



现代光通信技术丛书

# 光纤通信 集成电路设计

Design of Integrated Circuits for  
Optical Communications



[美] Behzad Razavi 著  
胡先志 胡佳妮 译  
王丽芳 冯 波 校



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

第 2 版

# 光纤通信 集成电路设计

Principles and Design of Integrated Circuits for  
Optical Communication Systems

作者：(美) 詹姆斯·M·坎普  
译者：王 强 等

ISBN 7-302-10400-3

TN929. 11/82

2008

现代光通信技术丛书

# 光纤通信集成电路设计

[美] Behzad Razavi 著

胡先志 胡佳妮 译

王丽芳 冯 波 校

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信集成电路设计 / (美) 拉扎维 (Razavi, B.) 著;  
胡先志, 胡佳妮译. —北京: 人民邮电出版社, 2008.8  
(现代光通信技术丛书)  
ISBN 978-7-115-18312-5

I. 光… II. ①拉…②胡…③胡… III. 光纤通信—集成  
电路—电路设计 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 086424 号

## 内 容 提 要

本书是一本详细论述光纤通信系统高速集成电路设计的教材性著作。书中全面介绍了光纤通信高速集成电路设计中集成电路的基本概念、光器件、跨阻放大器、限幅放大器、输出缓冲器、振荡器、锁相环、时钟、数据恢复、复用器和激光驱动器等工作原理、设计原则和典型的设计实例。

本书内容新颖、题材丰富。全书理论与实际相结合, 结构严谨, 文字简练, 图表清晰。同时, 书中重点阐述的现代 VLSI 技术的分析和设计内容, 以及给出的宽带电路设计技术与实例, 反映了光纤通信集成电路的先进水平具有很高的参考价值。

本书可以作为高等院校微电子、光电子器件以及通信工程专业本科生和研究生的专业课教材或参考书, 同时也可供从事光纤通信集成电路研究、设计和生产的技术人员在实际工作中阅读参考。

### 现代光通信技术丛书 光纤通信集成电路设计

- 
- ◆ 著 Behzad Razavi
  - 译 胡先志 胡佳妮
  - 校 王丽芳 冯 波
  - 责任编辑 梁 凝
  - 执行编辑 李 强
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京艺辉印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 17.25  
字数: 417 千字 2008 年 8 月第 1 版  
印数: 1—3 000 册 2008 年 8 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2008-1484 号

ISBN 978-7-115-18312-5/TN

定价: 48.00 元

## 版 权 声 明

Behzad Razavi

**Design of Integrated Circuits for Optical Communications**

ISBN: 978-7-115-18312-5/TN

Copyright©2003 by the McGraw-Hill Companies , Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies , Inc. All Rights Reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Posts and Telecommunications Press.

本书中文简体字翻译版由人民邮电出版社和美国麦格劳-希尔教育（亚洲）出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2008-1484 号

## 译者的话

21 世纪是一个信息高速传输和交换的时代。今天，光纤通信技术正在承担着海量信息传输的重任。光纤通信系统是由光网络、光电子器件和集成电路 3 大部分共同组成的，其中集成电路的设计和制造技术水平从一个侧面反映了一个国家的高新技术、工业生产和国家安全的综合实力。为此，中国信息产业发展一定要努力做到：坚持自主发展，增强创新能力和核心竞争力。

发展光纤通信高速集成电路设计技术的基础之一就是要培养一大批具有国际竞争力的专业人才。培养光纤集成电路设计专业人才不仅需要优秀的师资力量，还需要高质量的教材。然而据译者所知，迄今为止，国内仅出版了两本有关光纤通信高速集成电路设计方面的著作：一本是高等教育出版社于 2003 年出版的由王志功教授撰写的《光纤通信集成电路设计》专著，另一本是清华大学出版社于 2005 年出版的由美国加州洛杉矶分校 Behzad Razavi 教授撰写的《Design of Integrated Circuits for Optical Communications》教材的影印本。

本书是 Behzad Razavi 教授所著《Design of Integrated Circuits for Optical Communications》一书的中译本，适合用作高等院校的本科生和研究生的专业课教材或参考书。

