



21 世纪高职高专电子信息系列规划教材

光纤原理与技术

北京希望电子出版社 总策划

姚建永 主 编

王 臻 副主编

王绍理 魏 访 吕俊杰 编 著

 科学出版社
www.sciencep.com



21世纪高职高专电子信息系列规划教材

光纤原理与技术

北京希望电子出版社 总策划

姚建永 主 编

王 臻 副主编

王绍理 魏 访 吕俊杰 编 著

 科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书主要阐述了光纤的原理和基本技术应用, 内容包括光纤的基本原理、光纤制备技术、光纤无源及有源器件、光纤的连接与耦合、光纤传感技术及光纤的应用。

本书内容全面, 语言通俗易懂, 注重理论与实践相结合, 实用性强, 可作为高职高专院校光电技术类基础课程的教材, 也可供从事光纤工作的研究人员、技术人员以及高等院校有关专业的师生参考。

需要本书或需要得到技术支持的读者, 请与北京中关村 083 信箱(邮编 100080) 发行部联系, 电话: 010-82702660, 010-82702658, 010-62978181 转 103 或 238, 传真: 010-82702698, E-mail: tbd@bhp.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

光纤原理与技术/姚建永等主编. —北京: 科学出版社, 2005.5

21 世纪高职高专电子信息系列规划教材

ISBN 7-03-014771-5

I. 光... II. 姚... III. 光导纤维—基本知识

IV. TQ342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 134127 号

责任编辑: 曾 华 / 责任校对: 王春桥
责任印刷: 媛 明 / 封面设计: 梁运丽

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市媛明印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
2005 年 5 月第一次印刷 印张: 11
印数: 1-3 000 册 字数: 249 千字

定价: 22.00 元

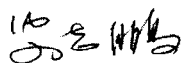
序

进入21世纪,随着科技的进步,高新技术已成为当前的热门话题。光电子技术以其独特的功能,应用在各行各业之中,人们给予了高度的关注,该专业各层次人才的需求量越来越大。

作为高职院校,我们有义务也有责任担负起该专业人才培养的重任。2001年在华中科技大学专家的指导下,以武汉中国光谷为依托,武汉职业技术学院在全国高职院校率先开办了光电子技术专业。2004年6月,武汉职业技术学院电信学院与北京希望电子出版社通力合作,邀请了国内20多所高职院校的专家和学者,成功举办了高职光电子技术专业教学与教材研讨会,并取得圆满成功。与会专家一致认为,培养光电子技术专业人才有着广泛的就业市场,当务之急是建设适合本专业的基础课程和系列教材。

为此,武汉职业技术学院电信学院经过大量的市场调研,听取专家意见,最后在原有自编教材的基础上推出了系列光电子技术专业教材。本系列教材以最大限度地满足社会应用型人才综合能力的培养为价值取向。课程体系建设则以能力为主线,以能力训练为轴心,淡化普通文化课、技术基础课和专业课的界限,重新整合课程。课程设置的目的是强调基本职业能力训练,综合开发学生的职业能力;强化学生创新意识、创新精神和创新能力,提高学生对就业上岗和职业变化的适应力;增加课程的灵活性,形成模块化、弹性化的课程体系,在整体上适应行业和社会对人才规格多变的需求。本教材填补了国内高职光电子类专业教材的空白。

作为一种尝试和探索,难免存在这样或那样的问题,望广大从事光电子技术教育和应用的科技工作者,不吝赐教,提出宝贵的意见。



前 言

光纤通信是 20 世纪 70 年代问世的通信新技术,它采用光波作为信息载体,采用光导纤维作为传输介质。这种通信方式以其巨大的可用带宽和极低的传输损耗,在问世后不久便取代了铜缆,成为有线信道最主要的传输方式。目前一个覆盖全球的光纤通信网已经建立起来,光纤不仅在长途干线网、区域网中已完全取代了铜缆,而且已深入到了居民区、大楼、办公室乃至偏远的乡村,成为无处不在的通信方式。正是通信的需要催生了光纤,而随着人们对光纤认识的不断深入和光纤技术的迅猛发展,光纤的应用领域也在不断拓宽。

进入 21 世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都存在着较大的差距。

在面对新技术挑战的时代中,光纤及其应用技术所处地位的重要性是显而易见的。作为传授知识的高等学校,我们在关注全球信息技术发展方向的同时,更关注搞好教材建设和专业建设。

为了加强高职高专光电子技术类专业教学与教材建设的力度,2004 年 6 月,由武汉职业技术学院电子信息工程学院和中国科学出版集团北京希望电子出版社组织全国各兄弟高职院校教师在武汉召开了“高职类光电子技术专业教学与教材研讨会”,旨在推出系列专业基础课和专业教材。通过这次会议,大家相互交流,相互学习,达成了共识——高职院校需要有自己的专门教材以满足高职院校的教学急需。正是在这次会议精神的指导下,我们组织编写了本教材。

