

大学物理教程

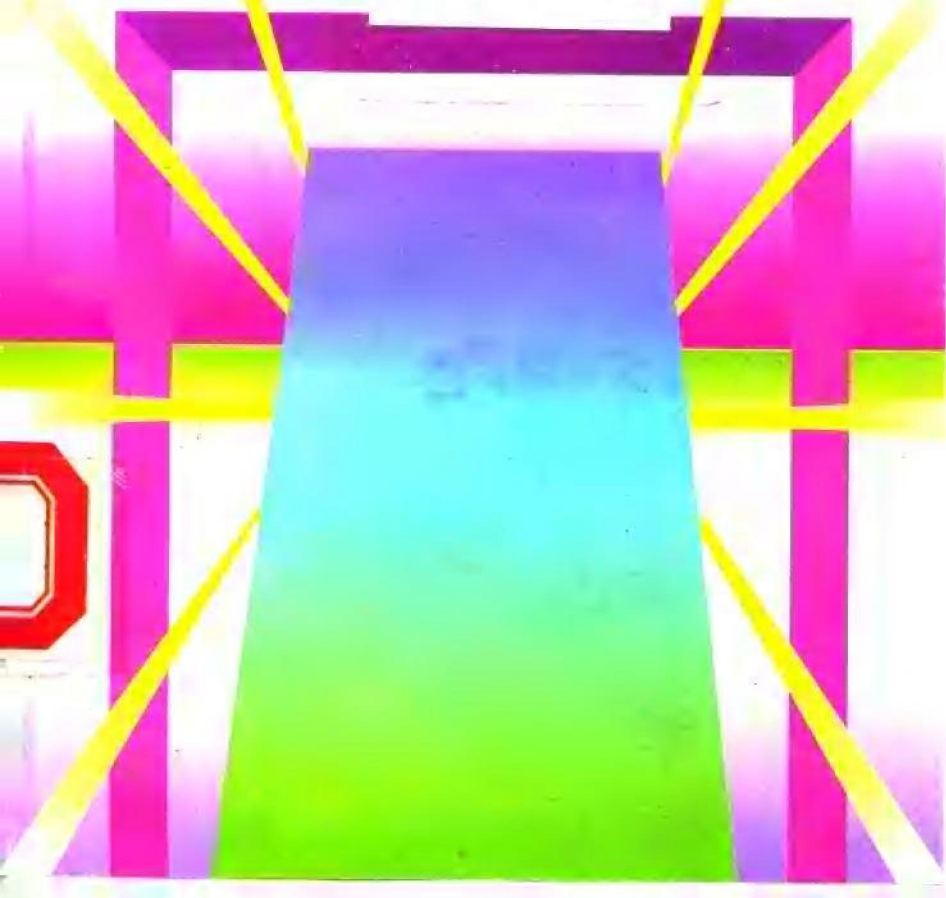
光学

蔡峰怡 编著

G F G Y C B S



国防科工委802 3 0161076 2



大学物理教程

光 学

蔡峰怡



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程：光学/蔡峰怡编著. —北京：国防工业出版社, 1997. 1

ISBN 7-118-01563-6

I. 大… I. 蔡… III. ①物理学-高等学校-教材②光学-高等学校-教材 IV. ①04-43②043

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 22754 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

开本 787×1092 1/32 印张 7 149 千字

1997 年 1 月第 1 版 1997 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 7.40 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

总 序

本书是根据国家教委高等学校物理学教学指导委员会应用物理学教材规划,结合作者多年来的教学实践编写的。按照各学校的实际情况和教材规划的要求,本教程的内容和深度介于物理系普通物理和工科普通物理之间。这一选择是为了使本教程能够适合应用物理专业,以及其他偏理科的专业如技术物理、核物理、电子技术物理、材料科学、工程化学、生物科学等的需要。

本书注重对物理基本原理和概念的阐述,在注意严密性的同时,强调了借用现象、图像、比喻和实例来说明问题的本质,使内容更为丰富、更具有吸引力。本书力求能够反映 20 世纪 90 年代物理学的面貌以及人们对物质世界的认识水平。在叙述方法上力求由简到繁、由表及里、富于启发、便于阅读,以利于引导读者积极思考和分析问题。

