

摘要

在现代信息网络中，光纤通信由于其传输距离和带宽方面具有的无可比拟的优势占据着主导地位。随着宽带接入的不断普及以及数据业务和语音、视频、图像等多媒体综合业务的蓬勃发展，随着国家光进铜退、三网（电信网、广播电视网、互联网）合一的逐步推进，作为光纤通信设备中一个重要组成部分，承载着 O/E 转换功能的光模块在最近几年里也取得了突飞猛进的发展。光模块的发送、接收速率持续提高，也涌现出了多种封装形式，如 1*9(9 Pins)、GBIC(Gigabit Interface Converter)、SFP(Small Form-factor Pluggables)、SFP+(SFP 扩展)、X2 (X-wavelength Two ports) 和 XFP(10 Gigabit Small Form Factor Pluggable) 等。其中 XFP 是一种数据透明的多速率光收发模块，其应用与协议无关，且具有价格低、小型化、可热插拔等优点，业已成为最流行的 10G 光模块封装形式。

本文首先详细介绍 XFP 光收发一体模块的结构、原理以及各部分的功能和具体实现，然后根据其所要实现的关键指标，提出整体设计方案，包括光模块的硬件电路设计、Firmware 的功能、DDMI 的实现，并给出了最终的测试结果。

本文设计的 XFP 光模块，主芯片采用 Gennum 公司的光收发一体芯片 GN2010E，其集成了 CDR（时钟恢复）、EML laser driver、Limiting amplifier；TOSA(Transmitter Optical Subassembly)采用 EML laser（电吸收调制激光器），ROSA(Receiver Optical Subassembly)采用 APD（雪崩光电二极管），单片机采用 ADuC7020。光模块可以调试 AOP（平均光功率）和 ER（Extinction ratio，消光比），并具有 DDMI（Digital Diagnostic Monitoring Interface，数字诊断）功能。接口采用 XFI，完全符合 XFP MSA 协议规定，且支持热插拔。笔者搭建了光模块测试系统，采用 Tektronix 公司的 CSA8200 进行光眼图测试，采用 CENTELLAX 公司的 TG1B1-A 进行误码测试。本文设计的 XFP 光模块符合 INF-8077i 协议并兼容 SFF-8472 协议。

测试结果表明，本文设计的 XFP 光模块各项指标均达满足 80Km 传输要求，发射光功率、消光比、光调制幅度、眼图以及接收灵敏度等几项关键指标均领先于国内同类产品，达到了预期设计目标。

关键词：光模块，XFP，GN2010E，ADuC7020，DDMI

ABSTRACT

In the modern information network, optical fiber communication occupy a dominant position because of its unparalleled advantage in the transmission distance and bandwidth. With the growing popularity of broadband access , the flourishing of data services ,voice, video, images and other multimedia integrated business, the convergence of three networks (telecommunication network, radio and television networks, the Internet) , the optical module ,which is used for O / E conversion and one important part of fiber optic communications equipment , has developed rapidly in recent years. With the increasing of the optical module' rate , it has emerged many form of packages ,such as 1*9(9 Pins),GBIC(Gigabit Interface converter),SFP(Small Form-factor Pluggable),SFP,X2 (X-wavelength Two ports) , XFP(10 Gigabit Small Form Factor Pluggable)and so on. Among these package forms, XFP is a kind of data-agnostic and multi-rate optical transceiver module. Its application has nothing to do with the protocol. Besides, low-cost, miniaturization and hot pluggable also make XFP the most promising technologies of the 10Gbps optical module.

The construction, the principle , each part's function and design of XFP optical transceiver module are introduced in detail first in this thesis. Secondly, according to the key indicators, the overall design of the program, which includes hardware circuit design ,the function of firmware, as well as the design of DDMI are proposed. The results of test are introduced.

The main chip GN2010E which is from Gennum company and integrate the CDR, EML laser driver and Limiting amplifier are used to design XFP optical transceiver module in this thesis. EML laser is used for TOSA.APD is used for ROSA, while ADuC7020 is used for MCU. The module can test AOP and ER. It also has the DMMI function. The XFI is used for the interface, which is in full compliance with the XFP MSA protocol and hot pluggable. The optical module test system is set up. The optical eye diagram are tested by CSA8200 of Tektronix company, the BER are tested by TG1B1-A of CENTELLAX company.The XFP optical transceiver module is compliant with the INF-8077i protocol and is compatible with SFF-8472 protocol.

ABSTRACT

The results of test indicate that the performance of XFP meet the requirements of 80Km Transmission distance, several key indications such as output optical power, extinction ratio, OMA, eye diagram and receiver sensitivity are leading in the similar domestic products. The research has achieved the desired object.

Keywords: Optical module, XFP, GN2010E, ADuC7020, DDMI

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景以及研究意义	1
1.2 国内外 10Gb/s 光收发模块研究现状	2
1.3 论文的主要研究内容	4
1.4 论文的组织	6
1.5 本章小结	6
第二章 XFP 光收发模块原理与硬件电路设计	7
2.1 XFP 光模块总体设计	7
2.2 XFI 电接口设计	8
2.2.1 电气接口定义	8
2.2.2 电源设计	12
2.2.3 缓启电路设计	13
2.3 发端设计	14
2.3.1 光发射次模块	14
2.3.2 半导体致冷器	17
2.3.3 自动功率控制	19
2.3.4 激光器驱动	19
2.4 收端设计	20
2.4.1 光接收次模块	20
2.4.2 升压电路设计	24
2.4.3 收端电信号处理电路	26
2.5 光收发一体芯片	28
2.6 MCU 电路设计	29
2.7 本章小结	31
第三章 XFP 光模块 FIRMWARE 设计	32
3.1 XFP 光模块主程序的设计与分析	33
3.2 XFP 光模块调测接口的设计与分析	36
3.3 FIRMWARE 代码	39
3.4 本章小结	42
第四章 XFP 光模块数字诊断功能的设计与实现	43
4.1 数字诊断功能的原理	43
4.2 数字诊断功能的具体实现	45
4.2.1 温度	45

4.2.2 电压.....	46
4.2.3 偏置电流.....	46
4.2.4 输出光功率.....	46
4.2.5 接收光功率.....	47
4.3 数字诊断范围及精度.....	48
4.4 本章小结.....	48
第五章 XFP 光模块性能测试.....	49
5.1 测试仪器.....	49
5.2 发端性能测试.....	49
5.2.1 平均光功率输出.....	49
5.2.2 消光比.....	50
5.2.3 眼图.....	51
5.2.4 发射光波长及谱宽测试.....	53
5.2.5 发端性能测试结果.....	54
5.3 收端性能测试.....	54
5.3.1 接收灵敏度.....	54
5.3.2 饱和光功率.....	55
5.3.3 无光告警和告警延迟.....	55
5.3.4 收端性能测试结果.....	56
5.4 本章小结.....	56
第六章 结论.....	57
致谢.....	58
参考文献.....	59

第一章 绪论

1.1 研究背景以及研究意义

进入二十一世纪以来，伴随着各个国家对信息生活数据快速传送、多渠道通信日渐增加的要求，光网络作为整个通信系统的基础，其传输速率也在不断飞速发展，目前单波通信速率已经达到 10G 并有继续增长的趋势。与此同时，得益于密集波分复用 (DWDM) 技术大步流星的开始商业化，以及自动交换光网络 (ASON) 等新的技术出现和投产，光通信网络的使用也就越来越走入寻常生活，可以预见到其发展前景将更加的广阔^[1]。

我们知道，光器件的发展与光纤通信网络的技术发展是相辅相成的，甚至可以说是同步的。如今已经成为现代网络技术中重要传授手段的光通信产业，并且伴随着我国光进铜退、三网融合等重大战略的实施，我国对光纤通信网络的核心元器件——光收发一体模块的要求也越来越大。因此，出于满足各大厂商产业增长需求的考量，光收发一体模块也就不间断的变得更加的复杂多变。

光收发一体模块是这样一种系统，它本身能够实现光/电、电/光转换，且具备独立的发射驱动电路，以及独立的接收放大电路，并符合电信传输标准。光收发一体模块的前身是分离的光发射模块和光接收模块，并没有整合在一块。而随着光器件封装技术的不断进步，以及驱动、放大集成电路的出现，现在人们已经能够将发射和接收集成在一个很小的体积范围内。

自从上世纪末问世以来，光收发一体模块的技术发展非常迅速，日新月异。目前，光模块的发展趋势是高传输速率、智能化和小型化^[2]。目前我们可以看到，已经有种类繁多的各种速率以及各种封装形式的光模块出现在市场。目前已知的光模块的封装形式有以下几种：1*9、SFF、GBIC、SFP、SFP+和 XFP 等，而传输速率则已经不限于 155M、622M、1.25G、4.25G、6G、10G 以及 40G 等。这些不同封装和不同速率的光模块均有其特定的应用场合^[3]。

随着数量越来越多的百兆、千兆的光收发一体模块布置在光通信网络中，人们对更高速率的 10Gb/s 光收发一体模块的需求将会越来越急迫。而一旦能够实现 10Gb/s 光收发一体模块的技术突破，必然将会进一步缩小我国在光通信层面与世

界先进国家的距离，对于整体通信行业的产业升级都有着至关重要的意义。设计研发 10Gb/s 光收发一体模块，不仅仅是顺应光通信发展的潮流，能够产生明显的社会效益、经济效益，更重要的是能在促使国外产品价格下降的同时，使得国产高速传输系统的发展也得到有力的推动^[4]。

1.2 国内外 10Gb/s 光收发模块研究现状

2002 年电气与电子工程师协会 (IEEE) 审核通过了万兆以太网标准--IEEE Std 802.3ae。从此，10G 以太网就以迅雷不及掩耳之势开始取代传统的以太网，将网络传输速率极大的提高，并且克服了打破了旧式以太网的局限，以太网的发展得以扩展，其发展将扩展到城域网和广域网。10G 光收发一体模块是 10G 以太网的一个重要组成部分，因此可以说，10G 以太网的发展极大的推动了 10G 光收发一体模块的发展。

