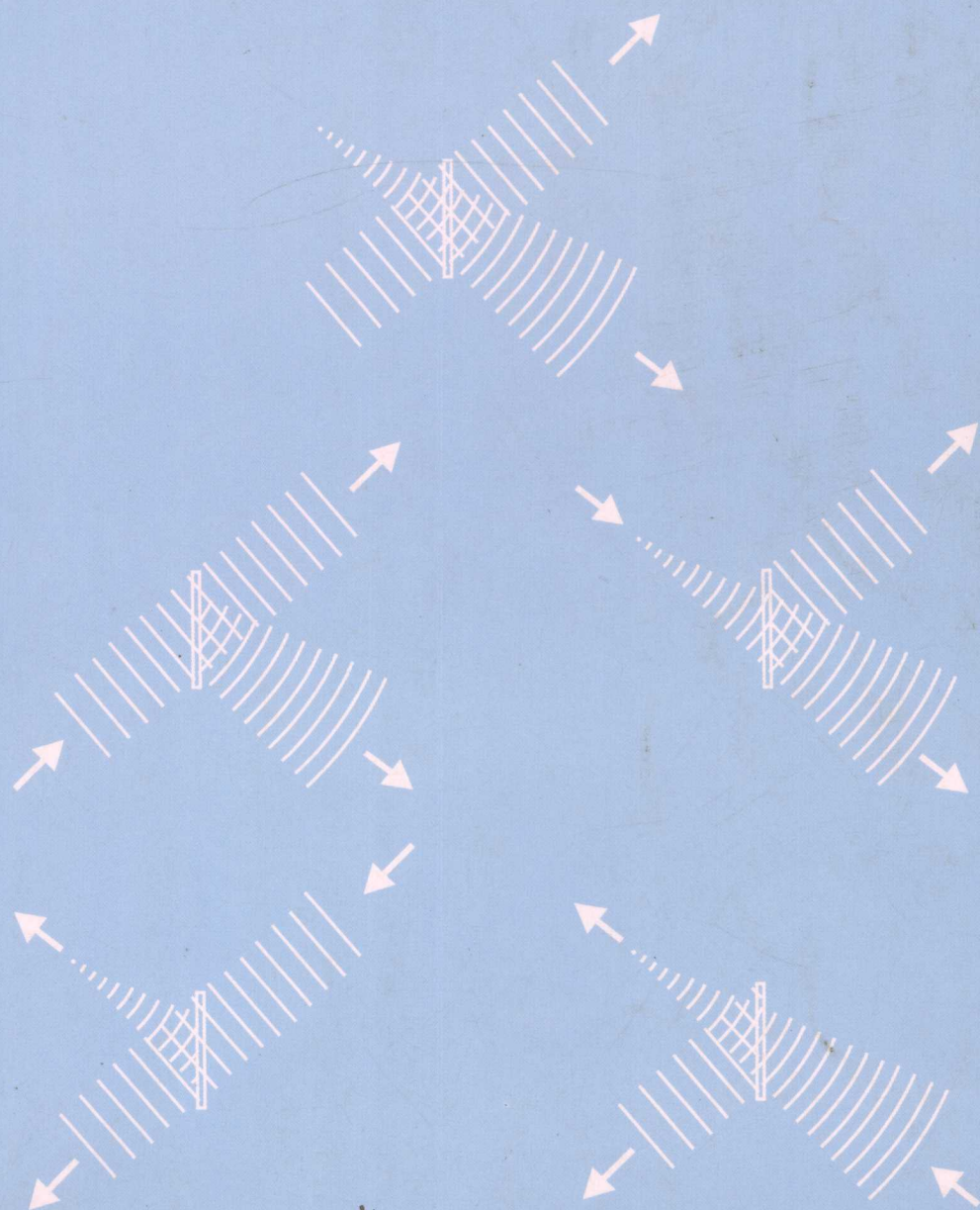


# 光 学

(修订版)

高文琦 等 编著



南京大学出版社

043

97

责任编辑 秦 涛  
责任校对 刘 芸

ISBN 7-305-02236-5



9 787305 022364 >

ISBN 7-305-02236-5/O · 151

定价:23.00元

043  
97

# 光 学

(修订版)

