



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

# 硕士学位论文

高速光模块的设计与实现

作者姓名: \_\_\_\_\_ 牛星茂 \_\_\_\_\_

指导教师: \_\_\_\_\_ 刘丰满 研究员 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 中国科学院微电子研究所 \_\_\_\_\_

学位类别: \_\_\_\_\_ 工程硕士 \_\_\_\_\_

学科专业: \_\_\_\_\_ 集成电路与工程 \_\_\_\_\_

培养单位: \_\_\_\_\_ 中国科学院大学微电子学院 \_\_\_\_\_

2021 年 6 月



# **Design and implementation of High Speed Optical Module**

**A thesis submitted to**

**University of Chinese Academy of Sciences**

**In partial fulfillment of the requirement**

**for the degree of**

**Master of Engineering**

**in integrated circuit engineering**

**By**

**Xingmao Niu**

**Supervisor: Fengman Liu**

**School of Microelectronics**

**University of Chinese Academy of Sciences**

**June 2021**



## 中国科学院大学

### 研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名： 牛星茂

日期：2021.05.27

## 中国科学院大学

### 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分內容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名： 牛星茂

日期：2021.05.27

导师签名： 刘丰茂

日期：2021.05.27



## 摘 要

由于大数据和云计算等新技术的兴起，数据中心处理和交换的数据流量急剧增长。在数据中心光通信网络里，400G 光互连正在逐渐代替 100G 光互连，400G 光互连将成为数据中心发展的必然趋势和下一代网络升级的方向。400G 光模块作为光网络的核心组成，主要用于光电/电光转换，400G 光模块在构建 400G 网络系统中起着至关重要的作用。本文基于光电器件特性，针对两种 400G 光模块封装，围绕封装结构、电互连信道建模仿真、光耦合设计、热电制冷器（Thermo Electric Cooler, TEC）温控技术、组装等共性关键技术问题开展了研究，完成了基于波分复用 NRZ 码型调制的 400G 光发射模块的设计、制作与测试，完成了 8 通道并行传输 PAM4 码型调制的 400G 收发一体光模块的设计，具体工作和研究成果如下：

（1）针对两种 400G 光模块，完成了芯片选型、原理图设计以及电学信道建模，通过对连接器、电容、过孔、焊盘等不连续结构阻抗的计算和优化，使得差分互连信道的阻抗特性控制在  $100 \pm 10$  欧姆的范围内，改善高频传输特性，经测试满足要求。

（2）基于细波分复用（LWDM）技术和 NRZ 调制方案，完成了 100G 光发射组件（TOSA）的 TEC 闭环温控，确保了激光器输出光波长和工作性能的稳定性。完成了时钟数据恢复芯片以及驱动芯片的编程控制，实现了互连信道的补偿与优化。选用垂直紧凑结构高频电连接器，实现 4 组 TOSA 的集成，测试表明单 TOSA 带宽达到 100Gbps，4 组 TOSA 封装后实现 400Gbps 的总带宽。

（3）基于 8 通道并行的 PAM4 调制方案，采用 COBO（Consortium for on-Board Optics）封装结构，完成了基于两种不同电芯片方案的 400G 收发一体光模块的设计和优化，完成了  $45^\circ$  多模光纤阵列（Fiber Array, FA）的光耦合结构设计和光耦合效率的分析，完成了电学互连基板的制作。

**关键词：**400G 光模块，波分复用，光耦合，COBO 封装，热电制冷器

## Abstract

Due to the rise of new technologies such as big data and cloud computing, the data traffic processed and exchanged in data centers has increased dramatically. In data center optical communication networks, 400G optical interconnect is gradually replacing 100G optical interconnect, and 400G optical interconnect will become the inevitable trend of data center development and the direction of next generation network upgrade. 400G optical modules, as the core components of optical networks, are mainly used for optoelectronic/electro-optical conversion, and 400G optical modules play a crucial role in building 400G network systems. In this paper, based on the characteristics of optoelectronic devices, two kinds of 400G optical module packages, around the package structure, electrical interconnection channel modeling simulation, optical coupling design, Thermo Electric Cooler (TEC) temperature control technology, assembly and other common key technical issues were studied, completed the wavelength division multiplexing NRZ code type modulation-based 400G optical transmitter module. We have completed the design, fabrication and testing of 400G optical transmitter modules based on WDM NRZ modulation, and the design of 400G transceiver modules with 8-channel parallel transmission PAM4 code type modulation, and the specific work and research results are as follows.

(1) For the two 400G optical modules, chip selection, schematic design and electrical channel modeling are completed. Through the calculation and optimization of the impedance of discontinuous structures such as connectors, capacitors, vias and pads, the impedance characteristics of the differential interconnection channel are controlled within the range of  $100 \pm 10$  ohms to improve the high frequency transmission characteristics, which are tested to meet the requirements.

(2) Based on the fine wavelength division multiplexing (LWDM) technology and NRZ modulation scheme, the closed-loop TEC temperature control of the 100G

optical transmitter assembly (TOSA) was completed to ensure the stability of the laser output optical wavelength and operating performance. Completed the programming control of the clock data recovery chip as well as the driver chip to achieve the compensation and optimization of the interconnect channel. The vertical compact structure high-frequency electrical connector is selected to realize the integration of 4 groups of TOSAs, and the test shows that the bandwidth of single TOSA reaches 100Gbps, and the total bandwidth of 400Gbps is realized after 4 groups of TOSAs are packaged.

(3) Based on the 8-channel parallel PAM4 modulation scheme, the COBO (Consortium for on-Board Optics) packaging structure was used to complete the design and optimization of the 400G transceiver optical module based on two different electrical chip schemes, and the design of the optical coupling structure of the 45 ° multimode fiber array (Fiber Array) and the analysis of the optical coupling efficiency were completed. The analysis of the optical coupling efficiency of the 45 ° multimode fiber array was completed, and the fabrication of the electrical interconnect substrate was completed.

**Key Words:** 400G Optical Module, WDM, Optical coupling, COBO package, TEC

## 目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 光模块国内外研究现状.....	3
1.2.1 400G 光模块的分类.....	3
1.2.2 400G 光模块封装.....	8
1.3 400G 光模块接口物理层技术方案.....	9
1.4 本论文的主要研究内容以及组织结构.....	12
第 2 章 400G 高速光模块设计理论基础.....	15
2.1 光模块的结构设计.....	15
2.1.1 光发射结构设计.....	15
2.1.2 光接收结构设计.....	21
2.1.3 光信号传输部分-光纤和耦合结构的设计.....	22
2.2 400G 光模块的光电特性研究.....	26
2.2.1 400G 光模块的电学特性研究.....	26
2.2.2 400G 光模块的光学特性研究.....	30
2.3 本章小结.....	33
第 3 章 基于 LWDM 的 400G 光发射模块的设计与实现.....	35
3.1 模块方案制定及器件选型.....	35
3.1.1 模块方案的制定.....	35
3.1.2 模块内部器件类型.....	36
3.2 原理图及版图的设计.....	39
3.2.1 原理图设计.....	39
3.2.2 版图设计.....	39
3.3 模块板电互连信道建模仿真.....	42
3.4 光发射模块的微组装.....	47
3.5 光发射模块的性能测试.....	47
3.5.1 传输线 S 参数测试.....	48

3.5.2 眼图测试.....	49
3.6 本章小结.....	54
第 4 章 基于 COBO 的 400G 收发一体光模块的设计与实现.....	55
4.1 模块方案制定及器件选型.....	55
4.2 版图设计.....	59
4.3 模块板电互连信道建模仿真.....	60
4.4 光路设计.....	64
4.5 本章小结.....	66
第 5 章 总结与展望.....	69
5.1 论文总结.....	69
5.2 未来工作展望.....	70
参考文献.....	71
致 谢.....	75
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果.....	77

## 图目录

图 1.1	数据中心内部结构.....	1
图 1.2	光模块结构.....	2
图 1.3	光模块发展速率及升级周期.....	2
图 1.4	400G LR8 光模块原理框图.....	4
图 1.5	400G LR8 光模块测试眼图.....	4
图 1.6	400G DR4 硅光模块解决方案.....	5
图 1.7	400G DR4 硅光模块及光眼图.....	5
图 1.8	400G SR8 光模块及测试结果.....	6
图 1.9	400G PSM8 光模块.....	7
图 1.10	400G PSM8 光模块眼图测试结果.....	7
图 1.11	光模块封装结构.....	9
图 1.12	400G FR4 光模块设计原理图.....	11
图 2.1	光模块的功能.....	15
图 2.1	光模块的功能.....	15
图 2.2	光发射结构设计原理图.....	16
图 2.3	DFB 激光器结构示意图.....	16
图 2.4	DFB 激光器封装实物图.....	17
图 2.5	DFB 激光器小信号等效电路.....	17
图 2.6	COC 示意图.....	18
图 2.7	异面电极 VCSEL 结构.....	19
图 2.8	共面电极 VCSEL 结构.....	19
图 2.9	光接收结构设计原理图.....	21
图 2.10	PIN 的工作原理.....	22
图 2.11	光纤结构图.....	23
图 2.12	单模光纤.....	23

图 2.13	多模光纤.....	23
图 2.14	基于 45° 反射镜耦合方式.....	25
图 2.15	45° 光纤示意图.....	25
图 2.16	45° FA 结构.....	26
图 2.17	45° FA 耦合结构图.....	26
图 2.18	耦合传输线的等效电路模型.....	28
图 2.19	NRZ 与 PAM4 的波形及对应眼图.....	30
图 2.20	WDM 传输.....	31
图 2.21	TEC 工作原理图.....	32
图 3.1	光发射模块设计原理图.....	36
图 3.2	光发射模块封装侧视图.....	36
图 3.3	TOSA 内部电路图.....	37
图 3.4	CDR 电路图.....	38
图 3.5	电连接器外观图.....	39
图 3.6	原理图设计.....	39
图 3.7	叠层设计结构.....	40
图 3.8	版图设计.....	42
图 3.9	仿真模型及结果.....	43
图 3.10	仿真模型及结果.....	43
图 3.11	仿真模型及结果.....	44
图 3.12	仿真模型及结果.....	45
图 3.13	仿真模型及结果.....	45
图 3.14	仿真模型及结果.....	46
图 3.15	光发射模块实物电路板.....	46
图 3.16	微组装流程图.....	47
图 3.17	光发射模块实物图.....	47
图 3.18	长度为 1.1CM 的传输线测试结果.....	48
图 3.19	长度为 2.1CM 的传输线的测试结果.....	48

图 3.20	眼图测试方案.....	49
图 3.21	光模块测试平台.....	50
图 3.22	TOSA 发射光波长图.....	51
图 3.23	LANE0@PBRs-7 的光眼图.....	51
图 3.24	LANE0@PBRs-31 的光眼图.....	52
图 3.25	LANE1@PBRs-7 的光眼图.....	52
图 3.26	LANE1@PBRs-31 的光眼图.....	52
图 3.27	LANE2@PBRs-7 的光眼图.....	53
图 3.28	LANE2@PBRs-31 的光眼图.....	53
图 3.29	LANE3@PBRs-7 的光眼图.....	53
图 3.30	LANE3@PBRs-31 的光眼图.....	54
图 4.1	400G SR8 光模块方案设计图.....	55
图 4.2	400G SR8 光模块芯片选型.....	56
图 4.3	400G SR8 光模块的 COBO 封装结构.....	56
图 4.4	1×4 阵列的 VCSEL.....	57
图 4.5	1×4 阵列的 PD.....	57
图 4.6	差分信号最佳端口.....	58
图 4.7	模块板版图设计.....	60
图 4.8	测试板版图设计.....	60
图 4.9	CDR 焊盘仿真模型及结果.....	61
图 4.10	仿真模型及结果.....	61
图 4.11	仿真模型及结果.....	62
图 4.12	仿真模型及结果.....	63
图 4.13	仿真模型及结果.....	63
图 4.14	光芯片端面与光纤端面的角度变化.....	64
图 4.15	光芯片端面与光纤端面夹角的耦合效率.....	64
图 4.16	光轴上方向上的相对偏移.....	65
图 4.17	光轴方向上相对偏移后的耦合容差.....	65

图 4.18 在光纤端面上的相对偏移..... 66

图 4.19 在光纤端面上相对偏移后的耦合效率..... 66

## 表目录

表 1.1	光模块分类及优缺点对比.....	9
表 1.2	400G 光模块分类及接口物理层技术方案.....	10
表 2.1	VCSEL 和 DFB 参数对比.....	20
表 2.2	三种耦合结构的对比.....	24
表 2.3	四种 WDM 技术的对比.....	31
表 3.1	测试设备清单.....	49
表 4.1	连接器差分信号端口测试结果.....	58



## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

数据中心内部（图 1.1）是一系列的交换机和服务器，这些服务器与交换机通过光模块和光纤完成互联，组成强大的虚拟计算机，以此来提升数据中心的计算能力以及存储能力<sup>[1]</sup>。现在云计算的应用越来越广泛，数据中心作为云计算的核心，需要强大的计算能力和数据交换水平来应对云计算的高速发展<sup>[2]</sup>。数据中心内部的数据传输速率从 10G→40G→100G，下一代数据中心将会经过 200G 过渡后，升级到 400G，而随着数据中心对速率需求的提升，都需要光纤通信来完成其内部数据信息的计算和存储。

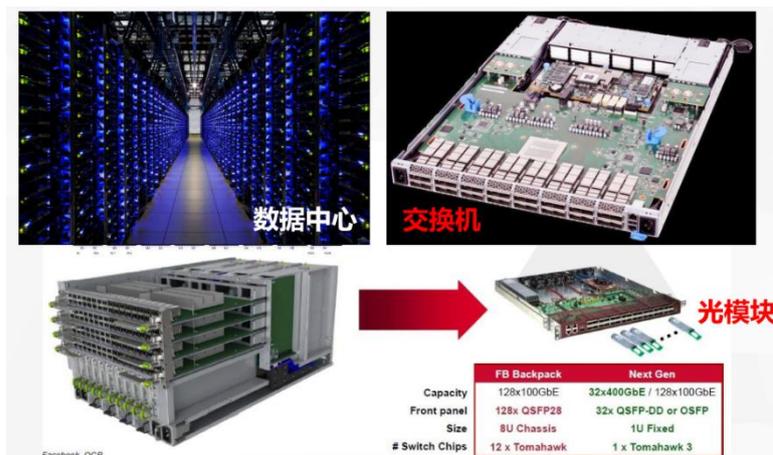


图 1.1 数据中心内部结构

Figure1.1 Data Center Internal Structure

光纤通信中光是信息传递的媒介，接收端传出的信号要以电的形式传出为人们所使用。而光模块正是完成电/光转换和光/电转换的核心组件，打通了通信网络的信息传递<sup>[3]</sup>。光模块中主要组件为发送器和接收器两个结构，发射器就是完成电/光转换；接收器就是负责进行光/电转换的过程，发射部分与接收部分中间的信号是通过光纤进行传递的。把发射器和接收器两个结构封装在一个模块里，就形成了一个完整的光模块，可以同时负责发射和接收。光模块作

为光互连里的核心组件，它的性能便成为光通信世界里信息传递效率的最重要影响因素之一。

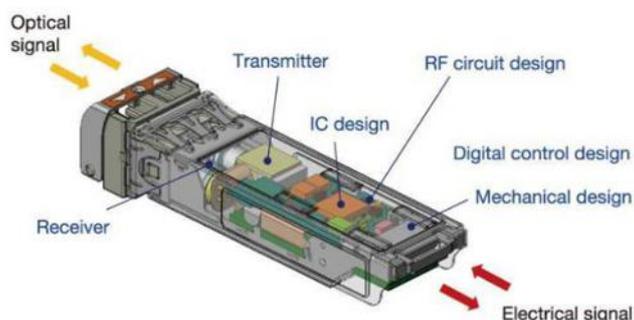


图 1.2 光模块结构

Figure1.2 Optical module structure

在数据中心的网络成本中，光模块的占比逐渐提升，已经达到 60%到 70%左右，因此伴随着数据中心对传输和存储数据能力需求的提升，其内部的核心结构——光模块将会更新换代<sup>[4]</sup>。数据中心在未来的前进方向是：高性能计算、规模较小、绿色节能，为光模块的发展指明了道路：

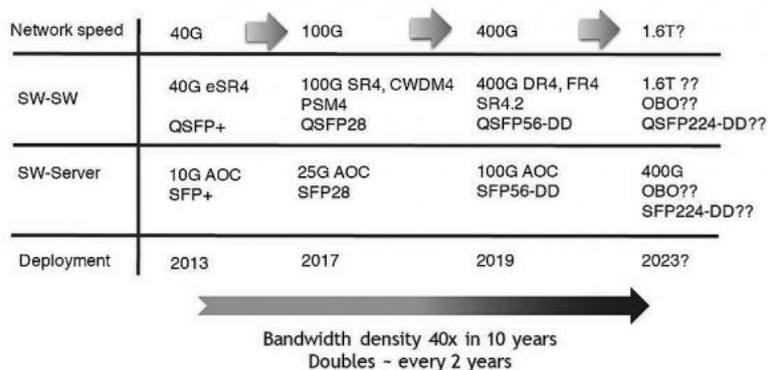


图 1.3 光模块发展速率及升级周期

Figure1.3 Optical module development rate and upgrade cycle

### 1. 高速率、升级周期短

未来在数据中心的流量将会呈现指数级增长，其内部的驱动光模块为了和高速的设备相适配，将会持续不断的向着高速率的方向升级，从 40G/100G 升级到 400G，甚至更高速率，而且迭代周期将会越来越短<sup>[5]</sup>（图 1.3）。

## 2. 高密度、体积小

现在我们需要通过提高数据中心内部的密度来满足人们对带宽和流量需求的增大，这也是为了提高其内部单板的传输容量。提高密度就意味着封装体积要更小，这样也就可以减少数据中心内部的交换机，以此来让机房资源得到充分利用。

## 3. 低功耗

光模块也应当朝着低功耗的方向发展。低功耗的光模块不但可以减少能耗，并且可以让发热量更少。减少散热量将大大改善光模块性能并提高密度。

## 4. 低成本

建立一个大型数据中心对光模块的需求将会大幅度的增加，在需求大幅增加后成本将会显的尤其重要，而且低成本也成为各个企业追求的目标之一<sup>[6]</sup>。

## 1.2 光模块国内外研究现状

### 1.2.1 400G 光模块的分类

为了增加数据中心内部的数据吞吐量，将数据中心内部设备的端口密度及带宽增大，便产生了 400G 光模块<sup>[7]</sup>。为了下一代数据中心可以完成高质量的数据传输和存储，400G 光模块将会向着高集成度、小型化、广增益和低噪声的目标前进<sup>[8]</sup>。400G 光模块可以从传输距离、光波长、信号调制方式进行分类对比。

1) 从传输距离来划分，400G 光模块可以分为 SR（100m）、DR（500m）、FR（2km）、LR（10km）。按光波长来划分，400G 光模块可以分为多模和单模。常见的多模 400G 光模块有 SR8 和 SR4.2（四通道，单通道两个波长）两种接口，光接口均为 8×50G PAM4 信号，通过单模光纤完成 100m 的传输<sup>[9]</sup>。单模 400G 光模块按光口速率分为两种：8×50G PAM4 方式和 4×100G PAM4 方式。使用 8×50G PAM4 方式的通用光模块有三种：FR8、LR8 和 2×FR4，使用 4×100G PAM4 方式的光模块有三种：DR4、FR4 和 LR4，其中关键为 DSP 技术<sup>[10]</sup>。

2018 年 3 月，光迅公司通过将 16 路 25Gbps 的 NRZ 信号通过 PAM4 转换

单元,即其内部的PAM4 Gearbox 芯片合成了 8 路 PAM4 信号,其设计符合 400G BASE-LR8 规范。该 400G LR8 光模块的原理框图如图 1.4 所示。经过测试,此光模块在实验室眼图(图 1.5)质量良好,通过单模光纤能够完成 10km 的数据信号传输,而且灵敏度高,传输能力优秀。