200/300 pin Transponder、Xenpak、Xpak、X2、XFP 等是目前国内外开发的主要的 10G 光收发一体模块。其中，采用 SFI-4(Serdes Framer Interface level 4)电接口的 200/300 pin Transponder 是最早标准化的，它由各 16 路 622Mb/s 信号组成发送端和接收端，内部集成复用/解复用器，用于 SONET/SDH 的数据传输。

最早用于 10G 以太网的光收发一体模块则是 Xenpak，其数据信道接口为 XAUI(10-Gigabit Attachment Unit Interface)，通过 70 pin 的 SFP 连接器与系统电路板连接，可以提供 $4 \times 3.125\text{Gb/s}$ 、9.95Gb/s 或者 10.3Gb/s 的速率在线路端。

Xpak 和 X2 光模块的内部功能模块与 Xenpak 基本相同，均为从 Xenpak 标准演进而来的，因此在系统应用在电路板上也大同小异，一个模块就可以实现 10G 以太网光接口的相关功能。由于 Xenpak 光模块在系统电路板上的安装复杂性，需要在电路上开槽，所以很难实现高密度的应用。而 Xpak 和 X2 光模块在 Xenpak 的基础上进行了改良，体积仅有 Xenpak 的一半左右，在系统电路板上可以直接简便安装，也就实现了在机架系统上和 PCI 网卡的高密度应用。XAUI 和串行成帧器接口(SFI-4)是 Xpak 和 X2 光模块可以提供的两种电路接口，既可以用于传统的 10G 以太网，也可以用于 OC-192 SDH 和 10GFC。Xpak 和 X2 的标准非常相似，其改动主要反映在导轨系统上。

与以上几种光模块不同的是 XFP 光模块，其电接口部分为 10G 串行电接口，可以同系统直接交换 9.95、10.31、10.52、10.7、11.09Gb/s 数据。XFP 的特点是其不是光收发模块 (Transponder)，而是光收发器(Transceiver)。光收发器的本质只是

一个光电转换器件，仅仅能够转换光/电、电/光等信号，其他比如复用/解复用、64B/66B 编译码等功能则均有系统电路板上的专用芯片实现，因此 XFP 光模块的通用性是最强的。XFP 光模块在印刷电路板（PCB）上的占用面积只有 Xenpak 的 20%，功耗也低至 1.5~2w，因此 XFP 可以很轻松的使用于高密度应用。

以上介绍的物种光模块，按照功能和内部接口划分，可以分为两大类：Transponder、Xenpak、Xpak 和 X2 是光收发模块类，XFP 是光收发器类。上述是两种大相径庭的设计实现思路，优点突出但缺点鲜明：光收发模块的优点是高集成度，电路设计便于实现，设计人员可以更多地只是关心系统设计，而不需要在器件层面去浪费太多的精力；缺点则是体积大，功耗高，限制了其安装在系统电路板上的数目，但是很多设计对于端口密度的要求高它无法满足。光收发器的优点是个头小，价格较低，且能满足端口高密度的要求；缺点则是对设计者的电路能力需求高，要在系统电路板上的设计实现 12 英寸传输距离的 10G 串行电接口。另外，XFP 光模块还能够满足 300 米到 80 公里范围的多距离传输安装以及较低成本的应用。

综合进行分析，Xenpak 光模块较早实现市场化，其技术成熟度较高，市场上支持 XAUI 接口的芯片也较多，因此其应用较为广阔。Xpak、X2 虽然只有 Xenpak 一半的体积，但是其劣势为成本也较高，因此仅仅只能在当下作为过渡产品。现在随着 XFP 光模块的出现和一步步成熟的技术，很多厂家都逐渐放弃再进行 Xpak、X2 光模块的开发，而是直接转向 XFP 光模块。相对于其他几种 10G 光模块，XFP 不是光收发模块，仅为光收发器，只负责光电信号转换，而由外围的系统电路板来实现复用/解复用、64/66 编解码等功能。XFP 仅占用相当于 Xenpak 的 20% 的电路板面积，且没有中间环节的 XGXS 和 XAUI 接口部分，极大的降低了成本。另外 XFP 光模块自身会提供一个用于数字诊断功能的两线串行接口^[5]。

为了保持 XFP 光模块良好的兼容性，并促进其发展，在 2002 年三月，光模块业内的 Finisar、JDSU 等大公司联合推出了 XFP 多源协议(Multisource Agreement)。到今天为止，已经有越来越多的光模块企业采用了这个标准。MSA 规定了 XFP 光模块支持 9.95Gb/s、10.31Gb/s、10.52Gb/s、10.70Gb/s 和 11.09Gb/s 这些速率，其功能具有如下几个特点：(1)协议无关性；(2)热插拔(带电插拔)；(3)具有数字诊断功能。

特点(1)使得 XFP 光模块的应用场合众多，典型的如 10G 以太网、OC-192 SDH 和 10GFC 等。由于 XFP 仅为一个光电转换器，自身不包含编解码功能电路，从而大大节省了占用电路板的面积，并维持了较为低廉的成本，从而降低了通信设备

的价格。可以合理的预计，在今后的若干时间内，XFP 将保持非常强劲的发展势头。

特点(2)有利于实现光通信设备的模块化。如今的设备大多趋于模块化设计，主要是为了便于设备的维护和升级。当某一个模块运行不正常，只需要更换不正常模块，而不需停止或者更新整套设备。如果光模块具有较好的热插拔性能，自然就能够更好的支持光模块的更换和升级。事实上，由于光模块比较容易老化，替换的概率很高。XFP 光模块采用差分串行 XFI 电接口，不仅支持热插拔，其兼容性也较好。

特点(3)有利于光模块的在线故障诊断和验证兼容性。数字诊断技术最早出现在 SFP(小型可热插拔模块)上，比如 Tyco 于 2003 年推向市场的具有数字诊断功能的光模块。数字诊断功能带有可分为两部分的存储器：一部分地址为 A0H，保存了存储产品制造商信息、产品制造商信息、产品生产日期、产品序列号等信息；另一部分地址为 A2H，用于诊断光模块的工作电压信息、发射光功率信息、接收光功率信息、温度信息、偏置电流信息以及告警信息等^[6]。由于具有了数字诊断功能，使得工作人员对通信设备的维护大大简化，能够通过编程来自动检测通信设备的工作状态。XFP 光模块数字诊断的相关信息由 MSA 多源协议规定。

1.3 论文的主要研究内容

本设计实现了一种满足如下指标的 10Gb/s XFP 光收发一体模块：

- (1) 支持热插拔和数字诊断功能，并符合 XFP MSA 协议的相关标准；
- (2) 采用 XFI 电接口，光接口采用 LC 插拔结构；
- (3) 可应用于：
 - SONET OC-192 / SDH STM-64 ITU-T G.959.1 P1L1-2D2
 - SONET OC-192/SDH STM-64 with ITU-T G.709
 - 10GBASE-ZR/ZW 80km 10G Ethernet
 - Extended 80km 10G Fiber Channel
 - 80km 10G Ethernet with ITU-T G.709 FEC
- (4) 最大传输距离达 80km(单模光纤)。

表 1-1 光模块发射部分关键技术指标

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Average Launch Optical Power	P_{out}	0		4	dbm
Extinction Ratio	ER	9			db
Centre Wavelength	λ	1530		1565	nm
Spectral Width (-20dB)	$\Delta \lambda$			0.5	nm
Side Mode Suppression Mode	SMSR	30			db
Tx Jitter (SONET) 20kHz-80MHz	Txj1			0.3	UI
Tx Jitter (SONET) 4MHz-80MHz	Txj2			0.1	UI
Transmitter Dispersion Penalty (@ 1600 ps/nm)	TDP			2	db
Eye Diagram	GR-253-Core/ITU-T G.691				
Mask margin	10				%

表 1-2 光模块接收部分关键技术指标

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Optical Center Wavelength	λ	1270		1600	nm
Receiver Sensitivity (BOL)*				-24	dbm
Receiver Overload		-7			dbm
Receiver reflectance				-27	db
LOS De-Assert				-30	dbm
LOS Assert		-35			dbm
LOS Hysteresis		0.5		5	db
*: RATE:9.95G,, BER<1E-12					

在本设计中，作者亲自参与了硬件和软件设计以及调测试的全过程。

硬件上，作者根据所要实现的 XFP 光模块指标，确定了收发端光器件、驱动芯片、控制芯片的选型，并完成了原理图和 PCB 的设计。

软件上，作者完成了 XFP 光模块的 Firmware 设计，并完成了基于命令行的调测试接口的设计。

作者最后对已完成的 XFP 光模块进行了收发端性能测试，可以看到其各项性能指标优异，达到了设计目标。

1.4 论文的组织

本文按照所需介绍的内容，共分为六个章节，各章的内容安排如下：

第一章详细介绍了本文的研究背景和意义，并叙述了本文的主要工作和各章的组织。

第二章设计了 XFP 光模块的硬件方案，叙述了总体设计、相关元器件的选择和具体的电路实现，并给出了系统框图和原理图。

第三章介绍了底层软件（Firmware）的设计与分析，并给出了调测试接口功能的设计与分析。

第四章为 DDMI 数字诊断，首先详细叙述了基于 SFF-8472 协议的数字诊断功能，之后给出了具体的数字诊断方案的实现方法。

第五章为 XFP 光模块性能测试，首先分别介绍了光模块发射部分和接收部分的主要参数的调测试原理，并给出了测试框图，最后给出了 XFP 光模块的测试结果。

第六章为结论部分，总结已经完成的工作，并对今后的工作方向以及可能存在的问题提出了有益的建议和意见。

1.5 本章小结

本章详细叙述了论文的研究背景和意义，完成的主要工作以及论文各章的结构安排。

第二章 XFP 光收发模块原理与硬件电路设计

XFP 是一种收发器件 (Transceiver) 而非 Transponder, 可以将其看做只是一个光电转换器件, 即光发射机和光接收机的结合。图 2-1 是一个典型的 10G XFP 光模块框图^[7], 它有四大组成部分: 发射、接收、MCU、XFI (与系统板的电气接口), 另外还有缓启电路 (以支持热插拔)。

