

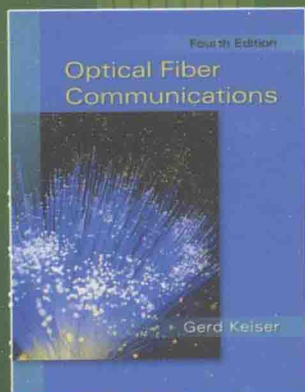
国外电子与通信教材系列

Mc  
Graw  
Hill Education

英文版

# 光纤通信 (第四版)

Optical Fiber Communications  
Fourth Edition



[美] Gerd Keiser 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

# 光纤通信

(第四版)(英文版)

Optical Fiber Communications

Fourth Edition

[美] Gerd Keiser 著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了光纤通信的各方面知识。全书共14章,内容涵盖光纤传输原理和传输特性,半导体光源和光检测器的工作原理与工作特性,数字光纤通信系统和模拟光纤通信系统,光放大器的工作原理和性能,WDM系统原理与器件,光网络与光交换,光纤通信系统的性能测量及管理。与前一版相比,新增了光纤的非线性效应、光子晶体光纤、高速通信中的前向纠错、光载无线通信(ROF)及光缆铺设等新内容。

本书理论体系严谨、内容深入浅出并紧密联系工程实际,适合作为通信工程及相关专业高年级本科生、研究生的光纤通信课程的双语教学教材,对于本领域从事设备设计制造、系统运营管理的工程技术人员也是一本很好的参考书。

Gerd Keiser

### Optical Fiber Communications, Fourth Edition

ISBN: 978-0-07-338071-1, Copyright © 2011 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Bilingual edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2011 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of the Singapore Branch of The McGraw-Hill Companies, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中英双语版专有出版权由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授予电子工业出版社。此版本仅限在中国大陆销售。未经许可的出口,视为违反著作权法,将受法律制裁。

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。

本书封底贴有 McGraw-Hill 公司的激光防伪标贴,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2011-3076

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信 = Optical Fiber Communications : 英文 / (美)凯泽 (Keiser, G.) 著. — 4 版.

北京:电子工业出版社,2011.8

(国外电子与通信教材系列)

ISBN 978-7-121-14081-5

I. ①光… II. ①凯… III. ①光纤通信-高等学校-教材-英文 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第136858号

策划编辑:马 岚

责任编辑:冯小贝

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:787×980 1/16 印张:42.25 字数:946千字

印 次:2011年8月第1次印刷

定 价:75.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,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。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

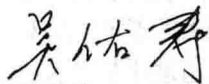
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

# 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

# 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长, 中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报(英文版)》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘彩	中国通信学会副理事长兼秘书长, 教授级高级工程师 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员	
张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院长	
范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长	

物理常数及其单位

常数	符号	数值 (mks 单位制)
真空中的光速度	$c$	$2.99793 \times 10^8$ m/s
电子电荷量	$q$	$1.60218 \times 10^{-19}$ C
普朗克常量	$h$	$6.6256 \times 10^{-34}$ J.s
玻尔兹曼常数	$k_B$	$1.38054 \times 10^{-23}$ J/K
$T = 300$ K 时, $k_B T/q$	—	0.02586 eV
自由空间电容率 (介电常数)	$\epsilon_0$	$8.8542 \times 10^{-12}$ F/m
自由空间磁导率	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ N/A <sup>2</sup>
电子伏特	eV	1 eV = $1.60218 \times 10^{19}$ J
长度单位 (埃)	Å	1 Å = $10^{-4}$ μm = $10^{-8}$ cm
自然对数的底数	e	2.71828
圆周率	$\pi$	3.14159

## 关于作者

Gerd Keiser 是台湾科技大学电子工程系科学顾问委员会的客座教授。他的教学科研兴趣包括光子器件研发、光传输系统、光纤到驻地 (FTTP) 网络、智能建筑和智能家庭网络, 以及生物医学光子学。此外, 他还是光子通信联盟的发起人和首席顾问, 该联盟是针对光通信产业的专门咨询与教育机构。Keiser 博士曾在 Honeywell、GTE 和通用动力等公司任职, 从事光网络和数字交换技术的开发与应用。他在 GTE 的技术成就赢得了 Leslie Warner 奖, 使其声望鹊起。他还担任过美国东北大学、Tufts 大学和波士顿大学的兼职教授。Keiser 博士是 IEEE 的会士、OSA 和 SPIE 的会员、*Optical Fiber* 杂志的副编审及 4 本研究生教材的作者。



