



研究与开发

高速光模块关键技术解决方案及标准化进展

吴冰冰, 赵文玉, 张海懿

(中国信息通信研究院技术与标准研究所, 北京 100191)

摘要: 光模块是 5G 承载网络、数据中心互联和全光接入网络的基础构成单元。随着上层业务应用的快速发展, 高速光模块已成为各应用领域实现高带宽、广覆盖的关键要素。在梳理光模块基本概念分类及标准化整体视图的基础上, 重点介绍了 400 Gbit/s、800 Gbit/s 强度和相位调制高速光模块的技术方案、标准化进展及市场发展趋势, 并提出后续发展建议。

关键词: 光通信; 光模块; 400 Gbit/s; 800 Gbit/s

中图分类号: U285.16

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022249

Key technical solutions and standardization progress of high-speed optical modules

WU Bingbing, ZHAO Wenyu, ZHANG Haiyi

Institute of Technology and Standards, China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

Abstract: Optical modules are the basic building blocks of 5G transport networks, data center interconnections and all-optical access networks. With the rapid development of upper-layer service and applications, high-speed optical modules had become the key element to achieve high bandwidth and wide coverage in various application fields. Based on the basic concepts and the overall view of standardization research of optical modules, the technical solutions, standardization status and market development trend of 400 Gbit/s, 800 Gbit/s intensity and phase modulation high-speed optical modules were focused on. Finally, suggestions to promote the healthy development of optical modules in the future were proposed.

Key words: optical communication, optical module, 400 Gbit/s, 800 Gbit/s

0 引言

2019 年我国正式启动第五代移动通信 (5G) 技术商用, 2020 年 5G 网络、数据中心等被确定

为新型基础设施建设的重点内容, 2021 年“加大 5G 网络和千兆光网建设力度, 丰富应用场景”被写入政府工作报告, 5G、数据中心和全光接入网络等相关技术与产业加速发展。光模块是 5G 承载

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2018YFB2201600)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB2201600)



网络、数据中心互联和全光接入网络的基础构成单元,近年来随着速率的逐渐提升,其在系统设备中的成本占比不断攀升,已成为各应用领域实现高带宽、广覆盖、低成本和低能耗的关键要素。

以数据中心互联为例,亚马逊、谷歌、微软、脸书等北美超大型数据中心内部互联已从2019年开始部署商用400 Gbit/s光模块;国内数据中心正由100 Gbit/s逐步向400 Gbit/s过渡。交换芯片容量及接口发展趋势如图1所示,预计2023年数据中心交换芯片吞吐量将达51.2 Tbit/s,2025年将达到102.4 Tbit/s^[1-2],800 Gbit/s及更高速率光模块将成为实现高带宽数据交换的重要基础。

1 基本分类及标准化视图

光模块也称光收发合一模块,用于完成光电/电光转换功能,主要由光发送单元、光接收单元、数字信号处理单元、控制单元、电源单元和无源光器件等构成,典型功能框图如图2(a)所示。光发送端将设备侧传来的一定速率的电信号经数字信号处理单元及驱动器处理后,驱动激光器发射出相应速率的调制光信号,用于大容量、低损耗、长距离光纤传输;光接收端由探测器将光信号转换为相应速率的电信号,经放大和恢复处理后由电接口输出。光模块有

多种分类方式,如图2(b)所示,按传输速率可分为 ≤ 1 Gbit/s / 2.5 Gbit/s / 10 Gbit/s / 25 Gbit/s / 50 Gbit/s / 100 Gbit/s / 200 Gbit/s / 400 Gbit/s / 800 Gbit/s等,按传输距离可分为几十米/100 m/500 m/2 km/10 km/40 km/80 km/几百千米/ ≥ 1000 km等,按调制格式可分为强度调制(NRZ/PAM4)、相位调制(DP-QPSK/DP- n QAM),按是否支持波分复用(wave-division multiplexing, WDM)可分为灰光、彩光,按光接口类型可分为双纤双向(duplex)、单纤双向(BiDi),按工作温度可分为商业级($0^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$)、工业级($-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$)和扩展级($-20^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$),按封装类型可分为可插拔式(SFP+/SFP28/SFP56/QSFP28/CFP2/QSFP-DD/OSFP等)和不可插拔式(168-pin/320-pin等)。

光模块的应用场景和生产制造厂商较多,为便于在服务器、交换路由设备、通信系统设备中即插即用和互联互通,国内外标准化组织对光模块的电接口、光接口和封装形式进行了全面的标准研究。

电接口的国际标准化工作主要由光互联网论坛(Optical Internetworking Forum, OIF)、电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)802.3积极推动^[3-4]。由于上层业务应用

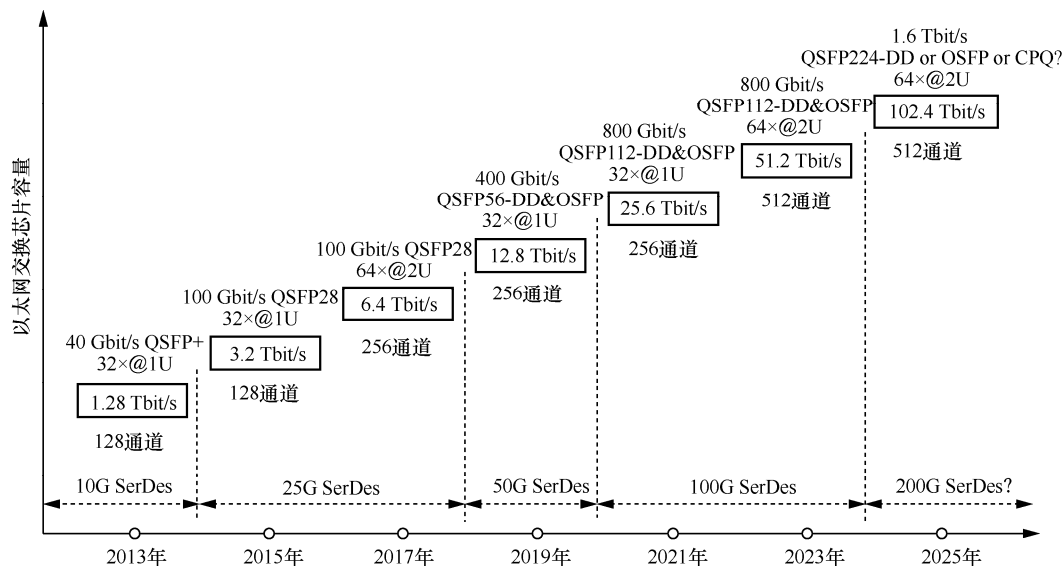
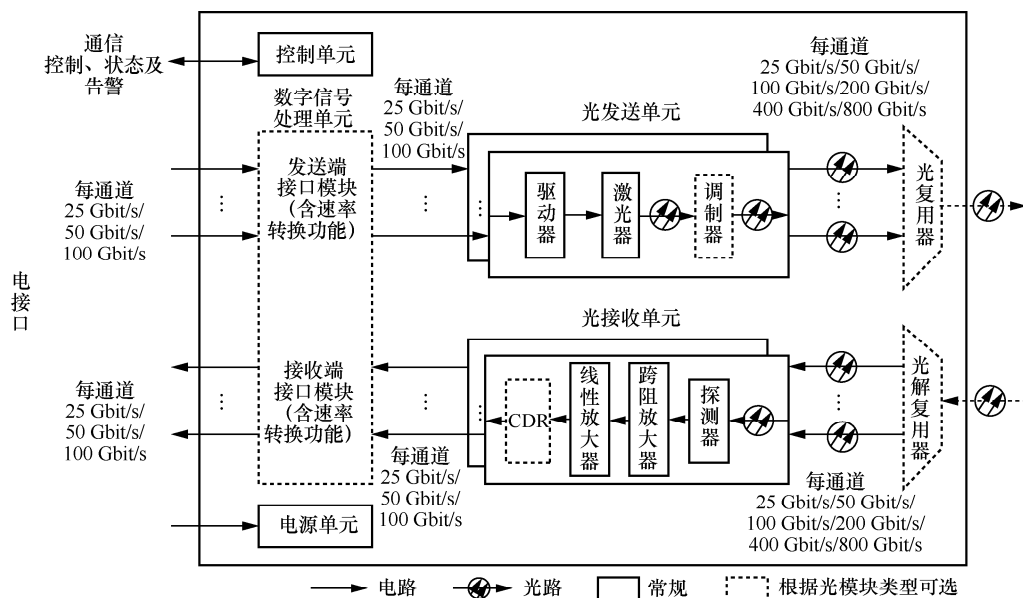


图1 交换芯片容量及接口发展趋势

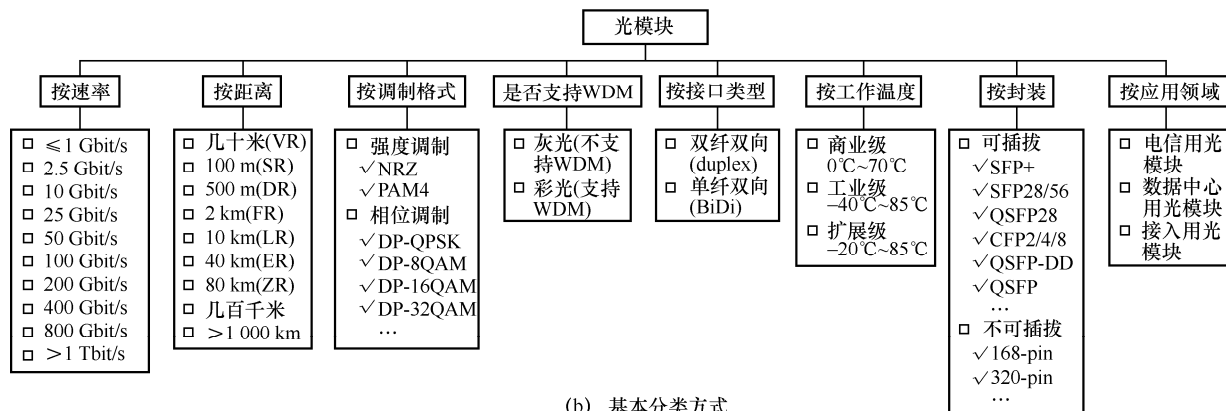
对光模块速率需求增长较快,超过了光电子芯片器件本身的带宽能力,电接口主要通过多通道复用和高阶调制来实现速率提升。国际标准中的电接口类型见表1,单通道波特率由早期的10.312 5 GBd逐步向53.125 GBd及更高演进;基于同样波特率,PAM4码型相对于NRZ码型可实现速率翻倍,如基于26.562 5 GBd NRZ调制码型,2通道复用可实现50 Gbit/s电接口(50GAUI-2);基于26.562 5 GBd PAM4调制码型,1个通道即可实现50 Gbit/s电接口(50GAUI-1),8通道复用可实现400 Gbit/s电接口(400GAUI-8)。目前,OIF和IEEE 802.3ck正在进行112/224 GBd更高波特率的电接口研究^[5-7],以推

动光模块速率提升和通道数量减少。

光信号可通过强度、相位和偏振携带调制信息,同时,不同波长的光信号可在同一根光纤中互不干扰地传输,因此,光接口可通过多光纤复用、多波长复用以及强度和相位高阶调制等维度来实现速率提升。此外,为实现光模块成本和性能的平衡,光接口还涉及不同传输距离。国际标准主要由国际电信联盟电信标准化部门(ITU-T)、IEEE 802.3、OIF等标准组织,以及4WDM、100 Gbit/s Lambda、800 Gbit/s Pluggable MSA、IPEC、Open ZR+等由厂商发起的多源协议(MSA)组织共同制定^[8-14],主流光



(a) 典型功能框图



(b) 基本分类方式

图2 光模块典型功能框图及基本分类方式



接口类型如图3所示, 400 Gbit/s 和 800 Gbit/s 光模块是目前业界研发应用和标准化研究热点^[15]。

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, 光模块的封装以插拔形式为主, 具备小尺寸、低功耗的优势, 技术规范由

CFP、SFF、QSFP-DD、OSFP 等 MSA 研制; 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, 光电共封装 (co-packaged optics, CPO) 成为未来重要发展方

表 1 国际标准中的电接口类型

接口类型	标准化组织及状态	调制格式	FEC 类型	通道数量/个	每通道波特率
CAUI-10	IEEE802.3 83B 已发布	NRZ	无 FEC 或 RS-FEC(528) FEC 类型	10	10.312 5 GBd
25GAUI	IEEE802.3 109B 已发布	NRZ	无 FEC 或 RS-FEC(528)FEC 类型	1	25.781 25 GBd
25GBASE-KR/CR/CR-S					
LAUI-2	IEEE802.3 135C 已发布			2	
CAUI-4	IEEE802.3 83E 已发布			4	
100GBASE-KR4/CR4					
50GAUI-2	IEEE802.3 135E 已发布	NRZ	RS-FEC(544)	2	26.562 5 GBd
100GAUI-4	IEEE802.3 135E 已发布			4	
100GBASE-KR4/CR4					
200GAUI-8	IEEE802.3 120C 已发布			8	
400GAUI-16	IEEE802.3 120C 已发布			16	
50GAUI-1	IEEE802.3 135G 已发布	PAM4	RS-FEC(544)	1	26.562 5 GBd
50GBASE-KR/CR					
100GAUI-2	IEEE802.3 135G 已发布			2	
100GBASE-KR2/CR2					
200GAUI-4	IEEE802.3 120E 已发布			4	
400GAUI-8	IEEE802.3 120E 已发布			8	
100GAUI-1	IEEE802.3ck 在研	PAM4	RS-FEC(544)	1	53.125 GBd
100GASE-KR1/CR1					
200GAUI-2				2	
200GASE-KR2/CR2					
400GAUI-4				4	
400GASE-KR4/CR4					

	25 Gbit/s	50 Gbit/s	100 Gbit/s	200 Gbit/s	400 Gbit/s	800 Gbit/s	1.6 Tbit/s
50 m			100GBASE-VR(802.3db)	200GBASE-VR2(802.3db)	400GBASE-VR4(802.3db)	800GBASE-VR8(802.3df)	
100 m	25GBASE-SR(802.3by)	50GBASE-SR(802.3cd)	100GBASE-SR10(802.3ba) 100GBASE-SR4(802.3bm) 100GBASE-SR2(802.3cd) 100GBASE-SR(802.3db)	200GBASE-SR4(802.3cd)	400GBASE-SR16(802.3bs) 400GBASE-SR8(802.3cm) 800GBASE-BR4.2 (MSA) 400GBASE-SR4(802.3db)	800GBASE-SR8(802.3df) 800G Pluggable MSA	
500 m			100GBASE-DR(802.3cd) 100G PSM4(MSA)	200GBASE-DR4(802.3bs) 200GBASE-DR1(802.3df)	400GBASE-DR4(802.3bs) 400GBASE-DR2(802.3df)	800GBASE-DR4/8(802.3df) IPEC	1.6TGBASE-DR8(802.3df)
2 km		50GBASE-FR(802.3cd)	100GBASE-FR(802.3ba) 100G PSM4(MSA) 100G CLR4(MSA) Openoptics(MSA) 100G-FR(MSA) 100GBASE-FR(802.3cu)	200GBASE-FR4(802.3bs) 200GBASE-FR1(802.3df)	400GBASE-FR8(802.3bs) 400G-FR4(MSA) 400GBASE-FR4(802.3cu)	800GBASE-FR4/8(802.3df) 800G Pluggable MSA IPEC	1.6TGBASE-DR8(802.3df)
10 km/20 km	25GBASE-LR(802.3ce) 25GBASE-BR(802.3cp)	50GBASE-LR(802.3cd) 50GBASE-BR(802.3cp)	100GBASE-LR4(802.3ba) WDM4-10(MSA) 100G-LR/LR1-20(MSA) 100GBASE-LR(802.3cu)	200GBASE-LR4(802.3bs)	400GBASE-LR8(802.3bs) 400G-LR4-10(MSA) 400GBASE-LR4-6(802.3cu)	800GBASE-LR1(802.3df) OIF相干800LR	
30 km/40 km	25GBASE-ER(802.3ce) 25GBASE-BR(802.3cp)	50GBASE-ER(802.3cn) 50GBASE-BR(802.3cp)	100GBASE-ER4(802.3ba) WDM4-20/40(MSA) 10×10(MSA) 100G-ER1-30/40(MSA)	200GBASE-ER4(802.3cn)	400GBASE-ER8(802.3cn) 400G-ER4(MSA) 相干(OIF 400ZR)	800GBASE-ER1(802.3df)	
80 km~120 km			相干DWDM(802.3ct) 相干DWDM(ITU-T G.698.2)		相干DWDM(802.3cw) 相干(OIF 400ZR) 相干DWDM(ITU-T G.698.2)	OIF相干800ZR	
200 km~450 km			相干DWDM(ITU-T G.698.2) OpenZR+MSA	OpenZR+MSA	相干DWDM(ITU-T G.698.2) OpenZR+MSA		

图 3 国际标准中的主流光接口类型

向^[16], OIF、CPO JDF、COBO 及国际光电委员会 (IPEC) 纷纷开展 CPO 标准研究。

国内光模块的标准化工作主要在中国通信标准化协会 (China Communications Standards Association, CCSA) 传送网与接入网工作委员会 (TC6) 光器件工作组 (WG4) 有序开展。大部分光模块行业标准以国外先进标准为基础, 结合国内应用需求制定而成, 整体发展速度与国际标准基本同步。

2 400 Gbit/s 光模块技术发展现状

2.1 技术方案

400 Gbit/s 光模块典型技术方案见表 2。其中, 16×25 Gbit/s 方案应用场景较少, 8×50 Gbit/s 方案已较为成熟。本文重点介绍 4×100 Gbit/s 强度调制和 400 Gbit/s 相位调制技术方案。

(1) 4×100 Gbit/s 强度调制

(a) 500 m/2 km: 基于单模光纤的 400 Gbit/s 500 m DR4 光模块已步入商用, 存在外调制激光器 (external modulation laser, EML)、直接调制激光

器 (directly modulated laser, DML) 和硅光 3 种方案。其中, EML 方案是成熟度最高的传统方案。

2020 年年底 Lumentum 发布 100 Gbit/s PAM4 DML 芯片, 为 DML 方案提供有力支撑, 但产业链成熟度仍需进一步提升。硅光方案在调制带宽、器件尺寸和集成规模等方面具备优势, 业界对该方案的研发投入较大, 海信、光迅、博创、SiFotonis、亨通、阿里巴巴等纷纷推出 400 Gbit/s DR4 硅光模块产品, 但目前各厂商的技术方案不统一, 给规模优势的形成带来一定挑战。同时, 硅光方案由于具有高耦合损耗、大功率直流 DFB 激光器、大摆幅驱动器等因素, 在功耗方面距离产业预期仍有提升空间。此外, 业界在 500 m 应用场景粗波分复用 CWDM4 和并行信号模式 PSM4 的技术方案选择上也存在争议, 两者各具优缺点, 还需综合考虑性能和成本等多方面因素。400 Gbit/s 2 km FR4 应用场景主要采用 CWDM4 技术方案^[17], 光纤需求量可大幅减少, 实现端到端成本优势。

(b) 10 km/40 km: 400 Gbit/s LR4 光模块发送端采用 4×53 GBd EML 阵列芯片, 接收端采用

表 2 400 Gbit/s 光模块典型技术方案

技术方案	16×25 Gbit/s 强度调制	8×50 Gbit/s 强度调制	4×100 Gbit/s 强度调制	400 Gbit/s 相位调制		
波特率	25 GBd	26 GBd	53 GBd	64 GBd	90+ GBd	128 GBd
调制码型	NRZ	PAM4	PAM4	DP-16QAM	DP-16QAM-PCS	DP-QPSK
激光器数量/个	16	8	4	1	1	1
光纤对数量/个	16	8/4/2/1	4/1	1	1	1
距离						
50 m	—	PSM8	—	—		
100 m	—	PSM8	—	—		
500 m	—	PSM8 BD4.2	CWDM4 PSM4	—		
2 km	—	PSM8 2×400 Gbit/s FR4 CWDM8 LWDM8	CWDM4	—		
10/20 km	—	LWDM8 nLWDM8	LWDM4 nLWDM4	800LR/800GBASE-LR1		
40 km	—	nLWDM8	—	800GBASE-ER1		
80 km	—	—	—	400ZR	—	—
上百千米	—	—	—	400ZR+	—	—
上千千米	—	—	—	—	在研	在研



4×53 GBd PIN 阵列芯片; 400 Gbit/s ER4 光模块发送端采用 4×53 GBd EML 阵列芯片, 接收端方案待定。400 Gbit/s LR4/ER4 光模块采用 8:4 PAM4 DSP 芯片, 支持 KP4 FEC^[18]。基于单波 100 Gbit/s 技术的 100 Gbit/s/400 Gbit/s 光模块与传统方案相比, 可节省多枚光芯片, 从而降低成本、功耗、制造复杂度并提升良率。电芯片采用集成驱动、数据时钟恢复及速率变换功能的数字信号处理器 (digital signal processor, DSP), 降低设计复杂度, 便于芯片设计厂商进行产品聚焦。

(2) 400 Gbit/s 相位调制

(a) 80~120 km: 80~120 km 主要面向县乡波分、数据中心之间互联和 5G 回传等城域边缘应用场景, 需求量较大且成本敏感, 对小型化可插拔相干光模块及低成本诉求明显。400 Gbit/s 80~120 km 相位调制光模块主要采用 DP-16QAM 调制码型, OIF-400ZR-01.0 标准中通路间隔为 100 GHz, OSNR 容限为 26 dB@0.1 nm, 采用 14.8%开销的 CFEC, 支持 QSFP-DD、OSFP、CFPx 等封装^[19]。因部分参数在 OIF-400ZR-01.0 中尚未完善, 后续将围绕 75 GHz 通路间隔的参数规范, 以及更长距离或更多应用场景的 ZR+等开展研究。相干光模块在集成芯片的实现方式上存在不同技术方案, 其中硅光集成方案有望使相干技术向更短距离应用下沉。

(b) 1 000 km 及以上: 400 Gbit/s 长距大容量传输对光电芯片器件的能力水平、系统损伤等较为敏感, 需从调制格式、高波特率器件和新波段扩展等方面开展技术研究。首先在调制格方面, 业界存在 DP-QPSK/8QAM/16QAM/32QAM/64QAM 等多种调制码型, 涉及 64 GBd/90 GBd/96 GBd/128 GBd 等多种波特率。400 Gbit/s DP-16QAM 目前可满足 600 km 传输需求, 1 000 km 以上距离存在 DP-QPSK、DP-16QAM-PCS 等竞争方案。其次在高波特率芯片器件方面, 提升芯片器件波特率是提升光模块速率, 且不带来额外传输性能降低的有效方式, 业界正在积极开展高带

宽调制器及接收机、模数转换 (analog-to-digital conversion, ADC)/数模转换 (digital-to-analog conversion, DAC)、高功率激光器或放大器等关键技术研究。最后在新波段扩展方面, 400 Gbit/s 长距光模块由于波特率较高, 通道间隔由 75 GHz 提升至 100 GHz/150 GHz, 扩展 C 波段仍无法支持 80 波系统, 需进一步开展频谱扩展技术研究, L 波段是潜在的相对成熟的选择, 但目前产业链尚不成熟, 有待进一步研究验证。

2.2 标准化进展

400 Gbit/s 强度调制光模块方面, IEEE 802.3、100 Gbit/s Lambda MSA 等国际标准化组织已发布或立项系列相关标准, 见表 3。2019 年和 2020 年国内已发布 YD/T 3538 400 Gbit/s 强度调制可插拔光收发合一模块系列标准, 包含 16×25 Gbit/s、8×50 Gbit/s、4×100 Gbit/s 3 种速率的不同距离规格, 同时正在开展 4×100 Gbit/s 30 km/40 km 光模块课题研究。

400 Gbit/s 相位调制相干光模块方面, OIF 已发布 OIF-400ZR-01.0 标准, 规定了两大应用场景: 一种是基于密集波分复用 (dense wavelength division multiplexing, DWDM) 并结合光放大的彩光点到点光信噪比 (optical signal noise ratio, OSNR) 受限传输系统, 工作距离在 120 km 以内; 另一种是基于单波长无光放大的灰光点到点功率预算受限传输系统, 传输距离小于 40 km。IEEE 802.3cw 正在制定 80 km DWDM 400 Gbit/s 标准, 采用 DP-16QAM 码型, CFEC 前向纠错编码。ITU-T G.698.2 正在讨论面向百千米传输距离增加 4 000 Gbit/s 应用代码。CCSA 已发布 YD/T 3539 400 Gbit/s 相位调制光收发合一模块系列行业标准的第 1 部分: 2×200 Gbit/s; 第 2 部分: 1×400 Gbit/s; 并正在立项面向 1 000 km 及以上传输距离的第 3 部分: 长距 1×400 Gbit/s。封装方面, QSFP-DD MSA 和 OSFP MSA 已发布面向 400 Gbit/s 的封装技术规范, 采用 8×56 Gbit/s 电接口; QSFP-DD MSA 又于 2021 年更新发布了包含 QSFP112 在内的 6.01 版本规范^[20]。国内由阿里

表 3 400 Gbit/s 强度调制光模块相关国内外标准进展

标准化组织	技术方案			距离	标准状态
	应用代码	单通道速率	工作波长		
IEEE 802.3bs	400G-SR16	25 Gbit/s	840~860 nm	70 m(OM3)	已发布
IEEE 802.3cm	400G-SR8	50 Gbit/s		100 m(OM4/5)	已发布
400G BiDi MSA (400G-BD4.2 Technical Specification Rev1.0)	400G-BD4.2	50 Gbit/s	844~863 nm 900~918 nm	70 m(OM3) 100 m(OM4) 150 m(OM5)	已发布
IEEE 802.3bs	400G-FR8	50 Gbit/s	1 272.55~1 274.54 nm	2 km	已发布
IEEE 802.3bs	400G-LR8	50 Gbit/s	1 276.89~1 278.89 nm	10 km	已发布
IEEE 802.3cn	400G-ER8	50 Gbit/s	1 281.25~1 283.27 nm 1 285.65~1 287.68 nm 1 294.53~1 296.59 nm 1 299.02~1 301.09 nm 1 303.54~1 305.63 nm 1 308.09~1 310.19 nm	40 km	已发布
IEEE 802.3db	400G-VR4	100 Gbit/s	842~948 nm	30 m(OM3) 50 m(OM4/5)	在研
IEEE 802.3db	400G-SR4	100 Gbit/s	844~863 nm	60 m(OM3) 100 m(OM4/5)	在研
IEEE 802.3bs-2017	400G-DR4	100 Gbit/s	1 304.5~1 317.5 nm	500 m	已发布
IEEE 802.3cu-2021 100G Lambda MSA (400G-FR4 Technical Specification Rev 2.0)	400G-FR4	100 Gbit/s	1 264.5~1 277.5 nm 1 284.5~1 297.5 nm 1 304.5~1 317.5 nm 1 324.5~1 337.5 nm	2 km	已发布
IEEE 802.3cu-2021	400G-LR4-6	100 Gbit/s		6 km	已发布
100G Lambda MSA (400G-LR4-10 Technical Specification Rev1.0)	400G-LR4-10	100 Gbit/s		10 km	已发布
100G Lambda MSA	400G-ER4	100 Gbit/s	nLWDM	30 km/40 km	在研
IEEE 802.3df	400G-DR2	200 Gbit/s	在研	500 m	在研
OIF (OIF-400ZR-01.0)	400 ZR	400 Gbit/s	C 波段 DWDM	80~120 km	在研
IEEE 802.3cw	400 ZR	400 Gbit/s		80 km	在研
Open ZR+ MSA	400 ZR+	400 Gbit/s		几百千米	已发布
ITU-T G.698.2	—	400 Gbit/s		几百千米	在研
CCSA YD/T 3538.1-2019	400 Gbit/s 强度调制可插拔光收发合一模块 第 1 部分: 16×25 Gbit/s			70 m/100 m	已发布
CCSA YD/T 3538.2-2019	400 Gbit/s 强度调制可插拔光收发合一模块 第 2 部分: 8×50 Gbit/s			70 m/100 m/ 150 m/2 km/ 10 km	已发布
CCSA YD/T 3538.3-2020	400 Gbit/s 强度调制可插拔光收发合一模块 第 3 部分: 4×100 Gbit/s			500 m/2 km	已发布
CCSA	400 Gbit/s 相位调制光收发合一模块 第 1 部分: 2×200 Gbit/s			城域、长距、 超长距	已发布
CCSA	400 Gbit/s 相位调制光收发合一模块 第 2 部分: 1×400 Gbit/s			80~120 km 640 km/ 720 km	已发布
CCSA	400 Gbit/s 相位调制光收发合一模块 第 3 部分: 长距 1×400 Gbit/s			1 000 km 及以上	立项中



巴巴、百度牵头成立的 QSFP112 MSA 协会也即将发布相关规范, 推进国内数据中心互联应用。

3 800 Gbit/s 光模块技术发展现状

3.1 技术方案

目前 800 Gbit/s 光模块技术方案整体上处于研究讨论阶段, 见表 4。

(1) 8×100 Gbit/s 强度调制

(a) 100 m 及以下: 单通道速率提升至 100 Gbit/s, 垂直腔表面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 速率突破面临挑战, 性能的提升和多模光纤成本的下降成为多模方案持续演进的关键因素。2021 年 Broadcom 演示了单通道多模 100 Gbit/s 的传输性能, 并给出 VCSEL 等光电器件的演进路线。同时, 以硅光和 DML 为代表的单模技术方案迅速发展^[21], 尤其硅光方案, 如果成品率进一步提升, 未来有望在 60~100 m 传输距离方面与多模方案展开竞争。

(b) 500 m/2 km: 8×100 Gbit/s 500 m 应用场景可借鉴 4×100 Gbit/s 500 m 技术方案, 随着速率提升和通道数增加, 对集成度提出更高要求。硅光方案如成品率进一步提升, 有望取代 EML 方案成为 500 m 应用场景的主流方案。8×100 Gbit/s 2 km 应用

场景可采用 800 Gbit/s CWDM8 或基于 400 Gbit/s FR4 的接口定义, 通过通道数量翻倍来实现 800 Gbit/s。此外, PSM8/LWDM8 也有相关讨论, 需要在功耗、成本等方面进一步研究确定。

(c) 10 km/20 km: 关于 10 km 距离, 目前有基于 CWDM、LWDM (800 GHz 间隔) 和 nLWDM (400 GHz 间隔) 的 800 Gbit/s LR8 方案在讨论中, 可重用 50 GBd 光电芯片器件和直调直检技术。同时, 业界也在开展 20 km 800 Gbit/s nLWDM8 的相关研究, 与 100 Gbit/s Lambda MSA 制定的 100G-4WDM20、100G-LR1-20 需求对标。

(d) 40 km: 10 km 及以上距离的强度调制方案主要面临最坏情况色散和狭窄的色散容限匹配挑战, 部分厂商提出 200 GHz 间隔的 nLWDM 技术方案 800GBASE-ER8/800G nLWDM-40, 通过构建新的波长体系、压缩多通道波长范围, 改善最坏情况色散以支持 40 km 传输距离。

(2) 4×200 Gbit/s 强度调制

(a) 500 m/2 km: 单通道 200 Gbit/s 极有可能继续沿用 PAM4 调制码型, 以继承相对成熟的 PAM4 产业基础^[22-27]。关于 4×200 Gbit/s 500 m/2 km 距离, 目前有 PSM4 和 CWDM4 技术方案^[28], 仍面临较多挑战, 需进一步研究。

表 4 800 Gbit/s 光模块技术方案

技术方案	8×10 Gbit/s 强度调制	4×2 000 Gbit/s 强度调制	800 Gbit/s 相位调制		
波特率	53 GBd	106 GBd	90+ GBd		115~120 GBd
调制码型	PAM4	PAM4	DP-16QAM	DP-32QAM	DP-16QAM
激光器数量/个	8	4	1		
光纤对数量/个	8/4/2/1	4/1	1		
距离					
50 m	PSM8	—	—		
100 m	PSM8	—	—		
500 m	PSM8	CWDM4	—		
	BD4.2	PSM4			
2 km	PSM8	CWDM4	—		
	2×400 Gbit/s FR4				
	CWDM8				
	LWDM8				
10 km/20 km	LWDM8	LWDM4	800LR/800GBASE-LR1		
	nLWDM8	nLWDM4			
40 km	nLWDM8	—	800GBASE-ER1		
80 km	—	—	800ZR	—	—

(b) 10 km: 关于 10 km 距离, 目前有基于 CWDM、LWDM 和 nLWDM 的 800 Gbit/s LR4 方案在讨论中, 发送/接收端由 4 个波长进行波分复用/解复用, 需要高带宽光电芯片器件、更强的均衡技术以及更强的 FEC 来支撑, 以确保纠错后的误码率。

(3) 800 Gbit/s 相位调制

部分光电芯片器件厂商在 800 Gbit/s 技术发展早期, 优先规划了基于 96 GBd 的相干光模块产品, 需采用高阶调制码型, OSNR 性能差、传输距离和应用场景受限。随着标准化日益明确和 100+ GBd 芯片器件的研究深入^[29-34], 基于 128 GBd 的 DP-16QAM 将成为 800 Gbit/s 相干模块的主流实现方案。

(a) 80 km: OIF 800ZR 是支持 80~120 km 的单跨放大 DWDM 链路, 目前已基本确定采用 DP-16QAM 调制码型和 150 GHz 通道间隔, 具体参数指标正在讨论中。

(b) 10 km: IEEE 802.3 B400G SG 和 OIF 800LR 正在讨论单波长链路 800 Gbit/s 10 km 相干方案, OIF 已基本确定在 G.652 光纤上采用 DP-16QAM

调制码型和 193.7 THz 工作频率。此外, 基于双子载波的 800 Gbit/s LR2、800 Gbit/s LR4/LR2 自零差检测 (self-homodyne detection, SHD) 等更多方案也在讨论和研究中。

3.2 标准化进展

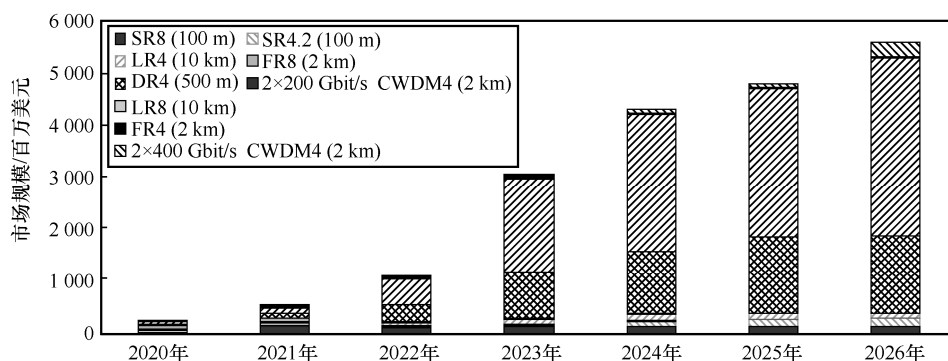
800 Gbit/s 光模块相关产品研发及标准化推进是目前业界的研究热点, 国内外多个标准化组织竞相开展相关工作, 相关标准进展见表 5。IEEE 802.3、OIF、IPEC 已对 800 Gbit/s 强度调制和相位调制方案进行了立项; 800 G Pluggable MSA 已发布 8×100 Gbit/s 100 m 和 4×200 Gbit/s 2 km 技术规范; CCSA 也对国内行业标准进行了立项。封装方面, QSFP-DD800 MSA 将面向 800 Gbit/s 的技术规范统一合并至新发布的 QSFP-DD SPEC 6.01; OSFP MSA 已发布适用于 800 Gbit/s OSFP 模块的 4.0 版本规范^[35]。

4 高速光模块市场发展趋势

根据 Omdia 数据, 高速光模块的市场规模发展趋势如图 4 所示^[36]。在 400 Gbit/s 强度调制光模块方面, 基于单波 100 Gbit/s 的 400 Gbit/s 光模

表 5 800 Gbit/s 相关国内外标准进展

标准化组织	技术方案	距离	标准化状态
IEEE 802.3df	8×100 Gbit/s	8 对 MMF、强度调制	在研
		8 对 MMF、强度调制	
		8 对 SMF、强度调制	
		8 对 SMF、强度调制	
	4×200 Gbit/s	4 对 SMF、强度调制	在研
		4 对 SMF、强度调制	
		4 波复用 SMF、强度调制	
	1×800 Gbit/s	相干、相位调制	在研
		相干、相位调制	
800G Pluggable MSA	8×100 Gbit/s	8 对 SMF、强度调制	800G-PSM8 Technical Specification 已发布
	4×200 Gbit/s	4 波复用 SMF、强度调制	800G-FR4 Technical Specification 已发布
IPEC	8×100 Gbit/s	8 对 SMF 等、强度调制	在研
		2×FR4 等、强度调制	
OIF-800G Coherent Framework IA	1×800 Gbit/s	相干、相位调制	在研
	1×800 Gbit/s	相干、相位调制	
CCSA	8×100 Gbit/s	8 对光纤/8 波长复用、强度调制	待研究
	4×200 Gbit/s	4 对光纤/4 波长复用、强度调制	待研究
	2×400 Gbit/s FR4	2×400 Gbit/s FR4、强度调制	立项中
	1×800 Gbit/s	相干、相位调制	在研



高速光模块	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年
SR8 (100 m)/百万美元	32	163	127	132	137	143	132
SR4.2 (100 m)/百万美元	3	7	17	44	113	135	162
LR8 (10 km)/百万美元	42	42	10	4	1	0	0
LR4 (10 km)/百万美元	11	27	65	114	136	122	109
FR8 (2 km)/百万美元	70	73	23	8	2	0	0
FR4 (2 km)/百万美元	35	86	313	877	1 192	1 450	1 491
DR4 (500 m)/百万美元	33	98	495	1 810	2 616	2 846	3 387
2x200Gbit/s CWDM4 (2 km)/百万美元	39	54	63	49	37	17	16
2x400Gbit/s CWDM4 (2 km)/百万美元	0	0	0	32	64	66	280

图4 高速光模块市场规模发展趋势

块产品开始在运营商及数据中心部署蓝图上占据重要位置,未来几年存在较大的需求空间。其中,400 Gbit/s DR4/FR4/LR4 光模块产品已基本成熟,基于市场需求出货量逐步攀升;400 Gbit/s ER4 预计于2022年年底或2023年趋于成熟。在400 Gbit/s相位调制光模块方面,Acacia、Neophotonics、旭创、光迅和海信等已具备80~120 km相干光模块产品能力,随着DCI需求的快速增长,未来几年将快速占据400 Gbit/s相干主要市场。1 000 km及以上传输距离的400 Gbit/s相干光模块方面,主流设备商已具备基于概率整形技术90+GBd DP-16QAM-PCS的长距传输能力,2021年国内运营商已完成1 000 km传输现网试点;采用128 GBd DP-QPSK理论上可实现更长传输距离,目前处于技术研究阶段。

根据交换芯片演进趋势、市场需求及技术成熟度,800 Gbit/s强度调制光模块将于2023年进入市场,2026年左右规模应用。早期将以8×100 Gbit/s方案(2×400 Gbit/s CWDM4)为主,优先实现400 Gbit/s向800 Gbit/s的平滑演进。800 Gbit/s相位调制相干光模块方面,预计DP-16QAM码型不可插拔模块将更早实现商用,可插拔模块预计于2023年下半年进入测试阶段,2024年实现小批量

商用。更长远来看,随着高带宽芯片器件及算法技术的不断演进,800 Gbit/s相干光模块传输距离将从80 km及以下发展至长距离,应用场景也将从DCI逐渐向城域网、省干网甚至骨干网扩展。

5 结束语

5G承载、数据中心和上层业务应用的快速发展为光模块市场带来机遇与活力,同时也对光模块提出高速率、高性能、低功耗和低成本等更高挑战。其中高速率是核心诉求,400 Gbit/s/800 Gbit/s高速光模块是各类应用场景的重要技术节点。产业链上下游和业界各方需进一步加强合作、聚焦共识,从加强技术创新、引导市场聚集和强化产业基础等方面协同推进高速光模块技术产业的健康发展。

参考文献:

- [1] IMT-2020(5G)推进组. 5G承载与数据中心光模块白皮书[R]. 2021.
IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G bearer and data center optical module white paper[R]. 2021.
- [2] 800G Pluggable MSA. Enabling the next generation of cloud & AI using 800 Gbit/s optical modules white paper[R]. 2020.
- [3] OIF. Common electrical I/O (CEI) - electrical and jitter interoperability agreements for 6G+ bit/s, 11G+ bit/s, 25G+ bit/s I/O and 56G+ bit/s: OIF-CEI-04.0[S]. 2017.

- [4] IEEE 802.3. IEEE standard for ethernet: IEEE 802.3-2018[S]. 2018.
- [5] IEEE P802.3ck. 100 Gbit/s, 200 Gbit/s, and 400 Gbit/s electrical interfaces task force[S]. 2018.
- [6] CEI. Common electrical I/O (CEI)-112G[S]. 2019.
- [7] CEI. Common electrical I/O (CEI)-224G[S]. 2020.
- [8] IEEE 802.3. IEEE standard for ethernet - amendment 3: media access control parameters for 50 Gbit/s and physical layers and management parameters for 50 Gbit/s, 100 Gbit/s, and 200 Gbit/s operation: IEEE 802.3cd[S]. 2018.
- [9] IEEE 802.3. IEEE standard for ethernet - amendment 4: physical layers and management parameters for 50Gbit/s, 200Gbit/s, and 400Gbit/s operation over single-mode fiber: IEEE 802.3cn[S]. 2019.
- [10] IEEE 802.3. IEEE standard for ethernet amendment 13: physical layers and management parameters for 100 Gbit/s operation over DWDM systems: IEEE 802.3ct[S]. 2021.
- [11] IEEE 802.3. IEEE standard for ethernet - amendment 11: physical layers and management parameters for 100 Gbit/s and 400 Gbit/s operation over single-mode fiber at 100 Gbit/s per wavelength: IEEE 802.3 cu[S]. 2021.
- [12] IEEE 802.3. IEEE standard for ethernet-amendment 14: BiDi-directional 10 Gbit/s, 25 Gbit/s, and 50 Gbit/s optical access PHYs: IEEE 802.3cp[S]. 2021.
- [13] ITU-T. Amplified multichannel dense wavelength division multiplexing applications with single channel optical interfaces, G.698.2[S]. 2018.
- [14] OpenZR+ MSA. OpenZR+ specifications v. 1.0[S]. 2020.
- [15] 中国通信标准化协会. 800 Gbit/s 光收发合一模块研究: 2020B46[S]. 2021.
China Communications Standards Association. Research on 800 Gbit/s optical transceiver integrated module: 2020B46[S]. 2021.
- [16] 中国通信标准化协会. 光电合封技术研究: 2021B35[S]. 2021.
China Communication Standardization Association. Research on co-packaged optics technology: 2021B35[S]. 2021.
- [17] 100G lambda MSA. 400G-FR4 technical specification rev 2.0 [S]. 2018.
- [18] 100G lambda MSA. 400G-LR4-10 technical spec rev1.0[S]. 2020.
- [19] OIF. Implementation agreement 400ZR: OIF-400ZR-01.0[S]. 2020.
- [20] QSFP-DD MSA. QSFP-DD/QSFP-DD800/QSFP112 hardware specification rev 6.01[S]. 2021.
- [21] 800G Pluggable MSA. 800G-PSM8 technical specification[S]. 2020.
- [22] TIAN Y, LIN Y, ZHENG J, et al. 800 Gbit/s-FR4 specification and interoperability analysis[C]//Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). [S.l.:s.n.], 2021.
- [23] SCHUH K, HU Q, COLLISI M, et al. 100 GSa/s BiCMOS analog multiplexer based 100 GBd PAM transmission over 20 km single-mode fiber in the C-band[C]//Proceedings of European Conference on Optical Communications (ECOC). [S.l.:s.n.], 2020.
- [24] HU Q, SCHUH K, BORKOWSKI R, et al. 120 GBd IM/DD PAM-4 transmission over 1.5 km SMF using a single CMOS DAC with <20 GHz analog bandwidth[C]//Proceedings of European Conference on Optical Communications (ECOC). [S.l.:s.n.], 2020.
- [25] CHE D, MATSUI Y, SCHATZ R, et al. Long-term reliable >200 Gbit/s directly modulated lasers with 800GbE-compliant DSP[C]//Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). [S.l.:s.n.], 2021.
- [26] YAMAUCHI S, ADACHI K, ASAKURA H, et al. 224 Gbit/s PAM-4 uncooled operation of lumped-electrode EA-DFB lasers with 2-km transmission for 800 GbE application[C]//Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). [S.l.:s.n.], 2021.
- [27] ZHANG Y, XU M, ZHANG H, et al. 220 Gbit/s optical PAM-4 modulation based on lithium niobate on insulator modulator[C]//Proceedings of European Conference on Optical Communications (ECOC). [S.l.:s.n.], 2019.
- [28] 800G Pluggable MSA. 800G-FR4 technical specification[S]. 2021.
- [29] TAKUYA O, HIDEKI Y, KOJI E, et al. InP-based butt-joint coupled waveguide photodiodes integrated with various functions for 100 GBd coherent detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 24(5): 69-71.
- [30] ZIARI M, LAI V, STUDENDOV P, et al. High-performance 100 gbaud coherent photonic modules[C]//Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). [S.l.:s.n.], 2021.
- [31] WANG C, ZHANG M, CHEN X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages [J]. Nature, 2018(562): 101-104.
- [32] LORENCES A, NGUYEN T, MUMTAZ S, et al. 32 Tbit/s transmission over 1 400 km using power allocation optimization[C]//Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). [S.l.:s.n.], 2021.
- [33] ZHAO Y, RUIZ I, LORENCES A, et al. A novel analytical model of the benefit of partial digital PRE-emphasis in coherent optical transponders[C]//Proceedings of European Conference on Optical Communications (ECOC). [S.l.:s.n.], 2020.
- [34] MAHE R, CHITGARHA M, LEUNG I, et al. Real-time 100.4 GBd PCS-64QAM transmission of a 1.6 Tbit/s super-channel over 1600 km of G.654.E fiber[C]//Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). [S.l.:s.n.], 2021.
- [35] OSFP MSA. Specification for OSFP octal small form factor pluggable module rev 4.0[S]. 2021.
- [36] Omdia. Total optical components market[R]. 2020.

[作者简介]



吴冰冰 (1984—), 女, 博士, 中国信息通信研究院技术与标准研究所宽带网络研究部高级工程师, 主要研究方向为光传送网、光模块器件及光电子芯片技术、量子计算技术等。

赵文玉 (1973—), 男, 博士, 中国信息通信研究院技术与标准研究所宽带网络研究部主任、教授级高级工程师, 主要研究方向为光传送网、量子信息技术等。

张海懿 (1972—), 女, 中国信息通信研究院技术与标准研究所副所长、教授级高级工程师, 主要研究方向为光传送网、量子信息技术等。