



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等院校

电子信息类系列教材

*Guangxian Tongxin
Jishu*

光纤通信技术

(第2版)

© 孙学康 张金菊 编著

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等院校电子信息类系列教材

光纤通信技术

(第2版)

孙学康 张金菊 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信技术/孙学康, 张金菊编著. —2 版. —北京:
人民邮电出版社, 2008. 5
(普通高等院校电子信息类系列教材)
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-115-17618-9

I. 光… II. ①孙…②张… III. 光纤通信—高等学校—
教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 018424 号

内 容 简 介

本书全面讲解了光纤通信技术方面的基本概念、原理及系统。全书共分为 8 章, 主要介绍光纤通信的基本概念及其特点、光纤的导光原理、常用的光器件、光纤通信系统、SDH 与 WDM 网络、城域光网络、智能光网络以及全光网等内容。

本书可作为高等院校通信工程和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。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等院校电子信息类系列教材
光纤通信技术 (第 2 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 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17.5
字数: 426 千字 2008 年 5 月第 2 版
印数: 17 001-20 000 册 2008 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-17618-9/TN

定价: 30.00 元

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

前 言

随着 IP 业务的迅速增长，特别是各种多媒体应用的实用化，用户对网络服务质量的要求越来越高。光纤通信系统具有低的传输损耗和宽的传输频带的特点，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。

本教材在内容取材和编写上具有以下特点。

(1) 内容全面。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，并从应用的角度，详细地介绍了几种常用的光纤通信网络，例如光同步网、基于 SDH 的多业务传送平台、波分复用系统、城域光网络以及光互联网等。

(2) 理论适中。对了解光纤通信所必须具备的理论知识进行了介绍，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。同时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。

(3) 内容先进。教材的内容包括光纤通信新技术以及其他先进技术，如光传送网的概念及结构、多业务传送平台、光网络的保护及其安全性分析、NGN 中的关键技术、ASON 的体系结构及其路径选择策略、IP over WDM 技术、全光网络技术等。

为了便于学习，每一章还提供了小结和习题。

本书的第 1~3 章由张金菊编写，第 4~8 章由孙学康编写。

感谢为本书的编写做过贡献的北京邮电大学李玲、蒋佩璇、李文海、段炳毅教授和刘勇等老师，还要感谢为本书编写和出版给予帮助的各位同事。

由于时间紧迫，学识有限，书中难免存在不足之处，敬请批评指正。

编 者
2008 年 2 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 光纤通信的基本概念	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 光纤通信系统的基本组成	2
1.1.3 光纤通信的优越性	3
1.2 光纤通信的现状与发展趋势	3
1.2.1 光纤通信技术的现状	3
1.2.2 光纤通信技术的发展趋势	3
第 2 章 光导纤维	5
2.1 光纤的结构和分类	5
2.1.1 光纤的结构	5
2.1.2 光纤的分类	5
2.2 用射线理论分析光纤的导光原理	7
2.2.1 平面波在两个介质交界面的反射与折射	7
2.2.2 阶跃型光纤的导光原理.....	11
2.2.3 渐变型光纤的导光原理.....	13
2.3 用波动理论分析光纤的导光原理.....	19
2.3.1 麦克斯韦方程及波动方程.....	19
2.3.2 阶跃型光纤的标量近似解法.....	22
2.3.3 渐变型光纤的标量近似解法.....	32
2.4 单模光纤.....	37
2.4.1 单模光纤的折射率分布.....	37
2.4.2 单模传输的理论分析.....	39
2.4.3 单模光纤的双折射.....	41
2.4.4 新型单模光纤.....	43
2.5 光纤的传输特性.....	45
2.6 光纤的非线性效应.....	53
2.6.1 受激光散射效应.....	54
2.6.2 光纤折射率随光强度变化而引起的非线性效应.....	54
2.6.3 光孤子通信.....	56
小结	59
习题	60
第 3 章 光纤通信器件	61
3.1 半导体光源.....	61
3.1.1 激光器的物理基础.....	61
3.1.2 激光器的工作原理.....	64

