

相干光收发器件未来技术演进



Future Technology Evolution of Coherent Transceiver Optical Devices

沈百林/SHEN Bailin, 王会涛/WANG Huitao

(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.202305013

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20231016.0928.008.html>

网络出版日期: 2023-10-17

收稿日期: 2023-08-12

摘要: 相干光收发器件是相干光通信系统的核心器件。相干光通信系统朝着更大容量、更长传输距离、更低成本方向发展, 同时相干光收发器件面临一系列新挑战, 包括高带宽、多波段、高性能、高可靠性、高集成度、低功耗。相干光收发器件的未来技术演进包括新材料光芯片、先进封装技术、多路集成架构等方面。光芯片将存在多种材料, 包括硅光、磷化铟和薄膜铌酸锂, 以及基于硅光平台的异质集成技术。光器件将参考采用微电子行业的先进封装技术, 以减小芯片间高速电信号的传输距离, 降低成本, 保证封装可靠性。器件级多路集成可满足未来多波传输架构的需求。

关键词: 相干通信; 光器件; 技术演进

Abstract: Coherent transceiver optical devices are the key devices of coherent optical communication systems. With the development of coherent optical communication systems towards larger capacity, longer transmission distance, and lower cost, coherent transceiver optical devices face a series of new requirements and challenges, including high bandwidth, wide spectral band, high performance, high reliability, high integration, and low power consumption. Future technology evolution of coherent transceiver optical devices includes: new material optical chips, advanced packaging technologies, and multi-channel integrated architectures. A variety of materials will exist in optical chips, including silicon photonics, indium phosphide and thin-film lithium niobate, as well as heterogeneous integration technologies based on silicon photonics platforms. The optical device will refer to the advanced packaging technology of the microelectronics industry to reduce the high-speed electrical signal transmission distance between chips, and ensure package reliability. The device-level multi-lane integration meets the needs of future multi-wavelength transmission architectures.

Keywords: coherent communication; optical components; technology evolution

引用格式: 沈百林, 王会涛. 相干光收发器件未来技术演进 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(5): 82-86. DOI: 10.12142/ZTETJ.202305013

Citation: SHEN B L, WANG H T. Future technology evolution of coherent transceiver optical devices [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(5): 82-86. DOI: 10.12142/ZTETJ.202305013

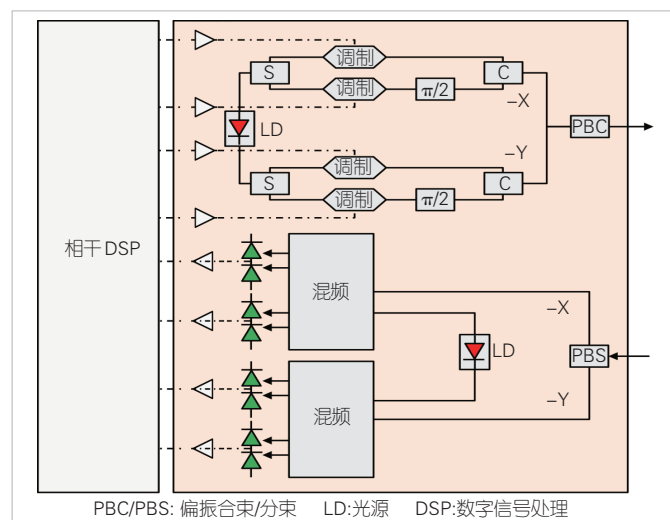
1 相干光收发器件

1.1 具体概念

相干光收发器件^[1-3]是光芯片、电芯片的集成组合。发送部分实现光信号的偏振复用正交调制功能, 包含电信号驱动功能; 接收部分利用本振信号和输入信号混频干涉, 实现双偏振态信号检测和电信号放大功能。相干光收发器件的工作原理如图 1 所示。

