



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

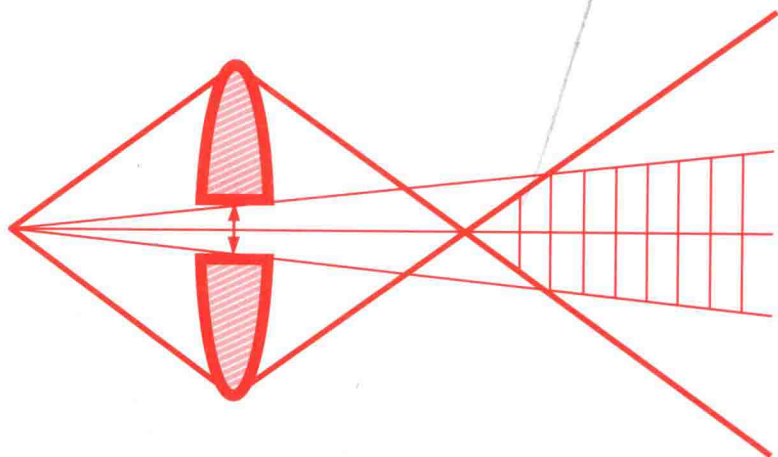
光学工程

Physical Optics

物理光学

范希智 编著

Fan Xizhi



清华大学出版社





教育部高等
高等学校电

指导委员会规划教材

Physical Optics

物理光学

范希智 编著

Fan Xizhi

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书从光是可见的电磁波、具有波粒二象性的角度出发,讲述了物理光学的基本概念、原理、主要现象及应用。全书内容共6章,第1~5章主要阐述光的波动性的相关知识,包括光的电磁波本性、光的反射、折射、光波的叠加和分解、光波的干涉和衍射等方面的知识,涉及光的电磁波理论、典型光波、光的相速度、横波性、偏振性、坡印亭定律、光强、光照度、光的折射和反射定律、菲涅耳公式、全反射、光的吸收、散射和光在媒质中的色散;双折射、光轴、晶体的光学分类、 k 和 S 的分离、光线速度、光线折射率、菲涅耳方程、折射率椭球、折射率曲面(波矢面)、菲涅耳椭球、射线曲面、晶体表面光反射和折射;光行波、光驻波、椭圆(圆)偏振光等光叠加后光场的特性、偏振光的产生和检验、偏振元器件、拍频光波、群速度和光波的傅里叶分析;光干涉的基本理论、分波面双光束杨氏干涉、分振幅双光束、多光束干涉及光学薄膜干涉、海定格干涉仪、迈克尔逊干涉仪和法布里-珀罗干涉仪及其变型和应用;衍射的基本理论、菲涅耳衍射、夫琅和费衍射、衍射光栅等。第6章针对光的粒子性介绍了黑体辐射、光电效应、光压、康普顿效应、氢光谱及原子光发射和吸收等涉及光的量子性的基础研究,同时也介绍了激光领域涉及光的量子性的基础知识。

本书各章配有丰富的例题和思考与练习题,并配套了教学课件。本书适合作为普通高等院校光电信息类专业的本科生及研究生教材,也可作为相关行业工程技术人员参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

物理光学/范希智编著. —北京:清华大学出版社,2016

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-43979-0

I. ①物… II. ①范… III. ①物理光学—高等学校—教材 IV. ①O436

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第120621号

责任编辑:盛东亮 赵晓宁

封面设计:李召霞

责任校对:梁毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:25.25

字 数:613千字

版 次:2016年10月第1版

印 次:2016年10月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.80元

产品编号:063520-01

高等学校电子信息类专业系列教材

顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

编审委员会

主 任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘 旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委 员	王志华	清华大学	宋 梅	北京邮电大学
	韩 焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪 伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾 云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢 泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴 瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李 晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡 毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江 毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋 峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳 伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

foreword

人们的周围充满着光,没有光,人类就难以生存。所以说,人们最熟悉的现象之一就是光。但是,光是什么?光的实质是什么?光是怎样传播的?光能做什么?这些问题很早就引起了人们的关注,为此已探索了若干个世纪,并且还要持续下去。可以说人们最不熟悉的現象之一也是光,因而出现了一门研究光的学科——光学。

