

普通高等教育光电信息科学与工程规划教材

基础光学

FUNDAMENTAL OPTICS

潘路军◎ 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育光电信息科学与工程规划教材

基础光学

主编 潘路军

参编 彭伟 潘石 李睿

荆振国 武震林 张毅

王乔 胡瑞 詹卫伟



机械工业出版社

本书对光学的普遍现象、基本原理和基础理论体系进行了较全面和系统的阐述,内容包括几何光学、光学仪器和光度学,建立在波动理论基础上的干涉、衍射和偏振的理论和应用以及光与物质相互作用的原理和器件等,并配有适当的例题和习题以加深对知识的理解和掌握。本书可作为物理学、光电信息科学与工程、电子科学与技术、应用物理、测控技术与仪器等理工科专业本科学生的教材或参考书,也可作为相关行业技术人员的参考书。

欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载免费电子课件,或发邮件到 jinaicmp@163.com 索取。

图书在版编目(CIP)数据

基础光学/潘路军主编. —北京:机械工业出版社, 2015. 11

普通高等教育光电信息科学与工程规划教材

ISBN 978-7-111-52168-6

I. ①基… II. ①潘… III. ①光学—高等学校—教材 IV. ①O43

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第270764号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 刘丽敏

版式设计:霍永明 责任校对:闫玥红

封面设计:张静 责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2016年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.25印张·301千字

标准书号:ISBN 978-7-111-52168-6

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649 机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前言

蔚蓝的天空上漂浮着的朵朵白云和雨后悬挂在天边的美丽彩虹,街道两边 LED 广告板闪烁着的迷人光彩、夜晚远处的路灯映于眼帘的光芒和舞台上五颜六色的绚丽的激光秀,商店里琳琅满目的数码相机,天文台中巍然矗立的大型望远镜……这些事物看似不相关,但它们其实都和光学有密切的联系。光学是以光为对象,阐明和研究光的产生、传播和接收的规律以及光与物质的相互作用机制的理论。

光学包含的内容十分丰富,有经典的几何光学和以电磁场为基础的经典波动光学,也有建立在近现代物理理论和技术基础之上的现代光学,如量子光学、激光光学、全息光学、近场光学、傅里叶光学、非线性光学、光谱学等。

光学的发展历久弥新,与时俱进,生机勃勃。从最初牛顿的微粒说和惠更斯的次波学说到杨氏干涉和菲涅耳的衍射理论,从爱因斯坦的光量子说到量子光学理论,从自然火光到油气灯,从普通电光源到激光,从简单的三棱镜到分光仪,从平面镜到哈勃望远镜,从黑白照片到全息照片,从无声电影到 IMAX……光学的发展使人们透过日常生活中司空见惯的光现象,深入到了光的本质,并利用光学原理不断地创造出了丰富多彩的实用技术和工具以及高精尖的科学仪器。特别是激光的广泛应用,更是促进了通信技术和信息处理、精密加工和制造、光电技术和工程、精密仪器和测量、光谱分析和检测等领域的飞速发展。

因此,光学是一门理论性和应用性兼强的学科,一直以来都是各大学物理类、光学工程类、光电信息类和精密仪器类理工科专业学生必修的重要基础课目之一。本书主要面向相关专业本科低年级学生,立足于大类通识教育对光学理论的要求,旨在继承前人的优秀研究成果,总结光学发展的新内容,注重基础光学理论的学习和实际的应用,使学生能够系统地认识光学的发展规律和发展动向,为进一步深入学习光学方面的专业课程以及其他专业知识和技术打下良好的基础。

本书包括以下主要内容:

1. 几何光学是波动光学在波长为无限小时的极限情况,此时可将光束视为几何线条。本书的几何光学部分在光传播的基本规律的基础上,阐述利用透镜成像的基本原理以及像差的形成和补偿,并介绍几种助视光学仪器和光度学的基本知识。

2. 从经典的波动理论出发,阐述波动光学的基础理论,主要包括光波的概念和数学描述、两种最基本的波——平面波和球面波及其复振幅的表述、偏振的基础以及光波在界面反射和折射时振幅、相位和偏振态等的变化。

3. 围绕光的干涉的现象、原理和装置,系统阐述波的叠加原理和干涉条件、干涉的分类和各自的特点及应用、光场的时间和空间上的相干性,重点介绍几种典型的干涉装置的原理和实际应用。

4. 从光的衍射现象和分类出发,以菲涅耳的衍射理论为基础,分析两种典型衍射的发光强度分布特点,阐明光学仪器的分辨本领。在此基础上,重点论述衍射光栅的原理和应用,并简述建立在干涉和衍射基础上的全息技术。

5. 重点关注光在各向异性晶体中的传播,介绍有关晶体光学的基本现象和理论知识,包括晶体的双折射、晶体偏振器件以及波片、旋光效应和电光效应及其应用。

6. 介绍光与介质的相互作用, 包括光的吸收、散射和色散的现象、理论及其应用。

本书是由长期从事光学理论和实验教学及研究的教师联合编写的。绪论和第1章中几何光学部分由彭伟教授和胡瑞女士负责撰写; 第1章中的光学仪器和光度学部分由潘石教授和王乔讲师负责撰写; 第2章由潘路军教授负责撰写; 第3章由荆振国副教授和武震林讲师负责撰写; 第4章至第8章由潘路军教授负责撰写, 张毅副教授负责撰写了全息光学的内容; 第9章由詹卫伸副教授和李睿讲师负责撰写; 附表及电子课件由荆振国副教授和武震林讲师负责搜集和整理; 李睿讲师和胡瑞女士负责了部分图表的设计和制作。潘路军教授进行了全书的整体统稿和编纂。

