

现代光通信技术丛书

# 光波导理论与 与技术

李玉权 崔敏 编著

人民邮电出版社  
POSTS & TELECOMMUNICATIONS PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

光波导理论与技术/李玉权,崔敏编著. —北京:人民邮电出版社,2002.12

(现代光通信技术丛书)

ISBN 7-115-10700-9

I.光... II.①李...②崔... III.①光波导—波导传输—理论②光通信—通信技术  
IV.TM929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 081397 号

## 内 容 提 要

本书系统地讲述了目前发展比较迅速的光波导传输理论和光通信器件的工作原理。

本书的第 1 章是对光通信及相应的器件的一个概略介绍。第 2 章是电磁场理论基础,介绍经典电磁理论的主要结论。第 3 章是几何光学分析方法,讲述光波导中光的传播规律。第 4 章讲述平面波导及条形波导的模式理论。第 5 章介绍光纤的模式理论。第 6 章讲述光纤的色散特性和色散补偿技术。第 7 章是光纤的非线性传输理论,讲述光纤中重要的非线性效应。第 8 章介绍光通信系统中常用的无源光器件的结构、工作原理和特性。第 9 章讲述有源光器件的结构、工作原理及特性。

本书的作者长年为本科生和研究生讲授《光纤通信》、《光纤传输理论》课程,因此本书可以作为相关专业的本科生和研究生的教材。对于从事与光纤通信相关工作的工程技术人员,本书也可以提供有益的参考。

现代光通信技术丛书

光波导理论与技术

◆ 编 著 李玉权 崔 敏  
责任编辑 梁 凝 李 健

◆ 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 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线 010-67129258

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京鸿佳印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 22.25

字数: 538 千字

2002 年 12 月第 1 版

印数: 1-5 000 册

2002 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-10700-9/TN · 1932

定价: 38.00 元

本书如有印装质量问题,请与本社联系 电话:(010) 67129223

## 序

人类社会在 20 世纪末进入了信息时代。支撑信息社会的基础是遍布于全球的信息高速公路,光纤通信系统是构成全球信息高速公路的最重要的环节。光纤通信技术是 20 世纪 60 年代以后才发展起来的通信新技术,但作为光纤通信技术基础的光波导理论却可以追溯到 20 世纪初德拜的介质波导理论。为适应光纤通信技术在我国的飞速发展,自 20 世纪 80 年代以来国内已先后有多部光波导理论或光纤传输理论方面的专著或教科书问世。光纤通信技术日新月异,通信与电子学领域的教学内容在不断更新,因而适时补充新的内容、出版新的专著和教材实乃顺理成章的事情。

李玉权和崔敏编著的这本《光波导理论与技术》是为通信和电子工程专业的高年级本科生和硕士研究生编写的教科书。本书系统地介绍了分析光波导的理论基础,光波导的几何光学分析方法、波动光学分析方法、光纤的传输特性在本书中都有全面而深入的论述。鉴于非线性光学系统在光网络中的地位日益重要,本书用了较大的篇幅讲述光纤中的非线性效应,是十分必要的,也是本书的特色之一。本书的最后两章讲述有源和无源光器件的工作原理和工作特性,这些内容对于学习光通信课程也是必不可少的。

本书的第一作者李玉权 20 世纪 60 年代毕业于北京大学物理系,1981 年在电子科技大学获得微波电子学专业硕士学位,具有坚实的数学物理基础。1981 年以后一直在中国人民解放军通信工程学院从事电磁场理论、微波技术、光波导理论与光纤通信领域的教学和研究工作,积累了丰富的教学经验,取得了丰硕的研究成果。本书正是作者在为研究生讲授光波导理论课程的讲稿基础上写成的,它反映了作者的教学思想和教学成果,同时也反映了作者在光波导理论领域的部分研究成果。本书理论体系完整、论述严谨、资料翔实。我相信,本书的出版必有助于本学科的教学,选择本书作为光波导理论及相关课程的教材必是个不错的选择。

中国科学院院士  
电子科技大学教授



刘盛纲

2002 年 8 月于成都

# 前 言

自 20 世纪 70 年代中期光纤通信技术问世至今不过短短的二十多年,光纤已取代了大部分铜线,成为固定通信网中最主要的传输介质。编著本书的目的就是要为通信工程专业或相近专业的高年级本科生和硕士研究生提供一本系统讲述光波导传输理论和光通信器件工作原理的教科书。本书的作者自 20 世纪 80 年代末以来一直在解放军通信工程学院为本科生、研究生讲授《光纤通信》、《光纤传输理论》课程。1996 年,作者根据给本科生授课的讲稿编写了通信工程学院的内部教材《光纤通信基础》。本书就是根据这本讲义和作者近年给研究生讲授《光纤传输理论》课程的讲稿编写成的。近年作者在从事教学工作的同时,亦致力于光通信及光波导理论方面的研究工作,发表过一些拙作。作者的部分研究成果在本书中亦有所反映,希望对读者有所裨益。

本书的第 1 章是对光通信及相应器件的概略介绍,目的是使读者在系统学习光波导理论之前对光通信的发展历史、光通信系统的构成、主要的光通信器件有一个大致的了解。第 2 章是电磁场理论基础,介绍经典电磁理论的主要结论,为后面各章利用电磁理论分析波导中光波的传播打下基础。第 3 章是几何光学分析方法,讲述光波导中光线的传播规律。第 4 章讲述平面波导及条形波导的模式理论。第 5 章是光纤的模式理论,讲述介质圆柱波导的分析方法、正规模的特性、近似分析方法、耦合模理论和单模光纤理论。第 6 章讲述光纤的色散特性和色散补偿技术。第 7 章是光纤的非线性传输理论,讲述光纤中诸如自相位调制、交叉相位调制、四波混频、光孤子传输、受激拉曼散射、受激布里渊散射等重要的非线性效应。第 8 章介绍光通信系统中常用的无源光器件,例如光纤连接器、光耦合器、波分复用器、光纤光栅的结构、工作原理和特性。第 9 章讲述有源光器件,例如半导体激光器、光检测器、光放大器等的结构、工作原理及特性。

