

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

光纤通信

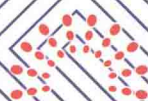
梁猛 刘崇琪 杨祎 编著

Optical Fiber Communications



 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



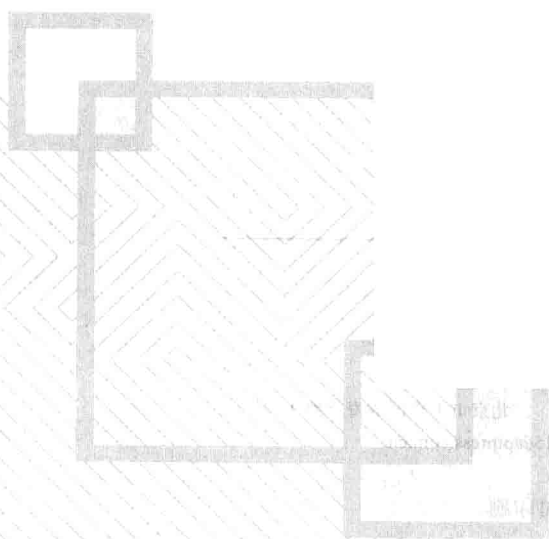
高校系列

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

光纤通信

梁猛 刘崇琪 杨祎 编著

Optical Fiber Communications



人民邮电出版社
北京



图书在版编目(CIP)数据

光纤通信 / 梁猛, 刘崇琪, 杨祎编著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2015. 9
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-39768-3

I. ①光… II. ①梁… ②刘… ③杨… III. ①光纤通
信—高等学校—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第177100号

内 容 提 要

本书系统地介绍了光纤通信的基本原理和技术。全书分为基础篇和提高篇两个部分。基础篇以特性、应用为重点, 介绍光纤通信系统中的光纤、光发射和光接收, 各类线路器件、光放大、色散补偿和复用等线路技术, 以及光纤通信系统和网络基础。提高篇以实现原理为重点, 深入介绍光纤通信系统中的光源、光检测器、光放大器等典型有源器件, 波分复用器、光隔离器、光环行器等典型无源器件, SDH、MSTP、OTN等光传输网系统、PON等光接入网系统。基础篇从基本知识出发, 以便读者先构建起光纤通信系统体系框架, 提高篇可帮助读者根据需要进一步深入学习相关知识。

本书可作为通信工程、电子信息工程、光电信息科学与工程等相关本科专业的教材或相关研究生的教学参考书, 也可以作为从事光纤通信工作的科技人员的参考用书。

-
- ◆ 编 著 梁 猛 刘崇琪 杨 祎
责任编辑 张孟玮
执行编辑 李 召
责任印制 沈 蓉 彭志环
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京中新伟业印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 13.75 2015年9月第1版
字数: 333千字 2015年9月北京第1次印刷
-

定价: 38.00元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

自 20 世纪 60 年代激光器的发明、理论证明了低损耗光纤的应用可能开启了光纤通信发展的大门；1970 年，低损耗光纤的成功研制，证明了光纤可以作为通信的传输媒质，同时室温下连续工作的半导体激光器的实现，解决了光通信载波产生的问题，光纤通信技术开始了实用化的发展。1976 年，世界上第一条、速率 45Mbit/s 的实验线路开通，光纤通信开始了商业应用发展。20 世纪 80 年代，光纤通信以其长距离、大容量的传输特性逐渐取代电缆通信在通信网络中广泛应用。之后，随着载波波长从 850nm 到 1310nm、1550nm 的过渡，多模光纤转变为单模光纤，掺铒光纤放大器（EDFA）的出现、波分复用技术应用等，光纤通信系统的传输速率以超摩尔定律的速度迅速增长。进入 21 世纪，随着多种先进调制技术、色散补偿技术、各类器件技术等的发展，出现了以单波长 40Gbit/s 和 100Gbit/s 为基础的总容量可达 10Tbit/s 的波分复用系统的商业应用，单波长 400Gbit/s 的系统也将会开始逐步商用。