同时, 本书的编写得到了大连理工大学教务处和物理与光电工程学院的大力支持, 在此深表谢意。

尽管在编写中对书稿进行了反复认真的修改和校对, 但错误和纰漏仍在所难免, 敬请广大读者批评指正。

潘路军
于大连理工大学

目 录

前言	
绪论	1
0.1 光学及其研究内容	1
0.2 光学发展史	1
0.3 学习方法	3
第1章 几何光学	4
1.1 几何光学的基本概念和基本定律	4
1.1.1 光源、光波与光线的概念	4
1.1.2 光线传播的基本定律	4
1.1.3 全反射	6
1.1.4 折射棱镜	8
1.2 惠更斯原理	9
1.2.1 惠更斯原理的物理表述	10
1.2.2 对光的反射和折射定律的解释	10
1.3 费马原理	11
1.3.1 光程的概念	12
1.3.2 费马原理的表述	12
1.3.3 费马原理对几何光学传播定律的验证	13
1.4 光学成像的基本概念	14
1.4.1 光束、光具组、像与物	14
1.4.2 物方和像方、理想光具组、物与像的共轭性	15
1.4.3 等光程性、等光程面	16
1.5 共轴球面组的成像规律	16
1.5.1 单球面的折射规律	16
1.5.2 傍轴光线的成像规律	18
1.5.3 傍轴物点的成像规律和横向放大率	20
1.5.4 多球面逐次成像	21
1.6 透镜及其成像规律	22
1.6.1 薄透镜焦距公式	22
1.6.2 成像公式——高斯公式和牛顿公式	23
1.6.3 薄透镜成像的作图法	25
1.6.4 共轴透镜组成像	26
1.7 光学成像仪器	28
1.7.1 眼睛的构造和成像机能	28
1.7.2 放大镜和目镜	30
1.7.3 显微镜	30
1.7.4 望远镜	32
1.7.5 照相机	33
1.7.6 投影仪	34
1.8 光度学和光阑	35
1.8.1 光度学简介	35
1.8.2 辐射通量和光通量	36
1.8.3 发光强度	37
1.8.4 照度	37
1.8.5 亮度	38
1.8.6 光阑	39
1.9 像差	40
1.9.1 球差	40
1.9.2 彗差	41
1.9.3 像散和场曲	41
1.9.4 畸变	42
1.9.5 色像差	42
习题	43
第2章 光的波动概念和描述	46
2.1 描述光波的基本参数	46
2.2 光速和光强	47
2.3 光波的基本分类及其数学描述	48
2.3.1 平面波的数学描述	49
2.3.2 球面波的数学描述	50
2.3.3 共轭光波及光强的复振幅表示	51
2.4 波前函数	51
习题	53
第3章 光的偏振	54
3.1 光波的偏振态	54
3.1.1 偏振片	54
3.1.2 自然光	54
3.1.3 线偏振光	55
3.1.4 马吕斯定律	56

3.1.5 部分偏振光	56	5.7.2 菲涅耳双棱镜	83
3.1.6 圆偏振光	57	5.7.3 劳埃德镜	84
3.1.7 椭圆偏振光	58	5.8 分振幅干涉	84
3.2 完全偏振光的琼斯矩阵表示	61	5.8.1 等倾干涉	84
3.2.1 琼斯矢量	61	5.8.2 等倾干涉条纹的特点	85
3.2.2 偏振光的琼斯矩阵表示	62	5.8.3 等厚干涉	86
3.3 立体视觉与立体电影	63	5.8.4 楔形薄膜的等厚条纹——劈尖干涉	87
3.3.1 立体视觉	63	5.8.5 牛顿环	89
3.3.2 立体电影	63	5.8.6 增透膜和增反膜	90
习题	64	5.8.7 迈克尔逊干涉仪	91
第4章 光波在界面的反射和折射		5.8.8 光场的时空相干性	92
规律	65	5.8.9 多光束干涉-法布里-珀罗干涉仪	96
4.1 入射、反射和折射光的光矢量的分解	65	习题	101
4.2 菲涅耳反射和折射公式	65	第6章 光的衍射	104
4.3 光在界面反射时的相位跃变——半波损失	66	6.1 衍射现象	104
4.4 光在介质界面传播时偏振态的变化——布儒斯特角	68	6.2 光的衍射及其分类	104
4.5 几种典型情况下反射光的相位变化	69	6.3 衍射的特点	105
4.5.1 正入射	69	6.4 惠更斯-菲涅耳原理	106
4.5.2 掠入射	69	6.5 菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式	107
*4.5.3 全反射	70	6.6 衍射的巴比涅原理	108
4.5.4 光在多层介质界面的反射和折射	70	6.7 菲涅耳衍射	109
4.6 光强和能流的反射率和透射率	71	6.8 矢量图解法	112
4.7 斯托克斯倒逆关系	73	6.9 菲涅耳波带片	113
习题	73	6.10 夫琅禾费单缝衍射	115
第5章 光的干涉	75	6.10.1 利用振动矢量图法求解单缝夫琅禾费衍射的光强分布	115
5.1 波的叠加原理	75	6.10.2 利用菲涅耳-夫琅禾费衍射积分公式求解单缝夫琅禾费衍射的光强分布	116
5.2 波的相干叠加和非相干叠加	76	6.10.3 夫琅禾费单缝衍射的光强分布特点	117
5.2.1 波的干涉	76	6.11 夫琅禾费矩孔衍射	119
5.2.2 相干叠加	76	6.12 夫琅禾费圆孔衍射以及光学仪器的分辨本领	120
5.3 光波的相干条件	77	6.12.1 夫琅禾费圆孔衍射	120
5.4 两个理想点光源的干涉	78	6.12.2 光学仪器的分辨本领	121
5.5 杨氏干涉	79	习题	126
5.6 干涉条纹的反衬度	82	第7章 衍射光栅	128
5.7 分波前干涉	83	7.1 夫琅禾费多缝衍射	128
5.7.1 菲涅耳双面镜	83		

7.1.1 多缝衍射的强度分布	128	8.6.1 偏振片的相对位置引起的附加 相位差	159
7.1.2 缝间干涉引起的光场分布	129	8.6.2 $\delta' = \delta$ 时偏振光的干涉	160
7.2 衍射光栅	133	8.6.3 $\delta' = \delta + \pi$ 时偏振光的干涉	161
7.2.1 光栅光谱的形成原理	133	8.6.4 出现干涉条纹的偏振光干涉	161
7.2.2 光栅光谱的谱线宽度	134	8.7 电光效应	162
7.2.3 光栅的色散本领	134	8.7.1 克尔效应	162
7.2.4 光栅的色分辨本领	135	8.7.2 泡克耳斯效应	163
7.2.5 光栅的自由光谱范围	136	8.8 旋光性	164
7.3 闪耀光栅	136	8.8.1 晶体的旋光	164
7.4 全息技术基础	138	8.8.2 液体的旋光	165
7.4.1 全息技术发展历史简述	139	8.8.3 对旋光现象的解释	165
7.4.2 波前记录与再现	140	8.8.4 磁致旋光	166
7.4.3 全息照相的特点	143	习题	167
7.4.4 全息图的分类	144	第9章 光波与介质的相互作用	169
习题	145	9.1 光与物质相互作用的经典 理论	169
第8章 晶体光学	147	9.2 光的色散	172
8.1 双折射现象	147	9.2.1 色散的观测	172
8.1.1 晶体的光轴	147	9.2.2 正常色散	172
8.1.2 晶体中光波的偏振	148	9.2.3 反常色散	173
8.2 晶体中光波的波面	149	9.3 光的吸收	174
8.2.1 主折射率、正晶体和负晶体	149	9.4 光的散射	175
8.2.2 晶体中的波面	150	9.4.1 光的散射现象	175
8.3 利用惠更斯作图法确定 o 光 和 e 光的传播方向	150	9.4.2 瑞利散射	176
8.3.1 光在主截面内的斜入射	151	9.4.3 米氏散射	177
8.3.2 光在主截面内的垂直入射	151	9.4.4 拉曼散射	178
8.3.3 光在垂直于光轴的平面内的斜 入射	152	习题	181
8.4 晶体光学器件	152	附录	182
8.4.1 晶体偏振片	152	附录 A 常用物理常数	182
8.4.2 偏光棱镜	153	附录 B 折射率表	182
8.4.3 偏光分束棱镜	154	附录 C 常用光源的典型谱线和 波长	185
8.4.4 波晶片——偏振态的改变	155	附录 D 几种物质的旋光度率	185
8.4.5 补偿器	157	附录 E 显微镜的物镜和目镜	185
8.5 偏振光的检验	158	附录 F 光度学单位换算表	186
8.5.1 自然光和圆偏振光的甄别	158	附录 G 典型光学玻璃的色散	187
8.5.2 部分偏振光和椭圆偏振光的 甄别	158	参考文献	188
8.6 偏振光的干涉	159		

绪 论

0.1 光学及其研究内容

光是什么？光（阳光）是生命的起源，光是人类认识世界的主要媒介，从科学的角度来定义的话，光是特殊波段的电磁波。人类通过感官从外界获取的信息中，至少 90% 是通过眼睛来获得的。可以说光使人们认识了客观世界，也改变了人们对客观世界的认识，同时人们也正在利用光来改变客观世界。

光学是研究光（电磁波）的行为和性质，包括光的产生、传播、光与物质相互作用及光在科技中应用的学科，是物理学的一个重要组成部分；作为物理学中最古老的一个基础学科，光学是伴随着社会的进步和科技的发展而同步前进，日臻完善的。从最初人类的祖先只能凭肉眼观看和认识世界，到现代人们生活中有关光学的众多仪器、设备和材料，如眼镜、望远镜、照相机、显微镜、LED 照明、高清晰电视、DVD、手机和光纤、激光等，光学已经渗透到社会生活的方方面面。此外，光学也是当前科学研究中最活跃的学科之一。人们可以利用高倍望远镜观测日月星辰的宏观运行规律，探索宇宙的起源，也可以通过高倍显微镜观测微观世界的特性及规律，探索生命的奥秘；可以利用激光进行精密加工和检测，实现信息的处理和传播；通过研究吸收光谱和发射光谱来探知物质的电子结构和特性，依靠物体的吸光制造高效光伏和催化设备，或者运用物体的发光制造先进的显示和照明器件。

光学的发展历久弥新，与时俱进，从传统上对可见光的研究，扩展到现代光学对全波段电磁波的研究，其研究内容从几何光学和成像到波动光学，扩展至量子光学、激光光学、全息光学、近场光学、傅里叶光学和非线性光学，以及光谱学和生物光学、纳米光学等，可谓丰富多彩，日新月异，生生不息。

0.2 光学发展史

作为一种神奇的自然现象，光就在我们的身边，给人们带来了光明和温暖，给万物带来了生机。但光到底是什么？从何而来？到何方去？人们对这种自然现象的认识付出了无比艰辛的努力，经历了一个漫长而曲折的历史过程。随着对光的特性和本质认识的逐步加深，人们学会了如何控制和利用光，并用光改造客观世界，从而使客观世界变得更加丰富多彩。