本书是一本主要针对高职院校光电专业学生的专业基础课教材,内容涉及光纤传输原理与基本特性、光纤(光缆)制备及测试、光纤无源及有源器件、光纤的连接与耦合、光纤传感原理与应用和光纤技术的应用。作者力图深入浅出,注重原理的系统性叙述又不拘泥于繁琐的数学推导,紧密联系实际,突出实用性,以期更好地做到理论与实际相结合。本书还可作为大专院校相关专业学生的学习参考书,对工程技术人员亦具有一定的参考价值。

本书第 1、2、5 章由王绍理同志编写,第 3、4 章由魏访同志编写,第 6 章由吕俊杰同志编写,由姚建永同志统编全书。在编写过程中,得到了华中科技大学博士生导师杨坤涛教授、武汉职业技术学院电信工程学院各级领导、武汉职业技术学院电信学院光电教研室、各兄弟院校许多同志的大力支持与协助,他们提出了不少宝贵意见。同时,在编写过程中还参阅了一些作者的著作和文章,在此,一并谨向他们表示诚挚的感谢。

限于编者理论水平和实践经验的不足,不妥或谬误之处在所难免,恳请广大师生、读者及有关专家批评指正,以期不断提高教材的编写、出版质量,共同为高职光电子技术专业教材建设服务。

编 者

21 世纪高职高专电子信息系列规划教材

编 委 会 成 员 名 单

主 任：杨坤涛 马必学 安志鹏 陆卫民

副主任：张学礼 姚建永 李 旭 王 臻

编 委：（排名不分先后）

郑明红 贺占魁 熊 绪 王建庄 唐汝元

魏少峰 程远志 陈元芳 汪建立 杨殿生

金 鸿 王 蓉 李 丽 杨 凡 陈华林

王 立 李建利 韩全力 刘明伟 全卫强

目 录

第1章 光纤传输原理与基本特性 1	
1.1 引言..... 1	
1.2 光的波粒二象性..... 4	
1.3 基本的光学定律和定义..... 6	
1.4 光纤的结构与分类..... 7	
1.5 光纤传输的基本原理..... 8	
1.5.1 光线理论..... 9	
1.5.2 波动理论..... 12	
1.5.3 单模光纤..... 15	
1.6 光纤的损耗与色散..... 18	
1.7 光纤的机械特性与温度特性..... 22	
1.8 光纤的其他重要性能参数..... 23	
习题..... 25	
第2章 光纤(光缆)制备及测试 27	
2.1 常用光纤材料及其提纯方法..... 27	
2.2 预制棒制备技术..... 29	
2.3 拉丝、涂覆与套塑技术..... 32	
2.4 成缆技术、光缆类型与结构..... 34	
2.4.1 光缆的基本构件..... 34	
2.4.2 光缆的分类方式..... 35	
2.4.3 光缆的结构类型..... 37	
2.5 光缆型号与命名方式..... 41	
型号命名的格式..... 41	
2.6 光纤(光缆)参数和特性测试..... 44	
习题..... 53	
第3章 光纤无源及有源器件 54	
3.1 光纤连接器..... 54	
3.2 光纤定向耦合器..... 57	
3.3 光波分复用器..... 59	
3.4 光隔离器与环行器..... 62	
3.5 窄带光学滤波器..... 64	
3.6 光开关与光衰减器..... 65	
3.7 光纤放大器..... 67	
3.7.1 光纤放大器的工作原理..... 67	
3.7.2 光纤放大器的构成及 泵浦方式..... 69	
3.7.3 光纤放大器的应用..... 71	
3.8 光纤激光器..... 72	
3.8.1 光纤激光器的谐振腔..... 72	
3.8.2 光纤激光器的阈值特性..... 74	
3.8.3 光纤激光器的其他特性..... 75	
习题..... 76	
第4章 光纤的连接与耦合 77	
4.1 光纤—光源的连接损耗..... 77	
4.1.1 多模光纤和多模光纤直 接耦合的损耗..... 79	
4.1.2 单模光纤和单模光纤直接 耦合的损耗..... 82	
4.2 光纤的固定连接技术..... 84	
4.2.1 光纤端面制备..... 84	
4.2.2 光纤对准调节..... 85	
4.2.3 光纤的固定..... 86	
4.3 光纤的活动连接..... 88	
4.4 光源—光纤的耦合..... 88	
4.4.1 朗伯光源与光纤的耦合..... 88	
4.4.2 固体及气体激光器与光纤 的耦合..... 91	
4.4.3 半导体激光二极管与光纤 的耦合..... 91	
4.5 光纤—光无源器件的耦合..... 94	
习题..... 94	
第5章 光纤传感器原理与应用 95	
5.1 光纤传感器的原理..... 95	
5.1.1 光纤传感器的基本原理..... 95	
5.1.2 光纤传感器的分类..... 96	
5.1.3 光纤传感器的组成..... 96	
5.1.4 光纤传感器的性能特点..... 100	
5.2 强度调制光纤传感器..... 100	
5.2.1 强度调制..... 100	
5.2.2 强度检测..... 106	
5.2.3 应用举例..... 108	
5.3 频率调制光纤传感器..... 109	

