



中国科学院实验技术人员岗位培训系列教材

光学技术基础

谢建平 文公玲 刘文清 编

科学出版社

中国科学院实验技术人员岗位培训系列教材

光学技术基础

谢建平 文公龄 刘文清 编

科学出版社

1996

内 容 简 介

本书结合光学技术的最新进展,以浅显易懂的语言论述了几何光学、光学仪器的基本知识,光的干涉、衍射、偏振、吸收和散射等物理光学的原理,以及光的量子特性、激光的基本原理和技术等。

本书适合光学研究机构中的实验人员及从事激光应用研究的人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

光学技术基础/谢建平等编. —北京:科学出版社,1996.8

中国科学院实验技术人员岗位培训系列教材

ISBN 7-03-004789-3

I. 光… I. 谢… II. 光电子技术-技术培训-教材 IV. TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 14046 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1996 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1996 年 8 月第一次印刷 印张: 11

印数: 1—1 700 字数: 261 000

定价: 15.00 元

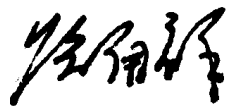
《中国科学院实验技术人员岗位培训系列教材》序

在人类即将进入 21 世纪之际,全国人大八届四次会议通过了《关于国民经济和社会发展“九五”计划和 2010 年远景目标纲要的报告》,报告提出了全面实现第二步战略目标并向第三步战略目标迈进的指导方针和主要任务,为全国人民确定了一个跨世纪的宏伟纲领。党中央提出的科教兴国的战略,是实施这一宏伟目标,强国富民,进行社会主义现代化建设的重大方针。科教兴国揭示了科技、教育与社会发展的内在关系,反映了科技、教育在社会主义现代化建设中的重要地位。科教兴国战略的提出对科技、教育的本身的改革和发展提出了更高、更紧迫的要求。

在科教兴国中,中国科学院作为科技国家队的战略定位,就是应该瞄准国家的目标,成为推动国家跨跃式发展的科学技术的创新源泉,成为为国家经济和社会发展提供基础性、关键性、综合性、战略性先进科技支撑的主要基地。中国科学院,对能够提高我国国际竞争力和经济建设有重大推动作用的科技前沿问题,要集中力量予以突破;在重要的科学前沿和对长远发展有着重要影响的基础性研究领域,要集中力量开拓创新;利用市场机制,联合社会生产要素,促进我国高技术产业的发展;利用长期的科学积累、多学科的综合优势、先进的观测及信息处理手段和科学方法,为社会的持续发展提供科学方法和依据;积极为社会培养和输送高水平的创新人才;在高层次上为国家经济建设、社会发展的科技决策提供咨询、建议。面对 21 世纪的挑战,面对科教兴国的重任,中国科学院始终重视高科技人才的培养。多年来,中国科学院在研究生培养、出国留学派遣和继续教育、在职培训方面做了大量工作,并在促进科研工作、改善科研队伍结构、提高科研队伍素质等方面取得了显著成绩。

为了使我院广大的实验技术人员适应现代实验技术工作的需要,我院教育部门在多年工作的基础上,组织有关科技人员编写出版了《中国科学院实验技术人员岗位培训系列教材》。这套教材,经过多年培训试讲和修改日趋完善,它既是实验技术人员培训用书,也是参加编写工作的科技人员辛勤劳动的成果。

国运兴衰,系于科教。我们要认真落实科教兴国的战略方针,为培养跨世纪的各类高科技人才奠定坚实的基础,满怀信心地去迎接 21 世纪,使社会主义中国以现代化的崭新面貌屹立于世界。



1996 年 5 月 7 日

(路甬祥系中国科学院、中国工程院院士,中国科学院常务副院长)

前 言

光学现象在人们认识自然界中起着极为重要的作用,人们由五官从周围世界感知和获取的信息中以眼睛的最主要。人类经过长期的实践和研究,知道了光是一种电磁波,其波长极短,它不仅能携带能量,而且也是传递信息的载体。

二十世纪 60 年代,激光的出现使得光学学科发生了革命性的变化,出现了许多新兴的分支学科,如激光物理学、激光光谱学、非线性光学、集成光学、傅里叶光学和光学信息处理、光纤光学和光纤通信、光电子学等等。这些学科的发展又促进了相应技术的发展,使得近代光学技术已成为发展高技术产业的重要支柱。