根据我们的教学经验,全书主要内容可用 180 学时讲完。本书作者曾多次研讨了全书的内容、结构和叙述方法,但为了方便读者,仍分册出版,包括力学、热学、电磁学、光学和原子物理学五个分册,它们既构成一个整体,又具有相对独立性,可以单独选用。

国家教委高等学校物理学教学指导委员会应用物理学教材建设组对本书进行了初审和复审,提出了极为宝贵的意见和建议。国防工业出版社的同志对本书的出版给予了热情的

支持和帮助,作者在此一并向他们表示衷心的感谢。

浙江大学李文铸教授主持编写了本教程,清华大学、北京工业大学、北京科技大学的几位教授担负了具体的编写工作。第一册《力学》由许崇桂、李铿编写;第二册《热学》由许崇桂编写;第三册电磁学由李铿编写;第四册《光学》由蔡峰怡编写;第五册《原子物理学》由史斌星编写。

在编写本书各册时,都参考了国内外若干教材和其他书籍,从中得到启发与教益。这些书籍无论在内容选择和安排,或对问题的分析、讨论,以及在插图、例题、习题等许多方面都有各自的优点,其中有些地方无疑是值得借鉴和吸收的。这里难于一一指出,在此一并致谢。

由于作者学识和经验所限,书中定会出现缺点和错误,欢迎批评、指正。

作 者

前 言

人类很早就认识到,光是人们必需却无需购买的重要能源,有谓“阳光、空气和水是生命之源”,还有很多颂扬阳光的诗歌、故事、神话、传说。随着对光本性的认识,光的功能不断被开发出来。今天,你想利用这种无偿的能源,就要为高技术附加值的光学商品付款,例如灯及灯饰、照相机等。70年代,人类进入了信息时代,光缆是重量最轻、容量最大、抗干扰能力最强的通信电缆。从信息科学的观点,回头审视光学,光的最大功能是被用作信息载体。文字、图画、照片蕴藏的大量信息,要用光来读出;物体的信息通过光,再经成像系统如透镜、放大镜、望远镜转换成可用的信息,或被记录下来,或利于观察。粗略估计,人类约有80%以上的信息,是由眼睛接收的,或说是由光来传递的。有些信息,诸如复杂的电路图、机械零件图,恐怕只能用眼睛接收,用语言文字是无法表达清楚的。大多数仪器都把最后结果转换成能用眼来观察的形式,因为只有眼睛才能快速处理数量巨大而又需准确传递的信息。现代生活中,各种显示屏幕、传真机、可视电话、光学材料、视觉艺术制品等日新月异,层出不穷,并形成众多产业。作为科技人员,在他的知识结构中,自然需要光学知识作为支撑。

光学是历史最悠久的学科之一。在中国可上溯到墨子的《墨经》(公元前5世纪),在欧洲可追溯到欧几里德的《光学》(公元前3世纪)。眼镜的发明在700年前(1299, Armati),望

远镜(1608, Lippershey)、显微镜(1656, Fonata)也有 300 多年的历史。

光学中最早成熟的是几何光学,它以几何线条描述光的传播,用反射定律及折射定律计算几何线条的屈折。虽然它不给出光线在反射及折射时能量的分配,却是设计透镜时的主要工具。放大镜、望远镜、照相机以及近十年出现的变焦镜头,都是几何光学的辉煌成果。

1801 年,杨(Thomas Young)以双缝干涉实验证明光是一种波动,并从实验测定了光的波长。麦克斯韦(Clark Maxwell)在 1873 年用法拉第电磁感应定律及推广了的安培环路定律导出电磁波方程式,从方程中算出电磁波的速度与当时已知的光速十分接近,麦克斯韦断言光是电磁波,从此诞生了波动光学(也称物理光学)。光波的衍射、干涉、偏振,不是几何线条所能描述得了的,它具有几何语言无法描述的更丰富的物理内涵。波动光学不但导致了許多干涉计量仪器的发明,把许多物理量的测量精度提高了许多倍,还把人类的知识领进微观世界。几何光学使人类首次看到细菌(显微镜),而波动光学则使人类首次“看见”原子结构(氢原子光谱及其精细结构)。

