

数据中心光模块技术及演进



Data Center Optical Module Technology and Its Evolution

张平化/ZHANG Pinghua, 王会涛/WANG Huitao,
付志明/FU Zhiming

(中兴光电子技术有限公司, 中国 南京 210012)
(ZTE Photonics Technology Co., Ltd, Nanjing 210012, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202401015

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240304.1751.002.html>

网络出版日期: 2024-02-28

收稿日期: 2024-01-16

摘要: 算力需求提升带动网络带宽成倍增加, 数据中心能耗呈指数型增长。针对低功耗、高带宽的技术需求, 硅光、共封装光学 (CPO) 等技术有望成为长期解决方案。硅光芯片采用光互联, 叠加 CPO 技术, 将光引擎与交换芯片共同封装, 在速率提高的同时大大缩减功耗。液冷技术、线性驱动可插拔光模块 (LPO)、相干技术及薄膜铌酸锂等技术成为光模块优化主要新趋势。LPO 在高线性度跨阻放大器 (TIA)/驱动芯片厂商大力推动下可快速落地。相干精简版解决方案在数据中心 2 km 以内传输距离方面有竞争优势。

关键词: 硅光; CPO; LPO; 薄膜铌酸锂

Abstract: Network bandwidth multiplies and power consumption of data centers increases exponentially. SiPh and co-package optics (CPO) may be long-term solutions around the technical requirements of low-power consumption and high-bandwidth. SiP chips can be optical interconnection. Using SiPh and CPO stacking techniques which can realize co-package of optical engines and switch chips, power consumption can be greatly reduced when transmission rate increases. Besides, liquid cooling technology, linear-drive pluggable optics (LPO), coherent technology, and thin film lithium niobate will be main development trends of optical modules. LPO should be quick landing with vigorous promotion of high-linearity trans-impedance amplifier (TIA)/driver manufacturers. Coherent lite solution becomes competitive when solving under 2 km transmission in data centers.

Keywords: SiPh; CPO; LPO; thin film lithium niobate

引用格式: 张平化, 王会涛, 付志明. 数据中心光模块技术及演进 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 89-98. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401015

Citation: ZHANG P H, WANG H T, FU Z M. Data center optical module technology and its evolution [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(1): 89-98. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401015

1 数据中心光模块技术创新点

作为数据存储和计算的中心, 数据中心在各个时期承载的主要功能有所差异。自 2000 年以来, 全球数据中心从计算中心发展到信息中心, 再发展至云计算中心, 目前正向算力中心演变。

1.1 算力时代下低功耗成为技术创新点

算力需求提升带动网络带宽成倍增加, 数据中心能耗呈指数型增长。设备厂商 Cisco 的数据显示^[1], 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增加约 8 倍, 光模块功耗增加 26 倍, 交换芯片串行器/解串器 (SerDes) 功耗增加 25 倍。

如何解决功耗问题成为下一代高速光互联应用的最大挑战。液冷技术成为数据中心突破节能瓶颈最有效的方式。液冷光模块是未来技术的一个亮点。

在光模块降耗的发展趋势下, 行业围绕驱动器、调制

器、激光器及电接口 4 个方面降低功耗。在驱动器方面, 如果采用线性驱动可插拔光模块 (LPO) 技术路线, 则可在数据链路中只使用线性模拟元件, 无需数字信号处理 (DSP) 或者时钟数据恢复 (CDR) 芯片, 从而降低 DSP/CDR 产生的功耗。在调制器方面, 薄膜铌酸锂基于自身较低的半波电压, 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。在激光器方面, 提高激光器的电光效率和耦合效率是两种降低功耗的途径。在电接口方面, 缩短交换芯片和光引擎之间的连接长度, 采用诸如近封装光学 (NPO) 和共封装光学 (CPO) 之类的超密集封装, 可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, 即硅光技术, 是以光子和电子为信息载体的硅基光电子大规模集成技术。

1.2 算力时代下高带宽需求是技术原动力

数据中心设备之间的连接由高速光接口提供, 并且根据

连接距离不同分为短距离（SR）、DR（指500 m距离）、远距离（FR）、长距离（LR）等规格，不同传输距离采用的技术方案也会有所不同。高速光接口的速率发展与数据中心的交换机容量以及SerDes技术的发展息息相关。交换机容量每2年翻一番，预计2030年会出现400 Tbit/s交换容量，单端口速率需要增长到3.2 Tbit/s。

根据接收技术的不同，光连接技术可以分为直检检测技术和相干检测技术。直检检测技术由于成本低、功耗低，在800GE之前，为数据中心高速光接口的主要技术。随着速率的提升，直检检测技术受到色散、四波混频等问题的影响，传输距离下降，使得相干技术下沉到数据中心成为可能。在800GE时代，IEEE 802.3dj针对10 km场景将定义相干和直检两条技术路径。但相干技术面临功耗高、成本高的挑战。未来3.2T时代，直检技术和相干技术将同时存在。直检检测技术在3.2T时代仍是主力技术路径之一。在单通道速率持续提升的同时，通过增加光纤或者波分复用技术来增加并行路数的方法也将持续发展。800GE时代不仅使用单通道100G技术，还使用了单通道200G的技术。3.2T时代将会依托单通道200G技术进行多路复用，当然也可能会发展单通道400G的技术。

2 光模块新技术演进路径

算力时代对光模块有着低功耗、高带宽的需求。目前业界技术演进方向如下：

1) 液冷光模块。冷板式液冷系统中的冷却液不与发热电子部件直接接触，所以目前常规光模块在冷板式液冷系统中应用时，一般无须考虑兼容性问题。浸没式和喷淋式液冷系统的冷却液都与散热器件直接接触。尤其是浸没式液冷系统，其直接将散热器件浸泡在冷却液里。而常规光模块的设计都基于风冷的应用场景，在浸没或喷淋的液冷环境下可能出现失效的情况，因此需要针对液冷环境的应用进行设计并规范相关技术要求，以保障液冷场景下的数据传输。

2) LPO方案。LPO通过线性直驱技术替换传统的DSP，将功能集成到交换芯片中，只留下驱动芯片（Driver）和跨阻放大器（TIA）芯片。LPO光模块中用到的Driver和TIA芯片性能也有所提升，从而实现更好的线性度。