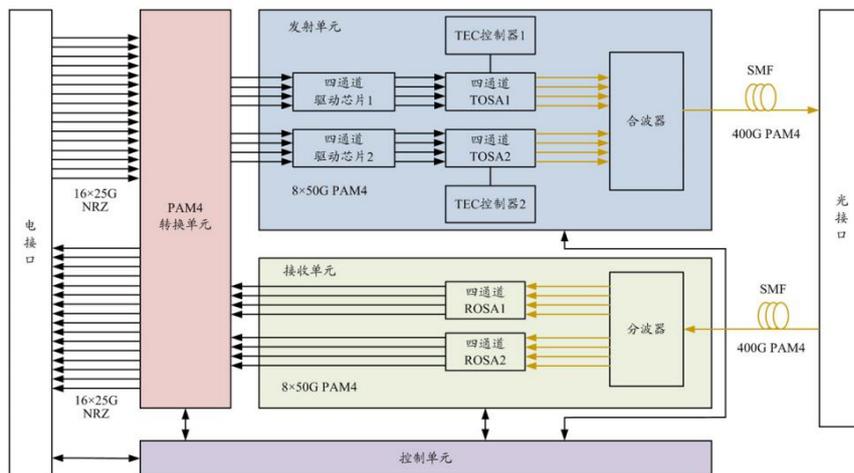


图 1.4 400G LR8 光模块原理框图

Figure1.4 400G LR8 optical module schematic block diagram

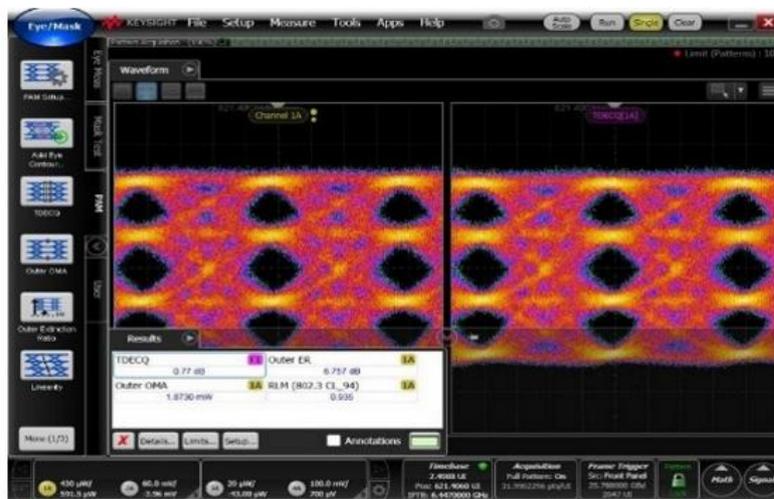


图 1.5 400G LR8 光模块测试眼图

Figure1.5 400G LR8 optical module test eye diagram

在 2020 年 1 月, 博创科技发布了 400G DR4 硅光模块(图 1.6), 采用了

行业内处于靠前地位的 7nm DSP 芯片,通过 2.5D 封装完成了单片集成,将 MZM 调制器、硅波导、探测器、Driver 和 TIA 等多种芯片集成在一起,采用目前成熟的 COB 工艺将其封装到整个模块里面(图 1.7 左),这样设计制作光模块将会容易很多。为了降低光信号传输过程中的损耗,博创科技自己研发并使用了损耗很低的 CW 耦合技术和光纤阵列耦合组件。通过测试,该 400G DR4 硅光模块的光眼图(图 1.7 右)不论是性能还是不同通道之间的一致性都很好,TDECQ(发射色散眼图闭合四相)低于 0.6dB,不开 FEC(前向纠错编码)误码率可以达到  $1E-9$ ,所能传输的距离在 2 公里以上。

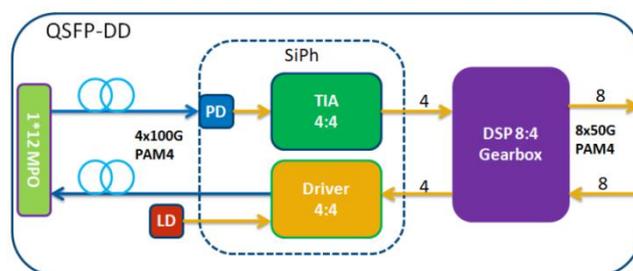


图 1.6 400G DR4 硅光模块解决方案

Figure1.6 400G DR4 Silicon Optical Module Solution

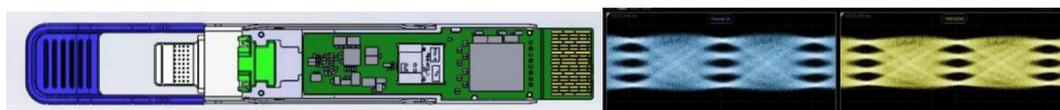


图 1.7 400G DR4 硅光模块及光眼图

Figure1.7 400G DR4 silicon optical module and photo eye diagram

2020 年 3 月 10 日,亨通光电推出了应用于下一代数据中心的 400G DR4 光模块,同时在传统解决方案的基础上,发布了 400G FR4 光模块。该光模块采用 7nm 的 DSP 芯片,在发射一侧使用了 EML 激光器,在接收一侧使用 InP 探测器阵列,在光信号传输的处理上使用了低成本的波分复用技术。亨通光电发布的这两款光模块的功耗均在 9W 以下。

在 2020 年 8 月,铭普光磁推出了 400G SR8 产品(图 1.8 左),使用了 DSP 技术和 PAM4 调制的方式,在金手指(电口)输入单通道 50Gbps 的 PAM4 电

信号，光口输出 50Gbps 的 PAM4 光信号，总共 16 个并行通道，8 个发射通道，8 个接收通道，单通道信号速率为 50Gbps，使用多模光纤，工作光波长为 850nm，以此来完成 400Gbps 信号的传输。此光模块可以在 0°C 到 70°C 范围内工作，功耗低于 12W，最终测试结果（图 1.8 右）满足 802.3cd 的 400GBASE—SR8 的协议，传输距离可以达到 100m。此 400G SR8 光模块尺寸小，且后期维护便捷，是当前在数据中心内部短距光互连成本低且有效的最佳解决方案。



图 1.8 400G SR8 光模块及测试结果

Figure1.8 400G SR8 Optical Module and Test Results

2) 按光的传输技术来划分又可以分为并行单模光纤 (PSM) 技术和波分复用技术—粗波分复用 (CWDM) 和密集波分复用 (DWDM)。以信号调制方式来划分，分为不归零码 (NRZ) 和四阶脉冲幅度调制 (PAM4)。

2021 年 1 月 7 日，易飞扬推出了 400G PSM8 光模块（图 1.9），它采用 8 通道 53Gbps 平行光引擎，使用非制冷的 50G PAM4 EML（电吸收调制）激光器，工作波长为 1310nm，接收端使用 PIN 接收器，工作电压为 3.3V，允许在 0°C 到 70°C 范围内工作。在实验室温度为 25°C 时进行了测试，测试结果如图 1.10 所示，此 400G PSM8 光模块通过单模光纤可以很好完成 2km 以内的数据信号传输，开启 FEC 后，传输距离可以到 10km，而其整个模块功耗小于 11W。此光模块优势在于高密度设计，工艺简单——将所有的功能集成于单块 PCB 板，可以满足数据中心 400G 对光模块在 2km 内的信号传输需求。

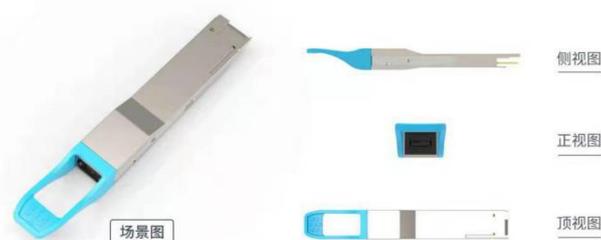


图 1.9 400G PSM8 光模块

Figure1.9 400G PSM8 Optical Module

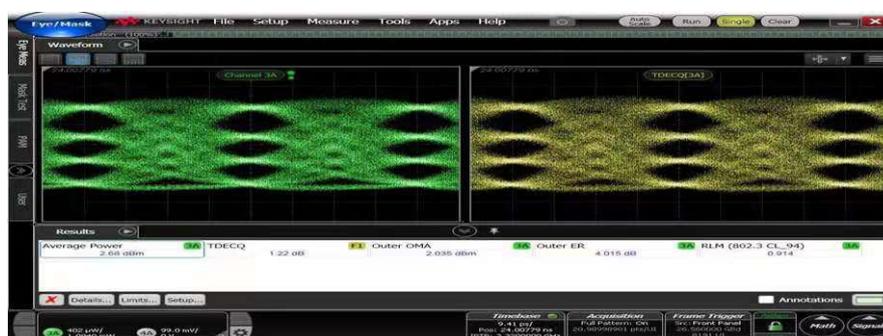


图 1.10 400G PSM8 光模块眼图测试结果

Figure1.10 400G PSM8 optical module eye diagram test results

400G CWDM8 光模块就是在 CWDM4 的基础上进行了扩展，在原来 1271nm/1291nm/1311nm/1331nm 四路中心波长的基础上增加了四个中心波长 1351nm/1371nm/1391nm/1411nm，每个波长的速率为 50Gbps，波长范围变宽，对复用 (Mux) /解复用 (DeMux) 提出了高要求，而且激光器数目也变为原来的两倍，其最大输入功率是 8.5dBm<sup>[10]</sup>。

400G DWDM 光模块中关键技术和创新点为相干光学技术，它可以将数字信号转为模拟信号，可以将更多的数据信息打包达到模拟信号波形中，再接收端进行解码。400G DWDM 光模块加入相干光学技术后可以完成 120km 以上甚至可以达到 1400km 距离的数据信号的传输<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 400G 光模块封装

400G 光模块按封装结构可以分为可插拔光模块、板上光模块、光电集成光模块，如图 1.11 所示。

可插拔光模块包括 CDFP、CFP8 和当前比较主流的 OSFP 和 QSFP-DD 光模块。（1）早期的 400G SR16 光模块所采用的封装结构的便是 CDFP/CFP8 封装，但是由于并行通道数太多，导致光模块功耗和尺寸都比较大，不适合在数据心里使用。（2）CFP8 光模块是 CFP4 的基础上增加通道数，其体积增大为  $40 \times 102 \times 9.5 \text{mm}^3$ ，而且 CFP8 光模块需要用到 16 个 25G 的激光器，成本较高（3）QSFP-DD 在 2016 年 3 月成立，是在 QSFP 接口的基础上增加了一倍，将通道数增加到 8 通道，其优势在于可以与 QSFP 接口兼容，尺寸小，更适合在数据中心使用<sup>[11]</sup>。（4）OSFP 在 2016 年 11 月启动，尺寸比 QSFP-DD 光模块稍大一点，集成了高瓦数的收发器和光引擎，更适合应用于电信中心。总的来说，可插拔光模块其优势在于可插拔，更换简单，已经标准化量产，其劣势在于互连密度的增长收到了限制，母板上电互连线的增长对传输信号质量的影响将会随着速率的增长而增大。

板上光模块即采用 COBO 封装结构，2015 年 3 月微软联合设备商和芯片商成立了 COBO（Consortium for on board optics）联盟，COBO 光模块是把所有的光学结构都在 PCB 电路板上放置，其优势在于不受端口密度的束缚、散热好以及尺寸更小，但由于它不可以热插拔，因此给后期维护带来了很大的困难<sup>[12]</sup>。

光电集成共封装（Co-Packaging，CPO）是通过在高性能集成电路，如 CPU/GPU/FPGA/ASIC 等）封装内集成光接口来大幅提升带宽密度和吞吐量、降低功耗并提高 I/O 能力的一种全新集成技术。2019 年微软和 Facebook 共同创立了 CPO 联盟，宗旨是解决当前数据中心交换机、服务器光互连的应用<sup>[13]</sup>。亨通洛克利在 2021 年 1 月推出了国内首台 3.2T CPO 样机，此样机是在硅光技术的基础上，将光引擎和核心交换芯片协同封装在同一块高速主板上，把核心交换芯片和光引擎之间的距离大大缩短，这样就减小了高速电通道链路的距离，减少使用冗长器件，系统功耗得到大大改善，而且可以通过提高集成度的方式

将样机速率提升至 25.6T/51.2T。

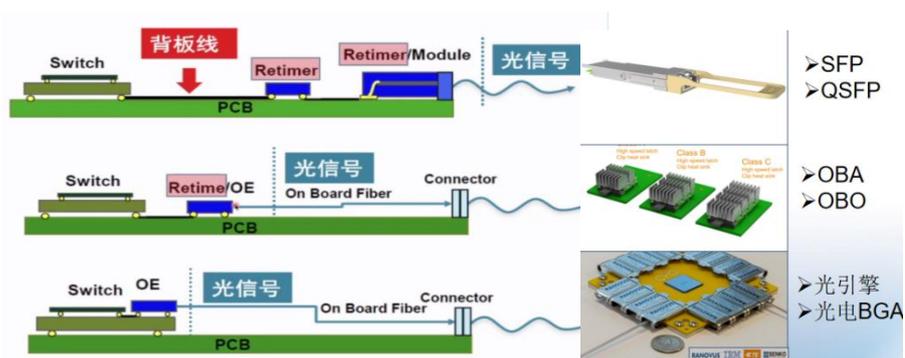


图 1.11 光模块封装结构

Figure1.11 Optical module package structure

下面我们对上述的三种光模块进行了对比，如表 1.1 所示：

表 1.1 光模块分类及优缺点对比

Table1.1 Optical module classification and comparison of advantages and disadvantages

400G 光模块分类	优势	劣势	应用
可插拔光模块	可插拔，维护简单，已实现标准化	互连密度受限，限制了带宽的增大，功耗大	应用最广
板上光模块 (COBO)	板载方案，端口密度高，带宽大，功耗小，散热好	不可插拔，后期维护困难	应用广
光电集成共封装 (CPO)	信号最宽最高，功耗低	不可插拔，后期维护困难，散热能力有限	少量试样

### 1.3 400G 光模块接口物理层技术方案

目前 400Gbps 以太网接口在各大互联网公司的数据中心渐渐得到应用，

IEEE 从 2013 年 3 月开始到 2020 年 4 月发布了 3 种 400Gbps 接口的标准，下面根据光模块类型对光电接口物理层的技术方案进行对比分析，如表 1.2 所示：

表 1.2 400G 光模块分类及接口物理层技术方案

Table1.2 400G optical module classification and interface physical layer technology solutions

光口	光口速率	传输方式	电口速率	封装
400G-SR16	16*25Gbps	100mMM	16*25GbpsNRZ	CDFP/CFP8
400G-FR8	8λ*53Gbps PAM4	2km SM	8*53Gbps PAM4	QSFP-DD/OSFP
400G-LR8	8λ*53Gbps PAM4	10km SM	8*53Gbps PAM4	QSFP-DD/OSFP
400G-SR8	8*53Gbps PAM4	100m?MM	8*53Gbps PAM4	QSFP-DD/OSFP
400G-SR4.2	4*2λ*53Gbps PAM4	100m?MM(2λ)	8*53Gbps PAM4	QSFP-DD/OSFP
400G-DR4	4*106Gbps PAM4	500m SM	8*53Gbps PAM4	QSFP-DD/OSFP
400G-FR4	4λ*106Gbps PAM4	2km SM	8*53Gbps PAM4	QSFP-DD/OSFP
400G-LR4	4λ*100Gbps PAM4	10km SM	8*53Gbps PAM4	QSFP-DD/OSFP
400G-ZR	DWDM+59.8Gbd DP-16QAM	>80kmDWDM		QSFP-DD

除了早期的 CDFP/CFP8 封装的 400G SR16 光模块使用 NRZ 技术，其余光模块都使用 PAM4 信号调制的方式。目前的光模块在光口侧主要使用 8 个并行通道，单通道 53Gbps PAM4 或者 4 个并行通道，单通道 106Gbps PAM4 的方式，在电口侧使用 8 个并行通道，单通道 53Gbps PAM4 的方式来达到 400G 数据信号传输的能力。目前主流封装结构就是 QSDP-DD 和 OSFP。下面我们以 400G FR4 光模块为例，简单介绍下它的原理设计（图 1.12）及组成：

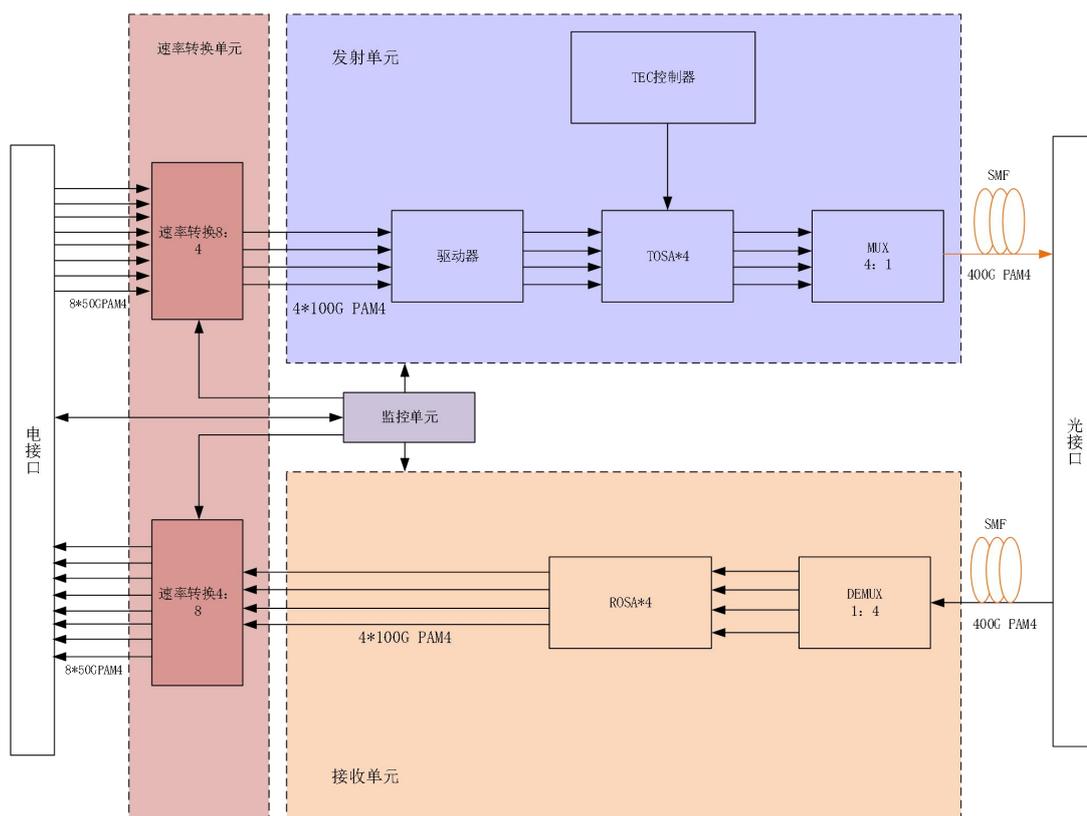


图 1.12 400G FR4 光模块设计原理图

Figure1.12 400G FR4 optical module design schematic

此 400G FR4 在电口侧采用用  $8 \times 53\text{Gbps}$  PAM4 的方式，在光口侧采用  $4 \times 106\text{Gbps}$  PAM4 的方式完成 400G 的传输。在设计种使用的器件包括 TOSA(光发送组件)、ROSA(光接收组件)、TEC(半导体制冷器)、MUX(复用器)、DEMUX(解复用器)。其中速率转换单元的作用就是对 4 通道的  $106.25\text{Gbps}$  的 PAM4 信号和 8 通道  $53.125\text{Gbps}$  的 PAM4 信号完成相互转换<sup>[31]</sup>，完成电口速率与光口速率的匹配。(1) 对于发射单元，首先通过 4 通道的驱动芯片来驱动 TOSA 内部的 EML(电吸收调制激光器)发光，完成电光转换，MUX 的作用就是将 4 个并行通道的  $106.25\text{Gbps}$  的光信号耦合到一根 SMF 里,最大传输距离为 2km,这种设计方式可以减少光器件、减少工艺难度并节约成本,其中 TEC 和热敏电阻就负责保持激光器工作温度的稳定性，以此来保证光模块良好的性能。(2) 对于接收单元，DEMUX 的作用就是对接收到的光信号进行分波，然

后用 ROSA 完成光-电转换，最后通过放大器输出。监控单元主要由 MCU（单片机）通过 I2C（两线式串行总线）来完成对内部电芯片的控制及监测。

#### 1.4 本论文的主要研究内容以及组织结构

本文基于 400Gbps 数据传输标准，主要研究设计了在不同场景应用的两种光模块：针对数据中心和以太网等长距传输的应用场景，完成了基于 DWDM（密集波分复用）技术的 400Gbps 光发射模块的设计。针对短距光互连的应用场景，完成了基于 COBO 封装的 400Gbps 收发一体光模块的设计。

本文的主要工作内容体现在以下几个方面：

(1) 针对 400Gbps 光模块的高速电互连信道，对电学信道包括：高频高速信号传输线、焊盘、连接器端口，进行了设计、建模仿真及优化，保证高频高速电信号的传输质量。

