经典译丛

WILEY

微电子学

光通信集成电路设计（第二版）

Design of Integrated Circuits for Optical Communications, Second Edition

【美】 Behzad Razavi 著

林 云 译

Design of Integrated Circuits for Optical Communications, Second Edition

中国工信出版集团

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

经典译丛·微电子学

光通[redacted]络设计

（第二版）

Design of Integrated Circuits for Optical Communications

Second Edition

[美] Behzad Razavi 著

林 云 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 提 要

本书是光通信集成电路设计方面的经典书籍，在国内外享有盛誉。全书共11章，主要内容包括光通信系统介绍、通信系统基本概念、光器件原理、跨阻放大器、限幅放大器和输出缓冲器、振荡器基础、LC振荡器、锁相环、数据和时钟恢复电路设计、复接器和激光驱动器、突发模式电路。全书内容系统全面，理论严谨，讲解透彻，理论联系实际，同时引入了近年来光纤领域新的电路及设计技术。

本书是通信工程、电子信息工程、光电信息工程、集成电路工程、电子科学与技术等专业的高年级本科生和研究生的一本优秀教材，也是光通信电路设计领域工程技术人员及科研人员的一本不可多得的参考书。

Design of Integrated Circuits for Optical Communications, Second Edition
ISBN: 978-1-118-33694-6
Behzad Razavi

Copyright © 2012 by John Wiley & Sons, Inc.
All Rights Reserved. This translation published under license.
Authorized translation from the English language edition, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.
Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.
本书简体中文字版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。
本书封底贴有 Wiley 防伪标签，无标签者不得销售。
版权贸易合同登记号图字：01-2013-3700

图书在版编目（CIP）数据

光通信集成电路设计 = Design of Integrated Circuits for Optical Communications /（美）毕查德·拉扎维（Behzad Razavi）著；林云译. —2版. —北京：电子工业出版社，2017.8
（经典译丛·微电子学）
ISBN 978-7-121-31750-7

Ⅰ. ①光… Ⅱ. ①毕… ②林… Ⅲ. ①光通信-集成电路-电路设计-高等学校-教材 Ⅳ. ①TN929.1
中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 124101 号

策划编辑：张小乐
责任编辑：张小乐
印　　刷：北京京科印刷有限公司
装　　订：北京京科印刷有限公司
出版发行：电子工业出版社
　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编 100036
开　　本：787×1 092　1/16　印张：19.5　字数：500 千字
版　　次：2017 年 8 月第 1 版（原著第 2 版）
印　　次：2017 年 8 月第 1 次印刷
定　　价：69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。
质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。
本书咨询联系方式：（010）88254462，zhxl@phei.com.cn。

译 者 序

从1966年英籍华人高琨提出光纤通信的概念至今，光纤通信获得了突飞猛进的发展。光纤通信以其独特的优越性，已经成为现代通信系统的主流方向之一，是当今信息社会的基石。随着包括移动互联网、大数据、物联网、云计算等新的业务不断普及，对光纤通信集成电路的设计要求不断提高，光纤通信系统及光纤通信高速集成电路的设计必然迎来新的发展高峰。

光纤通信承担着海量信息的传输。光纤通信系统由光网络、光电子器件和集成电路构成，除了硬件部分，还需要大量的信号处理、通信理论等的算法和技术。因此，其所涉及的领域非常广泛。随着信息技术的高速发展，必然会带动光纤通信系统及其相关产业的进步，如微电子技术、光电子技术、信号处理技术、电子技术、计算机技术，等等。

发展光通信高速集成电路设计技术，首先需要培养一大批具有扎实基础的专业人才。这不仅需要优秀的师资，还需要高水准的教材。然而据译者所知，目前国内出版的光纤通信高速集成电路设计方面的书还很欠缺，主要是2003年出版的王志功教授撰写的《光纤通信集成电路设计》，远远满足不了培养人才的需要。

本书是Behzad Razavi教授所著*Design of Integrated Circuits for Optical Communications*一书的中译版，适合作为研究生、工程师及高年级本科生的教科书或参考书。

虽然译者翻译本书之时在高校从事“电子电路”“非线性电子电路”“锁相技术”“电力电子基础”等课程教学与研究已逾二十载，但是Razavi教授所著的这本书确实包含了译者以前未接触的内容，深感国内教材的内容与其相比还是有些陈旧。