3) CPO方案。CPO是指把光引擎和交换芯片共同封装在一起的光电共封装，没有采用可插拔光模块的形式。这种方式能够使得电信号在引擎和芯片之间更快地传输，缩短了光引擎和交换芯片间的距离，有效减少尺寸、降低功耗、提高效率。

4) 硅光技术。硅光技术是一种基于硅光子学的低成本、

高速光通信技术，利用基于硅材料的互补金属氧化物半导体（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（CPO/LPO架构下）的优势。

5) 薄膜铌酸锂技术。相比于传统体材料铌酸锂，薄膜铌酸锂波导可以制作亚微米尺度的光波导，不但提高了器件的集成度，而且大大提高了对光场的限制能力，增强了光场和铌酸锂材料的相互作用，因而可以实现超高电光带宽、超低驱动电压以及超低光学损耗。该技术有望在电光调制器领域掀起一场革命。

6) 相干下沉。在数据中心本身的范围内，强度调制直接检测（IM-DD）技术仍然占主导地位。认识到IM-DD在满足不断发展的需求方面的局限性，业界正在探索“相干精简版”解决方案（一种专门为较短距离的数据中心连接而设计的相干技术方案）。

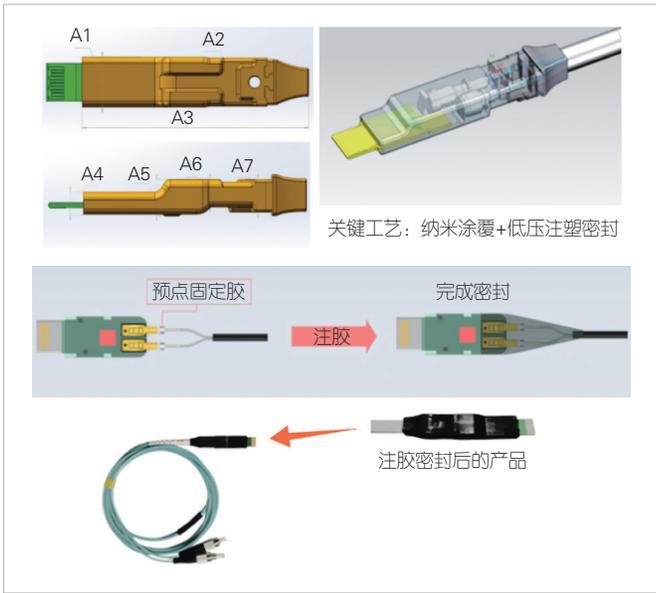
7) 光进光出（OIO）技术。OIO是一种基于芯片的光互连解决方案，与计算芯片（中央处理器、图形处理器、张量处理器）集成在同一封装中，旨在实现分布式计算系统中它们之间的无缝通信（跨板、机架和计算行），其带宽密度、能源成本和延迟与封装内的电气互连相当。具体产品形态包括板载光学（OBO）、NPO、CPO及未来可能部署的光电子集成电路（OEIC）。OIO有望提供百倍以上的通道密度，每个通道可以提供百倍以上的带宽，很可能成为交换芯片向100T、200T乃至更高容量演进的必要技术。

2.1 液冷光模块

当数据中心中采用浸没或者喷淋式液冷系统时，板上芯片封装（COB）工艺的光模块在液体环境中无法直接使用。在液冷数据中心中宜使用蝶形封装BOX和同轴封装TO-CAN两种气密性封装光组件，并进行模块的整体液密封装，或者对光电部分COB封装的光模块进行全塑封设计（液密封装），以有效防止液冷环境中的冷却液对光模块光路部分造成干扰。图1展示了易飞扬液冷光模块的密封工艺，该工艺主要通过纳米涂覆和低压注塑密封实现^[2]。

为满足高性能计算和通信应用需求，提高系统性能、能效、可靠性，液冷光模块技术还需要在以下方面实现突破：

- 1) 液冷光模块的技术要求；
- 2) 液冷光模块的封装方式和密封性技术；
- 3) 液冷光模块的液冷测试环境和可靠性测试环境的配置、搭建以及对应测试方法；
- 4) 液冷光模块的运维管理相关技术；
- 5) 液冷光模块的布线连接技术。



▲图1 易飞扬 25G 液冷光模块示意图^[2]

目前，市场上已经有多个厂家发布液冷光模块产品。易飞扬发布了支持浸没式或者喷淋式液冷散热方案的液冷光模块，涵盖 25 Gbit/s、100 Gbit/s 和 200 Gbit/s 速率；海光芯创也在 2023 年的光连接大会现场上演示了自研的 200G QSFP56 SR4 液冷光模块；光迅科技已经可以提供全套的液冷光模块产品，目前已经批量交付 100 Gbit/s 液冷光模块；海信宽带的 25G Pigtail-SFP28 封装液冷光模块于 2023 年已批量生产。另外，华工正源、中天科技也在进行液冷光模块的研究。

2.2 LPO 方案

虽然 DSP 具有数字时钟恢复功能和色散补偿功能，能够以较低的误码率实现信号恢复，但它也带来了较高的功耗和成本开销。例如，在 400G 光模块中用到的 7 nm DSP，其功耗约为 4 W，占到了整个模块功耗的 50% 左右。从成本的角度来看，400G 光模块中，DSP 的物料清单 (BOM) 成本约占 20%~40%。为了降低功耗和成本，并满足高

速、高密度光通信连接，以及光网络灵活性和可升级性的需求，LPO 应运而生。LPO 方案不采用 DSP/CDR 芯片，而是将相关功能集成到设备侧的交换芯片中。如图 2 所示，该光模块只留下了线性度较高的 Driver 和 TIA，并分别集成连续时间线性均衡 (CTLE) 和均衡 (EQ) 功能，用于对高速信号进行一定程度的补偿^[3]。

LPO 具有突出的优势：低功耗、低成本、低延时、易维护。具体表现在：

1) 低功耗。去掉 DSP 后，光模块功耗大幅度下降。相比于可插拔光模块，LPO 的功耗下降约 50%，这与 CPO 的功耗接近。Arista 采用 Linear-Drive，使硅光、垂直腔面发射激光器 (VCSEL)、薄膜铌酸锂不同光学方案的功耗均下降 40% 左右。

