



北京市高等教育精品教材立项项目

高等学校通信教材

gaodeng xuexiao tongxin jiaocai

◎ 孙学康 张金菊 编著

GUANGXIAN TONGXIN
JISHU

光纤通信 技术

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



北京市高等教育精品教材立项项目

高等学校通信教材

光纤通信技术

孙学康 张金菊 编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信技术/孙学康, 张金菊编著. —北京: 人民邮电出版社, 2004. 6

高等学校通信教材

ISBN 7-115-12280-6

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 (2004) 第 040229 号

内 容 提 要

本书较全面地讨论了光纤通信技术方面的基本概念、原理及实用系统。基本内容包括光纤通信的基本概念及其特点、光纤的导光原理及其特性分析、常用的光纤通信器件介绍、光纤通信系统概述、光同步网和波分复用技术介绍等, 最后对各种实用的光网络技术进行了详细的介绍。

本书为高等院校通信工程、计算机通信专业本科生的专业教材, 也可供从事通信、计算机方面工作的工程技术人员参考。

高等学校通信教材

光纤通信技术

◆ 编 著 孙学康 张金菊

策化编辑 滑 玉

责任编辑 郭 玲

◆ 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 010-67129259

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京顺义振华印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 800×1000 1/16

印张: 20

字数: 468 千字

2004 年 6 月第 1 版

印数: 1—5 000 册

2004 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN7-115-12280-6/TN·2282

定价: 25.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

编者的话

随着技术的不断发展,用户需求的不断提高,特别是 Internet 对数据业务的增长起到了推动作用,人们对现有光网络的功能提出了更高的要求,要求光网络能够实时地、动态地调整网络的逻辑拓扑结构,快速、有效地为用户提供各种宽带服务与应用。为了能够及时反映最新光纤通信的现状与发展动态,本书在介绍光纤通信技术基本概念、原理的基础上,重点介绍光纤通信网络方面的最新进展。

本书在内容取材和编码上具有以下几个特点:

(1) 在第 2 章光导纤维中,除较深入地讨论了光纤的导光原理和光纤的传输特性外,还对光纤的非线性效应及其应用技术进行了详细的分析,以适应相关器件发展的要求。

(2) 为适应高速、大容量数据传输技术发展的要求,本书在第 5、6 章分别着重论述了光同步网络和波分复用光网络。

(3) 为了适应 IP 业务的爆炸式的发展,在第 7 章中详细论述了光互联网、光城域网、光接入网以及光智能网。

本书是一本用于通信专业本科学习的教材,也供从事通信方面工作的工程技术人员参考。

本书的第 1、2、3 章由张金菊编写,第 4、5、6、7 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、高炜烈、李文海、段炳毅教授和刘勇老师,还要感谢为本书编写付之帮助的北京邮电大学网络教育学院的各位同事。

由于时间紧迫,学识有限,书中的不足之处,请不吝指正。

编者

2004 年 5 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 光纤通信的基本概念	1
1.2 光纤通信的优越性	2
1.3 光纤通信系统的基本组成	3
1.4 光纤通信的发展趋势	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	14
2.3 用波动理论法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	23
2.3.3 渐变型光纤的标量近似解法	34
2.4 单模光纤	39
2.4.1 单模光纤的折射率分布	39
2.4.2 单模传输的理论分析	41
2.4.3 单模光纤的双折射	43
2.4.4 新型单模光纤	45
2.5 光纤的传输特性	47
2.6 光纤的非线性效应	56
2.6.1 受激光散射效应	57
2.6.2 光纤折射率随光强度变化而引起的非线性效应	57
2.6.3 光孤子通信	59
小结	63
习题	63
附录	65
附录一 标量解场方程的推导	65

