

电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业

# 光纤通信与传感技术

毕卫红 张燕君 齐跃峰 等编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了光纤通信和光纤传感的基本原理、方法、实现及应用。本书共 14 章, 主要内容包括: 光纤的基本理论、光无源器件的特性与应用、光源与光发射机的设计、光检测器与光接收机的设计、光纤通信的基本原理、光纤传输系统和光网络、光纤传感器的基本原理及各类光纤传感器的构成与应用等。本教材配有免费电子课件。

本书可作为高等院校光电专业高年级本科生和研究生的教材, 也可供通信类及相关专业的研究生和工程技术人员参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信与传感技术 / 毕卫红等编著. —北京: 电子工业出版社, 2008.3

电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业

ISBN 978-7-121-06063-2

I. 光… II. 毕… III. ①光纤通信—高等学校—教材②传感器—高等学校—教材

IV. TN929.11 TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 022382 号

策划编辑: 韩同平

责任编辑: 段丹辉

印 刷: 北京市通州大中印刷厂

装 订: 三河市万和装订厂

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: 787×1092 1/16 印张: 18.75 字数: 480 千字

印 次: 2008 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 29.00 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。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn); 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010)88258888。

# 前 言

当前, 光纤通信与光纤传感技术发展迅猛, 在工业自动化、石油化工、生物工程、军事工程、海洋探测、航空航天等许多领域得到了广泛应用, 越来越多的人渴望了解光纤应用技术方面的知识。

本书将光纤通信与光纤传感技术作为两个重要部分加以阐述, 希望能为今后从事这两个方面课题研究与应用的人员起到一个抛砖引玉的作用。

全书共分 14 章。第 1 章为绪论部分; 第 2 章和第 3 章为光纤基本理论和光无源器件特性及应用; 第 4 章和第 5 章为光源与光发射机的设计、光检测器与光接收机的设计; 第 6 章和第 7 章详细分析了光纤通信的原理和方法; 第 8 章和第 9 章为光纤传感的基础知识; 第 10 章~第 14 章系统地分析了光纤传感器在温度、电压电流、机械、医用、军事及大气监测等方面的应用。

本书第 1, 8, 9 章由毕卫红编写, 第 2, 3 章由李炳新编写, 第 4, 5 章由齐跃峰编写, 第 6, 7 章由黄震编写, 第 10, 13 章由吴国庆编写, 第 11 章由刘丰编写, 第 12, 14 章由张燕君编写。全书由毕卫红统稿并做了部分调整, 郭璇与刘强进行了文字的编辑和校对工作。本书由清华大学廖延彪教授审阅, 并提出了宝贵的修改意见。本书由国家自然科学基金(50477001)和燕山大学教材出版基金资助出版。在此, 我们一并表示最诚挚的谢意。

由于光纤通信与传感技术尚在不断发展中, 加之作者水平有限, 编写不妥和疏漏在所难免, 望同行专家和读者评批指正, 作者万分感激!

编著者  
2007 年 12 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 光纤制备与应用的发展 .....	(1)
1.1.1 光纤的结构 .....	(1)
1.1.2 光纤发展史 .....	(1)
1.2 光纤通信技术的发展 .....	(3)
1.2.1 通信系统的组成 .....	(3)
1.2.2 通信系统的分类 .....	(4)
1.2.3 光通信概述 .....	(5)
1.2.4 光纤通信的发展过程简介 .....	(7)
1.3 光纤传感技术的发展 .....	(10)
1.3.1 概述 .....	(10)
1.3.2 传感器的组成 .....	(11)
1.3.3 光纤传感器的分类 .....	(11)
1.3.4 光纤传感器的发展史 .....	(12)
1.3.5 光纤传感器的研究现状 .....	(12)
<b>第 2 章 光纤与光缆</b> .....	(14)
2.1 光纤的结构与模式 .....	(14)
2.1.1 光纤的结构 .....	(14)
2.1.2 阶跃折射率光纤分析的基本概念 .....	(15)
2.1.3 阶跃折射率光纤的模式分析 .....	(17)
2.2 光纤的材料、制作和光缆 .....	(22)
2.2.1 预制棒的制造方法 .....	(22)
2.2.2 预制棒拉丝 .....	(24)
2.3 光纤的传输特性 .....	(25)
2.3.1 衰减 .....	(25)
2.3.2 色散 .....	(26)
2.3.3 偏振特性 .....	(27)
2.3.4 非线性效应 .....	(27)
2.4 光纤的种类 .....	(31)
2.4.1 多模光纤 .....	(31)
2.4.2 单模光纤 .....	(32)
习题 .....	(34)
<b>第 3 章 常见光无源器件</b> .....	(35)
3.1 光纤连接器 .....	(35)
3.1.1 光纤活动连接器 .....	(35)

