



普通高等教育“十三五”规划教材

物理光学基础教程

Fundamental Concepts of Physics Optics

刘娟 胡滨 周雅 © 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



普通高等教育“十三五”规划教材

物理光学基础教程

Fundamental Concepts of Physics Optics

刘娟 胡滨 周雅 ◎ 编著

内 容 简 介

本书的主要内容为波动光学和量子光学基础。重点叙述了光的电磁波理论基础、光的干涉、光的衍射和光的偏振,也简述了半经典的量子理论和激光器的基本原理。

本书可作为高等院校光电工程类专业的基础课教材,也可供相关专业的师生或科研人员阅读。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

物理光学基础教程 / 刘娟, 胡滨, 周雅编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2017.2
ISBN 978-7-5682-3567-9

I. ①物… II. ①刘… ②胡… ③周… 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 317562 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 21.5

字 数 / 502 千字

版 次 / 2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 52.00 元

责任编辑 / 李秀梅

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

物理光学是揭示光波的本性和规律及其应用和造福于人类的一门学科。物理光学在近代科学的发展中起到了重要作用,是很多现代光学仪器设计和应用的基础,在光纤通信、微纳制造、高密度集成芯片、信息获取和处理、三维显示、大容量光学存储、激光器和发光二极管器件、绿色太阳能电池、量子通信、量子加密等领域都有广泛应用,其将进一步推动科学的发展并改变人类的生活。

物理光学是光电类专业基础课,该课程的教学目的是使学生能够掌握并熟练应用现代光学理论及方法,分析并处理光波传播过程中发生的各种光学现象,掌握其规律,为学习其他相关专业课及进一步深造打下坚实的理论基础。为了帮助不同基础的使用者在有限的时间内尽快掌握知识脉络和重要知识点,建立初步的物理光学模型,本教材是编者在现有教材基础上,根据多年教学经验和学生反馈情况进行凝练整理而成的。内容主要包括波动光学和量子光学基础两部分。波动光学主要讨论光呈现波动性质时所产生的现象及其规律,包括干涉、衍射、偏振等;量子光学主要讨论光呈现量子性质时所产生的各种现象及其规律,包括光电效应、物质发光等。全书包括6部分。绪论主要介绍人们对光本性认识的简史;第1章主要介绍光波的基本性质,包括电磁波理论基础、波函数和折反射定律等;第2章讨论光的干涉性质,包括干涉基本理论、分波面、分振幅干涉、多光束干涉及它们的应用;第3章讨论光的衍射性质,从点源和面源两个角度来讨论衍射积分公式及其简化形式,并介绍了衍射光学元件的设计方法;第4章讨论光的偏振,包括晶体光学基础,偏振光的产生、转换和检验等内容;第5章介绍量子光学,包括光的量子特性和激光器等内容。编者在各章中也增加了针对难点和重点的典型例题和分析。

本书由北京理工大学刘娟、胡滨、周雅编著,绪论、第1章和第3章由刘娟执笔,第2章由周雅执笔,第4章和第5章由胡滨执笔。

编者感谢在编写过程中参与文字录入和校对的同学们。感谢谢敬辉教授在本书编写过程中给予的帮助和指导。因时间仓促和水平所限,书中难免存在欠妥和错误之处,敬请读者批评指正。

目 录

CONTENTS

绪论 光本性认识简史	001
0.1 17 世纪中叶之前	001
0.1.1 对光的早期认识	001
0.1.2 几何光学规律的发现	001
0.1.3 波动光学现象的发现	002
0.1.4 光的传播速度	002
0.2 17 世纪中叶至 19 世纪光的微粒说和波动说	003
0.2.1 微粒说与波动说之争	003
0.2.2 波动说的胜利	003
0.2.3 光是电磁波的发现	004
0.3 20 世纪光的波粒二象性	006
第 1 章 光波的基本性质	009
1.1 光的电磁波理论基础	009
1.1.1 麦克斯韦方程	009
1.1.2 电磁波的产生及传播	012
1.1.3 电磁波的波动微分方程及传播速度	013
1.1.4 电磁波的通解形式及其矢量性	015
1.2 平面电磁波的性质	017
1.2.1 电磁波的横波性	017
1.2.2 电磁波的宏观偏振性	019
1.2.3 电场波和磁场波的关系	020
1.2.4 平面电磁波的能量传播特性	020
1.3 光波的波函数	023
1.3.1 三维简谐平面波	023
1.3.2 球面波	027
1.3.3 柱面波	031
1.3.4 共轭光波	031
1.4 电磁波在两种均匀各向同性透明媒质界面上的反射和折射	037
1.4.1 折、反射定律	037
1.4.2 菲涅尔公式	038