目前，光纤通信已经广泛应用到长途骨干网、城域网和接入网中，成为现代信息传输网络的基础，深刻地影响着人类的活动。光纤通信知识也成为很多专业特别是信息技术类相关专业的学生需要去了解或掌握的知识。本书作者曾经针对通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、光电信息科学与工程、应用物理等理工科专业讲授过光纤通信课程，也对经管类专业讲授过光纤通信的通识课程。由于不同的专业有不同的专业基础和专业方向，课程内容需要有不同的取舍。更为重要的，不管哪个专业和哪个专业方向，要使学生真正掌握相关的知识，需要在教学过程中能够使学生先建立起光纤通信的知识体系架构，在系统中去理解和掌握所学习的知识点，解决学生学习过程中普遍存在的“只见树木不见森林”的问题。

为了适用不同专业学生的使用，也为了解决学生学习过程中易于陷于细节而忽视全局的问题，全书分为基础篇和提高篇两个部分。基础篇以特性、应用为重点，以便读者先构建起光纤通信系统体系框架，主要介绍光纤通信系统中的光纤、光发射和光接收，各类线路器件、光放大、色散补偿和复用等线路技术，以及系统和网络基础。提高篇以实现原理为重点，深入介绍光纤通信系统中的光源、光检测器、光放大器等典型有源器件，波分复用器、光隔离器、光环行器等典型无源器件，SDH、MSTP、OTN 等光传输网系统、PON 等光接入网系统，供读者根据需要进一步深入学习相关知识。

本书第 2 章、第 3 章、第 6 章 1~3 节由刘崇琪编写，第 5 章、第 7 章和第 8 章由杨祎编

写，其余部分的编写和全书的统稿由梁猛完成。在本书的编写和出版过程，受到西安邮电大学教务处教材建设立项的支持。西安邮电大学光电技术系刘娟、吕淑媛、陆蓉、谢东华等老师对本书的体系、内容提出了宝贵的建议和意见，在此向他们表示深切的谢意。

由于编者水平有限，书中难免有不足、不妥之处，敬请读者不吝赐教和批评指正。

编 者

2015 年 3 月

目 录

上篇 基础篇

第 1 章 光通信概论	2
1.1 光通信的基本概念	2
1.1.1 通信的基本概念	2
1.1.2 光通信的概念	3
1.1.3 光纤通信系统的构成	4
1.2 光纤通信的发展历史	4
习题	7
第 2 章 光纤	8
2.1 光纤的结构、类型	8
2.1.1 光纤的结构	8
2.1.2 光纤的类型	8
2.2 光纤的射线分析	10
2.2.1 光在介质中的传播规律	10
2.2.2 阶跃光纤射线分析	10
2.2.3 渐变光纤射线分析	13
2.3 光纤传输特性	14
2.3.1 光纤损耗特性	14
2.3.2 光纤色散	17
2.3.3 光纤的非线性	20
2.4 光纤的制造、光缆	21
2.4.1 光纤的制造	21
2.4.2 光缆	24
2.5 ITU 建议	28
2.5.1 G.651 光纤	28
2.5.2 G.652 光纤	28
2.5.3 G.653 光纤	29
2.5.4 G.654 光纤	29
2.5.5 G.655 光纤	29
2.5.6 G.656 光纤	29
2.5.7 G.657 光纤	30
习题	30

第 3 章 光发射和光接收	31
3.1 光源与光发射机	31
3.1.1 光纤通信对光源的要求	31
3.1.2 半导体激光器 (LD) 及其特性	32
3.1.3 半导体发光二极管 (LED) 及其特性	37
3.1.4 光发射机及其性能参数	39
3.2 光电检测器和光接收机	42
3.2.1 光纤通信对光电检测器的要求	42
3.2.2 光电检测器类型	43
3.2.3 光电检测器性能参数	44
3.2.4 光接收机的组成原理和性能	45
习题	48
第 4 章 线路器件与技术	50
4.1 线路器件	50
4.1.1 光隔离器	50
4.1.2 光环行器	52
4.1.3 光纤连接器	52
4.1.4 光耦合器	56
4.1.5 光纤光栅	57
4.1.6 光衰减器	61
4.1.7 光开关	62
4.1.8 光调制器	64
4.2 线路技术	64
4.2.1 光复用技术	64
4.2.2 光放大技术	69
4.2.3 色散补偿技术	72
习题	74
第 5 章 系统和网络	75
5.1 数字光纤通信系统	75