3.1.2	光纤固定连接器 .....	(38)
3.2	光耦合器 .....	(40)
3.2.1	描述光耦合器特性的一些技术参数 .....	(41)
3.2.2	光耦合器的制作方法 .....	(42)
3.2.3	耦合机理 .....	(43)
3.2.4	波导型光耦合器 .....	(45)
3.2.5	光波分复用器(WDM)和解复用器 .....	(46)
3.5	光隔离器 .....	(48)
3.5.1	光隔离器中使用的光学元件 .....	(48)
3.5.2	光隔离器的作用和工作原理 .....	(49)
	习题 .....	(50)
<b>第4章</b>	<b>光源及光发射机 .....</b>	<b>(51)</b>
4.1	发光二极管 .....	(51)
4.1.1	工作原理 .....	(51)
4.1.2	LED的结构和分类 .....	(52)
4.1.3	LED的基本特性 .....	(52)
4.2	半导体激光器 .....	(53)
4.2.1	半导体激光器的基本工作原理(F-P型) .....	(53)
4.2.2	半导体激光器的基本性质 .....	(55)
4.2.3	其他半导体激光器 .....	(58)
4.3	光载波的调制方式 .....	(60)
4.4	模拟信号光纤传输 .....	(61)
4.4.1	模拟信号调制 .....	(62)
4.4.2	模拟信号调制电路 .....	(63)
4.5	数字信号光纤传输 .....	(67)
4.5.1	LED数字驱动电路 .....	(67)
4.5.2	LD数字驱动电路 .....	(69)
4.6	光发射机电路 .....	(71)
4.6.1	光发射机组成 .....	(71)
4.6.2	模拟脉冲调制光发射机 .....	(72)
4.7	光源与光纤的耦合 .....	(77)
4.8	光载波的间接调制 .....	(81)
4.8.1	电光体调制 .....	(82)
4.8.2	电光波导调制器 .....	(85)
	习题 .....	(87)
<b>第5章</b>	<b>光检测器与光接收机 .....</b>	<b>(88)</b>
5.1	光检测器 .....	(88)
5.1.1	PIN光电二极管的工作原理 .....	(88)
5.1.2	雪崩光电二极管(APD) .....	(90)
5.2	光接收机概述 .....	(92)
5.3	光接收机的噪声 .....	(94)

5.3.1	量子噪声和倍增噪声	(95)
5.3.2	前置放大器的噪声	(96)
5.4	量子极限灵敏度	(97)
5.5	光接收机设计	(98)
5.5.1	高阻抗前置放大电路	(100)
5.5.2	互阻抗前置放大电路	(103)
5.5.3	高阻抗前置放大电路的均衡	(103)
5.6	光接收机实例	(105)
5.6.1	PWM 接收解调电路	(105)
5.6.2	一个实用的光接收机电路	(105)
	习题	(106)
	本章参考文献	(107)
<b>第 6 章</b>	<b>光纤传输系统</b>	<b>(109)</b>
6.1	光纤传输系统设计	(109)
6.1.1	功率预算	(110)
6.1.2	带宽预算	(111)
6.2	光纤通信复用系统	(113)
6.2.1	波分复用技术原理	(113)
6.2.2	波分复用技术的特点及研究热点	(114)
6.2.3	密集波分复用技术	(115)
6.2.4	稀疏波分复用技术	(117)
6.3	相干光通信	(121)
6.3.1	相干光通信的基本工作原理	(121)
6.3.2	相干光通信的优点	(123)
6.3.3	相干光通信的关键技术	(124)
6.4	光孤子通信	(125)
6.4.1	光孤子通信原理	(126)
6.4.2	光孤子通信系统的构成	(126)
6.4.3	国内外光孤子通信走向实用的动态	(128)
	习题	(129)
<b>第 7 章</b>	<b>光网络</b>	<b>(131)</b>
7.1	SONET/SDH	(131)
7.1.1	SONET 的物理配置	(131)
7.1.2	传输格式和速率	(132)
7.1.3	光接口	(133)
7.1.4	SONET/SDH 环网络	(134)
7.1.5	SONET/SDH 网络	(136)
7.2	光交换系统	(138)
7.2.1	成熟的光交换技术	(139)
7.2.2	光分组交换	(141)
7.2.3	光突发交换技术	(142)

7.2.4 光交换技术的发展趋势 .....	(148)
7.3 智能光网络 .....	(149)
本章参考文献 .....	(155)
<b>第8章 光纤传感技术基础</b> .....	(156)
8.1 光纤传感技术的理论基础 .....	(156)
8.1.1 光光效应 .....	(156)
8.1.2 光电效应 .....	(158)
8.1.3 电光效应 .....	(159)
8.1.4 磁光效应 .....	(161)
8.2 传感器的性能指标及标定 .....	(162)
8.2.1 传感器的性能指标 .....	(162)
8.2.2 传感器的标定 .....	(163)
习题 .....	(166)
本章参考文献 .....	(167)
<b>第9章 光纤传感调制技术</b> .....	(168)
9.1 光强调制型光纤传感器 .....	(168)
9.1.1 微弯型 .....	(168)
9.1.2 蚀刻型 .....	(168)
9.1.3 遮光型 .....	(169)
9.1.4 缠绕型 .....	(169)
9.2 相位调制型光纤传感器 .....	(169)
9.2.1 迈克尔逊干涉型光纤传感器 .....	(169)
9.2.2 马赫-曾德尔干涉型光纤传感器 .....	(170)
9.2.3 塞格纳克干涉型光纤传感器 .....	(171)
9.2.4 法布里-珀罗干涉型光纤传感器 .....	(171)
9.2.5 布拉格光栅型光纤传感器 .....	(174)
9.2.6 模间干涉型光纤传感器 .....	(175)
9.3 偏振调制型光纤传感器 .....	(175)
习题 .....	(176)
本章参考文献 .....	(176)
<b>第10章 光纤温度传感器</b> .....	(178)
10.1 引言 .....	(178)
10.2 传光型光纤温度传感器 .....	(179)
10.2.1 半导体光吸收型光纤温度传感器 .....	(179)
10.2.2 热效应光纤温度传感器 .....	(179)
10.2.3 荧光型光纤温度传感器 .....	(181)
10.3 功能型光纤温度传感器 .....	(183)
10.3.1 光纤温度开关传感器 .....	(183)
10.3.2 掺杂光纤温度传感器 .....	(183)
10.3.3 热辐射光纤高温传感器 .....	(183)

