

光学工程

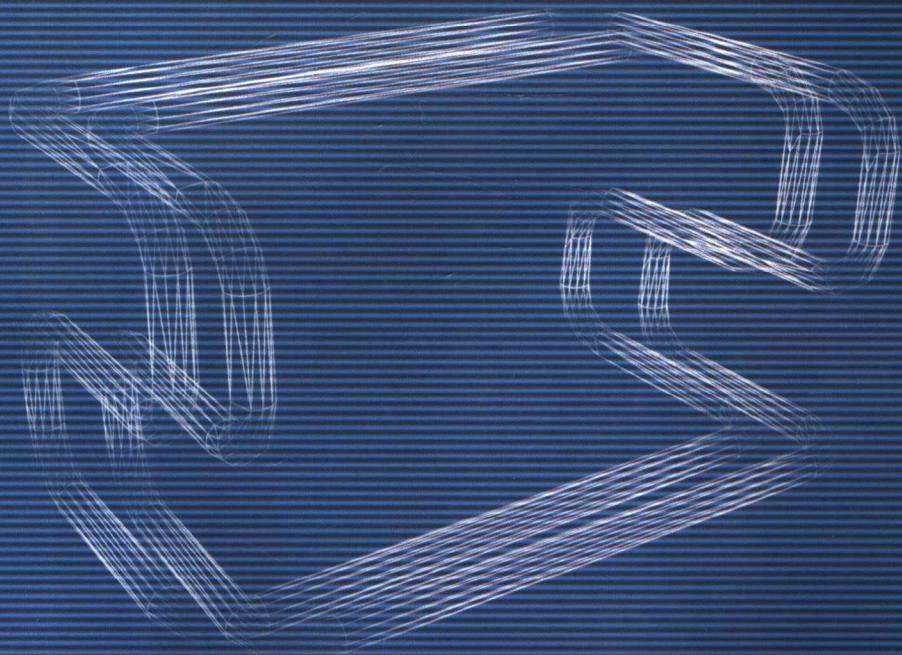


国防科工委「十五」规划教材

光纤技术

——理论基础与应用

●孙雨南 王茜蓓 伍 剑 杨爱英 编著



北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·光学工程

光纤技术——理论基础与应用

孙雨南 王茜蓓 编著
伍 剑 杨爱英

北京理工大学出版社

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

内容简介

本书是根据国防科工委“十五”重点教材建设计划立项,并在原有教材《介质光波导及其应用》与《光纤技术基础》的基础上增补编写而成的。书稿中凝聚了作者,特别是工作在教学、科研第一线的年轻的博士们多年的教学与科研成果。

全书共七章。第一章是本书内容所涉及的有关射线光学、波动光学与电磁场理论的基础知识的概括。第二和第三章是光波导和光纤的基础知识,侧重于介绍研究光波导的基本方法与思路,从物理概念上去理解光波导中的模式、色散、损耗、偏振、非线性等传输特性。第四章介绍了光波导模式耦合理论,并以光波导器件为例介绍了耦合模理论的应用。第五章介绍了常见光纤光波导器件的原理与特性。第六章介绍了光纤通信系统与光网络技术。第七章按光纤传感的工作原理分类介绍了各种光纤传感器的原理,通过几个典型实例讨论了光纤传感系统的特性。

本书可作为高等院校光电专业高年级本科生技术基础和专业课教材,以及研究生相关课程教材,也可供通信类及相关专业的研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤技术:理论基础与应用/孙雨南等编著. —北京:
北京理工大学出版社,2006.7

国防科工委“十五”规划教材. 光学工程

ISBN 7-5640-0672-2

I. 光… II. 孙… III. 光学纤维-高等学校-教材 IV. TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 038734 号

光纤技术——理论基础与应用

孙雨南 王茜蓓 伍 剑 杨爱英 编著

责任编辑 唐 爽

责任校对 郑兴玉

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)

电话:010-68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

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

E-mail:chiefeditor@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本:787×960 1/16

印张:27.5 字数:552 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

印数:3500 册.

