

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240174.

光电器件研究与应用

成璇璇,石川,马洪勇,等.基于50 Gbit/s Combo PON OLT光组件的研究[J].光通信研究,2025(2):240174.

Cheng X X, Shi C, Ma H Y, et al. Design and Study on 50 Gbit/s Combo PON OLT Optical Module[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240174.

基于50 Gbit/s Combo PON OLT光组件的研究

成璇璇,石川,马洪勇,梅晓鹤,丁深,秦强

(武汉光迅科技股份有限公司,武汉 430074)

摘要:【目的】随着视频业务逐渐成为宽带网络的核心支柱,无源光网络(PON)技术迅速发展,从传统的家庭宽带接入领域迈向政企、工业智能制造和远程医疗等更为广泛的应用领域,由此对网络的带宽、时延、丢包率和抖动等业务质量要求日益苛刻。在这样的背景下,50 Gbit/s的下一代光接入网技术应运而生,50 Gbit/s PON不仅要提供超过10 Gbit/s PON 4倍以上的接入带宽,还需强化业务支撑能力、网络安全防护以及确保与现有10 Gbit/s PON技术的兼容性和平滑演进。在实现的过程中,光发射组件的研发尤为关键。【方法】文章重点介绍了一种基于混合集成封装技术的50 Gbit/s Combo PON光线路终端(OLT)光组件。这款光组件通过折叠的光路设计,解决了发射端和接收端多通道波长合分波的技术难题,显著降低了收发器件在同一管壳内的串扰问题。【结果】通过精心设计的4通道小型可插拔接口(QSFP28)封装尺寸模块,实现了在金属气密性管壳内的3发3收功能。同时,得益于先进的优化设计,发射端对接收端的串扰明显降低,效果提升达到20~30 dB。这一重要突破不仅提高了光组件的性能,也为50 Gbit/s PON的商用部署奠定了坚实基础。【结论】测试结果表明,文章所提光组件的波长性能完全符合国际电信联盟-电信标准化部门(ITU-T)G.9804.3国际标准的要求,其工作眼图和灵敏度均达到了预期指标。这意味着50 Gbit/s Combo PON OLT光组件已经具备了在实际网络环境中应用的能力。展望未来,随着技术的不断进步和应用需求的持续增长,50 Gbit/s PON将在推动宽带网络升级、增强业务支撑和提升用户体验等方面发挥重要作用。期待这一领域继续涌现更多创新成果,共同推动光网络技术的繁荣发展。

关键词:50 Gbit/s;Combo 无源光网络;光线路终端;光发射组件

中图分类号:O436

文献标志码:A

Design and Study on 50 Gbit/s Combo PON OLT Optical Module

CHENG Xuanxuan, SHI Chuan, MA Hongyong, MEI Xiaohe, DING Shen, QIN Qiang

(Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: 【Objective】As video services gradually become the core pillar of broadband networks, Passive Optical Network (PON) technology has rapidly developed, expanding from the traditional field of home broadband access to a wider range of application areas such as government and enterprise, intelligent manufacturing in industry, and telemedicine. Consequently, the requirements for network bandwidth, latency, packet loss rate, and jitter in terms of service quality have become increasingly stringent. In this condition, the next-generation optical access network technology with a speed of 50 Gbit/s has emerged. The 50 Gbit/s PON is not only required to provide an access bandwidth more than four times that of the 10 Gbit/s PON, but also needs to enhance the service support capabilities, network security protection, and ensure compatibility and smooth evolution with the existing 10 Gbit/s PON technology. In the implementation process, the development of optical transmitter components is particularly crucial. 【Methods】The 50 Gbit/s Combo PON Optical Line Terminal (OLT), presented in this study, leverages hybrid integrated package technology to address key challenges such as multi-channel wavelength combination, signal splitting, and crosstalk minimizing. Through meticulous optical path simulations and crosstalk analyses, the device successfully achieves a balance between performance and efficiency. 【Results】By means of a meticulously designed 4-channel QSFP28 package size module, the functionality of 3 transmitters and 3 receivers within a metal hermetic tube has been realized. At the same time, thanks to advanced optimization design, the crosstalk from the transmitter to the receiver has been significantly reduced, with an improvement of 20 to 30 dB. This important breakthrough not only enhances the performance of the optical components, but also lays a solid foundation for the commercial deployment of 50 Gbit/s PON. 【Conclusion】The test results indicate that the wavelength performance of the optical components proposed in the article fully complies with the requirements of the International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) G.9804.3 international standard. Both the operating eye diagram and sensitivity have reached the expected indicators. This means that the 50 Gbit/s Combo PON OLT optical components are already capable of being applied in actual network environments. Looking to the future, with the continuous progress of technology and the sustained growth of application demands, 50 Gbit/s PON will play an important role in promoting broadband network upgrades, enhancing service support, and improving user experience. It is expected that more innovative achievements will continue to emerge in this field, jointly promoting the prosperous development of optical network technology.

收稿日期:2024-08-13; 修回日期:2024-08-28; 纸质出版日期:2025-04-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFB180091)

作者简介:成璇璇(1982-),女,湖北武汉人。工程师,硕士,主要研究方向为光电子器件设计与制造。

通信作者:成璇璇,工程师。E-mail:xuanxuan.cheng@accelink.com

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Key words: 50 Gbit/s; Combo PON; OLT; optical module

0 引言

在光网络演进的道路上,运营商始终致力于在利用现有资源的同时,尽可能地节约升级成本。为实现 10 Gbit/s 无源光网络(Passive Optical Network, PON)向 50 Gbit/s PON 的平稳过渡以满足不同业务需求,这两种技术将在一段时间内并存。为了节约机房空间、降低能耗,并有效利用光分配网(Optical Distribution Network, ODN)资源以降低网络建设成本,局端设备采用多制式共存的光收发合一模块是一种有效的选择,比如采用 Combo PON 理念合并 50 Gbit/s PON 和 10 Gbit/s 吉比特无源光网络(Gigabit-capable PON, GPON)。在标准方面,2023年12月,国际电信联盟-电信标准化部门(International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)SG15 全会通过了 G.9804.3 Amd.2 标准^[1],标志着 50 Gbit/s PON 国际标准的完善,50 Gbit/s PON 将步入产业快速发展的新阶段。因此,同时支持 3 种速率和 6 个波长工作模式的 3 发 3 收器件的研发将面临一定挑战,器件封装尺寸需要满足小型化模块的要求。这项技术的研究不仅为高端芯片和器件的国产化提供了经验积累,也为高速 PON 器件的进一步发展作出了有益贡献。

本文将围绕 50 Gbit/s Combo PON 光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)组件研发难题展开讨论。通过深入介绍芯片和组件研制情况,结合光路设计、串扰和性能方面的分析,验证实现高性能发射和接收的可行性。研究结果对克服制约因素和推动技术进步具有重要意义。

1 芯片研制

1.1 50 Gbit/s 带 EML SOA 芯片的研制

本研究采用自研 50 Gbit/s 带半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)的电吸收调制器(Electro Absorption Modulator, EAM)激光器芯片作为光源,该芯片由增益区、放大区和调制区 3 部分构成,如图 1 所示。增益区提供激光器所需的放大增益,放大区对芯片出光功率进行放大和均衡,调制区采用了电吸收调制技术。这款芯片采用钢磷材料的 III-V 族半导体单片集成工艺完成,具有体积小和功耗低等优点。主要外延工艺流程包括

光栅制作、光栅掩埋、量子阱(Quantum Well, QW)材料和对接生长工艺。在前期研究中,已经掌握了调制应变补偿高应变多量子阱(Multiple Quantum Well, MQW)生长技术和停止层辅助对接耦合生长等关键技术^[2]。为了满足芯片宽调制带宽、良好线性响应特性和大功率的要求,我们对激光器、EAM 和光放大器的 QW 结构进行了独立优化,包括材料组分、集成工艺和光场调控等。通过采用电子束曝光光刻的方法^[3]制备分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser, DFB),激光器的光栅可以实现对光栅结构参数的精准控制。这有助于提高激光器光栅制作的可重复性,提高波长精度和边模抑制比。图 2 所示为芯片光谱图,由图可知,芯片中心波长在 1 341.12 nm,边模抑制比为 49.67 dB,分别满足了 $1\ 342\pm 2\ \text{nm}$ 和 $>35\ \text{dB}$ 的要求。为了提高激光器单模振荡的稳定性,需要确保 DFB 芯片中的激射波长和 EAM 的吸收区以及光放大器的增益区相匹配。图 3 所示为芯片 3 dB 带宽图,由图可知,芯片的带宽达到了 43.57 GHz,满足 50 Gbit/s 速率的要求。通过以上优化,实现了集成芯片在宽调制带宽、线性响应特性和功率要求方面的性能要求。

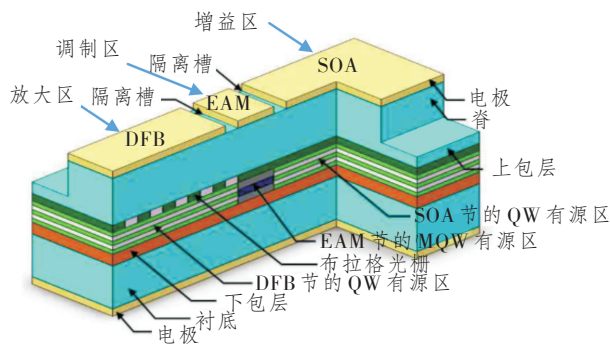


图 1 芯片结构图

Figure 1 The detailed structure of chip

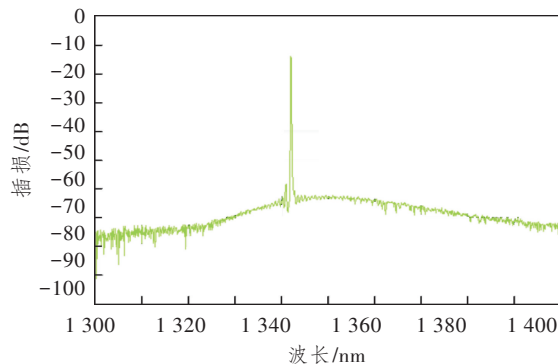


图 2 芯片光谱图

Figure 2 The measured optical spectrum of the optical chip

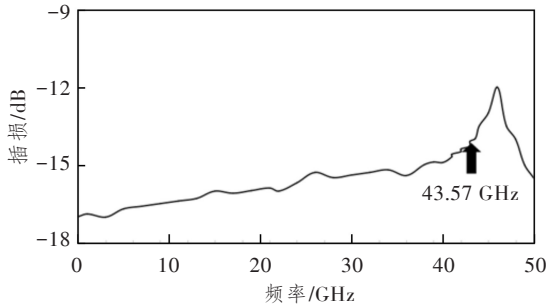


图3 芯片 3 dB 带宽

Figure 3 The 3 dB bandwidth of the chip

1.2 25 Gbit/s APD

在 ITU-T G. 9801. x 标准中明确规定了 50 Gbit/s PON 的上下行速率和波长,其中上行速率为 25 Gbit/s,中心波长为 $1\,286\pm 2$ nm,下行速率为 50 Gbit/s,中心波长为 $1\,342\pm 2$ nm,上下行为非对称结构。常用的光探测器包括 PIN 型光电二极管 (Pin Diode, PD) 与雪崩二极管 (Avalanche Photo Diode, APD) 两种,光探测器后接集成放大器对弱信号进行放大,由于 APD 具有内部增益特性,其原理与光电倍增管类似,可以增大内部光电流,使其具有更高的响应度^[4-5]。在本研究中,选择 25 Gbit/s 的 APD 作为接收端的实施方案。

APD 分为正照和背照两种类型,顾名思义,正照 APD 是光从晶圆正面入射,而背照 APD 是光线从晶圆的背面入射,直接照射到感光元件(如 PD)上^[6]。本文针对这两种类型进行了详细的参数对比研究,如表 1 所示。通过与相同跨阻放大器 (Trans Impedance Amplifier, TIA) 的匹配测试发现,25 Gbit/s 的正照和背照 APD 在灵敏度上没有明显差异,二者都能在 1×10^{-3} 误码率下达到 -28 dBm 的灵敏度。这一结果对 50 Gbit/s PON 在实际应用中的方案选择和低成本化提供了参考。

表 1 25 Gbit/s 正照和背照 APD 测试结果

Table 1 The APD test results for 25 Gbit/s bandwidth

指标	正照 APD	背照 APD
过载点/dBm	-3	0
光面直径/ μm	16	20
光响应度/A/W ($\lambda=1\,310$ nm, $P_{\lambda\text{光}}=-20$ dBm)	8.2	7.0
3 dB 带宽/GHz($P_{\lambda\text{光}}=-20$ dBm)	23	23
灵敏度(1×10^{-3})/dBm	-28	-28

注: λ 为波长; $P_{\lambda\text{光}}$ 为入光功率。

1.3 3 发 3 收光学系统的耦合设计

50 Gbit/s Combo PON OLT 器件的光学系统

集成了多种光发射芯片、透镜和隔离器等组件,以支持高速的光通信传输。为了减小器件尺寸,采用了光路折叠的设计,图 4 所示为器件实物图。在发射端的光路中,不同波长的光经过多款滤光片的波长复用,最终进入光窗并被接收。通过这种设计,实现了对 1 342、1 577 和 1 490 nm 不同波长光的有效处理和传输。图 5 所示为发射端光路设计图,1 577 nm 的光经过滤光片 1 反射后进入隔离器,然后经过滤光片 2 继续反射,最终透过滤光片 3 进入光窗,到达 C 透镜;1 342 nm 的光则经过隔离器、滤光片 2 透射和滤光片 3 透射后,也进入光窗并被 C 透镜接收;而 1 490 nm 的光则经过滤光片 1 透射,再经过隔离器和滤光片 2 反射,最后透过滤光片 3 进入光窗,被 C 透镜接收。



图4 器件实物图

Figure 4 The picture of the device

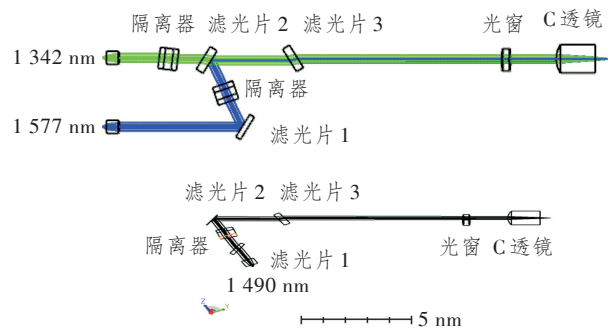


图5 发射端光路设计

Figure 5 The optical path design at the transmitter side

光路设计时,不同中心波长的光会通过多组反射片和滤光片,最终被不同速率的 APD 接收。图 6 所示为接收端光路设计,1 286 nm 的光经过滤光片 2 后被反射片 1 反射进入滤光片 5,被 25 Gbit/s APD 接收;1 270 nm 的光则经过反射片 2、反射片 1、滤光片 5 和反射片 2 的多次反射后进入滤光片 6,最终由 10 Gbit/s APD 接收;而 1 310 nm 的光则通过滤光片 2、反射片 1、滤光片 5 和反射片 2 的反射后,最终被滤光片 6 反射,并以 1.25 Gbit/s 的速率被 APD 接收。设计精确的光路可以实现不同波长光信号的有效接收和处理,保障通信系统的稳定和高效运行。

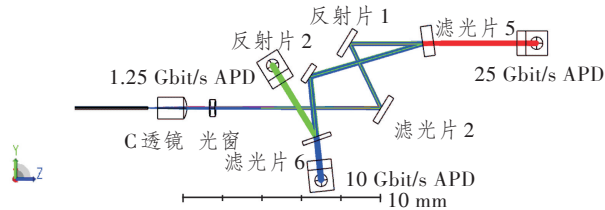


图6 接收端光路设计

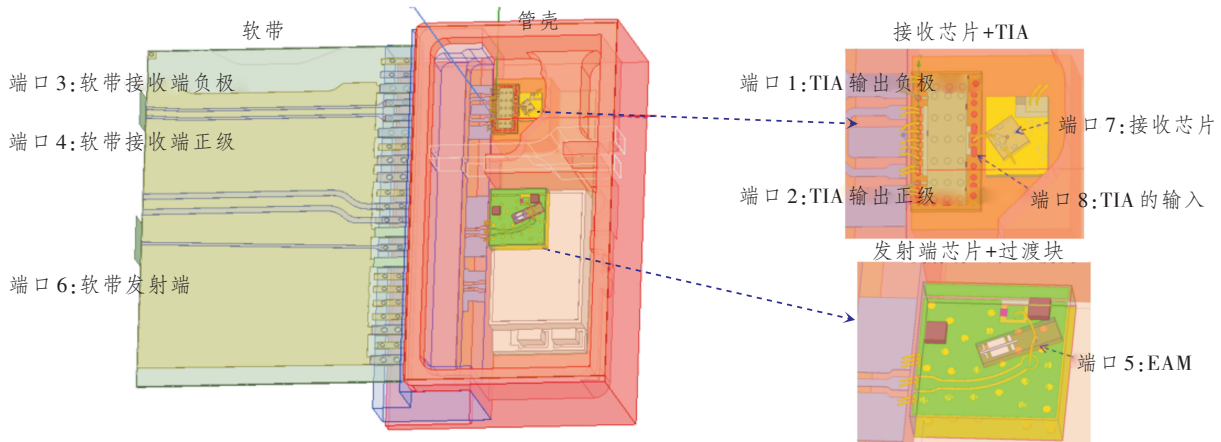
Figure 6 The optical path design at the receiver side

发射端和接收端共用同一光口,通过选用不同的透镜组合,使得发射端和接收端均达到较高的耦合效率。在3发3收器件内实现了不同波长光的分离和传输,也在保证了传输效率的同时,节约了空间和资源。光学系统的精巧设计和组合,为50 Gbit/s Combo PON OLT器件的性能提升和可靠性保障奠定了坚实基础。

1.4 发射端和接收端的串扰分析

在50 Gbit/s Combo PON器件设计中,收发端在同一金属管壳内,因此收发串扰指标至关重要,其直接影响器件的高频性能,特别是25 Gbit/s接收端和50 Gbit/s发射端之间的串扰对接收灵敏度有显

著影响。在设计过程中,需要重点关注25 Gbit/s接收器件和50 Gbit/s发射器件之间的串扰问题,因为其共用一块陶瓷件,空间距离最近,串扰效应最为明显。为了解决这一问题,本文对管壳挡板、50 Gbit/s发射端芯片、25 Gbit/s接收端TIA、APD以及软带的串扰等参数进行了严格仿真,图7所示为收发器件在金属管壳内的模型示意图,分别建立软带、管壳、接收芯片+TIA和发射芯片+过渡块4块模型,设置了8个端口,其中端口1为TIA输出负极,端口2为TIA输出正极,端口3为软带接收端负极,端口4为软带接收端正极,端口5为EAM,端口6为软带发射端,端口7为接收芯片,端口8为TIA的输入。另外,2.50 Gbit/s发射器件、10.00 Gbit/s接收器件和1.25 Gbit/s接收器件分布在管壳的不同区域,通过挡板隔开,串扰影响较小。在仿真过程中,我们发现金属挡板和发射部分形成完全封闭,对收发隔离度影响微乎其微,而发射端EAM对接收端TIA输出的串扰影响可忽略不计。



(a) 收发器件在金属管壳内模型
(a) Model of transceiver in metal tube

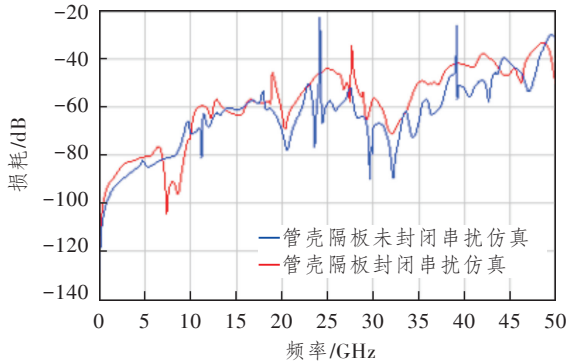
(b) 盖板和管壳模型
(b) The cover and housing model

图7 管壳模型

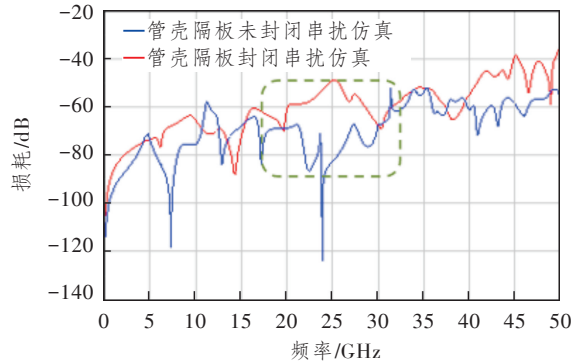
Figure 7 The housing model

由图 8 的模拟实验结果可知,首先,发射端 EAM 对软带以及 APD 的影响与是否有隔板几乎没有关系;其次,添加隔板后,发射端 EAM 对壳内器件 APD 的串扰有一定抑制作用,约可降低 20~30 dB。总的来说,在 50 Gbit/s Combo PON 器件

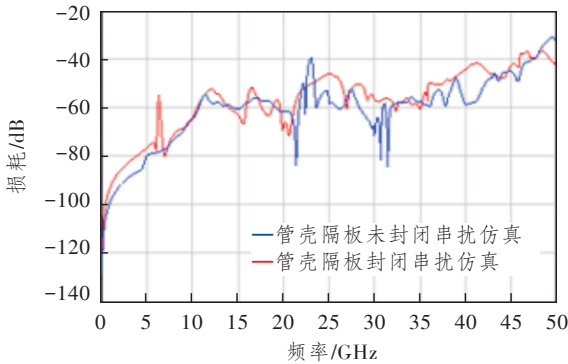
的设计中,有效地解决收发端之间的串扰问题至关重要。通过严格的仿真和实验验证,我们可以优化器件结构,提高其高频性能指标,确保高速信号传输的稳定性和可靠性^[7]。因此,在设计过程中,需要综合考虑各个参数的影响,以达到最佳的性能表现。



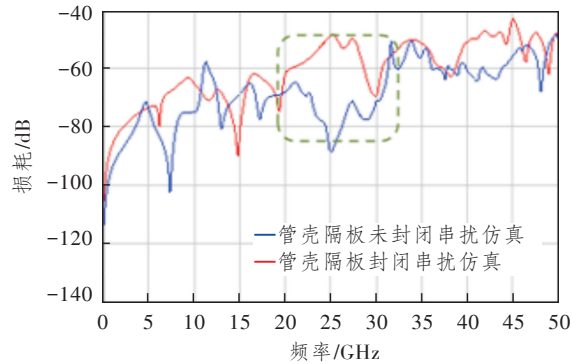
(a) EAM 对软带接收端的远端串扰
(a) EAM's the far-end crosstalk to the receiving end of the soft band



(b) EAM 对 APD 的串扰
(b) EAM's crosstalk to APD



(c) EAM 对 TIA 输出近端的串扰
(c) EAM's crosstalk to the output of the TIA



(d) The EAM's crosstalk to the input of the TIA

图 8 EAM 对管壳的串扰
Figure 8 Crosstalk from EAM to shell

1.5 TOSA 特性

50 Gbit/s 光发射器件 (Transmitter Optical Subassembly, TOSA) 在 PON 产品中扮演关键角色,除了 25 Gbit/s 接收灵敏度外,其高速率和高带宽的技术难点也备受关注。而眼图测试被视为检验 50 Gbit/s TOSA 光学和电学设计综合手段的有效方式。因此,在室温条件下,本文对 50 Gbit/s Combo PON 激光器进行了眼图测试,结果如图 9 所示,图中 50 Gbit/s 眼图模板容限 (Eye Mask Margin, EMM)^[8] 均在 20% 以上,消光比 (Extinction Ratio, ER) 在 8 dB 以上,符合国际标准 ITU-T G. 9804.3 的要求。这些数据验证了本文设计方案的可靠性和性能,为产品的进一步优化提供了重要参考。

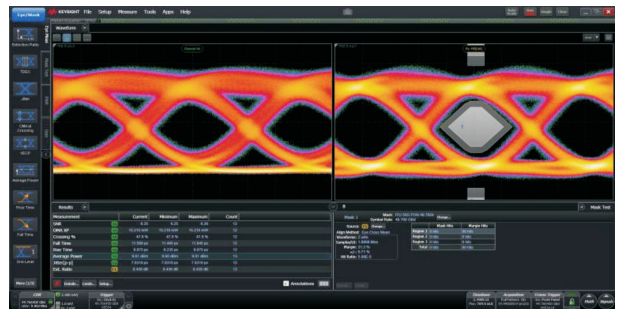
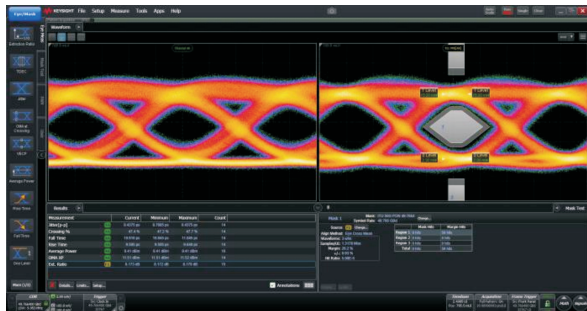


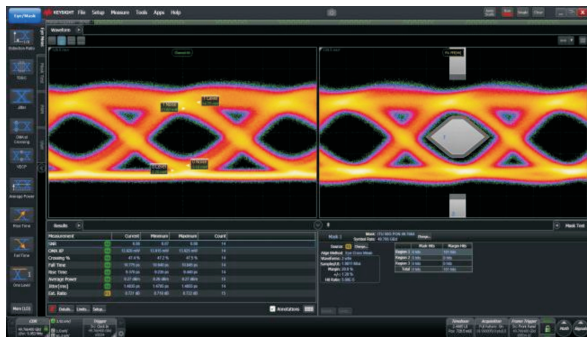
图 9 常温下 50 Gbit/s 光眼图
Figure 9 Optical eye diagram of signal at 50 Gbit/s under normal conditions

为了满足 PON 产品对工作环境的要求,本文对 0~70 °C 范围内机房的工作环境进行了深入研究。为了更全面地检测高低温下 50 Gbit/s TOSA 的光眼图,本文采用了一系列创新设计。首先,为了

保证器件具有良好的散热性能,本文采用了高导热率的胶水来粘接半导体制冷器件与管壳。同时,在设计时选用了导热系数较高的钨铜材料嵌入到金属管壳内部,以增加管壳的散热面积,从而起到了良好的散热效果。经过一系列的优化设计,成功保证了器件在高低温下的眼图性能。图10所示为高低温下50 Gbit/s TOSA的光眼图,EMM和ER在0~70℃温度范围内表现稳定,符合国家标准,达到了业内先进水平。这项研究为PON产品在各种工作环境下的稳定性提供了重要参考,有望推动行业发展。



(a) 70℃



(b) 0℃

图10 高低温下50 Gbit/s TOSA光眼图

Figure 10 The optical eye diagram of signal at both high and low temperatures for 50 Gbit/s TOSA

2 结束语

本文介绍了一种基于3模收发混合集成的50 Gbit/s Combo PON器件,详细讨论了芯片研制和组件研制两个方面,并对光路设计、串扰和性能进行了深入分析。实验结果显示,该TOSA符合QSFP28封装形式和ITU-T G. 9804.3协议标准^[9],达到了国际同类产品的水平。此次成功研制标志着国内企业在高端PON器件领域取得了重要突破,打破了国外企业的技术壁垒。这不仅对提高国内光器件制造商的竞争力具有重要意义,而且该组件已经具备一定的量产能力,有望在50 Gbit/s PON系统中得到广泛应用。这一成果的取得将进

一步促进我国在光通信领域的自主研发能力,并有助于加速我国在第五代移动通信技术(5th Generation Mobile Communication Technology, 5G)等领域的发展。通过持续创新和技术升级,中国光器件制造业有望在国际市场上占据更大的份额,实现高质量发展和可持续增长。

参考文献:

- [1] Rad M M, Fouli K, Fathallah HA, et al. Passive Optical Network Monitoring: Challenges and Requirements [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(2): s45-s52.
- [2] 李程程. 基于SOA的50 G-PON上下行链路传输系统的研究[D]. 上海: 上海大学, 2020.
Li C C. Research on Uplink and Downlink Transmission System of 50 G-PON based on SOA [D]. Shanghai, China: Shanghai University, 2020.
- [3] Iiyama N, Kani J I, Suzuki K I, et al. Advanced DSP for Optical Access Networks: Challenges and Opportunities [C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2015: 7121565.
- [4] Breuer D, Weis E, Krauß S, et al. Assessment of Future Backhaul and Fronthaul Networks for HetNet Architectures [C]//2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Budapest, Hungary: IEEE, 2015: 7193622.
- [5] 张蕾, 高建河, 黄莎, 等. 50 Gbit/s PON高性能接收技术的研究[J]. 光通信研究, 2024(1): 230150.
Zhang L, Gao J H, Huang S, et al. Research on High Performance Receiving Technology of 50 Gbit/s PON [J]. Study on Optical Communications, 2024(1): 230150.
- [6] 步超, 李成明. 加快推动超宽带5.5G产业升级, 打造“超级宽带中国”[J]. 新经济导刊, 2023(2): 30-34.
Bu C, Li C M. Accelerate the Upgrading of Ultra-wideband 5.5G Industry and Build “Ultra-wideband China” [J]. New Economy Weekly, 2023(2): 30-34.
- [7] Zhang H, Mi S, Brito L F, et al. Genomic and Transcriptomic Analyses Enable the Identification of Important Genes Associated with Subcutaneous Fat Deposition in Holstein Cows [J]. Journal of Genetics and Genomics, 2023, 50(6): 385-397.
- [8] Bretchko P. RF Circuit Design: Theory and Applications [M]. London, England: Prentice Hall, 2000.
- [9] ITU-T G. 9804.3-2021, 50-Gigabit-Capable Passive Optical Networks (50 G-PON): Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification [S].