

GUANGXUE·GUANGXUE

GUANGXUE·GUANGXUE·GUANGXUE

光学

(重排本)

● 赵凯华 钟锡华 编著

GUANGXUE·GUANGXUE·GUANGXUE

非
外
借



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

光 学

(重排本)

赵凯华 钟锡华 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是根据作者在北京大学物理系讲授光学课程的讲义修改补充而成。本书内容丰富,以波动光学为重点,并以“波前”这一概念为纽带连接现代变换光学与传统光学,反映了本学科的现代面貌。书中附有较多的思考题和习题。

全书主要内容:几何光学、波动光学基本原理、干涉装置和光场的时空相干性、衍射光栅、傅里叶变换光学、全息照相、光在晶体中的传播、光的吸收、色散和散射、光的量子性和激光。

本书可作为高等院校物理专业光学课程教材,也可供其他专业有关师生及工程技术人员参考。

与本书习题思考题相应的配套教材《光学习题思考题解答》,已由北京大学出版社出版,可供读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

光学:重排本/赵凯华,钟锡华编著. —北京:北京大学出版社,2017.10

ISBN 978-7-301-28752-1

I. ①光… II. ①赵…②钟… III. ①光学—高等学校—教材 IV. ①O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 220135 号

- 书 名** 光学(重排本)
著作责任者 赵凯华 钟锡华 编著
责任编辑 顾卫宇
标准书号 ISBN 978-7-301-28752-1
出版发行 北京大学出版社
地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871
网 址 <http://www.pup.cn>
电子信箱 zpup@pup.cn
新浪微博 @北京大学出版社
电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62764271
印 刷 者 北京大学印刷厂
经 销 者 新华书店
730 毫米×980 毫米 16 开本 32.25 印张 603 千字
1984 年 1 月第 1 版
2017 年 10 月第 2 版 2017 年 10 月第 1 次印刷
定 价 78.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

常用物理常数

真空中光速(定义值)	$c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s}$
普朗克常数	$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
基本电荷	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
	$= 4.803 \times 10^{-10} \text{ CGSE}$
玻尔兹曼常数	$k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
阿伏伽德罗常数	$N_A = 6.022 \times 10^{23} / \text{mol}$
电子质量	$m_e = 9.109 \times 10^{-28} \text{ g} = 0.510 \text{ MeV}/c^2$
质子质量	$M_p = 1.6725 \times 10^{-24} \text{ g} = 938.26 \text{ MeV}/c^2$
中子质量	$M_n = 1.6747 \times 10^{-24} \text{ g} = 939.55 \text{ MeV}/c^2$
电子康普顿波长	$\lambda_C = h/m_e c = 2.426 \times 10^{-12} \text{ m}$
玻尔半径	$a = \epsilon_0 h^2 / \pi m e^2 = 0.5292 \times 10^{-10} \text{ m}$
电子经典半径	$r_e = e^2 / 4\pi\epsilon_0 m_e c^2 = 2.8178 \times 10^{-15} \text{ m}$
里德伯常数	$R_H = 109\,677.576 \text{ cm}^{-1}$
	$R_\infty = 109\,737.31 \text{ cm}^{-1}$
斯特藩-玻尔兹曼常数	$\sigma = 2\pi^5 k^4 / 15ch^3 = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
维恩位移常数	$b = 0.2014hc/k = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$
电子伏	$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
	相当的温度 $1.1605 \times 10^4 \text{ K}$
	相当的频率 $2.418 \times 10^{14} \text{ Hz}$
	相当的波数 $0.8066 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$
	$1\text{g} = 5.610 \times 10^{26} \text{ MeV}/c^2$
最大光功当量(定义值)	$K_M = 683 \text{ lm/W}$
	$1\text{Å} = 10^{-10} \text{ m}$

作者絮语

本书出版于1984年1月,首印4万册;第二次印于1989年,印数6千册。至2016年,本书重印24次。

在1988年全国高校首届优秀教材评选中,本书获国家级优秀奖。这是一次规模盛大的教材评选活动,有来自全国22部委呈送的教材参评,参评图书计有7000多册,它们出版或重版于1978—1987年期间。最终评选出国家级特别奖22套,国家级优秀奖239套;部委级一等奖118套,部委级二等奖141套。其中,获国家级优秀奖的物理教材有6套,本书乃其一。

本书共计9章,其中第一、第八和第九章等3章由赵凯华教授撰写,第二章至第七章等6章由钟锡华教授撰写。其间两位作者有过多交流 and 认真讨论,全书由赵凯华先生审定。

本书出版至今逾三十年,未曾有过第二版,这一次是重排,而非改版,将原来上下两册合为一本,原来的32开本扩大为16开本;同时按现行的图书规范,对物理学名词与物理量符号作一些必要改动,这项工作由责任编辑承担。总之,这一次重排原则是**不对原书内容和文句作改动**。

这样一本在全国享有盛誉至今常青不老的光学教材,竟在长达三十多年间,未出第二版,此乃何故?现在回头想,其主要原因有二。一是自我感觉良好,二是两位作者各有所好。

作为一本基础光学教材,本书篇章结构完整,理论体系先进。首章为几何光学与光度学,末章为光的量子性和激光简介,而中间6章系本书主体内容即波动光学,其中确立了以波前分析为主脉络的现代波动光学理论体系,倡导了波前相因子判断法作为分析复杂波前的一种有效方法,从而将经典波动光学与现代变换光学,和谐地融合为一体系,而成为那个年代基础物理教材现代化的一个成功典范,至今依然闪耀着其先进学术理念的思想光辉。