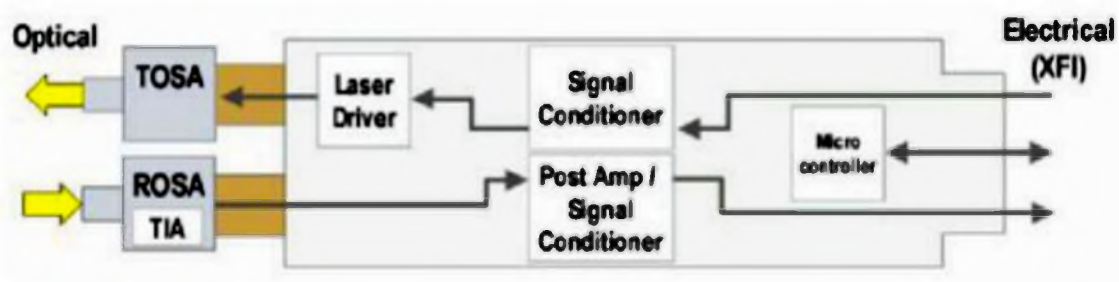


图 2-1 XFP 光模块框图

本章将详细介绍 XFP 光模块的硬件电路的具体实现。

2.1 XFP 光模块总体设计

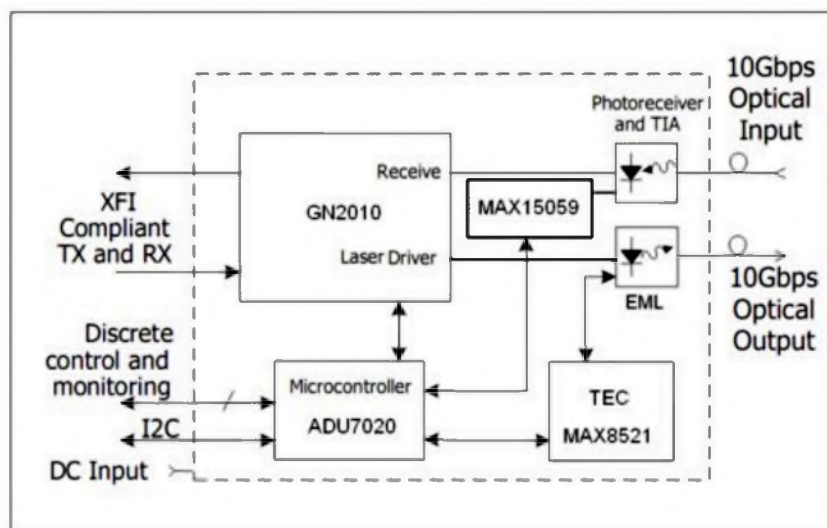


图 2-2 XFP 光模块系统框图

如图 2-2 为本方案 XFP 光模块系统框图。本方案主芯片使用 Gennum 公司的收发一体芯片 GN2010E, 其首次将 CDR (时钟恢复)、EML laser driver (EML 激光器驱动)、Limiting amplifier (限幅放大器) 功能集成到一起; 激光器使用 EML (电吸收调制激光器), 并使用 Maxim MAX8521 作为 TEC 控制芯片; 光电探测器使用 APD (雪崩光电二极管), 并使用 Maxim MAX15059 作为升压芯片; MCU 使用 ADuC7020, 负责读写各芯片寄存器和实现温度补偿功能, 并实现 DDMI (数字诊断) 功能。光模块与主机的通信采用 ADuC7020 的从 I2C 总线。

作为整个 XFP 光模块设计的基础, 硬件设计的好坏会直接影响到整个模块的质量。硬件设计部分主要包括电接口、发射模块、接收模块、控制模块、缓启模块。

2.2 XFI 电接口设计

本小节首先介绍了 INF-8077i 协议定义的 XFI 电接口, 并给出了主要功能引脚的详细定义; 然后介绍了电源接入及其分配; 最后给出了缓启电路的硬件实现。

2.2.1 电气接口定义

INF-8077i 协议定义了 XFP XFI 电接口。图 2-3 显示了 XFI 30pin 电接口 (金手指) 输出/输出引脚的名称和序号, 表 2-1 为各引脚的详细定义^[8]。

以下给出几个主要功能引脚的详细定义:

- 1) Mod_DeSel: 此引脚实现模块片选功能, 为 LVTTTL 电平输入。当此引脚输入为低电平时, 模块响应外部 I2C 通信。
- 2) Interrupt: 此引脚为中断信号, 显示模块当前异常。当有异常出现时, 此异常会通过 I2C 通信输出。
- 3) TX_DIS: 此引脚为传输禁止输入信号, 用于关闭激光器。
- 4) Mod_Abs: 显示模块不存在。
- 5) Mod_NR: 模块没有准备好, 显示模块运行错误。
- 6) RX_LOS: 此引脚为接收信号状态显示, 当为高电平时, 显示接收部分信号关断。
- 7) P_Down/RST: 降低模块功耗, 当此引脚为高电平时, 模块功耗降为 1.5W 或者更低, I2C 接口在低功耗模式下必须正常工作。RST 即 Reset, 用于重置模块

(包括 I2C 接口)。

8) RD+/RD-:接收部分的差分输入引脚,为交流耦合(AC Couple),差分 100ohm 阻抗,应该使用 100ohm 终端匹配连接到 SERDES(串/行解串)。由于交流耦合是在模块内部,因此在系统主板上不再需要。当终端阻抗匹配时,高速信号线上的差分信号电压摆幅在 370~2000mV 之间。

9) TD+/TD-:发送部分的差分输入引脚,为交流耦合(AC Couple),差分 100ohm 阻抗。由于交流耦合是在模块内部,因此在系统主板上不再需要。差分输入引脚的输入差分电压摆幅为 500~2400mV,但是为了保证最佳 EMI 性能,推荐摆幅为 500~1200mV。

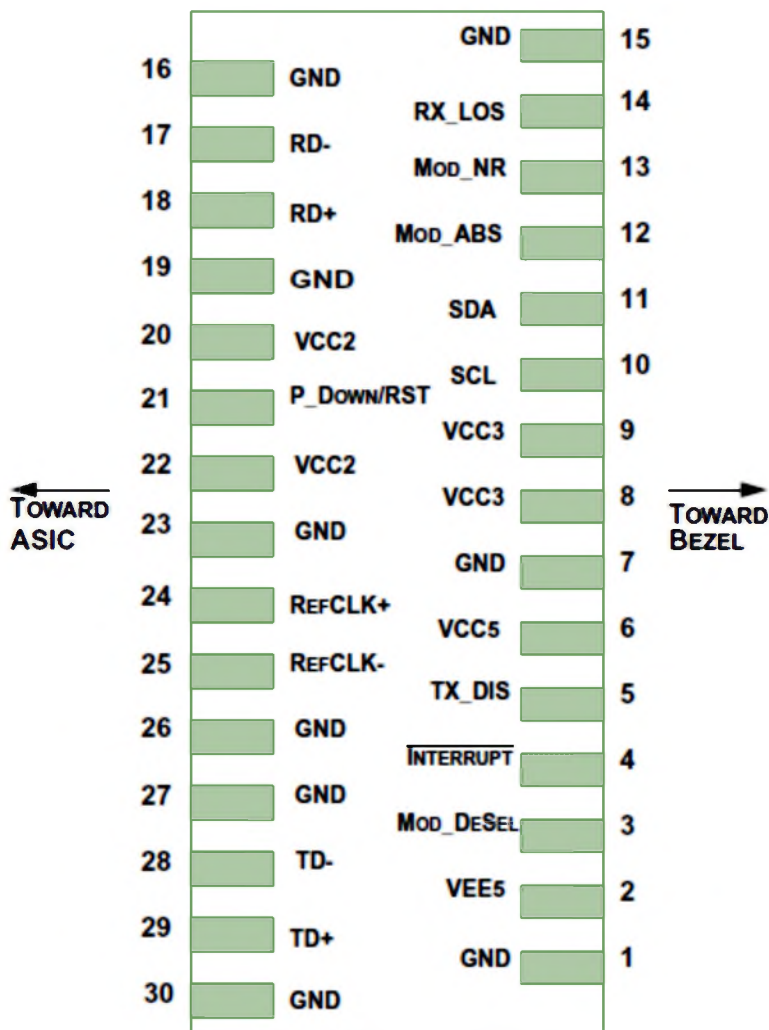


图 2-3 XFP XFI 电接口

表 2-1 Module Electrical Pin Definition

Pin	Symbol	Logic	Name/Description	Note
1		GND	Module Ground	1
2		VEE5	Optional -5.2V Power Supply	
3	LVTTL-I	Mod_DeSel	Module De-select; When held low allows module to respond to 2-wire serial interface	
4	LVTTL-O	Interrupt	Interrupt; Indicates presence of an important condition which can be read over the 2-wire serial interface	2
5	LVTTL-I	TX_DIS	Transmitter Disable; Turns off transmitter laser output	
6		VCC5	+5V Power Supply	
7		GND	Module Ground 1	
8		VCC3	+3.3V Power Supply	
9		VCC3	+3.3V Power Supply	
10	LVTTL-I/O	SCL	2-Wire Serial Interface Clock	2
11	LVTTL-I/O	SDA	2-Wire Serial Interface Data Line	2
12	LVTTL-O	Mod_Abs	Indicates Module is not present. Grounded in the Module	2
13	LVTTL-O	Mod_NR	Module Not Ready; Indicating Module Operational Fault	2
14	LVTTL-O	RX_LOS	Receiver Loss Of Signal Indicator	2
15	GND		Module Ground	1
16	GND		Module Ground	1
17	CML-O	RD-	Receiver Inverted Data Output	
18	CML-O	RD+	Receiver Non-Inverted Data Output	
19		GND	Module Ground	1
20		VCC2	+1.8V Power Supply	3
21	LVTTL-I	P_Down/RST	Power down; When high, requires the module to limit power consumption to 1.5W or below. 2-Wire serial interface must be functional in the low power mode. Reset; The falling edge initiates a complete reset of the module including the 2-wire serial interface, equivalent to a power cycle.	
22		VCC2	+1.8V Power Supply	3
23		GND	Module Ground	1
24	PECL-I	RefCLK+	Reference Clock Non-Inverted Input, AC coupled on the host board	

第二章 XFP 光收发模块原理与硬件电路设计

25	PECL-I	RefCLK-	Reference Clock Inverted Input, AC coupled on the host board	
26		GND	Module Ground	1
27		GND	Module Ground	1
28	CML-I	TD-	Transmitter Inverted Data Input	
29	CML-I	TD+	Transmitter Non-Inverted Data Input	
30		GND	Module Ground	1

1. Module ground pins Gnd are isolated from the module case and chassis ground within the module.
 2. Shall be pulled up with 4.7K-10Kohms to a voltage between 3.15V and 3.45V on the host board.
 3. The 1.8 V power supply can be optionally programmed to voltages lower than 1.8 V in modules supporting the variable power supply.