ISBN 7-5640-0672-2 定价:38.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光褊
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当

今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、中北大学、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化新的的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

当今的信息时代是以两大技术的出现与发展为基础,同时也以这两大技术为支撑的。其一是包括超大规模集成电路(ULSIC)在内的计算机技术,它使信息处理能力成百万倍地提高;其二是包括半导体和光电子器件在内的通信和网络技术,它使信息传输能力成千上万倍地提高。1966年高锟博士首次提出利用介质光导纤维以光载波传输信息,奠定了光纤通信的理论基础;1970年美国康宁公司首次拉制出损耗为20 dB/km的光纤,展现出光纤通信技术发展的美好前景;1990年后推出的以电时分复用为基础的单信道光波通信系统,将传输速率每五年提高9倍;20世纪90年代中期,由于掺铒光纤放大器(EDFA)的实用化推动了波分复用(WDM)技术的实用化,实现了Tbit/s(每秒1万亿比特)量级的传输速率;近年来光交叉连接(OXC)、光分插复用(OADM)、光突发交换(OBS)、光分组交换(OPS)、无源光网络(PON)等技术应运而生,并得到迅速发展。进入新世纪以来,光通信行业挤掉了“泡沫”步入了健康高速发展阶段,但全光通信网是当前与未来发展的主要方向之一已经成为业内共识,与光信号处理及智能光交换相关的技术仍然保持着蓬勃的发展态势,光电子集成、光纤传感器及传感系统等多种技术也都得到了迅速发展,并在许多领域中得到了广泛的应用。

光波在光纤和光波导中传输,由于受到边界条件的束缚,其传输特性与通常光学问题中在自由空间和无限介质中传输时大不相同。在研究方法和特性上与无线电波或微波在电缆或波导管中的传输相似,但由于频率甚高(光波波段),其特性与无线电波和微波又不尽相同,很多方面又与光学特性相似。因此,已经形成了光-电子相互交叉的学科新方向,有人称之为导波光学。

为了适应这一交叉学科方向的发展,跟上光通信与光纤传感技术的迅速发展,我们于1989年和1996年先后编写了《介质光波导及其应用》与《光纤技术基础》两本面向非通信专业学生的教材。近十年来,越来越多的学校开设了与光纤通信、光纤传感技术相关的课程,越来越多的非通信专业和非电子专业的人渴望了解光纤技术方面的基本知识,反映出社会对该领域人才的需求。另一方面,近十年来光通信与光传感技术发展迅猛。从这两方面来讲,都需要对原有教材的内



容与编排进行调整与补充。在保留原教材精华与风格的同时,我们在内容上作了较大改动与补充,重新编写了这本教材。

全书共七章。第一章是本书内容所涉及的有关射线光学、波动光学与电磁场理论的基础知识的概括。对于熟悉此部分内容的读者,本章可作为后续章节所需基础知识的复习或“附录”;对不熟悉这部分内容的读者,则可作为先修或“补充”内容。第二和第三章是光波导和光纤的基础知识,侧重于介绍研究光波导的基本方法与思路,从物理概念上去理解光波导中的模式、色散、损耗、偏振、非线性等传输特性。第四章介绍了光波导模式耦合理论,并以光波导定向耦合器、光栅耦合器、棱镜耦合器为例介绍耦合模理论的应用。第五章介绍了常见光纤光波导器件,重点介绍了近年来出现的掺铒光纤放大器(EDFA)、拉曼光纤放大器、阵列波导光栅(AWG)、光纤光栅、声光可调谐滤波器(AOTF)等新型器件的原理与特性。第六章介绍了光纤通信系统及光网络技术。第七章按光纤传感的工作原理分类介绍了各种光纤传感器的原理,通过几个典型实例讨论了光纤传感系统的特性。本书涉及内容较多,而目前单一课程的学时数有限,建议根据各学校的情况分成2~3门课讲述,例如导波光学/光纤光学、光纤通信、光纤传感等。

本书第一章、第二章、第三章前7节和第四章由孙雨南执笔,第五章和第六章前5节由伍剑博士执笔,第七章由王茜蓓博士执笔,第三章的第3.8、3.9、3.10节和第六章的第6.6、6.7节由杨爱英博士执笔,全书由孙雨南统稿并作了部分调整。书稿中凝聚了他们多年教学与科研的成果。