3.1.3	半导体激光器的结构、工作原理及工作特性	67
3.1.4	分布反馈半导体激光器	73
3.1.5	量子阱半导体激光器	74
3.2	半导体光电检测器	74
3.2.1	半导体的光电效应	74
3.2.2	光纤通信中常用的半导体光电检测器	76
3.2.3	光电检测器的特性	78
3.3	光放大器	80
3.3.1	掺铒光纤放大器 (EDFA)	80
3.3.2	光纤拉曼放大器 (RFA)	85
3.4	无源光器件	88
3.4.1	光定向耦合器	88
3.4.2	光隔离器与光环行器	89
3.4.3	光滤波器	91
3.4.4	光开关	91
3.4.5	波长转换器	92
3.4.6	波分复用器	93
3.4.7	光纤光栅	95
	小结	96
	习题	96
第4章	光纤通信系统	97
4.1	IM-DD 光纤通信系统	97
4.1.1	光纤通信中的线路码型	97
4.1.2	IM-DD 光通信系统结构	98
4.2	衰减和色散对中继距离的影响	110
4.2.1	衰减与色散对中继距离的影响	110
4.2.2	10Gbit/s 及 10Gbit/s 以上的 SDH 光线路	115
4.2.3	使用光放大器的 SDH 高速线路	116
4.3	噪声及灵敏度分析	117
4.3.1	接收机噪声	117
4.3.2	接收机灵敏度	119
	小结	121
	习题	122
第5章	SDH & WDM	123
5.1	光同步数字传输网	123
5.1.1	SDH 的基本概念	123
5.1.2	SDH 中的基本复用、映射结构	126
5.1.3	SDH 网元	128
5.1.4	SDH 光传输系统	130

5.1.5 SDH 的网同步	132
5.2 波分复用	134
5.2.1 光波分复用的基本概念	134
5.2.2 波分复用系统	139
5.2.3 WDM 网络的关键设备	140
5.2.4 采用光波分复用技术的高速光纤通信线路	143
5.2.5 1.6Tbit/s WDM 系统	146
5.3 光传送网	149
5.3.1 光传送网的分层结构	149
5.3.2 传送网的节点和节点设备	150
5.3.3 光传送网的拓扑结构	151
5.4 网络的生存性	161
5.4.1 网络生存性策略——保护和恢复	162
5.4.2 SDH 网络的保护	163
5.4.3 WDM 网络的保护	169
5.5 光传送网络的网络性能	172
5.5.1 光接口、电接口的界定	172
5.5.2 光传送网的误码性能	174
5.5.3 光传送网的抖动性能	175
小结	176
习题	178
第 6 章 城域光网络	179
6.1 城域光网络的结构	179
6.2 宽带光接入网	181
6.2.1 光接入网的概念	181
6.2.2 无源光网络的传输原理及其应用	183
6.2.3 ATM 无源光网络 (APON)	185
6.2.4 以太网无源光网络 (EPON) 技术及其应用	189
6.3 光互联网	192
6.3.1 IP over SDH	193
6.3.2 IP over WDM	199
小结	203
习题	204
第 7 章 基于 SDH 的多业务传送平台	205
7.1 MSTP 的基本概念及特点	205
7.2 MSTP 中的关键技术	206
7.2.1 级联与虚级联	206
7.2.2 链路容量调整方案 (LCAS)	209
7.2.3 通用成帧规程	211

7.2.4 智能适配层	215
7.3 多业务传送平台	215
7.3.1 以太网业务在 MSTP 中的实现	215
7.3.2 ATM 业务在 MSTP 中的实现	217
7.3.3 TDM 业务在 MSTP 中的实现	218
7.4 MPLS 技术在 MSTP 中的应用	218
7.4.1 MPLS 技术基础	218
7.4.2 MPLS 技术在 MSTP 中的应用	220
7.5 弹性分组环技术在 MSTP 中的应用	222
7.5.1 弹性分组环基础理论	222
7.5.2 RPR 技术在 MSTP 中的应用	229
7.6 MSTP 在城域网中的应用	230
小结	231
习题	233
第 8 章 智能光网络	234
8.1 光网络的概念	234
8.2 智能光网络	235
8.2.1 智能光网络的概念、特点及功能	235
8.2.2 ASON 的网络体系结构	235
8.2.3 ASON 控制平面及其核心技术	237
8.3 全光网	251
8.3.1 全光网的概念、结构及其特点	251
8.3.2 全光网中的关键技术	252
小结	257
习题	258
附录	259
附录一 双曲正割型折射指数分布光纤可以获得自聚焦的证明	259
附录二 标量解场方程的推导	260
附录三 标量亥姆霍兹方程解的推导	263
英文缩写	266
参考书目	272