5.3.1	频率调制	109	5.6.3	应用举例	138
5.3.2	频率检测	111	5.7	复用式和分布式光纤传感器	140
5.3.3	应用举例	113	习题	143	
5.4	波长(颜色)调制光纤传感器	113	第6章	光纤技术的应用	145
5.4.1	波长(颜色)调制	113	6.1	特种光纤	145
5.4.2	波长检测	116	6.1.1	红外光纤	145
5.4.3	应用举例	117	6.1.2	塑料光纤和紫外光纤	147
5.5	相位调制光纤传感器	118	6.1.3	衰减场光纤	150
5.5.1	相位调制	118	6.2	光纤技术的应用	153
5.5.2	几种光纤干涉仪	121	6.2.1	工业应用	153
5.5.3	相位检测	125	6.2.2	军事应用	156
5.5.4	应用举例	131	6.2.3	医学应用	160
5.6	偏振态调制光纤传感器	134	6.2.4	在信息处理中的应用	164
5.6.1	偏振态调制	134	习题	168	
5.6.2	偏振态的检测	137			

第 1 章 光纤传输原理与基本特性

1.1 引 言

自古以来,通信就是人们的基本需求之一,这种需求引起人们开始发明能将信息从一个地方传送到另一个遥远地方的通信系统。至今为止,已有多种形式的通信系统出现,每一种新的通信方式出现的原动力都是源自于改进传输的可靠性、提高信息传输速率或增加中继站之间的距离。19 世纪中叶以前,所有的通信方式只能以极低的信息速率工作,而通信方式不外乎光方式和声方式两种,例如信号灯和喇叭。已知的最早光通信线路是公元前 8 世纪在古希腊出现的烽火台通信,这种通信方式可用于报警、呼救或通知特定的事件。

1838 年 Samuel F.B.Morse 发明了电报,这标志着人类进入了一个通信新纪元,即电通信时代。此后,在图 1.1 所示的电磁频谱中有越来越多的部分用于将信息从一个地方传送到另一个地方。这是因为对于一个电通信系统,信息数据通常是加载于一个正弦电磁波(即所谓载波),然后再通过通信信道传送的。在目的地,信息再从载波中分离出来并需要根据加以处理。由于可传输的信息总量是与载波的工作频率范围直接相关的,因此提高载波频率在理论上就可以增加传输带宽,通常也就可以提供大的信息传输容量。因此,电通信系统总是倾向于采用更高的频率(更短的波长),这样便可增加带宽或者提高信息传输容量。正是由于这种原动力导致了无线电、电视、雷达和微波线路的产生。

图 1.1 所示的电磁频谱中,另一个重要的部分在光频区域。与电通信相比,以光形式实现的信息传输不是通过对载波的频率调制完成的,而是通过改变光功率的强度而实现的。与射频波段类似,光波也有两种传输媒介可以利用,一是大气信道,另一个是波导信道。在光波系统中,通常使用波长这个术语来区分关注的频段,而不是像无线电领域那样使用频率这个术语。但是,到了 20 世纪 90 年代中期,随着高速多波长系统的改进,光源的输出也开始使用光频这一术语。其原因是像锁模半导体激光器一类的光源,如果调谐到不同的发射范围,则比较容易控制输出光的频率而并非波长。当然,不同的光频率 ν 是以一个基本关系式 $c = \nu\lambda$ 与波长 λ 相联系的,例如,1552.5nm 波长的光信号,其频率为 193.1THz ($193.1 \times 10^{12}\text{Hz}$)。光谱范围大约从 50nm (紫外)一直到 100 μm (远红外),可见光在 400~700nm 范围以内。在光纤通信系统中,其工作波长范围为 800~1600nm。

近代光通信的雏形可追溯到 1880 年 Bell 发明的光电话,他用阳光作为光源,硒晶体作为光接收检测器件,通过 200m 的大气空间成功地传送了语音信号。虽然在以后的近几十年中,人们对 Bell 的光电话具有浓厚的兴趣,但由于缺乏合适的光源及严重的大气衰减,这种大气通信光电话未能像其他电通信方式那样得到发展。

近代光通信的真正发展则只是近三四十年的事,其中起主导作用的是激光器和光纤的诞生。首先是 1960 年 Maiman 发明了红宝石激光器,激光器产生的强相干光为现代光通信提供了可靠的光源。这种单波长的激光具有普通无线电波一样的特性,可对其调制而携带信息。利用激光的早期光通信也是通过大气传输的。但很快发现,许多因素如雾、雨、云,

甚至一队偶然飞过的鸟，都会干扰光波的传播，因而只能作短距离通信用。显然，需要一种像射频或微波通信的电缆或波导那样的光波通信传输线以克服这些影响，实现信息的长距离稳定传输。

1965 年，E.Miller 报导了金属空心管内一系列透镜构成的透镜光波导可避免大气传输的缺点，但因其结构太复杂且精度要求太高而不能实用。而另一方面，光导纤维的研究正在扎实进行。早在 1951 年就发明了医疗用玻璃纤维，但这种早期的光导纤维损耗太大（大于 1000dB/km），也不能作为光通信的传输媒质。