1.2 在系统中的位置

波分复用系统包含光转发单元、复用/解复用单元、光纤、光放单元、可重构分叉复用单元, 以及管理单元。光转发单板实现业务信号到波分复用光信号的光电光转换。相干



▲图1 相干光收发器件的工作原理

光模块位于光转发单板的线路侧，其核心是相干光收发器件，如图2所示。

1.3 需求和挑战

1) 高波特率

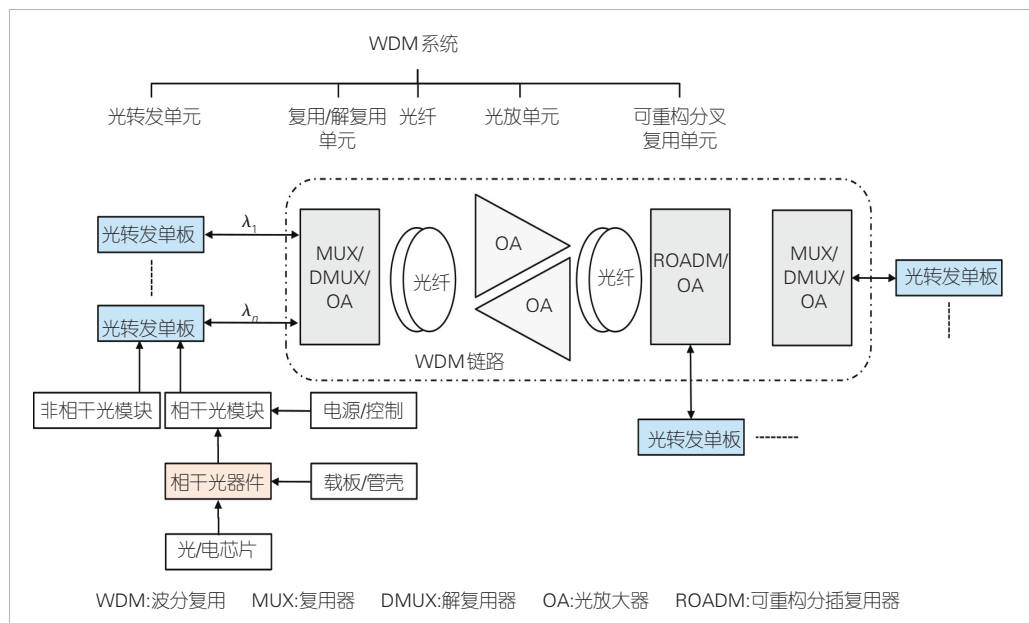
自从相干通信技术实现商用以来，信号波特率按照大约3年一代的方式进行演进，如图3所示。数据中心互联的ZR需求（如400ZR/800ZR）使得64、128 GBd相干光收发器件成为主流。128 GBd之后的速率已接近物理极限，技术迭代有可能放缓。业界对下一代信号波特率的观点不统一：主要集中在1.6T-ZR1的波特率选择（192 GBd和256 GBd）方

面。其中，256 GBd方案的传输能力强于192 GBd方案，但256 GBd方案存在技术挑战，如数字信号处理（DSP）芯片模数转换（AD）/数模转换（DA）的采样率和带宽，以及模拟电芯片的带宽。同时，256 GBd方案需要配置275 GHz的通道间隔，并且需要扩展波段才能提升系统传输容量；而192 GBd方案只需要配置200 GHz的通道间隔。在G.654.E光纤上，192 GBd方案配合PS-16QAM调制以及更强的前向纠错码，可以实现1000 km以上的传输，满足骨干网大部分应用需求，并且系统传输容量有提升。相干DSP芯片的主流晶圆代工厂为台积电。台积电3 nm和2 nm工艺路线支持192 GBd和256 GBd开发。2022年台积电实现3 nm芯片量

