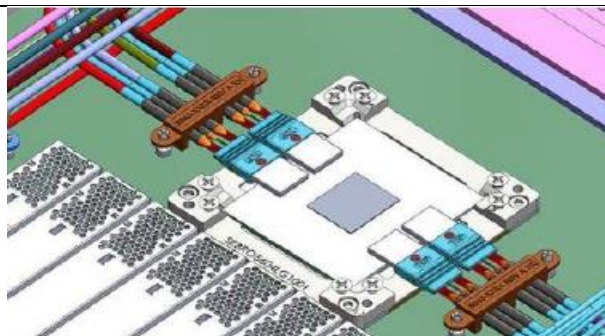
2022 年博通首次推出了一款基于 3D 封装的光引擎，它将 PIC 倒装在 EIC 上方，EIC 与 ASIC 芯片通过基板互连。将 25.6Tbps 的 Tomahawk 4 交换机芯片和 4 个 CPO 结构的光引擎封装在一起形成一个交换机，单个 CPO 模块支持 3.2Tbps，整个系统包含 4 个 CPO 模块，共有 12.8Tbps 的带宽。博通称采用 CPO 的结构可以节约 40% 的功耗和 40% 的每比特成本。

图47：基于带 TSV 的 PIC 转接板的 CPO



资料来源：《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》，卞玲艳，2023

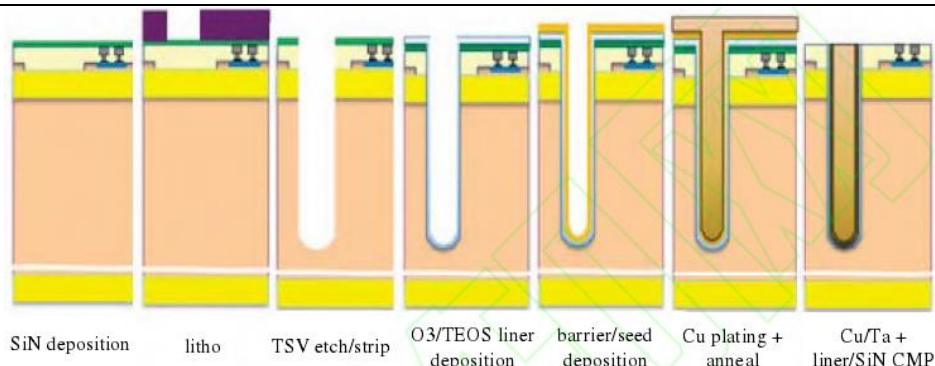
图48：Acacia 基于陶瓷基板的 CPO 技术图



资料来源：《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》，卞玲艳，2023

CPO 目前处于产业化初期，在工艺、仿真以及测试等方面面临很多技术挑战。封装工艺能力是制约 CPO 发展的重要因素，涉及 TSV、TGV 等多种先进复杂的封装技术，每一种技术都皆有利弊，需要在研发制造过程中不断探寻最可靠的方案。以 TSV 通孔加工技术为例，其涉及深反应离子刻蚀工艺。在采用氟化物对硅刻蚀后，需要对通孔进行电镀填充，填充步骤是该技术的关键和核心。电镀填充的材料包括铜和银，一方面需要控制填充速度，以防止后期形成孔洞，另一方面还需要控制填充后的表面铜层厚度，以减少后续平坦化工艺的困难。整体工艺流程在可靠性和良率方面难度较高，国内相关制成水平与海外存在较大的差距。

图49：基于硅中介层的 TSV 主要制备工艺包括 7 个步骤



资料来源：《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》，卞玲艳，2023

散热问题对于 CPO 来说具有重大挑战。CPO 中放置光和电器件的空间十分狭小，并且光学器件对热特别敏感。在 CPO 标准工作组所做的模拟仿真中，在风速 5m/s 的条件下，当采用 16 个的 CPO 模块和一个开关芯片模型设计时，开关芯片的温度

为 151.76°C，几乎无法正常工作。

主流的热可插拔模块在维修时非常方便，但作为不可插拔的 CPO 封装技术在维修时难度较高，因此测试、良率以及可靠性问题成为 CPO 产业化的关键。由于光芯片是直接和电芯片通过先进封装工艺封装在一起的，如果某颗芯片发生了损坏，整个模块就无法正常工作，这不仅使良率下降，也给测试带来了诸多困难。CPO 的光学器件具有不同于以往开发的任何子组件的通道密度，这意味着现有的测试解决方案不能满足测试要求。可靠性要求具体包括使用寿命、故障率等方面，提高产品可靠性可以大幅降低后续 CPO 的维护成本。