本书的第 1 章至第 7 章由李玉权执笔,第 8 章和第 9 章由崔敏执笔。作者的学生邓卫华、徐俊华、刘杰、李乃庚、熊德华、彭霞帮助绘制了本书的大部分图表,完成了大部分文字录入工作。对他们的辛勤劳动,在此作者表示深切的谢意。

著名学者、中国科学院院士刘盛纲先生在百忙中抽时间阅读了书稿,并为本书作序。刘先生不仅学术造诣精深,而且待人谦和、时时不忘提携后学,实乃我辈之楷模。在这里,谨向先生表示最衷心的感谢。

光波导和光器件理论涉及到多个学科,例如电磁场理论、微波理论与技术、量子力学、半导体物理和器件以及通信理论等领域的基础理论和专业知识。尽管作者有多年从事电磁场理论、微波技术、光波导理论、光纤通信领域教学科研工作的经历,但毕竟学识有限,书中若有不妥乃至错误之处,望读者不吝赐教。

作者

2002 年 6 月 于南京

HAUW/08

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 通信历史的回顾 .....	1
1.2 光纤通信的产生和发展 .....	2
1.3 光通信关键技术 .....	3
1.3.1 光纤 .....	4
1.3.2 光源和光发送机 .....	7
1.3.3 光检测器和光接收端机 .....	9
1.3.4 光电集成和光集成技术 .....	11
1.4 光波技术的发展 .....	11
<b>第 2 章 电磁场理论基础</b> .....	13
2.1 电磁场基本方程 .....	13
2.1.1 麦克斯韦方程组 .....	13
2.1.2 电磁场边界条件 .....	14
2.1.3 波动方程和亥姆霍兹方程 .....	15
2.1.4 柱型波导中的场方程 .....	16
2.2 各向同性媒质中的平面电磁波 .....	17
2.2.1 无界均匀媒质中的均匀平面电磁波 .....	17
2.2.2 平面电磁波的偏振状态 .....	18
2.2.3 平面波的反射和折射 .....	19
2.2.4 非理想媒质中的平面电磁波 .....	20
2.3 各向异性媒质中的平面电磁波 .....	21
2.3.1 电各向异性媒质 .....	21
2.3.2 电各向异性媒质中的平面波 .....	21
2.4 电磁波理论的短波长极限——几何光学理论 .....	24
2.4.1 几何光学的基本方程——eikonal 方程 .....	24
2.4.2 光线传播的路径方程 .....	26
2.4.3 路径方程解的两个特例 .....	27
2.4.4 折射定律与反射定律 .....	29
<b>第 3 章 光波导的几何光学分析方法</b> .....	31
3.1 均匀介质薄膜波导中光线的传播 .....	31
3.1.1 光线的传播路径及光线分类 .....	31
3.1.2 传播时延及时延差 .....	33
3.2 芯层折射率渐变的介质薄膜波导中光线的传播 .....	34

3.2.1	传播路径及光线分类	34
3.2.2	传播时延及时延差	37
3.2.3	举例	38
3.3	阶跃光纤中光线的传播	43
3.3.1	传播路径及光线分类	44
3.3.2	数值孔径	47
3.3.3	传播时延和时延差	48
3.4	梯度光纤中光线的传播	48
3.4.1	路径方程和光线不变量	49
3.4.2	光线路径及光线分类	50
3.4.3	本地数值孔径	52
3.4.4	传播时延	53
3.4.5	举例	54
3.5	光纤与光源的耦合	55
3.5.1	照射光源	55
3.5.2	耦合效率	56
3.5.3	提高光源耦合效率的措施	59
<b>第 4 章</b>	<b>薄膜波导和带状波导的模式理论</b>	<b>62</b>
4.1	均匀薄膜波导	62
4.1.1	TE 模	63
4.1.2	TM 模	65
4.1.3	传播模和辐射模	66
4.1.4	截止参数	67
4.1.5	单模传输和模数量	68
4.1.6	导波场分布	69
4.1.7	导波的传输功率和有效厚度	70
4.1.8	对称薄膜波导	72
4.1.9	本地平面波解释	74
4.2	渐变薄膜波导	77
4.2.1	无界的抛物线型折射率分布光波导的解析解	77
4.2.2	有界的抛物线型折射率分布光波导的解析解	79
4.3	条形光波导	82
4.3.1	条形光波导的结构	82
4.3.2	分析条形波导的马卡梯里方法	82
4.3.3	$E_{mn}^y$ 模	83
4.3.4	$E_{mn}^x$ 模	86
4.3.5	截止条件与单模传输	87
4.4	带状波导的近似分析方法	88