第 1 章 概 述

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变化，它使高速率、大容量的通信成为可能。

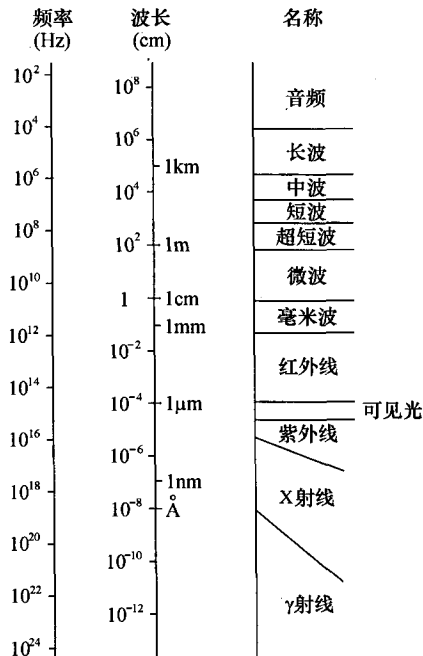
为了使读者在深入学习之前对光纤通信有个基本了解，本章将对光纤通信的基本概念以及光纤通信的发展趋势作一概括介绍。

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，按照波长不同（或频率不同）电磁波的种类和名称如图 1-1 所示。



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

图 1-1 电磁波的种类和名称

从图中可以看出,属于光波范畴之内的电磁波包括紫外线、可见光和红外线。它们各自的波长范围如图 1-2 所示。

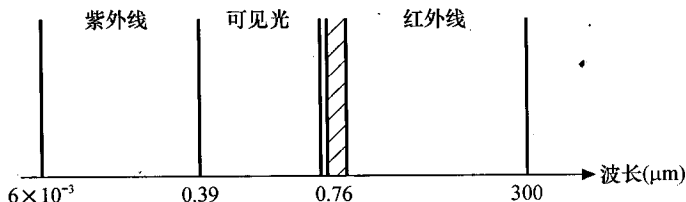


图 1-2 光波的波长范围

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 SiO_2 ,因此它是属于介质光波导的范畴。对于 SiO_2 光纤,在上述波长区内的三个低损耗窗口,是目前光纤通信的实用工作波长,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 1-3 所示。

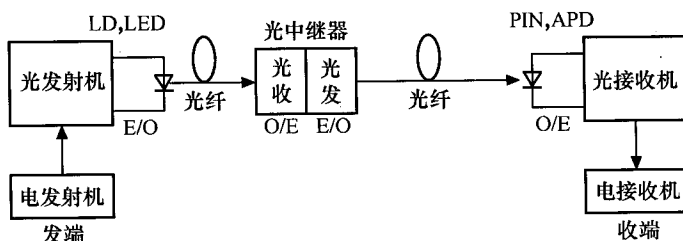


图 1-3 光纤数字通信系统示意图

在点对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码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-光转换的半导体光源,目前主要采用半导体激光器(LD)或半导体发光二极管(LED)。

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,这是由于它具有较好的传输特性。

光接收机的主要作用是将光纤送过来的光信号转换成电信号,然后经过对电信号的处理以后,使其恢复为原来的脉码调制信号送入电接收机。光接收机中的重要部件是能够完成光/电转换任务的光电检测器,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形式主要有两种,一种是光-电-光转换形式的中继器,另一种是在光信号上直接放大的

