

光通信 10Gbit/s Transponder 的设计

谢 亮, 王 欣, 黄亨沛, 张家宝, 祝宁华

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 本文分析了在高速光模块设计中介质损耗和微带结构对信号的影响, 并对 PCB 中信号串扰模型的参数进行了计算. 解决了高速光模块设计的一些关键问题, 设计出满足 MSA 的 300 pin transponder, 并对模块进行了一系列性能和指标测试. 测试结果表明, 该模块完全满足 SDH/SONET(STM-64/OC-192) 以及 10G Ethernet 应用要求.

关键词: 光通信; 光收发模块; 10Gbit/s; transponder

中图分类号: TN919, TN702 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 02-0337-04

The Design of 10Gbit/s Transponder for Optical Communication

XIE Liang, WANG Xin, HUANG Heng-pei, ZHANG Jia-bao, ZHU Ning-hua

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China)

Abstract: The design and fabrication of 10Gbit/s transponder are presented. Key technologies of 10Gbit/s optical transceiver module are resolved. According to the MSA, the 300 pin transponder is designed. Experiments and tests show that the module entirely satisfies the application requirement of SDH/SONET(STM-64/OC-192) and 10G Ethernet.

Key words: optical communication; optical transceiver module; 10Gbit/s; transponder

1 引言

光通信用光收发一体化模块一直是光通信领域研究的热点之一. 随着光电子器件和微电子集成电路芯片技术的不断发展, 光收发模块的体积越来越小, 速率也越来越高, 并在模块中加入了更多的物理层(PHY)功能. 目前, 单波 10Gbit/s 是光通信干线传输的主流, 各个公司相继推出了符合 MSA 规范^[1]的 10Gbit/s 模块. 这些光收发模块具有很好的兼容性, 可以在不同系统间互换, 以简化系统设计.

本文重点讨论了在 10Gbit/s 的光收发模块设计中的关键技术问题. 由于高速光收发模块中的核心电路工作在微波波段, 因此在模块设计时, 信号的完整性问题也越来越显得突出. 合理的电路设计, 对模块的性能起到至关重要的作用. 在众多种类的 10Gbit/s 模块中, 300 pin Transponder 具有代表性, 并且有着广泛的应用. 在此, 我们以 300 pin Transponder 为例, 讨论高速光收发模块的设计及一些关键的技术.

2 10Gbit/s transponder 设计的关键技术

从功能上来说, 光收发模块的基本功能就是进行光电转换, 它主要由光发射和光接收两部分以及其它辅助电路组成, 实现物理介质相关接口功能.

我们在 10Gbit/s 激光器和探测器模块封装的基础

上^[2~5], 设计了 300 pin Transponder. 结构框图如图 1 所示, 该模块主要包括激光器模块、探测器模块、16:1 的 MUX/DEMUX、时钟恢复(CDR)、激光器驱动电路、限幅放大器(LA)、光功率控制(APC)和制冷器(TEC)控制电路等. 光接口的速率为 10Gbit/s, 电接口包含有 16 路 622Mbit/s 的输入信号和 16 路 622Mbit/s 的输出信号, 以及时钟信号和其他监控信号. 为了使模块工作状态更加稳定可靠, 通常还包含一些辅助电路, 如激光器保护电路(慢启动、过流保护等). 同时模块具有远程监控、管理功能. 为了有效地增加传输距离, 还支持双二进制(Dour Binary)编码. 模块遵从 MSA 和 ITU-T 设计, 完全兼容 SONET/SDH 应用.

10Gbit/s 的电信号在电路板(PCB)上传输时, 集总参数元件模型将不再适用, 需要用场模型来解决分布参数的问题. 当信号完整性(Signal Integrity)变坏时, 会出现波形的过冲、欠冲、振荡、延时、抖动等等, 严重时会导致信号无法识别, 造成这种现象的原因是多方面的, 主要有: 电路板上传输线的损耗、传输线阻抗和负载阻抗不匹配、传输线间串扰以及其他一些寄生参数影响等.

在有限的电路板面积上, 要实现 300 pin transponder 的各部分功能, 需要解决一系列问题, 如 PCB 介质材料的选择、高速传输线的设计、差分信号线对的设计以及器件的散热结构等等, 如果稍有不慎, 可能会导致整个设计的失败, 下面我们

重点介绍在 PCB 设计中几个问题的解决。

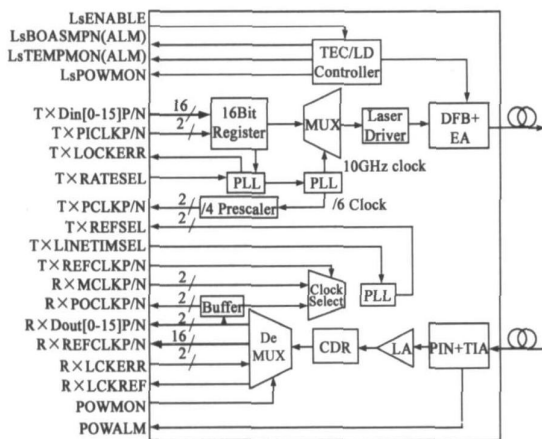


图 1 300-pin Transponder 结构示意图

2.1 PCB 传输线的损耗和阻抗匹配

在进行高速 PCB 设计时, 常用的高速信号传输线是微带线。然而, 微带线的损耗将影响信号的驱动能力和信噪比; 同时损耗对频率的依赖关系会导致在微带中传输的信号发生畸变。微带线的损耗主要有导体损耗、介质损耗、辐射损耗和表面波传输损耗四个方面。对于导体损耗和介质损耗可以用下面的公式来计算:

$$P = P_0 e^{-2\alpha l} \quad (1)$$

其中 P 为微带输出功率, P_0 为输入功率, l 为微带线长度, α 为衰减常数, 它由介质衰减常数和导体衰减常数组成。对于介质衰减系数, 与介质的 $\tan\delta$ 损耗角正切有关, 它是衡量介质材料损耗大小的一个重要因素^[6], 而导体损耗主要与传输线的特征阻抗和趋肤深度 δ_s 有关^[7]。当传输信号的速率达到千兆以上时, PCB 中介质损耗

和导体损耗都比较显著。要降低微带线的高频损耗需要选取损耗角正切小的材料, 以减小介质损耗。常用的高频材料为 FR4 和 Rogers 系列板材。Rogers 板材的介质损耗角正切比 FR4 小一个数量级, 约为 0.0037。

另一方面, 由于一般 PCB 工艺的导体层是铜, 所以它的趋肤深度是一定的, 图 2 微带线和差分耦合线的结构降低导体损耗的必然要用阻抗匹配的微带传输线, 以减小高频信号的反射和损耗。图 2 给出了常用的微带线 (a) 和用于差分信号的微带耦合线 (b)。对于图 2(a), 当 $0.1 < W/H < 3.0$ 时, 微带线的特征阻抗可以用下式计算:

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98H}{0.8W + T} \right) \quad (2)$$

式中, ϵ_r 为介质的介电常数, 对于 FR-4 电路介质板来说, 约为 4.6, Rogers 系列板材约为 3.38; H 为介质厚度, T 为导体层

厚度; W 为传输线宽度。同样, 也可以得到图 2(b) 微带耦合线的特征阻抗^[7]。

我们计算了 Rogers 板

材上三种不同长度的 50Ω

微带线的传输参数并和

实测结果进行了比较。从

图 3 可以看出, 频率越高,

计算值与实测值差别越

大, 在较高频率下微带线

的损耗要大的多。可能的

原因有两方面, 一是介质

材料本身在频率较高时

性能变差, 损耗角正切随频率的升高而增大; 二是上述计算中

并未考虑辐射损耗和表面波传输, 当频率达到 10GHz 时, 这两种损耗变的十分显著^[8], 对于 Rogers 这种相对电容率较小的

材料尤为如此。另外, 辐射和表面波会引起微带线和其它电路

之间的寄生耦合, 影响整个 PCB 板的电磁兼容 (EMC) 性能。

2.2 微带线中的耦合串扰

在传输线上传输的高速信号很容易在它周围的传输线上产生耦合串扰, 这就要求传输线之间的距离尽可能大; 而 PCB 板尺寸的减小又要求传输线的距离尽量小。传输线可以用单位长度上的分布电容 C_s 和分布电感

L_s 来描述。有耦合的两条传输线除了各自的分布电容和电感外, 还应该引入两传输线间的耦合电容 C_m 和耦合电感 L_m 来分别描述它们的电场耦合和磁场耦合。单位长度耦合传输线分布电路参数模型如图 4 所示。

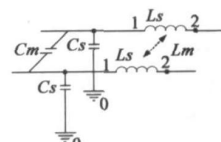


图 4 耦合传输线的分布电路模型

定量分析计算传输线中的串扰, 关键是如何得到 C_s 、 L_s 、 C_m 和 L_m 四个参量。由于有另一条传输线的影响, 这里的 C_s 和 L_s 与一条传输线单独存在时的分布电容和分布电感有所不同。这四个参量可以由数值场解得到的曲线进行拟合而得到经验公式, 文献[9]提出了一组基于实验测试数据的经验公式。

基于我们的实验数据, 我们对文献[9]的经验公式做了一些修正, 得到如下四个计算 C_s 、 L_s 、 C_m 和 L_m 的经验公式:

$$C_s = \epsilon \left[1.15 \cdot \left(\frac{W}{H} \right)^{0.963} + 1.07 \cdot \left(\frac{T}{H} \right)^{0.049} + \exp \left(-3.52 \cdot \frac{S}{H} \right) \cdot \left[0.75 \cdot \left(\frac{W}{H} \right)^{0.25} + 2.7 \cdot \left(\frac{T}{H} \right)^{1.36} \right] \right] \quad (3)$$

$$C_m = \epsilon \left[1.17 \cdot \left(\frac{W}{H} \right)^{0.083} \cdot \left(\frac{S}{H} + 0.402 \right)^{-0.77} + \left(\frac{S}{H} + 1.32 \right)^{-0.7} \cdot \left[-1.36 \cdot \left(\frac{W}{H} \right)^{0.067} + 0.227 \cdot \left(\frac{T}{H} \right)^{0.98} \right] \right] \quad (4)$$

$$L_s = \mu_0 \left[3.71 \cdot \left(\frac{H}{W} \right)^{0.041} + 0.018 \cdot \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.73} - 3.39 \cdot \left(\frac{H}{T} \right)^{-0.0006} + \exp \left(-1.89 \cdot \frac{S}{H} \right) \cdot \left[0.75 \cdot \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.0062} - 0.84 \cdot \left(\frac{H}{T} \right)^{0.006} \right] \right] \quad (5)$$

$$L_m = \mu_0 \left[\left[-0.415 \cdot \left(\frac{H}{W} \right)^{-0.16} - 2.38 \cdot \left(\frac{T}{W} \right)^{1.18} \right] \cdot \left(\frac{S}{H} + 1.07 \right)^{-2.75} \right]$$

$$+ \left(0.89 + \frac{S}{H} \right)^{-2} \cdot \left[0.418 \cdot \left(\frac{H}{W} \right)^{0.13} + 1.37 \cdot \left(\frac{T}{W} \right)^{1.09} \right] \quad (6)$$

其中 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, 单条微带特性阻抗为 50Ω , 只有间距 S 和平行长度 L 为变量。

