



普通高等教育“十一五”  
国家级规划教材

孙学康 张金菊 编著

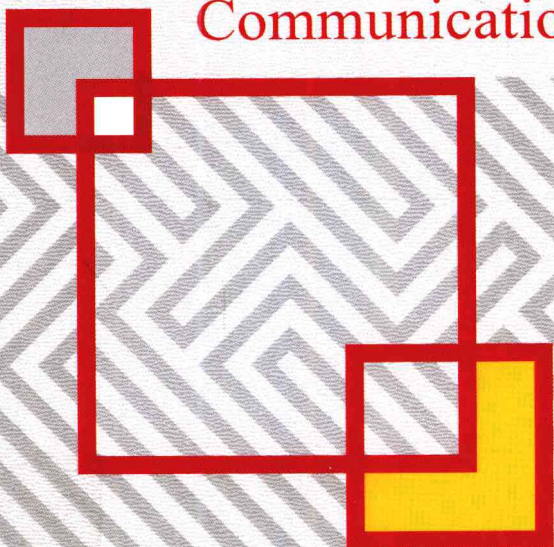
# 光纤通信 技术 (第3版)

21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

北京市精品教材

Optical Fiber

Communications (3rd Edition)



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

精品系列



普通高等教育“十一五”  
国家级规划教材

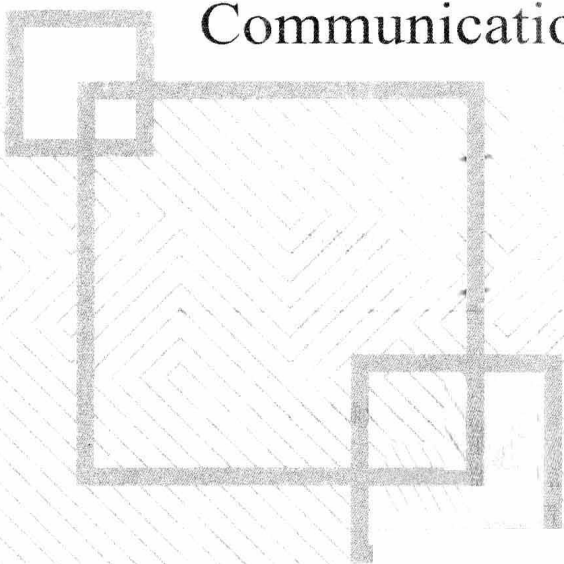
孙学康 张金菊 编著

# 光纤通信 技术 (第3版)

北京市精品教材  
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

Optical Fiber

Communications (3rd Edition)



人民邮电出版社  
北京



精品系列

## 图书在版编目 (C I P) 数据

光纤通信技术：第3版 / 孙学康, 张金菊编著. —  
3版. — 北京：人民邮电出版社, 2012. 9  
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材  
ISBN 978-7-115-28411-2

I. ①光… II. ①孙… ②张… 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(2012)第135106号

## 内 容 提 要

本书全面地介绍光纤通信技术方面的基本概念、原理及实用系统。全书共分9章, 主要内容包括光纤通信的基本概念及其特点、光纤的导光原理、常用光器件介绍、光纤通信系统、SDH 光同步网、基于 WDM 的光传送网、城域光网络、分组传送网以及智能光网络。

本书可作为高等院校通信工程、计算机通信专业本科教材或研究生的教学参考书, 也可供从事通信工程方面的技术人员参考。

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材

### 光纤通信技术 (第 3 版)

- 
- ◆ 编 著 孙学康 张金菊  
责任编辑 滑 玉
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子邮件 [315@ptpress.com.cn](mailto:315@ptpress.com.cn)  
网址 <http://www.ptpress.com.c>  
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 17.25 2012 年 9 月第 3 版  
字数: 421 千字 2012 年 9 月河北第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-115-28411-2

定价: 38.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223  
反盗版热线: (010) 67171154

IP 业务的迅速增长,特别是各种多媒体应用的实用化,使得用户对网络服务质量的要求越来越高。光纤通信系统由于具有低的传输损耗和宽的传输带宽的特点,因此成为高速数据业务的理想传输通道。本书在介绍光纤通信基本概念和工作原理的基础上,重点介绍光纤通信的最新进展。

本书在内容取材和编写上具有以下特点。

(1) 内容全面。全书包括光纤的导光原理分析、主要光器件的工作原理及性能分析、SDH 光纤通信系统的结构及特性介绍,然后从应用的角度,详细地介绍了几种常用的光纤通信网络,如光同步网、基于 SDH 的多业务传送平台、波分复用系统、光传送网 OTN、PTN 分组传送网、城域光网络以及光互联网等。

(2) 循序逐进部分内容理论性较强,如光纤的导光原理、光器件的工作原理、噪声及灵敏度分析等。因此本书加入了射线光学基础、电磁场基础、半导体发光原理等内容,使其由浅至深、层次分明。

(3) 内容先进。书中包括光纤通信新技术以及实用先进技术,如光传送网的概念及结构、多业务传送平台、PTN 分组传送网、光网络的保护及其安全性分析、ASON 的体系结构及其路径选择策略、IP over WDM 技术、全光网络技术。

为了便于学习,每一章还提供了内容摘要、小结和习题。

本次修订过程中主要通过梳理理论知识点之间的衔接关系,进而缩减理论分析篇幅与难度,同时根据光通信的最新进展,重点补充光传送网和分组传送网等应用新技术,以适应技术和市场的需求。

本书可用作通信工程、计算机通信专业本科教材或研究生的教学参考书,也可供从事通信工程方面的技术人员参考。

本书的第 1 章由张金菊、孙学康编写,第 2、3 章由张金菊编写,第 4、5、6、7、8、9 章由孙学康编写。

在本书的编写过程中,得到北京邮电大学李玲、蒋佩璇、李文海、段炳毅、张政等教授和刘勇老师的热心指导,在此表示衷心的感谢,同时还要感谢段梅、王晓勤、乔容、杜聪等对本书所提供的帮助。