# 前 言

## 本书的目标

自1983年本书第一版问世以来,光纤通信历经了令人神往的发展历程。特别值得一提的是,高锟(Charles K. C. Kao)以其超越时代的洞察力发现,可以使用玻璃纤维作为数据传输媒介,其执着的后继工作带来了低损耗光纤的进一步发展,这使得他荣获2009年诺贝尔物理学奖。第一根超纯光纤在高锟预言之后的第四年,即1970年制作成功。这一突破导致与光纤相关的系列技术的发展。最初人们仅关心传输链路技术,随后很快转移到越来越复杂的网络技术。许多新器件和通信技术加入到光纤通信中。其中有的技术获得极大成功,也有的技术因为实现复杂而被淘汰,还有的技术由于过于超前在经历一段时间的休眠期之后再次出现。基于光纤技术的现代大容量电信网络已成为社会不可分割的一部分。这些先进网络的应用领域从简单的网页浏览到电子邮件交互再到健康诊断、网络和云计算及复杂的商业交换。由于网络对于日常生活如此重要,我们越来越期望通信服务能够永远在线并功能合理。要到达这一近乎苛刻的需求,需要对从器件发展到系统设计安装和网络运行维护的所有技术方面进行仔细的工程化考量。

为突出上述技术的成就与现状,本书力求展现基本原理,以利于理解光纤技术并将其广泛应用于现代通信网。读者将能系统地领略光纤链路中器件及其相互间影响的基本原理,掌握复杂光链路和网络的架构与性能特征,了解网络安装与维护中需要的基本测量技术。通过理解、掌握这些基本问题,读者不仅可以从事器件、通信链路或设备的设计,还能预见未来网络技术的发展方向。

## 本书的内容

为达到上述目标,第1章给出了光通信系统的概述。其内容包括采用采用光纤的动因和好处,所使用的频带,WDM如何提高光纤的传输容量,采用的标准及仿真工具。

第2章~第11章描述了光链路中主要元器件的性能特征。这些元器件包括光纤、光源、光检测器、无源光器件、光放大器,以及用于多波长网络中的有源光电器件。光纤是光链路中最为重要的器件。第2章~第3章给出了各类现有光纤的物理结构、所用材料、损耗特性、光传输机理及信号畸变特性。第3章还介绍了光纤制造方法和几种常用光缆。这两章的新增内容包括有关光子晶体光纤的讨论,及其对模式影响和脉冲展宽的改善。

第4章论述了光通信中所用光源的结构、发光原理和工作特性。此外还论述了直接调制和外调制技术、温度效应、器件寿命和线路编码方法。在第5章中描述了如何有效地将光源发射光束耦合进光纤,以及如何将两段光纤以功率损耗最小的方式连接起来。

光接收机的任务是检测到光信号并将其转换为可被后继电接收机处理的电信号。第6章内容包括光检测器的结构与响应特性。第7章描述了光接收机的原理和功能。第7章中的新内容包括光接收机工作特征的简化数学描述、信号检测的统计概念、眼图测量方法,以及用于无源光网络的突发模式接收机简介。

第8章~第9章分别介绍了数字和模拟链路的设计方法。第8章包括链路功率预算和带宽限制的讨论。新内容包括功率代价、基本相干检测方案和数字信号差错控制方法。第9章增加了在光纤



中传输微波射频模拟信号的概念。射频光传输技术的一个扩展应用是室外和大楼内移动终端的宽带光载无线电 (ROF) 网络。

第 10 章论述了波分复用 (WDM) 的原理, 介绍了普通 WDM 链路的功能, 讨论了不同 WDM 方案的国际标准。本章的新内容包括有源和无源 WDM 器件的描述与应用举例, 例如光纤布拉格光栅、薄膜滤波器、阵列波导光栅、衍射光栅和可调光衰减器等。