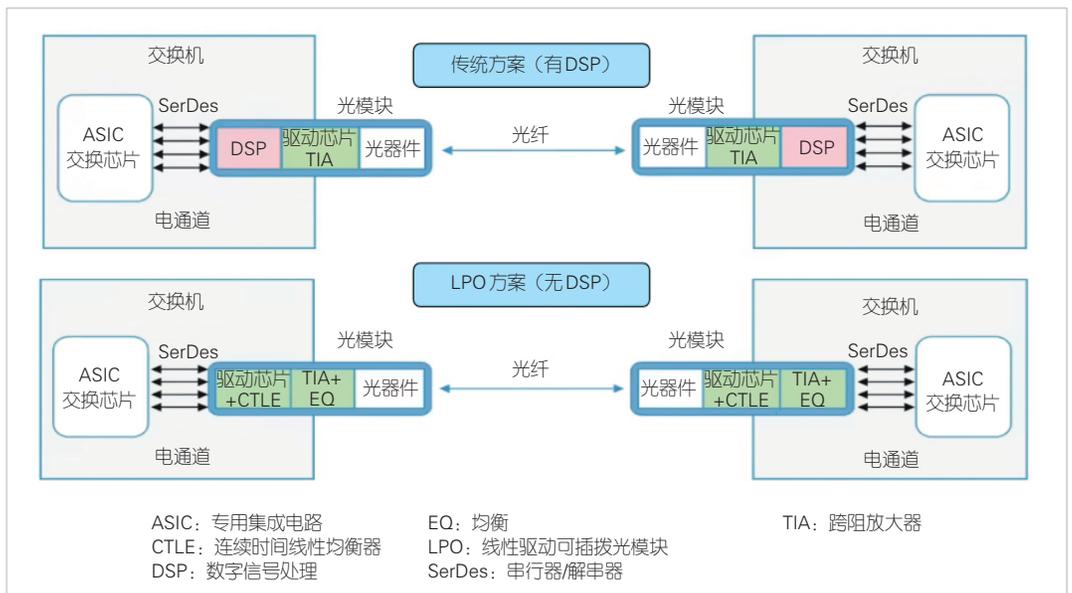
2) 低成本。DSP 的 BOM 成本约占 20%~40%。去除 DSP 后，虽然 Driver 和 TIA 集成了 EQ，局部成本略有增加，但整体成本还是下降的。以 800G 光模块为例，使用 LPO 系统可以使总成本下降大约 8%。

3) 低延时。去除 DSP 会使得光模块减少一个处理过程，数据的传输时延也随之下降。这对人工智能 (AI) 计算和超级计算场景来说尤为重要。

4) 易维护。在 LPO 方案中，光模块的封装形式没有显著改变，采用可插拔设计，这样方便插入和拔出光学模块，使得光学连接更加灵活便捷。这种设计简化了光纤布线和设备维护，提高了系统的可管理性和可维护性。

然而，当前 LPO 仍存在两大缺点：

1) 通信距离短，应用场景受限制。去除 DSP 后会导致



▲图1 LPO 光模块示意图^[2]

ASIC: 专用集成电路
CTLE: 连续时间线性均衡器
DSP: 数字信号处理
EQ: 均衡
LPO: 线性驱动可插拔光模块
SerDes: 串行器/解串器
TIA: 跨阻放大器

系统的误码率提升，进而导致传输距离变短。

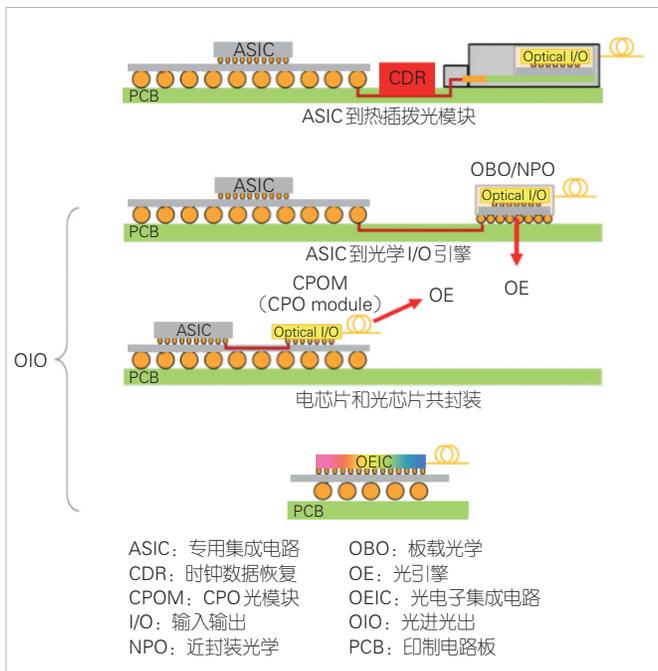
2) 标准化刚起步，互联互通存在挑战。目前由于交换机厂商不倾向于改动交换机，因此光模块需要适应各个通路之间不同的情况。

这里我们给出全球主要企业的LPO部署进度：英伟达披露了在其内部人工智能集群中部署LPO的计划，将在2024年量产LPO光模块；Meta公司预计在2024年上半年导入LPO技术；Arista公司在2023年光纤通信会议和展览会(OFC 2023)上首次展示了有关降低LPO功耗的数据，在网络研讨会上分享了他们在LPO方面的最新研究结果；新易盛、剑桥科技等已发布相关产品；中际旭创已进行相关产品开发；海信宽带已推出800G线性互联光缆。

2.3 CPO方案

CPO是在成本、功耗、集成度各个维度上优化数据中心的光电封装方案。如图3所示，CPO将光模块不断向交换芯片(ASIC芯片)靠近，缩短芯片和模块之间的走线距离，最终将光引擎和电交换芯片封装成一个芯片^[4]。在理想情况下，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。如图4所示^[5]，按照物理结构分类，CPO可分为3种技术形态：2D平面CPO、2.5D CPO和3D CPO。

1) 2D封装的CPO技术



▲图3 CPO封装示意图^[4]