由于时间紧迫,学识有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

第 1 章 概述	1	2.4.4 其他常用单模光纤	39
1.1 光纤通信的基本概念	1	2.5 光纤的传输特性	40
1.1.1 引言	1	2.6 光纤的非线性效应	43
1.1.2 光纤通信系统的基本组成	1	2.6.1 受激光散射效应	43
1.1.3 光纤通信的优越性	2	2.6.2 光纤折射率随光强度变化而 引起的非线性效应	44
1.2 光纤通信网络的发展现状	3	2.6.3 光孤子通信	46
1.2.1 光网络的基本概念	3	小结	49
1.2.2 光网络的组网技术现状	3	习题	50
1.3 光纤通信网络的发展趋势	5	第 3 章 光纤通信器件	51
1.3.1 发展趋势	5	3.1 半导体光源	51
1.3.2 关键技术	6	3.1.1 激光器的物理基础	51
第 2 章 光纤	8	3.1.2 激光器的工作原理	54
2.1 光纤的结构和分类	8	3.1.3 半导体激光器的结构、工作 原理及工作特性	57
2.1.1 光纤的结构	8	3.1.4 分布反馈半导体激光器	63
2.1.2 光纤的分类	8	3.1.5 量子阱半导体激光器	64
2.2 用射线理论分析光纤的导光 原理	10	3.2 半导体光电检测器	64
2.2.1 平面波在两介质交界面的 反射与折射	10	3.2.1 半导体的光电效应	64
2.2.2 阶跃型光纤的导光原理	14	3.2.2 光纤通信中常用的半导体 光电检测器	65
2.2.3 渐变型光纤的导光原理	16	3.2.3 光电检测器的特性	67
2.3 用波动理论分析光纤的 导光原理	22	3.3 光放大器	70
2.3.1 麦克斯韦方程及波动 方程	22	3.3.1 掺铒光纤放大器	70
2.3.2 阶跃型光纤的标量近似 解法	24	3.3.2 光纤拉曼放大器	75
2.3.3 渐变型光纤的标量近似 解法	33	3.4 无源光器件	78
2.4 单模光纤	34	3.4.1 光定向耦合器	78
2.4.1 单模光纤的折射率分布	34	3.4.2 光隔离器与光环行器	79
2.4.2 单模传输的理论分析	35	3.4.3 光滤波器	80
2.4.3 单模光纤的双折射	37	3.4.4 光开关	80
		3.4.5 波长转换器	81
		3.4.6 波分复用器	82
		3.4.7 光纤光栅	84
		小结	85

习题 .....	85	5.5.2 SDH 的网同步 .....	135
<b>第 4 章 光纤通信系统</b> .....	87	5.6 SDH 网络性能 .....	137
4.1 IM-DD 光纤通信系统 .....	87	5.6.1 光接口、电接口的界定 .....	137
4.1.1 光纤通信中的线路码型 .....	87	5.6.2 误码性能 .....	138
4.1.2 IM-DD 光通信系统结构 .....	88	5.6.3 抖动性能 .....	139
4.2 衰减和色散对中继距离的 影响 .....	100	小结 .....	140
4.2.1 衰减与色散对中继距离的 影响 .....	100	习题 .....	141
4.2.2 10Gbit/s 及 10Gbit/s 以上的 SDH 光线路 .....	105	<b>第 6 章 基于 WDM 的光传送网</b> .....	142
4.2.3 使用光放大器的 SDH 高速 线路 .....	106	6.1 光传送网的基本概念及特点 .....	142
4.3 噪声及灵敏度分析 .....	107	6.2 波分复用系统 .....	143
4.3.1 接收机噪声 .....	107	6.2.1 光波分复用的基本概念 .....	143
4.3.2 接收机灵敏度 .....	109	6.2.2 波分复用系统 .....	147
小结 .....	110	6.2.3 WDM 网络的关键设备 .....	149
习题 .....	111	6.2.4 采用光波分复用技术的高速 光纤通信线路 .....	153
<b>第 5 章 SDH 光同步网</b> .....	113	6.2.5 1.6Tbit/s WDM 系统 .....	156
5.1 SDH 的基本概念 .....	113	6.3 光传送网 .....	159
5.1.1 SDH 的网络节点接口、 速率和帧结构 .....	113	6.3.1 WDM 光传送网的功能 分层模型 .....	159
5.1.2 SDH 网的特点 .....	115	6.3.2 OTN 帧结构和开销 .....	160
5.2 SDH 中的基本复用、 映射结构 .....	116	6.3.3 客户信号的映射和复用 .....	161
5.2.1 SDH 复用结构 .....	116	6.3.4 光通道网络 .....	163
5.2.2 映射方法 .....	119	6.3.5 OTN 关键设备 .....	166
5.3 SDH 光传输系统 .....	119	6.4 OTN 网络的保护方式 .....	167
5.3.1 系统结构 .....	119	6.4.1 线性保护 .....	167
5.3.2 SDH 网元 .....	120	6.4.2 子网连接保护 .....	169
5.4 SDH 传送网 .....	123	6.4.3 共享保护 .....	169
5.4.1 传送网的分层结构 .....	123	小结 .....	171
5.4.2 传送网的节点和节点 设备 .....	124	习题 .....	172
5.4.3 SDH 传送网 .....	125	<b>第 7 章 城域光网络</b> .....	173
5.5 SDH 网络中的安全性问题—— 保护与同步 .....	128	7.1 城域光网络的结构 .....	173
5.5.1 SDH 网络的保护 .....	128	7.1.1 城域网的分层结构 .....	173
		7.1.2 城域网的网络架构与 功能 .....	175
		7.2 光互连网 .....	176
		7.2.1 IP over SDH .....	177
		7.2.2 IP over WDM .....	179
		7.3 无源 EPON/GPON 光接入	