人们对光的认识始于对人眼视觉的解释，并逐渐建立了光的直线传播定律、反射和折射定律。中国作为世界上四大文明古国之一，早在战国时代的哲学家墨翟所著的《墨经》中，就有关于小孔成像的叙述，直观反映了光的直线传播这一朴素思想。此外，宋代沈括（1031~1095）的著作《梦溪笔谈》中记载的凹面镜成像、日月食的起因，古希腊数学家欧几里得（公元前 325~265）在《反射光学》中对光反射的详细研究，阿拉伯学者阿尔哈增（Alhazen, 965~1039）在其著作《光学全书》中讨论的几何光学现象等，都对光的传播有直观的研究。直到 17 世纪上半叶，荷兰的斯涅耳（Willebrord Snell, 1580~1626）和法国的笛卡儿（René Descartes, 1596~1650）才将对光折射的观察结果，归结为今天大家所惯用的光的折射定律。光的折射和反射定

律的确立奠定了几何光学的基础。

从17世纪开始,人类对光的本质的认识经历了漫长的微粒说和波动说的争论。早在1704年,英国物理学家牛顿(Isaac Newton, 1643~1727)在其著作《光学》中就提出:“光是一种细微、大小不同而又迅速运动的粒子,这些粒子从光源中飞出来,在真空或均匀物质中由于惯性作匀速直线运动”,并以此成功地解释了光的折射和反射定律。但是,这一理论无法解释牛顿环等光的干涉以及以后发现的衍射现象。1665年,意大利人格里马弟首先观察并描述了光的衍射现象。随后,英国科学家罗伯特·胡克(Robert Hooke, 1635~1703)为解释这一现象,最先提出“光必定是一种振动”,并研究了薄膜所产生的彩色干涉条纹。荷兰物理学家惠更斯(Christiaan Huygens, 1629~1695)发展了胡克的思想,在1678年发表的《论光》中进一步提出:“光是发光体中微小粒子的振动在弥漫于宇宙空间的以太中的传播过程。光的传播方式与声音类似,而不是以牛顿为代表的微粒说所设想的像子弹或箭那样的运动”。采用该波动学说,不仅成功解释了光的折射、反射定律,还解释了方解石的双折射现象,但是并没有对光的波动特性给予足够的说明。在这一阶段,微粒说由于牛顿的巨大影响力而长期占据主导地位。1802年,英国科学家托马斯·杨(Thomas Young, 1773~1829)设计了杨氏双缝实验,圆满解释了双缝干涉和“薄膜颜色”现象。法国物理学家菲涅耳(Augustin-Jean Fresnel, 1788~1827)以杨氏干涉原理为基础,完善了惠更斯的波动理论,提出了次波相干理论,圆满解释了光的干涉和衍射现象,也能完美解释光的直线传播定律。1808年,法国物理学家马吕斯(Etienne Louis Malus, 1775~1812)发现了光的偏振现象,菲涅耳为解释这一现象,又提出了光是在连续介质(以太)中传播的一种横波的假定。波动理论对光的这些现象的成功解释使得光的波动说战胜了微粒说而确立起来,然而波动说中作为光的弹性介质的以太的性质却匪夷所思,其密度极小而弹性模量又要极大,在理论和实验上都难以实现。1873年麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831~1879)在其出版的专著《电磁学通论》中提出:“电场和磁场的改变,不能局限于空间的某一部分,而是以等于电流的电磁单位与静电单位的比值的速度传播着,光就是这样一种电磁现象”。这一论断在1888年被赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857~1894)通过实验证明。光的电磁理论的建立,使人们在认识光的本质方面迈进了一大步。

19世纪末到20世纪初,关于光学研究进入到光的产生、光和物质相互作用的微观机制中。有关黑体辐射光谱的研究揭开了量子论的序幕。1900年,普朗克(Max Planck, 1858~1947)提出了辐射能量的量子化假设,成功地解释了黑体辐射中谱密度按照波长分布的问题;1905年爱因斯坦(Albert Einstein, 1879~1955)在普朗克的量子论的基础上进一步提出了光量子假设,完美解释了1887年赫兹发现的光电效应现象。至此人们一方面从光的干涉、衍射、偏振等光学现象验证了光是电磁波;另一方面又从热辐射、光电效应、光压以及光的化学作用等证明了光的量子性——微粒性。从属性上说,光既不是经典意义上的波动,也不是经典物理中的粒子,而是两者兼有,即具有波粒二象性。这一观点被世人广泛接受并延续至今。

早在1916年,爱因斯坦就提出了原子和分子的受激辐射概念,为激光的发明打下了理论基础。1960年,西奥多·梅曼(Theodore Harold Maiman, 1927~2007)成功地研制出世界上第一台红宝石激光器。激光器的发明极大地促进了包括傅里叶光学、光信息处理、非线性光学等在内的现代光学的发展,成为现代物理学和科学技术发展的里程碑。20世纪50年代以来,结合数学、电子技术和通信理论等学科,在光学中引入频谱、空间滤波、载波、线性变换及相关运算等概念,形成了傅里叶光学。在此理论上,结合由激光产生的强相干光和逐步发展起来的全息光学,光信息处理这一新的学科,正以处理信息速度快、处理信息量大等优点,极大地改变着人们的日常生活。光纤通信正是以这一理论为基础的重要成就。此外,由强激光激发的非线性光学