第 5 章 光纤的模式理论 .....	92
5.1 光纤中的电磁场方程 .....	92
5.2 阶跃光纤的严格解——矢量模解 .....	93
5.2.1 阶跃光纤的电磁场解 .....	93
5.2.2 导波模的特征方程 .....	100
5.2.3 导波模分类 .....	102
5.2.4 导波模的截止参数和单模传输条件 .....	104
5.2.5 远离截止状态时导波模的性态 .....	108
5.2.6 色散曲线 .....	110
5.2.7 导波模的场型图 .....	111
5.3 阶跃光纤中的线偏振模 .....	112
5.3.1 线偏振模场解及特征方程 .....	113
5.3.2 线偏振模特性 .....	114
5.3.3 $LP_{mn}$ 模与矢量模之间的对应关系 .....	116
5.3.4 $LP_{mn}$ 模的功率分布 .....	117
5.3.5 多模光纤中的模数量 .....	119
5.4 梯度光纤的解析解法 .....	121
5.4.1 抛物线型折射率分布光纤中的标量近似解 .....	121
5.4.2 相位常数 .....	125
5.4.3 模式群和模式数量 .....	126
5.5 光波导的数值分析方法 .....	127
5.5.1 有限元方法概要 .....	128
5.5.2 边界条件 .....	131
5.5.3 计算举例 .....	132
5.6 模式的正交性和完备性 .....	133
5.6.1 模式的完备性 .....	133
5.6.2 模式的正交性 .....	133
5.7 微扰法 .....	135
5.7.1 弱导光纤的微扰解 .....	136
5.7.2 折射率分布有一均匀变化的情形 .....	137
5.8 模式的横向耦合理论 .....	140
5.8.1 耦合模方程 .....	140
5.8.2 耦合模方程的形式解 .....	143
5.8.3 耦合系数的计算 .....	145
5.9 模式的纵向耦合理论 .....	146
5.9.1 耦合模方程 .....	146
5.9.2 纵向耦合特点 .....	148
5.10 单模光纤 .....	148
5.10.1 阶跃型单模光纤 .....	148



5.10.2	梯度型单模光纤	151
5.10.3	单模光纤的双折射和偏振演化	152
<b>第6章</b>	<b>光纤的色散特性</b>	<b>157</b>
6.1	色散概述	157
6.1.1	波长色散	157
6.1.2	模式色散	158
6.2	材料色散	159
6.3	单模光纤的色散及单模光纤的分类	163
6.3.1	色散系数	163
6.3.2	单模光纤分类	166
6.3.3	偏振模色散	169
6.4	多模光纤的模式色散	171
6.4.1	群时延差	171
6.4.2	最佳折射率指数 $\alpha_{opt}$	173
6.5	色散导致的光信号畸变及其对通信的影响	174
6.5.1	光脉冲传播方程	174
6.5.2	传播方程的形式解	177
6.5.3	高斯光脉冲在色散介质中的展宽	177
6.5.4	色散对通信容量的限制	180
6.6	色散补偿	183
6.6.1	后补偿技术	183
6.6.2	预补偿技术	184
6.6.3	在线补偿技术	186
6.6.4	光均衡滤波	188
6.6.5	偏振模色散的补偿	190
<b>第7章</b>	<b>单模光纤的非线性传输特性</b>	<b>193</b>
7.1	光波与媒质的非线性相互作用	193
7.1.1	电介质的极化	193
7.1.2	媒质的非线性响应	194
7.1.3	光纤的非线性折射率	197
7.2	光信号的非线性传播方程	198
7.2.1	光信号传播方程	198
7.2.2	传播方程的数值解法	201
7.3	自相位调制(SPM)	203
7.3.1	非线性相移及频率啁啾	203
7.3.2	群速度色散的影响	205
7.3.3	SPM对通信的影响	207
7.4	交叉相位调制(XPM)	207
7.4.1	不同频率光波之间的耦合	207



7.4.2	正交偏振模之间的耦合	209
7.4.3	XPM 对通信系统的影响	210
7.5	光孤子传输	211
7.5.1	孤子方程和孤子解	211
7.5.2	暗孤子	214
7.5.3	基态光孤子的传播特性	215
7.5.4	光孤子通信	219
7.6	四波混频(FWM)	222
7.6.1	四波混频的形成机理	222
7.6.2	参量增益	223
7.6.3	四波混频的相位匹配条件	226
7.6.4	四波混频对通信的影响及其可能的应用	227
7.7	受激拉曼散射(SRS)	228
7.7.1	受激拉曼散射的物理机理	229
7.7.2	拉曼增益	229
7.7.3	拉曼阈值	231
7.7.4	短脉冲修正	233
7.7.5	拉曼光纤放大器	234
7.7.6	拉曼串扰	235
7.8	受激布里渊散射(SBS)	236
7.8.1	SBS 的物理机理和布里渊频偏	237
7.8.2	布里渊增益	238
7.8.3	布里渊阈值	239
7.8.4	SBS 对通信的影响	239
<b>第 8 章</b>	<b>无源光器件</b>	<b>241</b>
8.1	光纤连接器	241
8.1.1	光纤的连接损耗	241
8.1.2	光纤连接器	244
8.2	光耦合器	248
8.2.1	全光纤耦合器的耦合原理	248
8.2.2	光纤耦合器的性能参数	250
8.2.3	耦合器的分类	250
8.3	光波复用、解复用器	255
8.3.1	光波复用、解复用器的性能参数	255
8.3.2	复用、解复用器的结构原理	256
8.4	光调制器	267
8.4.1	电光调制	268
8.4.2	声光调制	275
8.4.3	磁光调制	278