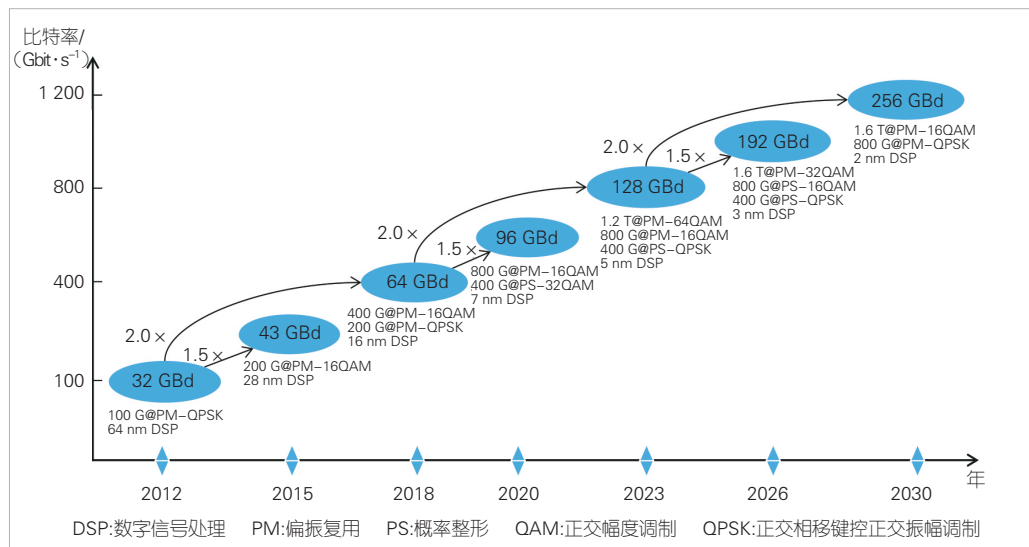
产，预计2025—2026年量产2 nm芯片。数据中心互联的ZR应用需求远大于长途传输需求。光互联网络论坛（OIF）标准的1.6T-ZR1标准确定的信号波特率影响128 GBd之后的器件带宽选择。

2) 多波段

为保持容量的提升，传统波分复用系统的通道数维持80波。当波特率提升且频谱效率不变时，需要考虑波段扩展。为确保光信噪比（OSNR）性能，骨干网传输系统首选正交相移键控（QPSK）调制方案。100G骨干网波分系统采用C80方案，200G骨干网波分系统采用C120方案，400G骨干网波分系统采用C120+L120方案。800G骨干网波分系统如果仍采用QPSK调制，为实现系统传输容量的升级，需要扩展到S+C+L+U波段；如果采用PS-16QAM调制，需要扩展到S+C+L波段。G.652光纤和G.654.E光纤均支持多波段。S、U波段的相干光收发器件和光放大模块技术成熟度偏低，研



▲图2 相干光收发器件在系统中的位置



▲图3 信号波特率的演进过程

发仍处于实验阶段。多波段系统由于拉曼通道功率转移效应导致 OSNR 不均衡代价，因此需要综合考虑多波段系统的性价比。当波段扩展的代价太大或无法持续扩展波段时，单光纤系统可以不用维持 80 波，此时多芯光纤将成为传输容量升级的另一技术路径。近年来，具有低时延、小非线性效应、低色散、多波段等优点的空芯光纤被广泛认可，但目前距离骨干网规模商用还比较遥远。总之，从技术成熟度考虑，下阶段采用 S+C+L 波段的可能性大于 S+C+L+U 波段，但也不排除考虑性价比继续沿用现有的 C+L 波段。

3) 高性能

相干光模块的 OSNR 性能决定了传输能力，它取决于 DSP 算法、光芯片材料、电芯片性能及光电芯片之间高速电信号互联的质量。骨干网要求传输能力在 1 000 km 以上，属于 OSNR 受限系统，对此一般采用 QPSK 或 PS-16QAM 调制方案。相干光收发器件要求带宽大于所支持最大波特率的一半。从 64 GBd 相干光收发器件开始，电芯片带宽峰化功能有效补偿了光芯片的带宽不足和封装带宽损失。速率越高，器件的实施代价越大。当器件带宽大于 110 GHz 时，封装设计的信号完整性难度大，芯片设计和器件封装将是较大的挑战。