网络 .....	180	8.4 T-MPLS 的 OAM 技术 .....	214
7.3.1 光接入网的概念 .....	180	8.5 T-MPLS 网络中的安全性问题——	
7.3.2 无源光网络的传输原理及其		保护与同步 .....	216
应用 .....	181	8.5.1 网络保护 .....	216
7.3.3 以太网无源光网络 .....	184	8.5.2 同步技术 .....	220
7.3.4 GPON 与 EPON 的比较 .....	188	8.6 PTN 在 3G 传输承载网络中的	
7.4 基于 SDH 的多业务传送平台 .....	190	应用 .....	223
7.4.1 MSTP 的基本概念及		8.6.1 3G 网络对传输承载的	
特点 .....	190	要求 .....	223
7.4.2 MSTP 中的关键技术 .....	191	8.6.2 PTN 应用定位 .....	223
7.4.3 多业务传送平台 .....	196	8.6.3 3G 传输承载网络应用 .....	225
7.5 城域传送网的组网策略 .....	198	小结 .....	227
7.5.1 全业务运营对城域传送网的		习题 .....	228
要求 .....	198	<b>第 9 章 智能光网络</b> .....	229
7.5.2 城域传送网的组网策略 .....	200	9.1 智能光网络 .....	229
小结 .....	203	9.1.1 智能光网络的概念、特点及	
习题 .....	204	功能 .....	229
<b>第 8 章 分组传送网</b> .....	205	9.1.2 ASON 的网络体系结构 .....	230
8.1 PTN 的基本概念及特点 .....	205	9.1.3 ASON 控制平面及其核心	
8.1.1 PTN 的基本概念 .....	205	技术 .....	231
8.1.2 PTN 标准 .....	205	9.2 全光网 .....	245
8.1.3 PTN 的特点 .....	206	9.2.1 全光网的概念、结构及其	
8.2 PTN 网络的体系结构 .....	206	特点 .....	245
8.2.1 分层结构 .....	206	9.2.2 全光网中的关键技术 .....	246
8.2.2 PTN 的功能平面 .....	208	小结 .....	251
8.2.3 PTN 网元结构与分类 .....	209	习题 .....	252
8.3 T-MPLS 的业务承载与		<b>附录 A 双曲正割型折射指数分布光纤</b>	
数据转发 .....	210	可以获得自聚焦的证明 .....	253
8.3.1 T-MPLS 与 MPLS 的		<b>附录 B 标量解场方程的推导</b> .....	255
区别 .....	210	<b>附录 C 标量亥姆霍兹方程解的</b>	
8.3.2 T-MPLS 帧格式 .....	212	推导 .....	259
8.3.3 T-MPLS 各层的适配		<b>英文缩写</b> .....	262
过程 .....	213	<b>参考文献</b> .....	269
8.3.4 T-MPLS 的数据转发			
原理 .....	214		

光纤通信作为现代通信的主要传输手段,在现代通信网中起着重要的作用。自 20 世纪 70 年代初光纤通信问世以来,整个通信领域发生了革命性的变革,使高速率、大容量的通信成为现实。

为了使读者在深入学习之前对光纤通信有个基本的了解,本章将对光纤通信的基本概念、光纤通信发展现状及其发展趋势作一概括介绍。

## 1.1 光纤通信的基本概念

### 1.1.1 引言

利用光导纤维传输光波信号的通信方式称为光纤通信。

光波属于电磁波的范畴,按照波长的不同(或频率的不同)电磁波的种类也不同,具体名称如图 1-1 所示。其中,属于光波范畴之内的电磁波主要包括紫外线、可见光和红外线。

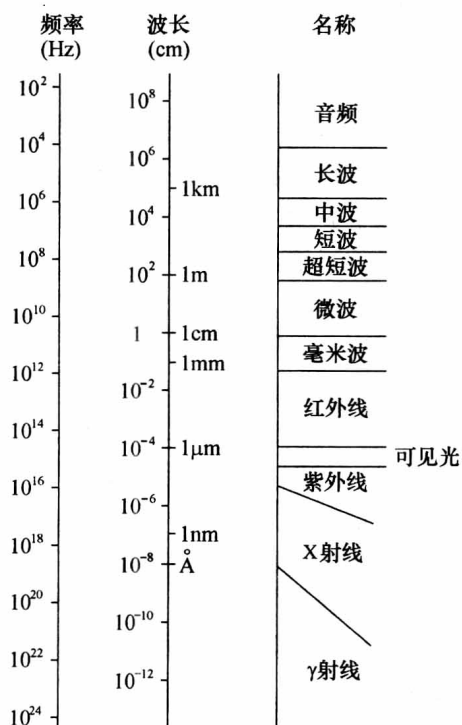
目前光纤通信的实用工作波长在近红外区,即  $0.8\sim 1.8\mu\text{m}$  的波长区,对应的频率为  $167\sim 375\text{THz}$ 。

光导纤维(简称为光纤)本身是一种介质,目前实用通信光纤的基础材料是  $\text{SiO}_2$ ,因此它是属于介质光波导的范畴。对于  $\text{SiO}_2$  光纤,在上述波长区内的 3 个低损耗窗口,是目前光纤通信的使用工作波长,即  $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$  及  $1.55\mu\text{m}$ 。

### 1.1.2 光纤通信系统的基本组成

根据不同的用户要求、不同的业务种类以及不同阶段的技术水平,光纤通信系统的形式可多种多样。

目前采用比较多的系统形式是强度调制/直接检



注:  $1\text{ \AA}=10^{-8}\text{cm}=10^{-10}\text{m}$

图 1-1 电磁波的种类和名称



波(IM/DD)的光纤数字通信系统。该系统主要由光发射机、光纤、光接收机以及长途干线上必须设置的光中继器组成。如图 1-2 所示。

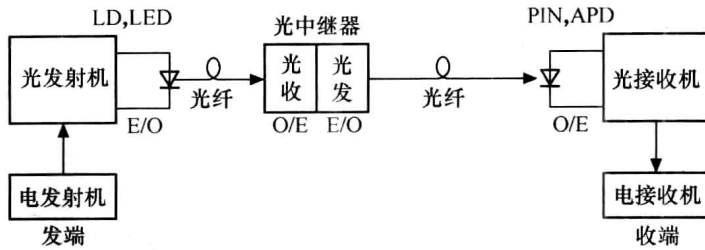


图 1-2 光纤数字通信系统示意图

在点到点的光纤通信系统中,信号的传输过程如下。

由电发射机输出的脉冲调制信号送入光发射机,光发射机的主要作用是将电信号转换成光信号耦合进光纤,因此光发射机中的重要器件是能够完成电—光转换功能的半导体光源。目前主要采用单色性、方向性和相干性极强的半导体激光器(LD)。