第 11 章描述了实现光放大的不同方法。包括半导体光放大器、掺杂光纤放大器和新型的拉曼放大器。除了传统掺饵光纤放大器 (EDFA) 的论述, 还有用于 S 波段的掺铥光纤放大器 (TDFA) 和用于 L 波段的增益移位 EDFA 的新结构。

第 12 章~第 14 章展示了如何将各个元件组合成链路和网络, 给出了评估光器件和链路性能的测量方法。第 12 章的新内容包括光纤中的非线性过程的来源与影响。许多非线性效应会导致系统性能劣化, 必须予以控制, 而另一些如受激拉曼散射效应则可以加以利用。

第 13 章扩展了有关长途、城域、局域和接入光网络的内容。新内容包括运行于 160 Gb/s 以上的高速光链路, 光分插复用器和光交叉连接的概念, 波长路由, 光分组交换, 光突发交换, 无源光网络, IP over WDM, 光以太网, 以及减小高速网络传输损伤的技术等。

最后一章讨论了性能监测。论题包括国际认可的测量标准, 光纤链路的基本测试仪表, 光纤的建模方法, 通过眼图测量评估链路性能。特别要强调的是对 WDM 链路的评估。第 14 章的新内容包括眼图模板、压缩眼图测试、误码率眼图轮廓等概念。其他新内容包括光性能监测, 这已成为光网络的基本功能, 特别是与误码监测、网络运行维护和故障管理等相关的内容。

## 本版新增内容

本书第四版新增加的内容如下:

- 光纤通信的频谱划分。
- 描述了光子晶体光纤, 一种通过内部微结构增加控制纤维中光的又一个维度的光纤。
- 回顾了光纤光缆在包括室内管线到海底链路等各种环境中的铺设方法。
- 描述了用于与光波相互作用, 以便控制、管理光信号的特种光纤。
- 讨论各种国际标准, 规范不同类别的光纤的参数, 从而保证工业领域的兼容性。
- 举例说明了商用收发器组件的特性与封装。
- 举例说明了商用光纤连接器的特性与封装。
- 讨论了用于无源光网络的突发模式光接收机的特性。
- 扩充了传输链路的功率代价。
- 扩充了用于 10 Gb/s 或更高速率的单模光纤链路。
- 新增加了相干检测, 相对于直接检测方式, 相干检测可以提高谱纯度、提高抗色散性能。
- 新增了用于超过 10 Gb/s 速率传输链路的数字四相移键控 (DQPSK) 方法。
- 新增了数字差错检测和纠错方法, 包括多项式编码与前向纠错 (FEC) 技术。
- 新增了用于无线接入网、室内环境无线服务、家庭个域网连接的光载射频技术。
- 扩充了用于波分复用的光子器件内容。
- 新增了拉曼光放大器技术, 扩展了掺饵光纤放大器技术。

- 新加了一章，讲述光纤中的非线性效应及其影响。
- 显著扩展了光网络的内容，包括高速光链路，光分插复用器，光交换，WDM网络举例，IP over WDM，光以太网，用于光纤到驻地（FTTP）的无源光网络应用。
- 修改了性能测试与监测的相关内容，包括眼图测试，光性能监测（OPM）功能，性能测试功能，例如包括误码率（BER）、光信噪比（OSNR）、 $Q$ 值、光调制幅度（OMA）和定时抖动在内的性能测试。

## 本书的使用

第四版提供了有关光纤通信技术的理论和应用的基本材料，可用于高年级或研究生课程。本书还可用做工作参考书，为从事光纤通信系统相关器件、传输设备、测试仪表设计开发和光缆工厂的应用工程师服务。学习本书，应具有高年级工科学生的理论基础，包括电磁场理论、微分方程、光学基础。本书的正文部分也对光学概念、电磁理论和基本半导体物理等几个主要基础知识进行了简要回顾。许多涉及到进一步知识的章节（如麦克斯韦尔方程组在圆柱介质波导中的应用）用星号标注，可以跳过而不失连续性。为了帮助读者学习和设计实践运用，本书提供了143个例题；并收集了277个习题，帮助测试读者对本书所覆盖和延伸内容的理解。授课教师可通过原出版商获得这些习题解答<sup>①</sup>。