本书翻译和校对工作的具体分工是：胡先志翻译前言、目录和第 1~6 章，胡佳妮翻译第 7~10 章，王丽芳校对第 2~5、8、9 章初稿，冯波校对第 1、6、7 章初稿。全书最后由胡先志统一审核定稿。

本书涉及光纤通信技术、光电子器件和微电子集成电路 3 个技术领域，内容广泛，既有理论阐述，又有设计技巧和设计实例。鉴于译者的专业水平和中英文功底有限，书中难免出现一些误译和不足之处，恳请读者予以斧正。

译者

## 作者简介

Behzad Razavi 于 1985 年在 Sharif 理工大学获得电子工程学士学位，随后分别于 1988 年和 1992 年在美国斯坦福大学获得电子工程硕士和博士学位。在 1992—1996 年，Behzad Razavi 一直在 AT&T Bell 实验室和 Hewlrrtt-Packard 实验室工作；1996 年 9 月起，他先后担任了美国洛杉矶加利福尼亚大学电子工程的副教授和教授；当前，他正在从事的研究领域包括无线收发器、频率同步器、高速数据通信的锁相、时钟恢复和数据转换器等方面。

Razavi 教授在 1992—1994 年担任美国纽约普林斯顿的普林斯顿大学的副教授；1995 年，他转任美国斯坦福大学的副教授。在 1993—2002 年，他为国际固态电路会议 (ISSCC, International Solid-State Circuits Conference) 的技术程序委员会服务；现在，他是 VLSI 电路讨论会的技术程序委员会的一名成员。与此同时，Razavi 教授还兼任 IEEE 《Journal of Solid-State Circuits》期刊、IEEE 《Transactions on Circuits and Systems》学报和《High Speed Electronics》国际期刊的特约编辑与副总编辑。

在 1994—2001 年的 8 年中，Razavi 教授先后获得了诸多奖项：1994 年荣获 ISSCC 的贝雅特丽齐优秀编辑奖；1994 年荣获欧洲固态电路会议的最佳论文奖；1995 年和 1997 年荣获 ISSCC 的最佳专题小组成员奖；1997 年荣获 TRW 的创新教学奖；1998 年在 IEEE 的常用集成电路会议上荣获最佳论文奖；2001 年同时获得 ISSCC 的 Jack Kilby 杰出学生论文奖和贝雅特丽齐优秀编辑奖。

Razavi 教授曾先后撰写了《Principles of Data Conversion System Design》(IEEE 出版, 1995)、《RF Microelectronics》(Prentice Hall 出版, 1998) (该书已由 Tadahiro Kuroda 翻译成日语出版) 和《Design of Analog CMOS Integrated Circuits》(McGraw-Hill 出版, 2001) 等著作，而且他还担当了《Monolithic Phase-Locked Loops and Clock Recovery Circuits》一书的编辑 (IEEE 出版, 1996)。

# 目 录

<b>第 1 章 光纤通信简介</b> .....	1
1.1 历史回顾 .....	1
1.2 光纤通信系统的发展 .....	2
1.3 设计面临的挑战 .....	4
1.4 当前的技术水平 .....	5
参考文献.....	6
<b>第 2 章 基本概念</b> .....	7
2.1 随机二进制数据的特性 .....	7
2.2 随机数据的产生 .....	9
2.3 数据格式.....	11
2.3.1 NRZ 和 RZ 数据 .....	11
2.3.2 8B/10B 编码 .....	12
2.4 带宽限制对随机数据的影响.....	13
2.4.1 低通滤波的作用.....	13
2.4.2 眼图.....	14
2.4.3 高通滤波的作用.....	16
2.5 噪声对随机数据的影响.....	16
2.6 相位噪声和抖动.....	19
2.6.1 相位噪声.....	19
2.6.2 抖动.....	21
2.6.3 相位噪声和抖动之间的关系 .....	21
2.6.4 附加噪声引起的抖动.....	22
2.7 传输线.....	23
2.7.1 理想的传输线.....	23
2.7.2 具有损耗的传输线.....	26
参考文献 .....	26
<b>第 3 章 光器件</b> .....	28
3.1 激光器.....	28
3.1.1 激光器的工作原理.....	29
3.1.2 激光器的类型.....	30
3.1.3 激光器的特性.....	33
3.1.4 激光器外调制.....	34
3.2 光纤.....	35