在通信系统的线路上,目前主要采用由单模光纤制成的不同结构形式的光缆,这是因为其具有较好的传输特性。

光接收机的主要作用是将通过光纤传送过来的光信号转换成电信号,然后经过对电信号的处理,使其恢复为原来的脉冲调制信号送入电接收机。可见光接收机中的重要器件是能够完成光—电转换功能的光电检测器。目前主要采用光—电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD)。

为了保证通信质量,在收发端机之间适当距离上必须设有光中继器。光纤通信中光中继器的主要形式有两种,一种是采用光—电—光转换形式的中继器,其可提供电层面上的信号放大、整形和定时提取功能;另一种是可在光层面上直接进行光信号放大的光放大器,但其并不具备波形整形和定时信号提取功能。

以上介绍的是目前采用比较多的一种系统构建形式,随着光通信技术的不断发展,一些新的光通信系统的不断涌现,如波分复用光通信系统、光孤子光通信系统等。

### 1.1.3 光纤通信的优越性

光纤通信技术从 20 世纪 70 年代初到现在,能够得到迅速的发展,主要是由其无比优越的特性决定的,具体包括以下几点。

#### (1) 传输频带宽,通信容量大

通信容量和载波频率成正比,通过提高载波频率可以达到扩大通信容量的目的。光波的频率要比无线通信的频率高很多,因此其通信容量也要增大很多。

光纤通信的工作频率为  $10^{12} \sim 10^{16}$  Hz,如设一个话路的频带为 4kHz,则在一对光纤上可传输 10 亿路以上的电话。目前采用的单模光纤的带宽极宽,因此用单模光纤传输光载频信号可获得极大的通信容量。

#### (2) 传输损耗小,中继距离长

传输距离和线路上的传输损耗成反比,即传输损耗越小,则无中继距离就越长。目前,  $\text{SiO}_2$  光纤线路如工作在  $1.55\mu\text{m}$  波长时,传输损耗可低于  $0.2\text{dB/km}$ ,系统最大中继距离可达

200km,在采用光放大器实现中继放大的系统中,无电再生最大中继距离可达 600km 以上。这样在保证传输质量的条件下,长途干线上无电中继的距离就越长,则中继站的数目就可以越少,这对于提高通信的可靠性和稳定性具有特别重要的意义。

### (3) 抗电磁干扰的能力强

由于光纤通信采用介质波导来传输信号,而且光信号又是集中在纤芯中传输的,因此光纤通信具有很强的抗干扰能力,而且保密性也好。

另外,光纤线径细、重量轻,而且制作光纤的资源丰富。

光纤通信由于具有以上优越性,因此发展速度非常快,在 21 世纪的信息社会中,占有非常重要的地位。

## 1.2 光纤通信网络的发展现状

光纤通信的发展依赖于光纤通信技术的进步,为了适应网络发展和传输容量不断提高的需求,人们在传输系统的技术开发上做出了不懈的努力。到 2001 年,据 OFC 会议上的报导,单根光纤的传输容量可达 10.92Tbit/s,并在过去的 10 年中大约提到了近 100 倍。目前,随着“光进铜退”的实施,在我国光纤逐步取代传统的有线传输方式,从而进一步加快光纤化比例,促进光网络的发展。

### 1.2.1 光网络的基本概念

光网络是光纤通信网络的简称,它是指以光纤为基础传输链路所组成的一种通信体系结构。换句话说,光网络就是一种基于光纤的电信网。它兼顾“光”和“网络”两层含义:即可通过光纤提供大容量、长距离、高可靠的链路传输手段,同时在上述媒质基础上,可利用先进的电子或光子交换技术,并引入控制和管理机制,实现多节点间的联网,以及基于资源和业务需求的灵活配置功能。

一般来说,光网络是由光传输系统和在光域内进行交换/选路的光节点构成,并且光传输系统的传输容量和光节点的处理能力非常大,电层面的处理通常是在边缘网络中进行的,边缘节点是通过光通道实现与光网络的直接连通。图 1-3 所示为基于 WDM 的多波长光网络总体结构图。光网络常使用的设备有 OTM(光终端复用器)、OADM(光分插复用器)和 OXC(光数字交叉连接器)。

光网路节点(ONN)是用户终端与光网络的接口界面,可提供交叉连接和选路等功能,用于控制、分配光信号的路径,从而实现源节点和目的节点之间的光连接。网络中的光电转换和电子处理器件主要集中在边缘节点用于业务上路和下路操作。可见这种光网络不是一种纯光的光网络,它的控制、管理以及处理仍然是由电层来完成的。

### 1.2.2 光网络的组网技术现状

从光网络的发展进程来看,光网络可以分为三代。第一代是以光同步网(SDH)为代表的,仅仅在光层面实现大容量的传输,而所有的交叉连接、选路和其他智能化的操作都是在电层面来完成。而光传送网(OTN)和全光网络(AON)可以认为是第二代光网络,OTN 是在子网内实现透明的光传输,而在子网边界处采用光/电/光(O/E/O)的 3R 再生(包括光放大、时

钟恢复和光判决等)技术,以此构成光网络,而在 AON 网络中,信号的传送、复用、选路、监控和某些智能是在光层面上完成。目前由于器件和交换技术的不断发展,已成为研发的热点之一。第三代光网络将是以自动交换光网络(ASON)为代表的智能光网络。智能化的 ASON 能够构建在 OTN 或 SDH 之上,实现动态的、基于信令和策略驱动的控制。