每章结束都提供了大量的参考资料作为深入学习所涉及专题的起点。由于光纤通信将多个科学和工程学科领域的研究与开发力量汇聚在一起，各章所涉内容的相关文献有数百篇。参考文献虽然无法列出全部文章，但是选择了对纤维光学领域具有重要贡献的文章，以作为所涉领域的良好导引。有关最新发展的参考材料可以在专业教材和许多会议论文集集中找到。

为帮助作者理解和使用本书，书中给出了相关的物理常数及其单位。附录A~附录D给出了国际单位制、完成习题所需的数学公式等。附录E~附录G给出了缩写术语、拉丁文符号和希腊文符号。

计算机建模与仿真工具为制造原型机之前帮助分析设计光器件、电路和网络提供了有效的途径。本书网址（[www.mhhe.com/KeiserOFC](http://www.mhhe.com/KeiserOFC)）介绍了关于仿真模块的简单可交互演示版。这些仿真模块可从三个仿真工具的公司网址下载。简化版含有超过100个预先定义的模块和链路配置用于交互式的概念演示。尽管配置是固定的，用户仍可通过参数设置或开关来看到不同效应的系统性能。

## 本书网址

为学习和下载交互式仿真演示，我们还提供了网络链接，网址[www.mhhe.com/KeiserOFC](http://www.mhhe.com/KeiserOFC)还会提供本书相关的新技术发展和最新参考资料信息。可为授课教师提供课外习题的系统解答及部分教学幻灯片和插图。为授课教师提供的相关内容需授权下载，相应的密码由出版商向教师提供<sup>②</sup>。

## COSMOS（仅提供给授课教师）

McGraw-Hill的COSMOS（完全在线解决方案组织系统）允许授课教师从教材所属问题与解答和他们自己的材料中生成课后任务、课题讨论与测试。COSMOS系统现在可以从<http://cosmos.mtte.com/>网址获得。

<sup>①</sup> 参见书后的“教学支持说明”。

## 致 谢

在这本书及其早期版本的准备过程中，我要特别感谢那些经常与我讨论并以不同方式帮助过我的人，以及那些为书稿准备材料的人。特别要感谢美国海军研究生院的 Tri T. Ha，他给予我灵感并鼓励我撰写了本书的第一版。我与学术界的很多同仁进行过有益的交流，他们的研究报告给了我很大的帮助，包括美国东北大学和加州圣迭戈大学的 John Proakis；波士顿大学的 Selim Ünlü、Michael Ruane 和 Malvin Teich；台湾科技大学（NTUST）的 Shi-Shuenn Chen、San-Liang Lee、Cheng-Kuang Liu 和 Shih-Hsiang Hsu；圣约翰大学（台湾）的 Jean-Lien Chen Wu；南洋科技大学的 Perry Ping Shum；台湾大学的 Hung-Chun Chang、Hen-Wei Tsao、Jingshown Wu 和 Chih-Chung Yang；台湾中山大学的 Wood-Hi Cheng；莫那什大学的 Arthur Lowery；南加州大学的 Alan E. Willner；加州大学圣芭芭拉分校的 Daniel Blumenthal；新南威尔士大学的 Francois Ladouceur；悉尼大学的 Robert Minasian 和 Benjamin Eggleton；马萨诸塞大学卢维尔分校的 Craig Armiento；台湾辅仁大学的 Hui-Chi Chen；香港中文大学的 Lian-Kuan Chen 和 Hon Tsang；台湾阳明大学的 Arthur Chiou 和 Fu-Jen Kao；中佛罗里达大学的 Bahaa Saleh 和 Guifang Li；韩国仁荷大学的 El-Hang Lee；韩国科学技术学院的 Yun Chung；北京交通大学的吴重庆；北京邮电大学的林金桐和徐坤；新加坡资讯通信研究院的 Emily Jianzhong Hao；约翰内斯堡大学的 Heidi Abrahamse；剑桥大学的 Richard Penty 和 Ian White；皇家墨尔本科技学院（RMIT）的 Sarah Dods；以及斯特拉斯克莱德大学的 Brian Culshaw。另外，很高兴在 NTUST 与 Chu-Lin Chang、Daniel Liang-Tang Chen、Olivia Devi Haobijam、Hsin-Yi Hsu、Shu-Min Hsu、Kuo-Ming Huang、Ming-Je Huang、Yung-Jr Hung、Yu-Jhu Jhang、Chen-Yu Lee、Shu-Chuan Lin、Zih-Rong Lin、Hua-Liang Lo 和 Joni W. Simatupang 合作。

