



普通高等教育“十二五”规划教材

光电检测技术

Photo-electronic Measurement Technology

胡涛 赵勇 王琦◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

光电检测技术

胡涛 赵勇 王琦 编著



机械工业出版社

本书系统介绍了光电检测技术的基础知识,光电检测系统的组成及各部分的功能,各类光电器件的工作原理、特性和典型应用及其发展情况等。本书共分10章,主要内容包括:光电检测技术基础、光电检测系统中的光源、光学变换器件、光子探测器件、光电成像器件、热电探测器件、光电信号处理、激光检测技术、光纤传感技术和光谱技术等。

本书取材新颖、内容丰富、注重理论与实践相结合,在对光电检测技术基本概念和原理讲述的同时,对其实际应用进行了详细的介绍分析,并对新型光电检测器件原理、研究与应用以及发展趋势进行了较细致深入的论述。本书包含较多的光电检测技术实例,可作为高等院校光电信息工程、光电子技术、光学工程、检测技术与自动化装置、测控技术与仪器专业的本科生、研究生的教材,同时也可供相关专业的科研及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光电检测技术/胡涛,赵勇,王琦编著. —北京:机械工业出版社,2014.3
普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-45774-9

I. ①光… II. ①胡…②赵…③王… III. ①光电检测-高等学校-教材
IV. ①TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第025320号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华 王 荣

版式设计:常天培 责任校对:樊钟英

封面设计:张 静 责任印制:刘 岚

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2014年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·21.25印张·519千字

标准书号:ISBN 978-7-111-45774-9

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工微博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

光电检测技术是将传统光学与现代微电子技术、计算机技术紧密结合在一起而形成的一门高新技术，是获取光信息或者借助光来获取其他信息的重要手段。随着 20 世纪 60 年代激光技术以及 70 年代光纤技术的发展，光电检测技术的理论及应用都取得了巨大的进步，尤其是光纤技术在通信中的广泛应用，使光电检测技术与微电子技术进一步相互结合，相互交叉、相互渗透，形成了 21 世纪信息社会的三大技术支柱：计算机技术、通信技术和传感器技术。现代科学技术的不断发展及各种新型光电检测传感器件的不断出现，促进了光电检测技术的迅猛发展，它具有的测量精度高、速度快、非接触、频宽和信息容量极大、信息效率极高及自动化程度高等突出的特点，使其在工业、农业、日常生活、医学、军事和空间科学技术等许多领域都得到了广泛应用。

光电检测技术将光学精密检测与光电变换相结合，以激光、红外、光纤等现代光电器件为基础，通过对载有被检测物体信号的光辐射进行检测，即通过光电检测器件接收光辐射并转换为电信号从而实现检测的目的。光电检测技术主要包括光电变换技术、光信息获取与光信息测量技术、测量信息的光电处理技术等，它将光学、光电子学、计算机技术、机电技术以及通信技术等内容融为一体，以光电技术为核心，已成为光电信息技术中最活跃的高新技术之一。

本书在系统介绍光电检测基础理论和检测器件的基础上，突出了光电检测技术的典型应用。通过参阅国内外大量文献，对光电器件、光电检测技术的理论与应用进行了总结，并阐述了一些新型的光电器件和光电检测技术。本书主要内容包括：光电检测技术基础、光电检测系统中的光源、光学变换器件、光子探测器件、光电成像器件、热电探测器件、光电信号处理、激光检测技术、光纤传感技术和光谱技术等。由于光电检测技术具有综合性、应用性、实践性强的特点，涉及光学、电子学、光与物质相互作用等学科知识，因此本书在知识内容取材、理论深度方面力求简明易懂，力求紧跟技术发展方向，利于激发学生学习兴趣及创新意识能力的培养，注意理论联系实际；各章节次序及内容的编排既注重知识体系之间的有机联系，又考虑各自的独立性，便于教师讲授与学生自学；整体内容布局及各章的内容编写上，均有侧重点并注意了相互内容的衔接，便于教师根据不同专业以及不同学时对内容进行选择。

本书由哈尔滨工业大学胡涛副教授、东北大学赵勇教授、东北大学王琦副教授编著，此外，参与本书编写的还有东北大学胡海峰老师、东北电力大学焦圣喜老师、沈阳工程学院张玉艳老师、沈阳师范大学高朋老师等。

现今光电检测技术发展非常迅速，由于编者水平有限，加之本书内容涉及面较广，内容编写上难免会有疏漏与错误，恳请各位专家学者、教师、学生及工程技术人员提出宝贵意见，以便今后不断改进。