(2) 基于 DWDM 技术的 400Gbps 光发射模块，针对电信号传输过程中的失真，研究了时钟数据恢复（CDR）技术，保证电信号传输过程中的一致。研究通过 TEC 温控技术，保证激光器发光波长的稳定性。结合垂直紧凑结构高频电连接器设计，集成四个 TOSA，完成该光互连系统的设计且性能良好。

(3) 针对基于 COBO 封装的 400Gbps 收发一体光模块，研究了 PAM4 调制，对 45 度光纤阵列（FA）进行了理论研究和光耦合效率的分析，最终完成基于商用（inipi）4 通道电芯片和国产（半导体所）8 通道电芯片的光互连系统的设计。

本论文的结构安排：

第一章，介绍了 400Gbps 光模块的研究背景及意义，不同类型光模块和光模封装结构的国内外研究现状，最后对本文的结构进行安排

第二章，对 400Gbps 光模块设计理论和其中涉及到的关键技术：波分复用技术、TEC 温控技术、PAM4 调制方式、信号完整性等进行了阐述。

第三章，主要介绍了基于 DWDM 技术的 400Gbps 光发射模块的设计与测试，包括器件特性介绍、高频高速电路设计、电学信道设计、建模与仿真、微组装流程以及最终的测试与分析。

第四章，主要是基于 COBO 技术的 400Gbps 收发一体光模块的设计，其中包括方案的制定、芯片的选择、电学信道设计、建模与仿真、光耦合结构的仿真与设计。

第五章，是总结与展望，包括对当前已完成工作和问题的总结，并提出针对问题的解决方法，以及进一步的研究计划。



## 第 2 章 400G 高速光模块设计理论基础

光模块是光互连系统中最重要有源光器件之一，包括发射器（Transmitter）、接收器（Receiver）、光收发模块（Transceiver）、光转发模块（Transponder）四种，但光模块通常指的是光收发模块。光模块组成结构包括：发射器、功能电路、电接口、光接口、接收器等，就是负责光电/电光转换。在光模块中，为了保证电信号的传输质量，需要用到时钟数据恢复（CDR）、信号完整性等技术，为了保证光信号的传输质量，需要用到 TEC 温控技术、波分复用，为了提升数据的信息携带能力，需要用到 PAM4 调制。

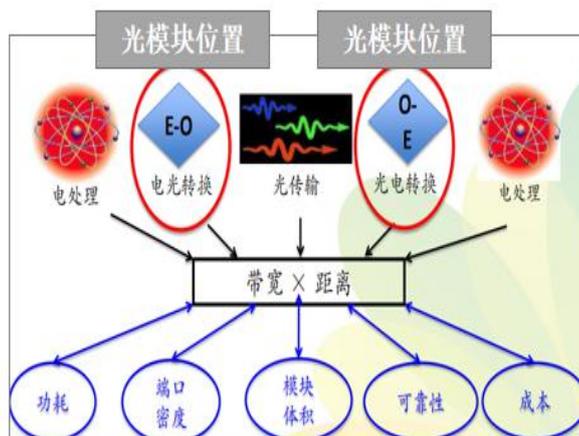


图 2.1 光模块的功能

Figure 2.1 Functions of optical modules

### 2.1 光模块的结构设计

#### 2.1.1 光发射结构设计

光模块的发射部分是将信号源输出的脉冲信号（电信号）通过驱动调制电路（Driver）加载到光波中，完成电光转换，最终光信号耦合到光纤里进行信号传递。光模块的发射结构主要包括：输入电接口、通信接口、驱动调制电路、光源、控制电路（温控或者功率控制）、监测电路及电源等，光模块发射部分的结构框图如下图所示：

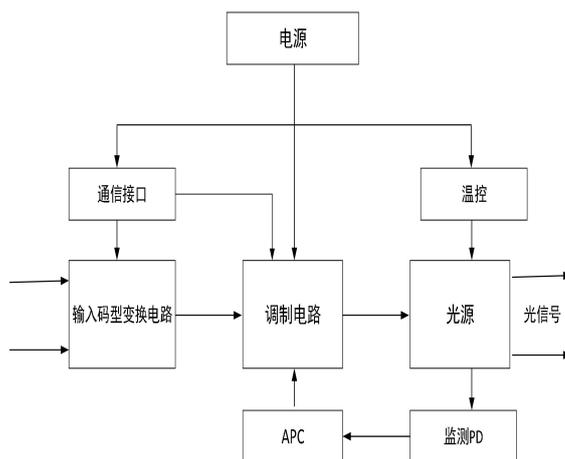


图 2.2 光发射结构设计原理图

Figure2.2 Optical emission structure design schematic

光源和驱动电路是光发射结构中的核心器件，而激光器是光模块发射结构的“心脏”，激光器按发光类型可以分为垂直腔面发射（VCSEL）激光器和分布布拉格反射（DBR）、分布式反馈（DFB）、法布里-珀罗（FP）等边发射激光器，下面我们介绍本文中所用到的两种激光器：DFB、VCSEL 的原理。

### 1. DFB 激光器原理

DFB 激光器在光通信行业已被广泛应用，它制作时主要使用的材料包括 GaAs、ZnS、GaSb、InP 等。其结构图如图 2.3 所示，它的主结构就是在有源层上刻写的光栅部分—布拉格光栅，光纤布拉格光栅在激光器内部形成谐振腔，通过分布反馈完成纵模的选择，其发光面在侧面<sup>[14]</sup>。DFB 激光器的优势在于：单纵模特性好、发光功率大、输出波长稳定、线宽窄、边模抑制比优异、可在长距离中传输。

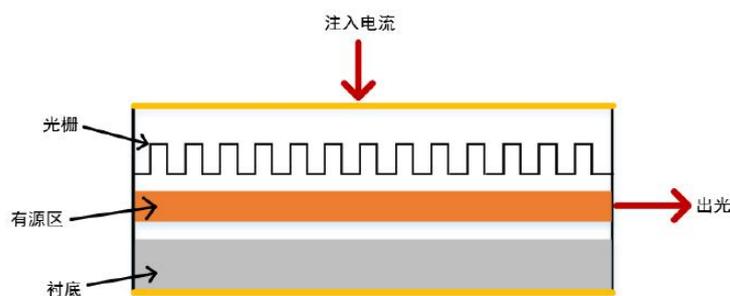


图 2.3 DFB 激光器结构示意图

Figure2.3 DFB laser structure schematic

对于此激光器，当有电流通过后，在其有源区进行电子空穴复合，然后产生带有能量的光子。这些光子将会受到布拉格光栅的反射，只有光的波长达到布拉格光栅和有源区增益条件，才可以进行动态的单纵模工作，最后完成激光的输出。

在实际应用中，通常将 DFB 激光器、温控系统和热敏电阻封装成一个模块，主流的封装结构有同轴（TO）封装和蝶形封装，如图 2.4 所示，目前更多的采用蝶形封装的形式，外部有 14 个针脚，通过外带的尾纤出光。



图 2.4 DFB 激光器封装实物图：同轴封装（左）和蝶形封装（右）

Figure2.4 DFB laser package physical picture: coaxial package (left) and butterfly package (right)

随着光模块速率的不断升高，激光器工作的速率也在升高，封装结构所引入的寄生参数对激光器工作性能的影响已经不能忽略。下面通过 DFB 激光器的小信号等效电路模型（图 2.5），从其物理机制来了解下该器件的行为。

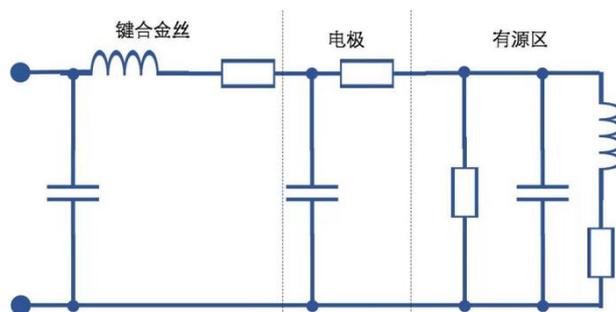


图 2.5 DFB 激光器小信号等效电路

Figure2.5 DFB Laser Small Signal Equivalent Circuit

从上图可以看出，我们将 DFB 激光器的小信号等效电路分为了三部分：有源区、电极和键合金丝。

1) 在有源区，寄生电感和电容代表了载流子的存储效应，电子不断的转换成光子。等效电阻表示的是弛豫振荡效应中（激光器输出光功率随时间有一定的起伏）的阻尼。通过寄生电感的电流和有源区产生光子的密度是成正比的，激光器的输出光功率和光子密度也是正比关系。

2) 在电极位置是接触电阻和寄生电容，接触电阻的量级一般是几欧姆，电容的量级大约是十几 pF。

3) 对于键合金丝，无论哪种封装形式，激光器都必须在载体上放置（COC, chip on carrier），如图 2.6 所示，有寄生电阻、电感和电容，这些参数和金丝的种类、直径、长度以及键合方式有关。

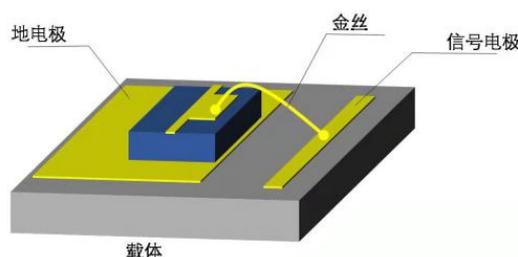


图 2.6 COC 示意图

Figure2.6 COC schematic

## 2. VCSEL 原理

VCSEL 激光器的发光方向与衬底垂直。和边发射激光器相比，VCSEL 激光器有以下优势：体积小；发散角小，发光面为圆形，能减小耦合难度，提高耦合效率；阈值电流较小，所需供电电压、电流减小，减少了能耗<sup>[15]</sup>；可直接在片上完成测试，降低了成本；可以在发光面所在的平面任意排列。

现在大多数 VCSEL 所使用的基底材料是 GaAs。VCSEL 的种类有很多，按照光电场限制形式的不同，可以分为氧化限制类型和质子注入类型。根据出

光方向的不同，可以分为顶部发射和底部发射。按照电极结构的不同，可以分为异面电极（图 2.7）和共面电极（图 2.8）

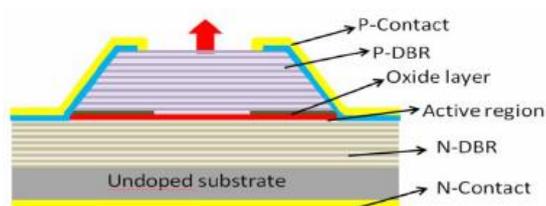


图 2.7 异面电极 VCSEL 结构

Figure 2.7 VCSEL structure of different surface electrode

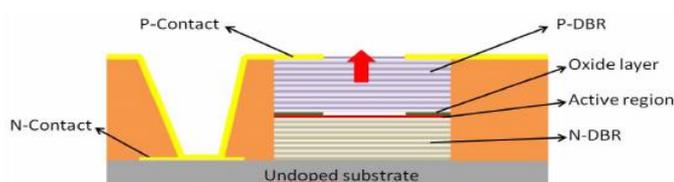


图 2.8 共面电极 VCSEL 结构

Figure 2.8 VCSEL structure of coplanar electrodes

VCSEL 一般通过两个布拉格反射镜（DBR）和一个有源区构成。DBR 反射镜是通过折射率相差很大的两种不一样的半导体薄膜材料以交替生长的方式形成的，其中每一层材料的光学厚度大约为发光波长的四分之一<sup>[16]</sup>。有源区也成为增益区，为激光器提供增益介质，负责将电转换为光，是由可以产生高光增益薄的半导体材料—量子阱组成的结构。为了让激光在激光器的谐振腔里形成驻波，把量子阱有源区放在 P 型 DBR 和 N 型 DBR 之间，当激光通过量子阱时便可以完成增益放大，当激光满足阈值条件后，便可以完成发射。

VCSEL 是通过电流进行直接调制的激光器，其带宽与激光器的内部响应以及外部寄生响应有关。内部响应主要指有源区响应—在有源区里电子和空穴进行受激复合产生能量，以光子的形式辐射。外部寄生通常是在 Laser 和外部 Driver 连接位置，有芯片寄生和电极寄生两种<sup>[17]</sup>。下面我们介绍下高速 VCSEL 的阈值增益特性。

VCSEL 要想完成激射，那么增益就必须比损耗大，而且光要在 DBR 中间进行往返传播，要求波的振幅比初始值大，其激射条件为：

$$R_t R_b \exp\{2(g - \alpha_i)L\} = 1 \quad \dots \quad (2.1)$$

其中， $R_t$ 、 $R_b$  为上顶部、底部 DBR 反射镜的折射率， $g$  是介质的增益系数， $\alpha_i$  是器件内部损耗系数， $L$  是 VCSEL 的实际腔长。那么增益公式为：

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_t R_b}}\right) \quad \dots \quad (2.2)$$

由于 VCSEL 没有具体的腔长，因此公式 2.2 无法直接计算出其阈值增益。上下 DBR 反射镜可以形成一个提供光波振荡的场所—激光谐振腔，因此其等效腔长为：

$$L_{eff} = L + L_t + L_b \quad \dots \quad (2.3)$$

$L_{eff}$  为等效腔长， $L$  为激光器实际腔长， $L_t$ 、 $L_b$  为顶部、底部 DBR 反射镜的长度，因此 VCSEL 增益公式为：

$$g_{th} = \alpha_d \left(1 - \frac{L}{L_{eff}}\right) + \alpha_c \frac{L}{L_{eff}} + \frac{1}{L_{eff}} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_t R_b}}\right) \quad \dots \quad (2.4)$$

其中， $\alpha_d$  为 DBR 的平均损耗系数， $\alpha_c$  为平均腔内损耗系数。

下面我们对两种激光器进行了参数对比，如表 2.1 所示：

表 2.1 VCSEL 和 DFB 参数对比

Table2.1 Comparison of VCSEL and DFB parameters

	VCSEL	DFB/EML
材料	GaAs	InP, InP on SiC
器件特点	面发射、圆形光斑	支持 WDM, 扩展光纤通道容量
典型波长	850nm	1310nm/1550nm
光纤类型	多模光纤	单模光纤
调制方式	NRZ/PAM4	NRZ/PAM4/QPSK

传输距离	<300m	500m-几十 km
耦合冗余	10-15um	3um-5um

总之，VCSEL 激光器和多模光纤之间的耦合，效率超过 90%；测试可以在片，这样开发成本就极大的降低了；由于此激光器光是从垂直于衬底的方向发出的，因此它可以在衬底所在的平面上任意摆放，这样就可以提高输出光功率的；此外它和 LED 可以共用一种工艺，这样我们就不必去耗费更多的时间和费用在工艺上。因此，VCSEL 激光器作为下一代光通信里的核心光器件之一，近几年在手机 3D 传感领域得到了极大的应用。

### 2.1.2 光接收结构设计

光模块的接收部分就是负责光电转换并对电信号进行放大。光接收机的典型结构框图如下所示，主要组成部分为：光电探测器（PD）、跨阻放大器（TIA）和时钟数据恢复电路（CDR）等。

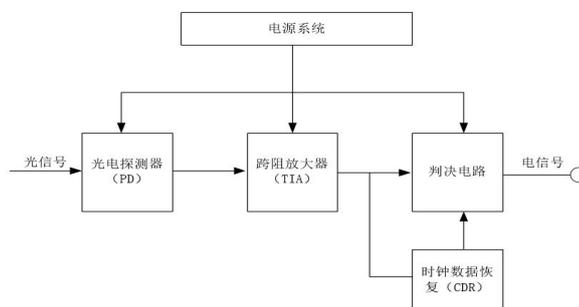


图 2.9 光接收结构设计原理图

Figure2.9 Optical receiver structure design schematic

在光模块的接收端，光电探测器的作用就是完成光电信号转换，是光模块接收器的核心组件，它就是利用光电效应，将光辐射转换成电流。目前常用的探测器就是本征光电探测器（PIN）。

PIN 光电探测器是以之前的 PN 结制造的光电探测器为基础而研究设计的，探测器的响应速度和结耗尽区的宽度有一定关系，载流子在窄耗尽区的探测器

工作中会发生扩散,因此之前的探测器只适合在低速的光电转换的场景下应用。PIN 就是在 PN 探测器的基础上对结耗尽区做了优化,即在 P 区和 N 区中间加了一层本征半导体材料,促使光变换和光吸收区域增大,与之前的光电二极管相比较,响应速度提高,扩散电流的影响得以消除。PIN 光电探测器就是基于光伏效应而工作的,当其内部的 PN 结被光照射时,价带电子获得足够多的能量后就可以跃迁到导带,这样就会产生价带空穴和导带电子,它们便是光生载流子,产生光生载流子的前提就是入射光子的能量必须超过导带与价带之间的能量差<sup>[32]</sup>。在 PN 结上加反向偏压时,主要加到了 PN 结之间的本征层上,促使光电子和光空穴分别向 P 区和 N 区定向运动,这样就产生了光生电流。它的基本特性包括响应度、击穿电压、带宽和噪声等。下图为 PIN 光电探测器的工作原理图。

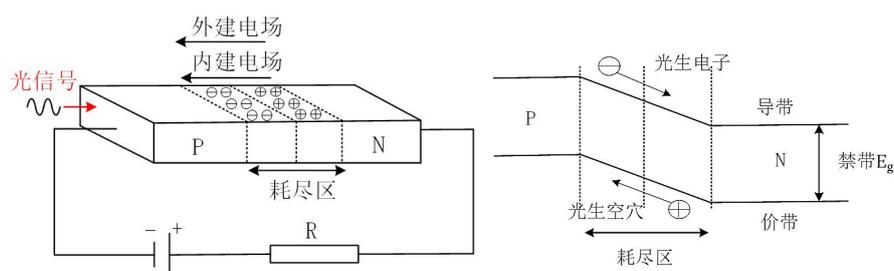


图 2.10 PIN 的工作原理

Figure2.10 The working principle of PIN

### 2.1.3 光信号传输部分-光纤和耦合结构的设计

光纤作为传播光信号的媒介,是一种由三个部分组成的比头发还细的圆柱形的玻璃丝结构,从内到外依次是纤芯、包层、涂覆层,如下图所示。纤芯和包层的主要作用就是完成光信号的传递,涂覆层主要就是负责保护光波导,提升光纤的弯曲性能。



图 2.11 光纤结构图

Figure2.11 Fiber optic structure diagram

在光纤中，光进行传输的方式是全反射，为了实现光的全反射，我们需要保证包层和纤芯之间的折射率有一定的差异。光纤以多模和单模两种模式进行光的传播，顾名思义，单模光纤中只允许单一个模的通过，多模光纤允许多个模的通过。多模光纤内部的纤芯比单模光纤粗，因此可以传输更多的光信号。两种光纤相比，多模光纤成本要低<sup>[40]</sup>。而输入的光要通过不同的模式进行传播，这样就造成不同模式携带不同光功率的光传播所用的时间不同，从而产生模间色散，即信号会在时域展宽；而单模光纤就不会出现模间色散的情况。这就是为什么与多模光纤相比，单模光纤在传输损耗和宽带特性方面表现会更好，因此多模光纤更适合在短距光互连中使用。下图为单模光纤和多模光纤的示意图：

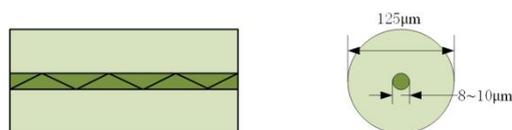


图 2.12 单模光纤

Figure2.12 Single-mode fiber



图 2.13 多模光纤

Figure2.13 Multimode Fiber

光耦合结构是实现光源和光纤的互连，是光组件中的重要结构。耦合结构的两个最重要的指标是耦合效率和耦合容差。耦合效率和驱动电路提供的偏置电流有一定关系，耦合效率的增大可以让偏置电流减小，这样就可以减小功耗。耦合结构的耦合容差，直接影响系统的稳定性和组装难度，更大的耦合容差可以降低光组件的组装难度。VCSEL、PD 芯片是直接贴在 PCB 上的，VCSEL 的发光方向与 PCB 垂直，PD 需要光方向垂直于 PCB 入射进光敏面，而光纤带和 PCB 是平行的，因此需要通过光路方向或者电路方向改变 90 度完成光源和光纤之间的互连，有以下三种耦合结构可以完成光源和光纤之间的互连：基于 90° 光纤反转的光耦合、基于 45° 反射面的光耦合和基于 90° 柔性基板弯折的光耦合结构。三种耦合结构的对比分析如下表所示：