附录二 双曲正割型折射指数分布光纤可以获得自聚焦的证明	68
附录三 标量亥姆霍兹方程解的推导	70
第3章 光纤通信器件	73
3.1 半导体光源	73
3.1.1 激光器的物理基础	73
3.1.2 激光器的工作原理	76
3.1.3 半导体激光器的结构、工作原理及工作特性	79
3.1.4 分布反馈半导体激光器	85
3.1.5 量子阱半导体激光器	86
3.2 半导体光电探测器	86
3.2.1 半导体的光电效应	86
3.2.2 光纤通信中常用的半导体光电探测器	87
3.2.3 光电检测器的特性	90
3.3 光放大器	92
3.3.1 光放大器的分类	92
3.3.2 EDFA 的结构与工作原理	93
3.3.3 EDFA 的主要特性参数	95
3.4 无源光器件	97
3.4.1 光定向耦合器	97
3.4.2 光隔离器与光环行器	98
3.4.3 光滤波器	99
3.4.4 光开关	100
3.4.5 波长转换器	101
3.4.6 波分复用器	101
3.4.7 光纤光栅	104
小结	105
习题	105
第4章 光纤通信系统	106
4.1 IM-DD 光纤通信系统	106
4.1.1 光纤通信中的线路码型	106
4.1.2 IM-DD 光纤通信系统结构	107
4.2 衰减和色散对中继距离的影响	122
4.2.1 衰减与色散对中继距离的影响	122
4.2.2 10Gbit/s 及 10Gbit/s 以上的 SDH 光线路	127
4.2.3 使用光放大器的 SDH 高速线路	129
4.3 噪声及灵敏度分析	132

4.3.1	IM-DD 光纤通信系统噪声及灵敏度	132
4.3.2	EDFA 的级联系统	135
小结	.....	138
习题	.....	140
第 5 章	光同步网	142
5.1	同步数字体系的概念	142
5.1.1	PDH 的主要缺陷	142
5.1.2	SDH 的网络节点接口、速率和帧结构	143
5.1.3	SDH 网的特点	145
5.1.4	SDH 中的基本复用、映射结构	145
5.2	SDH 设备	148
5.2.1	SDH 逻辑功能块	148
5.2.2	再生器	156
5.2.3	复用设备	157
5.2.4	数字交叉连接器	160
5.3	SDH 传送网及其网络安全	163
5.3.1	SDH 光传输系统	163
5.3.2	SDH 传送网	165
5.3.3	网络安全	168
5.4	SDH 网络性能分析	178
5.4.1	SDH 网络的误码性能	178
5.4.2	SDH 网络抖动性能	180
5.4.3	可靠性	182
5.5	SDH 光接口、电接口技术指标	186
5.5.1	SDH 光接口、电接口的界定	186
5.5.2	SDH 光接口技术指标	187
小结	.....	189
习题	.....	191
第 6 章	波分复用	192
6.1	复用技术的基本概念	192
6.2	光波分复用技术	194
6.2.1	WDM、DWDM 和 CWDM	194
6.2.2	WDM 的特点	196
6.2.3	WDM 与光纤	196
6.2.4	WDM 对光源和光电检测器的要求	198
6.3	波分复用系统	200

6.3.1	波分复用系统结构	200
6.3.2	WDM 系统的基本应用形式	201
6.3.3	WDM 系统中的光监控信道	202
6.4	基于 WDM 的光传送网	202
6.4.1	WDM 光传送网分层结构	202
6.4.2	WDM 网络的交换形式和波长路由机制	207
6.4.3	WDM 网络的关键设备 OADM 和 OXC	211
6.4.4	采用光波分复用技术的高速光纤通信线路	219
6.4.5	WDM 网络的生存性	223
小结	.....	227
习题	.....	230
第 7 章	光网络	231
7.1	光网络的概念	231
7.2	光局域网和光城域网	231
7.2.1	光局域网结构	232
7.2.2	光城域网	241
7.3	宽带光接入网	252
7.3.1	光接入网的概念	252
7.3.2	无源光网络的传输原理及其应用	253
7.3.3	ATM 无源光网络 (APON)	257
7.3.4	以太网无源光网络 EPON 技术及其应用	262
7.4	光互联网	266
7.4.1	实现宽带 IP 网络的主要技术	267
7.4.2	IP over SDH 技术	269
7.4.3	IP over WDM 技术	277
7.5	智能光网络	281
7.5.1	智能光网络的概念、特点及功能	281
7.5.2	ASON 的网络体系结构	282
7.5.3	ASON 控制平面及其核心技术	283
7.6	全光网	298
7.6.1	全光网的概念、结构及其特点	298
7.6.2	全光网中的关键技术	299
小结	.....	305
习题	.....	308
参考书目	.....	309

第 1 章 概 述

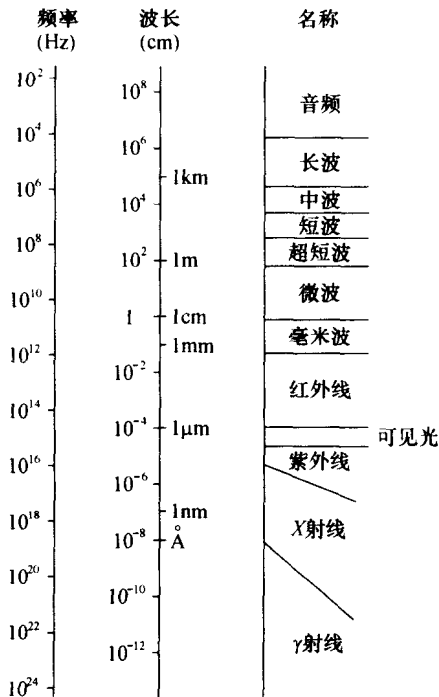
光纤通信作为现代通信的主要传输手段，在现代通信网中起着重要作用。

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、光纤通信的优越性、光纤通信系统的基本组成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

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。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。



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

图 1-1 电磁波的种类和名称

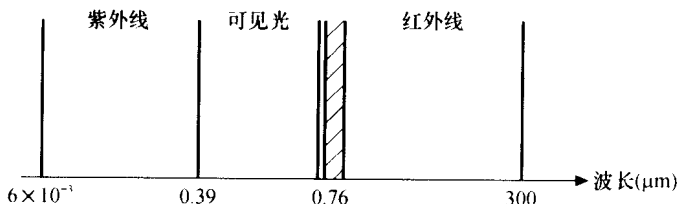


图 1-2 光波的波长范围

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 $1.55 \mu\text{m}$ 。

1.2 光纤通信的优越性

光纤通信技术从 20 世纪 70 年代中期到目前近 30 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 $10^{12} \sim 10^{16} \text{Hz}$ ，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

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，传输损耗值约为 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。

1.3 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。

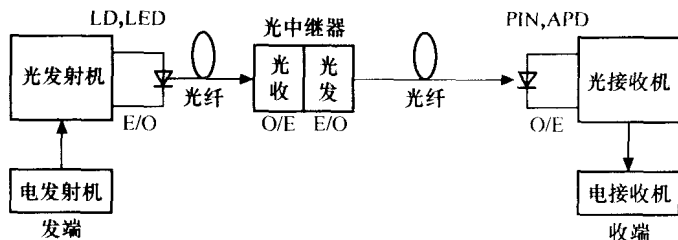


图 1-3 光纤数字通信系统示意图

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。

1.4 光纤通信的发展趋势

信息化是21世纪的时代特征,而信息化的基础是网络化。为了实现全球信息化的宏伟目标,先进的光纤通信技术必须建设和开发基于同步数字体系(SDH)和波分复用(WDM)的大容量超高速光纤传输网,并积极开展在光层上直接组网的光联网技术。

同步数字体系 (SDH) 是当前电信网的主要传输体制。为了适应网络边缘复杂的客户层信号特点, SDH 必须从纯传送网转变为传送网和业务网一体化的多业务平台, 即将传送节点与各种业务节点融合在一起, 构成业务层和传送层一体化的下一代 SDH 节点。

波分复用 (WDM) 系统由于可以在一根光纤上同时传送多个波长的信号, 因而通信容量将有很大程度的提高。从 WDM 系统的原理来看, 相邻波长的间隔越小, 在一定波长范围内可传送的波长数就越多, 则总的传输容量就越大。因此, 减小 WDM 系统的波长间隔将是人们努力的方向。目前商用密集波分复用 (DWDM) 的波长数已达到 160 个, 而实验室已做到超过 1 000 个。

普通的点到点的波分复用系统虽然有巨大的通信容量, 但只提供了原始的传输带宽, 必须要有灵活的节点才能实现高效灵活的组网能力。因此, 光节点是人们关注的一个问题, 光分叉复用器 (OADM) 和光交叉连接器 (OXC) 是靠光层面上的波长连接来解决节点的容量扩展问题的, 单个节点容量可从 160Gbit/s 增加到 10Tbit/s。

