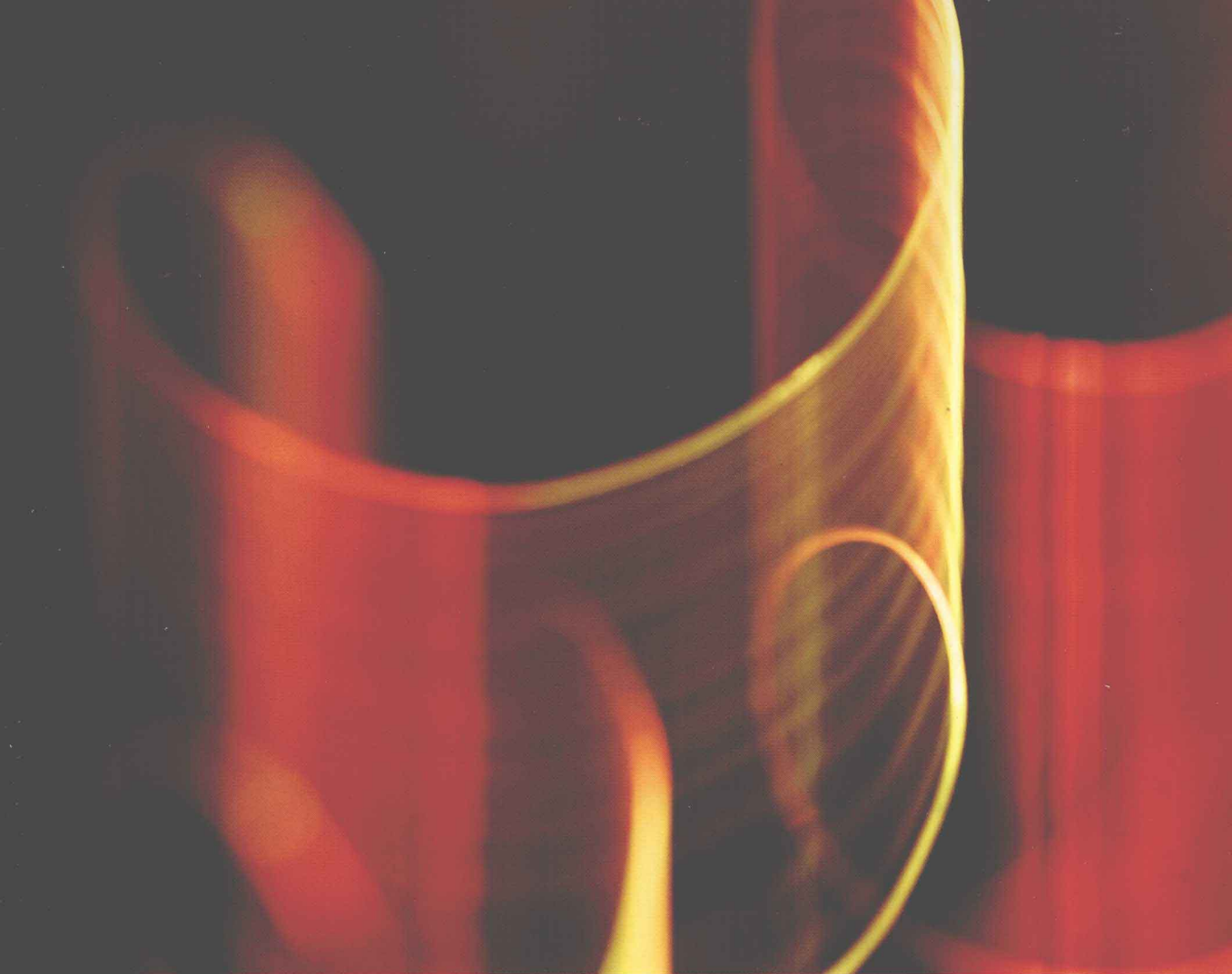




光波导 简明教程

秦政坤 马春生 著

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

光波导 简明教程

Guangbodao Jianming Jiaocheng

秦政坤 马春生 著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内 容 提 要

本书系统地总结了作者多年来的教学经验和研究成果,以几何光学和波动光学理论为基础,介绍了相对介电常数陡变的阶跃式平板波导、相对介电常数连续变化的渐变式平板波导、矩形和脊形等条形波导以及圆形波导的传输特性及其分析方法,并对经常用到的光波导模式耦合和波导损耗进行了详细讨论。

全书思路清晰,知识结构完整,对基本公式以外的所有公式均进行了详尽推演,尽量降低对前导课程的要求。本书适合物理学、电子信息、电子通信类专业的本科生、研究生作为光波导研究领域的入门教材,也可作为相关专业科研工作者和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光波导简明教程 / 秦政坤, 马春生著. —北京:
高等教育出版社, 2011. 3

ISBN 978 - 7 - 04 - 031596 - 7

I. ①光… II. ①秦…②马… III. ①光波导- 高等
学校-教材 IV. ①TN252

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 007479 号

策划编辑	李 慧	责任编辑	王丹丹	封面设计	张志奇	责任绘图	尹 莉
版式设计	王 莹	责任校对	陈旭颖	责任印制	毛斯璐		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 13.75
字 数 300 000