3.2.1	光纤损耗	35
3.2.2	光纤色散	36
3.3	光电二极管	40
3.3.1	响应度和效率	41
3.3.2	PIN 二极管	41
3.3.3	雪崩光电二极管	42
3.4	光系统	43
	参考文献	45
<b>第 4 章</b>	<b>跨阻放大器</b>	<b>46</b>
4.1	概述	46
4.1.1	TIA 的性能参数	47
4.1.2	信噪比计算	51
4.1.3	噪声带宽	53
4.2	开环 TIA	54
4.2.1	低频特性	54
4.2.2	高频特性	60
4.3	反馈 TIA	64
4.3.1	一阶 TIA	64
4.3.2	二阶 TIA	65
4.4	电源抑制	71
4.5	差分 TIA	73
4.6	高性能技术	75
4.6.1	增益放大	75
4.6.2	电容性耦合	77
4.6.3	反馈 TIA	78
4.6.4	电感峰化	81
4.7	自动增益控制	83
4.8	实例分析	86
	参考文献	89
<b>第 5 章</b>	<b>限幅放大器和输出缓冲器</b>	<b>90</b>
5.1	通常要考虑的问题	90
5.1.1	性能参数	90
5.1.2	级联的增益级	91
5.1.3	幅度调制/相位调制转换	94
5.2	宽带技术	95
5.2.1	电感峰化	96
5.2.2	电容简并	97
5.2.3	Cherry-Hooper 放大器	99
5.2.4	$f_T$ 倍频器	102
5.3	输出缓冲器	103
5.3.1	差分信号	104

5.3.2 双终端 .....	107
5.3.3 前向驱动器设计 .....	109
5.4 分布式放大 .....	110
5.4.1 单片传输线 .....	110
5.4.2 分布式放大器 .....	113
5.4.3 带集总器件的分布式放大器 .....	118
参考文献 .....	119
<b>第6章 振荡器基础</b> .....	<b>121</b>
6.1 通常要考虑的问题 .....	121
6.2 环形振荡器 .....	122
6.3 LC振荡器 .....	130
6.3.1 交叉耦合振荡器 .....	132
6.3.2 电容三点式(考毕兹)振荡器 .....	134
6.3.3 单端口振荡器 .....	136
6.4 压控振荡器 .....	139
6.4.1 环形振荡器的调谐 .....	141
6.4.2 LC振荡器的调谐 .....	148
6.5 压控振荡器的数学模型 .....	150
参考文献 .....	153
<b>第7章 LC振荡器</b> .....	<b>155</b>
7.1 单片电感 .....	155
7.1.1 损耗机理 .....	156
7.1.2 电感模型 .....	159
7.1.3 电感设计准则 .....	161
7.2 单片变容二极管 .....	164
7.3 基本的LC振荡器 .....	166
7.3.1 差分控制 .....	168
7.3.2 设计程序 .....	169
7.4 积分振荡器 .....	171
7.4.1 同相耦合 .....	173
7.4.2 反相耦合 .....	174
7.5 分布式振荡器 .....	175
参考文献 .....	176
<b>第8章 锁相环</b> .....	<b>178</b>
8.1 简单的锁相环 .....	178
8.1.1 鉴相器 .....	178
8.1.2 基本的锁相环电路结构 .....	179
8.1.3 简单锁相环的动态特性 .....	185
8.2 电荷泵锁相环 .....	190
8.2.1 锁定捕获的问题 .....	190
8.2.2 鉴相/鉴频器与电荷泵 .....	190