物理光学是光学的分支,它的研究范畴包括研究光的本质、光的产生、传播、接收及其与物质相互作用等问题。它既是物理学中一门重要的基础学科,又是一门应用性很强的学科。从理论体系讲,就是以人探索光的本质为基本线索而建立起来的一个物理学分支。物理光学包含有波动光学和量子光学两部分内容,前者研究光的波动性,后者研究光的量子性。

本书是关于物理光学课程的基础性教材,讲述了得到公认的最基本的概念、规律、结论及一些方法,重点有光的电磁波性质、光的偏振特性、光的叠加、干涉和衍射等传播特性,并在此基础上介绍了光的量子性。

本书的编写思路是这样的:在阐述了光的电磁理论基础上,讲述一束光的传播规律;两束光的叠加、干涉特性;一束光的衍射规律与特性;然后讲述光的量子性,并简单介绍与光的量子性相关的激光的基础知识。第1章首先讲述光的电磁理论,再介绍几种典型光波的知识;然后讲解一束平面光在各向同性媒质空间中传播的规律,包括光在界面上的反射、折射,在色散、吸收和散射媒质空间中传播的特性。第2章讲述一束平面光在各向异性媒质空间中传播的规律,各向异性媒质的代表就是晶体,因而该章也同时介绍晶体的一些光学特性,可以说,这一章是基础晶体光学知识。第3章和第4章讲述两束平面光波在空间传播相遇叠加时的规律和特点;第3章是针对两束光叠加时合光场的问题,同时也讲解了复杂光波分析的问题,这在某种程度上可看作是光波叠加的逆问题;第4章针对两束光叠加时合光强分布的特点、规律进行阐述的,合光强的问题主要就是干涉问题,该章分别讲解光的干涉基本理论、分波面双光束干涉、分振幅双光束干涉、分振幅多光束干涉、分振幅光学薄膜干涉、偏振光的干涉以及光的干涉性等基本知识。第5章讲述一束光传播时遇到小尺度障碍物时出现的问题——衍射,在讲述基本衍射理论之后,先后讲述菲涅耳衍射和夫琅和费衍射的问题,之后讲述光栅这一重要衍射器件的衍射特性及其他相关知识,最后介绍分析衍射的严格耦合波理论。第6章讲述光的量子性,介绍黑体辐射、光电效应、康普顿效应、光压等能证实光具有量子属性的诸多现象的研究。在此基础上讲解关于光辐射和吸收的半经典半量子解释,以及激光的基本知识。可以说,前5章是针对光的波动性的相关内容,而第6章则是针对光的粒子性——光量子的基础内容。波动性和粒子性都客观地反映了光的特性,光

实际上具有波粒二重性。

关于光的偏振特性问题,书中并没有安排独立的章节来做专门讲述,而是将相关知识分散开穿插入相关章节加以讲述,如 1.3 节在讲完光的横波特性后就讲述了光的偏振特性,交代了基本概念,在讲完光强的基础上,讲述偏振度的概念;第 2 章讲述了晶体中双折射的两条折射光的线偏振特性;3.3 节是偏振光产生的理论分析以及偏振态的表示方法,而 3.4 节则从实验上讲述了偏振光产生和检测的相关知识;4.7 节则讲述了偏振光的干涉等。这样做似乎很零乱,但是各部分知识的讲解都是在相关预备知识讲完之后进行的,有充分的铺垫。

本书各章都选编了一定数量的例题、思考题和练习题,以供读者学习和巩固基本概念,并锻炼独立解析的能力。

本书着重阐述物理光学最基本的理论知识的同时,结合实际,在部分章节增加了目前光学发展形成的定论,通过本书的阅读、学习,可为“现代光学课程”的学习打下一定的理论基础。

本书可作为高等学校光信息科学与技术专业、光电子、光通信类专业和光学工程专业的教材,也可以作为学习物理学、光学等其他专业的教材和光学行业的技术人员的参考书。

本书在编著过程中参考了很多优秀教材以及相关文献,编者从这些参考资料中得到了良好的启示、借鉴和帮助。

本书的编写得到了武汉理工大学物理系的领导和同事的鼓励、支持和帮助,更得到了武汉理工大学“光电信息科学与工程专业综合改革试点”项目的支持,在此表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,所以不足之处在所难免,敬请读者给予斧正。

