

4.25 Gbps 小型可热插拔光收发模块的设计与测试

刘希*, 薛原, 徐红春

(武汉电信器件有限公司 光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:对4.25 Gbps小型化可热插拔(SFP)光收发模块的关键参数进行了理论分析,从发射、接收和控制3个方面讨论了模块的结构组成,设计出了符合SFP MSA及SFF-8472协议的光模块,并根据此设计方案制作了样品模块。在-40, 25, 85℃环境温度下测试和分析了模块的性能指标,结果显示其光功率、消光比和灵敏度等均符合设计要求,且在适用温度范围内表现出良好的稳定性。实验证实了方案的可行性,为模块的产品化提供了参考。

关键词:光纤通信;4.25 Gbps光模块;光发射组件;光接收组件;消光比

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120501.0077

Design and test of 4.25 Gbps SFP optical transceiver

LIU Xi*, XUE Yuan, XU Hong-chun

(State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks,
Wuhan Telecommunication Devices Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

* Corresponding author, E-mail: liuxi@wtd.com.cn

Abstract: By taking 4.25 Gbps Small Form-factor Pluggable (SFP) as an example, this paper analyzes theoretically its key parameters in detail, and discusses the module structure composition from the transmitter, receiver and the control part. Then it designs the optical module according to the SFP MSA and SFF-8472 agreement. On the basis of the design, some sample optical transceiver modules are designed. Finally, the optical power, extinction ratio, sensitivity and other performance indicators of the module are tested at -40, 25, 85℃, and results indicate that these parameters meet the design requirements, and show good stability in a suitable temperature range. The feasibility of the design is confirmed by experiments, which provides a reference for the actual production of modules.

Key words: optical fiber communication; 4.25 Gbps optical module; Transmitter Optical Subassembly (TOSA); Receiver Optical Subassembly (ROSA); extinction ratio

1 引言

近年来,随着光纤到户、全光网络等热点应用的兴起,通信业正面临带宽和速度的巨大挑战,大容量、高速率、高质量的光纤通信已成为信息产业发展的必然趋势。在此背景下,作为网络通信设备关键部件的光收发一体模块也呈现出高速化、智能化、小型化和集成化等特点。本文研究的4.25 Gbps小型可热插拔(SFP)模块是一种极具代表性的光通信模块,目前主要应用于各种存储区域网络(SAN)^[1],这种网络依托光纤通道为服务器和存储设备的连接提供更高的吞吐能力,支持更远的距离和更可靠的连通,并且不需要对现有设备进行全面升级,适用于对数据存储性能要求高、系统升级方面具有很强的动态容量可扩展性和灵活性的企事业单位。光模块在其中主要完成光源驱动、光电转换及告警输出等功能^[2]。

本文研究和设计了数据速率达到4.25 Gbps的高速SFP光模块,并对其性能进行了测试。通过分析数据结果,验证产品的性能稳定性和个体一致性,证实了设计方案的可行性,为高速SFP光模块的实际生产提供理论依据。

2 参数设计原理

4.25 Gbps SFP光模块设计的优劣取决于其能否满足性能需求,输出平均光功率和消光比是最重要的两项指标^[3]。输出平均光功率定义为光输出为高时的功率 P_1 与光输出为低时的功率 P_0 的平均值,即:

$$P_{AVG} = \frac{P_1 + P_0}{2} \quad (1)$$

而激光器的光功率为激光器的斜效率 η 与通过激光器的电流的乘积 I ,即:

$$P = \eta \cdot I \quad (2)$$

为了获得较高的储备峰值以驱动高速电流开关,激光二极管与驱动电路之间可采用交流耦合方式连接。此时,当光输出为高时,通过激光器的电流 I_1 为:

$$I_1 = I_{BIAS} + \frac{I_{MOD}}{2} - I_{th} \quad (3)$$

式中: I_{BIAS} 为偏置电流, I_{MOD} 为调制电流, I_{th} 为阈值电流。

当光输出为低时,通过激光器的电流 I_0 为:

$$I_0 = I_{BIAS} - \frac{I_{MOD}}{2} - I_{th} \quad (4)$$

消光比定义为全“1”时的平均光功率 P_1 与全“0”时的平均光功率 P_0 之比,即:

$$E_x = 10 \lg \frac{P_1}{P_0} \quad (5)$$

4.25 Gbps SFP光模块的输出平均光功率和消光比的设计值为 $P_{AVG} = -5.5$ dBm(即0.28 mW), $E_x = 6$ dB。由式(1)可得, $P_1 + P_0 = 0.56$ mW;由式(5)可得, $P_1/P_0 = 4$;所以 $P_1 = 0.448$ mW, $P_0 = 0.112$ mW。

经查阅资料,本次设计所需要的垂直腔面发射激光器(VCSEL)在-40、25和85℃下的典型斜效率 η 分别为0.15、0.11和0.06 mW/mA,阈值电流 I_{th} 约为2 mA,则:

(1) -40℃时,由式(2)、(3)和(4)可得:

$$I_{BIAS} = \frac{P_1 + P_0}{2\eta} + I_{th} =$$

$$\frac{0.56 \text{ mW}}{2 \times 0.15 \text{ mW/mA}} + 2 \text{ mA} = 3.8 \text{ mA} \quad (6)$$

$$I_{MOD} = \frac{P_1 - P_0}{\eta} = \frac{0.336 \text{ mW}}{0.15 \text{ mW/mA}} = 2.2 \text{ mA} \quad (7)$$

(2) 25℃时,由式(2)、(3)和(4)可得:

$$I_{BIAS} = \frac{P_1 + P_0}{2\eta} + I_{th} =$$

$$\frac{0.56 \text{ mW}}{2 \times 0.11 \text{ mW/mA}} + 2 \text{ mA} = 4.6 \text{ mA} \quad (8)$$

$$I_{MOD} = \frac{P_1 - P_0}{\eta} = \frac{0.336 \text{ mW}}{0.11 \text{ mW/mA}} = 3.1 \text{ mA} \quad (9)$$

(3) 85℃时,由式(2)、(3)和(4)可得:

$$I_{BIAS} = \frac{P_1 + P_0}{2\eta} + I_{th} =$$

$$\frac{0.56 \text{ mW}}{2 \times 0.06 \text{ mW/mA}} + 2 \text{ mA} = 6.7 \text{ mA} \quad (10)$$

$$I_{MOD} = \frac{P_1 - P_0}{\eta} = \frac{0.336 \text{ mW}}{0.06 \text{ mW/mA}} = 5.6 \text{ mA} \quad (11)$$

由上述计算可知,输出平均光功率仅与偏置

电流 I_{BIAS} 有关,而与调制电流 I_{MOD} 无关。因此,通过控制自动功率控制(APC)回路即可实现输出平均光功率的稳定。但随着温度上升,激光器的斜效率逐渐降低,为了保证输出平均光功率不变,偏置电流要相应增大,如果调制电流不变,那么消光比就会降低。为了使消光比稳定,有必要对调制电流也进行补偿,本文是通过微控制器的寄存器设置对调制电流进行补偿的。