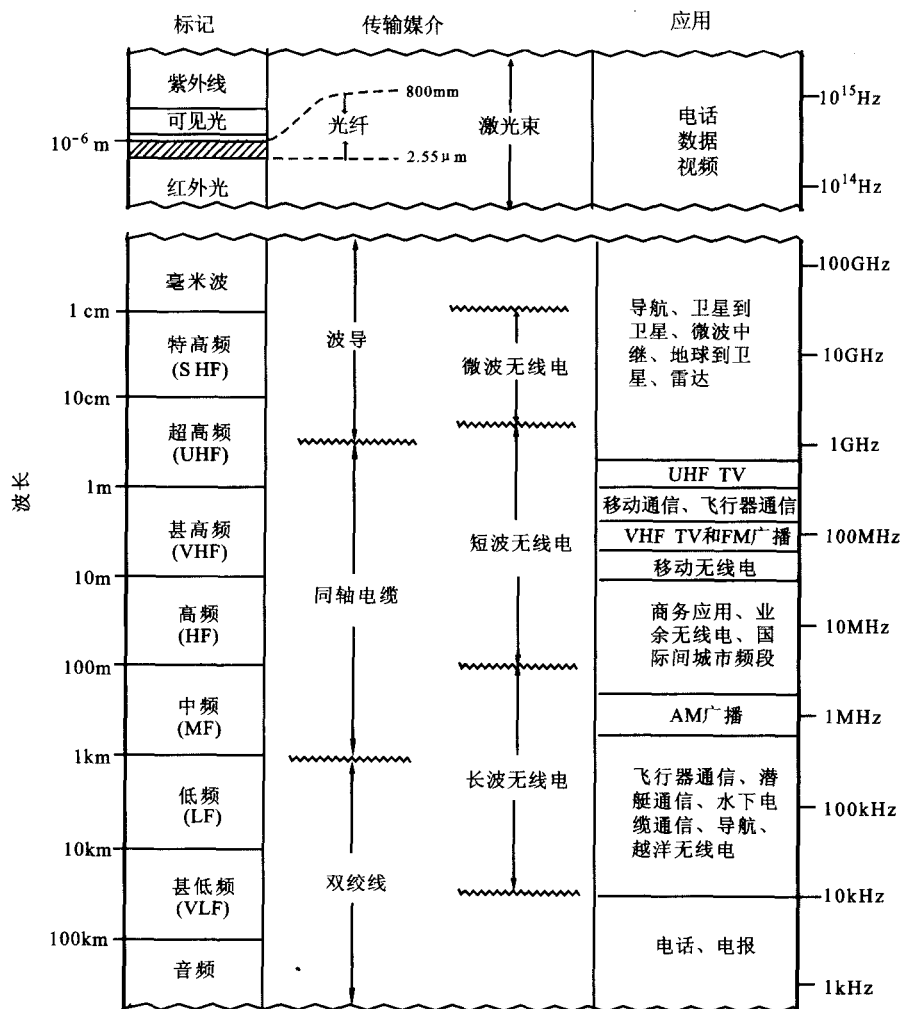


图 1.1 应用于通信系统的电磁频谱示例

1966 年，C.K.Kao（英籍华人科学家高锟）和 G.A.Hockman 发表了对光纤通信发展具有历史意义的著名论文。他们在分析了造成光纤传输损耗高的主要原因后指出，如能完全除去玻璃中的杂质，损耗就可降到 20dB/km——相当于同轴电缆的水平，那么，光纤就可用来进行光通信。在这种预想的鼓舞下，Corning 公司终于在 1970 年制出了 20dB/km 损耗

的光纤,从而为光纤通信的发展铺平了道路。对光纤光谱特性的研究发现,它有3个低损耗的传输窗口,即850nm的短波长窗口和1300nm、1500nm的长波长窗口。而后,随着新的制造方法的出现及工艺水平的不断提高,光纤损耗不断降低。到1979年,单模光纤在1550nm波长的损耗已降到0.2dB/km,接近石英光纤的理论损耗极限。

而且光波频率高,光纤的带宽资源亦十分可观,是任何其他传输媒质无法比拟的。可以说,光纤是通信工作者梦寐以求的理想传输媒质,有近乎完美的品质:

- 几乎无限的带宽
- 几乎为零的损耗
- 几乎为零的信号失真
- 几乎为零的功率消耗
- 几乎为零的材料消耗
- 几乎为零的占有空间
- 几乎为零的价格

因此,也可以毫不夸张地说,没有光纤,信息高速公路也许无“路”可走,当今信息革命的新纪元也许无从谈起。

在光纤损耗不断降低的同时,光源研究的进展亦十分迅速。1962年,GaAs半导体激光二极管(LD)问世,意味着现代光通信有了小体积的高速光源。GaAs—LD的发射波长为870nm,在掺杂铝后移到了光纤的短波长低损耗窗口。后来,GaAlAs—LD又实现了室温长时间工作。利用四元系合金InGaAsP制造出了1300nm及1550nm的LD光源。由于LD昂贵,适合光纤通信的高亮度LED也研制了出来。这样,随着符合光纤传输要求、各种波长、高效率、长寿命、高速率半导体光源的研制成功,光纤通信的实用化及大发展已是水到渠成。LD输出进入单模光纤的功率约为1mW。在光纤通信中又常用dBm作为功率单位,它是以1mW为基准、用dB表示的相对功率大小,即

$$P(\text{dBm}) = 10 \log \frac{P(\text{mW})}{1(\text{mW})} \quad (1.1)$$

因此, $P=1\text{mW}$ 即为0dBm。

此外,在光接收机的研究方面,各种波长范围的高效率、高速率半导体光电转换器件(如APD、PIN)也陆续问世。1973年,S.D.Personick发表了有关PCM数字光接收机分析的论文,解决了现代光纤通信系统中光接收机的设计问题。数字接收机的灵敏度是很高的,如2.5Gb/s的信号可达-30dBm(1μW)。那么对于似乎很小的1mW发送功率,光纤损耗为0.2dB/km时,仅从损耗而言的传输距离就可达100km以上。

此外,为了满足系统应用的需要,各种光无源器件(如光纤活动连接器、光衰减器、光波分复用器、隔离器及分路器等)及专用仪器设备(如光纤熔接机、光时域反射计、光功率计等)也陆续配套商用。

1974年左右,许多国家进行了各种室内的光纤通信传输实验,1976年后出现了各种实用的光纤通信系统,1980年美国电报电话公司的45Mb/s光纤通信系统FT-3实现商用。从20世纪80年代起进入了光纤通信高速发展的时期,经历了从短波长到长波长、从多模光纤到单模光纤、从低速率到高速率的发展过程。至今,光纤通信的发展已经历4代,即850nm波长多模光纤的第1代系统(1973~1976)、1300nm波长多模光纤的第2代系统

(1976~1982)、1300nm 单模光纤多模激光器的第 3 代系统(1987~现在)及 1550 nm 单模光纤单频激光器的第 4 代系统(1990~现在)。全世界已铺设的光缆总长达几千万公里,我国亦铺设了百万公里,形成了遍布全国、全世界的陆地及海底光纤网。从 2.5~10Gb/s 的系统均已实用化大量应用,40Gb/s 的超高速光纤通信技术进展亦十分迅速。图 1.2 为通信系统容量的发展图,可见只有采用了光纤通信后才实现了通信系统容量的指数式增长。

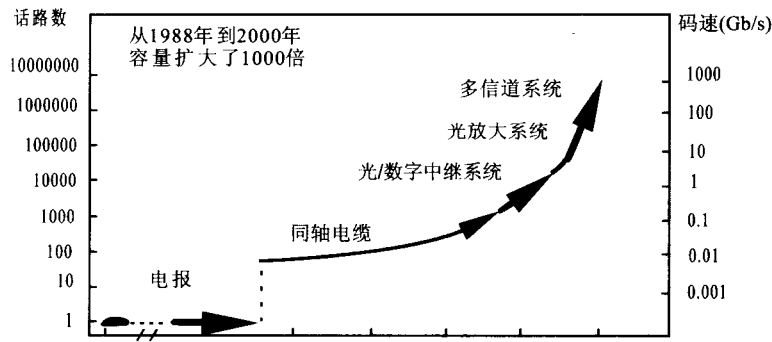


图 1.2 通信容量发展图

充分发挥光纤的带宽潜力,克服光纤损耗及色散的影响,延长中继距离、扩大传输容量及降低成本,一直是光纤通信的发展目标。各种光纤通信技术不断出现,系统的码速距离积一再提高,几乎每 4 年增加一个数量级。这些新技术包括:

- (1) 有源及无源光器件、系统端机的集成化与模块化,提高速率与性能,简化结构降低成本,这些是系统发展最主要的技术基础;
- (2) 波分复用(WDM, Wavelength Division Multiplexing)技术,实现单根光纤上超高速、超大容量传输;
- (3) 光放大技术,尤其是掺铒光纤放大器(EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier)及光放大器在长途干线系统以及用户分配系统中的应用;
- (4) 孤子通信技术;
- (5) 高速光纤网技术,全光网技术等。

发展这些新技术的宗旨,都是为了更好地满足日益增长的信息需求。其中,WDM 技术与光放大器技术的完美结合,极大地提高了光纤通信系统的性能与通信容量,成为了现代光通信技术的闪亮明珠,通向全光通信网的桥梁。

可以说,通信发展的要求催生了光纤。随着光纤技术的迅速发展和人们对光纤的深入认识,光纤的应用又不仅仅限于通信应用。从实用角度看,光纤主要应用在三大领域中,即通信领域、非通信领域和大功率传输领域。