编 者

2016 年 8 月

目 录

contents

第 1 章 光的电磁理论	1
1.1 麦克斯韦电磁场理论与电磁光波	1
1.1.1 麦克斯韦方程组	2
1.1.2 物质方程	3
1.1.3 电磁场波动性	4
1.1.4 电磁波谱和折射率	5
1.1.5 光的色散	6
1.1.6 边值关系	8
1.2 典型光波	10
1.2.1 平面光波	11
1.2.2 球面光波	16
1.2.3 柱面光波	19
1.2.4 高斯光波	20
1.3 平面光波的性质及相关知识	22
1.3.1 简谐平面电磁波的性质	22
1.3.2 坡印亭矢量和坡印亭定律	25
1.3.3 光强 I	26
1.3.4 辐照度 L	27
1.4 折射和反射定律、菲涅耳公式	28
1.4.1 折射和反射定律	28
1.4.2 菲涅耳公式	30
1.4.3 根据菲涅耳公式讨论反射波和透射波的性质	32
1.5 全反射	36
1.5.1 临界角 θ_c 之下	36
1.5.2 临界角 θ_c 之上	37
1.6 金属中的光波和金属表面的折反射	43
1.6.1 良导体的条件、电导率 σ 不等于零时的波动方程	43
1.6.2 金属中的简谐平面光波	44

1.6.3 电磁波在金属表面的折、反射	46
1.7 光的吸收和散射	51
1.7.1 光的吸收	51
1.7.2 光的散射	54
名人简介: 麦克斯韦	60
名人简介: 菲涅耳	61
例题	61
思考题与习题	66
第2章 光波在各向异性光学媒质中的传播	70
2.1 晶体媒质的双折射和各向异性	70
2.1.1 双折射	70
2.1.2 光是横波的证明	71
2.1.3 媒质的各向异性	72
2.1.4 张量的基础知识	73
2.1.5 晶体的介电张量	74
2.2 理想单色平面光波在晶体中传播的解析法描述	76
2.2.1 单色线偏振平面光波的振动方向	76
2.2.2 波法线菲涅耳方程	78
2.2.3 单轴晶体的双折射的再讨论	81
2.2.4 单轴晶体中寻常光和非常光的振动方向	81
2.2.5 双轴晶体的双折射的讨论	83
2.2.6 光线菲涅耳方程	84
2.3 光在晶体中传播的几何方法描述	87
2.3.1 折射率椭球(光率体)	87
2.3.2 折射率曲面和波矢曲面	93
2.3.3 菲涅耳椭球	95
2.3.4 射线曲面	96
2.4 平面光波在晶体界面上的反射和折射	97
2.4.1 反射和折射定律	97
2.4.2 光在晶体界面上反射和折射方向的几何作图法描述	98
2.5 感生双折射	104
2.5.1 应力双折射——光弹性效应	105
2.5.2 电致双折射——电光效应	105
2.5.3 磁光效应	108
例题	109
思考题与习题	110

第3章 光波的叠加和分析	112
3.1 波的独立传播和叠加原理	112
3.1.1 标量波和矢量波	112
3.1.2 波的独立传播原理	113
3.1.3 光波的叠加原理和线性媒质	113
3.2 两束同频振动方向平行的标量波的叠加	114
3.2.1 同向传播的平面光波的叠加	114
3.2.2 同向传播的平面光波的叠加——驻波及其实验	115
3.2.3 任意方向传播的平面光波的叠加	118
3.3 两束同频振动方向垂直的标量波的叠加	119
3.3.1 椭圆偏振光的产生	119
3.3.2 偏振态的表示法	122
3.4 偏振光的产生和检测、偏振元器件及其琼斯矩阵	124
3.4.1 线偏振光的产生	124
3.4.2 线偏振光的检验	130
3.4.3 椭圆(圆)偏振光的产生	131
3.4.4 椭圆(圆)偏振光的检验	134
3.4.5 偏振器件的琼斯矩阵表示	138
3.5 不同频率的两个平面单色波的叠加	141
3.5.1 拍频现象	141
3.5.2 拍频现象的应用	142
3.5.3 群速度	144
3.6 光波的分析	146
3.6.1 周期性光波的分析	146
3.6.2 波群的分析	147
3.6.3 光波的傅里叶分析	148
3.7 旋光-线偏振光的分解	149
3.7.1 自然旋光	149
3.7.2 人工旋光	154
名人简介: 李普曼	155
名人简介: 阿喇果	156
例题	157
思考题与习题	162
第4章 光的干涉	165
4.1 两束单色光的干涉	165
4.1.1 概述	165
4.1.2 两束平面光波的干涉	168