纵观国内外的光学进展情况,在过去 30 年中都相继出现了不少专业性的光学研究机构,其中的实验人员都需要有一个了解和熟悉光学基础及其技术的过程。本书的目的在于帮助这类读者缩短这一过程,尽快地获得必要的光学技术基础。本书对其他行业中从事激光应用研究的人员也具有参考价值。

本书包括几何光学、光学仪器的基本知识;光的干涉、衍射、偏振、吸收和散射等物理光学的原理;以及光的量子特性、激光的基本原理和技术等方面的内容。全书的侧重点是在光学图像、光学基本概念以及光学实验技术上。全书力求少而精、浅近易懂,而不追求全面、系统和严格的理论描述。

本书编写大纲和全书修改定稿由谢建平负责,书中第一章由谢建平编写,第二、第三章由刘文清和文公岭编写。本书虽然是经过一定的教学实践后写成的,但由于时间和经验方面的限制,难免有不少不妥之处,谨请读者批评指正。

编 者

1995 年 5 月

目 录

《中国科学院实验技术人员岗位培训系列教材》序	(i)
前言	(iii)
第一章 几何光学	(1)
引言	(1)
1.1 几何光学的基本定律	(4)
1.1.1 光的直线传播定律	(4)
1.1.2 光的反射定律	(5)
1.1.3 光的折射定律	(6)
1.1.4 全反射定律	(9)
1.1.5 费马原理	(11)
1.2 透镜的成像规律	(12)
1.2.1 焦点、焦距和焦平面	(13)
1.2.2 透镜的类型	(14)
1.2.3 透镜成像	(15)
1.2.4 薄透镜组	(17)
1.2.5 角放大率	(18)
1.2.6 球面镜成像	(20)
1.3 光学仪器	(23)
1.3.1 眼睛	(23)
1.3.2 放大镜	(25)
1.3.3 显微镜	(28)
1.3.4 望远镜	(31)
1.3.5 照相机	(34)
1.3.6 投影仪器	(38)
1.3.7 棱镜光谱仪	(38)
1.4 光度学	(41)
1.4.1 辐射通量和光通量	(41)
1.4.2 发光强度	(42)
1.4.3 照度	(43)
1.4.4 亮度	(44)
1.4.5 余弦发射体	(44)
1.4.6 光学仪器像面的照度和亮度	(45)
第二章 物理光学	(49)
引言	(49)
2.1 光的干涉	(49)
2.1.1 光波的性质	(49)

2.1.2	分波面干涉	(55)
2.1.3	分振幅干涉(薄膜干涉)	(60)
2.1.4	干涉现象的应用	(67)
2.2	光的衍射	(79)
2.2.1	衍射现象的实验规律	(79)
2.2.2	惠更斯原理	(80)
2.2.3	单狭缝的夫琅和费衍射	(84)
2.2.4	光栅的夫琅和费衍射	(87)
2.2.5	光栅光谱仪	(91)
2.3	光的偏振	(96)
2.3.1	光波是横波	(96)
2.3.2	界面反射中的偏振效应	(99)
2.3.3	晶体中的双折射现象	(104)
2.3.4	晶体光学元件	(110)
2.3.5	电光效应	(116)
2.4	光的吸收和散射	(120)
2.4.1	光吸收的基本规律	(120)
2.4.2	光散射现象	(122)
2.4.3	喇曼散射	(123)
第三章	光的量子特性和激光	(125)
	引言	(125)
3.1	光电效应	(127)
3.1.1	光电效应的实验规律	(127)
3.1.2	光子及光电效应的解释	(128)
3.1.3	光电检测器件	(130)
3.2	激光的基本原理	(136)
3.2.1	激光介质的原子能级	(136)
3.2.2	激光介质中的光辐射	(138)
3.2.3	激光的结构与原理	(141)
3.2.4	常用激光器	(147)