1.2 光的波粒二象性

有关光的本质的一些概念,在物理学发展历史中几经变化。直到 17 世纪早期,一般认为光是由光源发出的微粒流构成的。微粒说可以解释光的直线传播、光可贯穿透明介质、

同时,在非透明介质表面的反射。这种理论在解释大尺寸光学现象如反射和折射时是成功的,但在解释小尺寸光学现象如干涉和衍射时却遭到了失败。

有关光的衍射的正确解释是1815年由菲涅尔(Fresnel)提出的。菲涅尔认为光的近似直线传播特性可以假设光是一种波动现象来进行解释,而且可以详细考虑衍射阴影。此后,1864年麦克斯韦的论文从理论上认定了光波在本质上是电磁波。进一步的偏振效应观察指出光波是横波(也就是构成波的场量振动方向与波的传播方向相垂直)。按照波动光学或物理光学的观点,由一个小的光源辐射出的电磁波可以使用图1.3所示的光源中心为球面波前(Wave Front)来进行表示。波前定义为波列中具有相同相位的点的集合。通常要画出波前所经历的波的最大和最小取值,例如,正弦波的波峰和波谷。因此波前(也称为相前)是以一个波长为间隔的。

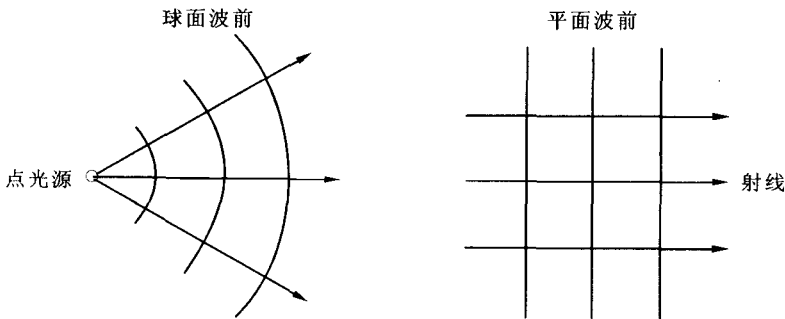


图1.3 球面波和平面波的波前及与之相联系的射线表示

如果光在传播过程中遇到其尺寸比光波波长大多了的物体(或开口),则光波的波前对此物体(或开口)以直线形式出现。这种情况下可以将光波看成是平面波,可以使用光射线代表其传播方向,此射线与波前或相前垂直。所以大尺寸的光效应,例如反射和折射可以使用射线追踪的简单几何方法进行分析,这种光学观点即所谓的射线光学或几何光学。光射线指明了光束能量流动的方向,是一个十分有用的概念。

光的波动理论可以充分地解释与光的传播相联系的所有现象。但在处理光与物质的相互作用,例如光的色散、光的发射和光的吸收等问题时,无论是波的粒子说还波动说都是近似考虑的。为此,必须求助于量子理论,量子理论指出光辐射具有波粒二象性。光的粒子性来源于对以下现象的解释,即光能量的发射与吸收总是以称为光量子或光子的离散单位而实现的。在所有验证光子存在的实验室中,发现光子能量仅与频率 ν 有关,而频率则只有在观察光的波动特性时才能对其测量。

光子的能量 E 与频率 ν 之间的关系为

$$E = h\nu \quad (1.2)$$

等式中的 $h=6.625 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 是普朗克(Planck)常数。当光入射到原子上时,一个光子可以将其能量交给原子中的电子,并将电子激发到较高的能级。在这个过程中,没有任何一个光子只是部分地将能量交给电子,电子吸收的能量必须严格地与它跃迁到较高能级所需要的能量相等,激发态的电子也可能跃迁至较低的能级并辐射一个光子,此光子的能量 $h\nu$ 必须严格等于这两个能级的能量差。

1.3 基本的光学定律和定义

下面我们将回顾一些与光纤相关的基本光学定律和定义。物质的最基本光学参数是它的折射率（或折射指数），在自由空间中光以速度 $c=3\times 10^8\text{m/s}$ 传播，光的速度与频率 ν 以及波长 λ 之间的关系为 $c=\nu\lambda$ 。当光进入电介质或非导电介质时，将以速度 v 传播，这是材料的特征速度而且总是小于 c 。真空中的光速度与物质中的光速度之比即为材料的折射率 n ，其定义式为

$$n = c / v \quad (1.3)$$

一些典型的折射率值为：空气 $n=1.00$ ，水 $n=1.33$ ，玻璃 $n=1.50$ ，钻石 $n=2.42$ 。

关于光的反射和折射概念，可以考虑与平面波在电介质材料中传播相联系的光线概念。当光线到达两种不同介质的分界面时，光线的一部分反射回第一种介质，其余部分则进入第二种介质并发生弯折（或折射）。如果 $n_2 < n_1$ ，则反射和折射情况如图 1.4 所示。界面上光线发生弯折或折射是由于两种材料中光的速度不同，也就是说它们有不同的折射效果。界面上光线之间的方向关系就是众所周知的 Snell 定律，其表达式为

