



普通高等教育“十二五”规划教材

物理光学导论

姜宗福 刘文广 侯 静 编著



 科学出版社

普通高等教育“十一五”规划教材

物理光学导论

潘承洞 潘承雄 潘承明 编著

清华大学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

物理光学导论

姜宗福 刘文广 侯 静 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

物理光学的内容非常广泛,本书针对光学工程、光电子技术等工科类本科专业对光学知识的基本要求,主要介绍经典物理光学内容和部分近代物理光学内容。书中以电磁场与光传输理论为基础,简洁而系统地讲述光的电磁波描述、光的偏振、光在介质界面的传输、光的干涉、光场的空间和时间相干性、光的衍射、傅里叶光学基本概念与光的信息处理、光的全息术、光在晶体中的传输,以及光的吸收、色散和散射等。

本书可作为工科光学工程、光电子技术等专业本科生的教材,也可作为光学工程等学科研究生和科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

物理光学导论/姜宗福,刘文广,侯静编著. —北京:科学出版社,2011
(普通高等教育“十二五”规划教材)
ISBN 978-7-03-032206-7

I. ①物… II. ①姜…②刘…③侯… III. ①物理光学-高等学校-教材
IV. ①0436

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 175336 号

责任编辑:刘鹏飞 潘斯斯 卜 新/责任校对:陈玉凤
责任印制:张克忠/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 7 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2011 年 7 月第一次印刷 印张:14 3/4

印数:1—3 000 字数:295 000

定价:29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

几百年来,几何光学和物理光学的理论及工程应用的各方面一直不断深入和发展。物理光学是描述光的传输、光与物质相互作用等物理过程本质的基础理论,其内容非常广泛:①以电磁场理论为基础的经典波动光学,包括光的干涉和衍射,光波导传输理论,光的吸收、色散和散射,经典晶体光学等;②以经典波动光学理论为基础的近代波动光学,包括近场光学、光学全息、傅里叶光学、波导光学等;③以经典光学、近代物理理论与现代技术相结合的现代光学,包括激光、光谱学、量子光学、非线性光学、微纳与材料光学等基础理论。

针对光学工程、光电子技术等工科类本科专业对光学基础的要求,结合光学工程专业物理光学学时较少的特点,编者根据近几年在国防科学技术大学光电科学与工程学院讲授物理光学过程中的体会,编写了《物理光学导论》一书。本书主要介绍经典物理光学内容,部分介绍近代物理光学内容,其中标注星号的部分可以只作为参考内容。

为使本科学生对历史上光的本质认知过程、光的物理理论建立过程有一个初步的了解,本书在引言部分按时间顺序对光学的发展进行简单的介绍。

第1章作为光的经典波动理论基础,主要介绍电磁场的麦克斯韦方程、电磁波的波动方程,给出波动方程的两个最基本解——平面波解和球面波解。通过平面波,引入描述电磁场的能量密度和能流密度、光强概念、光偏振等概念,光在光学介质界面传播时反射光和折射光的相位变化、偏振状态变化和能流的分配等特性的菲涅耳公式。同时,简要介绍光量子概念。

第2章介绍光的干涉现象及相关基础概念和应用,首先对光波的叠加原理和光波的独立传播原理进行介绍,在此基础上,给出光波场相干叠加的基本条件,引入描述光波场相干性的物理量——衬比度。分别介绍分波前干涉、分振幅干涉和多光束干涉的分析方法,以及典型干涉测量仪器的原理和实际应用。结合各种干涉装置讨论光场的空间相干性和时间相干性。

第3章介绍描述光波衍射现象的唯像理论和电磁场理论:惠更斯-菲涅耳衍射理论、基尔霍夫衍射理论。介绍菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射的概念和基本分析方法。结合圆孔夫琅禾费衍射,重点介绍成像仪器的分辨本领和光衍射极限等具有工程应用背景的重要概念。运用位移-相移定理讨论光栅衍射、光栅光谱仪和高衍射效率的闪耀光栅。

第4章以衍射理论为基础,通过分析薄透镜实现光波的相位变换规律,介绍傅里叶变换光学基本概念、阿贝成像原理、空间滤波、相干光信息处理、光学成像的频谱分析和光学全息等近代光学的基本概念和基础理论。