1.4.3 全反射的性质及其应用	045
习题	050
第2章 光的干涉	057
2.1 干涉基本原理	057
2.1.1 波的叠加原理和平面标量波光波叠加综述	057
2.1.2 双光束干涉的基本条件	063
2.1.3 两个平面波的干涉	065
2.1.4 两个球面波的干涉	070
2.2 分波面干涉	074
2.2.1 杨氏实验	074
2.2.2 光波的相干性	084
2.2.3 分波面干涉的应用	089
2.2.4 其他分波面装置	091
2.3 分振幅干涉	095
2.3.1 干涉条纹的定域性质	096
2.3.2 分振幅干涉——等倾干涉和等厚干涉	099
2.3.3 分振幅干涉的应用	103
2.4 多光束干涉	118
2.4.1 平行平板的多光束干涉	118
2.4.2 法布里—珀罗干涉仪及条纹分布规律	120
2.4.3 法布里—珀罗干涉仪的应用	123
习题	129
第3章 光的衍射	132
3.1 标量衍射理论基础	132
3.1.1 衍射问题概述	132
3.1.2 基于球面波的衍射积分公式	133
3.1.3 基于平面波的衍射积分公式	139
3.1.4 标量衍射积分公式的进一步讨论	146
3.1.5 在有限距离观察夫琅和费衍射的方法	148
3.1.6 屏的衍射——巴比内原理	152
3.2 衍射理论的应用	153
3.2.1 单孔的夫琅和费衍射	153
3.2.2 单孔光学系统的分辨本领	162
3.2.3 衍射光栅	166
3.2.4 泰伯效应	188
3.3 特殊物体的夫琅和费衍射	194
3.3.1 随机颗粒的夫琅和费衍射	194
3.3.2 直边的夫琅和费衍射	195
3.3.3 位相物体的衍射	196

3.4 菲涅尔衍射	197
3.4.1 菲涅尔半波带法	197
3.4.2 菲涅尔波带板	202
3.4.3 菲涅尔积分法	208
3.5 衍射光学元件	213
3.5.1 衍射光学元件的设计原理	213
3.5.2 基于标量衍射理论的衍射光学元件设计方法	215
3.5.3 基于干涉原理的衍射光学元件设计方法	220
习题	221
第4章 光的偏振	225
4.1 光传播的各向异性过程及各向异性媒质	225
4.1.1 双折射现象及其启示	225
4.1.2 偏振光的应用价值	225
4.1.3 偏振的描述和分类	226
4.1.4 光波传播中的各向异性过程	231
4.1.5 偏振光的琼斯矢量表示	232
4.2 晶体光学基础	234
4.2.1 晶体的光学各向异性及其描述	235
4.2.2 晶体中的光波	239
4.2.3 平面光波在单轴晶体中的传播	240
4.2.4 光波在晶体界面上的折射和反射	242
4.2.5 旋光	245
4.3 偏振光的产生、转换和检验	249
4.3.1 线偏振光的产生和检验	249
4.3.2 椭圆偏振光的产生和波片	255
4.3.3 椭圆偏振光的检验	266
4.4 偏振光的干涉	269
4.4.1 概述	269
4.4.2 平行偏振光干涉	270
4.5 人为双折射	273
4.5.1 应力双折射	273
4.5.2 电致双折射	274
4.5.3 磁光效应	276
习题	279
第5章 量子光学基础	283
5.1 光的量子性	283
5.1.1 辐射与能量子概念	283
5.1.2 光电效应与光子概念	285
5.1.3 康普顿散射光子量子性的进一步证实	287

5.1.4 光的波粒二象性	288
5.2 原子激发与发光的量子理论	290
5.2.1 α 粒子散射和原子的核式结构	290
5.2.2 氢原子光谱和玻尔原子模型	290
5.2.3 量子力学和原子发光	293
5.2.4 光谱线的展宽	302
5.3 激光和激光器	304
5.3.1 激活介质中的光放大	305
5.3.2 谐振腔中的光振荡	307
5.3.3 激光的速率方程理论	309
5.3.4 激光的模式	310
5.3.5 几种典型的激光器	312
附录 A 证明 $y(z \pm vt)$ 是波动方程的解	319
附录 B 二阶常系数偏微分方程求解	320
附录 C 常用函数及特殊函数	321
附录 D 傅里叶变换	329
参考文献	334

绪 论

光本性认识简史

光学是一门古老的学科。光不仅可以为人类提供视觉信息，而且可以为人类提供无限的能源。2015 年 7 月 29 日，联合国教科文组织将 2015 年定为“国际光年”。光是什么呢？光的本性问题是贯穿在光学发展中的一个根本问题。可以毫不夸张地说，人类对光的认识一直伴随着人类文明的进步和发展。正是这种对光的本性的探讨有力地推动了光学乃至整个人类社会的进步和发展。人类对光的本性的认识，从光的“触觉论”“发射论”“微粒说”“波动说”到光的“以太论”“波粒二象性”。几千年来，人类对光的本性进行了不懈的探索。

0.1 17 世纪中叶之前

0.1.1 对光的早期认识

早在公元前 5 世纪，人们已经认真考虑过视觉是如何产生的问题。当时古希腊人提出了两种假设。一种假设可称为“触觉论”。它认为与用手去触摸物体获知硬、软、冷、暖等感觉一样，人们在观察物体时，从眼睛中伸出一根无形的触须，去“触摸”物体的亮、暗、颜色等性质。虽然这种假设形象地描绘了视觉过程，但是它不能说明为何在黑暗中不能看见物体这样的简单事实，更无法解释为什么当物体移近篝火时能由不可见变为可见。另一种假设称为“发射论”。它认为可见的物体能发射一种被称为“光”的东西，视觉由光的刺激产生。这种观点是人类对光认识的第一次飞跃。虽然它十分粗糙，没有涉及光的本性，也未阐明产生光的原因和条件，但是它能解释当时遇到的多数视觉现象。经过长期的考验，“发射论”终于在公元 10 世纪前后完全取代了“触觉论”。

0.1.2 几何光学规律地发现

根据光的发射论，光自物体发射到人眼接收之间应该经历一个传播过程。

公元前 4 世纪的我国战国时期，墨翟（公元前 468—公元前 376）及其弟子在《墨经》中记录了光的直线传播、阴影形成，光的反射和凹凸面镜反射成像等规律。公元前 3 世纪，古希腊的欧几里得（Euclid，公元前 330—公元前 260）也发现了光的直线传播和镜面反射定律。从那时开始直到公元 17 世纪，虽然陆续出现了眼镜、透镜和“成像暗箱”等光学器件，我国北宋时代的沈括（1031—1095）还在《梦溪笔谈》中描述了天文仪器，但总的说来光学的发展相当缓慢。例如几何光学的基本定律之一——折射定律直到 17 世纪前

期才由荷兰的斯涅耳(W.Snell, 1591—1626)和法国的笛卡儿(R.Descartes, 1596—1650)归纳成解析表达式。而几何光学的普适原理——费马(P.de Fermat, 1601—1665)原理则到17世纪中叶才提出。

0.1.3 波动光学现象的发现

17世纪50年代,意大利的格里马第(F.M.Grimaldi, 1618—1663)首次注意到衍射现象。他发现光在通过细棒等障碍物时违背了直线传播的规律,在物体阴影的边缘出现了亮、暗交替的或彩色变化的条纹。后来,英国的胡克(R.Hoke, 1635—1727)研究了薄膜的彩色图样,认为这是由薄膜前后表面的反射光互相作用——干涉所致。牛顿(I.Newton, 1642—1727)也研究了薄膜的干涉现象,丹麦的巴塞林(E.Bartholin, 1625—1698)发现了光经过方解石时的双折射现象。17世纪70年代,荷兰的惠更斯(C.Huygens, 1629—1695)进一步发现了光的偏振性质。至此,反映光的波动性质的各种基本现象都已被揭示,但由于历史条件的限制,人类对光本性的认识并不统一。

0.1.4 光的传播速度

在研究光的传播规律的同时,人们也在研究光的传播速度问题。起初,谁也不能确定,光速是无限大还是虽然很大但却有限。1607年,伽利略(G.Galilei, 1564—1621)试图测定光从一个山峰传播到另一个山峰所需的时间。他让站在第一个山峰上的人打开手中所持灯的遮光罩,作为发光的开始。又命第二个山峰上的人看到对方的灯光后立即打开手持灯的遮光罩。这样,测定第一个山峰上的人自发出光信号到看到对方灯光的时间间隔,便得到光在两个山峰间来回一次所需的时间。但是,由于人的反应及动作时间远大于光传播所需的时间,伽利略的实验没有成功。

1676年,丹麦的罗麦(O.Römer, 1644—1710)利用天文观察首次成功地测定了光速,肯定了光速是有限的。罗麦认为,木星的卫星客观上以固定的周期 T_0 环绕木星旋转。如果光速无限,则不论地球如何转动,观察到的木卫蚀现象也该有同样的确定周期 T_0 。然而,观察到的事实是,木卫蚀的周期不固定,当地球在其轨道上远离木星运动时,周期变长;反之周期变短。罗麦用光速有限解释这一现象:木卫蚀这一信息是由光传递到地球的。随着地球的远离,光传递第二个蚀的信息比传递第一个蚀的信息需要走更多的路程,因此需要更长的时间,使得地球上测得的两个蚀的时间间隔大于 T_0 。地球迎着木星运动时,情况与上述相反。假定在地球远离木星运动的半年内,观察到 N 次木卫蚀,总共经历的时间为 t_1 ,则 t_1 与 $(N-1)T_0$ 之差应该是光经过地球轨道直径 D 所需的时间 D/c (其中 c 是假设的光速),即 $t_1 - (N-1)T_0 = D/c$ 。类似地,在另外半年的时间内,假定也观察到 N 次木卫蚀,总共经历的时间为 t_2 ,则有 $(N-1)T_0 - t_2 = D/c$ 。由以上两式得到:

$$c = \frac{2D}{t_1 - t_2}$$

当时已知地球轨道直径约为 2.84×10^8 km,实际测得的 $t_1 - t_2$ 约为2 640 s,由此算出光速 c 约为 2.15×10^5 km/s (2.15×10^8 m/s)。虽然与近代数据比较,这个数值有近30%的误差,但这毕竟是第一次成功地测量了光速。

0.2 17 世纪中叶至 19 世纪光的微粒说和波动说

0.2.1 微粒说与波动说之争

光能够温暖万物，能够点燃草木，因而必定携带能量。鉴于 17 世纪的认识水平，人们只能把光与两种传递能量的机械运动相类比，分别提出了关于光本性的两种学说：微粒说和波动说。光的微粒说由笛卡儿提出，并得到牛顿的支持。该学说认为，光是由光源发射的一种微粒流。由此很容易解释直线传播定律和反射定律，也可以借助媒质对光微粒有作用力的假定去解释折射定律，得到光在折射率较大的媒质中传播速度较快的结论。同时，人们由经验发现的通过冰洲石的光束会分裂成两束折射光的现象，也可以借助微粒说得以解释。然而，微粒说对干涉、衍射、偏振等现象的解释相当勉强，以致牛顿不得不在微粒说中添加了“振动”的因素，认为光微粒在传播途中会受到媒质振动的影响。另一方面，与牛顿同时代的惠更斯综合了胡克等人的思想，于 1678 年比较系统地提出了光的波动说。该学说认为，光是一种特殊媒质——“以太”的波动。通过与机械波类比，波动说很容易定性地说出干涉和衍射现象；如果加上惠更斯所作的“子波假设”，它也能定量地解释反射定律和折射定律。不过，由此导出的结论与微粒说的相反，认为光在折射率较大的媒质中传播速度较慢。因为当时还不能在地面上测量光速，一时无法判断哪个结论正确。尽管总的来说波动说比微粒说显得更合理一些，但一方面由于牛顿在科学界的威望，另一方面波动说当时还不能定量地说明干涉和衍射现象，甚至不能圆满地解释直线传播规律，多数科学家在 17 世纪和 18 世纪倾向于微粒说。

0.2.2 波动说的胜利

19 世纪初，一系列决定性的发现导致人们普遍接受波动理论。托马斯·杨和菲涅尔等人的实验和理论工作把光的波动理论大大向前推进，解释了光的干涉、衍射现象，初步测定了光的波长，并根据光的偏振现象确定光是横波。到 19 世纪中叶，光的波动说战胜了微粒说，波动理论在比较坚实的基础上建立起来。

19 世纪初，英国的杨氏 (T.Young, 1773—1829) 首次完成了著名的“杨氏干涉实验”，提出“干涉原理”，并成功地解释了牛顿环的彩色。他甚至利用牛顿的实验数据确定了各种颜色光的波长。尽管如此，杨氏的学说仍然遭到强大的微粒说坚持者们的反对。这时，法国的菲涅尔 (A.J.Fresnel, 1788—1827) 意识到，要使波动说在这场争论中取得胜利，必须使用数学工具予以定量论证。1815 年，他把惠更斯的子波假设和杨氏的干涉原理相结合，提出后人所谓的“惠更斯—菲涅尔原理”。该原理用波动理论圆满地解释了光的直线传播规律，定量地给出了圆孔等衍射图形的强度分布。当时，微粒说的支持者泊松 (S.D.Poisson, 1781—1840) 根据菲涅尔的理论，导出圆屏的阴影中央将出现亮斑的结论。他认为这个结论是荒谬的，试图以此否定波动说。然而，阿喇戈 (D.F.Arago, 1786—1853) 却很快用实验证明了该亮斑确实存在，使菲涅尔理论获得了意外的强力支持。1817 年，杨氏明确指出，光波是一种横波（在此之前，惠更斯、菲涅尔等人也曾有此设想），使一度被牛顿视为波动说障碍之一的偏振现象转化为波动说的一个佐证。至此，波动说的优势已十分明显。

光是横波和偏振光干涉进一步推动了波动说。1808 年,法国工程师和物理学家马吕斯(Etienne Louts Mains, 1775—1812)用冰洲石晶体来看落日在玻璃上的反射现象时,惊奇地发现只出现一个太阳的像,而不是一般双折射时的两个像。1851 年,英国的布儒斯特(David Brewster, 1781—1868)发现发生这一现象的入射角的正切等于折射光束所在介质的折射率与入射光束所在介质的折射率之比。马吕斯引入了“光的偏振”,并证明了寻常光线和非寻常光线在互相垂直的平面内偏振。1816 年,菲涅尔和阿喇戈一起研究了偏振光的干涉。1819 年,阿喇戈和菲涅尔在《化学与物理学年刊》上联名发表了题为《关于偏振光线的相互作用》的论文,概括了杨氏干涉实验所得的“美妙的结果”,并引入了光程的概念,详细地描述了他们所做的一系列偏振光干涉的实验。

给(古典的)微粒说压上最后一根稻草的是 1850 年阿喇戈首先建议,由法国的傅科(J.B.L.Foucault, 1819—1868)、斐索(A.H.L.Fizeau, 1819—1896)和布雷格特(L.Breguet)设计的实验室测量光速装置。该装置的原理如图 0-1 所示。点光源 S 发出的光被透镜 L 经过反射镜 M_1 成像在 S_1 处,球心位于 M_1 镜面上的 I 点,半径为 r 的凹球面反射镜 M_2 会使会聚到其上 S_1 点的光束返回。如果 M_1 静止不动,则从 S_1 返回的光束经过 M_1 反射后将被 L 成像在光源 S 处。如果令 M_1 以很大的角速度 ω (如 1 000 rad/s) 绕一个通过 I 点并垂直于图面的轴旋转,并且在某一时刻反射镜 M_1 恰好转至图 0-1 所示位置,则 S 的像点仍将位于 S_1 。但因光从 I 点射到 S_1 处再从 S_1 处返回到 I 点需要一段时间 $\Delta t = 2r/v$ (其中 v 为光速),所以当光返回到 I 点时, M_1 已转过了一个角度 $\theta = \omega \Delta t$,从而使返回光被处于新角位置的 M_1 反射,使 S_1 相对

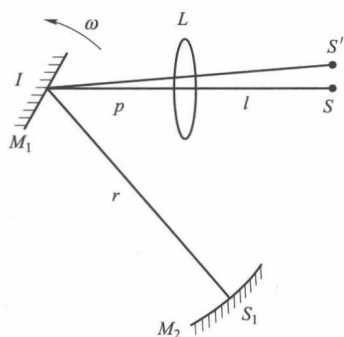


图 0-1 实验室测量光速装置原理

于 M_1 的镜像位置发生了变化,变化的距离等于 $2r\theta$ 。结果,对于返回光来说, L 的“物点”在“物面”上移动了 $2r\theta$, 于是其“像点” S' (见图 0-1) 将偏离光源 S 一个偏移量 $\overline{S'S} = 2r\theta \times \text{像距/物距} = 2r\theta \cdot l/(r+p) = 4r^2\omega l/[(r+p)v]$ 。这样,测出上式中各个长度量便可由已知的 ω 求得 v 。当整个装置(主要是反射镜 M_1 与 M_2 之间的部分)位于真空中时,测得的 v 就是真空光速。如果在 M_1 与 M_2 之间的光路上加入一个长度为 $d(d < r)$ 的水槽,那么上述的 Δt 将变成 $\Delta t' = 2(r-d)/v + 2d/v'$, 其中 v' 是水中的光速。从而 θ 变成 $\theta' = \omega \Delta t'$, $\overline{S'S}$ 也将发生相应的变化,于是根据已测得的 v 便可以导出 v' 。傅科于 1850 年公布了上述实验的结果,表明即使考虑了实验中的各种误差,也可以确定光在水(其折射率较大)中的传播速度要小于其在真空或空气(其折射率较小)中的传播速度,从而否定了微粒说的推论。

0.2.3 光是电磁波的发现

虽然到 19 世纪中叶时波动说已被普遍接受,但人们对光波动实质的认识存在着两个错误。错误之一是,无论是惠更斯还是杨氏、菲涅尔,都认为光波是一种机械波,伴随着某种实物的机械振动。错误之二是,认为光波必须依赖假想媒质“以太”才能传播。尽管两个错误有明显的因果关系,但是作为“原因”的前一种错误随电磁波理论的建立而很快得到了纠正,而作为“结果”的后一种错误却继续存在了一段时间。

1873 年,英国的麦克斯韦(J.C.Maxwell, 1831—1879)在总结法拉第(M.Faraday,

1791—1867) 等人对电磁作用研究的基础上加入了自己的假设, 发表了“电磁论”, 提出了后人所称的“麦克斯韦电磁方程组”。根据该方程组, 麦克斯韦预言, 电磁场可以向外发射、传播, 形成电磁波。他利用由电磁学方法测到的数据, 计算出电磁波的传播速度, 发现在误差范围内该速度与实测的光速相同。以此为主要依据, 麦克斯韦认为光波是一种电磁波。这就是光的电磁波理论。1888 年, 德国的赫兹 (H.R.Hertz, 1857—1894) 发现了射频范围内的电磁波 (波长约 10 m) 的传播速度与光速相同, 并证明它和光一样, 能产生反射、折射、衍射、干涉和偏振等现象。这样, 麦克斯韦的理论由于得到实验的有力支持而被广泛接受。

光的电磁波理论是人们对光本性认识的又一次飞跃。光振动不再是某种媒质分子的机械振动, 而是电磁场这个物理量的振动。麦克斯韦电磁方程组给出了惠更斯—菲涅尔原理的理论依据, 除了极微弱的光波之外, 它几乎可以解释光波的一切宏观传播规律。

电磁波理论也有其局限性。首先, 在它形成的初期, 由于不知道电磁波本身是物质的一种形式, 为了说明电磁波能在真空中传播, 仍然需要借助以太假设, 认为电磁波是在无所不在的以太中传播的。其次, 该理论不能解释光在反射过程和吸收过程中的许多现象。第三, 它也不能说明极微弱光的干涉、衍射现象。

以太假设是惠更斯机械波动说的必然要求, 后来麦克斯韦“借用”了以太的概念, 作为传播电磁波的载体。

为了解释各种光学现象, 人们被迫赋予以太许多奇特的性质。例如, 以太应该充斥整个空间, 渗入一切透光物质之中, 它必须十分稀薄, 不阻碍物体的运动。这种类似于气体的性质, 使惠更斯最初认为光波像声波一样, 是一种纵波。当偏振现象使人们认识到光是横波以后, 又不得不给以太加上了类似于固体的性质。例如它不能被压缩, 同时具有很大的切变模量, 因为只有这样才会不传递纵波, 只传递快速、高频的横波。尽管很难想象这种具有气体、固体双重性质的“物质”, 但还不能说它不可能存在。

以太假设的根本困难出现在回答下述问题的时候, 即以太与运动媒质之间究竟有无相对的运动?

由英国的布拉德雷 (J.Bradley, 1692—1762) 在 18 世纪 20 年代所发现的“光行差”现象可以推断, 以太是“绝对静止”的, 地球及其上的大气不能带动以太运动。

19 世纪前期, 菲涅尔依据机械波模型推导了光波折、反射过程的振幅关系 (“菲涅尔公式”)。

1851 年, 斐索在光通过静止水柱和流动水柱两种情形下, 测定了干涉条纹的位移量。

19 世纪后期的迈克耳逊—莫雷 (A.A.Michelson, 1852—1931, E.W.Morley, 1838—1923) 实验却导出了完全相反的结果: 不能察觉地球与以太之间的任何相对运动, 以太被地球完全曳引。1879 年, 麦克斯韦去世前不久, 建议用干涉方法测定地球与以太的相对速度。为此, 美国的迈克耳逊设计了著名的“迈克耳逊干涉仪”。

迈克耳逊—莫雷实验似乎说明, 以太几乎完全被地球大气曳引, 地球与以太之间基本上没有相对运动。该结论与当时流行的“雨滴模型”完全相反, 同时也与部分曳引公式矛盾。

以上事实揭示, 已流行一个多世纪的以太假设含有内在矛盾。1900 年, 法国的邦加 (J.H.Poincare, 1854—1912) 终于提出疑问: “我们的以太真的存在吗?”

0.3 20 世纪光的波粒二象性

19 世纪末到 20 世纪初, 光学的研究深入到光的发生、光和物质相互作用的微观机构中, 在解释光电效应现象时, 近代物理学革命的先锋爱因斯坦 (Albert Einstein, 1879—1955) 提出了光量子假设。

20 世纪初期, 物理学发生了一系列的突破和革命, 相继出现了相对论、量子力学以及相对论量子力学和量子场论等新理论, 可以说, 这些理论的诞生无一不受到光学研究的推动和刺激; 反之, 它们的建立又解决了光学中的许多困难和疑问, 加深了人们对光本性的认识。

为了解释迈克耳逊—莫雷实验的结果, 洛伦兹 (H.A.Lorentz, 1853—1928) 在否定存在绝对坐标系和绝对时间概念的基础上, 导出了两个相对运动坐标系之间的变换公式——洛伦兹变换。该变换公式与我们在推导前述各计算公式时所使用的经典变换公式 (伽利略变换) 有着根本的差别。例如, 洛伦兹变换认为在不同的坐标系中时间变量也是不同的。利用洛伦兹变换可以导出, 在选定的参考系中, 运动物体的长度在运动方向上有所缩短, 小于静止时的长度, 也即存在著名的“洛伦兹缩短”。据此可以求得, 光波在迈克耳逊干涉仪的两支光路中所经历的时间是相同的, 因此不应观察到干涉条纹的位移。

1905 年, 爱因斯坦推广了洛伦兹变换, 对牛顿经典力学加以修正, 提出“狭义相对论”。该理论一方面重申洛伦兹变换的一些结果, 例如“洛伦兹缩短”和“光速不变原理”(在任何惯性坐标系中, 真空中的光速都相同); 另一方面给出了“质能公式”:

$$E = mc^2$$

指出任何质量都与一定的能量相联系, 任何能量也一定与某个惯性质量相联系。这种联系使人们认识到, 具有能量的电磁波自身就是一种物质, 它的传播不需要任何其他媒质的支持。因此, 以太假设不仅是不合理的, 而且变得不必要, 被人们彻底摒弃。至此, 经典的电磁波理论已经完全改善。

然而, 即使是“完善”的电磁波理论, 也不能保证光的波动本性不受到新的挑战。19 世纪末至 20 世纪初, 发现了一系列与电磁波理论矛盾的现象, 如黑体辐射的规律、光电效应、原子的分立光谱和康普顿 (A.H.Compton, 1892—1962) 散射规律等。为了解释这些现象, 人们不得不做出一些与电磁波理论相对立的假设。1900 年, 德国的普朗克 (M.Planck, 1858—1947) 提出了“量子化假设”, 认为物体的发光过程是量子化的, 即发射的能量必然是某一单元能量的整数倍, 单元能量的大小正比于所发射光波的频率 ν , 比例系数是一个普适常数 h ——普朗克常数。量子化假设能够很好地说明黑体且光在传播途径中以及在与物质作用时也是量子化的。换言之, 电磁场本身是量子化的, “一束光波”实际上是由大量具有能量和动量的“辐射能量子”组成的。爱因斯坦称此辐射能量子为光子。该理论不仅解释了光电效应的种种规律, 而且还定量地说明了康普顿散射现象。1913 年, 丹麦的玻尔 (N.Bohr, 1885—1962) 结合原子的行星模型和普朗克假设, 提出“玻尔原子模型”, 成功地说明了氢原子的分立光谱线。

面对这些事实, 人们不得不再次接受光的“微粒”性质, 并认真考虑如何统一波动和微粒这两种看起来矛盾的特性。对此问题的探讨, 加速了量子力学的诞生。1923 年, 法国的德布罗意 (L.V.de Broglie, 1892—1987) 在光有双重性质的启发下, 提出“物质波”假定: 电

子等实物粒子也有波动性质。该假定后来被电子衍射实验所证实。在此基础上，奥地利的薛定谔(E.Schrödinger, 1887—1961)建立了“薛定谔方程”，奠定了量子力学的基础。因为该方程实质上是物质波的波动方程，所以量子力学又称为“波动力学”。量子力学从微观粒子的“波、粒”两重性出发，建立了用“波函数”描述微粒运动状态的体系，给出了在外力作用下求解波函数的方法，沟通了“粒子性参量”(如位置、动量等)与“波动性参量”(如波长、频率等)的联系。例如，它认为微粒处在某一地点的概率与该点的波强度成正比；微粒的动量与波的频率成正比。量子力学以这种方式确立了微观粒子的波粒二象性。

随着量子力学的发展，狄拉克(P.Dirac, 1902—1984)把量子力学思想应用于电磁场，通过对电磁场的量子化，逐步形成了量子理论，“自然地”引入了电磁场的量子——光子。这样，电磁场和光也与其他微观粒子相似，具有波粒二象性。

为了对光的波粒二象性有一个直观的认识，下面用海森堡(W.K.Heisenberg, 1901—1976)提出的量子力学基本原理之一——“不确定关系”(又称“测不准原理”)来解释单缝衍射现象。不确定关系说，微观粒子的某两个粒子性参量，如位置和动量，不能同时具有精确确定的数值。就 x 方向的分量而言，动量的不确定量 Δp_x 和位置的不确定量 Δx 满足以下关系：

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \approx h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

式中， h 为普朗克常数。现在用这个关系来研究表面上“纯属”粒子性质的一个实验现象。图0-2(a)中的 Π 是一块挡光屏，其上有一条宽度为 a 的狭缝。一束能量和方向都完全相同的光子自左方垂直射向 Π 。在遇到屏 Π 之前，每个光子的动量 p_0 都完全相同并完全确定，其 x 分量 p_x 恒为零，因而 $\Delta p_x = 0$ 。由上式，任意一个光子的 x 坐标值将完全不确定，或者说具有任一个 x 值的概率都相等。这就是波动观点中的“均匀平面波”。这束光子射向屏时，大部分被吸收或反射，只有那些 x 值恰好在缝宽 a 范围内的光子能射向屏的右方。这些光子在 Π 处的 x 不确定值不再是无限大，而是 a 。因而它们的动量不确定值也不再为零，而是 $\Delta p_x = h/a$ 。这样，穿过狭缝的光子可能具有 x 方向的动量分量，从而偏离了原先的 p_0 方向。由图0-2(b)可以看出，最大的偏离角 θ 满足下式：

$$\sin \theta = \frac{\Delta p_x}{|p|} = \frac{h}{a} \frac{1}{|p|}$$

根据量子力学中粒子动量与波长的关系 $|p| = h/\lambda$ ，上式变为 $\sin \theta = \lambda/a$ 。这些结论不仅说明了光在通过狭缝后将偏离原先的传播方向，即发生“衍射”，而且上面最后一式的结果与用“纯”波动理论计算得到的衍射中央亮斑的半角宽相同。通过这个例子可以看到，描述物质粒子性的参量的不确定关系“隐含”着物质的波动性质。

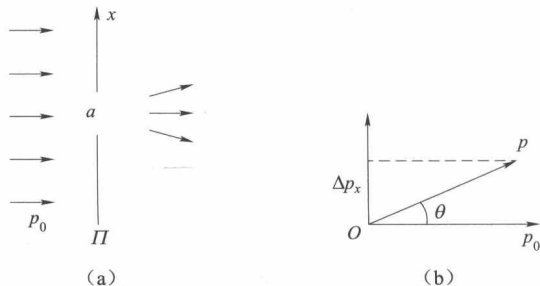


图0-2 用光子概念和不确定关系说明单缝衍射

以上对波粒二象性的描述仍是初步的，但是从中可以看出，二象性中的波和粒子的概念与经典物理学中的有很大差别，因此我们不能囿于经典模型来理解波粒二象性。然而，就通常的精度要求而言，我们还是可以用经典的模型去处理大多数的光学问题。例如，对于光与物质微粒相互作用的过程，可以使用粒子的模型；对于光的传播过程，可以使用波动的模型。

光的波粒二象性是人们对光本性认识的最近一次飞跃，但绝不是最后一次飞跃。随着高能物理的发展，已经观察到了光子和正、负电子对相互转化的现象，表明光子与电子之间存在着某种联系。光子是否像原子和分子那样具有内部结构？近来又有迹象表明，电磁作用力与原子核内的弱相互作用力有相同的实质。这些事实说明，人类对光的本性的认识还远远没有完结，新的物理现象和新的规律仍有待于人们去进一步探索。

第 1 章

光波的基本性质

1873 年, 麦克斯韦总结当时已经得出的电磁学基本定律和实验成果, 提出了光的电磁波理论。按照这一理论, “光是一种以场的形式按照电磁定律传播的电磁扰动”。因此, 光应当具有电磁波的各种属性。本章从麦克斯韦电磁波理论出发, 研究光波在传播过程中的一般性质和规律。这些知识将是进一步研究各种具体波动现象的基础。

1.1 光的电磁波理论基础

1.1.1 麦克斯韦方程 (Maxwell's Equations)

相互作用和交变的电场和磁场的总体, 称为电磁场。交变的电磁场按照电磁定律传播就形成了电磁波。描述在真空中传播的电磁波可用电场强度 E 和磁感应强度 B ; 而为了描述电磁波与媒质的相互作用, 则还需引入电位移 D 和磁场强度 H 两个矢量。光的电磁波理论可归纳为一组与四个矢量 E 、 B 、 D 、 H 有关的方程, 即麦克斯韦方程组。它描述了这四个矢量随空间和时间的变化关系及规律, 大多数与光的传播和叠加有关的现象都可以从这一理论出发得到解释。

麦克斯韦方程组的公式是在当时的法拉第电磁感应定律、电磁场高斯定律、安培定律等基础上总结和发展起来的, 本教程只给出对方程组的说明和有关结论。麦克斯韦方程组有积分和微分两种形式, 本教程采用有理化 MKSA 制单位。

1. 积分形式的麦克斯韦方程组

$$\oint_C E \cdot dl = - \iint_A \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (1-1)$$

$$\oiint_A D \cdot dS = \iiint_V \rho dV \quad (1-2)$$

$$\oiint_A B \cdot dS = 0 \quad (1-3)$$

$$\oint_C H \cdot dl = \iint_A \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS \quad (1-4)$$

式 (1-1) 是法拉第电磁感应定律的积分形式。公式右端给出了通过空间任一曲面 A 的磁通量随时间变化的速率, 公式左端对电场沿曲面周边 C 的环线积分表示感应电动势。该式的意义是: 变化的磁场可以产生电场。式中的负号表示感应电动势具有阻碍磁场变化的趋势。

式 (1-2) 是电场高斯定律的常用形式。式中右端对电荷密度 ρ 的积分表示体积 V 内总