

光学

田兴时 林南英 编
姚裕昌 佘兆铭

云南大学出版社

光 学

田兴时 林南英 姚裕昌 佘兆铭 编

云南大学出版社

责任编辑:罗贵金

封面设计:丁群亚

内 容 提 要

本书系统介绍几何光学、光的振动、光的干涉、光的衍射、光的偏振、光的传播以及傅里叶变换光学和激光的基本原理及应用。

本书可作为高等院校物理教学的光学教科书及参考书,也可作为科技人员的基础参考书。

光 学

田兴时 林南英 姚裕昌 余兆铭

*

云南大学出版社出版发行

(云南大学校内)

云南大学出版社印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:19.5 字数:475千

1996年5月第1版 1996年5月第1次印刷

印数:0001—1000

ISBN 7-81025-642-4/O·35 定价:28.00元

前 言

古老的光学经历了漫长发展史后,到 19 世纪 40 年代才在像的形成、干涉和衍射、光的偏振及光的传播等方面形成了以波动学说为基础的系统理论。20 世纪初,光量子理论的诞生,特别是 20 世纪 40 年代信息论和通讯理论对光学的积极影响以及 60 年代激光的发现和 应用,促进光学的许多新概念和新理论形成,从此光学就以一系列引人注目的成就出现在当代科学技术领域内,使光学研究进入了一个崭新阶段,成为现代科学技术前沿阵地之一。

这本《光学》是作为一门基础课提出的。由于学时有限,不可能收集光学的所有理论和实验规律。为了让读者能对光学有一个较全面的了解,本书在编写时作了如下处理。首先,在力求讲清基本原理的原则下,尽力避免繁杂的数学推导,并适当打开一些窗口,留作对基本原理的引伸,使读者易于掌握基本原理及其应用前景,这有利于帮助读者积累知识和提高运用知识的能力。其次,几何光学是波动光学在光波波长趋于零时的极限情况,其处理方法比较简单。因此,在具体安排上,先讲几何光学的一般规律及典型仪器。这样处理与几何光学在整个光学中的地位是一致的。再者,现代光学已在科学技术中占有显赫地位。因此,除了讨论传统光学外,以精炼而简短的方式介绍了现代光学的发展概况。现代光学是传统光学的发展,在处理方式上特别注意了两者之间的联系,以保证光学各部分之间的连续性。最后,在各章选配了新颖多样的例题,既有巩固基础知识的题目,又有一定难度的提高性题目,用以帮助读者深入地理解并掌握基本原理和基本知识。

本书参照了 1984 年余兆铭、马伟林编写的《光学讲义》及其他光学资料,结合光学的最新发展,多次修改,终于写成。此书跳出了传统光学的约束,较全面地反映了光学的面貌,蕴有现代科学发展之特点。全书共十章。第一章介绍几何光学的基本原理,第二章介绍典型光学仪器,第三章对光度学和色度学作了简要介绍,第四章讨论光波的特点及光波的叠加,第五章讨论光的干涉,并介绍几种典型的干涉仪,第六章研究光的衍射,同时简要介绍空间光栅及晶体的 X 射线衍射,第七章讨论光的偏振及多层薄膜,第八章研究傅里叶光学及相关应用,第九章介绍光在介质中的传播,包括光在金属中的传播,第十章阐述光的量子理论及光谱基础,对激光原理及应用也作了简要介绍。每章均有例题和习题,习题的参考答案总汇于书末。

本书可作为综合大学和师范院校物理教学的光学教材及参考书,也可作为科技人员的基础参考书及其他高等院校的物理教学参考书。

本书由田兴时、林南英、姚裕昌、余兆铭编写,最后由田兴时统稿全书。姚裕昌绘制了插图。限于编者的水平,如有疏漏或不当之处,恳请读者指正。

本书是云南大学主干课教材之一,出版过程中,得到云南大学物理系、云南大学教务处的的大力支持。张世鸾先生、罗贵金先生为本书的编辑作了大量工作,编者在此一并表示感谢。

编 者

一九九三年四月

1993.04

绪 论

光学是一门有悠久历史的学科。整个光学发展历史可以分为五个时期：萌芽时期、几何光学时期、波动光学时期、量子光学时期和现代光学时期。

光学的研究，集中于人类对光本性的认识。关于对光本性的认识，人类进行了大约三百年的争论，形成了各种不同学派。具有代表性的是微粒说和波动说，这两种学说在不同时期各自所占地位不同。随着科学的进步，认识的发展，直至爱因斯坦(A. Einstein)和德布罗意(L. V. de Broglie)提出波粒二象性后，争论才告一段落。

早在十七世纪就已开始了光本性问题的讨论。微粒说的代表人物是牛顿(I. Newton)，牛顿不仅在力学上有伟大的贡献，同时在光学中作出了不少成绩。牛顿认为：“光线是否是发光物质发射出来的很小物体？因为这样一些物体能够直线地穿过均匀媒质而不弯曲到影子区域里去，这正是光线的本性。”（按照这种认识，牛顿也解释了光的反射、折射现象。）当然，还应该指出，牛顿并不是绝对不承认光的波动性。他认为光投射到物体上时，能激起物体中以太粒子的振动，就好象投入水中的石块激起水面上的波纹一样，以此他解释了牛顿环产生的干涉。但是这种理论的致命弱点是由下面的结论表现出来：光在光密媒质中的传播速度大于光在光疏媒质中传播速度。

以惠更斯(C. Huygens)为代表建立了光的波动学说。这一学说认为光的作用是通过媒质来传递的，光是一种振动，而且根据光速的有限性论证了光是以媒质的一部分依次向其它部分传播的一种运动，它和声波、水波一样是一种球面波。惠更斯的理论较之于牛顿的微粒说更接近于光的本性，然而由于理论的不完善，致使用它来解释光的干涉、衍射和偏振现象时却遇到了困难。微粒说和波动说几乎在同一时代产生，但在十九世纪以前，微粒说一直占统治地位，其主要原因是限于当时的科学发展，使人们易于接受用古典力学的机械论来解释光的本性，再则当时牛顿的威望较之于惠更斯等高得多。

十九世纪初，托马斯·扬(T. Young)通过眼睛对距离的调节问题、声和光方面的实验及双缝实验等问题的研究，首次提出了波动光学的基本概念——波长，并作出定量测定，发现“同一光束的两不同部分以不同的路径要么完全地、要么在方向上十分接近地进入眼睛，在光线的路程差是某个长度的整数倍的地方，光就越强……对于不同颜色的光束来说，这个长度是不同的。”用他的这一观点成功地解释了干涉现象。

菲涅尔(A. J. Fresnel)的成绩是他对衍射问题的研究。他提出了把波振面分解为波带的巧妙的计算方法。使理论结果与实验符合得很好。

托马斯·扬和菲涅尔的发现，标志着光学进入了新时期。1849年菲索(A. H. L. Fizeau)利用转动齿轮法和1862年佛科(J. L. Foucault)用旋转镜法，首次在实验室测定了光速，由此证明波动光学说在解释折射时的正确性。这样，在光的本性问题的争论中，波动说已上升到重要地位。然而这时的波动说仍没有跳出机械说的圈子，因为它把光看成是在一种特殊的弹性媒质——“以太”中的机械振动。

19世纪30~40年代，欧洲工业革命的结果引起生产技术的重大变革，这无疑对自然科

学的发展起了巨大的推动作用。麦克斯韦(J. C. Maxwell)在法拉第(M. Faraday)等人工作的基础上建立的电磁理论为光的电磁波本性提供了依据。通过这一理论麦克斯韦证明了光是横波,而且推算出电磁波在空气中的传播速度就是光的传播速度。因而他认为:“这一速度与光速如此接近,看来我们有强烈的理由断定光本身乃是以波的形式在电磁场中按电磁规律传播的一种电磁振动。”这一观点20年后由赫兹(H. R. Hertz)用实验证明了。光的电磁理论虽然摆脱了机械振动的观念,然而传播光的媒质却由“机械以太”转向了“电磁以太”。

19世纪末、20世纪初,电子、X射线、放射性等的发现,引起了物理学的大革命。光电效应的研究,确立了爱因斯坦光量子理论,并由密立根(R. A. Millikan)用实验加以证明。表面上看来,似乎量子论又重复了牛顿的微粒说,但实际上二者是截然不同的。牛顿提出粒子的运动服从古典力学规律,而光子理论提出的光子的运动却遵从电磁运动规律。所以光子理论是人们认识光本性的飞跃。随后爱因斯坦通过黑体辐射能量和动量涨落的研究,提出辐射场不仅显示出波动性而且显示出粒子性。他认为:“不可否认的是,有关黑体辐射的很大一类实验说明,光具有的一些基本性质,从牛顿的微粒论去理解要比从波动说去理解容易得多。因此我认为,在理论物理发展的下一阶段,将会出现光的理论,根据这种理论,光可能被看作是波动论和微粒论的一种融合体……我们关于光的本性和光的结构的看法的深刻改变是不可避免的。”

德布罗意的工作进一步阐述了光的波粒二象性,并将它推广到一切实物粒子。这一点由电子衍射实验所证明。它说明了波动和粒子的二象性是微观物质世界的普遍性质,而光的二象性只是这种普遍性中的特殊情况。量子电动力学的建立更深刻地揭示了微观世界波粒二象性的意义,并阐述了光的波动性与粒子性的意义及其辩证关系。

20世纪50年代以来光学开始了一个新的发展时期,使光学构成了现代物理和现代科学技术不可缺少的重要组成部分。在过去的半个世纪,人们将分析方法和通讯系统理论与光学结合,引入频谱和空间滤波的概念,形成了“傅里叶光学”,为现代的光信息处理、现代象质评估、相干光学计算机等尖端技术奠定了基础。由于各种优质红外材料的研制成功,使红外光技术在各种探测系统、制导、遥感技术和资源考察中越来越显示出神奇的威力。光学纤维的问世,内窥镜光学系统和光通讯的实现,使人类向自由王国迈进了一大步。从60年代激光器制成以来,极大地刺激了光学技术的发展,使之成为现代科学技术最活跃的领地之一。通过激光物理学和激光技术的研究,有力地促进了物理学、化学和生物学的发展,并在材料加工、精密测量、远距离测距、全息技术、军事、乃至医疗、农作物育种等方面获得越来越广泛的应用。用激光加热等离子体实现受控热核反应是物理学中最有前途的方向之一,它已受到全世界的重视。利用激光可以获得很高的能量密度,由此产生了一个光学的新分支——强光光学(即非线性光学)。由于它具有许多特殊的规律、现象和效应,已被越来越多的人所注意。

经过漫长的历史及人们辛勤的劳动,光学可以说是够美妙、够完善的了。但是光学也不断地向人们展示着它的面貌,以致使人们在这些令人瞠目结舌的新现象面前无所适从(例如:近代实验发现,波长不大于千分之一纳米的光子—— γ 射线,在强电场中可以变成两个带相反电荷的质点——电子和正电子,这一现象使人们在惊奇中不知所以)。这无疑告诉人们:虽然对光学的研究已经取得极为辉煌的成就,但是绝不能说人们对光本性的认识,已经终结,相反,更深入、更困难的问题将不断呈现在人们的面前,等待着人们去探索。

目 录

| | | | |
|---------------------|------|--------------------------|------|
| 绪 论 | | 第二章 典型光学仪器原理简析 | (34) |
| 第一章 几何光学 | (1) | § 2-1 眼睛 | (34) |
| § 1-1 几何光学的基本原理 | (1) | § 2-2 助视仪器 | (35) |
| 一、光源 光线 | (1) | 一、放大镜 | (35) |
| 二、实验定律 | (1) | 二、显微镜 | (37) |
| 三、全反射 光学纤维 | (2) | 三、望远镜 | (38) |
| 四、费马原理 | (3) | § 2-3 照相机和投影仪 | (39) |
| 五、惠更斯原理 | (5) | § 2-4 棱镜光谱仪 | (39) |
| § 1-2 单球面的折射和反射成象 | (6) | 习 题 | (42) |
| 一、同心光束 物和象 | (6) | 第三章 光度学与色度学简介 | (43) |
| 二、光经平面的反射和折射 | (7) | § 3-1 光度学简介 | (43) |
| 三、单球面折射成象 | (8) | 一、光度学基本概念 | (43) |
| 四、放大率 | (13) | 二、象的亮度和照度 | (45) |
| 五、作图求象法 | (14) | § 3-2 色度学简介 | (46) |
| 六、球面反射成象 | (14) | 一、人的颜色视觉规律简介 | (46) |
| § 1-3 共轴球面系统的逐次成象 | (16) | 二、颜色匹配 | (47) |
| 薄透镜 | (16) | 三、部份标准色度学系统简介 | (48) |
| 一、逐次成象计算 | (16) | 习 题 | (50) |
| 二、薄透镜 | (17) | 第四章 光波 | (51) |
| 三、作图求象法 | (18) | § 4-1 光是电磁波 | (51) |
| § 1-4 共轴球面系统的基点 厚透镜 | (19) | § 4-2 一维平面简谐光波 | (52) |
| 一、共轴球面系统的基点 | (19) | 一、一维平面简谐波方程 | (52) |
| 二、共轴球面系统的组合 | (22) | 二、简谐波方程的复数形式 | (54) |
| 三、厚透镜 | (23) | § 4-3 三维平面简谐光波 | (55) |
| 四、薄透镜的组合 | (24) | 一、三维平面简谐波方程 | (55) |
| § 1-5 光阑及象差简介 | (26) | 二、波场的空间频率 | (56) |
| 一、有效光阑 入射光瞳和出射光瞳 | (26) | § 4-4 球面简谐光波 | (58) |
| 二、视场光阑 入射窗和出射窗 | (27) | § 4-5 光波的能量、光强 | (59) |
| 三、象差 | (27) | § 4-6 波的叠加原理 | (60) |
| 四、色差及其校正 | (29) | 一、波的叠加原理 | (60) |
| 习 题 | (31) | 二、二列频率相同、振动方向相同单色平面光波的叠加 | (60) |
| | | 三、求合振动的复数法 | (63) |
| | | 四、求合振动的振幅矢量法 | (63) |
| | | 五、多列光波的叠加 | (64) |

| | | | |
|-----------------------------------|-------|------------------------------|-------|
| § 4-7 实际光波 | (65) | 特点 | (107) |
| 习 题 | (71) | 二、透射相干光的光强分布 | (107) |
| 第五章 光的干涉 | (73) | 三、干涉条纹的锐度 | (108) |
| § 5-1 光的干涉现象与相干条件 | (73) | 四、法布里-珀罗干涉仪是一种高分辨率分光仪器 | (111) |
| 一、光的干涉现象 | (73) | 习 题 | (116) |
| 二、相干条件 | (74) | 第六章 光的衍射 | (119) |
| 三、相干光波的获得 | (77) | § 6-1 光的衍射现象 | (119) |
| § 5-2 分波阵面法及其典型实验装置 | (77) | § 6-2 惠更斯-菲涅耳原理 | (120) |
| 一、杨氏干涉实验 | (77) | § 6-3 菲涅耳半波带法和振幅矢量图解法 | (122) |
| 二、菲涅耳双棱镜实验 | (83) | 一、菲涅耳半波带法 | (122) |
| 三、菲涅耳双平面镜实验 | (84) | 二、振幅矢量图解法 | (125) |
| 四、洛埃镜实验 | (84) | § 6-4 菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射 | (128) |
| § 5-3 干涉条纹的可见度 空间相干性和时间相干性 | (85) | 一、实验现象 | (128) |
| 一、干涉条纹的可见度 | (85) | 二、对实验现象的解释 | (128) |
| 二、二相干光波的相对光强对可见度的影响 | (85) | 三、波带片 | (129) |
| 三、光源的宽度对可见度的影响 | (85) | 四、直线传播和衍射现象的联系 | (132) |
| 四、空间相干性 | (87) | § 6-5 夫琅和费单缝衍射 | (132) |
| 五、光源的单色性对可见度的影响 | (88) | 一、实验装置和衍射花样的特点 | (132) |
| 六、时间相干性 | (91) | 二、衍射光强分布公式 | (133) |
| § 5-4 透明薄膜的干涉——分振幅法产生的双光束干涉 | (92) | 三、衍射花样 | (135) |
| 一、在薄膜两个界面上反射的光波的光程差 | (94) | § 6-6 夫琅和费圆孔衍射 | (138) |
| 二、薄膜的等倾干涉条纹 | (94) | 一、实验装置和衍射花样的特点 | (138) |
| 三、薄膜的等厚干涉条纹 | (95) | 二、光强分布公式 | (138) |
| 四、牛顿环 | (100) | § 6-7 光学仪器的像分辨本领 | (141) |
| § 5-5 迈克逊干涉仪 | (101) | 一、像分辨本领的概念 | (141) |
| 一、干涉仪的结构 | (102) | 二、瑞利判据 | (142) |
| 二、等效光路及光程差 | (102) | 三、人眼的最小分辨角 | (143) |
| 三、干涉条纹的性质 | (103) | 四、望远镜的最小分辨角 | (143) |
| 四、应用举例 | (104) | 五、显微镜的最小分辨距离 | (144) |
| § 5-6 法布里-珀罗干涉仪 | (107) | 六、照相机的分辨本领 | (145) |
| 一、干涉仪的结构和干涉花样的特点 | (107) | § 6-8 棱镜光谱仪的色分辨本领 | (146) |

| | | | |
|------------------------|-------|---------------------|-------|
| 一、角色散和线色散····· | (146) | 二、晶体的光轴和主截面····· | (187) |
| 二、色分辨本领····· | (147) | 三、双折射的实验规律····· | (188) |
| § 6-9 平面衍射光栅····· | (148) | § 7-5 单轴晶体中的波面····· | (189) |
| 一、实验装置和衍射花样的特点 | | 一、单轴晶体中的波面····· | (189) |
| ····· | (149) | 二、平面波在单轴晶体中的传播 | |
| 二、光强分布公式····· | (149) | ····· | (189) |
| 三、缝间干涉因子的特点····· | (151) | 三、波片····· | (191) |
| 四、谱线的缺级····· | (154) | § 7-6 偏振器件····· | (191) |
| 五、光栅光谱····· | (154) | 一、尼科耳棱镜····· | (192) |
| 六、光栅的角色散、色散范围和色 | | 二、渥拉斯顿棱镜····· | (193) |
| 分辨本领····· | (155) | 三、人造偏振片····· | (193) |
| § 6-10 空间光栅、晶体的 X 射线 | | § 7-7 椭圆偏振光和圆偏振光的获 | |
| 衍射····· | (160) | 得和检验····· | (194) |
| 一、概述····· | (160) | 一、椭圆和圆偏振光的获得····· | (194) |
| 二、布喇格方程····· | (161) | 二、三种特殊情况····· | (195) |
| 三、X 射线衍射实验方法····· | (163) | 三、偏振光的检验····· | (196) |
| 习 题····· | (164) | § 7-8 平行平面偏振光的干涉 | |
| 第七章 光的偏振····· | (167) | ····· | (196) |
| § 7-1 偏振光和自然光····· | (167) | 一、干涉装置····· | (197) |
| 一、线偏振光····· | (167) | 二、光强分布公式····· | (197) |
| 二、圆偏振光····· | (168) | § 7-9 平面偏振光振动面的旋转 | |
| 三、椭圆偏振光····· | (168) | ····· | (199) |
| 四、自然光····· | (170) | 一、旋光现象····· | (199) |
| 五、部分偏振光····· | (171) | 二、对旋光现象的解释····· | (200) |
| § 7-2 光在透明介质界面上的反 | | 习 题····· | (203) |
| 射和折射····· | (171) | 第八章 傅里叶光学····· | (205) |
| 一、反射定律和折射定律····· | (172) | § 8-1 傅里叶变换····· | (205) |
| 二、菲涅耳公式····· | (173) | 一、傅里叶变换及变换对····· | (205) |
| 三、布儒斯特定律····· | (175) | 二、傅里叶变换的基本性质····· | (206) |
| 四、关于位相突变 π 问题····· | (176) | § 8-2 衍射的傅里叶变换····· | (208) |
| 五、能流反射率和能流透射率 | | 一、菲涅耳衍射和夫琅和费衍射 | |
| ····· | (178) | ····· | (208) |
| § 7-3 薄膜的光学特性····· | (182) | 二、夫琅和费衍射的傅里叶变换 | |
| 一、单层薄膜的光学特性····· | (182) | ····· | (210) |
| 二、双层增透膜····· | (185) | 三、夫琅和费单缝衍射与多缝衍射 | |
| 三、多层高反射膜····· | (186) | ····· | (211) |
| § 7-4 光通过单轴晶体时的双折 | | 四、夫琅和费圆孔衍射与矩孔衍射 | |
| 射现象····· | (187) | ····· | (213) |
| 一、双折射现象····· | (187) | 五、菲涅耳衍射的傅里叶变换 | |

| | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| (216) | 习 题..... (261) |
| § 8-3 透镜的傅里叶变换性质 (218) | 第十章 光量子理论..... (262) |
| 一、透镜对光波位相的影响..... (218) | § 10-1 黑体辐射..... (262) |
| 二、透镜的傅里叶变换性质..... (220) | 一、热辐射..... (262) |
| § 8-4 阿贝成象原理..... (225) | 二、黑体辐射..... (263) |
| 一、阿贝成象原理..... (225) | 三、黑体辐射理论..... (264) |
| 二、波尔特实验及空间滤波..... (226) | 四、热辐射定律的应用..... (265) |
| § 8-5 光学信息处理..... (227) | § 10-2 光电效应..... (267) |
| 一、相干光学处理系统..... (227) | 一、光电效应..... (267) |
| 二、相衬法..... (230) | 二、光电效应的经典理论..... (268) |
| 三、 θ 调制实验..... (232) | 三、爱因斯坦光量子理论..... (268) |
| 四、光信息的计算机处理..... (232) | § 10-3 康普顿散射..... (270) |
| § 8-6 全息术原理..... (234) | 一、康普顿散射..... (270) |
| 一、全息术概述..... (234) | 二、康普顿散射的光量子理论 (271) |
| 二、全息术原理..... (235) | § 10-4 波粒二象性..... (274) |
| 三、全息术应用..... (236) | 一、光子和光波..... (274) |
| 习 题..... (238) | 二、实物波..... (275) |
| 第九章 光在介质中的传播..... (240) | 三、波粒二象性..... (276) |
| § 9-1 介质对光的吸收..... (240) | § 10-5 原子发光..... (278) |
| 一、吸收现象..... (240) | 一、氢原子光谱的实验规律..... (278) |
| 二、吸收规律..... (240) | 二、玻尔假设..... (279) |
| 三、吸收光谱和物体的颜色..... (242) | 三、玻尔原子..... (279) |
| § 9-2 光在介质中的色散..... (244) | 四、氢原子的能级图和光谱..... (280) |
| 一、正常色散和反常色散..... (244) | 五、碱金属原子光谱..... (281) |
| 二、色散的特点..... (245) | § 10-6 激光原理 激光特性及其 应用..... (283) |
| 三、色散的观测方法..... (246) | 一、激光器..... (283) |
| 四、相速和群速..... (248) | 二、光与原子的相互作用..... (284) |
| § 9-3 吸收理论和色散理论..... (250) | 三、光在介质中的放大..... (285) |
| 一、经典吸收理论..... (250) | 四、实现粒子数反转的方法..... (286) |
| 二、经典色散理论..... (252) | 五、谐振腔..... (288) |
| 三、光在导电介质中的传播..... (253) | 六、激光的频率特性..... (288) |
| § 9-4 光的散射和散射理论..... (255) | 七、激光的应用..... (289) |
| 一、光的散射现象..... (255) | 习 题..... (292) |
| 二、瑞利散射..... (256) | 附录 基本物理常数..... (294) |
| 三、米氏散射..... (258) | 习题答案..... (295) |
| 四、喇曼散射..... (259) | |

第一章 几何光学

几何光学不涉及光的波动特性,以光的直线传播为基础、讨论光经过透明介质时的传播、成像原理以及计算方法。它是人们在长期实践中总结、发展起来的理论。“光”是一种能作用于眼睛而引起主观视觉的客观存在,现已弄清这种被眼睛所感知的客观存在仅仅是电磁波谱中很窄的一段。在物理学上“光”被归结为短的电磁波,而不论它是否为人眼所感知。在几何光学中,被光作用的介质界面线度较之于光波波长大得很多,因此几乎在所有的讨论和实际应用中都忽略了波长的有限大小,光学中以这种近似为前提的领域称为几何光学。用这一理论对实际光学系统进行分析,具有避免繁难的运算、直观简单、结果与观察到的现象也很符合等优点。因此用几何光学的方法处理光学系统成像问题时,是很有用的。

本章主要介绍几何光学的基本原理,并根据这些原理重点研究近轴条件下不同光学系统的物像关系。

§ 1—1 几何光学的基本原理

一、光源 光线

任何发光(包括可见光或不可见光)或反射光的物体或表面都是光源。当光源线度在所讨论的问题中可以忽略时,该光源称为点光源。

在几何光学中,用沿着波传播方向所引起的一条表示光传播方向的几何线来代表光,这条线称为光线。

点光源和光线均为便于研究问题而抽象出的理想模型。一个实际的光源可看成是无数点光源的集合。

二、实验定律

1. 光的直线传播定律 在均匀介质中,光沿直线传播。

2. 光的独立传播定律 两束光或多束光相遇时,并不因其它光束的存在而改变原来传播的方向。

3. 光的反射定律和折射定律 一般情况下,光线入射到二种介质界面上时,一部分被反射,回到第一种介质中。另一部分被折射,进入到第二种介质。如图 1—1,光线 AB 称为入射光, B 点称为入射点,过 B 点垂直界面的直线 NB 称为入射点处界面的法线,入射光线与入射点处界面的法线共同确定的平面称为入射面,光线 BA' 称为反射线,光线 BA'' 称为折射线,入射光线与入射点处界面的法线夹角 i_1 称为入射角,反射光线与入射点处界面的法线夹角 i_1' 称为反射角,折射线与入射点处界面的法线间夹角 i_2 称为折射角。

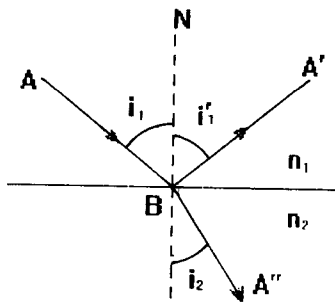


图 1—1

反射定律:光射到两种介质的介面上,其反射线在入射面内,反射线与入射线分居法线两侧,并且反射角等于入射角。即

折射定律:光射到两种介质的介面上,其折射线在入射面内,折射线与入射线分居法线两侧,并且入射角 i_1 与折射角 i_2 满足斯涅尔定律: $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ 。

$$i_1' = i_1 \tag{1-1}$$

折射定律:光射到两种介质的界面上,其折射线在入射面内,折射线与入射线分居界面两侧,并且入射角的正弦与折射角的正弦之比等于光在该两种介质中的相速度之比,该比值为—常数。即

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} \tag{1-2}$$

定义光在真空中的相速度与光在介质中的相速度之比,为介质的绝对折射率,简称折射率。

即
$$n = \frac{c}{v} \tag{1-3}$$

则
$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_1}{c} \frac{c}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

n_{21} 称为第二种介质对第一种介质的相对折射率。因此,折射定律还可以表示为:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \tag{1-2a}$$

介质对不同波长的光波,折射率不同。通常给出的介质的折射率,是用金属钠发出的波长($\lambda = 589.3 \text{ nm}$)测出来的。

4. 光的可逆性定律 光由一点 A 沿一定路径传播到 B 点,不论此路径的形状如何,只要保证媒质的分布不变,那么,光反过来由 B 点传播到 A 点是沿原路径进行的。

三、全反射 光学纤维

1. 临界角 全反射 光学纤维中,将绝对折射率大的介质称为光密介质,将绝对折射率小的介质称为光疏介质。—般情况下,光入射到两种介质的界面时,一部分被反射,另一部分被折射。但当光由光密介质进入光疏介质时,由(1-2a)式知:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} < 1$$

即 $i_1 < i_2$

若增大入射角 i_1 ,使 $i_1 = i_{10}$ 时, $i_2 = 90^\circ$,此时没有折射光。 i_{10} 称为临界角。如果入射角等于或大于临界角,则入射光全部被反射,这种现象称为全反射。

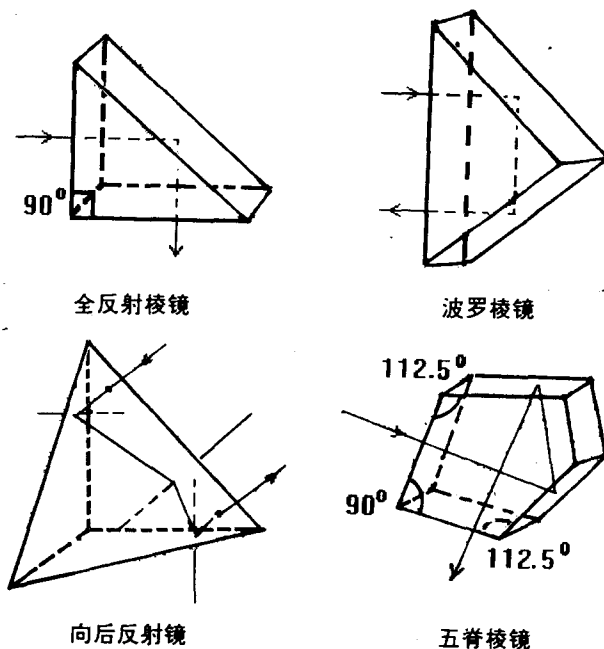


图 1-2 全反射棱镜

全反射有很多应用。光学仪器中常利用各种各样的全反射棱镜的组合来实现改变光路的目的。全反射棱镜的主要优点是能将入射到界面上的光能量全部反射回原介质,并且容易制作。图 1-2 给出了几种全反射棱镜的外形图示。

2. 光学纤维 当今具有抗电磁干扰强、高保密性、容量大、节省金属材料等优异性的光

学纤维通讯,就是利用了光学纤维具有全反射这一特性而研制成功的。

光学纤维用外表涂有低折射率物质的玻璃细丝制成,如图 1—3 所示,当光由折射率为 n_a 的媒质以入射角 i_0 射向光学纤维的端面时,是否所有的光能都被光学纤维传递呢?这要由制成光纤材料的折射率 n_g 和涂层物质折射率 n_c 的配置来决定。

由图 1—3 不难分析,进入光学纤维的光,当光线射在光学纤维壁上其入射角 $(\pi/2 - i_0')$ 等于或大于由 n_g 、 n_c 所决定的临界角时,将被光学纤维传递。也就是说,只有那些射到端面上的光的入射角小于某一角度 i_0 的光才能被传递。因此,对于进入光学纤维内能够被全反射的光,应满足:

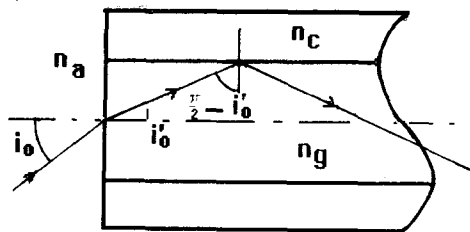


图 1—3 光纤结构示意及光的传递

$$n_g \sin(\pi/2 - i_0') = n_c \sin 90^\circ$$

即

$$n_g \cos i_0' = n_c$$

又

$$n_a \sin i_0 = n_g \sin i_0'$$

故有

$$n_a \sin i_0 = \sqrt{n_g^2 - n_c^2} \quad (1-4)$$

一般将 $n_a \sin i_0$ 称为光学纤维的数值孔径,它是光学纤维聚光本领的度量。 n_a 一般是空气折射率,而 $\sin i_0$ 的最大值只能是 1,只要选择适当的材料的 n_g 、 n_c 值,使 $\sqrt{n_g^2 - n_c^2} = 1$,此时光学纤维的数值孔径为 1,意味着该光学纤维能将由端面入射进到光学纤维内的所有光传送到另一端。否则,由端面入射的光进入光学纤维后,有一部分将在传送过程中透过 n_c 涂层介质而不被传送。

四、费马原理

1. 光程

光在不同介质中传播的速度不同。设光由 A 传到 B 通过 k 种介质,所需时间为 t 。由图 1—4 有:

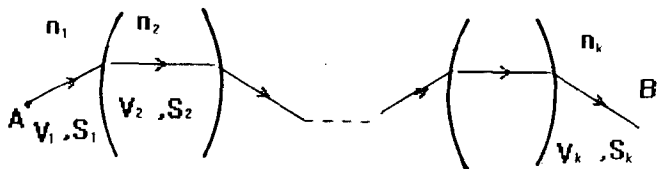


图 1—4

$$t = \frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} + \dots + \frac{s_k}{v_k} = \sum_{i=1}^k \frac{s_i}{v_i}$$

利用(1—3)式有:

$$t = \sum_{i=1}^k \frac{s_i}{v_i} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^k n_i s_i \quad (1-5)$$

定义介质的绝对折射率 n 与光在其中通过的几何路程 s 的乘积为光在该介质中的光学路程,简称光程。上式中 $\sum_{i=1}^k n_i s_i$ 为光由 A 到 B 的总光程。

若光用同样的时间 t 通过长度为 L 的真空,则:

$$t = L/c$$

对比(1—5)式知, $\sum_{i=1}^k n_i s_i$ 等于光以相同时间在真空中所通过的路程。将光在介质中传播的距离折算成光在真空中传播的距离,使得可以方便地对光在不同介质中所走路程的长短作比较。

若光在折射率连续变化的介质中由 A 点传到 B 点,则由 A 点到 B 点,光所通过的路径是一条曲线,其总光程为

$$l = \int_A^B n \, ds \quad (1-6)$$

2. 费马定理

费马对光的传播规律作了总结:

在介质(均匀或者不均匀)内,光从一点到另一点是取所需时间为极值(极大、极小或常数)的路径传播的,称为时间极值原理。其数学表示式为:

$$\delta t = \delta \left(\frac{1}{c} \sum_{i=1}^k n_i s_i \right) = 0 \quad (1-7)$$

或写为

$$\delta l = \delta \int_A^B n \, ds = 0 \quad (1-8)$$

(1—8)式表示,在介质内,光从一点到另一点是取光程为极值(极大、极小或常数)的路径传播的,称为光程极值原理。这两种叙述是等价的,称为费马原理。

下面由费马原理导出反射定律和折射定律:

(1) 反射定律

如图 1—5 所示,由 A 点向界面 ab 发出数条光线,经界面反射后到达 B 点的光线,其光程应最短。由图 1—5 知,由 A 点到 B' 的光线,直线 AEB' 最短,由对称性知,反射光线 AEB 最短。又因为

$$\angle BEb = \angle bEB' = \angle AEa$$

所以 $i_1' = i_1$

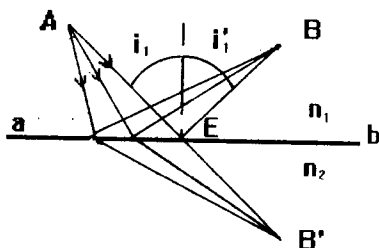


图 1-5

(2) 折射定律

如图 1—6 所示,由 A 点发出的光经界面折射后到达 B 点,总光程为

$$\begin{aligned} l &= n_1 s_1 + n_2 s_2 \\ &= n_1 \sqrt{y^2 + x^2} + n_2 \sqrt{y'^2 + (L-x)^2} \end{aligned}$$

由 l 为极值的条件 $\frac{dl}{dx} = 0$

$$\text{有} \quad \frac{n_1 x}{s_1} - \frac{n_2(L-x)}{s_2} = 0$$

$$\text{即} \quad n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

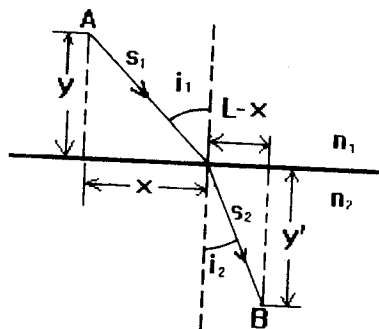


图 1-6

五、惠更斯原理

1. 波阵面 波射线

光波发出的振动状态向四面八方传播,将振动状态同一时刻到达的所有点连起来,一般构成一个曲面,这个面上各点的振动位相相同,该面称为波阵面或波前。

沿波传播方向所引的射线称为波射线。在各向同性介质中,波阵面为球面,波射线垂直波阵面。在各向异性介质中,波沿各个方向传播的速度不同,波阵面不是球面,波射线也不一定垂直波阵面。

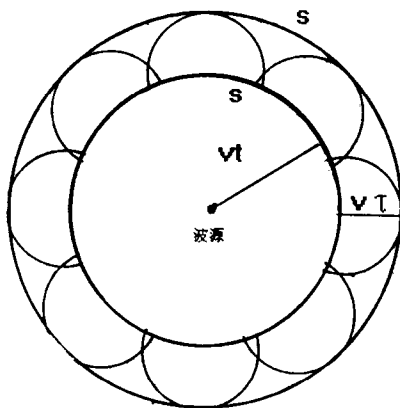


图 1-7

2. 惠更斯原理

惠更斯从波动的角度对波的传播提出看法,他认为:波前上各点都是新的波源,它们发出球面次波,这些次波的包络面就是后一时刻的新波前。根据惠更斯原理,图 1-7 示意了球面波的传播情况。波速是 v , t 时刻,波前是以 vt 为半径的球面 s , $(t + \tau)$ 时刻,波前 s' 是从 s 面上各点发出的以 $v\tau$ 为半径的球面次波的包络面。

由惠更斯原理可以得到反射定律和折射定律。如图 1-8 所示,一平面光波入射到两种介质的界面 MN ,入射角为 i_1 ,反射角为 i_1' ,折射角为 i_2 。 AB 为 t 时刻的波前, $A'B'$ 和 $A''B''$ 分别为 $(t + \tau)$ 时刻反射光的波前和折射光的波前。设光在 n_1 介质中的波速为 v_1 ,在 n_2 介质中的波速为 v_2 ,由图 1-8 的几何关系得

$$\sin i_1 = \frac{BB'}{AB'} = \frac{v_1 \tau}{AB'}$$

$$\sin i_1' = \frac{AA'}{AB'} = \frac{v_1 \tau}{AB'}$$

$$\sin i_2 = \frac{AA''}{AB''} = \frac{v_2 \tau}{AB''}$$

即

$$i_1 = i_1'$$

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

而由牛顿的微粒说得出的却是光在水中的传播速度比在空气中的快,但最终被傅科的实验结果否定。

惠更斯原理说明了光的反射、折射定律,但却不能解释光的衍射现象。

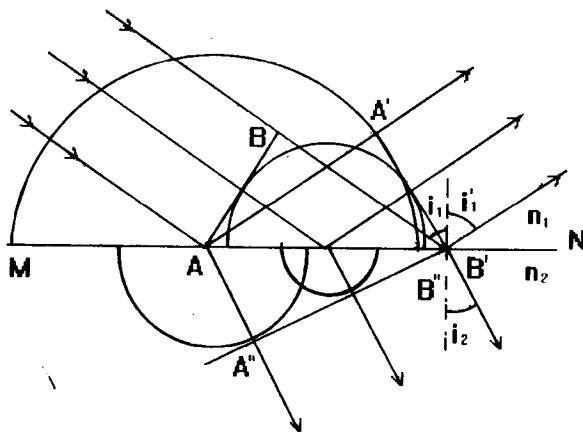
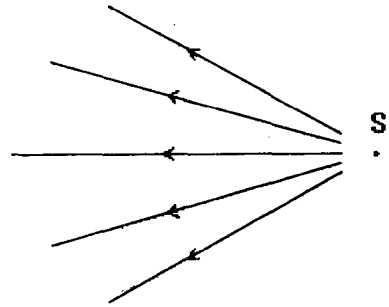


图 1-8

§ 1—2 单球面的折射和反射成像

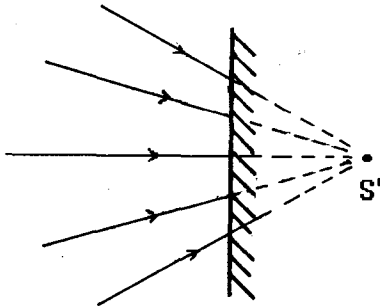
一、同心光束 物和像

物体发出的光,在传播过程中无论发生怎样的变化,它们之间总有可追寻的确定关系,因此在研究光的时候,就将这些具有一定关系的光线的集合称为光束。如果一束光从同一点发出或一束似乎无共同交汇点的光,但其反向延长的非真实光线仍能交汇于一点的话,这样的光束都被称为同心光束,交汇点一般称为“心”(图 1—9)。在各向同性的均匀媒质,从一个点光源发出的光线向各个方向传播,点光源就是各光线的共同中心,这就构成一个发散的同心光束;反之,如果光线会聚于一个共同的中心则称为会聚的同心光束,如图 1—9(a)、(b);对于一束平行光,仍将其认为是同心光束,只不过这些平行光线的共同中心在无穷远处,如图 1—9(c)。

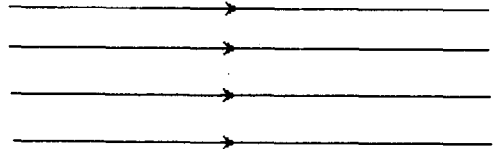


(a) 有实交点的同心光束(发散光束)

任何一个发光物体,都可以看成是由若干点光源组成。一般发光物体所发出的光线是不同心的。如一个非球形曲面,由于在两个正交的方向上具有不同的曲率,所以该曲面所发出的光线只可能交汇于相互垂直的两线段 $\overline{aa'}$ 、 $\overline{bb'}$ 上如图 1—10,这种不能交汇于同一点,而有一定关系的光线的集合称为像散光束。



(b) 有虚交点的同心光束(会聚光束)



(c) 交点在无限远处的同心光束

图 1—9 同心光束

能变换入射同心光束的折(反)射面的组合叫光学系统。从同一点光源发出的诸多光线,经光学系统作用后的折射、反射光线的交汇点被称为像点,这样的像点是物经光学系统后生成的理想像。像点若是被光学系统改造后的真实光线的交汇点,称为实像点,反之若是被光学系统改造后的真实光线的反向延长线的交汇点,称为虚像点。显然光经光学系统作用后,只有在保持同心性不变的条件下,才能使从同一物点发出的各条光线经光学系统后仍会聚于(或延长线会聚于)同一像点。例如平面镜的反射成像就保证了这种同心性。

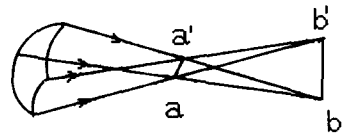


图 1—10 像散光束

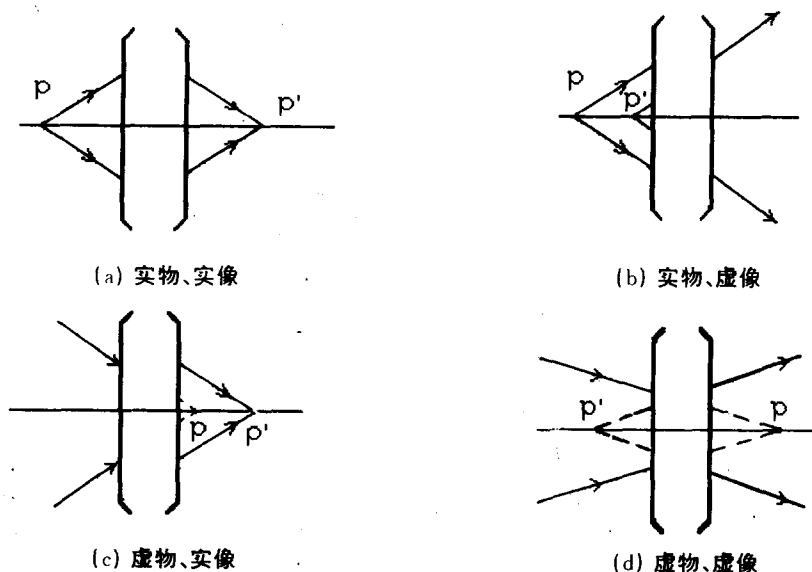


图 1-11 物和像

一个发光实物可以看成是由无穷多的物点组成，每一物点经光学系统后，有一像点与之对应，所有像点的集合就是物体的像。如果光学系统能使任一物点都理想成像，并且物与像在几何上完全相似，这样的光学系统称为理想光学系统。在几何光学中，理想成像时，物像之间有点与点、线与线、及面与面间的一一对应关系，这种关系为物、像间的共轭关系。实际光学系统中，只有平面镜才能作为理想光学系统。

物、像均有虚实之分。对一光学系统而言，将入射发散同心光束的心称为实物点，而入射会聚同心光束的心称为虚物点；将出射会聚同心光束的心称为实像点，而出射发散同心光束的心称虚像点。（图 1-11）

在讨论光学成像问题时，通常还将实物所在的区域称为实物空间，虚物所在的区域称为延拓物空间，实际物空间和延拓物空间统称物空间，简称为物方；实像点所在的空间称实际像空间，虚像所在的空间称延拓像空间；实际像空间和延拓像空间统称像空间，简称像方。

二、光经平面的反射和折射

1. 光在平面上的反射

平面是最简单的光学系统。光照射到平面上发生反射，若服从反射定律，这样的反射平面称为镜面。镜面反射具有如下特点：同心光束经镜反射后仍为同心光束。所以镜面能生成完整的像，实物生虚像，虚物生实像；物像等大，且以镜面为对称面分布。

2. 光在平面上的折射

(1) 同心光束经平面折射后，不能交汇于一点

下面讨论同心光束经平面折射后具有的特点。设光源 s 发出的光，由媒质 1 射向媒质 2，且 $n_1 > n_2$ ；取过 s 且垂直界面的方向为 x 轴，沿界面为 y 轴（如图 1-12）。

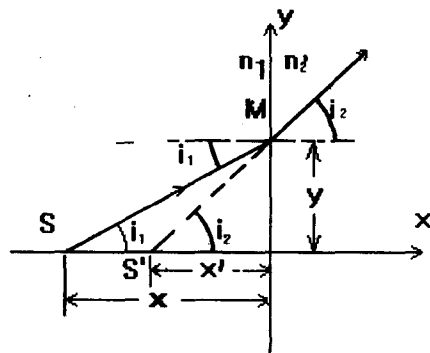


图 1-12 光在平面上折射