高文琦 叶蓉华 李曾沛 编著  
何永蓉 周 进

南京大学出版社

## 内 容 简 介

本书是根据作者在南京大学物理、天文等系多年讲授光学课时使用的讲义编写而成的。全书内容包括几何光学、光度学、光的干涉、光的衍射、光的偏振、量子光学和近代光学中的一些课题。内容翔实、插图丰富,有不少是作者的特色。

本书可作为综合大学、高等师范院校及其他高校的光学教材,对从事光学科研工作的有关科技人员亦是一本入门的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

光学/高文琦等编著.—2版.—南京:南京大学出版社,2000.2

ISBN 7-305-02236-5

I. 光... II. 高... III. 光学 IV. 043

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 55416 号

书 名 光 学

著 者 高文琦等

出版发行 南京大学出版社

(南京汉口路 22 号南京大学校内 邮编 210093)

照 排 南京展望照排印刷有限公司

印 刷 武进第三印刷厂

经 销 全国各地新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 17.5 字数 431 千

版 次 2000 年 8 月第 2 版 2004 年 7 月第 2 次印刷

印 数 3001~4500

定 价 23.00 元

ISBN 7-305-02236-5/O·151

声明:(1) 版权所有,侵权必究。

(2) 本丛书若有印装质量问题,本社发行部负责退换。

发行部订购、联系电话: 3592317、3319923、3302695

## 前 言

这本光学教材是编者在多年讲授光学课程所用讲义的基础上,参阅了国内外大量有关教材后修订而成的.原讲义曾在南京大学物理系、天文系、电子科学与工程系、大气科学系等广泛地使用过.

在这次修改过程中注意了光学课程的系统性,对光学现象的基本规律和基本概念的阐述时只求清楚而不刻意追求它的完整性.这样,当读者读完本书后,能明确理解光学课程的主要线索.在上述的基础上,我们感到介绍一些近代光学的内容对开拓读者的知识面也是有好处的.鉴于这些考虑,本书主要包括了几何光学、干涉、衍射、偏振、光的量子性和近代光学的一些课题等几部分内容,对光度学方面知识也作了必要的介绍.另一方面,我们也注意到光学教材中插图对帮助读者理解内容建立物理图像起着重要作用.在此我们花了大量时间查阅有关资料,特别是增加了具有特色的插图,还制作了部分的插图.希望这些努力能有益于使用本书的读者.

本书讲授需要 70 学时左右,其中前 5 章为基本内容,需要 50 学时左右,最后两章约 18 学时,这部分内容也可作为自学.

本书的分工如下:叶蓉华教授第一章,何永蓉副教授第五章,周进教授第六章、第七章,李曾沛副编审第三章的部分内容,其余为高文琦教授撰写.高文琦教授并负责全书的统稿.

在本书的编写和出版过程中,方松如副教授提出了不少有益的建议,南京大学物理系领导和南京大学出版社也给予了多方面的支持,对此我们表示衷心的感谢.

由于成书时间紧迫和水平所限,书中不妥和疏漏之处在所难免,真诚地希望本书的读者能给予指正并将对本书的各种意见反馈给我们.

编者  
于南京大学

## 再版前言

本书是1994年南京大学出版社出版的光学教材的再版,该光学教材在南京大学等多所高校中作为教材使用.1996年获得国家教育委员会优秀教材二等奖,这次根据教学的要求进行了修订和再版.

科学技术日新月异,光学知识在各个领域也更多地发挥着各种各样关键的作用,作为一本基础光学教材,考虑到教学学时的限制,我们强调的还是基础、少而精.修订时增加了部分新内容,并对原有的插图进行了修改,力求更清晰、更形象.

最后衷心希望本书的使用者把各种意见反馈给我们.

编者

2000.1

## 绪 论

从很古老的时代起,人类对于光的现象,就已积累了许多知识,使光学成为最古老的学科之一.而光学的发展历史几乎和人类的历史一样悠久,人们从远古时代起就知道把光作为能源和传递信息的工具而加以利用.

在我们祖国,几千年前建造的烽火台,就是利用光来传递信息的光辉范例.成书于公元前三四百年的“墨经”,已能运用光线直进原理,解释针孔成像等的实验结果,是反映我国光学现象研究的最早文字记载,说明我国古代早已开始了光学的研究.