现象也引起越来越多的关注。激光光谱学中,包括激光拉曼光谱学、高分辨率光谱和皮秒、飞秒超短脉冲,以及可调谐激光技术的出现,给传统的光谱学带来了很多新的变化,成为深入研究物质微观结构、运动规律及能量转换机制的重要工具和物质检测和加工的新技术。

综上所述,光学的发展史可以说是人类科学发展史的一个缩影。从古至今一直照亮整个世界的光正以一个崭新的方式继续照亮人们前行的道路,带给世界更多的灿烂和辉煌。

0.3 学习方法

光学作为物理学的重要基本分支之一,在学习方法上秉承着学习物理学的基本原则:理解和把握,即从单个知识点的理解到对知识体系的整体把握。物理学在很大篇幅上是讲述各种物理定律以及为描述该定律的数学公式的推导,不建议死记硬背,首先要理解公式的含义。在各种物理公式的推导过程中,既要体会数学的完美和强大,也要体会各字符段所表达的物理思想和更贴近客观实际的近似和假设;要领会公式对客观事物内在本质的表达,学会利用理论知识去思考和解决实际问题;同时不要孤立地学习,应善于将前后的知识点串接,学会融会贯通,把握整体知识脉络,逐步形成对客观事物进行分析的基础物理思维和逻辑思维,为进一步的理论学习 and 实际应用打下良好的基础。

第1章 几何光学

几何光学作为光学（或经典光学）中最基础的部分，将光的路径看成是几何光线，并以光线概念为基础，采用几何的分析方法研究光在介质中的传播规律，以及物体通过透镜等光学器件成像的过程。

从光的波动性来看，几何光学是简化了的经典光学理论，它采取近似处理的方法，描述了当波长趋近于零极限的光场模型。当所研究物体对象的几何尺寸远远大于光的波长时，几何光学通常能够比较精确地描述光线通过光学系统或不同介质的传播行为。

1.1 几何光学的基本概念和基本定律

研究几何光学中光线在光学系统或不同介质中的传播规律，学习光学的原理及理论，首先需要定义几个常用的光学概念，进而了解几何光学中几个最基本的实验定律。这些概念和（实验）定律是研究光的传播和成像规律的基础。

1.1.1 光源、光波与光线的概念

和日常生活中一样，人们把能够发光或能够辐射光能量的物体称为光源（或发光体），光源可看作是由许多发光点或点光源组合成的。几何光学中的发光点是只有位置概念的几何抽象点，任何发光或反射光的物体都可以看作是由无数发光点组成的。

人们还把光线定义为从发光点发出的携带能量并具有方向的几何线，它的位置和方向代表了光能向外传播的领域和方向。

几何光学中定义光束为光线的集合体，根据发光点的位置，又可以分为平行光束、同心光束等多种。在1.2节中，将学习与之分别对应的平面波和球面波等。

1.1.2 光线传播的基本定律

利用以上几个光学基本概念，可以学习和了解几何光学中四个基本实验定律。

1. 光的直线传播定律

实验证明，在各向同性的均匀介质中，光是沿着直线方向进行传播的。日常生活中，影子的形成，日食和月食等自然现象，都很好地证明了这一实验定律。

“小孔成像”是证明这一定律的经典例子。如图1.1所示，在带有小孔的暗箱前面，发光物体上各点发出的光沿着直线进行传播，经过小孔后在暗箱的后壁上形成一个倒立的实像。在后面的章节中可以看到，许多光学测量仪器在远大于波长的长度条件下，都是以这一实验定律为基础的。

这里需要说明两点：一是光的直线传播定律具有一定的局限性，即当光通过尺寸与波长接近或更小的小孔、狭缝或微粒等障碍物时，将发生衍射或散射现象，光将不再遵循直线传播定律；二是这一定律仅适合在均匀介质中光的传播，当光在非均匀介质

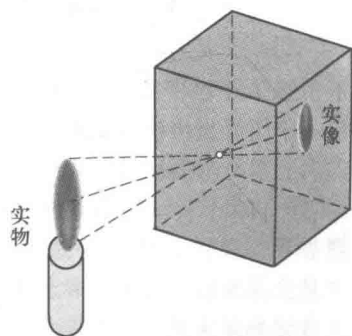


图1.1 小孔成像

中传播时,由于折射现象的存在,光线传播的路径也不再是直线了。

2. 光的独立传播定律

两路或多路从不同光源发出的光,沿着不同方向传播到空间某一点同时相遇时,彼此互不影响,各光线将沿着原来的方向继续传播,几何光学中称之为光的**独立传播定律**。这个定律在波动光学也是适用的,在本书后面的5.1节中也有介绍。

光的独立传播定律为研究光的传播及成像提供了方便,即分析某一光线的行为时,不需考虑其他光线的影响。需要注意的是,该定律的适用范围也有一定的限制,即不适用于强光和非线性介质中光传播的情况。

3. 光的反射定律和折射定律

实验证明,当光线入射到两种各向同性并且透明均匀的介质分界面时,将遵从光的反射定律和折射定律进行传播。

如图1.2所示,介质1和介质2是透明均匀且各向同性的,它们的分界面是平面或近似为平面。当一束光线(以一条光线代表)由介质1入射到分界面上时,一般会被分解为反射线和折射线。按照几何光学的传统,称入射线与入射点处分界面的法线所构成的平面为**入射面**,而分界面法线与入射线、反射线和折射线所成的夹角 i_1 、 i_1' 和 i_2 分别称为**入射角**、**反射角**和**折射角**。

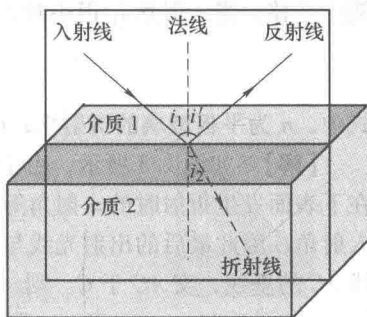


图1.2 光的反射和折射

(1) 光的反射定律

光的反射定律包括以下内容:

- 1) 反射线和折射线都在入射面内。
- 2) 反射线和入射线分布在法线的两侧,且反射角与入射角相等,即

$$(2) \text{ 光的折射定律} \quad i_1' = i_1 \quad (1.1)$$

光的折射定律又称为**斯涅耳定律**(W. Snell, 1580~1626),包括以下内容:

入射角与折射角的正弦之比与入射角的大小无关,仅由两种介质的光学性质决定。对于一定波长的光线而言,在一定温度和压力下,该比值为一常数,即

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{12} \quad (1.2)$$

式中, n_{12} 称为介质2相对介质1的折射率。

在这一定律下,可以定义介质的**绝对折射率**,即任何介质相对于真空的折射率,简称**折射率**。其中,折射率较小的介质称为**光疏介质**,折射率较大的介质称为**光密介质**。

另外,实验证明相对折射率 n_{12} 等于介质2和介质1各自的折射率之比,即

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.3)$$

因此,折射定律也常表示为

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1.4)$$

本书的附录B折射率表中列出了几种常见的透明介质对于钠黄光(D 线, $5893\text{\AA}$)的折射率,以及一些气体和液体的折射率。

需要说明的是,上述几何光学三定律只是对于真实光线传播的近似描述,考虑到光的波动性,它们仅适用于通常的空间物体或光线的入射界面尺寸远大于入射光波长的情形。在很多光学仪器中,包括用于天文测量、地质勘测的大型精密光学仪器等,这些定律还是非常精确的。

4. 光的可逆性原理

根据上述几何光学的三个基本定律,可引申出光的可逆性原理。日常生活中,如果二人同时站在一面镜子前,各自都能够看到对方的眼睛,这是因为光线的传播是可逆的。以图 1.2 为例,该原理可描述为:若光线沿着反射线方向进行反向入射,则在两种介质界面产生的反射线将逆着原来的入射方向传播;如果光线沿折射线方向由介质 2 逆向入射,则射入介质 1 的折射线也将逆着原来的入射方向传播。光的这种传播规律称为光的可逆性原理。换言之,当光线的传播方向逆转时,它将沿着同一路径逆向传播。该原理具有普适性,对于了解光的传播特性非常重要。

【例 1.1】证明:当一条光线倾斜入射并通过一平板玻璃时,出射光线的方向不变,只产生侧向平移。当入射角 i_1 很小时,侧向位移为

$$\Delta x = \frac{n-1}{n} i_1 t$$

式中, n 为平板玻璃的折射率; t 为平板玻璃的厚度。

【解】如图 1.3 所示,由于平板玻璃上下两平面平行,且两侧介质同为空气,折射率相等,在下表面发生折射时的入射角等于上表面倾斜入射时的折射角,下表面的折射角等于上表面的入射角,因此最后的出射光线与入射光线保持平行。过下表面出射点 B 作垂直于入射光的延长线 AC 的垂线,交 AC 于 C 。则

$$\begin{aligned} \Delta x &= BC \\ &= AB \sin(i_1 - i_2) \\ &= \frac{t}{\cos i_2} \sin(i_1 - i_2) \\ &= \frac{t(\sin i_1 \cos i_2 - \cos i_1 \sin i_2)}{\cos i_2} \\ &= t \left(\sin i_1 - \frac{\cos i_1 \sin i_2}{n \cos i_2} \right) \end{aligned}$$

若在小角度入射时,有

$$\sin i_1 \approx i_1, \cos i_1 \approx 1 - \left(\frac{i_1}{2}\right)^2, \cos i_2 \approx 1 - \left(\frac{i_2}{2}\right)^2$$

则有

$$t \left(\sin i_1 - \frac{\cos i_1 \sin i_2}{n \cos i_2} \right) \approx \frac{ti_1}{n} \left[n - \frac{1 - \left(\frac{i_1}{2}\right)^2}{1 - \left(\frac{i_2}{2}\right)^2} \right] \approx \frac{ti_1}{n} (n-1)$$

即侧向平移 $\Delta x = \frac{n-1}{n} i_1 t$ 。

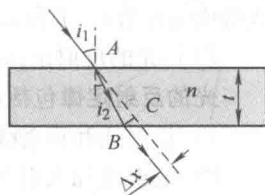


图 1.3 例 1.1 图

1.1.3 全反射

光入射到不同介质的分界面上,在一定的入射条件下,会发生一种特殊的临界反射现象,即全反射。

当入射光线从光密介质 1 射入光疏介质 2 时, $n_{12} < 1$ (即 $n_2 < n_1$), 由式 (1.4) 可知, 折射角 i_2 大于入射角 i_1 (见图 1.4 中的光线 1-1')。如果将入射角 i_1 增大, 达到满足如下条件的角度 i_c 时, 即

$$i_c = \arcsin(n_2/n_1) \quad (1.5)$$

这时候的折射角 $i_2 = 90^\circ$ ，即图 1.4 中的光线 2-2'。

若入射角 i_1 继续增加到大于 i_c ，折射光线会消失，所有的入射光线全部被反射（见图 1.4 中的光线 3-3''）。这种现象即称为全反射，在式 (1.5) 中，对应于折射角为 90° 的入射角 i_c 称为全反射临界角。

由以上叙述可知，发生全反射需要满足两个条件：光线从光密介质入射到光疏介质和入射角大于临界角 i_c 。几种常见介质的折射率数据见附录 B 折射率表。通过计算可知，光在水和空气分界面的全反射临界角约为 49° ，在不同玻璃和空气分界面的临界角介于 $30^\circ \sim 42^\circ$ 之间。

全反射现象在实际工程中有着广泛的应用。例如，光学仪器中经常利用各种全反射棱镜代替平面反射，以减少反射时的光能损耗。图 1.5 所示的是一种常用的全反射等腰直角棱镜的横截面，光线从直角边垂直入射，在斜边上的入射角大于其全反射临界角 ($45^\circ > i_c = 30^\circ \sim 42^\circ$)，发生了全反射。因此该棱镜通过合理地使用全反射现象，既可以改变光的传播方向，又可以保证光能不受损失。理论上讲，全反射棱镜可以将入射光全部反射，而镀有反射膜层的平面反射镜只能反射 90% 左右的入射光能。在光的传输中，利用光的全反射原理制作的光导纤维（见例 1.3），在光通信领域中发挥着巨大的作用。

【例 1.2】如图 1.6 所示，厚度为 $t = 200\text{mm}$ 的平行平板玻璃，其折射率为 $n = 1.5$ ，在它的下面放置一个直径为 $d = 1\text{mm}$ 的金属片。现在玻璃板上覆盖一个圆形纸片，若要求在玻璃板上方任何角度都看不到下面的金属片，求圆形纸片的直径。

【解】根据题意，要想在任何角度都看不到下面的金属片，就要求光线在平行平板玻璃与空气交界面处刚好发生全反射，没有折射光线进入人眼，即要求折射角 $i_2 = 90^\circ$ 。由折射定律有

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

则 $\sin i_2 = \frac{1}{n_2} = 0.66666$ 。可得 $\cos i_2 = 0.745356$ 。所以圆形纸片的直径为

$$L = d + 2t \tan i_2 = 358.77\text{mm}$$

【例 1.3】设光导纤维（光纤）玻璃芯和包层的折射率分别为 n_1 和 n_2 ($n_1 > n_2$)，垂直端面外介质的折射率为 n_0 （见图 1.7）。试证明：能使光线在光纤内发生全反射的入射光光束的最大孔径角 θ_1 满足下式：

$$n_0 \sin \theta_1 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

式中， $n_0 \sin \theta_1$ 称为光纤的数值孔径，记作 NA 。

【解】根据折射定律，有

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta' = n_1 \cos \theta_2 = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2}$$

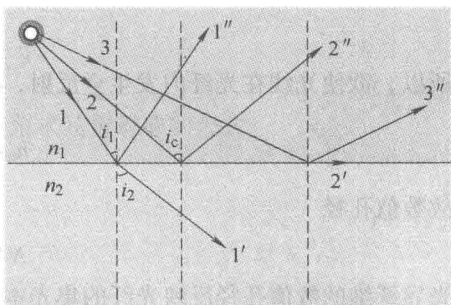


图 1.4 光的全反射图

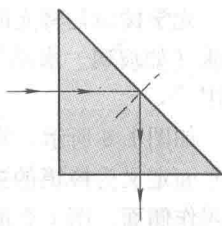


图 1.5 等腰直角棱镜

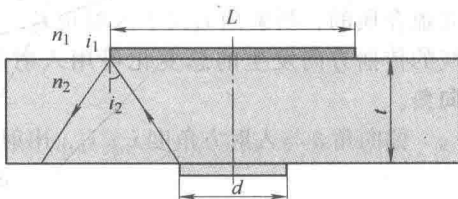


图 1.6 例 1.2 图

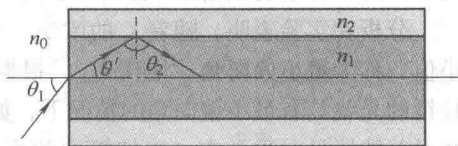


图 1.7 例 1.3 图

因为光线在玻璃芯和包层的界面上发生全反射的条件为

$$\sin \theta_2 \geq \frac{n_2}{n_1}$$

所以, 欲使光线在光纤内发生全反射, θ_1 必须满足

$$n_0 \sin \theta_1 \leq n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

故数值孔径

$$NA = n_0 \sin \theta_1 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

光导纤维的数值孔径反映光纤的集光本领, 是导光传输的重要性能参数之一。

1.1.4 折射棱镜

光学棱镜是将光的折射应用于实际光学系统的典型器件, 通常是由抛光平面包围着的透明介质(如玻璃、水晶等)所构成的棱柱体, 可以在光学系统中起到偏向、色散、分束和起偏等作用。

如图 1.8 所示, 常见的三棱镜中, 与棱边垂直的平面定义为棱镜的主截面, 光线入射和出射的平面叫作侧面。图 1.8 的右图描绘了光线在三棱镜主截面内的折射。 $\triangle ABC$ 是三棱镜的主截面, 沿主截面入射的光线 DE 首先在 AB 截面的入射点 E 点处发生折射, 由于光线在此处是由光疏介质(空气)射入光密介质(玻璃), 折射角 i_2 小于入射角 i_1 , 光线向底边 BC 方向偏折; 进入棱镜的光线 EF 在截面 AC 上的 F 点再次折射, 此处光线是由光密介质射入光疏介质的, 折射角 i'_1 大于入射角 i'_2 , 光线进一步向底边 BC 方向偏折。经过两次折射后, 光线的传播方向发生的总变化可用入射线 DE 和出射线 FG 延长线的夹角 δ 来表示, δ 称为偏向角。

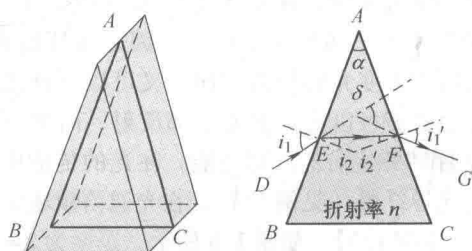


图 1.8 三棱镜主截面及光在其主截面内的折射

偏向角 δ 与入射方角度 i_1 、 i_2 , 出射方角度 i'_1 、 i'_2 以及顶角 α 的之间的关系为

$$\begin{aligned} \delta &= (i_1 - i_2) + (i'_1 - i'_2) \\ &= (i_1 + i'_1) - (i_2 + i'_2) \end{aligned} \quad (1.6)$$

由于

$$\alpha = i_2 + i'_2 \quad (1.6)$$

得到

$$\delta = (i_1 + i'_1) - \alpha \quad (1.7)$$

因此, 对于棱镜的顶角 α , 偏向角 δ 随入射角 i_1 的变化而变化。

分析和实验表明, 随着 i_1 的改变, 三棱镜的偏向角 δ 存在一个最小值, 称为最小偏向角, 记作 $\delta_{\min}$ 。根据折射定律可以证明, 通过三棱镜的光线具有最小偏向角的情况下, 如图 1.9 所示, 入射线和出射线对三棱镜呈对称分布, 三棱镜内的光线与底边平行, 此时 $i_2 = i'_2$, 由式 (1.6) 可知

$$i_2 = \frac{\alpha}{2} \quad (1.8)$$

又因为 $i'_1 = i_1$, 则由式 (1.7) 得

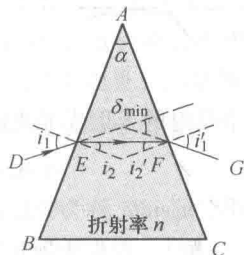


图 1.9 三棱镜的最小偏向角

$$i_1 = \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2} \quad (1.9)$$

在 E 点应用折射定律

$$\sin i_1 = n \sin i_2 \quad (1.10)$$

综合式 (1.8) ~ 式 (1.10) 可得, 由三棱镜最小偏向角求其折射率的公式

$$n = \frac{\frac{\alpha + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (1.11)$$

对于已知的棱镜顶角 α , 通过测量其最小偏向角 $\delta_{\min}$, 利用式 (1.11) 即可算出三棱镜材料的折射率。

另一种常见的折射光学器件称为**光楔**, 是顶角 α 很小的三棱镜, 由式 (1.11) 和小角度近似可得光楔的最小偏向角

$$\delta_{\min} = (n - 1)\alpha$$

棱镜最主要的用途为分光, 即利用同一棱镜对不同波长的光有不同的折射率的性质来分析光谱。折射率与光的波长有关的这一现象, 叫做**光的色散**。如图 1.10 所示, 当一束白光或其他非单色光射入棱镜时, 由于折射率的不同, 不同波长 (颜色) 的光具有不同的偏向角 δ , 从而出射方向各不相同, 形成一条彩色光带。通常棱镜的折射率 n 随波长的增加而减小 (正常色散), 所以可见光中紫光偏折最大, 红光偏折最小。利用棱镜的这一分光性质所制成的棱镜光谱仪是光谱分析中的重要光学仪器之一。有关色散的详细内容将在第 9 章中介绍。

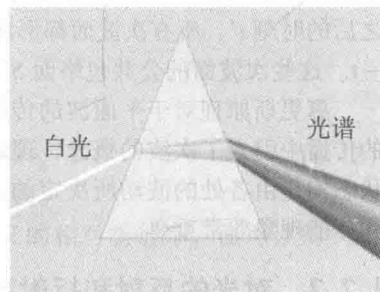


图 1.10 三棱镜的色散

1.2 惠更斯原理

为深入了解几何光学中光传播的本质, 需要结合波动学进一步讨论光波的行为, 弄清这些实验定律的物理内涵。

如图 1.11 所示, 设从发光点同时发出的光波以相同的速度向四周传播, 在其后的某一时刻光同时到达的点构成的面称为**波阵面**或简称为**波面**, 又称为**等相位面** (有关相位的概念将在第 2 章中说明)。光能的传播即为波面的传播。在各向同性的介质中, 波面上某点的法线代表了该点处光波的传播方向, 光能是沿着光波的法线方向传播的。波面的法线是光波的**波线**, 即光线。用光线和波面都可以描述波的传播情况, 统称为波的几何描述。

由一个发光点发出的波, 在各向同性的均匀介质中的波面是以振源为中心的球面, 这种波称为**球面波**。如图 1.11a 所示, 同心球面 (虚线) 为不同时刻的波面, 由圆心向外辐射的发散光束中各射线代表光能的传播, 即为波线或光线。若观测点离发光点很远, 则波面趋于平面, 称为**平面波**。如图 1.11b 所示, 波面为平行直线, 波线为垂直于波面的平行线。

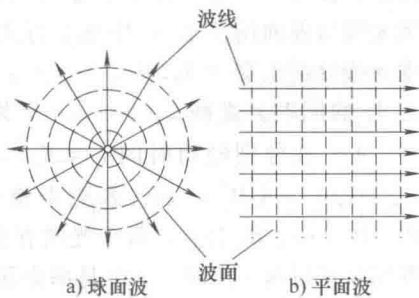


图 1.11 球面波和平面波