8.4.4	波导调制器和电吸收式调制器	278
8.5	光滤波器、光开关、光隔离器、光衰减器	279
8.5.1	光滤波器	279
8.5.2	光开关	279
8.5.3	光隔离器	280
8.6	光纤光栅	281
8.6.1	光纤光栅的写入技术	281
8.6.2	掺杂光纤光敏性机理	284
8.6.3	均匀周期光栅光学特性	285
8.6.4	线性啁啾光栅光学特性	288
8.6.5	非线性效应	289
8.6.6	光纤光栅的应用	290
<b>第9章</b>	<b>有源光器件</b>	<b>293</b>
9.1	半导体激光器的工作原理	293
9.1.1	半导体中光发射的物理机理	293
9.1.2	半导体PN结及其能带结构	295
9.1.3	异质结及直接带隙半导体材料	297
9.1.4	半导体激光器的基本结构及阈值条件	298
9.1.5	激光器的谱宽和线宽	299
9.2	半导体激光器的结构及工作特性	300
9.2.1	条形结构半导体激光器	300
9.2.2	单纵模激光器	301
9.2.3	半导体激光器的工作特性	306
9.3	半导体光电检测器	313
9.3.1	光检测的原理	313
9.3.2	PIN光电二极管	314
9.3.3	雪崩光电二极管(APD)	316
9.3.4	响应度和量子效率	321
9.3.5	光检测器的响应时间	322
9.3.6	光检测器的噪声	324
9.4	光放大器	325
9.4.1	半导体激光放大器	327
9.4.2	非线性光纤放大器	332
9.4.3	掺铒光纤放大器	332
9.4.4	掺铒光纤激光器	340
9.4.5	掺镨光纤放大器(PDFA)	341
	<b>参考文献</b>	<b>342</b>

# 第 1 章 绪 论

光通信是 20 世纪 70 年代以后发展起来的新的通信技术。光通信被认为是通信发展史上一次革命性的进步,它对人类由工业化社会向信息化社会的进步,有着不可估量的推动作用,而光波导理论和光通信器件则是光通信技术的基础。本书将对光波导的基本理论、光通信器件的工作原理及其在光通信系统中的应用予以全面的介绍。在介绍具体的光波导理论及光通信器件之前,我们将首先简要介绍光通信的过去、现状和将来。

## 1.1 通信历史的回顾

通信的发展历史总是与人类文明的发展历史紧密相关的。可以认为,人类早期的长途通信手段——烽火台报警通信就是光通信。烽火台通信是现代接力通信的雏形,每个烽火台就是一个通信中继站。当边关有战事时,烽火台点起烽烟,一级接一级地往下传,很快即可将信息送达目的地。当然这种光通信并非现代意义下的光通信,可以称它是目视光通信。这种通信方式的优点是快速,主要缺点是能传输的信息量太小,烽火无法表达边关战事的具体情况。到了中世纪这种烽火台通信又得到了改进,人们用不同颜色的烽烟组合来传递较为复杂的信息。目视光通信在 19 世纪达到了它的顶峰。18 世纪末,法国人夏布(Chappe)发明了扬旗式通信机(又称旗语通信机)。在这种通信方式中,每隔数公里设置一塔,塔上装有三块可活动的木板,木板以不同的运动姿态代表不同的信息,各站以接力方式将信息传到目的地。扬旗通信在拿破仑时代达到了鼎盛时期,在欧洲架设了数千公里的线路。到了 19 世纪中叶,由于电通信技术的出现,以扬旗通信为代表的目视光通信因其固有的缺点而迅速退出了历史舞台。

1837 年美国莫尔斯发明了电报,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,于是电通信即成为最主要的通信方式。可以说,直到 20 世纪 60 年代,电通信在通信领域都居于绝对统治地位。

电通信是以射频电磁波作为信息载体的通信方式,它的发展历程实际上就是所使用的载波频率由低到高的发展过程。可以这么说,电通信的容量几乎是与所使用的载波频率成正比的。随着生产和科学技术的发展,人们对通信容量的要求越来越高,这就迫使人们不断开发利用频率更高的电磁波频段。20 世纪 50 年代,微波通信技术的发展,尤其是 20 世纪 60 年代以后,卫星通信的发展将电通信技术推到了一个顶峰。工作于微波频段的卫星通信技术是人类通信史上的一个巨大进步,但微波频段毕竟只有有限的可用频带,它已远远不能满足人类对通信容量的要求,因而开发利用毫米波、亚毫米波,甚至远红外波段就成为自然趋势。但令人遗憾的是,在开发毫米波、亚毫米波,甚至更短波段的电磁波作为信息载体时,人们遇到了难以逾越的困难。首先是地球周围大气层中的水汽对毫米波、亚毫米波的强烈吸收,以及大气电磁参数的不稳定,导致毫米波和亚毫米波难以作为信息载体而被有效地利用。其次是亚毫米波乃

至更高频段电磁波的产生在理论上和技术上都有许多难题,不易解决。在毫米波和亚毫米波作为信息载体应用遇到困难的同时,人们很自然地将注意力又聚集到了光波上。光波有比毫米波要高得多的频率,利用光波作为信息载体,其潜在的通信容量是传统的电通信手段所无法比拟的。当然现代意义下的光通信绝对不是先前意义的光通信。