5.1.1 点对点的数字光纤通信系统的组成.....	75
5.1.2 光线路编码.....	77
5.1.3 光纤通信系统的监控系统.....	79
5.1.4 系统的性能指标.....	79
5.1.5 系统中继距离的设计.....	83
5.2 光传输网.....	84
5.2.1 光纤传输系统的网络拓扑结构.....	85
5.2.2 SDH 系统与网络.....	86
5.2.3 WDM 系统与网络.....	89
5.2.4 OTN 系统与网络.....	92
5.3 光接入网.....	95
5.3.1 接入网定义.....	95
5.3.2 无源光接入网.....	96
5.3.3 有源光接入网.....	97
习题.....	97

下篇 提高篇

第 6 章 光器件技术.....	99
6.1 光源.....	99
6.1.1 激光物理基础.....	99
6.1.2 半导体激光二极管.....	100
6.1.3 半导体发光二极管.....	104
6.2 半导体光电二极管.....	106
6.2.1 PN 光电二极管.....	106
6.2.2 PIN 光电二极管.....	106
6.2.3 APD 光电二极管.....	107
6.3 光放大器.....	107
6.3.1 半导体光放大器 (SOA)	107
6.3.2 掺铒光纤放大器 (EDFA) ..	108
6.3.3 拉曼光纤放大器.....	112
6.3.4 布里渊光纤放大器.....	114
6.4 光隔离器、光环行器.....	114
6.4.1 偏振态的控制.....	114
6.4.2 光隔离器.....	115
6.4.3 光环行器.....	117
6.5 光耦合器.....	119

6.5.1 光学分束型光耦合器.....	120
6.5.2 消逝场耦合型光耦合器.....	120
6.6 波分复用器.....	122
6.6.1 色散型波分复用器.....	122
6.6.2 阵列波导光栅 (AWG)	123
6.6.3 干涉滤波片型波分复用器....	123
6.6.4 熔锥型波分复用器.....	124
6.6.5 光梳状滤波器(Interleaver)	124
6.6.6 其他类型.....	125
6.7 光纤光栅.....	125
6.7.1 光纤光栅的制作.....	125
6.7.2 光纤光栅的工作原理.....	127
6.8 电光调制器.....	129
习题.....	132

第 7 章 光传输网..... 133

7.1 SDH 系统.....	133
7.1.1 SDH 的速率与帧结构.....	134
7.1.2 SDH 的复用结构.....	136
7.1.3 139.264Mbit/s 支路信号 复用成 STM-N 信号.....	137
7.1.4 34.368Mbit/s 支路信号 复用成 STM-N 信号.....	141
7.1.5 2.048Mbit/s 支路信号 复用成 STM-N 信号.....	143
7.1.6 虚容器的级联.....	145
7.1.7 SDH 的开销字节.....	148
7.1.8 SDH 的设备功能块.....	152
7.1.9 SDH 的网同步.....	158
7.1.10 SDH 的分层结构.....	161
7.1.11 SDH 的网管系统.....	168
7.2 基于 SDH 的多业务传送平台.....	169
7.2.1 MSTP 技术的工作原理.....	169
7.2.2 MSTP 技术的关键技术.....	170
7.2.3 MSTP 的应用.....	173
7.3 WDM 系统.....	175
7.3.1 波分复用系统的工作原理....	175
7.3.2 DWDM 系统的组成.....	177
7.4 OTN 系统.....	179

7.4.1 OTN 的概念.....	179	8.2.1 无源光网络 (PON) 的 拓扑结构	203
7.4.2 OTN 的分层结构.....	180	8.2.2 无源光网络 (PON) 的 关键技术	205
7.4.3 OTN 的速率等级与帧结构...	182	8.2.3 APON 技术.....	206
7.4.4 OTN 的开销.....	184	8.2.4 EPON 技术	207
7.4.5 OTN 的映射与复用结构.....	188	8.2.5 GPON 技术.....	207
7.4.6 OTN 的设备.....	192	8.2.6 PON 的技术比较.....	208
7.4.7 OTN 的组网与应用.....	197	8.3 有源光接入网	210
习题	199	8.4 EPON 设备的应用实例	210
第 8 章 光接入网系统	201	习题	211
8.1 概述.....	201	参考文献	212
8.2 无源光网络 (PON)	203		