2.3 模块整体设计

在 300-pin transponder 的 PCB 设计中, 由于 PCB 中同时存在 622Mbit/s 的差分信号线和 10Gbit/s 的信号传输线, 所以合理的布局和走线显得尤为重要。为了避免 10Gbit/s 的信号在 PCB 传输的过程中恶化, 10Gbit/s 的传输线全部安排在顶层, 可以消除由于传输线通过在不同层时, 过孔 (via) 引起的阻抗不连续, 从而保证 10Gbit/s 的信号完整性。对于 PCB 中多对差分信号, 即要考虑到串扰, 又要保证不同差分线之间的长度匹配, 以免导致信号间的相位差别, 我们在设计 PCB 时, 差分线对长度差控制在 0.5mm 以内。激光器采用 DFB+ EA 的集成光源, 7-pin 蝶型封装, 集成了 TEC; 探测器采用 PIN PD, 17-pin 表贴封装, 内部集成 TIA。

3 10G transponder 的实现和测试结果

我们对 300-pin transponder 进行了基本参数测试和光传输测试。测试装置如图 5 所示, 采用 16 路电信号环回的方法测试 Transponder 模块。采用 Advantest D3186 码型发生器产生 10Gbit/s 伪随机码, 高速调制光源为 DFB+ EA 集成光源, 误码仪采用 Advantest D3286。眼图测量采用 Tektronix CAS8000 通信信号分析仪。

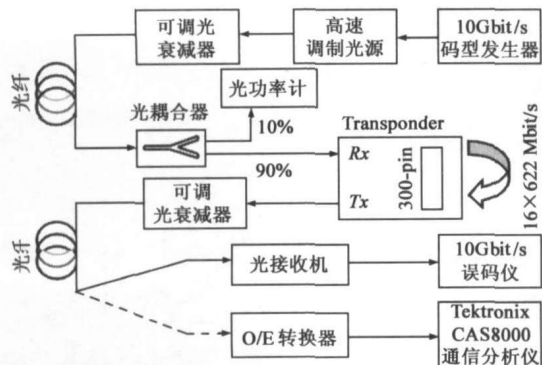


图 5 10Gbit/s Transponder 测试系统示意图

3.1 消光比测试

消光比定义为:

$$Ex = 10 \lg \frac{P_1}{P_0} \quad (7)$$

P_1 为逻辑“1”的平均光功率, P_0 为逻辑“0”的平均光功率。G. 957 规定长距离传输时消光比为 10dB。标准光接收机由光电转换器和四阶贝塞尔-汤姆逊滤波器组成。眼图中心处的“1”和“0”分别对应整个比特区间上逻辑“1”和逻辑“0”的电平的平均值。由上式即可计算出消光比。我们实际测得消光比为 10.7dB。

3.2 眼图测试

不同光纤长度的光发射眼图, 如图 6 所示, 从图中可以看出, 该模块符合 SDH/SONET OC 192 眼图模板, 并有一定的冗余度。在 75km 时, 眼图仍然张开, 误码测试表明, 此时仍可以

满足通信要求。

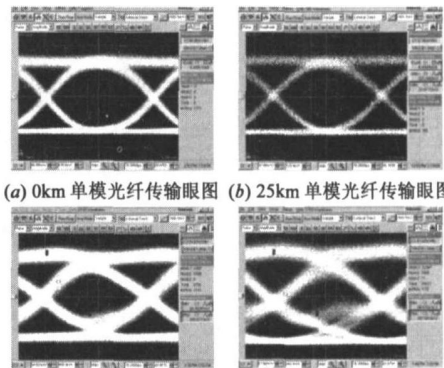


图 6 Transponder 的光发射眼图

3.3 灵敏度测试

为了更快的准确得到模块的灵敏度, 我们采用外推测试法^[10], 测试结果从图 7 可以看出, 我们设计的模块灵敏度可达 -19dBm。

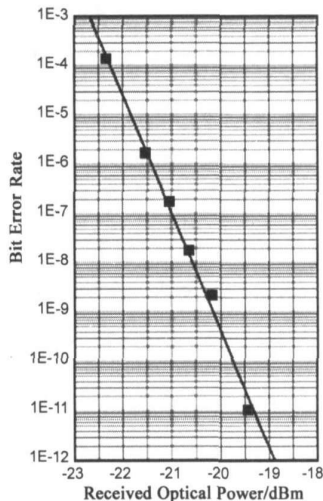


图 7 Transponder 灵敏度测试结果

4 结束语

在高速光收发模块中, 主要电路工作在微波波段, 信号的完整性显得尤为重要, 本文以符合 MSA 规范的 300-pin Transponder 设计为例, 分析了介质损耗和微带结构对信号的影响, 并研究了 PCB 中信号串扰的问题, 对串扰模型的参数进行了计算。成功设计了 10Gbit/s Transponder, 并对主要参数进行测试。测试结果显示, 该模块传输距离可达 75km, 接收灵敏度 -19dBm, 符合 ITU-T 和 SDH OC-192 规范, 可以满足中长距离光通信需求。表明我们能自主设计光通信的核心器件和光收发模块, 并可以产业化。同时, 利用该工作基础, 可以设计开发高速光通信的新型器件和模块。

参考文献:

[1] Reference document for 300-pin 10Gb transponder [DB/OL].

<http://www.300pinmsa.org/document/MSA-10G-TRX->

Public. Document. Edition. 4. zip, 2002- 09- 20.

- [2] 张胜利, 刘宇, 孙建伟, 祝宁华. 高速光探测器封装的优化设计[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 659- 662.
Zhang Sheng li, Liu Yu, Sun Jiar wei, Zhu Ning-hua. Optimized pack of high speed photodiode[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 659- 662. (in Chinese)
- [3] 孙建伟, 张胜利, 王幼林, 谢亮, 祝宁华. 高速信号眼图测试中夹具影响的校准[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1563- 1565.
Sun Jiar wei, Zhang Sheng li, Wang Your lin, Xie Liang, Zhu Ning-hua. Correction of the fixture effect on the high speed eye diagram measurement [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(9): 1563- 1565. (in Chinese)
- [4] 张胜利, 孙建伟, 谢亮, 祝宁华, 光探测器芯片的高频特性测量[J]. 中国激光, 2004, 31(7): 857- 860.
Zhang Sheng li, Sun Jiar wei, Xie Liang, Zhu Ning-hua. Measuring the high frequency characteristics of chip photodiodes [J]. Chinese J. Lasers, 2004, 31(7): 857- 860. (in Chinese)
- [5] 刘宇, 谢亮, 袁海庆, 张家宝, 祝宁华, 孙长征, 熊兵, 罗毅. 10Gb/s 电吸收调制器集成光源的微波封装设计[J]. 中国激光, 2005, 32(12): 1495- 1498.
Liu Yu, Xie Liang, Yuan Hai-qing, et al. Microwave packaging for 10 Gb/s EML modulators[J]. Chinese J. Lasers, 2005, 32(12): 1495- 1498. (in Chinese)
- [6] E O Hammerstad, F Bekkadal. A microstrip handbook, ELAB Report[R]. STF44A 74169, Norway: University of Trondheim, 1975. 98- 110.
- [7] Kai Chang. Handbook of RF/Microwave Components and Engineering[M]. Hoboken: Published by John Wiley & Sons,

Inc, 2003. 55- 57.

- [8] J R James, A Henderson. High frequency behavior of microstrip open circuit terminations[J]. IEE Journal on Microwaves, Optics and Acoustics, 1979, 3(5): 205- 218.
- [9] Y S Sohn, J Lee, et al. Empirical equations on electrical parameters of coupled microstrip lines for crosstalk estimation in printed circuit board[J]. IEEE Trans on Advanced Packaging, 2001, 24(4): 521- 527.
- [10] 朗讯科技光网络部. 光传输技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 北方交通大学出版社, 2003. 432- 434.

作者简介:



谢 亮 1969 年 8 月生于甘肃, 1998 年毕业于兰州大学获博士学位, 现为中科院半导体所副研究员. 主要从事高速光电子器件的封装、测试以及光通信子系统研发、设计.
E-mail: xiel@semi.ac.cn



王 欣 1975 年 2 月生于吉林, 1998 年毕业于北京理工大学获学士学位, 现为中科院半导体所在职硕士研究生. 主要方向是高速光电子器件的测试、封装以及光通信收发模块的设计.