编 者

目 录

前言

第 1 章 光电检测技术基础	1
1.1 光电检测技术概述	1
1.2 光电检测的基本概念	1
1.3 光频电磁波的基本理论和定律	2
1.3.1 麦克斯韦方程	2
1.3.2 平面波	4
1.3.3 电磁场中的能量	6
1.3.4 光的反射和折射定律	8
1.3.5 电磁波谱与光度学	10
1.3.6 光的量子性	12
1.4 半导体物理基础	14
1.4.1 半导体材料的能带	14
1.4.2 半导体的导电性	17
1.4.3 半导体 PN 结	18
1.4.4 半导体中的光吸收	20
1.5 光电检测系统的组成及特点	20
1.6 光电检测方法的应用和发展趋势	22
1.7 本书的主要内容	23
第 2 章 光电检测系统中的光源	24
2.1 光源的分类	24
2.2 光源的特性参数及选择的基本要求	24
2.2.1 辐射效率和发光效率	25
2.2.2 光谱功率分布	25
2.2.3 光源强度与空间光强分布	26
2.2.4 光源的颜色	26
2.2.5 光源的色温	27
2.2.6 光源的稳定性	27
2.2.7 光源其他方面的要求	27
2.3 热辐射光源	27
2.3.1 黑体及黑体模拟器	28
2.3.2 白炽灯	28
2.3.3 红外辐射灯	29
2.4 气体放电光源	30
2.4.1 脉冲灯	30
2.4.2 燃烧式闪光泡	31
2.4.3 原子光谱灯	31

2.4.4 汞灯	32
2.5 金属卤化物灯	33
2.5.1 金卤灯的性能结构	33
2.5.2 金卤灯的工作原理	34
2.5.3 金卤灯的分类和选择	34
2.6 固体发光光源	35
2.6.1 电致发光屏	35
2.6.2 发光二极管	37
2.7 激光光源	40
2.7.1 气体激光光源	41
2.7.2 固体激光器	42
2.7.3 半导体激光器	42
2.7.4 可调谐半导体激光器	44
第3章 光学变换器件	47
3.1 光调制器件	47
3.1.1 光束调制原理	47
3.1.2 电光调制器件	50
3.1.3 声光调制	53
3.1.4 磁光调制器	54
3.1.5 空间光调制器	56
3.2 光扫描器件	58
3.2.1 机械扫描	58
3.2.2 电光扫描	58
3.2.3 电光数字式扫描	59
3.3 光放大器	60
3.3.1 光放大器的一般概念	60
3.3.2 半导体光放大器	61
3.3.3 掺铒光纤放大器	65
3.3.4 光纤拉曼放大器	68
3.4 光开关	70
3.4.1 微机电光开关	70
3.4.2 电光开关	71
3.4.3 热光开关	74
3.4.4 磁光开关	76
3.4.5 声光开关	77
3.5 新型光学变换器件	77
3.5.1 光纤陀螺用集成光学芯片	77
3.5.2 通信用集成光学强度调制器	78
3.5.3 GC1120S 型高消光比集成光学强度调制器	79
3.5.4 相位调制器	80
第4章 光子探测器件	82
4.1 光电探测器件的特性参数	82
4.2 光电导效应和光敏电阻	85

4.2.1	光电导效应	85
4.2.2	光敏电阻	86
4.3	光电发射器件	95
4.3.1	光电发射效应	95
4.3.2	光电倍增管	96
4.3.3	微通道板	103
4.4	结型光电器件	104
4.4.1	光生伏特效应	104
4.4.2	光电池	108
4.4.3	光敏二极管	116
4.4.4	PIN 光敏二极管	122
4.4.5	雪崩光敏二极管	123
4.4.6	光敏晶体管	124
4.4.7	光生伏特器件组合件	129
4.4.8	光电位置敏感器件	132
4.5	各种光子器件的比较与选取	135
第5章	光电成像器件	139
5.1	像管	139
5.2	摄像管	142
5.2.1	摄像管的作用及分类	142
5.2.2	摄像管的结构和工作原理	143
5.3	电荷耦合器件 (CCD)	144
5.3.1	CCD 的基本原理	144
5.3.2	CCD 时序信号读出原理	148
5.3.3	性能评价指标	148
5.4	互补金属-氧化物-半导体 (CMOS)	150
5.4.1	CMOS 像元构造	150
5.4.2	CMOS 图像传感器的特性参数	151
5.4.3	CCD 与 CMOS 的区别比较	152
5.5	电荷注入器件 (CID)	153
5.6	自扫描光敏二极管阵列 (SSPD)	155
5.6.1	SSPD 线阵列	156
5.6.2	SSPD 面阵列	159
5.7	红外焦平面器件	162
第6章	热电探测器件	165
6.1	热辐射的一般规律	165
6.2	热敏电阻	168
6.3	温差电偶与热电堆	171
6.4	热释电器件	174
6.4.1	热释电效应	175
6.4.2	热释电探测器	176
6.4.3	热释电成像器件	181
第7章	光电信号处理	184