光纤通信由于其传输容量大、传输距离长的特点,已成为现代通信的基石,为现代信息技术的飞速发展提供了强有力的支持。本章简要介绍光通信的基本概念和分类、光纤通信系统的基本构成和光纤通信技术的发展。

本章重点: 光通信的基本概念, 光纤通信系统的基本构成, 光纤通信技术的发展和光纤通信的特点。

1.1 光通信的基本概念

1.1.1 通信的基本概念

简单来说,通信是信息的互通,即人们通过听觉、视觉等感官或者仪器、仪表等感知到的关于现实世界的各类信息的传递。古代战争中的烽火狼烟、击鼓鸣金,日常生活中的手语、各国海军通用的旗语等都是通信的具体体现,只不过这些手段和方法所能传递的信息量比较少、传递的范围也比较小。随着现代科学技术的发展,人们借助电、光等信号来更大范围地传递更多的信息,满足人类社会发展的需求。最基本的现代意义的通信系统结构,如图 1.1 所示。

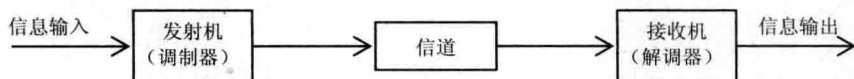


图 1.1 通信系统构成

(1) 信源、信宿

信源是指产生各种信息(如语音、图像、文本、数据等)的信息源,可以是人,也可以是机器。信宿是信息的接收者,可以是人,也可以是机器,与信源组合,根据需要可以构建人一人、人一机、机一人、机一机通信。

(2) 发射机、接收机

发射机的作用是将信源发出的信号通过调制变换成适合在信道中传输的信号。所谓调制是指一个信号影响另一个信号、使得两个信号之间建立起一种联系的过程,即一个信号的某种特征(如振幅、频率或相位)会随着另一个信号的某种特征(可以是一样的特征,也可以

是不一样的特征)作相应的变化,就可以把一个信号上反映的信息用另一个信号表现出来。接收机的作用正好与发射机相反,可以将从信道上接收的信号变换成信宿可以接收的信息。与调制相对应,接收机通过解调完成信号的反变换,还原原信号。对于不同的信源和不同的信息承载方式,发射机和接收机有不同的实现方式。

(3) 传输介质

信道即承载信息的信号的传输介质。

通信系统可以按信道中传输信号、调制方式、传输介质等的不同进行分类。

(1) 按信道中传输信号分类

如果信道中传输的用以承载信息的信号是电信号,则称为电通信系统;如果信道中传输的用以承载信息的信号是光信号,则称为光通信系统。通常把信道中传输的用以承载信息的信号称为载波,也即按载波的不同,通信系统可分为电通信系统、光通信系统等。载波频率的高低决定了传输信息的多少,即载波频率越高,传输信息容量越大。

除了载波不同之外,信道中传输的信号还可以以模拟信号、数字信号的形式存在,即通信系统可分为模拟通信系统和数字通信系统。数字通信系统由于抗干扰能力强、差错可控、易于处理等特点应用广泛。

(2) 按调制方式分类

根据载波调制方式的不同,通信系统可以分为幅度调制、相位调制、频率调制等,即利用载波的幅度、相位、频率等携带信息。

(3) 按传输介质分类

按传输介质分类,通信系统可以分为有线通信系统和无线通信系统。根据载波的不同,有线通信系统的传输介质可以是架空明线、电缆和光缆。无线通信系统是在自由空间传输电磁波或光波进行信息传输。

图 1.1 所示是信息传输最基本的点对点单向通信系统的构成。实际应用中,要实现双向通信以及多个用户之间的相互通信,需要将多个通信系统有机地组成一个整体,形成通信网协同工作。

1.1.2 光通信的概念

所谓光通信就是以光波作为载波进行通信的技术。类似于其他通信方式,根据传输介质的不同,光通信也可以分为有线方式和无线方式。光通信的有线方式即光纤通信,无线方式包括自由空间光通信(FSO)、紫外光通信、可见光通信、水下光通信等。

