



中国科学院电子信息与通信系列规划教材

# 光纤通信系统

延凤平 裴丽 宁提纲 编著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

中国科学院电子信息与通信系列规划教材

# 光纤通信系统

延凤平 裴丽 宁提纲 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书分信号发射源、传输和接收三部分阐述光纤通信系统的构成及工作机理,并在此基础上,进一步介绍了光纤通信系统的设计方法和各种支持高速、长距离、大容量光纤通信的新技术。

全书由12章组成,内容包括:光纤通信系统的起源和发展阶段,光纤的基本理论及传输特性,光源及调制,光探测器及光接收机噪声分析,接收机灵敏度分析,光纤通信系统设计,光无源器件,光放大器,光网络及光纤测量等。

本书可作为高等院校通信工程及相关专业本科生的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统/延凤平,裴丽,宁提纲编著. —北京:科学出版社,2006

(中国科学院电子信息与通信系列规划教材)

ISBN 7-03-017293-0

I. 光… II. ①延…②裴…③宁… III. 光纤通信-通信系统-教材  
IV. TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第052464号

责任编辑:匡敏 余江 潘继敏/责任校对:鲁素

责任印制:张克忠/封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2006年8月第一次印刷 印张:16 1/4

印数:1—3 000 字数:295 000

定价:25.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

# 《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》

## 编委会

顾 问：保 铮 中国科学院院士 西安电子科技大学  
刘永坦 两院院士 哈尔滨工业大学  
陈俊亮 两院院士 北京邮电大学

主 任：谈振辉 教授 北京交通大学

副主任：任晓敏 教授 北京邮电大学

梁昌洪 教授 西安电子科技大学

冯正和 教授 清华大学

张文军 教授 上海交通大学

林 鹏 编审 科学出版社

委 员：(按姓氏汉语拼音排序)

段哲民 教授 西北工业大学

顾学迈 教授 哈尔滨工业大学

洪 伟 教授 东南大学

焦李成 教授 西安电子科技大学

李少谦 教授 电子科技大学

毛军发 教授 上海交通大学

沈连丰 教授 东南大学

唐朝京 教授 国防科学技术大学

王成华 教授 南京航空航天大学

王文博 教授 北京邮电大学

徐安士 教授 北京大学

严国萍 教授 华中科技大学

杨建宇 教授 电子科技大学

姚 彦 教授 清华大学

张宏科 教授 北京交通大学

张晓林 教授 北京航空航天大学

秘 书：段博原 编辑 科学出版社

## 丛 书 序

信息技术的高速发展及广泛应用,使信息技术成为当今国际竞争中最重要战略技术。信息技术对经济建设、社会变革乃至国家安全起着关键性的作用,它是经济发展的“倍增器”和社会进步的“催化剂”,是体现综合国力的重要标志。在人类历史上,没有一种技术像信息技术这样引起社会如此广泛、深刻的变革。在 20 世纪末和 21 世纪前半叶,信息技术乃是社会发展最重要的技术驱动力,可以说,21 世纪人类已经步入了信息时代。信息产业在世界范围内正在由先导产业逐步变为主导产业。从微观上看,表现为单位产品的价格构成中,能源和材料的消耗减少而信息技术和信息服务的比重上升;从宏观上看,表现为国民生产总值(GDP)中信息产业所占的比重增加。一个国家信息产业的发展水平将是衡量该国社会经济总体发展和现代化程度的重要标志之一。

目前,信息科学已成为世界各国最优先发展的科学之一。党的十六大提出了“加速发展信息产业,大力推进信息化,以信息化带动工业化”的发展战略,以及“优先发展信息产业,在经济和社会领域广泛应用信息技术”的基本国策,使我国信息产业得到了前所未有的重视,信息产业呈现出飞速发展的势头。信息产业的发展离不开信息化人才,信息化人才建设将是信息产业可持续发展的关键。然而,有关调查表明,我国国家信息化指数为 38.46,而信息化人才资源指数仅为 13.43。据权威机构预测,从 2005 年到 2009 年,中国信息行业将以 18.5% 的年复合增长率高速增长,中国信息市场将迎来又一个“黄金年代”。