7.1 光电检测系统的噪声	184
7.1.1 噪声的分类及性质	184
7.1.2 光电探测器主要的噪声类型	184
7.1.3 噪声等效分析与设计	187
7.2 光电检测系统的动态特性	204
7.2.1 光电信号输入电路的动态计算	205
7.2.2 光电检测电路的频率特性	207
7.3 弱光检测的信号处理技术	211
7.3.1 窄带滤波器与锁相放大技术	211
7.3.2 取样积分法	215
7.3.3 相关检测技术	217
7.3.4 光子计数技术	219
第8章 激光检测技术	222
8.1 激光准直技术	222
8.1.1 激光准直技术的分类	222
8.1.2 大气折射率对激光准直精度的影响	224
8.1.3 激光准直仪	224
8.2 激光多普勒测速技术	228
8.2.1 多普勒效应简述	228
8.2.2 光多普勒效应	228
8.2.3 激光器多普勒测速原理	229
8.2.4 激光多普勒测速的基本模式	229
8.2.5 激光多普勒测速信号处理方法	231
8.2.6 激光多普勒测速技术的应用	232
8.3 激光干涉检测技术	233
8.4 激光衍射检测技术	240
8.4.1 激光衍射测量概述	240
8.4.2 激光衍射测量原理	241
8.4.3 激光衍射测量分辨率	245
8.5 激光测距技术	246
8.5.1 激光测距技术的基本原理	246
8.5.2 激光测距技术的应用	247
8.5.3 激光测距装置	248
第9章 光纤传感技术	249
9.1 光纤的结构和基本原理	249
9.1.1 光纤的结构	249
9.1.2 传感用光纤器件	252
9.2 强度调制型光纤传感器技术	265
9.2.1 反射式强度调制	265
9.2.2 透射式强度调制	268
9.2.3 光吸收系数强度调制	269
9.3 相位调制型光纤传感器技术	269
9.3.1 光纤相位调制机理	270

9.3.2 光纤相位调制的普通干涉测量	273
9.4 偏振调制型光纤传感器技术	278
9.4.1 光纤偏振调制的常用物理效应	278
9.4.2 光纤偏振调制机理的典型应用	279
9.5 频率调制型光纤传感器技术	283
9.5.1 光学多普勒效应	283
9.5.2 光纤多普勒传感技术	283
9.6 波长调制型光纤传感器技术	285
9.6.1 光纤荧光探测技术	285
9.6.2 光纤黑体辐射探测技术	287
第10章 光谱技术	289
10.1 光谱检测技术概述	289
10.2 傅里叶变换红外光谱技术	290
10.2.1 红外光谱	290
10.2.2 傅里叶变换红外光谱原理	292
10.2.3 傅里叶变换红外光谱应用	298
10.3 激光拉曼光谱检测技术	300
10.3.1 激光拉曼光谱	300
10.3.2 几种激光拉曼光谱技术	301
10.3.3 激光拉曼光谱检测技术的应用简介	308
10.4 荧光光谱检测技术	311
10.4.1 荧光光谱的基本原理	311
10.4.2 X射线荧光光谱检测技术	312
10.4.3 激光原子荧光光谱检测	314
10.4.4 激光离子荧光光谱检测	316
10.5 THz 检测技术	320
10.5.1 THz 辐射的基本情况和主要特征	320
10.5.2 THz 时域光谱探测技术	322
10.5.3 THz 相关探测技术	324
10.5.4 THz 成像技术	325
10.5.5 THz 检测技术存在的问题及展望	326
参考文献	328

第 1 章 光电检测技术基础

1.1 光电检测技术概述

信息泛指人类社会传播的一切内容。人通过获得、识别自然界和社会的不同信息来区别不同事物，得以认识和改造世界。信息是沟通客观世界和主观世界的桥梁，如果没有信息，人们就无法对客观世界进行认知。随着人类文明的不断进步、科学技术水平的不断提高，信息对整个社会的影响逐步提高到一种绝对重要的地位。信息量、信息传播的速度、信息处理的速度以及应用信息的程度等都以几何级数的方式在增长，这也标志着人类社会正在由工业化时代进入信息化时代。在此背景下，信息的获取、存储、传递、处理分析就变得越加重要，这些需求推动了信息技术的发展。信息技术是一门综合的技术，它包括 4 种基本技术，即感测技术、通信技术、人工智能与计算机技术以及控制技术。感测技术包括传感技术和测量技术以及遥感、遥测技术，它能够使人类更好地从外部实际获取各种有用的信息；通信技术的作用是传递、交换和分配信息，可以消除或克服空间上的限制，使人们能更有效地利用信息资源；人工智能和计算机技术使人们能够更好地加工和再生信息；控制技术的作用是根据输入的指令，对信息状态实施干预。因此，一切与信息提取、加工、传输、处理、存储有关的技术都可称为信息技术。

现代信息技术是借助以微电子学和光电子学为基础的计算机技术和电信技术的结合而形成的手段。微电子技术是在传统电子技术的基础上发展起来的一种渗透性最强、影响面最广的电子技术，它通过控制固体内电子微观运动来实现对信息的加工处理，并在固体的微区（小到几个晶格的数量级）内进行，可以把一个电子功能部件，甚至是一个系统集成到一个很小的芯片上。光电子技术和微电子技术一样，是一门渗透性极强的综合技术，它是以前以光集成技术为核心的光学元器件制造的应用技术。与微电子技术类似，它利用外延、扩散、注入、蒸发工艺，将各种有源和无源光学器件（激光器、光耦合器、光分路器、光调制器、光检测器等）集成在一起，构成能完成光学信息获取、处理和存储等功能的系统。

光电检测技术是现代信息技术的重要组成部分。光电检测技术是将待测的物理量转换为光学量，然后利用光电变换和电路处理的手段对待测物理量进行检测的技术。它是将电子学和光学融为一体，实现信息的提取、加工、传输、处理、存储的一系列处理过程，因此该领域具有很强的系统性和综合性，包含光学、电子学和计算机科学等多个学科的相关知识。

1.2 光电检测的基本概念

对于一个物理量的测量过程，实际上就是要将这个量与同性质的标准量相比较，确定待测量和标准量之间的倍数关系，并通过数字来表示这个倍数，使人们得到一个量化的概念。测量分为两种方式：直接测量和间接测量。直接测量是指在对被测物进行测量时，不需要对

仪表读数进行任何计算，直接得到待测量的数值，比如用温度计测温度，用万用表测电压。间接测量则需要获取几个与待测量相关的物理量，通过函数关系式计算出来待测量的数值，比如电功率 P 与电压 U 和电流 I 相关，函数关系式为 $P = IU$ 。为了得到功率的数值，就需要对电流和电压进行测量，最后计算出功率。直接测量的方式简单、方便，在实际应用中较为普遍。但是许多情况下无法采用直接测量的方式，或者不适合应用直接测量的方式，这时就需要使用间接测量的方法。检测是用指定的方法检验测试某种物体（气体、液体、固体）指定的技术性能指标。检测技术的任务包括：寻找与自然信息具有对应关系的种种表现形式的信号，以及确定二者之间的定性、定量关系；从反映某一信息的多种信号表现中挑选出在所处条件下最为合适的表现形式，以及寻求最佳的采集、变化、处理、传输、存储、显示的方法和响应的设备。

在测量和检测过程中，由于检测系统或仪表不可能绝对的精确，很多因素，诸如测量原理的局限、测量方法的不尽完善、环境因素以及外界干扰的存在，使得测量和检测的过程会影响被测对象的原有状态，最后的结果不能准确地反映被测量的真值而存在一定的偏差，这个偏差就是测量误差。对于一个检测系统来说，误差小就意味着该检测系统的测量精度高。一般来说，光电检测技术比其他检测技术测量的精度更高，这也是光电检测技术的优势之一。

传感器是检测系统中最为核心的器件。从广义上来说，传感器是能够将实际中的力、声、光、温度、湿度等非电量转化为电量的一种检测装置。它能接收被测量的信息，并能将接收到的信息，按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。在工业生产中，对于生产高精密的产品，要借助各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，使设备工作在正常状态或最佳状态，并使产品达到最好的质量。因此可以说，没有众多的、优良的传感器，现代化生产也就失去了基础。在医学中，借助传感器能够更好地分析病因，得到一个好的治疗方案。在科学研究中，传感器更具有突出的地位。许多领域，人的感官还有简易的传感器根本无法得到精确的数据，必须借助高精密的传感器来实现分析测量。在光电检测系统中，光电传感器处于核心的地位，它的作用是将光学信号转换为电学信号，本质上是光学系统和电学系统之间的接口。光电传感器被广泛应用于自动控制、生物医学和光机电一体化等领域。

1.3 光频电磁波的基本理论和定律

光信号是光电检测系统需要处理的对象，在本质上光是一种电磁波。因此学习相关电磁波的基本原理和定律有助于更加深入地掌握光电检测技术的相关知识。本节内容包括电磁波的形成机制、传播特性以及光谱学和光度学的基本概念，最后简要介绍量子光学的相关概念。

1.3.1 麦克斯韦方程

早在 17 世纪，科学家们对于光的本性还存在着争论。牛顿提出了光的微粒学说，按照牛顿的理论，光是以微小粒子的形式从发光物体中传播出来的。与其同时代的惠更斯则认为

光是以波动的形式在“以太”中传播的，不过他认为光是纵波。直到19世纪，托马斯·杨和菲涅尔等人研究了光的干涉、衍射现象，初步测定了光的波长，发展了光的波动理论，特别是他们根据光的偏振现象，确定了光是横波，但是，这个时期的波动理论没有跳出机械论的范围。19世纪中叶，麦克斯韦在系统地总结了前人的研究成果，特别是总结了从库仑到安培、法拉第等人关于电磁学说的全部研究成果后，提出了“涡旋电场”和“位移电流”的假说，从而将这些规律总结称为麦克斯韦方程组，并预言了电磁波的存在。随后，麦克斯韦的理论被赫兹的实验所证实。此外，麦克斯韦的理论和赫兹的实验还证明了电磁波和光波具有共同的特性，即光在本质上就是电磁波，这样就将电磁波和光波统一起来，使人们对光的本质有了深入的认识。

电磁波在空间中的运动规律可以利用麦克斯韦方程组描述，它是电磁理论的基础，其微分形式如式(1-1)~式(1-4)所示：

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

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

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

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

式中， \mathbf{E} 为电场强度； \mathbf{D} 为电位移矢量； \mathbf{H} 为磁场强度； \mathbf{B} 为磁感应强度； \mathbf{J} 为电流密度； ρ 为电荷密度； ∇ 为微分算符，在直角坐标系中的表达式为 $\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}$ ， \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} 分别是 x 、 y 、 z 方向的单位矢量。在式(1-1)~式(1-4)中，每个方程都有各自的物理意义：式(1-1)表示随时间变化的磁场可以激发涡旋电场；式(1-2)表示随时间变化的电场（位移电流）激发涡旋的磁场；式(1-3)为高斯定理的微分形式，电位移矢量 \mathbf{D} 的散度等于电荷密度 ρ ，说明电场为有源场；式(1-4)表示磁感应强度 \mathbf{B} 的散度为零，意味着磁荷的不存在。在麦克斯韦方程中实际上也包括了电荷守恒定律，比如在式(1-2)两端同时取散度后，得到

$$\nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = -\partial \rho(\mathbf{r}, t) / \partial t \quad (1-5)$$

式(1-5)说明，在某一区域内部，电荷的减少量与流出这一区域的电荷量相同，因此在这一过程中，电荷既没有产生也没有消除，即电荷守恒。针对具体问题，还需要考虑介质的宏观电磁性质，对于各向同性和线性的介质，这些关系为

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \quad (1-6)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \quad (1-7)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \sigma \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \quad (1-8)$$

式中， ε_0 为真空介电常数； μ_0 为真空磁导率； ε 为相对介电常数； μ 为相对磁导率； σ 为电导率。式(1-6)~式(1-8)被称为物质方程。式(1-8)为欧姆定律的微分形式，这里需要指出的是，式(1-6)~式(1-8)仅适用于比较简单的各向同性材料。对于某些特殊的材料如许多晶体材料来说，介电特性是各向异性的，在这些介质中某些方向容易极化，而另一些方向就难以极化，使得 \mathbf{D} 和 \mathbf{E} 一般具有不同的方向，这时它们之间的关系就变成更加复杂的张量式，对于这种情况我们不做更详细的讨论。麦克斯韦方程组式(1-1)~式(1-4)

加上描述介质性质的物质方程式 (1-6) ~ 式 (1-8), 全面地总结了电磁场中的规律, 是宏观电动力学的基本方程, 利用它们可以解决各种宏观电动力学的问题。

麦克斯韦方程是一组微分方程, 因此为了求解它, 我们还必须知道相应问题的边界条件。只有在边界条件已知的情况下, 才能唯一地确定方程组的解。例如, 电磁波在介质分界面上的反射和折射等问题, 都需要利用边界条件才能得以解决。麦克斯韦方程可以用于任何连续介质的内部, 在两种介质的分界面上, 由于一般出现的电荷电流分布, 使得物理量发生跃变, 式 (1-9) ~ 式 (1-12) 给出电场和磁场在介质 1 和介质 2 的分界面上法向和切向上的界面连续性条件 (下标 1 表示介质 1 一侧的电磁场, 下标 2 表示介质 2 一侧的电磁场)。

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) = 0 \quad (1-9)$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \boldsymbol{\alpha} \quad (1-10)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = \sigma \quad (1-11)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0 \quad (1-12)$$

式中, \mathbf{n} 为界面法线方向的单位矢量。

这组方程和麦克斯韦方程组是一一对应的。界面连续性条件表示界面两侧的场以及界面上的电荷和电流的制约关系。它们实际上是边界上的场方程。由于实际问题往往含有几种介质以及导体在内, 因此, 界面连续性条件的具体应用对于解决实际问题十分重要。

