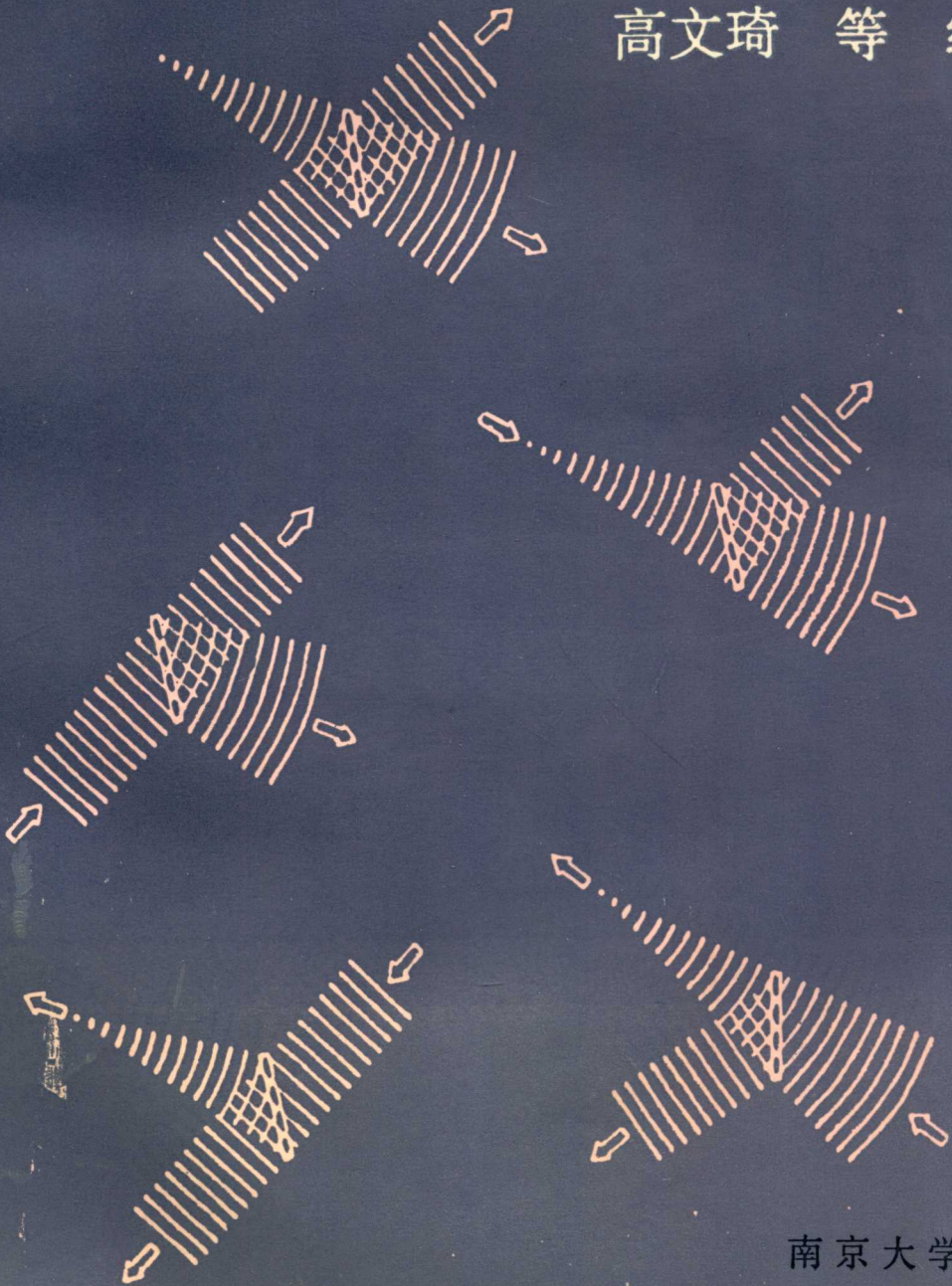


光 学

高文琦 等 编著



南京大学出版社

内 容 简 介

本书以《普通物理学》上册为基础，主要介绍几何光学、波动光学、干涉、衍射、偏振、光的量子性、近代光学等。全书共分八章，可作为高等院校物理专业及相关专业教材，也可供从事物理工作的工程技术人员参考。

光 学

高文琦 叶蓉华 李曾沛 编著
何永蓉 周 进

在这次编写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益的。鉴于这些原因，本书在编写过程中，除了注意保持传统教材的优点外，还注意吸收国内外大量有关教材的优点，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。另一方面，我们也注意吸收近年来国内外有关教材的优点，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。特别是增加了具有特色的插图，还依靠计算机制作了部分的插图。希望本书能对使用本书的读者有所帮助。