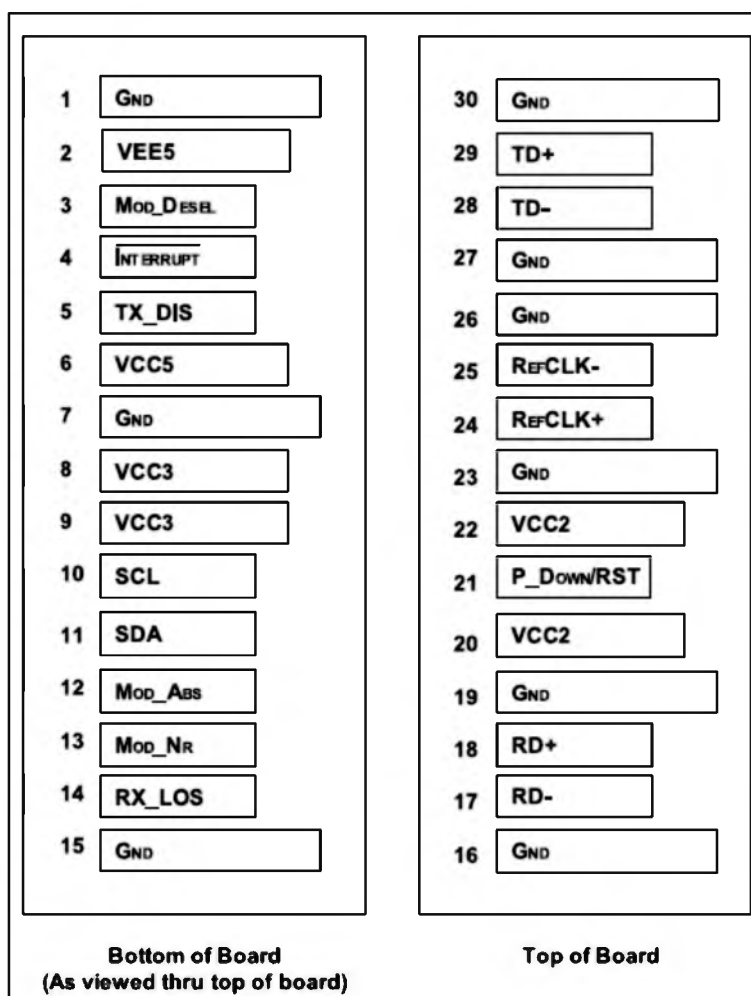


图 2-4 XFP 收发器电气焊盘布局

XFI 电接口的上电顺序是有特殊规定的,可以使用预充电的方式减小浪涌电流,以此来保护热插拔对器件没有损坏。在热插拔时,有一个规定的上电和断电顺序,在上电时,按照接地、电源、信号线的顺序;下电时,按照信号线、电源、地的顺序下电。上电时,先接地,再加电源,可以在接入系统前对光模块内部的电容充电,以减少瞬态电流冲击。在上电和下电过程中,光模块均接地良好,有利于静电放电,减小电弧的影响^[9]。

为了保证热插拔时模块的上电和下电顺序,光模块电接口中不同类型的引脚,其长度也是不一样的。如图 2-4 所示, XFP 电接口金手指有 30 个引脚,其中最长的为 GND,电源线稍短,数据线是最短的。由于电路板尺寸有限制,为了保证各引脚的绝缘性,相邻引脚的间距为 0.8mm。为了保证光模块在热插拔时的电气连接,每根金手指的宽度大约为 0.6mm,不能太细。为了保证导电性能,金手指制作时需在上面镀镍和金。

如图 2-5 为本文设计的 XFP 光模块的电接口电路图。

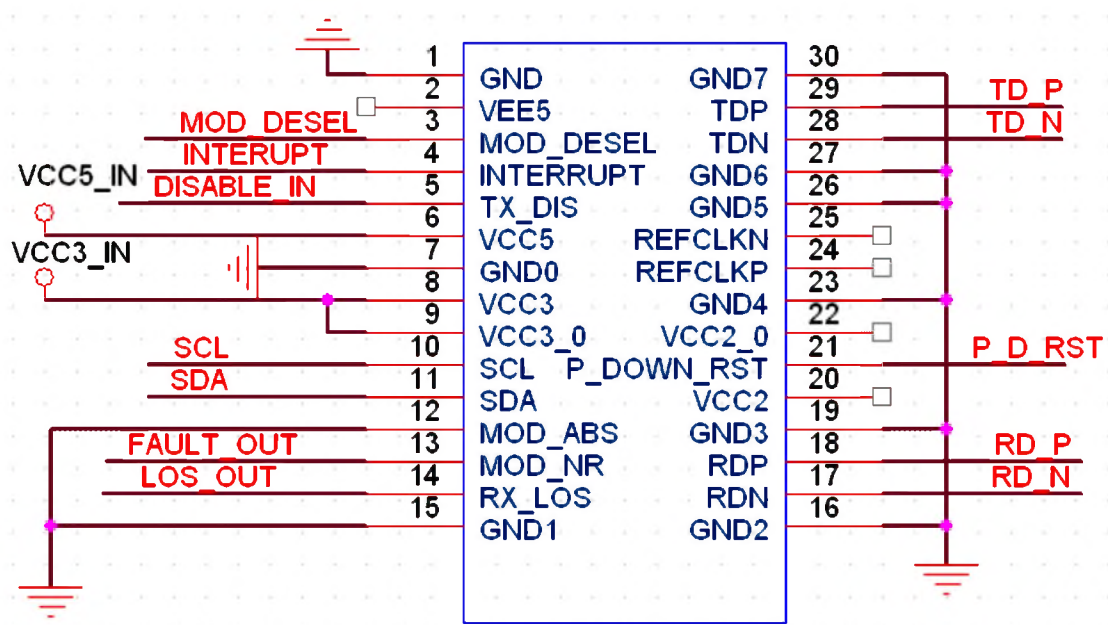


图 2-5 XFP 光模块的电接口电路图

2.2.2 电源设计

为了使光模块适应不同的工作环境,能够运行于大多数的系统, INF-8077i 协议规定了主板滤波电路,如图 2-6 所示:

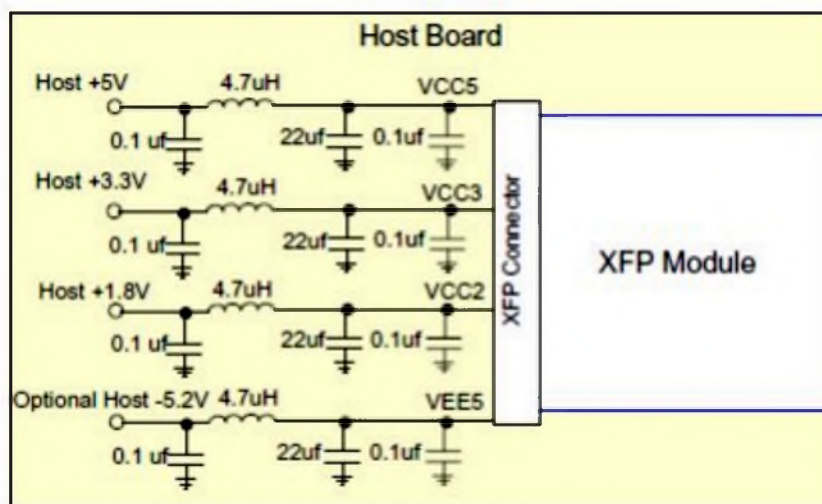


图 2-5 主板滤波电路

在本文设计中，XFP 光模块只需要主板的+5V 和+3.3V 供电。其中，+5V 主要为 MAX15059 和 MAX8521 供电，其余均为+3.3V 供电。

2.2.3 缓启电路设计

XFP 作为可热插拔的光模块，为减小插入与拔出时的浪涌电流，必须在光模块内部有缓启电路。在本文设计中，使用两个 MOSFET NTJD4152 来实现缓启功能，分别用于+5V 和+3.3V。

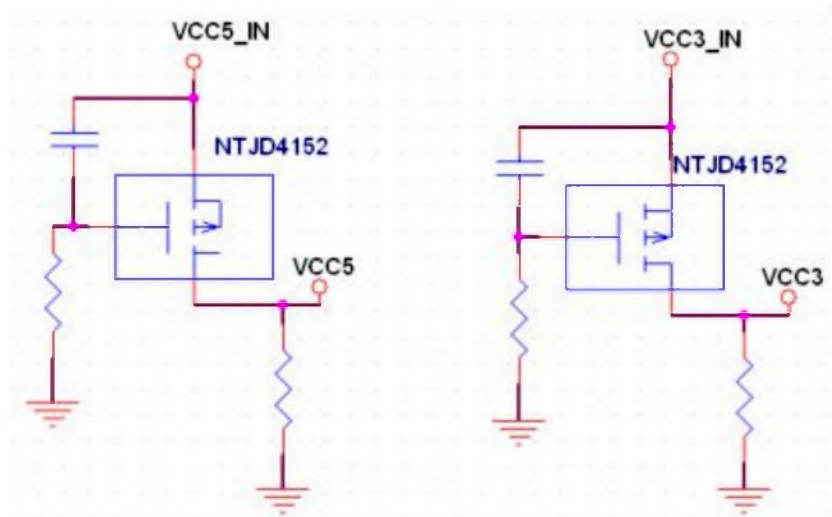


图 2-6 缓启电路

其中, VCC5_IN、VCC3_IN 分别为系统主板的+5、+3.3V 供电, VCC5、VCC3 分别为供 XFP 光模块内部使用的+5、+3.3V 电源。

2.3 发端设计

发端负责 E/O 转换, 即将接收到的电信号转换为光信号, 其原理框图如图 2-7 所示:

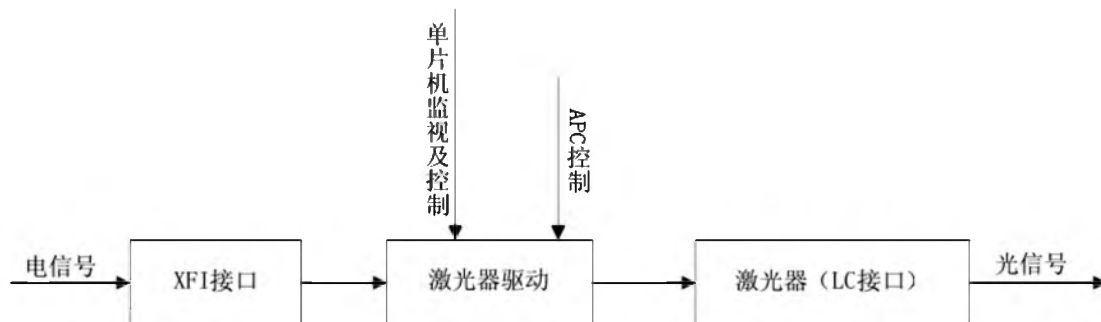


图 2-7 发端原理框图

2.3.1 光发射次模块

光发射次模块 TOSA(Transmitter optical Subassembly)的主要部分就是激光器, 本文设计中使用的是 EML(Electro-absorption modulated laser)电吸收调制激光器。

通信领域用的激光器可以分很多种: 如 LED(发光二极管)和半导体激光器^[10]。LED 发射的不是激光而是辐射光。它的光谱范围很宽, 发光效率低, 输出功率小, 一般应用在低速领域。现代光通信大多使用的是半导体激光器。半导体激光器根据它的工作模式又可以分为多纵模激光器和单纵模激光器。常用的法布里·帕罗 (FP)激光器就属于多纵模激光器。单纵模激光器应用的比较多, 像分布反馈(DFB)激光器、量子阱 (MQW) 激光器、波长可调谐激光器、垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 等都属于此类^[11]。

根据激光器的工作波长, 也可以将之分成几种。在光通信系统中, 850nm、1310nm 和 1550nm 为广泛使用的 G.625 型光纤内的 3 个低损耗窗口的波长。一般通信用激光器主要工作在这 3 个波长。表 2-2 列出了常用半导体激光器及其特点。

表 2-2 常用半导体激光器

激光器类型	工作波长 (nm)	应用及特点
FP(Fabry-Perot Laser)	1310	常用, 可用于中距离高速应用
DFB(Distribution Feedback Laser)	1310	成本较高, 可输出大功率, 适用于长距传输应用。
	1550	
VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting)	850	低成本, 可用于 10Gbps 应用
	1310	
EML(Electro-Absorption Modulator with Laser)	1310	成本比较高, 可用于传输距离高达 100Km 的应用
	1550	
MZ(Mace-Zenden Modulator)	/	可控制消光比及啁啾, 制造工艺较复杂, 可用于远距离传输应用, 使用较少

通常说内调制和外调制都是激光器的调制方式。内调制就是用电信号来直接控制半导体光源的振荡参数（光强、频率等）；外调制则是光源发出幅度和相位等恒定的光，通过调制器之后，用电信号控制调制器的出光。内调制不好之处在于会有啁啾现象，引起噪声。在速率达到 10G 的远距离通信中，发射部分大多使用电吸收调制器（EML），为外调制。

在光纤通信电路设计中，如下激光器的四个特性必须综合考虑^[12]：

1) 接通时延

当偏置电流达到激光器的阈值电流时，激光器不会立刻就进行受激辐射，而是还会要再有一段时间的自发辐射，这就称为接收时延。其特点为随机性，会产生抖动。

2) 频率啁啾

激光器进行调制，出射光的频率也被调制，导致了光谱变宽，从而在光纤中产生色散。

3) 驰豫振荡

当激光器的电流从 0 信号变化成 1 信号，激光器的光功率不会突变，而是要产生振荡，这就称为驰豫振荡，会使光信号产生抖动和码间干扰。

4) 老化和温度漂移

激光器的电光转换效率和阈值电流均会随着温度的变化而变化，影响输出光功率。

本设计需要满足单模光纤最大传输距离达 80km，因此使用 EML 电吸收调制激光器，可以有效的控制啁啾效应。

如图 2-8 为一个典型的 EML 电吸收调制激光器组成及其特性：

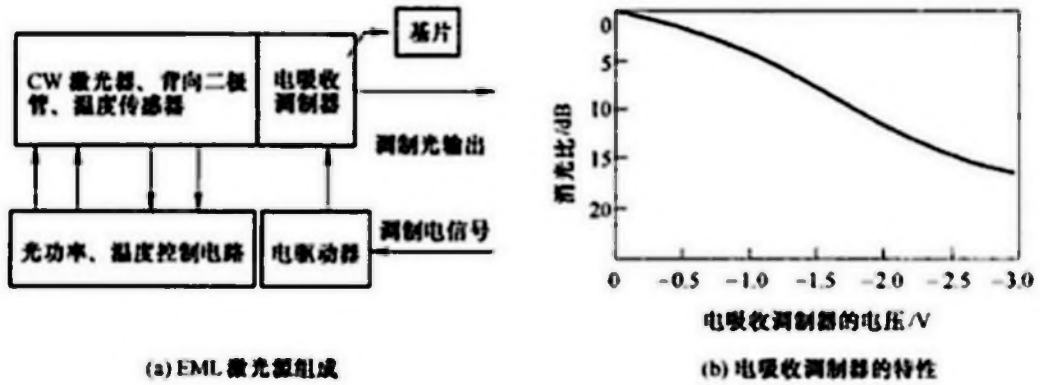


图 2-8 EML 组成及特性

EML 是将调制器和半导体激光器集成在同一基片上，该芯片置于一个热电制冷器上。芯片的激光器部分发出连续光波，功率是恒定的，不存在直接调制固有的啁啾声。芯片的调制器部分有一个光开关，让光通过和阻断光两个状态。这两个状态转换只引入很小的啁啾声。所以 EML 比直接调制激光器传输距离长得多。



图 2-9 CyOptics 公司 10Gb/s 的光发射次模块

图 2-9 为本文设计中使用的 CyOptics 公司的 10 Gb/s Cooled EML TOSA，集成

了 EML、背光二极管、TEC 以及热敏电阻；并且还自带柔板，方便与 PCB 的焊接。其管脚定义如表 2-3 所示^[13]。

表 2-3 TOSA 管脚定义

PAD	PAD ASSIGNMENT
1	TEC-
2	TEC+
3	SIGNAL GROUND
4	MODULATOR
5	SIGNAL GROUND
6	PD ANODE
7	LD ANODE
8	THERMISTOR

2.3.2 半导体致冷器

激光器多为半导体材料制成，本身对温度敏感。激光器工作后，由于电流的注入，其温度会升高；且 XFP 光模块会工作在 $-5\sim 70^{\circ}\text{C}$ （商业级）或者 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$ （工业级）的环境中。当温度变化，EML 激光器的输出波长也会随之变化，这在实际使用中显然是不可接受的。因此必须要采取措施来控制温度。

常用的致冷方法有：恒温槽致冷、强迫致冷以及温差制冷等等。其中强迫致冷是统一封装光源、驱动电路到一块，致冷目的用风吹实现，但是它体积大，而 XFP 体积容量有限，因此这种方法在 XFP 中无法实现。使用帕尔贴效应原理的温差致冷，又叫做半导体致冷。将特殊半导体材料制成的热电偶封装在激光器中，热电偶遇到电流通过时，一端吸热，一端放热。流过的电流大小不同，致冷的程度不同，从而可以通过控制电流大小来控制温度。

本文设计中，TOSA 内部集成了一个负温度系数热敏电阻器（Negative Temperature Coefficient Thermistor），当温度变化时，热敏电阻的阻值也随之变化（温度越高，阻值越低）。通过监控这个热敏电阻的阻值即可得到激光器的温度，

从而实现温控。

TOSA 内部还集成了一个 TEC (Thermoelectric Cooler, 半导体致冷器), 当 TEC 控制器改变 TEC+到 TEC-之间电流的流向时, TEC 会制冷或者制热; 当电流大小变化时, TEC 的制冷或者制热能力也会随之改变。本文设计中使用 Maxim MAX8521 作为 TEC 控制器。如图 2-9 为 MAX8521 的典型应用框图。

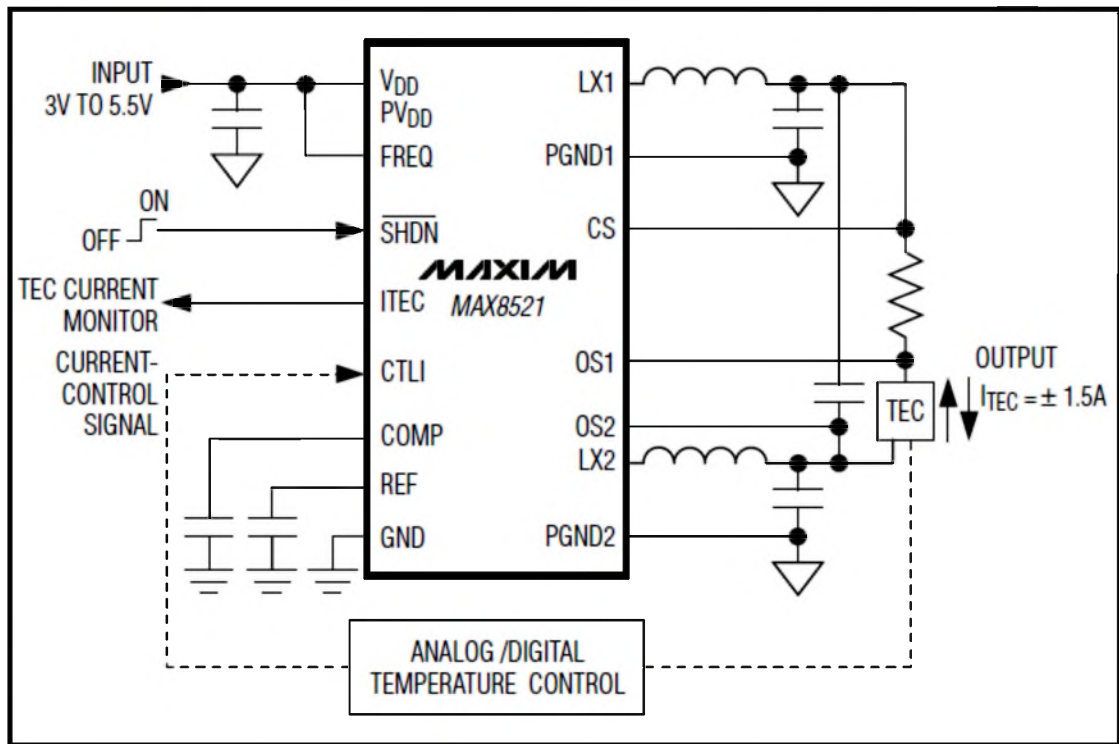


图 2-9 MAX8521 典型应用电路

MAX8521 可以提供最大 $\pm 1.5A$ 的输出电流, 可由模拟控制信号精确的设置 TEC 电流^[14]。

本文设计中, 将 MAX8521 的 ITEC (pin5, TEC Current-Monitor Output) 连至 ADuC7020 的 ADC, 以得到实时的 TEC 电流; 将 CTLI (pin10, TEC Current-Control Input, Sets TEC current) 连至 ADuC7020 的 DAC, 以设置 TEC 电流。由于 TEC 的存在, 激光器的温度会有两个趋势: 一方面是激光器发光产生热量导致温度有升高的趋势; 另一方面是 TEC 的制冷使得温度有降低的趋势。如果不采取一定的算法, 只是盲目的根据激光器的温度来不断设置 TEC 电流, 很容易会使激光器温度产生震荡, 即在我们想要设置的温度值上下跳动。为此我们采用了 PID 控制算法, 以保证激光器温度的稳定^[15]。

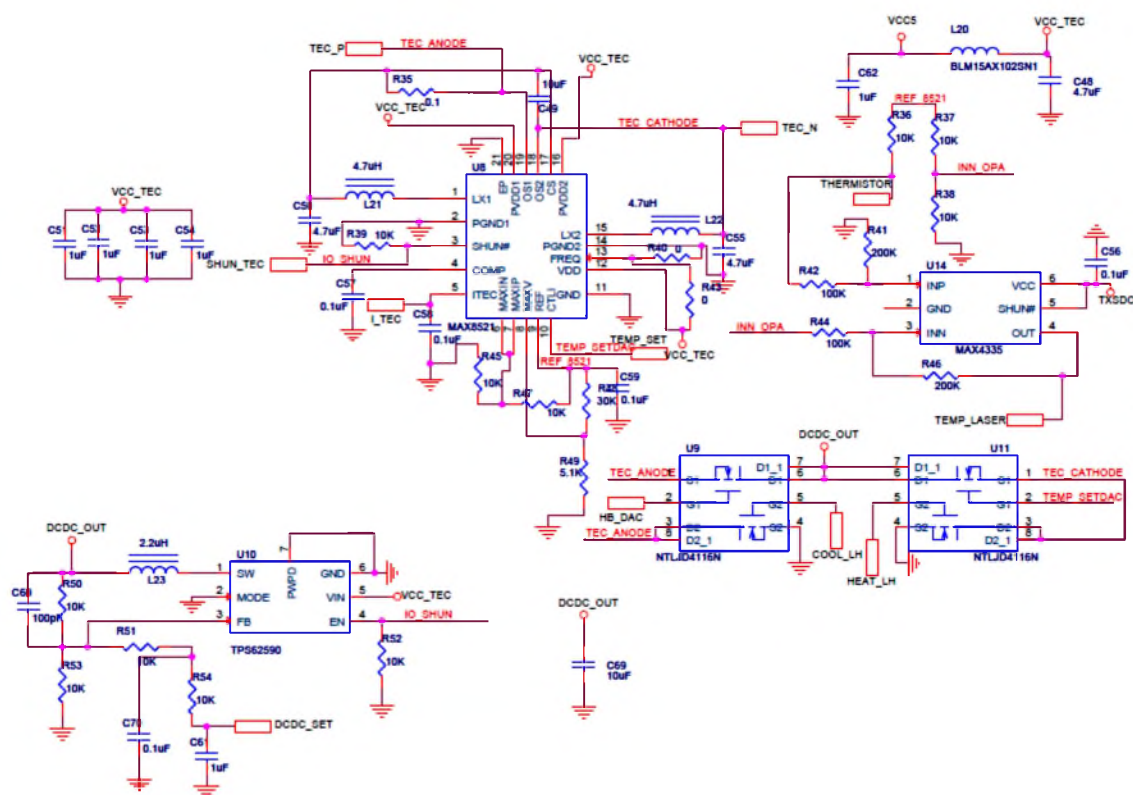


图 2-10 TEC 控制电路原理图

2.3.3 自动功率控制

为了保持 XFP 光模块平均光功率输出稳定，一般使用监测背光电流的方法。激光器的谐振腔里面有两个半透明的反射镜面共同构成谐振腔，光子在其中做往返动作，激发出新的光子。当出射激光时，两个发射镜面都会同时透射出光。主光从前镜面透射出，即为激光器的出光；而后镜面透射出去则称为背光。背光和主光的大小是成线性关系的。

本文设计即采用这种方法来实现 APC（Auto Power Control，自动功率控制）。TOSA 输出的背光电流输入到 GN2010E 中，并与预设的值比较：当背光电流大于预设值，说明此时光功率偏大，GN2010E 会减小 Bias 电流值；当背光电流小于预设值，说明此时光功率偏小，GN2010E 则增大 Bias 电流。

2.3.4 激光器驱动

在光通信系统中，激光器驱动是光发射机的关键组成部分。激光器驱动又可以称为激光器调制，主要是为激光器提供调制电流和偏置电流。激光器的输出函数一般为电流的函数，这是由于电流开关速度很快决定的，激光器驱动就是一个电流开关。由于光通信一般传输速率很高，在设计中就需要考虑信号完整性，激光器的输入阻抗和激光器驱动的输出阻抗必须大致匹配。对于高速调制来说原来老式的分离式激光器驱动电路无法再承担，现在光模块中均采用专用激光器驱动芯片，包括消光比和功率自动控制电路、保护电路和告警电路等。

在本设计中使用了收发一体芯片 GN2010E，其集成了激光器驱动，详细电路设计见 2.5 小节。

2.4 收端设计

收端负责 O/E 转换，即接收光信号，将其转换为电信号，并处理转换后的电信号。其原理框图如图 2-11 所示：

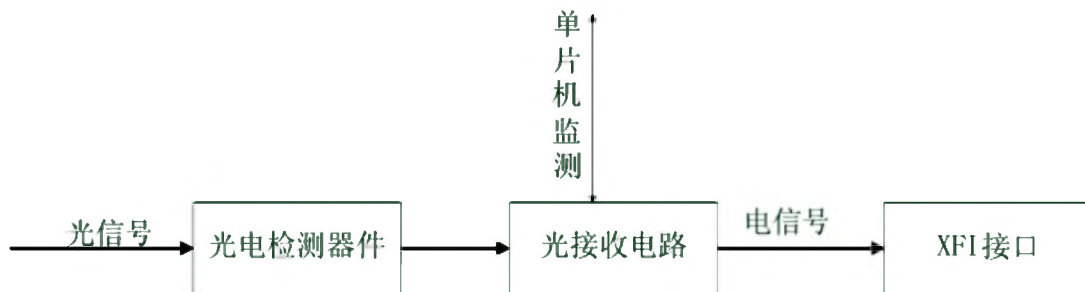


图 2-11 收端原理框图

收端部分主要由光电二极管（探测器）、TIA（Transimpedance Amplifier，跨阻放大器）、LA（Limiting Amplifier，限幅放大器）和 CDR（Clock and Data Recovery，时钟数据恢复）芯片组成。现代专用芯片技术在 10Gbps 应用中已经越来越倾向于将 TIA 集成到 ROSA 中，而限幅放大器 LA 则成为接收信号调节器（通常为一个 CDR 或者是均衡器）的一部分。这样做一方面可以减小 PCB 面积，另一方面做到一起可以减少硬件工程师在信号完整性方面必须做的一些工作。

2.4.1 光接收次模块

光接收次模块 ROSA(Receiver Optical Subassembly)主要由光电探测器和跨阻

放大器组成。

（一）光电探测器

光电检测器件的本质就是将光信号转化为电信号。光纤通信系统对光电检测器件有如下四个严格要求：（1）较低的工作电压；（2）较高的光电转换效率；（3）尽量小的噪声；（4）体积小，稳定工作的寿命长。

光纤通信系统中运用到了一个重要的原理就是光电效应，它是指半导体的 P-N 结经过某个波长的光照射，价带上的电子吸收光子能量，从价带跃迁到导带，这样价带中有了空穴，导带中有了电子，半导体的 P-N 中就会产生光生载流子。根据这个效应，研究出了半导体光电探测器^[16]。

光电检测器有诸多类型，最常用的非光电二极管不可。以物理结构分，光电二极管可分为 PIN 光电二极管和 APD 雪崩光电二极管（Avalanche Photo Diode）。PIN 光电二极管的等效电路和雪崩光电二极管的等效电路如图 2-12 所示。

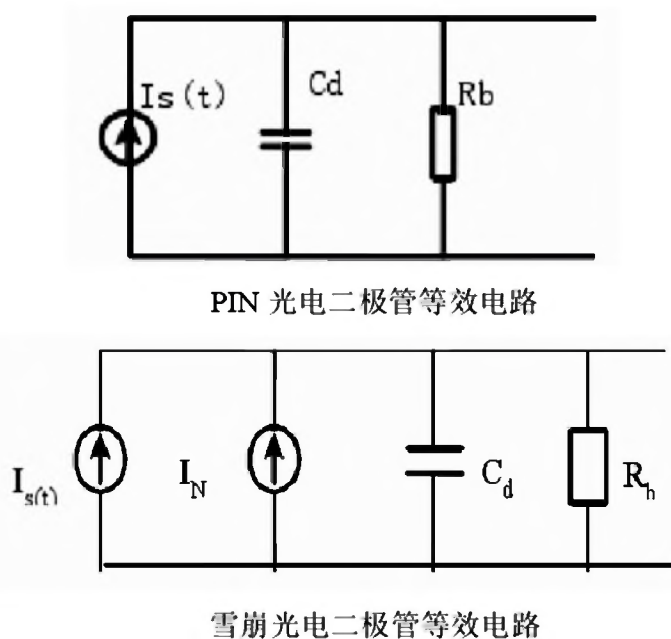


图 2-12 两种光电二极管等效电路

图中， C_d 代表结电容， C_d 越小，意味着响应频率就越高，器件的高频特性就越好。 R_b 是偏置电阻，用于产生偏置电压。 I_N 则表示倍增噪声电流源。

两种光电二极管由于物理结构的不同，其性能也有很大的差异，表 2-4 为两种光电二极管的性能比较。

表 2-4 PIN 光电二极管和 APD 雪崩光电二极管性能比较

	特点	应用场合
PIN 光电二极管	优点：工作电压低、噪声小、价格低、使用寿命长 缺点：光电流倍增系数小($M < 1$)	短中距离光纤通信
APD 雪崩光电二极管	优点：光电流倍增系数大($M > 1$) 缺点：工作电压较高，倍增噪声大	中长距离光通信

PIN 光电二极管没有倍增效应，工作时的电压低，对温度不敏感，使用起来比较简单，主要的缺点是灵敏度较差。

相对于 PIN 光电二极管，APD 雪崩光电二极管的主要优点为灵敏度高。其工作时的偏置电压产生内部强电场，从而产生雪崩效应，因此内部增益很高。其缺点是对温度敏感，会影响到增益的稳定性。APD 的增益在实际使用中是个需要关注的问题，APD 的灵敏度与增益 G 成正比，增益 G 又与偏置电压有关。在光通讯系统中，温度的漂移是不可避免的，从而也会导致增益 G 的漂移。从理论上讲，APD 雪崩光电二极管的增益 G 是偏置电压 V 和温度 T 的函数。在保持固定增益的情况下，偏置电压 V 和温度 T 之间存在一定的关系。所以，通过控制 APD 雪崩光电二极管的偏置电压 V ，使其随着温度 T 的变化而改变，这样就可以保证 APD 雪崩光电二极管的增益 G 保持不变，正常工作。

本设计需要满足单模光纤最大传输距离达 80km，对收端灵敏度要求较高，因此选择使用 APD 作为光电探测器。

(二) 跨阻放大器 TIA

跨阻放大器一般作为光模块收端的前置放大器，其性能对光接收机灵敏度有着较大的影响。收端通过 ROSA 的光电探测器检测来自光纤传输的光信号并将其转换成电流信号，接着由 TIA 将转换得到的电流信号变成电压信号。由于 10G 信号在 PCB 上传输会受到很大的串扰，差分信号相对单端信号可以更有效的抑制共模干扰，有很强的抗干扰能力。故通常希望能将信号变成差分信号对进行传输，因此需要 TIA 将信号转换成差分信号。同时为使接收端得到更大的动态范围，TIA 必须有高的带负载能力和高的输入灵敏度。光接收机中用的前置放大器基本有两种：高阻放大器和跨阻放大器，高阻放大器优点是噪声小，灵敏度较高，缺点是动态响应范围和带宽不理想；跨阻放大器则设计简单，采用高输入阻抗负反馈结构，带宽较高，且由于饱和极限较高从而具有了较大的动态响应范围，因此在光模块

中跨阻放大器使用较多^[17]。

光通信系统中的前置跨阻放大器应该具备带宽较高、增益较高、噪声指数较低等关键指标。前置跨阻放大器原理图如图 2-13 所示^[18-19]。

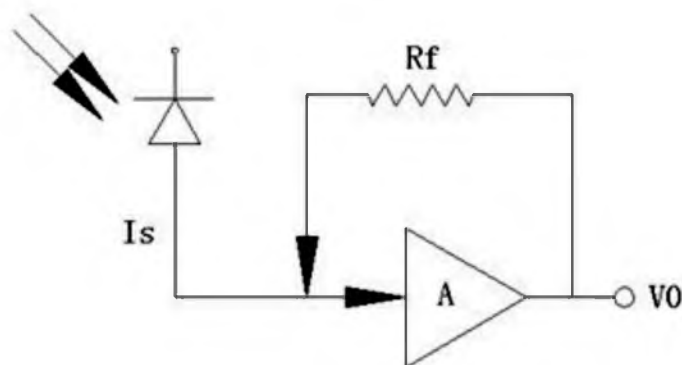


图 2-13 跨阻放大器原理图

由上图可知：

$$V_O = I_s * (1 + A_0) * R_f \quad (2-1)$$

该放大器的增益可以用跨阻增益来表示，在低频段其跨阻增益可以用下式来确定：

$$Z_T = \frac{R_f}{1 + 1/A_0} \quad (2-2)$$

Z_T 为跨阻， R_f 是反馈电阻， A_0 是运算放大器的开环增益。TIA 带宽由下式确定：

$$B = \frac{1 + A_0}{2\pi * R_f * C_{in}} \quad (2-3)$$

B 为 3dB 带宽， C_{in} 是运放的输入电容。 $C_{in} = C_d + C_g$ 。其中 C_g 是运放输入端栅极电容， C_d 是探测器的等效电容。

由式 (2-3) 可知，如果固定放大器的开环增益，当增大反馈电阻 R_f ，就可以提高跨阻，并降低带宽。反过来，当减小反馈电阻 R_f ，就可以增加带宽，并降低跨阻。因此就需要同时提高反馈电阻 R_f 和放大器的开环增益。但是，由于受到电路结构、电路规模大小、器件水平等因素的限制，放大器的开环增益较难提高；反馈电阻 R_f 的值也不能过大，否则会使得放大器的输出电压摆幅 ($I_s * R_f$) 过大从而引起失真，因此需要慎重选择。除此之外，放大器的实际带宽与速率之间有如下

经验公式^[20]:

$$B = 0.7 * v \quad (2-4)$$

对于 10Gbps 应用来说，带宽要求大概在 7G 左右。

本设计使用的 ROSA 管脚定义如表 2-5 所示^[21]。

表 2-5 ROSA 管脚定义

PAD	PAD ASSIGNMENT
1	Pre-amplifier power supply
2	Signal ground
3	TIA OUTP
4	TIA OUTN
5	Signal ground
6	RSSI_APD
7	Signal ground
8	Signal ground

2.4.2 升压电路设计

如 2.4.1 小节所述，APD 雪崩光电二极管需要较高的工作电压，而 XFP 光模块输入电压最高仅为+5V，因此就需要升压电路将+5V 电压升至几十伏。本设计使用 Maxim MAX15059 作为升压芯片，如图 2-14 为 MAX15059 的典型应用电路框图^[22]。

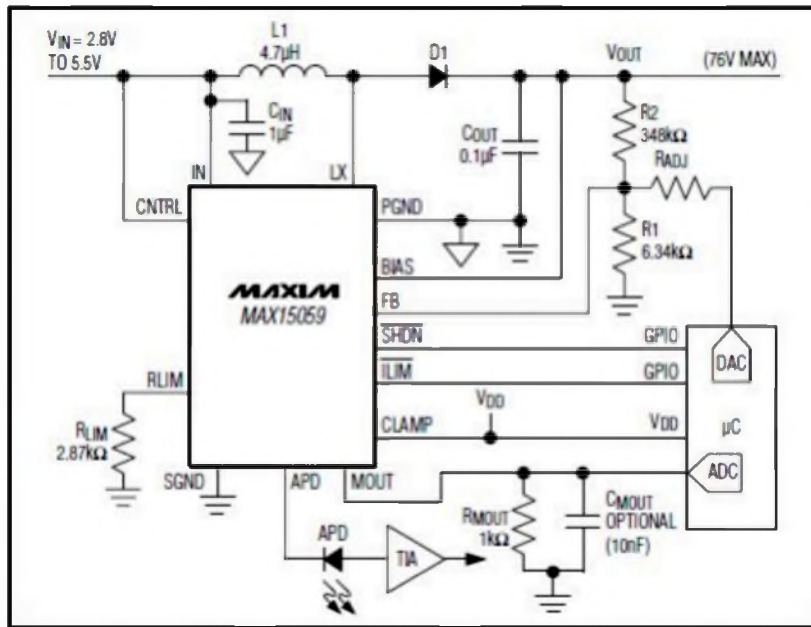


图 2-14 MAX15059 典型应用电路

MAX15059 工作电压为+2.8V 至+5.5V，最高可升压至 76V，开关频率为固定 400KHz，且自带镜像电流源（用于 RSSI），可以简化电路设计以节省 PCB 布板空间。

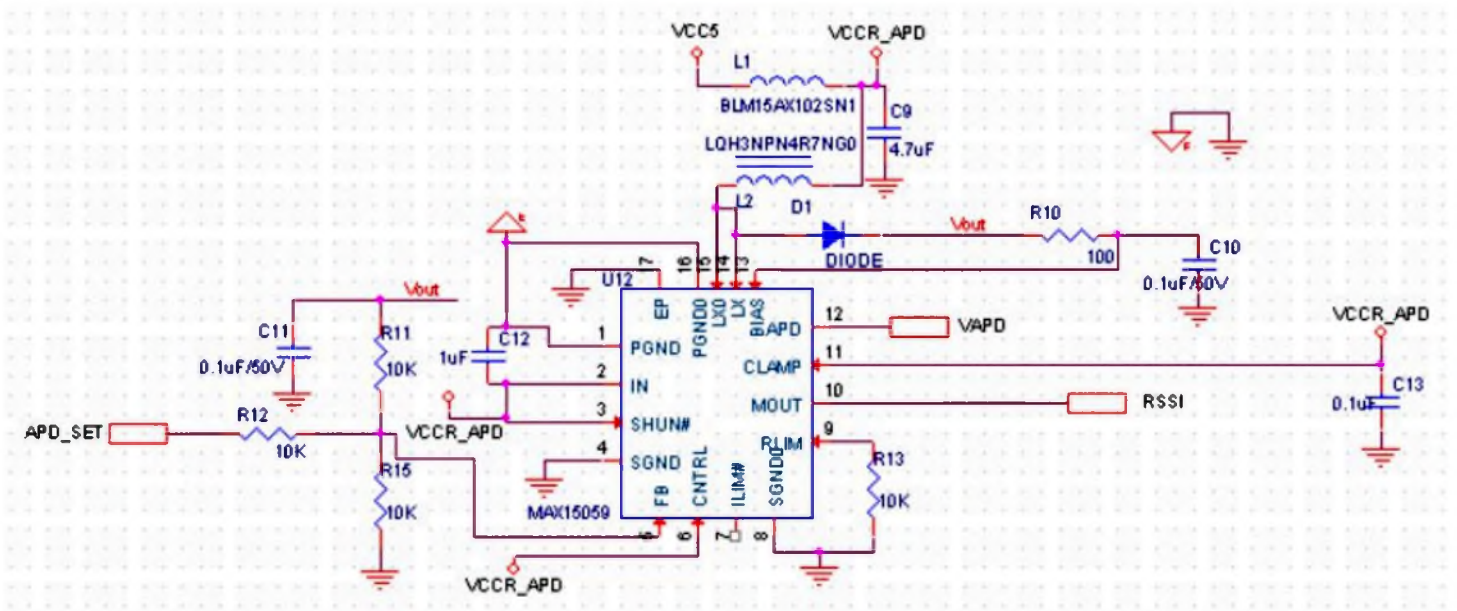


图 2-15 升压电路原理图

图 2-15 为升压电路的原理图，其中 APD_SET 为 ADuC7020 的 DAC；MAX15059 的 FB 脚为固定 1.23V 输出，可近似认为此引脚电流为 0；它们与 R11、

R12、R15 共同构成了一个三端网络，通过调节这三个电阻值，可以使 V_{out} 输出不同范围的电压值。

MAX15059 的 APD 脚是升压输出，将其连至 ROSA 的 6pin 以提供 APD 的偏压；MOUT 脚则为 MAX15059 内部的镜像电流源输出，流经这个引脚的电流等于 APD 将光信号转换为电信号的大小，间接反映了光信号的强度，将此脚连至 ADuC7020 的 ADC 以监控接收光信号强度。

2.4.3 收端电信号处理电路

光信号由光电探测器转换为电信号，并经由前置跨阻放大器转换为差分信号后，就来到了主放大器 LA，如图 2-16 为收端电信号处理电路模型。

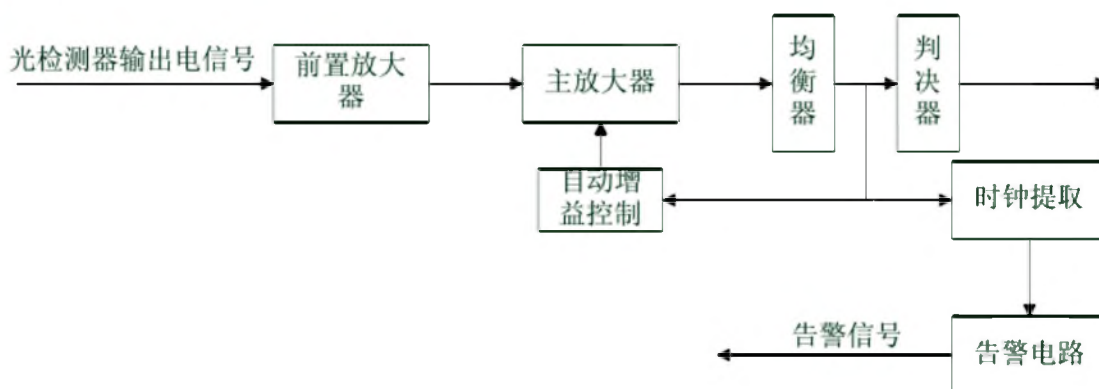


图 2-16 收端电信号处理电路模型

收端电信号处理电路主要包括 LA 限幅放大器和 CDR 时钟数据恢复。

（一）LA 限幅放大器

LA 限幅放大器一般在时钟恢复电路和前置放大器之间，其主要任务就是把前置放大器的输出的低噪声信号放大到一个固定的信号幅度，以便于其后数据判决电路和时钟恢复电路的工作。除了满足高增益和高速率的要求，较宽的输入动态范围是 LA 限幅放大器的另外一个重要特点^[23]。在实际使用的通信系统中，通常需要输入动态范围很宽的信号到接收机，这样信号幅度就会在很短的时间内从几微伏突变为几伏，同时又要求输出的信号幅度要在几十毫伏到几伏内。

LA 限幅放大器输出电压的摆幅是恒定的，这个恒定值和输入信号的强弱无关。LA 限幅放大器一般还提供信号丢失探测器，当输入信号低于预定义的阈值时将不再检测该信号。由于这个参数与实际的系统有关，所以需要从外部进行调整。当输入信号接近阈值时，迟滞比较器会发出信号丢失标志。LA 限幅放大器通常作为

光接收机中的主放大器用于光纤传输系统中，除了将前置放大器输出的较小电压进一步放大至一定的幅度外，它还可用于含无源滤波器的时钟恢复电路，以抑制由于输入信号码型不同而引起的时钟信号的幅度变化。另外，限幅放大器还可以作为其他领域内各种电路单元的输入输出缓冲^[24]。

(二) CDR 时钟数据恢复

在限幅放大器后的是时钟和数据恢复 (CDR) 电路。当数据流在光纤中传输时，光纤数据接收端需要通过 CDR 从接收到的含较大干扰和抖动的数字信号中提取接收位同步时钟，并使用该时钟对数据信号重新采样回复出原数据信号。时钟恢复电路的两个基本功能为^[25]：

1. 从不归零码(NRZ,Not Return to Zero)信号中提取出时钟分量；
2. 产生频率漂移尽量小的稳定在输入数据速率上的时钟输出。

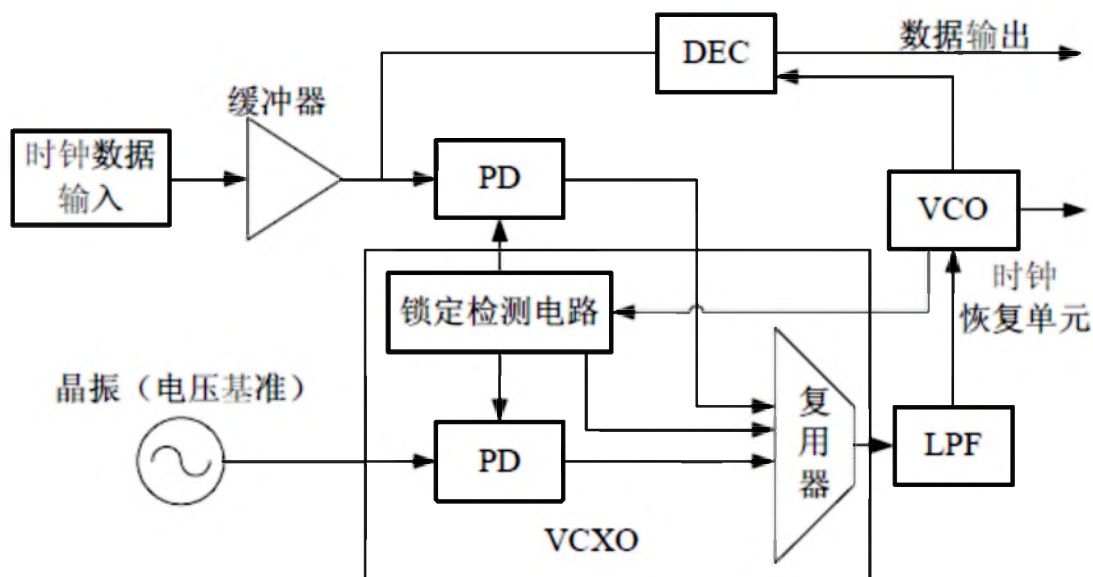


图 2-17 时钟数据恢复电路框图

CDR 会根据输入信号做出幅度等级和定时的判决，并产生幅度再生和时间的数据流。图 2-17 给出了基准电压型 CDR 的基本框图。

在本设计中使用了收发一体芯片 GN2010E，其集成了 LA 限幅放大器和 CDR 时钟数据恢复，详细电路设计见 2.5 小节。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/378044024110006036>