本世纪初,本书两位作者先后出版了各自新的光学教材。分别为:2003年,钟锡华,《现代光学基础》,北京大学出版社出版;2004年,赵凯华,《新概念物理教程·光学》,高等教育出版社出版。有意思的是,这两

本新作,前者剥离了几何光学、光度学和光的量子性,而专注于论述波动光学,承袭了本书波动光学的理论体系和篇章结构,并加以充实扩展和提高。后者保留了本书的首章和末章,而将波动光学的篇章结构回归到传统体系,按干涉、衍射、偏振之先后顺序予以论述。这两本新教材各有所取舍,分别体现了两位作者在基础光学教材认识上的一种教学理念。如此而已。

从科学层面考察,近60年光学学科的发展和成就,主要在两个方向或领域。一是经典波动光学得以综合和创新,进入了现代波动光学及其蓬勃发展的新时代,贯穿于或蕴含于其中的新概念新思想和新方法,就是波前概念和波前分析方法,以及对波前的改造而实现对光场的调控;二是量子光学理论的创立,及其卓有成效的广泛应用。2005年诺贝尔物理学奖授予三位光学家,其中一位是量子光学理论的奠基者,两位利用飞秒激光脉冲发明了光梳技术,实现了对可见光波段光频的直接测量。

2014年诺贝尔物理学奖授予蓝光发光二极管(LED)的三位发明者;同年诺贝尔化学奖,授予荧光分子显微镜的三位发明者。2015年被国际教科文组织确定为“光和光基技术国际年”(International Year of Light and Light-based Technologies)。千真万确,光与人类生活密切相关,眼睛与太阳息息相应。迄今为止,唯有光,这个精灵,像孙悟空那样神通广大本领高超,可以在宇观世界、宏观世界和微观世界中,自由穿梭左右逢源,成为人类探测无限大和无限小世界的一种最神速最机灵的载波,为我们带来无限丰富的信息,诸如显微图像、星体图样、光谱图和衍射图。

与精灵共舞,与天使对话。我们有理由相信,在未来岁月人类必将获得更多有助于认识物质世界乃至自我生命的宝贵光信息,人类必将发现光的更多奇异性,开拓出光的更多神奇应用,它们必将继续普惠人类生活,乃至深刻影响社会进步。

基于此等展望,我们信心十足走上讲台,满怀激情讲授光学课程,使大学生们感受到它是一门内容丰富、格调多样、充满活力且让自己感到亲切而振奋的基础物理课程。为达到这目标,让我们继续努力吧。

作者于2017年

前 言

本书是我们 1981 年编写的一套讲义,这次公开出版之前只作了少量修改。它与我们六十年代和七十年代编写的讲义相比,在结构上有较大的变动,内容上也有相当的充实和提高。

按传统的眼光,这本《光学》教科书仍然大致可分为几何光学、波动光学和光与物质相互作用三大部分。第一章为几何光学(包括光度学),第二章到第七章为波动光学,第八、九章主要讨论光和物质的相互作用。我们认为,对大学基础课来说,波动光学应是光学课程的主体。这本书在结构上的最大变动,是将波动光学的基本原理集中到第二章优先予以介绍,而将干涉、衍射的各种装置和仪器中的具体问题和应用分离出来,留到较后的章节讨论。过去光学教学中常遇到这样的矛盾:讲波动光学现象,就离不开装置和仪器;一谈到装置和仪器,就出现许多综合性的问题。例如任何分波前的干涉装置中衍射现象都较突出;分振幅的干涉装置中总要涉及反射、透射光的振幅或强度分配问题;此外,半波损问题有时是不可回避的。如果让这些问题一开头都牵扯进来,就会使学生感到课程内容庞杂零乱。在过去的普通物理光学课中经常听到学生有这类反映。本教科书现在这种处理或许有助于克服上述缺点。这种尝试是否成功?或者会不会带来什么新的矛盾?尚有待于更多的教学实践来回答。

现在谈谈我们对几何光学部分的处理。从理论高度上看,几何光学三个基本定律只不过是光波衍射规律的短波近似行为。目前有不少教材把几何光学放在波动光学之中或之后讲解,我们也曾有过这样的想法。但考虑到几何光学的规律毕竟是比较简单的,而且它处理问题的方法有独立于波动光学之外的巨大实际意义,在讲解、分析和调节各种物理光学仪器装置的光路时,又常常要用到几何光学的术语、概念和规律。从循序渐进的观点出发,仍把几何光学放在最前边不无好处。至于它和波动光学的关系,通过以后各章节的多次强调,学生在学完全课程之后还是可以最终建立起完整概念的。此外,为了适应不同专业在课程要求和学时上的差异,我们将几何光学中相当一部分内容改用小字印刷^①。教学时越过它们,仍可保证后面物理光学的基本需要。

有关光和物质相互作用的部分,本书新添的内容主要是激光。为了介绍激光,量子光学的有关章节作了相应的加强,例如我们在这里引入了能级和跃迁、粒子数的正则分布与反转、自发辐射与受激辐射等各种概念,传统上这些往往是原子物理课程的内容。当然,所有这些内容是否仍应放在原子物理课程中讲授,是有争议的。为了教材的完整性,我们还是将它们写在这里。好在它们是在最后的章节,对教学上无论怎样处置都不会有妨碍。