本教材由北京大学吴德明教授、清华大学高以智教授审阅,并提出了宝贵的修改意见。我们在这里表示最诚挚的感谢。

由于作者水平有限,编写过程中难免出现错误与不周之处,欢迎广大读者批评指正。

作者

2005年10月

目 录

第一章 光纤中的波动及射线理论基础	(1)
1.1 麦克斯韦方程及波动方程	(1)
1.2 平面波	(3)
1.3 平面波的偏振	(12)
1.4 射线光学基础	(19)
习题与思考题	(21)
参考文献	(22)
第二章 介质薄膜波导及带状波导	(23)
2.1 平板波导的射线分析	(23)
2.2 平板波导的波动分析	(31)
2.3 渐变折射率平面波导	(37)
2.4 带状波导	(43)
习题与思考题	(49)
参考文献	(50)
第三章 光纤	(51)
3.1 光纤概述	(51)
3.2 多模光纤中的光线	(52)
3.3 阶跃折射率光纤中的标量模	(60)
3.4 阶跃折射率光纤中的矢量模	(70)
3.5 光纤损耗	(78)
3.6 光纤色散与带宽	(83)
3.7 单模光纤特性与单偏光纤	(95)
3.8 单模光纤的偏振模色散	(101)
3.9 光纤中的非线性效应	(106)
3.10 色散和非线性效应对光纤中传输信号的影响	(112)
习题与思考题	(123)
参考文献	(124)
第四章 光波导模式耦合理论及其应用	(125)
4.1 规则波导与波导畸变	(125)
4.2 理想波导模式耦合振幅方程	(129)
4.3 本地正规耦合振幅方程	(134)



4.4 光波导定向耦合器.....	(136)
4.5 光栅耦合器.....	(141)
4.6 棱镜耦合器.....	(147)
习题与思考题	(155)
参考文献	(155)
第五章 光纤与光波导器件	(156)
5.1 光波导器件中几种常用物理效应.....	(156)
5.2 光无源器件.....	(170)
5.3 光外调制器.....	(183)
5.4 光放大器.....	(192)
5.5 光开关及其阵列.....	(219)
5.6 光谱器件.....	(235)
习题与思考题	(260)
参考文献	(263)
第六章 光纤通信系统与网络技术.....	(264)
6.1 光源与光发射端机.....	(264)
6.2 光电探测器与光接收机.....	(286)
6.3 光纤通信系统.....	(301)
6.4 全光通信网.....	(322)
6.5 光纤接入网.....	(338)
6.6 色散补偿技术.....	(344)
6.7 光孤子通信技术.....	(351)
习题与思考题	(354)
参考文献	(356)
第七章 光纤传感器原理与系统	(358)
7.1 光纤传感器概述.....	(358)
7.2 强度调制型光纤传感器.....	(361)
7.3 相位调制型光纤传感器.....	(373)
7.4 偏振调制型光纤传感器.....	(387)
7.5 频率调制型光纤传感器.....	(393)
7.6 波长调制型光纤传感器.....	(398)
7.7 复用式与分布式光纤传感系统.....	(410)
习题与思考题	(418)
参考文献	(419)
附录:缩略语	(422)

第一章 光纤中的波动及射线理论基础

光在光纤中的传播规律,一般应用两种理论去分析,即波动和射线理论。如果光波的波长 λ 远小于光波导(光纤)的横向尺寸,可近似认为光波长 $\lambda \rightarrow 0$,则可以忽略光的衍射现象,光的发散角可近似为零,那么可以把光波看作射线。以此为基础分析光传播的各种现象和规律即为射线理论或几何光学。把光波看作波长较短的电磁波,采用电磁场理论分析光传播的规律,即为波动光学或波动理论。射线光学方法具有简单、直观的特点。波动光学方法是一种更严格、更全面的方法,但要使用较复杂的数学工具,过程较繁杂。分析简单问题时,采用射线理论与用波动理论得出的结果一致。但分析复杂问题时,射线理论却不能给出比较满意的结果。要得到全面、准确的解析或数值结果,还必须采用波动理论。