本书由林云翻译。在翻译过程中得到了很多同仁的帮助，教研室的何丰、管春、胡文江老师给予了大力的支持和帮助，谢显中教授对译者翻译本书也给予了帮助和鼓励，在此表示感谢。

本书涉及内容广泛，包含通信技术、微电子技术、光电子器件、电子电路等领域。由于译者专业水平和英文水平有限，书中难免出现不足甚至误译之处，请读者不吝批评指正。

译 者

2017年5月

作者简介

Behzad Razavi 是一位备受赞誉的老师、研究者和作者。他拥有斯坦福大学的博士学位，且是洛杉矶加利福尼亚大学电子工程教授。他现在的研究包括无线收发信机、频率合成器、高速数据通信的锁相和时钟恢复，以及数据转换器。

1993—2002 年，Razavi 教授在国际固态电路会议技术计划委员会服务，1998—2002 年在 VLSI 电路专题会服务。他也是 *IEEE Journal of Solid-State Circuits*，*IEEE Transaction on Circuits and System*，*International Journal of High Speed Electronics* 的特约编辑和副总编辑。

1994 年，Razavi 教授荣获 ISSCC 贝亚特丽齐（Beatrice）优秀编辑奖，荣获 1994 年欧洲固态电路会议最佳论文奖。1995 年和 1997 年荣获 ISSCC 最佳专题小组奖。1997 年荣获 TRW 创新教学奖，1998 年荣获 IEEE 常用集成电路会议最佳论文奖。2001 同时荣获 ISSCC 的 Jack Kilby 杰出学生论文奖和贝亚特丽齐优秀编辑奖，2006 荣获 Lockheed Martin 教学优秀奖，2007 年荣获 UCLA 教学能力评议奖，2009 年获得 CICC 最佳发明论文奖。Razavi 教授被认为是 ISSCC 50 年历史以来 10 个顶尖作者之一。由于他对高速通信电路开创性的贡献，2012 年 Razavi 教授荣获 IEEE 固态电路唐纳德·彼得森（Donald Pederson）奖。

Razavi 教授是 IEEE 杰出的讲师和 IEEE 会士。出版了 *Principles of Data Conversion System Design*，*RF Microelectronics*（已翻译成中文、日文、韩文），*Design of Analog CMOS Integrated Circuits*（已翻译成中文、日语、韩语），*Design of Integrated Circuits for Optical Communications*，*Fundamental of Microelectronics*（已翻译成中文、日文、韩文）。他还是 *Monolithic Phase-Locked Loops and Clock Recovery Circuits*、*Phase-Locking in High-Performance Systems* 的编辑。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第一版前言

对高速数据传输的日益增长的需求，使光纤通信焕发了青春，导致人们对高速器件和高速电路进行深入研究。本书的目的是用于光纤通信系统中的集成电路(IC)分析与设计的教学，将证明其对于研究生和正处于实际研发中的工程师是有用的。本书假定读者具有坚实的模拟电路设计基础，例如，具有 B. Razavi 所著的 *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* 或者 P. Gray、P. Hurst、S. Lewis 和 R. Meyer 所著的 *Analysis and Design of Analog CMOS Integrated Circuits* 的知识水平。

权衡以后，本书由 10 章构成。第 1 章介绍光通信系统，对后面的章节提供基础。第 2 章介绍基本概念，构成分析设计电路的基础。第 3 章处理光器件与系统，在光和电之间架起桥梁。

第 4 章论述跨阻放大器的设计，集中在低噪声宽带技术和它们之间的权衡(折中)。第 5 章将这些概念扩展到限幅放大器和输出缓冲器，介绍获得宽带高增益的方法。

第 6 章介绍振荡器基础，第 7 章集中介绍 LC 振荡器。第 8 章描述锁相环的设计，第 9 章把相位锁定概念应用到时钟和数据恢复电路。第 10 章处理高速发射机电路，例如复接器和激光驱动器。

本书可用于研究生有关高速集成电路设计的课程，如果在一学季使用本书，可将第 3 章、第 4 章、第 10 章部分略去。如果一学期使用，可以讲授完全书。

与本书配套的网站为读者提供附加资源，包含本书图像，网址为 www. mhhe. com/razavi。

感谢本书的书评作者，他们提供了对本书各个方面的无价的反馈。特别要感谢 Lawence Der (Transpectrum)，Larry DeVito (Analog Devices)，Val Garuts (TDK Semiconductor)，Michael Green (University of California，Irvine)，Yuriy Greshishchev (Nortel Networks)，Qiuting Huang (Swiss Federal Institute of Technology)，Jaime Kaidontchik (TDK Semiconductor)，TaiCheng Lee (National Taiwan University)，Howard Luong (Hong Kong University of Science and Technology)，Bradley Minch (Cornell University)，Hakki Ozuc (TDK Semiconductor)，Ken Pedrotti (University of California，Santa Cruz)，Gabor Temes (Oregon State University)，以及 Barry Thompson (TDK Semoconductor)。也感谢 McGraw-Hill 的 Michelle Flomenthoft，Betsy Jonse 和 Gloria Schiesl 友好的帮助。

我的妻子 Angelina，在我们结婚不久就鼓励我写这本书，她录入了所有的内容并总是微笑着忍受我工作到很晚。我非常感谢她。

Behzad Razavi
2002 年 7 月

前　言

自本书第一版出版以来，光纤通信领域已经历了一些变化。尽管基础仍然相同，但是光纤通信领域正在试图发现巨大的市场，特别是，产生了大量的“无源光网络”。同时，为了适应宽带应用，已经引入了许多新技术，包括光纤系统。

第二版反映了该领域的新进展。对于跨阻放大器、宽带放大器、激光驱动器、时钟和数据恢复电路的较新的电路技术都在本书中给予介绍。同时，增加了一章专门介绍“突发模式”电路，它是无源光网络的构件。

Behzad Razavi

2012 年 4 月

目　录

第 1 章　光通信简介 …… 1
1.1　历史简述 …… 1
1.2　一般的光纤系统 …… 2
1.3　设计挑战 …… 4
1.4　当前的技术水平 …… 4
参考文献 …… 5
第 2 章　基本概念 …… 6
2.1　随机二进制数据的特性 …… 6
2.2　随机数据的产生 …… 8
2.3　数据格式 …… 10
2.3.1　NRZ 和 RZ 数据 …… 10
2.3.2　8B/10B 编码 …… 11
2.4　带宽受限对随机数据的影响 …… 11
2.4.1　低通滤波的影响 …… 11
2.4.2　眼图 …… 12
2.4.3　高通滤波的影响 …… 14
2.5　噪声对随机数据的影响 …… 15
2.6　相位噪声和抖动 …… 18
2.6.1　相位噪声 …… 18
2.6.2　抖动 …… 19
2.6.3　相位噪声和抖动的关系 …… 20
2.6.4　加性噪声引起的抖动 …… 21
2.7　传输线 …… 22
2.7.1　理想传输线 …… 22
2.7.2　有耗传输线 …… 24
参考文献 …… 25
第 3 章　光器件 …… 26
3.1　激光二极管 …… 26
3.1.1　激光器的工作原理 …… 27
3.1.2　激光器的类型 …… 28
3.1.3　激光器的特性 …… 30
3.1.4　外接调制 …… 32
3.2　光纤 …… 33
3.2.1　光纤损耗 …… 33
3.2.2　光纤色散 …… 34

3.3 光电二极管 …… 38
3.3.1 响应度和效率 …… 39
3.3.2 PIN 二极管 …… 40
3.3.3 雪崩光电二极管 …… 40
3.4 光系统 …… 41
参考文献 …… 43
第 4 章 跨阻放大器 …… 44
4.1 概述 …… 44
4.1.1 TIA 性能参数 …… 46
4.1.2 信噪比计算 …… 49
4.1.3 噪声带宽 …… 52
4.2 开环跨阻放大器（TIA） …… 52
4.2.1 低频性能 …… 52
4.2.2 高频性能 …… 58
4.3 反馈 TIA …… 62
4.3.1 一阶 TIA …… 63
4.3.2 二阶 TIA …… 64
4.4 电源抑制 …… 69
4.5 差分 TIA …… 71
4.6 高性能技术 …… 74
4.6.1 增益提高 …… 74
4.6.2 电容耦合 …… 75
4.6.3 反馈 TIA …… 76
4.6.4 电感峰化 …… 79
4.7 自动增益控制 …… 82
4.8 设计实例研究 …… 85
4.9 TIA 设计的新发展 …… 87
参考文献 …… 91
第 5 章 限幅放大器和输出缓冲器 …… 93
5.1 概述 …… 93
5.1.1 性能参数 …… 93
5.1.2 级联增益级 …… 94
5.1.3 AM/PM 变换 …… 97
5.2 宽带技术 …… 98
5.2.1 电感峰化 …… 99
5.2.2 容性负反馈 …… 100
5.2.3 Cherry-Hooper 放大器 …… 102
5.2.4 f_T 倍增器 …… 105
5.3 输出缓冲器 …… 106