为了适应新世纪信息学科尤其是电子信息与通信学科的长足发展,在规模上、素质上更好地满足我国信息产业和信息科学技术的发展需要,更好地实现电子信息与通信学科专业人才的培养目标,推进国内信息产业的发展,中国科学院教材建设专家委员会和科学出版社组织电子信息与通信领域的院士、专家、教学指导委员会成员、国家级教学名师及电子信息与通信学科院校的相关领导等组成编委会,共同组织编写这套《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》。

本套教材主要面向全国范围内综合性院校电子信息工程、通信工程、信息工程等相关专业的本科生。本套教材的编委会成员具有国内电子信息与通信方面的高学术水平,他们负责对本套教材的编写大纲及内容进行审定,可使本套教材的质量得以保证。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。依据最新专业规范,系列教材主要根据教育部最新公

布的电子信息与通信学科相关专业的“学科专业规范”和“基础课程教学基本要求”进行教材内容的安排与设置。同时,根据各类型高校学生的实际需要,编写不同层次的教材。

2. 结构体系完备。本套教材覆盖本科、研究生教学层次,各门课程的知识之间相互衔接,以便完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。

3. 作者水平较高。我们将邀请设有电子、通信国家重点学科的院校,以及国家级、省级教学名师或国家级、省级精品课程负责人编写教材。

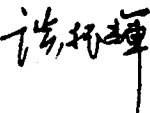
4. 借鉴国外优秀教材。编委会为每门课程推荐一本国外相关的经典原版教材,作为教师编写的参考书。

5. 理论与实际相结合,加强实践教学。教材编写注重案例和实践环节,着力于学生实际动手能力的培养。

6. 教材形式多样。本套教材除主教材外,还配套有辅导书、教师参考书、多媒体课件、习题库及网络课程等。

根据电子信息与通信学科专业发展的战略要求,我们将对本套系列教材不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子信息与通信领域教育及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。

北京交通大学校长



2005年10月

## 前 言

自从 20 世纪 70 年代第一根低损耗光纤和可在室温下连续工作的半导体激光器问世以来,光纤通信以其具有损耗小、传输容量大、重量轻等特点迅速取代同轴电缆,在全世界通信领域得到应用和普及,形成高速、大容量且具有自愈功能的光纤网络,并在此基础上进一步建立了支持固定点通信和移动通信的可容纳各种速率数据和话音业务的信息网。正因为如此,光纤通信被认为是 20 世纪人类最伟大的技术发明之一,是当今信息社会的基石。

在 30 余年的发展历程中,光纤通信不仅在支持自身的技术上取得了巨大进步,而且形成了遍布全球的支持各种信息传输业务的功能强大的光网络,发挥出极其巨大的经济效益和社会效益。光纤通信技术的进步是在激光器技术、光纤技术和光放大技术等不断取得突破的条件下实现的,在掺铒光纤放大器(EDFA)、掺铋光纤放大器(TDFA)、拉曼光纤放大器(RFA)、密集波分复用(DWDM)、光时分复用(OTDM)、色散管理、色散补偿、分布反馈(DFB)激光器、量子阱激光器、高速调制及前向纠错(FEC)、偏振复用等技术的支持下,实验室两根光纤可支持的数据速率已经达到 10.92Tbit/s,商用的数据传输速率最高也可达到太比特每秒(Tbit/s),无电中继传输距离可达数千公里,从而为当今社会的信息传输提供了一个无限宽广的通道。但是由于光层交换的技术没有取得突破,这在很大程度上限制了光纤网数据传输速率优势的发挥,成为阻碍光纤到户(FTTH)发展进程的主要原因之一。

现在,光交换研究的热潮已经兴起,并在某些方面(如基于可变波长激光器和可选波长光探测器的光路交换、粗粒度的光突发交换及光分组交换等)已经取得一定的进展。如果光交换的技术能获得成功,将会带来光信息网络方面的一次革命,由此实现光通信网络高速传输和高速交换,促进光纤网络向更深更广方面发展,使 FTTH 成为现实。

本书是编者结合多年从事本科生和研究生“光波技术基础”、“光纤通信系统”、“光纤传感技术”、“光纤测量”等课程的教学,以及科研实践的基础上形成的,同时也参阅了大量有价值的参考文献。编写目的就是力求为读者提供一套较为完整的光纤通信系统方面的知识,使其既具备成熟的光纤通信系统的基本理论,又掌握当今光纤通信的新技术,并了解其发展趋势。

全书分为 12 章,第 1 章为引言,从光通信器件的发展及光纤通信系统的演进两个方面回顾了光通信的历史,介绍了准同步数字体系 PDH 和同步数字体系

SDH 的特点及 10.92Tb/s 光纤传输系统的构成及其性能。分光发射机、传输光纤和光接收机三个部分简述了数字光纤通信系统的组成,并介绍了光纤通信系统的特点。第 2 章为光纤理论,从一维平面光波导中的模式理论分析出发给出了模式的一般概念。通过对光纤的矢量模和标量模分析,揭示了光纤中模式的特性、场分布规律以及单模光纤的模场直径和模式传播特性。最后分析和讨论了光纤的制作工艺、光缆结构及其特性。第 3 章为光纤的传输特性,对光纤中损耗的形成原因及表示方法,光纤中色散的产生因素、表示方法及色散补偿和色散管理措施,光纤中的非线性因素及抑制方法等进行了阐述。第 4 章为光源,对激光产生的条件及特性、半导体材料中的能带特性、PN 结的形成、发光二极管(LED)和激光二极管(LD)的工作原理、噪声及调制特性进行了分析,对光纤激光器的构成、工作机理及特性进行了讨论,最后介绍了光纤通信系统中常用的 DFB 及量子阱激光器的性能。第 5 章为功率的注入和耦合,分析了几种改善由光源到光纤尾纤中光功率耦合的方法,以及由于接续工艺的不完善和光纤模场直径之差导致的光纤接续损耗,并对光连接器的构成及性能进行了介绍。第 6 章为光探测器,介绍了通信用光电探测器中 PN 结型光电二极管(PD)、PIN 结型光电二极管(PIN)和雪崩型光电二极管(APD)等半导体光电二极管的基本原理和主要特性。第 7 章为光接收机,分析了前置放大器的性能及光接收机的噪声特性,并在此基础上进一步分析得出接收机灵敏度、误码率性能以及影响接收灵敏度和误码率的主要因素。第 8 章为光纤通信系统的设计,以光纤通信系统的设计为主线,考虑系统的可靠性、性能价格比及扩容升级要求,从功率预算、色散预算和上升时间预算三个方面分析系统中工作波长、光纤、光发送机、光接收机、各种光无源器件的参数选取方面的要求及系统实际设计过程。介绍了编码调制和前向纠错的原理、实现过程及其应用。第 9 章为光无源器件,主要就光纤通信系统中最重要且使用最多的光调制器和光复用解复用器的工作原理和构成等基本内容进行了介绍。第 10 章为光放大器,分析了光放大的基本原理,主要介绍了 EDFA 和 FRA 的原理、构成及其性能,并简单介绍了半导体光放大器的构成及特性。第 11 章为光网络,描述了一些可用于光纤网络的基本拓扑结构,讨论了与光网络密不可分的 SONET 和 SDH 标准及基于波长变换技术的波长路由网络构成及性能,介绍了光码分多址(OCDMA)及光突发交换(OBS)的原理及实现过程。第 12 章为光纤测量,主要介绍了损耗和色散这两个光纤的传输特性参数,以及光纤通信系统中误码率及信号眼图的测量方法,并介绍了光谱仪的使用方法。