4.1.3	两束球面光波的干涉	173
4.2	杨氏分波面干涉	177
4.2.1	杨氏干涉	178
4.2.2	杨氏干涉的改良——菲涅耳型干涉	181
4.2.3	瑞利干涉仪	183
4.3	分振幅双光束干涉	184
4.3.1	定域性	185
4.3.2	平行平板产生的干涉——等倾干涉及其应用	186
4.3.3	楔形平板产生的干涉——等厚干涉及其应用	190
4.3.4	双臂式分振幅干涉装置	194
4.4	多光束干涉	198
4.4.1	平行平板产生的多光束干涉	198
4.4.2	法布里-珀罗干涉仪及其应用	202
4.5	光学薄膜干涉	208
4.5.1	单层膜的分光特性	208
4.5.2	多层膜分光特性的递推法计算	212
4.6	光波的相干性	214
4.6.1	时间相干性	214
4.6.2	空间相干性	216
4.6.3	迈克尔逊天体干涉仪	220
4.7	偏振光的干涉	222
4.7.1	平行偏振光的干涉	222
4.7.2	会聚光的偏光干涉	226
	名人简介: 托马斯·杨	230
	名人简介: 迈克尔逊	231
	名人简介: 法布里	232
	例题	232
	思考题与习题	238
第5章	光的衍射	242
5.1	光衍射基本理论	242
5.1.1	惠更斯-菲涅耳原理	244
5.1.2	菲涅耳-基尔霍夫衍射公式	246
5.1.3	菲涅耳-基尔霍夫衍射公式近似	248
5.2	菲涅耳衍射	252
5.2.1	菲涅耳半波带法	252
5.2.2	菲涅耳波带板	258
5.2.3	菲涅耳积分法	260
5.2.4	菲涅耳衍射与分数傅里叶变换	263

5.3 夫琅和费衍射	265
5.3.1 衍射的观察	265
5.3.2 夫琅和费衍射的傅里叶变换处理	266
5.3.3 单缝的夫琅和费衍射	267
5.3.4 直边的夫琅和费衍射	270
5.3.5 矩孔的夫琅和费衍射	271
5.3.6 矩孔二值位相物体的衍射	272
5.3.7 圆孔的夫琅和费衍射	273
4.3.8 夫琅和费衍射中的 Babinet 互补规律	280
5.3.9 随机颗粒的夫琅和费衍射	280
5.3.10 衍射图形与光波所受的限制之间的关系	281
5.4 多缝夫琅和费衍射及衍射光栅	282
5.4.1 双缝夫琅和费衍射	282
5.4.2 多缝夫琅和费衍射	285
5.4.3 衍射光栅	291
5.5 几种光栅	295
5.6 严格耦合波分析方法	305
名人简介: 惠更斯	311
名人简介: 夫琅和费	311
例题	312
思考题与习题	315
第 6 章 光的量子性	319
6.1 早期光量子现象及其解释	319
6.1.1 黑体辐射	319
6.1.2 光电效应和光压	324
6.1.3 康普顿效应	328
6.1.4 光的波粒二象性和物质波	329
6.2 原子激发与发光的量子处理	330
6.2.1 原子的有核结构	330
6.2.2 氢原子光谱和经典理论的困难	331
6.2.3 玻尔的量子理论及其对相关疑难的解释	332
6.2.4 原子的光发射与吸收的半量子半经典理论	334
6.2.5 原子光谱线的展宽	341
6.3 激光中的量子过程和典型激光器	344
6.3.1 激光的基本原理	344
6.3.2 激光的特性	348
6.3.3 典型激光器	349
例题	353

思考题与习题	355
附录 A 常用非初等函数	357
A.1 标准形式的一维非初等函数	357
A.2 一维非初等函数的一般形式	365
A.3 常用二维非初等函数	367
附录 B 贝塞尔函数	372
B.1 n 阶第一类贝塞尔(Bessel)函数的定义	372
B.2 贝塞尔函数的性质	373
附录 C 傅里叶变换	374
C.1 傅里叶级数以及频谱的概念	374
C.2 一维傅里叶变换的定义及其运算举例	376
C.3 二维傅里叶变换	382
C.4 傅里叶变换的性质	384
C.5 傅里叶变换相关理论	385
参考文献	388

第1章

光的电磁理论

1830年前,以菲涅耳(Augustin-Jean Fresnel)、夫琅和费(Joseph von Fraunhofer)、托马斯·杨(Thomas Young)等为代表的研究者们建立了波动光学体系,但是并没有透彻地认识到光的本质:光是什么。19世纪60年代,麦克斯韦(James Clerk Maxwell)总结了当时电磁学方面的基本定律和实验成果,建立了经典电磁理论。他利用这个理论,把光学现象和电磁现象联系起来,认为光是一种电磁波,从而产生了光的电磁理论。光的电磁理论的确立,推动了光学乃至整个物理学的发展。现代光学尽管产生了许多新的领域,并且许多光学现象需要用量子理论来解释,但光的电磁理论仍是掌握现代光学的一个重要基础。

本章主要讲述光的电磁理论基础,平面光波、球面光波、柱面光波、高斯球面等典型的光波;以平面光波为主讲述光波的横波性、偏振性及光能流密度、光强、偏振度、辐照度等相关知识;同时讲述一些光的传播规律,如光的反射和折射、吸收和散射、光学媒质的色散等典型的现象。学生需熟悉光的电磁理论,重点掌握光波的横波性、偏振性、光能流密度、光强、辐照度、反射折射定律、菲涅耳公式、全反射、倏逝波等相关知识,对光的色散、吸收、瑞利散射、米氏散射等要有深刻的认识。

1.1 麦克斯韦电磁场理论与电磁光波

电磁场的普遍理论总结为麦克斯韦方程组,它是麦克斯韦把静态电磁场(静电场和稳恒电流下的磁场)的基本规律推广到变化的电磁场的普遍情况所得到的。从方程组出发,根据具体的条件,可以定量地计算在那些给定条件下发生的光学现象,例如光的反射、折射、干涉、衍射以及光与物质相互作用等现象。

1.1.1 麦克斯韦方程组

1. 积分形式

根据电磁理论可知,若用 $\mathbf{E}$ 表示电场强度矢量, $\mathbf{B}$ 表示磁感应强度矢量,则有法拉第(Faraday)电磁感应定律

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.1)$$

式(1.1)右端给出了通过空间任一曲面 A 的磁感应强度随时间的变化率,而左端表示对电场 $\mathbf{E}$ 沿曲面 A 的周边 C 的环线积分,这个积分是感应电动势。因而式(1.1)的物理含义是:变化的磁场产生电场。式右端的负号表示感应电动势具有阻碍磁场变化的趋势。

同样,若用 $\mathbf{D}$ 表示电位移强度矢量, ρ 表示体电荷密度,则有电场高斯(Gauss)定律

$$\oiint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \iiint_V \rho dv \quad (1.2)$$

其中 $\mathbf{D}$ 又称电位移矢量。式(1.2)的右端对电荷密度的体积分表示体积 V 内总的自由电荷;而左端对电位移 $\mathbf{D}$ 的面积分表示流过包围体积 V 的闭合曲面 A 的电通量。这样,式(1.2)就表示,自由体积 V 内部通过闭合曲面 A 向外流出的电通量等于 A 所包围的空间 V 中自由电荷的总数。当 A 包围的总电荷为负时,表示电通量自曲面 A 外流入体积 V 内。