1.3.2 平面波

利用麦克斯韦方程可以预言, 能量能够以电磁波的形式进行空间上的传播。在无限均匀的空间里, 基本的电磁波形式为平面波。如果无限空间中填充的介质是均匀、非导电的, 那么在没有电荷或电流分布的情况下, 式 (1-1) ~ 式 (1-4) 中, $\rho = 0, \mathbf{J} = 0$ 。假设电磁波沿着 z 轴进行传播, 该电磁波的等相位面垂直于 z 轴, 为了简单起见, 令电场强度、磁场强度及相位都与 x, y 的变量无关, 微分算符简化为 $\nabla = \hat{z} \partial / \partial z$, 因此式 (1-1) ~ 式 (1-4) 被简化为

$$\frac{\partial}{\partial z} E_z = 0 \quad (1-13)$$

$$-\hat{x} \frac{\partial}{\partial z} E_y + \hat{y} \frac{\partial}{\partial z} E_x = -\mu\mu_0 \hat{x} \frac{\partial H_x}{\partial t} - \mu\mu_0 \hat{y} \frac{\partial H_y}{\partial t} - \mu\mu_0 \hat{z} \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (1-14)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} H_z = 0 \quad (1-15)$$

$$-\hat{x} \frac{\partial}{\partial z} H_y + \hat{y} \frac{\partial}{\partial z} H_x = \varepsilon\varepsilon_0 \hat{x} \frac{\partial E_x}{\partial t} + \varepsilon\varepsilon_0 \hat{y} \frac{\partial E_y}{\partial t} + \varepsilon\varepsilon_0 \hat{z} \frac{\partial E_z}{\partial t} \quad (1-16)$$

对于旋度方程式 (1-14) 和式 (1-16) 来说, 由于等号两边都是矢量, 所以要求等号两边矢量的每个分量对应相等。等式左边没有 z 方向分量, 因此容易得到 $\partial H_z / \partial t = 0, \partial E_z / \partial t = 0$ 。结合式 (1-13) 和式 (1-15) 可知, z 方向电场和磁场的分量与时间和空间坐标不相关, 也就是与电磁波无关, 可以设为 $E_z = 0, H_z = 0$, 这里我们得到一个重要的结论: 电磁波是横波。旋度方程其余部分变为 4 个方程:

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \mu\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (1-17)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (1-18)$$

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (1-19)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (1-20)$$

可以看出, 式(1-17)和式(1-20)表达的是 H_x 和 E_y 之间的关系, 式(1-18)和式(1-19)表达的是 H_y 和 E_x 之间的关系, 这两组变量之间是相互独立的。如果取电场沿 x 方向振动, 则 $E_y = 0$, 相应的 $H_x = 0$, 这说明电磁波中电场分量和磁场分量是相互垂直的。在式(1-18)两端对 z 取偏微分, 并与式(1-19)联立, 得到电场的波动方程为

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \mu\mu_0 \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = 0 \quad (1-21)$$

令 $v = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu}$, 在真空条件下, $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$, 则式(1-21)变为

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = 0 \quad (1-22)$$

式(1-22)是在电磁波沿 z 方向传播的条件下得到的, 而电场的方向, 理论上来说可以在 xOy 平面内任意选取。前面也已经证明电场和磁场分量是相互垂直的, 电磁场分量 H_y 和 E_x 中的下标 x 和 y 可以去掉, 可得式(1-23), 这样波动方程中的电磁场分量就能够指向垂直于 z 轴的任意方向。

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-23)$$

通常情况下, 电磁场是很多振荡频率的场的叠加, 为了简单起见, 仅考虑频率为 ω 的电磁波, 称这时电磁场是时谐的, 场强对时间的依赖关系可以表达成

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) e^{-j\omega t} \quad (1-24)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r}) e^{-j\omega t} \quad (1-25)$$

将这种形式的电场表达式(1-24)代入波动方程(1-23), 可以将其化简为简单的一维常微分方程, 即

$$\frac{d^2 \mathbf{E}}{dz^2} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1-26)$$

式中, $k = \omega/v$ 为波矢量。该方程的一个解为 $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 \cdot e^{jkz}$, 将时间项加入以后, 电场强度的表达式为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cdot e^{jkz - j\omega t} \quad (1-27)$$

利用式(1-18)可以得到, 磁场强度也可以表达成类似的形式:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}_0 \cdot e^{jkz - j\omega t} \quad (1-28)$$

并且磁场和电场之间振幅的比例关系为 $|\mathbf{E}_0|/|\mathbf{H}_0| = \sqrt{\mu/\varepsilon}$, 在真空中这个比例系数为 $\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$, 被称为真空阻抗。由于电场和磁场复振幅的辐角相等, 说明它们是同相位的。

以上采用了复数运算, 对于实际的场强应该理解成只取式(1-27)和式(1-28)的实部, 则式(1-27)为 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(jkz - j\omega t)$, 在 $t=0$ 时刻, 振幅的波峰位置位于 $z=0$ 处。在另一时刻 t , 波峰的位置移动到 $z = \omega t/k$, 所以这个沿 z 方向传播的平面波的传播速