本书第 1、8~10 章由延凤平教授编写,第 2~5 章由裴丽教授编写,第 6、7、11、12 章由宁提纲教授编写。全书由延凤平教授统稿,并作部分加工修改。在编写过程中,得到了我国著名的光纤通信专家、中国科学院院士简水生教授多方面的精心指导和关怀,同时得到了北京交通大学光波技术研究所全体教师和学生的大



力支持。博士生王琳、龚桃荣、郑晶晶和硕士生李一凡、王圻、沈旷轶等协助做了部分资料收集和图表绘制工作。在此一并表示感谢。

由于编者的学识水平有限,在编写过程中一定还会存在不少缺点、错误和疏漏,恳请读者批评指正,以便本书今后的修订和完善。

编 者

2006年4月于北京交通大学

# 目 录

## 丛书序

## 前言

<b>第 1 章 引言</b> .....	1
1.1 光通信的历史回顾 .....	2
1.1.1 光通信器件的发展 .....	3
1.1.2 光纤通信系统的演进 .....	4
1.2 准同步数字体系与同步数字体系 .....	5
1.2.1 复接与分插 .....	6
1.2.2 准同步数字体系 .....	6
1.2.3 同步数字体系 .....	7
1.2.4 10.92Tbit/s 系统 .....	8
1.3 数字光纤通信系统的组成.....	11
1.3.1 光发射机.....	11
1.3.2 传输光纤.....	13
1.3.3 光接收机.....	13
1.4 光纤通信系统的特点.....	13
习题 .....	14
<b>第 2 章 光纤</b> .....	15
2.1 Maxwell 方程组及边界条件.....	15
2.2 介质平板波导中的模式理论.....	16
2.2.1 模式的一般概念 .....	17
2.2.2 激光在平板波导中的传输特性 .....	17
2.3 光纤的结构.....	19
2.3.1 光纤的物理结构 .....	19
2.3.2 折射率分布 .....	19
2.4 光纤中的模式理论.....	20
2.4.1 模式的一般描述 .....	20
2.4.2 阶跃型折射率分布光纤中的波导方程 .....	21
2.4.3 阶跃型折射率分布光纤中的模式 .....	23
2.4.4 线偏振模式理论 .....	24

2.5	单模光纤	26
2.5.1	模场直径	26
2.5.2	单模光纤中的传输模式	27
2.6	新型特种光纤	28
2.6.1	各种稀土掺杂光纤	28
2.6.2	光子晶体光纤	28
2.6.3	其他介质光纤	29
2.7	光纤制造	30
2.7.1	预制棒制作	30
2.7.2	拉丝	33
2.7.3	新型低损耗光纤制造技术	35
2.8	光纤的机械性能	35
2.9	光缆	37
	习题	39
<b>第3章</b>	<b>光纤的传输特性</b>	<b>41</b>
3.1	光纤的损耗	41
3.1.1	损耗产生的机理	41
3.1.2	光纤的损耗谱表述	44
3.2	光纤的色散	45
3.2.1	色散的一般描述	45
3.2.2	群时延	46
3.2.3	模式色散	47
3.2.4	材料色散	47
3.2.5	波导色散	48
3.2.6	偏振模式色散	49
3.2.7	单模光纤中脉冲展宽的一般描述	50
3.2.8	光纤色散管理与色散补偿	50
3.3	光纤的非线性	53
3.3.1	非线性的产生机理	53
3.3.2	自相位调制	54
3.3.3	交叉相位调制	55
3.3.4	四波混频	55
3.3.5	受激散射	56
	习题	57
<b>第4章</b>	<b>光源</b>	<b>59</b>