3 设计方案

对 4.25 Gbps SFP 光模块的设计方案进行了讨论,其结构由独立的发射、接收和控制部分组成,具体结构如图 1 所示。

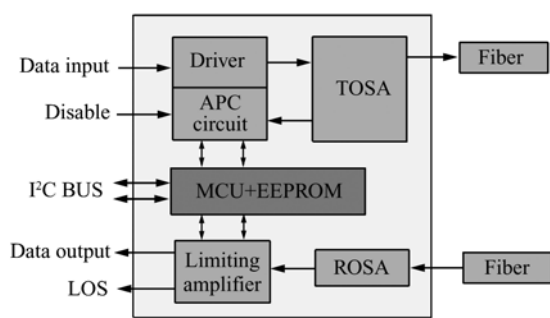


图 1 光模块结构

Fig. 1 Optical module structure

3.1 发射部分设计

模块发射部分由光发射组件(TOSA)及激光器驱动电路组成,而 TOSA 由激光二极管(LD)及背光二极管(PD)组成。LD 采用的是 VCSEL,驱动电路的作用是驱动和控制 LD。输入模块的电数据信号首先由 LD 驱动电路接收,并调制到 LD 的驱动电流(包括偏置电流和调制电流)上,驱动 LD 发出带有数据调制信号的激光。LD 驱动电路具备自动功率控制(APC)功能^[4],可根据监控 LD 发光大小的背向光输出电流,确定加给 LD 的驱动电流的大小。通过 APC 电路,激光器驱动电路可动态调节驱动电流的大小^[5]。

本文采用的 TOSA 是一种 TO-46 封装、带 LC 连接器的 850 nm VCSEL,它能将电信号转换成数据速率高达 4.25 Gbps 的光信号,其圆形光束能为 50/125 μm 和 62.5/125 μm 多模光纤提供最

佳的功率耦合效率,在 $-40 \sim 85$ $^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下,仍然具有很高的可靠性,可满足 4.25 Gbps 光收发模块的需求。

激光器驱动芯片采用 4 mm \times 4 mm 小型贴片,20 引脚 QFN 封装,包括一个集成的 APC 回路以支持激光器安全特性和收发器管理系统,同时提供一个 2 线接口,允许调制电流和偏置电流的数字控制,是一种多功能、宽工作温度的高速 VCSEL 驱动。

3.2 接收部分设计

光接收组件(ROSA)及限幅放大器组成了光模块的接收部分,其中 ROSA 又由 PD 及前置放大器(即互阻放大器)组成。从模块光接收端输入的光信号,通过模块内部的 PD 转换为电信号,输入到前置放大器进行放大。前置放大器具备自动增益控制(AGC)功能,即对小功率输入光转换后的小幅度电信号采用大增益的放大倍数,而对大功率输入光转换后的大幅度信号采用小增益的放大倍数,从而使其输出电信号的波动幅度远远小于输入光信号的波动幅度。最后,主放大器接收经前置放大器放大后的信号进行二级放大,输出模块的电数据信号。

与 TOSA 相匹配,本文选用的 850 nm LC ROSA 具备较高的多模光纤耦合效率及宽泛的工作温度等特点,可靠性较高。3.3 V 供电时,其典型工作电流仅为 15 mA,能将光信号转换成数据速率高达 4.25 Gbps 的电信号,较好地满足了高速光纤通信的需要。值得注意的是,这款 ROSA 中的 TIA 具有较低的输入噪声、2.8 GHz 带宽、AGC 功能、3.2 k Ω 互阻和接收信号强度指示(RSSI)等特点,使其能用作 4.25 Gbps 光接收器的高速互阻放大器。

限幅放大器提供一个 2 线接口,带宽、输出幅度和 LOS 阈值校准均允许数字式调整,单 3.3 V 供电,能在 $-40 \sim 85$ $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下正常工作。

3.3 控制部分设计

EEPROM 单元主要用于存储模块类型、接口形式、传输特性、产品型号、流水号及制造日期等信息,而带自动诊断监测(DDM)功能的 SFP 模块除了存储上述基本信息外,还有微控制器和一系列的数模和模数转换电路,用于模块的电压、温

度、激光器偏置电流、输入光功率和输出光功率等参数的实时监控^[6]。这5个DDM参数首先由采集电路采集转换,然后送至模数转换电路输入端,5个模拟电压量转换成数字信号,经译码电路存于支持DDM的存储器的相应地址位上^[7]。

