

光学

GUANG XUE

陆 慧 编著



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

光 学

陆 慧 编著



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

光学/陆慧编著. —上海:华东理工大学出版社,

2014. 10

ISBN 978-7-5628-4020-6

I. ①光… II. ①陆… III. ①光学—高等学校—教材
IV. ①O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 202134 号

光 学

编 著 / 陆 慧

责任编辑 / 李国平

责任校对 / 成 俊

封面设计 / 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电 话: (021)64250306(营销部)

(021)64252344(编辑室)

传 真: (021)64252707

网 址: press.ecust.edu.cn

印 刷 / 上海展强印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 14

字 数 / 339 千字

版 次 / 2014 年 10 月第 1 版

印 次 / 2014 年 10 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-4020-6

定 价 / 35.00 元

联系我们: 电子邮箱 press@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

淘宝官网 <http://shop61951206.taobao.com>



本书以作者在华东理工大学物理系多年讲授光学课程的讲稿为基础,参考和借鉴了大量国内外优秀的基础光学教材和相关文献资料,并结合作者个人教学及研究的体会撰写而成。

光学是物理学重要的分支学科,光学也是一门应用性极强的基础学科。光学古老而年轻,经典光学的内容极为丰富,而现代光学的迅速发展又为传统光学的基本原理赋予新的形式和内涵,光学的各个部分各自形成了现代的体系,延伸了众多的子学科及光学新技术。尤其近 40 年光学理论和技术的飞跃式发展,使它以崭新的面貌在物理学和现代科学技术的各个领域特别引人注目。

作为大学基础物理课程系列中的一门,光学又与其他基础课程有所不同。一方面,光学课本身所需要的基础理论及使用的数学方法往往要在后继课程中学习(例如电动力学、原子物理和量子力学、数学物理方法等),对于已经稔熟力学、热学和电磁学等经典物理的学生来说,光学表现得不那么“经典”,无论是几何光学还是波动光学,都要用到不少近似的处理方法;另一方面,光学课程内容丰富而复杂,包含了几何光学、波动光学和量子光学基本知识三大部分,其主要概念“光线”、“光波”、“光量子”反映了光在不同条件下所表现出的不同特性,看起来各自独立,采用不同的处理方法,但是内容却又相互渗透、相互关联,容易使学生感到多而杂、缺乏系统性。

基于上述光学课程的特点,加之各院校不同的专业背景,目前的许多基础光学教材均有各自的特色,在内容和体系编排上各有侧重。编者以为,一本基础性强、全面系统而又准确简洁地阐述传统光学基本原理的教材,对于初学者认识理解光学主要线索、入门光学科学殿堂,是非常需要的,也是最根本的。本书以上述观点为编写宗旨,力求遵循基础光学课程的特点,从光学现象出发,系统和透彻地讲清楚光学基础知识、基本光学原理及其应用。既不刻意追求纯理论体系的完整,尽力避免繁杂的数学推导,也不回避对一些重要的原理做较为详细的解析处理。既与前期所授力学、热学、电磁学以及后继近代物理等课程的物理思想密切相关,同时也结合光学技术实际,尽可能在基础理论中联系一些现代光学的课题和概念,并综合兼顾物理类、光电信息类和光学工程类各专业的学科特色及课程要求。为学生后续专业课程的深入学习和研究工作打下坚实的基础。

全书围绕光的本性这一内在主线,分为光的传播行为和光与物质的相互作用两大部分。

力求内容精选、主线清晰、概念透彻,体系结构完整合理。首先在几何光学部分用光线近似的方法讨论光的传播与成像理论,并在此后章节中从不同角度论证几何光学是波动光学的极限情况。波动光学是传统物理光学的主要内容,也是基础光学教材的核心,作为本书重点,将以光的电磁波理论为基础,用波的叠加原理贯穿始终,系统阐述光传播过程中的干涉、衍射、偏振、双折射等。根据具体情况做不同的近似处理,简洁数学运算,强调清晰的物理图像和物理思想;注重光学基本概念的准确描述,对各种干涉、衍射图样的物理过程及特征也作较为详细的解析讨论。在衍射中用叠加原理更精细的形式惠更斯-菲涅耳原理进行分析和计算,并结合现代光学,将傅里叶变换及频谱概念融入其中;在偏振问题中,将详细讨论双折射导致的偏振态改变、介绍晶体光学基础及应用。而对光与物质的相互作用部分,以经典电磁场理论分析作为基础,介绍光的量子性质,解决波动理论所遇到的困惑,阐述对光的本性更为深刻的认识。

作者在此要感谢龚尚庆教授、罗有华教授和张先梅教授对本书编写一直给予的关心和支持,感谢罗锻斌副教授、林功伟博士、还有研究生毕寒在本书编写中给予的帮助。

限于作者的学识和水平,书中难免错误和疏漏之处,敬请使用本书的读者不吝指正。

编 者

2014 年 3 月

绪论	1
0.1 光是什么——历史的简单回顾	1
0.1.1 光的微粒说	1
0.1.2 光的波动说	1
0.1.3 光的波粒二象性	2
0.1.4 现代光学时期	3
0.2 光学研究范畴、特色与现代进展简述	3
0.2.1 光学研究范畴	3
0.2.2 光学的特色与现代进展简述	4
第1章 光的传播	6
1.1 光源与光谱	6
1.1.1 光源	6
1.1.2 光谱	7
1.2 光的几何光学传播规律	8
1.2.1 光线传播的实验规律	8
1.2.2 全反射	10
1.2.3 棱镜与色散	12
1.3 费马原理	13
1.3.1 光程	14
1.3.2 费马原理	14
1.4 惠更斯原理	17
1.4.1 波的几何描述	17
1.4.2 惠更斯原理	17
1.5 光度学基本概念	18
1.5.1 光的电磁理论基础	18
1.5.2 辐射通量和辐照度	20
1.5.3 视见函数	21
1.5.4 光通量和光照度	21

习题	22
第 2 章 几何光学基础	23
2.1 成像基本概念	23
2.1.1 物和像	23
2.1.2 物方和像方 物像之间的共轭性	24
2.1.3 物像之间的等光程性	24
2.2 单球面上的傍轴成像	24
2.2.1 傍轴条件	24
2.2.2 傍轴(单)球面折射的物像公式	26
2.2.3 单球面反射	28
2.2.4 傍轴物点成像的放大率 拉格朗日-亥姆霍兹定理	28
2.3 薄透镜成像	30
2.3.1 薄透镜物像公式	31
2.3.2 薄透镜成像作图法	33
2.3.3 透镜组成像	35
2.4 理想共轴球面系统(理想光具组理论)	37
2.4.1 理想成像与共线变换	37
2.4.2 基点和基面	37
2.4.3 物像关系	39
2.4.4 共轴球面系统的组合	40
2.5 几何光学仪器	42
2.5.1 眼睛	42
2.5.2 放大镜和目镜	44
2.5.3 显微镜	45
2.5.4 望远镜	46
2.5.5 投影仪和照相机	47
2.6 光阑与像差	48
2.6.1 光阑	48
2.6.2 像差概述	49
习题	54
第 3 章 光的干涉	56
3.1 波的叠加与干涉	56
3.1.1 波的叠加原理	56
3.1.2 干涉现象与相干条件	57
3.1.3 干涉条纹的可见度	60

3.1.4 相干光的获得	61
3.2 分波前干涉	62
3.2.1 杨氏实验	62
3.2.2 其他分波前装置	66
3.2.3 光场的空间相干性和时间相干性	68
3.3 分振幅干涉——薄膜干涉	72
3.3.1 等倾干涉	72
3.3.2 等厚干涉	77
3.3.3 增透膜与增反膜	81
3.4 迈克耳逊干涉仪	82
3.4.1 干涉仪结构和原理	83
3.4.2 干涉条纹	83
3.5 多光束干涉和法布里-珀罗干涉仪	85
3.5.1 分波阵面法获得的多光束干涉	85
3.5.2 分振幅法获得的多光束干涉	87
3.5.3 法布里-珀罗干涉仪	89
习题	93
 第4章 光的衍射	 97
4.1 衍射的基本原理	97
4.1.1 光的衍射现象	97
4.1.2 惠更斯-菲涅耳(Huygens-Fresnel)原理	98
4.1.3 巴比涅原理	100
4.1.4 衍射的分类	100
4.2 菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射	101
4.2.1 实验现象	101
4.2.2 菲涅耳半波带法	102
4.2.3 矢量图解法	104
4.2.4 菲涅耳波带片	105
4.3 夫琅禾费单缝衍射	108
4.3.1 实验装置和现象	108
4.3.2 单缝衍射的光强分布	109
4.3.3 单缝衍射因子的讨论	115
4.4 夫琅禾费圆孔衍射 光学仪器的像分辨本领	116
4.4.1 夫琅禾费圆孔衍射	116
4.4.2 光学成像仪器的分辨本领	119
4.5 多缝夫琅禾费衍射	122

4.5.1	实验装置和衍射图样	122
4.5.2	强度分布公式	123
4.5.3	缝间干涉因子的特点	124
4.5.4	单缝衍射因子的作用	125
4.6	衍射光栅	126
4.6.1	光栅的分光性能	126
4.6.2	闪耀光栅	130
4.7	X 射线衍射简介	131
4.8	全息照相简介	132
4.8.1	全息记录	133
4.8.2	全息再现	133
4.8.3	全息照相的特点	134
4.9	傅里叶光学概述	135
	习题	135
第 5 章 光的偏振 晶体光学基础		138
5.1	光的偏振态	138
5.1.1	完全偏振光(线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光)	138
5.1.2	非偏振光——自然光	141
5.1.3	部分偏振光 偏振度	142
5.2	偏振片的起偏与检偏	143
5.2.1	偏振片的作用机制	143
5.2.2	偏振片对不同偏振态的光强响应	144
5.3	光在界面上反射折射时偏振态的改变	147
5.3.1	菲涅耳公式	147
5.3.2	反射光与折射光的振幅比	149
5.3.3	反射光与折射光的相位变化	150
5.3.4	反射光与折射光的偏振态	153
5.3.5	玻璃片堆和布儒斯特窗	153
5.4	单轴晶体的双折射	154
5.4.1	双折射现象及基本规律	154
5.4.2	单轴晶体中点光源的波面	156
5.4.3	平面波在单轴晶体中的传播——惠更斯作图法	157
5.5	晶体光学器件	159
5.5.1	晶体偏振器	159
5.5.2	相位延迟器——波晶片和补偿器	161
5.6	圆偏振光和椭圆偏振光的获得与检验	164

5.6.1 光通过波晶片后偏振态的变化	164
5.6.2 圆偏振光和椭圆偏振光的获得	164
5.6.3 圆偏振光和椭圆偏振光的检验	165
5.6.4 光偏振态的检验	166
5.7 偏振光干涉	167
5.7.1 平行偏振光干涉	167
5.7.2 会聚偏振光的干涉	169
5.8 人工双折射及其应用	170
5.8.1 应力双折射	170
5.8.2 克尔效应	171
5.9 旋光现象	171
5.9.1 旋光现象与实验规律	171
5.9.2 菲涅耳对旋光现象的解释	172
习题	174
第6章 光的吸收、色散和散射	177
6.1 光的吸收	177
6.1.1 光的吸收定律	177
6.1.2 一般吸收与选择吸收	178
6.1.3 吸收光谱	179
6.2 光的色散	180
6.2.1 色散概念 三棱镜的色散率	180
6.2.2 正常色散与反常色散	181
* 6.2.3 色散的经典理论解释	182
6.3 光的散射	185
6.3.1 光的散射现象	185
6.3.2 瑞利散射	185
6.3.3 米氏散射与大粒子散射	187
6.3.4 自然界的散射现象	188
6.3.5 拉曼散射	188
习题	190
第7章 光的量子性	191
7.1 单色辐射出射度和吸收比 基尔霍夫定律	191
7.1.1 热辐射和发光	191
7.1.2 单色辐射出射度和吸收比	192
7.1.3 基尔霍夫定律	193

7.2 黑体辐射实验规律	193
7.2.1 绝对黑体	193
7.2.2 黑体辐射实验规律	194
7.2.3 维恩公式和瑞利-金斯公式	196
7.3 普朗克能量子假设与普朗克公式	197
7.4 光电效应 光子	199
7.4.1 光电效应及其实验规律	199
7.4.2 光电效应与波动理论的矛盾	201
7.4.3 爱因斯坦的光子假设和光电效应方程	201
7.5 康普顿效应	201
7.5.1 康普顿效应及实验规律	201
7.5.2 康普顿效应的量子解释	202
7.6 光的波粒二象性	204
7.6.1 光的粒子性	204
7.6.2 光的波粒二象性 德布罗意波	204
7.6.3 波粒二象性的统计解释	206
7.6.4 概率波与概率幅 不确定关系	206
7.6.5 光的本性	209
习题	209
习题参考答案	211
参考文献	213

0.1 光是什么——历史的简单回顾

“光是什么?”这是光学发展至今,人们一直在努力探索的问题。光学发展的历史也是对光的本性认识的历史。下面做一个简略的回顾。

0.1.1 光的微粒说

光的微粒说的代表是英国科学家牛顿(I. Newton)。1704年牛顿在其出版的重要著作之一《光学》一书中,提出光是从发光物体发射出来的作高速运动的一种非常细小的粒子,每个粒子可看成一个质点,遵守质点运动的规律。光的微粒说很自然地解释了光在均匀介质中的直线传播特性。如果假定光在水中的速度比空气中大,用微粒说也能容易地解释光的反射和折射现象。

1679年,荷兰物理学家惠更斯(C. Huygens)提出了光的波动理论。他认为光是在充满整个空间的特殊介质“以太”中传播的某种弹性波。用波动说也顺利地解释了光的反射和折射定律,但得出光在介质中的速度小于空气中的速度的推论,用波动说还能解释方解石的双折射现象,并且发现了光的偏振性。微粒说与波动说各有长短,争论不休。牛顿的巨大声望以及微粒说的直观易接受,使得光的微粒理论在整个18世纪占据统治地位。

0.1.2 光的波动说

惠更斯的波动说只是相当粗略地指出光的波动性。1801年,英国科学家杨氏(T. Young)用著名的双孔干涉实验,证明了光的波动性。为光的波动理论奠定基础的是德国物理学家菲涅耳(A. J. Fresnel),他吸收了惠更斯球面子波思想并补充以干涉原理,提出波的传播应看成是波面上各点相继发出的一系列球面次级子波互相叠加和干涉的结果,从而解释了在圆孔、直边、狭缝等物体边缘存在的光的绕射或衍射现象。菲涅耳的理论还完满地解释了光波的直线传播性。最为奇妙的是,根据菲涅耳的理论计算,可以预见在一块不透明圆板的阴影中心仍然有个亮点,实验确证了这个似乎不可理解的结论。

尽管波动理论曾受到严厉的攻击,但由于杨氏和菲涅耳等孜孜不倦的实验和理论工作,加之光速测定实验提供的重要依据,到19世纪中叶,光的波动说理论已占上风,逐步发展起来的波动光学体系已初步形成。

对光的本性的进一步认识,即光是一种电磁波的认识,是在19世纪后叶建立的。当时

物理学中的另一分支学科——电磁学已发展得十分成熟。英国科学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)总结了一系列电磁学实验及相应的定律后,建立了著名的麦克斯韦方程组,从理论上预言了电磁波的存在,即变化的电场和磁场将以波的形式向周围传播,其在物质中的传播速度可以由该物质的电学和磁学常量予以确定,通过计算得出电磁波在空气中的传播速度与当时测得的光的传播速度相同。麦克斯韦大胆预言:光波就是电磁波,它是一种以波的形式通过以太传播的电磁扰动。麦克斯韦关于电磁波的预言,由赫兹(H. R. Hertz)的实验所证实。

到19世纪末,人们已确认:光是一种具有极高频率的电磁波,以极快的速度传播,在其传播过程中所产生的各种现象,如干涉、衍射、偏振等,按照光的电磁波理论可获得完善的解释。当然,光的波动说还面临着一个问题:如何证实光波传播介质“以太”的存在?这个问题使人们困惑了许久。1887年,美国人迈克耳逊(A. A. Michelson)和莫雷(E. W. Morley)用干涉仪测“以太风”给出了否定的结果,从而动摇了作为光波(电磁波)载体的“以太”假说,以“静止以太”为背景的绝对时空观遇到巨大挑战。1905年,爱因斯坦(A. Einstein)提出了狭义相对论,从根本上否定了“以太”的存在,他认为电磁场本身就是物质存在的一种形式,它可以在真空中以波的形式传播,具有确定的传播速度 $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$,与光源或观察者的运动状态无关。

光是什么的问题似乎已有了明确的答案:光是电磁波,它可以在真空中传播。

0.1.3 光的波粒二象性

20世纪初期是物理学取得划时代进展的年代,其标志就是相对论和量子力学的建立,而在这两个理论的诞生过程中,光学扮演了极其重要的角色。

如上所述,利用光的干涉效应探测地球相对“以太”运动的迈克耳逊-莫雷实验及其“零结果”,对爱因斯坦建立相对论起了重要的佐证作用。

另一方面,光学的研究已经从光的传播深入到光的发射、吸收、光与物质相互作用的微观机制中,人们却困惑地发现许多问题是无法用电磁波理论加以解释的。其中最著名的是黑体辐射能量的光谱分布研究结果与经典物理学理论的矛盾。为解释这一问题,德国科学家普朗克(M. Planck)于1900年首先提出了“量子化”概念,认为各种频率的电磁波(包括光波)只能以一定的能量子方式发射,能量子是不连续的。关于光子的概念是由爱因斯坦进一步明确和完善的。当时的另一个重要发现是“光电效应”,即光照射在金属表面上可使电子逸出,逸出电子的能量与光的强度无关,而依赖于入射光的频率。1905年爱因斯坦提出了杰出的光量子理论,圆满地解释了光电效应,并为后来的康普顿效应等许多实验所证实。这里所说的光子已经完全不同与牛顿时期的粒子概念。光子是和光的频率相联系的。每个光子的能量 E 与光的频率 ν 成正比, $E = h\nu$, 其中 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 称为普朗克常数。

光的本性究竟是什么?这一问题再次摆到人们的面前。一方面,在与光的传播特性有关的一系列现象中,如光的干涉、衍射和偏振以及运动物体的光学现象等证实了光是电磁波;另一方面,在光与物质相互作用过程中,如热辐射、光电效应、光谱学效应以及光的化学作用等又表明了光的量子性(粒子性)。如何将光的本性的两个完全不同的概念统一起来,人们进行了大量探索。1924年,法国科学家德布罗意(L. V. de Broglie)提出了物质波概念,他大胆地设想每一物质粒子的运动都与一定波长的波动相联系。1927年,戴维逊(C. J.

Davisson)和革末(L. H. Germer)的电子衍射实验很快证实了电子具有波动性。事实上,不仅仅是电子、质子、原子和分子,其他物质粒子都具有与它自己的质量和速度相联系的波动性的特征。亦即,不仅光具有波动性和微粒性,一切习惯概念上的实物也同样具有这两种性质。德国科学家玻恩(M. Born)提出了物质波的“几率假设”,建立了波动性和微粒性之间的联系。此后,海森堡(Heisenberg)、薛定谔(Schrödinger)、狄拉克(Dirac)和玻恩(M. Born)等建立了量子力学,其中波动性和粒子性在新的形式下得到了较圆满的统一。

现在,我们对光的本性的认识应该是:光和实物一样,是物质的一种,具有波粒二象性,这是一切量子现象的基本属性。动量为 p 的光子(或粒子),具有波长为 λ ,其关系为: $p=h/\lambda$ 。波动性和粒子性反映了光在与不同物质相互作用时所表现出来的不同特性,任何经典的概念都不能完全概括光的本性。

至今,我们仍不能说光本性的问题已经彻底解决。对于波动性和粒子性之间的辩证关系,人们仍然缺乏一目了然的形象,对于光的本性的认识也还远远没有达到最后的境地。甚至在某些新发现的现象面前,人们依然万分惊奇。例如,近代实验已发现,波长不大于 0.001 nm 的光子(γ 射线)在强电场中可变成两个带相反电荷的质点——电子和正电子,这一现象无疑显示着光与实物之间的深刻联系。因此,随着现代光学的发展及其科学技术的进步,人们对光的本性的认识还会不断完善和深入,新的现象、新的理论正等待着人们去探索和发展。

0.1.4 现代光学时期

现代光学一般认为起源于 20 世纪中期。从 1935 年荷兰光学家泽尼尔(F. Zernike)提出相衬原理开始,1948 年伽伯(D. Gabor)全息术的提出,以及 1955 年光学传递函数理论的建立,特别是 1960 年激光器的问世,促使光学学科迅速进入现代光学阶段。激光具有普通光源所无法比拟的高强度和高相干性(高单色性及高方向性),它的发明结合了波动光学和量子光学理论,它的诞生和发展不仅使光学学科本身发生了深刻的变化,也促进了原子和分子物理学的复兴,而且光学研究及应用在许多方面达到了全新的阶段或开辟了全新的领域,产生并继续产生着一系列新的学科分支。

现代光学以量子光学、激光理论与技术、非线性光学、以及现代光学信息处理技术与光电子技术等为标志,它们多是综合性很强的交叉学科。在现代光学阶段,人们更深刻地认识到光的基本属性是波粒二象性,量子电动力学理论能够对光场的波动-粒子二象性给出较为严格合理的表述,并经受了一系列精确实验的检验,仍是现代光学的理论基础。

0.2 光学研究范畴、特色与现代进展简述

0.2.1 光学研究范畴

光学研究范畴包括光的本性、光的传播以及光与物质相互作用的规律及其应用。在基础光学中,常根据研究问题的不同出发点,将光学分为几何光学和物理光学,后者又可分为波动光学和量子光学。

当光与尺度比光的波长大得多的宏观物体相互作用时,可以用光线概念来描述和研究光的传播、处理光的成像问题,由此构成几何光学,其基本实验定律是关于光线的直进、反射、折射等定律,这些定律可以看做是一个更为普遍的原理——费马原理的必然结果。几何光学是一个关于光的唯象理论,但在现代光学系统的设计方面起着不可替代的作用。

当光与介观尺度的物体,即尺度与其波长相比拟的物体相互作用时,则表现出典型的波动特性。例如,当光通过极细小的缝或孔时,会产生衍射效应。波动光学就是将光看成是在空间连续分布的波动,是电磁波,从麦克斯韦电磁场理论出发,可以解决光的干涉、衍射、偏振等问题,以及描述光与物质的相互作用,如散射和色散等现象。当然,也可以用波动理论来解决光的直线传播、反射、折射成像等几何光学领域的问题。事实上,几何光学就是波动光学在其波长相对可视为极短(衍射效应可以忽略)时的极限情况。波动光学是经典光学的核心内容,传统划分上的物理光学主要是指波动光学,这也是本书的重点。

在分析光的发射、吸收以及某些在物质的微观结构起重要作用的光学现象,即光与物质的相互作用在原子、分子尺度上的表现时,则需要用光的量子理论,将光场看成量子化的光子群,严格而全面地描述许多光学现象。而在波动光学适用的范围内量子光学亦会给出同样的测量结果,因为光同时具有波动性和粒子性。只是在某些实验条件下用光的波动性可以满意地解释观察到的现象,或者说,在大量实际问题中光的粒子性并不起显著作用。并且,量子光学需要更多的数学、物理基础,因此在基础光学阶段,波动光学是核心内容。

综上所述,我们称光为光线、光波、光量子,既反映了在不同的历史阶段人们对光的认识,也反映了光与不同尺度的物体作用时所表现出的截然不同的特性。可以这么认为,它们是为了研究光而引入的不同物理模型,以这些物理模型为基本假设和出发点,分别建立了几何光学、波动光学和量子光学,它们是光学的重要分支,也构成光学的基本内容。

0.2.2 光学的特色与现代进展简述

光学是人类自然知识体系中一门古老而又年青的学科。光学是古老的,几何光学中光的直线传播是古代欧几里德几何学的物理基础,传统光学经千锤百炼,内容丰富、经典;光学又是年轻、极富生命力的,尤其是激光的问世,使光学以前所未有的规模和速度发展成为当今的前沿科学,现代光学世界更加绚丽多姿。

光学除了是物理学中一门重要的基础学科外,它又是一门应用性极强的学科,光学的每一部分几乎都与现代技术相联系。现代光学的迅速发展是建立在传统光学基础上的,同时它又给传统光学内容和基本原理赋予新的形式、增添新的内涵。

几何光学本来就是为设计各种光学仪器而发展起来的专门学科,现代高速计算机为复杂光学系统的设计和提高光学设计的质量创造了条件,从而产生了一系列高质量的性能卓越的光学系统,如各种非球面消像差成像镜头、精密微缩镜头等。

波动光学的应用十分广泛。光的干涉至今仍然是各种光学元件的检测中最精密和无可替代的方法。根据衍射原理制成的光栅光谱仪,在分析物质微观结构(原子、分子结构)和化学成分等方面起着最为重要的作用。

近 50 年来,人们将数学技术和通信理论与光的衍射结合起来,形成了傅里叶光学,由此引入的空间滤波和频谱概念为现代的光学信息处理、图像识别、像质评价、相干光学计算机以及综合孔径雷达技术等奠定了基础。

激光科学技术的发展标志着人们掌握利用光进入一个新的阶段。激光的出现带来了许多光学新技术的开拓和迅速发展,如光纤通信、光计算机、集成光学、光电子学等。激光技术已广泛应用于材料加工、精密测量、通信、测距、全息检测、医疗、激光武器、激光制导以及激光核聚变等各个方面,也极大地改变了我们的生活。

激光具有优良的单色性以及可以获得超短的光脉冲,使得人们可以利用激光对经典的原子、分子光谱学的数据进行重新测量,而获得更高的精度,并发展成了新的“激光光谱学”,其高精度、高频域分辨和高时空分辨的特点,使它成为目前研究物质微观结构和转换机制的重要手段,也为分子生物学和化学动态过程的研究提供前所未有的方法。在光学领域本身,高强度激光与物质作用产生的非线性光学效应,如光的倍频、混频、自聚焦、光学双稳态开关效应等,这方面的研究,形成了另一分支——“非线性光学”,这是当前发展的许多光学新技术的基础。激光冷却技术证实了凝聚物质以及宏观量子规律的存在;光场压缩态则在量子通信和量子计算机等领域显示出广泛的应用前景;超短脉冲激光使人们得以用很低的脉冲能量获得极高的峰值光强,并在飞秒级时间分辨率下研究物理、化学、生物学、光电子学等学科中各种超快速演变的瞬态过程。在许多情况下,超快和超强正在根本地改变激光与物质相互作用的机制,也促进着人们对光的本性更深入的探索 and 认识。

最后,让我们重新回到光的本性问题上。

光是具有极高频率的电磁波,光学学科所包含的研究范围从远红外光到真空紫外光并延伸到软 X 射线。光波可以作为信息载体而远距离传输信息,即光通信,利用“光的压缩态”,甚至可以把噪声降低到量子极限以下,从而大大提高光通信的效率,并可能检测到引力波的信号。光波作为信息的载体有其特殊的灵活性,它不仅可以进行强度调制,还可以进行偏振态调制、相位调制以及二维空间调制。基于激光的“光信息处理”研究,在航天技术、军事及社会生活中获得重要应用。

光子与电子都是具有能量和动量的微观“粒子”,它们都可以与其他物质相互作用而交换其能量和改变其动量,它们之间存在着一定的相似性。但它们又是截然不同的实体,它们分别服从不同的统计分布规律。电子具有静止质量并带有电荷,而光子静止质量为零并且是电中性,等等。光子可以像电子一样与物质相互作用,成为探测物质内部微观信息的一种极为灵敏的“探针”,并显示出其独特的优点。如:利用超短光脉冲可以探测物理、化学或生物学中的超快速演变过程。光子“探针”所研究对象不必放置在真空中,所以具有更普遍的应用性。光子探针仪器和电子探针仪器相辅相成,成为人类研究微观世界的重要工具。事实上,一门与电子学相并行的学科——光子学正在迅速发展,其在承载信息的速度和容量方面,显示了突出的优点。相应光子技术和光子工业的发展将与电子技术和电子工业一样为人类社会创造巨大的财富。

人类对光的本性的认识从原始朴素的微粒说到波动说,再到新的光子说和波粒二象性,其发展过程遵从辩证规律。光学的发展历史内容丰富、精彩纷呈,无处不闪耀着人类的智慧和 innovation。光学学科的生命力如此旺盛顽强,对现代物理学和整个科学技术的发展都有着重大的贡献,而其未来则更显示出诱人的前景。

在研究光的传播问题时,我们习惯将光称为“光线”或“光波”,这正好代表了光学的两大分支:几何光学与波动光学。前者忽略了光的波动性,即相当于光波长 $\lambda_0 \rightarrow 0$ 的极限情况,其前提是,在光的传播方向上障碍物(如狭缝、小孔、透镜的孔径等)的几何尺寸远大于光的波长。由此可以得到光传播定律的良好一级近似,在这种近似处理下,人们可以根据基本实验定律,借助几何学的方法,来研究光在透明介质中的传播问题,光学定律可以用几何学的语言来表述,通常称为“几何光学”。后者根据光的电磁波本性,用麦克斯韦电磁场方程组来描述光的传播,建立严格的波动理论,称之为“波动光学”,这也是传统经典光学的主题。

本章首先从几何光学和波动光学两个方面介绍光传播的基本实验规律,以及光源、光度学基本概念。

1.1 光源与光谱

1.1.1 光源

任何发光物体都可以称之为光源。太阳是人们最熟悉的天然光源,而生活中的各种灯是人造光源,在科学研究和生产实际中,还有各种形式多样的特殊的人造光源,如各种电弧和气体辉光放电管等,1960年发明的激光则是一种前所未有的崭新光源,具有一般光束无法比拟的单色性、方向性和高功率。

光是一种电磁辐射,需要不断的能量补充来维持其发射,物体发光过程就是一个能量转换的过程,按照转换方式(能量提供方式)的不同,可以将光源分为以下两大类。

1. 热辐射光源

通过加热物体使其维持一定的温度,物体就会持续发光,包括红外、紫外等不可见光。在一定温度下处于热平衡状态的物体的辐射,称为热辐射或温度辐射。太阳就是最大的热辐射光源,还有钨丝白炽灯、钨卤灯等都是热辐射光源。

2. 非热辐射光源

非热辐射光源又称冷光源,有很多种类。一类是气体放电光源,即电流通过气体(包括某些金属蒸气)引起放电而发光,这是依靠电场补充能量的过程,称电致发光,如汞灯、钠灯、氙灯、金属卤化物灯、空心阴极灯等。另一类是固体发光光源,如场致发光和发光二极管等,前者指固体在电场作用下将电能直接转化为光能的发光现象(也称电致发光),后者是一种