根据图 1.2 电磁频谱可以看出,光波(包括紫外线、可见光、红外线)的频率远远大于无线电波的频率,所以光波作为载波比电磁波作为载波有更大的信息容量。

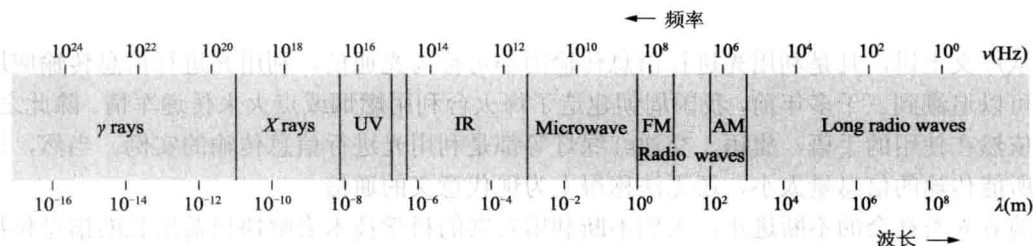


图 1.2 电磁频谱

1.1.3 光纤通信系统的构成

光纤通信是以光波为载波以光纤为传输介质的通信方式。图 1.3 所示为点到点单向光纤通信系统的构成图。图中给出了一个方向的传输结构，反方向的传输结构是相同的。其中，电发射机的作用是对来自信源的信号进行处理，如模/数变换、多路复用等。光发射机中通过驱动光源发光，使光信号具有和电信号相对应的变化，即将要传输的信息加载在光信号上，完成对光载波的调制，并将光信号送入光纤进行传输。光接收机接收经光纤传输的光信号，利用光检测器将光信号还原成电信号，完成光信号的解调，并对解调的电信号进行放大、整形及再生恢复原形后，输入到电接收机，恢复原始信息，从而完成整个信息的传输过程。对于长距离的光传输系统，由于光纤对信号产生的衰减及畸变效应，为保证信号的传输质量，经过一段距离的传输后，需采用中继器对衰减和畸变了的光信号放大、整形、再生成一定强度的光信号，继续向前传送。

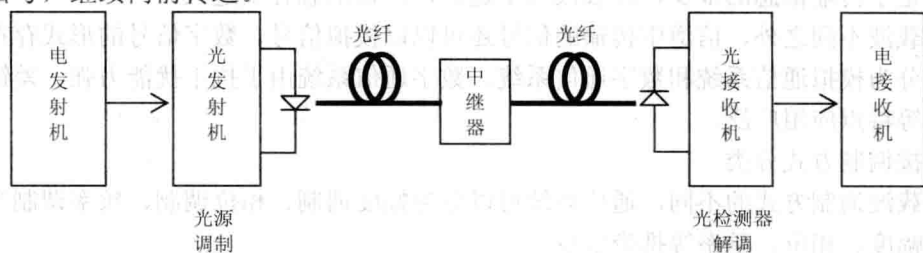


图 1.3 光纤通信系统构成

简单起见，图 1.3 可以简化为图 1.4，可以用“电光转换—光纤传输—光电转换”概括描述光纤通信系统的核心，即光纤通信系统在发射端实现电光转换，完成光载波的调制；携带信息的光信号在光纤线路中传输；在接收端，完成光载波的解调，恢复原始信息。



图 1.4 光纤通信系统简化示意图

1.2 光纤通信的发展历史

从广义上讲，凡是利用光进行信息传输的都可称为光通信。利用光进行信息传输应用的历史可以追溯到三千多年前，我国周朝建造了烽火台利用燃烟或点火来传递军情。除此之外，现在依然在使用的、手语、旗语、交通红绿灯等都是利用光进行信息传输的实例。当然，这些方式所能传输的信息量太小，还无法称得上为现代意义的通信。

随着人类社会的不断进步，人们不断利用发展的科学技术去解决日益增长的信息传播的需求。1837 年，美国人莫尔斯发明了电报，标志着人类进入了电通信时代。此后，贝尔发明

了电话，马可尼、波波夫发明了无线电通信。直至今，电通信在通信领域都占据重要地位。由于电通信的通信容量几乎和所使用的载波频率成正比，为了解决人们对通信容量的要求越来越高，人们不断开发和利用频率更高的电磁波频段。但由于信号的产生、传输介质等关键技术水平所限，除了在微波频段取得巨大成功之外，在毫米波、亚毫米波等频段遇到了难以突破的困难。幸运的是，利用另外的频率更高的频段——光波进行信息传输的光纤通信系统的关键技术逐一得到解决，光纤通信已逐步取代传统的电通信，成为现代信息传输网络的主体。