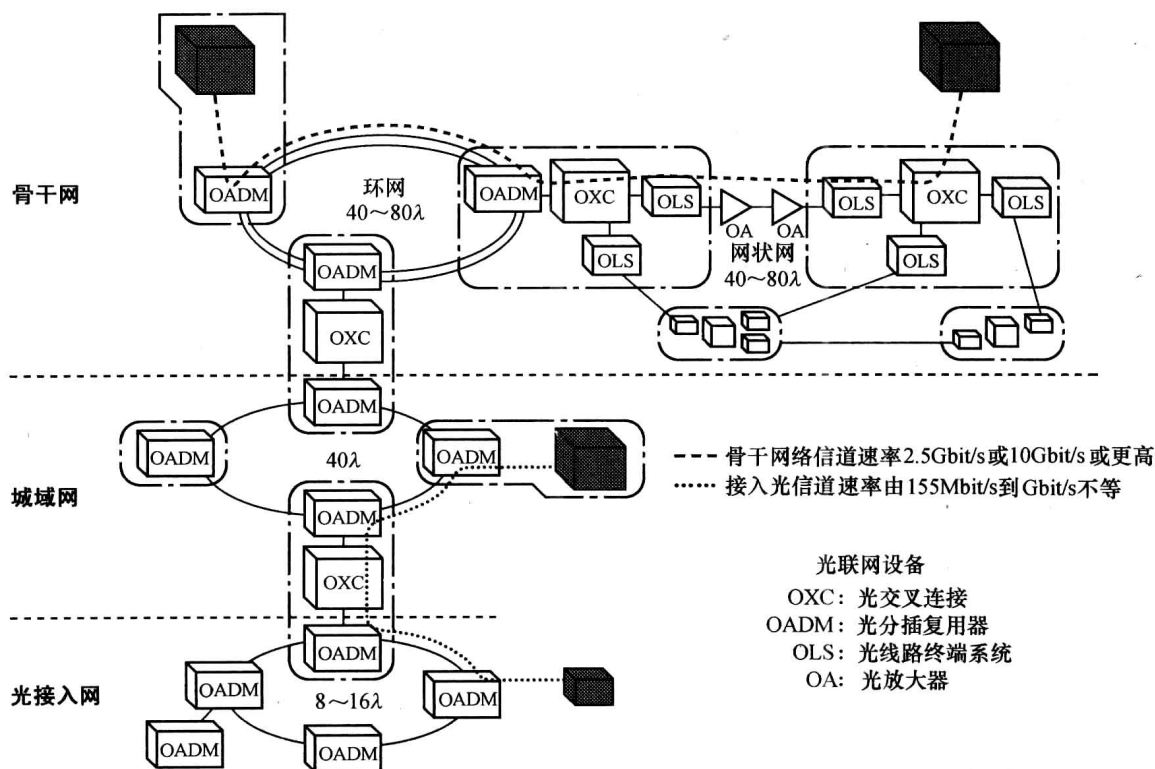


图 1-3 基于 WDM 的多波长光网络总体结构示意图

从广义的角度看,光网络应该覆盖城域网和接入网,由于这两种网络在网络中位置不同,各自的技术特征也不同,因此可根据需求选择不同的技术。通常城域骨干网中可供选择的技术有 SDH、DWDM、OTN、MSTP、ASON 等,接入网中常使用的技术包括 SDH、CWDM、MSTP、EPON、GPON、PTN 等。下面分别进行简要介绍。

**SDH 技术:**第一代光网络的应用技术。它是由一系列的 SDH 网元构成,可通过光纤链路实现同步信息的大容量、长距离、高可靠的业务传送、复用、分插、交叉连接。但其中所有的交叉连接和选路功能是在电层完成的。目前单波长 SDH 传输系统的最高传输率可达 40Gbit/s。由于 SDH 最初是一个专门针对语音通信而设计的,并在国际上得到广泛认可的传送网络标准,因此,在此框架基础上可以构建出灵活、可靠、易管理的新型电信传送网络,不仅为各种新业务的传输提供可靠的解决方案,而且还使不同厂商的设备之间互通成为可能。

**波分复用技术:**在 WDM 系统中,可使多种波长的信号可以同时在一根光纤中实现长距离的传送,这种技术极大地提高了光纤的通信容量。目前 1.6Tbit/s 的 DWDM(密集波分复用)系统已经大量商用,随着技术和业务的不断发展,WDM 技术已经开始从长途传输领域向城域网领域扩展。为了进一步降低城域 WDM 多业务平台的成本,出现了 CWDM(粗波分复用)系统。这种系统的典型波长组合为 4、8 和 16 三种,波长通道间隔达到 20nm,允许波长漂

移 $\pm 6.5\text{nm}$ ,这就使得 CWDM 系统对激光器的波长精度,以及对激光器输出功率、温度敏感度等的要求都远低于 DWDM 系统。

**MSTP 技术:**随着 IP 业务和以太网的迅速发展,如何利用现有的网络资源,实现多业务接入以适应城域网的多业务需求则成为人们研究的重点。基于 SDH 的多业务传送平台(MSTP),利用已敷设的大量 SDH 运营网络,能够同时实现 TDM、ATM、以太网等业务的接入、处理和传送功能,并能提供统一的网管运营平台。由此可见,MSTP 除了具有 SDH 功能外,还具有两层 UPN、MAC 层和 ATM 功能,从而有效地支持分组数据业务,实现从电路交换网到分组网的过渡。

**OTN 技术:**是以波分复用技术为基础、在光层完成业务信号的传送、复用、选路、交换和监控等,并保证其性能指标和生存性。从功能上看,OTN 能够在子网内实现透明的光传输,而在子网边界处采用光/电/光(O/E/O)的 3R 再生技术,从而构建起一个完整的光传送网。但因光处理的复杂性使得 OTN 成为现阶段可供选择的主流技术之一。相信随着技术和器件的进步,人们所期望的光透明子网的范围将会逐步扩大至接入网,以实现真正意义上的全光网络(AON)。此时传送、复用、选路、监控和相关智能操作都能在光层面上实现,可见,要建立起真正的全光网络,必须解决的问题是消除电光瓶颈,这也是未来信息网络的核心。