8.2.3 基本的电荷泵锁相环 .....	194
8.3 锁相环中的非理想效应 .....	198
8.3.1 PFD/CP 非理想性 .....	198
8.3.2 锁相环的抖动现象 .....	201
8.4 延迟锁相环 .....	203
8.5 应用 .....	205
8.5.1 倍频和频率合成 .....	205
8.5.2 偏移的减小 .....	207
8.5.3 抖动的减小 .....	208
参考文献 .....	209
<b>第 9 章 时钟与数据恢复</b> .....	<b>210</b>
9.1 通常要考虑的问题 .....	210
9.2 随机数据鉴相器 .....	219
9.2.1 Hogge 鉴相器 .....	219
9.2.2 Alexander 鉴相器 .....	223
9.2.3 半速率鉴相器 .....	226
9.3 随机数据鉴频器 .....	229
9.4 CDR 的结构 .....	233
9.4.1 全速率无参考结构 .....	233
9.4.2 双 VCO 结构 .....	234
9.4.3 带外参考的双环结构 .....	235
9.5 CDR 电路中的抖动 .....	236
9.5.1 抖动传递 .....	236
9.5.2 抖动的产生 .....	240
9.5.3 抖动容限 .....	241
参考文献 .....	243
<b>第 10 章 复用器和激光驱动器</b> .....	<b>245</b>
10.1 复用器 .....	245
10.1.1 2 合 1 复用器 .....	245
10.1.2 复用器的结构 .....	249
10.2 分频器 .....	252
10.2.1 触发分频器 .....	252
10.2.2 密勒分频器 .....	257
10.3 激光驱动器和调制器驱动器 .....	258
10.4 设计原则 .....	261
参考文献 .....	266

# 第 1 章 光纤通信简介

通信网数据业务量的快速增长已经再度激起人们对高速光电子器件和系统进行研究的兴趣。随着因特网规模的壮大和微处理器、存储器运算速度的提高，数据传输依然是传输过程中的“瓶颈”，人们投入了对更快的通信信道的研究工作中。

以光作为信号载体的想法一直持续了 100 多年之久。然而，直到 20 世纪 50 年代，研究人员才用试验证明了光纤可以用作光传输介质。虽然早期的光纤受到高损耗的限制，但是采用一个非常宽的调制带宽进行光传导的美好前景激励着人们对光纤通信领域进行更为广泛的研究，从而使光网络在 20 世纪 70 年代进入了实用阶段。

本章就光纤通信作一个综述，使读者对后续章节中所引入的一些概念有一些基本的了解。首先，介绍光纤通信的简史，了解一般的光纤通信系统的组成，并对光纤通信系统的主要的功能进行必要的阐述；其次，列出现代光收发机设计的要求；最后，对光收发机设计的当今技术水平和发展趋势进行综述。

## 1.1 历史回顾

光“传导”的历史可以追溯到 19 世纪 40 年代。当时，一个名为 Jacque Babinet 的法国物理学家用试验证明了光可以沿着一股喷出的水流而发生“弯曲”。直到 19 世纪后期，研究人员又发现光可以在一根弯曲的石英棒内传导。这样，我们可以将用于光传输的“光纤”看作是一根柔软、透明的玻璃丝或塑料丝。

1954 年，荷兰德尔夫特技术大学的 Abraham van Heel 和英国帝国学院的 Harold Hopkins 与 Narinder Kapany 各自发表了用一束光纤传输图像的想法。与此同时，美国光学公司的 Brian O. Brien 认识到“裸”光纤会使光纤中的能量丢失至光纤周围的空气中。这就启发了 van Heel 用一个涂覆层将光纤纤芯包围起来，从而使光纤的损耗（衰减）大幅度下降。那时光纤的衰减仍然是非常的大，大约 1 000dB/km，故光纤被限制使用于内窥镜中。

20 世纪 50 年代和 60 年代，激光作为一种强光源，在光学领域起着关键作用。尽管当时似乎没有可用的合适传输介质，但是激光具有的宽带调制能力，使其具备了传输信息的巨大的潜力。1966 年，英国标准实验室的高锟（Charles Ko）和 Charles Hockem 提出，只要光纤衰减进一步降低到低于 20dB/km，光纤就可以用作信号的传输介质。同时，他们假设只要光纤材料中的杂质含量大幅度地减少，应该能够获得低衰减的光纤。

1970 年，康宁公司的 Robert Mauer 及其两个同事研制出了衰减低于 20dB/km 的石英玻璃光纤。随着半导体工业的发展，降低光纤材料杂质和改善光纤结构均匀性的技术水平也