5.3.1 差分传输信号 …… 107
5.3.2 双终端 …… 109
5.3.3 预驱动设计 …… 111
5.4 分布式放大器（DA） …… 113
5.4.1 单片传输线 …… 113
5.4.2 分布式放大器 …… 116
5.4.3 集中元件分布式放大器 …… 121
5.5 其他宽带技术 …… 121
5.5.1 T-线圈峰化 …… 122
5.5.2 负电容 …… 124
5.5.3 有源反馈 …… 127
5.5.4 三谐振峰化 …… 128
参考文献 …… 130
第6章 振荡器基础 …… 132
6.1 概述 …… 132
6.2 环形振荡器 …… 133
6.3 LC 振荡器 …… 141
6.3.1 交叉耦合振荡器 …… 143
6.3.2 考比兹振荡器 …… 144
6.3.3 单端口振荡器 …… 146
6.4 压控振荡器（VCO） …… 150
6.4.1 环形振荡器的调谐 …… 152
6.4.2 用 LC 振荡器调谐 …… 158
6.5 VCO 的数学模型 …… 160
参考文献 …… 164
第7章 LC 振荡器 …… 165
7.1 单片电感 …… 165
7.1.1 损耗机制 …… 166
7.1.2 电感建模 …… 169
7.1.3 电感设计指导 …… 171
7.2 单片变容二极管 …… 174
7.3 基本 LC 振荡器 …… 175
7.3.1 差分控制 …… 177
7.3.2 设计过程 …… 179
7.4 正交振荡器 …… 181
7.4.1 同相耦合 …… 183
7.4.2 反相耦合 …… 183
7.5 分布式振荡器 …… 185
参考文献 …… 186

第 8 章　锁相环 …… 188
8.1　简单的锁相环 …… 188
8.1.1　鉴相器 …… 188
8.1.2　基本的锁相环电路 …… 189
8.1.3　简单锁相环的动态特性 …… 195
8.2　电荷泵锁相环 …… 200
8.2.1　锁定捕获问题 …… 200
8.2.2　鉴相/鉴频器与电荷泵 …… 201
8.2.3　基本的电荷泵锁相环 …… 204
8.3　锁相环的非理想影响 …… 209
8.3.1　PFD/CP 非理想性 …… 209
8.3.2　锁相环中的抖动 …… 212
8.4　延迟锁相环 …… 214
8.5　应用 …… 216
8.5.1　倍频和频率合成 …… 216
8.5.2　减少时延 …… 217
8.5.3　减小抖动 …… 218
参考文献 …… 219
第 9 章　时钟和数据恢复 …… 220
9.1　概述 …… 220
9.2　随机数据鉴相器 …… 228
9.2.1　Hogge 鉴相器 …… 228
9.2.2　Alexander 鉴相器 …… 232
9.2.3　半速鉴相器 …… 235
9.3　随机数据鉴频器 …… 237
9.4　CDR 的结构 …… 241
9.4.1　全速无参考频率结构 …… 242
9.4.2　双 VCO 电路结构 …… 242
9.4.3　具有外部参考的双环结构 …… 243
9.4.4　四分之一速率鉴相器 …… 244
9.5　CDR 电路的抖动 …… 245
9.5.1　抖动传递 …… 246
9.5.2　抖动的产生 …… 249
9.5.3　抖动容限 …… 250
参考文献 …… 253
第 10 章　复接器和激光驱动器 …… 254
10.1　复接器 …… 254
10.1.1　2∶1 MUX …… 254
10.1.2　MUX 的结构 …… 258