基于2D封装的CPO技术是将光子集成电路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。电子集成电路EIC和光子集成电路PIC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) 基于2.5D封装的CPO技术

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3种技术路线。

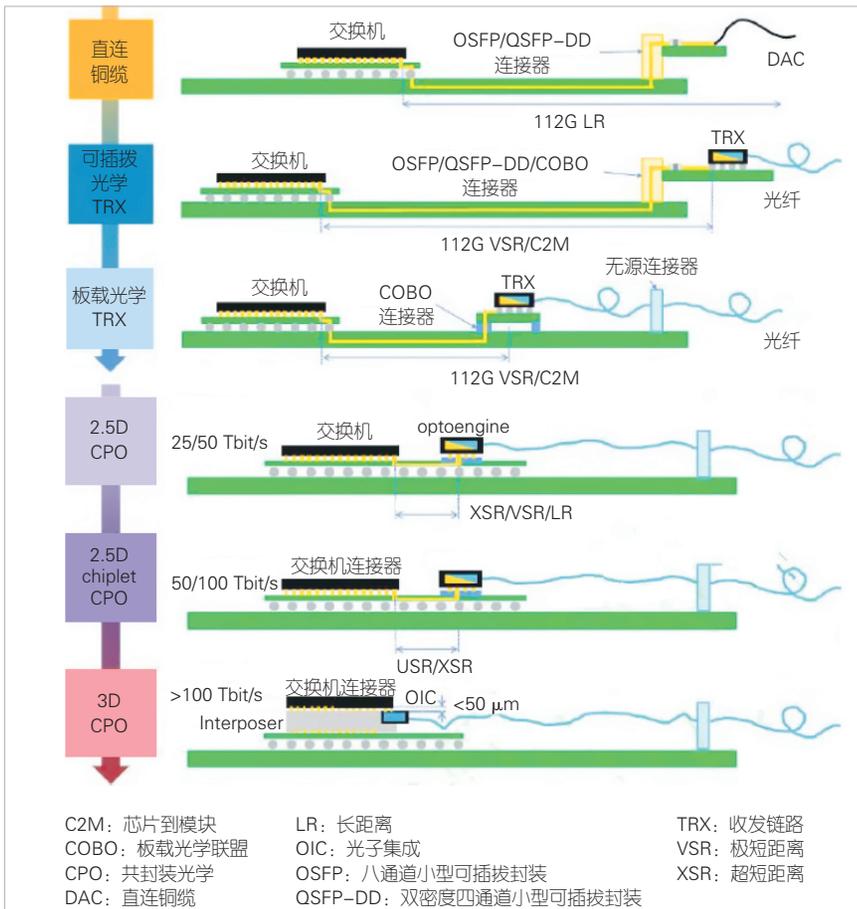
3) 基于3D封装的CPO技术

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。

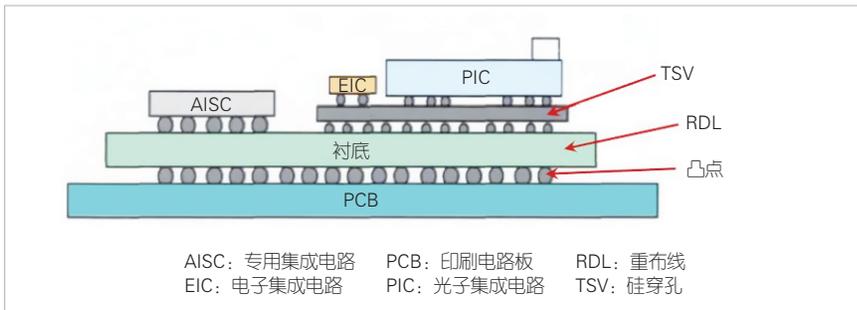
CPO技术将增加先进封装工艺需求。如图5所示，目前封装工艺是限制CPO技术发展的主要因素。CPO技术在封装过程中会用到硅穿孔(TSV)、凸点(Bumping)和重布线(RDL)等先进封装技术^[6]，对传统光模块封装厂商提出新的挑战。

CPO目前处于产业化初期，在工艺、仿真以及测试等方面仍面临很多挑战。封装工艺能力是制约CPO发展的重要因素，涉及TSV、RDL等多种先进复杂的封装技术。每一种封装技术都有利弊，因此我们需要不断探寻最可靠的方案。散热问题对于CPO来说是一个重大挑战。CPO中放置光器件和电器件的空间十分有限，并且光器件对热特别敏感。CPO标准工作组做的模拟仿真表明，在风速5m/s的条件下，当采用16个的CPO模块和1个开关芯片模型设计时，开关芯片的温度达到151.76℃，几乎无法正常工作。主流的热可插拔模块维修简单，但作为不可插拔的CPO封装技术维修难度较高，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光学器件的通道密度与以往任何子组件不同，这意味着现有的测试解决方案需要改进。

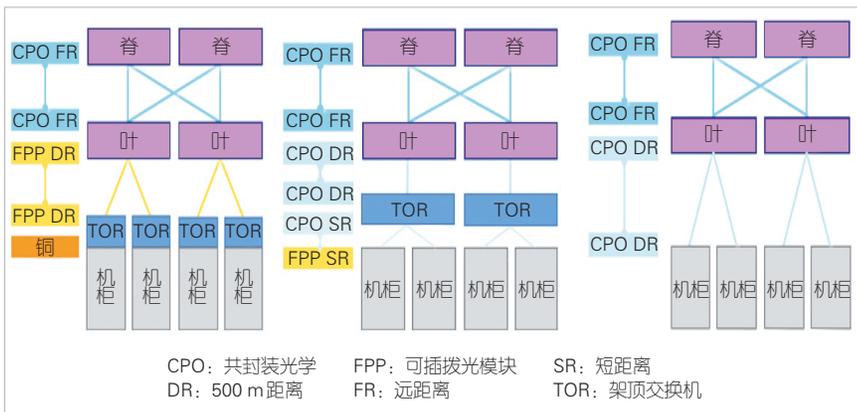
CPO的发展需要产业链协同推进，这将考验光模块/光引擎厂商的长期综合实力。如图6所示，CPO的技术路线优化本质上是对整个网络架构的优化^[5]，需要数据中心整体产