得到发展，从而在 1975 年和 1979 年光纤衰减分别降低到 4dB/km 和 0.2dB/km。这样，就使人们在长距离上进行大容量信息传输的梦想变为现实。1977 年，AT&T 和 GTE 终于研制出了第一个光纤电话系统。

光纤通信广泛使用于高速数据传输源于两个理由：(1) 光纤具有高带宽 (25~50GHz)；(2) 光纤具有低衰减 (0.15~0.2dB/km)。比较而言，双绞线电缆在频率为 100MHz 时的衰减达到 200dB/km；便宜的同轴电缆在频率为 1GHz 的衰减达 500dB/km。同样，载波频率为几个吉赫兹的无线电波传过几米距离就会引起几十分贝的衰减，故无线电波所支持的数据速率只能低于 100Mbit/s。

光纤提供的高 (巨大) 带宽，使其得到了另一个重要应用：利用多个波长 (频率) 在一根光纤中传输多个信道。例如，现在已经试验成功的波长数是 100，每个波长传输的数据速率为 10Gbit/s，允许在 400km 实现总的的数据速率为 1Tbit/s 的通信。

## 1.2 光纤通信系统的发展

光纤通信 (OC) 系统就是要实现将大量的数据传输到很远的距离。例如，欧洲电话业务与美国的电话业务是通过已安装的一个跨越大西洋的光纤通信系统连接起来的。

图 1.1 (a) 所示的是由 3 个组件所组成的一个简单 OC 系统，3 个组件分别为：(1) 电光转换器 (如激光器)，可以将电信号转换为光信号 (产生光代表逻辑 1，光断开代表逻辑 0)；(2) 光纤，它的作用是传输激光器所产生的光；(3) 光检测器 (光电二极管)，其对光纤终端的光敏感且能够将光信号变换为电信号。我们将发射端和接收端分别称为“近端”和“远端”。在第 3 章将介绍，激光器由电流所驱动，而光电二极管产生输