10.3.4	相位干涉型光纤温度传感器	(185)
10.4	分布式光纤温度传感器	(186)
10.4.1	光纤光时域反射原理	(187)
10.4.2	光纤拉曼背向散射及其温度效应	(187)
10.4.3	分布式光纤拉曼背向散射光子温度传感器	(189)
10.4.4	分布式光纤布里渊散射型温度传感器	(189)
	习题	(191)
<b>第 11 章</b>	<b>高压光纤电流和电压互感器</b>	<b>(192)</b>
11.1	引言	(192)
11.2	光纤电流互感器	(192)
11.2.1	传统电磁式电流互感器的结构和基本工作原理	(192)
11.2.2	光电式电流互感器	(193)
11.3	高压光纤电压互感器	(199)
11.3.1	基于晶体电光效应的电压互感器	(199)
11.3.2	基于多电场传感器正交数值积分方法的光学电压互感器	(204)
	本章参考文献	(205)
<b>第 12 章</b>	<b>光纤机械量传感器</b>	<b>(208)</b>
12.1	光纤位移传感器	(208)
12.1.1	光强调制型光纤位移传感器	(208)
12.1.2	相位干涉型光纤位移传感器	(212)
12.2	光纤压力传感器	(213)
12.2.1	全内反射光纤压力传感器	(213)
12.2.2	相位调制光纤压力传感器	(214)
12.2.3	动态压力传感器	(216)
12.2.4	偏振调制光纤压力传感器	(218)
12.3	光纤振动传感器	(219)
12.3.1	相位调制振动传感器	(219)
12.3.2	光弹效应振动传感器	(223)
12.3.3	双波长光纤振动传感器	(224)
12.4	光纤速度和流量传感器	(225)
12.4.1	光纤速度传感器	(225)
12.4.2	光纤流量传感器	(226)
12.5	光纤加速度传感器	(228)
12.5.1	相位调制光纤加速度传感器	(229)
12.5.2	倾斜镜式光纤加速度传感器	(231)
12.6	光纤角速度传感器——光纤陀螺	(233)
12.7	光纤表面粗糙度传感器	(236)
12.8	光纤应变和弯曲传感器	(238)
12.8.1	脉冲传输时间法光纤传感器	(238)
12.8.2	测量结构畸变的光纤传感器	(239)
12.8.3	F-P 结构传感器	(240)



12.9	光纤液位传感器	(243)
	习题	(244)
	本章参考文献	(245)
<b>第 13 章</b>	<b>光纤光栅传感器</b>	<b>(246)</b>
13.1	引言	(246)
13.2	光纤 Bragg 光栅及其传感模型	(247)
13.2.1	应变传感模型	(248)
13.2.2	温度传感模型	(254)
13.2.3	动态磁场的传感模型	(255)
13.3	长周期光纤光栅	(256)
13.3.1	应变灵敏度	(257)
13.3.2	温度灵敏度	(257)
13.4	光纤光栅传感器	(258)
13.4.1	光纤光栅应变与位移传感器以及振动与加速度传感器	(258)
13.4.2	光纤光栅温度传感器	(262)
13.4.3	光纤光栅压力传感器	(263)
13.4.4	光纤光栅水声传感器	(265)
	习题	(266)
	本章参考文献	(266)
<b>第 14 章</b>	<b>光纤传感器的其他应用</b>	<b>(268)</b>
14.1	光纤传感器在医学上的应用	(268)
14.1.1	光纤血流计	(268)
14.1.2	光纤 pH 值传感器	(270)
14.1.3	光纤体压计	(272)
14.1.4	光纤体温计	(273)
14.1.5	光纤氧饱和度传感器	(275)
14.1.6	光纤血气监测传感器	(276)
14.2	光纤传感器在军事方面的应用	(277)
14.2.1	光纤传感器的航空航天军事应用	(278)
14.2.2	光纤传感器的海上军事应用	(282)
14.2.3	光纤传感技术在兵工测试中的应用	(283)
14.3	光纤传感器在环境保护方面的应用	(285)
14.3.1	光纤 NO <sub>2</sub> 传感器	(285)
14.3.2	光纤 NH <sub>3</sub> 传感器	(286)
14.3.3	光纤 CO <sub>2</sub> 传感器	(287)
14.3.4	光纤 CH <sub>4</sub> 传感器	(287)
	习题	(288)
	本章参考文献	(288)

# 第1章 绪 论

## 1.1 光纤制备与应用的发展

### 1.1.1 光纤的结构

光纤一般是由纤心、包层、涂敷层及护套构成的，是一个多层介质结构的对称圆柱体，其基本结构如图1.1所示。



图 1.1 光纤的基本结构

纤心一般是由某种类型的玻璃或塑料制成的圆柱体，其直径约为  $5\sim 85\ \mu\text{m}$ 。包层是环绕纤心的圆柱形套层，可以是一层或多层，由特性与纤心不同的玻璃或塑料制成，其折射率略小于纤心折射率。涂敷层是一种涂料的敷层，其作用是保护光纤不受外来的损害，以增强光纤的韧性。护套是由塑料制成的圆形保护套，用来维持光纤的机械强度。