光放大器。

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

1.1.3 光纤通信的优越性

光纤通信技术从20世纪70年代初到目前30多年的时间里,能够如此迅猛地发展,主要决定于它无比的优越性,概括起来主要有以下几点。

(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, SiO_2 光纤通信线路若工作在 $1.55\mu\text{m}$ 波长时,传输损耗值可低于 0.2dB/km ,系统最大中继距离可达200km。在保证传输质量的条件下,长途干线上无中继距离越长,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的优越性,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 光纤通信的现状与发展趋势

1.2.1 光纤通信技术的现状

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作出了不懈的努力。光纤通信系统的传输容量从1980年到2000年增加了近10000倍,传输速度在过去的10年中大约提高了100倍。目前我国长途传输网的光纤化比例已超过80%。一些发达国家在光纤传输方面已实现了 10.96Tbit/s 的实验系统,对超长距离的传输已达到4000km无电中继的技术水平。

在光网络方面的一系列研究项目已相继实施,为下一代宽带信息网络奠定了良好的基础。

1.2.2 光纤通信技术的发展趋势

光纤通信技术作为信息技术的重要支撑平台,在未来信息社会中将起到重要作用。超高

速度、超大容量以及超长距离传输的光纤通信一直是人们追求的目标，而光纤到户和全光网络更是人们希望早日实现的梦想。

波分复用 (Wavelength-division Multiplexing, WDM) 技术极大地提高了光纤通信系统的传输容量，目前 1.6Tbit/s 的 WDM 系统已经大量商用，随着技术和业务的不断发展，WDM 技术正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，出现了粗波分复用 (Coarse Wave Division Multiplexing, CWDM) 系统。这种系统的典型波长组合有 4, 8 和 16 三种，波长通路间隔达到 20nm，允许波长漂移 $\pm 6.5\text{nm}$ ，这样使得 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。

未来的高速通信网将是全光网。全光网络是以光节点代替电节点，节点之间也是全光化，即信息始终以光的形式进行传输与交换。全光网络具有良好的透明性、开放性、兼容性以及可靠性，并且能够提供巨大的带宽，网络结构简单，组网非常灵活。目前，全光网络的发展还处于初期阶段，从发展趋势上来看，要形成一个以 WDM 技术与光交换技术为主的光网络层，建立起真正的全光网络，必须要解决的问题是消除电光瓶颈，这也是未来信息网络的核心。

FTTH (光纤到户) 是解决从 Internet 主干网到用户的“最后一公里”瓶颈现象的最好方案。在我国，FTTH 是势在必行，预计在不久的将来，随着技术的不断更新，FTTH 的成本不断降低，我国将兴起光纤到户的建设高潮。

第2章 光 导 纤 维

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。

本章将对光纤的结构与分类作简单介绍，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，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。

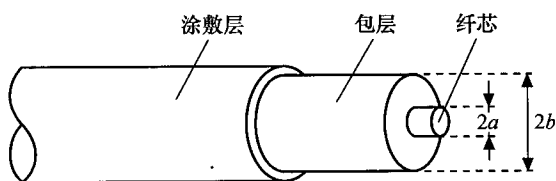


图 2-1 光纤的结构

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等来分类。

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

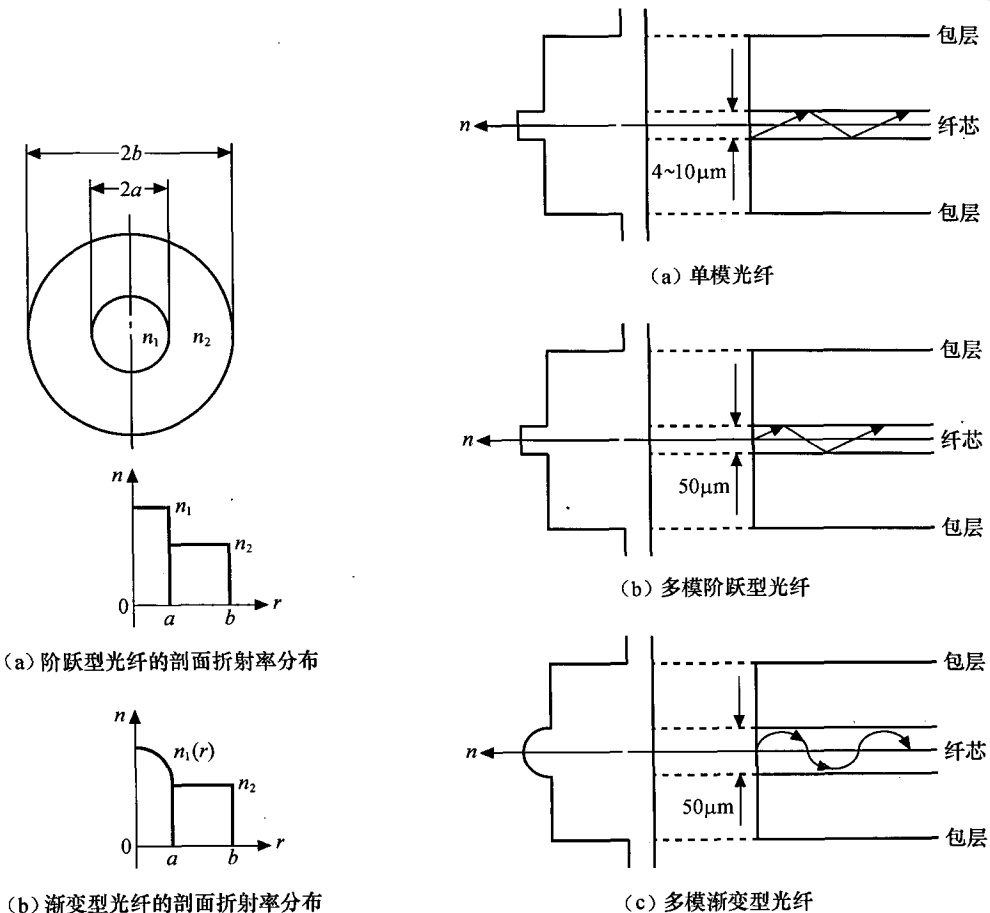
如果纤芯折射率 n_1 随着半径加大而逐渐减小, 而包层中折射率 n_2 是均匀的, 这种光纤称为渐变型光纤, 又称为非均匀光纤。它的剖面折射率分布如图 2-2 (b) 所示。

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, 约为 $4\sim 10\mu\text{m}$ 。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。



(a) 阶跃型光纤的剖面折射率分布

(b) 渐变型光纤的剖面折射率分布

(a) 单模光纤

(b) 多模阶跃型光纤

(c) 多模渐变型光纤

图 2-3 光纤中的光射线轨迹

图 2-2 光纤的剖面折射率分布

(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折射率分布,也可以采用渐变折射率分布,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 λ 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,第 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 E 的幅度相等、相位相同,磁场强度 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,即如图 2-4 所示。

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

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

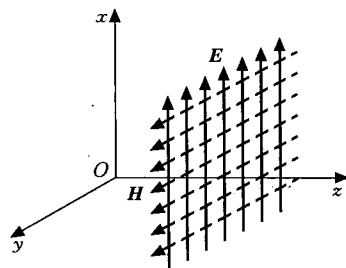


图 2-4 沿正 z 轴方向传播的均匀平面波

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。

(1) 传播速度 v

平面波的传播速度是指在平面波的传播方向上等相位面的传播速度，故又称为相速。

$$v = \frac{\omega}{k} \quad (2-2-1)$$

式中 k 的物理意义是电磁波在自由空间传播时的相位常数，即电磁波每传播单位距离所产生的相位变化，其表示式为

$$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$$

其中， ϵ 称为介质的介电常数，是不随时间和空间变化的标量； μ 称为介质的磁导率，是不随时间和空间变化的标量。因此平面波的传播速度可用介质的参量 μ, ϵ 表示为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

(2) 波阻抗 Z

如图 2-4 所示，电场强度仅有 x 分量，而磁场强度仅有 y 分量，电场 E_x 和磁场 H_y 之比所得到的 Z 具有阻抗的量纲，称为波阻抗。

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

若平面波在自由空间中传播，则称为自由空间的波阻抗，用符号 Z_0 来表示。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega$$

它是个纯阻。

(3) 相位常数 k

由式 (2-2-1) 可得出

$$k = \frac{\omega}{v}$$

而 $\omega = 2\pi f, v = f \cdot \lambda$ ，于是上式可写为

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

它代表了在单位长度上相位变化了多少，称之为相位常数，也称为波数。

如果平面波在折射指数为 n 的无限大的介质中传播，则由式 (2-2-1) 得出

$$k = \frac{\omega}{v}$$

而 v 是表示平面波在该介质中的传播速度，即

$$v = \frac{c}{n}$$

则

$$k = \frac{\omega n}{c}$$

而

$$\omega = 2\pi f$$

$$c = f \cdot \lambda_0$$

所以

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n = k_0 n$$

均匀平面波是一种非常重要的波型，这是因为一些复杂的波型均可由平面波的叠加而得到。

2. 平面波在两介质交界面的反射和折射

如图 2-5 所示，有两个半无限大的介质，其介质参数分别为 ϵ_1 、 μ_1 和 ϵ_2 、 μ_2 。 $x=0$ 的平面为其交界面，介质交界面的法线为 x 方向。这两种物质都是各向同性的。

平面波沿 k_1 方向由介质 1 射到两介质的分界面上，这时将产生反射和折射。一部分能量沿 k'_1 方向反射回原来的介质，这称为反射波；一部分能量沿 k_2 方向进入第二种介质，称为折射波。入射线、反射线和折射线各在 k_1 、 k'_1 和 k_2 方向， θ_1 、 θ'_1 和 θ_2 为入射线、反射线、折射线与法线之间的夹角，分别称为入射角、反射角和折射角。

反射和折射的基本规律是由斯奈耳定律和菲涅尔公式表示的。

(1) 斯奈耳定律

斯奈耳定律说明反射波、折射波与入射波方向之间的关系。由图 2-5 看出，入射线、反射线和折射线在同一平面内^注， θ_1 、 θ'_1 和 θ_2 之间的关系为

$$\theta_1 = \theta'_1 \quad (2-2-2)$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2-2-3)$$

式 (2-2-2) 叫做反射定律、式 (2-2-3) 叫做折射定律。

式 (2-2-3) 中的 n 代表介质的折射指数。其物理概念是：光波在不同介质中传播时，其速度不同，在真空中的传播速度最快，而在其他介质中传播的速度要比在真空中慢。光在真空中的传播速度与在介质中的传播速度之比被定义为介质的折射指数（或称折射率），用符号 n 表示。

$$n = \frac{c}{v}$$

由公式可知， n 越大的介质，光波在其中传播的速度越慢。

反射定律确定了反射角和入射角的关系，折射定律确定折射角和入射角的关系。这是两个十分重要的定律，分析光射线在介质波导中传播时，就要应用反射定律和折射定律。

(2) 菲涅尔公式

菲涅尔公式表明反射波、折射波与入射波的复数振幅之间的关系。

如设 E_{01} 、 E'_{01} 、 E_{02} 为入射波、反射波、折射波在介质分界面的复数振幅。现引进反射系数 R 与折射系数 T 来表示 E'_{01} 、 E_{02} 与 E_{01} 之间的关系。

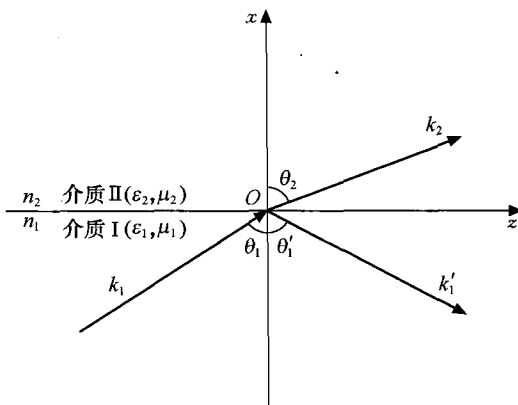


图 2-5 平面波的反射和折射

注：参见叶培大、吴彝尊编著：《光波导技术基本理论》，27 页，北京，人民邮电出版社，1981。