表 2.2 三种耦合结构的对比

Table2.2 Comparison of the three coupling structures

耦合结构	电学互连	光学互连	高度	耦合效率 (dB)	耦合容差 ( $\mu\text{m}$ )
基于 45° 反射面	无 90° 弯折	90° 弯折	毫米级	-2 (无透镜) -1 (有透镜)	$\pm 10$ (无透镜) $\pm 15$ (有透镜)
基于 90° 弯折光纤	无 90° 弯折	90° 弯折	毫米级	-2 (发送) -0.5 (接收)	$\pm 20$
基于 90° 弯折 柔性基板	有 90° 弯折	无 90° 弯折	厘米级	-0.75	$\pm 10$ (平面) 60 (轴向)

表 2.2 从电互连、光互连、高速、耦合效率和耦合容差 5 个方面对这三种耦合结构进行了对比，其中基于 45° 反射面与基于 90° 柔性基板相比，其耦合结构较低，电学组装和互连难度小，与基于 90° 弯折光纤相比，其对光纤的包层和纤芯之间的折射率差和曲率半径要求比较低。考虑到体积和成本的原因，

在 400Gbps 收发一体光模块的耦合结构的设计中，我们选择了  $45^\circ$  光纤阵列（FA）的耦合结构完成光路反射。

早期基于  $45^\circ$  反射面的方案是需要通过透镜、反射镜来实现的，如下图所示：

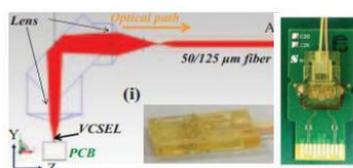


图 2.14 基于  $45^\circ$  反射镜耦合方式

Figure2.14 Based on  $45^\circ$  reflector coupling method

此种耦合方式由于需要用到反射镜、透镜等器件，所以耦合损耗会比较高，而且要求反射镜有较好的平整度和很小的角度误差，这样才能获得高的耦合效率，因此对器件制作的工艺提出了更高的要求。

而  $45^\circ$  光纤就是不需要透镜、反射镜等器件，直接将光纤端面磨成  $45^\circ$  完成光路的反射。如下图所示：

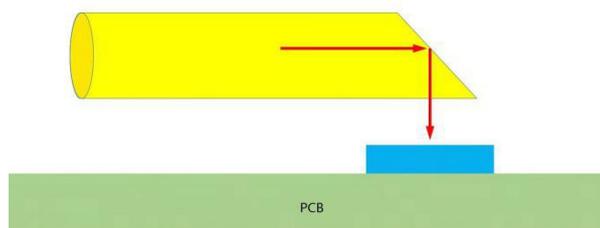


图 2.15  $45^\circ$  光纤示意图

Figure2.15  $45^\circ$  fiber optic schematic

$45^\circ$  FA 需要做一组基板，前端用 V 型槽定位，需要将带状光纤剖出纤芯，放进 V 型槽，如下图所示：

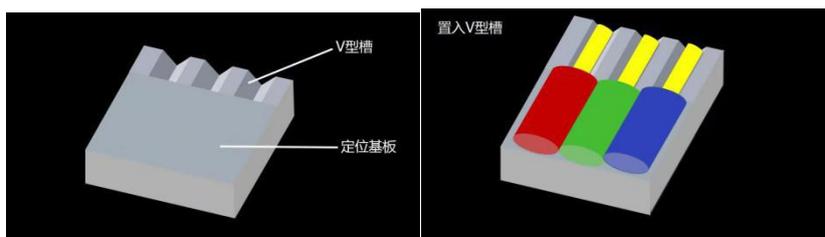


图 2.16 45° FA 结构

Figure2.16 45 ° FA structure

要注意将光纤突出基板，便于光路的耦合，然后后加胶水固定带状光纤、裸纤芯，最后加盖板，45° 光纤阵列就制作完成了，最后将 45° FA 放在 PCB 板上，对准 VCSEL/PD，完成光路的 90 度弯折，示意图如下：

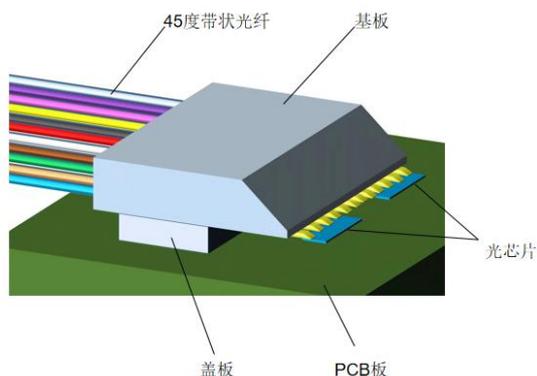


图 2.17 45° FA 耦合结构图

Figure2.17 45 ° FA coupling structure diagram

## 2.2 400G 光模块的光电特性研究

### 2.2.1 400G 光模块的电学特性研究

#### 1. 电互连信道设计的理论研究

随着信号的传输速率越来越高，信号完整性的问题越来越得到大家的重视，主要有反射、串扰、传输损耗、电源塌陷、振铃、时序等问题<sup>[33]</sup>。尤其是在高速光模块的设计过程中，在光组件将信号转成光信号之前，其一直是以电信号的形式进行传输的。电信号传输速率很高，信号完整性出现问题就会对所传输信号的质量造成很大的影响，会让信号发生严重畸变，导致最后系统对信号出

现误判，这样就造成了传输错误。下面我们介绍本文中我们所遇到的三个信号完整性问题：反射、串扰和插损。

### （一）反射原理

在信号传输的过程中，造成反射的原因是传输路径上的阻抗不连续。高频高速信号通过传输线进行传输时，信号会受到其瞬态阻抗的影响。如果它的某个位置阻抗改变，那么信号传到该处时就会发生反射，其中一部分信号就会发生朝着相反与传输方向的方向进行传输，其余的信号仍沿着传输方向进行传输。用反射系数来度量反射的大小，其表示符号为 $\Gamma$ ，它的大小就是反射电压/入射电压<sup>[33]</sup>。由于反射电信号是补偿了入射信号和接收信号之间不匹配的电压与电流，所以可以通过阻抗来表征反射系数的大小，也可以推导出入射系数（ $T$ ）的大小，公式如下：

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \dots (2.5)$$

$$T = 1 - \Gamma = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \dots (2.6)$$

其中， $Z_2$ 为负载阻抗， $Z_1$ 为传输线的特性阻抗

所有的传输线电路都可以简化为三部分的连接：源端、传输线部分、信号接收端。信号的反射包括容性反射、阻性反射和感性反射三种，其根本原因是由于阻抗不匹配导致的。在实际的高速信号的传输电路中，主要是一些不连续结构会导致信号反射，包括引脚焊盘、过孔、SMA 连接器、接插件、绑定线等。因此在实际的高速电路设计中，我们主要考虑不连续结构部分的优化，保证其阻抗变化范围不超过 10%，这样信号摆动的幅值才不会超过 5%，这样我们就可以将反射对高速信号的影响降到最低。

### （二）串扰原理

高频高速信号通过传输线进行传输时，由于其周围会产生电磁场，因此会对靠近它的信号传输线上产生一定干扰，从而引起信号完整性问题，这种现象就称为串扰。其中主动攻击、产生噪声的传输线就是攻击线条，被攻击的传输线就是

受害线。由于传输线是一种无源且线性的结构，因此传输线上的信号会进行叠加。因此如果传输线正常传输信号的过程中，它的附近有噪声的产生，那么噪声就会与正常信号叠加，对信号造成一定的影响，产生一定程度的畸变，引起信号完整性的问题。

为什么会产生串扰？是由于耦合的存在所导致的，互感和互容可以用来计算它们的大小。两根传输线之间的耦合等效模型如下图所示：

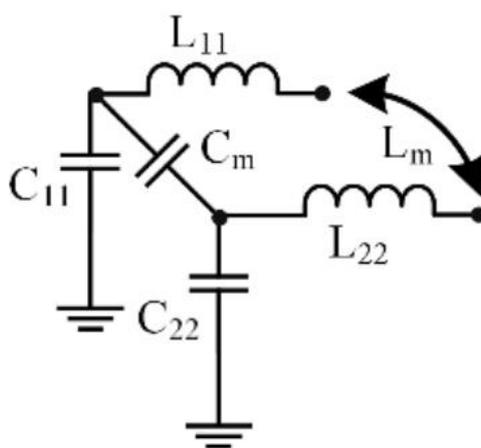


图 2.18 耦合传输线的等效电路模型

Figure2. 18 Equivalent circuit model for coupled transmission lines

串扰在空间上可以分为远端串扰和近端串扰。其中将攻击线的一端加上信号源，另一端进行端接，而将受害线两端都进行端接，这是为了避免反射的产生。在受害线上和信号源之间间隔大的一侧就是近端，距离信号源距离大的一端叫做远端。近端串扰和远端串扰的大小以及变化会有一定的区别。在实际的信号传输电路中，噪声容限最大只能为信号幅值的 15%，在其中，只有信号幅值的 5%和串扰有关系。减小串扰的方法主要有：增加相邻信号传输线的距离，减小信号平行走线的长度也就是减小信号传输线的耦合长度、传输线的端口要做好阻抗匹配、使用带状线来消除远端串扰、满足阻抗的情况下使用低介电常数的板材、在传输线周围放置地过孔来加大对传输线的保护。

### （三）损耗原理

在理论推导和计算中，我们都是以把导体和介质看作是理想的为前提进行

的。但是实际应用中，导体电导率有限，而且介质也不是完全绝缘的。所以，现实情况下传输线是有一定损耗的，其中有在导体中产生的阻性损耗，介质中的介质损耗，由于传输路径中阻抗不匹配导致的反射损耗，由于串扰导致的耦合损耗，以及由于电磁辐射引起的辐射损耗。

阻性损耗是由于导体的电导率有限导致的，也就是说它是来源于传输线的电阻。传输线的阻性损耗的产生主要是来自于信号路径，因为参考地平面很大，其阻值与信号路径的阻值相比可以忽略不计。信号路径的损耗主要是来自于直流损耗和交流情况下趋肤效应所带来的损耗。此外，由于趋肤效应的存在，导体表面的粗糙度也会产生一定的损耗。当交流电流通过传输线时，随着频率的升高，电流会渐渐衰减到零，此时电流就会分布在传输线的表面。下面为趋肤深度与频率的关系式：

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad \dots (2.7)$$

其中， $\mu$ 是磁导率， $\sigma$ 是电导率。因为导体的阻值和导体的厚度是反比关系，因此在趋肤效应的情况下，导体的交流电阻阻值和频率的平方根是正比关系。

介质损耗主要是因为介质的极化而产生的。当有电流通过介质时，会有电场的产生，电场又会使介质分子的方向发生变化，也就是取向极化，就需要做功，需要消耗能量。在交流情况下，电场方向不断的发生变化，因此介质中的分子也会不断的改变“取向”，持续消耗能量，介质的损耗就这样产生了。

在高速高频信号的传递过程中，我们主要着重注意的就是在导体和介质上的损耗，它们都会导致高频高速信号发生衰减，使眼图变模糊，但均衡技术可以适当弥补这两种损耗。

## 2. NRZ 和 PAM4 调制的原理

通常在数字信号中所使用的调制方式是 NRZ 调制，仅通过高、低两个信号电平完成数据信息的传输，每个符号可以携带 1bit 的信息，每个时钟周期内可以完成 2bit 的编码，因此 NRZ 也成为 PAM2，但是传输距离和速率受到了器件

带宽的限制。为了克服信道带宽的限制并提升所传输数据的速率，研究出了脉冲幅度调制技术来满足数据中心对高速率的需求，PAM4 调制便应用而生，并成为了当前 400G 光模块使用的主流调制方式。

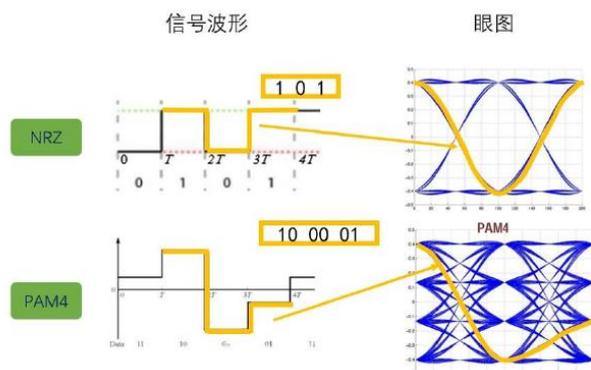


图 2.19 NRZ 与 PAM4 的波形及对应眼图

Figure2.19 Waveforms of NRZ and PAM4 and corresponding eye diagram

如图 2.19 所示，PAM4 信号通过使用 11、10、00、01 四个信号电平来完成信号的传输，每个符号可以携带 2bit 的信息，每个时钟周期可以完成 4bit 的编码。与 NRZ 相比，由于符号携带的信息量增加了一倍，因此 PAM4 的速率达到 NRZ 信号的一半，就可以完成一样多数据的传输，这大大降低了传输链路的带宽，而且信号传输链路中的码间干扰 (ISI) 也会大幅减小。但是 PAM4 信号的灵敏度会比 NRZ 信号差，也表明 PAM4 信号需要更大功率，更小的噪声才能得到低误码率。为了得到低误码率，需要使用信道均衡技术、前向纠错技术 (FEC)、脉冲整形技术等。

### 2.2.2 400G 光模块的光学特性研究

#### 1. 波分复用技术 (WDM)

波分复用技术 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 就是一种将两个以上波长的光信号复合到一起的技术，其实就是将光纤容量扩展的技术。在发射端通过合波器 (MUX) 把不同波长的光耦合进一根光纤进行传输，在接收端由分波器将光分离出来。如图 2.20 所示:

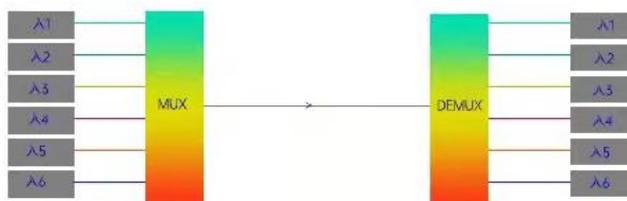


图 2.20 WDM 传输

Figure2.20 WDM transmission

WDM 根据波长及其间隔的不同可以分为：稀疏波分复用（CWDM）、密集波分复用（DWDM）、中等波分复用（MWDM）、细波分复用（LWDM）。我们对比分析了四种不同的波分复用技术，如表 2.3 所示：

表 2.3 四种 WDM 技术的对比

Table2.3 Comparison of the four WDM technologies

	CWDM	DWDM	MWDM	LWDM
信道间隔	20nm	1.6/0.8/0.4nm	7nm	4nm
工作波段	1270-1610nm O/E/S/C/L 波段	1525~1565nm (C 波段) 1570-1610nm (L 波段)	1267.5、1274.5、 1287.5、1294.5、 1307.5、1314.5、 1327.5、1334.5、 1347.5、1354.5、 1367.5、1374.5nm	1269.23、1273.54、 1277.89、1282.26、 1286.66、1291.1、 1295.56、1300.05、 1304.58、1309.14、 1313.73、1317.35nm
通道数	18 通道	40, 80, 最高达 160 通道	12 波	12 波
成本	低成本	价格较贵		
应用	城域网接入层、电信、 企业网、校园网等	适用于长距, 大容量长途干 线网, 或超大容量的城域网 核心节点, 电信 5G、城域网、 骨干网、数据中心等	中国移动方案	中国电信方案

采用 WDM 的优势在于：容量大，可以扩展光纤容量，提升光纤的利用率；兼容性好，对不同信号兼容性很好；高度的网络灵活性、经济性和可靠性。

## 2. TEC 温控技术

对于半导体激光器，注入电流和工作温度是影响输出功率的两个重要因素。它输出功率随着注入电流的增大而增大，同时会有一部分电能转换为热能，造成其外部环境温度升高。温度变化将会导致以下几种状况：（1）由于半导体材料有热胀冷缩的性质，因此温度升高会改变 PN 结的物理特性，导致激光器发出的光出现红移现象。（2）温度升高会对激光器的外量子效率有一定影响，导进而影响其输出功率。（3）如果温度过高，将会造成半导体激光器不可逆损坏的局面。因此，对其进行温度控制是很重要的一环。目前我们主要使用半导体热电制冷器（TEC）完成对它的温控。

TEC 属于固态制冷技术，是基于热电材料的帕尔帖效应工作的。TEC 有许多对 PN 结串联组成，当电流方向为 N 型材料→P 型材料，电荷的移动让能级减小，能级减小所释放的能量以热能的形式辐射向四周，最后表现为结点温度升高，向周围环境散热。反之，结点温度下降，会向外部环境吸热。通过改变电流的方向可以改变 TEC 的冷热面，改变驱动电流的大小可以改变制冷功率和效率。

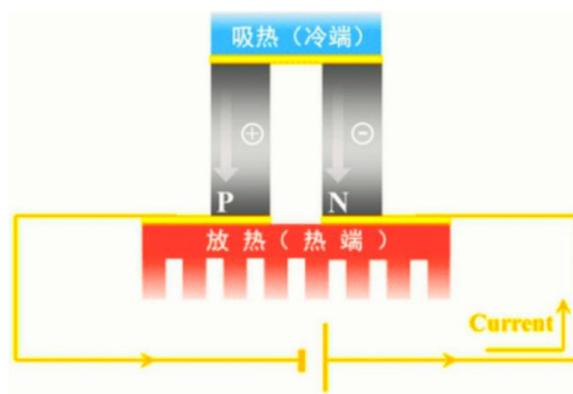


图 2.21 TEC 工作原理图

Figure2. 21 TEC working principle diagram

激光器中使用 TEC 有以下好处：（1）确保激光器输出波长的稳定：DFB 激光器波长—温度漂移系数为  $0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$ ，在商用工作温度范围 0 到  $70^\circ\text{C}$  下，其

波长偏移可以达到 7nm，已经超过了 DWDM、LAN-WDM、MWDM 这些通道间隔小的波分复用系统的波长间隔，会造成不同通道间的串扰，因此使用 TEC 保证输出光波长的稳定很重要；（2）确保器件良好的性能：以电吸收调制激光器（EML）芯片为例，其中 DFB 的温度漂移系数是  $0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$ ，与电吸收调制（EA）的  $0.5\text{nm}/^\circ\text{C}$  不匹配，如果不通过 TEC 控制温度，芯片工作时间过长导致环境温度升高，EML 芯片的输出光功率和调制特性都会下降，因此 EML 芯片需要 TEC 控温。光器件中的 TEC 有小尺寸（TO 中的 TEC 面积为  $3\text{mm}^2$ ）、高制冷效率、高可靠性的特点。

### 2.3 本章小结

本章从光模块的结构出发，分别对光发射结构、光接收接收结构、光传输部分的设计进行了介绍，并对光发射结构里的激光器包括 DFB 和 VCSEL 的原理、光接收结构里探测器 PD 的原理和光传输部分的 45 度 FA 进行了理论研究分析。接着对 400G 光模块设计过程中所涉及的光学和电学技术点包括信号完整性、PAM4 调制、WDM 技术和 TEC 温控技术进行了一定的研究与分析。



## 第 3 章 基于 LWDM 的 400G 光发射模块的设计与实现

在本章中我们详细介绍了 400G 光发射模块的设计、制作及测试过程，其中包括高频高速电路设计、时钟数据恢复技术、细波分复用技术（LWDM）、TEC 温控技术、光耦合方式。为了保证模块整个系统的稳定工作，我们必须充分考虑这些关键技术对于光模块性能的影响，解决其中可能存在的问题，以此来保证光模块的高性能工作。

### 3.1 模块方案制定及器件选型

#### 3.1.1 模块方案的制定

光模块传输带宽提升的方法有三种：一是将单通道信号的传输速率提高；二是将传输的通道数量增加；三是改变信号的调制方式。本次光模块的设计我们是在 100G LR4（IEEE 802.3ba）的基础上通过增加并行通道数的方式来完成 400Gbps 信号的传输，这样就可以直接使用目前成熟的 25G NRZ 技术。在本次设计的光发射模块中，我们在电信号传输的一侧采用了 16 个传输通道并行，单个通道的信号传输速率为 25Gbps，信号调制方式为 NRZ，光信号传输的一侧使用了 4 个 TOSA，每个 TOSA 集成了 4 路激光器来完成电信号到光信号的转换，最后通过 MUX 将 4 路光信号耦合进一根光纤。CDR 和 TOSA 的监测与控制要通过 MCU 来实现。下面为本次所设计模块的细节框图及封装侧视图：