光传送联网的一个最新发展趋势是自动交换光网络 (ASON), 使光联网从静态光联网发展到自动交换光网络, 使传统的传送网向业务网方向发展。

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特殊光纤。

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。

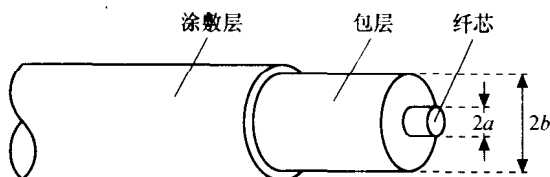


图 2-1 光纤的结构

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

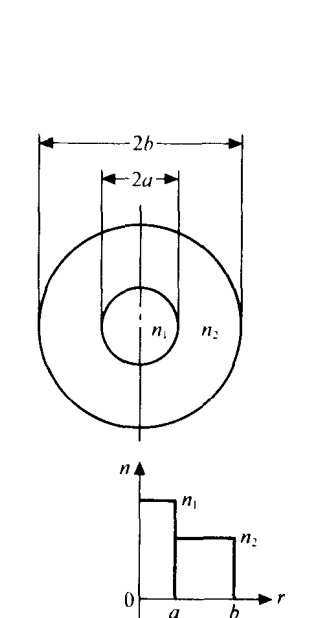
如果纤芯折射率 n_1 随着半径加大而逐渐减小，而包层中折射率 n_2 是均匀的，这种光纤称为渐变型光纤，又称为非均匀光纤。它的剖面折射率分布如图 2-2 (b) 所示。

2. 按照纤芯中传输模式的多少来划分

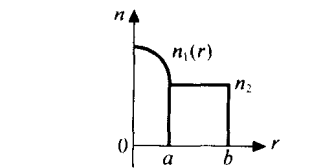
模式实质上是电磁场的一种场结构分布形式。模式不同，其场型结构不同。根据光纤中传输模式数量，光纤可分为单模光纤和多模光纤。

(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。

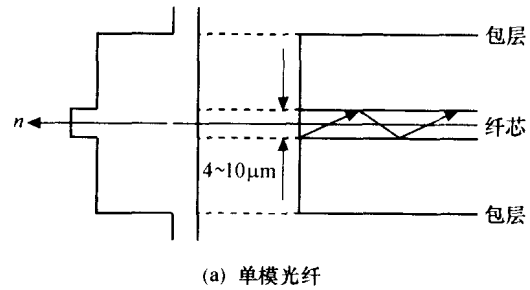


(a) 阶跃型光纤的剖面折射率分布

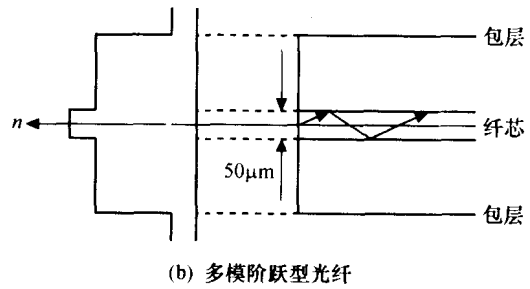


(b) 渐变型光纤的剖面折射率分布

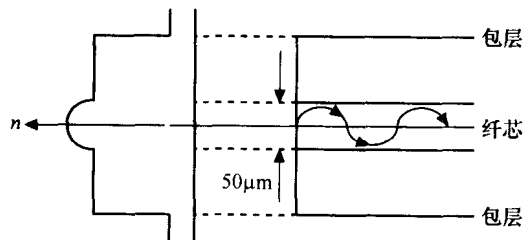
图 2-2 光纤的剖面折射率分布



(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

(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)、(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，第三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，即如图 2-4 所示。

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

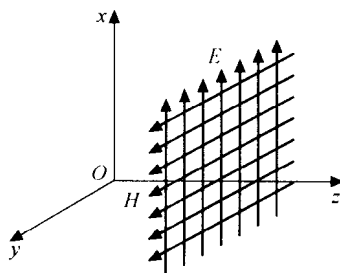


图 2-4 沿正 z 轴方向传播的均匀平面波

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

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。

(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 、 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。

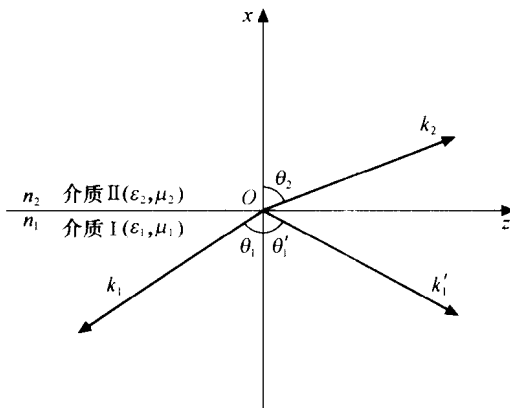


图 2-5 平面波的反射和折射

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。