其他以各种方式帮助过我的人包括 William (Bill) Beck、Troy Bergstrom、Bertand Destieux、Emmanuel Desurvire、Paul Fitzgerald、Doug Forster、Paul Fowler、Enrico Ghillino、André Girard、Jim Hayes、Frank Jaffer、Jan Jakubczyk、Joy Changhong Jiang、Jack Kretovics、Hui-Ru Lin、André Richter、Bruce Robertson、Rosmin Robertson、Dirk Seewald、Douglas Walsh 及 Winston I. Way。尤其要感谢以下提供图片的人：Simone Baldassari、Evie Bennett、Michael Kwok、Courtney McDaniel、Victoria McDonald、Robert E. Orr、Erika Peterssen、Jeff Sitlinger、Randa Van Dyk、Brad Wackerlin 及 Stephanie H. Webb。

我还要感谢众多的评论者，他们给了我很多有益的帮助，提高了文稿的质量，并使之清晰易懂。他们是科罗拉多大学的 Frank Barnes；加州大学北岭分校的 Nagwa Bekir；乔治亚理工学院的 John A. Buck；新墨西哥州立大学的 Sang-Yeon Cho；弗吉尼亚理工大学的 Ira Jacobs；亚利桑那大学的 Raymond K. Kostuk；塔尔萨大学的 Peter LoPresti；拉费特维尔的路易斯安那大学的 Zhongqi Pan；俄勒冈州立大学的 Thomas K. Plant；内华达大学里诺校区的 Banmali Rawat；杨伯翰大学的 Stephen Schultz；以及佛罗里达大学的 Huikai Xie。世界范围内众多学术机构的用户对前面几个版本给予了积极的评价，鼓励我出版本书的第四版。

这个版本尤其受益于 McGraw-Hill 的 Lisa Brufl odt、Lorraine Buczek、Carrie Burger、Peter Massar 和 Raghu Srinivasa，以及 Glyph International 的 Deepti Narwat Agarwal 和 Kay Mikel 等人的专业指导。最后，要感谢我的妻子 Ching-yun 及女儿 Nishla 在本书的撰写和修订过程中给予的耐心和鼓励。

# 目 录

第 1 章 光纤通信概述 .....	1
1.1 光通信的发展动因 .....	2
1.1.1 光网络的发展历程 .....	2
1.1.2 光纤的优势 .....	5
1.2 光谱带 .....	5
1.2.1 电磁能量 .....	5
1.2.2 低损耗窗口和频段 .....	8
1.3 分贝单位 .....	9
1.4 网络信息速率 .....	12
1.4.1 电信信号的复用 .....	12
1.4.2 SONET/SDH 复用体系 .....	13
1.5 波分复用概念 .....	15
1.6 光纤通信系统的关键单元 .....	15
1.7 光纤通信标准 .....	19
1.8 建模与仿真工具 .....	20
1.8.1 仿真工具的特征 .....	20
1.8.2 编程语言 .....	21
1.8.3 适于学生使用的程序举例 .....	23
习题 .....	23
参考文献 .....	24
第 2 章 光纤：结构、导波原理及制造 .....	27
2.1 光的特性 .....	27
2.1.1 线偏振 .....	28
2.1.2 椭圆偏振和圆偏振 .....	31
2.1.3 光的量子特性 .....	33
2.2 基本的光学定律和定义 .....	33
2.2.1 折射率 .....	33
2.2.2 反射和衍射 .....	34
2.2.3 光偏振器件 .....	36
2.2.4 偏振敏感材料 .....	38
2.3 光纤模式及结构 .....	39