4) 高集成度

小型化、高集成度成为光器件不断追求的基础需求。早期光芯片、驱动器、跨阻放大器、相干 DSP 芯片均为分立形态，现阶段光器件集成了光电芯片以满足小型化需求。2012 年第一代长距相干 100G 光模块采用 300PIN-MSA 模块 (127.0 mm × 177.8 mm)。数据中心短距离相干光模块功耗较低，倾向采用 QSFP-DD 封装 (18.35 mm × 52.40 mm)；电信长途传输应用功耗较大，倾向采用 CFP2 模块 (41.5 mm × 91.5 mm)。光器件尺寸越小，低功耗和先进散热设计就越重要。2012 年第一代长距相干 100G 光模块功耗大于 50 W，2023 年 400ZR 光模块典型功耗不到 18 W，长距 400G 光模块典型功耗约为 25 W，近期研发的 100ZR 的 QSFP28 光模块典型功耗甚至低至 5 W。光模块功耗的降低归因于 DSP 芯片、光源和光器件的技术发展。随着信号波特率提升，DSP 芯片功耗增加，DSP 芯片需要采用更先进的工艺节点来优化尺寸和功耗。

5) 低成本

不断降低成本是相干光收发器件规模应用的需求。波分复用系统升级的驱动力是单位比特传输成本的不断下降。提升信号速率或波特率，减少光电器件数量，有利于降低单位比特传输成本。当技术上信号波特率难以持续提升时，多路集成是可行方案，例如数据中心 1.6 Tbit/s 和 3.2 T bit/s 的短

距 ZR/ER 互联场景。当波段扩展和波特率提升不作为优先需求时，需要考虑多路集成方案。在 400G 时代，相干光模块下沉到 120 km 单跨传输；在 800G 时代，相干光模块下沉到 10 km 和 40 km 单跨传输。相干光模块下沉的前提是非相干技术的传输能力无法满足应用场景需求，同时相干光收发器件的技术发展能够促使成本下降。低成本相干光模块设计思路有：光器件规模应用和技术发展降低成本、非气密封装代替气密封装、集成驱动器和跨阻放大器的相干 DSP、固定波长光源代替可调谐光源、功能简化版可调谐光源、信号和本振光源同频异纤传输免频率补偿、O 波段传输无需色散补偿、降低采样率降低功耗等。

2 未来技术演进

2.1 新材料光芯片

光芯片材料有硅光、磷化铟和薄膜铌酸锂，以及硅光-薄膜铌酸锂的异质集成新材料，是实现高波特率、多波段、高性能、高集成度、低成本相干光收发器件的关键要素之一。

当前，高速相干光芯片的主流材料有硅光、磷化铟和薄膜铌酸锂。硅光材料支持多波段，具有集成度高、封装友好、成本低等特性，成为可插拔相干模块市场的主流选择。硅锗探测器如果要实现 110 GHz 以上的带宽，就需要减小载流子渡越时间，采用电感带宽峰化措施。一般认为，硅光技术实现 192 GBd 或 256 GBd 仍存在较大的技术挑战。2023 年已有厂商实现相干 128 GBd 硅光相干调制和接收。关于磷化铟器件，早在 2019 年就有研究团队率先公开 192 GBd-QPSK 发射机。近期有多个研究团队实现了 110 GHz 以上带宽的单行载流子 (UTC) 结构磷化铟光电探测器。磷化铟器件存在一些缺点，它需要控制温度，外置偏振管理器件，封装相对复杂，单芯片仅支持单波段工作。传统体材料铌酸锂素有“光学硅”的称号。自 2018 年以来，薄膜铌酸锂材料以大带宽特性成为研究热点。目前已有多个研究团队报道了带宽大于 110 GHz 的调制器，预计薄膜铌酸锂调制器将在 128 GBd、192 GBd 和 256 GBd 应用中发挥重要作用。然而，薄膜铌酸锂只能用于发送端，接收端仍需要采用磷化铟或硅光技术。

结合硅光技术和各种高效电光调制新材料的异质集成技术是行业研究热点。这些新材料包括铌酸锂、钛酸钡、有机聚合物等等。硅光技术的缺点是插损大、带宽小，但集成优势也很突出，如果硅光和高效电光调制效应的新材料异质集成，将在未来超 128 GBd 相干光收发器件中发挥重要作用。异质集成技术存在热膨胀系数不匹配、工艺兼容性不好、长

期可靠性不高等问题。现阶段有多个初创公司专注于硅光异质集成钛酸钡或有机聚合物的工艺技术。钛酸钡比铌酸锂材料具有更大的线性电光系数，但钛酸钡的居里温度点很低，制备困难。有机聚合物在高温可靠性、制备工艺兼容性等方面仍需要提升。因此，新材料在商用前需要完成性能、成本、可靠性等多方面的评估和验证。总体而言，当前钛酸钡和有机聚合物技术仍处于实验室阶段，薄膜铌酸锂技术处于工程化阶段。硅光专家预计未来5~10年内硅光商用代工厂的异质集成薄膜铌酸锂工艺将成熟^[4]。硅光-薄膜铌酸锂的异质集成材料优势包括：大带宽（>110 GHz）、多波段（单片支持S+C+L波段）、高性能（铌酸锂OSNR性能好）、高集成度（收发集成）。

2.2 先进封装技术

未来相干光收发器件将采用先进封装技术。这是实现高波特率、高性能、高集成度、低成本相干光收发器件的另一个关键要素。

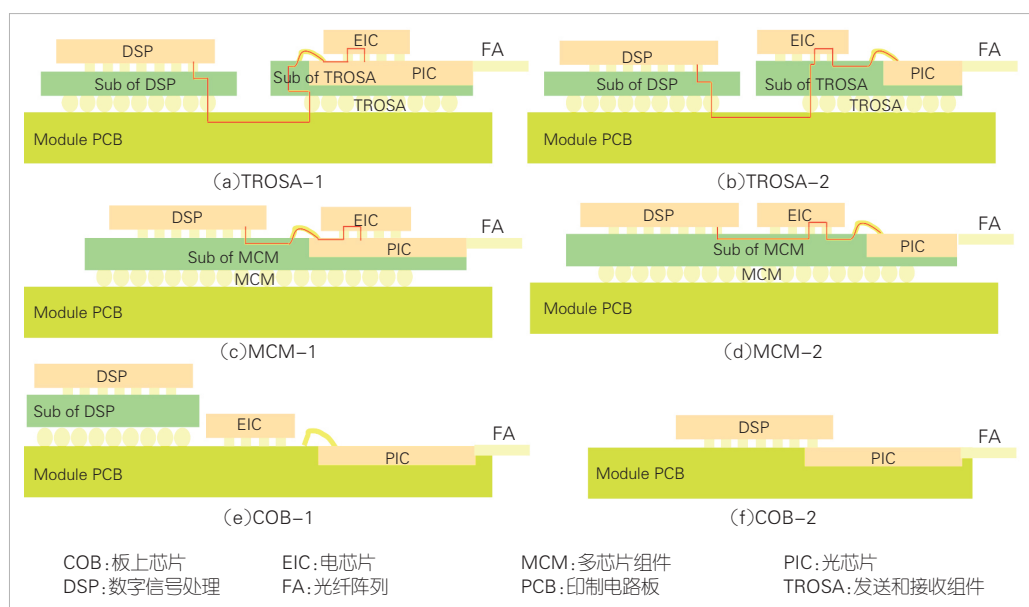
相干光收发器件封装实现光/电芯片集成为一个器件。封装技术^[5]需要综合考虑热、力、电、光的设计，尤其保证器件的长期可靠性和信号完整性。封装方案的设计与可用的光、电芯片接口形态密切相关。目前封装方案主要包括传统的金盒气密封装，以及近年来出现的小型化球栅阵列（BGA）封装和集成DSP芯片的多芯片组件（MCM）封装，未来还可能采用低成本和高性能的板上芯片（COB）封装方案。金盒封装采用高温烧结陶瓷基板。BGA封装多采用有机基板，具有一些优点：尺寸小、加工周期短、成本低、与模块印制电路板（PCB）适配性好、可实现光器件封装微电子化。电芯片散热是设计重点。倒装电芯片要求器件具备从顶部散热的功能。可靠性与基板/管壳材料的选型相关，例如：光器件基板和模块PCB进行BGA焊接时，基板材料的热膨胀系数会影响焊点的可靠性。要优化光器件封装的信号完整性，就需要尽量减少阻抗的不连续点。如图4所示，(c)和(d)的MCM封装架构相对于(a)和(b)的TROSA封装架构，DSP裸片