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2011 年 3 月第 1 版
印 次 2011 年 3 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 31596-00

前 言

随着人类社会的进步和信息科技的快速发展,以几何光学和波动光学为理论基础的光波导技术逐渐成为新技术领域中发展速度最快、发展潜力最大、竞争最激烈的高新技术之一。本书的编写意图有两个,一是详细地阐述有关光波导的基本概念、基本理论和基本物理现象,力求能够为相关专业的本科生和研究生提供一本合适的入门教材;二是尽量反映近年来国内外关于光波导的一些重要研究成果,力求能够为相关专业的科研人员提供一本合适的参考书。

在本书的编写过程中,作者主要参考了国内外著名的有关光波导方面的学术专著及大量在国内外核心刊物上发表的相关的学术论文,其中也包含了本书作者公开发表的百篇被 SCI 和 EI 检索的论文。

本书共有 10 章。

第 1 章绪论。主要让读者系统了解光波导的历史背景、发展历程、技术特点、具体应用以及最新进展。

第 2 章光波导的理论基础。介绍几何光学和波动光学的基本原理,特别对波动光学的电磁理论基础进行了详尽的描述。目的是根据高校课程安排的特点,尽量降低学生对先导课程的要求。

第 3 章平板波导的几何光学分析方法。运用几何光学的方法,对平板波导的模式传输特性进行了讨论。目的是让读者更加直观地理解波导的导波原理和与之相关的某些物理概念,为以后运用波动光学理论分析各种结构的光波导的模式特性打好基础。

第 4 章阶跃式平板波导的波动分析。运用波动光学原理,分别对三层平板波导的模式特性进行了详细分析。

第 5 章渐变式平板波导的分析方法。首先对抛物型、双曲型、指数型分布等几种相对介电常数连续变化的渐变式平板波导的模式特性给出了精确的分析结果,然后介绍了处理渐变式平板波导的几种重要的近似方法,即 WKB 法、微扰法和变分法。

第 6 章矩形波导的波动分析。运用波动光学原理,对矩形波导的模式特性进行详细分析。

第 7 章条形波导的分析方法。以矩形波导、脊形波导和梯形波导为例,介绍处理结构更加复杂的条形波导的近似方法,即有效折射率法、等效折射率法及微分法等。

第 8 章阶跃式圆形波导的波动分析。首先讨论了弱导条件下圆形波导中光频电磁场的标量近似及其分析方法,然后在一般条件下,运用波动光学原理对矩形波导的模式特性进行了详细分析。

第 9 章耦合模理论。首先导出了一般形式的耦合模方程,然后利用耦合模方程分析了双波导的定向耦合、双平板波导的定向耦合、双矩形波导的定向耦合、直波导与弯曲波导之间的耦合

以及弯曲波导之间的耦合等现象。

第10章波导的损耗。主要分析了光波导的吸收损耗和辐射损耗,运用微分法给出了三层平板波导、矩形波导介质吸收型波导的吸收损耗系数,并对平板波导端面耦合、矩形波导偏折和波导弯曲引起的模式的耦合效率和辐射损耗进行了细致讨论。

由于篇幅所限,本书所选取的内容皆为光波导的基础部分。虽然编写中力求表述清晰、结构完整,但由于作者水平所限,书中难免会有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2010年9月

目 录

第 1 章 绪论	1	5.3 对称双曲型分布的波动分析	70
1.1 通信技术的历史回顾	1	5.4 对称指数型分布的波动分析	72
1.2 光波导的发展	2	5.5 有包层对称抛物型分布的 微扰分析	77
1.3 光波导的特点和应用	3	5.6 对称双曲型分布的 WKB 近似分析	82
1.4 光波导的最新进展	5	5.7 对称四次多项式型分布的 变分分析	86
第 2 章 光波导的理论基础	7	第 6 章 矩形波导的波动分析	92
2.1 光的本质	7	6.1 马卡梯里近似	92
2.2 几何光学的基本原理	9	6.2 矩形波导的横向亥姆霍兹方程	93
2.3 光频电磁场的波动方程	11	6.3 矩形波导的 E_{mn}^y 模	94
2.4 光波的基本特性	16	6.4 E_{mn}^y 模光频电磁场的分量	102
2.5 光波的平均能流密度	21	6.5 矩形波导的 E_{mn}^x 模	106
第 3 章 平板波导的几何光学分析 方法	23	6.6 E_{mn}^x 模光频电磁场的分量	112
3.1 平板波导的传输模式	23	第 7 章 条形波导的分析方法	117
3.2 平板波导导模的特征方程	25	7.1 矩形波导的远截止近似法	117
3.3 有效波导芯宽度	28	7.2 矩形波导的有效折射率法	121
3.4 导模截止与单模传输	33	7.3 脊形波导的有效折射率法	125
3.5 远截止近似法	35	7.4 脊形波导的等效折射率法	128
3.6 近截止近似法	38	7.5 梯形波导的微扰法	131
第 4 章 阶跃式平板波导的波动分析	42	第 8 章 阶跃式圆形波导的波动分析	137
4.1 平板波导的横向亥姆霍兹方程	42	8.1 阶跃式圆形波导的标量近似	137
4.2 对称三层平板波导的 TE 模	43	8.2 圆形波导 TE 模的场分布函数和 特征方程	138
4.3 对称三层平板波导的 TM 模	50	8.3 圆形波导 TM 模的场分布函数和 特征方程	142
4.4 非对称三层平板波导的 TE 模	54	8.4 阶跃式圆形波导的矢量分析	144
4.5 非对称三层平板波导的 TM 模	59	8.5 圆形波导中场矢量的分量及其 特征方程	147
第 5 章 渐变式平板波导的分析方法	64		
5.1 渐变式平板波导的波动方程	64		
5.2 对称抛物型分布的波动分析	67		

8.6 圆形波导的导模截止和单模传输	151	10.1 损耗型波导的复有效折射率和 复传播常数	181
第9章 耦合模理论	156	10.2 三层平板波导的吸收损耗	182
9.1 耦合模方程	156	10.3 平板波导端面耦合产生的 辐射损耗	186
9.2 双圆形波导的定向耦合	159	10.4 矩形波导的吸收损耗	191
9.3 双平板波导的定向耦合	165	10.5 矩形波导偏折产生的 辐射损耗	195
9.4 双矩形波导的定向耦合	169	10.6 波导的弯曲损耗	200
9.5 直波导与弯曲波导间的耦合	171	参考文献	206
9.6 弯曲波导间的耦合	177		
第10章 波导的损耗	181		

第1章 绪论

20 世纪 70 年代光通信的成功,是通信发展史上一次革命性进步。光波导作为光通信的支撑技术,逐渐成为发展速度最快、发展潜力最大、竞争最激烈的高新技术,对现代社会产生了巨大而深远的影响。到目前为止,光波导还是主要应用于通信领域,所以说清光波导的来龙去脉,还需要从通信技术的发展开始讲起。

1.1 通信技术的历史回顾

通信技术的发展总和人类文明的进步息息相关,通信发展史也是人类文明进步的历史,我国是世界上最早建立起信息传递系统的国家之一。早在 3 000 多年前的商代,就有通信的记载。当时乘马传递称为驿,驿传是最早的有组织的通信方式。秦汉时期,已形成了一整套“驿传制度”,汉代传递的文书已分出等级,有专人、专马按规定的次序和时间传递,建立了登记制度。到了隋唐时期,驿传事业得到了空前发展和完善。唐代的官邮线路以长安为中心,向四方辐射,30 里设一驿,直达边疆。宋代把所有的信息传递机构称为“递”,出现了“急递铺”。驿站是官府的组织,只传递官文。到了明朝,开始出现专为民间传递信件通信机构——民信局。

另一种历史上著名的通信系统是西周时期的“烽燧制度”,它使通信技术成为了严密的军事防御体系的重要组成部分。在《周礼》上有这样一段记载:在各国边疆到腹地的通道上,每隔一段距离筑有一座烽火台。夜间预警,举火为号,称为“烽”。白天预警,以烟示急,称为“燧”。周朝规定:天子举烽燧,各地诸侯必须引兵救援,共同抗敌。

历史上虽然还陆续出现了信鸽、金鼓、旗语等信息传递方式,但是“驿传制度”和“烽燧制度”还是能够代表当时最完备、最先进的通信技术水平,在我国的边防、经济和文化的交流等方面起到了重要的作用。

由于支撑技术的先天不足,这些原始的通信方式无论结构如何巧妙、体系如何完备都因其固有的缺点而逐步退出了历史的舞台。自 1600 年英国人吉尔伯特(W. Gilbert)发现了电力、电吸引等现象,电磁研究逐渐成为人们关注的热点。1837 年,美国人莫尔斯(S. F. Morse)发明了电报,并于 1844 年在国会大厦联邦最高法院会议厅用“莫尔斯电码”发出了第一份电报。1875 年,苏格兰人亚历山大·贝尔(A. G. Bell)发明了世界上第一台电话机,并于 1878 年在相距 300 km 的波士顿和纽约之间成功地进行了首次长途电话实验。1864 年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)在前人电磁研究成果的基础上,建立了完整的电磁波理论,断定了电磁波的存在。1888 年,德国物理学家海因里希·赫兹(H. R. Hertz)用电波环进行了一系列实验,用实验进一步证明了麦克斯韦的电磁理论。19 世纪中叶以后,人们通过金属导线实现了有线通信,通过电磁

波实现了无线通信,信息传递脱离了常规的视听方式。电信号成为了新的载体,标志着人类开始进入电信时代。

电信是以射频电磁波作为信息载体的通信技术,电磁波的波长(频率)决定了所能承载的信息量,波长越短(频率越高),所承载的信息量越大。从这种意义上讲,电信技术的发展历程实际上就是所使用的电磁载波波长由长到短(频率由低到高),经历了从长波、中波、短波、超短波到微波的过程。

20世纪50年代后,随着微电子技术的发展,对电磁波的利用发展到微波阶段。工作于微波频段的卫星通信技术,更是将电信技术提高到了一个新的水平。到20世纪70年代,由于微波频段可用频带的有限性,微波通信方式已不能满足社会发展对通信容量的需求。令人意外的是,按照通信技术发展惯性,对毫米波和亚毫米波的研究,并未取得预想的结果。而是跨越了这一阶段,直接进入了光波的时代。这主要基于两个方面的原因:一方面是人们在开发利用毫米波和亚毫米波作为信息载体时,遇到了极大的困难。首先是毫米波和亚毫米波的产生在理论上和技术上都难以解决。其次是地球周围大气层中的水汽对毫米波和亚毫米波具有超强的吸收作用,使其难以作为有效的信息载体。另一方面是光波导理论与技术逐步成熟。与毫米波相比,光波的波长更短,频率更高。作为载波,光波潜在的通信容量是电信技术无法比拟的。人们的注意力聚集到了光波上,光波导也自然成为最活跃的研究领域之一。

1.2 光波导的发展

光束在介质中传播,由于光本身的衍射特性和介质的吸收及散射作用,导致光束的强度不断衰减。光波导(简称波导)就是能够引导光束高效传播的器件。研究波导的主要任务就是根据光波的基本特性,对光介质的形状和构造进行必要的设计,对光束能量进行横向限制。在尽可能减少损耗和噪音的前提下,引导光束沿波导的方向传播。波导一般由内部的波导芯和外部的包层组成,通常波导芯的相对介电常数比包层的相对介电常数大,使得光束能够集中在波导芯中传播,从而起到导波作用。如果波导芯和包层的相对介电常数是陡变的,则称为阶跃式波导。如果波导芯和包层的相对介电常数是连续的,则称为渐变式波导。平板波导、条形波导、圆形波导作为波导最基本的结构,是本书研究和分析的主要对象。

波导的发展史可以追溯到19世纪末期。1880年,亚历山大·贝尔利用自然光束作为载波,在大气空间中成功地完成了200 m左右距离的语音传送实验。但令人遗憾的是,直至20世纪初再没有明显的进展。究其原因主要有两点:一是缺乏可以高频调制的强相干光源;二是没有找到传输光波的理想介质。1960年,美籍科学家梅曼(T. H. Maiman)发明了激光器,从根本上解决了光源的问题。1966年,华裔英籍科学家高锟(C. K. Kao)和霍克亥姆(C. A. Hockham)发表了关于传输介质新概念的论文,指出了利用圆形光导纤维(简称光纤)进行信息传输的可能性和实现的技术途径,奠定了光波传输的理论基础。同年,高锟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。

20 世纪 70 年代到 90 年代,波导的发展是以光纤的应用研究为主线的,主要是提高光纤链路的传输速率和延长传输距离。1970 年,美国康宁玻璃公司利用玻璃材料成功研制了石英光纤,把光纤的传输损耗从 1 000 dB/km 降低至 20 dB/km,使光波通信技术进入应用阶段。1977 年,在芝加哥(Chicago)利用砷化铝镓半导体激光器作为光源,以硅材料的半导体 PIN 光电二极管和半导体雪崩光电二极管(APD: Avalanche Photodiode)为光电检测器,实现了短波长、低速率、多模光纤通信。其波长为 0.85 μm ,速率为 45 Mb/s,无中继传输距离为 10 km。20 世纪 80 年代早期,利用长波 InGaAsP/InP 半导体激光器作为光源,以 Ge 材料为光电检测器,实现了短波长向长波、多模光纤向单模光纤的转变。其工作波长为 1.31 μm ,速率为 140 Mb/s 以上,无中继传输距离为 50 ~ 100 km。1990 年,实现了 1.55 μm 色散位移单模光纤通信系统,速率达 2.5 ~ 10 Gb/s,无中继传输距离超过 100 km。

20 世纪 90 年代后,波导的研究不再局限于光纤的范畴,功能器件研究引起了人们广泛的兴趣。例如:利用波分复用(WDM)器件,可大幅增加信道容量和提高传输速度;利用光放大器件,可以延长中继距离;利用直接检测方式,可实现在 2.5 Gb/s 条件下传输 4 500 km 距离,在 5 Gb/s 条件下传输 1 500 km 距离;利用环形结构,可实现在 2.4 Gb/s 条件下传输 21 000 km 距离,在 5 Gb/s 条件下传输 14 300 km 距离。波导的发展,特别是 WDM 扩容技术的使用,实现了一根光纤中传输多个光信道。充分地利用了光纤带宽,实现了低成本扩容,使波导的应用迈上了一个新的台阶。

1.3 光波导的特点和应用

自 20 世纪 70 年代突破了光源和传输介质两个困扰光波传输的障碍以后,波导的研究和应用以异乎寻常的高速度发展。到 20 世纪 90 年代,光缆传输取代了电缆传输成为通信网的主干。这主要得益于社会发展对拓展通信容量、提高通信能力的迫切需求,也是波导本身的技术特点所决定的。与传统的通信方式相比,波导技术的突出优点主要表现在以下几个方面。

1. 传输带宽大。光通信的带宽主要取决于光源的调制特性、调制方式和波导的色散特性。目前,常用的石英单模光纤的工作波长在 0.80 ~ 1.65 μm 之间。在 1.31 μm 波长附近,具有零色散窗口。通过对波导的设计和改造,可以在 1.55 μm 波长附近也实现零色散。单根光纤的可用带宽几乎达到 200 THz,即使是在 1.55 μm 波长附近的低损耗窗口,其带宽也超过了 15 THz。如果再加上空分复用、频分复用、波分复用、外调制方式和减少光源谱线宽度等波导扩容技术,光通信传输带宽潜力巨大。