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

10.2 分频器（频率除法器） …… 261
10.2.1 触发电路分频器 …… 261
10.2.2 Miller 分频器 …… 266
10.3 激光驱动器 …… 267
10.3.1 性能参数 …… 268
10.4 设计原理 …… 270
10.4.1 功率控制 …… 274
10.5 激光驱动器设计的新进展 …… 276
参考文献 …… 280
第 11 章 突发模式电路 …… 282
11.1 无源光网络 …… 282
11.2 突发模式跨阻放大器（BM TIA） …… 283
11.2.1 具有顶部和底部保持的跨阻放大器 …… 284
11.2.2 突发模式跨阻放大器的变种 …… 286
11.2.3 限幅放大器中的失调校正 …… 289
11.3 突发模式 CDR 电路 …… 290
11.3.1 有限时延的影响 …… 291
11.3.2 频率失配和偏差的影响 …… 292
11.3.3 抖动特性 …… 295
11.4 另一种突发模式 CDR 电路 …… 297
参考文献 …… 299

第1章　光通信简介

通信网数据业务的快速增长重新点燃了人们对高速光电子器件和系统的兴趣。随着因特网规模的增大和微处理器、存储器速度的提高，数据传输依然是通信系统的瓶颈，这一切激励了人们开展对更快速的通信信道的研究。

用光作为信号载波的想法已出现一个多世纪的时间，然而直到20世纪50年代中期，研究人员才证实光纤可以作为光传输的介质[1]。虽然早期的光纤损耗高，但是，光沿着介质传输具有非常宽的调制带宽的美好前景激励了人们对光通信领域的深入研究，从而导致了光网络在20世纪70年代进入了实用阶段。

本章对光通信做简要概述，帮助读者理解后面章节所引入的一些概念，这些概念将出现在本章的框图中。首先，介绍光通信简史，通过研究一个一般的光纤通信系统，描述它的主要功能。其次，列出设计现代光纤通信收发机设计所面临的挑战。最后，对光收发机设计的当前技术水平和趋势进行简要介绍。

1.1　历史简述

企图“导引”光传输的历史可以追溯到19世纪40年代，当时一个名为Jacque Babinet的法国物理学家证实光可以沿着一股喷出的水柱而发生弯曲。直到19世纪后期，研究者发现光可以在一根弯曲的石英玻璃棒内传输。这样，光纤可以看作是起源于一根柔软的、透明玻璃棒或者塑料棒。

1945年，荷兰德尔夫特技术大学的Abraham van Heel和英国帝国理工学院的Harold Hopkins与Narinder Kapany独立地发表了用一捆光纤传输图像的思想。几乎同时，美国光纤公司的Brian O'Brien认识到“裸的”光纤将能量损失到附近空气中，这启发了van Heel用一个涂敷层包围光线芯，从而降低了损耗。光纤损耗仍然很高，约为1000dB/km，这限制了到内窥镜的应用。

20世纪50年代和60年代，激光器作为强光源的引入在光纤技术中起了关键作用。激光器的宽带调制能力为传输信息提供了极大的潜力，尽管似乎没有合适的介质可以利用。在1966年，英国标准电信实验室的Charles Ko和Charles Hockem提出，如果损耗低于20dB/km，则光纤可以用作信号传输介质。他们同时推测，如果极大地减少光纤中的杂质，则可以获得这样的低损耗。

四年后，Robert Mauer和他的两个同事在康宁玻璃工厂（Corning Glass Works）演示了损耗低于20dB/m的石英光纤。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了提高，在1975年和1979年光纤的损耗分别降低到4dB/km和0.2dB/km。因而，长距离传输大容量信息的梦想得以实现：1977年AT&T和GTE部署了第一个光纤技术电话系统。

光纤通信快速应用于高速数据传输，源于（1）光纤带宽大（25～50GHz），（2）光纤的损耗低（0.15～0.2dB/km）。作为对照，对于双绞线电缆，在100MHz损耗达200dB/m；对于低损耗同轴电缆，在1GHz损耗达500dB/km。同时，用几吉赫兹的载波无线传输几米衰减达数十分贝，其能够支撑的数据速率小于100Mb/s。

光纤提供的巨大带宽（且免费的）已经带来了另一个重要发展：在单个光纤上利用多个光波长（频率）传输几个信道。例如，已经演示了100个波长，每个传输数据速率为10Gb/s，其通信总速率达1Tb/s，距离超过400km。

