

基础光学

李 良 德 编

中山大学出版社

基 础 光 学

李良德 编

中山大学出版社

内 容 简 介

全书共分七章,包括:几何光学,光的干涉,光的衍射,光的偏振,光的色散、吸收和散射,光的量子现象,以及激光等。各章附有思考题和习题,附录中给出了全部习题答案。本书可作为综合大学、工学院、师院、师专物理类专业普通物理光学教材,也可供电大、职大、教师进修院校、中学教师使用。

基 础 光 学

李良德 编

中山大学出版社出版发行

广东省新华书店经销

广州红旗印刷厂印装

850×1168毫米 32开本 16.5印张 39.5万字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

印数 1—5 000册

ISBN 7-306-00028-4/O·1

统一书号:13339·23 定价:2.80元

前 言

本书是编者多年在中山大学物理系及无线电电子学系讲授普通物理光学部分的自编教材，1981年曾由中大铅印发行，与部分兄弟院校共同试用，这次出版，作了进一步的修订补充。

本书共分七章：第一章几何光学，包括了光度学内容；第二、三、四章是波动光学，而薄膜光学、傅里叶光学、全息术等内容则分别结合有关章节作了适量的介绍；第五章是光的色散、吸收和散射；第六章是光的量子现象；第七章是激光。

近三十年来光学理论和实践发展很快，反映波动光学现代面貌的傅里叶光学（包括全息术、空间滤波、信息处理……等）以及作为现代科学技术中的一些最活跃领域，例如，激光、纤维光学、薄膜光学、……等，看来都不能不在基础光学教材中有所反映。本教材在结合当前我国大学实际，考虑到需要与可能、基础光学课程的性质与任务等方面因素，在传统波动光学和傅里叶光学的结合和沟通上作了一些尝试。

各章后编有思考题和习题。附录中除了给出全部习题答案之外，还补充了一些阅读某些章节必需的数学知识。全书采用的基本物理常数，均为国际科技数据委员会(CODATA)发表的《1986年基本物理常数国际推荐值》。

目录标题中有*号内容，主要是1980年6月全国物理教材编审委员会审定的综合大学物理专业光学教学大纲建议的选择内容，或者是《大纲》中未规定的内容，仅供参考。

由于编者水平所限，错误之处在所难免，希广大教师和读者们批评指正。

编 者 1987年5月于广州

026247/08

目 录

绪 论	(1)
第一章 几何光学	(10—149)
§1.1 光线传播的基本规律	(10)
(一) 光线的概念	(10)
(二) 光线传播的实验定律	(11)
(三) 全内反射	(15)
(四) 光程 费马原理	(19)
§1.2 单球面成象系统的近轴理论	(24)
(一) 物和象的概念	(24)
(二) 高斯公式 牛顿公式	(26)
(三) 放大率 拉—亥不变式	(29)
(四) 作图法 基点和基面	(34)
(五) 球面镜	(40)
§1.3 薄透镜	(42)
(一) 物象关系	(42)
(二) 几对特殊共轭点	(44)
(三) 作图法	(44)
(四) 成象规律小结	(46)
§1.4 共轴球面系统组合的近轴理论	(50)
(一) 定主点和焦点的作图法	(50)
(二) 定主点和焦点的计算公式	(51)
(三) 作图法 物象关系式	(53)
§1.5* 近轴理论中的矩阵方法	(57)
(一) 光线状态的描述及其变换规律	(57)

(二) 系统矩阵	(60)
(三) 物象关系式	(64)
(四) 共轴球面系统的主点 焦点和节点	(68)
(五) 高斯公式和牛顿公式	(71)
§1.6 光阑与象差	(75)
(一) 光阑	(75)
(二) 单色象差	(81)
(三) 色差	(88)
§1.7 光学仪器	(92)
(一) 投影仪器 摄影仪器	(92)
(二) 助视仪器	(95)
(三) 棱镜分光仪器	(109)
§1.8 光度学	(113)
(一) 光度学中的基本量	(114)
(二) 通过光学系统的光通量	(122)
(三) 象的亮度	(123)
(四) 象的照度	(124)
(五) 主观亮度	(128)
复习思考题	(130)
习 题	(137)
第二章 光的干涉	(150—230)
§2.1 光波的叠加和干涉 相干光的条件	(150)
(一) 光矢 波函数 光强	(150)
(二) 光波的叠加和干涉	(153)
(三) 相干光的必要条件	(154)
§2.2 分波面双光束干涉 空间相干性	(158)
(一) 双孔(缝)干涉	(158)
(二) 双棱镜 双面镜干涉	(166)
(三) 洛埃镜	(168)

(四) 光源线度的影响 空间相干性	(169)
§2.3 分振幅双光束干涉 时间相干性	(174)
(一) 等倾干涉	(174)
(二) 等厚干涉	(181)
(三) 迈克耳逊干涉仪	(185)
(四) 光源非单色性的影响 时间相干性	(189)
§2.4 分振幅多光束干涉 法布里-珀罗干涉仪	(196)
(一) 法布里-珀罗干涉仪的结构	(197)
(二) 减幅多光束干涉的光强分布	(198)
(三) 标准具性能参数	(202)
§2.5 薄膜光学简介	(207)
(一) 正入射时光强反射率和透射率	(207)
(二) 单层增透膜和增反膜	(210)
(三) 多层介质反射膜	(213)
(四) 干涉滤光片	(215)
复习思考题	(220)
习 题	(224)
第三章 光的衍射	(231—319)
§3.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	(231)
(一) 光的衍射现象及其分类	(231)
(二) 惠更斯-菲涅耳原理	(233)
§3.2 圆孔的非涅耳衍射 波带片	(236)
(一) 圆孔的非涅耳衍射	(236)
(二) 波带片及其应用	(242)
§3.3 单缝夫琅和斐衍射	(246)
(一) 实验装置和现象	(246)
(二) 衍射光的强度分布	(247)
§3.4 圆孔的夫琅和斐衍射 成象仪器的分辨本领	(254)
(一) 圆孔衍射	(254)

(二) 成像仪器的分辨本领	(256)
§3.5 多缝的夫琅和斐衍射 光栅	(262)
(一) 多缝衍射	(262)
(二) 透射光栅	(267)
(三) 闪耀光栅	(273)
§3.6 空间光栅 布喇格条件	(276)
(一) 布喇格条件	(278)
(二) 晶体衍射的实验方法	(282)
§3.7 全息照相	(285)
(一) 概述	(285)
(二) 物点的共轴全息图	(288)
(三) 全息照相的一般性原理	(294)
§3.8* 相干成像理论	(297)
(一) 阿贝相干成像理论	(297)
(二) 夫琅和斐衍射和频谱函数	(298)
(三) 阿贝-波特实验	(301)
§3.9* 相干光图象处理系统	(304)
(一) 4 F 系统	(304)
(二) 图象信息处理举例	(305)
复习思考题	(309)
习 题	(312)
第四章 光的偏振	(320—407)
§4.1 自然光和偏振光	(320)
§4.2 光在各向同性介质界面上反射与折射	(323)
(一) 菲涅耳公式	(323)
(二) 实振幅反射比 实振幅透射比 位相跃变	(328)
(三) 能流反射率和能流透射率	(336)
(四) 布儒斯特角的应用	(342)

§4.3 光在各向异性介质中的传播——晶体光学基础	(347)
(一) 晶体的主介电常数 介电主轴	(348)
(二) 晶体中的平面光波	(349)
(三) 光率体	(351)
§4.4 单轴晶体	(353)
(一) 光率体与光的偏振态	(353)
(二) 折射率	(355)
(三) 点光源的波面	(356)
(四) 双折射 惠更斯作图法	(358)
(五) 偏振棱镜	(362)
(六) 二向色性 人造偏振片 马吕斯定律	(366)
§4.5 双轴晶体	(367)
(一) 主轴面内光的偏振态	(367)
(二) 点光源的波面	(369)
(三) 双折射 惠更斯作图法	(372)
§4.6 椭圆偏振光与圆偏振光 单色偏振光的系统分析	(373)
(一) 椭圆偏振光与圆偏振光	(373)
(二) 单色偏振光的系统分析	(377)
§4.7 线偏振光的干涉	(378)
(一) 平行偏振光的干涉	(378)
(二) 电光效应与偏振光的干涉	(382)
(三) 会聚偏振光的干涉	(386)
§4.8 旋光性	(388)
(一) 旋光现象	(388)
(二) 旋光现象的非涅耳理论	(391)
(三) 磁致旋光性	(394)
复习思考题	(396)
习 题	(401)
第五章 光的色散 吸收和散射	(408—430)

§5.1 光的色散和吸收	(408)
(一) 正常色散	(408)
(二) 反常色散和吸收	(410)
(三) 朗伯定律和比尔定律	(411)
§5.2 色散和吸收的经典理论	(413)
(一) 复折射率	(413)
(二) 色散和吸收的经典理论	(414)
§5.3 光的散射	(418)
(一) 浑浊介质的散射	(419)
(二) 纯净介质的分子散射	(421)
§5.4 光在介质中的速度 相速和群速	(424)
复习思考题	(427)
习 题	(428)
第六章 光的量子现象	(431—466)
§6.1 热辐射及其实验定律	(431)
(一) 辐出度	(432)
(二) 平衡热辐射的特征	(433)
(三) 基尔霍夫定律	(434)
(四) 绝对黑体的辐射定律	(436)
§6.2 经典热辐射理论的局限性 普朗克黑体辐射公式	(438)
(一) 热辐射的经典理论	(438)
(二) 热辐射的量子理论 普朗克黑体辐射公式	(439)
§6.3 光电效应	(444)
(一) 光电效应的实验规律	(445)
(二) 波动理论的困难 光子假设	(447)
(三) 光子的性质	(450)
(四) 光电器件	(450)
§6.4 X光的散射 康普顿效应	(454)

(一) X光散射的实验结果	(455)
(二) 康普顿效应的量子理论	(457)
§6.5 光的波粒两象性	(459)
复习思考题	(462)
习 题	(464)
第七章 激 光	(467—495)
§7.1 光与原子体系的相互作用	(467)
(一) 原子按能级的统计分布	(468)
(二) 光与原子体系相互作用的基本形式	(469)
(三) 能级寿命	(474)
§7.2 激活介质中的光放大	(475)
(一) 光放大的条件——粒子数反转分布	(475)
(二) 实现反转分布的内因和外因	(477)
(三) 激活介质的光增益	(480)
§7.3 谐振腔的作用	(482)
(一) 谐振腔的定向作用	(483)
(二) 光振荡的阈值条件	(484)
(三) 激光的单色性	(486)
§7.4* 激光器的类型	(489)
(一) 气体激光器	(489)
(二) 固体激光器	(491)
(三) 半导体激光器	(492)
(四) 染料激光器	(492)
复习思考题	(493)
习 题	(493)
附录 I 基本物理常数	(496)
附录 II 傅里叶变换(积分)的简单验证	(497)
附录 III 各章习题答案	(500)

绪 论

人类是从“人为什么能看见周围物体”这样的一个问题开始研究光的。对于光线传播的几何性质，光的本性的认识，经历了漫长曲折的道路。学习光学之前，概略地了解一下人们对光的认识史是有益的。

古希腊的哲学家欧几里德（Euclid，公元前330~260年）认为人所以能看见周围物体，是由于从眼睛发出视线，视线的作用犹如触须能触摸物体一样。如果视觉是由视线探索的结果，怎么去解释人看不见黑暗中的物体呢？在我国先秦时代（公元前400~382年）以墨翟为首的墨家代表作《墨经》中载有“人以目见，而目以火见”的说法。是指物体发出光线（火）射进人眼后，才产生视觉。墨翟的观点比欧几里德的观点不但早而且高明得多。东汉（公元25~220年）王充在《潜夫论·赞学》中指出：“中阱深室幽黑无见，及设盛烛则百物彰矣，此则光之耀也，非目之光也，而目假之则明矣。”，更明确地否定了视线观点，肯定了光线的观点。

早在我国周代（约公元前5世纪）已能用铜锡合金制造平面镜、凹面镜和凸面镜，《周礼·秋官》关于用凹面镜聚焦取火的记载比欧几里德在其《反射光学》谈到的要早一百多年，《墨经》中有关几何光学的记载有八条之多，包括了影的定义与形成，光与影的关系，光的直进性，针孔成象，平面镜、凹球面镜和凸球面镜中物和象的关系等等。唐初孔颖达（公元574~648年）所著《礼记注疏·月令》，唐代中叶张志和所著《玄真中》

都明确指出：虹是日光通过悬浮在大气中的水滴反射形成的。七个世纪以后，欧洲人罗吉·培根才提出类似见解。宋代沈括（公元1031~1095年）在《梦溪笔谈》中描述了平面镜、球面镜的成像规律，凹面镜焦点位置与曲率半径的关系，虹和海市蜃楼的成因。1621年荷兰人斯涅尔（Willebrord Snell, 1591~1626）从实验上总结出正确的折射定律（ $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \text{常数}$ ）。1631年左右，才由笛卡尔（Rene Descartes, 1596~1650）将折射定律写成现在通用的形式。费马（Pierre de Fermat, 1601~1665）大约在1657年，把几何光学的基本定律作了更高的概括，提出了光在介质中实际传播的路径是费时（或光程）为极值的路径。可以说，从上古到十七世纪中叶，人类才弄清楚了光线的几何性质，至于光的本性是什么？亮度和颜色是怎么回事还是很无知的。

十七世纪下半叶出现了微粒说和波动说之争，人类才认真开始了对光的本性的研究。

微粒说把光看成一群飞行的微粒，在均匀介质中作匀速直线运动，能自由穿过透明介质，撞到视神经上可以引起视觉。牛顿（Isaac Newton, 1642~1727）主张微粒说。微粒说很自然地解释了光的直线传播和反射定律，在解释折射定律时，则须假定在两介质界面层小范围内，介质对微粒的作用力发生跃变，它改变了微粒过界面时速度的法向分量，但不会改变速度的切向分量，微粒过界面层后以另一种速率作匀速直线运动。

图（0-1）中 v_1 、 v_2 分别表示光微粒在折射率为 n_1 、 n_2 的介质中的速度（光速），用脚标 t 、 n 分别表示速度在界面切向、法向上的分量； i_1 、 i_2 分别表示入射角、折射角。

按微粒通过界面时速度的切向分量不变

$$v_{1t} = v_{2t}$$

得 $v_1 \sin i_1 = v_2 \sin i_2$

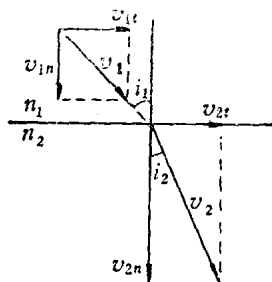


图0-1 微粒说对折射定律的解释 (设 $n_1 < n_2$)

即
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (0-1)$$

(0-1)式是按微粒说导出的折射定律.实验事实是:光由折射率较小的介质(称光疏介质)进入折射率较大的介质(称光密介质)时,靠近法线方向折射。(图0-1)画的就是这种情形 ($n_1 < n_2$, $i_2 < i_1$),按(0-1)式应有 $v_2 > v_1$.换句话说,按微粒说,光由光疏介质进入光密介质时,光速增大。

1678年惠更斯(Christian Huygens, 1629~1695)在《论光》一文中,首次提出了光的机械波动说,波动说以光现象和声现象类似性为主要依据.为了说明波在空间传播的机制,惠更斯提出一种假设(惠更斯原理):波所到达的各点都可以看作次波波源,这些次波的包络就是新的波面.用惠更斯原理能很自然解释光的直线传播和反射定律,但在解释折射定律时,却得出和(0-1)式不同的结果。

图(0-2)中AB是入射平面波波面,DC是折射平面波波面,令 Δt 表波面AB传播到DC所需时间,则

$$\overline{BC} = v_1 \Delta t, \quad \overline{AD} = v_2 \Delta t.$$

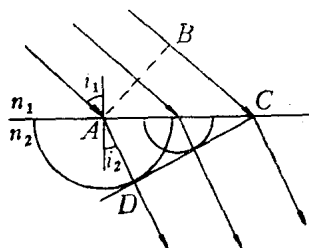


图 0-2 波动学对折射定律的解释 (设 $n_1 < n_2$)

而
$$\sin i_1 = \frac{\overline{BC}}{\overline{AC}} = \frac{v_1 \Delta t}{\overline{AC}}$$

$$\sin i_2 = \frac{\overline{AD}}{\overline{AC}} = \frac{v_2 \Delta t}{\overline{AC}}$$

因此
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (0-2)$$

(0-2) 式是按波动说导出的折射定律, 和 (0-1) 式不同。若 $n_1 < n_2$, $i_2 < i_1$, 按 (0-2) 式应有 $v_2 < v_1$ 。换句话说, 按波动学, 光由光疏介质进入光密介质时, 光速减少。遗憾的是, 在十七、十八世纪虽然从天文观测中粗略地得知真空中光速, 当时还没有测量不同介质中光速差异的科技水平。无法从判断 (0-1)、(0-2) 式那个是正确的来裁决微粒说和波动说之争。再有, 微粒说把光看成是一群飞行的微粒, 为什么两普通光源发出的光相交时, 不改变各自的运动方向呢? 微粒说对此无法解释。此外, 微粒说还有一些其它困难。由于牛顿在天文学、力学方面的成就而享有极高威望, 人们还是比较相信微粒说。虽然作为波动光学的基本现象(干涉衍射和偏振)在十七世纪中后期先后被发现(见第五页注①)微粒说在十七世纪和十八世纪还是占统治地位。

十九世纪开头的约三十几年内，波动说走向复兴：1801年杨氏（T. Young, 1773~1829）实现了光的双缝干涉，并提出了“光的干涉原理”，1808年马吕斯（E. L. Malus, 1775~1812）发现光的横波性。1815年法国工程师菲涅耳（A. J. Fresnel, 1788~1827）在前人工作基础上，用次波干涉原理发展和完善了惠更斯原始形式的光的机械波动说，使波动说理论臻于完成。十九世纪上半叶波动说已取代微粒说占据了主导地位。1850年傅科（J. L. Foucault, 1819~1868）测得光速在水和空气中的比值约为2/3。傅科的工作，与其说是微粒说与波动学之争的判决，倒不如说是微粒说的一个迟到的唁电。

光的机械波动说本身包含着致命的弱点。机械波只能在介质中发生和传播，因此光的机械波动说必须假设一种宇宙中无所不入的介质——以太（Aether）。光是横波，而机械横波只能在固体中产生，按弹性力学理论：

$$\text{横波速度} = \sqrt{\frac{\text{固体的切变模量}}{\text{固体的密度}}}$$

为了解释光何以有每秒30万公里的高速度，就必须假定作为光波的载体——以太的切变弹性很大（比钢铁大千万倍），而密度却要求是微不足道的，否则难以理解何以物体在以太中运动，未受到任何可觉察的阻力；为了解释光在不同介质中有不同的速度，还要认为以太的特性随介质而变；为了说明光波中完全没有纵振动（固体介质中激起横波时，一般同时会激起纵波，而且后者传播速度要大些）又得认为以太具有更奇特的性质…等等。总

①意大利人格利马第（Francesco Maria Grimaldi, 1618~1663）指出了干涉和衍射现象；1669年丹麦人巴塞林（E. Berthelsen, 1625~1698）发现了方解石的双折射现象；1678年惠更斯发现了光的偏振现象。

之，以太有许多难以理解和自相矛盾的人为性质。

1865年麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831~1879) 建立了光的电磁理论，断言光是一种电磁现象，并预言电磁波存在。1888年赫兹 (H. R. Hertz, 1857~1894) 用实验证实了电磁波的存在。光的电磁波理论，最初仍假设需要以太，并认为它本身不流动，状态却能作周期性变化，且以一定的速度传播。1881到1887年迈克尔逊—莫雷 (Michelson-Morley) 用实验否定了以太存在。1905年爱因斯坦 (Einstein, 1879~1955) 在此基础上创立了狭义相对论。按现代观点看来，光 (电磁波) 本身就是一种物质，没有必要去空想一种实际上并不存在的以太。

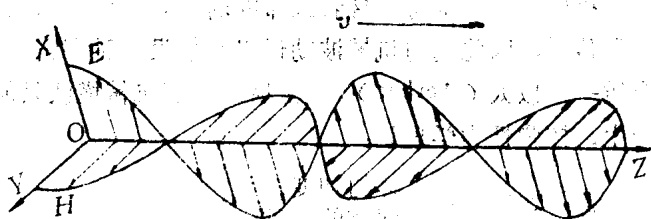


图0-3 电磁波的传播

电磁波是一种横波，见图 (0-3)。其中电场强度矢量 E 和磁场强度矢量 H 和传播速度 v 互相正交， E 和 H 以相同位相在互相正交的平面内振动。电磁波在真空中的传播速度 (即真空中光速) c 为①

$$2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s}$$

即每秒约30万公里。光在折射率为 n 的介质中的传播速度 v 为

①1983年第17届国际计量大会通过米的新定义：“1米是光在真空中在 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔内所行进路径的长度”。这就等于说，真空中光速 c 实质上是基本单位，而米是导出单位。