至 1960 年,人类利用光已有漫长的历史,但所使用的光都是非相干光,即含有各种波长、相位极其杂乱的光波,用通信工程师的话说,非相干光全是噪声。通信工程师经过数代人的努力,把载波频率从几百千赫(中波广播)推进到几百吉赫兹(GHz, $G=10^9$ 毫米波),以提高通信的容量及速率。但要把频率提高到光频波段(10^{14} Hz)就无能为力了。解决这个难题的是物理学,1960 年制造出第一支激光器,辐射出很强的相干光。激光为信息产业带来巨大变革,光纤通讯、激光唱盘、激

光视盘、全息记录等已经很普遍了。有人说 21 世纪是光学世纪, 一个重要的依据是光频很高, 可载大量信息。

本书第一章介绍几何光学的基本知识及原理, 以及在各种光学仪器中的应用; 第二、三、四章分别介绍物理光学的干涉、衍射、偏振, 及其在干涉计量中的应用; 第五章介绍光和物质相互作用的种种现象及其物理解释。

本书希望能向一个应用物理系大学生的知识结构提供较坚实的 optics 基础。学完本书, 应能对光学现象及其物理本质有较深刻的了解。但如想在某些专题中深入和展开, 还请钻研更专门的书籍和文献, 这就不是本书的篇幅和任务所能承担的了。

内 容 简 介

本书是《大学物理教程》的《光学》分册。光学是一门古老的学科,又是一门迅速发展的学科。本书突出光学的基本概念和原理的论述,在内容取舍方面精简了传统光学的内容,给现代光学内容留下较多的篇幅。书中介绍了许多应用实例,如激光、光纤通信、光盘等,以传递较多的现代技术信息,开阔读者眼界。

本书适合大学一二年级学生、科技人员、大中学物理教师及自学者参考阅读。

目 录

第一章	几何光学	(1)
§ 1.1	几何光学基本定律	(1)
§ 1.2	薄透镜成像	(19)
§ 1.3	几何光学仪器	(30)
§ 1.4	光度学概要	(37)
	习题	(48)
第二章	光的干涉	(53)
§ 2.1	光波的表示	(53)
§ 2.2	波的叠加和干涉	(60)
§ 2.3	两束光的干涉	(63)
§ 2.4	多束光的干涉	(86)
	习题	(98)
第三章	光的衍射	(102)
§ 3.1	惠更斯—菲涅耳原理	(102)
§ 3.2	夫琅和费单缝衍射	(105)
§ 3.3	菲涅耳半波带法	(111)
§ 3.4	夫琅和费矩孔衍射及圆孔衍射	(112)
§ 3.5	菲涅耳衍射	(123)
§ 3.6	衍射光栅	(133)
	习题	(138)
第四章	光的偏振	(142)
§ 4.1	自然光和偏振光	(142)
§ 4.2	菲涅耳公式	(151)

§ 4.3	双折射现象	(164)
§ 4.4	偏振片及波片	(171)
习题	(177)
第五章	光和物质的相互作用	(179)
§ 5.1	光和物质相互作用现象	(179)
§ 5.2	稀薄气体的光学性质	(180)
§ 5.3	导电介质的光学性质	(185)
§ 5.4	稠密介质的折射率、色散与吸收	(189)
§ 5.5	物体的颜色	(194)
§ 5.6	光的散射	(197)
§ 5.7	光的速度	(200)
习题	(207)
习题答案	(209)

第一章 几何光学

几何光学的三条定律——直线传播、反射定律与折射定律,以及薄透镜成像公式,在高中课本里已讲过,不作为本章的重点。本章的重点是将这三条定律应用到成像系统中,阐明一个好的成像系统应满足什么要求,影响成像质量的因素是什么,以及决定像的明亮程度的因素是什么,等等。

§ 1.1 几何光学基本定律

光本质是波动,但在描述光的传播过程时,既可用波动的图像,也可用光线即光的传播方向来描述。下面的几个图表明这两种描述方法是等价的。几何光学采用后一方法,因为数学上处理直线要比曲面容易得多。

