



国防特色教材·光学工程

纤维光学与光纤应用技术

XIANWEI GUANGXUE YU GUANGXIAN YINGYONG JISHU

迟泽英 陈文建 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京航空航天大学出版社 哈尔滨工程大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

TN25
C812



国防特色教材·光学工程

纤维光学与光纤应用技术

迟泽英 陈文建 编著

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 哈尔滨工程大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书系统、全面地介绍了纤维光学(光纤光学)的基础理论与光纤应用技术。全书内容除绪论外,分为两篇共十章。第一篇共6章,主要包括纤维光学、光波导的基础理论以及光纤与无源光器件的基础知识。书中应用光线光学与波动光学两种方法系统地分析了阶跃多模、渐变多模与单模光纤的传输机理与规律,进行了基本的模式分析,阐述了光纤的传输特性以及光纤的材料、制造、分类与光缆,并讨论了几种主要类型的无源光器件;第二篇共4章内容,较全面地介绍了光纤在通信、传感、传像以及传光照明与能量信号传输等多方面的应用技术。

本书在内容上重视基础理论体系的建立,强调基本物理概念,并重视全面反映光纤应用技术的各主要方面,力求内容丰富翔实、新颖实用、符合相关标准;表述方法力求理论联系实际,深入浅出,图文并茂,具有良好的可读性及参考价值。

本书可作为高等学校非通信类的光学工程、电子科学与技术、仪器科学与技术等学科的研究生以及光电信息工程、光信息科学与技术、电子科学与技术、电子信息工程等专业高年级本科生的教材,具有较宽的学科专业适用面;也可供从事光纤应用技术、光通信技术与光电技术等方面的科技研发与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

纤维光学与光纤应用技术/迟泽英,陈文建编著. —北京:北京理工大学出版社,2009.4

国防特色教材. 光学工程

ISBN 978-7-5640-2048-4

I. 纤… II. ①迟…②陈… III. ①纤维光学-高等学校-教材②光学纤维-高等学校-教材 IV. TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 020187 号

纤维光学与光纤应用技术

迟泽英 陈文建 编著

责任编辑 刘志实

*

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081) 发行部电话:010-68944990 传真:010-68944450

<http://www.bitpress.com.cn>

北京地质印刷厂印刷 全国各地新华书店经销

*

开本:787毫米×960毫米 1/16 印张:26 字数:527千字

2009年4月第1版 2009年4月第1次印刷 印数:1~3000册

ISBN 978-7-5640-2048-4 定价:46.00元

前 言

纤维光学与光纤技术是 20 世纪 60 年代以来伴随着激光技术与微电子技术同步迅速发展起来的近代光信息高、新技术领域的重要分支。近 50 年来,光纤应用技术在光纤传像、光纤照明与能量传输、光纤信号控制、光纤传感特别是光纤通信等民用与军用的重要领域获得了广泛而大量的应用,尤其在信息科学技术领域表现出越来越强大的生命力以及广阔的应用前景,因而必将是 21 世纪最有生命力和最有发展前景的信息技术与产业之一。相应地,也必将形成对光纤应用技术、特别是光纤通信等信息技术方面高层次人才的大量需求。因而,将反映先进学科研究方向与高新技术重要方向的“纤维光学(光纤光学)与光纤应用技术”,作为部分相关学科与专业的研究生与高年级本科生的必修或选修课程,已成为人们的共识。为此,适时编写出版能较全面地反映纤维光学的基础理论与光纤应用技术基本内容的《纤维光学与光纤应用技术》教材,具有重要现实意义和极大的迫切性。