1.2 一般的光纤系统

光纤通信（OC）的目标是长距离传输大容量数据。例如，欧洲电话业务通过装在横跨大西洋的光纤系统连到美国电话业务。

如图1.1(a)所示，一个简单的光纤通信系统由三部分构成：（1）一个电光传感器（例如，激光器），它把电数据转换成光的形式（也就是说，对于逻辑1，它产生光，对于逻辑0，它保持截止）；（2）光纤，用于传输激光器产生的光信号；（3）一个光检测器（例如，光电二极管），它在光纤的末端检测光，然后将其转换成电信号。将发射端和接收端分别称为“近端”和“远端”。正如第3章将要解释的，电流驱动激光器，光电二极管产生输出电流。

对于长光纤或者低成本光纤，当光从近端传输到远端时，会产生很大的衰减。因此，（1）激光器必须产生高强度的光，即几十毫瓦；（2）光电二极管对光必须具有高灵敏度；（3）光电二极管产生的电信号必须用低噪声放大器放大。这些观察导致了更完全的系统，如图1.1(b)所示，其中“激光驱动器”将大电流传输给激光器，且具有低噪声和充足带宽的跨阻放大器（TIA）对光电二极管的输出进行放大，把它变成电压信号。例如，可以在激光驱动器上加载速率为10Gb/s的数据，调制波长为1.55μm的激光器，跨阻放大器的输出幅度为10mV。

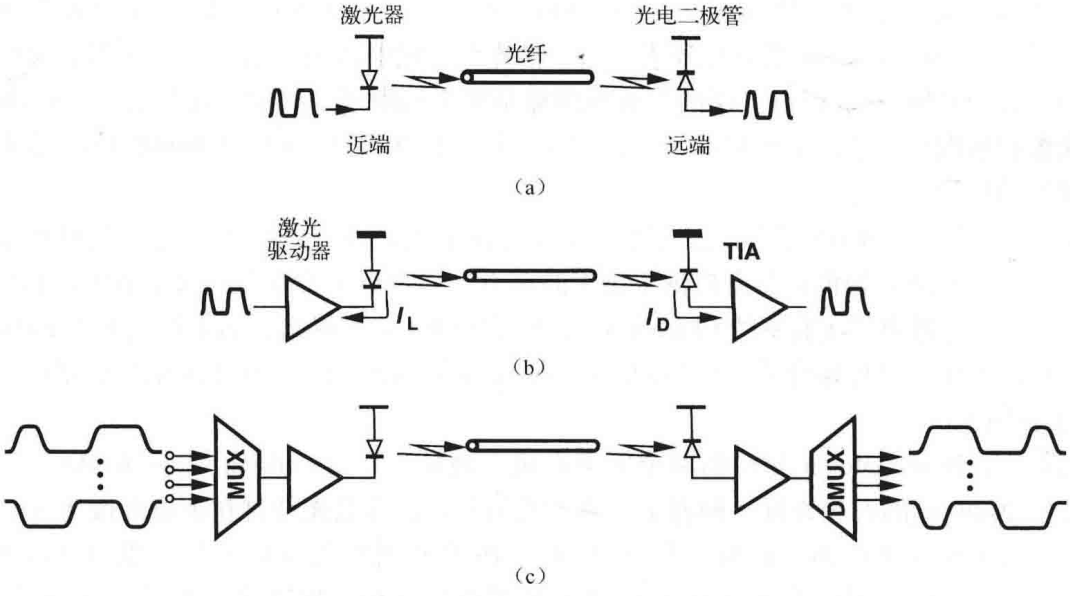

图1.1 光纤系统。(a)简单的光纤系统；(b)加入驱动器和放大器；(c)加入复接器和分接器

图 1.1(b)所示的发射和接收操作处理高速“串行”数据，即速率为 10Gb/s 的单个数据流。然而，因为由多个终端产生，实际提供给发射机（TX）的数据是由很多低速信道（“并行”数据）构成的。并/串转换的任务由复接器（MUX）完成。同样地，接收机（RX）必须包含分接器（DMUX）以重新产生最初的并行信道。这样的系统如图 1.1(c)所示。

图 1.1(c)所示的拓扑仍然不完全，首先考虑发射端，复接器需要一些精确对准的时钟，这些时钟由锁相环（PLL）产生。而且，实际上，复接器的输出具有“抖动”和“符号间干扰”（ISI）等非理想性，在激光驱动器的前面必须使用“净化”的触发器。这些修改引出了图 1.2(a)所示的发射机。

接收端也需要附加的功能。由于跨阻放大器的输出摆幅可能没有大到提供逻辑电平，因此，必须在跨阻放大器后接一个高增益放大器（称为限幅放大器）。而且，由于接收数据可能具有极大的噪声，需要将一个净化触发器（称为判决电路）插在限幅放大器和分接器之间。因而，接收机如图 1.2(b)所示。