光的直线传播定律、光的独立传播原理及光的反射与折射定律,统称为几何光学基本定律。

(一)光的直线传播定律

在均匀介质(如均匀的空气、均匀的液体)里,光是沿直线传播的。针孔成像、物体的影子、日蚀月蚀,都是光直线传播的例证。人类所以能用眼睛来对物体定位、瞄准,也是基于这一定律。人们眼前看见的东西,总认为确在前方;动物会绕到镜子后面去找自己的像。但不自觉地运用某种经验与从现象中提取出某种规律,是截然不同的两回事。这里只是说明,人们对光的直线传播已习以为常。当光在不同介质(如空气和玻

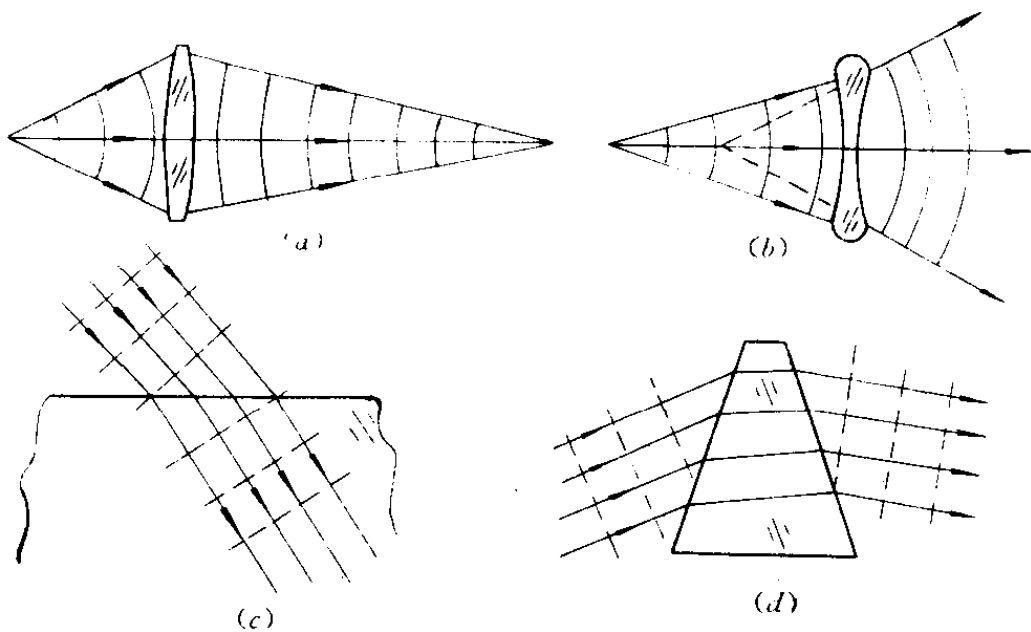


图 1.1.1 光波与光线

(带箭头的直线为光线,不带箭头的线为波面)

(a)凸透镜成像;(b)凹透镜成像;(c)平面上折射;(d)棱镜折射。

璃)的分界面反射、折射,或在不均匀介质(如密度不均匀的空气)中走一曲线时,人们反而感到迷茫。半张圆桌上树一大镜,观众总认为这是一张整圆桌,其实后面藏着魔术师。万花筒、哈哈镜、大型幻术、豪华的室内装饰中众多的镜子与玻璃镶嵌,都是利用人们根深蒂固的光总直线传播的经验,来产生意料不到的视觉效果。

按照光直线传播定律,可用有向直线表示光在均匀介质中的传播,这一几何直线就叫光线。物体靠反射、散射或自身发光,从每一点发出许多条光线,组成光束。实际的光接收器,如照相机、眼睛,都不是只接收一条光线,而是许多点发出的许多光束。有时为了简便,画图时常取几条光线作为代表,这也遵从语言表达的基本原则,越简洁越好。