实际上具有现代意义的光通信从贝尔在发明电话 4 年后的 1880 年发明光电话开始。如图 1.5 所示，贝尔利用太阳光做光源，通过反射镜、透镜等把光会聚到送话器前的可以振动的镜片上。当人对着送话器说话时，振动镜就会振动发生变形，引起反射镜的反射系数发生变化，使发光强度随着语音强弱变化，实现了语音对发光强度的调制。被语音调制的强度变化的光信号经透镜等光学系统后发射出去。在接收端，从大气传输来的光信号通过抛物面反射镜会聚到电阻随光的强弱变化的硒管上，产生强度变化的光电流，驱动受话器发声，恢复发送端的话音信号。利用这种方法贝尔实现了两百多米长的语音的传输。此后，人们考虑利用弧光灯替代日光、硅光电池代替硒管等改善传输的效果，但也无法达到长距离、大容量的传输，满足实际的需求。由于限于当时的技术发展水平能够获得的都是频谱极宽的光源，无法实现高速调制，同时在大气中进行传输的光信号受空气质量和气候的影响十分严重，即未能有效解决通信的载波源和传输介质两大关键问题，所以光通信的发展一直处于停滞状态。

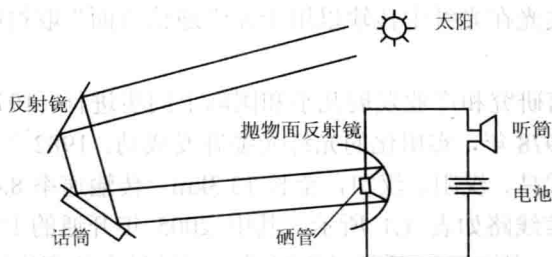


图 1.5 贝尔光电话的结构示意图

1960 年梅曼发明了世界上的第一台红宝石激光器，解决了单频光载波的产生问题。虽然红宝石激光器及之后出现的氦氖气体激光器、二氧化碳气体激光器等由于效率、寿命等问题还不能用于实际的光通信系统，但已经为现代光通信的实现开启了大门，使得光通信的发展成为可能。随着半导体技术、激光技术的发展，1970 年，美国贝尔实验室成功研制了在室温下可连续工作的 GaAlAs 半导体激光器，为光通信提供了可实用化的光源。

光信号在大气里传播会受到空气的吸收、散射造成信号无法长距离传输。人们尝试在特定的介质中，像电线电缆传输电信号那样传输光信号。实际上在古代人们已经发现玻璃棒可以导光。在 20 世纪 30 年代，人们开始把玻璃棒拉成细丝称为光导纤维（简称光纤），成功地将光纤用于胃镜等医疗设备上，证明了光纤也可以传光。但是，在 20 世纪 60 年代以前，能制作出来的光纤损耗都很大，达到了 3000dB/km，即信号传输 10m 后光信号功率只剩下千分之一，无法用以实际通信。直到 1966 年 7 月，英籍华人高锟发表了论文《Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies》，理论上证明了基于石英材料的光纤的损耗可以通过改进工

艺降低到几个 dB/km，就可以满足通信的需要。1970 年，美国康宁公司成功研制出了损耗为 20dB/km 的光纤，为长距离的光信号传输提供了可能。随着光纤制造技术的不断改进，光纤损耗进一步降低。目前，在使用光波段光纤的损耗已降至零点几 dB/km 的水平。

在 20 世纪 70 年代，室温下可连续工作的半导体激光器、低损耗光纤的先后出现，解决了用光进行信息传输的源及传输媒介的两大关键问题。1976 年，贝尔实验室在美国亚特兰大和华盛顿建立了世界上第一条、速率 45Mbit/s 的实验线路，光通信开始向商业应用发展。历经多模光纤替换为单模光纤、载波波长由 850nm 替换为 1310nm 然后再替换为 1550nm、光纤放大器、波分复用等技术的发展，光纤通信的容量和传输距离成倍增长，光纤通信技术被广泛应用于信息传输的领域，成为现代信息网络的骨干和基础。