SFP的控制功能由常用的DS1859和EEPROM单元实现。DS1859包含2个50 k Ω 或2个20 k Ω 的256级线性可变电阻,3个模拟监视器输入端以及直接数字化温度传感器^[6]。这款双路温控器件可对偏置电压和电流进行设置和温度补偿,非常适合于需要小尺寸电路的控制应用。可变电阻的设置保存在EEPROM存储器中,通过I²C串行总线进行访问。

3.4 印刷电路板(PCB) 布板设计

考虑到此款4.25 Gbps光收发模块传输速率非常高,电路板的设计除了应满足高速设计的一般要求外,还应注意以下几点:

(1)发射和接收部分的直流电源与接地端必须各自独立,电源与地应都设计成单一平面,同时发射地与接收地最好区分开来。

(2)同一组差分信号尽量处于同一平面以对称方式布线,两线之间的间距应考虑电路的阻抗匹配,使其信号变异性降至最低。

(3)IC的滤波或去耦电容尽量靠近电源并与芯片处于同一平面,考虑PCB布板空间有限,去耦电容可以放置于另一平面对应的IC下方,以过孔连接,从而使传导路径达到最短,降低寄生效应。

(4)信号路径越短越好,当遇到转折处时以圆弧或45°角方式连接,避免阻抗变化。

(5)由于在电路中传输的是高频信号,应将信号线与周围电路隔离,并在其周围多打地孔,以减小干扰^[8]。

4 模块性能测试及分析

根据本设计方案,研制了4.25 Gbps SFP光模块样品,并对其性能进行了测试及数据分析。

4.1 测试方法

测试平台连接方式如图2所示。将SFP光模

块插入测试板,测试板与一个稳压电源连接,提供模块所需的3.3 V供电电压。激光器的输出信号经光衰减器衰减后由分路器一分为二,一路连接到示波器的光口,测试发射光眼图。另一路作为光源,输入到光模块的接收端。与示波器同步的误码仪用来产生和接受4.25 Gbps的PRBS-23数据流,对比测试后计算出传输误码率。电脑通过串口,并口或USB接口与测试板相连接,通过测试软件对模块进行监控和读写操作^[6]。

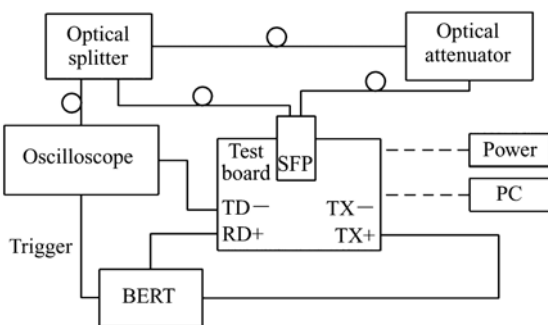


图2 测试平台

Fig. 2 Test platform

对于发射端,主要测试模块在-40~85℃环境温度下的平均光功率、消光比、波长等参数,接收端方面则测试灵敏度、告警点和告警恢复点等,并且需要考虑在宽温工作范围内光电参数的稳定性和各模块之间的性能一致性^[9]。

值得注意的是,图2中测试板的TX-端没有连接时,应接上匹配头或在TX-端与地之间串联一个50 Ω 匹配电阻以保证差分信号传输质量,这有利于更好地测试模块性能^[10]。

4.2 测试数据及分析

表1列举了样品模块以4.25 Gbps传输速率分别在-40、25和85℃环境温度下的性能测试数据。

从表1可以看到,SFP样品模块在-40~85℃环境温度下工作时,输出光功率均满足设计要求,且变化幅度不超过1 dBm,消光比和灵敏度也比较稳定。在宽温范围内告警和告警恢复基本保持了2 dBm的功率间隔,有效避免了某些情况下光模块在告警点上的反复报警。

表 1 测试数据

Tab.1 Test data

温度/℃	输出光功率/dBm	消光比/dB	波长/nm	灵敏度/dBm	告警/dBm	告警恢复/dBm
-40	-5.1	6.0	846.5	-19.2	-23.6	-21.5
25	-5.6	6.1	851.2	-18.6	-22.7	-20.9
85	-4.8	5.8	857.5	-18.4	-23.5	-21.6