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，后 3 章为近代光学的 18 学时，这部分内容也可作为自学。

本书的分工如下：叶蓉华副教授第一章，何永蓉副教授第二章、第三章、第四章、第五章、第七章，李曾沛副教授第三章部分内容，其余为高文琦教授撰写。



在本书的编写过程中，得到了许多同志的帮助，特别是南京师范大学出版社的编辑同志，为本书的出版做了大量的工作，在此表示衷心的感谢。

由于编写时间紧迫和水平有限，本书难免有不足之处，恳请广大读者在使用过程中，能给予批评并寄对本书的宝贵意见。

南京 大学 出版社

1994 • 南京

ISBN 7-305-03308-2/O·151

定价 13.20 元

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、信息物理系、气象系等系广泛地使用过。

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象起着重要作用。在此我们化了大量时间查阅有关资料,特别是增加了具有特色的插图,还依靠计算机制作了部分的插图。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:叶蓉华副教授第一章,何永蓉副教授第五章,周进副教授第六章、第七章,李增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

1993 年 6 月于南京大学

1.5.2 共轴球面系统的基点	24
1.5.3 共轴球面系统成像问题的解法	26
1.5.4 共轴球面系统基点的求法	29
1.5.5 共轴球面系统的物像关系	34
1.5.6 共轴球面系统的物像关系	34
1.5.8 物空间和像空间	38
1.6 光阑	39
1.6.1 孔径光阑和视场光阑	39
1.6.2 孔径光阑 入射光瞳和出射光瞳	37
1.6.3 光学系统中孔径光阑的求法	39
1.6.4 视场光阑 入射窗和出射窗	41
1.7 光学仪器	43
1.7.1 眼睛	44
1.7.2 放大镜	47
1.7.3 显微镜	48
1.7.4 望远镜	52

目 录

绪 论	1
第一章 几何光学	4
1.1 几何光学的基本定律	4
1.1.1 光线	4
1.1.2 光的反射定律和折射定律	4
1.1.3 光的可逆性原理	8
1.1.4 费马原理	8
1.1.5 棱镜的色散作用	9
1.2 成像的基本概念	12
1.2.1 同心光束与物像关系	12
1.2.2 物像的分类	12
1.3 单个球面的折射及反射成像	14
1.3.1 符号规则	14
1.3.2 单球面折射成像公式的推导	14
1.3.3 单球面反射成像公式的推导	19
1.4 球面折射的三种放大率	20
1.4.1 线放大率 β	20
1.4.2 轴向放大率 α	22
1.4.3 角放大率 γ	22
1.4.4 放大率三角形	23
1.5 共轴球面系统成像	23
1.5.1 共轴球面系统的定义与性质	23
1.5.2 共轴球面系统的基点	24
1.5.3 共轴球面系统成像问题的解法	26
1.5.4 共轴球面系统基点的求法	29
1.5.5 共轴球面系统的物像关系	34
1.5.6 物空间和像空间	36
1.6 光阑	36
1.6.1 孔径光阑和视场光阑	36
1.6.2 孔径光阑 入射光瞳和出射光瞳	37
1.6.3 光学系统中孔径光阑的求法	39
1.6.4 视场光阑 入射窗和出射窗	41
1.7 光学仪器	43
1.7.1 眼睛	44
1.7.2 放大镜	47
1.7.3 投影仪器	48
1.7.4 照相机	49

目 录

1.7.5 显微镜	50
1.7.6 望远镜	53
1.7.7 目镜	54
1.8 像差	56
1.8.1 像差概述	56
1.8.2 球面像差	56
1.8.3 彗形像差	57
1.8.4 像散和像场弯曲	59
1.8.5 畸变	60
1.8.6 色差	60
习题	61
第二章 光度学的基本概念	67
2.1 光通量	67
2.2 发光强度	68
2.3 照度	69
2.4 亮度 发光表面所产生的照度	69
2.5 量度单位	72
2.6 经过光学系统的光通量	73
习题	74
第三章 光的干涉	75
3.1 光的干涉现象	75
3.2 线性叠加原理和相干条件	75
3.2.1 电磁场的线性叠加原理	75
3.2.2 电磁波平均能流密度和光强	76
3.2.3 叠加区域中的场强和光强, 相干条件	76
3.3 杨氏实验的分析	77
3.3.1 相干条件的满足	77
3.3.2 观察屏上光强的讨论	79
3.4 一些实际问题的考虑	81
3.4.1 条纹对比度	81
3.4.2 时间相干性——相干长度和相干时间	82
3.4.3 空间相干性	85
3.5 实现干涉的方法	89
3.5.1 波前分割法	89
3.5.2 振幅分割法	90
3.6 迈克耳孙干涉仪	96
3.6.1 仪器的结构	97
3.6.2 仪器的等效光路	97
3.6.3 等倾干涉条纹的特征	98