关于磁场,有磁场的高斯(Gauss)定律

$$\oiint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1.3)$$

式(1.3)表示由闭合曲面 A 流出或流入的磁通量相等,意味着磁通量没有起点和终点。

此外,还有麦克斯韦-安培(Maxwell-Ampère)定律

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_A \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{s} \quad (1.4)$$

其中 $\mathbf{H}$ 表示磁场强度矢量; $\mathbf{J}$ 表示电流密度矢量; $\iint_A \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}$ 表示流过曲面 A 的传导电流强度。麦克斯韦将 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ 看作一种电流,称为位移电流密度,则积分 $\iint_A \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$ 表示通过曲面 A 的位移电流强度。利用平板电容器可以测到由位移电流产生的环形磁场。

式(1.1)~式(1.4)都是积分形式,它们组合成积分形式的麦克斯韦方程组,这个方程组将一个个独立的电磁学定律联结起来,合成一个整体。而位移电流概念的引入是麦克斯韦的首创,他将静电学和关于低频电磁场的电磁学定律改造成适合高频电磁场的定律,指出了交变的电场和磁场可以互相感生,并据此预言了电磁波的存在。

2. 微分形式

对式(1.1)~式(1.4)利用数学中的格林定理和斯托克斯公式进行处理,可以得到如下等式

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.8)$$

其中 ∇ 为哈密顿算符,是一个矢量微分算符: $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k}$ ($\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 表示 x, y, z 方向的单位矢量)。它作用到矢量 $\mathbf{E}$ 上时, $\nabla \cdot \mathbf{E}$ 称为 $\mathbf{E}$ 的散度,空间某点的散度描述了矢量场 $\mathbf{E}$ 从该点发散或汇聚于该点的性质; $\nabla \times \mathbf{E}$ 称为 $\mathbf{E}$ 的旋度,空间某点的旋度描述了矢量 $\mathbf{E}$ 在该点附近的旋转性质。

式(1.5)~式(1.8)组成微分形式的麦克斯韦方程组,用于求解空间某定点附近的电磁场矢量的问题。其中式(1.5)表示空间某一点磁通密度的变化可在该点周围产生一个环形电场;式(1.6)表示电位移矢量是由正电荷所在点向外发散或向负电荷所在点汇聚;式(1.7)表示磁场是无源场,没有起点和止点。对于式(1.8)则可以这样理解:环形磁场或可由传导电流 $\mathbf{J}$ 产生,或可由位移电流产生,亦可由两者合作同时产生。

1.1.2 物质方程

描述电磁场的普遍规律,除了麦克斯韦方程组之外,还要结合一组与电磁场所在空间媒质有关的方程,即物质方程

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1.9)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \quad (1.10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.11)$$

式(1.9)描述了 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{E}$ 之间的大小和方向的关系,其中 ϵ 称为物质的介电常数,该式可以进一步写成

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (1.12)$$

式中 $\epsilon_0 \approx \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \text{F/m}$,是真空的介电常数; $\mathbf{P}$ 称为电极化强度矢量,它表示在电场 $\mathbf{E}$ 的作用下,单位体积媒质中分子电偶极矩的矢量和。当电场符合“微扰原理”时,有

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (1.13)$$

其中 χ 称为媒质的电极化率。对于玻璃、空气等一类媒质, χ 是标量,可简写为 χ ,这类媒质称为各向同性媒质。于是式(1.12)可以写成

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 (1 + \chi) \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \quad (1.14)$$

其中, $\epsilon_r = 1 + \chi$ 是一个量纲为1的物质常数,称为相对介电常数。式(1.14)表明,对于各向同性媒质,相对介电常数 ϵ_r 和介电常数 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 都是与电场 $\mathbf{E}$ 无关的标量,因而 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{E}$ 的方向相同,大小成比例。

对于以晶体为代表的一类各向异性媒质, χ 是张量,因而电位移矢量 $\mathbf{D}$ 的方向和大小都与电场强度 $\mathbf{E}$ 有关。不妨仍写成类似于式(1.14)的形式,有

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1.15)$$