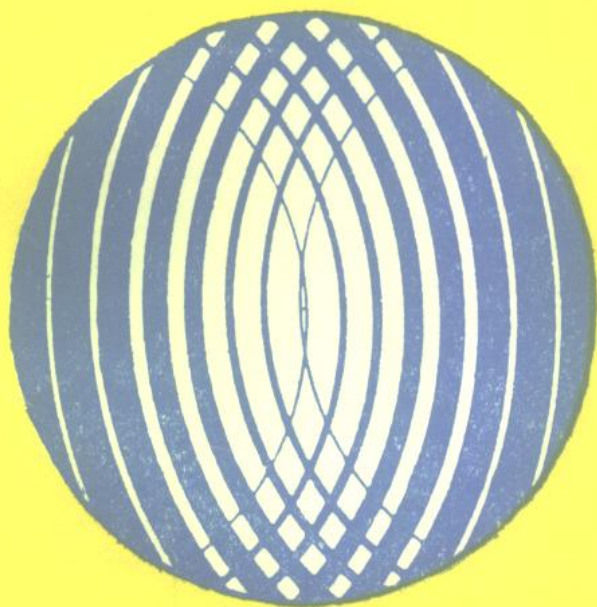


OPTICS

光 学

(上 册)

蔡履中 王成彦 编著



山东大学出版社

043
C02
1

362062

光 学

蔡履中 王成彦



山东大学出版社

鲁登字09号

光 学

蔡履中 王成彦

*

山东大学出版社出版

山东省新华书店发行

山师附中印刷厂印刷

*

850×1168毫米 大32 20.625印张 550千字

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数 1—2000册

ISBN7—5607—0695—9/N·18

定价：(上下册)6.40元

2207/3/10-05
内 容 简 介

本书是作者以多年来在山东大学光学系和物理系讲授光学课程的讲稿及讲义为基础充实整理而写成的。全书内容包括几何光学、波动光学通论、光的干涉、光的衍射、光在晶体中传播、光的吸收、色散和散射、光的量子性与激光等七章。在选材上以基础光学的传统内容为主，以波动光学为主，同时对现代光学的发展亦有充分的反映。在内容编排及讲法上注意从光学知识的内在规律性和系统性出发，突出和加强基本的物理概念、物理思想和物理图象的阐述，并注意各部分内容的内在联系及自洽。全书内容丰富、思路清晰、解说翔实、析理透彻，并注意将基本内容与选讲内容分开，以适应不同层次的需要。

本书可作为综合性大学或其他高等院校物理类系科的光学教材，对其他学习光学者及有关科技人员亦是一本有价值的参考书。

前 言

本书是作者以多年来在山东大学光学系和物理系讲授光学课程的讲稿及讲义为基础，参照国内外有关资料及文献，并结合作者个人教学研究心得而写成的。

本书旨在从普通物理光学课本身的特点及规律出发、比较系统地、翔实地、透彻地讲清基本的物理概念、物理思想及物理图象，同时与近代光学沟通起来。在编写过程中注意了以下几点：

首先，在选材上以普通物理光学的传统内容为主、以波动光学为主，同时兼顾现代光学的发展及某些提高性课题。后者大部分用小字排出，内容包括几何光学中的矩阵方法，波动光学中的傅里叶分析，隐失波，部分相干性理论，薄膜干涉定域及光源容许宽度的进一步讨论，薄膜光学简介，相干光成像系统的频谱分析，全息照相的原理与特点，偏振态及其变换的矩阵描述，非线性光学简介等。

其次，在内容编排上注意了知识本身的内在规律性、系统性及相互联系。以波动光学为例可以看到以下特点：设置“通论”一章较系统地讨论波的迭加及有关概念，并以迭加原理（包括其更精细的形式惠更斯—菲涅耳原理）为主线贯穿整个波动光学；从不同环节反复阐明对波的时空限制会造成波在时间频率域和空间频率域的展宽；对相位规定、坐标系选取、相应公式及偏振态判断建立起一套前后一致且自洽的系统，并阐明了它们的关系；从不同角度论证了几何光学是波动光学的极限情况。在每一章节也尽量启发学习者注意各部分知识的内在联系与区别。为此书中运用了一系列表格，例如几种典型干涉条纹的形成及异同，棱镜、光栅、法—珀干涉仪三种分光装置的比较，以及全息照相与

普通照相的区别等。

第三，也是最重要的一点，是在讲法上注意突出和加强基本的物理思想和物理图象。例如几何光学中对费马原理的讨论，波动光学中对迭加原理以及物理学以可观测量为基础这一思想的阐述。从后者出发可以阐明光的干涉中波的即时迭加——暂态干涉——稳定干涉这三个层次，并容易理解偏振光模型的实质及其多样性等和效性。在衍射一章，则有意识地培养学习者从直观的物理图象及矢量图解法分析与解决问题的能力。

当然，强调物理图象并不等于忽视数学分析，本书在后一方面内容亦很充实。例如，对各种干涉、衍射图样的形成及特征有相当详尽的讨论，对数量众多的提高性课题也以小字给出了数学推证。

总之，我们力图使本书既有较高层次的深度和广度，又便于讲解和学习者应用。其基本内容部分力求讲清讲透，“泛读”部分则可拓展思路及开阔视野。因此授课时间也可根据各校的不同情况有较大的伸缩余地，可从72课时（大字内容亦可适当删减）直到120课时（全讲）。

最后说明，在可能的情况下，本书所用名词和术语皆以全国自然科学名词审查委员会于1988年公布的《物理学名词》为准，故某些译名与传统教本略有差异，如夫琅和费已改为夫琅禾费、洛埃改成劳埃德等。对尚未见统一规定的名词，如辐射度量学中的某些物理量，则参考中外名称尽量采用较为准确及应用较广的提法。有时也同时给出几种提法，将非标准或并行名词在括号中注明，以便参阅其他文献，如衬比度（又称反衬度、对比度或可见度）等。

本书绪论、第二、三、四章由蔡履中撰稿；第一、五、六、七章由王成彦撰稿，其中§5.3.4、§5.5、§7.3、§7.4.4节由蔡履中撰写；后由蔡履中承担全书的改写、补充及统稿。

山东大学出版基金委员会对本书提供了一等出版基金，山东大学马伯福教授及山东师范大学林典要教授对本书的编写一直给予关心和支持，作者表示衷心的感谢。

限于作者水平，加之整理时间仓促，书中必有疏漏之处，望使用者不吝指教。

蔡履中 王成彦

1991年9月

绪 论

光学是一门古老而又年轻的学科。其悠久的历史几乎和人类文明史本身一样久远，近半个世纪以来，它又以令人炫目的发展速度、奇迹般层出不穷的研究成果、以及所蕴含的巨大潜力和希望，使自己跻身于现代科学技术的前沿。在全面展开对光学基本知识的讨论之前，了解一下光学的概貌及发展过程将有所裨益，尽管这种介绍只能是相当粗糙而简略的。

一、光学的研究范畴

光学是研究光现象的学科，它包括光的本性、光的传播以及光与物质相互作用的规律及其应用。

从波动观点看来，光是一种电磁波。电磁波可以按其频率或波长排列成**波谱**，如图0.1上部所示，它覆盖了从 γ 射线到长波无线电波的一个广大范围。人眼可以感受的可见光只占其中很窄一个谱带，通常取为波长（真空中） $\lambda = 3900 \sim 7600 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)，或等价地表示为频率 $\nu = 3.9 \sim 7.7 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ①。在可见光范围内，随着波长从小到大，所引起的视觉颜色也逐渐从紫色过渡到红色，如图0.1下部所示。一般所谓光学波段，除可见光外，还包括波长小于紫光波长的**紫外线**和波长大于红光波长的**红外线**，其波长范围大致从 1 nm ($= 10^{-9} \text{ m}$) 到 1 mm 。

①实际上，人眼可感觉谱带稍大于此范围，但在此谱带两侧敏感度已很低，故可忽略；由于所取视见函数的阈值不同，不同文献给出的可见光范围可稍有区别。

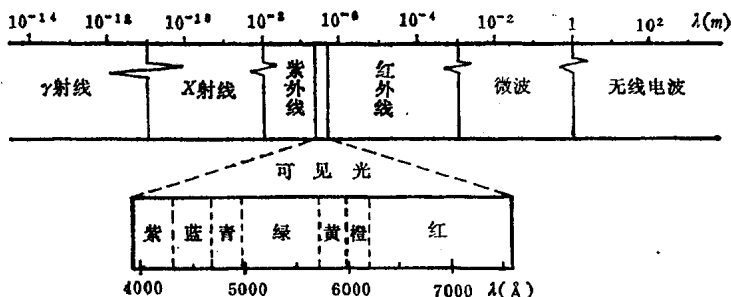


图0.1 电磁波谱与可见光范围

在基础光学中，常根据研究问题的不同出发点把光学分为**几何光学**和**物理光学**，后者又可分为**波动光学**和**量子光学**。几何光学中以光线概念为基础研究光的传播，其基本实验规律为光的直进及反射、折射定律，而这些规律均可看作是一个更为普遍的原理——费马原理的必然结果。波动光学中把光看作是在空间中连续分布的波动，其主要内容包括光的干涉、光的衍射、光的偏振，以及以波动理论对光与物质相互作用的描述。量子光学则把光视为一个个分立的粒子，它主要用于分析辐射、光发射，以及某些在物质的微观结构起重要作用时光与物质的相互作用现象。

实际上，以上区分只是在不同条件下反映了光的本性和性质的不同侧面。光同时具有波动性和粒子性。可以证明，几何光学可以看作是波动光学当其衍射效应可以忽略时的极限情况；而在波动光学适用的范围内量子光学亦会给出同样的测量结果。因为在大量实际问题中光的粒子性并不起显著作用，所以本书的侧重点为波动光学。

二、光学发展的历史回顾

几何光学的制造工艺可以追溯到三千年前甚至更早的时期，

当时在埃及及中国等地即已会用铜合金制造镜子。在公元前四世纪前后，光学的发展在中国与希腊几乎同时达到了一个高峰。在中国，墨翟（前468—前376）及其弟子所著《墨经》“经下”篇中就有八条关于几何光学的记载。前五条讨论影的形成，用针孔成像说明光的直线传播；后三条分别讨论平面镜、凹面镜及凸面镜的成像，并具体分析了物、像的正倒及大小关系。它们首尾相应，自成体系，可以说是世界上较为系统的关于光学知识的最早记录。约一百多年后，古希腊数学家欧几里得（Euclid，约前330—约前275）在其著作中宣布了光的反射定律。在其后一段漫长的封建时代，东西方科学发展均受到很大压抑。这期间值得提出的著作有阿拉伯杰出的科学家伊本·海赛木（Ibn al-Haitham，约965—约1039）的《光学书》（又译作《光学全书》或《光学宝鉴》）及中国沈括（1031—1095）的《梦溪笔谈》。前者在欧几里得认识到反射角等于入射角的基础上进一步指出了反射线与入射线在同一平面内，研究了球面镜和抛物面镜的性质，并对人眼的构造及视觉作用作了详尽的叙述；后者对光的直线传播及球面镜成像作了比较深入的研究，并认识到“月本无光犹银丸、日耀之乃光耳”，“日月相值，乃相凌掩”，从而科学地说明了月相的变化规律及月蚀的成因。

到17世纪，在经历了文艺复兴的大潮之后，欧洲的科学又进入一个蓬勃发展的时期。1621年斯涅耳（W. Snell，1591—1626）从实验上发现了折射定律，而笛卡儿（R. Descartes，1596—1650）第一个把它表示为现代的正弦形式。1657年费马（P. de Fermat，1601—1665）提出了最小时间原理^①，并说明由此可推出光的反射和光的折射定律。至此几何光学的基础已基本奠定。

^①费马的最小时间原理是不严格的，在§1.1.2中将给出费马原理更普遍的表述并讨论其各种可能性。

如果不考虑古希腊时代一些哲学家把光看作微粒的朴素猜想，人们对物理光学真正的实验研究亦始于17世纪。格里马耳迪(F·M·Grimaldi, 1618—1663)首次详细地描述了光的衍射现象。胡克(R·Hooke, 1635—1703)和玻意耳(R·Boyle, 1627—1691)各自独立地发现了现称为牛顿环的在白光下薄膜的彩色干涉图样。胡克还明确主张光由振动组成，每一振动产生一个球面并以高速向外传播，这可以认为是波动说的发端。1690年惠更斯(C·Huygens, 1629—1695)在其著作《论光》中大力阐发了光的波动说，并提出了后来以他的名字命名的著名原理。

1704年，身为英国皇家学会会长的牛顿(I·Newton, 1642—1727)出版了自己一生中最重要的一部著作之一《光学》。牛顿对光学的贡献无疑是巨大的，他研究了棱镜的分光作用，指出白光系由各色光复合而成，并分析了牛顿环的生成及色序问题。在光的本性方面，总的看来牛顿是持微粒说的，这在该书中有多处反映，他并由此作出了光速在介质中比真空中要快的错误论断。牛顿的巨大声望使得微粒说在整个十八世纪占据统治地位。但是，现在重新考察牛顿的思想，可以发现它在很多方面是与波动说相通的。例如，他在解释干涉时所用“突发(fit)间隔”的概念可以看作与光的周期性即波长概念相联系；为说明衍射，他揣测光可能“象鳗鱼那样”弯曲运动；在解释双折射时，他提出“光线的侧面”的概念，这可以认为是对光的偏振性质直觉和天才的猜想。

19世纪上半叶是波动说重新崛起并通过斗争走向胜利的时期。1801—1803年，杨(T·Young, 1773—1829)连续发表数篇论文，用干涉原理成功地解释了双缝干涉实验及薄膜的彩色条纹，但被有些人说成是“毫无价值”。十几年后，菲涅耳(A·J·resnel, 1788—1827)在并不了解杨氏工作的情况下，吸收了惠更斯的子波思想，并补充以干涉原理，提出了惠更斯—菲涅

耳原理，成功地解释了衍射现象。1818年他以自己关于衍射的论文参加了法国科学院举行的征文竞赛，由此引出了“泊松（S·D·Poisson, 1781—1840）亮点”的轶事（参见§4.2.2），它为波动说的正确性提供了一个有力证据。1850年傅科（J·Foucault, 1819—1868）用旋转镜法测定光速，确定光在水中的速度比空气中要小（这是波动说所预言的结果），宣告波动说对微粒说取得了决定性的胜利。待到麦克斯韦（J·C·Maxwell, 1831—1879）以对称和谐的方程组形式集电磁波理论之大成后，波动说看来已达到尽善尽美的境界。

但是，在上世纪末和本世纪初，当人们的研究深入到光与物质的相互作用这一领域时，却困惑地发现许多问题是无法用波动说加以解释的。其中最著名的难点是黑体辐射能谱与经典理论的矛盾，当时极有声望的物理学家开尔文（W·Thomson, Lord Kelvin, 1824—1907）在世纪之交的一次著名演讲中曾把它称为笼罩在物理学上空的两朵乌云之一^①。为解释这一问题，普朗克（M·Planck, 1858—1947）于1900年提出了能量子假说。1905年爱因斯坦（A·Einstein, 1879—1955）将它发展为光子学说，并用它成功地解释了光电效应。这样，光的粒子说似乎又复活了，但这种粒子已经完全不同不同于牛顿时期的粒子概念。1924年德布罗意（L·de Broglie, 1892— ）提出物质波概念，认为每一粒子的运动都与一定波长的波动相联系，此假说很快就被电子通过金属箔的衍射实验所证实。在20年代中期，薛定谔、海森伯、狄拉克和玻恩（M·Born, 1882—1970）等人建立了量子力学，其中波动性与粒子性在新的形式下得到了统一。

光学史是一部内容丰富、精彩纷呈的历史。限于篇幅，以上

^①另一朵乌云系指迈克尔孙测定以太漂移的否定结果。它促成了现代物理学另一基石——相对论的诞生。

叙述是挂一漏万的。通过这极为简略的回顾，我们也可看出：人类认识的发展是无限的，而认识的发展过程是遵从辩证规律的。从原始的朴素的粒子说到波动说，再到新的光子说和波粒二象性，似乎经历了一次否定之否定和“正一反一合”的认识过程，而这种否定之否定并非是机械循环，而是一种质的飞跃。

三、光学现代进展管窥

现代光学一般认为起源于本世纪中期。当时光学研究无论在思想、方法、技术（包括设备、材料、工艺）等方面都产生了一系列重大的突破，新的分支学科如雨后春笋般诞生。这里只能择取与基础光学有关者简要介绍之。

光学与通讯理论的结合促成了**傅里叶光学**的出现。它利用系统概念和频谱语言来描述光学变换过程。实际上它可看作是经典波动光学的扩展与深化。在本质上它与经典衍射理论并无根本区别，但在处理方法与观察角度上有全新的创造与发展，故得到了许多新的极有价值的结论。用傅里叶光学的概念和方法可对光学信息（图像）实施各种处理和变换，例如空间滤波、图像识别等，这部分内容称为**光学信息处理**。

与傅里叶光学有联系的另一学科分支是**全息学**，它由伽伯（D.Gabor, 1900—1979）于1948年首次提出。全息学利用与已知参考波相干涉的办法来实现对物波振幅与相位的同时记录，该干涉图样称为全息图。用与原参考波相同的波照明全息图则可重现原来的物波，所以这种方法也叫波前再现或波前重建，所重现的物体与原物具有相同的三维体视特性。全息术在干涉计量、特征识别、高密度存贮及三维显示等方面都有着重要应用。

1960年出现了第一台**激光器**。**激光**具有普通光源所无法比拟的高强度和高相干性（高单色性及高方向性），它的诞生使得光学研究及应用在许多方面达到了全新的阶段或开辟了全新的领

域。全息术在六十年代的迅速发展即得益于激光器的问世。现在激光技术已广泛应用于通讯、测距、加工、医疗、光谱学、激光制导、激光武器以及激光核聚变等各个方面。

高强度激光的出现亦促进了另一光学分支——**非线性光学**的迅速发展，它研究当介质已不满足线性迭加原理时所产生的一些新现象，如倍频、混频、自聚焦等。

另外，材料与工艺的改进亦使得光学在其他许多领域得到蓬勃发展。例如，对光学薄膜的研究形成了**薄膜光学**，对光导纤维的研究形成了**纤维光学**，将集成电路的概念和方法引入光学则促成了**集成光学**的出现。特别值得指出的是，现代科学的发展使各学科或其分支的互相渗透越来越强。非线性光学、信息光学及集成光学等理论与技术的综合可能会导致新一代计算机——**光计算机**的诞生，它具有大容量、高速度、并行处理等优点，并可部分实现人脑的功能（如学习和联想），它的成功将意味着现代科学技术产生又一重大突破。

光学的历史是一部闪耀着人类智慧和创造力光辉的灿烂画卷，光学的未来则更显示出诱人的前景。中国人在此领域中曾一度领先，近年来在不少方面也已接近或达到国际先进水平，但总体上仍有差距。一切与此领域有关的有志之士，特别是年青一代，均应为振兴及弘扬我国光学以至整个科学事业而奋发努力！

目 录

(上册)

绪 论

第一章 几何光学

§ 1.1	光线传播的基本规律	(1)
1.1.1	光线传播的实验规律	(1)
1.1.2	费马原理——光线传播的普遍规律	(8)
§ 1.2	成像的基本原理	(17)
1.2.1	成像的基本概念	(17)
1.2.2	单球面及共轴球面系统傍轴成像(逐次成像)	(20)
1.2.3	薄透镜傍轴成像	(30)
1.2.4	光焦度 高斯公式和牛顿公式 作图法	(33)
1.2.5	共轴球面系统傍轴成像(基面成像)	(39)
*1.2.6	共轴球面系统傍轴成像的矩阵方法	(50)
§ 1.3	成像仪器	(61)
1.3.1	眼睛	(61)
1.3.2	放大镜和目镜	(65)
1.3.3	显微镜	(69)
1.3.4	望远镜	(72)
§ 1.4	光阑与像差	(75)
1.4.1	光阑	(75)
*1.4.2	像差	(79)
§ 1.5	光度学和辐射度量学	(86)
1.5.1	辐射通量 视见函数 光通量	(87)
1.5.2	光源发光能力的描述	(91)

1.5.3	余弦发射体和定向发射体	(95)
1.5.4	光场中的照度	(97)
1.5.5	像的亮度和照度	(100)
1.5.6	辐射度量学中的量	(104)
	习题	(104)

第二章 波动光学通论

§ 2.1	波的概念与光的电磁理论基础	(115)
2.1.1	波的基本概念	(115)
2.1.2	光的电磁理论基础	(116)
§ 2.2	波的数学描述	(121)
2.2.1	波的实数表示与时空周期性	(121)
2.2.2	波的复数表示与复振幅	(132)
2.2.3	波的矢量表示	(138)
§ 2.3	波的迭加	(139)
2.3.1	波的迭加原理	(139)
2.3.2	同频率简谐波迭加的一般分析及干涉概念	(140)
2.3.3	两列同频率、同向振动的平面波的迭加	(142)
2.3.4	两列同频率、同向振动、反向传播的平面波的迭加——光驻波	(147)
2.3.5	两列同频率、振动方向互相垂直、同向传播的平面波的迭加——椭圆偏振光的形成及特征	(151)
2.3.6	两列频率相近、同向振动、同向传播的平面波的迭加——光学拍	(158)
§ 2.4	光的偏振态	(161)
2.4.1	完全偏振光——线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光	(161)
2.4.2	非偏振光——自然光	(163)
2.4.3	部分偏振光及偏振度	(165)
2.4.4	偏振片及其光强响应	(166)
*2.4.5	偏振光模型的多样性与等效性	(172)

§ 2.5	波的傅里叶分析	(176)
*2.5.1	周期波的分析——傅里叶级数	(176)
*2.5.2	非周期波的分析——傅里叶积分	(178)
2.5.3	波在空域和时域中的反比关系	(182)
§ 2.6	光在两种各向同性介质界面的反射与折射	(186)
2.6.1	反射与折射时光的振幅比 菲涅耳公式	(186)
2.6.2	反射与折射时光的能流比与光强比	(191)
2.6.3	反射光与折射光的相位变化	(196)
2.6.4	反射光与折射光的偏振态	(202)
2.6.5	全反射与*隐失波	(206)
	习题	(213)

第三章 光的干涉

§ 3.1	光的相干条件	(222)
3.1.1	光的相干条件	(222)
3.1.2	干涉条纹的衬比度	(227)
3.1.3	相干光束的产生方法	(229)
§ 3.2	分波前干涉	(230)
3.2.1	杨氏实验	(230)
3.2.2	其它分波前装置	(238)
§ 3.3	光场的相干性	(243)
3.3.1	光源空间展宽的影响 光场的空间相干性	(243)
3.3.2	光源光谱展宽的影响 光场的时间相干性	(252)
*3.3.3	部分相干性理论基础	(260)
§ 3.4	分振幅干涉 (一): 薄板的双光束干涉	(266)
3.4.1	点光源的干涉及干涉条纹的定域概念	(266)
3.4.2	等倾干涉	(268)
3.4.3	等厚干涉	(275)
*3.4.4	薄膜干涉定域及光源临界宽度的进一步讨论	(287)
3.4.5	迈克耳孙干涉仪	(291)