^① 为阅读方便,本版已不再使用小字。——编者注。

最后着重谈谈“现代光学”问题。“现代光学”是近三十年来兴起并得到蓬勃发展的。1948年全息术的提出,1955年作为像质评价的光学传递函数概念的建立,1960年新型光源——激光器的诞生,这是现代光学发展中有重要意义的三件大事。现代光学已渗透到物理学和其他科学技术的许多领域,得到越来越广泛的应用。时至今日,在基础光学课程中已不能不对现代光学的新成就多少有所反映了。要做到这一点,就不可避免地要扩充教材的篇幅,增加课程的学时。现代光学的最重大进展之一是引入了傅里叶变换的概念,形成了“变换光学”。能否以尽量少的学时把现代变换光学的梗概介绍出来?我们体会,现代变换光学与传统波动光学的关系,犹如分析力学对牛顿力学的关系,而不是相对论力学对牛顿力学的关系。这就是说,现代变换光学的基本规律并未超出传统波动光学的范围。关键问题是如何把现代变换光学与普通物理光学课程的传统内容尽可能紧密地结合和衔接起来。如果能在讲授波动光学的传统内容时考虑到现代变换光学的需要,不时地加以某些引申和发挥,力求挖掘新意,讲出新水平,便可较自然地沟通现代变换光学和传统光学在概念上的联系,在教学上收到事半功倍的效果。

波动光学的基本问题是光波在各种条件下的传播问题,解决这个问题的基本原理就是惠更斯-菲涅耳原理。用现代变换光学的眼光来看,这个原理解决的是如何从光场中的一个波前导出另一个波前。从这种广泛的意义上说,波前的传播问题就是衍射问题,几何光学只不过是它在短波下的极限。因此,我们选择了“波前”这一概念作为连接传统光学和现代变换光学的纽带。如何描述波前、识别波前、分解波前和改造波前,乃至记录波前和再现波前,这一系列问题构成了贯穿波动光学部分的一条主线。普通物理中光学的传统讲法较多地用光线来分析问题,我们的意图是要训练学生善于与波前打交道。除了正文之外,例题、习题都与之配合。唯有这样,才能在讲授后来波动光学的传统内容时渗入现代变换光学的风格,使学生在复杂的波前面前处于主动地位。

现代光学的内容是放在基础课中讲授,还是应该另开选修课?这是个值得研究的问题。本书在这部分内容(主要是第五章和第六章)的写法上考虑了给教师以较大的选择余地。若想对现代光学的基本思想只作一个简单的介绍,第五章后四节的小字部分是可以删去的。即使将第五、六两章完全去掉,也不会影响其他各章中传统内容的教学。

以上是我们在编写这本《光学》时的一些想法。教科书内容的处理可以多种多样,而且往往很难说怎样处理就一定是最好的。把我们目前的认识提供出来,是为了听取广泛的批评和建议。

本书很多地方借鉴了我校任课教师的教学经验;陈熙谋、章立源二同志七十年代曾参加过本课的讲义编写工作;陈熙谋、张之翔、陈怀琳同志对这次的编写工作一直很关心,本书吸取了他们的一些建议;吴仲英和汪滨同志协助我们排出一些演示实验并拍摄了许多照片。作者谨此对他们一并表示感谢。

本书有错误和不妥之处,恳切希望广大教师和读者不吝批评指正。

赵凯华 钟锡华

一九八二年十一月于北京大学物理系

目 录

(带 * 号的章节为教学要求偏高的内容)

绪 论	(1)
1. 光的本性(1) 2. 光源和光谱(2) 3. 光学的研究对象、分支与应用(5)	
第一章 几何光学	(7)
§ 1 几何光学基本定律	(7)
1.1 几何光学三定律(7) 1.2 全反射(9) 1.3 棱镜与色散(11) 1.4 光的可逆性原理(14) 思考题(15) 习题(16)	
§ 2 惠更斯原理	(18)
2.1 波的几何描述(19) 2.2 惠更斯原理的表述(19) 2.3 对反射定律和折射定律的解释(19) 2.4 直线传播问题(22) 思考题(23) 习题(23)	
§ 3 费马原理	(24)
3.1 光程(24) 3.2 费马原理的表述(24) 3.3 由费马原理推导几何光学三定律(26) 习题(27)	
§ 4 成像	(28)
4.1 实像与虚像 实物与虚物(28) 4.2 物方和像方 物与像的共轭性(29) 4.3 物像之间的等光程性(30) * 4.4 等光程面(30) 思考题(32) 习题(32)	
§ 5 共轴球面组傍轴成像	(32)
5.1 光在单个球面上的折射(33) 5.2 轴上物点成像 焦距、物像距公式(34) 5.3 傍轴物点成像与横向放大率(36) 5.4 逐次成像(37) * 5.5 拉格朗日-亥姆霍兹定理(38) 思考题(38) 习题(38)	
§ 6 薄透镜	(40)
6.1 焦距公式(40) 6.2 成像公式(42) 6.3 密接薄透镜组(43) 6.4 焦面(44) 6.5 作图法(44) 6.6 透镜组成像(46) 思考题(48) 习题(49)	
* § 7 理想光具组理论	(51)
7.1 理想成像与共线变换(51) 7.2 共轴理想光具组的基点和基面(52) 7.3 物像关系(53) 7.4 理想光具组的联合(55) 思考题(59) 习题(59)	
§ 8 光学仪器	(61)
8.1 投影仪器(61) 8.2 照相机(61) 8.3 眼睛(62) 8.4 放大镜和目镜(64) 8.5 显微镜(66) 8.6 望远镜(68) 8.7 棱镜光谱仪(68) 思考题(70) 习题(70)	
* § 9 光阑	(71)
9.1 孔径光阑 入射光瞳和出射光瞳(71) 9.2 视场光阑 入射窗和出射窗(74) 习题(76)	
* § 10 像差	(77)
10.1 像差概述(77) 10.2 球面像差(78) 10.3 彗形像差(79) 10.4 正弦条件和齐明点(80) 10.5 像散和像场弯曲(82) 10.6 畸变(83) 10.7 色像差(84) 10.8 小结(88) 思考题(88) 习题(88)	