4.1	激光的特性及基本光学规律	59
4.1.1	激光产生的基本条件	59
4.1.2	激光的基本特征	62
4.1.3	Snell 定律	64
4.2	半导体物理基础	65
4.2.1	能带	65
4.2.2	本征及掺杂材料	65
4.2.3	载流子及 PN 结	66
4.3	发光二极管	68
4.3.1	发光二极管结构及工作机理	68
4.3.2	伏安特性	70
4.3.3	量子效率	70
4.3.4	发光二极管的调制	71
4.4	激光二极管	72
4.4.1	激光二极管结构及工作机理	72
4.4.2	伏安特性及阈值条件	73
4.4.3	外量子效率	74
4.4.4	谐振频率选择	74
4.4.5	激光二极管结构	75
4.4.6	温度效应	75
4.5	半导体激光器	76
4.5.1	窄线宽半导体激光器	76
4.5.2	面发射激光器	78
4.6	光纤激光器	78
4.6.1	工作机理	78
4.6.2	特点	79
4.6.3	光纤激光器构成及其应用	79
	习题	82
<b>第 5 章</b>	<b>功率的注入与耦合</b>	<b>83</b>
5.1	芯片到光纤的功率注入	83
5.1.1	光源输出模式	83
5.1.2	功率耦合计算	83
5.2	用于改善耦合的透镜结构	83
5.2.1	球面结构	84
5.2.2	激光二极管到光纤的耦合	84

5.3	光纤到光纤的耦合	84
5.3.1	机械失配	84
5.3.2	光纤相对数值孔径失配	85
5.3.3	光纤端面处理	86
5.4	光纤接续	86
5.4.1	接续技术	86
5.4.2	单模光纤的接续	87
5.5	光纤连接器	87
5.5.1	连接器分类	88
5.5.2	连接器的回波损耗与插入损耗	90
	习题	91
<b>第6章</b>	<b>光电探测器</b>	<b>92</b>
6.1	光电二极管的物理特性	92
6.1.1	PD的工作机理	93
6.1.2	PIN光电探测器	94
6.1.3	雪崩光电探测器	95
6.2	光电探测器噪声	96
6.2.1	噪声源	96
6.2.2	信噪比	97
6.3	探测器响应时间	97
6.3.1	耗尽层光电流特征	97
6.3.2	响应时间	99
6.4	雪崩增益的温度效应及倍增噪声	100
6.5	光电探测器的比较	101
6.5.1	光电池	101
6.5.2	光电三极管	102
6.5.3	光电二极管与光电三极管的主要差别	102
6.5.4	光电倍增管	103
6.5.5	电荷耦合阵列探测器	103
	习题	103
<b>第7章</b>	<b>光接收机</b>	<b>105</b>
7.1	光接收机的基本构成	105
7.1.1	光接收机结构	105
7.1.2	误差源	106
7.1.3	数字信号传输系统构成	107

7.2	前置放大器 .....	109
7.3	数字接收机特征 .....	109
7.3.1	误差概率 .....	109
7.3.2	量子极限 .....	112
7.4	数字接收机的灵敏度 .....	113
7.4.1	接收机噪声 .....	113
7.4.2	散粒噪声 .....	115
7.4.3	灵敏度计算 .....	115
7.5	模拟接收机 .....	119
	习题 .....	120
<b>第 8 章</b>	<b>光纤通信系统设计</b> .....	<b>122</b>
8.1	点对点链路的设计 .....	122
8.1.1	功率预算 .....	122
8.1.2	上升时间预算 .....	123
8.1.3	色散预算 .....	125
8.1.4	系统的功率代价 .....	126
8.2	信道编码及线路码型 .....	126
8.2.1	非归零码 .....	126
8.2.2	归零码 .....	127
8.2.3	啁啾归零码 .....	128
8.2.4	载波抑制归零码 .....	129
8.2.5	扰码 .....	130
8.2.6	线路码型 .....	131
8.3	前向纠错技术 .....	134
8.3.1	FEC 码的构成 .....	134
8.3.2	编码增益和净编码增益 .....	135
8.3.3	FEC 误码纠错能力 .....	137
8.3.4	FEC 的应用 .....	140
8.3.5	超强 FEC .....	143
	习题 .....	145
<b>第 9 章</b>	<b>光无源器件</b> .....	<b>146</b>
9.1	光调制器 .....	146
9.1.1	基本概念 .....	146
9.1.2	电介质光调制器 .....	150
9.1.3	EA 调制器 .....	151

