

# 基础光学教程

湖北省师专光学教材编写组

华中师范大学出版社

# 基础光学教程

湖北省师专光学教材编写组

华中师范大学出版社

## 内 容 提 要

本书是作者依据师专物理专业光学教学大纲和有关中学教师进修、函授教学大纲，结合多年教学实践而编写的。全书共九章：几何光学（一）——基本定律和近轴成像规律，几何光学（二）——对实际光学系统的讨论，光的干涉，光的衍射，光的偏振，光的传播速率，光的吸收、散射和色散，光的量子性，激光。前八章基本内容都配有思考题和习题，还编写了一些有开阔意义的阅读材料。本书在保持光学的系统性、科学性的前提下，对教学内容进行了精选，加强了基本概念、基本规律的教学，并注意联系生产、生活和中学教学实际，叙述力求通俗易懂，突出物理思想和研究方法。本书是一本很好的简明教程。

本书可作为师专物理专业试用教材（包括函授教材），也可作为师范学院、电视大学、职工大学等理工科的教学参考书，并可供中学教师教学参考。

### 基础光学教程

湖北省光学教材编写组

\*

华中师范大学出版社出版

（武昌桂子山）

新华书店湖北省发行所发行

地矿部石油地质印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/32 印张 13.125 字数 295千字

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

ISBN 7-5622-0339-3/O·42

印数：1-4000 定价：4.70元

## 编写说明

本书是根据高等师范专科学校的培养目标，参照师专物理专业《光学》教学大纲和有关中学教师进修、函授大纲，结合我们的教学实践而编写的普通物理光学教材。

考虑到高等师范专科学校物理专业培养目标的特点，同时为了广大读者便于自学，本书从以下几方面作了努力：

1. 精选教材内容。在保持光学系统性、科学性的前提下，把几何光学、波动光学和量子光学的基本内容作为本书的重点；对重要的实验现象、基本概念、基本规律以及有代表性的实际应用，都作了必要的较详尽的论述；压缩和精简了一些次要内容；适当地反映了一些近代光学的内容，除激光单独作为一章简单介绍外，其他有关近代光学的内容都分散到有关章节介绍，尽量与经典光学的基础知识结合起来。

2. 努力按照辩证唯物主义的认识论组织教材。本书内容按几何光学、波动光学、量子光学的顺序安排，尽量做到由浅入深，较好地反映人们对光的认识辩证过程。教材内容叙述力求通俗简明，推导和论证不仅考虑严格性，还尽可能突出物理思想和研究方法，避免繁琐的数学运算，力求方便简捷。另外，为了使读者能更好地加深理解，巩固所学内容，还编写了适量的例题、思考题和习题。

3. 注意联系中学实际，联系生产、生活和科学技术的实际。本书在几何光学中采用以“实正虚负”为中心的符号法则，尽量与中学教材保持一致；对于中学教学直接相关的

部分都写得较深入；重视演示实验及其现象的描述，尽量使读者能在感性认识上提高到理性认识。本书较重视光学在生产、生活和科学技术中的实际应用。为了拓宽读者的知识面，本书编写了一定量的阅读材料，包括光学的基础知识、实际应用、某些新进展和发展史。

参加本书编写的有刘行敏，吴美钧，胡璟，吕贤远，孙慕渊，叶幼松，毕晓玲，张永红等同志。全书由吴美钧，刘行敏统编。

在本书编写过程中，武汉大学石展之教授，华中师范大学林杏全教授，南开大学潘维济教授，天津师范大学尚繁瑛副教授给予了热情支持和帮助，认真审阅了全稿并提出了许多宝贵的意见。为本书的修改和完善做了一定工作的还有黄明哲，赵永林，熊平凡、饶建国，龚运新，刘延华等同志。本书初稿写于1985年底，先后在湖北省各师专试用多次（包括函授），广大师生为本书提了不少的修改意见。华中师范大学余汉香同志为本书描绘了全部插图。在此我们一并表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限，时间匆促，书中难免存在不少缺点、错误和遗漏，敬请广大师生和读者指正。

湖北省师专光学教材编写组

一九八八年三月

# 目 录

## 绪论

### 第一章 几何光学(一)——基本定律和近轴成像规律… 7

§ 1.1 几何光学的基本定律 .....	8
§ 1.2 光程 费马原理 .....	12
§ 1.3 物和像 .....	16
§ 1.4 光在平面上的反射和折射 .....	21
阅读材料:海市蜃楼 虹和霓 .....	31
§ 1.5 光在单球面上的折射和反射 .....	37
§ 1.6 近轴物近轴光线的成像 .....	43
§ 1.7 共轴球面系统和逐次成像法 .....	53
§ 1.8 透镜 .....	57
§ 1.9 理想光具组的基点基面 .....	66
§ 1.10 理想光具组的组合 .....	75
思考题 .....	83
习题 .....	85

### 第二章 几何光学(二)——对实际光学系统的讨论…92

*§ 2.1 像差简介 .....	92
*§ 2.2 光阑 .....	103
§ 2.3 光度学的基本概念 .....	109
§ 2.4 像的亮度和照度 .....	116
§ 2.5 照相机和投影仪 .....	120
§ 2.6 眼睛 .....	123
§ 2.7 放大镜 目镜 显微镜 .....	128

§ 2.8 望远镜 .....	135
思考题 .....	139
习题 .....	140
<b>第三章 光的干涉</b> .....	142
§ 3.1 波的描述 惠更斯原理 .....	142
阅读材料：光的微粒说 .....	149
§ 3.2 波的叠加和相干条件 .....	150
阅读材料：振动合成的振幅矢量加法和复数加法 .....	156
§ 3.3 由分波阵面法产生的光的干涉 .....	158
§ 3.4 空间相干性 .....	167
§ 3.5 由分振幅法产生的光的干涉（一）——等倾干涉 .....	171
§ 3.6 由分振幅法产生的光的干涉（二）——等厚干涉 .....	178
§ 3.7 迈克耳逊干涉仪 .....	184
阅读材料：接触式干涉仪和显微干涉仪 .....	187
§ 3.8 时间相干性 .....	189
§ 3.9 多光束干涉 法布里-珀罗干涉仪 .....	194
思考题 .....	209
习题 .....	202
<b>第四章 光的衍射</b> .....	206
§ 4.1 光的衍射现象 .....	206
§ 4.2 惠更斯-菲涅耳原理 .....	209
§ 4.3 菲涅耳圆孔（圆板）衍射 .....	211
阅读材料：菲涅耳圆孔衍射的矢量图解法 .....	219
§ 4.4 夫琅和费单缝衍射 .....	222
§ 4.5 夫琅和费圆孔衍射 .....	231
§ 4.6 平面衍射光栅 .....	234

§ 4.7 晶体对X射线的衍射	243
§ 4.8 光学仪器的分辨本领	246
§ 4.9 全息照相	253
思考题	257
习题	259
<b>第五章 光的偏振</b>	<b>262</b>
§ 5.1 自然光和偏振光	262
§ 5.2 反射、折射时光的偏振	269
§ 5.3 晶体的双折射	272
§ 5.4 晶体偏振器	279
阅读材料：偏振光与立体电影	284
§ 5.5 椭圆偏振光和圆偏振光	286
§ 5.6 由分振动面法产生的光的干涉——偏振光的干涉	292
§ 5.7 人为双折射	296
§ 5.8 旋光现象	300
思考题	303
习题	306
<b>第六章 光的传播速率</b>	<b>308</b>
§ 6.1 光速的测定	308
§ 6.2 光的电磁理论	315
§ 6.3 光的相速和群速	317
§ 6.4 运动介质中的光速	321
思考题	327
习题	328
<b>第七章 光的吸收、散射和色散</b>	<b>330</b>
§ 7.1 光的吸收	339



§ 7.2 光的散射 .....	336
§ 7.3 光的色散 .....	344
阅读材料: 光和物的颜色 .....	351
思考题 .....	355
习题 .....	355
<b>第八章 光的量子性</b> .....	<b>357</b>
§ 8.1 黑体辐射 普朗克能量子假设 .....	357
§ 8.2 光电效应 爱因斯坦光量子理论 .....	365
§ 8.3 康普顿效应 .....	372
阅读材料: 光的引力红移和太阳对星光的偏转 .....	376
§ 8.4 波粒二象性 .....	377
思考题 .....	379
习题 .....	380
<b>第九章 激光</b> .....	<b>382</b>
§ 9.1 玻尔的原子假说 .....	382
§ 9.2 爱因斯坦的辐射理论 .....	385
§ 9.3 激光的产生 .....	389
§ 9.4 激光器 .....	395
§ 9.5 激光的相干性 .....	399
§ 9.6 激光的应用 .....	402
<b>常用物理常数</b> .....	<b>406</b>
<b>习题参考答案</b> .....	<b>407</b>
<b>主要参考书目</b> .....	<b>411</b>

## 绪 论

人类的文明历史告诉我们，人是靠眼、耳、鼻、舌、身等器官感知世界的。据统计，人所获得的关于客观世界的信息，百分之七十以上来自视觉，或者说百分之七十以上都跟光的知识相关。所以光学也就成为一门知识极丰富、历史极悠久的科学。它总结了人类对光的研究的丰硕成果，鲜明地反映了人类按照唯物辩证法认识客观世界的过程。

我们无须按照历史发展的足迹，一一介绍在曲折的科学小径上光学所经历的每个细节，在这里仅简要介绍光学发展史上的几个里程碑。

远在公元前470—400年，我国先秦时代的《墨经》，就有八条是关于光的传播规律方面的知识，其中第一条记述了影的定义和形成；第二条说明了光和影的关系；第三条描述了光的直线传播以及小孔成像实验；第四条记述了光的反射现象；第五条论述了影的大小与光源的关系；第六条、第七条、第八条则分别叙述了平面镜、凹面镜、凸面镜对实物成像的物像关系。这前后八条总共不过三四百字，可是内容却十分丰富，特别是小孔成像的实验和分析，是关于光的直线传播规律最早的伟大发现，比古希腊的欧几里德(Euclid)的记载还要早一百多年。公元前四世纪的《考工记》和公元前二世纪的《淮南子》都有用凹面镜取火的记载，而西方到十三世纪才有金属磨制的凹镜，落后十几个世纪。此后，我国

东汉时期的张衡、北宋时期的沈括，在他们的著作中，也都有关于用透镜取火和日蚀、月蚀、虹的形成的记述。总之，我们中华民族的祖先对几何光学的发展做出过杰出的贡献。

到十七世纪上半期，光学在欧洲得到了迅速发展。在不长的时间里，建立了完整的几何光学的体系，把光学推进到一个新时期。1621年，斯涅耳（Snell）对实验结果进行分析，总结出了折射定律；1657年费马（Fermat）提出了光程（或时间）取稳定值的原理。以费马原理和斯涅耳定律为标志，完成了对几何光学实验结果的概括与总结，确立了几何光学的实验定律。如果从公元前四世纪算起，光学从萌芽到系统地建立起几何光学的实验定律，经历了漫长的两千多年的缓慢过程。

此后，随着大工业的兴起，经典力学和电磁学理论迅速发展起来，光学也迎来了以力学和电磁学为基础的十分活跃的时期。这个时期又明显地区分为三个阶段：先是牛顿（Newton）微粒说占统治地位的阶段；接着是以惠更斯（Huggens）、菲涅尔（Fresnel）为代表的波动理论占绝对优势的阶段；后来，以麦克斯韦（Maxwell）为代表的电磁理论，揭示了光的电磁本质。在这个时期，围绕光的本性问题，微粒说和波动说之间展开了持久的激烈论战。

牛顿于1704年正式提出了光是一种遵守力学定律的微粒流思想。微粒说很自然地解释了光的直线传播现象；在解释折射和反射定律时，得出了光在光密介质中速度较大的结论；为了解释牛顿环现象、偏振现象和双折射现象，牛顿又不得不假定光微粒时而容易反射，时而容易透射，还可能是按一定方向旋转的，有磁矩的，等等。尽管牛顿在青年时

代，曾把牛顿环看作光的周期性表现，曾主张与各颜色相联系的光微粒会激发以太进入各种特征振动，但牛顿在年长后和微粒说的坚信者们一起，排斥光的波动学说，微粒说占统治地位长达一个多世纪。

几乎与牛顿形成微粒说的同时，欧洲大陆上的惠更斯创立了光的波动学说。他认为光如同声波等机械波一样，是在以太中传播的一种脉动，并用惠更斯原理解释了光的反射、折射现象，预言了光在光密介质中的速度会减小，但惠更斯原理毕竟是不完善的，对光传播时的能量分布问题也不能给出满意的回答。十九世纪初，在托马斯·杨(Thomas Yong)提出光的干涉原理后，菲涅耳在惠更斯原理基础上，提出了次波相干叠加原理，补充了关于次级子波叠加时的振幅和位相两方面的假设，从而形成了惠更斯-菲涅耳原理。菲涅耳和阿喇果(Arago)还引进了光是横波的假设，圆满地解释了光的直线传播现象、光的衍射现象和光的偏振现象，导出了著名的菲涅耳公式。特别是波动说的反对者根据菲涅耳的理论推论出不透光圆屏后的阴影中心应出现亮点，在当时，人们认为这是不可能的，然而却由阿喇果做的实验所证实。以后，光的波动理论兴旺起来。1850年，傅科(Foucault)又测量出光在水中比在空气中传播得慢，否定了微粒说的结论，从此微粒说再也无力与波动说抗衡了。

经典电磁学的理论和实验从另一角度把光学大大向前推进了一步。1845年，法拉第(Faraday)发现光的偏振面在强磁场中发生偏转，初步揭示了光现象和电磁现象之间的内在联系；1856年，科尔劳什(Kohlraush)等发现电荷的电磁单位和静电单位的比值等于光在真空中的传播速度。麦克

斯韦天才地总结了前人关于电磁现象的全部经验，于1864年建立了一套后人称之为优美对称的方程组，从理论上预言了电磁波的存在。麦克斯韦从他的方程出发进而求得电磁波的传播速率等于光速，这样他又进一步预言了光在本质上是电磁波。麦克斯韦的预言后来终于被科学实验证实。如果从牛顿研究光的颜色算起，到麦克斯韦建立电磁理论，刚好经历了两个世纪，经典的波动说使人类获得的光的知识远远超过了过去两千多年的积累。

十九世纪末二十世纪初是物理学发生伟大变革的时期。近代物理学的两个重要理论分支相对论和量子力学相继诞生，而且与光学的研究和发展密切相关。麦克斯韦说明了光的电磁本性，但他并没有否定“以太”的存在。十九世纪末，人们通过对运动介质中光速的研究，特别是1887年迈克尔逊和莫雷应用光的干涉效应对“以太”风的研究，进一步揭示了以太说的不可克服的困难，否定了以“静止以太”为背景的绝对参考系的存在，这就为1905年爱因斯坦（Einstein）建立狭义相对论提供了一定的实验基础。十九世纪末，对黑体辐射的研究是当时的又一重要课题，但经典理论在解释黑体辐射的实验定律时遇到了重重困难。为此，普朗克（Planck）于1900年提出能量量子化的概念，使黑体辐射定律得到了统一的合理解释。在此基础上，爱因斯坦于1905年又进一步提出光子量子理论，成功地对光电效应和康普顿效应进行了说明。于是，人们进一步认识到光不仅具有波动性，同时还具有量子性，波粒二象性是光的内在属性。因此，普朗克提出能量量子概念，成为光学进入另一个新时期的重要标志。以后，光的量子理论经德布罗意（de Broglie）、海森伯

(Heisenberg)、玻恩(Born)、薛定谔(Schrödinger)等人的进一步发展,逐步形成近代物理学的一重要理论基础——量子力学,与此同时,人们对光的本性认识也逐步加深,而且至今这仍然是基础理论研究的前沿科学之一。

自从本世纪六十年代激光问世以后,又揭开了现代光学新的一页.光学出现了许多新的分支,以从未有过的迅猛速度飞速发展.激光技术在社会和自然科学的各个领域都得到应用,激光技术继光学技术之后已渗透到工农业生产、科学教育、医药卫生、国防、通讯、核聚变、生物工程等各个部门.全息术、光导纤维、遥感技术、光计算机等方兴未艾.另外,统计光学、非线性光学、傅里叶(Fourier)光学、集成光学等光学分支,都使光学变得非常活跃,展示了广阔的发展前景.现代光学与其它学科和技术的结合,已经成为、并将继续成为人们认识自然、改造自然的强有力的武器之一。

回顾光学发展的简史,我们可清楚地看到光学发展史,是人类对光的本性认识逐步深化的历史,是人类神奇般地发展光学技术的历史.光学研究的范围十分广泛,它包括光的发射、传播、接收,光和其它物质的相互作用,光的本性及其在生产、生活上的应用等方面.通常可将光学分为几何光学和物理光学(包括波动光学和量子光学)两大部分.在本书中,我们将大致按这种顺序安排教学内容.对于近代光学的重要内容,我们也作一定介绍.除激光单独作一章外,我们将近代光学的有关内容,分散到有关章节中去介绍,尽量与光学的基础知识相结合。

光学发展的过程是“实践—认识—实践”的认识规律的生动体现.光学中有的部分(如几何光学的基本定律)就是

通过观察和实验总结出来的；大量的光学理论就是在大量的科学实验或生产实践的基础上提出的，并再回到实践中去经受了检验。光学所反映的物质世界的客观存在的辩证法，光学与生产实践的辩证关系，光学与科学实验的辩证关系，决定了我们学习光学的思考方法和学习方法；要重视对光现象的观察，重视光学实验；要注意理解关于光的模型，而不可把模型当作光本身；要自觉接受物质世界的多样性，学习从具体事实出发上升到抽象的思维，逐步实现从经典物理学的思维方式过渡到量子光学——近代物理的思维方式。

学好光学，将使我们能够正确认识各种光现象，能为我们步入近代物理学领域作必要的准备，有助于进一步探索微观世界和宏观世界的联系，有助于进一步探索物质运动的变化规律，并运用到祖国的“四化”建设事业中去。同时，认真学习光学，还必将增强我们的观察能力、实践能力、学习能力和分析解决问题的能力。

# 第一章 几何光学(一)

## ——基本定律和近轴成像规律

不考虑光的波动性，以光的直线传播、反射、折射等实验定律为基础，利用几何学的方法来研究光在透明介质中传播的规律及其应用的光学分支，叫做几何光学。我们用带箭头的几何线表示光能量的传播方向，这种几何线称为光线。光线是几何光学中最常用的概念，几何光学的基本原理往往是借助“光线”来表示的，因此，几何光学又称光线光学。

从本质上看，光具有波动性，应该用波的概念来描述光。在学习了第三章和第四章之后我们将认识到，当所研究的对象（如透镜，面镜等）的几何尺寸远大于光波波长时<sup>①</sup>，几何光学的研究结论与波动理论的研究结论趋于一致，与实验相符。因为几何光学对许多实际问题的研究能够获得令人满意的精确答案，而其方法又比较简单，所以它有相当高的实用价值，是研究光现象的有力工具。

本章，我们先介绍几何光学中的基本定律，阐述成像的基本概念，然后讨论单球面的折射、反射成像和透镜成像的规律，侧重于近轴条件下的理想成像的讨论。对于理想光具组的基本概念的处理方法，也将作一定程度的介绍。至于对实际光学系统的一些问题，将在下一章中进行讨论。

<sup>①</sup> 可见光的波长范围为 $4000\text{ \AA} \sim 7600\text{ \AA}$  ( $1\text{ \AA} = 10^{-10}\text{ m}$ ) 可见，常用光学仪器的各物件的几何尺寸都远大于光波波长。



## §1.1 几何光学的基本定律

### 一、光的直线传播定律

在均匀介质中，光沿直线传播。或者说，在均匀介质中，光线为一直线。自然界中，许多现象都可用来说明这一规律。例如，一不透明的物体在点光源照明下，其背后会形成清晰的影子，影子的形状与以点光源为中心发出的光线所构成的几何投影相一致（图1-1）。如果用有一定大小的体光源来照明，则在不透明的物体后面形成的暗影可大致分为两个区域，其中光线完全不能照到的区域称为本影；只有部分光线到达的区域称为半影，如图1-2所示。

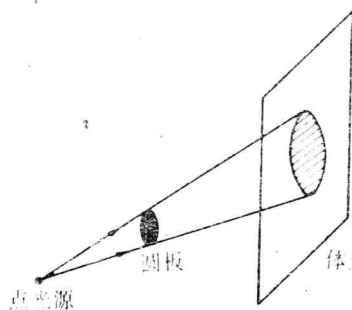


图1-1 影的形成

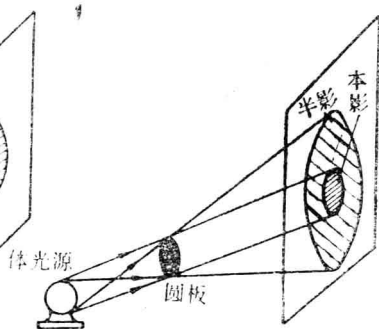


图1-2 本影和半影的形成

小孔成像是光沿直线传播的又一例子。如图1-3所示，在一个暗箱的前壁上开一个小孔，由物体上各点发出的光沿直线传播通过小孔，在暗箱的后壁上形成一个倒立的像。如果在暗箱后壁上装上照相底片，让像呈现在它上面，这就成为