现代意义的光通信必须对光波进行高速调制,使其承载高速数据信息,并采取有效措施使之能长距离传输,并能在接收端将其准确再现。显然要实现现代意义下的光通信必须解决两个最为关键的问题:一是可以高速调制的相干性很好的光源,二是低损耗的光波传输介质。直至 20 世纪 50 年代,人们所使用的光源都是非相干光源,这种光源发出的光波,其频谱极宽,相位和偏振态都是随机的,因而难以对其进行高速调制。1958 年第一台激光器问世,激光器是基于光的受激辐射放大机理制成的相干性极好的光源,这种光源发出的相干光束即可成为高速数据信息的载体。1970 年美国贝尔实验室研制成功在室温下可以连续工作的半导体激光器,为光通信提供了实用化的光源。光信号的长距离传输同样是至关重要的问题。光波在大气中传播会受到大气中的水汽的强烈吸收,这是人所共知的。光波波长极短,在自由空间直线传播,任何比光波波长线度大的障碍物都会遮挡光的传播,所以采用类似于无线电波那样的传播方式实现光通信,除了星际通信系统以外,要在地面上实现长距离传输问题极多。曾经有人建议,将光波通信系统转入地下,在地下修建光通信线路,光路转弯用反射镜实现,而光束的扩散则用透镜聚焦约束。这种方案原则上是可行的,但其建造成本极高,难以形成实用网络。最好的解决措施就是将光波注入透明的光波导传输,这种光波导可以由透明介质做成的极细的光学纤维。这种构想早在 20 世纪初即已由德拜提出,但很可惜的是直到 20 世纪 60 年代,用当时最好的光学玻璃做成的光学纤维其损耗也达到了 1000dB/km,用这样的光学纤维显然是无法实现光信号的长距离传输的。1966 年华裔科学家高锟在他的著名论文中解决了石英光纤损耗的理论问题,提出了研制低损耗光纤的可能性。1970 年美国康宁公司研制成功第一根低损耗光纤,从此阻碍光通信发展的两大困难得以解决。20 世纪 70 年代以后,通信技术进入了光通信时代。

## 1.2 光纤通信的产生和发展

20 世纪 70 年代,由于制约光纤通信发展的两个主要问题相继得到了解决,于是光纤通信技术即以异乎寻常的速度发展。到 20 世纪 90 年代,除了用户线以外,光纤传输已完全取代了传统的电缆通信,成为通信网的主干。光纤通信之所以能以如此高的速度发展,主要得益于它的巨大优势。与传统的通信方式相比,光纤通信的主要优势体现在如下几个方面:

(1) 巨大的传输带宽。石英光纤的工作频段为  $0.8 \sim 1.65\mu\text{m}$ ,单根光纤的可用频带几乎达到了 200THz。即使是在  $1.55\mu\text{m}$  附近的低损耗窗口,其带宽也超过了 15THz。这样巨大的传输带宽和巨大的潜在传输容量是任何其他传输介质所无法提供的。

(2) 极低的传输损耗。自 1970 年第一根低损耗光纤问世以后,随着光纤制造技术的不断改进,很快就将石英光纤的损耗降到了很低的水平。目前工业制造的光纤在  $1.3\mu\text{m}$  附近,其损耗在  $0.3 \sim 0.4\text{dB/km}$  范围以内,在  $1.55\mu\text{m}$  波段已降至  $0.2\text{dB/km}$  以下。加之,掺铒光纤放大器(EDFA)在  $1.55\mu\text{m}$  波长附近数十个 nm 的波长带宽内对光波的透明放大,可以有效地补偿

光纤损耗,这就更使大容量的光纤传输系统如虎添翼。

(3) 光纤通信可抗强电磁干扰,不向外辐射电磁波,这样就提高了这种通信手段的保密性,同时也不会产生电磁污染。

正因为光纤通信具有上述特点,所以自 20 世纪 70 年代以来,每隔几年光纤通信技术就上升到一个新的台阶。光纤传输容量几乎每年翻一番,由最初的第一代用作城市局间中继的光纤通信系统,发展到了以 DWDM 与掺铒光纤放大器相结合的第四代光纤通信系统和以光孤子为信息载体的第五代光纤通信系统。传输速率由当初的每对光纤数十 Mbit/s 发展到当今的 10Tbit/s 以上。

20 世纪 90 年代以前,光纤通信系统主要用于点对点的传输,传输体制最初采用准同步数字体系(PDH)。PDH 传输体制因其固有的缺点,自 20 世纪 80 年代末到 90 年代初就逐步地被同步数字体系(SDH)所取代。SDH 取代 PDH 是光纤通信发展历程中的一次重大进步,这是因为 SDH 不再仅仅是以点对点传输为目标的体制,而是基于网络的传送体制。所以采用 SDH 体制的光纤通信网又称为同步光网络(SONET),同步光网络是第二代网络,可以称为光电混合网络,其传输在光域实现,但在网络节点处信息的交换、数据流的分出和插入都在电域完成。第二代网络与第一代网络相比是一个巨大的进步,它具有更大的容量和更加灵活的网络管理。由于第二代网络的交换、路由等必须在电域实现,因而其性能必然要受到电子器件处理速率的制约,这就是所谓“电子瓶颈”问题。

第三代网络必将是全光网络。所谓全光网是指信息从源节点到目的节点能够实现全光透明传输的网络。全光网中的网络节点在光域中处理信息,交换、路由等都在光域完成。众所周知,光域中信息处理的速率可以比电域快几个数量级,从而可以完全克服“电子瓶颈”的制约。目前光信息处理技术尚不成熟,在光域实现信号的检测、再生、缓存功能和交换,在实验室中已能实现,但作为实用化技术尚有待时日。为此,降低全光网的透明程度,在现阶段是必要的。电子器件虽然有速率制约问题,但在电域逻辑功能则比在光域完成要灵活得多。现阶段,电处理技术仍然是光波技术的有力补充。在光网络中适当的位置引进电处理技术,可以使基于 SDH 的第二代光电混合网向第三代全光网平滑过渡,因而是十分自然的选择。有一种说法叫做“光快,但笨;电慢,但灵活”,将二者有机结合就形成了所谓光传送网(OTN)概念。但我们相信“光快同时也很灵活”的日子不会太远,全光网也是网络发展的必然方向。