▲图4 CPO技术路线^[5]



▲图5 基于带TSV的PIC转接板的共封装光学(CPO)^[6]



▲图6 CPO与数据中心网络架构优化路径^[5]

产业链的协同推进。其中，在现有光模块产业链的基础上，有些环节还需要交换芯片及设备厂商、各元器件厂商共同参与。因此CPO的发展本质上是对光模块/光引擎厂商综合实力的长期考验。

2020年以来，CPO逐渐从学术研究成果转变为市场需求产品。如表1所示，博通、Cisco、Marvell等行业内龙头企业均已推出多款基于CPO样品，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，以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。中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。中国计算机互连技术联盟（CCITA）牵头的CPO标准是当前中国唯一原生的CPO技术标准。该标准旨在结合目前全球光互连技术发展，联合中国光模块、光收发芯片、电驱动放大芯片、光源、连接器等厂商，共同打造更加适合中国的CPO标准。光迅科技、中际旭创、华工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。

2.4 硅光技术

相对于传统光模块，硅光模块在高速率领域具有高集成度、低成本、低功耗的显著优势。硅是用量最大的半导体晶圆材料，具有低成本和加工工艺成熟的优势。硅光基于硅和硅基衬底材料，通过CMOS工艺进行光器件开发和集成。硅光模块产生的核心理念是以光代电，即利用激光束代替电子信号进行数据传输。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。如图7所示，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

▼表1 全球主流企业的CPO技术研究进展

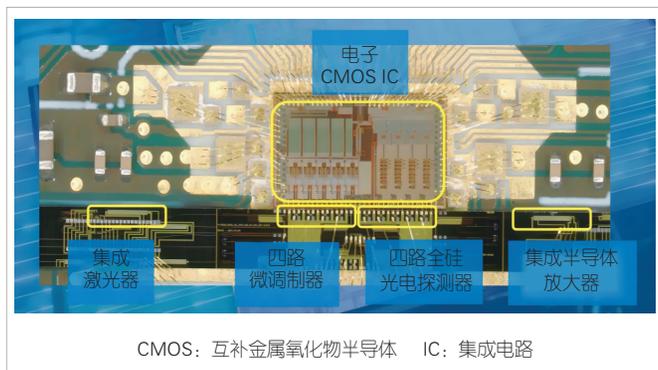
公司	进展情况
博通	2023年10月联合 Micas Networks(云母网络)在美国 OCP 全球峰会上展示了基于博通的 Bailly CPO 首款 51.2T (CPO)交换机。该产品的每个光引擎为 3.2T(2×8 PCS),集成 CMOS 电芯片和 MUX/DMUX,整体相对领先
Cisco	2023年3月在 OFC 2023 上展示基于 Silicon One G100 ASIC(25.6T)CPO 交换样机。51.2T+CPO 的 DEMO 样机还在开发中,预计会在 OFC 2024 上展示
英伟达	积极推进芯片光互连策略,通过战略投资 Ayar Labs、TSMC 构建硅光平台、芯片共封装能力,计划 2025 年左右通过 CPO 技术实现 GPU 芯片与 NVSwitch 芯片之间的光连接
Marvell	2022 年推出基于 2.5D CPO 技术的 12.8 Tbit/s Teralynx7 交换机,2023 年推出由超低延迟 Marvell Teralynx10 51.2 Tbit/s 交换芯片和业界首款 PAM4 1.6 Tbit/s 光电平台 Marvell Nova 组成的新平台
光迅科技	在 OFC 2023 上发布可以支持 3.2T CPO 光引擎的自研光源模块
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
锐捷网络	2021 年发布首款基于 112G SerDes 交换芯片和由 16 个 1.6 Tbit/s CPO 模块组成的 25.6 Tbit/s CPO 交换机;2022 年将 CPO 模块从 1.6 Tbit/s 升级到 3.2 Tbit/s,并发布了 51.2 Tbit/s 的 CPO 交换机

CMOS: 互补金属氧化物半导体
CPO: 共封装光学
DMUX: 解复用器
DR: 500 m 距离

ER: 加长距离
FR: 远距离
GPU: 图形处理器
LR: 长距离

MUX: 复用器
OFC: 光纤通信会议和展览会
PAM4: 四电平脉冲幅度调制
SerDes: 串行器/解串器

SR: 短距离
ZR: 最长距离



▲图7 Intel硅光模块样品示意图

子材料占比上升。光模块价值向硅光芯片、硅光引擎转移。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降低,对下游封装厂或制造商的要求也会降低。

硅光技术的发展可以分为4个阶段。第1阶段,硅基器件逐步取代分立元器件,即将硅作为光通信底层器件,并达到工艺的标准化水平。第2阶段,集成技术从耦合集成向单片集成演进,实现部分集成,再通过不同器件的组合,把这些器件集成不同的芯片。第3阶段,光电一体技术融合,实现光电全集成化。把光和电都集成起来,可实现更加复杂的功能。第4阶段,硅光技术实现可编程芯片。这一阶段器件能够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。目前硅光技术已经发展到了第2个阶段。硅光子核心器件主要是以硅半导体材料的光有源及无源器件:硅基激光器(负责将电信号转化成光信号)、硅基光调制器(负责将光信号带宽提升)、

硅基光探测器(负责将光信号转化成电信号)、光波导(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。

1) 硅基激光器。硅基激光器指集成在以硅为衬底的光芯片上的激光器。常用的硅基激光器按照结构可分为 VCSEL 芯片、分布式布拉格反射激光器 (DBR) 芯片、分布式反馈激光器 (DFB) 芯片和电吸收调制激光器 (EML) 芯片。制作材料主要以 III-V 族半导体材料为主。对于 III-V 族激光器与硅光芯片的耦合,主流设计方案主要有片上倒装焊集成、异质键合集成和直接外延生长集成。异质键合集成和直接外延生长集成是未来实现硅光大规模生产的可行方案。

2) 硅光调制器。硅光调制器指集成在硅光芯片上的调制器。硅光调制器集成度高、消光比较高、损耗低、驱动电压小,但线性度差,因此目前业界多使用混合集成调制器。通过异质键合、外延等技术,将成熟的铌酸锂调制器、InP 调制器等集成到硅基上,可实现微米级大小,调制效率为全硅调制器的 5 倍以上。

