

400G 光收发模块优化设计

聂嵩, 贾建刚, 刘超

(河北华美光电子有限公司, 河北 张家口 075499)

摘要: 为了进一步提高光模块光学耦合效率和出光功率, 设计和优化了 400G 光收发模块, 使用带有透镜的无源器件作为光学耦合的重要部件, 以提高耦合效率; 采用输入/输出缓冲区信息规范 (IBIS) 模型对光模块的高频电路进行分析与优化; 最后, 对光模块进行了光学设计、链路仿真和测试。测试结果表明: 设计的光收发模块眼图较为清晰, 光眼图抖动为 2.3 ps 左右, 各个通道具有较好的一致性, 202 s 内无误码; 信号传输 100 m 后, 未出现丢包情况, 系统性能比较稳定。

关键词: 光模块; 多路并行收发驱动电路; 短距离传输; 印制电路板埋铜技术

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)05-0053-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimized design of 400G optical transceiver module

NIE Song, JIA Jiangang, LIU Chao

(Hebei Huamei Optoelectronics Co., Ltd., Zhangjiakou Hebei 075499, China)

Abstract: In order to further improve the optical coupling efficiency and output power of the optical module, a 400G optical transceiver module is designed and optimized. A passive device with a lens is used as an important part of the optical coupling to improve the coupling efficiency. The input/output buffer information specification (IBIS) model is used to analyze and optimize the high frequency circuit of optical module. Finally, the optical design, link simulation and test of the optical module are carried out. The test results show that the designed optical transceiver module eye image is clear, the optical eye image jitter is about 2.3 ps, each channel has a good consistency, no error code within 202 s. After the signal is transmitted for 100 m, no packet loss occurs, and the system performance is stable.

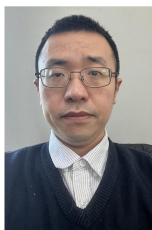
Key words: optical module, multiplex parallel transceiver driver circuit, short distance transmission, printed circuit board buried copper technology

0 引言

随着云计算和大数据的广泛应用, 大型数据中心是未来数字产业最重要的基础设施之一, 其建设数量将越来越多。数据中心的计算能力和内部数据交换能力也呈现出指数级增长。由于数据中心内部服务器与交换机之间普遍采用光模块进行互联^[1-2], 光模块作为光互连的核心器件, 对整个通信系统的运行质量起着决定性作用。因此, 如何设计出更高速率的光模块产品, 同时确保其高性能并且具有稳定性是非常关键的^[3]。

收稿日期: 2022-11-03。

作者简介: 聂嵩(1982—), 男, 硕士, 工程师, 毕业于北京工业大学计算机技术专业, 2010 年加入河北华美光电子有限公司, 主持开发过的产品包括: 10G、40G、100G 全系列高速光模块, 在光模块的硬件设计、软件设计以及光电眼图调测方面积累了丰富的经验。



本文对 400G 光收发模块(下文简称光模块)的光电封装及散热结构进行优化设计。

1 光模块总体设计

在 400G 光传输产品中, 光模块的需求量最大。每个光模块包括 16 个传输通道(发射、接收各 8 个), 每个传输通道的传输速率为 50 Gb/s, 其信号调制方式为 4 阶脉冲幅度调制(PAM4), 并同时满足上下行 400 Gb/s 的速率传输。光模块产品的整体结构框图^[4]如图 1 所示。其中, 电路部分主要包括数字信号处理(DSP)芯片、跨阻放大器(TIA)芯片、调制驱动器(Driver)芯片等; 光路部分及光学无源器件主要包括垂直腔面发射激光器(VCSEL)芯片、光电二极管探测器(PD)芯片、光学透镜等。