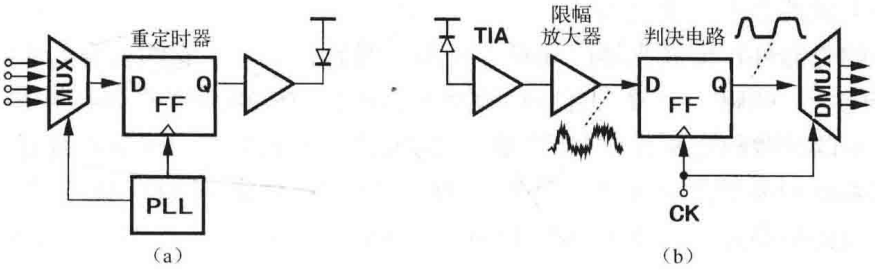

图 1.2　修改后的发射机和接收机。(a)修改后的发射机；(b)修改后的接收机

图 1.2(b)所示的接收机缺乏产生判决电路和分接器所必需的时钟的方法。该时钟与接收数据必须具有定义好的相位关系，以便触发器“最优地”（即在每比特的中点）采样高低电平。从输入数据中产生这样的时钟的任务称为“时钟恢复”。整个时钟恢复和数据净化的操作称为“时钟和数据恢复”（CDR）。图 1.3 示出了一个完整的系统。注意，激光驱动器包括功率控制器（见第 10 章）和具有自动增益控制（AGC，见第 4 章）的 TIA。

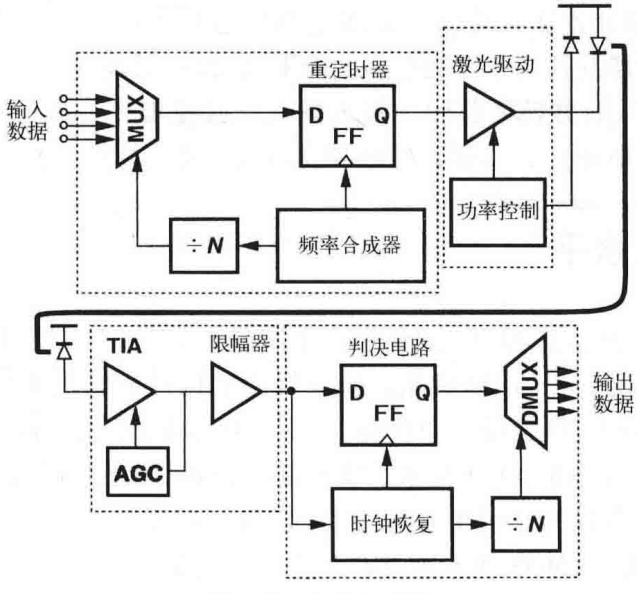

图 1.3　完整的系统

1.3 设计挑战

尽管图 1.3 所示电路的拓扑几十年来没有多少改变，但是构件的设计和集成度已经发生了很大的改变。集成芯片（IC）技术的进步和成本的降低，以及对高性能的需求，这些改变已经带来了新的挑战，必须使用新的电路及新的结构技术。本节概述一些挑战。

图 1.3 所示的发射机在高速和/或大规模集成电路技术中会引起几个问题。由于发射数据的抖动主要由锁相环决定，因此，一个具有高的电源和基片抑制比的强健的低噪声设计是必需的。而且，在高速时，设计没有偏差的复接器是很困难的。

另一个关键挑战来自于激光驱动器，该电路必须传输具有非常短的上升和下降时间的几十毫安的电流。激光器在导通和截止状态可能经历大的电压摆幅，由于大规模集成技术需要低的电压，所以驱动设计变得更加困难。封装的寄生参数也严格地限制了速度，利用该速度，这样高的电流能够开关激光器[2]。

图 1.3 中的光器件，即激光器、光纤、光电二极管，引入了它们自身的非线性，需要电和光设计紧密配合。啁啾、色散、衰减和效率影响在总的链路预算中起主要作用。

图 1.3 所示的接收机也提出了很多问题。跨阻放大器的噪声、增益和带宽，以及限幅器直接影响整个系统的灵敏度和速度，随着电源电压的减小带来了其他问题。而且，时钟和数据恢复功能必须提供高速，容忍长连（序列中相同的比特），并且满足严格的抖动与带宽要求。