2.3.1	光纤分类 .....	40
2.3.2	射线和模式化 .....	42
2.3.3	阶跃折射率光纤结构 .....	43
2.3.4	射线光学表述 .....	43
2.3.5	介质平板波导中的波动表述 .....	45
2.4	圆波导的模式理论 .....	47
2.4.1	模式概述 .....	48
2.4.2	关键的模式概念汇总 .....	49
2.4.3	麦克斯韦方程组* .....	51
2.4.4	波导方程* .....	52
2.4.5	阶跃折射率光纤中的波方程* .....	54
2.4.6	模式方程* .....	55
2.4.7	阶跃折射率光纤中的模式* .....	57
2.4.8	线偏振模* .....	60
2.4.9	阶跃折射率光纤中的功率流* .....	63
2.5	单模光纤 .....	65
2.5.1	结构 .....	65
2.5.2	模场直径 .....	65
2.5.3	单模光纤中的传播模 .....	67
2.6	渐变折射率光纤结构 .....	68
2.7	光纤材料 .....	70
2.7.1	玻璃光纤 .....	70
2.7.2	有源玻璃光纤 .....	71
2.7.3	塑料光纤 .....	71
2.8	光子晶体光纤 .....	72
2.8.1	折射率导引 PCF .....	72
2.8.2	光子带隙光纤 .....	73
2.9	光纤的制造 .....	74
2.9.1	外部气相氧化法 .....	75
2.9.2	气相轴向沉积法 .....	75
2.9.3	改进的化学气相沉积法 .....	76
2.9.4	等离子催化化学气相沉积法 .....	76
2.9.5	光子晶体光纤的制备 .....	77
2.10	光纤的机械性能 .....	78
2.11	光缆 .....	82
2.11.1	光缆结构 .....	83
2.11.2	室内光缆设计 .....	84
2.11.3	户外光缆 .....	86

2.12 光缆铺设方法 .....	87
2.12.1 直埋铺设 .....	87
2.12.2 管道中的光缆拖曳 .....	88
2.12.3 光缆喷射铺设 .....	89
2.12.4 陆地铺设 .....	90
2.12.5 水下铺设 .....	91
2.12.6 行业铺设标准 .....	92
习题 .....	93
参考文献 .....	96
<b>第3章 损耗和色散 .....</b>	<b>102</b>
3.1 损耗 .....	102
3.1.1 损耗单位 .....	103
3.1.2 吸收 .....	104
3.1.3 散射损耗 .....	108
3.1.4 弯曲损耗 .....	111
3.1.5 纤芯和包层损耗 .....	113
3.2 光纤中的信号畸变 .....	114
3.2.1 色散综述 .....	114
3.2.2 模式延迟 .....	116
3.2.3 色散因素 .....	118
3.2.4 群延迟 .....	119
3.2.5 材料色散 .....	121
3.2.6 波导色散 .....	123
3.2.7 单模光纤的色散 .....	124
3.2.8 偏振模色散 .....	126
3.3 单模光纤性能 .....	128
3.3.1 折射率剖面 .....	128
3.3.2 截止波长 .....	130
3.3.3 色散计算 .....	132
3.3.4 模场直径 .....	135
3.3.5 弯曲损耗 .....	135
3.4 国际标准 .....	138
3.4.1 G.651.1 建议 .....	138
3.4.2 G.652 建议 .....	138
3.4.3 G.653 建议 .....	141
3.4.4 G.654 建议 .....	141
3.4.5 G.655 建议 .....	141