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (1.4)$$

与之等效的表达式为

$$n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2 \quad (1.5)$$

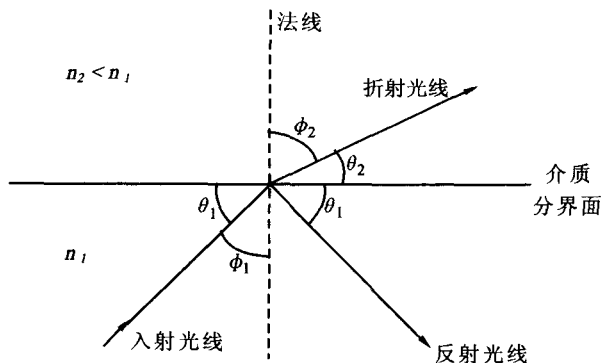


图 1.4 不同材料分界面上光线的折射和反射

等式中的角度在图 1.4 有其相应的定义，图中的角 ϕ_1 是入射光线与界面法线间的夹角，称为入射角。

根据反射定律，入射光线与界面间的夹角 θ_1 与反射光线与界面间的夹角是完全相等的。另外，入射光线、界面的法线、反射光线位于同一平面内，这个平面是与两种材料的界面相垂直的，也就是所谓的入射面。通常光密介质（也就是折射率较大的介质）反射光的过程称为外反射，而光疏介质反射光（例如光在玻璃中传播时被玻璃与空气的界面反射）的过程则称为内反射。

当光密介质中光线的入射角 ϕ_1 增大时，折射角 ϕ_2 也增大。当 ϕ_1 大到某一特定值时， ϕ_2

达到 $\pi/2$ 。当入射角进一步增大时将不可能有折射光线，这时光线被“内全反射”。内全反射的条件可以由 1.4 式所表示的 Snell 定律决定。图 1.5 所示为玻璃与空气的界面，根据 Snell 定律，进入空气的光线折向玻璃表面，当入射角增大到某一值时，空气中的光线将趋于与玻璃表面平行，这个特殊的入射角就是众所周知的临界入射角 ϕ_c 。如果光线的入射角大于此临界角，内全反射条件得到满足，则光线全部反射回玻璃，因而没有光线从玻璃表面逃逸（这是一种理想情况，实际上总有一些光能从表面折射出去，这可以利用光的电磁波理论加以解释）。

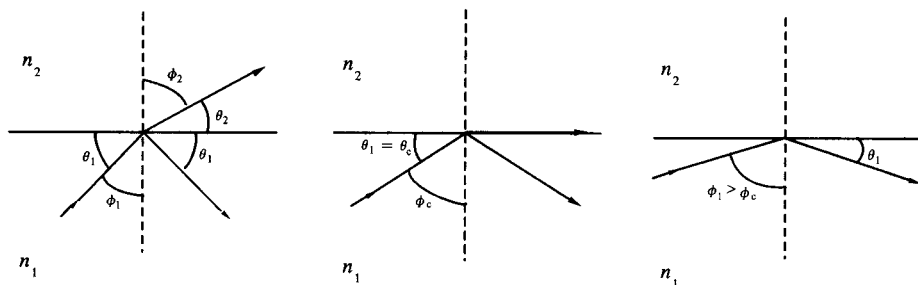


图 1.5 临界角和玻璃—空气界面上内全反射的示意图

作为一个例子，考虑图 1.5 所示的玻璃—空气界面，当空气中的光线与玻璃表面平行时， $\phi_2 = 90^\circ$ ，所以 $\sin \phi_2 = 1$ ，玻璃中的临界角为

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.6)$$

例 令玻璃折射率 $n_1 = 1.50$ ，空气折射率 $n_2 = 1.00$ ，则 ϕ_c 约为 42° 。玻璃中所有以大于 42° 的入射角 ϕ_1 入射到界面的光线都将全部反射回玻璃中。

1.4 光纤的结构与分类

光纤是“光导纤维”的简称，它是一种介质圆柱光波导，所谓“光波导”是指能够约束并导引光波在其内部或表面附近沿轴线方向传播的传输介质。

光纤波导是以各种导光材料制成的纤维丝。其基本结构通常包括纤芯和包层两部分，如图 1.6 所示。纤芯由高折射率材料制成，是光波的传输介质；包层材料折射率比纤芯稍低一些，它与纤芯共同构成光波导，形成对传输光波的约束作用。目前，已研制成功的光纤包括石英光纤、多组分玻璃光纤、塑料光纤、晶体光纤以及红外材料光纤等。

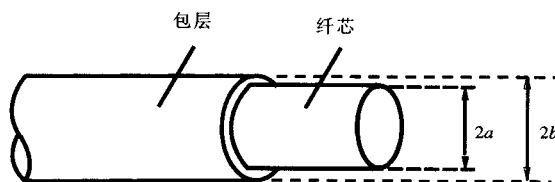


图 1.6 光纤结构

在光纤波导中传播的光波称之为“导波光”，其特征是：沿传播方向以“行波”的形式存在，而在垂直于传播方向上则以“驻波”的形式存在。因此，对于理想的平直光纤波导，在垂直于光传播方向的任一截面上，都具有相同的场分布图。这种场分布只决定于光纤波导的几何结构，是光纤固有属性的表征。不同的场分布图通常又称之为“模式”，在一般的光纤中，可以允许几百至几千个模式传播，称之为“多模光纤”；如果光纤中只允许一个模式传播，则称之为“单模光纤”。

光纤的传播特性与其横截面上折射率分布有很大关系。光纤依据其折射率分布可分为两类，即阶跃折射率分布光纤和渐变折射率分布光纤。在阶跃折射率分布光纤中，纤芯和包层折射率均为常数，分别等于 n_1 和 n_2 ($n_1 > n_2$)，在渐变折射率分布光纤中，包层折射率仍为 n_2 ，但纤芯折射率不再为常数，而是自纤轴沿半径 r 向外逐渐下降；在纤轴处 ($r=0$)，折射率最大（等于 n_1 ）；在纤壁处 ($r=a$)，折射率最小（等于 n_2 ）。光纤的折射率分布可由式 1.7 描述

$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^g]^{1/2} & 0 \leq r \leq a \\ n_2 & r > a \end{cases} \quad (1.7)$$

其中 a 为纤芯半径， Δ 是纤芯轴线折射率与包层折射率的相对差，定义为

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.8)$$

g 是光纤折射率分布参数，它决定了折射率分布曲线的形状，当 $g=\infty$ ，即为阶跃折射率分布光纤；当 $g=2$ 时，称之为平方律分布（或抛物线分布）光纤； $g=1$ 时，为三角分布光纤。

1.5 光纤传输的基本原理

在光纤中传播的光波遵从麦克斯韦方程组，由此出发，可以导出描述光波传播特征的“射线方程”与“波导场方程”

$$\frac{d}{ds} \left[n(r) \frac{dr}{ds} \right] = \nabla n(r) \quad (1.9)$$

$$\nabla_t^2 \begin{bmatrix} E(x, y) \\ H(x, y) \end{bmatrix} + \chi^2 \begin{bmatrix} E(x, y) \\ H(x, y) \end{bmatrix} = 0 \quad (1.10)$$

式中 s 是光线轨迹的弧长， $\mathbf{r} = xe_x + ye_y + ze_z$ 是光线轨迹上一点至参考点的矢径； ∇ 和 ∇_t^2 分别是梯度算符与横向拉普拉斯算符

$$\nabla = \begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{e}_z & (\text{直角坐标}) \\ \frac{\partial}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{e}_z & (\text{圆柱坐标}) \end{cases} \quad (1.11)$$

$$\nabla_t^2 = \begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\text{直角坐标}) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} (\text{圆柱坐标}) \end{cases} \quad (1.12)$$

E 与 H 分别是光波的电场与磁场强度矢量, χ 是光波的横向传播常数, 它是波矢 $\bar{K}$ 的横向量, 定义为

$$\chi^2 = \omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2 = n^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (1.13)$$

式中 ω 为光波角频率; ε 和 μ 分别是传播媒质的介电常数和磁导率; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 是光波在真空中的波数; β 是光波的纵向传播常数, 它是波矢 $\bar{K}$ 的纵向分量, 定义为

$$\beta = nk_0 \cos \theta_z \quad (1.14)$$

其中 θ_z 是波矢 $\bar{K}$ 与 z 轴夹角。

射线方程 1.9 式与波导场方程 1.10 式分别构成光线理论与波动理论的基础, 光线理论是用几何光学的方法来分析光波在光纤中的传播, 它仅在光波波长远小于光纤芯径时才适用, 它研究的重点是光波在光纤中的传播轨迹。波动理论以波动光学的方法分析光波在光纤中的传播, 具有普遍适用性, 它研究的重点是光波在光纤中激励的模式以及在传播过程中模式的变化。

1.5.1 光线理论

在光线理论中, 近似认为光波波长 $\lambda_0 \rightarrow 0$, 从而将光波近似看成为光线, 其在光纤中的传播遵从几何光学的反射定理与折射定理, 对于给定折射率分布 $n(r)$ 的光纤, 可由 1.9 式导出其中传播光波的光线轨迹, 并进而分析光线传播特性。

1. 光线轨迹

对于阶跃折射率分布光纤, 子午光线 (经过纤轴的光线) 的传播轨迹是限制在子午平面 (包含光纤轴线的平面) 内的锯齿形折线 (如图 1.7 所示), 倾斜光线 (不经过纤轴的空间光线) 则是螺旋状折线 (如图 1.8 所示)。

对于渐变折射率分布光纤, 其子午光线也限制在子午平面内传播, 但光线轨迹是光滑曲线 (如图 1.9a 所示); 倾斜光线的轨迹则比较复杂: 一方面光线沿径向呈周期性变化, 另一方面又沿角向以周期性变化的角速度旋转 (如图 1.9b 所示), 不同折射率分布 $n(r)$ 对应于不同的光线轨迹。对于子午光线可由下式来描述

$$z = \int_{r_0}^r \frac{n(r_0) \cos \theta_z(r_0) dr}{\sqrt{n^2(r) - n^2(r_0) \cos^2 \theta_z(r_0)}} \quad (1.15)$$