第一章 几何光学

引言

长期以来的科学理论和实验都证实了光,是一种频率极高的电磁波。以可见光为例,其频率在 10^{14} — 10^{15} 赫兹(Hz)。一束光在空间传播,在某一定点观察时,光波的电场和磁场都随时间作交替的变化,如图 1.1(a)所示。电场或磁场变化中的最大值 E_0 或 H_0 ,称为电场或磁场的振幅,也称为光波的振幅。振幅愈大光波愈强,或者说光强度愈大。振幅是表示光波强弱的物理量。光强度正比于振幅的平方,

$$I \propto E_0^2 (\text{或 } H_0^2), \text{ 一般写成 } I = E_0^2 \quad (1.1)$$

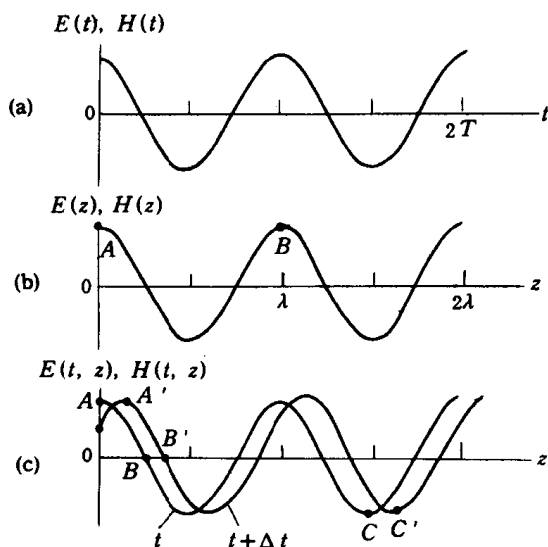


图 1.1 光波的电场和磁场随时间变化(a)、随空间位置变化(b)和传播中(c)的图像

光波电场或磁场完成一次全振动所需要的时间称为周期,用 T 表示,由图 1.1(a)可见,电场和磁场的振动周期是相同的。周期为 T 的光波在单位时间 1 秒内完成的全振动次数叫做光波的频率 ν ,

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (1.2)$$

可见光的振动周期就非常短,只有 10^{-14} — 10^{-15} 秒。周期和频率都是表示光波振动快慢的物理量。

图 1.1(a)所示的光波电场和磁场随时间变化的图形可用三角函数来描述,

$$\begin{cases} E(t) = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \\ H(t) = H_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \end{cases} \quad (1.3)$$

式中, E_0, H_0 分别为电场和磁场的振幅, T 为光波周期。括号中的 $\frac{2\pi}{T}t$ 叫做光波随时间变化的位相。当 $t=0$ 或 nT (周期的整数倍) 时, $\frac{2\pi}{T}t = 0^\circ, 360^\circ, 720^\circ \dots$, 相应地在这些时刻上 $E(t)$ 和 $H(t)$ 都处于最大值的振动状态; 当 $t=T/4, 5T/4 \dots$ 时, $E(t)$ 和 $H(t)=0$, 即振动状态都处于振幅为零, 由正值向负值变化的状态。因此, 位相 $\frac{2\pi}{T}t$ 不仅表示了 $E(t)$ 和 $H(t)$ 在 t 时刻上振幅的大小, 而且还表示出电、磁场的变化趋势, 它是描述光波振动状态的物理量。

图 1.1 (b) 表示同一时刻沿光传播方向 (z 轴) 上各点的电场和磁场变化的图像, 也呈周期性变化。振动状态相同的两邻近点的距离叫做波长, 用 λ 表示。如图上 AB 两点间的距离为波长, 因为这两点振幅都为最大值且相邻。同样, 图 1.1 (b) 的图像也可用下面的三角函数来表示:

$$\begin{cases} E(Z) = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}Z\right) \\ H(Z) = H_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}Z\right) \end{cases} \quad (1.4)$$

其中, $\frac{2\pi}{\lambda}Z$ 是光波随传播距离 Z 变化的位相, 它描述空间各点的振动状态。 t 时刻光波电场和磁场的振动状态经过 Δt 时间将沿 Z 向前传播一段距离 ΔZ , 如图 1.1 (c) 所示, $A, B, C \dots$ 的振动状态将分别传播到 $A', B', C' \dots$ 。那么光波的传播速度为

$$v = \frac{\Delta Z}{\Delta t}$$

由于光振动在一个周期内向前传播一个波长的距离, 上式又可表示成

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (1.5)$$

由图可知, $A', B', C' \dots$ 点的位相与相应的 $A, B, C \dots$ 点的位相相同, 即

$$\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}Z = \frac{2\pi}{T}(t + \Delta t) - \frac{2\pi}{\lambda}(Z + \Delta Z), \quad \frac{2\pi}{T}\Delta t = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta Z.$$