进入 21 世纪，随着多种先进调制技术、色散补偿技术、各类器件技术等的发展，出现了以单波长 40Gbit/s 和 100Gbit/s 为基础的总容量可达 10Tbit/s 的波分复用系统的商业应用。预计在 2017 年左右单波长 400Gbit/s 的系统也会开始逐步商用，有效地解决运营商面临的网络业务流量及带宽持续增长的压力。

由于载波频率高、光纤损耗低等使得传输容量大、传输距离长成为光纤传输的最显著的特点，是光纤通信成为现代信息传输网络基础的根本原因。除此之外，由于光纤及光缆的工作方式、结构特点，外界的电磁信号很难进入到光纤线路中，使得光纤通信具有很强的抗干扰能力；同时，光纤中的信号也很难从线路中泄露出来，因此保密性好。光纤制作的材料为石英砂，地球储量丰富，易于得到，可节约金属材料；光纤线径细、质量轻，易于施工和维护。

高锟由于在“有关光在光纤中传输以用于光学通信方面”取得的突破性成就，获得 2009 年诺贝尔物理学奖。

在中国，光纤通信研究和产业发展几乎和国际上同步进行。1973 年武汉邮电科学研究院开始研究光纤通信。1978 年，实用化的光纤光缆开发成功。1982 年，国内第一条商用光纤线路在武汉建成，跨越武昌、汉阳、汉口，全长 13.3km，传输速率 8.448Mbit/s。我国各种速率的第一条商用光纤通信线路如表 1.1 所示，其中 2005 年开通的上海至杭州国家一级干线的 3.2Tbit/s（80×40Gbit/s）的 WDM 系统是当时世界容量最大的商用线路。

表 1.1 我国各种速率的第一条商用光纤通信线路

时 间	主要技术特点	地 点
1982 年	8.448Mbit/s，波长 850nm，多模光纤	武汉
1983 年	34Mbit/s，波长 1300nm，多模光纤	武汉
1986 年	34Mbit/s，单模光纤	汉口—荆州
1992 年	140Mbit/s	合肥—芜湖
1993 年	565 Mbit/s	上海—无锡
1998 年	SDH 2.5Gbit/s	海口—三亚
1999 年	WDM 8×2.5Gbit/s	青岛—济南
2000 年	WDM 32×2.5Gbit/s	大连—沈阳
2003 年	WDM 160×10Gbit/s	上海—南京
2005 年	WDM 80×40Gbit/s	上海—杭州

光纤通信技术经过 40 余年的发展，已广泛应用于工业领域的各个环节，深入影响着人类的社会生活。光纤通信技术已成功应用于通信网、互联网、广播电视网，成为信息高速公路

的主要物理载体,是三网融合的物理基础。国内各大电信运营商都建设有覆盖全国范围的光纤通信网络,包括骨干网、接入网、用户网;电力、公安、国防等还建设专用通信网络,为特定领域和范围的用户服务。同时,光纤数据总线在飞机、舰船、航天器等领域中发挥着越来越重要的作用。光纤制导鱼雷、光纤制导导弹等光纤制导武器利用光纤传输回目标图像形成控制信号完成精确制导;结合光电传感器构建光纤传感网络,具有抗干扰能力强、耐腐蚀、绝缘性好等特点,在军事、工业过程控制等领域广泛应用。

习 题

1. 说明通信系统的构成,列举目前应用的通信方式并简单比较。
2. 举例说明电磁波的各个频段可能在哪些领域应用。
3. 光纤通信系统主要由哪几部分构成?简述各部分的作用。
4. 说明光纤通信的主要特点。
5. 简述光纤通信的发展历程,列举光纤通信发展过程中的主要事件。
6. 解释贝尔发明的光电话在当时无法实际应用的原因。
7. 说明光纤通信的实际应用。

第2章 光纤

光纤通信系统区别于电缆通信系统主要有两点：第一是用光纤作为传输介质，第二是传输光信号。因此，光纤通信系统的核心是光纤。本章首先介绍光纤的基本结构和类型，并用射线方法分析光纤传输光信号的基本原理。其次，讨论光纤传输光信号的性能参数及其对信号传输质量的影响。最后，简要介绍光纤制造工艺和 ITU-T 关于光纤的有关建议。