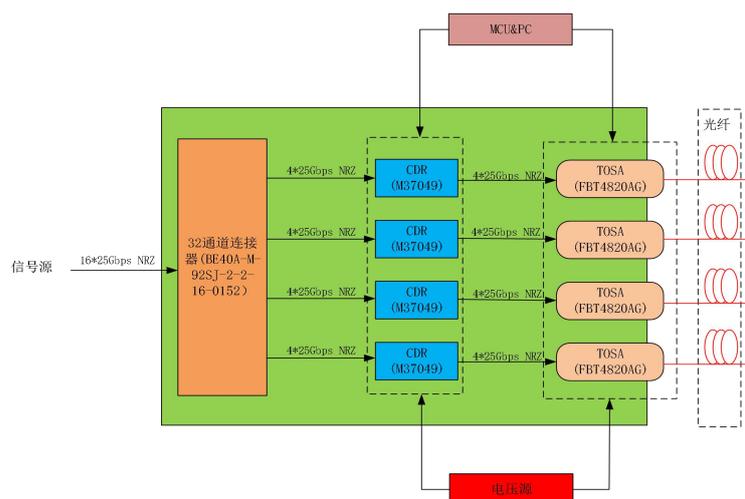


图 3.1 光发射模块设计原理图

Figure3.1 Optical emission module design schematic

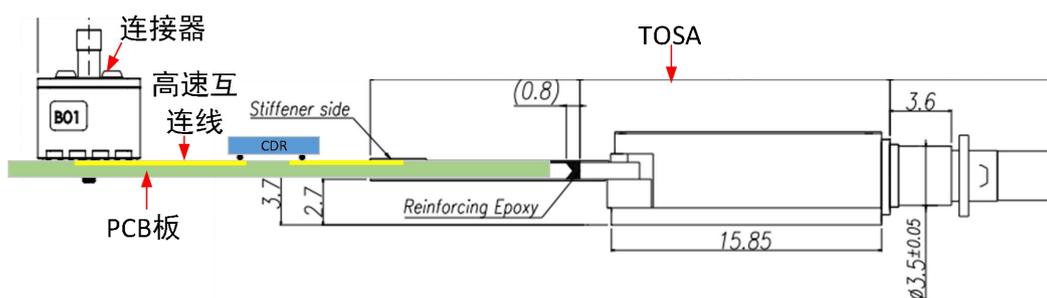


图 3.2 光发射模块封装侧视图

Figure3.2 Side view of optical transmitter module package

### 3.1.2 模块内部器件类型

光发射模块主要器件包括 TOSA (FBT4820AG)、CDR (M37049) 和连接器 (BE40A-M-92SJ-2-2-16-0152)，下面我们详细一下这些器件的特性。

#### 1. 光发射组件-TOSA

我们选用了剑桥科技公司(CIG, Cambridge Industries Group)的一种 TOSA, 其型号为 FBT4820AG, 它是集成了驱动器、直接调制激光器 (DML)、分布式放大器 (Distributed Amplifier)、监测探测器 (Monitor PDs)、半导体制冷器 (TEC)、热敏电阻 (Thermistor) 和细波分复用 (LWDM MUX) 于一体的

一款光发射组件的产品，其中 DWDM 技术可以保证单根光纤完成 100Gbps 信号的传输。其中驱动器是由驱动芯片（MAOM-002304）和控制芯片（MAMF-011039）组成的，控制芯片上有 I2C 和 SPI 两种串行通信接口，驱动芯片是一颗高度集成的四通道的用来驱动直接调制激光器的芯片，电信号的传输是使用差分输入、单端输出的方式。为了环境温度会对 TOSA 内部 DML 激光器的参数产生一定的影响，从而影响输出光的特性，因此，TOSA 集成了 TEC 与热敏电阻，来监测和调控激光器的温度保证其正常工作，以此来保证激光器正常工作。其中 TOSA 内部 4 路激光器发出的波长的典型值分别为：1295.56nm、1300.05nm、1304.58nm、1309.14nm，激光器的最佳工作温度是 50℃。下面为 TOSA 内部工作的电路图：

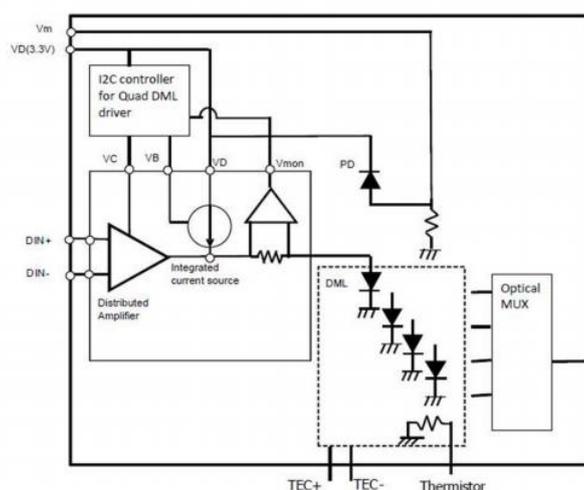


图 3.3 TOSA 内部电路图

Figure3.3 TOSA internal circuit diagram

## 2. 时钟数据恢复电路（CDR）

近年来，并行传输技术应用场景越来越少，Serdes 技术依靠低成本、低信号幅度要求、低 EMI 以及无需在传输期间同步时钟和数据的优势正在渐渐代替它成为新一代通信技术，CDR 的应用正是 Serdes 技术可以顺利发展的关键因素之一。CDR 的功能就是完成对输入数据的采样并提取信息的过程，并通过芯片内部时钟对信息进行重新定时，从而在恢复数据的同时还可以消除所有的抖动。

除此之外，还可将 CDR 恢复的数据调整到最佳时钟采样位置，从而最大程度地优化电路中的抗抖动性能。

在本次光发射模块的设计中，我们选用了 MACOM 公司的型号为 M37049 的 CDR 芯片，它集成了四个传输通道，单通道传输速率为 25.78Gbps 或者 28.05Gbps，该芯片有自适应输入均衡，每个通道包括自适应输入均衡、高性能的 CDR 和具有可编程输出摆动和去加重的输出驱动器。CDR 是无参考的，可以绕过它来支持遗留数据或非标准数据速率。该款芯片是以 CSP 形式封装，封装后大小为 4mm\*4.5mm，。该器件的供电电压仅为 1.8V，提供了行业领先的低功耗。通过 I2C 串行总线来完成控制。下面为该 CDR 的工作电路图：

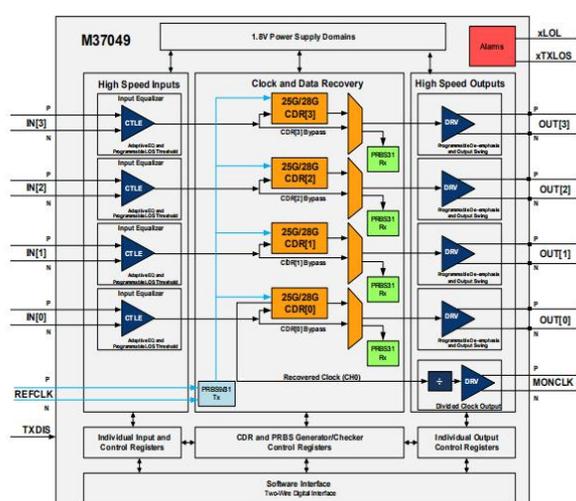


图 3.4 CDR 电路图

Figure3.4 CDR circuit diagram

从图中以及 CDR 的 Datasheet 中可知,CDR 要想正常工作首先要保证 1.8V 的供电电压，然后将 TXDIS 引脚拉低，最后要给 CDR 加参考时钟。

### 3. 高速电连接器

我们选用了 Samtec（申泰）的一种可以支持 25Gbps 信号传输的 16 通道高速电连接器，其大小为 66mm×12mm，满足 400Gbps 数据传输，其型号为 BE40A-M-92SJ-2-2-16-0152，它的特点是配有信号和弹簧顶针，每个通道阻抗为 50Ω，配有铜制外壳的固体介质低损耗微波电缆，每列有 16 个通道，该连接器性能可以达到 50GHz。下面是该连接器的外观图：



图 3.5 电连接器外观图

Figure3.5 Electrical connector appearance diagram

### 3.2 原理图及版图的设计

#### 3.2.1 原理图设计

根据上述组件和芯片的性能和管脚定义，进行了系统的原理图设计，包括一个多通道高密度电连接器、4 个 TOSA 和 4 个 CDR，如下图所示，

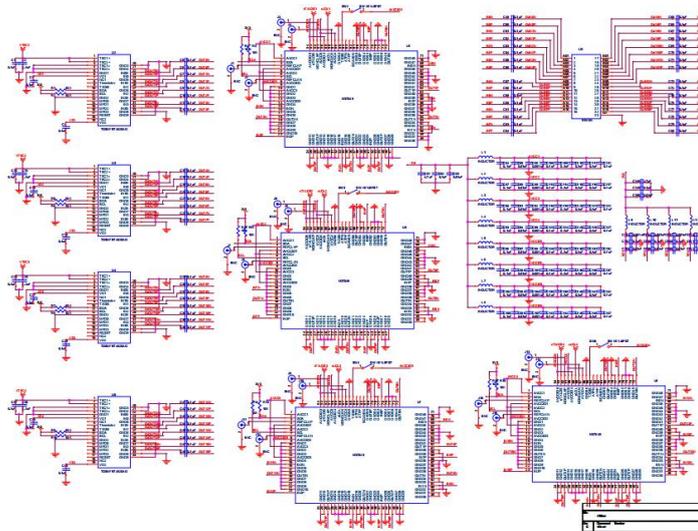


图 3.6 原理图设计

Figure3.6 Schematic design

#### 3.2.2 版图设计

##### 1. 信号叠层及传输线阻抗设计

叠层结构的设计很关键，因为它设计的好坏影响 PCB 板供应商在制造过程

中所遇到问题的南移程度和高速信号传输的质量<sup>[11]</sup>。良好的材料叠层设计应该是在性能和成本均衡后所产生的结果。为了确保传输过程中信号的质量，此次我们设计了六层叠层。第一层和最后一层为高速传输线布线层，第二层和第五层设计为参考地层是为了给高速信号提供完整的返回路径，第三层和第四层为电源平面，三四层之间的距离应尽可能小，这样可以降低回路电感，进而减小阻抗，叠层结构整体设计是对称的。因此在第一层和第二层、最后一层和第五层之间的介质材料使用介电常数为 3.6，损耗角正切为 0.004 的高频板材 M7\_3313，以此来满足 25Gbps 信号的传输，其他层之间的介质使用一般的 FR4 材料即可。最终设计完成后，板厚为 0.986mm。差分线的阻抗要匹配为 100 欧姆，单端线的阻抗要匹配为 50 欧姆<sup>[10]</sup>。具体的叠层设计如下图所示：

	材料	厚度 (um)
	DK 3.8	20
S1	Cu	35
	M7_3313 Dk3.6 Df0.004	100
G1	Cu	18
	FR4 DK4.2 Df0.04	100
Power1	Cu	18
	FR4 DK4.2 Df0.04	400
Power2	Cu	18
	FR4 DK4.2 Df0.04	100
G2	Cu	18
	M7_3313 Dk3.6 Df0.004	100
Signa2	Cu	35
	DK 3.8	20

图 3.7 叠层设计结构

Figure3.7 Laminated design structure

对于高速信号传输线，通常有两种设计方式：一种是通过表层传输信号的微带线结构，还有一种是内层传输信号的带状线结构。考虑到串扰、插损和场聚集等因素的考虑，我们采用紧耦合的 CPW 线，在高速电连接器和 SMA 连接器附近将差分线转成单端线进行信号的传输，在两者之间一定要采取一定方法让其做好匹配。因此我们使用 Polar Si9000 先进行传输线阻抗的匹配，然后用 HFSS 仿真进行精准调节，最后得到的 GSSG 的差分传输线线宽为 112um，线

间距为 100 $\mu\text{m}$ ，信号线与共面参考地平面的间距为 109 $\mu\text{m}$ ；单端传输线线宽为 160 $\mu\text{m}$ ，线与共面参考地平面的间距为 109 $\mu\text{m}$ 。

## 2. 版图设计

在 PCB 板上电芯片（CDR）采用 Flipchip 的方式，高速电连接器和光组件（TOSA）采用贴装的形式与 PCB 板连接，光组件的 DC 引脚要通过在 PCB 板上焊接连接器的方式与其柔性基板（FPC）完成互连。光组件和电芯片在 PCB 板上呈对称分布，光组件靠近板边，由于光组件柔性基板长度有限，而光组件距离 PCB 板板边距离较大，因此对 TOSA 所在位置的附近对 PCB 板进行了挖槽处理。连接器、电芯片和光组件之间的高速信号传输线均采用上面仿真得到的 CPW 信号传输线及单端微带线来进行互连，高速信号线走弧线，并尽可能的减小高速信号线的传输距离，在它们之间均添加了 0.1 $\mu\text{F}$  的高频电容来阻隔直流偏置，电芯片上的时钟信号引脚需要引出到 SMA 连接器上，电源和其他控制引脚均引出到插针。考虑到电源完整性，电芯片和光组件里的电源都采用单独供电的方式，在插针与芯片电源引脚的互连平面中放置了磁珠和去耦电容，其中芯片引脚相隔的间距与电容容值成反比关系，电源平面按照芯片供电引脚分割，电源之间的互连均通过平面来完成，这样可以减小传输过程中的压降以此来保证电芯片和光组件正常工作，电容与供电平面采用多孔连接。下面为设计完成后的版图：

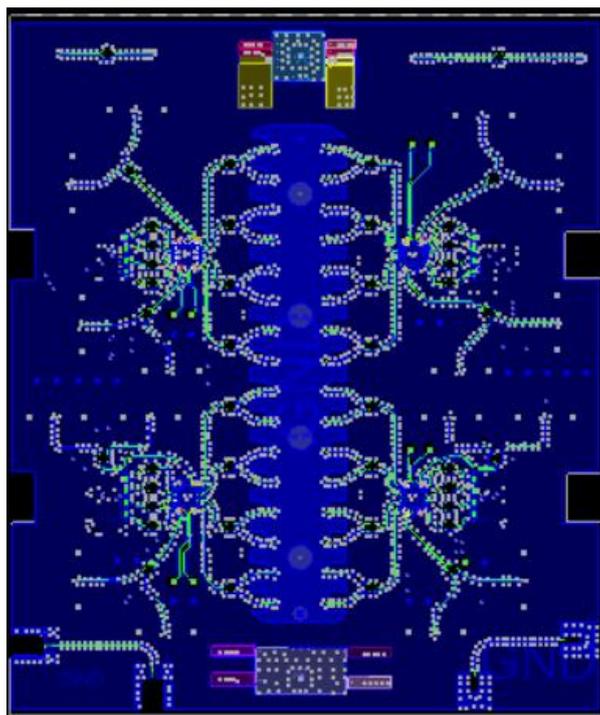


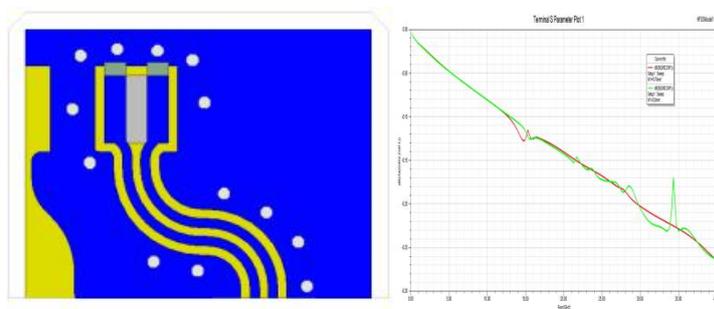
图 3.8 版图设计

Figure3.8 Layout design

### 3.3 模板板电互连信道建模仿真

在本文中信号完整性的处理主要包括：叠层以及传输线阻抗的设计、不连续结构的优化。关于叠层以及传输线阻抗的设计已经在 3.2.2 中详细说明，下面我们主要介绍不连接结构的优化。

(1) TOSA 焊盘处的仿真及优化如下图所示：



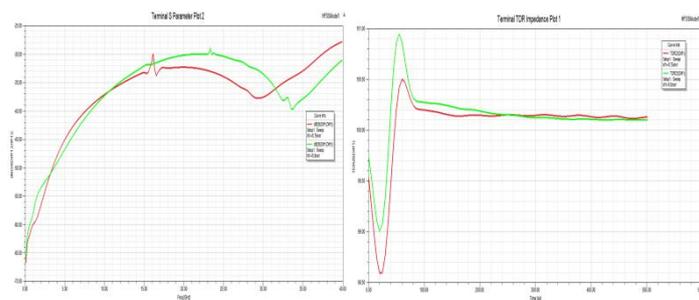


图 3.9 仿真模型及结果

Figure3.9 Simulation model and results

经过仿真及优化，我们将 TOSA 焊盘下面的参考地平面挖掉一个长度为 0.8mm，宽度为 0.75mm 的矩形时，阻抗最靠近 100 欧姆，同时反射和插损也会比较好。

(2) TOSA 与 CDR 之间的高频电容的仿真及优化如下图所示：

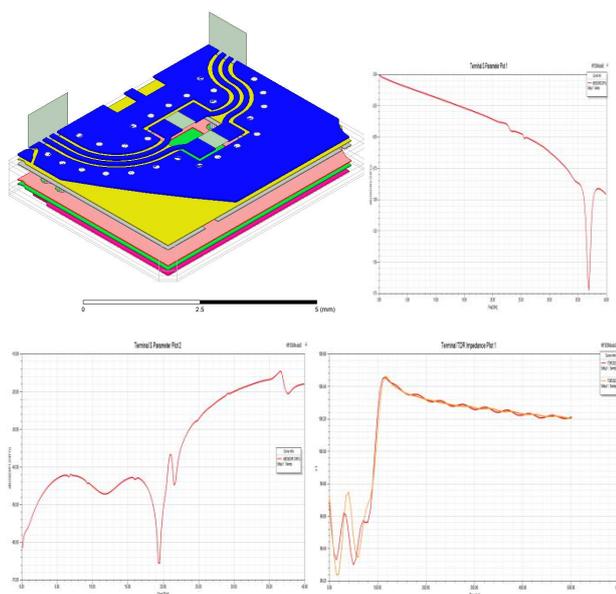


图 3.10 仿真模型及结果

Figure3.10 Simulation model and results

通过仿真及优化，把电容下面的第二层参考地平面和第三层电源平面挖掉一个长为 1.36mm，宽为 1.7mm 的矩形，第四层电源平面挖掉一个长为 1.36mm，宽为 1.6mm 的矩形时，阻抗与 100 欧姆相差无几，反射和插损也

效果最好。

(3) CDR 与连接器之间的电容的仿真及优化如下图所示：

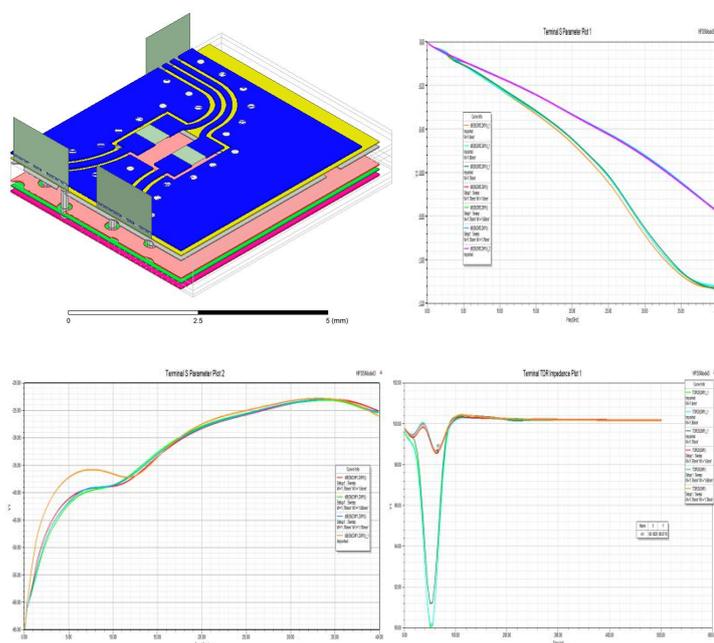
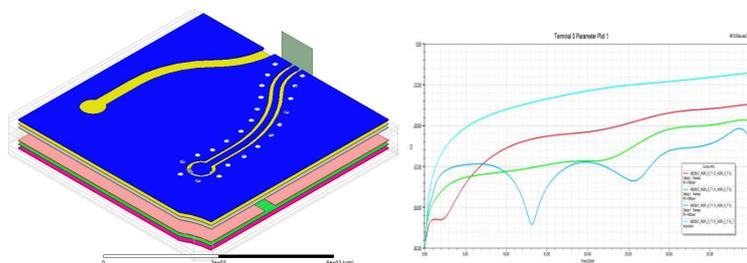


图 3.11 仿真模型及结果

Figure3.11 Simulation model and results

通过仿真及优化，将电容下面的第二层和第三层平面挖掉一个长为 1.36mm，宽为 1.76mm 的矩形，第四层电源平面挖掉一个长为 1.36mm，宽为 1.6mm-1.76mm 时，阻抗最靠近 100 欧姆，反射和插损效果最后。

(4) 连接器焊盘处的仿真及优化如下图所示：



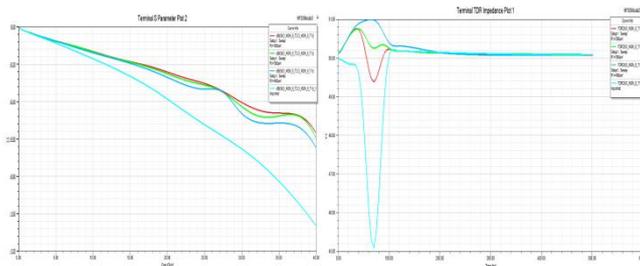


图 3.12 仿真模型及结果

Figure3.12 Simulation model and results

经过仿真及优化，我们发现将焊盘下面的第二层参考地挖掉一个半径为 0.3mm 的圆时，阻抗最接近 50 欧姆，反射和插损效果最好。

CDR 焊盘处阻抗偏大。因此将靠近 CDR 的一小部分传输线的线宽加粗为 130um，这样差分线阻抗最接近 100 欧姆，反射效果最好。

最后我们按照上述分段仿真得到的结果对不连续结构进行优化之后，对光组件到 CDR 和 CDR 到连接器之间的传输线整体做了仿真，仿真模型及结果如下图所示：

(1) 光组件（TOSA）到 CDR 的仿真

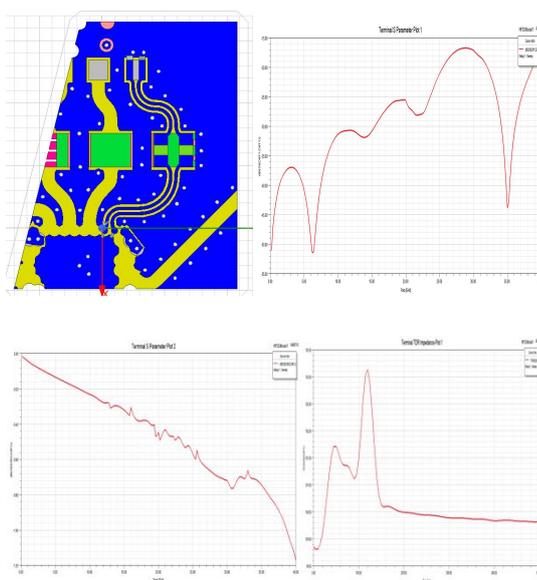


图 3.13 仿真模型及结果

Figure3.13 Simulation model and results

从仿真图来看，光组件到 CDR 之间的传输线路阻抗与 100 欧姆相差无几，回波损耗 S11 在 0 到 40GHz 之间基本是在-15dB 以下，插入损耗 S21 在 13GHz 时约为 0.34dB。

(2) CDR 到连接器的仿真

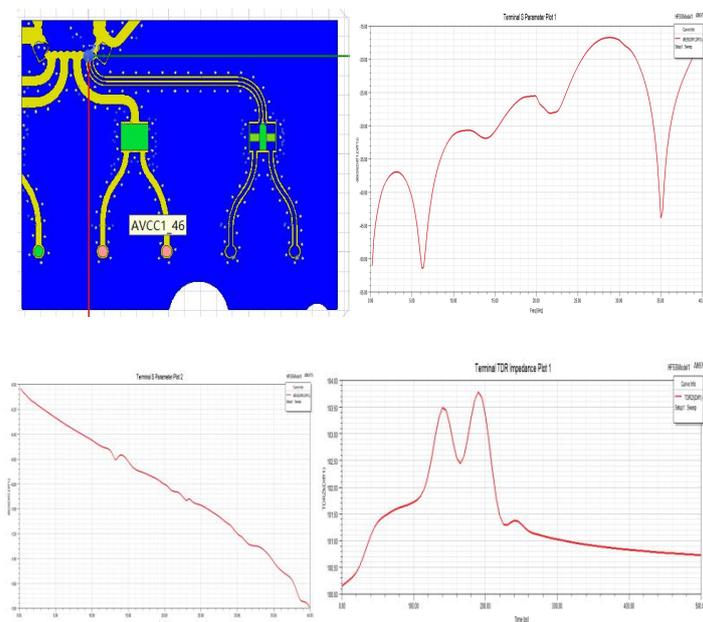


图 3.14 仿真模型及结果

Figure3.14 Simulation model and results

从仿真图可以看出，CDR 到连接器之间的传输线路阻抗变化范围在 10% 以内，反射损耗 S11 在 0 到 40GHz 内低于-15dB，插损 S21 在 13GHz 时约为 0.6dB。

最后按照设计及仿真优化后的结果，最终制成的 PCB 板如下图所示：

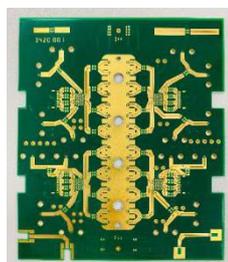


图 3.15 光发射模块实物电路板

Figure3.15 Optical emission module physical circuit board

### 3.4 光发射模块的微组装

微组装流程如图 3.16 所示：



图 3.16 微组装流程图

Figure3.16 Micro assembly flow chart

最后组装完成的实物图如图 3.17 所示：

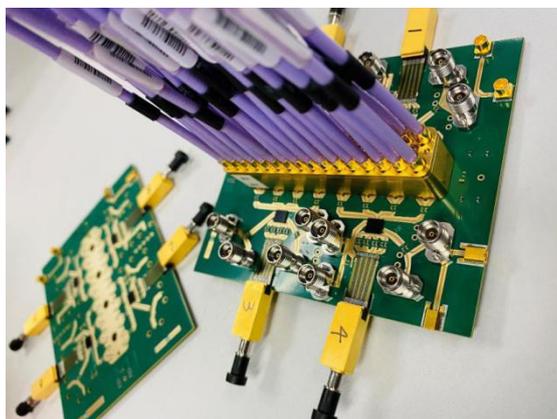


图 3.17 光发射模块实物图

Figure3.17 Physical view of optical emission module

### 3.5 光发射模块的性能测试

本文中光模块测试的内容主要是 PCB 板的电学测试和光发射模块的眼图

测试。

### 3.5.1 传输线 S 参数测试

在模块板上我们设计了用于测试的传输线条（包括高频电容），传输线的 S 参数反映的是互连的频域特性，可以通过 VNA 测量得到传输线的 S 参数，通过使用 250 $\mu\text{m}$  间距的高频探针将模块板上的测试线条与 VNA 连接并完成测试，最后得到的测试结果如下图所示：

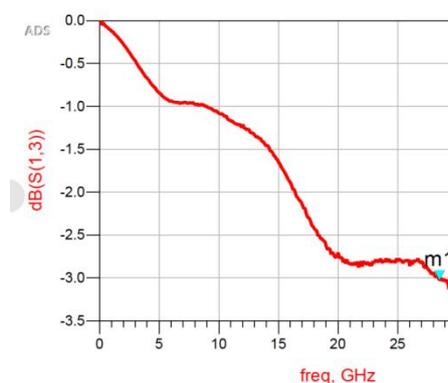


图 3.18 长度为 1.1cm 的传输线测试结果

Figure3.18 Test results for a transmission line of 1.1cm in length

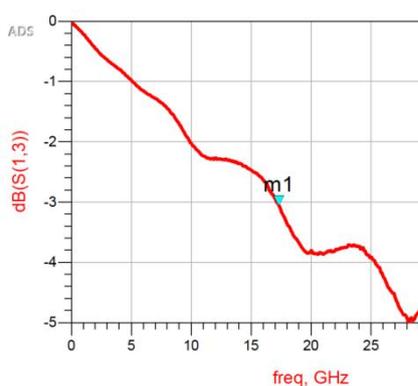


图 3.19 长度为 2.1cm 的传输线的测试结果

Figure3.19 Test results for a transmission line of 2.1cm in length

从测试结果图可以看出，长度为 1.1cm 的传输线的 3dB 带宽为 28.5GHz，长度为 2.1cm 的传输线的 3dB 带宽为 17GHz，所以此传输线性能很好，可以完

成 25Gbps 信号的传输。

### 3.5.2 眼图测试

1. 首先我们根据需求制定了眼图测试方案如下图所示：

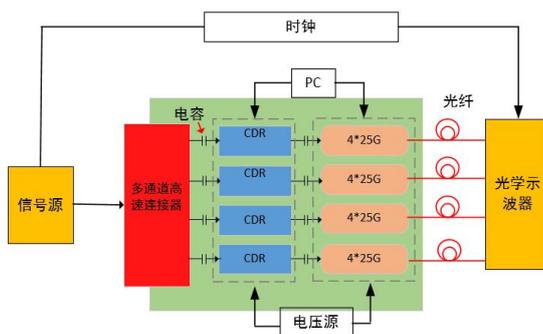


图 3.20 眼图测试方案

Figure3.20 Eye diagram test protocol

2. 测试设备清单

16\*25Gbps 光发射模块测试设备清单如下表所示：

表 3.1 测试设备清单

Table3.1 Test equipment list

类型	型号	具体型号	厂家	数量
	误码率测试仪	BSA260C	Tektronix (泰克)	1
	直流电源	GPD-4303S	GWINSTEK (固纬)	1
	光谱仪	AQ6370D	YOKOGAWA	1
	电示波器	DSA73304D	Tektronix (泰克)	1
	光示波器	DSA8200	Tektronix (泰克)	1
	信号发生器	USG-LF44	GWINSTEK (固纬)	1

我们确定需求后，搭建了相应的测试平台，如下图所示：



图 3.21 光模块测试平台

Figure3.21 Optical Module Test Bench

此模块测试的参数包括：消光比、平均光功率、光眼图、发射光波长。

### 3. 通过 TEC 控制器来调节 TOSA 的静态工作点

(1) 首先将 TOSA 评估板的控制板上的 26-pin 引脚与模块板上对应的管脚连接，给控制板和 MCU 分别加上+5V 和+3.3V 的电源，测试过程中 TOSA 要注意散热；

(2) 用直流电压源给模块板供电，保证输出到 CDR 的电压在 1.8V 左右，用一个信号连接器给 CDR 提供参考时钟；

(3) 用光纤将 TOSA 出光口与光谱仪连接；

(4) 最后通过设定 GUI 里的 TEC 温度来调节激光器的发光波长。

最后通过设定温度调节后的 TOSA 发光波长如图 3.22 所示：

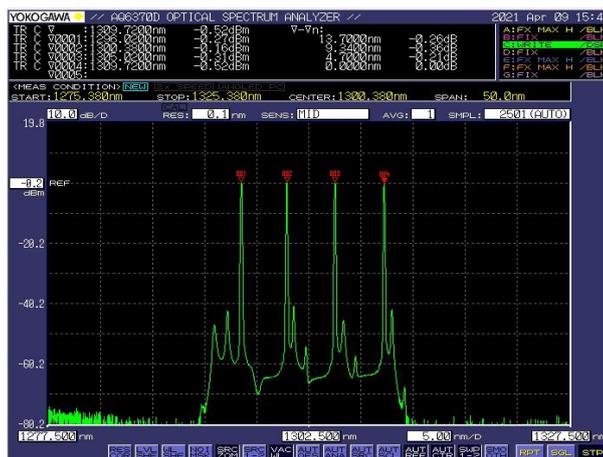


图 3.22 TOSA 发射光波长图

Figure3.22 TOSA emitted light wavelength chart

从图中可以看出，四路激光器发光波长分别为 1296.02nm、1300.38nm、1305.02nm、1309.72nm，达到了 TOSA 的最佳静态工作点。

#### 4. 眼图测试

(1) 用光纤将 TOSA 出光口与光示波器连接，将误码仪与电连接器连接，设定信号传输速率为 25.78Gbps，设置相应的时钟信号；

(2) 在光示波器里设置好要测试的参数，然后通过 GUI 将激光器依次打开，在光示波器里读取并记录眼图即可；

下面为编号为 7 的 TOSA 的 4 通道眼图：

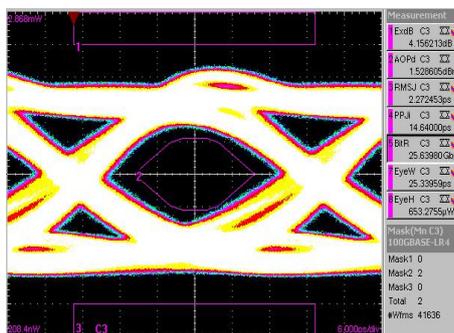


图 3.23 Lane0@PBRs-7 的光眼图

Figure3.23 Photocurrent diagram of Lane0@PBRs-7

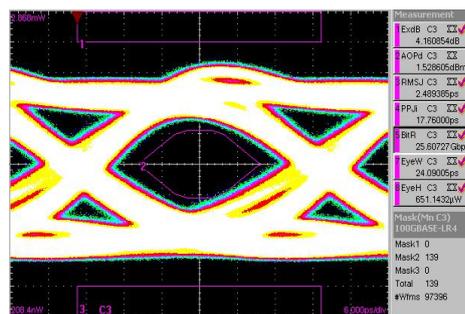


图 3.24 Lane0@PBR3-31 的光眼图

Figure3.24 Photo eye diagram of Lane0@PBR3-31

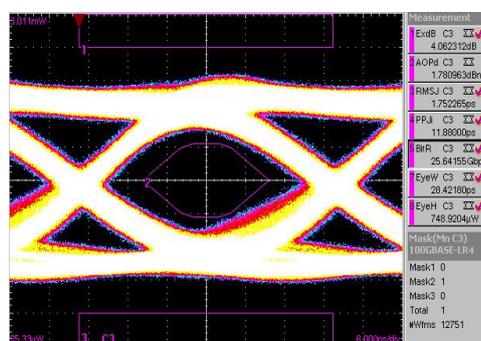


图 3.25 Lane1@PBR3-7 的光眼图

Figure3.25 Photoeye diagram of Lane1@PBR3-7

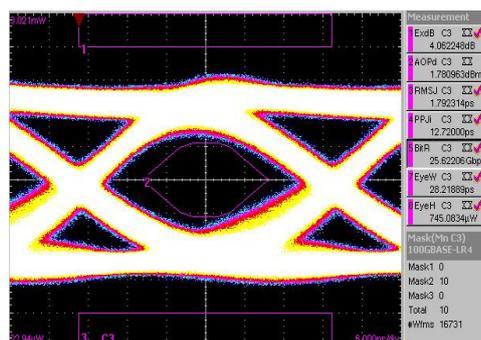


图 3.26 Lane1@PBR3-31 的光眼图

Figure3.26 Lane1@photo eye diagram of PBR3-31

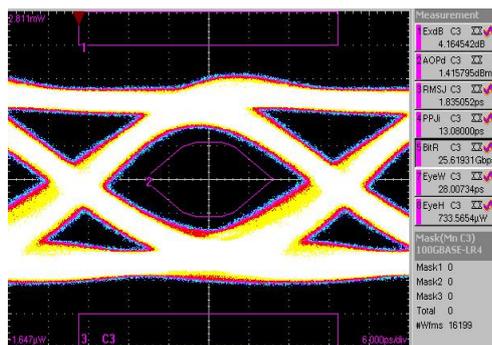


图 3.27 Lane2@PBRs-7 的光眼图

Figure3.27 Photoeye diagram of Lane2@PBRs-7

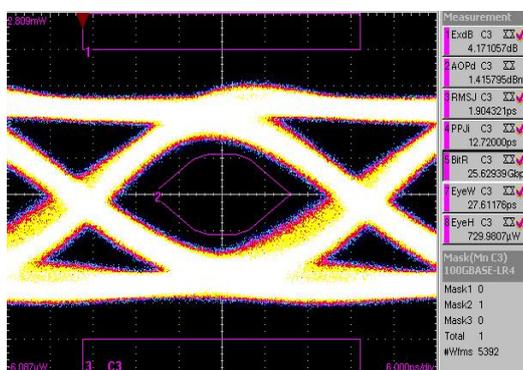


图 3.28 Lane2@PBRs-31 的光眼图

Figure3.28 Photo-eye diagram of Lane2@PBRs-31

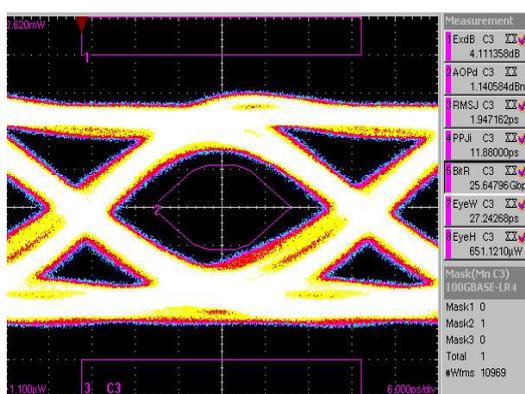


图 3.29 Lane3@PBRs-7 的光眼图

Figure3.29 Photoeye diagram of Lane3@PBRs-7

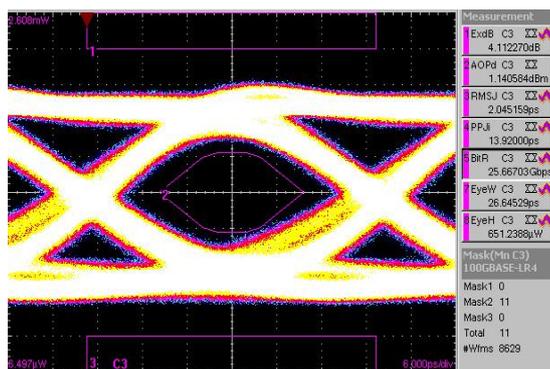


图 3.30 Lane3@PBR3-31 的光眼图

Figure3.30 Photo eye diagram of Lane3@PBR3-31

从测试结果图可以看出，单 TOSA 的四个通道的消光比 (ER) 均大于 4dB，平均光功率均大于 1dBm，是符合 100G-LR4 的协议要求的，四个通道的峰峰值抖动都在 10-20ps 之间。一个模块中 4 个 TOSA 可以很好的完成 400G 信号的传输。

### 3.6 本章小结

本章进行了 400G 光发射模块的设计、制作及测试。首先我们使用了当前成熟的 25G NRZ 技术，在 100G LR4 的基础上通过增加传输通道数的方式制定了 400Gbps 光发射模块的方案，研究了光器件中的 TEC 温控技术，细波分复用 (LWDM) 技术，选用了商用的 TOSA 组件来完成单纤 100Gbps 信号的传输，选用与 TOSA 相匹配的 CDR 来保证电信号的完整，然后进行了电信道的设计、建模和仿真，接着对模块板进行了微组装，最后完成了对光发射模块的测试，验证了单个 TOSA 符合 100G LR4 协议的标准，四个 TOSA 可以很好的完成 400Gbps 信号的传输。

## 第 4 章 基于 COBO 的 400G 收发一体光模块的设计与实现

COBO 封装凭借其体积小、散热效率高的优势成为当前 400G 光模块比较流行的封装结构之一，在此次收发一体光模块的制作中，我们使用了该封装结构，光耦合结构、连接器端口设计、高速电信道设计进行了一定的研究，最终完成了基于 COBO 技术的 400G SR8 收发一体光模块的设计。

### 4.1 模块方案制定及器件选型

在上一章中我们介绍了 400G 光发射模块的设计，这给本章中所介绍的 400G SR8 光模块的设计奠定了一定的基础。本次光模块设计采用 16 通道，单通道 56Gbps 的 PAM4 信号，其中 8 通道发射，8 通道接收来完成 400G 信号的传输，光耦合方面我们采用了 45 度反射面的光耦合。此次设计我们采用两种电芯片，一种是采用 inphi 公司的四通道电芯片，另一种是采用半导体所设计的 8 通道电芯片，因此在做原理图及版图设计时考虑了两种方案的兼容性。本章中所介绍的 400G SR8 光模块设计的方案和光电组件的选择如下图所示：

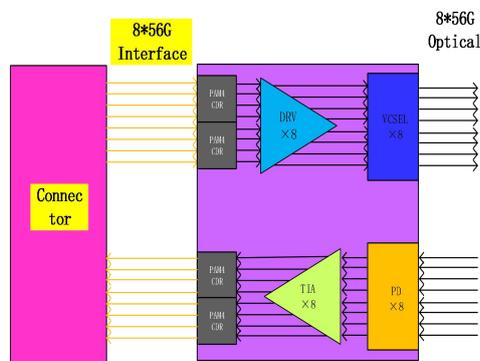


图 4.1 400G SR8 光模块方案设计图

Figure4.1 400G SR8 Optical Module Solution Design Diagram

序号	芯片名称	芯片规格及型号	说明 (光芯片电芯片均使用2颗, 实现8通道)
1	激光器芯片	1*4 array/VM50-850C4	26.5 Gbd/s PAM-4 VCSEL
2	探测器芯片	1*4 array/D30-850C4	Photodetector Chip up to 50 Gbit/s
3	驱动芯片	1*4 array/IN2814DV	26 Gbaud Quad-Channel Linear VCSEL Driver
4	放大芯片	1*4 array/IN2865TA	28Gbaud Quad-Channel
5	CDR	25G PAM4 (macom 38053用于输入、38040用于输出, 采购)	Vcsel应用
6	FA	1*4 array *4	收发均使用4通道FA耦合 (45°FA)
7	板中连接器	SEAM-20-02.0-S-10-2-A-K-T R/Samtec	PAM-4 56Gbps

● 驱动和放大芯片可用半导体所8通道Driver/Tia替换

图 4.2 400G SR8 光模块芯片选型

Figure4.2 400G SR8 Optical Module Chip Selection

按照方案最终完成的光模块如图 4.3 所示:

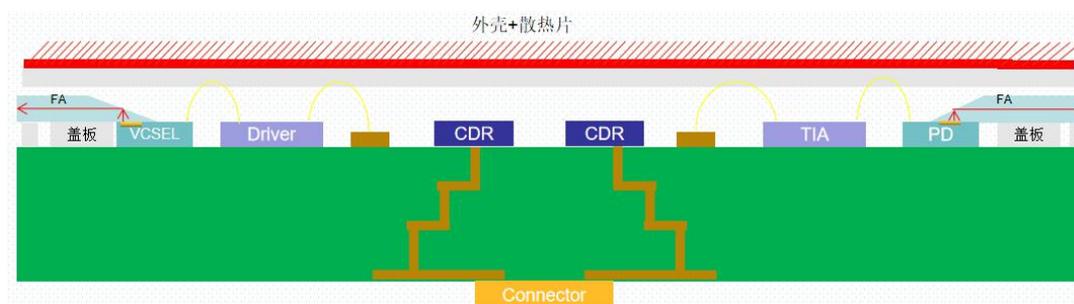


图 4.3 400G SR8 光模块的 COBO 封装结构

Figure4.3 COBO package structure of 400G SR8 optical module

下面我们对所选择的光电器件的特性简单的介绍下:

### 1. VCSEL 激光器

我们选用 VIS 公司的 VCSEL 激光器, 其型号为 VM-850C, 这款激光器有  $1 \times 1$ 、 $1 \times 4$  和  $1 \times 12$  三种阵列, 激光器之间的间距为 250um, 它在高温下也可以保持稳定工作, 而且它支持引线键合 (wirebonding) 和倒装 (Flipchip) 的方式进行互连, 它发光的中心波长为 850nm, 发光面为直径 20um 的圆, 单通道信号速率可以达到 26.5Gbd/s (PAM-4 调制), 阈值电流不超过 0.5mA, 峰值输出功率可以达到 4mW, 本次设计中我们采用的是 1 察 4 阵列的激光器 (VM-850C4)。

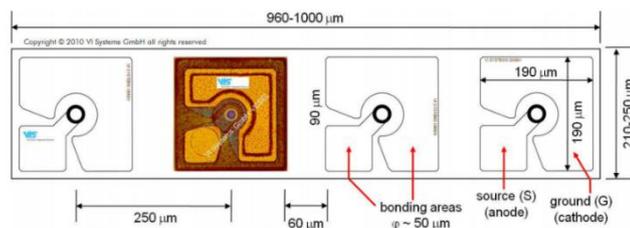


图 4.4 1×4 阵列的 VCSEL

Figure4.4 1×4 array of VCSEL

## 2. PD 探测器

PD 探测器我们也是选用了 VIS 公司的，其型号为 D30-850C，它和选用的激光器一样，有 1×1、1×4 和 1×12 三种阵列，探测器之间的间距也为 250μm，它也支持引线键合和倒装两种方式连接，它的工作波长范围是 700-890nm，光敏面为直径 20μm 的圆，单通道最高可以传输速率为 112Gbps 的信号，它在 850nm 处的响应度大于 0.4A/W，本次设计中我们采用的是 1×4 阵列的探测器（D30-850C4）。

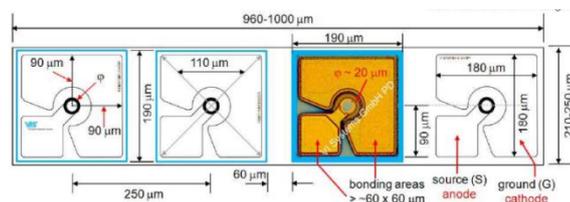


图 4.5 1×4 阵列的 PD

Figure4.5 PD for 1×4 arrays

## 3. 驱动芯片 (Driver)

我们选用了 inphi 公司的四通道电芯片，其型号为 IN2814DV，它主要为 PAM-4 的 200G 和 400G SR 的 VCSEL 激光器做驱动的，它有四个发射通道，单通道信号速率为 26Gbd/s，相邻两个通道之间相距 250μm，与我们所选择的激光器的间隔是一样的，可以通过引线键合的方式与 VCSEL 激光器直接连接。此外，它的最大输出偏置电流为 10mA，可以输出的最大调制电流为 10mApp，通过 I2C 接口对芯片所有的模拟功能实现控制。

#### 4. 放大器芯片 (TIA)

TIA 我们也选用了 inphi 公司的芯片, 其型号为 IN2865TA, 它也是四通道芯片, 支持单通道速率 28Gbd/s, 3dB 带宽可以达到 25GHz, 而且它设计一个 RSSI 功能, 可以监测并读取平均光输入功率, 它通过 3.3V 的单一电源来供电, 不适用 RSSI 功能的情况下芯片功耗为 0.8W。

#### 5. 时钟数据恢复 (CDR)

CDR 我们选用了 MACOM 公司的芯片, 其型号为 MAOM-38053B, 它是一款带有可编程均衡器的、支持四通道的 PAM-4/NRZ 的 28GBaud 信号的 CDR, 编程输出摆幅 (Swing) 最高可以达到 2.5Vpdd, 通过单一的 1.8V 电源供电即可正常工作, 它也支持 2.5V 和 3.3V 供电电源, 如果想得到更高的输出摆幅, 就需要加大供电电源电压。它的每一个通道都可以通过 I2C 串行总线进行控制。

#### 6. 高速电连接器

此次我们选择了 Samtec 公司的 SEARAY 系列连接器中的一款。该连接器是一种板中高速高密度连接器, pin 之间间距为 0.8mm, 可以大大节约板上的空间, 堆叠高度为 7mm, 减少了整个模块封装结构的体积, 符合 COBO 封装的要求。电气性能是我们重点关注的地方, 需要对它的 SI 性能进行测试, 看是否可以完成单通道 56Gbps PAM4 信号的传输。因此需要通过设计测试板来完成其电气性能的测试, 为了保证测试结果的准确度, 测试版中的传输线设计的长度尽量短, 测试端口及结果如图 4.5 和表 4.1 所示:

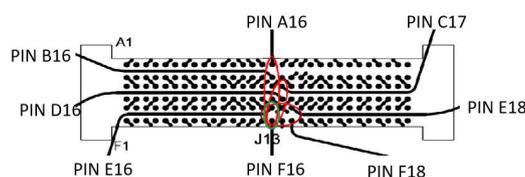


图 4.6 差分信号最佳端口

Figure4.6 Optimal port for differential signals

表 4.1 连接器差分信号端口测试结果

Table4.1 Connector differential signal port test results

测试参数	发送	接收	结果
插损 (S21)	SEAM8_E16,F16	SEAF8_E16,F16	3dB@13.7GHz
回损 (S11)	SEAM8_E16,F16	SEAM8_E16,F16	>10dB to 8.0GHz
近端串扰	SEAM8_A16,B16	SEAM8_E16,F16	<-20dB to 20.0GHz
	SEAM8_C17,D17	SEAM8_E16,F16	<-20dB to 12.9GHz
	SEAM8_E16,F16	SEAM8_E18,F18	<-20dB to 20.0GHz
远端串扰	SEAM8_E16,F16	SEAF8_A16,B16	<-20dB to 20.0GHz
	SEAM8_E16,F16	SEAF8_C17,D17	<-20dB to 12.7GHz
	SEAM8_E16,F16	SEAF8_E18,F18	<-20dB to 20.0GHz

从上述测试结果可以看出，3dB 带宽为 13.7GHz，去掉测试板上传输线和焊接等的损耗，因此其 3dB 带宽可以达到 14GHz，回损、近端串扰和远端串扰均都满足要求，因此此连接器可以支持单通道 56Gbps PAM4 差分信号的传输。

## 4.2 版图设计

本次光模块设计，分析了信号速率、布线密度和电互连信道设计等的影响，叠层结构设计为 6 层。在 PCB 板上 CDR 通过 Flipchip 的方式连接，电芯片和电路板之间、光电芯片之间均通过 Wirebonding 的方式完成互连，高速信号线我们采用线宽/线间距为 112um/100um 的等长 CPW 线，中间加 0.1uF 的高频电容来阻隔直流偏置，对于电连接器信号端口，根据电连接器厂商提供的规格参数说明，进行高速信号布局设计。为便于测试，RSSI、I2C 接口等 DC 引脚均由插针引出。此外，为了实现更好的散热的作用，在 CDR 和电芯片下面设置导热孔。因为，本模块中，光耦合结构的实现是另一个重要部分，为便于后续光纤耦合，在模块板需要提前设置好定位孔，匹配自动光耦合平台。模块板的整体布局如如下图 4.5 (a) 所示,高频电连接器放置在中间，左右两边分别是光发射部分和光接收部分。同时，增加另外一款模块设计，目的是通过使用半导体所设计的 8 通道电芯片替代 inphi 公司的商用 4 通道电芯片，目的是为了通过两种模块的设计，进行对比评估，进一步地，通过协同设计联合建模仿真等工作，为国产芯片提供封装链路反馈设计。

为了便于后续模块板的测试，选用了高速射频连接器 SMP 和与 SEAF8 配对的 SEAM8 高频连接器来完成 8 发 8 收 56Gbps PAM4 信号的传输，如图 4.6 所示：

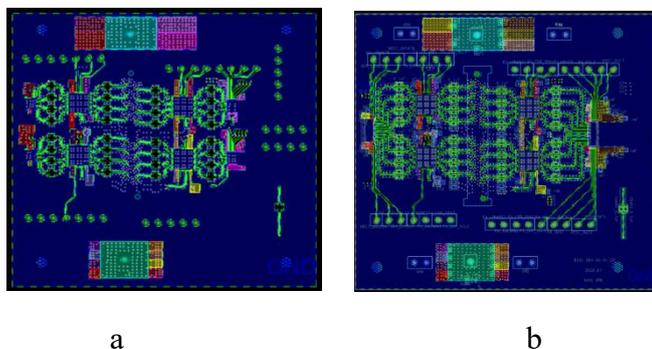


图 4.7 模块板版图设计：(a)基于 inphi 电芯片；(b)基于半导体所电芯片

Figure4.7 Module board layout design: (a) based on inphi electrical chip; (b) based on semiconductor house electrical chip

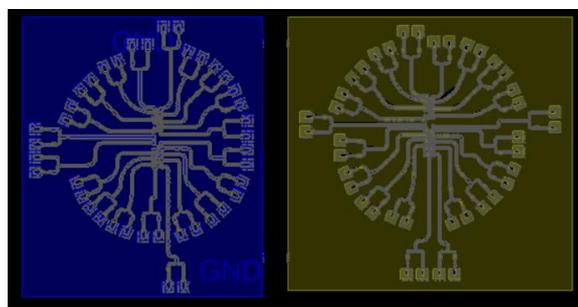


图 4.8 测试板版图设计

Figure4.8 Test board layout design

### 4.3 模块板电互连信道建模仿真

在模块板中我们主要对 CDR 焊盘、连接器焊盘以及电容等不连续结构进行了仿真并完成了优化。

(1) CDR 焊盘处的仿真及优化如下所示

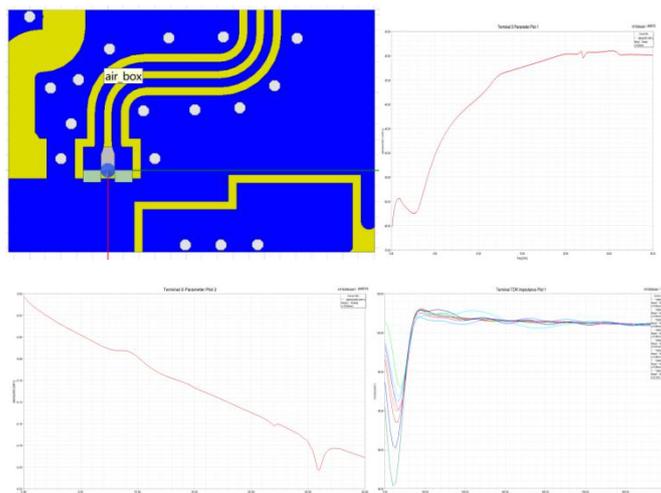


图 4.9 CDR 焊盘仿真模型及结果

Figure4.9 CDR pad simulation model and results

经仿真及优化，我们发现将 CDR 焊盘下面的第二层参考地平面挖掉一个长为 0.3mm，宽为 0.64mm 的矩形时，阻抗匹配到了 100 欧姆，反射和插损效果也最好。

(2) 连接器焊盘处的仿真及优化如下所示

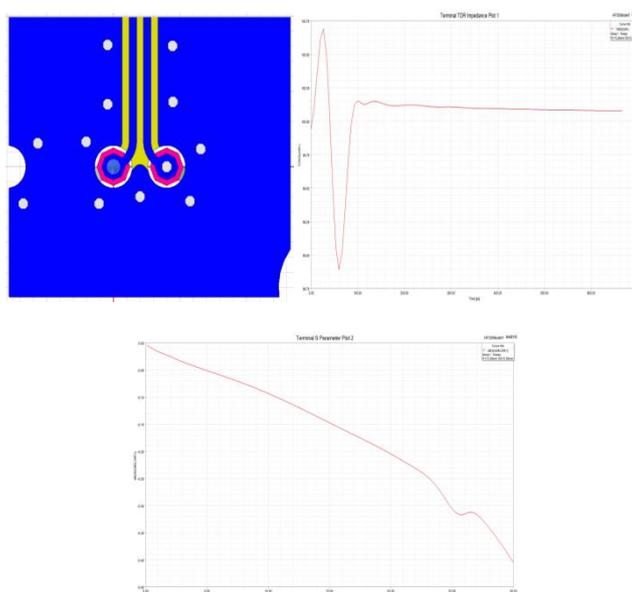


图 4.10 仿真模型及结果

Figure4.10 Simulation model and results

通过仿真及优化，发现将焊盘下面的第二层到第五层挖掉一个半径为 0.39mm 的圆时，阻抗可以匹配到 100 欧姆，插损效果也最好。

(3) 高频电容部分的仿真

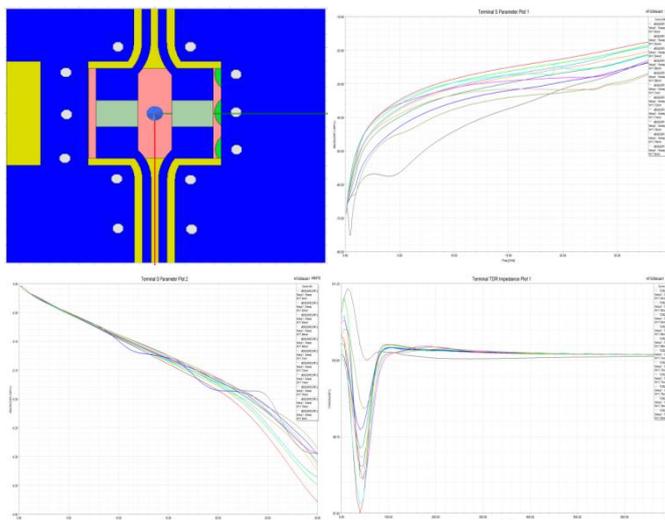


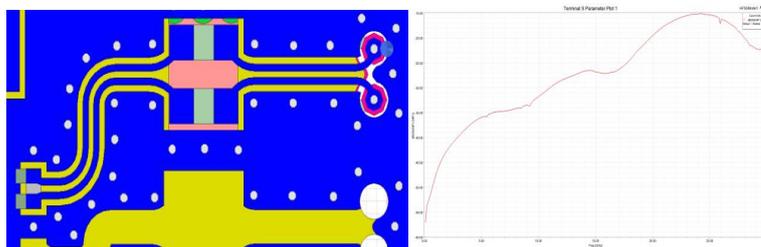
图 4.11 仿真模型及结果

Figure4. 11 Simulation model and results

经过仿真及优化，我们发现将第二层和第三层挖掉一个长为 1.36mm，宽为 1.8mm 的矩形时，阻抗可以匹配到 100 欧姆，反射和插损效果也最好。

最后我们按照上述分段仿真得到的结果对不连续结构进行优化之后，我们对连接器到 CDR 之间的传输线结构和 CDR 到电芯片之间的传输线结构进行了仿真，结果如下：

(1) 连接器到 CDR 之间的传输线结构仿真



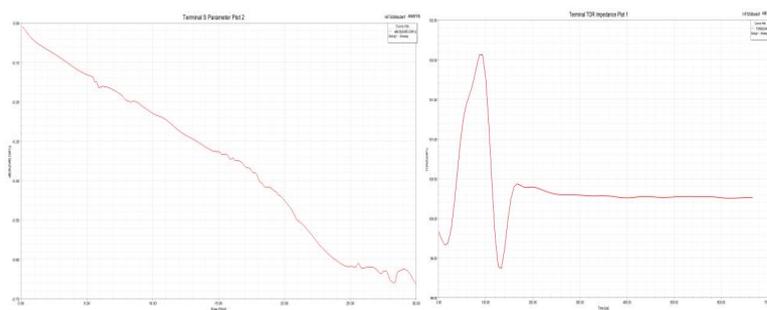


图 4.12 仿真模型及结果

Figure4.12 Simulation model and results

从仿真结果来看,阻抗变化范围在 3%以内,反射损耗 S11 在 0 到 30GHz 内都低于 -15dB, 插损在 15GHz 时仅有 0.33dB, 远远满足要求。

(2) CDR 到电芯片之间的传输线结构

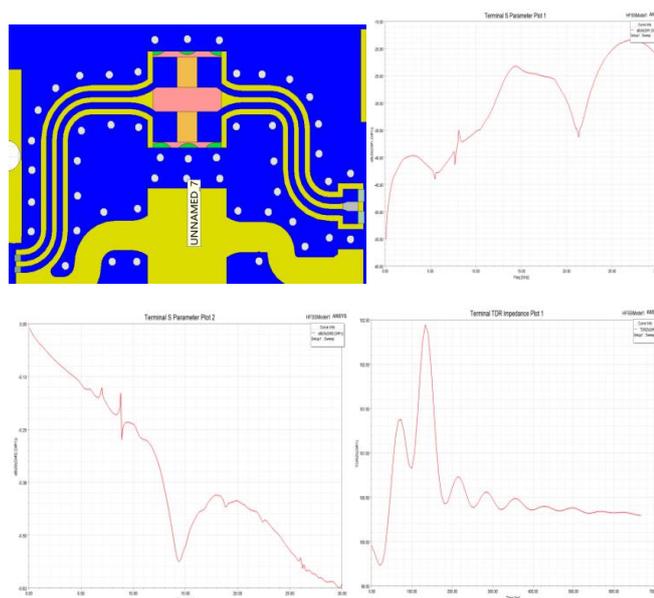


图 4.13 仿真模型及结果

Figure4.13 Simulation Model and results

从仿真结果来看,阻抗匹配到了 100 欧姆,反射损耗 S11 在 0 到 30GHz 之间小于 -15dB, 插损在 15GHz 时大约为 0.6dB, 有一些谐波, 不影响正常工作。

#### 4.4 光路设计

在第二章中我们对比分析了三种耦合结构的优缺点，最后决定采用 45 度 FA 来完成光路反射。为了保证光信号传输的质量，对此种光耦合结构的耦合容差和耦合效率进行了分析和研究，具体过程如下：

(1) 光芯片端面与光纤端面角度变化，考虑到加上盖板后光纤与光芯片端面不在同一平面，将光芯片位置放置在正对光纤底边中心，距离底边中心为 45 $\mu\text{m}$  的位置，如图 4.27 所示：

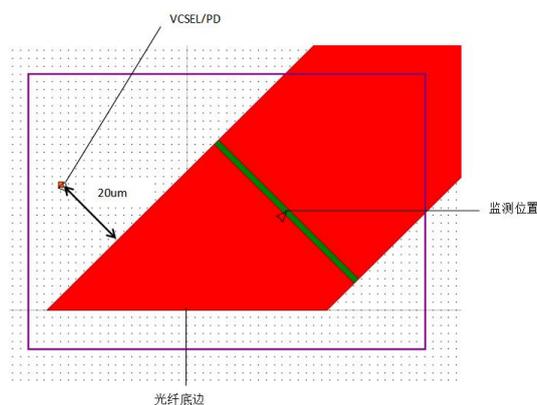


图 4.14 光芯片端面与光纤端面的角度变化

Figure4.14 The angle change between the end face of the optical chip and the end face of the optical fiber

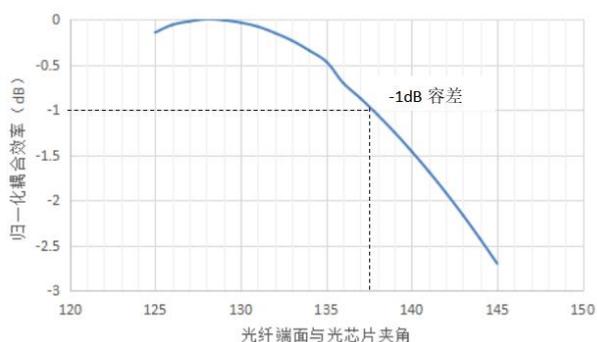


图 4.15 光芯片端面与光纤端面夹角的耦合效率

Figure4.15 Coupling efficiency of the angle between the end face of the optical chip and the end face of the optical fiber

从仿真结果可以看出，光芯片端面与光纤端面夹角在  $128^\circ$  时耦合效率最高，对于角度来说，其-1dB 耦合容差为  $+9.5^\circ$ 。

(2) 光芯片与光纤的垂直距离，为了仿真结果准确，将光芯片端面正对光纤底边中心，如图 4.29 所示：

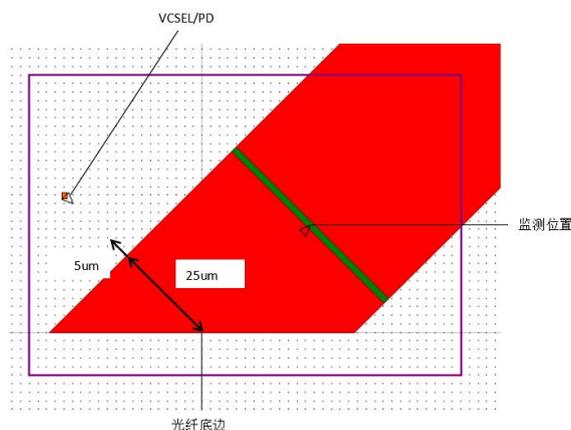


图 4.16 光轴上方向上的相对偏移

Figure4.16 Relative offset in the direction of the optical axis

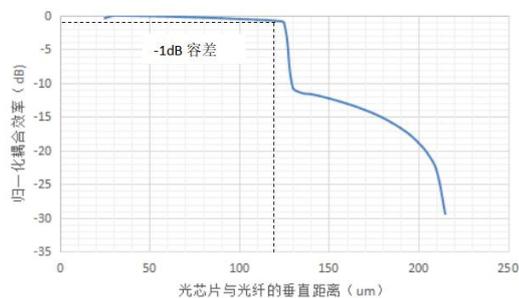


图 4.17 光轴方向上相对偏移后的耦合容差

Figure4.17 Coupling efficiency after relative offset in the optical axis direction

从仿真结果看出，光芯片与光纤之间的垂直距离为  $30\mu\text{m}$  时，其耦合效率最高，对于光轴上的偏移来说，其-1dB 耦合容差为  $+90\mu\text{m}$ 。

(3) 光芯片在光纤端面上的相对偏移，我们从光芯片端面正对光纤底边中心位置为基准，向右上（左下）移动  $25\mu\text{m}$  的范围，如图 4.31 所示：

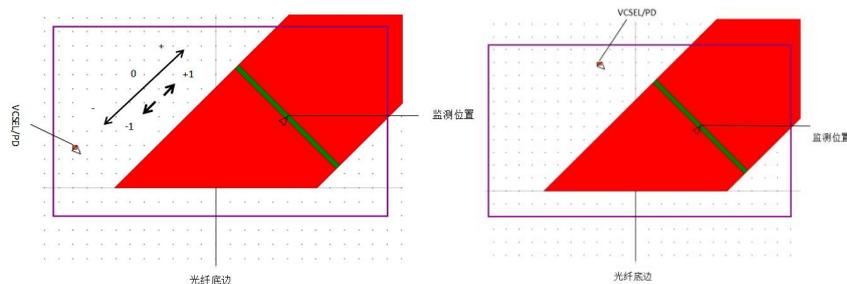


图 4.18 在光纤端面上的相对偏移：-25um（左）和 25um（右）

Figure4.18 Relative offset on the fiber end face: -25um (left) and 25um (right)

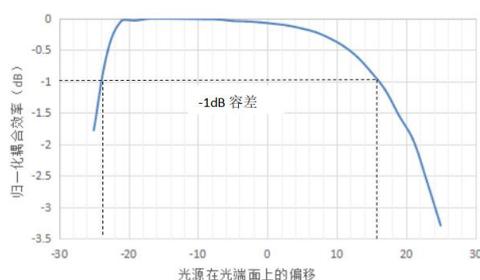


图 4.19 在光纤端面上相对偏移后的耦合效率

Figure4.19 Coupling efficiency after relative offset on the fiber end face

从仿真结果看出，光芯片向左下偏移 15um 是，其耦合效率最高，对于光纤端面上的偏移，-1dB 耦合容差为-23um 和+16um。

从上述仿真结果来看，该结构在光轴和光纤端面方向上有较大的-1dB 耦合容差，在光芯片端面与光纤端面夹角上有较小的-1dB 耦合容差。因此 45 度耦合光纤对于组装的误差要求比较低，对光纤与光器件之间的对准精度提出了较高的要求。

#### 4.5 本章小结

本章进行了基于 COBO 封装的 400G 收发一体光模块的设计，首先通过对 PAM4 调制方式的研究，选用了商用的 4 通道电芯片和国产化的 8 通道电芯片来完成 400Gbps 信号的传输，并研究了光耦合结构、连接器端口的设计来保证信号传输过程的稳定性，然后对 56Gbps PAM4 信号传输链路进行了信号完整性

的设计仿真，最后完成了收发一体光模块的设计，验证了 COBO 封装体积小，高密度的优势。



## 第 5 章 总结与展望

作为数据中心中光互连的必不可少的部分，光模块的成本在数据中心光互连成本的大概占比是一半。100G 光模块广泛应用在各大互联网公司的数据中心，400G 光模块是目前光通信领域内大家关注的重点。在未来几年内 400G 光互连将会得到了大规模商用，因此本论文中两种 400G 光模块的研究具有重要意义。

### 5.1 论文总结

本论文主要的内容如下：

(1) 首先是调研了光模块的发展背景及研究意义，主要介绍了在数据中心这个大环境下光模块的发展趋势，接着介绍了不同种类的 400G 光模块的国内外研究现状和 400G 光模块不同封装结构的发展历程，最后对不同类型 400G 光模块的接口物理层技术方案进行了对比分析；

(2) 对 400G 高速光模块设计的理论进行了一定研究，首先从光模块的三部分结构：光发射结构、光接收结构、光传输结构三部分出发，对其结构以及里面涉及的光器件原理及特性进行了分析，然后对 400G 光模块的光电特性进行了分析，包括：电互连信道设计原理、NRZ 和 PAM4 调制、波分复用技术和 TEC 温控技术。

(3) 在 400Gbps 光发射模块的设计制作过程中，研究使用了 LWDM 技术、TEC 温控技术，在 100G LR4 的基础上通过增加通道数的方式，最终实现了单通道 25Gbps，16 个通道并行的 400Gbps 信号的传输，最终通过测试验证了此光模块的各项参数均满足设计要求。

(4) 为了实现 400Gbps 收发一体光模块的设计，我们使用了不同于 400Gbps 光发射模块的方式，通过改变信号的调制方式，即研究使用了 PAM4 信号调制，模块通过使用单通道 56Gbps PAM4，8 通道并行完成 400Gbps 信号的传输。在设计过程中，对光学耦合结构、连接器等进行了一定的研究，通过

理论分析及仿真，最终得到了最优的光耦合结构和连接器端口的设计。最终完成了 COBO 封装设计，展示了该板载方案体积小、高密度的优势。

## 5.2 未来工作展望

在本文设计光模块的过程中，仍然有一些问题需要去解决并进一步优化，可以根据遇到的问题来进行下一步工作计划的制定。首先是基于商用光组件 TOSA 的 400G 光发射模块的设计我们需要在原来的基础上去修改并进行优化，同时设计与之相对应的光接收模块，最后测试经过 10km 的光纤进行传输后，信号是否满足至指标要求。然后要完成基于 COBO 封装的 400G 收发一体光模块的组装及测试，验证其是否可以达到 400G SR8 设计标准。

## 参考文献

- [1] Jiang M , Zhu Y, Zhang F . Comparison of Coherent and Direct Detection Schemes for 400G Data Center Interconnection and Metro Networks[C]// 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). 2018.
- [2] 杨建光. 浅析数据中心100/200/400G以太网[J]. 智能建筑, 2019, No.232(12):49-51.
- [3] 刘鹏. 云计算数据中心光互连网络研究现状与趋势[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 7(004):92-93.
- [4] Timurdogan E , Su Z , Shiue R J, et al. 400G Silicon Photonics Integrated Circuit Transceiver Chipsets for CPO, OBO, and Pluggable Modules[C]// Optical Fiber Communication Conference. 2020.
- [5] Xu Y , Yu J , Li X . Demonstration of  $4 \times 100$  Gbps discrete multitone transmission using electric absorption modulated laser at 1550-nm for dense wavelength division multiplexing intradata center connect[J]. Optical Engineering, 2017, 56.
- [6] Nasu H. VCSEL-based parallel-optical modules for optical interconnects[C]// Electron Devices Technology and Manufacturing Conference. Furukawa Electric Co. Ltd. Tokyo, Japan;, 2019.
- [7] Nasu H , Nagashima K , Uemura T , et al. 1.3-Tb/s VCSEL-Based On-Board Parallel-Optical Transceiver Module for High-Density Optical Interconnects[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, PP(2):1-1.
- [8] Wang B , Sorin W V , Rosenberg P , et al.  $4 \times 112$  Gbps/Fiber CWDM VCSEL Arrays for Co-Packaged Interconnects[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(13):3439-3444.
- [9] 论数据中心设备光互联技术及发展[J]. 苏州市职业大学学报, 2019, 30(04):12-15.
- [10] 谭先友. 基于COBO技术高速并行光互连模块的设计与实现[D]. 山东大学, 2016.
- [11] Erps J V, Debaes C, Vervaeke M, et al. Low-Cost Micro-Optical Modules for Datacommunication to Optical Interconnections from the LAN-to the PCB-Level[C]// Transparent Optical Networks, 2007. ICTON '07. 9th International Conference on. 2007.

- [12] Hwang S H , Mu H C , Kang S K , et al. Optical Interconnection Platform Composed of Fiber-Embedded Board, 90-Bent Fiber Block, and 10-Gb/s Optical Module[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(11):1479-1485.
- [13] Matsuoka Y , Yong L , Arimoto H , et al. A compact 25-Gbit/s  $\times$  4ch optical interconnect module with straddle-shaped optical and electrical interface[C]// 2014 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ). IEEE, 2015.
- [14] 鄢雷. VCSEL原理及驱动电路的设计与仿真[D]. 西安电子科技大学, 2014.
- [15] Chen C T , Lan H C , Shen P K , et al. 53.5625 Gb/s X 4-ch Optical Interconnect Module Based on Silicon Interposer for Data Center Application[C]// 2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ). IEEE, 2020.
- [16] Lee J K , Jang Y S . Compact 4 $\times$ 25 Gb/s optical receiver and transceiver for 100G Ethernet interface[C]// International Conference on Information & Communication Technology Convergence. IEEE, 2015.
- [17] 肖刚, 张约, 胡毅,等. 400Gb/s CFP8 LR8光收发模块的设计与实现[J]. 光通信技术, 2019, 043(006):13-16.
- [18] 刘璐、吴冰冰、赵文玉. 面向差异化需求5G承载光模块如何演进?[J]. 通信世界, 2020, No.854(26):39-40.
- [19] Ukaegbu I A , Lee T W , Mu H C , et al. Optoelectronic subcarrier for chip-to-chip optical PCB applications using long wavelength VCSELs[C]// The 13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2011.
- [20] Cujo N , Gou S , Matsuoka Y , et al. Crosstalk reduction for compact optical transceiver module. IEEE, 2015.
- [21] Nasu H , Nagashima K, Ishikawa Y , et al. 28-Gb/s  $\times$  4-channel solderable optical transceiver module for QSFP28[C]// 2016 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ). IEEE, 2016.
- [22] Chujo N , Yazaki T , Takai T , et al. A 25-Gb/s  $\times$  4-Ch, 8  $\times$  8 mm<sup>2</sup>, 2.8-mm Thick Compact Optical Transceiver Module for On-Board Optical Interconnect[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013. IEEE, 2013.

- [23] Ma P , Liu F , Zhao M , et al. Signal Integrity Design For QSFP interface applied in RF Optical transmitter Module[C]// 2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). 2018.
- [24] Takai T , Chujo N , Matsushima N , et al. A high-density 300-Gbit/s parallel optical interconnect module with efficient thermal dissipation characteristics[C]// 2015 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ). IEEE, 2015.
- [25] Man J , Wei C , Song X , et al. A Low-Cost 100GE Optical Transceiver Module for 2km SMF Interconnect with PAM4 Modulation[C]// Optical Fiber Communications Conference & Exhibition. IEEE, 2014.
- [26] Uemura T , Nagashima K , Nishimura N , et al. Thermal design of 28-Gb/s  $\times$  24-channel CDR-integrated VCSEL-based transceiver module[C]// 2016 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ). IEEE, 2016.
- [27] 陈光秒, 陈军, 葛剑虹,等. 垂直腔面发射激光器(VCSEL)在自由空间通信中的应用研究 [C]// 中国光学学会学术大会. 2004.
- [28] Masuda K , Hsu H H , Tokunari M , et al. High Density Micro-Lens Array Connector for Optical Multi-chip Module[C]// 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). IEEE, 2016.
- [29] Su Z X , Wu C Y , Jou J J , et al. Analysis and design of connection between flexible PCB and hard PCB for 25 Gb/s optical subassembly module[C]// 2016 11th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). IEEE, 2016.
- [30] Li C , Zhang X , Li T , et al. 48-Channel Matrix Optical Transmitter on a Single Direct Fiber Connector[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(9):1-7.
- [31] Song J H , Rensing M , Daunt C L L M , et al. Directly Modulated Laser Diode Module Exceeding 10 Gb/s Transmission[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2011, 1(6):975-980.
- [32] High Power Compact EML Transmitter Module for 400G-FR4[C]// International Semiconductor Laser Conference. 0.

- [33] 范忱. 光互连系统光电探测器的设计[D]. 西安电子科技大学.
- [34] 于争. 信号完整性揭秘[M]. 机械工业出版社, 2013.
- [35] Xu B , Li R , Li Y , et al. High Power External Pluggable Laser Bank with Simultaneous Single Mode Optical & Electrical Connection[C]// Optical Fiber Communication Conference. IEEE, 2020.
- [36] Song J H , Rensing M , Daunt C L L M , et al. Directly Modulated Laser Diode Module Exceeding 10 Gb/s Transmission[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2011, 1(6):975-980.
- [37] 陈雷, 宋耕, 肖刚,等. 400 Gbit/s PAM4 CFP8光收发模块技术研究[J]. 光通信研究, 2018, 000(002):60-63.
- [38] 杨松, 李佼洋, 蔡志岗. 100G SR4并行光模块光电子集成封装的研究[J]. 现代电子技术, 2019, 42(03):160-164.
- [39] Wu B , Zhao W , Zhang H . Recent Developments of Optical Transceiver Modules for 100G and beyond 100G Long-Distance Transport. 2014.
- [40] Zhou Z, Bi M, Xiao S, et al. Experimental Demonstration of Symmetric 100-Gb/s DML-Based TWDM-PON System[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(5):470-473.
- [41] 美国康普国际控股有限公司. 多模光纤和单模光纤[J]. 网管员世界, 2007(16):94-95.
- [42] D Noguchi, Yamamoto H, Shibuya N, et al. Wide Temperature Range Operation of 25.8 Gbit/s Uncooled Direct Modulated Laser (DML) TOSA With Extremely High Eye Mask Margin[C]// IEEE Electronic Components & Technology Conference. IEEE, 2016.

## 致 谢

行文至此，意味着我的研究生生涯即将落幕，从18年9月到现在，三个春秋，眨眼即过，在这即将离开学校，踏入社会的转折点上，不禁思绪万千，难以言表。

饮水思其源，成学念吾师。首先衷心感谢我的导师刘丰满研究员，在人才济济的科研团队中，我并不是一名优秀的研究生，积极也消极，乐观也焦虑。在三年的时光里，我仍然没有离优秀这个词更近一步，但刘老师还是一直帮助我，给予我很多选择和发展，在选题上给予我悉心的指导，我为成为您的学生而倍感荣幸，感恩拥有。感谢薛海韵副研究员，无论是在生活中还是科研过程中她都充满热情的帮助我，当遇到问题时，她都会耐心的指导我，帮助我，直到问题圆满解决，教会了我生活和学习中解决问题的方法与态度，让我受益匪浅。感谢光电组的何慧敏师姐，感谢她对我平时科研过程中的耐心指导与帮助，在这过程中我学到了很多。感谢孙瑜副研究员、孙思维师姐和曹睿师姐她们在两年的学习与生活中的支持与帮助。落其实者思其树，饮其流者怀其源，在此由衷感谢所有老师对我的教导。

高山流水，知音难觅，求学三载。感谢光电组的两位师兄师姐李志雄和隗娟在学习上和生活中给予我很多帮助，让我在刚入所时就能很快的走上正轨。感谢光电组的几位同学和师弟师妹（郑奇、陈莹、白利娟、阳鹏、吴越、孟祥旭），在平时和他们的交流中，我也学到了很多。感谢陈颖师兄、元健师兄、石先玉师兄、宗小雪师姐、杨海博师兄、朱瀚翔师兄、万伟康师兄、鲁瑶师姐、楚姣、王鑫、王豪杰、高溶唯、陈海英等九室同学的帮助。因为身边这些人，我的学习和生活得以快乐顺利，多姿多彩。

感谢曹立强研究员、李君研究员、王启东研究员、尹雯老师、朱国鑫、王旭刚老师、余秋生老师、周云燕老师、苏梅英老师等九室成员的支持与帮助，成为了我脑海里的美好回忆。

感谢轩运动老师、王璐老师、郑雪滢老师、罗小颖老师、崔京老师、侯龙

飞老师、李惠子老师等其他微电子学院和微电子所老师的支持与帮助。

父爱如山，母爱如水。求学二十多年，感谢我父母无微不至的关爱。足蒸暑土起，背灼炎天光，日复一日，年复一年，只为让我可以一心读书，无怨无悔。没有他们的辛苦付出，就没有我的今天。

纸短情长，溢于言表，路漫漫其修远兮，徐弭节而高厉。山高路远，我们顶峰相见。

[牛星茂]

2021年6月

## 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

### 作者简历:

2014年9月——2018年7月,在长安大学电子与控制工程学院获得学士学位。

2018年9月——2021年7月,在中国科学院大学微电子学院攻读硕士学位。

### 已发表(或正式接受)的学术论文:

#### 一作论文:

- [1] **Xingmao Niu**, Haiyunxue, Fengman Liu, Huimin He. 100Gbps chip-level optical interconnect integrated packaging design[C]. 21st International Conference on Electronic Packaging Technology. 2020.

#### 合作论文:

- [1] Qinfen Hao, Kai Hao, Haiyunxue, Meng Han, Nan Qi, Kunming Zhang, **Xingmao Niu**, et al. A Chip-level Optical Interconnect for CPU[C]. IEEE Photonics Conference. 2020

### 申请或已获得的专利:

- [1] 牛星茂, 薛海韵, 刘丰满. 一种基于多个光互连结构的光纤拉远处理器模组结构[p]. 申请号: 202110361540.2 [发明专利, 审查中]