本教材所涉及的主要内容与知识点包括:纤维光学与光波导的基础理论,反映光纤传输机理的光线与波动分析理论基础;光在光纤中传输机理的光线理论分析,光在阶跃型圆柱光纤中的传输规律(子午光线与斜光线;光纤形状偏差影响),光在非均匀介质中的程函方程与光线微分方程,光在梯度折射率分布光纤中的传输与自聚焦透镜的成像特性;光在阶跃型圆柱光纤中传输的波动理论分析,阶跃光纤中的基本波导方程及方程严格解,阶跃光纤中模式的基本表征与分析,弱波导光纤与线偏振模,多模光纤与单模光纤;渐变折射率多模光纤的标量近似理论分析;光纤传输的损耗、色散、偏振与非线性特性;光纤的材料、制造与分类以及光缆的基本知识;光纤的连接耦合特性与各种新型的无源光器件(光隔离器、光纤光栅、光滤波器、波分复用器、光开关等);光纤的传光照明与能量信号传输应用;无源光纤传像器件、系统与应用,波分复用像质优化技术,光纤编码传像技术;光通信与光纤传感技术应用中的光源(LED, LD)与光探测器(PIN, ADP)的功能与特性,光调制技术与光纤通信系统的原理与类型(模拟通信与数字通信),光纤通信网络的类型与功能,无源光网络终端宽带接入技术,光纤通信的军事应用以及光纤制导原理,光纤通信发展的新技术(EDFA 原理,相干光通信,光孤子通信与光

交换技术等); 光纤传感器的原理与分类, 光纤传感器中五种光调制技术, 功能型与非功能型光纤传感器(光纤陀螺、水听器、分布式传感器等), 光纤传感新技术等。

本教材是在对有关光学工程、电子科学与技术、仪器科学与技术等学科研究生以及光电技术、光学仪器(光电信息工程)、测控技术与仪器、工业自动化仪表等专业高年级本科生进行长期教学实践与教学改革经验总结的基础上编著完成的; 也是对2006年11月南京理工大学校内出版的《纤维光学与光纤应用技术》教材, 经多次本、研教学实践后, 进一步修改、优化的成果; 教材编写中力求重视反映国内外在光纤技术与应用这一领域的产业与科学研究的当前水平与研究发展动态, 并适当反映了具有先进性和代表性的部分自身科研成果; 本教材的主要适用对象为广大需要应用光通信、光纤传感、光纤传像、光纤传光与能量信号控制等光纤应用技术的非通信类学科与专业(如光学工程、电子科学与技术、仪器科学与技术等学科, 以及光电信息工程、光信息科学与技术、测控技术与仪器、电子信息工程、电子科学与技术、电气工程及其自动化、探测制导与控制技术、信息对抗等本科专业)的研究生与高年级本科生。本教材以纤维光学、光波导的基本理论, 光线光学与波动光学两种研究方法以及光纤通信、光纤传感、光纤传像、光纤制导、光纤能量传输与信号控制等光纤应用的主要方面与相关器件为基本内容, 教材具有较宽的学科与专业适应面。为方便选择确定不同教学对象的教学内容侧重面, 目录中给出了不同的符号标识: 标*者为适合于本科高年级专业课或专业选修课内容; 标★者为适合于硕士研究生学位课或博、硕士生选修课内容。

本教材在编写过程中重点体现如下特色: 教材体系内容具有较好的系统性、科学性与完整性, 既重视基本的基础理论体系的建立(如运用波动光学方法建立基本波导方程与进行模式分析以及有代表性的理论建模), 突出基本理论教学内容的重点, 又应较全面、完整地反映光纤技术应用领域的各主要方面, 两者的篇幅比例应相对合理, 避免片面追求理论体系的严密与深奥而脱离实际应用, 或只重应用而忽视理论基础建立的两种片面性, 强调理论密切联系实际; 教材表述力求深入浅出, 并以较多的图、表配合文字的阐述, 尽量避免大篇幅单纯枯燥的文字叙述, 做到图文并茂、理性与感性相结合, 通俗易懂、具有良好的可读性; 教材内容力求翔实, 贴近实用, 所涉及的有关标准与数据尽可能反映当前或近期的标准与数据, 摒弃陈旧和已废弃的内容, 具有良好的可参考性; 有关光纤技术应用部分的内容, 应较全面地反映光纤技术在传光、传像、传感与通信等主要领域的基本内

容,但与光纤通信、光纤传感器等领域的专题教材或著作应有重要区别;另外,有关光纤应用技术的内容,除了全面反映光纤技术在有关民用领域应用的内容外,还特别重视反映光纤高新技术在军工各领域的应用,如无源光纤传像在侦察与观瞄装备中的应用,光纤制导、光纤陀螺、光纤通信的军事应用等。

最后应该说明的是,本教材的编写是在多方面地学习国内前辈与专家们已有的有关纤维光学与光纤应用技术的专著与教材以及部分国外相关专著的基础上进行的(详见参考书目),教材的编写过程也是作者广采众长、向各位前辈与同行最好的学习过程,从中所获得的教益匪浅。作者由衷地希望能为读者奉献一本具有参考价值的好书。

本教材由迟泽英主编,内容共分两篇10章。其中,第一篇的1~6章与第二篇的7、8两章由迟泽英执笔;第二篇的9、10两章由陈文建执笔。

在教材编写的过程中曾得到武汉邮电科学院毛谦教授,东南大学孙小菡教授、张明德教授,南京邮电大学张爽斌教授、杨祥林教授,北京理工大学连铜淑教授、孙雨南教授以及南京玻纤院张振远研究员等许多专家教授的宝贵指导与热情鼓励,也曾得到同行以及李武森、齐鑫等许多博士生、硕士生的积极关心与大力支持;连铜淑教授和孙小菡教授在百忙之中对本书进行了详细的审阅和指导。在此表示衷心感谢。由于作者的水平所限,本教材无论是在理解领悟、体系内容还是表述方法等方面,都会存在许多缺点、不足甚至错误,恳请有关专家、同行及读者给予批评指正,不吝赐教。

作 者
2009.1

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 纤维光学的基础理论与知识

第 1 章 光纤波导的电磁理论基础(* *)	7
1.1 麦克斯韦方程组与物质方程组(* *)	7
1.2 波动方程(* *)	10
1.3 亥姆霍兹方程(正弦稳态波动方程)(* *)	12
1.4 各向同性、均匀介质圆柱光波导(阶跃光纤)中光波的传播(* *)	14
习题与概念思考题 1	18
第 2 章 光纤传输机理的光线理论分析(* *)	19
2.1 光在阶跃型圆柱光纤中的传播规律(*)	19
2.2 光线理论的基本方程(* *)	28
2.3 光在渐变折射率光纤中的传播规律(* *)	36
2.4 自聚焦光纤、透镜及其成像特性(* *)	40
习题与概念思考题 2	49
第 3 章 阶跃与渐变折射率光纤的波动理论分析(*)	51
3.1 阶跃折射率光纤的波动理论分析与模式概念(*)	51
3.2 渐变折射率光纤的标量近似理论分析(*)	90
习题与概念思考题 3	95
第 4 章 光纤的特性(*)	97
4.1 光纤的传输特性(* *)	97
4.2 光纤的物理化学特性(*)	129
习题与概念思考题 4	131
第 5 章 光纤的材料与制造/光纤的分类/光缆	132
5.1 光纤的材料与制造(*)	132

5.2 光纤的分类(* *)	145
5.3 光缆(*)	161
习题与概念思考题 5	170
第 6 章 无源光器件(* *)	171
6.1 光纤连接器(*)	171
6.2 光纤耦合器(* *)	179
6.3 光隔离器、光环行器、光衰减器	187
6.4 光纤光栅(*)	192
6.5 光滤波器(*)	197
6.6 光波分复用器(*)	203
6.7 光开关器件(*)	212
习题与概念思考题 6	216
第二篇 光纤技术应用	
第 7 章 光纤传光照明与能量信号传输(*)	219
7.1 玻璃光纤在照明、能量与信号传输方面的应用	219
7.2 石英光纤在照明、能量传输等方面的应用	223
7.3 液芯光纤及其应用	224
7.4 塑料光纤在照明、装饰中的应用	224
7.5 日光采集、光纤传输照明系统	229
习题与概念思考题 7	230
第 8 章 光纤传像器件、系统与应用(* *)	231
8.1 无源光纤传像器件与光纤传像系统(* *)	231
8.2 光纤传像系统的像质优化技术(*)	259
8.3 光纤编码传像(*)	265
习题与概念思考题 8	267
第 9 章 光纤通信技术(* *)	269
9.1 概述(*)	269
9.2 光源与光发送机(* *)	273
9.3 光检测器与光接收机(* *)	297

9.4	光中继器	317
9.5	光纤通信系统(* *)	318
9.6	光纤通信网络(*)	334
9.7	相干光通信(*)	346
9.8	光孤子通信(*)	349
9.9	光纤通信技术在军事中的应用(* *)	350
	习题与概念思考题 9	358
第 10 章	光纤传感技术(* *)	361
10.1	光纤传感技术概述(* *)	361
10.2	光强调制型光纤传感器(* *)	365
10.3	光相位调制型光纤传感器(* *)	375
10.4	光偏振调制型光纤传感器(* *)	383
10.5	光波长调制型光纤传感器(*)	388
10.6	光频率调制型光纤传感器(*)	394
10.7	分布式光纤传感器(*)	398
	习题与概念思考题 10	403
	参考文献	404

绪 论

纤维光学与光纤技术是 20 世纪 50 年代以后,伴随着激光技术、微电子技术同步迅速崛起的近代光学与光电高、新技术领域的重要分支。近 50 年来光纤应用技术在光纤传感、光纤传像、传光照明、能量传输与信号控制、特别是在光纤通信等民用与军工的广泛领域获得了重要而大量的应用,尤其在信息技术领域正表现出越来越强大的生命力以及广阔的应用前景,因而也必然是 21 世纪最有发展前景的技术与产业。相应地,作为研究光信息(光信号、光线或图像)在光学纤维这种透明圆柱介质光波导中传输机理、特性、规律、制作工艺、器件与应用的“纤维光学”(或称“光纤光学”),则是近 50 年来迅速发展并日臻完善并成熟起来的近代光学领域的一门崭新的分支学科。

从更高层面认识,光纤技术是属于光波导技术的一个方面,而通常所指的光波导技术,则应包括以圆柱介质光波导为特征的光纤技术和以平板或带状介质光波导为特征的集成光路技术;与其相对应,从学科角度可以认为,与光波导技术相对应的是导波光学,它应包括:对应于光纤技术的纤维光学(光纤光学)和对应于集成光路技术的集成光学(参见图 1)。

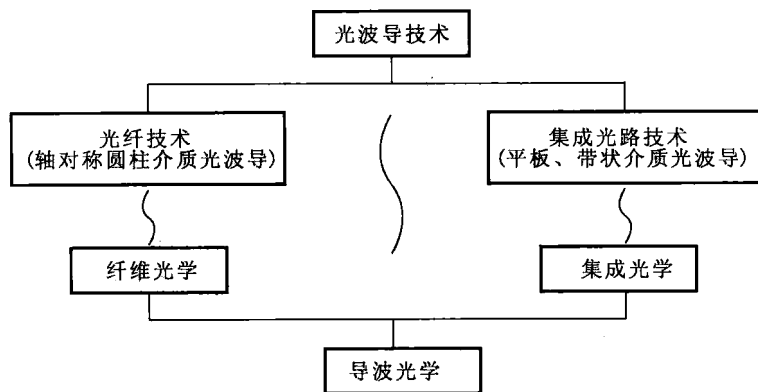


图 1 光波导技术与导波光学的对应关系

本书研究的主要内容包括:光在圆柱介质光波导——光纤中的传输机理、特性与规律(即纤维光学)以及光纤与相关器件的应用技术。

一、纤维光学与光纤应用技术发展的简要回顾

纤维光学早期实验室研究的缓慢发展阶段,是从 1854 年英国丁达尔(J. Tyndall)研究证实光线可沿盛水的弯曲通道经全反射向前传播开始的,持续了将近 100 年;纤维光学与光纤技

术的主要发展阶段是近 60 年,期间大体经历了如下的三个发展阶段:

(1) 起步与上升阶段(1950—1970 年)。从 1951—1954 年,荷兰的范希尔(A. C. S. Van Heel)、英国的霍普金斯(H. H. Hopkins)与美国的卡帕尼(N. S. Kapany)同时分别开展了实用光纤与光纤束结构与制作的研究;1955 年希斯乔威兹解决了光纤包层的光绝缘问题;1956 年卡帕尼提出了“纤维光学”新学科的命名;1958 年卡帕尼提出了拉制复合光纤的新工艺;1960 年美国首先研制出光纤传像束,尔后即兴起了光纤医用窥镜传输图像以及传光的应用;1960 年由 Theodore Maiman 研制的第一台激光器问世,解决了光通信的光源问题;1966 年华裔科学家高锟首先提出了以光纤传输线取代传统电缆线,用光波导传输光信息的概念,从而奠定了光纤通信的理论基础;1970 年美国康宁公司首先拉制出损耗低至 20 dB/km 的通信用石英光纤,为光纤通信的实用化奠定了技术基础。概括这一阶段的基本标志是:

- 工艺上制成完善可以实用的光纤;
- 各种光纤传像器件(柔性的光纤传像束与刚性的光纤面板等)与传光器件的制作工艺水平与应用首先成熟;
- 光纤在通信中的大规模应用正孕育着突破,光纤通信的理论与工程基础已经初步解决;
- 纤维光学的初步理论体系已经建立,纤维光学的新学科已经基本形成。

(2) 全面兴起与发展阶段(1970—1990 年)。这一阶段的主要进展与标志是:

• 长距离通信光纤的需求促进了多种光纤类型研制的完善与光纤制造工艺的成熟,各种类型光纤相继问世,从阶跃多模光纤到渐变折射率多模光纤,进而发展到阶跃单模光纤。构成长距离光纤通信工程基础的光纤类型与各种无源光器件已形成基本体系,解决了光纤的最佳选择(单模光纤),光纤产业化的基础已经建立;

• 低损耗、低色散单模光纤的研究进展,促进了光纤主要应用领域——光纤通信的蓬勃发展,光纤通信先后经历了三代通信系统的发展。从短波长(0.85 μm)、多模光纤通信系统(第一代),到长波长(1.31 μm)、多模和单模光纤通信系统(第二代),再到长波长(1.31 μm)单模光纤实用化通信系统的大规模应用(第三代),其传输信号为准同步数字体系(PDH)的各次群信号,传输距离为 50 km 左右。

• 光纤传感技术获得迅速发展,70 余种功能型与非功能型光纤传感器相继问世,研究异常活跃;

• 梯度折射率光纤的研究进展,促进了梯度折射率光学与微型光学的发展;此外,塑料光纤、红外光纤等多种特种光纤获得迅速发展。

(3) 以现代光纤通信作为最重要应用方向的飞速发展阶段(1990 年至今)。

• 随着现代信息社会与信息技术对光纤传输距离与通信容量进一步提高的迫切需求,从进一步降低色散、实现低损耗、并抑制四波混频等非线性效应以及适应 WDM 与 EDFA 等应用的要求,单模光纤从常规的单模光纤(G. 652 光纤)发展演变出多种新型的单模通信光纤品种,如:G652A、G652B、G652C(全波光纤)、G652D 等光纤,色散位移光纤(G. 653)、截止波长

位移光纤(G. 654)、非零色散位移光纤(G. 655A, G. 655B, G. 655C)以及 G. 656. G657 光纤等,从而形成了适应不同用途需要的单模通信光纤品种的配套体系;

- 波分复用(WDM、DWDM)、掺铒光纤放大器(EDFA)等新器件、新技术及光互连、光逻辑门、光子开关、变频、路由器等多种新型光无源与光有源器件等相继问世并实用化,奠定了新一代光纤通信系统的技术基础;

- 光纤通信系统从 20 世纪 90 年代初开始进入第四代光纤通信系统,即传输体制以同步数字体系(SDH)取代准同步数字体系(PDH),从而使光纤通信网跨入第二代网络——同步光网络(又称光电混合网络),同时传输波长从 $1.31\ \mu\text{m}$ 转向 $1.55\ \mu\text{m}$,开始采用 WDM 与 EDFA 技术,传输速率达 $2.5\ \text{Gb/s}$,中继距离达 $80\ \text{km}$;经历了近 20 年的发展历程,到 20 世纪末光纤通信系统的发展进入第五代光纤通信系统阶段,波分复用(WDM、DWDM)技术已进入全面实用化,光纤传输容量获得大的突破,以光孤子作为信息载体的光孤子传输系统以及相干光通信系统、全光通信系统等先进的光纤通信方式与系统正逐步进入实用取代常规通信方式,基于多波长传输与波长交换技术的全光网络成为网络升级的优选方案,集成各种新兴技术与新兴光器件的“掺铒光纤放大器(EDFA)+波分复用(WDM)+非零色散光纤(NZDSF)+光电集成电路(OEIC)”模式,正在成为光纤通信系统的代表性方向。

二、光纤的主要优点

光纤作为一种介质光波导、光信号的传输线,它相对于金属传输线具有如下的主要优点:

- (1) 具有极宽的传输带宽,可使通信容量获得极大提高,比同轴电缆大 5 个量级,可提供宽频带的综合数字化服务;

- (2) 具有极低的损耗,良好的透明性,可实现无中继的长距离传输,损耗最低可控制到 $0.1\sim 0.2\ \text{dB/km}$;

- (3) 光纤是绝缘介质,传输光信号抗电磁干扰性好,且同一光缆中的多根光纤之间的相互干扰小。因此,信号传输的保密性好,且受干扰小,传输质量易于保证;

- (4) 尺寸、体积小,质量轻,柔韧性好,适宜铺设、弯曲。光缆同比相应电缆具有极大优越性;

- (5) 光纤的原材料 SiO_2 蕴藏丰富,可节约大量有色金属(铜)材料。

正是由于光纤具有上述诸多的突出优点,因而它获得了广泛而大量的应用。

三、光纤的主要应用领域

光纤的优良特性,使之在光纤通信、传感、传像、传光照明与能量信号传输等多方面的领域被广泛而大量应用,并已成为当今世界的新兴支柱产业,需求非常旺盛(例如,今后承担电信业务的大多数电缆将被光缆取代)。另外,对光纤技术应用的需求,不仅在民用方面,而且在军用方面也有巨大的应用潜力。

光纤与光纤技术的主要应用领域包括:

(1) 进行一维(时间)的信息传输。包括远程光纤通信(含洲际海底光缆通信、陆地的国际与国内长途通信)、区域网与城域网通信、互联网的数据传输、本地接入网传输等;此外,在军用上包括舰载、机载、车载及陆军的战术、战略光纤通信系统,以及光纤制导中的双向信息传输。

(2) 光纤传感技术——应用于各种用途的功能型与非功能型光纤传感器。

(3) 进行二维图像的传输、增强与变换:

- 二维图像传输:如光纤传像束(柔性器件)、光纤面板(刚性器件);
- 二维图像增强:微通道板像增强器;
- 二维图像变换:扭像器、图像分割器等。

(4) 传光照明与能量信号传输:

- 传光照明、装饰与光纤工艺制品;
- 能量传输以及信号传输与控制。

正是由于光纤以及光纤技术所独具的优越性能以及广泛而重要的应用领域与前景,因而以光纤通信为最重要代表的光纤技术及产业已成为当今世界范围内信息技术领域最重要的支柱产业之一。光纤类产业的产值正以每十年 50% 的增长率快速发展,而价格则呈数量级下降,从而产生了巨大的社会与经济效益,并具有非常广阔的应用前景。

近 30 年来,在世界范围信息技术大发展的背景下,我国以光纤通信为主体的光纤与光纤技术产业,取得了长足的发展和令人瞩目的成就。例如,我国在“八五”计划期间即已建成包含 22 条光缆干线、总长度为 3.3 万千米的“八纵八横”大容量光纤通信干线传输网;“九五”期间我国开始大规模地建设 SDH 网络,并开通了 1 550 nm 的通信窗口;2000 年我国敷设光缆总长度约 720 万千米;2003 年年末,我国实际光纤产量已达 350 万千米;我国生产的光纤以及预制棒的水平已达到或接近国际先进水平。可以预期,在我国向现代化、信息化快速前进的背景下,光纤通信技术与产业以及更广泛的光纤技术与产业,必将迎来一个更加辉煌发展的明天,并跻身于世界信息技术发展强国之列。

本书运用光线光学与波动光学,系统地分析轴对称圆柱介质光波导——光纤(阶跃多模、渐变多模、单模光纤)的传输机理、特性与规律(包括进行基本的模式分析),并在较详细地介绍光纤、光缆与无源光器件等基本知识的基础上,全面地介绍光纤在通信、传感、传像、传光照明与能量信号传输等方面的应用,从而使读者获得较系统、全面的纤维光学与光纤应用技术的完整概念。

第一篇

纤维光学的基础理论与知识

本篇的主要内容包括:纤维光学即轴对称圆柱介质光波导的基础理论,运用光线光学和波动光学两种方法,研究分析光在圆柱阶跃光纤与渐变折射率光纤中的传输机理与规律,求解波导方程,进行模式的基本分析;研究光纤传输的几种重要特性;介绍光纤的材料、制造、分类与光缆;研究光纤的连接、耦合特性以及几种重要的无源光器件。上述内容为全面研究光纤应用技术奠定必要的理论基础。

馬曉平對照圖基函學光整形

基函學光整形對照圖基函學光整形：該書內容豐富，圖文並茂，是學習基函學光整形的好幫手。本書共分五章，第一章介紹基函學光整形的概況，第二章介紹基函學光整形的符號，第三章介紹基函學光整形的性質，第四章介紹基函學光整形的運算，第五章介紹基函學光整形的應用。本書適合大專院校、自學成才者及從事基函學光整形工作的專業人士閱讀。

第 1 章 光纤波导的电磁理论基础

电磁波的传播规律取决于所依赖的具体环境,例如,是在自由空间中还是在介质中。其中,介质的种类又包括:金属导体、电介质非导体(根据其磁性特征又可分为磁性物质与非磁性物质)及电离气体。

光纤是一种介质光波导,因此,光波在其中的传播规律与特性应服从于介质中的电磁场理论。本章目的即建立光纤介质波导中光线光学与波动光学两种分析方法共同的电磁理论基础。

1.1 麦克斯韦方程组与物质方程组

光波是一种电磁波,光波的波动性质被包含在描述变化电磁场的麦克斯韦方程组以及表征物质电磁性质的物质方程组中。两者将电场强度 \mathbf{E} 和磁感应强度 \mathbf{B} 之间的空间与时间变化联系起来。

1.1.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组有其积分形式和微分形式,通常采用如下微分形式的麦克斯韦方程组求解介质中任一给定点电磁场矢量与时间变化的对应关系。

对非各向同性、非均匀、非线性介质的一般条件下,微分形式麦克斯韦方程组的表述形式为:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-4)$$

上述一级线性耦合微分方程组中的(1-1)式、(1-2)式为基本方程,分别表示变化的磁场产生电场,以及由传导电流(\mathbf{J})和位移电流(\mathbf{D})形成的总电流所产生的磁场;对上两式取散度并利用电荷不灭定律,即 $\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$,则可以得到(1-3)式与(1-4)式。因而后两式并非独立方程。

通常称(1-1)式~(1-4)式为麦克斯韦方程组。式中, \mathbf{D} 为电通量密度矢量, \mathbf{J} 为电流密

度矢量, \mathbf{B} 为磁感应强度(或磁通量密度)矢量, ρ 表示介质中给定点的自由电荷密度。

应该指出,利用上述方程组还不能求解出介质中给定点确定的 \mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} ,这是因为尚不知道 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 与 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 之间的具体关系,其具体关系是随所在的物质而异的。为此,必须研究并确定物质方程组。

1.1.2 物质方程组

电磁场的存在与变化总是依赖于介质的,介质的具体情况决定了各有关矢量之间的关系。我们称反映矢量 \mathbf{E} 、 \mathbf{B} (电磁场的两个基本物理量)与 \mathbf{D} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{J} (引进的辅助场量)之间关系的关联方程为“物质方程组”。物质方程组的具体函数形式取决于如下所述各种介质的具体类型。为区分不同类型介质,需首先给出如下的各相关定义:

(1) 各向同性与各向异性: 对介质中的任意给定点,若其各方向的物理性质均相同,则为各向同性;否则,为各向异性,表征其特性的系数以张量形式表示。一般地,晶体为各向异性。

(2) 均匀与非均匀: 一种介质若其物理特性不随空间位置而逐点变化,则为均匀;否则,为非均匀,其特性系数可表为位置矢量 \mathbf{r} 的函数形式。

(3) 线性与非线性: 若 $\mathbf{D}(\mathbf{J})$ 、 \mathbf{H} 只与 \mathbf{E} 、 \mathbf{B} 的一次项有关,即 ϵ 、 σ 、 μ 均是与 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 无关的常数,则为线性;以 $\mathbf{D} \sim \mathbf{E}$ 函数关系为例,若 \mathbf{D} 不仅与 \mathbf{E} 的一次项有关,且与 \mathbf{E} 的高次项有关,即可表为如下形式

$$D_i = \underbrace{\sum_j \epsilon_{ij} E_j}_{\text{一次项}} + \underbrace{\sum_{j,k} \epsilon_{ijk} E_j E_k + \sum_{j,k,l} \epsilon_{ijkl} E_j E_k E_l + \dots}_{\text{非线性项}} \quad (1-5)$$

则为非线性关系。一些介质在强场作用下呈现非线性特性,这种介质即称为非线性介质。

(4) 透明: 即指 $\sigma=0$,因而 $\mathbf{J}=0$,无吸收损耗。透明介质是指光进入其中而其强度不发生可察觉减弱的物质(如空气、玻璃),它们在电学上必为非导体。

(5) 无源: 即自由电荷密度 $\rho=0$ 。

根据上述定义,可给出如下三种主要类型介质的物质方程组形式。

(1) 物质为各向异性、非均匀、线性,则其物质方程组可表为:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1-6)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \boldsymbol{\mu}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (1-7)$$

式中, $\boldsymbol{\epsilon}$ 、 $\boldsymbol{\mu}$ 分别表示介质的张量介电系数和张量磁导率,并以矩阵形式表示(以 $\boldsymbol{\epsilon}$ 为例):

$$\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

式中, $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}(\mathbf{r})$, \mathbf{r} 为介质中不同空间点的位置矢量。因而(1-6)式可表为: