

面向 21 世纪高等院校教材

# 光学教程

刘杰 洪正平 李健 主编

GUANG XUE  
JIAO CHENG

山东大学出版社

面向 21 世纪高等院校教材

# 光学教程

刘杰 洪正平 李健 主编

山东大学出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

光学教程/刘杰, 洪正平, 李健主编. — 济南: 山东大学出版社, 2000. 9

ISBN 7-5607-2166-4

I. 光…

Ⅰ. ①刘…②洪…③李…

Ⅱ. 光学-高等学校: 师范学校-教材

Ⅳ. O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 40319 号

山东大学出版社出版发行

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码: 250100)

山东省新华书店经销

山东滨州新华印刷厂印刷

850×1168 毫米 1/32 12.25 印张 31.8 千字

2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 册

定价: 22.00 元

# 前 言

本书是根据作者多年来在山东师范大学物理系讲授光学课所使用的讲义基础上,既汲取国内外教学研究的新成果,又体现了师范院校特点编写而成的。目的在于为高等师范院校提供一本得心应手的基础光学教材或参考书。

本书从师范院校的特点出发,着重阐述光学现象的基本规律和基本概念,力求使读者对光学课程的核心内容有一个较为全面深入的了解。全书主要包括几何光学、波动光学和光的量子性三大部分。为了开拓学生的知识面,本书对现代光学的一些最新发展作了介绍,力求将现代光学的最新成就融于基本概念和基本理论的阐述中;其部分内容可以自学。在本书的编写过程中注重和目前中学教学内容相衔接以及实际应用的需要,例如对几何光学部分仍利用相当篇幅来讨论其基本原理,并未作太大的删减。书中插图基本上都采用了计算机绘图,形象清晰。此外,还选编了一些有启发性的例题和习题,书末附有习题答案,希望对读者的学习能有所帮助。

本书编写分工如下:洪正平副教授:第一章、第二章、第三章;李健副教授:第八章,并负责绘制了书中插图;刘杰副教授撰写了其余内容,并负责全书的统稿。

林典要教授对本书的编写和出版十分关心,提出了许多宝贵的意见和建议。本书的出版得到了山东师范大学各级领导以及现代光学实验室的老师们的的大力支持和帮助,同时还得到山东师范大学出版基金的资助。对此一并表示衷心的感谢。

由于成书时间的紧迫和作者水平所限,书中不妥和疏漏之处在所难免,真诚地希望读者批评指正。

编 者

2000年6月于山东师范大学

现代光学实验室

# 目 录

## 绪 论

### 第一章 几何光学..... (7)

§ 1.1 几何光学基本定律 ..... (7)

§ 1.2 费马原理 ..... (9)

§ 1.3 成像的基本概念..... (12)

§ 1.4 近轴物体的成像——球面折射..... (15)

§ 1.5 薄透镜..... (27)

§ 1.6 共轴球面系统..... (36)

§ 1.7 共轴球面系统的组合..... (43)

§ 1.8 共轴球面系统近轴成像的矩阵方法..... (48)

§ 1.9 像差简介..... (60)

习题 ..... (66)

### 第二章 助视光学仪器基本原理 ..... (71)

§ 2.1 人眼..... (71)

§ 2.2 助视光学仪器..... (74)

§ 2.3	光阑	(81)
§ 2.4	光度学基本概念	(83)
§ 2.5	投影光学仪器	(92)
	习题	(95)
<b>第三章 光的干涉</b>		<b>(97)</b>
§ 3.1	光波电磁性质概要	(97)
§ 3.2	光波场的数学描述	(100)
§ 3.3	光波的相干叠加和干涉	(104)
§ 3.4	分波阵面干涉装置	(108)
§ 3.5	光波场的时间相干性和空间相干性	(118)
§ 3.6	菲涅耳公式	(125)
§ 3.7	薄膜干涉(一)——等倾干涉	(131)
§ 3.8	薄膜干涉(二)——等厚干涉	(138)
§ 3.9	迈克耳逊干涉仪	(145)
§ 3.10	法布里—珀罗干涉仪	(149)
	习题	(155)
<b>第四章 光的衍射</b>		<b>(160)</b>
§ 4.1	光的衍射现象	(160)
§ 4.2	惠更斯—菲涅耳原理	(162)
§ 4.3	菲涅耳圆孔衍射和圆屏衍射	(168)
§ 4.4	夫琅和费单缝衍射和圆孔衍射	(179)
§ 4.5	光学仪器的像分辨本领	(188)
§ 4.6	衍射光栅	(193)
§ 4.7	光栅和棱镜光谱仪的特性	(204)
§ 4.8	全息照相	(210)
§ 4.9	光信息处理初步	(217)

习题.....	(228)
<b>第五章 光的偏振.....</b>	<b>(233)</b>
§ 5.1 光波的偏振态 .....	(233)
§ 5.2 光通过单轴晶体时的双折射 .....	(247)
§ 5.3 晶体光学器件 .....	(255)
§ 5.4 偏振光的检验 .....	(266)
§ 5.5 偏振光的干涉 .....	(270)
§ 5.6 旋光现象 .....	(279)
§ 5.7 光弹效应和电光效应 .....	(285)
* § 5.8 偏振态及其转换的矩阵描述.....	(288)
习题.....	(295)
<b>第六章 光的吸收、色散和散射 .....</b>	<b>(299)</b>
§ 6.1 光的吸收 .....	(299)
§ 6.2 光的色散 .....	(305)
§ 6.3 光的相速和群速 .....	(309)
§ 6.4 光的散射 .....	(313)
习题.....	(319)
<b>第七章 光的量子性.....</b>	<b>(321)</b>
§ 7.1 热辐射 普朗克的量子假设 .....	(321)
§ 7.2 光电效应 .....	(328)
§ 7.3 康普顿效应 .....	(335)
§ 7.4 光的波粒二象性 .....	(339)
习题.....	(341)



<b>第八章 激光</b> .....	(343)
§ 8.1 光子与原子系统的相互作用 .....	(343)
§ 8.2 激光的形成 .....	(349)
§ 8.3 典型激光器简介 .....	(356)
§ 8.4 激光的特性和应用 .....	(367)
§ 8.5 非线性光学 .....	(370)
习题.....	(379)
<b>部分习题参考答案</b> .....	(380)

# 绪 论

## 一、对光的本性认识的简史

光学是一门历史悠久、充满了生命力的学科。正是因为眼睛接收到物体发射、反射或散射的光，人们才能看到五彩缤纷、瞬息万变的世界。据统计，人类感官收到外部世界的总信息中，至少有90%以上通过眼睛。从很古老的时代起，人类对于光的现象，就已积累了许多知识，人们从远古时代起就知道把光作为能源和传递信息的工具而加以利用。光学的发展历史几乎和人类的历史一样悠久，但对光的本性的认真探讨是从17世纪才开始的。当时存在着以牛顿为代表的微粒说和以惠更斯为代表的波动说的争论。

### 1. 光的微粒学说

以牛顿为代表的一些人提出了光的微粒理论，认为光是从光源中发射出来的粒子，在均匀介质中作等速直线运动。这一学说直接说明了光的直线传播定律，并能对光的反射和折射作一定的解释。

在解释反射定律时，微粒说认为当微粒遇到反射面时，它们像

弹性小球一样地反跳,这时微粒的切向速度  $v_x$  不变,而法向速度  $v_y$  反转,从而反射角  $i_1'$  等于入射角  $i_1$ ,如图 1 所示。

为了解释折射定律,它假设在粒子经过介质分界面时,受到一垂直界面的力的作用,它使微粒通过界面时法向速度发生改变,即  $v_{2y} \neq v_{1y}$ ,如图 2 所示。

由图 2 可知:  $v_{2x} = v_{1x}$ ,  $v_{1x} = v_1 \sin i_1$ ,  $v_{2x} = v_2 \sin i_2$

所以

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

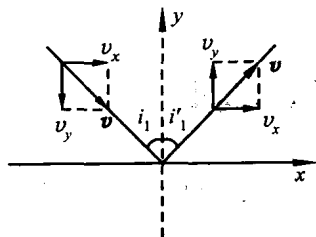


图 1

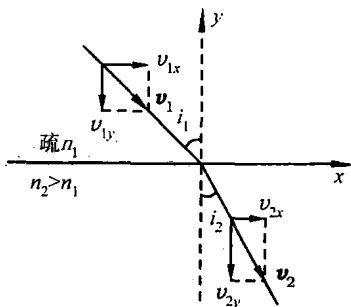


图 2

由于在各向同性介质中,速度  $v_1, v_2$  与光的传播方向无关,上式右端是一个与入射角无关的常数,这样便解释了折射定律。

但从实验得出,当光从光疏介质向光密介质折射时,入射角  $i_1$  大于折射角  $i_2$ ,再由上式可得出  $v_2 > v_1$ ,即在光的微粒说看来,在光密介质中光“微粒”的速度较大,这一点后来为傅科的实验所否定。

## 2. 光的波动学说

大约与牛顿倡导微粒说的同时,惠更斯等人则主张波动说。惠更斯认为光是在“以太”中传播的波,并提出了惠更斯次波原理:波

面上(等位相面)任一点均可看成为一个新的波源,要发次波,同一时刻这些次波的包迹(公切面)便是该时刻的波面,如图 3 所示,以此解释球面波的传播。根据惠更斯原理,可以解释光的反射定律和折射定律,对反射定律的证明留给同学们自己做。下面证明光的折射定律,如图 4 所示。