### 1.3 光通信关键技术

一个最基本的光纤通信系统的构成如图 1-1 所示。图中的电端机处理来自信源的信息

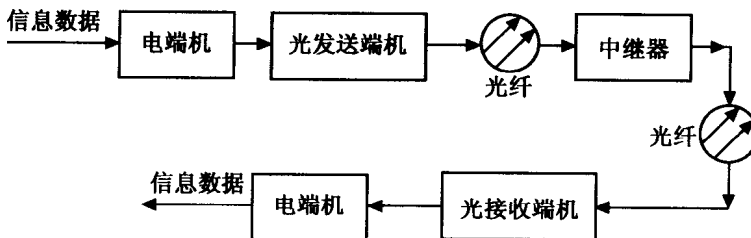


图 1-1 光纤通信系统原理框图

数据,完成诸如复节等功能,形成适合于在光路上传输的高速数据流。光发送端机将电端机送来的电信号变换为光信号,送入光纤传输。在接收端,光接收端机将光信号还原为电信号,送进电端机处理,完成数据分节等功能,恢复原始数据送至用户。一般的长途通信系统中间还有中继器,中继器可以是电光中继,也可以是全光中继(光放大器)。

光网络则是以光纤线路作为基本传输链路,并充分利用光纤和其他光器件的特性而构成的一种通信网络结构。光网络由光传输链路和各类光网络节点连接形成,在这些节点处要实现信号的分插复用、交叉连接等功能。一个原理性的光网络结构如图 1-2 所示。图中的圆圈代表光网络节点(ONN),提供选路和交换功能,而 NAS 则是网络接入局(Network Access Station),它们是用用户终端和其他无光终端系统与网络的接口界面。

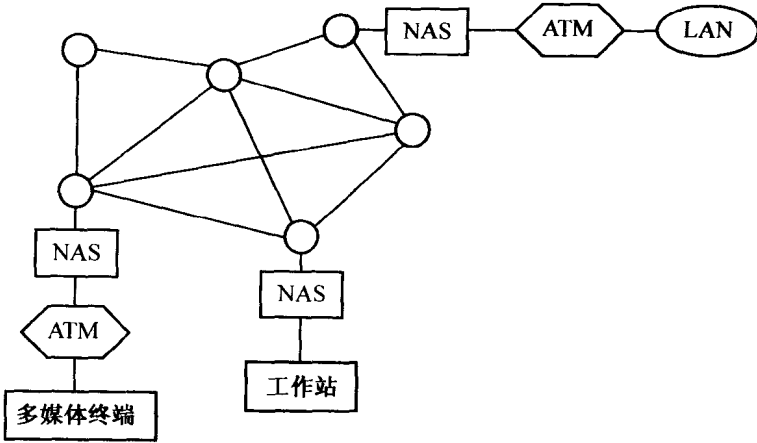


图 1-2 光网络示意图

构成一个点到点的光传输系统,除了传统的电信技术以外,还要涉及光纤技术、半导体激光器技术、光检测技术和光放大技术等关键技术。构成一个光网络则还要涉及到光域的复用、解复用技术、光交换等关键技术。

### 1.3.1 光纤

光纤是构成光网络的传输介质,目前使用的通信光纤无一例外的都是以石英为基础材料。它由纤芯、包层及保护层构成,其横截面如图 1-3 所示。纤芯和包层由石英材料掺不同的杂质构成,使纤芯折射率  $n_1$  略大于包层折射率  $n_2$ 。光纤对光波的导引作用由纤芯和包层完成,

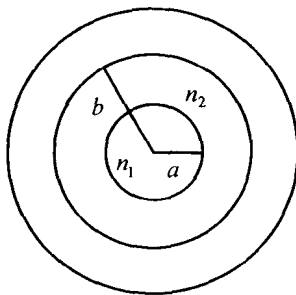


图 1-3 光纤的横截面

保护层的作用是防止光纤受到机械损伤。通信用光纤主要有多模光纤与单模光纤两类。多模光纤纤芯直径  $2a$  主要有  $50\mu\text{m}$ 、 $62.5\mu\text{m}$  两种规格,单模光纤纤芯更细,其直径小于  $10\mu\text{m}$ 。多模光纤和单模光纤的包层直径一般都为  $125\mu\text{m}$ 。如果不加标识,凭肉眼,我们无法区分单模光纤和多模光纤。多模光纤因其有较为严重的多径色散,在通信网中已很少使用,尤其是长途传输系统,无一例外地都用单模光纤。

光纤最主要的传输特性是它的损耗、色散、非线性及双折射等。在光纤通信发展的早期,损耗是制约光纤通信系统的主要因素。

### 1. 光纤的损耗特性

光纤的损耗导致光信号在传输过程中信号功率下降,光功率  $P$  在光纤中的变化可以用方程式(1.3-1)表示。

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P \quad (1.3-1)$$

式中  $\alpha$  就是光纤的衰减系数。积分上式可得

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}}e^{-\alpha L} \quad (1.3-2)$$

式中  $P_{\text{in}}$ 是注入功率, $P_{\text{out}}$ 是长为  $L$  的光纤的输出功率。一般用  $\text{dB/km}$  作为光纤损耗的实用单位,即

$$\alpha (\text{dB/km}) = -\frac{10}{L} \lg\left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}\right) \quad (1.3-3)$$