图 1.3 所示的收发机全部集成在单个芯片上，这同样引起了一些关注。复接器和分接器中的高速数字信号可能污损接收机输入或者锁相环及时钟和数据恢复电路中的振荡器。激光驱动器的高摆动速率可能导致相同的污损且降低跨阻放大器的灵敏度。最后，由于发射方的锁相环、接收方的时钟和数据恢复电路的振荡器工作频率略有不同（由于两石英晶体频率在通信收发机之间不匹配），它们可能互相“牵引”，产生极大的抖动。

上面的问题导致了多芯片方案，有噪的和灵敏的功能集成在不同的基片上。图 1.3 中的虚线框表明了典型的划分方法，建议采用如下的单芯片组：锁相环/复接器电路（也称为“串行器”），激光驱动器及其功率控制电路，跨阻放大器/限幅器的组合，时钟和数据恢复/分接器电路（也称为“串/并转换器”）。最近的工作已经集成了串行器和串/并转换器［称为“SERDES”（并串/串并）］，但是，接收和发射放大器仍然是单独的。

1.4 当前的技术水平

新的光纤革命令人想起了 20 世纪 90 年代早期的射频（RF）设计的不朽变化。这种复苏带来了三种重要的趋势：（1）模块化，通用目的的构件渐渐被端到端的解决方案取代，该方案从器件/电路/结构的联合设计中获益。（2）单芯片上的更高集成度提供了更好的性能和更低的成本。（3）主流的 VLSI 技术，像 CMOS 和 BiCMOS 继续接管如今 GaAs 和 InP 的领域。现代光纤通信收发机的应用在很多尺寸上继续挑战设计者。

用 CMOS 技术实现 CMOS 技术的成本和集成优势激发人们对高速 CMOS 设计的深入研究。在 CMOS 收发机的设计中，像噪声、速度、电压幅度和基片耦合等因素带来了很多困

难。对10Gb/s的CMOS CDR电路的研究在2000年有了结果[3]。工作于该速率的CMOS串行器和串/并转换器在2002年被报道[4,5]。

速度 随着因特网基架数据传输容量的增加，40Gb/s的光纤通信变得很有吸引力。这样的高速带来了IC设计的新领域，因为以前这些频率（“毫米波频率”）一直限于窄带、低复杂性电路的无线应用。将双极型，尤其是CMOS技术推动到这种速度，设计者必须处理有源和无源器件的宽带特性、芯片上互连的传输线的行为，以及高速封装问题。40Gb/s的SiGe CDR电路已经报道[6]。

集成度 在OC收发机设计中，将一个完整的SERDES集成在单个CMOS芯片上是向大得多的复杂体迈出的第一步。两个重要的趋势特别适合CMOS技术：（1）SERDES与连接网络的大的数字处理器集成在一起（称为帧器）；这种集成消除了它们之间大量的高速PCB线，简化了封装设计并且节约了极大的功率。（2）在一个芯片上集成多个SERDES；由于可以用多个光波长在单个光纤上增加总速率，一个重要的推动是在相同芯片上集成几个SERDES，因而增加了“端口密度”。

功率耗散 在高速和/或高端口密度环境下，光收发机的功率耗散变得很关键，因为它决定整个模块安放的封装类型和尺寸。现有的10Gb/s的SERDES消耗大约1W的功率，如果4个SERDES必须集成在一个芯片上，将导致严重的封装问题。有趣的是，需要低电源电压的深亚微米CMOS技术确实减小了整个耗散功率（例如，输出缓冲器），然而这样却使电路设计更加困难。

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 Solid-State Circuits*, vol. 31, pp. 1076-1090, August 1996.
3. J. Savoj and B. Razavi, “A 10-Gb/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-μm CMOS,” *ISSCC Dig. of Tech. Papers*, pp. 186-187, Feb. 2002.
5. J. Cao et al., “OC-192 Receiver in Standard 0.18-μm CMOS,” *ISSCC Dig. of Tech. Papers*, pp. 187-188, Feb. 2002.
6. M. Reinhold et al., “A Fully Integrated 40-Gb/s Clock and Data Recovery IC with 1:4 DMUX in SiGe Technology,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 36, pp. 1937-1945, Dec. 2001.

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com