(二)光的独立传播原理

两条光线在传播过程中相交后,各自保持原来的特性(颜

色、传播方向等)继续传播,不因相遇而发生改变。这一原理说明光更近于波动而不像粒子流。波动的传播是独立的,因此我们才能欣赏一幅图画。不然图画上的红色光和蓝色光在传到眼睛的过程中互相干扰,我们便什么也看不清了。这种情形和声波的传播类似,在闹市上我们能清楚地听到亲人的呼唤,从嘈杂的叫卖声中把亲人的特有声音选择出来。而粒子流则不同,粒子流相遇后,通常都会互相干扰,其速度大小及方向会发生变化,不会保持原状态继续向前传播。

(三)光的反射定律与折射定律

光线入射到两种介质的分界面上,会发生反射与折射。入射线与界面法线所决定的平面称入射平面,入射线与界面法线之间的夹角叫入射角 i 。反射线、折射线与界面法线的夹角分别叫反射角 i' 、折射角 r (见图 1.1.2)。

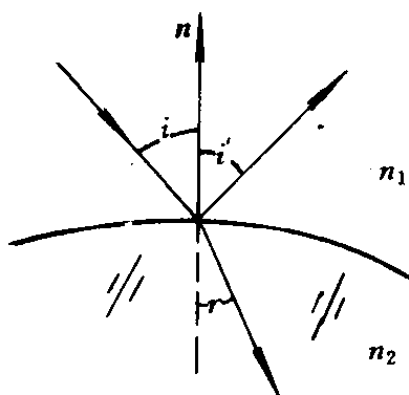


图 1.1.2 光线的反射与折射

(n 是界面法线方向,入射角 i 、反射角 i' 、折射角 r 均从法线量起)

反射定律 反射光线在入射面内,且反射角 i' 等于入射角 i 。

折射定律(Snell 定律) 折射光线在入射平面内,折射角 r 与入射角 i 满足:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

式中 n_1 ——入射线所在介质的折射率；

n_2 ——折射线所在介质的折射率。

规定真空(空气)的折射率为 1。

利用折射定律,可以测定透明的均匀介质的折射率。例如水, $n = 1.33$, 普通玻璃的折射率约为 1.5, 一些含铅的玻璃有较大的折射率, 可达 1.6 ~ 2.0 之间, 称为重火石玻璃。钻石(是晶体, 不是玻璃)的折射率很大, 达 2.4。

傅科(Foucault)1850 年用实验证明了光在水中的速度要比空气中慢, 正好符合 200 年前惠更斯的波动说。折射率为 n 的介质中的光速是真空中光速的 $1/n$ 。牛顿的三棱镜分光实验证明, 折射率 n 不但和介质有关, 对于同一种介质, n 还取决于光波的波长(颜色), n 对波长的依赖关系叫该种介质的色散。图 1.1.3 是 100% 的石英玻璃(SiO_2) 的色散曲线。通常在可见光波段($4000 \text{ \AA} = 400\text{nm} \sim 7000 \text{ \AA} = 700\text{nm}$) 透明的介质, 都是波长越长, 折射率越小。

介质的色散由材料本身决定, 但不同波长的光透过介质后是否分开, 不但取决于介质的色散, 还取决于入射及出射时与界面的夹角。例如, 当入射角 $i = 0$ 时, 折射角 $r = 0$, 与 n 无关, 各种波长的光都不会分开。许多使光路屈折或把倒立的像正过来的棱镜, 都设计成入射光与出射光均垂直于界面, 尽管光线在棱镜中经多次反射, 但反射是无色散的, 这就避免了色散对成像造成的有害影响。