度为

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}} \quad (1-29)$$

可见,光的传播速度受到材料的介电常数和磁导率的影响。在不同材料中光的传播速度是不同的,真空中,相对介电常数 $\epsilon = 1$, 相对磁导率 $\mu = 1$, 这时光的传播速度 $c = (\epsilon_0\mu_0)^{-1/2} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。为了比较光在不同介质中的传播特性,在光学中,人们把介质的折射率 n 定义为

$$n = \sqrt{\mu\epsilon} \quad (1-30)$$

该物理量可以被理解为光在真空中传播的速度与在介质中传播的速度之比,即 $n = c/v$ 。

1.3.3 电磁场中的能量

电磁场在传播的过程中,能量也伴随着电磁场的运动在空间中传播。描述电磁场能量的两个物理量是能流密度和能量密度。能流密度 \mathbf{S} 描述能量在场内的传播, \mathbf{S} 在数值上等于单位时间内垂流过单位横截面的能量,其方向代表能量的传播方向;电磁场的能量密度 w 表示场内单位体积的能量,是空间位置 x 和时间 t 的函数,即 $w = w(x, t)$ 。为了进一步得到电磁场能流密度和能量密度的表达式,下面介绍洛伦兹力的概念。

除了麦克斯韦方程组以外,洛伦兹力公式也是反映电磁场的运动规律以及它和带电物质相互作用的理论基础。库仑定律指出:静止电荷 Q 受到的电场力为 $\mathbf{F} = Q\mathbf{E}$; 安培定律指出:横稳电流元 $\mathbf{J}dV$ 受到磁场的作用力为 $d\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}dV$ 。若电荷为连续分布,其密度为 ρ ,则在电磁场的作用下,电荷系统单位体积所受的力的密度 \mathbf{f} 为

$$\mathbf{f} = \rho\mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (1-31)$$

洛伦兹将这个结果推广为普遍情况下场对电荷系统的作用力,因此,式(1-31)称为洛伦兹力密度公式。将电磁作用力公式用到一个点电量为 e 的粒子上,得到一个带电粒子受到电磁场的作用力,即

$$\mathbf{F} = e\mathbf{E} + e\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1-32)$$

式(1-32)称为洛伦兹力公式。近代物理学实验验证了洛伦兹力公式对任意运动速度的带电粒子都是适用的。考虑空间区域 V , 其界面为 S , 设 V 内的电荷分布为 ρ , 电流密度为 \mathbf{J} 。能量守恒定律要求单位时间通过界面 S 流入空间区域 V 内的能量等于场对 V 内的电磁场能量增加率之和。

以 \mathbf{F} 表示场对电荷作用力密度, \mathbf{v} 表示电荷运动速度,则场对电荷系统所作的功率为

$$\iiint_V \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dV$$

空间区域 V 内能量的增加率为

$$\frac{d}{dt} \iiint_V w dV$$

通过界面 S 流入 V 的能量为

$$- \oiint_S \mathbf{S} \cdot d\boldsymbol{\sigma}$$

式中, $d\boldsymbol{\sigma}$ 为面元,方向为界面的法线方向向外。根据能量守恒定律,即

$$-\oint \mathbf{S} \cdot d\boldsymbol{\sigma} = \iiint \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dV + \frac{d}{dt} \iiint w dV \quad (1-33)$$

相应的微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{S} + \frac{\partial w}{\partial t} = -\mathbf{f} \cdot \mathbf{v} \quad (1-34)$$

若 V 包括整个空间, 则通过无限远界面的能量应为零, 这时式 (1-33) 左边的面积分为零, 则

$$\iiint \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dV = -\frac{d}{dt} \iiint w dV \quad (1-35)$$

式 (1-35) 表示场对电荷所作的总功率等于场的总能量减小率, 因此, 场与电荷的总能量守恒。

由洛伦兹力公式 (1-32) 得到

$$\mathbf{f} \cdot \mathbf{v} = (\rho \mathbf{E} + \rho \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} = \rho \mathbf{E} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (1-36)$$

将麦克斯韦方程中的磁场的旋度方程式 (1-2) 代入式 (1-36) 中, 得到

$$\mathbf{f} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{E} \cdot \nabla \times \mathbf{H} - \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-37)$$

利用矢量分析及麦克斯韦方程, 式 (1-37) 右边第一项可以化成

$$\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = -\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) - \mathbf{H} \cdot (\partial \mathbf{B} / \partial t) \quad (1-38)$$

则

$$\mathbf{f} \cdot \mathbf{v} = -\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) - \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-39)$$

将式 (1-38) 和式 (1-33) 比较, 可以得到能流密度 \mathbf{S} 和能量密度变化率 ($\partial w / \partial t$) 的表达式为

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1-40)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-41)$$