包层的材料一般是二氧化硅，但其小微量掺杂物一般为三氧化二硼或四氧化二硅，以降低包层的光学折射率。

涂敷层的材料一般为硅酮或丙烯酸盐，用于隔离杂光。

护套的材料一般为尼龙或其他有机材料，用于增加光纤的机械强度，保护光纤。

### 1.1.2 光纤发展史

光纤自1841年由 Daniel Colladon 通过实验发现了光线能够沿着盛水的弯曲通道而传播以来，经历了一百多年的发展（参见表 1.1），现已经是通信的主要干线。此外，各种特殊需要的光纤也应运而生，目前已有几十种。

表 1.1 光纤的发展史

时 间	代表人物或公司	主要成果
1841 年	Daniel Colladon	通过实验发现了光线能够沿着盛水的弯曲通道而传播
1854 年	英国的 John. Tyndall	在一次演讲中用实验证实了光沿着从水管喷射出来的水柱折射前进的现象
1877 年	俄国的契卡洛夫	对一个导线车间进行光导照明系统试验
1880 年	俄国的契卡洛夫	关于用管道输送光的论文在俄国《电》杂志上发表
1880 年	A. G. Bell	在英国的 <i>Nature</i> 杂志上介绍了利用光波作载体传送语音信息的“光电话”

(续表)

时 间	代表人物或公司	主要 成果
1881 年	美国的 William Wheeler	在美国申请了第一个光导管的专利
1926 年	英国的 J. C. Baird	首先提出了应用光的全反射原理而制成石英纤维, 并申请了透明纤维束的制造专利
1927 年	美国的 C. W. Hansell	申请了透明纤维束的制造专利
1930 年	德国的 H. Lamm 和 R. Schindler	将直径为 40 $\mu\text{m}$ 的石英纤维有规则地排列起来用于肠胃检查, 但效果不理想
1951 年	荷兰的 A. C. S Van Heel 和美国的 H. H. Hopkins 及 N. S. Kapany	分别进行了光纤的研究工作
1953 年	荷兰的 A. C. S Van Heel	将一种折射率为 1.147 的塑料涂敷在玻璃纤维上, 制成了玻璃心-塑料涂层的光纤, 满足了全内反射条件, 但因塑料涂层不均匀使得传光效果不理想
1954 年	美国的 H. H. Hopkins	在 <i>Nature</i> 杂志上发表了有关传像束、传输图像的文章
1954 年	美国的 B. I. Hirschowitz	采用棒管制成了玻璃心-玻璃涂层光学纤维, 奠定了光纤制作工艺的基础
1954 年	美国的 J. S. Courtneypratt	提出了用熔融法制造光纤面板用做电子束管的屏板, 但在当时仅是一个设想
1955 年	美国的 B. J. Hirschowitz	把高折射率的玻璃棒套在低折射率的玻璃管中, 放在高温炉中控制, 初步解决了光纤的光绝缘问题
1956 年	美国的 N.S.Kapany	提出了“纤维光学”学科的新概念
1956 年	L. E. Curtiss	首先掌握涂层纤维实用制造法, 其中心玻璃和皮玻璃的折射率分别为 1.7 和 1.5
1957 年	不详	开始出现闪烁发光纤维
1958 年	美国的 N. S. Kapany	提出了可控制复合光纤的新工艺, 并在纤维丝上增加吸收套层以减少杂散光的影响, 使得光纤面板得到了实用
1958 年	美国的 L. E. Curtiss 和 B. J. Hirschowitz	研制出了世界上第一根实用化光纤胃镜
1960 年	美国	解决了光纤排列工艺, 制作出可弯曲、分辨率高的光纤传像束, 并开始在医院仪器中使用
1960 年	不详	研制出了红外光导纤维
1964 年	日本东北大学西泽等人	提出了聚集型即梯度型折射率分布通信用光线系统
1966 年	英国标准电信公司的华裔科学家	提出了将玻璃中过渡族金属离子的含量(质量比)降到 6~10 以下时, 光纤的吸收损耗可降到 10 dB/km
1967 年	Arridge 和 Heywood	采用了一种冻结涂覆工艺将铝涂覆到石英光纤上
1967 年	Cooper	成功地进行了碳涂覆层实验
1968 年	不详	开始研究紫外光导纤维
1968 年	美国杜邦公司	发明了 PMMA 材料的聚合物光纤
1969 年	日本电气公司和板玻璃公司的北野等人	采用了离子交换法制作出 Selfoc 型玻璃聚焦光纤
1969 年	S. E. Miller	首先提出了集成光学器件的设想
1970 年	美国康宁公司	研制出了损耗为 20 dB/km 的光纤, 证实了高锟等人的设想, 从此低损耗、低色散的通信光纤有了迅速的发展
1971 年	美国康宁公司	发明了管外气相沉积法制作光纤
1973 年	美国康宁公司	采用了 CVD 法制作的石英玻璃光纤的损耗已降至 4 dB/km
1973 年	美国的 Stolen	实验证实了光纤中的拉曼放大效应
1973 年	美国贝尔实验室	预言了光孤子的存在
1974 年	美国、日本、德国	有大量文章报道了钠钙多组成玻璃光纤的制造方法
1975 年	日本电气公司	研制了新型的 Selfoc 光纤的最低损耗已达 10 dB/km

(续表)

时 间	代表人物或公司	主 要 成 果
1976 年	美国加州大学	首次研制出了空心铝波导
1977 年	美国贝尔实验室	在芝加哥两电话局间开通了世界上第一条商业用光纤通信系统
1977 年	美国海军研究所	开始执行光纤传感器计划(出现了第一根熔融光纤耦合器, 出现了最早的光纤环路)
1978 年	加拿大渥太华通信研究中心	首次在掺锗石英光纤中发现光纤的光敏效应
1979 年	T. Miya	单模石英光纤的损耗已降至 0.2 dB/km
1980 年	不详	单模石英光纤首次应用于长途通信
1980 年	美国贝尔实验室	首次在实验中观察到光孤子
1981 年	Hidaka. t 等人	首次提出用于传输二氧化碳激光的低损耗中红外氧化物玻璃空心光纤
1982 年	日本庆应大学	发明共聚法梯度折射率聚合物光纤
1983 年	英国	出现了气送光纤技术(第一代单模石英光纤实现商用化)
1983 年	日本 NTT 公司	制作氟化 PMMA 聚合物光纤损耗 20 dB/km
1984 年	美国贝尔实验室	实现商用光纤通信技术传输速率超过 1 Gb/s
1985 年	不详	色散位移单模光纤进入商业应用(提出掺铒光纤放大器)
1987 年	不详	掺铒光纤放大器研制成功
1988 年	连接美国东海岸和欧洲大陆	世界上第一条海底光缆敷设成功
1989 年	美国联合技术研究中心	研制出第一个 Bragg 光纤光栅
1990 年	不详	研制出截止波长位移光纤 G.654
1991 年	新西兰南北两岛之间	敷设了第一根碳涂敷光纤商用海底电缆
1993 年	美国朗讯科技公司	发明了短波光纤
1994 年	法国电信公司	提出了多心单模光纤新概念
1994 年	日本庆应大学	发明了界面凝胶法制作高带宽的梯度折射率聚合物光纤
1995 年	美国贝尔实验室	研制出了第一台商用 DWDM 光波通信系统
1996 年	世界电信标准大会	正式颁布了 ITU-TG.655 标准
1997 年	J. H. B. Nijhof 等人	首次报道了色散补偿光孤子可以在正或零平均色散趋于稳定传输
1998 年	美国 Lucent Technologies 公司	首家研制出了海底光缆用大有效面积负色散光纤
1999 年	日本住友公司	推出了新的 G.655 光纤-纯导光纤
2000 年	美国康宁公司	开发出了城域光纤
2001 年	法国 Alcatel 公司	光纤传输速率突破 10.2 Tb/s
2001 年	澳大利亚悉尼大学	发明了微结构聚合物光纤
2002 年 至今	世界范围内	光纤市场摆脱低迷, 快速稳定发展

## 1.2 光纤通信技术的发展

### 1.2.1 通信系统的组成

所谓通信, 从广义上讲就是信息从发信者传输到收信者的过程。消息是用以载荷信息的有次序的序列或连续的时间函数, 如待传输的文字、符号、数据、语言、静止图片和活动图像等。前者称为离散信息(指消息状态是可数的, 时间上是离散的), 后者称为连续信息(指消息状态是变化的, 时间上是连续变化的)。通信系统中传输的具体对象是消息, 这种传输

利用通信系统来实现。完成通信过程的全部设备和传输媒质，称为通信系统。19世纪末迅速发展起来的以电信号（或光信号）为信息载体的通信系统，称为现代通信系统。通信系统的一般模型如图1.2所示。



图 1.2 通信系统的一般模型

信源的作用是产生（形成）消息。信源分为模拟信源和数字信源。模拟信源（如电话机、电视摄像机）输出连续幅度的模拟信号，数字信源（如电传机、计算机等数字终端设备）输出离散的数字信号。信宿的作用是将复原的原始信号转换成相应的信息，是传输信息的归宿点。

发信机的作用是将消息转换成适于在信道中传输的信号。信号为信息的载荷者，是消息的直接反映，与消息一一对应。信号可分为两类，连续信号（模拟信号）和离散信号。载荷信息的物理量（如电信号的幅度、频率、相位，光信号的光强度、频率、相位、偏振态等）的改变，在时间上是连续的，称为连续信号；在时间上是离散的，称为离散信号；如果不仅在时间上离散，而且取值也离散，则称为数字信号。

信道是将信号从发信机传输到收信机的媒质或途径。信道既给信号以通道，也对信号产生各种干扰和噪声，信道的固有特性和干扰直接关系到通信的质量。通信系统中应用的信道可分为两类：有线信道（如架空明线、对称电缆、同轴电缆、光纤等）和无线信道（如海水、地球表面、自由空间等）。不同的信道有不同的传输特性，相同的媒质对不同频率的信号传输特性也是不同的。例如在无线信道中，电磁能量是以电磁波的形式传播的，然而不同频率的电磁波却有不同传播方式。1.5 MHz 以下的电磁波主要沿地表传播，这种电磁波称为地波。由于大地不是理想的导体，电磁波沿大地传播时，一部分能量被损耗掉了，电磁波的频率越高，损耗越大。1.5~30 MHz 的电磁波，主要靠天空中电离层的折射和反射传播，称为天波。电磁波的频率越高，电磁波被电离层吸收的能量越小，电磁波传入电离层也越深。当频率超过一定值后，电磁波穿透电离层而不再返回地面。30 MHz 以上的电磁波主要沿空间直线传播，称为空间波。由于地球表面的弯曲，空间波的传播距离受限于视距范围，因此架高发射天线可以增大传输距离。

