

光 学

李国华 主编

山东教育出版社

1990年·济南

责任编辑：韩义华

封面设计：刘永和

光 学

李国华 主编

*

山东教育出版社出版

(济南经九路胜利大街)

山东省新华书店发行 山东新华印刷厂潍坊厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 17.5 印张 1 插页 385 千字

1991 年 6 月第 1 版 1991 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—2,270

ISBN 7—5328—1097—6/G·928

定价 5.90 元

2012/4/27

编 者 的 话

本书是根据我们多年来教学和科研的实践，并参考国内外有关资料编写的。目的在于为高等师范院校物理专业提供一本得心应手的基础光学教材或参考书。

从高等师范院校的特点出发，本书注重阐述了有关光学的基本实验现象、基本概念、基本原理和规律。全书分为几何光学、波动光学和光的量子性三大部分，并涉及到现代光学的有关内容。对大学基础光学来说，波动光学是主体，为深入理解波动光学的本质，本书在波动光学前较系统地阐述了波动光学的电磁理论。

近年来，由于激光技术的迅速发展，偏光技术已发展成为应用光学的一个重要分支，偏光器件已由几种发展到几十种，尤其引人注目的是种类繁多的专用激光偏光器件。根据现代科技的发展，本书选择现代偏光技术中应用最广泛的格兰·泰勒棱镜为代表，阐明了双折射棱镜偏光镜的基本原理和特点；对当代棱镜偏光镜作了较全面的介绍，其中不少是作者的工作。鉴于尼科耳棱镜在学科发展史上的作用，也简要作了介绍。遵循理论联系实际的原则，加强了与现代实验技术密切相关的内容。

考虑到各类学校教学特点，在某些章节中加了星号（※），以提供处理教材时参考。此外，为帮助读者更好地掌握教材，还选取了部分有启发性的思考题，习题和例题。书末附有习题

答案。

参加本书编写的有：刘坤英、范汝盐、赵心岭、吕源潮、汪志鹏和杨良工等，李国华教授主持了本书的编写，并负责全书的修改和定稿。

曲阜师范大学激光研究所为本书提供了各系列棱镜偏光镜的彩色照片；赵明山同志提供了有关晶体光轴测定方面的资料；孙兰芬同志为本书第四章提供了部分例题和习题，编者一并谨表谢意！

由于编者的水平所限，错误和缺点在所难免，热情欢迎各位专家和广大读者批评指正。

编 者

1990年4月

目 录

绪论

第一章 几何光学的基本原理及近轴光学

§ 1—1 几何光学的基本定律	9
§ 1—2 费马原理	12
§ 1—3 同心光束 物与像	16
§ 1—4 光在平面上的反射和折射	20
§ 1—5 光在单球面上的折射和反射	36
§ 1—6 傍轴物点经单球面的成像	45
§ 1—7 薄透镜	51
§ 1—8 共轴球面系统及组合	63
§ 1—9 厚透镜及透镜组	76
附录 物像两点间等光程性的证明	85
本章小结	87
思考题	93
习题	95

第二章 几何光学仪器原理

§ 2—1 眼睛	101
§ 2—2 助视与投影光学仪器原理	106
§ 2—3 光阑	114
§ 2—4 光度学的基本概念	119
§ 2—5 光学仪器的聚光本领	127
§ 2—6 像差简介	132

本章小结	138
思考题	142
习题	142

第三章 波动光学的电磁理论基础

§ 3—1 光波电磁性质概要	144
§ 3—2 光波的数学描述	150
§ 3—3 光在两种介质界面上的反射和折射 菲涅耳公式	159
§ 3—4 光波的偏振态 布儒斯特定律与全内反射	165
§ *3—5 光能流、光强的反射比和透射比	170
§ *3—6 反射光在反射点产生的位相跃变	178
§ *3—7 光反射时的半波损失问题	185
附录 菲涅耳公式的推导	190
本章小结	194
思考题	197
习题	198

第四章 光的干涉

§ 4—1 光源 光波的叠加原理	200
§ 4—2 相干叠加与非相干叠加、相干条件	204
§ 4—3 点、缝光源的干涉 杨氏实验	212
§ 4—4 点、缝光源的其它干涉实验装置	222
§ 4—5 光源宽度对干涉条纹可见度的影响	227
§ *4—6 光的空间相干性	232
§ 4—7 介质膜干涉 (一)	235
§ 4—8 介质膜干涉 (二)	244
§ 4—9 迈克尔逊干涉仪	256
§ 4—10 光源的非单色性对干涉条纹可见度的影响 时间 相干性	262
§ 4—11 法布里-珀罗干涉仪	270

附录 光在介质膜干涉中的附加光程差	275
本章小结	280
思考题	284
习题	288

第五章 光的衍射

§ 5—1 光的衍射现象	293
§ 5—2 惠更斯—菲涅耳原理	295
§ 5—3 菲涅耳半波带法和振幅矢量图解法	299
§ 5—4 菲涅耳圆孔、圆盘衍射 波带片	304
§ 5—5 夫琅和费单缝衍射	313
§ 5—6 夫琅和费圆孔衍射	322
§ 5—7 助视光学仪器的分辨本领	324
§ 5—8 衍射光栅	329
§ 5—9 光栅光谱仪及其色散本领和色分辨本领	339
§ 5—10 夫琅和费双缝衍射	351
§ 5—11 X射线衍射	354
§ *5—12 傅里叶光学简介	356
§ *5—13 全息照相	367
本章小结	374
思考题	377
习题	378

第六章 光的偏振

§ 6—1 光波的横波性与五种偏振态	381
§ 6—2 偏振片 起偏和检偏 马吕斯定律	385
§ 6—3 由反射和折射获得偏振光	388
§ 6—4 光在各向异性晶体中的双折射现象	393
§ 6—5 惠更斯对双折射现象的解释	397
§ 6—6 偏光棱镜	404

§ 6—7 椭圆偏振光和圆偏振光	411
§ 6—8 延迟片 偏振光的检验	415
§ 6—9 偏振光的干涉及应用	421
§ 6—10 旋光现象	428
§ *6—11 法拉第效应	431
§ *6—12 琼斯矢量和琼斯矩阵	439
本章小结	445
思考题	446
习题	448

第七章 光的吸收、散射和色散

§ 7—1 光的吸收	452
§ 7—2 光的散射	459
§ 7—3 光的色散	463
§ 7—4 光的相速度和群速度	473
本章小结	479
思考题	480
习题	480

第八章 光的量子性

§ 8—1 热辐射 基尔霍夫辐射定律	482
§ 8—2 黑体及黑体辐射实验定律	485
§ 8—3 普朗克公式 能量子	488
§ *8—4 光测高温法	493
§ 8—5 光电效应	494
§ 8—6 爱因斯坦方程 光子	499
§ 8—7 康普顿效应	504
§ *8—8 波粒二象性	510
§ *8—9 激光原理概述	513
§ *8—10 激光器的基本结构和工作原理	518

§ *8—11 其它激光器 激光应用简介	533
本章小结	539
思考题	541
习题	542
附录1 习题答案.....	543
附录2 基本物理常数表.....	549

绪 论

一、光 是 什 么

光学和几何学、天文学、力学等一样，是一门历史悠久的学科，同时，又是当前科学领域中最活跃的前沿阵地之一。

光是什么？回答这个问题，并不是一件容易的事。人类对光的性质及光的本性的探讨，始于我国春秋战国时期的墨翟（约前468—前376），至今已有2000多年的历史。然而，直至17世纪上半叶，人类所获得的光学知识，仍仅限于对一些现象和简单规律的描述，如光是从物体发出的；当光在空间传播射入眼睛时，就引起视觉；以及光在均匀介质中的直线传播特性、光的反射和折射定律等。至于光的本性是什么？光的强度和颜色是怎么回事？还无从回答。

对于光的本性的认真探讨，应该说是从17世纪下半叶开始的。当时存在两种对立的学说：一种是以牛顿(I. Newton, 1642—1727)为代表的微粒说，认为光是按照惯性定律沿直线飞行的微粒流。这个学说直接说明了光的直线传播特性，并能对光的反射和折射作出一定的解释。但是，在用微粒说研究光的折射定律时，却得出了光在水中的速度比空气中大的错误结论。太阳的白光是由许多色光组成的，这是牛顿发现的。为了解释这一现象，他不得不假定存在与各种不同色光相对应的多种光微粒。另一种是由与牛顿同时代的惠更斯(C. Huygens, 1629—1695)于1678年提出的波动说，认为光是在一种特殊弹

性介质（以太）中传播的机械波。这个学说成功地解释了光的反射和折射定律，并认为不同的色光有各自的波长，而白光则由许多不同波长的光所组成。然而，惠更斯认为光波是纵波。他的理论是很不完善的，特别是为了与事实相符，必须赋予以太种种异乎寻常的特性。例如，光既然能在真空中和透明介质中传播，以太就必须存在于真空和介质中。为此就必须假定以太是一种充斥整个宇宙的透明介质；又光速如此之大，以太还必须具有巨大的弹性等等。

上述两种完全不同的观点——光的微粒说和光的机械波动说，孰是孰非，无疑应由实验事实作出评定。然而，当时因受实验条件的限制及牛顿威望的影响，使光的微粒说统治了近两个世纪。

直至19世纪上半叶，经杨氏（T. Young, 1773—1829）和菲涅耳（A. J. Fresnel, 1788—1827）等人的工作，光的波动说才重新恢复了活力。杨氏和菲涅耳根据光的波动理论，分别正确地解释了光的干涉、衍射现象，初步测定了光的波长，在研究光的折射时，得出的结论是光在水中的速度应小于在空气中的速度，这一点在1862年为傅科（J. L. Foucault, 1819—1868）的实验所证实。菲涅耳和阿喇果（D. Arago, 1786—1853）通过实验还证实了光的横波性。至此，所发现的光学现象都有利于波动说，在这些事实面前，牛顿微粒说的支持者已寥寥无几。

在用波动理论解释光学现象取得巨大成功之际，以太假设的存在仍然是必要的。当时，人们还无法理解没有介质的波动过程，这就使得惠更斯—菲涅耳的旧波动理论和牛顿的微粒理论一样，仍然带有机械论的色彩。重大的突破发生在19世纪60

年代。1865年，麦克斯韦（J. C. Maxwell, 1831—1879）在前人的基础上，建立起著名的电磁场理论。该理论预言了电磁波的存在，证明了电磁波的横波性，并发现电磁波的速度等于光速！这一绝非巧合的事实暗示着光现象与电磁现象之间存在着密切的联系。麦克斯韦由此确信光是一种电磁现象，光波即波长较短的电磁波。1888年，赫兹（H. R. Hertz, 1857—1894）通过实验发现了波长较长的电磁波——无线电波，并发现了它也有反射、折射、干涉、衍射等与光波类似的性质。后来的科学实验又证实，红外线、紫外线和X射线也都是电磁波，它们的区别只是波长不同而已。光的电磁本性以大量无可辩驳的事实赢得了普遍的承认，于是光的电磁理论就应运而生了。但是，光的电磁理论的产生并未动摇以太存在的信念，人们仍然认为光波（电磁波）是电磁场在以太中的传播过程，即仍然认为以太是光波（电磁波）的载体。

以上是经典物理学中光的微粒说与波动说之争的简单回顾，其中讨论的范围仅限于光的传播问题，很少涉及光的发射和吸收及光和物质的相互作用问题。

19世纪末，20世纪初是物理学发生伟大变革的时代。从牛顿力学、热力学和统计力学到麦克斯韦的电磁理论，经典物理学已形成一套严整的理论体系。当时绝大多数物理学家深信，物理学中的各种基本问题在原则上都已得到完善解决，经典理论体系囊括了一切物理现象的基本规律，剩下的似乎只是解微分方程和具体应用的问题了。然而，“正当人们欢庆这座宏伟的经典物理学大厦落成的时候”，一个个惊人的发现使经典物理学理论重新陷入困境。1887年，迈克尔逊（A. A. Michelson, 1852—1931）和莫雷（E. W. Morley, 1838—1923）利

用光的干涉效应，试图探测地球“以太风”的存在，但得到否定的结果。以“静止以太”为背景的绝对时空观遇到了根本性的困难。随后，瑞利（L. Rayleigh, 1842—1919）和金斯（J. H. Jeans, 1877—1946）根据统计力学和电磁波理论，导出了黑体辐射公式，该公式要求辐射能随频率的增大而趋于无穷（即黑体辐射的所谓“紫外灾”）。1900年4月27日，当时的物理学权威开尔文（威廉·汤姆逊）（L. Kelvin, 1824—1907）在为送别旧世纪而作的题为《十九世纪热和光的动力学理论上空的乌云》的长篇讲话中，把这两个问题比喻作笼罩在物理学晴朗天空中的两朵乌云。以后的物理学发展证实，正是这两朵乌云孕育着近代物理学两个革命性的重大理论——相对论和量子论的诞生。有趣的是，这两个问题都与光学有关。

1900年，为了解决黑体辐射理论的矛盾，普朗克（M. Planck, 1858—1947）提出了量子假说，认为各种频率的电磁波（包括光波），只能象微粒似的以一定最小份额的能量发生（普朗克称为能量子，正比于频率），这是一个光的发射问题。另一个显示光的微粒性的重要发现是光电效应，即光照射在金属表面上可使电子逸出，逸出电子的能量与光强无关，但与光的频率有关，这是一个光的吸收问题。1905年，爱因斯坦（A. Einstein, 1879—1955）发展了光的量子假说，并成功地解释了光电效应现象。光究竟是微粒还是波动？这个古老的问题又重新摆在了人们面前。

光子理论与牛顿所提出的光的微粒说是绝然不同的。不同点在于：牛顿所提出的光粒子的运动，严格遵守经典力学的规律，即遵守机械运动规律；而光子理论则认为，光子运动不遵守经典力学规律，光子的运动应遵守电磁运动规律，光子和电

磁波一样，在真空中具有相同的恒定的传播速度，光子的静止质量为零。后来的科学实验进一步证明，光子是十分复杂的客体。关于光的本性问题，只能用它表现的性质和规律来回答：光的某些行为象“波动”，另一些行为象“粒子”，任何经典概念都不能完全概括光的本性，这就是所谓的“光的波粒二象性”学说。

德布罗意(L. de Broglie, 1892—)的工作,使光的波粒二象性得到进一步阐述,并把波粒二象性的结论推广到一切实物粒子。1924年11月,德布罗意在法国索邦提交了一篇论文,该论文把一种称之为物质波的波与每一种粒子的运动联系起来。德布罗意所提出的波粒二象性,后来被电子衍射实验所证实,这就说明波动和粒子的二象性确实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质的特殊情况。

量子力学中,粒子的波动性用波函数和波动方程表示,波函数具有统计性质,从而把物质波解释为几率波,由此建立波动性和粒子性的联系和统一。但光波与实物波不同,光波是电磁波,是一种特殊的物质形态——场,电磁波是电磁场本身周期性的变化,在空间(包括真空)以波动形式传播;实物波的波动是指其在空间分布几率变化的波动。因此,量子力学中的薛定谔(E. schrödinger, 1887—1961)方程或狄拉克(P. Dirac, 1909—)方程能够描述电子的波粒二象性,却不能描述光子的高速运动。

量子电动力学中,为了描述光的波粒二象性,通常将电磁场量子化,将麦克斯韦方程变换为量子形式,并用波函数来描述电磁场的量子状态,此处的波函数仍具有几率波的意义,由此建立起几率波与电磁波的联系。量子电动力学还进一步解

决了光子与电子、正电子偶的相互转化问题，从理论上说明了场与实物的相互转化和统一性。因此量子电动力学更深刻地揭示了微观世界波粒二象性的意义，而关于光本性的波粒二象性理论也较为完善了。

至此，关于光是什么的回答，可以用下面几句话来概括：

光是一种物质形态，具有波粒二象性；波动性和粒子性是同一客观物质——光在不同场合下反映出来的两种属性；光既是具有粒子性的电磁波，又是具有波动性的光子流。

二、光学的理论体系及其各个分支与应用

光学是研究光的传播及其与物质相互作用问题的学科。光学既是物理学中一门重要的基础学科。又是一门应用性很强的学科。从理论体系上讲，光学就是以人类探讨光的本性为基本线索而建立起来的一个物理学分支。

若不涉及光的发射和吸收等与物质相互作用过程的微观机制，经典光学在传统上可分为两大部分：当光的波长可视为极短，从而波动效应不明显时，人们把光的能量看成是沿着一条条光线传播的，遵循直进、反射、折射等定律，这便是几何光学。几何光学研究方法的特点是撇开光的本性，以光的直进、反射、折射等实验定律为基础，研究光在透明介质中的传播规律及光学系统成像的规律。经典光学的另一部分主要是波动光学，它是研究光的波动性（干涉、衍射、偏振）的物理光学，研究方法以光本质上是波长较短的电磁波为基础。光和物质的相互作用问题，通常是在分子、原子的尺度里研究，有时用经典理论，有时则用量子理论。对于这类原不属于传统经典光学的内容，通常冠以量子光学的名称，习惯上仍归属于物理光学之

内，因为它是以光为光子流为基本观点，侧重研究光的粒子性的物理光学。

现代光学是近30年来兴起并得到蓬勃发展的。1948年全息术的提出（激光出现后又为全息技术的研究开拓了新前景），1955年作为像质评价的光学传递函数概念的建立；1960年新型光源——激光器的诞生，是现代光学发展有重要意义的三件大事。人们把数学、信息论与光的衍射结合起来，发展起一门新的学科——傅立叶光学，并将其运用到信息处理、像质评价、光学计算机等技术中。激光器的诞生，可以说是光学发展史上的里程碑。激光具有亮度高、单色性好、相干性好、方向性强等一系列独特性能，自从问世以来，它与许多科技领域紧密结合、相互渗透，派生出不少崭新的分支学科，如全息照相术、非线性光学、激光光谱学等，从而使现代光学迅速发展，成为现代物理学的前沿阵地之一。

光学技术的应用无处不在，人类最早就是用光来传递远距离信息。当今常见的放大镜、显微镜、望远镜等助视仪器可以扩大视角范围，能够帮助人类探索宏观世界和微观世界的奥秘。照相机、投影仪、复印机等给我们的生活和生产提供了方便。利用光的干涉原理所制造的各种物理光学仪器，可用于检查光学玻璃表面质量、检验轴承钢珠质量、测量微小厚度的改变、测定气体密度等，其特点是精密度高。衍射光栅是重要的分光器件，用于制作的各类光栅单色仪、分光光度计、光谱仪等，既可用于认识原子、分子等微观粒子的结构，又能用于研究遥远星体的运动规律，也可在采矿、冶金、化工等行业中测定物质成分和含量。X光衍射可研究晶体结构，可进行医学、工业制品、文物等检验。偏光技术近年来更有长足的发展，旋

光仪是偏光技术最早的应用之一，它广泛应用于制糖和医药工业中。随着激光技术的发展，激光调制无处不用偏光技术，它已渗透到与光学应用技术有关的各个学科领域，是现代光学技术的重要分支。光电转换、光声转换、光热转换器件在自动控制中应用十分广泛，它在自动监测、遥控、遥测等方面发挥着特殊的作用。此外，光纤通讯是当前世界科技发展的热点之一，已进入工程阶段，这是通讯工程的巨大改革。激光的问世为光学应用技术开辟了更美好的应用前景，激光应用技术已发展为一个重要的学科领域，它在工业、农业、生物工程、激光医学、国防、现代科技、光信息处理、光通讯、光测量、光计算机、核聚变等所有与光学应用技术有关的领域已显示其巨大的潜在力，我国自行设计研制的“神光12”，其功率达 10^{12} 瓦，使我国强激光技术已跻身世界先进行列。对生活在光的世界的人类而言，了解光的本性，认识光的规律，让光更好的为我们的经济建设和美好的生活服务，将是一项重要的任务。

综上所述，光学理论体系及其各个分支，可用下列“框架”概括：