能流密度 \mathbf{S} 也称为坡印廷矢量, 是电磁波传播问题的一个重要物理量。在各向同性介质材料中, 有

$$w = \frac{1}{2} (\varepsilon |\mathbf{E}|^2 + \mu |\mathbf{H}|^2) \quad (1-42)$$

前面在讨论平面波的特性时曾经提到, 电场和磁场互相垂直并垂直于平面波的传播方向, 而能流密度可以表达成电场和磁场的矢量积, 因此能流密度的方向与电场和磁场垂直。所以说在各向同性介质中, 波矢 (波面法线) 方向 \mathbf{k} 与能流方向 (光线方向) \mathbf{S} 是一致的, 波速 (相速 v) 也就是能流速度。

对于光波来说, 电磁场振动的频率是很高的, 可以达到 $\nu = 10^{15}$ Hz 数量级。因此能流密度 \mathbf{S} 是随着时间迅速脉动的量, 对于这样的振动频率, 现有的任何探测手段都无法对其直接探测。实际上, 人们常常关心的是能流密度对时间的平均值, 而不必考虑瞬时的能流值。这里我们首先给出二次式对时间求平均值的一般公式, 其中场强仍用复数表示。设有两个同频率的时空复函数分别为

$$f(\mathbf{r}, t) = f_0(\mathbf{r}) \exp[j(\omega t + \phi_1)], g(\mathbf{r}, t) = g_0(\mathbf{r}) \exp[j(\omega t + \phi_2)] \quad (1-43)$$

式中, f_0 和 g_0 分别为 $f(\mathbf{r}, t)$ 和 $g(\mathbf{r}, t)$ 的振幅, 为实函数。在某一时刻, $f(\mathbf{r}, t)$ 和

$g(\mathbf{r}, t)$ 这两个函数所代表的物理量的具体数值应该为这两个复函数的实部。这两个函数实部的乘积在一个周期 T 内的平均值为

$$\begin{aligned}\langle fg \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \operatorname{Re}[f(\mathbf{r}, t)] \operatorname{Re}[g(\mathbf{r}, t)] dt \\ &= f_0(\mathbf{r}) g_0(\mathbf{r}) \frac{1}{T} \int_0^T \cos(\omega t + \phi_1) \cos(\omega t + \phi_2) dt \\ &= \frac{1}{2} f_0(\mathbf{r}) g_0(\mathbf{r}) \cos(\phi_1 - \phi_2)\end{aligned}\quad (1-44)$$

又因为

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \operatorname{Re}[f(\mathbf{r}, t) g^*(\mathbf{r}, t)] \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}[f_0(\mathbf{r}) g_0(\mathbf{r}) \exp[j(\phi_1 - \phi_2)]] \\ &= \frac{1}{2} f_0(\mathbf{r}) g_0(\mathbf{r}) \cos(\phi_1 - \phi_2)\end{aligned}\quad (1-45)$$

比较式 (1-44) 和式 (1-45) 可以得到二次式对时间求平均值的一般公式为

$$\langle fg \rangle = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[f(\mathbf{r}, t) g^*(\mathbf{r}, t)] \quad (1-46)$$

将式 (1-46) 应用于能流密度 \mathbf{S} 的表达式, 可以得到能流密度 \mathbf{S} 在一个时间周期内的平均值公式为

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \quad (1-47)$$

我们称 $\langle \mathbf{S} \rangle$ 为平均能流密度。对于平面波, 电场和磁场振幅的比例关系是 $|\mathbf{E}_0|/|\mathbf{H}_0| = \sqrt{\mu/\epsilon}$, 因此平面波的平均能流密度的表达式为

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} |\mathbf{E}_0|^2 \quad (1-48)$$

对于光电探测器件来说, 能够直接检测到的物理量就是光束的平均能流密度。这个物理量就被定义称为光强 $I = \langle \mathbf{S} \rangle$ 。从式 (1-48) 可以看出, 光强不仅和电场的振幅相关, 也和介质材料的折射率相关。

1.3.4 光的反射和折射定律

原来在几何光学中, 光的折射和反射定律都是通过实验总结出来的规律。这一节的内容将以麦克斯韦方程组为基础来证明平面波在界面处的传播规律满足折射定律和反射定律。几何光学中, 光的折射定律和反射定律仅仅能够给出光束在反射和折射以后的传播方向, 而从物理光学的角度上来讲, 我们通过严格的数学推导, 不仅可以给出反射角和折射角与入射角之间的关系, 还可以给出具体的入射波、反射波和折射波的振幅比例和相位关系。

当光波传播到两种介质的界面附近的时候, 由于两种介质材料将整个空间分解成介电常数不同的两个区域, 因此需要在这两个区域内分别求解麦克斯韦方程, 然后通过边界连续性条件, 确定电磁场表达式中相关的比例系数。因此, 研究光波的反射和折射问题的基础是电磁场在两个不同介质面上的边值条件的匹配。