**ASON 技术:**是一种智能化的第三代光网络技术。这种技术是通过能够提供自动发现和动态连接建立功能的分布式(或部分分布式)控制平面,基于 OTN 或 SDH 网络实现动态的、基于信令和策略动态控制的一种网络技术。

**PON(无源以太网)技术:**是以光纤为传输媒质,具有高接入带宽、全程无源分光传输的特点,在管理运维、带宽性能、综合业务提供、带宽分配策略、组网灵活性等方面,较其他接入技术具有明显的优势。目前常使用的主要有 EPON(以太无源光网络)技术和 GPON(吉比特无源光网络)技术。EPON 利用 PON 技术与以太网技术的有效结合,将信息封装成以太网帧进行传输,从而实现基于 PON 拓扑结构下的以太网接入,利于与现有以太网的兼容。GPON 技术是新一代光接入技术,在抗干扰性、带宽特性、接入距离、维护管理等方面均具有巨大优势,可更好地支持语音、数据、视频等多业务流的接入。

**PTN(分组传送网)技术:**是面向连接的、以分组交换为核心的、承载电信级以太网业务为主、兼容传统 TDM、ATM 等业务的综合传送技术。该技术主要用于解决城域传输网汇聚层和接入层上 IP RAN(IP 无线接入网)以及全业务的接入、传送问题。在秉承光传输的传统优势的基础上,同时可实现高可用性和可靠性、高有效的带宽管理机制和流量工程、便捷的 OAM 和网管、可扩展、较高的安全性、全面的 QoS 保障等。

## 1.3 光纤通信网络的发展趋势

### 1.3.1 发展趋势

随着互联网和视频业务的快速发展,特别是无线智能手机的迅速普及,IP 业务流量持续强劲增长,运营商的骨干传送网所面对的压力也越来越大,预计到 2013 年最大段落容量将达  $10\text{Tbit/s}$ , $100\text{Gbit/s}$  的需求将占据主导,并在 2015 年左右将进入规模部署阶段。

据资料显示, $100\text{Gbit/s}$  的技术已经进入试验阶段,其在关键技术的突破方面取得了重大进展,例如由于相干 PDM-QPSK(偏振复用四相相移键控)的突破,使得 OSNR(光信噪比)比

调幅 10Gbit/s 系统性能提高 6dB。当前摆在 100Gbit/s 技术面前的最大挑战在于如何与现有的 10Gbit/s 传输架构兼容。这不仅要求 OSNR、PMD(偏振模色散)容限、频谱效率需提高 10 倍,同时色散容限提高 100 倍才有可能。其次高速 ADC(模数转换器)需要突破。与此同时,设备商对于超 100Gbit/s 技术的研究也已开始,其研发困难在于调制技术、保证长距离传输、光电集成度、芯片处理速度等,实现产业化的时间还难以预料。

城域光网络的发展呈现出以下趋势。

- 网络结构逐步扁平化:随着用户在线比提高,收敛比降低,汇聚级数在减少,汇聚层将逐渐淡出。
- 接口以太化:目前电信网中以 GE/10GE、2.5G/10G/40G POS 接口为代表的大颗粒宽带业务大量涌现,且价格低,因此接口的以太化势在必行,特别是基站接口的以太化。
- 传送内核分组化:MSTP 层将逐渐缩小,让位于增强型以太网、PTN、IP RAN 等分组化技术。
- 融合化:接入网关融合化,实现针对如基站回传和大客户等需要的综合、统一承载。
- 双平面:一平面用于承载宽带接入业务,二平面用于承载高质量业务。FTTH(光纤到户)是解决从 Internet 主干网到用户的“最后 1 公里”瓶颈现象的最佳方案。相信随着 FTTH 成本的不断降低,光纤到户将成为不远的现实。

### 1.3.2 关键技术

#### 1. 大容量、超长距离传输技术

随着单信道传输速率的提升,光纤本身的损耗、非线性、色散等因素,使光信号在传输过程中发生畸变,制约了系统性能,因此在技术上给网络传输与交换带来了很多要求。

从调制格式和复用方式来看,可采用基于偏振复用结合的多相位调制的调制方式,如偏振复用四相相移键控(PDM-QPSK)、8/16 相相移键控(8PSK/16PSK)以及基于低速子波复用的正交频分复用(OFDM),也可采用光时分复用技术。

从调制编码解调来看,目前主要可采用直接解调和相干解调两种方式,其中相干解调主要采用数字信号处理(DSP)技术来实现,显著降低了相干通信中对于激光器特性的要求。但由于目前受到模/数转换器(ADC)和 DSP 芯片等处理能力的限制,基于 100Gbit/s 信号的实时相干接收处理是亟待解决的技术难题之一,将直接影响其商用的步伐。

(1) 正交频分复用:鉴于 OFDM 的技术优势,将其引入到光纤通信系统中是近年来的一个研究热点。实验表明在不采用任何补偿的情况下,采用 OFDM 技术的单模光纤通信系统可以将 10Gbit/s 信号传输 1 000km 以上,可见 OFDM 技术的引入可明显改善光纤通信系统性能。

(2) 光时分复用:OTDM 能够克服因放大器级联而带来的增益不平坦和光纤非线性的限制,在未来采用全光交换和全光路由的网络中,OTDM 技术的一些特点使其作为全光网络关键技术之一更具吸引力,如上下话路方便,可适用于本地网和骨干网。目前,基于 OTDM 的传输速率已经可以达到太比特每秒。但由于 OTDM 必须采用归零码超短脉冲,占用频带宽,而且色散和色散斜率影响较为显著。OTDM 传输系统的关键技术包括超短光脉冲发生技术、全光时分复用/解复用技术和超高速定时提取技术等。因此,人们在研制全光控制的各种超高