在发射端, 电信号从连接器电接口进入 PAM4 DSP 芯片进行电信号整形处理。处理后的高频信号再

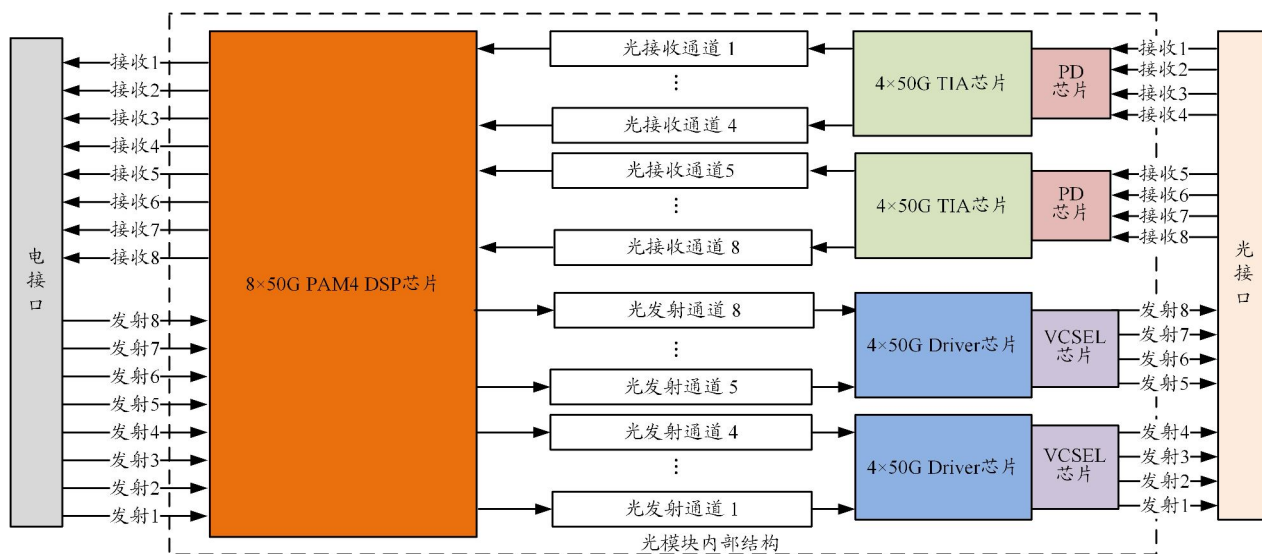


图1 光模块整体框图

分为2组4通道信号进入Driver芯片。Driver芯片对信号进行放大,并驱动VCSEL芯片完成电/光转换。在接收端,光信号通过MPO16的光接口进入PD芯片,PD芯片产生感应光电流。光电流再通过TIA芯片进行信号放大、幅度整形后进入DSP芯片。在DSP芯片中完成高频信号的整形并输出,由此完成光/电转换。

光模块的整体光电布局及结构示意图如图2所示。在模块的制作中,使用高精度贴片机将Driver、TIA、VCSEL和PD芯片贴在印制电路板(PCB)上,然后通过高精度键合机对各芯片进行连接,以实现电路信号的连通。在键合过程中,通过降低键合金线的拱高,从而在很大程度上缩短了键合金线的长度,减小了高速信号反射的影响。在发射端,将Driver芯片、VCSEL芯片的上表面置于同一水平面上;在接收端,将TIA芯片、PD芯片的上表面置于同一个水平面上,从而能够有效地缩短键合金线的长度。电芯片所在的

镀金面至PCB背面有数个通孔直接将热量传递到PCB背面开孔,同时在背面填充高导热系数的散热材料与金属管壳相接触,以达到最理想的散热通道;另外,在各电路芯片与金属管壳的缝隙处填充高导热系数的散热材料,实现良好的热管理性能^[9]。在完成光路芯片与电路芯片的键合后,使用增加了透镜处理的无源器件对发射端和接收端进行一体式光耦合封装,以此来完成光引擎的气密性封装。与不带透镜的无源器件相比,使用该种增加透镜的无源器件的耦合效率可提高10%~15%。

2 光模块的高频电气与光学设计

2.1 光模块的PCB设计

整个模块的PCB采用10层板结构,其中4层用于高频差分线,另外6层用于参考层及直流层。本文使用阻抗计算软件(Polar SI9000)和3D信号仿真软件HFSS来对高频差分线进行阻抗计算,并进行了模拟仿真测试(在外层差分结构下,100Ω阻抗差分线宽为4mil,间距为8mil)。在PCB的制作过程中,高频差分信号层的板材必须选用低介电常数的高速专用板材,比较常用的是罗杰斯或者松下M6。另外,为了确保各叠层的物理对称性,避免因受热不均而导致PCB发生形变问题,需要对板材进行对称处理。本文设计的光模块中的参考层和直流走线层采用普通的FR4材料。