为了验证此设计方案的性能一致性,需要测试批量样品模块在宽温下的性能表现,主要包括光功率、消光比和灵敏度等参数指标。

图 3 为 10 支 SFP 光模块在 -40、25 和 85 ℃ 环境温度下的光功率变化趋势。从图 3 可以看到,宽温环境下各模块的光功率相对集中,-40、25 和 85 ℃ 3 个温度点下的变化幅度控制在 1 dBm 以内,且各支模块的变化趋势基本一致,APC 回路发挥了较大作用。值得注意的是,-40 ℃ 时的功率集中程度最好,这是由于温度较低时激光器的斜效率较高,要达到额定光功率所需的偏置电流 I_{BIAS} 较小,激光器的差异不会明显表现出来。当温度升高时激光器斜效率降低,偏置电流 I_{BIAS} 和调制电流 I_{MOD} 相应增加,LD 工作活性增强,放大了模块个体的性能差异。

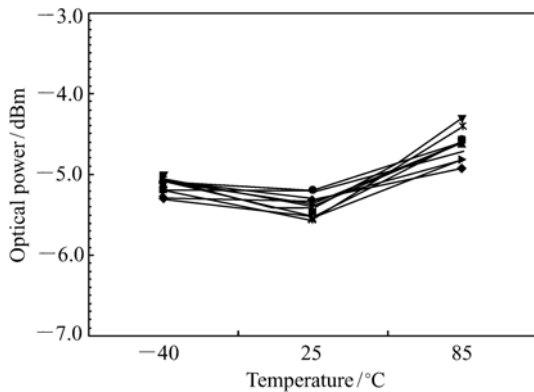


图 3 光功率变化趋势

Fig.3 Change trend of optical power

图 4 为 10 支 SFP 光模块在 -40、25 和 85 ℃ 环境温度下的消光比变化趋势。在环境温度改变时,模块个体消光比的集中度较好,即使从 -40 ℃ 上升到 85 ℃,变化幅度也不超过 1 dB。

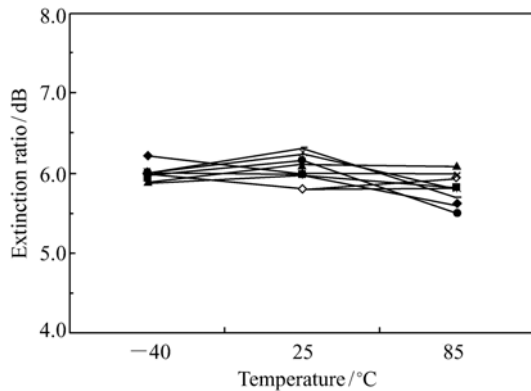


图 4 消光比变化趋势

Fig.4 Change trend of extinction ratio

图 5 为 10 支 SFP 光模块在 -40、25 和 85 ℃ 环境温度下的灵敏度变化趋势。3 个工作温度下的灵敏度分别集中于 -19.5、-18.5 和 -18 dBm,且变化趋势基本相同,符合协议要求,表现出较好的接收性能。