9.2 光复用解复用器 .....	152
9.2.1 波分复用/解复用器 .....	152
9.2.2 复用器/解复用器的串扰 .....	162
9.2.3 时分复用/解复用器 .....	164
习题 .....	168
<b>第10章 光放大器</b> .....	<b>169</b>
10.1 基本概念 .....	169
10.1.1 增益系数 .....	169
10.1.2 增益与带宽 .....	170
10.1.3 放大器噪声 .....	172
10.2 掺铒光纤放大器 .....	173
10.2.1 增益谱 .....	174
10.2.2 放大器增益 .....	175
10.2.3 放大器噪声 .....	177
10.3 调制不稳定性 .....	179
10.3.1 分布放大 .....	179
10.3.2 周期性集总放大 .....	180
10.3.3 噪声放大 .....	181
10.4 拉曼光纤放大器 .....	183
10.4.1 光纤拉曼放大器的工作原理 .....	184
10.4.2 光纤中的受激拉曼散射 .....	186
10.4.3 光纤拉曼放大器特点 .....	189
10.4.4 光纤拉曼放大器的分类 .....	190
10.4.5 增益特性 .....	191
10.4.6 光纤拉曼放大器噪声特性 .....	192
10.4.7 宽带增益平坦拉曼光放大器设计的一般方法 .....	192
10.4.8 多波长泵浦拉曼光放大器的设计 .....	197
10.5 半导体光放大器 .....	204
10.5.1 信号放大特性 .....	205
10.5.2 行波光放大器的噪声特性 .....	205
10.5.3 信道间的串扰 .....	206
习题 .....	207
<b>第11章 光网络</b> .....	<b>208</b>
11.1 基本光网络 .....	208
11.1.1 网络拓扑结构 .....	208

11.1.2	无源线形总线网络的性能	209
11.1.3	星形结构网络的性能	210
11.2	SONET/SDH	210
11.2.1	传输格式及速率	211
11.2.2	光接口	212
11.2.3	SONET/SDH 环	212
11.2.4	SONET/SDH 网络	213
11.3	波长路由网络	214
11.3.1	光上下话路复用	214
11.3.2	光交叉连接	215
11.3.3	波长变换器的性能评价	216
11.4	WDM+EDFA 系统的性能	217
11.4.1	链路带宽	217
11.4.2	用于特殊误码率的光功率要求	217
11.4.3	通道间串扰	218
11.5	光码分多址 OCDMA 技术	218
11.6	全光包交换技术	220
11.6.1	光包交换的网络结构	220
11.6.2	OPS 的节点结构	221
11.6.3	OPS 在城域网中的应用	221
11.7	光突发交换	222
11.7.1	OBS 网络结构	222
11.7.2	OBS 协议	223
11.7.3	OBS 的特点	223
	习题	224
<b>第 12 章</b>	<b>光纤测量</b>	<b>225</b>
12.1	衰减测量	225
12.1.1	截断技术	226
12.1.2	插入损耗方法	227
12.1.3	背向散射法	228
12.2	色散测量	228
12.2.1	模间色散	229
12.2.2	时域模间色散测量	229
12.2.3	频域模间色散测量	230
12.2.4	色度色散	231



---

12.2.5 偏振模色散 .....	232
12.3 OTDR 的应用 .....	233
12.3.1 衰减测量 .....	234
12.3.2 光纤故障位置判定 .....	234
12.4 眼图分析 .....	236
12.5 光谱分析仪的应用 .....	237
12.5.1 光源的性能评价 .....	238
12.5.2 EDFA 增益及噪声图测试 .....	239
习题 .....	240
<b>参考文献</b> .....	<b>241</b>