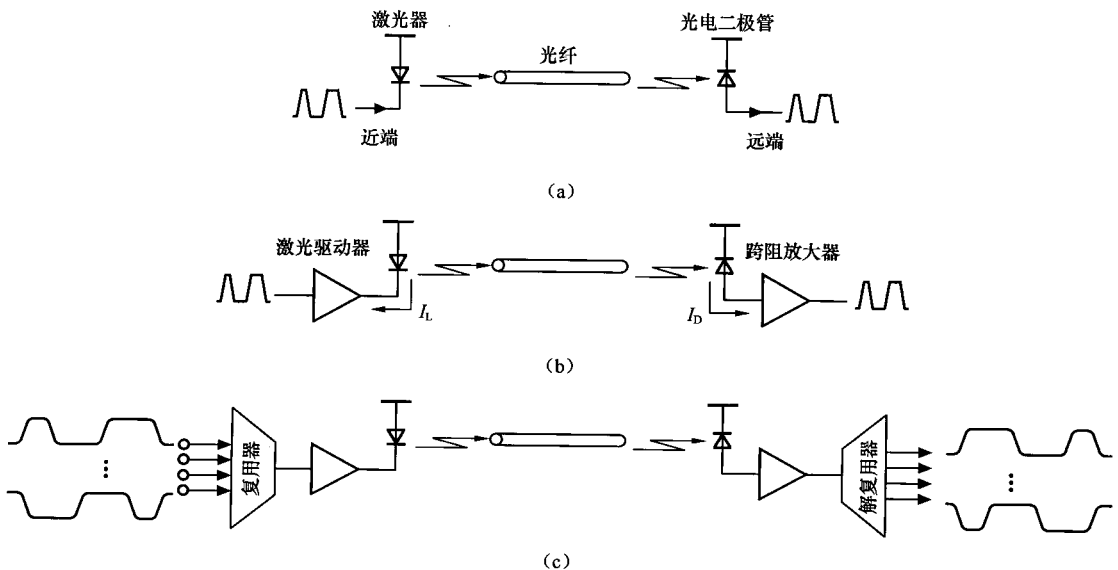


图 1.1 (a) 简单的光纤通信系统 (b) 带驱动器和放大器的光纤通信系统  
(c) 带 MUX 和 DMUX 的光纤通信系统

出电流。

在一个光纤通信系统中采用长或便宜的光纤，随着光从光纤的近端传输至远端，光会经受相当大的衰减。这样就要求：(1) 激光器必须产生几十毫瓦的光强；(2) 光电二极管必须具备较高灵敏度；(3) 由光电二极管产生的电信号必须进行低噪声放大。这些要求引出了图 1.1 (b) 所示的更复杂的光纤通信系统。图 1.1 (b) 中的激光驱动器可以将大电流传送到激光器，跨阻放大器 (TIA) 以低噪声和足够的带宽放大光电二极管的输出，并将其转换为电压。例如，一个速率为 10Gbit/s 的数据输入激光驱动器，用  $1.55\mu\text{m}$  波长调制激光器的光，在 TIA 输出端出现一个幅值为 10mV 的电压波形。

图 1.1 (b) 所示的发射和接收工作是处理高速“串行”数据，即一个 10Gbit/s 的数据流。然而，提供给发射机 (TX) 的实际数据是很多低速信道 (“并行”数据)，是由多个用户所产生的。由并行至串行转换的任务是由一个复用器 (MUX) 来完成的。类似地，接收机 (RX) 必须引入一个解复用器 (DMUX) 来再生原始的并行信道。这样，我们得到一个组合的光纤通信系统，如图 1.1 (c) 所示。

图 1.1 (c) 所示的系统结构配置仍然不够完整。我们首先考虑发射端，复用器需要许多具有精确的边沿对准的时钟频率，这些时钟是由一个锁相环 (PLL) 产生的。此外，实际上，MUX 的输出会遭受到非理想性的损伤，如受到“抖动”和“码间串扰” (ISI) 的干扰。这样就要求在激光驱动器之前使用一个“提纯”触发器，这些改进措施都会现在如图 1.2 (a) 所示的发射机中。

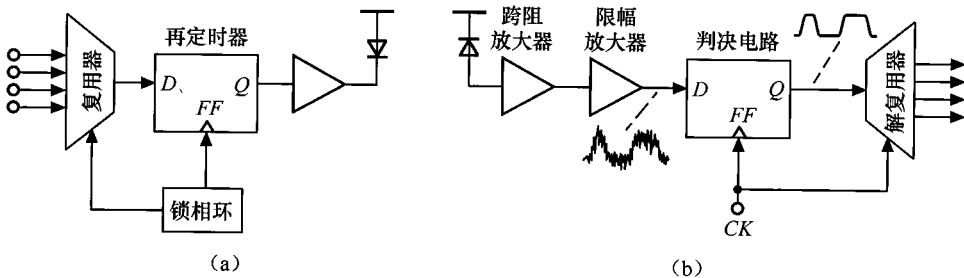


图 1.2 (a) 改进的发射端 (b) 改进的接收端

接收端也需要增加一些附加功能。因为对于提供逻辑电平而言，TIA 输出的动态范围不够大，所以，必须在 TIA 之后安装一个高增益放大器 (称为“限幅放大器”)。另外，由于已接收到的数据可能出现明显的噪声，所以在限幅放大器和 DMUX 之间应插入一个“提纯”触发器 (称为“判决电路”)。这样接收端呈现的情况，如图 1.2 (b) 所示。

图 1.2 (b) 中的接收端缺少一个产生判决电路和 DMUX 需要的时钟。这个时钟必须提供一个与接收到的数据有着十分确定的相位关系，以便触发器在高和 low 电平的“最佳”点，即在每个比特的中间点进行抽样。从输入的数据提取这样一个时钟的任务被称为“时钟恢复”。时钟恢复和数据提纯的整个操作被称为时钟和数据恢复 (CDR)。图 1.3 所示为一个完整的光纤通信系统。值得指出的是，激光驱动器中含有功率控制 (参阅第 10 章)，同时 TIA 采用了自动增益控制 (AGC) (参阅第 4 章)。