§ 11 光度学基本概念	(89)
11.1 辐射能通量和光通量(89) 11.2 发光强度和亮度(92) 11.3 余弦发射体和定向发射体(93) 11.4 照度(94) 11.5 光度学单位的定义(96) 习题(98)	
* § 12 像的亮度、照度和主观亮度	(98)
12.1 像的亮度(99) 12.2 像的照度(100) 12.3 主观亮度(101) 思考题(102) 习题(102)	
第二章 波动光学基本原理	(104)
§ 1 定态光波与复振幅描述	(104)
1.1 波动概述(104) 1.2 定态光波的概念(105) 1.3 复振幅描述(106) 1.4 平面波和球面波的复振幅(107) 1.5 强度的复振幅表示(108) 思考题(108) 习题(108)	
§ 2 波前	(109)
2.1 波前的概念(109) 2.2 傍轴条件与远场条件(轴上物点)(111) 2.3 傍轴条件与远场条件(轴外物点)(113) * 2.4 高斯光束(116) 思考题(117) 习题(117)	
§ 3 波的叠加和波的干涉	(118)
3.1 波的叠加原理(118) 3.2 波的干涉与相干条件(119) 3.3 普通光源发光微观机制的特点(120) 3.4 干涉条纹的衬比度及其与振幅比的关系(122) * 3.5 线性光学系统(123) 思考题(123) 习题(124)	
§ 4 两个点源的干涉	(124)
4.1 两列球面波的干涉场(124) 4.2 杨氏实验(125) 4.3 两束平行光的干涉场(128) 思考题(130) 习题(131)	
§ 5 光的衍射现象和惠更斯-菲涅耳原理	(133)
5.1 光的衍射现象(133) 5.2 惠更斯-菲涅耳原理(135) 5.3 巴比涅原理(139) 5.4 衍射的分类(139) 思考题(140)	
§ 6 菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射	(141)
6.1 实验现象(141) 6.2 半波带法(142) 6.3 矢量图解法(145) 6.4 菲涅耳波带片(147) 思考题(150) 习题(151)	
§ 7 夫琅禾费单缝和矩孔衍射	(152)
7.1 实验装置和实验现象(152) 7.2 单缝衍射的强度公式(153) 7.3 矩孔衍射的强度公式(156) 7.4 单缝衍射因子的特点(158) * 7.5 衍射反比关系意义的探讨(162) 思考题(163) 习题(164)	
§ 8 光学仪器的像分辨本领	(165)
8.1 夫琅禾费圆孔衍射(165) 8.2 望远镜的分辨本领(166) * 8.3 球面波照明条件下像面接收的夫琅禾费衍射(168) * 8.4 显微镜的分辨本领(169) 思考题(171) 习题(171)	
§ 9 光的横波性与五种偏振态	(172)
9.1 偏振现象与光的横波性(172) 9.2 偏振片(174) 9.3 自然光(174) 9.4 线偏振光(175) 9.5 部分偏振光(176) 9.6 圆偏振光(176) 9.7 椭圆偏振光(177) 思考题(178) 习题(178)	
§ 10 光在电介质表面的反射和折射 菲涅耳公式	(179)
10.1 菲涅耳反射折射公式(179) 10.2 反射率和透射率(180) 10.3 斯托克斯的倒逆关系(182) 10.4 相位关系与半波损问题(184) 10.5 反射、折射时的偏振现象(187) * 10.6 从电磁理论推导光的反射、折射定律和菲涅耳公式(188) * 10.7 全反射与隐失波(191) 思考题(191) 习题(192)	