有些棱镜用于光谱分析, 这时色散是有用的, 因为光谱分析正是要把入射光中各种不同波长的光分开。这种棱镜的入射光不能垂直于界面, 出射时也不能垂直于界面。

反射定律与折射定律不涉及入射光、反射光和折射光的

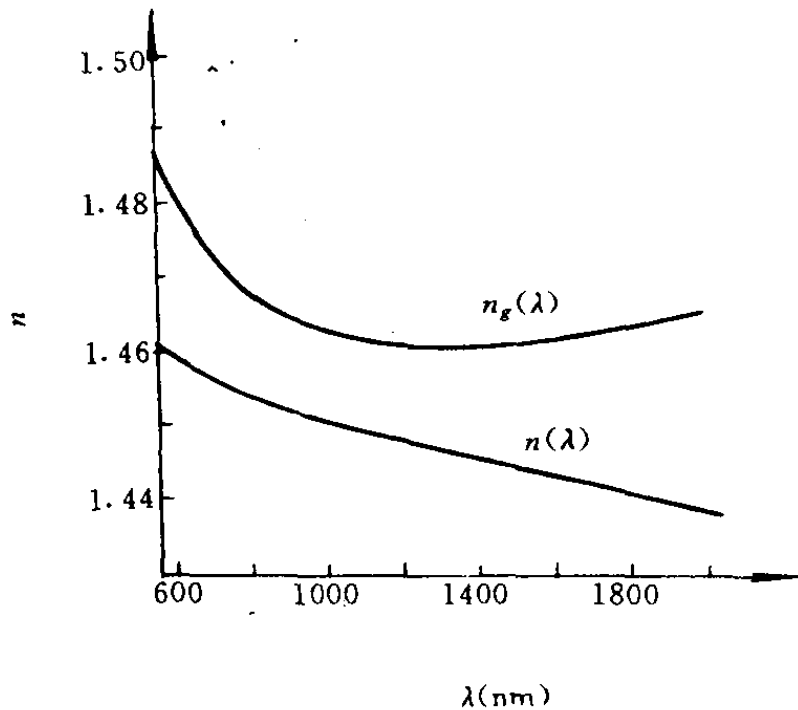


图 1.1.3 100%SiO₂ 的折射率 n 随波长的改变($n(\lambda)$ 曲线)

(图中 $n_g = n - \lambda \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)$, 是与光波的群速度有关的群折射率)

物理内容(如强度、偏振状态等),只是纯几何的表述。光的许多物理内涵将在物理光学中分别介绍。

(四) 光线可逆性原理

反射定律与折射定律中,如果把光线的传播方向反过来,定律依然正确,光线是可逆的。

利用上述基本定律,主要是折射定律与反射定律,可以计算物体上每一点发出的若干条光线经过一系列透镜(或反射镜,大型天文望远镜均用反射镜)的轨迹,光学设计人员称之为光线追迹。透镜设计的大部分工作,就是进行光线追迹计算。60年代,这种计算尚用八位对数表及手摇计算机,现在用微型计算机或大型机,速度提高了上万倍。

(五) 费尔马(Fermat) 时间最短原理

光的直线传播启发了费尔马,他在 1657 年提出时间最短原理——“自然界的行为永远以路程最短为准则。”费尔马把着眼点从光学转到整个自然界,把一个光学命题提升为哲学命题,不免有些武断,但他这种把特殊规律上升为普遍规律的方法,却对后来的牛顿力学、量子力学、量子场论的发展,很有影响。

按照费尔马时间最短原理,光从一点传播到另一点时,所选择的路径永远是时间最短的一条。两点间直线最短,光的直线传播是时间最短原理的自然结果。在反射中,用简单的几何关系就能从费尔马原理导出反射定律。但在折射中必须先解决从路径转换为时间的问题。如果光在不同介质中速度都相同,就不会有折射现象,所以费尔马假设不同介质对光的“阻力”不同。下面分别介绍如何从费尔马原理证明反射定律和折射定律。

(1) 反射定律

在图 1.1.4 中,经镜子反射从 A 到 B 有许多路径,光线只走时间最短的一条。为比较折线的长短,可作 A 在镜中的对称点 A' (A 的像),利用三角形的全等关系,所有从 A 经反射到 B 的路径的长短,均可用像点 A' 到 B 的路径代替。由图可见,时间最短的路径只有直线 $A'FB$,对应的实际路径是 AFB ,再用简单的几何关系可以证明此时正好满足反射定律——反射线在入射平面内,反射角等于入射角。

(2) 折射定律及光程

费尔马假定,光在不同介质中传播时,所用时间不但正比于路径的长度 s ,且反比于介质折射率 n 。为便于在时间上作比较,一律按时间相等为准则,把实际的几何路程 s 折合成真空中的路程,这个折合路程就叫光程: