

JICHU WULI XUE

基础物理学 下

过祥龙 董慎行 编著

苏州大学出版社



基础物理学(上、下册)
过祥龙 董慎行 编著
责任编辑 陈兴昌

苏州大学出版社出版发行
(地址:苏州市十梓街1号 邮编:215006)
镇江前进印刷厂照排
丹阳兴华印刷厂印装
(地址:丹阳市胡桥镇 邮编:212313)

开本 787×1092 1/16 印张 38 字数 948 千
1999年2月第1版 1999年2月第1次印刷
印数 1-4500 册

ISBN 7-81037-501-6/O·22(课) 定价:50元(上、下册各25元)

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换

前 言

大学理、工科非物理专业开设的基础物理课程的主要目的在于对学生进行科学素质教育和科学思维方法的培养,课程内容是每个理工科大学生必备的知识.但是,目前的教学内容存在不少问题,如与中学物理的教学内容重复,经典内容过多而近代物理和非线性物理等内容没有得到适当的反映等,这与当前的科学技术发展是极不相称的.为此,我们在1993年就开始着手准备编写这本教材.在编写过程中结合了多年非物理专业的基础物理教学实践,并广泛参考国内外优秀同类教材,力图博采众长.本教材内容主要有以下几个方面的特点:

1. 注重物理基本概念和基本规律的阐述,尽量避免繁琐的数学推导,数学知识定位在微积分初步.考虑到当前中学物理教学水平的提高,本教材将和中学物理拉开距离,去掉与中学物理内容重复的部分.

2. 力求体系和结构的合理性,教材内容覆盖物理学的各个分支,物理学发展前沿及许多新课题也在教材中得到反映.全书分上、下两册.

3. 精编例题和习题.选编例题和习题的主导思想是有利于扩展学生的视野;有利于培养学生学习物理的能力.作为一种尝试,本教材编入了一定数量的用计算机演示或数值计算的习题.

4. 本教材的讲授时数在120学时~160学时之间,适用于理工科非物理专业的基础物理课程的教学.教材内容和习题都有不同层次的编排,便于师生在此基础上进行取舍,因而也可以作为90学时左右课程的学校使用.

在本书的编写过程中得到了苏州大学物理科学与技术学院领导和教师的大力支持,并提出许多宝贵意见;苏州大学出版社对本书的出版作了大力支持和有益的指导,在此表示衷心感谢.

本书中难免有疏漏和错误之处,竭诚欢迎广大教师和读者指正.

编 者

1998年12月

目 录

第 3 篇 光 学

第 17 章 几何光学

17.1 几何光学的基本定律.....	(3)
17.2 成像的基本概念.....	(9)
17.3 单球面折射和反射成像	(12)
17.4 薄透镜	(16)
17.5 透镜的像差	(25)
习 题	(27)

第 18 章 光的干涉

18.1 分波前干涉	(30)
18.2 薄膜干涉	(36)
18.3 迈克尔逊干涉仪	(43)
18.4 光波的空间相干性和时间相干性	(46)
习 题	(48)

第 19 章 光的衍射

19.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理.....	(54)
19.2 单缝的夫琅和费衍射	(56)
19.3 多缝的夫琅和费衍射	(61)
19.4 衍射光栅	(66)
19.5 圆孔的夫琅和费衍射 最小分辨角	(70)
19.6 X 射线在晶体上的衍射	(73)
19.7 全息照相	(75)
习 题	(78)

第 20 章 光的偏振

20.1 光的横波性	(82)
20.2 偏振片 马吕斯定律	(84)
20.3 反射光和折射光的偏振	(87)
20.4 光的双折射	(89)
20.5 波片 偏振态的检验	(94)

20.6 偏振光干涉	(96)
习 题	(99)

第 4 篇 热 学

第 21 章 热力学第一定律

21.1 平衡态 状态参量	(105)
21.2 热力学第零定律 温度	(106)
21.3 理想气体的宏观描述	(108)
21.4 热力学第一定律	(110)
21.5 热力学第一定律的应用	(113)
习 题	(116)

第 22 章 气体分子动理论

22.1 气体分子动理论的压强公式	(120)
22.2 温度的微观解释	(122)
22.3 理想气体的热容	(125)
22.4 绝热过程	(127)
22.5 能量均分原理	(129)
22.6 麦克斯韦分子速率分布律	(134)
22.7 分子平均自由程	(138)
22.8 范德瓦尔斯方程	(139)
22.9 气体的输运现象及其宏观规律	(142)
习 题	(144)

第 23 章 热力学第二定律 熵

23.1 热机 热力学第二定律	(150)
23.2 可逆过程和不可逆过程	(153)
23.3 卡诺循环 卡诺定理	(154)
23.4 热力学温标	(158)
23.5 熵	(159)
23.6 不可逆过程中的熵增 熵增加原理	(162)
23.7 热力学第二定律的统计意义	(165)
习 题	(168)

第 5 篇 近代物理基础

第 24 章 量子理论的起源

24.1 黑体辐射和普朗克的量子假设.....	(173)
24.2 光电效应.....	(177)
24.3 康普顿效应.....	(180)
24.4 玻尔的量子假设与玻尔模型.....	(183)
习 题.....	(187)

第 25 章 量子力学基础

25.1 德布罗意假设 实物粒子的波粒二象性.....	(190)
25.2 不确定关系.....	(192)
25.3 波函数与薛定谔方程.....	(194)
25.4 一维势阱.....	(197)
25.5 势垒与隧道效应.....	(198)
25.6 谐振子.....	(201)
习 题.....	(202)

第 26 章 原子 分子与固体

26.1 氢原子的量子理论.....	(205)
26.2 元素周期表.....	(209)
26.3 分子与分子光谱.....	(216)
26.4 激 光.....	(221)
26.5 固体的能带理论.....	(224)
26.6 超 导.....	(229)
习 题.....	(231)

第 27 章 原子核与基本粒子

27.1 原子核的组成与结合能.....	(233)
27.2 核自旋和核磁矩 核磁共振.....	(236)
27.3 核衰变.....	(238)
27.4 穆斯堡尔效应.....	(242)
27.5 核反应 裂变和聚变.....	(242)
27.6 基本粒子简介.....	(248)
习 题.....	(251)

第 28 章 宇宙学基础

28.1 宇宙学原理.....	(254)
28.2 宇宙膨胀.....	(255)
28.3 早期宇宙的遗迹——3K 微波背景辐射	(256)
28.4 大爆炸模型.....	(256)
28.5 天体演化 黑洞.....	(258)

部分习题参考答案

.....	(260)
-------	-------

附录

1. 常用物理常量(1986 年推荐值)	(265)
2. 用于构成十进倍数和分数单位的词头	(267)
3. 历年诺贝尔物理学奖获得者及其研究成果	(268)

第 3 篇

光 学

第 17 章 几何光学

17.1 几何光学的基本定律

17.1.1 光的概述

实验和理论都证明,光是电磁波,称为光波.光波在整个电磁波中只占很窄的波段.能为人类的眼睛所感受的可见光,只是波长 $\lambda=4\times 10^{-7}\text{m}\sim 7.6\times 10^{-7}\text{m}$ 范围的电磁波.在可见光范围内不同波长的光引起人眼不同颜色的感觉.波长与颜色的对应关系见下表:

红	橙	黄	绿	青	蓝	紫
---	---	---	---	---	---	---

760 630 600 570 500 450 430 400(nm)

在电磁波谱中与可见光波段衔接的,短波一侧是紫外线($4\times 10^{-7}\text{m}\sim 5\times 10^{-9}\text{m}$),长波一侧是红外线($7.6\times 10^{-7}\text{m}\sim 10^{-4}\text{m}$).一般所讨论的光波是指紫外至红外波段的电磁波.

在光学中常用的波长单位是米(m)、纳米(nm)以及微米(μm),埃(\AA)也是光波的常用单位,它们的换算关系如下:

$$1\text{\AA}=10^{-10}\text{m},$$

$$1\text{nm}=10^{-9}\text{m},$$

$$1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}.$$

任何波长的电磁波在真空中传播速度都是相同的,这个速度也是光在真空中传播的速度,通常用 c 表示.光速 c 在 1986 年的推荐值为

$$c=299\,792\,458\text{m/s},$$

常取

$$c\approx 3\times 10^8\text{m/s}.$$

利用下式从波长 λ 可以换算出频率 ν ,

$$\nu=\frac{c}{\lambda}.$$

例如,波长范围为 $4.0\times 10^{-7}\text{m}\sim 7.6\times 10^{-7}\text{m}$ 的可见光,对应的频率范围是 $7.5\times 10^{14}\text{Hz}\sim 3.9\times 10^{14}\text{Hz}$.

光的强度,称为光强,常用字母 I 表示.光强是指单位面积上的平均光功率,它由坡印廷矢量(能流密度) $S=E\times H$ 的平均值确定.可以算得

$$I=\overline{S}=\frac{n}{2c\mu_0}E_0^2\propto nE_0^2.$$

其中 E_0 为光矢量的振幅, n 为介质折射率, $n=\frac{c}{v}$ (v 为介质中光速).在同一介质里,人们往往只关心光强的相对分布,因此常把光的(相对)强度写成振幅的平方

$$I=E_0^2.$$

但是,在比较两种介质里的光强时,比例系数中的折射率 n 应该计及,即 $I=nE_0^2$.

只包含单一波长的光称为单色光,否则是非单色光.非单色光的光强是按波长 λ 分布的,称为光谱.实际上,波长为 λ 的单色光的光强都是分布在波长 λ 附近的范围 $\Delta\lambda$ 内的. $\Delta\lambda$ 称为谱线宽度(有关谱线宽度 $\Delta\lambda$ 的定义见 18.4 节). $\Delta\lambda$ 越小,光的单色性越好.若干元素的普通光源和激光器的典型谱线列于表 17-1.

表 17-1 典型谱线

元素	谱线 λ/nm	颜色	元素	谱线 λ/nm	颜色
钠	589.0, 589.6	黄(D 双线)	氢	410.2	紫
汞	404.7, 407.8	紫		434.0	蓝
	435.8	蓝		486.1	青绿(F 线)
	546.1(最强)	绿		656.3	橙红(C 线)
	577.0, 579.1	黄	氦氖激光	632.8	红
镉	643.8	红	氦离子激光	488.0	青
氦	605.7	橙		514.5	绿

应该指出,在光波中,产生感光作用与生理作用的是电场强度 E ,而不是磁场强度 H ,因此称 E 为光矢量, E 的振动为光振动.

17.1.2 几何光学三定律

按照波的传播规律,任何一个光源都是一个波源,在传播过程中,任一瞬间扰动所达到空间各点的集合称为波阵面或波面.波面可以是平面、球面或其他曲面.光线则是指光波能量传播方向的线,也就是电磁波里坡印廷矢量 S 的方向.在真空或者各向同性的介质中,光波的能量是沿着波面的法线方向传播的.这样,光线与波面的法线方向相当.用波面和光线两个概念来叙述光的传播,其效果是相同的.在几何光学中,运用光线这一概念,可以使叙述和计算大为简化,但是在讨论光学信息处理、全息术以及光学仪器的分辨本领等,这时必须运用波面概念来讨论.

有一定关系的一些光线的集合称为光束.显然,平面波对应平行光束,如图 17-1(a)所示;球面波对应于发散光束,如图 17-1(b)所示,或会聚光束,如图 17-1(c)所示.

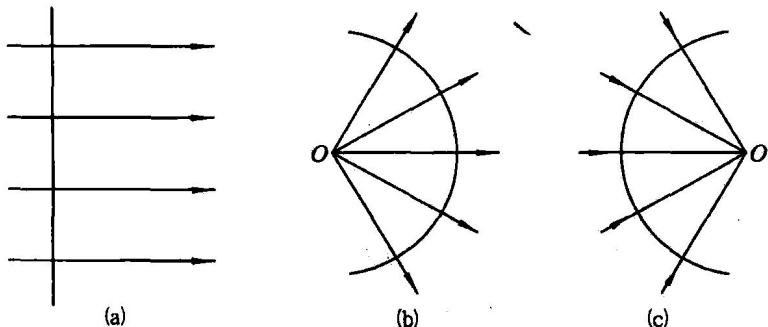


图 17-1

几何光学是以三个实验定律为基础建立起来的,它是各种光学仪器设计的理论根据.这三个定律就是,光的直线传播定律、光的反射定律和折射定律.

光的直线传播定律指光在均匀介质里沿直线传播.在点光源的照射下,不透明物

体背后出现清晰的影子,影子的形状与光源为中心发出的直线所构成的几何投影形状一致,如图 17-2 所示.这是人们熟知的光的直线传播事实.

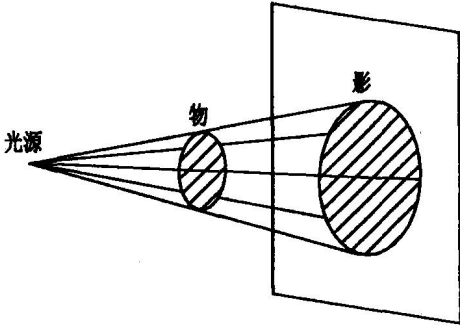


图 17-2

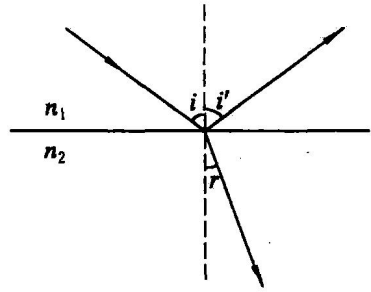


图 17-3

设透明介质 1 和 2 的分界面是平面,当一束光线入射到分界面上,一般情形下分解成两束光线,反射线和折射线,如图 17-3 所示.过入射点作界面的法线,入射线与该法线组成的平面称为入射面.入射角 i 、反射角 i' 以及折射角 r 的意义如图 17-3 所示.光的反射定律和折射定律的内容为:(1) 反射光线和折射光线都在入射面内;(2) 反射角等于入射角 $i' = i$;(3) 折射角与入射角间有关系式

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r, \quad (17.1-1)$$

式中 n_1, n_2 分别是两种介质的折射率,上式称为斯涅耳(W. Snell)定律.

介质的折射率和光的波长有关,几种透明介质对钠黄光(D 线,589.3nm)的折射率如表 17-2 所示.

表 17-2 介质的折射率

物 质	折射率 n	物 质	折射率 n
空气	1.00029	加拿大树胶	1.53
二氧化碳	1.00045	水晶	1.54
水	1.333	各种玻璃	1.5~2.0
乙醇	1.36	金刚石	2.417
甘油	1.47		

17.1.3 全反射 光纤

当光线从光密介质射向光疏介质时, $n_1 > n_2$, 从式(17.1-1)可以看出折射角 r 大于入射角 i , 如图 17-4 所示. 当入射角增至某一数值 i_0 时,

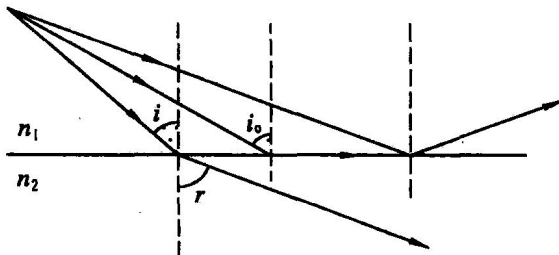


图 17-4

$$i_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}, \quad (17.1-2)$$

折射角 $r=90^\circ$; 当入射角 $i > i_0$ 时, 折射线消失, 光线全部反射, 这现象称为全反射, i_0 称为全反射(临界)角。

从能量的角度, 当发生全反射时, 入射光的能量全部集中到反射光中。

全反射现象有许多重要的应用, 目前发展起来的光学纤维(简称光纤), 就是利用全反射原理, 使光线沿着弯曲的路径传播。

通常, 每根光纤的直径在 0.002mm 到 0.1mm 之间, 一般由折射率较高 ($n=1.8$) 的玻璃纤维, 外包一层折射率较低(如 $n=1.4$) 的材料制成。当光线在光纤内发生多次全反射, 光就从一端传到另一端[图 17-5(a)]. 光纤有许多种类, 下面讨论芯料折射率是均匀的一种光纤。

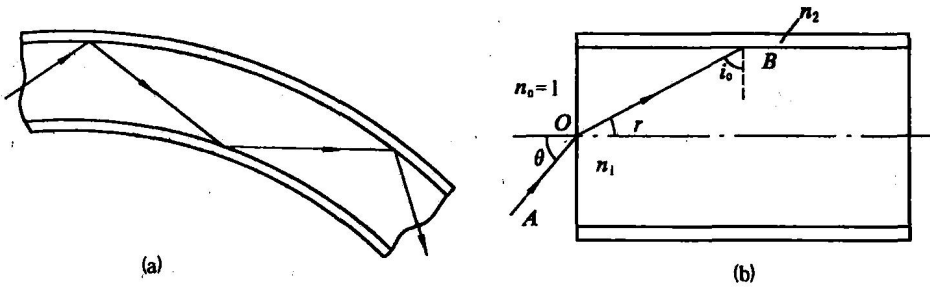


图 17-5

图 17-5(b) 中空气折射率 $n_0=1$, 芯料折射率为 n_1 , 外包材料的折射率为 $n_2, n_1 > n_2$. 图中 AOB 是一条临界光线, 光纤内光线 OB 的入射角等于全反射临界角 $i_0, \sin i_0 = \frac{n_2}{n_1}$. 按照斯涅耳定律, 空气中的入射线 AO 与它在芯料中的折射线 OB 间有关系式

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sin r, \quad (17.1-3)$$

而 $r + i_0 = \frac{\pi}{2}$, 所以 $\sin r = \cos i_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$. 因此,

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

$n_0=1$, 即

$$\sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

当入射线的入射角大于 θ 时, 光线在光纤内就不会发生全反射。能使光线在光纤内发生全反射的入射光束的最大孔径角, 就是满足(17.1-3)式的 θ 角, $n_0 \sin \theta$ 称为光纤的数值孔径。

光纤可以做得很细、很柔软, 并且能够弯成各种形状, 实用上把数十根甚至数百根光纤并在一起组成光缆。如果光缆两端各条光纤的排列次序严格对应, 它就能用来传播图像。能探入人体内部(如胃、膀胱)的内窥镜就是利用光缆的这种性质。

光纤的另一种重要应用是光纤通信技术。常用的电通信技术是用无线电波段的电磁波作为载波, 把信息变成电信号加在载波上, 使之沿传输线或在大气中传播出去。光纤通信技术, 是用光波作为载波, 把信息变成光信号加在载波光线上, 使之沿着光纤传播。光纤通信的主要优点是容量大、传输距离远。理论上光纤通信能同时容纳

100 亿个互不干扰的通话话路,或者同时传送1 000万套电视节目而互不干扰.这些都是现有通信的万倍以上.光纤通信的其他优点有抗电磁干扰能力强,保密性好,抗腐蚀、抗辐射能力也强,同时光纤很轻,节省建设经费(光纤的材料主要是硅酸盐)等.

17.1.4 光的可逆性原理

从几何光学的基本定律不难看出,如果图 17-3 中光线是逆着反射线方向入射,则它的反射线将逆着原来的入射线方向传播;再如光线逆着折射线方向由介质 2 入射,则其在介质 1 中折射线必将逆着原来的入射线方向传播.这表明,光线的方向逆转时,它将逆着同一路径传播,这个结论称为光的可逆性原理.这一原理对理解、思考一些光学问题将有所帮助.

17.1.5 色散与棱镜

前面已指出介质折射率有个重要性质,就是折射率 n 与光的波长有关.图 17-6 所示的是几种介质的折射率与光的波长关系曲线.

介质的折射率随着波长而变化的现象称为色散.大多数物质,折射率 n 随波长增加而减小,这种现象称为正常色散.实验表明,对于正常色散,介质的折射率 n 与波长的关系为

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

式中常数 A, B, C 均为正数,对于给定的介质,它们均由实验测定.上式称为科希(Cauchy)色散公式.大多数情形下上式右边第三项可以略去,于是得到

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

由于折射率 n 是波长 λ 的函数,按照斯涅耳定律,光线以相同入射角入射于两种介质的界面,不同波长的光有不同的折射角.图 17-6 所示介质折射率随波长增加而减小的情形,意味着蓝光通过折射介质时将比红光要弯曲得多.

为了帮助理解色散现象,让一束光线投射在棱镜的一个侧面,如图 17-7(a)所示.入射光线,经两个侧面的折射,其出射光线对入射光线夹的角度 δ 称为偏向角.如果投射的是一束白光,如图 17-7(b)所示,则从另一侧面出射的光,由于波长不同的单色光的偏向角 δ 不同,出射光中不同波长的单色光将分散开来,形成光谱.其中紫色光的偏向角最大,红色光的偏向角最小,其他颜色单色光的偏向角在这两极端值之间.

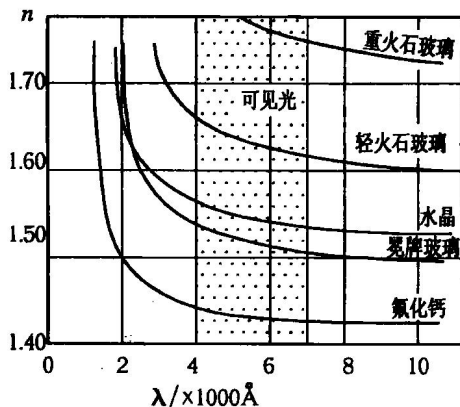


图 17-6

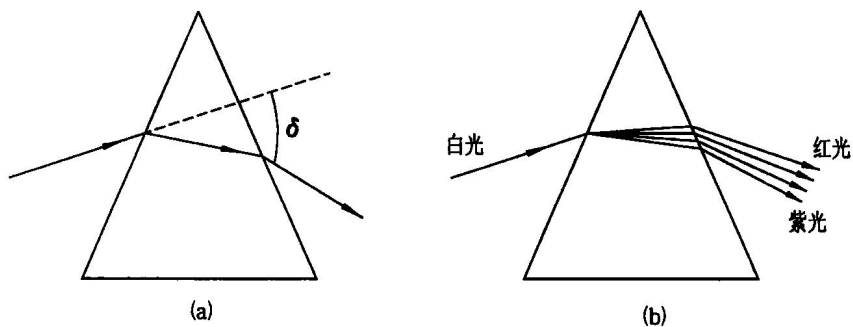


图 17-7

利用棱镜的分光作用,可以制成棱镜光谱仪,它的构造如图 17-8 所示.这种仪器通常是用来研究光源发射的光波的波长.从光源来的光,经狭缝调节成一束准直的平行光,这束光通过棱镜色散成一条光谱.用望远镜来观察出射光,从望远镜中观察到的是狭缝的像.移动望远镜,或者转动棱镜,就能观察到在不同偏向角位置,有不同颜色形成的像.

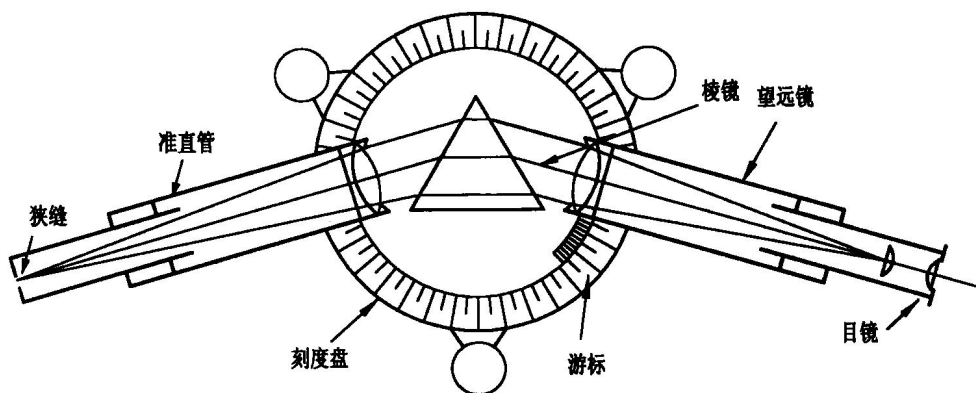


图 17-8

最后指出,除了正常色散现象以外,还有一种反常色散现象:折射率 n 随波长 λ 增加而增加.反常色散表示介质对这一波长范围光的吸收.

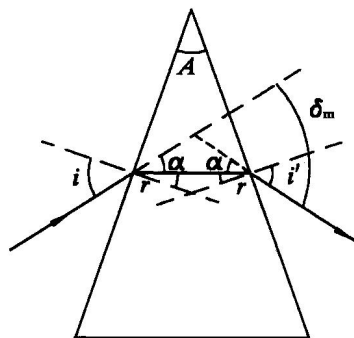
例 17-1 棱镜通常也用作测量透明固体的折射率.如图所示,一束单色光线投射在棱镜的一个侧面,调节入射角的大小,使得出射光线的折射角 i' 与入射角 i 相等,试导出此棱镜材料的折射率的表达式.

解 设 $i' = i$,棱镜的顶角为 A ,偏向角为 δ_m ,利用几何学中关系式,从图中可以得到

$$i = r + \alpha, \alpha = \frac{\delta_m}{2}, r = \frac{A}{2},$$

即
$$i = \frac{A + \delta_m}{2}.$$

从斯涅耳定律, $\sin i = n \sin r$, 即



例 17-1 图

$$\sin \frac{A+\delta_m}{2} = n \sin \frac{A}{2},$$

所以,

$$n = \frac{\sin \frac{A+\delta_m}{2}}{\sin \frac{A}{2}}.$$

因此,只要知道棱镜顶角 A ,以及测量 $i=i'$ 时的偏向角 δ_m ,就能通过上式计算出棱镜材料的折射率.注意,在 $i=i'$ 的安排下, δ_m 是偏向角最小值,称为**最小偏向角**,它的意思是无论使 i 增加或是减小,都会产生更大的偏向角.

17.2 成像的基本概念

17.2.1 光程

讨论光经过不同介质传播的问题,为了使问题讨论得到简化,必须用到光程概念.

单色光的振动频率 ν 在不同介质中是恒定不变的,在折射率为 n 的介质中,光速 v 是真空中光速的 $\frac{1}{n}$,

$$v = \frac{c}{n}.$$

因此,在这介质中,单色光的波长 λ' 将是真空中波长 λ 的 $\frac{1}{n}$,

$$\lambda' = \frac{\lambda}{n}.$$

光波在折射率为 n 的介质中传播,经过(几何)路程 l 所需的时间 Δt 为

$$\Delta t = \frac{l}{v} = \frac{nl}{c}.$$

由此得到,

$$nl = c\Delta t.$$

上式的意义非常明确,在相同的时间 Δt 内,光波在真空中传播的距离是介质中的 n 倍.光学中,将光波在某一介质传播的几何路程 l 与这介质折射率 n 的乘积,定义为**光程**,以字母 L 表示,

$$L = nl. \quad (17.2-1)$$

当光经过几种不同介质传播,从 A 点到达 B 点(图 17-9),光程按下式计算,

$$L = \sum_i n_i l_i.$$

如果介质的折射率连续变化,则光程为

$$L = \int_A^B n dl,$$

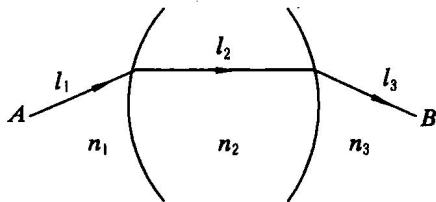


图 17-9

其中积分沿光线的路径.

17.2.2 费马原理

光程的概念对几何光学的重要意义体现在费马原理中. 费马(P. de Fermat)用光程的概念高度概括了几何光学的三个基本实验定律. 费马原理表述为: 光线在两点间传播的实际路径, 与任何其他邻近路径相比, 其光程为极值(极值指极小值、极大值或稳定值),

$$\int_A^B ndl = \text{极值.}$$

若用严格的数学语言来表述, 就是光线的实际路径上光程的变分为 0, 即

$$\delta L = \delta \int_A^B ndl = 0.$$

由费马原理可以导出光的反射定律和折射定律. 作为对费马原理的理解, 读者可以证明, 从旋转椭球面一个焦点 F_1 发出的所有光线, 经旋转椭球面内表面反射, 反射线必相交于另一焦点 F_2 , 如图 17-10 所示.

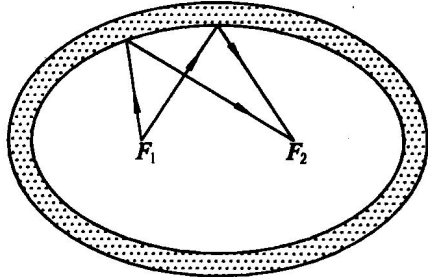


图 17-10

17.2.3 实物、虚物 实像、虚像

球心在同一直线上的若干反射面和折射面组成的光学系统, 称为共轴球面系统, 或称共轴光具组, 各球面球心的连线称为光轴. 平面是球面半径趋于无穷大时的极限情形.

如前所述, 有一定关系的一些光线的集合称为光束, 自一点发出的光束、会聚于一点的光束、或者光束的延长线相交于一点的光束, 皆称为同心光束. 在几何光学中, 把对光学系统入射的同心光束的顶点, 称为物点; 把经过光学系统后出射的同心光束的顶点, 称为像点, 如图 17-11 所示, 物点是 P , 像点是 P' . 光学系统使物点 P 成像于点 P' .

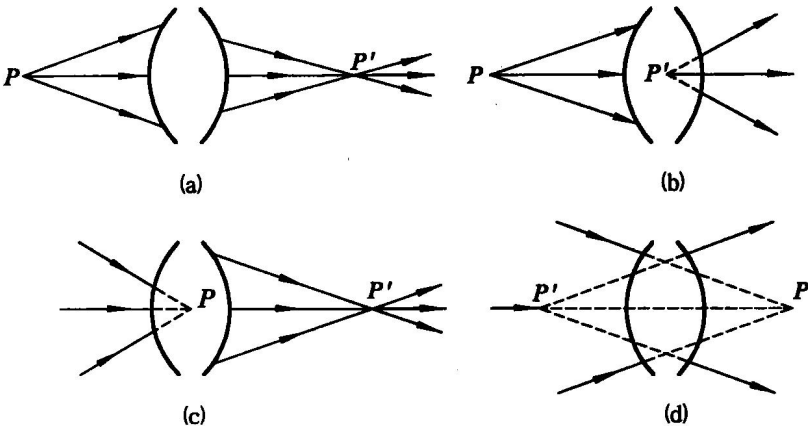


图 17-11

如果出射的同心光束是会聚的, P' 称为实像[图 17-11(a)、(c)]; 若出射的同心