本章的目的是给出波动理论及射线理论的基本概念、理论的出发点,为后续章节提供分析讨论问题的基础。

1.1 麦克斯韦方程及波动方程

1.1.1 麦克斯韦方程组

电磁场的基本规律,由麦克斯韦方程组表示为

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

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

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

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

式中, $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{J}$ 、 ρ 分别代表电场强度、磁场强度、电位移矢量、磁感应强度、电流密度及电荷密度;“ $\nabla \times$ ”表示旋度;“ $\nabla \cdot$ ”表示散度。

式(1-1)和式(1-2)表示随时间变化的电场在周围空间会产生磁场,同样,变化的磁场在周围空间会产生电场,这种变化的电磁场在空间中将会以一定速度传播,形成电磁波。式(1-3)表示电场有散度,电场可由点电荷所激发。式(1-4)表示磁场无散度,即磁场不可能为单磁荷所激发。对光波导来说,传输物质为介质而非导体,即电导率 $\sigma=0$,同时介质又无电荷与电流, $\rho=0$, $\mathbf{J}=0$,称为无源情况。

$\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{E}$ 之间、 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 之间应满足物质关联方程。对各向同性介质有



$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \epsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1-5)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu(\mathbf{r})\mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (1-6)$$

式中, $\mathbf{r}$ 代表介质中各点的坐标; $\epsilon(\mathbf{r})$ 和 $\mu(\mathbf{r})$ 分别表示各向异性非均匀介质的介电常数和磁导率, 一般应为张量。在各向同性非均匀介质中, $\epsilon(\mathbf{r})$ 和 $\mu(\mathbf{r})$ 应为标量, 只是随坐标位置 $\mathbf{r}$ 不同, ϵ 和 μ 有不同值。对于大多数光波导材料来说, 磁导率 μ 等于真空磁导率 μ_0 , 且与坐标无关。

只有极简单的问题, 才可能直接应用麦克斯韦方程组求解。对于电磁波的传播问题一般均须将麦克斯韦方程组联立, 化为波动方程, 并且利用边界条件才能解出电磁场的特定解。

由于光波导都是介质而非金属, 又是无源的, 因此, 这里讨论的仅仅是两种不同介质交界面的边界条件: 两介质中的电场强度 $\mathbf{E}$ 和磁场强度 $\mathbf{H}$ 相对于界面的切向分量连续, 两介质中的电位移 $\mathbf{D}$ 和磁感应强度 $\mathbf{B}$ 相对于界面的法线分量连续, 即

$$E_{1t} = E_{2t}, H_{1t} = H_{2t} \quad (1-7)$$

$$D_{1n} = D_{2n}, B_{1n} = B_{2n} \quad (1-8)$$

式中, 角标 t 表示切线方向, 角标 n 代表法线方向。

1.1.2 波动方程

根据麦克斯韦方程组和物质关联方程可以建立波动方程。这里仅给出各向同性介质的波动方程。对式(1-1)和式(1-2)求旋度, 并利用式(1-5)和式(1-6)及介质中 $\rho=0, \mathbf{J}=0$, 各向同性介质中 ϵ 和 μ 为常标量, 则有

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mu\mathbf{H})$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}) = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \epsilon\mathbf{E})$$

在各向同性均匀介质中, $\nabla \epsilon = 0$, 经数学运算可得

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \epsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1-9)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \epsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1-10)$$

式(1-9)和式(1-10)即为均匀介质中的波动方程, 它是波动光学讨论各种波导问题的基础。



1.1.3 亥姆霍兹方程

假设电磁场以角频率 ω 作简谐振荡, 即时间的函数为 $\exp(+j\omega t)$ ^①, 简化成定态解问题, 在光学中对应理想单色波情况。这一假设并不影响问题的普遍性, 因为任何复杂问题都可以视为作简谐振荡的傅里叶分量的叠加。此时则有 $\partial/\partial t = j\omega$, $\partial^2/\partial t^2 = -\omega^2$, 波动方程式(1-9)、式(1-10)成为