2. 传输损耗低。20 世纪 60 年代,开始圆形波导的研制工作,当时制作的光纤传输损耗超过了 1 000 dB/km。随着波导制作技术的发展,1970 年,第一根低损耗石英光纤已经把传输损耗降低到 20 dB/km。在低损耗光纤的研制过程中,人们认识到 0.80 μm 并非理想的低损耗工作波段。但由于受光源限制,1978 年投入使用的光波通信系统的工作波长仍为 0.80 μm 。随着半导体激光器技术和波导制作技术的突破,目前 1.31 μm 单模石英光纤的传输损耗已经降低到 0.5 dB/km,

1.55 μm 单模石英光纤的传输损耗降低到 0.2 dB/km。传输损耗的降低,延长了中继距离,加快了传输速度。

3. 抗干扰性好。波导是由电绝缘材料制成的,在强电磁场附近也不会产生感应电压和感应电流。即使是闪电、雷击和核爆炸产生的强大电磁干扰,也不会对其产生影响。光信号被限制在光纤芯中传播,不易逸出,光纤之间也基本没有串扰。

4. 原材料丰富。与传统的电导体相比较,波导具有原材料丰富、价格便宜的巨大优势。电导体的原材料主要是铜、铝、铅等金属材料,矿产有限,价格昂贵。而波导的原材料主要是二氧化硅,在地球上资源丰富,可以说取之不尽。从另一个角度讲,单就光纤而论,直径一般只有微米的量级,不到电缆的 1/5,重量最低可达到电缆的 1/20。相同容量的通信话路,光纤消耗的原材料更少。

1976 年,在亚特兰大(Atlanta)成功地完成了光通信实验,标志着光通信从基础研究发展到了应用阶段。从技术层面讲,光纤通信模式从多模发展到单模;工作波长从 0.80 μm 到 1.31 μm ,再到 1.55 μm ;传输速率从几十兆比特每秒发展到几十吉比特每秒。从应用角度看,光缆的建设从初期的市话局间中继、长途干线发展到市话网和用户接入网;电信业务从数字电话发展到有线数字电视(CATV),并进一步转向多媒体光通信,光纤成为信息宽带传输的主要介质。目前,波导的应用主要有以下四个方面。

1. 长途干线。长途干线特别是公用电信网之间干线传输,由于其距离远、信息交流量特别巨大,所以对传输介质的容量、速度、损耗、中继距离等性能的要求也非常高。光通信的大容量、低损耗等优点,使其特别适合于这一领域,这也是波导最早应用的领域。

2. 多媒体信息传输。声音、图片和视频等多媒体信息的传输,提高了对通信系统传输能力的要求。光通信的巨大带宽不仅能满足传统的数字电话和数据通信的需要,而且还可以满足可视电话、电话会议、远程服务和高质量音质传送等业务的需要。

3. 特殊环境的信息传输。与传统电缆相比,光通信优良的抗干扰性和低危险性使其在防强电、防雷击、防辐射、防爆炸、防火灾要求较高的领域大显身手。

4. 通信专线。光信号被限制在波导芯中传播,光信号泄漏非常微弱,很难窃听。而光纤的分接非常复杂,不仅要求有特殊的精密仪器,而且对环境条件要求也很苛刻,这使得在非正常条件下分接窃密近乎不可能。所以光通信的保密性极好,特别适合于军事、政治和经济等领域。另外,光纤的轻便特性也使其更适合应用到卫星、飞机等对载重负荷要求比较严格的高新技术领域。

值得单独一提的是海底光缆的应用。目前,全世界已铺设海底光缆 37 万多公里,最具有代表性的是通信能力最强、容量最大、连接欧美的海底光缆。该光通信系统横跨大西洋,穿越地中海,经红海、印度洋和马六甲海峡进入太平洋,全长近 32 万公里。得到全世界 30 个国际电信组织的支持,连接 170 多个国家和地区。能够实现 240 多万部电话同时通话,同时传输几十万幅图片,工程耗资为 140 亿美元。

我国波导的应用与欧美等发达国家相比,虽然起步比较晚,但差距并不是很大。特别是近年

来,中国的信息产业进入了快车道,光缆生产的年增长率高达30%左右。1999年,国内已有光缆厂170多家,年生产能力超过1300万芯公里,已铺设光缆总量达660万芯公里。2002年铺设光缆总量达1200多万芯公里。2005年已达到1600多万芯公里。现在,我国正积极筹建全新的骨干光传输网络,各大运营商纷纷登台。中国电信宣布在“八纵八横”的基础骨干网之外建设以三个10 Gb/s密集波分复用(DWDM)环状网为主体的全国高速大容量骨干网;中国联通也将建设五个10 Gb/s DWDM环状网为主体的国家级骨干网;中国移动正在筹划建设自身的国家干线网和省级干线网;中国铁通已全面启动两个全国10 Gb/s DWDM环状网的一期工程;中国网通也正在策划其骨干网的拓展与提速。