同样可以得到光波传播速度的表达式 (1.5)。光在真空中传播速度最大, 以 c 表示, 其值为

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

光在透明介质中的传播速度都小于真空光速 c , 例如光在空气、水和玻璃中的传播速度大约分别为 $v_{\text{空气}} \leq c, v_{\text{水}} = (3/4)c$ 和 $v_{\text{玻璃}} \approx (2/3)c$ 。

经过上面的讨论, 光在空间传播的图象可用下面的式子表示:

$$E(Z, t) = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}Z\right), \quad H(Z, t) = H_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}Z\right) \quad (1.6)$$

这里 $\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}Z$ 称为光波的位相。光在空间的传播形象地讲, 就是光波的电场和磁场是以余弦或正弦曲线在空间以光速前进; 在这一点, 如 $Z=0$ 的点上, 电场和磁场都随时间呈余弦或正弦变化; 在同一时刻沿传播方向上的各点的电场或磁场也呈余弦或正弦变化; 磁场和电场有相同的变化规律。

光波的电场 E 、磁场 H 及其传播方向 S (在前面我们说成 Z) 三者相互垂直, 我们可以用下面的方法来确定这三者的关系: 伸展右手, 四指由 E 向 H 弯曲, 竖起姆指所指的方

向即为 S , 如图 1.2 所示。

光是电磁波。然而有不少光学现象尚无需涉及光的这种波动性, 只需考虑光能量传播方向的变化规律, 就可以比较清楚地解释这些现象。一般是用直线或曲线来代表光能量传播的方向, 称为光线, 如图 1.3(a) 所示, 光能量由 A 处沿直线方向传到 B 处, 我们用光线 AB 来代表; 图 1.3(b) 中能量沿光线 AB 传到空气和水的交界面上 B 处, 再偏向 BC 方向传播, 我们可以用光线 AB 和 BC 来表示这种光能量传播方向的改变; 图

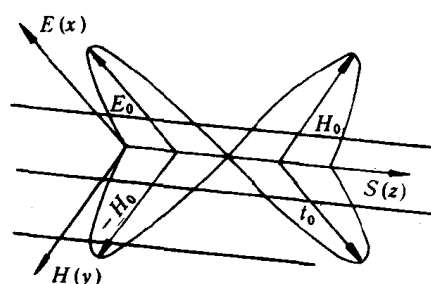


图 1.2 光波电场、磁场和传播方向的关系

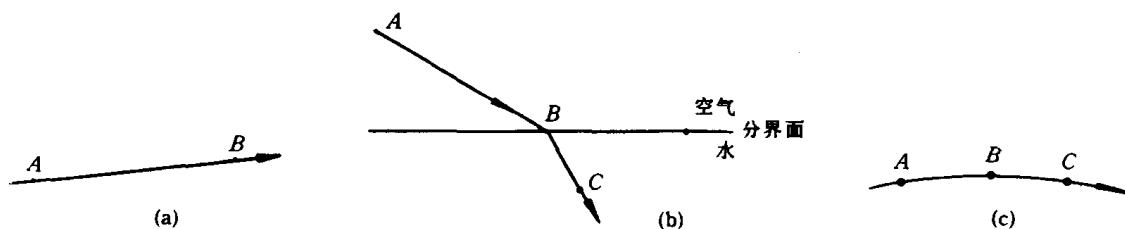


图 1.3 光线示意图

1.3(c) 表明光在密度不均匀的物质中其能量沿曲线 ABC 传播, 这时光线为曲线 ABC 。光行进中光线在空间的变化情况可用几何学的方法来描述, 所以叫做几何光学。

一个点光源或发光点向四面八方发射光波, 这种情况的传播方式可用由点光源向外引多条光线来代表。这些光线都是来自空间一点, 因而将这些光线的集合称为**发散同心光束**, 发光点是光束的顶点, 如图 1.4(a) 所示。将点光源放在一个透射前方焦点上, 发散同心光束经过透镜后各条光线相互平行向前传播。这样的光束叫做**平行光束** [见图 1.4(b)], 它的顶点看作在无限远处。如果将点光源放在透镜前方焦点以外, 透镜后面的光线将会聚成一点, 这便是**会聚同心光束** [图 1.4(c)], 会聚点是它的顶点。光束中各光线有共同交点的称为同心光束, 没有共同交点的称为非心光束。图 1.4(c) 中点光源和会聚点可

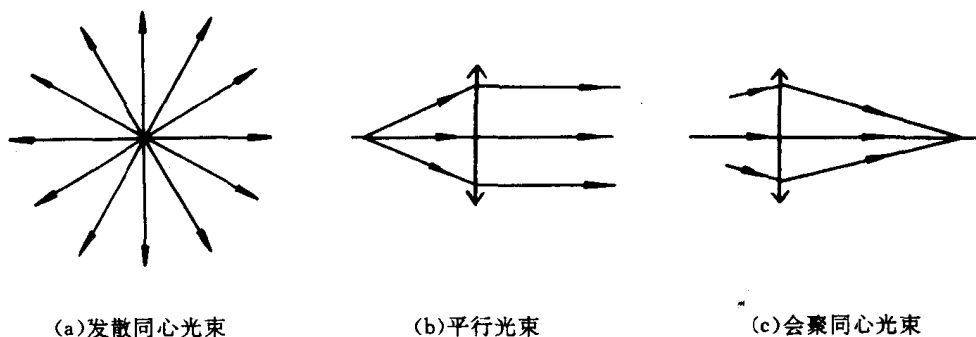


图 1.4 光线和光束

看作是物点和成像点,那么透镜或光学仪器的作用是将发散同心光束转变为会聚的同心光束。因而同心光束在成像中是有重要意义的,光学仪器的成像规律在一定意义讲是研究它们对同心光束转变的规律。

点光源向四周发射光波,它们在相同时间内向各方向均传播相同的距离。若将光波同时达到之点连结起来会形成一个球面,此球面上各点的振动状态都相同,我们称它为光波的波面。波面上各点的位相也相同,所以波面有时也称之等相面。因此,点光源发出的波面是球面,叫做球面波[图 1.5(a)]。点光源到球面波面上各点的连线是光线,它们都垂直于波面,即光线在波面的法线上,这样球面波的光线形成了发散同心光束。同样的道理,波面为平面的平面光波的光线形成平行光束,[图 1.5(b)],会聚球面波的光线为会聚同心光束[图 1.5(c)]。光束和波面的这种对应关系在光束口径较小时对描述光学仪器成像特性如光学分辨率等有重要作用。

本章下面的内容是介绍几何光学的基本定律,透镜成像的规律和一些光学仪器的成像特点。

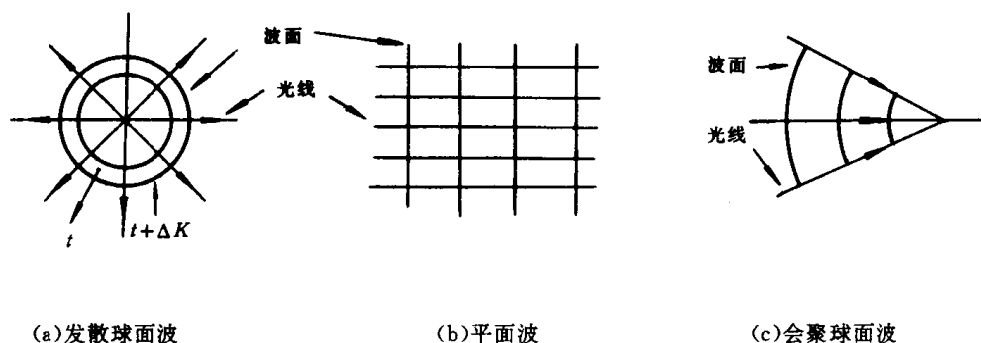


图 1.5 波面和光线

1.1 几何光学的基本定律

几何光学是以一些实验定律为基础建立起来的,它是各种光学仪器成像的理论依据。

1.1.1 光的直线传播定律

光能在许多物质中传播。这些光学介质或材料各处的性质(主要是指光的速度)相同时称它们为均匀介质,如空气、真空、光学玻璃、洁净的水等等。光在均匀介质中沿直线路径行进,这就是人们所熟知的光的直线传播定律。如图 1.6 所示,在均匀介质中点光源 O 发出的光线能达到 A 点的,只有沿 OA 直线传播的光线,不可能有沿 OBA 曲线路径的光线到达 A 点。古代用烽火台传递信号,就是利用光直线传播的原理。步枪射击也是利用靶子的光线穿过准芯到达人眼的直线传播定律来瞄准的。

点燃的蜡烛放在前壁上开小孔的暗箱前面,烛焰各点发出的光线根据直线传播定律,将沿直线通过小孔,在暗箱后壁上形成了倒立的烛光像,见图 1.7。

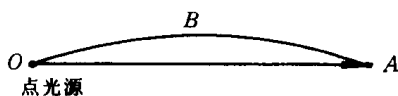


图 1.6 光的直线传播

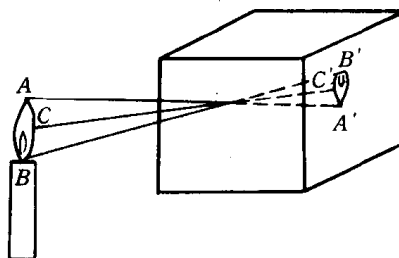


图 1.7 针孔成像

1.1.2 光的反射定律

光线在两种介质构成的分界面上会发生反射,如镜子,平静的水面等。如图 1.8 所示一条光线 AB 入射到水平的反射面 MM' 上,光线与 MM' 的交点 B 为入射点。过 B 作反射面的垂直线 BN ,称为界面的法线。入射光线在 B 点反射成光线 BC , AB 和 BC 分别叫做入射光线和反射光线。它们与法线夹角 i 和 i' 分别叫做入射角和反射角。反射定律的内容为:反射光线和入射光线与法线位于同一平面内,分列于法线两侧,入射角等于反射角,即

$$i' = i \quad (1.7)$$

如果光线按 CB 反向入射,反射光线则沿 BA 方向行进。因此光线是可逆的。

反射定律是理解镜面反射成像的基础。图 1.9 中,若发光点 S_1 距镜面为 h_1 ,它发出的发射光束,即光线 S_1N, S_1A, S_1B 等到达镜面,各反射光线的方向由反射定律给出,即 NS_1, AC 和 BD 等。反向延长这些反射光线交于 S_1' 点。人眼看到的发散光束好像是从顶点 S_1' 发射而来的, S_1' 称为发光点 S_1 的像。但是,并不是反射光线的实际交点故称为虚像点。 S_1' 到镜面也相距 h_1 。同理,发光点 S_2 也在镜面下方对称点 S_2' 处形成其虚像点。这样,人照镜子时,便看到了自己脸的虚像。

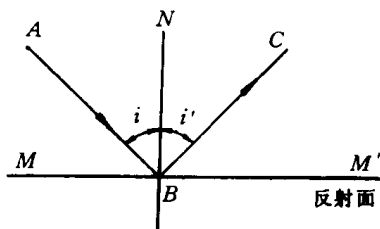


图 1.8 光的反射定律

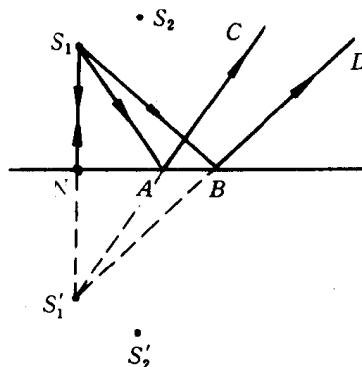


图 1.9 镜面反射成像

例题 1 人高 2m 站在镜前 1m 处,欲想看到自己的脚,镜面至少要多高?