2.2 高频线路分析与优化

本文采用输入/输出缓冲区信息规范(IBIS)模型进行仿真设计。在光模块发射端结构中,误码仪产生

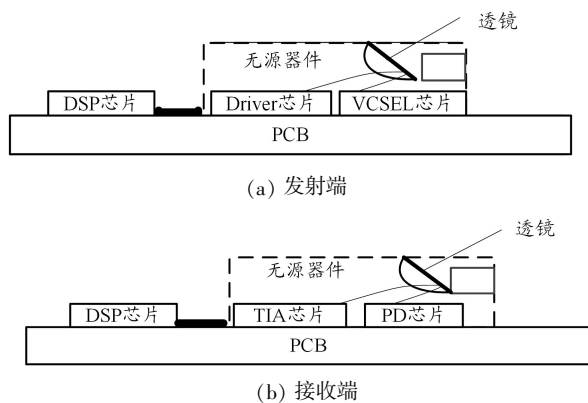


图2 光模块的整体光电布局及结构

26.562 5 Gbaud 的高速差分信号, 通过带宽为 40 GHz 的电缆及超小型高频接头(2.92 连接器)连接到光模块的测试电路板上, 通过测试电路板上的小尺寸可插拔-双倍密度(QSFP-DD)连接器传输到光模块内部的 DSP 芯片。在光模块内部, DSP 芯片对高速信号数据进行恢复、整形后传输到 Driver 芯片, Driver 芯片对

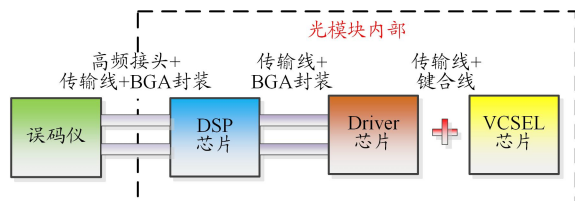


图3 发送端封装等效电路示意图

信号进行放大, 并驱动 VCSEL 芯片产生光信号。发送端等效电路结构框图如图 3 所示。

金手指和耦合电容这些部位不能实现高频信号的完全连续。因此, 本文针对模块金手指到 DSP 芯片、DSP 芯片到 Driver 芯片的高速电路进行高频性能优化。金手指接触的位置是按照标准 QSFP-DD 的多源协议(MSA)设计的^[6], 同时采用镀金和镍钎金工艺强化金手指, 增强其耐磨性和导电性, 以减少信号泄漏。此外, 通过增加电路周围多层电气参考面与电信号过孔的间距, 提高了电路的感性, 以减少信号反射情况。使用仿真软件的局部裁剪法, 对金手指到 DSP 芯片的 16 对高频线进行了裁剪和高频仿真, 并结合阻抗计算软件对每一组高频线路的线厚、线宽、线间距进行调整。在处理耦合电容时, 主要根据仿真结果调整距离, 并在整个模型的四角打参考地层孔, 形成干扰信号的回流层, 以达到抗干扰的目的。

高频优化结果表明: 发射和接收共 32 组高速差分线均能达到 3 dB 的带宽且大于 35 GHz 的高频要求(实际使用带宽不超过 20 GHz), 所有高频线路的阻抗值控制在 $100\ \Omega$ (误差精度为 $1\ \Omega$), 高频线路的回波损耗值全部小于 $-15\ \text{dB}$ 。此外, VCSEL 芯片通过差分键合线与 Driver 芯片相连, 键合线使用的是常规直径为 $25\ \mu\text{m}$ 的金线^[7], 最长的一条键合线从 $500\ \mu\text{m}$ 缩短到 $280\ \mu\text{m}$, 插损值降低了 0.3 dB。

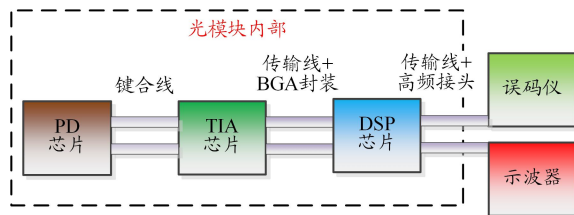


图4 接收端封装结构框图

图 4 是接收端的结构示意图。接收端的高频差分线优化与发射端大致相同, 采用剪裁法对每对差分线进行剪裁、修正、模拟、优化后再修正, 最终得到符合要求的差分线。经过优化后, 所有差分线的阻抗精确控制在 $100\ \Omega$ (精度 $\pm 1\ \Omega$), 3 dB 带宽满足 35 GHz 的要求, 回波损耗小于 $-8\ \text{dB}$ 。

2.3 光学设计

光模块贴片键合成品图如图 5 所示。使用贴片机将 Driver 芯片、TIA 芯片按照设计的贴片位置标记位进行阵列贴片, 确保 2 种芯片贴片位置误差小于 $3\ \mu\text{m}$, 以此来保证产品的精度及光学耦合的稳定性。在 Driver 芯片、TIA 芯片完成贴片后, 进行 VCSEL 芯片、PD 芯片的贴片, 使其分别对应 Driver 芯片和 TIA 芯片的工作区域, 并按照 GSG 的管脚位置进行标记对齐, 贴片误差小于 $3\ \mu\text{m}$ 。完成贴片后, 根据仿真中得出的

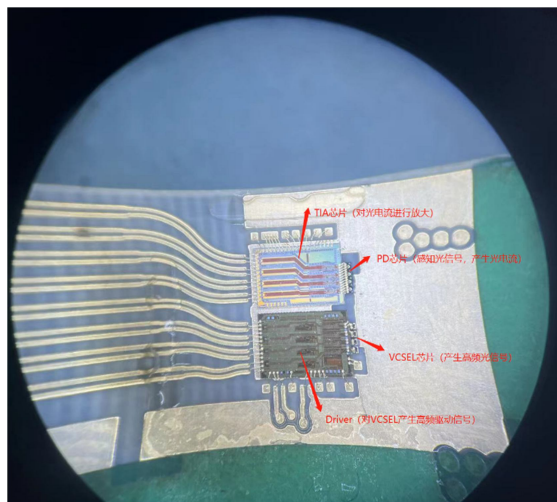


图5 光模块贴片键合成品图

金线长度及角度进行键合机参数设置, 对所有管脚进行键合, 至此便完成了芯片与 PCB 的键合工作。

完成键合后, 本文使用高精度耦合机对模块进行有源耦合, 耦合工作分 2 次进行: 一次耦合一组阵列贴片的 Driver、TIA 芯片(使用光功率计检测 4 通道 TX 的发射出光功率, 使用软件检测 4 通道 RX 的接收响应度), 当发射和接收的检测指标同时达到最大值时, 进行 LENS 点胶固定; 另一次以同样的方式对另一组

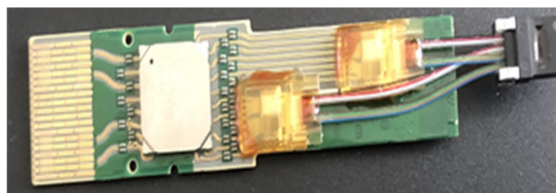


图6 400G 光收发模块结构实物图

聂嵩, 贾建刚, 刘超. 400G 光收发模块优化设计

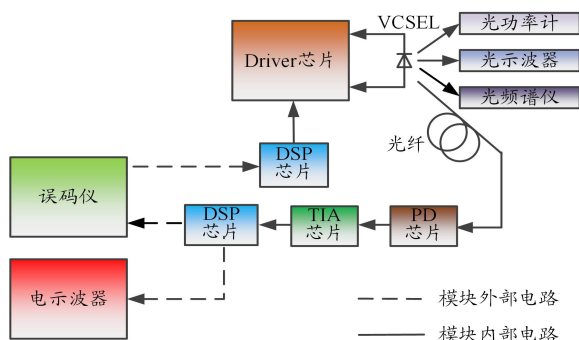
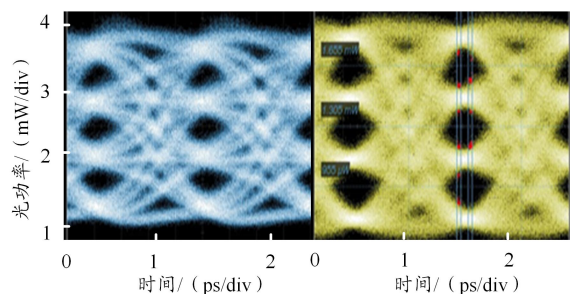


图 7 光模块仿真链路结构示意图



(a) 均衡前

(b) 均衡后

图 8 光模块测试眼图

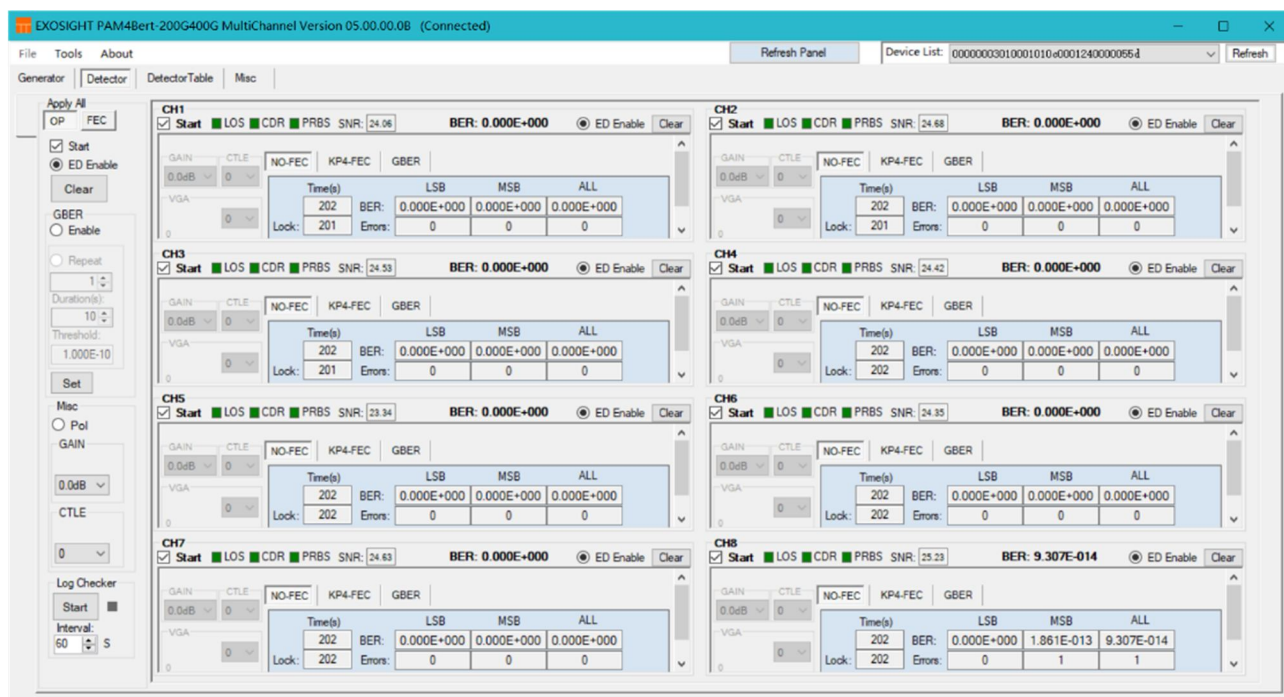


图 9 光模块测试误码率图

芯片进行耦合固定。本文制作的 400G 光收发模块实物如图 6 所示。

3 光模块仿真

3.1 光模块链路仿真结构

图 7 是光模块链路仿真结构示意图。在发射端, VCSEL 在 Driver 芯片的驱动下发出一束光, Driver 芯片输出的高速射频信号对光信号进行调制后输出。通过使用光功率计、光示波器主光频谱仪, 可获取光信号的平均光功率 (P_{avg})、消光比 (ER) 和波长等重要参数。在进行模块自环或交叉测试时, 实纤在接收端接收到光信号后, 经过 PD、TIA、DSP 等芯片的一系列信号处理, 将信号传递到电示波器上, 即可观察转化后的电信号眼图并分析信号质量; 将该电信号输入到误码仪的 RX 端口, 即可在误码仪上读取实时误码率, 以判断模块的传输质量是否达到国际标准要求^[9]。