和光电芯片进行共基板封装，高速电信号少经历了两次由BGA植球引起的阻抗不连续点，改善了高频性能。(e)和(f)均为COB封装。(e)中DSP为封装片，PCB需支持电芯片的倒装，光芯片通过打线与PCB连接。当驱动器摆幅要求不高时，DSP集成驱动器和跨阻放大器成为可能。(f)中DSP为裸片，集成了驱动器（DRV）/跨阻放大器（TIA）功能，且倒装焊跨接在模块PCB和光芯片（PIC）上。需要说明的是，PCB（如类载板）需要高精度工艺支持DSP裸片的倒装。波特率较高时，芯片之间高速电信号的传输路径应尽量短，阻抗不连续点应尽量少，同时DSP芯片应尽量与光电芯片共封装。

2.3 多路集成架构

未来相干光收发器件将出现多路集成架构。这是实现高集成度、低成本相干光收发器件的方向之一。

单位比特传输成本影响系统传输方案的选择。在技术发展早期或光电器件带宽难以满足高波特率需求时，多路并行成为技术可行和成本最优的方案选择。相干调制信号的偏振复用正交信号架构相当于非相干调制信号的四路并行或波分架构。在非相干10G、40G、100G、200G、400G、800G、1.6T标准接口中，多路并行架构一直是重要的实现方案。短距离非相干传输采用单纤或少数几根光纤；长距离相干传输采用波分复用技术，其重要指标是传输容量。多路并行方案无法增加系统传输容量，因而早期关注度不高。在相干400G传输的早期阶段，双波方案成为长途传输的可行方案。IEEE 802.3以太网标准正在讨论短距800G/1.6T的相干传输



▲图4 相干光收发器件封装方案示例

技术。有提案建议 1.6T 传输方案采用双波相干 800G。预计 800G 长途传输将采用双波 128 GBd-PDM-QPSK。对于未来 1.6T、3.2T 的长途传输，如果单载波信号波特率的提升不再具备性价比时，双波或四波方案将被采用，从而推动相干光收发器件实现多路集成。

3 结束语

为满足相干光传输系统更大容量、更长传输距离、更低成本的需求，相干光收发器件需要具备更大带宽、更多波段、更高性能、更高集成度、更低功耗等技术特征。未来相干光收发器件技术将向着新材料光芯片、先进封装技术、多路集成架构等方面演进。

参考文献

- [1] OIF. Implementation agreement for IC-TROSA [EB/OL]. (2019-08-20) [2023-08-10]. <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-IC-TROSA-01.0.pdf>
- [2] 陆源, 牛文林, 王永奔, 等. 基于数字子载波和概率整形的相干光通信系统设计及应用 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(4): 78-82. DOI: 10.12142/ZTETJ.202304014
- [3] 王会涛, 张平化, 苏展. 800 Gbit/s 光模块技术及应用 [J]. 中兴通讯技术, 2021,

- 27(6): 40-46. DOI: 10.12142/ZTETJ.202106008
- [4] SUDIP S, BOGAERTS S, CHROSTOWSKI L, et al. Silicon photonics -- roadmapping the next generation [EB/OL]. (2023-05-25) [2023-08-10]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.15820>
- [5] 刘新阳. 5G 半导体产业发展和创新趋势思考 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(4): 51-52. DOI: 10.12142/ZTETJ.202104010

作者简介



沈百林, 中兴光电子技术有限公司高级工程师; 研究方向为高速光电相干器件技术。



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。