速逻辑单元,如速度在皮秒(ps)级的超高速全光开关等。

(3) 偏振复用:利用光在单模光纤中传输的偏振特性,将传输波长的两个独立且相互正交的偏振态作为独立信道分别用于传输两路信号,这样可成倍提高系统容量和频谱利用率。由于两束偏振光信号偏振复用后,经过长距离的光纤传输,会受到光纤应力、偏振模色散(PMD)、偏振相关损耗(PDL)等因素的影响,偏振状态会发生变化,使得到达接收端的光信号的偏振态随时间发生快速变化。这就要求解复用器具有自动调整功能,进而能够分辨出彼此正交的两个偏振通道。目前,偏振复用技术所面临的关键挑战正是在于如何进行信号的解复用,这是一直困扰和阻碍偏振复用技术进入实际应用的难题。

## 2. 全光缓存器

光子具有一定的能量,如果没有将其转换成其他形式的能量,理论上讲光子是不可能停下来的。因而能够在光域内实现对数据包缓存的全光缓存器,是全光包交换网络中的关键器件。目前“光缓存”可以分为两类:一类是通过减慢光的传播速度所制作的慢光型全光缓存器;另一类是通过延长光传输路径构建的,包括光纤延迟线或光纤环型全光缓存器。随着光器件研究进展,近来研究出基于复合调制长周期光栅的新型缓存器,其在降低成本、提高器件集成度方面具有明显的优势,可应用于存储单元和脉冲重新定时,但目前仅限于实验室研究。

## 3. 光层调度技术

作为实现 OTN 光层调度的核心设备 ROADM,与传统的非可重构 OADM 相比,ROADM 采用可配置的光器件,从而实现 OTN 节点中任意波长、波长组的上下、阻断和直通配置。这样通过引入 ROADM 设备,可组建大规模的 PXC(光子交叉)网络,以实现 OTN 光层波长交叉调度功能。由于交叉过程全部是在光层完成的,无须经过 O/E/O 转换,因此设备成本减低。目前,实现光层调度的主要器件包括波长阻塞器(WB)、平面光波回路(PLC)和波长选择开关(WSS)。因为 WSS 能够支持多个方向间的波长调度,这是 WB 与 PLC 所无法实现的功能,即便 WSS 不能支持广播组播功能,且成本较高,但 WSS 仍成为 ROADM 的主流技术,用于实现波长业务的重路由,以提高业务的保护能力和网络的可靠性。

我们可以预期,随着数字信号处理(DSP)技术和各种功能的光器件在技术成熟和成本上达到预期目标,将使目前呆板的光网络向下一代具有鲁棒性且可实现“即插即用”的光网络转变,同时通过引入光层自动调度功能,使网络具有可重构性,进一步降低运营和维护成本。

光纤通信是利用光导纤维来传输光波信号的,因此,关于光纤的结构及导光原理的分析是光纤通信原理的重要部分。

本章首先简单介绍光纤的结构与分类,对光纤的导光原理将采用射线法和标量近似解法进行重点分析,然后在此基础上对单模光纤的结构特点、主模及单模传输条件进行讨论,最后介绍光纤的传输特性及光纤的非线性效应。

## 2.1 光纤的结构和分类

### 2.1.1 光纤的结构

光纤有不同的结构形式。目前,通信用的光纤绝大多数是用石英材料做成的横截面很小的双层同心圆柱体,外层的折射率比内层低。折射率高的中心部分叫做纤芯,其折射率为  $n_1$ ,直径为  $2a$ ;折射率低的外围部分称为包层,其折射率为  $n_2$ ,直径为  $2b$ 。光纤的基本结构如图 2-1 所示。

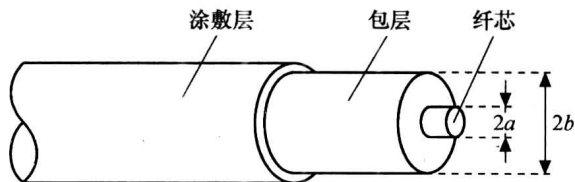


图 2-1 光纤的结构

### 2.1.2 光纤的分类

光纤的分类方法很多,可以按照横截面上折射率的分布不同来分类,也可以根据使用材料的不同来分类。

如果按照制造光纤使用材料的不同来分,则可分为玻璃光纤、全塑光纤及石英系列光纤等。在光纤通信中,目前主要采用石英材料制成的光纤,因此,在这一节中,将对石英光纤按照横截面上折射率的分布不同及光纤传输模式的多少进行分类,并作简单介绍。

#### 1. 按照光纤横截面折射率分布不同来划分

光纤按照横截面折射率分布不同来划分,一般可以分为阶跃型光纤和渐变型光纤两种。

##### (1) 阶跃型光纤

纤芯折射率  $n_1$  沿半径方向保持一定,包层折射率  $n_2$  沿半径方向也保持一定,而且纤芯和

包层的折射率在边界处呈阶梯型变化的光纤称为阶跃型光纤,又称为均匀光纤。它的剖面折射率分布如图 2-2(a)所示。

(2) 渐变型光纤

如果纤芯折射率  $n_1$  随着半径加大而逐渐减小,而包层中折射率  $n_2$  是均匀的,这种光纤称为渐变型光纤,又称为非均匀光纤。它的剖面折射率分布如图 2-2(b)所示。

2. 按照纤芯中传输模式的多少来划分

模式实质上是电磁场的一种场结构分布形式。模式不同,其场型结构不同。根据光纤中传输模式数量,光纤可分为单模光纤和多模光纤。

(1) 单模光纤

光纤中只传输一种模式时,叫做单模光纤。单模光纤的纤芯直径较小,为  $4\sim 10\mu\text{m}$ 。通常,纤芯的折射率分布被认为是均匀分布的。由于单模光纤只传输基模,从而完全避免了模式色散,使传输带宽大大加宽,因此它适用于大容量、长距离的光纤通信。单模光纤中的光射线轨迹如图 2-3(a)所示。