收信机的作用与发信机相反，完成解调、解码等任务，将信号转换为信息。对于多路复用信号，收信机还有解除多路复用和实现正确分路的功能。

## 1.2.2 通信系统的分类

通信系统有多种分类方法。

(1) 按传输媒质的不同进行分类  
可分为有线通信和无线通信两大类。对于电通信，有线通信有架空明线通信、对称电缆通信、同轴电缆通信，无线通信有微波接力通信、卫星中继通信；对于光通信，包括有线光通信和无线光通信（即大气激光通信）。

## (2) 按通信业务和用途进行分类

可分为常规通信和控制通信等。常规通信又可分为话务通信和非话务通信。话务通信业务主要包括电话服务业务、语音信箱业务和电话智能网业务。非话务通信主要包括分组数据业务、计算机通信、数据库检索、电子信箱、电子数据交换、传真存储转发、可视图文及会议电视、图像通信等。控制通信包括遥测、遥控和遥感通信等。

## (3) 按传输信号的特征进行分类

可分为模拟通信系统和数字通信系统。对于模拟通信，信道中传输的是模拟信号；对于数字通信，信道中传输的是数字信号。

## (4) 按信息传递的方向与时间关系进行分类

可分为单工通信、半双工通信和双工通信。通信时消息只能单方向传输的工作方式，称为单工通信，如遥测、遥控；通信时通信双方都能收、发消息，但不能同时进行收、发消息的工作方式，称为半双工通信，如同单一载波频的无线电对讲机就是按这种通信方式工作的；通信时通信双方可以同时进行收、发消息的工作方式，称为双工通信，如普通电话就是一种最常见的双工通信方式。

## (5) 按调制方式进行分类

可分为基带传输通信和调制传输通信。基带传输通信是将未经调制的信号进行直接传播的通信。调制传输通信是将调制后的信号进行传输的通信。

## (6) 按传输信号的复用方式进行分类

可分为频分复用、时分复用、码分复用三种复用方式的通信。频分复用通信是频谱搬移的方法，是不同信号占据不同的频谱范围的通信。传统的模拟通信都是采用频分复用通信。时分复用通信是用脉冲调制的方法，使不同信号占据不同的时间区间的通信。随着数字通信的发展，时分复用通信的应用越来越广泛。码分复用通信使用正交脉冲系列分别携带不同信号的通信，这种通信方式主要用于空间通信的扩频通信中。

## 1.2.3 光通信概述

### 1. 基本概念

从广义上讲，凡是用光作为信息载波信号的通信称为光通信。光通信系统使用电磁波谱中的可见光或近红外区域的高频电磁波（约100 THz）。光通信系统，有时又称为光波通信系统，以区别于频率低于5个数量级的微波（微波载波频率为1~10 GHz）通信系统。图1.3为光的频谱图，可以看出光的频率很高，响应带宽也很宽，光通信充分利用了这一优点。

根据定义，波长是光在一个周期时间内行进的距离。设真空中光的波长为 $\lambda$ ，介质中的波长为 $\lambda_m$ ，则光的波长 $\lambda$ 和频率 $f$ 之间的关系为

$$\lambda = c / f \quad (1.1)$$

$$\lambda_m = v / f = \lambda / n \quad (1.2)$$

式(1.1)和式(1.2)中， $c$ 是真空中光速， $c = 3 \times 10^8$  m/s； $n$ 为介质的折射率（石英光纤的折射率为1.5左右）； $v$ 为光在介质中的速度（ $n = c/v$ ）。

在光通信系统中，除了一些特殊场合使用可见光之外，如绿光（ $\lambda \approx 500$  nm）、红光（ $\lambda \approx 670$  nm），现代光纤通信系统一般使用近红外光，典型波长为1300 nm和1500 nm，相应的频率分别为230 THz和193 THz。

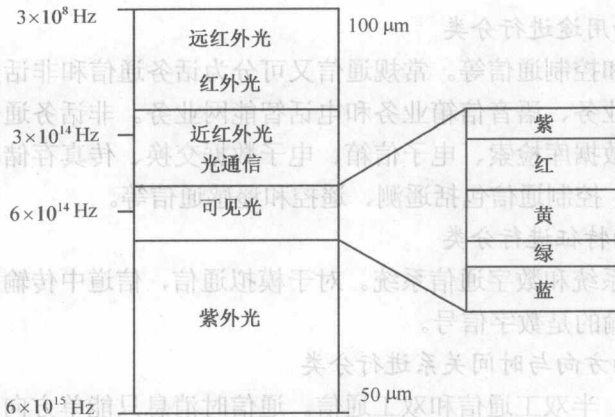


图 1.3 光的频谱图

## 2. 光通信系统的分类与特点

光通信系统可分为两类：大气激光系统（无线光通信）和光纤通信系统（有线光通信）。大气激光通信主要是指用激光作为信息的载波信号并以大气为信道的通信系统。光纤通信系统主要是指用激光作为信息的载波信号并以光纤为信道的通信系统。大气激光通信系统和光纤通信系统构成了近代光通信系统。下面对这两类光通信的特点做简要讨论。