光纤损耗主要由光纤的本征吸收、瑞利散射、杂质吸收等因素构成。石英材料在红外区域 ( $> 7\mu\text{m}$ )和紫外区域 ( $< 0.3\mu\text{m}$ )各有一个吸收带。红外吸收带将对波长大于  $1\mu\text{m}$  的波段产生影响,尤其是在波长为  $1.7\mu\text{m}$  时,红外吸收损耗已达  $0.3\text{dB/km}$ ,所以一般以  $1.65\mu\text{m}$  作为石英光纤工作波长的长波长极限。紫外吸收带主要影响通信波段的短波长段。对通信波段短波长段影响更严重的是瑞利散射。光纤材料内部因在制备过程中的熔融及冷却过程必然导致其密度的不均匀性。密度的随机起伏导致折射率分布的起伏,这种折射率起伏的尺度甚至小于光波波长。折射率的不均匀必然导致对光波的散射,散射导致光信号能量的损耗,这种与光波波长尺度相当的不均匀性对光波的散射称为瑞利散射。瑞利散射导致的损耗系数可以表示为

$$\alpha_R = C/\lambda^4 \quad (1.3-4)$$

式中的常数  $C$  在  $0.7 \sim 0.9\mu\text{m}^4 \cdot \text{dB/km}$  范围,在  $0.8\mu\text{m}$  处  $\alpha_R$  已达  $2\text{dB/km}$ ,所以瑞利散射是限制通信波段短波长的主要因素。在  $1.55\mu\text{m}$  处  $\alpha_R$  在  $0.12 \sim 0.15\text{dB/km}$  范围内。当然波长更长时  $\alpha_R$  会进一步减小,但红外吸收损耗则会迅速增加。瑞利散射和红外吸收共同决定了  $1.55\mu\text{m}$  附近石英光纤有最低的损耗系数。

光纤中的杂质对光纤的损耗特性产生重要影响,尤其是  $\text{OH}^-$  离子在  $1.39\mu\text{m}$  处有一个吸收峰,残存的  $\text{OH}^-$  离子的吸收导致光纤的通信波段在  $0.8 \sim 1.65\mu\text{m}$  范围内形成两个低损耗窗口,即  $1.31\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$ 。目前  $1.31\mu\text{m}$  处光纤损耗在  $0.3 \sim 0.4\text{dB/km}$  范围内, $1.55\mu\text{m}$  处损耗已低于  $0.2\text{dB/km}$ 。美国朗讯公司公布的最新的光纤制造技术已可完全消除  $\text{OH}^-$  离子的影响,制成所谓全波光纤(All-wave fiber),其最低损耗带宽超过  $50\text{THz}$ 。石英光纤的损耗因素及损耗随工作波长的变化如图 1-4 所示。

### 2. 光纤的色散特性

一般意义下的色散是指介质中不同频率的电磁波以不同的速度传播这一物理现象。色散



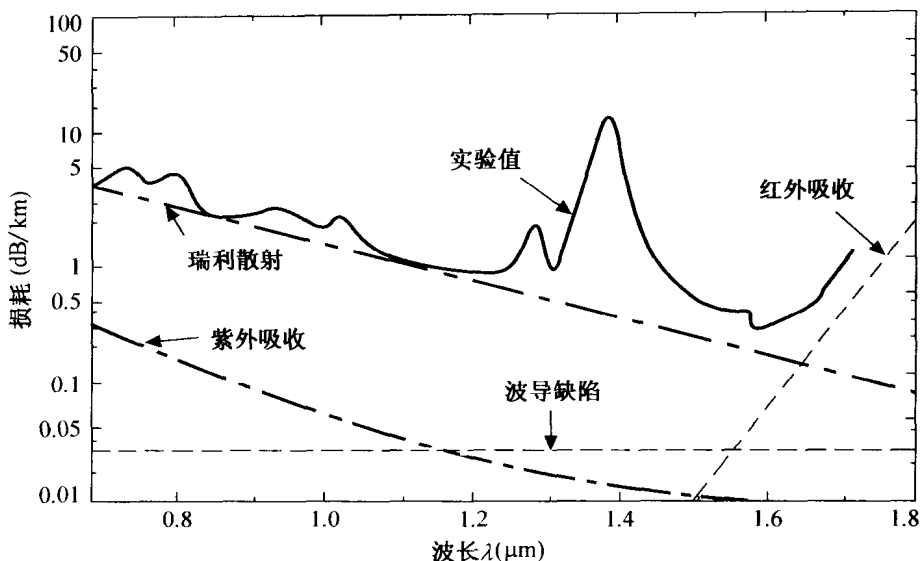


图 1-4 光纤的损耗谱

导致光信号在传输过程中产生畸变。在光纤中,不仅不同频率成分的光有不同的传播速度,而且不同的传播模式也有不同的传输速度,称之为模式色散。模式色散同样导致光信号在传输过程中的畸变。有关光纤的色散特性将在本书的第 6 章中详细介绍。