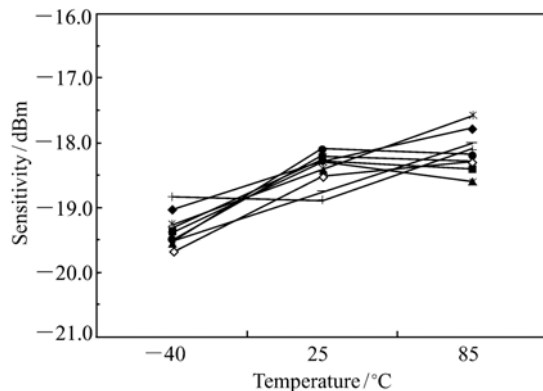


图 5 灵敏度变化趋势

Fig.5 Change trend of sensitivity

从以上各参数变化趋势可以看出,样品模块

在其工作温度和电压范围内各项性能指标变化幅度较小,性能非常稳定。另一方面,模块个体之间的性能区别较小,一致性较好。

5 结 论

本文设计并研制了 SFP 模块样品,该模块符

合光纤通道、SFP MSA 及 SFF-8472 标准,光功率、消光比和灵敏度等性能参数符合典型值,即使在环境温度大范围变化情况下仍能稳定工作,参数变化幅度很小,并且小批量试产后模块个体一致性较好,具有较高的可行性,经过进一步的调试及改进,通过中试优化后即可大规模生产并投入市场。

参考文献:

- [1] 郭艳菊,陈国鹰,安振峰. 光发射模块研究与进展[J]. 半导体技术,2005,30(9):4-7.
GUO Y J, CHEN G Y, AN ZH F. Study and development of optical transmission module[J]. *Semiconductor Technol.*, 2005,30(9):4-7. (in Chinese)
- [2] HU W, WANG G L. Design of 4.25 Gbps small form-factor pluggable(SFP) transceiver[J]. *Semiconductor Photonics and Technology*, 2009,55(1):56-62.
- [3] 亢俊健,宁书年. 光收发模块眼图、消光比及灵敏度关系的实验研究[J]. 激光杂志,2003,24(2):61-62.
KANG J J, NING SH N. Experimental research on the eye-diagram, extinction-ratio and sensitivity of optical receiving-transmitting modules[J]. *Laser J.*, 2003,24(2):61-62. (in Chinese)
- [4] 陈晓鹏,王亚非. 4.25 G/s 光收发模块性能研究[J]. 光通信技术,2006(7):27-29.
CHEN X P, WANG Y F. Study on the characteristics of 4.25 G/s optical transceiver[J]. *Opt. Communication Technol.*, 2006(7):27-29. (in Chinese)
- [5] 王妮,侯韶华. 基于 SFP 光模块控制系统的设计与实现[J]. 光通信技术,2010(9):36-38.
WANG N, HOU SH H. The design and implement based on a SFP optical transceiver's control system[J]. *Opt. Communication Technol.*, 2010(9):36-38. (in Chinese)
- [6] 吴旭. 智能 SFP 光模块数字诊断功能的实现[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2006,28(11):156-159.
WU X. Realization of digital diagnostics for SFP optical transceiver[J]. *J. Wuhan University Technol. (Information & Management Engineering)*, 2006,28(11):156-159. (in Chinese)
- [7] 邓燕妮,程社成. 基于 DS1859 的 SFP 模块数字诊断技术的研究[J]. 中国水运(理论版),2006,4(3):120-123.
DENG Y N, CHEN SH CH. The research of SFP modules digital diagnostic technology based on the DS1859[J]. *China Water Transport(Theory Edition)*, 2006,4(3):120-123. (in Chinese)
- [8] 彭涛,郭峰. 高速光收发模块的技术分析与设计[J]. 浙江万里学院学报,2007,20(3):75-78.
PENG T, GUO F. Analysis and design of high speed optical transceiver module[J]. *J. Zhejiang Wanli University*, 2007, 20(3):75-78. (in Chinese)
- [9] 殷爱菡,黄晓东,安鲁陵,等. 光收发模块性能参数测试与分析[J]. 江西科学,2005,23(4):176-177.
YIN A H, HUANG X D, AN L L, *et al.*. The test and analysis of transceiver function parameters[J]. *Jiangxi Science*, 2005,23(4):176-177. (in Chinese)
- [10] 葛建军. 高速 SFP 光模块的失效分析[J]. 光通信研究,2010(5):325-329.
GE J J. Failure analysis of high-speed SFP optical modules[J]. *Study on Optical Communications*, 2010(5):325-329. (in Chinese)

作者简介:刘 希(1984—),男,湖北武汉人,硕士,工程师,主要从事光收发模块方面的研究。E-mail:liuxi@wtd.com.cn