### (1) 大气激光通信

大气激光通信是利用光波在空气中直线传播的特点，进行大气传输的光通信。这种通信方式，其信道为大气，不需要敷设任何通信线路，简单经济。1960年5月，美国休斯飞机公司的梅曼(T. H. Maiman)研制了世界上第一台激光器——红宝石激光器，获得了单色相干光，使光调制成为可能。美国林肯实验室，首先利用氦氖激光器通过大气传输了一路彩色电视信号。此后相继在世界各地进行了各种大气传输的光通信实验。激光的能量密度大、方向性好、发散角小、单色性好、频率高、通信容量大，比微波（厘米波）高1000倍。由于激光方向性好、发散角很小，所以在近距离的保密通信中具有实用价值。在深空中，没有大气的影 响，几乎是真空，光能不被吸收。未来空间将有较多的宇宙飞船与通信卫星，因此在宇宙通信中，激光通信将有大的发展前途。

大气激光通信系统中，目前一般采用 $\text{CO}_2$ 激光器作为光源( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ )，这是透雾能力较好的光波，接收器为红外探测器，采用光外差方式接收，以减小噪声，提高信噪比，但通信距离受到限制。目前，要保证在任何气候条件下都能进行通信的所谓“全天候”大气传输光通信是非常困难的，一般只能做到90%的天候率，距离也只有几千米（当然，全天候与地理环境和气候条件有关，它不是一个精确严密的指标），这主要是由于大气传输光通信存在许多严重的缺点和不足如气候对大气光通信影响非常严重。因为光波在大气中传输时，会受到雨、雪、雾的影响，信号将受到严重地衰减，甚至中断。其中，雾的影响最为严重，特大雾对光的衰减甚至达到200 dB/km。例如，设输入光功率 $P_{\text{in}} = 1 \text{ MW}$ ，若衰减系数 $\alpha$ 为200 dB/km，则此光束传输1 km后，输出光功率为

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \times 10^{\alpha/l} = 10^6 \times 10^{20} \text{ (W)}$$

即0.01 pW。该计算结果表明，即使发射的光功率为1 MW，经过1 km的大雾后( $\alpha = -200 \text{ dB/km}$ )，光功率则衰减到0.01 pW。实验表明，①在特大雾的情况下，通信距离只有500 m；②由于



大气温度变化和大气湍流使空气的折射率发生变化，使光线发生漂移和抖动，这将使通信的信噪比变坏，传输不稳定；③由于大气光通信中的任何意外的空间拦截物，如鸟类、飞机等飞行物的挡光，都会使光通信中断，因此，大气传输通信设备要求设置在高处，使收、发端机之间传输的光线不易受到拦截。

## (2) 光纤通信

光纤通信技术是当代通信技术发展的最高成就，已成为现代通信的基石。光纤通信得到如此飞速的发展，主要是因为它具有一系列独特的优点：

① 频带宽，信息容量大。现在单模光纤的宽度可达  $\text{THz} \cdot \text{km}$  量级，极大地扩大了通信容量；光纤还具有极宽的潜在带宽。石英光纤的低损耗区在  $\lambda = 1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$  的波长范围内，频带宽度为 25 THz。如此巨大的带宽，即使开发一小部分也将从根本上改变通信产业的面貌。

② 传输损耗低，传输距离远。最低光纤传输损耗已降至 0.2 dB/km 以下，这是以往的任何传输线所不能与之相比的。由于光纤的传输损耗低，因此光纤通信系统中的无中继传输距离长。在强度调制直接检测(IM-DD)光纤通信系统中的无中继传输距离长。在强度调制直接检测(IM-DD)光纤通信系统中，无中继传输距离可达几十到上百千米，而相干通信的无中继传输距离可超过 200 km，这与电缆通信相比要大 1~2 个数量级。

③ 制作光纤、光缆用的原材料资源丰富。制造光纤的主要原材料是  $\text{SiO}_2$ ，它是地球上储藏最丰富的物质。而电通信中使用的是通信电缆，其主要原材料是金属铜和铝，其资源严重缺乏。因此，光纤通信系统使用光纤作为信道，可以节省大量的铜和铝，1 km 的光纤线路可以节省 150 吨铜和 500 吨铝。

④ 光纤作为信道具有体积小、质量轻的优点，便于通信线路的敷设。例如，一条 12 心的光缆直径为 12 mm，质量约为 90 g/m。由于光纤、光缆线径细，可绕性好，因此便于敷设，可直埋，可架空，也可插入已有的电缆管道，方便扩容，也特别适合于飞机、火箭、导弹、潜艇、轮船、人造卫星和宇宙飞船上使用。

⑤ 光纤通信系统的抗干扰能力强，使用安全。光纤是一种介质光波导，具有把光波封闭在其中进行传播的波导结构，不受电磁场干扰，可在强电磁场环境下工作，如在电力网或变电所内作为通信控制线路。光纤是石英介质波导，不打火花，且抗高温、抗腐蚀能力强，可在易燃易爆和有害气体的环境下工作，如能在化工、厂矿等环境恶劣的条件下工作。