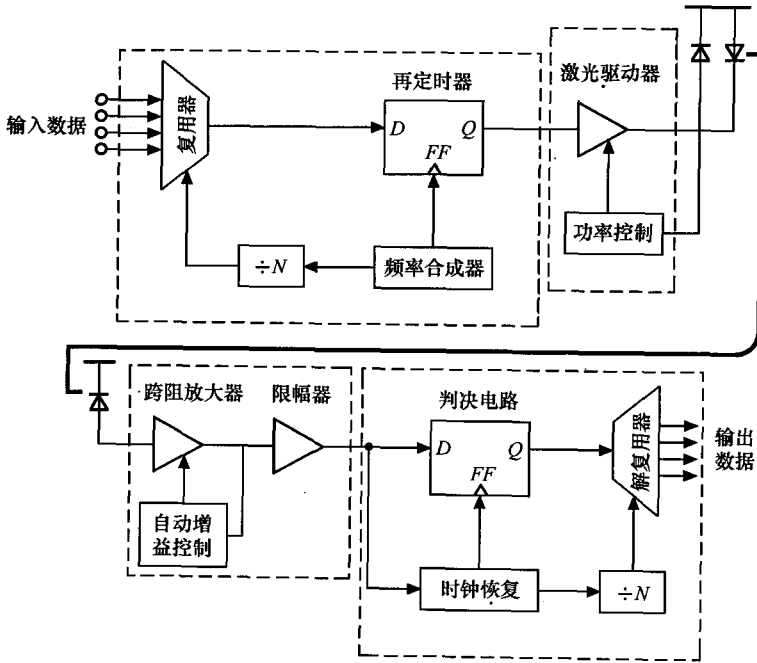


图 1.3 一个完整的光纤通信系统

### 1.3 设计面临的挑战

过去的几十年，图 1.3 所示的系统配置的构成发生的变化不太大，而组成系统组件的设计和集成度则发生了很大的变化。在 IC 工艺进步和可生产性，以及在满足更高的性能要求的推动下，这种系统组件设计和集成度的变化带来了一些新的问题，迫切需要一些新的电路和技术。在此，我们综述一些新产生的问题。

图 1.3 中的发射器需要解决一些因高速或大规模 IC 工艺所提出的要求。因为传输数据的抖动主要由 PLL 确定，所以必须提供一个稳定、高输入、低噪声的设计和衬底衰减。这就为高数据速率无非线性畸变复用器的设计带来了困难。

另一个关键问题来自于激光驱动器，该电路应该传输具有非常窄的上升和下降时间的几十毫安电流。因为激光器在开和关状态之间会经历一个大的电压波动，又由于大规模集成电路技术要求较低的电源电压，所以驱动器设计就变得十分困难。封装寄生电流也严重地限制着激光器大电流进行开、关转换的速度。

图 1.3 中的光器件分别称为激光器、光纤和光电二极管。它们具有各自的非线性特性，故需要使光器件的电和光设计之间的相互作用十分接近。例如，啁啾、色散、衰减和效率等效应在整个线路的功率预算中起着重要作用。

图 1.3 中的接收机也呈现出许多问题。TIA 的噪声、增益和带宽以及限幅器直接影响着整个系统的灵敏度和速度，电源电压的减小会产生一些其他问题。另外，时钟和数据恢复功能必须提供一个高速、容许长连相同（理想的比特序列）且能够满足严格的抖动和带宽的

要求的功能。

图 1.3 中所示的收发机整体集成在一个芯片上,这也会出现一系列相关问题。MUX 和 DMUX 中的高速数据信号可使接收机输入或者在 PLL 和 CDR 电路所用的振荡器的性能恶化。由激光器驱动器产生的高运行速率可以引起类似的恶化,而且也可以使 TIA 的敏感性下降。最后,由于传输 PLL 中的振荡器和接收 CDR 电路的工作频率略有偏差(在两个通信收发机中由晶体频率失配所产生的差异),它们可能会彼此“推挽”,从而产生基本的抖动。

为了解决上述问题,已经产生了多芯片解决方案,即将噪声和敏感功能集成到不同的衬底上。图 1.3 中的几个虚线方框即为一个典型的分配情况,它们分别是:PLL/MUX 电路(也称作“串行器”)、带功率控制电路的激光驱动器、TIA/限幅器组合以及 CDR/MUX 电路(也称为“串并转换器”)。最近的研究工作已经可以将串行器和串并转换器集成起来(生产出一个“SERDES”),但是 TX 和 RX 放大器仍然保留成各自独立形式。