3.2 模块测试

本文对 400G 光收发模块进行了眼图测试和误码率测量, 眼图和误码率图分别如图 8、图 9 所示。测试结果表明: 该模块的眼图较为清晰, 眼图抖动为 2.3 ps 左右, 各个通道具有较好的一致性, 202 s 内无误码。另外, 本文还对在 100 m 传输距离下的 400G 光收发模块的系统传输性能进行了测试, 发现各通道的眼图与直连测试结果差异不大, 尽管平均抖动有所增加, 但通道的眼图一致性保持良好^[10], 在 50 Gb/s 的速率传输下, 仍然没有出现丢包情况, 系统性能比较稳定。整个光模块的总功率为 9.8 W, 模块的功耗较低^[11]。

4 结束语

本文对 400G 光模块的结构和高频电路进行了系统的设计, 并使用专业软件进行了优化。测试结果表

明:与不带透镜的无源器件相比,使用这种增加透镜的无源器件可将耦合效率提高 10%~15%;高频线路优化后的回波损耗值全部小于 -15 dB,插损降低了 0.3 dB;光收发模块的眼图清晰,抖动约为 2.3 ps,各通道具有较好的一致性,202 s 内无误码;信号传输 100 m 后,误码率小于 $1\text{E}-12$,模块的总功率为 9.8 W,达到国际标准要求。

参考文献:

- [1] 邓维, 刘方明, 金海, 等. 云计算数据中心的新能源应用研究现状与趋势[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 582–598.
- [2] 陈皓. 数据中心用多模光纤技术及发展趋势[J]. 现代传输, 2019(6): 11–14.
- [3] IEEE. media access control parameters for 50 Gb/s and physical layers and management parameters for 50 Gb/s, 100 Gb/s, and 200 Gb/s operation: IEEE Std 802.3cd-2018[S]. New York: IEEE, 2018.
- [4] KOSE B, CASTRO J, PIMPINELLA R, et al. Characterization of modal-chromatic dispersion compensation in 400GBASE-SR8 channels[C] //OSA. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. San Diego: OSA, 2020: 15–19.
- [5] MILLER D A B, OZAKTAS H M. Limit to the bit-rate capacity of electrical interconnects from the aspect ratio of the system architecture[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 1997, 41(1): 42–52.
- [6] CHO H, KAPUR P, SARASWAT K C. Power comparison between high-speed electrical and optical interconnects for interchip communication [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(9): 2021–2033.
- [7] NAGASHIMA K, KISE T, ISHIKAWA Y, et al. A record 1-km MMF NRZ 25.78-Gb/s error-free link using a 1060-nm DIC vcsel [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(4): 418–420.
- [8] TEMPORITI E, GHILIONI A, MINOIA G, et al. Insights into silicon photonics Mach-Zehnder-based optical transmitter architectures [J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2016(1): 1–14.
- [9] PATEL D. Design, analysis, and performance of a silicon photonic traveling wave Mach-Zehnder modulator[D]. Masters Diss: McGill University, 2014.
- [10] FREDERIC B, SHINICHI T, MITSURU T, et al. Benchmarking Si, SiGe, and III-V/Si hybrid SIS optical modulators for datacenter applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(9): 1–1.
- [11] BALEMARTHY K, SUN Y, JIANG X, et al. Towards large-scale modeling of equalized MMF-VCSEL links at 25Gbps [EB/OL]. [2022-11-03]. https://www.ieee802.org/3/100GNGOPTX/public/jan12/linge_02_0112_NG100GOPTX.pdf.