3.6.4	几种振幅分割的干涉仪	101
3.6.5	傅里叶变换分光计	102
3.7	多光束干涉	103
3.7.1	多光束干涉的原理	103
3.7.2	多光束干涉仪的结构和条纹特征	107
3.7.3	自由光谱程和分辨本领	109
3.7.4	激光器的谐振腔	110
	习题	111
第四章 光的衍射		115
4.1	光的衍射现象	115
4.2	衍射的分类	117
4.3	惠更斯-菲涅耳原理	118
4.4	菲涅耳衍射	119
4.4.1	球面波的自由传播	120
4.4.2	圆孔衍射	125
4.4.3	圆屏衍射	127
4.4.4	波带片	127
4.5	夫琅和费衍射	131
4.5.1	平行光照明时的单缝衍射	131
4.5.2	圆孔衍射	136
4.5.3	远区场衍射和近区场衍射	138
4.6	分辨本领	139
4.6.1	望远镜的分辨本领	140
4.6.2	显微镜的分辨本领	141
4.6.3	衍射受限光学系统	142
4.8	衍射光栅	143
4.7.1	结构与作用	143
4.7.2	光栅强度公式的推导	143
4.7.3	强度分布曲线的规律	145
4.7.4	光谱分析元件的三个参数	148
4.7.5	其他形式的光栅方程式和闪耀光栅	150
4.7.6	振幅矢量图	151
4.7.7	光栅的应用	153
	习题	154
第五章 光的偏振		157
5.1	有关偏振光的一些概念	157
5.1.1	光的偏振性	157
5.1.2	光的偏振结构	159
5.1.3	自然光	160
5.1.4	部分偏振光	161

5.2	各种偏振状态的数学表示式	162
5.2.1	直线偏振光	162
5.2.2	圆偏振光	163
5.2.3	椭圆偏振光	165
5.3	偏振光的强度	167
5.3.1	偏振器	167
5.3.2	马吕斯定律	167
5.4	反射折射产生偏振光	169
5.4.1	菲涅耳公式	169
5.4.2	反射率和透射率	170
5.4.3	反射、折射时的偏振现象	171
*5.4.4	半波损失的解释	174
5.5	二向色性物质产生偏振光	176
5.5.1	线型光栅偏振器	176
5.5.2	二色性晶体	177
5.5.3	人造偏振片	177
5.6	散射产生偏振	177
5.6.1	散射的分类	177
5.6.2	瑞利散射定律	178
5.6.3	散射光的偏振状态	178
5.7	利用双折射产生偏振光	179
5.7.1	双折射现象的基本概念	179
5.7.2	单轴晶体中双折射现象的解释	181
5.7.3	寻常光和非常光的相对光强	185
5.7.4	双折射偏振器	186
5.8	位相延迟器——波片	189
5.8.1	位相延迟作用	189
5.8.2	全波片	190
5.8.3	半波片(1/2波片)	191
5.8.4	1/4波片	192
5.8.5	可变位相延迟板	193
5.9	光波偏振态的定性分析	194
5.10	偏振光的干涉	196
5.10.1	实验装置及现象	196
5.10.2	偏振光干涉的强度公式	197
5.10.3	实验现象的解释 显色偏振	198
*5.10.4	会聚偏振光的干涉	199
5.11	旋光性	201
5.11.1	旋光现象	201
5.11.2	旋光性的解释	202
5.11.3	菲涅耳假设的实验证明	203
5.12	感应的光效应	204

5.12.1 光弹效应	204
5.12.2 电光效应	205
5.12.3 法拉第效应	206
5.12.4 液体中的各向异性——液晶	207
习题	209
第六章 光的量子现象	212
6.1 热辐射 普朗克公式	212
6.1.1 热辐射 基尔霍夫定律	212
6.1.2 黑体辐射以及经典理论	213
*6.1.3 腔内电磁辐射的模式推导	216
6.1.4 普朗克的量子假说 普朗克公式	217
6.1.5 光测高温法	218
6.2 光电效应 爱因斯坦方程	220
6.2.1 光电效应的实验规律	220
6.2.2 经典波动理论的困难	222
6.2.3 光量子 爱因斯坦方程	222
6.2.4 光电效应的应用	224
6.3 康普顿效应	225
6.3.1 康普顿效应的实验定律	225
6.3.2 康普顿效应的理论解释	226
6.4 光的波粒二象性	227
6.4.1 德布罗意波	227
6.4.2 几率波	229
6.4.3 测不准关系式	230
习题	231
第七章 近代光学的一些课题	233
7.1 激光	233
7.1.1 光的自发辐射、受激吸收和受激辐射	233
7.1.2 光在介质中的增益	237
7.1.3 光振荡条件	239
7.1.4 纵模和横模	240
7.1.5 激光器的种类	243
7.1.6 激光的应用	244
7.2 全息照相	245
7.2.1 全息照相的特点	245
7.2.2 全息照相的基本原理	246
7.2.3 全息图的几种类型	248
7.2.4 全息干涉计量	251
7.3 光信息处理初步	252
7.3.1 预备知识	253

7.3.2	阿贝成像理论	255
7.3.3	阿贝-波特实验与空间滤波	257
7.3.4	光信息处理的应用	258
7.4	非线性光学	261
7.4.1	非线性光学概述	261
7.4.2	几种非线性效应	261
	习题	266
	部分习题答案	268
	主要参考书目	273
5.1	光的波动性	167
5.1.1	惠更斯原理	167
5.1.2	惠更斯-菲涅耳原理	167
5.1.3	菲涅耳衍射	167
5.1.4	夫琅禾费衍射	167
5.2	光的干涉	171
5.2.1	干涉现象	171
5.2.2	干涉的条件	171
5.2.3	干涉的强度	171
5.2.4	干涉的条纹	171
5.2.5	干涉的相位	171
5.2.6	干涉的偏振	171
5.2.7	干涉的色散	171
5.2.8	干涉的衍射	171
5.2.9	干涉的偏振	171
5.2.10	干涉的衍射	171
5.3	光的衍射	175
5.3.1	衍射现象	175
5.3.2	衍射的条件	175
5.3.3	衍射的强度	175
5.3.4	衍射的条纹	175
5.3.5	衍射的相位	175
5.3.6	衍射的偏振	175
5.3.7	衍射的色散	175
5.3.8	衍射的衍射	175
5.3.9	衍射的偏振	175
5.3.10	衍射的衍射	175
5.4	光的偏振	179
5.4.1	偏振现象	179
5.4.2	偏振的条件	179
5.4.3	偏振的强度	179
5.4.4	偏振的条纹	179
5.4.5	偏振的相位	179
5.4.6	偏振的偏振	179
5.4.7	偏振的色散	179
5.4.8	偏振的衍射	179
5.4.9	偏振的偏振	179
5.4.10	偏振的衍射	179
5.5	光的色散	181
5.5.1	色散现象	181
5.5.2	色散的条件	181
5.5.3	色散的强度	181
5.5.4	色散的条纹	181
5.5.5	色散的相位	181
5.5.6	色散的偏振	181
5.5.7	色散的色散	181
5.5.8	色散的衍射	181
5.5.9	色散的偏振	181
5.5.10	色散的衍射	181
5.6	光的吸收	185
5.6.1	吸收现象	185
5.6.2	吸收的条件	185
5.6.3	吸收的强度	185
5.6.4	吸收的条纹	185
5.6.5	吸收的相位	185
5.6.6	吸收的偏振	185
5.6.7	吸收的色散	185
5.6.8	吸收的衍射	185
5.6.9	吸收的偏振	185
5.6.10	吸收的衍射	185
5.7	光的散射	189
5.7.1	散射现象	189
5.7.2	散射的条件	189
5.7.3	散射的强度	189
5.7.4	散射的条纹	189
5.7.5	散射的相位	189
5.7.6	散射的偏振	189
5.7.7	散射的色散	189
5.7.8	散射的衍射	189
5.7.9	散射的偏振	189
5.7.10	散射的衍射	189
5.8	光的衍射	193
5.8.1	衍射现象	193
5.8.2	衍射的条件	193
5.8.3	衍射的强度	193
5.8.4	衍射的条纹	193
5.8.5	衍射的相位	193
5.8.6	衍射的偏振	193
5.8.7	衍射的色散	193
5.8.8	衍射的衍射	193
5.8.9	衍射的偏振	193
5.8.10	衍射的衍射	193
5.9	光的干涉	197
5.9.1	干涉现象	197
5.9.2	干涉的条件	197
5.9.3	干涉的强度	197
5.9.4	干涉的条纹	197
5.9.5	干涉的相位	197
5.9.6	干涉的偏振	197
5.9.7	干涉的色散	197
5.9.8	干涉的衍射	197
5.9.9	干涉的偏振	197
5.9.10	干涉的衍射	197
5.10	光的衍射	201
5.10.1	衍射现象	201
5.10.2	衍射的条件	201
5.10.3	衍射的强度	201
5.10.4	衍射的条纹	201
5.10.5	衍射的相位	201
5.10.6	衍射的偏振	201
5.10.7	衍射的色散	201
5.10.8	衍射的衍射	201
5.10.9	衍射的偏振	201
5.10.10	衍射的衍射	201
5.11	光的衍射	205
5.11.1	衍射现象	205
5.11.2	衍射的条件	205
5.11.3	衍射的强度	205
5.11.4	衍射的条纹	205
5.11.5	衍射的相位	205
5.11.6	衍射的偏振	205
5.11.7	衍射的色散	205
5.11.8	衍射的衍射	205
5.11.9	衍射的偏振	205
5.11.10	衍射的衍射	205
5.12	光的衍射	209
5.12.1	衍射现象	209
5.12.2	衍射的条件	209
5.12.3	衍射的强度	209
5.12.4	衍射的条纹	209
5.12.5	衍射的相位	209
5.12.6	衍射的偏振	209
5.12.7	衍射的色散	209
5.12.8	衍射的衍射	209
5.12.9	衍射的偏振	209
5.12.10	衍射的衍射	209

绪 言

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放出电子的现象）和其它现象，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（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（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，还能解释许多其它物理现象，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，但对我们了解和學習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 或 3900 \AA 到 7700 \AA [$1 \text{ nm} (1 \text{ 纳米}) = 10^{-9} \text{ m}$, $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$]，对应的频率范围是 $7.7 \times 10^{14} - 3.9 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。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它部分的，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。例如在强的激光照射下，可以观察到许多新的非线性光学现象。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。其它如全息、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，更重要的是光学的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。

射、反射方向和折射方向总遵循如下的规律：

1. 反射定律

(1) 入射光线、反射光线、分界面的法线在同一平面内，入射光线与分界面的法线点上的

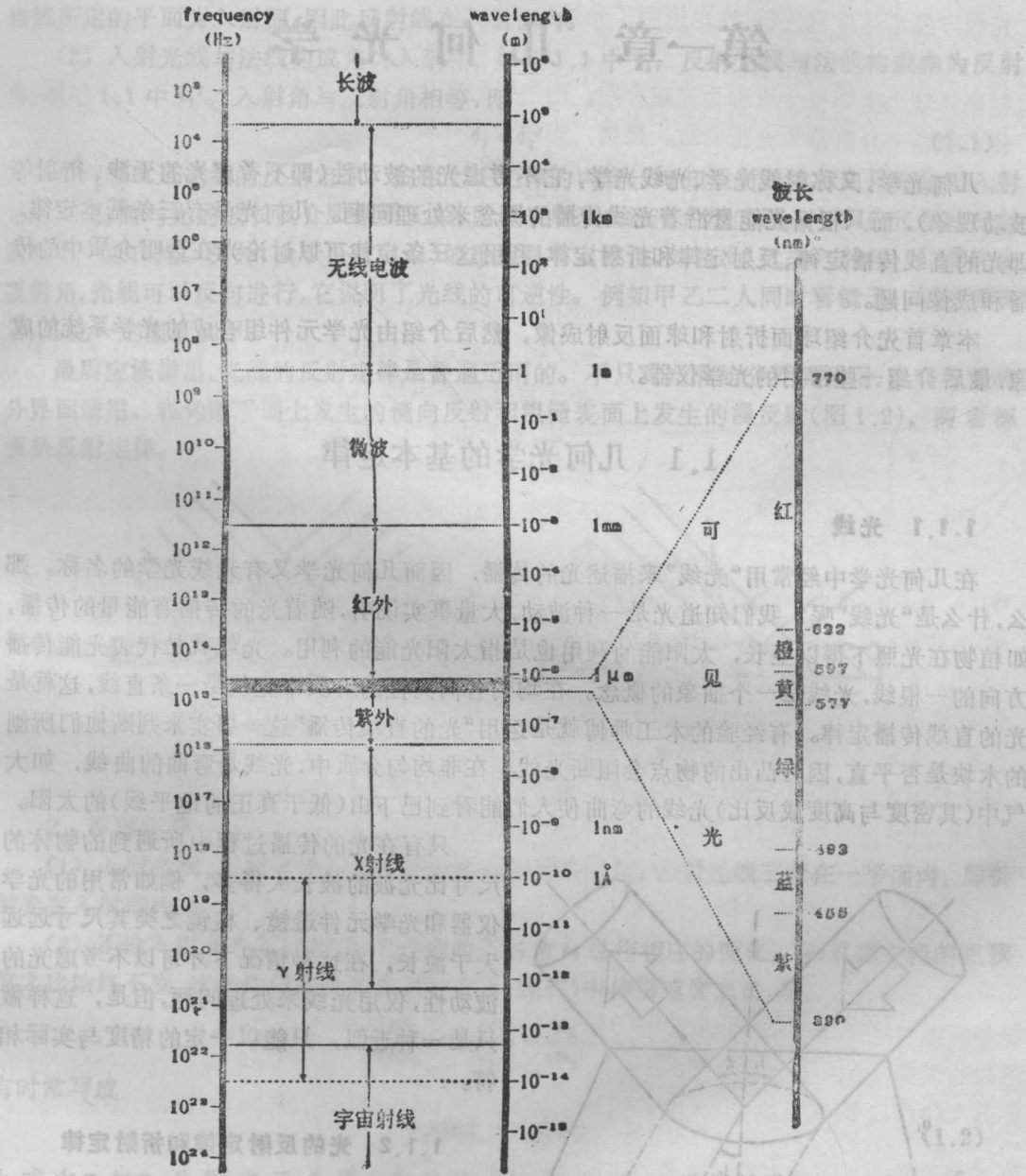


图 0.1 电磁波谱表

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,到底是什么?那么,这是不能简单地用比喻来作比较的。对事物的理解并不一定要借助于比喻的力。现在对光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?对麦克斯韦理论处理光的传播问题,而量子理论

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?我们知道光是一种波动,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,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。

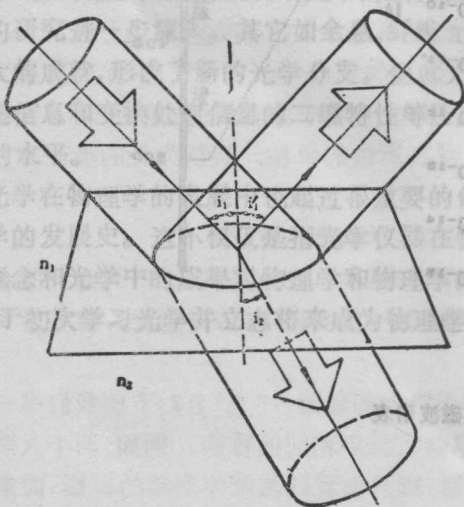


图 1.1: 光的反射和折射

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:

1. 反射定律

(1) 入射光、反射光、分界面的法线三者在一平面内,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。

(2) 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,它说明了光线的可逆性。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。不只对光滑的分界面适用,也对粗糙的分界面适用。在光滑平面上发生的镜向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。

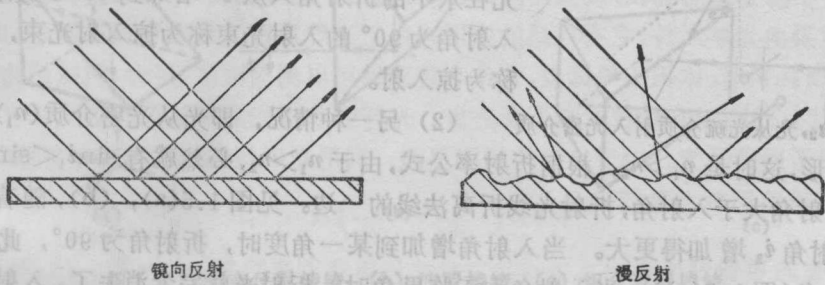


图 1.2 反射的两种情况

2. 折射定律

(1) 入射光线、入射光线与分界面的接触点上的法线、折射光线三者在一平面内,即折射光在入射面内。

(2) 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 $\frac{c}{v_1}$ 和 $\frac{c}{v_2}$, c 是光在真空中的传播速度,经实验测定

$$c = 299793 \text{ 千米/秒} \approx 3 \times 10^8 \text{ 米/秒}$$

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

现象(见图 1.3)。

折射定律的表示式 (1.2) 与反射定律一样也具有对称形式, 所以当 i_2 代表入射角时, i_1 就代表折射角, 光线方向可以反向进行, 这也说明了光线的可逆性。

光线从一介质进入到另一介质时, 通常我们把折射率比较小的那个介质称为光疏介质, 而把折射率比较大的那个介质称为光密介质。显然, 光在光疏介质中的速度大, 而在光密介质中速度小(见折射率定义

$n = \frac{c}{v}$)。现在分两种情况进行讨论。



图 1.3 光在折射时出现色散现象

(1) 首先讨论光从光疏介质(折射率为 n_1)射到光密介质(折射率为 n_2)的情形。根据折射率公式, 由于 $n_1 < n_2$, 必然就有 $\sin i_2 < \sin i_1$, 从而 $i_2 < i_1$, 即折射角小于入射角。从图 1.4 上看出折射光折向靠近法线的一边, 如光由空气入射到水中, 当入射角由 $0^\circ \rightarrow 90^\circ$, 光在水中的折射角只从 0° 增加到 48° 。顺便提一下, 入射角为 90° 的入射光束称为掠入射光束, 此时入射称为掠入射。

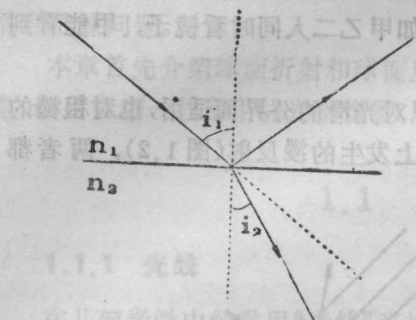


图 1.4 $n_1 < n_2$, 光从光疏介质射入光密介质

(2) 另一种情况, 即光从光密介质(n_1)到光疏介质(n_2)的情形, 这时是 $n_1 > n_2$ 。根据折射率公式, 由于 $n_1 > n_2$, 必然就有 $\sin i_1 < \sin i_2$, 从而 $i_1 < i_2$, 即折射角大于入射角, 折射光线折离法线的一边。见图 1.5(a), (b), 随着入射角 i_1 的增大, 折射角 i_2 增加得更大。当入射角增加到某一角度时, 折射角为 90° , 此时的入射角称为临界角(图 1.5(c))。当入射角大于临界角时, 折射光就完全消失了, 入射光全部转化成反射光, 这就是发生了全反射现象, 见图 1.5(d)。

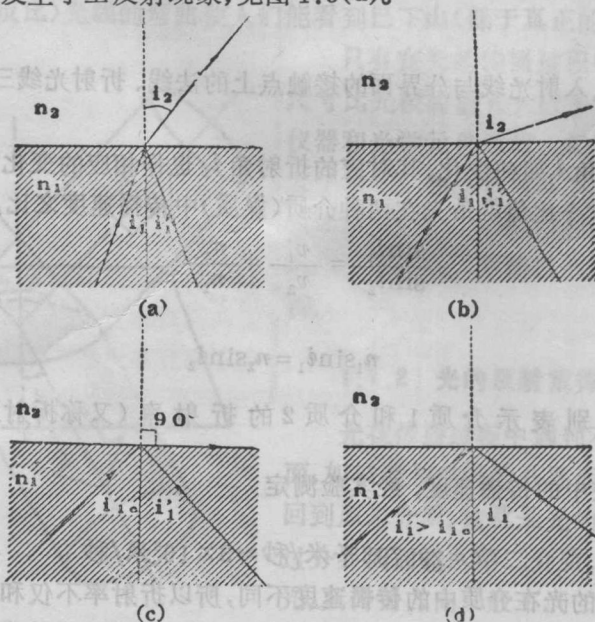


图 1.5 $n_2 < n_1$, 光从光密介质射入光疏介质时的四种情况

根据折射定律, 临界角 i_{1c} 满足下列公式:

$$n_1 \sin i_{1c} = n_2 \sin 90^\circ$$

$$\sin i_{1c} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.3)$$

由于全反射时, 光强几乎不会因反射而损失, 故全反射现象在光学中有着重要的应用。

光学仪器中经常使用反射棱镜, 使得进入棱镜的光束经过全反射后或是改变其传播方向, 或者是改变像的取向, 或者二者兼有。由于反射没有色散现象, 这种反射棱镜是消色差的。

图 1.6(a) 中的直角棱镜使入射光线偏转 90° 。图 1.6(b) 中的波罗 (Porro) 棱镜使光束经过两次全反射后方向偏转 180° , 并且使像的上下方位倒转, 但左右方位不变。在图 1.6(c) 中所画的组合波罗棱镜, 为两个棱边互相垂直的等腰直角三棱镜, 一个倒转上下方位, 一个倒转左右方位, 这就是双筒望远镜中常使用的正像系统。

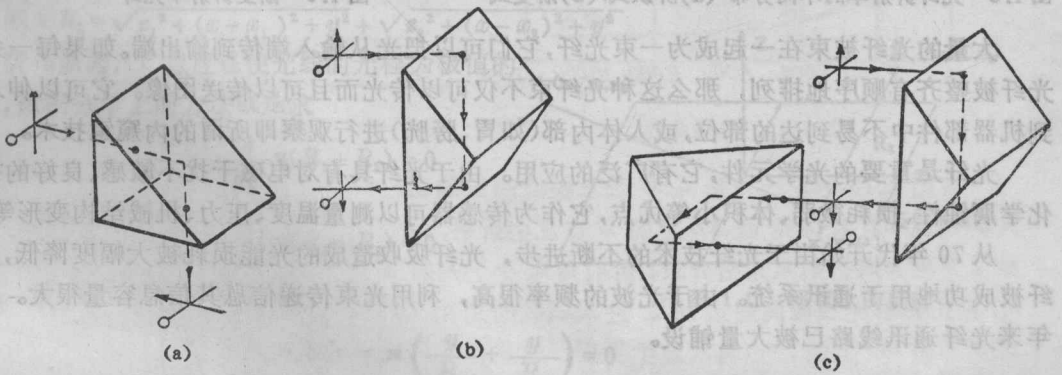


图 1.6 (a) 全反射棱镜; (b) 波罗棱镜; (c) 组合波罗棱镜

还有多种反射棱镜, 它们用于各种特殊的目的。例如, 切割一个立方体, 使切下来的部分有三个互相垂直的面, 这种棱镜叫做角锥棱镜, 这种棱镜有使光线反向的性质, 即向它入射的任何光线, 经过三个面的每一面反射之后, 平行于原入射方向返回。在阿波罗 11 号宇宙飞船飞往月球时, 曾把一百块这样的棱镜排成一个 46 厘米的阵列, 放置在月球上。

近代发展的光学纤维利用光在光纤中的全反射现象, 使携带信息的光在纤维中高效率地传播。

光纤通常由玻璃或石英等透明介质制成, 是直径非常小 (例如 $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$) 的圆柱体形状, 光纤芯的折射率 n_0 较高, 它的外层折射率 n_1 稍低, 由于产生全反射现象, 使光能够沿着光纤传播, 如图 1.7 所示。该图中的光纤其折射率呈阶梯状变化, 剖面如图 1.8(a)。

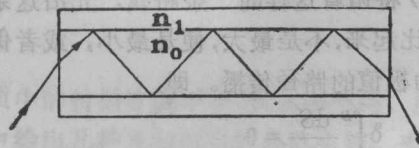


图 1.7 光纤中的全反射

另一种光纤其折射率由中心到边缘有规律连续地变小, 称为渐变折射率光纤, 如图 1.8(b), 光线在渐变折射率光纤中沿曲线传播 (图 1.9)。

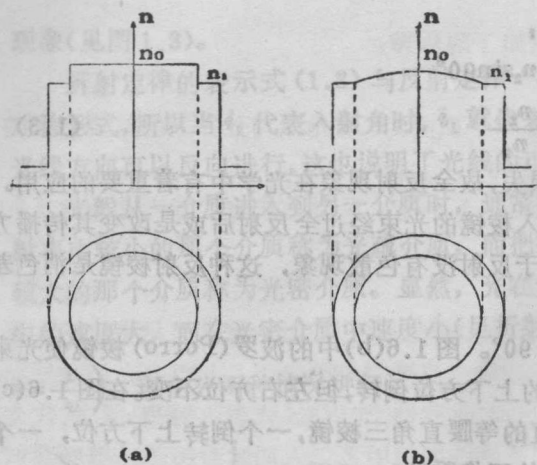


图 1.8 光纤折射率的不同分布 (a)阶跃式; (b)渐变式

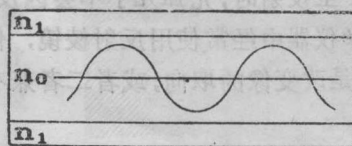


图 1.9 渐变折射率光纤

大量的光纤被束在一起成为一束光纤,它们可以把光从输入端传到输出端。如果每一条光纤被整齐有顺序地排列,那么这种光纤束不仅可以传光而且可以传送图像。它可以伸入到机器部件中不易到达的部位,或人体内部(如胃、膀胱)进行观察即所谓的内窥镜技术。

光纤是重要的光学元件,它有广泛的应用。由于光纤具有对电磁干扰不敏感、良好的抗化学腐蚀性、损耗微弱、体积小等优点,它作为传感器可以测量温度、压力、机械结构变形等。

从 70 年代开始由于光纤技术的不断进步,光纤吸收造成的光能损耗被大幅度降低,光纤被成功地用于通讯系统。由于光波的频率很高,利用光束传递信息其信息容量很大。近年来光纤通讯线路已被大量铺设。

1.1.3 光的可逆性原理

式(1.1)和(1.2)的对称性表明,如果光线逆着反射线方向入射,则这时的反射线将逆着原来的入射线方向传播;如果光线逆着原来的折射线方向由介质 2 入射,则射入介质 1 的折射线也将逆着原来的入射线方向传播。因为可逆性对每一反射面和折射面都适用,所以它对复杂的光路也适用。当光线的方向反转时,它将逆着同一路径传播。这个原理称为光的可逆性原理。

1.1.4 费马原理

1657 年费马(P. de Fermat)把光传播时所服从的定律归结成更为普遍的原理,这个原理就是费马原理。这原理常用下面的说法来表述:当光由 A 点传播到 B 点时(图 1.10)将循着这样的一条路线,光沿这条路线传播所需要的时间同附近的路线比起来,不是最大,便是最小,或者保持不变。换句话说,光沿着所需时间为极值的路径传播。即

$$\delta \int_A^B \frac{dS}{v} = 0$$

v 为速度。根据折射率的定义, $n = \frac{c}{v}$, 上式又可改写成

$$\delta \int_A^B n dS = 0 \quad (1.4)$$



图 1.10 费马原理