3.4.6	G.656 建议 .....	141
3.4.7	G.657 建议 .....	142
3.5	特殊光纤 .....	142
	习题 .....	145
	参考文献 .....	147
<b>第 4 章</b>	<b>光源</b> .....	<b>151</b>
4.1	半导体物理专题 .....	152
4.1.1	能带 .....	152
4.1.2	本征材料和非本征材料 .....	154
4.1.3	pn 结 .....	156
4.1.4	直接带隙和间接带隙 .....	157
4.1.5	半导体器件制作 .....	158
4.2	发光二极管 (LED) .....	158
4.2.1	LED 的结构 .....	158
4.2.2	光源材料 .....	161
4.2.3	量子效率和 LED 发射功率 .....	165
4.2.4	LED 的调制特性 .....	168
4.3	半导体激光器 .....	170
4.3.1	半导体激光器的模式和阈值条件 .....	171
4.3.2	半导体激光器的速率方程 .....	177
4.3.3	外量子效率 .....	178
4.3.4	谐振频率 .....	179
4.3.5	半导体激光器结构和辐射方向图 .....	180
4.3.6	单模激光器 .....	185
4.3.7	半导体激光器的调制特性 .....	189
4.3.8	激光器线宽 .....	190
4.3.9	外调制 .....	191
4.3.10	温度影响 .....	193
4.4	线路编码 .....	195
4.4.1	非归零和归零信号格式 .....	195
4.4.2	分组码 .....	196
4.5	光源的线性特性 .....	196
4.6	可靠性考虑 .....	198
4.7	单片封装光发送机 .....	202
	习题 .....	204
	参考文献 .....	208



<b>第 5 章 光功率发射和耦合</b> .....	211
5.1 光源至光纤的功率发射 .....	212
5.1.1 光源的输出方向图 .....	212
5.1.2 功率耦合计算 .....	213
5.1.3 发射功率与波长的关系 .....	216
5.1.4 稳态数值孔径 .....	217
5.2 改善耦合的透镜结构 .....	218
5.2.1 非成像微球 .....	219
5.2.2 半导体激光器与光纤的耦合 .....	220
5.3 光纤与光纤的连接 .....	221
5.3.1 机械对准误差 .....	223
5.3.2 光纤相关损耗 .....	229
5.3.3 光纤端面制备 .....	230
5.4 LED 与单模光纤的耦合 .....	231
5.5 光纤接头 .....	232
5.5.1 连接方法 .....	233
5.5.2 单模光纤的连接 .....	234
5.6 光纤连接器 .....	235
5.6.1 连接器的类型 .....	235
5.6.2 单模光纤连接器 .....	239
5.6.3 连接器回波衰减 .....	240
习题 .....	242
参考文献 .....	244
<b>第 6 章 光检测器</b> .....	248
6.1 光电二极管的物理原理 .....	249
6.1.1 pin 光电二极管 .....	249
6.1.2 雪崩光电二极管 .....	253
6.2 光检测器噪声 .....	257
6.2.1 噪声源 .....	257
6.2.2 信噪比 .....	261
6.2.3 噪声等效功率 .....	262
6.3 检测器响应时间 .....	263
6.3.1 耗尽层光电流 .....	263
6.3.2 响应时间 .....	264
6.3.3 双异质结光电二极管 .....	267
6.4 雪崩倍增噪声 .....	267
6.5 InGaAs APD 结构 .....	270

6.6	温度对雪崩增益的影响 .....	270
6.7	光检测器比较 .....	272
	习题 .....	273
	参考文献 .....	275
<b>第7章</b>	<b>光接收机 .....</b>	<b>277</b>
7.1	接收机工作的基本原理 .....	278
7.1.1	数字信号传输 .....	278
7.1.2	误码源 .....	280
7.1.3	前端放大器 .....	282
7.2	数字接收机性能 .....	283
7.2.1	差错概率 .....	283
7.2.2	接收机灵敏度 .....	287
7.2.3	量子极限 .....	290
7.3	眼图 .....	291
7.3.1	眼图的特征 .....	291
7.3.2	BER 和 $Q$ 因子测量 .....	293
7.4	突发模式接收机 .....	294
7.5	模拟接收机 .....	297
	习题 .....	300
	参考文献 .....	302
<b>第8章</b>	<b>数字链路 .....</b>	<b>304</b>
8.1	点到点链路 .....	305
8.1.1	系统考虑 .....	306
8.1.2	链路功率预算 .....	307
8.1.3	上升时间预算 .....	310
8.1.4	短波长带 .....	313
8.1.5	单模光纤的损耗受限距离 .....	314
8.2	功率代价 .....	316
8.2.1	色度色散代价 .....	316
8.2.2	偏振模色散代价 .....	318
8.2.3	消光比代价 .....	319
8.2.4	模式色散 .....	319
8.2.5	模分配噪声 .....	322
8.2.6	啁啾 .....	323
8.2.7	反射噪声 .....	325
8.3	差错控制 .....	327