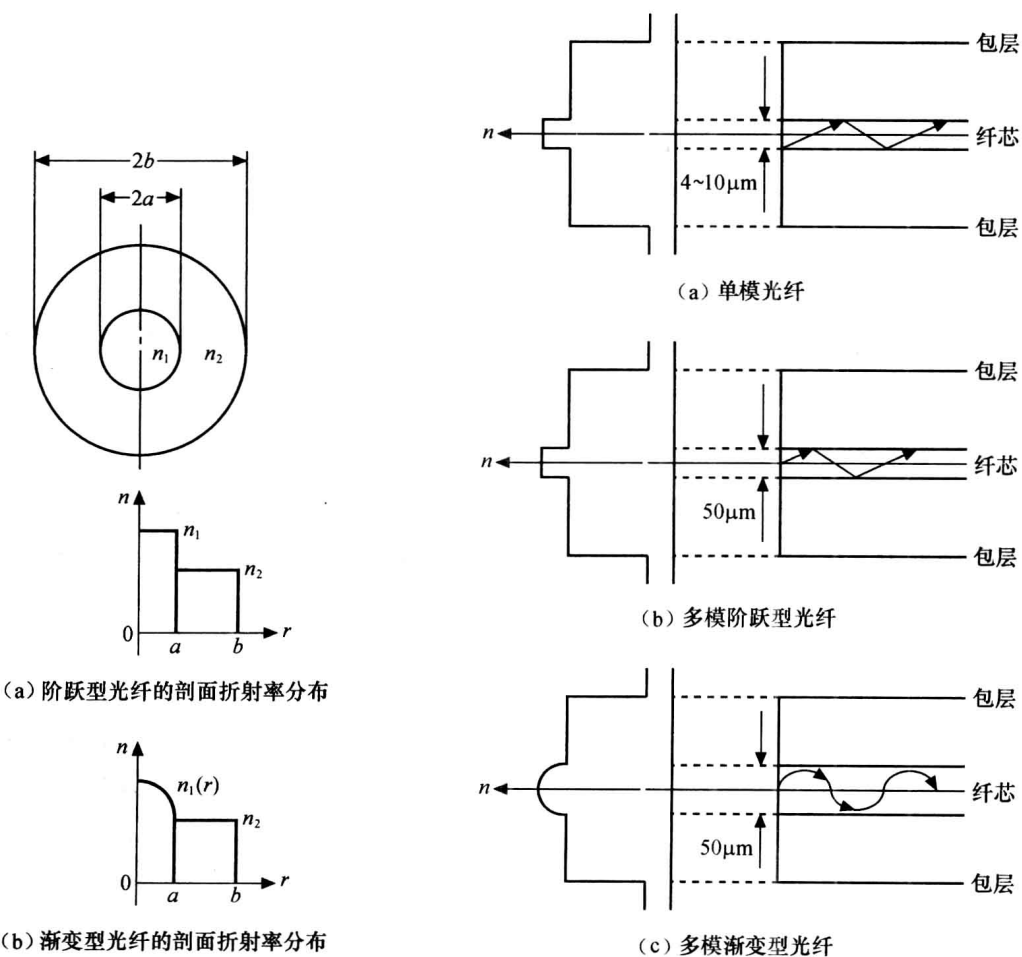


图 2-2 光纤的剖面折射率分布

图 2-3 光纤中的光射线轨迹



## (2) 多模光纤

在一定的工作波长下,多模光纤是能传输多种模式的介质波导。多模光纤可以采用阶跃型折射率分布,也可以采用渐变型折射率分布,它们的光波传输轨迹分别如图 2-3(b)、图 2-3(c)所示。多模光纤的纤芯直径约为  $50\mu\text{m}$ ,模色散的存在使得多模光纤的带宽变窄,但其制造、耦合及连接都比单模光纤容易。

## 2.2 用射线理论分析光纤的导光原理

分析光纤导光原理有两种基本的研究方法。

### 1. 射线理论法

射线理论法简称为射线法,又称几何光学法。当光波波长  $\lambda$  远小于光纤(光波导)的横向尺寸时,光可以用一条表示光波的传播方向的几何线来表示,这条几何线即称为光射线。用光射线来研究光波在光纤中的导光原理的分析方法,即称为射线法。显然,这是一种比较简单、直观的分析方法。

### 2. 波动理论法

波动理论法又称波动光学法。这种方法是一种较为严格、全面的分析方法,根据电磁场理论对光波导的基本问题进行求解。

本节将主要利用射线法分析光纤的导光原理,2.3 节将采用波动理论法进行分析。

### 2.2.1 平面波在两介质交界面的反射与折射

本章在分析光波在光纤中的导光原理及传输特性时,经常要遇到平面波向两种介质的交界面斜射的问题,所以在这一节里首先研究一下关于平面波的基本概念。

#### 1. 均匀平面波的一般概念

平面波是指在与传播方向垂直的无限大平面的每个点上,电场强度  $\mathbf{E}$  的幅度相等、相位相同,磁场强度  $\mathbf{H}$  的幅度也相等、相位也相同。或者说,这种波的等幅、等相位面是无限大的平面。

用直角坐标系把这些含义用图画出来,如图 2-4 所示。

从图 2-4 中可以看出, $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  与坐标  $x$  和  $y$  无关,即在沿  $x$  和  $y$  方向上,矢量  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  是不随  $x$  和  $y$  的位置改变而改变的,即

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} = 0 & \quad \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} = 0 & \quad \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} = 0 \end{aligned}$$

均匀平面波在均匀理想介质中的传播特性可通过以下 3 个参量来描述。

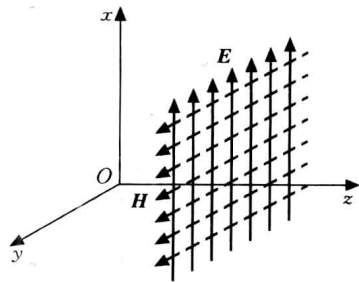


图 2-4 沿正  $z$  轴方向传播的均匀平面波