第5章介绍光波在非各向同性介质中传输的现象、分析方法、规律及其应用。主要

包括光的双折射现象、晶体光学中的波面、光在晶体中传输特性的惠更斯作图法,各种晶体光学器件及其应用,各种偏振光的产生和检验,偏振光干涉装置及其应用,旋光效应和电光效应。

第6章介绍光波在介质中传输时与介质相互作用产生的几种现象:介质对光的吸收、色散、散射。分别介绍吸收、色散和散射产生的物理本质、规律及其实际应用。

本书第1、3、4章由姜宗福教授编写,第2、6章由刘文广副教授编写,第5章由侯静教授编写;习锋杰和肖楠讲师编写了部分章的习题,实验员姜深理编辑制作了部分图片。

本书只涉及光学工程等相关工程类本科专业中物理光学内容的基础部分。书中不妥、错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2011年5月15日

目 录

前言

引言	1
0.1 17 世纪前的光学	1
0.1.1 古希腊人对光的认识	1
0.1.2 阿拉伯人对光学的贡献	2
0.1.3 中世纪的光学	2
0.1.4 16 世纪——文艺复兴的光学	2
0.2 17 世纪的光学	3
0.3 19 世纪的光学	3
0.4 近代光学	4
0.5 运动物体光学	5
第 1 章 电磁场与光传输理论基础	6
1.1 电磁场理论中的基本定律	6
1.1.1 电磁场理论中的基本定律与麦克斯韦方程	6
* 1.1.2 介质性质突变处的边界条件	11
1.2 电磁场波动方程与简谐光波	12
1.2.1 波动方程和光速	12
1.2.2 平面波和球面波	14
1.2.3 波函数的复数表示与共轭波	15
1.3 矢量简谐波与光的偏振	17
1.3.1 矢量平面波函数	17
1.3.2 电磁场的能量密度和能流密度	19
1.3.3 光的偏振性质	23
1.4 光子与电磁场谱	25
1.4.1 光子	25
1.4.2 电磁波谱	27
1.5 光波在介质界面的传播	28
1.5.1 介质界面的电磁波	29
1.5.2 菲涅耳公式	30
1.5.3 光强的反射率和透射率	33

1.5.4 界面反射光的相位变化	36
习题	41
第2章 光的干涉	43
2.1 光波干涉的基本概念	43
2.1.1 波的叠加原理	43
2.1.2 波叠加实现相干的基本条件	46
2.1.3 干涉场的衬比度	47
2.2 分波前干涉	49
2.2.1 普通光源实现相干叠加的方法	49
2.2.2 杨氏双孔干涉实验:两个球面波的干涉	50
2.2.3 光源宽度对干涉场衬比度的影响	53
2.2.4 光场的空间相干性	58
2.2.5 光场的时间相干性	61
2.2.6 分波前干涉装置及其应用	64
2.3 分振幅干涉	66
2.3.1 平行平板的等倾干涉	66
2.3.2 楔形板的等厚干涉	70
2.3.3 几种分振幅干涉仪及其应用	74
2.4 多光束干涉	80
2.4.1 平行平板的反射多光束干涉和透射多光束干涉	80
2.4.2 法布里-珀罗干涉仪及其特点	82
2.4.3 多光束干涉的应用	84
习题	87
第3章 光的衍射理论基础	90
3.1 惠更斯-菲涅耳原理	90
3.1.1 惠更斯原理	90
3.1.2 惠更斯-菲涅耳原理	91
3.2 基尔霍夫衍射理论简介	92
3.2.1 亥姆霍兹-基尔霍夫积分定理	92
3.2.2 平面屏衍射的基尔霍夫公式	94
3.2.3 巴比涅原理	95
3.3 近场衍射和远场衍射	95
3.3.1 球面波的傍轴近似和远场近似式	96
3.3.2 近场衍射——菲涅耳衍射	97
3.3.3 远场衍射——夫琅禾费衍射	98