3) 硅基光探测器。光电探测器将接收的光信号转变为电信号。由于硅对 1.1 μm 以上的光波透明,单体硅无法制作探测器。目前集成在硅基片上的高频探测器主要有混合集成 III-V 族和硅锗混合探测器。前者耦合效率高、灵敏度高、响应快;后者性能优越,器件制备技术与 CMOS 工艺兼容,更适合大规模集成,是目前的主流方案。

就硅光技术在通信设备中的具体应用而言,目前除了激光器外,光模块中大部分器件的制造都已实现,典型的如光波导、外调制器件、雪崩光电二极管 (APD) 接收器等。不

过由于硅光技术产业尚处于起步阶段，业内并未形成权威的行业规范与技术标准，各主流厂商采用硅光技术设计生产元器件时采用的技术路线不尽相同，因此最终的技术方案还有待优化完善。

如图8所示，从工艺角度来看，硅光可以分成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。单片集成是指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。混合集成是指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。目前来看，光器件如波分复用器、变换调谐器等已经可以实现单芯片集成，而光模块尚需要混合集成。

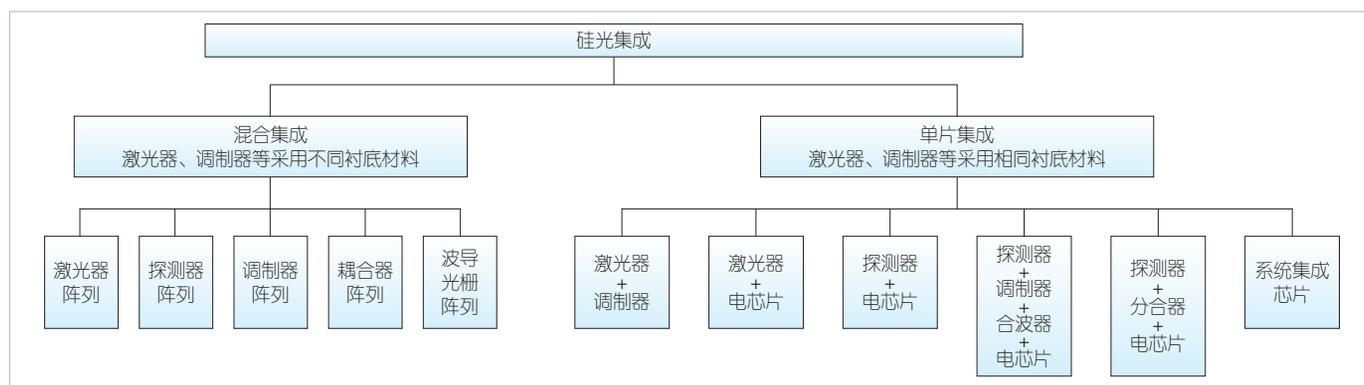
虽然硅光集成技术具有巨大的市场前景，但目前仍然面临诸多挑战：

1) 硅光器件性能问题。目前的硅光技术已可以替代很多传统的光器件，但是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技术的普及以及在数据中心场景中的应用。

2) 测试流程复杂。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，以避免后期由残次芯片造成的不必要的封装成本。

3) 标准化方案缺乏。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。这使得硅光技术大规模产业化变得更加困难。

硅光技术主要布局公司如表2所示。当前，台积电计划携手博通、英伟达等共同开发硅光子技术、共同封装光学元件等新产品。制程技术从45 nm延伸到7 nm。台积电已组建一支由约200名专家组成的研发团队，专注于利用硅光子技术开发未来芯片。



▲图8 硅光集成方案

▼表2 主流公司布局硅光技术对比

公司	硅光技术进展
Marvell	2022年推出业界首款800 Gbit/s多模平台解决方案,同年量产用于数据中心的400G DR4硅光子平台
中际旭创	400G硅光模块已进入市场导入阶段,正在接受海外客户认证;800G硅光模块已开发成功,并向海外客户送样;400G/800G的硅光模块已采用自研的硅光芯片
熹联光芯	100G硅光模块已实现规模化量产,400G光学引擎及硅光模块正处于多个客户认证测试中;在张家港经开区建设中国第一条硅光芯片及封测生产线,项目总投资达20亿元
华工科技	2021年400G硅光芯片已实现量产,2022年发布800G硅光芯片并实现小批量生产
光迅科技	2018年发布100G硅光收发芯片并正式投产使用,200G/400G硅光数通模块已经开始出货,800G产品已开始向客户送样
华为	2012和2013年分别收购英国光子集成公司CIP和比利时硅光子公司Caliope,2019年后累计投资10余家光芯片产业链相关企业,比如熹联光芯、微源光子、长光华芯、芯视界等

2.5 薄膜铌酸锂技术

电光调制器是超高速数据中心和相干光传输的核心光器件。通过调制将通信设备中的高速电子信号转化为光信号，电光调制器成为光通信系统中不可或缺的一环。如表3所示，目前光调制的技术主要基于硅光、磷化铟和铌酸锂3种材料的电光调制器。其中，铌酸锂电光系数显著高于磷化铟，而硅没有直接电光系数，因而铌酸锂调制器是高带宽光电信息处理系统中的关键器件。传统铌酸锂电光调制器为体材料铌酸锂调制器。体材料铌酸锂调制器具有带宽高、稳定性好、信噪比高、传输损耗小、工艺成熟等优点，但在传输速率需求不断提升的形势下，体材料铌酸锂调制器也在一些性能上遭存在瓶颈，而且体积较大，不利于集成。新一代薄膜铌酸锂调制器芯片技术将解决这些问题。铌酸锂材料具有“光学硅”之称。通过最新微纳工艺制备出的薄膜铌酸锂调制器，具有高性能、小尺寸、可批量化生产且与CMOS工艺兼容等优点。

与磷化铟相比，薄膜铌酸锂在长距离/超长距离的产品封装上具有优势。它可以采用非气密封装，从而降低成本，而磷化铟则需要气密封装。在性能方面，薄膜铌酸锂对比硅光和磷化铟都有明显优势。铌酸锂薄膜调制器利用容性电极和石英衬底，同时实现低微波损耗和光电同步传输。容性行波电极不仅可以降低金属微波损耗，还可以降低微波速率，使光波和微波在调制区域以相同的速率传输，光和电达到完