光纤的色散因素主要包括材料色散、波导色散和模式色散。

所有的材料都是色散材料,其折射率都是频率的函数。石英材料的折射率在  $0.8 \sim 1.65\mu\text{m}$  波段内随频率的增加而增加,即  $dn(\omega)/d\omega \geq 0$ 。但  $dn(\omega)/d\omega$  并不代表光纤的色散特性,在光信号传输中我们关心的是信号脉冲包络的传输情况,而包络的传输速度即为波的群速度。群速度随频率的变化决定了包络的畸变,这就是所谓群速度色散(GVD)。GVD 决定于折射率对频率的二阶导函数  $d^2n(\omega)/d\omega^2$ 。石英材料在  $\lambda_0 = 1.27\mu\text{m}$  处,  $d^2n(\omega)/d\omega^2 = 0$ 。 $\lambda_0 < 1.27\mu\text{m}$  时,  $d^2n(\omega)/d\omega^2 > 0$ ,呈正常色散。当  $\lambda_0 > 1.27\mu\text{m}$  时  $d^2n(\omega)/d\omega^2 < 0$ ,呈反常色散。 $1.27\mu\text{m}$  则是石英材料的零色散点。

波导色散是因光波导中某一个特定的传播模式的纵向相位常数与频率之间的非线性关系决定的。单模光纤工作模式的波导色散总是正常色散。单模光纤的总色散由材料色散和波导色散构成,在  $\lambda > 1.27\mu\text{m}$  时波导色散与材料色散符号相反,部分抵消,使得零色散波长向长波长方向移动。常规单模光纤的零色散波长为  $1.31\mu\text{m}$ 。这种单模光纤在  $1.31\mu\text{m}$  窗口具有很好的传输特性,它的缺点是在石英光纤的最低损耗窗口  $1.55\mu\text{m}$  附近有较大的反常色散系数。改变单模光纤结构,可以将零色散波长移至  $1.55\mu\text{m}$  处,这就是所谓色散位移光纤(DSF)。色散位移光纤在  $1.55\mu\text{m}$  波长附近有最好的传输特性,但它在  $1.55\mu\text{m}$  附近的零色散,对多波长复用(WDM)系统却十分不利。在 WDM 系统中,四波混频(FWM)会导致相邻波长通道间的串扰。为抑制四波混频,在  $1.55\mu\text{m}$  波长附近适当地保留一个足够大(足以抑制四波混频)同时又足够小(不致对高速数据的传输产生明显影响)的残余色散是必要的。这就是所谓非零色散光纤(NZDF)。

模式色散是指不同的传播模式具有不同的传播速度。光信号会在多模光纤中激励起众多

的传播模式,不同模式到达输出端的时延不同,导致信号产生严重的畸变。这是多模光纤的主要缺点,这一缺点限制它只能用于短距离、低速率的传输系统。单模光纤的偏振模色散(PMD)实际也是一种模式色散。它是由于单模光纤中两个正交的偏振态以不同的速度传播造成的。通常条件下,PMD与GVD相比要小得多,所以过去不被重视。近年由于GVD可以采用色散补偿措施加以克服,因而PMD在高速传输系统的影响日益突出,有关PMD的补偿措施成为近年的研究热点。

### 3. 单模光纤的非线性

非线性是指光纤对大信号的响应特性,几乎所有媒质都是非线性媒质,但在小信号条件下,非线性极小,可以忽略。单模光纤中传输的光信号的功率在mW量级,但由于单模光纤芯径很小,单位面积上通过的功率却是很大的,或者说光强很强。光纤纤芯中的电场强度达到 $10^5 \sim 10^6 \text{V/m}$ 量级。在如此强大的电场作用下,石英的非线性极化导致光纤的折射率有一个与外加光强成比例的非线性修正项,即

$$n = n_1 + n_2 |E|^2 \quad (1.3-5)$$

这就是所谓的光克尔效应。由于光克尔效应的存在,导致光信号传输过程中存在自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)以及四波混频(FWM)。此外在外加信号较大时光纤中还存在非弹性散射过程,例如受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)等。这些非线性过程都将对通信系统的性能产生重要影响。单模光纤的非线性问题将在第7章中详细论述。

### 4. 单模光纤的双折射

单模光纤中的传播模式并不是严格意义上的单一模式,光纤的主模式是一对偏振态相互正交的简并模,在非理想状态下,这一对模式将不再是理想的简并模,它们的传输特性将略有差别,或者说他们的等效折射率不同,这就是单模光纤的双折射。双折射导致光信号在单模光纤的传输过程中偏振态的不稳定,这种不稳定对相干光通信系统会产生严重的影响。双折射的另一后果就是导致偏振模色散(PMD)。为克服双折射的影响,可以人为地加大两个偏振态传输特性的差异,并使其中的一个处于截止状态,从而实现严格意义上的单模传输,这就是所谓偏振保持光纤或保偏光纤。与此相反,是采取措施尽量减小双折射,使双折射导致的偏振模色散减至可以忽略的程度。

## 1.3.2 光源和光发送机

### 1. 光源

光通信系统中所使用的光源无例外地都是半导体光器件。短距离低速率系统可以用半导体发光二极管(LED)作光源,而长距离高速率传输系统都用半导体激光器(LD)作光源。

半导体光源实际上就是一个加正向电压的半导体PN结,PN结区导带中的电子与价带中的空穴产生辐射复合,发射一个光子。光子的能量 $h\nu \geq E_g$ ,  $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ ,是普朗克常量, $\nu$ 是光子的频率, $E_g$ 是半导体禁带宽度。

半导体发光二极管(LED)是基于自发辐射发光机理的发光器件。它的发光功率与注入电流成正比,线性好、温度稳定性好、成本低,缺点是发光功率小(-20dBm左右)、谱线宽,因而只适用于短距离传输,例如局域网(LAN)中的光端机多采用LED作光源,可以降低成本。

半导体激光器(LD)是基于光的受激辐射放大机理的发光器件。LD是一种阈值器件,也就是说仅当注入电流大于某一特定电流 $I_{th}$ 时,器件才发射激光束。与LED相比,LD具有较大