3.4 单缝和矩孔的夫琅禾费衍射	100
3.4.1 单缝夫琅禾费衍射	101
3.4.2 矩孔夫琅禾费衍射	102
3.5 圆孔夫琅禾费衍射与成像系统的分辨本领	103
3.5.1 圆孔夫琅禾费衍射	103
3.5.2 成像仪器的分辨本领	104
3.6 光栅衍射	107
3.6.1 位移-相移定理	107
3.6.2 一维光栅	109
3.6.3 光栅光谱仪	112
3.6.4 闪耀光栅	115
3.7 菲涅耳衍射	117
3.7.1 菲涅耳衍射的波带方法	118
3.7.2 菲涅耳波带片	123
3.7.3 菲涅耳衍射的数值分析	125
习题	127
第4章 傅里叶光学基础	130
4.1 线性系统与波前变换	130
* 4.1.1 线性系统与线性变换	130
4.1.2 衍射系统与波前变换	132
4.2 薄透镜相位变换器与傅里叶光学变换	133
4.2.1 薄透镜的相位变换函数	133
4.2.2 透镜衍射的傅里叶变换性质	135
4.2.3 余弦光栅的衍射场	138
4.3 阿贝成像原理与空间滤波	139
4.3.1 阿贝成像原理	139
4.3.2 阿贝-波特实验与空间滤波	141
4.3.3 策尼克相衬显微镜	143
4.4 相干光信息处理简例	145
4.4.1 4F图像处理系统	145
4.4.2 图像的相加和相减处理方法	147
* 4.5 透镜相干成像的衍射分析	148
4.5.1 正透镜的点扩展函数	148
4.5.2 物像关系的衍射理论分析	150
4.5.3 相干成像系统的光学传递函数	151
* 4.6 非相干成像系统的频谱分析	152

4.6.1	非相干成像系统的强度传递函数	152
4.6.2	无像差系统的传递函数	154
4.6.3	像差对成像系统的影响	155
4.7	光学全息	156
4.7.1	全息术的基本原理	156
4.7.2	典型全息图	160
4.7.3	全息图应用简介	162
	习题	164
第5章	晶体光学	169
5.1	晶体双折射	169
5.1.1	双折射现象	169
5.1.2	单轴晶体中的波面	171
5.1.3	晶体中的惠更斯作图法	173
5.1.4	晶体双折射的四个重要情形	174
5.2	晶体光学器件	176
5.2.1	晶体偏振器	176
5.2.2	波晶片	178
5.2.3	晶体补偿器	180
5.3	圆偏振光、椭圆偏振光的产生和检验	182
5.3.1	通过波晶片后的偏振态分析	182
5.3.2	椭圆偏振光和圆偏振光的产生	183
5.3.3	偏振光的检验方法	184
5.4	偏振光干涉	185
5.4.1	单色偏振光干涉	185
5.4.2	显色偏振与偏振滤光器	188
5.4.3	偏振光的应用	190
5.5	旋光效应	191
5.5.1	自然旋光效应	191
5.5.2	法拉第效应——磁致旋光效应	194
5.5.3	旋光效应的应用	196
5.6	电光效应	198
5.6.1	泡克尔斯效应——线性电光效应	198
5.6.2	克尔效应——平方电光效应	199
	习题	201

第 6 章 光的吸收、色散和散射	203
6.1 介质对光的吸收	203
6.1.1 朗伯吸收定律	203
6.1.2 比尔吸收定律	204
6.1.3 对吸收系数的进一步说明	204
6.1.4 吸收光谱	205
6.2 介质对光的色散	206
6.2.1 正常色散和反常色散	206
6.2.2 色散和吸收现象的经典理论解释	208
6.2.3 波包的相速度和群速度	210
6.3 介质对光的散射	213
6.3.1 散射现象	213
6.3.2 瑞利散射	214
6.3.3 米氏散射	215
6.3.4 拉曼散射	216
习题	217
参考文献	218
附录 A 矢量分析	219
附录 B 傅里叶变换	221

引 言

物理光学是光学的重要内容,它从物理本质上对光学现象进行分析和理解。本书主要讲授经典物理光学内容,部分讲授近代物理光学内容。

物理光学研究光学现象的物理本质或物理原理。就本课程学习的内容而言,其基本理论在 1880 年前已经大体上形成了较完整体系。此后,由于量子力学的出现,光学经历了一场革命,尽管这场革命深深影响了人们对光的本性的理解,但早期的理论并没有失去作用。旧的原理和方法及其在诸多方面的应用,一直不断扩大,而且还在继续扩大,势头不减。

光学是最古老的物理学分支之一,在这里简要叙述人们对于光的本性认识发展过程中的几个主要里程碑。

0.1 17 世纪前的光学

0.1.1 古希腊人对光的认识

在 17 世纪之前,人们对光学现象只是只言片语的记载,还谈不上是科学。在埃及发现的希腊文稿中记载了许多光的幻觉现象。例如,太阳在地平线上比在近天顶时显得更大。

在希腊,阿里斯托芬在《云》(公元前 424 年)中描述了“用透明度极好的石头点火”的对话,把这种石头放在阳光下,人们就能够“通过某一种距离熔化那全部刻写”在蜡面上的“稿本”。

柏拉图学派曾经讲授过关于光的直线性、入射角和反射角相等的知识。公元 139 年,天文学家托勒密(Ptolemy)测量了入射角和折射角,他发现入射角和折射角成比例。

古代制造过金属镜。在《圣经·出埃及记》中记载,“窥镜”——(铜锡合金)铜锡比例为 38:8,在《圣经·约伯记》中记载为 37:18。在古埃及人的木乃伊墓中已发掘出这种镜子。希腊人对球形和抛物面形的镜子进行过探讨,在欧几里得(Euclid)的著作《反射光学》(Catoptrics)中探讨了反射现象,发现了关于球面镜焦点的最早论述,书中讲到了凹镜对准太阳时也能点火。在一份可能是特拉耳斯的安塞谬斯写的稿本“博比安瑟殊篇”(Fragmentun Bobiense)中,论证了抛物面形反射镜的聚焦性质。传说当罗马人包围叙拉古(Syracusae)时,阿基米德用具有聚光能力的反射镜,反射太阳光使敌船起火,来保卫城池,但这个故事可能是虚构的。

希腊人探讨过关于视觉的理论,按照毕达哥拉斯(Pythagoras)等人的说法,视觉是

由所见的物体射出的微粒进入眼睛引起的。柏拉图、欧几里得主张眼睛发射说,认为眼睛本身发射出某种东西,一旦这些东西遇到物体发出的别的东西就产生视觉。

0.1.2 阿拉伯人对光学的贡献

阿拉伯民族的成长在思想史中显得格格外壮丽。散居的部落在宗教的熔炉中突然融合为强大的民族。大约在公元8世纪开始,阿拉伯人把希腊的古典书籍翻译成阿拉伯文,自然科学成为人们爱好的研究课题。一般来讲,他们在创造性研究方面并不突出。只有阿勒·哈增在光学方面有独创性的贡献。哈增曾身居要职,由于犯了错误,在哈里发(Kaliph)面前失宠,一直佯装精神错乱并寻找避难处。其后以复制稿本维持生活,写了关于天文学、数学和光学方面的书。

哈增对反射定律做了研究,并加上了“这两个角都在同一个平面”的法则。对球面镜和抛物面镜做了深入研究。重复托勒密的工作,测量了入射角和折射角,并证明托勒密入射角和折射角之比是常数的说法是错误的,但没有给出正确的折射定律。他认为当太阳和月亮靠近地平线时,其直径显著增大是一种幻觉,是由于它们的大小是以地面物体的较小的距离来做估计造成的。这种解释今天仍流行,但没有普遍接受。

哈增是第一个详细叙述和描绘人眼的物理学家。今天普遍使用的眼睛一些部位的名称起源于他的拉丁文著作,如“网膜”、“角膜”、“玻璃状液”、“前房液”等术语。

0.1.3 中世纪的光学

13世纪欧洲人消化了阿拉伯人的光学知识,威特洛在哈增著作基础上,整理了一本精练而系统的光学著作。他把星星的闪烁解释为空气的运动所致,并证明若通过运动着的水观察星星,则星星的闪烁更为强烈。他指出虹霓是由于反射和折射共同作用形成的。

杰出的思想家罗吉尔·培根在他的书中提出一种设想的仪器的可能性,通过它眼睛“辨认出在相当远距离的最小的文字”。曾经存在一种说法,折射望远镜就是罗吉尔·培根发明的。

0.1.4 16世纪——文艺复兴的光学

文艺复兴时期光学的最大成就是发明了望远镜和显微镜。关于这两种神奇仪器的发明人,英意荷德等国都努力寻找证据,争取有利于自己同胞的决定。直到目前也没有足够证据肯定谁是最先的发明者。