第三章 干涉装置 光场的时空相干性	(195)
§1 分波前干涉装置 光场的空间相干性	(195)
1.1 各种分波前干涉装置(195) 1.2 条纹形状与间距(198) 1.3 干涉条纹的移动(199)	
1.4 光源宽度对干涉条纹衬比度的影响(200) 1.5 光场的空间相干性(203) 思考题(205)	
习题(206)	
§2 薄膜干涉(一)——等厚条纹	(207)
2.1 薄膜干涉概述(207) 2.2 薄膜表面的等厚条纹(209) 2.3 楔形薄膜的等厚条纹(211)	
2.4 牛顿圈(213) * 2.5 等厚干涉条纹的观测方法及倾角的影响(215) 2.6 薄膜的颜色	
增透膜和高反射膜(217) 思考题(218) 习题(220)	
§3 薄膜干涉(二)——等倾条纹	(222)
3.1 无穷远的等倾干涉条纹(222) * 3.2 观察等倾条纹时扩展光源的作用(224) * 3.3 薄	
膜干涉的定域问题(225) 思考题(227)	
§4 迈克尔孙干涉仪 光场的时间相干性	(228)
4.1 迈克尔孙干涉仪的结构(228) 4.2 干涉条纹(229) 4.3 光源的非单色性对干涉条纹	
的影响(231) * 4.4 傅里叶变换光谱仪(234) 4.5 精密测长与长度的自然基准(235)	
4.6 光场的时间相干性(237) 4.7 光场的相干性小结(240) 思考题(241) 习题(241)	
§5 多光束干涉 法布里-珀罗干涉仪	(242)
5.1 多光束干涉的强度分布公式(242) 5.2 法布里-珀罗干涉仪的装置和条纹的半值宽度	
(246) 5.3 法布里-珀罗干涉仪在光谱学中的应用(249) 思考题(251) 习题(251)	
第四章 衍射光栅	(253)
§1 多缝夫琅禾费衍射	(253)
1.1 实验装置和衍射图样(253) 1.2 N 缝衍射的振幅分布和强度分布(255) 1.3 缝间干	
涉因子的特点(257) 1.4 单缝衍射因子的作用(259) 1.5 复振幅的计算 黑白光栅和正弦	
光栅(260) 思考题(263) 习题(264)	
§2 光栅光谱仪	(266)
2.1 光栅的分光原理(266) 2.2 光栅的色散本领和色分辨本领(266) 2.3 量程与自由光谱范围	
(269) 2.4 闪耀光栅(269) * 2.5 棱镜光谱仪的色分辨本领(273) 思考题(274) 习题(275)	
* §3 三维光栅——X射线在晶体上的衍射	(276)
3.1 晶体点阵(276) 3.2 X射线(276) 3.3 X射线在晶体上的衍射——布拉格条件(277)	
3.4 劳厄相和德拜相(281) 思考题(282)	
第五章 傅里叶变换光学	(284)
§1 衍射系统的屏函数和相因子判断法	(284)
1.1 衍射系统及其屏函数(284) 1.2 相因子判断法(286) 1.3 透镜的作用及其相位变换函	
数(287) * 1.4 高斯光束经透镜后的变换(290) 1.5 棱镜的相位变换函数(291) 习题(293)	
§2 正弦光栅的衍射	(293)
2.1 空间频率概念(293) 2.2 正弦光栅(295) 2.3 正弦光栅的衍射图样(295) 2.4 正	
弦光栅的组合(297) 2.5 任意光栅的屏函数及其傅里叶级数展开(299) * 2.6 过高频信息	
产生的隐失波(302) 2.7 对夫琅禾费衍射的再认识(303) 思考题(304) 习题(304)	
§3 阿贝成像原理与相衬显微镜	(306)
3.1 阿贝成像原理(306) 3.2 空间滤波概念(309) 3.3 阿贝-波特空间滤波实验(310)	
3.4 相衬显微镜(311) 思考题(313) 习题(314)	

* § 4 夫琅禾费衍射场的标准形式	(314)
4.1 接收夫琅禾费衍射场的实验装置(314)	4.2 夫琅禾费衍射积分的标准形式(316)
4.3 结论和意义(317)	思考题(318) 习题(318)
* § 5 傅里叶变换 δ 函数	(318)
5.1 傅里叶积分变换(318)	5.2 几种典型函数的频谱(320)
5.3 傅里叶变换的性质(324)	5.4 δ 函数(329)
5.5 δ 函数的性质(331)	5.6 δ 函数的傅里叶变换(331)
习题(334)	
* § 6 空间滤波和信息处理	(335)
6.1 用夫琅禾费衍射实现屏函数的傅里叶变换(335)	6.2 相干光学图像处理系统(4F 系统)
(341)	6.3 空间滤波实验(345)
思考题(347)	习题(348)
* § 7 点扩展函数与光学传递函数	(349)
7.1 光学系统的像质评价问题(349)	7.2 点扩展函数(350)
7.3 等晕区内像面与物面上	强度分布的卷积关系(351)
7.4 简谐信息是空不变系统(等晕区)的本征信息(352)	7.5 光
学传递函数(354)	7.6 传递函数在像质评价上的意义(357)
7.7 小结(358)	思考题(358)
习题(358)	
第六章 全息照相	(360)
§ 1 全息照相的过程与特点	(360)
§ 2 全息照相的原理	(363)
2.1 惠更斯-菲涅耳原理的实质——无源空间边值定解(363)	2.2 波前的全息记录(364)
2.3 物光波前的再现(365)	2.4 线性和二次相位变换函数的作用(368)
2.5 体全息	(369)
2.6 小结(369)	思考题(370) 习题(370)
* § 3 全息术应用简介	(372)
3.1 全息电影和全息电视(372)	3.2 全息显微技术(372)
3.3 全息干涉技术(373)	3.4 红外、微波及超声全息照相技术(373)
3.5 全息照相存储技术(374)	
* § 4 傅里叶全息图及其应用举例	(375)
4.1 傅里叶全息图(375)	4.2 特征字符识别(375)
第七章 光在晶体中的传播	(378)
§ 1 双折射	(378)
1.1 双折射现象和基本规律(378)	1.2 单轴晶体中的波面(379)
1.3 晶体的惠更斯作图	法(381)
1.4 法线速度与射线速度	波法面与射线面(383)
1.5 折射率椭球(386)	1.6 双轴晶体(387)
思考题(389)	习题(390)
§ 2 晶体光学器件	(391)
2.1 晶体偏振器(391)	2.2 波晶片——相位延迟片(392)
思考题(394)	习题(394)
§ 3 圆偏振光和椭圆偏振光的获得和检验	(395)
3.1 垂直振动的合成(395)	3.2 圆偏振光和椭圆偏振光的获得(398)
3.3 圆偏振光和椭圆偏振光通过检偏器后强度的变化(399)	3.4 通过波晶片后光束偏振状态的变化(400)
3.5 圆偏振光和椭圆偏振光的检验(401)	思考题(403) 习题(404)
§ 4 偏振光的干涉及其应用	(404)
4.1 偏振器间的波晶片(405)	4.2 显色偏振(407)
4.3 偏振光的干涉条纹(407)	

4.4 光测弹性(408)	4.5 克尔效应与泡克耳斯效应(409)	* 4.6 会聚偏振光的干涉(411)
思考题(412)	习题(413)	
§ 5 旋光	..... (414)	
5.1 石英的旋光现象(414)	5.2 菲涅耳对旋光性的解释(416)	5.3 旋光晶体内的波面(419)
5.4 量糖术(420)	5.5 磁致旋光——法拉第旋转(421)	思考题(423) 习题(424)
第八章 光的吸收、色散和散射	..... (425)	
§ 1 光的吸收	..... (425)	
1.1 吸收的线性规律(425)	1.2 复数折射率的意义(426)	1.3 光的吸收与波长的关系(427)
1.4 吸收光谱(427)	习题(429)	
§ 2 色散	..... (429)	
2.1 正常色散(429)	2.2 反常色散(431)	2.3 一种物质的全部色散曲线(432)
2.4 经典色散理论(432)	习题(437)	
§ 3 群速	..... (437)	
思考题(440)	习题(440)	
§ 4 光的散射	..... (441)	
4.1 散射与介质不均匀性尺度的关系(441)	4.2 瑞利散射定律(442)	4.3 散射光强的角分布和偏振状态(443)
4.4 拉曼散射(444)	思考题(446) 习题(446)	
第九章 光的量子性 激光	..... (447)	
§ 1 热辐射	..... (447)	
1.1 热辐射的一般特征及辐射场的定量描述(447)	1.2 基尔霍夫定律(449)	1.3 绝对黑体和黑体辐射(450)
1.4 斯特藩-玻尔兹曼定律和维恩位移定律(452)	1.5 维恩公式和瑞利-金斯公式(453)	1.6 普朗克公式和能量子假说(454)
* 1.7 光源的发光效率(456)	* 1.8 光测高温法(457) 思考题(458) 习题(459)	
§ 2 光的粒子性和波粒二象性	..... (460)	
2.1 光电效应(460)	2.2 爱因斯坦光子假说与光电效应的解释(462)	2.3 康普顿效应(463)
2.4 波粒二象性(466)	思考题(470) 习题(470)	
§ 3 玻尔原子模型与爱因斯坦辐射理论	..... (471)	
3.1 原子结构经典理论的困难(471)	3.2 氢原子光谱中的谱线系(472)	3.3 玻尔假说(474)
3.4 粒子数按能级的统计分布(476)	3.5 自发辐射、受激辐射和受激吸收(476)	3.6 粒子数反转与光放大(479)
3.7 能级的寿命(479)	习题(480)	
§ 4 激光的产生	..... (481)	
4.1 激光概述(481)	4.2 激活介质中反转分布的实现(482)	4.3 增益系数(483)
4.4 谐振腔的作用(485)		
§ 5 激光器对频率的选择	..... (488)	
5.1 由谐振腔决定的纵模间隔和单模线宽(489)	5.2 由激活介质辐射决定的线宽(490)	5.3 小结(491)
§ 6 激光的特性及应用	..... (492)	
6.1 激光光束的特性(492)	* 6.2 激光的应用(494)	6.3 光速的测量与长度单位“米”的定义(495)
* 6.4 非线性光学效应(497)		

绪 论

1. 光的本性

光是一种重要的自然现象,我们所以能够看到客观世界中斑驳陆离、瞬息万变的景象,是因为眼睛接收物体发射、反射或散射的光.据统计,人类感官收到外部世界的总信息量中,至少有 90% 以上通过眼睛.由于光与人类生活和社会实践的密切联系,光学也和天文学、几何学、力学一样,是一门最早发展起来的学科.然而,在很长一个历史时期里,人类的光学知识仅限于一些现象和简单规律的描述.对光的本性的认真探讨,应该说是从十七世纪开始的.当时有两个学说并立,一方面,以牛顿为代表的一些人提出了微粒理论,认为光是按照惯性定律沿直线飞行的微粒流.这学说直接说明了光的直线传播定律,并能对光的反射和折射作一定的解释(见第一章 2.3 节).但是,用微粒说研究光的折射定律时,得出了光在水中的速度比空气中大的错误结论.不过这一点在当时的科学技术条件下还不能通过实验测定来鉴别.光的微粒理论差不多统治了十七、十八两个世纪.另一方面,和牛顿同时代的惠更斯提出了光的波动理论,认为光是在一种特殊弹性介质中传播的机械波.这理论也解释了光的反射和折射等现象(见第一章 2.3 节).然而惠更斯认为光是纵波,他的理论是很不完善的.十九世纪初,托马斯·杨和菲涅耳等人的实验和理论工作,把光的波动理论大大推向前进,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认光是横波(有关光的波动理论,参见第二章).根据光的波动理论研究光的折射,得出的结论是光在水中的速度应小于在空气中的速度,这一点在 1862 年为傅科的实验所证实.因此,到十九世纪中叶,光的波动说战胜了微粒说,在比较坚实的基础上确立起来.