## 1.4 当前的技术水平

新的光器件革命是在 20 世纪 90 年代射频(RF)设计所经历的里程碑,这再次提醒人们注意 3 个重要的趋势:(1)模块,通用目的积木式方块结构逐渐被具有器件/电路/结构级编码的端一端设计方案所替代;(2)在单个芯片上集成度越高,所提供的性能越好且其成本也越低;(3)主流 VLSI 技术,例如 CMOS 和 BiCMOS 继续取代由 GaAs 和 InP 器件要求的各个领域。现代 OC 收发器应用,对设计者不断提出各种几何尺寸方面的挑战。

### (1) CMOS 技术的实现

CMOS 技术的成本和集成优点已激励着人们在高速 CMOS 设计方面进行大量的工作。在 CMOS 收发机的设计中出现了许多难题,例如,噪声、速度、电压裕度和衬底耦合等问题。2000 年,人们研制造出了 10Gbit/s CMOS CDR 电路。2002 年出现了工作速率为 10Gbit/s 的 CMOS 串行器和串并转换器。

### (2) 速度

随着因特网骨干网传输数据容量的增大,工作速率为 40Gbit/s 的光纤通信系统已经引起了人们的高度重视。高速传输系统的出现,为 IC 设计开辟了一个新领域,这是由于对于无线应用而言,以前已经将无线应用工作的频率(毫米波频段)限制在窄带、低复杂性的电路。将双极性尤其是 CMOS 技术推进到这样的速度,设计人员应该克服有源和无源器件的宽带特性、芯片上传输线的耦合问题和高速封装问题。参考文献 [6] 已经报道了 40Gbit/s SiGe CDR 电路的情况。

### (3) 集成度

在一个 CMOS 芯片上集成一个完整的 SERDES 可以作为 OC 收发机设计向着采用先进技术所迈进的第一步。特别适合于 CMOS 技术的两个重要的趋势是:① SERDES 与带有网络(成帧器)接口的大数字处理器的集成,这样做消除了 SERDES 与数字处理器之间大量的高速印制电路板(PCB)线路,简化了封装设且节约了电能消耗;②将多个 SERDES 集成在一个芯片上,可以在一根光纤上传输多个波长以提高系统总的速率,所以一个重要的发展方向是将多个 SERDES 集成在同一个芯片上,以增加“端口密度”。



#### (4) 功耗

在高速和/或高端口密度情况下,光收发机的功耗变得十分重要。究其原因是功耗决定着容纳整个模块的封装的类型和尺寸。现在的 10Gbit/s SERDES 消耗的功率大约为 1W。如果 4 个 10Gbit/s SERDES 集成在一个芯片上,这样将会产生严重的封装问题。令人关注的是,深亚微米 CMOS 技术需要用低的电源电压来降低整个功耗(如在输出缓冲器),同时也使其电路设计变得更为复杂。

### 参考文献

1. D. G Goff . Fiber Optic Reference Guide . Boston : Focal Press, 1999
2. H. M Rein and M. Moller. Design Considerations for Very High Speed Si Bipolar ICs Operating up to 50Gb/s. IEEE Journal of Solide-State Circuits, vol. 31, pp. 1076~1090, August 1996
3. J. Savoj and B. Razavi. A10Gb/s CMOS Clock and Data Recovery Circuit. symp. on VLSI Circuits Dig . of Tech. Papers, pp. 136~139, June 2000
4. M. M Green et al . OC-192 Transmitter in Standard 0.18 $\mu$ m CMOS. ISSCC Dig . of Tech. Papers, pp. 186~187, June 2002
5. J. Cao et al . OC-192 Receiver in Standard 0.18 $\mu$ m CMOS. ISSCC Dig . of Tech. Papers, pp. 187~188, Feb 2002
6. M. Reinhold et al . A Fully Integrated 40Gb/s Clock and Data Recovery IC with 1: 4 DMUX in SiGe Technology . IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 36, pp. 1937-1945