伽利略是第一个把望远镜应用于天文观察和研究的人,用的望远镜也是他自己制造的。他改造望远镜,使之可以看到非常小又非常近的物体,即显微镜。开普勒的《折光学》(1611年)是最早尝试去阐明望远镜理论的著作,这需要有关折射定律的知识,他获得的近似经验表示,当以小角度 i 入射时,有 $i = nr$, n 是个常数,光线从空气射到玻璃时它等于1.5。这个值已准确到足以使他能够概括地建立关于望远镜的正确理论。

0.2 17 世纪的光学

(1)发现折射定律。斯涅耳在未公布的手稿中把折射定律叙述如下:在相同的介质里,入射角和折射角的余割之比总是保持相同的值。他用实验进行了验证。1637 年笛卡儿在他的《屈光学》一书中,假设不同介质光速不同,从理论上推导了这个定律,给出了现代书本中看到的折射定律的表达形式,他认为光本质上是一种压力,在一种完全弹性、充满一切空间的介质(即以太(ether))之中传播。

1657 年,费马在证明笛卡儿的假设时,提出了著名的最小时间原理:“自然界的行为永远以路程最短为准则。”由这一原理,在假设不同介质中“阻力”不同的条件下,可得到折射定律。

(2)光传播速度的发现。1675 年,罗麦(O. Romer)通过对木星卫星蚀的观测,发现了光的速度为有限,并被布拉德雷通过测量天体的光行差所证明。

胡克(R. Hooke)1665 年做出关于光的波动理论的粗略轮廓,他指出光是一种介质的快速振动,并以极大速度进行传播;他还进一步指出,发光体每一脉冲或振动将产生一球面波(every pulse or vibration of the luminous body will generate a sphere)。惠更斯(C. Huygens)提出了一个原理(惠更斯原理),用这一原理,他成功推导出反射定律和折射定律。他还说明巴托莱纳斯在 1669 年发现的冰洲石的双折射现象。在研究这些现象时,他还发现了光的基本现象——偏振。但当时认为光是纵波,不能理解光的偏振。

玻意耳(R. Boyle)和胡克各自独立发现了薄膜产生彩色的干涉现象(今天称之为“牛顿环”)。1666 年,牛顿发现用三棱镜可将白光分解成各种颜色,并且确定每一种纯颜色各由一个折射率来标志,颜色的基本性质才搞清楚。当时,牛顿提出了光是以微小粒子的形式从发光物体传播出来的,即微粒理论。由于当时的波动理论在光的直线传播和偏振方面无法解释,以及牛顿的权威,粒子学说占据主要地位,波动理论被摒弃,并停滞一个世纪。

0.3 19 世纪的光学

直到 19 世纪初,获得一些决定性的发现,人们开始普遍接受波动理论。1801 年,托马斯·杨(Thomas Young)迈出了第一步,他提出了干涉原理并对薄膜彩色做出解释。由于杨的见解大部分是定性的表达,没有赢得普遍承认。

与此同时,马吕斯(E. L. Malus)发现了反射光的偏振。1808 年的一天傍晚,他通过冰洲石晶体观察落日从窗户玻璃上的反射,发现当把晶体绕视线转动时,双折射产生的两个像的相对强度在改变。

而当时光的微粒学说拥护者(如拉普拉斯(P. S. Laplace)等),提出如何解释光衍射,将其作为 1818 年巴黎科学院有奖征文的题目,期望对这个题目的论述使微粒说获

得最后胜利。最后获奖者为以波动理论为其论述的作者——菲涅耳(A. T. Fresnel)。菲涅耳的主要思想是将惠更斯包络面作图法同杨氏干涉原理相结合,不仅能解释光的直线传播,还能解释光线的微小偏离——衍射现象。特别是泊松(S. D. Poisson)从这一理论推出了在小圆盘阴影中心应该出现一个亮的斑点,阿拉果(D. F. Arago)对此进行了实验验证。

1818年,菲涅耳还研究了地球的运动对光波传播影响的重要问题,这就是来自星源的光和地球上的光究竟有什么不同。阿拉果从实验上确定,它们没有什么不同。菲涅耳根据这些发现,发展了他的以太波物质部分漂移理论。他还和阿拉果一起研究了偏振光的干涉,并在1816年发现偏振方向相互垂直的两条光线从不干涉。这个事实,与光被认为理所当然为纵波的假设无法调和。杨从阿拉果那里听到了这个发现,他于1817年找到了解决疑难的钥匙:假设振动是横向的。菲涅耳立即理解到这个假设的全部意义,他尝试给它设置一个比较牢固的动力学基础,他从这个假设得到了许多结论。菲涅耳于1821年首先指出了色散的起因,他认为这要考虑物质的分子结构。他还从以太振动机构的动力学模型,推导了反射光线、折射光线的强度和偏振服从的定律——菲涅耳公式。

随后的数十年,是弹性以太理论的发展时期,人们以牛顿力学为基础,把以太看作弹性固体,来讨论光的性质。许多大物理学家都对它有过贡献,这个时期,许多光学问题得到了解决,但光学的基础还是不能令人满意。

几乎同时,电磁学的研究几乎独立于光学而发展着,法拉第(M. Faraday)的发现使它达到最高峰,麦克斯韦成功地把这个领域内所有前人的经验总结成一组方程,它最重要的一个结果是确定可能存在电磁波。科耳劳什(R. Kohlraush)和韦伯(W. Weber)对电磁波传播速度进行了测量,结果显示该速度与光速一致。麦克斯韦推测光波动就是电磁波,1888年赫兹直接实验证实了这个推测。尽管如此,麦克斯韦的电磁理论还是经历了长期的斗争才赢得普遍承认,包括麦克斯韦本人,就长期试图借助机械模型来描述电磁场。直到习惯了麦克斯韦理论之后,人们才逐渐放弃寻求用机械模型“解释”他的方程。今天,人们把麦克斯韦场看做是不能再简化的东西,在概念上没有困难了。

用电磁场理论能解释一切和光的传播有关的现象。然而,它不能说明光的发射过程和吸收过程。在这些过程中,物质和光波场相互作用的精细面貌被显现出来。

0.4 近代光学

近代光学是从发现光谱中的某些规律开始的。夫琅禾费(J. Fraunhofer)于1815年前后发现了太阳光谱中的暗线(夫琅禾费谱线);1861年,本生和基尔霍夫根据实验把这些暗线归属于吸收线。太阳本体是连续光谱,通过太阳大气的较冷气体时,由于吸收而失去的各个波长,正好是该气体所发射的波长。这个发现是光谱研究的开端。

光谱分析是基于每一种气态化学元素都具有一个特征的线光谱的认识。这些光谱的研究,一直到现在仍然是物理学研究的重要课题。原子光谱的结果为量子力学的发

展做出重要贡献。光谱分析也是今天分子材料研究的重要手段。

在研究方法方面,后来发现,经典力学不适用于描写原子内部发生的事件。玻尔将量子理论应用到原子结构,于1913年成功地解释了气体光谱的简单规律。

然而,关于光的本性的观念也大大受到了量子理论的影响。在最初的普朗克量子理论中,出现了和经典概念相反的命题,即一个电的振荡系统,它给予电磁场的能量并不是连续的,而是一定额,即“量子” $\epsilon = h\nu$ 的整数倍,它和光的频率 ν 成正比。其中, h 为普朗克常量,是近代物理区别于经典物理的标志。

量子理论使光的微粒理论在一种新形式下复活起来,主要是实验中发现的光电效应。爱因斯坦根据普朗克理论,假设能量量子作为实在的光粒子而存在,这种粒子叫“光量子”或“光子”,由此他成功地解释了光电效应。而这一效应运用光的波动理论无法解释,因为光的电磁场理论认为光的能量或强度正比于振幅。后来出现了许多肯定光的“光量子”特性的实验,结果使人们必须承认光的波动理论和微粒理论同时有效。这种离奇古怪、自相矛盾的状态,由于量子力学的发展才得到部分说明,但是这要抛弃旧物理学的一个基本原理,即决定论因果律原理。

场和物质相互作用的详细理论,需要把量子力学方法的领域加以扩大,场的量子化,这一工作首先由狄拉克完成,这些研究形成了量子光学的基础。量子光学最终以一门新学科脱颖而出,是由于1960年激光器的出现。激光器的发明,除提供一种研究量子光学的重要工具之外,还导致了大量的应用并产生若干新的学科领域,如量子电子学、非线性光学、光纤光学等。

【名家名言】The solution of the difficulty is that the two mental pictures which experiment lead us to form—the one of the particles, the other of the waves—are both incomplete and have only the validity of analogies which are accurate only in limiting cases. —Heisenberg

Every physicist thinks that he knows what a photon is, I spent my life to find out what a photon is and I still don't know it. —Einstein

0.5 运动物体光学

布雷德利1728年记载“恒量”光行差。菲涅耳探讨了运动物体造成的光漂移。多普勒研究了光源或观察者运动的影响,提出了一个著名原理——多普勒原理。爱因斯坦提出光速不变,建立了狭义相对论。

迈克耳孙干涉仪测量“以太网”速度,这个实验在物理学家当中引起惊愕,格雷兹布鲁克在1896年高喊道:“我们还期待着第二个牛顿给我们一个将要包括电和磁、光辐射,而且还可能包括万有引力在内的以太理论。”开尔芬在1900年讲过“两朵乌云”,它们掩蔽了“把光和热断定为运动形式的动力学理论的美丽和明晰”。这两朵乌云之一正是未能解释的迈克耳孙-莫雷实验。

第1章 电磁场与光传输理论基础

麦克斯韦电磁场理论是描述光的本质的经典理论。19世纪,麦克斯韦建立了描述电磁场变化规律的电磁场理论——麦克斯韦方程,该理论的一个重要结果是预言电磁波的存在,电磁波的传播速度与科耳劳什和韦伯由实验上测量得到的光速相同。随后赫兹实验证实光是电磁波的一种,光波的传播规律满足麦克斯韦方程。以电磁场理论为基础的光的波动理论,是光的相干与衍射、成像与分辨率、光的相干性、全息与光信息处理等经典物理光学基本概念和应用的基础。

根据现代量子电动力学理论,光是一种没有静止质量的能量“粒子”,即光子(photon),光的传播、光与物质的相互作用表现为波粒二象性,光子理论是现代光电子技术的重要理论基础。但这里,主要介绍以电磁场理论为基础的光传播理论和基本概念。

1.1 电磁场理论中的基本定律

电场和磁场(磁感应强度)是电磁场理论中最重要的两个物理量,光的性质由这两个量给出描述。电场 $\mathbf{E}$ 定义为:若电荷 q 在空间受到与其电量成正比的力 $\mathbf{F}_E$ 作用,则该处存在电场 $\mathbf{E}$,且满足 $\mathbf{F}_E = q\mathbf{E}$ 。同样磁场定义为:如果运动电荷 q 受到与其运动速度 $\mathbf{v}$ 成正比的力 $\mathbf{F}_B$ 作用,那么空间存在磁场 $\mathbf{B}$,满足 $\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 。电场由电荷和变化的磁场产生;电流和变化电场产生磁场。电磁场间的变化关系由四个基本的物理定律描述。

1.1.1 电磁场理论中的基本定律与麦克斯韦方程

1. 电场的高斯定理(Gauss's law for electric fields)

高斯定理是关于通量与产生通量的源之间的关系。描述电通量与产生通量的源(即电荷)之间的关系为电场的高斯定理:任何闭合曲面的电通量等于曲面中的净电荷除以介电常量

$$\oint_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint_V \rho dV \quad (1.1)$$

其体电荷分布中的净电荷为电荷密度对空间的体积分(图1.1),真空中的介电常量(permittivity of free space) $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ 。在真空中静电荷为自由电荷,在介质中静电荷包括自由电荷和极化电荷。为了方便,在介质中引入介质介电常量为 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ (ϵ_r 为相对介电常量(relative dielectric constant)),在式(1.1)右边只包含自由电荷,则介质中电场的高斯定理为

$$\oint_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon} \sum q = \frac{1}{\epsilon} \iiint_V \rho dV \quad (1.2)$$