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1-11)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (1-12)$$

$$\text{式中} \quad k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon} = nk_0 \quad (1-13)$$

k_0 为自由空间的波数; n 为介质的折射率

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 2\pi/\lambda, \quad n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1-14)$$

λ 为波长, ϵ_r 和 ϵ_0 分别为介质相对介电常数和真空介电常数。式(1-11)和式(1-12)称为矢量亥姆霍兹方程。

在直角坐标系中, $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 的 x 、 y 、 z 分量均满足方程

$$\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0 \quad (1-15)$$

式中, ψ 代表 $\mathbf{E}$ 或 $\mathbf{H}$ 的 x 、 y 、 z 分量。而在圆柱坐标系中, 则只有 E_z 和 H_z 才满足上面的方程。式(1-15)称为标量亥姆霍兹方程, 给定边界条件即可解出电磁场 $\mathbf{E}$ 或 $\mathbf{H}$ 的各个分量。

1.2 平面波

1.2.1 平面波的一般特性

1. 平面波的表达式

亥姆霍兹方程的通解可以是一系列特解的线性组合, 而特解的一种形式为平面波, 其电场和磁场可表示为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (1-16)$$

① 实际上应为 $\exp(\pm j\omega t)$, 文献[1-1]中取“+”, 而文献[1-3]和[1-4]中取“-”, 文献[1-5]和[1-4]中对此作了说明, 取“+”和取“-”是等价的, 根据需要而定。为了与大多数文献一致, 本书取“+”, 即平面波表达式(1-16)和(1-17)中取 $\exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_0)]$, 与文献[1-1]中表达式相同; 与文献[1-4]《波动光学》一书中所取 $\exp[-j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \phi_0)] = \exp[j(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \phi_0)]$ 不同, 刚好差一“-”号。这一规定关系到相位差正负号与相位超前与滞后的规定, 也关系到椭圆偏振态左旋与右旋的规定, 参见 1.3 节的注④。



$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (1-17)$$

式中, $\mathbf{E}_0$ 、 $\mathbf{H}_0$ 分别为电场振幅和磁场振幅矢量; $\mathbf{k}$ 为波矢量, $|\mathbf{k}| = k = 2\pi/\lambda$; $\mathbf{r}$ 为波面上任一点 $P(x, y, z)$ 的位置矢量。

2. 平面波为横波

将式(1-16)和式(1-17)代入麦克斯韦方程式(1-1)和式(1-2)的无源形式($\mathbf{J}=0$), 得

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -j\omega \mu \mathbf{H} \quad (1-18)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = j\omega \epsilon \mathbf{E} \quad (1-19)$$

作相应数学运算可得

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 = \omega \mu \mathbf{H}_0 \quad (1-20)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H}_0 = -\omega \epsilon \mathbf{E}_0 \quad (1-21)$$

由此可见, 在各向同性均匀介质中 μ 、 ϵ 为常数, 则 $\mathbf{H}_0$ 正交于 $\mathbf{k}$ 和 $\mathbf{E}_0$, $\mathbf{E}_0$ 又正交于 $\mathbf{k}$ 和 $\mathbf{H}_0$, 所以, $\mathbf{E}_0$ 、 $\mathbf{H}_0$ 、 $\mathbf{k}$ 三者相互正交。已知坡印亭矢量 $\mathbf{S}$ 在 $\mathbf{E}_0 \times \mathbf{H}_0$ 方向上, 于是 $\mathbf{k}$ 与 $\mathbf{S}$ 同向。同时证明了电场和磁场都垂直于光波的传播方向, 具有横波特性。在各向异性介质中, μ 和 ϵ 是张量, 波矢量 $\mathbf{k}$ 的方向为 $\mathbf{D} \times \mathbf{B}$ 方向, 它和坡印亭矢量 $\mathbf{S}$ (能量传播) 方向不一致。

3. 波矢 $\mathbf{k}$ 与色散方程

把平面波表达式代入波动方程(1-11)和(1-12)即可得出

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon = n^2 k_0^2 \quad (1-22)$$

式(1-22)称为各向同性介质中的色散方程。如果把 k_x 、 k_y 、 k_z 作为直角坐标系的坐标, 则上式是一个球面, 每个球面代表 k 为常数的表面。可以看出, 各向同性介质中的平面波, 在各个方向上的传播常数是相同的。

在各向异性介质中, 各方向上的传播常数不再相同。以单轴晶体为例, 在单轴晶体中 μ 为常数, ϵ 为张量

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon' \end{bmatrix}$$

若将它们代入波动方程求解波矢分量的值将是很不方便的。可将式(1-20)和式(1-21)改写成如下形式

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 - \omega \mu \mathbf{H}_0 = 0 \quad (1-23)$$

$$\omega \epsilon \mathbf{E}_0 + \mathbf{k} \times \mathbf{H}_0 = 0 \quad (1-24)$$

式(1-23)和式(1-24)可看成联立的二元($\mathbf{E}_0$ 、 $\mathbf{H}_0$)一次线性代数方程组, 若 $\mathbf{E}_0$ 、 $\mathbf{H}_0$ 有非零解, 则其系数行列式必为零

$$\begin{vmatrix} \mathbf{k} \times & -\omega \mu \\ \omega \epsilon & \mathbf{k} \times \end{vmatrix} = 0$$



将 ϵ 代入上式并经过数学运算, 可得

$$[(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) - \omega^2 \mu \epsilon][(k_x^2 + k_y^2) \omega^2 \mu \epsilon + \omega^2 \mu \epsilon' k_z^2 - \omega^4 \mu^2 \epsilon \epsilon'] = 0$$

由此可导出其色散方程为

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad (1-25)$$

或

$$\frac{k_x^2}{\omega^2 \mu \epsilon'} + \frac{k_y^2}{\omega^2 \mu \epsilon'} + \frac{k_z^2}{\omega^2 \mu \epsilon} = 1 \quad (1-26)$$

式(1-25)和式(1-26)说明单轴晶体中存在两种平面波。式(1-25)说明存在一种与各向同性介质相同的平面波, 它以相同的 k 值向各个方向传播, 称为寻常波。式(1-26)在 k_x, k_y, k_z 坐标系里表示一个椭球面。如果介电张量 ϵ 固定, 则它们代表 ω 为某一个值的椭球面, 在各个方向上 k 值不同, 即各方向上传播常数不同, 称为非寻常波。式(1-25)和式(1-26)分别为单轴晶体中寻常波和非寻常波的色散方程。

1.2.2 横电波和横磁波

将麦克斯韦方程式(1-18)和式(1-19)在直角坐标系中改写成分量形式, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -j\omega \mu H_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -j\omega \mu H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -j\omega \mu H_z \\ \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= j\omega \epsilon E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j\omega \epsilon E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= j\omega \epsilon E_z \end{aligned} \right\} \quad (1-27)$$

假定平面波在各向同性介质中沿 z 轴方向传播, 电磁场的各分量有如下形式

$$E_i(x, y, z) = E_i(x, y) \exp(-jk_z z) \quad (i = x, y, z) \quad (1-28a)$$

$$H_i(x, y, z) = H_i(x, y) \exp(-jk_z z) \quad (i = x, y, z) \quad (1-28b)$$

设平面波的电磁场沿 y 轴无变化, 即有 $\partial/\partial y = 0, \partial/\partial z = -jk_z$, 将其代入(1-27)式得

$$\left. \begin{aligned} k_z E_y &= -\omega \mu H_x \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} &= -j\omega \mu H_z \\ jk_z H_x + \frac{\partial H_z}{\partial x} &= -j\omega \epsilon E_y \end{aligned} \right\} \quad (1-29)$$



$$\left. \begin{aligned} k_z H_y &= \omega \epsilon E_x \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} &= j\omega \epsilon E_z \\ jk_z E_x + \frac{\partial E_z}{\partial x} &= j\omega \mu H_y \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

可见,麦克斯韦方程变成两组独立的方程,一组含有 E_y 、 H_x 、 H_z ;另一组含有 H_y 、 E_x 、 E_z 。第一组仅有一个电场分量 E_y ,称横电(TE)波,第二组仅有一个磁场分量 H_y ,称横磁(TM)波。对 TE 波,只需求出 E_y ,即可利用式(1-29)中的第一式和第二式求出 H_x 和 H_z 分量。同样,对 TM 波只需求出 H_y ,即可求出 E_x 、 E_z 分量。

在直角坐标系中 ∇^2 算符可写成

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1-31)$$

根据矢量亥姆霍兹方程(1-11)和(1-12)可得到 TE 波和 TM 波直角坐标中电磁场分量的亥姆霍兹方程为

$$\text{TE 波:} \quad \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (n^2 k_0^2 - k_z^2) E_y = 0 \quad (1-32)$$

$$\text{TM 波:} \quad \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (n^2 k_0^2 - k_z^2) H_y = 0 \quad (1-33)$$

显然,要求解上述方程还必须借助介质交界面的边界条件。

1.2.3 平面波在界面附近的传输

设有一个 TE 波和 TM 波,向两种介质的界面斜射,如图 1-1 所示。图中给出 TE 波和 TM 波在界面附近的折射和反射的情况,其中

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_i &= \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_t \\ \theta_i &= \theta_r \end{aligned} \right\} \quad (1-34)$$

分别是折射定律和反射定律的数学表示式。现在研究在界面附近 TE 波和 TM 波的振幅反射系数的变化规律。

1. 反射与折射

从麦克斯韦方程可以直接导出描述 TE 波和 TM 波振幅反射系数的菲涅耳公式,这里只

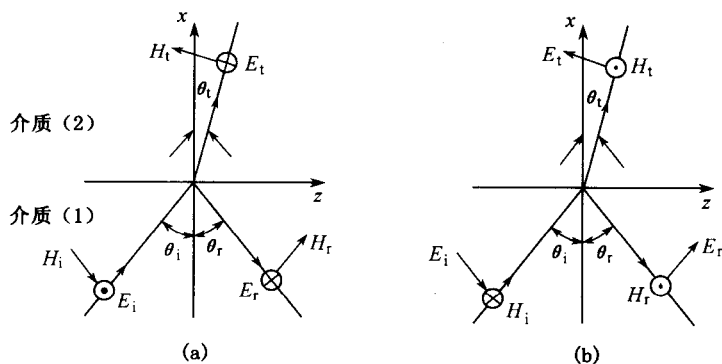


图 1-1 平面波的反射与折射

(a) TE 波; (b) TM 波

⊗代表进纸面, ⊙代表出纸面, 角标 i、r、t 分别代表入射、反射和折射

给出其结果。令界面上光的振幅反射系数为 R , 则^①

$$\text{对 TE 波有} \quad R = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} = |R| \exp(-j2\phi_{\text{TE}}) \quad (1-35)$$

$$\text{对 TM 波有} \quad R = \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} = |R| \exp(-j2\phi_{\text{TM}}) \quad (1-36)$$

无论对 TE 波或 TM 波, 其透射系数均为

$$T = 1 - |R| \quad (1-37)$$

式(1-35)~式(1-37)称为菲涅耳公式。

利用菲涅耳公式来研究全折射和全反射的问题。

对于 TE 波要获得全折射, 必须使 $R=0, T=1$, 所以必须要求 $n_1 \cos \theta_i = n_2 \cos \theta_t$ 。另一方面根据折射定律要求 $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$, 两个条件互相矛盾, 所以对于 TE 波, 得不到全折射, 即只能是部分折射, 部分反射。

对于 TM 波, 要满足全折射, 必须有

$$n_1 \cos \theta_i = n_2 \cos \theta_t, \quad n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

经计算, 可得

$$\tan \theta_i = \tan \theta_t = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-38)$$

^① 幅角 $2\phi_{\text{TE}}, 2\phi_{\text{TM}}$ 前面的正负号的选取与注①中指数项正负号选取的约定有关, 但最后结果是一致的。对 TM 波 R 的正负号文献[1-4]与文献[1-1]、[1-3]不同, 这是由于对反射波电场正方向的规定不同引起的, 参见图 1-1。为了与光纤、光波导类书中符号保持一致, 这里选取了文献[1-1]和[1-3]中的规定。