惠更斯-菲涅耳旧波动理论的弱点,和微粒理论一样,在于它们都带有机械论的色彩,把光现象看成某种机械运动过程.认为光是一种弹性波,就必须臆想一种特殊的弹性介质(历史上叫做“以太”)充满空间,为了不与观测事实抵触,还必须赋予以太极其矛盾的属性:密度极小和弹性模量极大.这不仅在实验上无法得到证实,理论上也显得荒唐.重要的突破发生在十九世纪六十年代.麦克斯韦在前人的基础上,建立起他著名的电磁理论.这个理论预言了电磁波的存在,并指出电磁波的速度与光速相同.因此麦克斯韦确信光是一种电磁现象,即波长较短的电磁波.1888 年赫兹实验发现了波长较长的电磁波——无线电波,它有反射、折射、干涉、衍射等与光波类似的性质.后来的实践又证明,红外线、紫外线和 X 射线等也都是电磁波,它们彼此的区别只是波长不同而已.光的电磁理论以大量无可辩驳的事实赢得了普遍的公认.

以上是经典物理学中光的微粒说与波动说之争的简短回顾,其中讨论的主要是光的传播,很少涉及光的发射和吸收.那时期光和物质的相互作用问题还没有怎么研究过,许多现象尚未发现.

十九世纪末、二十世纪初是物理学发生伟大革命的时代.从牛顿力学到麦克斯韦的电磁理论,经典物理学形成一套严整的理论体系.当时绝大部分物理学家深信,物理学中各种基本问题在原则上都已得到完美的解决,它的理论体系囊括了一切物理现象的基本规律,剩下的似乎只是解微分方程和具体应用的问题了.然而,正当人们欢庆这宏伟的经典物理学大厦落成的时候,一个个使经典物理学理论陷入窘境的惊人发现接踵而来.1887年迈克尔孙和莫雷利用光的干涉效应,试图探测地球在“以太”中的绝对运动,他们得到否定的结果,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了根本困难.随后瑞利和金斯根据经典统计力学和电磁波理论,导出黑体辐射公式,该公式要求辐射能量随频率的增大而趋于无穷.当时物理学界的权威开尔文爵士把光以太和能均分定理的困难比喻作笼罩在物理学晴朗天空中的两朵乌云,从后来物理学的发展看来,这两朵“乌云”正预示着近代物理学两个革命性的重大理论——相对论和量子论的诞生.有趣的是,这两个问题恰好都与光学有关.

现在让我们回到光的本性问题上来.为了解决黑体辐射理论的矛盾,1900年普朗克提出了量子假说,认为各种频率的电磁波(包括光),只能像微粒似地以一定最小份额的能量发生(它称为能量子,正比于频率,详见第九章§1).这是一个光的发射问题.另一个显示光的微粒性的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,但与光的频率有关(详见第九章§2).这是一个光的吸收问题.1905年爱因斯坦发展了光的量子理论,成功地解释了这个效应.光究竟是微粒还是波动?这个古老的争论重新摆在了我们的面前.

其实,“粒子”和“波动”都是经典物理的概念.近代科学实践证明,光是个十分复杂的客体.对于它的本性问题,只能用它所表现的性质和规律来回答:光的某些方面的行为像经典的“波动”,另一些方面的行为却像经典的“粒子”.这就是所谓“光的波粒二象性”.任何经典的概念都不能完全概括光的本性.

2. 光源和光谱

任何发光的物体,都可以叫做光源.太阳、蜡烛和火焰、钨丝白炽灯、日光灯、水银灯,都是我们日常生活中熟悉的光源.光源不仅用来照明,在实验室中为了各种科学研究课题的需要,人们常使用形式多样的特殊光源,如各种电弧和气体辉光放电管等.1960年发明的激光器,则是一种与所有过去的光源性质不同的崭新光源.

光既然是一种电磁辐射,就要有某种能量的补给来维持其发射.按能量补给的方式不同,光的发射大致可分为以下两大类.

(1) 热辐射

不断给物体加热来维持一定的温度,物体就会持续地发射光,包括红外线、紫外线等

不可见的光.在一定温度下处于热平衡状态下物体的辐射,叫做热辐射或温度辐射.太阳、白炽灯中光的发射属于此类.

(2)光的非热发射

各种气体放电管(如日光灯、水银灯)管内的发光过程是靠电场来补给能量的,这个过程叫做电致发光.某些物质在放射线、X射线、紫外线、可见光或电子束的照射或轰击下,可以发出可见光来,这种过程叫做荧光,日光灯管壁上的荧光物质、示波管或电视显像管中的荧光屏的发光属于此类.有的物质在上述各种射线的辐照之后,可以在一段时间内持续发光,这种过程叫做磷光,夜光表上磷光物质的发光属于此类.由于化学反应而发光的过程,叫做化学发光,如腐物中的磷在空气中缓慢氧化发出的光(如有时在坟地上出现的“鬼火”)属于这一类.生物体(如萤火虫)的发光叫做生物发光,它是特殊类型的化学发光过程.

应当指出,能量形式可以相互转化,上述光的各种发射过程不能截然分开,同一光源中光的发射过程也往往不是单一的.

在各种波长 λ 的电磁波中,能为人类的眼睛所感受的,只是 $\lambda=4000\text{—}7600\text{\AA}$ ^①的狭小范围.这波段内的电磁波叫做可见光.在可见光范围内不同波长的光引起不同的颜色感觉.大致说来,波长与颜色的对应关系见下表:

7600	6300	6000	5700	5000	4500	4300	4000(\AA)
红	橙	黄	绿	青	蓝	紫	

由于颜色是随波长连续变化的,上述各种颜色的分界线带有人为约定的性质.

在电磁波谱中与可见光波段衔接的,短波一侧是紫外线(4000\AA — 50\AA 左右),长波一侧是红外线(7600\AA —十分之几毫米).红外的波段很宽,为了方便,人们还常把它进一步分为近红外、中红外和远红外几段.习惯上红外线的波长用微米(μm)作单位, $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}=10^4\text{\AA}$,波长小于 $1\text{—}2\mu\text{m}$ 的叫近红外,大于 $10\mu\text{m}$ 的叫远红外,二者之间便是中红外(用 μm 表示,可见光的波长范围为 $0.40\text{—}0.76\mu\text{m}$).下面我们谈到“光”,常广义地把可见光以外波段的电磁辐射包括在内.

任何波长的电磁波在真空中的传播速度都是相同的,通常用 c 表示,其数值为

$$c=299\,792\,458\text{m/s}\approx 3\times 10^8\text{m/s}.$$

因此从波长 λ 立即可以换算出频率 ν 来:

$$\nu=\frac{c}{\lambda}. \quad (0.1)$$

例如,波长范围为 $4000\text{—}7600\text{\AA}$ 的可见光,对应的频率范围是 $7.5\text{—}3.9\times 10^{14}\text{Hz}$.

通常说光的强度(简称光强),是指单位面积上的平均光功率,或者说,光的平均能流

① $1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$.

密度. 作为电磁波, 这应由坡印亭矢量 $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ 确定^①, 因电磁波中 $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$, 且 $\sqrt{\epsilon\epsilon_0} \mathbf{E} = \sqrt{\mu\mu_0} \mathbf{H}$, 坡印亭矢量的瞬时值为

$$S = |\mathbf{E} \times \mathbf{H}| = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} E^2, \quad (0.2)$$

式中 ϵ 和 μ 是相对介电常数和相对磁导率, ϵ_0 和 μ_0 是真空介电常数和真空磁导率. 在光频段, 所有磁化机制都不起作用, $\mu \approx 1$, 从而光学折射率 $n = \sqrt{\epsilon\mu} \approx \sqrt{\epsilon}$. 故

$$S = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n E^2 = \frac{n}{c\mu_0} E^2, \quad (0.3)$$

这里用到 $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ 的关系式. 对于简谐振动, 平均值 $\bar{E}^2 = \frac{1}{2} E_0^2$, 其中 E_0 为振幅, 故光的强度为

$$I = \bar{S} = \frac{n}{2c\mu_0} E_0^2 \propto E_0^2. \quad (0.4)$$

在同一种介质里只关心光强的相对分布时, 上式中的比例系数不重要, 人们往往把光的(相对)强度就写成是振幅的平方:

$$I = E_0^2. \quad (0.5)$$

但在比较两种介质里的光强时, 则应注意到, 比例系数中还有一个与介质有关的量——折射率 n .

单一波长的光叫单色光, 否则是非单色光.

如果我们用棱镜或其他分光仪器对各种普通光源发出的光进行分析, 就会发现它们大都不是单色光. 令 dI_λ 代表波长在 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 之间光的强度,

$$i(\lambda) = \frac{dI_\lambda}{d\lambda} \quad (0.6)$$

代表单位波长区间的光强, 非单色光的 $i(\lambda)$ 按波长的分布, 叫做光谱, $i(\lambda)$ 叫做谱密度, 总光强 I 与谱密度的关系是

$$I = \int_0^\infty dI_\lambda = \int_0^\infty i(\lambda) d\lambda. \quad (0.7)$$

不同的光源有不同的光谱, 例如热辐射光源光谱的特点如图 0-1 所示, 光强在很大的波长范围内连续分布. 这种光谱叫连续光谱. 气体(或金属蒸气)放电发射光谱的特点如图 0-2 所示, 光强集中在一些分立的波长值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ 附近形成一条条谱线. 这种光谱叫线光谱, 不同的化学成分各有自己的特征谱线. 每条谱线只是近似的单色光. 它们的光强分布有一定的波长范围 $\Delta\lambda$, 这 $\Delta\lambda$ 称为谱线宽度. $\Delta\lambda$ 越小, 表示光的单色性越好. 激光器的谱线宽度可以做得比普通光源小得多, 单色性好正是激光的几个基本优点之一. 若干元素的普通光源和激光器的典型谱线列于表 0-1.

^① 参见赵凯华、陈熙谋:《电磁学》,第八章,人民教育出版社.