在光学发展历史中,特别值得一提的是人类对光的本性的认识过程.

“光到底是什么?”除了光是可以用眼睛看见这个明显而简单的解释外,“光在物理上又该怎样解释呢?”多少年来,人们一直在思考和研究这个问题,认识也是逐步地深入的.

最初,根据几何光学定律和力学定律之间的相似性(例如,光的直线传播和物体按惯性作直线运动很相似,光的反射和小球对于刚体表面的弹性碰撞很相似),人们就认为光是从发光体发出的按惯性运动的最小粒子流.这个观点就是牛顿的微粒说.根据这个学说可解释光的直线传播现象和反射现象.但对折射现象的解释,则与实验结果不符.

随着光学的进一步发展,发现了一些新的现象——光的衍射(又称绕射)和干涉.这些现象不能用几何光学的定律加以解释,因此和光的微粒说发生矛盾.同时,光的衍射和干涉现象和水面波的现象很相似,由此便产生了以惠更斯为代表的光的波动说.

根据这个学说,光是一种波,它从光源出发,并在空间传播,具有波动的属性.

于是,就有了光的两种学说:微粒说和波动说.这两种学说彼此矛盾,并引起了争论.

波动说在开始阶段曾遭到某些失败(例如,不能很好地解释光的直线传播).后来,经过人们在光学现象领域内进行了一系列决定性的实验,才促使波动说占了上风.

然而,这种情况没有维持多久,又发现了一些新的现象——光电效应(在光照射下金属表面逸出电子的现象)和其他现象,而这些新现象都是有利于微粒说的.但是,对于微粒的含意已不能像牛顿的微粒说那样简单地去理解.现在所指的微粒,是认为光的吸收和发射都是一份一份的光能,称为光子或光量子.

现代科学到底如何回答“光是什么”这一问题?是微粒还是波动?

原来,光既具有微粒性,又具有波动性(所谓二象性).在一些现象中(光与物质相互作用时),光的微粒性表现得很明显(如光电效应),而在另一些现象中(传播过程),波动性又表现得很明显(如衍射,干涉).

怎样才能把这种互不调和的微粒概念和波动概念加到同一“光”上?下面我们举一个非常简单的例子来说明,对于同一物体的性质怎么会有极不相同的看法.例如,两个人同时看一物体——圆锥体.第一个人从圆锥体上面去看,则只能看到圆锥体底部的投影;而第二个人从侧面去看,则只能看到圆锥体侧面的投影.那么,第一个人便说,他所看到的物体是圆形的,同时第二个人也会肯定地说,该物体是三角形的.这些断言初看起来,似乎是不相调和的.实际

上,两个人所看到物体的形状比圆形和三角形更为复杂,而圆形和三角形只不过是该物体的不同投影而已。

光的微粒性与波动性与上述的例子有些相似。但如果有人一定要问“光到底是什么?”那么,这是不能简单地回答的。因为在我们周围还找不到一种宏观模型可以用来作比拟。但是对事物的理解并不一定都要借助于比拟的方法。现在对于全部光学现象的理论解释是由麦克斯韦电磁场理论和量子理论联合得出的。麦克斯韦理论处理光的传播问题,而量子理论则描述光与物质的相互作用,也就是描述光的吸收与发射过程。这种联合的理论称为量子电动力学。由于电磁理论和量子理论除了能解释与电磁辐射有关的现象以外,还能解释许多其他物理现象,完全有理由认为光的本性问题已经圆满地解决了,至少是在数学结构范围内(这种数学结构与目前实验观察结果正确符合)。至于光的“真正”或“最终”本性问题尽管尚未完全解决,但对我们了解和学习光学并没有多大的影响。

光学这门课就其内容来说,一般可以分为几何光学、波动光学(物理光学)和量子光学。本教科书作为基础光学的教材,重点放在几何光学和波动光学。量子光学和现代光学只作一般性介绍。波动光学中把光看成电磁波,所不同于无线电波的是:光的波长非常短(频率很高)。在自然界中,已经知道具有各种不同波长的电磁波。所有电磁波的总和,可以列成一波谱表(见图 0.1)。在电磁波谱中,可见光只占很小的波段,大约由 390nm 到 770nm ( $1\text{nm}(1\text{ 纳米}) = 10^{-9}\text{m}$ ),对应的频率范围是  $7.7 \times 10^{14}\text{Hz} \sim 3.9 \times 10^{14}\text{Hz}$ 。波动光学中的许多概念和研究方法同样适用于波谱的其他波段。

从科学发展来说,光学的发展是领先于电子学和物理学的其他部分的,但是在光学的发展中也曾经经过步履艰难的时期,甚至当时有些物理学家说,在光学中已无什么进展可以期望了,光学似乎不那么值得注意了。最近半个世纪以来,由于激光的出现和发展,光学和电子学密切结合、渗透以及工艺水平的提高,特别是激光导致了光学新的迅速发展,先后出现了许多新的领域。过去,由于光束的电磁场很弱,仅能产生线性效应。而现在有了非常强的大功率激光,从而产生了许多非线性效应,由此而出现了光学的新分支——非线性光学。利用这些新发现,使人们对材料的研究进一步深入。其他如全息、二元光学、衍射光学、纤维光学、光通信、集成光学、光计算等领域,也取得了很大的成就,形成了新的光学分支。但就光学本身能力而言,如光的波长短、信息容量大、光传递信息和变换处理信息的二维特性等还具有很大的潜力,它的发展远远没有达到人们预期的水平。

光学在物理学的发展中也起过很重要的作用,可以毫不夸张地说,光学的发展史就是物理学的发展史。这不仅仅是指光学仪器在物理的实验研究中占重要地位,更重要的是光学概念和光学中的成果对物理学和物理学家的种种影响,具有非常根本的意义。了解这些,对于初次学习光学并立志将来成为物理学家的学生来说,也是很有益的。



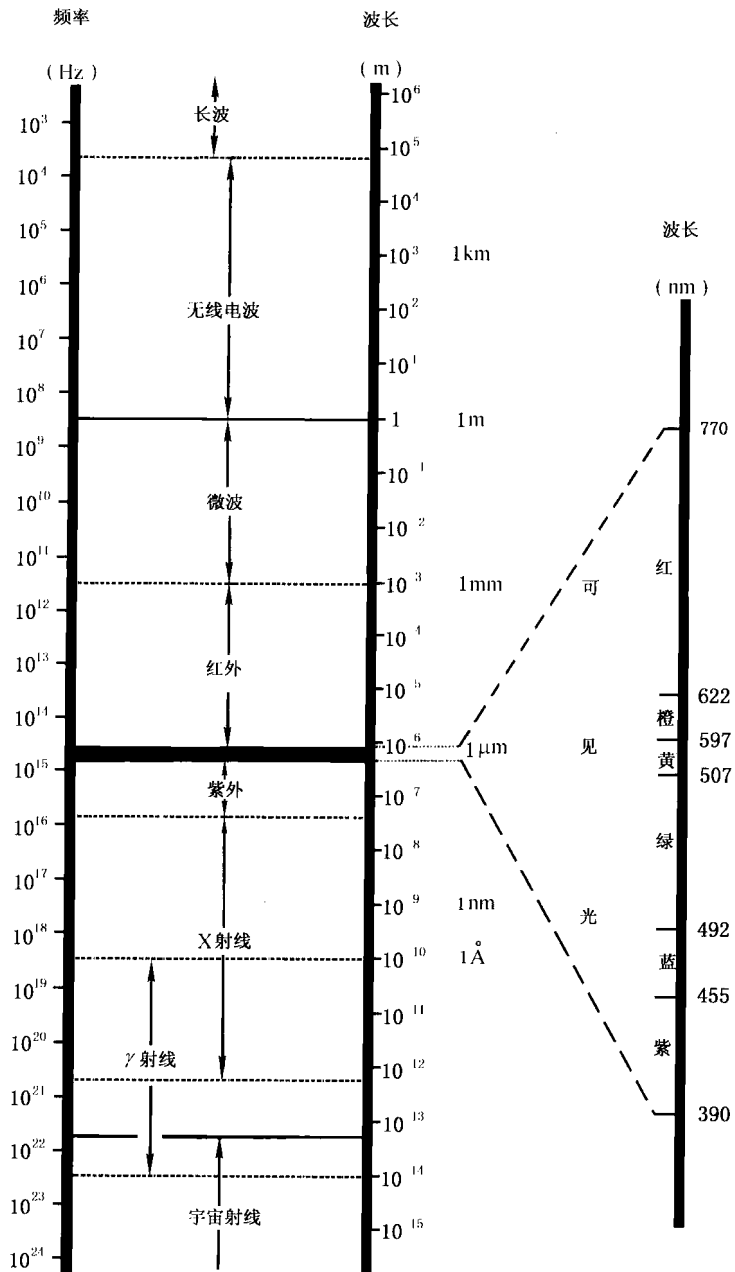


图 0.1 电磁波谱表

# 目 录

第一章 几何光学 .....	1
1.1 几何光学的基本定律 .....	1
1.1.1 光线 .....	1
1.1.2 光的反射定律和折射定律 .....	1
1.1.3 光的可逆性原理 .....	5
1.1.4 费马原理 .....	5
1.1.5 棱镜的色散作用 .....	7
1.2 成像的基本概念 .....	9
1.2.1 同心光束与物像关系 .....	9
1.2.2 物像的分类 .....	9
1.3 单个球面的折射及反射成像 .....	11
1.3.1 符号规则 .....	11
1.3.2 单球面折射成像公式的推导 .....	11
1.3.3 单球面反射成像公式的推导 .....	16
1.4 球面折射的三种放大率 .....	17
1.4.1 线放大率 $\beta$ .....	17
1.4.2 轴向放大率 $\alpha$ .....	19
1.4.3 角放大率 $\gamma$ .....	20
1.4.4 放大率三角形 .....	21
1.5 共轴球面系统成像 .....	21
1.5.1 共轴球面系统的定义与性质 .....	21
1.5.2 共轴球面系统的基点 .....	22
1.5.3 共轴球面系统成像问题的解法 .....	24
1.5.4 共轴球面系统基点的求法 .....	26
1.5.5 共轴球面系统的物像关系 .....	32
1.5.6 物空间和像空间 .....	32
1.6 光阑 .....	34
1.6.1 孔径光阑和视场光阑 .....	34
1.6.2 孔径光阑 入射光瞳和出射光瞳 .....	35
1.6.3 光学系统中孔径光阑的求法 .....	36
1.6.4 视场光阑 入射窗和出射窗 .....	37
1.7 光学仪器 .....	40
1.7.1 眼睛 .....	40
1.7.2 放大镜 .....	43

1.7.3 投影仪器 .....	44
1.7.4 照相机 .....	45
1.7.5 显微镜 .....	48
1.7.6 望远镜 .....	49
1.7.7 目镜 .....	51
1.8 像差 .....	52
1.8.1 像差概述 .....	52
1.8.2 球面像差 .....	53
1.8.3 彗形像差 .....	54
1.8.4 像散和像场弯曲 .....	55
1.8.5 畸变 .....	56
1.8.6 色差 .....	57
习题 .....	57
<b>第二章 光度学的基本概念</b> .....	<b>62</b>
2.1 光通量 .....	62
2.2 发光强度 .....	63
2.3 照度 .....	64
2.4 亮度 发光表面所产生的照度 .....	65
2.5 量度单位 .....	67
2.6 经过光学系统的光通量 .....	68
习题 .....	69
<b>第三章 光的干涉</b> .....	<b>70</b>
3.1 光的干涉现象 .....	70
3.2 线性叠加原理和相干条件 .....	71
3.2.1 电磁场的线性叠加原理 .....	71
3.2.2 电磁波平均能流密度和光强 .....	71
3.2.3 叠加区域中的场强和光强,相干条件 .....	71
3.3 杨氏实验的分析 .....	73
3.3.1 相干条件的满足 .....	73
3.3.2 观察屏上光强的讨论 .....	74
3.4 一些实际问题的考虑 .....	76
3.4.1 条纹对比度 .....	76
3.4.2 时间相干性——相干长度和相干时间 .....	77
3.4.3 空间相干性 .....	81
3.5 实现干涉的方法 .....	84
3.5.1 波前分割法 .....	84
3.5.2 振幅分割法 .....	86
3.6 迈克耳孙干涉仪 .....	91
3.6.1 仪器的结构 .....	92

3.6.2	仪器的等效光路 .....	93
3.6.3	等倾干涉条纹的特征 .....	93
3.6.4	几种振幅分割的干涉仪 .....	96
3.6.5	傅里叶变换分光计 .....	96
3.7	多光束干涉 .....	98
3.7.1	多光束干涉的原理 .....	98
3.7.2	多光束干涉仪的结构和条纹特征 .....	101
3.7.3	自由光谱程和分辨本领 .....	103
3.7.4	激光器的谐振腔 .....	105
	习题 .....	106
<b>第四章 光的衍射 .....</b>		<b>109</b>
4.1	光的衍射现象 .....	109
4.2	衍射的分类 .....	111
4.3	惠更斯-菲涅耳原理 .....	112
4.4	菲涅耳衍射 .....	113
4.4.1	球面波的自由传播 .....	113
4.4.2	圆孔衍射 .....	119
4.4.3	圆屏衍射 .....	121
4.4.4	菲涅耳波带片 .....	121
4.5	夫琅和费衍射 .....	124
4.5.1	平行光照明时的单缝衍射 .....	124
4.5.2	圆孔衍射 .....	130
4.5.3	远区场衍射和近区场衍射 .....	132
4.6	分辨本领 .....	133
4.6.1	望远镜的分辨本领 .....	133
4.6.2	显微镜的分辨本领 .....	135
4.6.3	衍射受限光学系统 .....	136
4.7	衍射光栅 .....	136
4.7.1	结构与作用 .....	136
4.7.2	光栅强度公式的推导 .....	137
4.7.3	强度分布曲线的规律 .....	138
4.7.4	光谱分析元件的三个参数 .....	141
4.7.5	其他形式的光栅方程式和闪耀光栅 .....	143
4.7.6	振幅矢量图 .....	144
4.7.7	光栅的应用 .....	146
	习题 .....	146
<b>第五章 光的偏振 .....</b>		<b>149</b>
5.1	有关偏振光的一些概念 .....	149
5.1.1	光的偏振性 .....	149

5.1.2	光的偏振结构 .....	151
5.1.3	自然光 .....	152
5.1.4	部分偏振光 .....	153
5.2	各种偏振状态的数学表示式 .....	154
5.2.1	直线偏振光 .....	154
5.2.2	圆偏振光 .....	155
5.2.3	椭圆偏振光 .....	157
5.3	偏振光的强度 .....	159
5.3.1	偏振器 .....	159
5.3.2	马吕斯定律 .....	159
5.4	反射、折射产生偏振光 .....	161
5.4.1	菲涅耳公式 .....	161
5.4.2	反射率和透射率 .....	162
5.4.3	反射、折射时的偏振现象 .....	163
5.4.4	半波损失的解释 .....	165
5.5	二向色性物质产生偏振光 .....	168
5.5.1	线型光栅偏振器 .....	168
5.5.2	二色性晶体 .....	168
5.5.3	人造偏振片 .....	169
5.6	散射产生偏振 .....	169
5.6.1	散射的分类 .....	169
5.6.2	瑞利散射定律 .....	170
5.6.3	散射光的偏振状态 .....	170
5.7	利用双折射产生偏振光 .....	171
5.7.1	双折射现象的基本概念 .....	171
5.7.2	单轴晶体中双折射现象的解释 .....	173
5.7.3	寻常光和非常光的相对光强 .....	176
5.7.4	双折射偏振器 .....	178
5.8	相位延迟器——波片 .....	181
5.8.1	相位延迟作用 .....	181
5.8.2	全波片 .....	182
5.8.3	半波片 .....	183
5.8.4	1/4 波片 .....	184
5.8.5	可变相位延迟板 .....	185
5.9	光波偏振态的定性分析 .....	186
5.10	偏振光的干涉 .....	187
5.10.1	实验装置及现象 .....	188
5.10.2	偏振光干涉的强度公式 .....	188
5.10.3	实验现象的解释 显色偏振 .....	189
5.10.4	会聚偏振光的干涉 .....	190
5.11	旋光性 .....	192
5.11.1	旋光现象 .....	192

5.11.2 旋光性的解释 .....	193
5.11.3 菲涅耳假设的实验证明 .....	195
5.12 感应的光效应 .....	195
5.12.1 光弹效应 .....	196
5.12.2 电光效应 .....	196
5.12.3 法拉第效应 .....	197
5.12.4 液体中的各向异性——液晶 .....	198
习题 .....	200
<b>第六章 光的量子现象 .....</b>	<b>203</b>
6.1 热辐射 普朗克公式 .....	203
6.1.1 热辐射 基尔霍夫定律 .....	203
6.1.2 黑体辐射以及经典理论 .....	204
6.1.3 腔内电磁辐射的模式推导 .....	207
6.1.4 普朗克的量子假说 普朗克公式 .....	208
6.1.5 光测高温法 .....	210
6.2 光电效应 爱因斯坦方程 .....	211
6.2.1 光电效应的实验规律 .....	212
6.2.2 经典波动理论的困难 .....	213
6.2.3 光量子 爱因斯坦方程 .....	214
6.2.4 光电效应的应用 .....	215
6.3 康普顿效应 .....	216
6.3.1 康普顿效应的实验定律 .....	216
6.3.2 康普顿效应的理论解释 .....	217
6.4 光的波粒二象性 .....	219
6.4.1 德布罗意波 .....	219
6.4.2 几率波 .....	220
6.4.3 不确定关系式 .....	221
习题 .....	222
<b>第七章 近代光学的一些课题 .....</b>	<b>224</b>
7.1 激光 .....	224
7.1.1 光的自发辐射、受激吸收和受激辐射 .....	224
7.1.2 光在介质中的增益 .....	228
7.1.3 光振荡条件 .....	230
7.1.4 纵模和横模 .....	231
7.1.5 激光器的种类 .....	234
7.1.6 激光的应用 .....	235
7.2 全息照相 .....	236
7.2.1 全息照相的特点 .....	236
7.2.2 全息照相的基本原理 .....	236

7.2.3 全息图的几种类型 .....	239
7.2.4 全息干涉计量 .....	242
7.3 光信息处理初步 .....	243
7.3.1 预备知识 .....	243
7.3.2 阿贝成像理论 .....	246
7.3.3 阿贝-波特实验与空间滤波 .....	247
7.3.4 光信息处理的应用 .....	248
7.4 非线性光学 .....	252
7.4.1 非线性光学概述 .....	252
7.4.2 几种非线性效应 .....	252
习题 .....	258
部分习题答案 .....	259
参考书目 .....	263

# 第一章 几何光学

几何光学,又称射线光学、光线光学,它不考虑光的波动性(即不考虑光的干涉、衍射等波动现象),而只根据光能量沿着光线传播的概念来处理问题.几何光学有三条基本定律,即光的直线传播定律、反射定律和折射定律,利用这三条定律可以讨论光在透明介质中的传播和成像问题.

本章首先介绍球面折射和球面反射成像,然后介绍由光学元件组合成的光学系统的成像,最后介绍一些常用的光学仪器.

## 1.1 几何光学的基本定律

### 1.1.1 光线

在几何光学中经常用“光线”来描述光的传播,因而几何光学又有光线光学的名称.那么,什么是“光线”呢?大量事实说明,随着光的传播有能量的传播,如植物在光照下得以生长,太阳能的利用也是指太阳光能的利用.光线就是代表光能传播方向的一根“线”,光线是一个抽象的概念.在均匀各向同性的介质中光线是一条直线,这就是光的直线传播定律.有经验的木工师傅就是运用“光的直线传播”这一事实来判断他们所刨的木块是否平直,因为凸出的物点会阻断光线.在非均匀介质中,光线是弯曲的曲线,如大气中(其密度与高度成反比)光线的弯曲使人们能看到已下山(低于真正的地平线)的太阳.

只有在光的传播过程中所遇到的物体的尺寸比光波的波长大多得多,例如常用的光学仪器和光学元件透镜、棱镜之类其尺寸远远大于波长,在这种情况下才可以不考虑光的波动性,仅用光线来处理问题,但是,这样做只是一种近似,只能以一定的精度与实际相符.

### 1.1.2 光的反射定律和折射定律

光在传播过程中遇到不同介质的分界面,如玻璃和空气的分界面时,将有一部分返回到原来介质,这就是光的反射.一部分光透过分界面而进入第二介质,进入第二介质的光,其传播方向一般不同于原来传播的方向,这个现象即所谓光的折射(图 1.1).根据实验,可将入射方向、反射方向和折射方向总结成如下的规律:

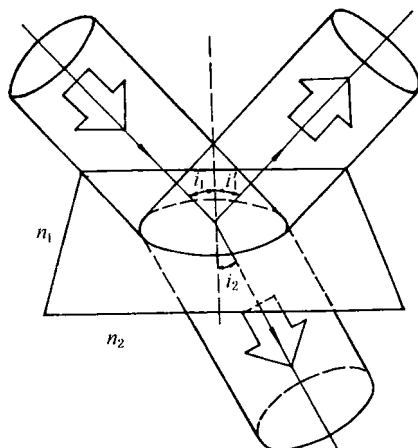


图 1.1 光的反射和折射



## 1) 反射定律

(i) 入射光、反射光、分界面的法线三者在同一平面内,入射光线与分界面的接触点上的法线所定的平面为入射面,因此反射线在入射面内.

(ii) 入射光线与法线构成角为入射角,如图 1.1 中  $i_1$ ,反射光线与法线构成角为反射角,如图 1.1 中  $i_1'$ . 入射角与反射角相等,即

$$i_1 = i_1'. \quad (1.1)$$

这两个内容就是光线的反射定律. 按照上述定律的内容,可知反射光的方向只决定于入射光的方向,而与光的波长及介质性质无关,所以反射现象没有色散问题. 一束白光经过反射后仍是一束白光. 另外,由于公式(1.1)的形式具有对称性,如将  $i_1'$  代表入射角, $i_1$  就代表反射角,光线可以反向进行,这就是光线的可逆性. 例如甲乙二人同时看镜子,甲能看到乙,乙也一定能看到甲.

最后应该指出,光线的反射定律是普遍适用的. 不仅对光滑的分界面适用,对粗糙的分界面也适用. 在光滑平面上发生的镜面反射和粗糙表面上发生的漫反射(图 1.2),两者都服从反射定律.

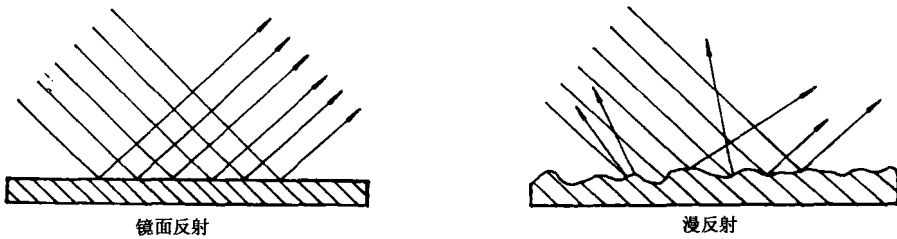


图 1.2 反射的两种情况

## 2) 折射定律

(i) 入射光线、入射光线与分界面的接触点上的法线、折射光线三者在同一平面内,即折射光在入射面内.

(ii) 不论入射角  $i_1$  如何变化,其对应的折射角  $i_2$  也作相应的变化,而且两个角的正弦值之比始终不变,这个比值就是光在两种介质(媒质)中传播速度之比,即

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

有时常写成

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2, \quad (1.2)$$

上式中  $n_1$  与  $n_2$  分别表示介质 1 和介质 2 的折射率(又称折射系数),定义为  $n_1 = \frac{c}{v_1}$  和  $n_2 = \frac{c}{v_2}$ ,  $c$  是光在真空中的传播速度,

$$c = 299792458\text{m/s} \approx 3 \times 10^8\text{m/s}.$$

由于不同波长的光在介质中的传播速度不同,所以折射率不仅和介质种类有关,而且和光的波长有关. 因此,与光的反射不同,在光折射时,不同波长的光将发生散开的现象,即色散现