2020 年以来 CPO 逐渐从学术型研究成果转变为市场需求的产品。如英特尔、博通、美满科技等行业内龙头企业均已推出多款基于 CPO 的量产产品，其他企业也在积极地布局相关产品，并推进 CPO 技术标准化。云服务厂商 Facebook 和 Microsoft 创建了 CPO 联盟，旨在打造一个平台吸引各细分行业龙头企业加入联盟，推动 CPO 标准的建立和产品的发展。

表6：CPO 海外龙头具有先发优势，布局进展相对国内较快

公司	进展情况
英特尔	2020 年公司展示了业内第一款基于 CPO 技术的交换机产品，并采用了 12.8Tbps 的 Barefoot Tofino2 芯片和 1.6 Tbps 光引擎共同封装；
	2021 年公司与 Ayar Labs 合作将 FPGA 芯片 Stratix10 和 5 颗光学 IO TeraPHY 芯片共同封装在一个 16 层有机基板上，实现 8Tbps 带宽的多芯片封装体；
	2022 年公司报道了与 Ayar Labs 的最新合作成果，使用 FPGA 与硅光芯片构成 optical IO 链路，首次验证了 5.12 Tbps 带宽的信号互连；
思科	并购 Lightwire、Luxtera、Acacia 三大硅光企业发展 CPO；Acacia 在 2020 年推出 400G 硅光模块方案，先将分立光器件集成为 PIC 芯片，再与自研 DSP 电芯片集成在 SOI 上，最终外接激光器封装成光模块；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 51.2Tbps 交换机；
美满	2022 年推出基于 2.5D CPO 技术的 12.8Tbps Teralynx7 交换机；2023 年推出由超低延迟 Marvell Teralynx10 51.2Tbps 交换芯片和业界首款 PAM4 1.6Tbps 光电平台 Marvell Nova 组成的新平台；
博通	收购光器件公司 Luminent、Broadlight 来发展 CPO；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 100G PAM4 接口共封装，达到了 51.2Tbps 的交换容量，功耗仅需 5.5W；

资料来源：《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》，卞玲艳，2023、开源证券研究所

与国外相比，我国企业则普遍较晚进入 CPO 领域，在产品开发进度及技术研究方面存在明显的差距。CCITA 牵头的 CPO 标准是当前我国唯一原生的 CPO 技术标准，其目的是结合目前国内外在光互连技术发展及应用场景的差异，联合国内光模块、光收发芯片、电驱动放大芯片、光源、连接器等厂商，共同打造更加适合我国的 CPO 标准。光迅科技、中际旭创、华工科技、新易盛、阿里云、通宇通讯、海信、博创科技、联特科技等都已开始涉足光电共封领域，但由于起步较晚，目前还没有 CPO 相关的产品推向市场，主要产品还都集中在 400G、800G 的硅光模块。

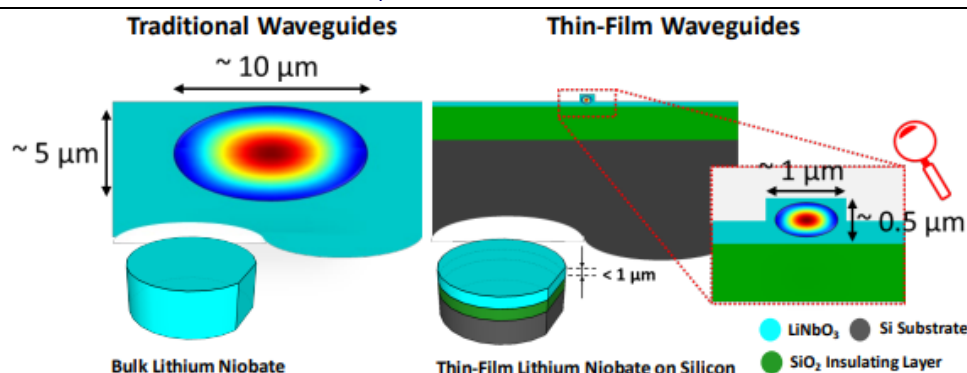
表7: CPO 国内尚处于开发阶段

公司	进展情况
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;
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, 由于技术迭代, 目前尚在进一步研发过程中, 还不具备量产化条件;
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;
通宇通讯	深圳光为在 2021 年已有预研, 目前相关的核心技术有在材料方面基于硅光技术的高集成度高速光电芯片及封装技术、结构方面基于全新系统架构需求的高密度光纤互联技术和基于客户降功耗需求的光模块液冷技术, 根据客户的验证进展, 公司预计 CPO 批量应用要到 2024 年底;
博创科技	正在 CPO 技术领域进行研发和产品准备;
联特科技	目前 CPO 相关产品开发还处于初期阶段, 技术的成熟及市场的规模化应用还需时日;
锐捷网络	2021 年锐捷网络发布了首款基于 112G SerDes 交换芯片并由 16 个 1.6 Tbps CPO 模块组成的 25.6 Tbps CPO 交换机; 2022 年锐捷网络将 CPO 模块从 1.6 Tbps 升级到 3.2 Tbps, 发布了 51.2Tbps 的 CPO 交换机;

资料来源:《大数据时代光电共封装技术的机遇与挑战》、中际旭创等公司公告、开源证券研究所

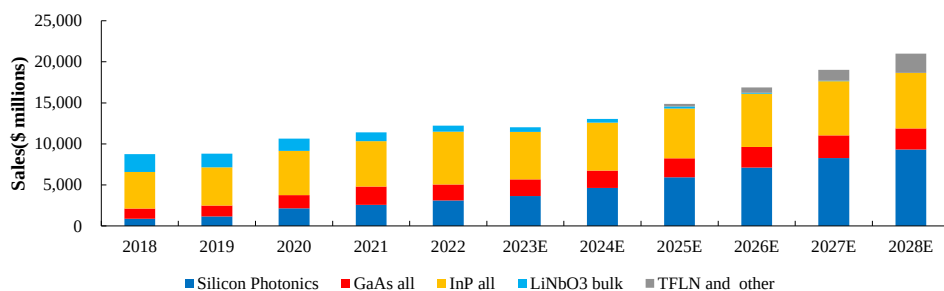
4、薄膜 LiNbO₃ 调制器: 高速率场景下结合硅光或大有可为

铌酸锂的优点是响应速度快、电光系数高, 适合做高速光调制器。铌酸锂这一特性源于其特殊的电光晶体结构。当施加电压时, 在泡克尔斯效应下铌酸锂由单轴晶体转变为双轴晶体, 因此电场可以大幅改变其光的折射率和相位, 产生良好的电光调制效果。传统的铌酸锂调制器受限于工艺水平, 尺寸相对 InP 和硅光较大, 在行业趋向小型化高集成的背景下开始为 InP 和硅材料调制器所替代。调制电压的大小取决于调制器调制臂的厚度和长度, 而厚度和长度决定了铌酸锂调制器结构的大小。想实现较低的调制电压驱动, 就需要降低厚度或者加长调制臂的长度。铌酸锂调制器厚度的降低由工艺所决定, 在厚度达到工艺极限的情况下为了降低电压只能选择加长调制臂。

图50: 传统铌酸锂调制器体积大, 基于硅基底的薄膜铌酸锂可解决体积难题


资料来源:《Thin-film Lithium Niobate Integrated Photonics on Silicon for Electro- and Nonlinear-optic Applications》, Honardoost, 2020

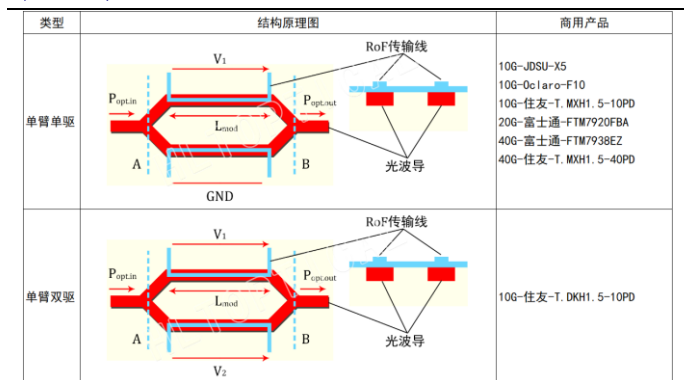
图51：根据不同材料体系光模块的市场份额变化，传统铌酸锂材料占比逐步下滑



数据来源：C114 通信网、开源证券研究所

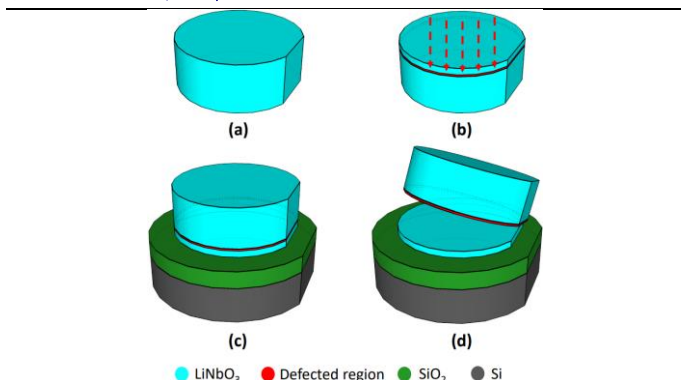
薄膜铌酸锂可通过 smart-cut 技术来制备,从而解决传统铌酸锂调制器体积过大的问题。为了从晶圆上得到铌酸锂薄膜,需要先使用 He 离子束轰击铌酸锂晶圆,控制注入的力度使得离子在距离晶圆表面适当的位置停留下来。完成离子注入后,再将铌酸锂 wafer 倒置扣在其他衬底的表面进行真空键合,加热后注入的离子散发,铌酸锂晶体上的薄层就渗入到硅衬底的表面。

图52：铌酸锂调制器按照驱动类型可分为单臂单驱和单臂双驱等



资料来源：深圳高光特光电科技、开源证券研究所

图53：薄膜铌酸锂晶圆制备工艺包括离子注入、薄膜键合、退火剥离和平坦化



资料来源：《Thin-film Lithium Niobate Integrated Photonics on Silicon for Electro- and Nonlinear-optic Applications》，Honardoost, 2020

通过薄膜铌酸锂材料的低损伤干法刻蚀工艺、硅与铌酸锂薄膜大面积键合工艺、硅和铌酸锂光波导的高效耦合方法以及大带宽行波电极的设计等关键技术,制备的薄膜铌酸锂调制器具有成本低、尺寸小、可批量化生产、CMOS 工艺兼容等优点,有望成为未来高速率场景下有竞争力的解决方案,目前国内还处于科研阶段,离产业化还有距离。

华中科技大学总结了薄膜铌酸锂目前面临的两个主要挑战。首先是低成本制备工艺。薄膜铌酸锂目前成本较高,而商用后的市场需求与单位成本息息相关。如何解决产业化后的成本问题是关键。其次是铌酸锂的晶圆尺寸。目前以 4 吋和 6 吋为主,8 吋和 12 吋能否实现产业化与后期的成本相关。

光库科技走在国内薄膜铌酸锂的产业化前沿。2019 年公司通过收购 Lumentum 铌酸锂系列高速调制器产品线相关资产切入赛道。公司开发的新一代薄膜铌酸锂光子集成技术,具有高速率、低功耗等优势。目前正重点开发 800G 及以上的薄膜铌酸锂相干和非相干调制器产品。预计将在未来几年推出薄膜铌酸锂高速调制器和模块系列产品,传输速率或达 800G 以上。

5、受益标的

在创新技术方面具有前瞻性布局的公司有望充分受益。LPO 技术受益标的为剑桥科技和新易盛；CPO 技术受益标的为中际旭创、光迅科技和锐捷网络；薄膜铌酸锂调制器受益标的为光库科技。

表8：重点公司盈利预测与估值

股票代码	公司简称	评级	最新收盘价（元）	总市值（亿元）	EPS			P/E		
					2023E	2024E	2025E	2023E	2024E	2025E
300308.SZ	中际旭创	买入	109.45	878.69	2.05	3.78	4.97	53.40	28.96	22.03
301165.SZ	锐捷网络	未评级	43.02	244.43	1.22	1.66	2.19	35.21	25.85	19.61
002281.SZ	光迅科技	增持	33.72	268.08	0.84	1.05	1.21	40.07	32.26	27.81
300620.SZ	光库科技	未评级	51.05	125.23	0.48	0.69	0.95	106.58	73.51	53.94
300502.SZ	新易盛	买入	44.73	317.55	1.21	1.92	2.48	36.95	23.34	18.06
603083.SH	剑桥科技	增持	52.40	140.49	-	-	-	-	-	-

数据来源：、开源证券研究所（注：收盘日期 2023 年 10 月 10 日，盈利预测均来自一致预期）

6、风险提示

电芯片及光芯片的供应链风险；云厂商资本开支不及预期的风险等。

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R4（中高风险），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（underperform）	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（underperform）	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。

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

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

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

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