美匹配。如图9所示，当前800G主流方案包括DR8/SR8/2FR4等方案。无论是单模还是多模方案，都使用单通道100 Gbit/s速率。向单波200/400 Gbit/s速率演进时，薄膜铌酸锂的大带宽优势将更加突出。未来对于成本、功耗、性能等要求会越来越高。薄膜铌酸锂调制器凭借功耗、成本、性能等方面的优势，有望迎来快速发展。

薄膜铌酸锂目前主要面临两个方面的挑战：1) 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。因此，如何解决产业化后的成本问题是关键。2) 铌酸锂的晶圆尺寸。目前铌酸锂的晶圆尺寸以4英寸（1英寸=2.54 cm）和6英寸为主。8英寸和12英寸能否实现产业化与后期的成本相关。

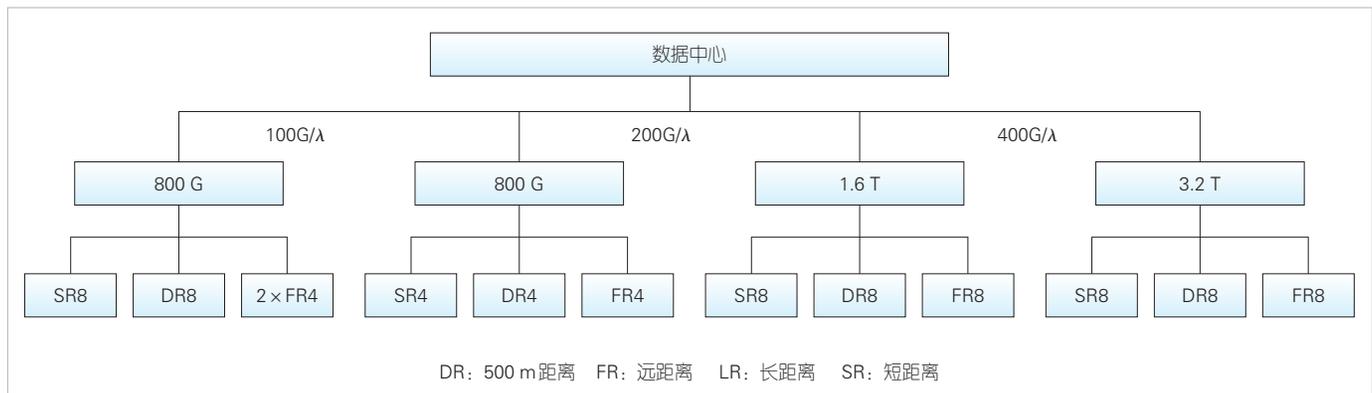
考虑到薄膜铌酸锂材料优异的性能，如表4所示，当前主要光模块厂商均已布局铌酸锂技术。

2.6 相干下沉

相干技术是长距光传输采用的技术。由于直检技术面临色散、四波混频等挑战，传输距离不断缩小。业界出现了相干技术下沉到数据中心互联的发展趋势。相干技术传输性能好，可以灵活地采用光数字信号处理（oDSP）技术进行色散补偿，但是成本和功耗较高。为了降低成本和功耗，许多高校及企业提出了Coherent-Lite的概念，并提出O波段相干、灰色（固定波长）激光器和自相干。

▼表3 电光调制器3种材料方案对比

材料方案	主要应用场景	优势	劣势
硅光方案	数据中心内部互联光模块	尺寸小,易集成,成本低,能耗低	调制性能一般,带宽低,插入损耗大
磷化铟方案	中距和长距光通信网络收发模块	尺寸小,集成度高	成本高,良率低,功耗高,偏振器件无法集成
铌酸锂方案	100 Gbit/s以上的长距骨干网相干通信,单波100/200 Gbit/s的超高速数据中心	电光性能好,带宽高,稳定性好,信噪比高,传输损耗小,工艺成熟	传统型尺寸大,不利于集成



▲图9 薄膜铌酸锂应用场景

▼表4 主流公司布局铌酸锂技术对比

公司	铌酸锂技术进展
新易盛	在OFC大会上展示最新800G光模块,为800G光模块功效提供了新的标准参考;DSP直接驱动薄膜铌酸锂,实现了出色的光发射性能
中际旭创	将根据市场需求开发相关产品
联特科技	比较看好硅光和薄膜铌酸锂两项技术,会并行开发这两项技术;公司年报已披露基于薄膜铌酸锂调制技术的800G光模块产品
光迅科技	正在持续研发中,目前已有小批量的供货
铌奥光电	开发的薄膜铌酸锂调制器芯片已实现超低驱动电压($V_{\pi} < 1V$)和超大带宽(最新记录为260 Gbaud),产品功耗较硅光调制器等显著降低

DSP: 数字信号处理 OFC: 光纤通信会议和展览会

1) O波段相干。目前数据中心内部光信号传输的波长都是O波段,而传统的相干光通信是C波段。C波段最大的好处是光纤功率损耗最小,所以非常适合长距离的光纤传输;但同时C波段的光纤色散比较大,需要用DSP进行色散和各种损伤的补偿。而在O波段,虽然光纤功率损耗变大了,但好在传输距离并不远,功率衰减不多,所以也不需要光放大器。同时在O波段光纤的色散最小,这样的话就不需要DSP来补偿色散。因此,DSP的功能可以进一步简化,这使得系统成本和功耗进一步降低。

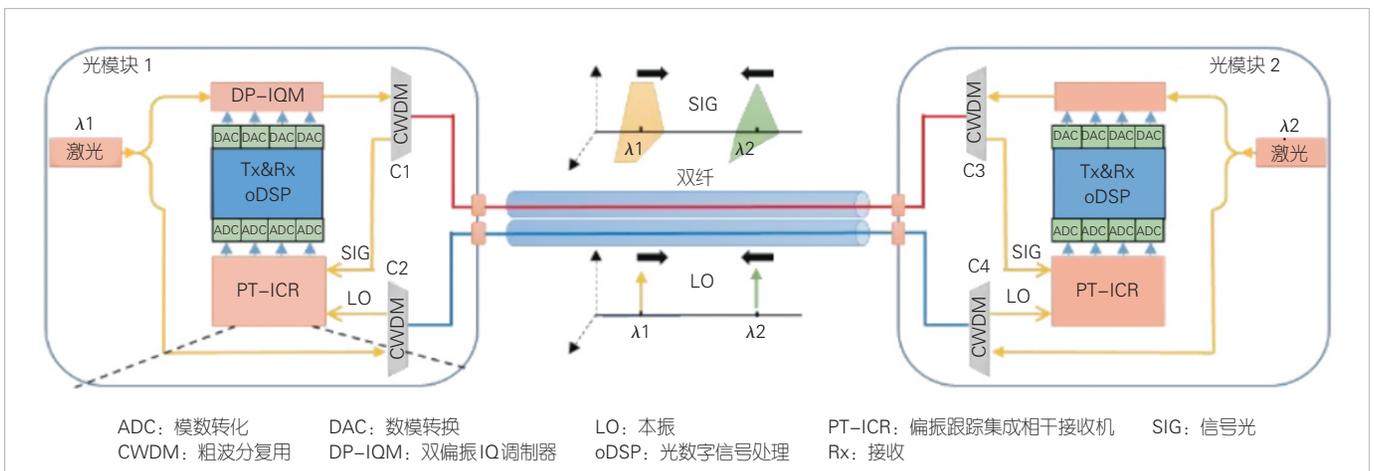
2) 灰色(固定波长)激光器。由于数据中心内部架构不需要在光纤中进行密集的波长传输,因此可以使用灰色(固定波长)激光器。它的使用消除了对波长调谐以及相关控制电路和算法的需求,简化了实施过程,降低了操作的复杂性。

3) 自相干。传统的相干方案是异源相干,本振(LO)光要求与信号载波频率相位对齐,而自相干是同源相干,即一根光纤双向传输数据,一根光纤双向传输LO,如图10所示^[7]。这个架构的好处是:不需要使用昂贵的激光器,无温控热电制冷器(TEC),无波锁,可有效降低模块成本和功耗。此外,接收机信号不存在频偏和相噪问题,DSP可以得到进一步简化。

随着传输速率提升至800G,相干技术方案在80 km传输距离的基础上将进一步向10 km等更短距离拓展应用。当传输速率达到1.6T时,相干会进一步下沉到2 km。IEEE 802.3正在标准化800G/1.6T以太网接口,包括单通道100G和200G两路不同传输距离的接口。值得一提的是,2023年,IEEE 802.3dj就800G 10 km应用是采用强度调制和直接检测(IMDD)还是采用相干技术进行了激烈讨论。最终,IEEE 802.3dj决定为800G 10 km设定两个项目目标,分别采用不同的技术解决方案。可以看到,随着单通道速率的提升,相干技术正在不断下沉,相关应用场景也在不断拓展。

3 结束语

液冷技术具备超高能效、超高热密度等优点,是解决数据中心散热压力和节能挑战的重要途径。液冷光模块是大势所趋。LPO具有短距离、低功耗、低时延等特性,能够适配AI计算中心。由于可以直接应用于目前成熟的光模块供应链,LPO在高线性度TIA/Driver厂商的大力推动下或可快速落地。CPO方案通过交换机光电共封装降低成本和功耗,是未来实现高集成度、低功耗、低成本、超高速率模块应用方面是综合最优的封装方案。虽然硅光产品的研发投资和销售额仍小于III-V族材料,在产品性能、工艺、成本等方面仍



▲图10 自相干示意图^[7]

面临一定挑战，但基于其在成本和功耗方面的优势，硅光技术有望成为未来光器件的主流技术。薄膜铌酸锂是超高速数据中心和相干光传输的核心光器件，具有高性能、低成本、小尺寸、可批量生产且与CMOS工艺兼容等优点，是未来高速光互连极具竞争力的解决方案。当数据中心内部连接的要求超过1.6T并走向3.2T时，色散损伤和链路预算将对直接检测（IM-DD）解决方案提出更高要求。因此，相干精简版解决方案有望成为大批量3.2T数据中心内互联应用的有力竞争者。

致谢

感谢中兴光电子技术有限公司沈百林、熊孝海等专家对本研究的帮助！

参考文献

- [1] Cisco. 2020 Cisco and/or its affiliates [EB/OL]. [2024-01-15]. https://www.cisco.com/c/dam/global/en_sg/partners/assets/networking-academy-cybersecurity/Josh-mccloud-becybersmart-presentation.pdf
- [2] 中国通信标准化协会. 用于液冷系统中的光模块研究报告 [R]. 2021
- [3] 西南证券人工智能专题研究: LPO光模块 [EB/OL]. [2024-01-15]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202312061613416719_1.pdf?1701854056000.pdf
- [4] IPEC. IPEC 成功立项 OIO 研究项目, 探索下一代数据中心交换芯片技术演进 [EB/OL]. [2024-01-15]. <https://www.ipec-std.org/zh/5219.html>
- [5] MINKENBERG C, KRISHNASWAMY R, ZILKIE A, et al. Co-packaged datacenter optics: opportunities and challenges [J]. IET optoelectronics, 2021, 15(2): 77-91. DOI: 10.1049/ote2.12020
- [6] 卞玲艳, 曾艳萍, 蔡莹, 等 大数据时代光电共封技术的机遇与挑战 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(11). DOI: 10.3788/LOP231348
- [7] GUI T, WANG X F, TANG M, et al. Real-time demonstration of

600 Gbit/s DP-64QAM selfomodyne coherent bi-direction transmission with uncooled DFB laser [C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2020, IEEE. DOI: 10.1364/OFC.2020.Th4C.3

作者简介



张平化, 中兴光电子技术有限公司工程师; 主要从事光模块规划工作。



王会涛, 中兴光电子技术有限公司规划总工; 长期从事光通信系统、光电子器件产品和技术的研究及规划工作; 曾获得中国通信学会科技进步奖一等奖、教育部技术发明奖二等奖; 拥有专利10余项。



付志明, 中兴光电子技术有限公司工程师; 主要从事光模块规划工作。