本章重点：光纤的基本结构，光纤传输光信号的基本原理，衰减和色散的概念和对传输的影响，光纤的制造工艺，光纤类型。

本章难点：光纤的射线分析方法，色散的概念、影响。

2.1 光纤的结构、类型

2.1.1 光纤的结构

光纤是由透明介质材料构成的能够传输光信号的圆柱形纤维。最简单的光纤是由圆柱形的纤芯和其外的包层构成，其横截面如图 2.1 所示。纤芯主要用来传输光，而包层的作用是把光限制在纤芯中。为了实现这种导光作用，纤芯的折射率 n_1 要高于包层的折射率 n_2 。

通常用 a 表示纤芯的半径，用 b 表示包层的外半径。通信用光纤的纤芯直径在几到几十微米之间，而包层外径一般为 $125\mu\text{m}$ 。

光纤的传输特性主要由纤芯和包层决定。在制造过程中，光纤的包层外面被覆涂覆层，其作用是增强光纤的机械强度和柔韧性。涂覆层外再加套塑层可以进一步提高光纤的机械性能。

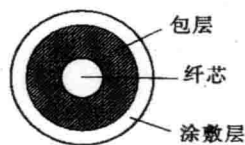


图 2.1 光纤的结构

2.1.2 光纤的类型

光纤的分类方法很多，可以按照光纤横截面上的折射率分布来分类，也可按光纤中传输模式的数量来分类，还可以按光纤的使用材料、工作波长或应用场合等进行分类。同一光纤，在不同的分类下会有不同的名称。

1. 按照光纤横截面上的折射率分布分类

光纤的折射率不随轴向变化,只随径向变化。因此其折射率分布可以用折射率随径向变化的函数 $n(r)$ 来表示:

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & r \leq a \\ n_2, & r \geq a \end{cases} \quad (2.1)$$

按照折射率分布不同,光纤可分为阶跃光纤和渐变光纤两种,其折射率分布如图 2.2 所示。

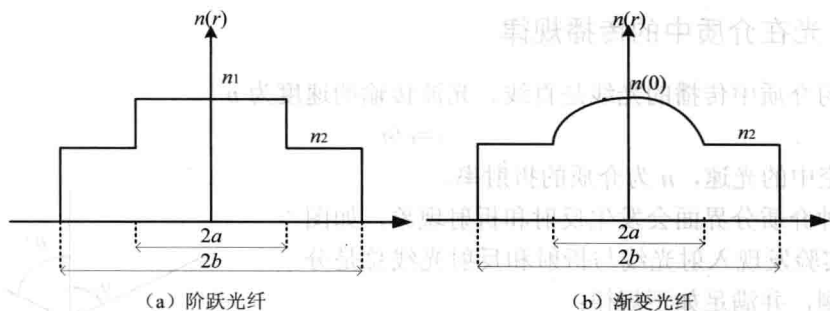


图 2.2 光纤折射率分布

阶跃光纤纤芯折射率 n_1 为常数,包层折射率 n_2 也为常数,纤芯折射率 n_1 大于包层折射率 n_2 。阶跃光纤纤芯中各处的折射率相同,又称为均匀光纤。

渐变光纤纤芯折射率 n_1 不再是常数,而是随径向 r 连续变化,在光纤轴线 $r=0$ 处,折射率最高,随 r 增加逐渐减小,在纤芯与包层界面处达到包层折射率 n_2 。渐变光纤纤芯中各处的折射率不相同,又称为非均匀光纤。

2. 按照光纤中的传输模式数量分类

根据光纤中传输模式的数量,光纤可分为多模光纤和单模光纤。

在一定的工作波长下,多模光纤中光的传输是由多个模式完成的,而单模光纤中光的传输是由单一模式完成的。从电磁场的角度看,模式是指可以独立存在的一种电磁场分布。从光射线的角度看,模式是指光传输的一个路径。

3. 按照光纤材料分类

按照材料不同,光纤可分为以下几种类型。

石英光纤: 纤芯和包层的主要材料均为石英,即二氧化硅 (SiO_2),通过掺杂实现纤芯和包层折射率的不同。

多组分玻璃光纤: 组成光纤的玻璃成分除 SiO_2 外,还含有碱金属、碱土金属、铅硼等的氧化物。

塑料包层光纤: 纤芯为石英玻璃,包层为塑料的光纤。

全塑光纤: 纤芯和包层全为塑料的光纤。

除此之外,还有许多特种光纤。通信中广泛使用的是石英系光纤。