1.4 光波导的最新进展

波导技术的优势和巨大的市场需求,使波导的研究进展更加迅速。因为篇幅有限,在这里只就引起大家广泛关注的国内外最新报道简单作一介绍。

1. 保真技术。光信号保真技术的目标就是实现在光缆中的无失真传输。据报道,专门从事电子设备、信号处理和图像技术研究的法国波根实验室,利用光的孤波子和短脉冲成功地解决了色散和非线性效应问题,使光信号高保真的中继距离达到100 km。

2. 防窃技术。尽管光通信具有良好的保密特性,但面对日益猖獗的窃听行为,专家们还是防患于未然,提前加了保险。美国的信息专家研制出一种无规律载波信号光通信技术,将数字光信号编码调制到无规律变化的随机微波载体上发送,接收时利用专用技术实现与发送方的同步动态协调,完成解调任务。

3. 新的应用。虽然波导目前主要用于光通信领域,但澳大利亚的Bowling公司却利用一根光纤和一个激光器制成了波导秤。基本原理是利用特制的光纤在受到压力时,由于波导的形变引起传输光信号的变化来进行测量,其精确程度远远高于电子装置。

4. 新型材料。据文献报道,美国波士顿光纤公司(Boston, M. A)研制出一种新型塑料光纤。其传输速度比标准铜线快30多倍,比现有的石英玻璃光纤重量更轻、成本更低。在100 km的范围内,传输速率可达到3 Mb/s。

国内在波导领域也取得了诸多进展。无论是光纤、器件的研制,还是传输设备、传输系统的研究都取得了很大成果。

1. 光纤研制。研制出了色散位移单模光纤(G. 653)、非零色散位移单模光纤(G. 655)、大有效面积非零色散位移单模光纤、色散补偿光纤(DCF)、掺铒光纤、保偏光纤等。目前主要使用的还是G. 653光纤,新网络建设已开始采用G. 655光纤。另外,塑料光纤的研制也取得了突破性进展。

2. 器件的研制。在光电器件方面:激光器、光收发模块、光放大器、外调制器的集成器件和单纤收发集成器件等研制技术日渐成熟,特别是国产的掺铒光纤放大器(EDFA)和光收发模块已普遍应用。在光器件方面:常规的光连接器、光隔离器、光准直器、光衰减器、滤光器和光耦合

器已批量生产。另外,在功能器件研制上也有新的突破,如平面硅基波导器件、光纤器件、聚合物薄膜波导等。

3. 设备及系统的研制。在光传输设备和系统的研制方面:STM-1,STM-4,STM-16的TM、REG、ADM等产品成功地进入了国际市场,STM-64也顺利地完成了478.8 km的传输实验。在DWDM技术的研究方面:4×2.5 Gb/s,8×2.5 Gb/s,16×2.5 Gb/s系统的产品已投放市场,8×10 Gb/s系统已完成传输实验,32×2.5 Gb/s系统正在传输实验工程中,16×10 Gb/s系统正在研制中。另外,对光纤CDMA、光纤ATM交换系统、光孤子传输等的研究也已取得阶段性成果。

近年来,高新技术的成果逐步应用于光通信领域,各种新型波导器件不断研发成功。随着波分复用、光放大、色散补偿、光交换、光互连和光处理等波导核心技术日渐成熟,全光网络将从理想逐步成为现实。

第2章 光波导的理论基础

自远古以来,人类就对神秘的光现象充满了探索的欲望,留下了许多珍贵的光学文献。我国春秋战国时代的《墨经》中,就对光的直线传播原理和凸凹镜成像实验进行了总结和记录。南宋时的《梦溪笔谈》中记载了丰富的几何光学知识,对针孔成像、球面镜成像、月食、虹霓等现象都作了创造性的阐述。古希腊的数学家欧几里得在《光论》一书中,详细研究了平面镜成像问题,首次指出入射角等于反射角的反射定律。这些关于光学的历史记载,在世界科技史上具有崇高的地位。

2.1 光的本质

光学的早期研究,主要停留在用眼睛所能观察的光现象上。人们通过观察,逐步尝试设计仪器,利用光能。17世纪初,荷兰数学家斯涅耳(W. Snell)发现的精确的折射定律奠定了几何光学的基础,为研制光学系统提供了理论模拟的可能,对光学仪器的设计和改进产生了巨大的影响。随着几何光学的逐步成熟,人们对光学的研究也由光的现象逐步转向光的本质,光的本性问题和光的颜色问题成为当时研究的热点。1636年,法国著名数学家笛卡儿(R. Descartes)在著作《折光学》中提出了两种假说。一种假说认为,光是类似于微粒的一种物质;另一种假说认为光是一种以“以太”为介质的压力。

17世纪中期是波动光学快速发展的时期。1655年,意大利数学家格里马第(F. M. Grimaldi)在观测光束中小棍子的影子时,发现了光的衍射现象,首次提出了“光的衍射”概念,成为光波动学说最早的倡导者。1663年,英国科学家波义耳(R. Boyle)第一次记载了肥皂泡和玻璃球中的彩色条纹,提出了物体的颜色不是物体本身的性质,而是光照射在物体上产生的效果。不久,英国物理学家胡克(R. Hooke)重复了格里马第的实验,并通过对肥皂泡膜的颜色观察,提出了“光是以太的一种纵向波”的假说。

1672年,英国物理学家牛顿(S. I. Newton)在论文《关于光 and 色的新理论》中,认为光的复合和分解就像不同颜色的微粒混合在一起又被分开一样,用微粒说阐述了光的颜色理论。然而,由胡克和波义耳等组成的英国皇家学会评议委员会对牛顿的论文基本上持以否定的态度。1675年,牛顿在《说明在我的几篇论文中所谈到的光的性质的一个假说》一文中,反驳了胡克的波动说,重申了微粒说。由于牛顿和胡克都没有形成完整的理论,因此波动说和微粒说的论争并没有全面展开。

1676年,荷兰著名物理学家惠更斯(C. Huygens)仔细研究了牛顿的光学实验和格里马第的实验后,提出光波是一种靠物质载体来传播的纵向机械波,传播它的物质载体是“以太”,波面上

的各点本身就是引起介质振动的波源。惠更斯利用该理论证明了光的反射定律和折射定律,也比较好地解释了光的衍射、双折射现象和著名的“牛顿环”实验。1678年,他向巴黎科学院提交了光学论著《光论》,系统地阐述了光的波动理论。

1704年,牛顿修改和完善了光学著作《光学》,对波动说进行了反驳。一方面,提出了两点质疑:第一,光如果是一种波,它应该同声波一样可以绕射,而不会产生影子。第二,冰洲石的双折射现象说明光在不同的边上有不同的性质,波动说无法解释其原因。另一方面,牛顿把物质微粒观推广到了整个自然界,并与质点力学体系融为一体,为微粒说找到了坚强的后盾。18世纪,几乎无人向微粒说挑战,微粒说成为当时对光本质的权威解释。

19世纪初,英国著名物理学家托马斯·杨(Thomax. y)在论文《关于光和声的实验和问题》中把光和声进行比较后认为,光是在以太流中传播的弹性振动,并以纵波形式传播,同时指出光的不同颜色和声的不同频率是相似的。1801年,杨氏进行了著名的杨氏双缝干涉实验,实验所使用的白屏上的明暗相间的黑白条纹证明了光的干涉现象,首次提出了光的干涉的概念和光的干涉定律。

1808年,法国科学家拉普拉斯(P. S. Laplace)用微粒说分析了光的双折射现象,批驳了杨氏的波动说。1809年,法国物理学家马吕斯(E. L. Malus)在实验中发现了光的偏振现象,并在进一步研究光的简单折射时,发现了光的部分偏振现象。这一发现成为了反对波动说的有力证据,纵波是不可能发生这样的偏振的。1811年,英国物理学家布吕斯特(D. Brewster)在研究光的偏振现象时,发现了光的偏振现象的经验定律。光的偏振现象和偏振定律的发现,使当时的波动说陷入了困境,使光学研究向有利于微粒说的方向发展。

1817年,杨氏放弃了光是一种纵波的说法,提出了光是一种横波的假说,建立了新的波动说理论。1819年,土木工程师菲涅耳(A. J. Fresnel)在杨氏理论的基础上,成功地完成了由两个平面镜所产生的相干光源的干涉实验,再次证明了光的波动说。1882年,德国天文学家夫琅禾费(J. V. Fraunhofer)首次用光栅研究了光的衍射现象。至此,新的波动说牢固地建立起来了。

随着光的波动说的建立,人们开始为光波寻找载体,以太说又重新活跃起来,新的问题也随之产生。菲涅耳在研究以太时发现的问题是:横向波的介质应该是一种类固体,而以太如果是一种类固体,为什么不干扰天体的自由运转呢?不久,法国科学家泊松(S. D. Poisson)也发现了问题:如果以太是一种类固体,在光的横向振动中为什么没有纵向振动?为了解决这些疑问,1839年,法国数学家柯西(A. L. D. Cauchy)提出了第三种以太说,认为以太是一种消极的可压缩性的介质,试图解释泊松的问题。1845年,英国数学家斯托克斯(G. G. Stokes)以石蜡、沥青和胶质进行类比,试图说明有些物质既硬得可以传播横向振动又可以压缩和延展,因此不会影响天体运动。1887年,英国物理学家迈克尔逊(A. Michelson)与化学家莫雷(A. Morley)以著名的“以太漂流”实验否定了以太的存在。19世纪中后期,在光的波动说与微粒说的论战中,波动说取得了决定性胜利。但人们在为光波寻找载体时所遇到的困难,却预示了波动说所面临的危机。

1887年,德国物理学家赫兹发现光电效应,光的粒子性再一次被证明。20世纪初,德国科学家普朗克(M. Planck)和德裔科学家爱因斯坦(A. Einstein)提出了光的量子学说。1921年,爱因

斯坦因为“光的波粒二象性”这一成就而获得了诺贝尔物理学奖。1921年,美国科学家康普顿(A. H. Compton)在实验中证明了X射线的粒子性。在新的事实与理论面前,光的波动说与微粒说之争以光具有波粒二象性而落下了帷幕。

2.2 几何光学的基本原理

人们通过对光传播现象的长期观察,发现这种传播规律可以用几个很简单的几何关系来描述,所以形象地称之为几何光学。可以这样理解,几何光学是基于可见光而发展起来的,主要研究一些光现象,并不真正解释光的本质问题。在解释光学成像和具体设计光学系统的过程中,运用几何方法来研究将更加直观、方便。

一、光射线和波阵面

在几何光学中的光射线与几何学中的射线的数学概念有着本质的区别。从数学意义上讲,射线越细越精确,即光线的半径越小越好。而从物理角度上看,由于光具有衍射现象,通过圆孔约束获得任意窄的光束是不可能的。只有当圆孔的半径远远大于光的波长时,光的衍射现象弱化后,才能用光射线表示光的传播方向,而不用叠加定理来分析。几何光学也称射线光学,即把光看成是由光源发出的很细的光束,轴线就是光射线,光是沿着直线无限制地传播,用射线去代表光能量的传输路线。用几何学中的概念来描述光学现象,用点来描述物点、像点和焦点,用直线来描述光的传播路线,把物面、像面、主面等抽象为几何学中无限薄的面等。

光波在介质中沿光射线的方向传播的过程中,光波的相位是不断变化的,相位相同的点组成的波面称为波阵面。在各向同性的介质中,光射线的方向就是波阵面的法线方向。在研究光的传播方向问题时,可以把光射线和波阵面看作抽象的数学概念,波阵面就是垂直于光射线的几何面,从而回避了波动光学中相位的概念。这样,在大多数光传播问题中,借助于光射线、波阵面等概念和基本实验定律就可以完成光学仪器设计,而不必涉及光的本质问题。正是这些基本概念和实验定律构成了几何光学的基础。它是波动光学的极限情况,即光波长趋于零时的波动理论,可以把它统一到光场的电磁学理论中。

二、几何光学的实验定律

1. 光的直线传播。光在各向同性的均匀介质中沿直线传播。各向同性的均匀介质是指物理性质保持恒定且各个方向均相同的介质,如:真空、光学玻璃、静止稳定的空气等。光传播时的这条直线,可以用图形方式表达。光的传播方向用一个箭头表示,这条带箭头的直线就成一条光线。

2. 光的独立传播。光在传播过程中与其他光束相遇时,各光束都不改变其性质和传播方向,各自独立传播。

3. 光的反射和折射定律。如图 2-1 所示,当光到达两种介质的界面时,其传播方向将以两种方式改变。光被拒绝穿过界面而离开界面,称为反射;光穿过界面而离开界面,称为折射。托勒密(Ptolemy)在大约公元 130 年就几种介质的入射角和折射角进行了列表。1621 年,斯涅耳提出了入射角和折射角之间的数学关系,即反射角等于入射角,入射角与折射角的正弦值之比与折射率成反比,称为斯涅耳定律,也称光的反射和折射定律。其数学关系式为

$$\begin{cases} i' = i \\ n_1 \sin i = n_2 \sin r \end{cases} \quad (2-1)$$

式中,入射角 i 为入射光线与界面法线的夹角,反射角 i' 为反射光线与界面法线的夹角,折射角 r 为折射光线与界面法线的夹角。

4. 光路可逆性。对于光在两种介质分界面上的反射和折射,如果光逆着原来的反射光线或折射光线的方向到达界面时,就可以逆着原来的入射光线反射或折射,即如果光逆着原来的方向传播时,它将按照完全相同的路径反向行进,称为光路可逆定律。光的直线传播、光的反射和折射定律,均符合光路可逆定律。

三、费马(P. de Fermat)原理

1657 年,费马首次提出了光从空间的一点到另一点是沿着光程最短路径传播。经进一步完善后,费马原理可表述为:光从空间的一点到另一点的传播,实际的光程总是一个极值,即沿光程为最小值、最大值或恒定值的路径传播。其数学表达式为

$$\int_A^B n dl = \text{极值} \quad (2-2)$$

光程是指介质折射率和几何路程的乘积。可以这样理解,光程等于相同时间内光在真空中通过的路程。利用光程这一概念,将光在介质中所经过的路程折算成光在真空中的路程,便于光在不同介质中所经过路程的比较。

费马原理是几何光学最基本的规律之一。根据两点之间直线最短公理,由费马原理可以直接推导出光在均匀介质中的直线传播定律。可以证明,从费马原理同样可以直接推导出光经过两种不同介质的界面时所遵循的反射定律和折射定律。由于两个定律的推导过程类似,这里只推导反射定律。

如图 2-2 所示, A 、 B 为均匀介质中的任意两点, P 为界

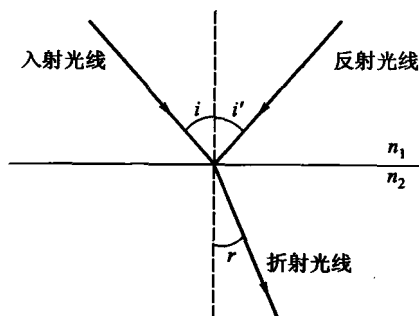


图 2-1 光的反射与折射现象

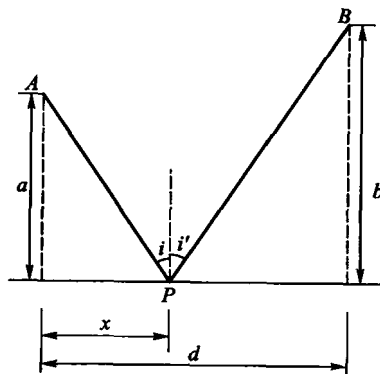


图 2-2 光的反射现象