但光纤信道也存在不足之处：①在敷设光纤、光缆时，弯曲半径不能过小，否则光纤中传输的导模将成为辐射模而损耗光能；②要求有比较好的光纤切断、连接技术；③分路、耦合比较麻烦。当然，随着光纤通信技术的不断进步，这些不足能够得到很好的克服和解决。

## 1.2.4 光纤通信的发展过程简介

1970 年美国康宁(Corning)公司研制出了 20 dB/km 的高纯石英光纤。同年，Hayashi 等人研制出了室温下连续运行的 GaAlAs (镓铝砷) 双异质结注入式半导体激光器，从而为光纤通信提供了合适的光源和信道，从此开始了光纤通信的新纪元。因此，1970 年是光纤通信史上十分关键的一年，被誉为光纤通信年。光纤通信与同轴电缆、微波、毫米波和超导体线路等传输方式相比，已被普遍承认，它已发展成为占压倒优势的传输方式。

光纤通信经过 30 多年的发展，经历了 5 个发展阶段，其中已有五代光纤通信系统由试验研究进入了实用阶段。



### (1) 第一代光纤通信系统

1978年,第一代光纤通信系统(0.85  $\mu\text{m}$  多模光纤通信系统)正式投入商业应用。光源为半导体激光器(GaAlAs LD)或发光二极管(LED),工作波长 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 。该光纤通信系统称为短波通信系统。光电探测器为管Si-PIN(硅光电二极管)或Si-APD(硅雪崩光电二极管)。信道为均匀多模光纤,其衰减系数约2.5~4 dB/km,比特率为20~100 Mb/s,最大中继距离约10 km,最大通信容量约500 (Mb/s)·km(通信系统的通信容量通常用比特率与中继距离的乘积 $BL$ 表示。其中, $B$ 为比特率, $L$ 为中继距离)。

### (2) 第二代光纤通信系统

20世纪80年代初,第二代早期多模光纤通信系统(1.3  $\mu\text{m}$  多模光纤通信系统)问世。光源为InGaAsP半导体激光器,工作波长 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 。该波段是石英光纤的第二个低损耗窗口,有较低的损耗和最低的色散。光电探测器为Ge-PIN管(锗光电二极管)或Ge-APD(锗雪崩光电二极管)。信道为均匀多模光纤。由于多模光纤的模间色散,该早期多模光纤通信系统的比特率 $B$ 限制在100 Mb/s以下。随着光纤由多模光纤发展到单模光纤,单模光纤比多模光纤的色散更低,损耗更小。因此,采用单模光纤通信系统可进一步提高系统的比特率和中继距离。1981年,一个实验室演示了一个单模光纤通信实验系统,其比特率为2 Gb/s,传输距离为44 km,并且很快就引入到了商业系统。1987年,第二代单模光纤通信系统(1.3  $\mu\text{m}$  单模光纤通信系统,称长波光通信系统)投入了商业运营,其比特率高达1.7 Gb/s,中继距离为50 km左右。

### (3) 第三代光纤通信系统

1990年,第三代光纤通信系统已能提供商业应用。光源为铟镓砷磷(InGaAsP)半导体激光器,光电探测器与第二代光纤通信系统同为锗光电探测器,信道为单模光纤(工作波长为1.55  $\mu\text{m}$ )。该系统是工作在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 长波波段的单模光纤通信系统,为长波光通信系统。该波段也是石英光纤损耗最低的窗口,1979年其损耗就达到了0.2 dB/s的低损耗,是石英光纤的第三低损耗窗口。由于在1.55  $\mu\text{m}$ 处光纤的色散高,而且当时多纵模常规InGaAsP半导体激光器的谱宽问题还未得到解决,因此推迟了第三代光纤通信系统的问世。后来由于在波长为1.55  $\mu\text{m}$ 附近,具有最小色散的色散位移单模光纤(Dispersion-Shifted Fiber, DSF)和单纵模激光器的研制成功,从而解决了1.55  $\mu\text{m}$ 附近光纤色散高和半导体激光器的谱宽问题,终于在1990年第三代光纤通信系统投入商业运营。该系统的传输速率(即比特率)为2.4 Gb/s,中继距离大于100 km。通过精心设计激光器和光接收机,其比特率能超过10 Gb/s。

### (4) 第四代光纤通信系统——相干光纤通信系统

相干光纤通信系统(Coherent Optical Fiber Communication Systems, COFCS)是利用激光的相干性,将无线电通信中采用的“外差”接收(或零差接收)和先进的调制方式[调幅键控(ASK)、相移键控(PSK)、频移键控(FSK)]应用到光纤通信中的系统。相干光纤通信系统的示意框图如图1.4所示。

频率为 $f_0$ 的光载波经调制后,输出的已调光波进入光匹配器。光匹配器有两个作用:获得最大的发射效率,使已调光波的空间分布和 $\text{HE}_{11}$ 模之间有最好的匹配;保证已调光波的偏振态和单模光纤的本征偏振态有最好的匹配。已调光波经单模光纤传输后,因光纤的损耗、色散和偏振态的变化等因素的影响使已调光波发生畸变。因此,在接收端光波首先进入光匹配器,使信号光波的空间分布和偏振方向与本振匹配,以便得到最大可能的混频效率。