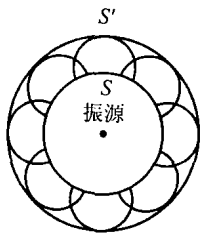


图 3

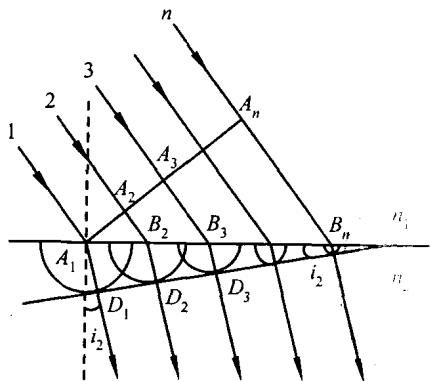


图 4

设想有一束平行光线(平面波)以入射角  $i_1$  由介质 1 射向它与介质 2 的分界面上。作通过  $A_1$  点的波面,它与所有的入射光线垂直,在光线 1 到达  $A_1$  点的同时,光线 2, 3,  $\dots$ ,  $n$  到达此波面上的  $A_2, A_3, \dots, A_n$  点。设光在介质中的速度为  $v_1$ , 则光线 2, 3,  $\dots$ ,  $n$  分别要经过一段时间  $t_2 = \overline{A_2 B_2} / v_1, t_3 = \overline{A_3 B_3} / v_1, \dots, t_n = \frac{\overline{A_n B_n}}{v_1}$  后才到达分界面上的  $B_2, B_3, \dots, B_n$  各点。每条光线到达分界面上时,都同时发射两个次波,一个是介质 1 内发射的反射次波(请同学们自己画出),另一个是向介质 2 内发射的透射次波。设光在介质 2 中的速度为  $v_2$ , 在第  $n$  条光线到达  $B_n$  的同时,由  $A_1$  点发出的透射次波面是半径为  $v_2 t_n$  的半球面。在此同时,光线 2, 3,  $\dots$  传到  $B_1, B_2,$

…各点后发出的透射次波面的半径为  $v_2(t_n - t_2), v_2(t_n - t_3), \dots$  这些次波面一个比一个小,直到  $B_n$  处缩成一个点。根据惠更斯原理,这时刻总扰动的波面是这些次波面的包络面(即通过  $B_n$  的平面),设透射波总扰动的波面与各次波面相切于  $D_1, D_2, \dots$  各点,连接次波源和切点,即得到总扰动的波线,即  $A_1D_1, B_2D_2, B_3D_3, \dots$  为折射光线。

由几何关系可得  $\sin i_1 = \frac{\overline{A_n B_n}}{A_1 B_n}, \sin i_2 = \frac{\overline{A_1 D_1}}{A_1 B_n}$

所以  $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\overline{A_n B_n}}{\overline{A_1 D_1}} = \frac{v_1 t_n}{v_2 t_n} = \frac{v_1}{v_2} = \text{常数}$

由此可见,入射角与折射角的正弦之比为一常数,这样便导出了折射定律。当光从光疏介质向光密介质折射时  $i_1 > i_2$ ,由上式可知,  $v_1 > v_2$ ,这与后来的实验结果是相符合的。

19世纪是波动说的全盛时期,它成功地解释了光的干涉、衍射、偏振现象,为波动光学奠定了基础。

19世纪60年代,麦克斯韦在前人的基础上,建立了著名的电磁理论。根据麦克斯韦的电磁理论,电磁波在真空中的传播速度为

$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ , 式中  $\epsilon_0, \mu_0$  为真空中的介电常数和磁导率。并通过实验

确认光是一种波长较短的电磁波,于是产生了光的电磁理论。1888年赫兹实验发现了波长较长的电磁波——无线电波也有反射、折射、干涉、衍射等与光波类似的性质。后来的实践又证明,红外线、紫外线和X射线等也都是电磁波,它们彼此的区别只是波长不同而已。光的电磁理论以大量无可辩驳的事实赢得了普遍的公认。

### 3. 光的波粒二象性

19世纪至20世纪初,光学已深入到研究光的发射,光和物质相互作用的微观结构。为解释光和物质相互作用的某些现象,光的电磁理论遇到了困难。1900年普朗克为了解释黑体辐射能量按波

长的分布规律,提出了量子理论。1905年爱因斯坦发展了普朗克的量子论,提出了光量子的假说,对光电效应的规律作了解释和预言。1927年康普顿散射实验进一步证明了爱因斯坦理论的正确性。由此对光的微粒性的认识进入了一个新阶段。

光的干涉、衍射、偏振表明光的波动性,光电效应等表明光的粒子性,即光具有波粒二象性,任何经典的概念都不能完全概括光的本性。1924年德布罗意指出波粒二象性是微观粒子的普遍属性,在量子力学及量子电动力学中光的波粒二象性可以很好地统一起来。

## 二、光学研究的内容

光学是物理学的组成部分。它研究的内容包括光的本性、光的发射、传播、接收以及光和物质的相互作用等。

从波动观点看,光是一种电磁波。在真空中,可见光的波长范围在400~760nm之间。

从量子观点看,光场是由一个个光子组成。光子是光的最小单位,每个光子的能量 $\epsilon$ 和它的频率 $\nu$ 之间的关系为 $\epsilon=h\nu$ ,式中 $h$ 是普朗克常数,其数值为 $h=6.62\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ 。

光子也具有动量 $P$ ,它的方向为光子运动的方向(即光传播方向),其值为 $|P|=\frac{\epsilon}{c}=\frac{h\nu}{c}$ 。式中 $c$ 为真空中光速,1983年第十七届国际计量大会通过其值为: $c=299792458\text{ m/s}$

在基础光学中,通常对不同的现象采用不同的观点去研究。根据所采用观点的不同,光学一般分为几何光学和物理光学两部分,后者又分为波动光学(主要包括光的干涉、衍射、偏振三部分)和量子光学。几何光学以光的直线传播性质为基础,研究光线在透明媒质中的传播问题。波动光学以光的波动性为基础,研究光的传播、

光和物质相互作用的规律。但是光的发射以及光和物质相互作用的某些问题,必须用光的量子性解释,属于量子光学的范围。

近半个世纪以来,由于激光的出现和发展,导致了光学的迅速发展,出现了许多新的领域,如非线性光学、信息光学、集成光学等光学新的分支,这些都属于现代光学的范畴。就光学本身能力而言,如光的波长短、信息容量大、光传递信息和变换处理信息的二维特性等还具有很大的潜力,它的发展还远远没有达到人们预期的水平。

# 第一章 几何光学

几何光学是撇开光的本性,不考虑它和物质的相互作用,仅以光线的概念为基础,利用几何学定理近似地阐明光的直线传播的基本定律。具体来说,几何光学是研究光的反射、折射以及与这些现象相关的光学系统的成像规律的科学。因此具有重要的实际应用意义,是各种光学仪器设计的理论根据。

## § 1.1 几何光学基本定律

在大量的生活实践和科学实验中,得到光的直线传播的基本规律,是几何光学的理论基础。

### 一、光的直线传播定律

在均匀介质中,光传播的范围或障碍物的线度远大于光波波长时,光沿直线传播。

因此,在几何光学中,可以用一条表示光的传播方向的几何线来代表光,并称这条线为光线,一束光由许多光线组成。



## 二、光的反射定律和折射定律

当一束光射到两种透明介质的分界面上时,一部分光从界面上反射形成反射光线,其余部分将进入第二种介质,形成折射光线。入射线与其入射点处界面的法线所构成的平面称为入射面,法线与入射光线和反射光线所构成的夹角  $i_1$  和  $i_1'$  分别称为入射角和反射角,如图 1.1-1 所示。

1. 反射定律:入射光线、反射光线和分界面的法线在同一平面内,入射光线、反射光线分别在该法线的两侧,反射角等于入射角。

$$i_1' = i_1 \quad (1.1-1)$$

2. 折射定律:折射光线在入射面内,并且和入射光线在法线的两侧,对单色光而言,入射角  $i_1$  的正弦与折射角  $i_2$  的正弦之比是一个常数,即:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (1.1-2)$$

式中  $v_1, v_2$  分别是光在 1, 2 两种介质中的传播速度;  $n_1, n_2$  分别表示介质 1 和介质 2 的绝对折射率,其定义为  $\frac{c}{v_1}$  和  $\frac{c}{v_2}$ ,  $c$  是光在真空中的传播速度,经实验测定:

$$c = 299,793 \text{ 千米/秒} \approx 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$n_{21}$  称为介质 2 对介质 1 的相对折射率。由于不同波长的光在介质中的传播速度不同,所以折射率不仅和介质种类有关,还和光的波长有关。因此,光在折射时,不同波长的光将发生散开的现象,称为色散现象。

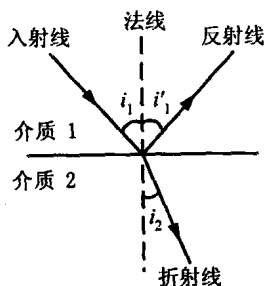


图 1.1-1 光的反射和折射