解:如图 1.10 所示, H 和 F 代表人的头部和脚,它们的虚像分别在 H' 和 F' 处,连接 HF' 交镜面 B 点则镜面 AB 高至少应为 1m。

例题 2 光线 AB 入射到镜 MM 上,入射角为 i 。将镜面转动 α 角度到 $M'M'$ 位置上,

求此时的反射光线 BC' 和原反射光线 BC 之间的夹角(图 1.11)。

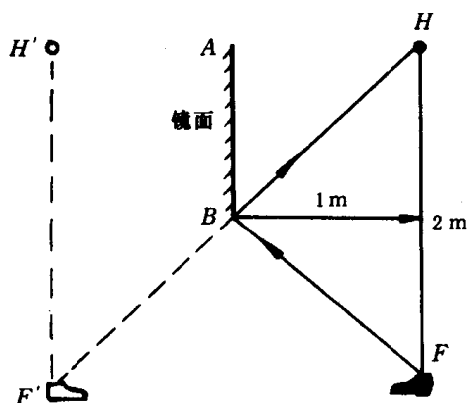


图 1.10

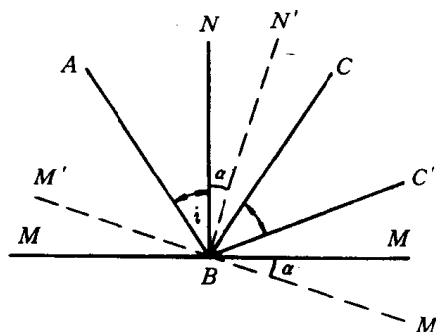


图 1.11

解: BM 和 BM' 成 α 角, 则两法线 BN 和 BN' 也成 α 角。由折射定律, $\angle ABC = 2i$, $\angle ABC' = 2(i + \alpha)$ 。那么, 反射光线 BC' 和 BC 之间夹 2α 角。

1.1.3 光的折射定律

光在真空中传播速度为 c ($\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$), 在其他透明介质中的速度都比 c 小, 将光在介质传播速度 v 与真空光速 c 的比值称为该介质的折射率,

$$n = c/v \quad (1.8)$$

例如, $v_{\text{水}} = \frac{3}{4}c$, $n_{\text{水}} = \frac{4}{3}$; $v_{\text{玻璃}} = \frac{2}{3}c$, $n_{\text{玻璃}} = 1.5$ 。

光在两种透明介质组成的界面上, 一部分光反射, 服从反射定律; 另一部分光进入到第二种介质, 称为光的折射。光线 AB 入射到折射率为 n_1 和 n_2 的两种介质的分界面上(图 1.12), 光线 AB 和法线 BN 所成平面叫做入射平面, i_1 和 i_2 称为入射角和折射角。实验告

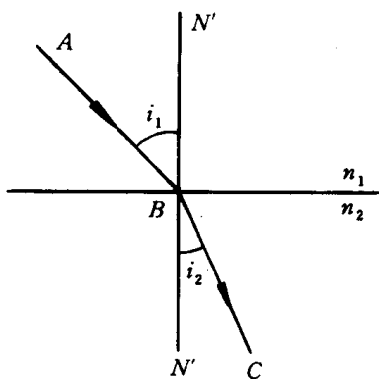


图 1.12 光的反射定律

诉我们: 折射光线位于入射面内, 在法线另一侧, 折射光方向由下式决定,

$$n_2 \sin i_2 = n_1 \sin i_1 \quad (1.9)$$

或者

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

折射角和入射角的正弦之比值与两种介质折射率有关, 而与入射角的大小无关。

当光线由 CB 入射, 折射光线则为 BA , 光路也是可逆的。

例题 3 光线以 30° 角由空气 ($n_1 \approx 1.0$) 入射到玻璃 ($n_2 = 1.5$) 面上, 求折射光线的折射角。

解: 由折射定律, $\sin i_2 = \frac{n_1 \sin i_1}{n_2} = \frac{0.5}{1.5} = \frac{1}{3}$, 得到 $i_2 = 19.47^\circ$

下面我们用折射定律来说明一些光学元件的作用。

(1) 玻璃面折射成像

点光源 S 到玻璃面距离为 l , 由 S 沿 SA 和法线 SN 引两条光线。光线 SN 是正入射 ($i_1=0$), 折射光线沿法线 NN' 行进 (图 1.13)。光线 SA 的入射角为 i_1 , 折射角 i_2 由折射定律可知: $\sin i_2 = \frac{n_1 \sin i_1}{n_2} = \sin i_1 / n_2$ 。若 i_1 较小, 即入射点 A 的高度 AN 较小, 入射角和折射角的正弦值可由它们各自的弧度值来近似, 则有 $i_2 = i_1 / n_2$ 。反向延长折射光线 NN' 和 AC , 它们交于 S' 。 S' 是 S 的虚像点。

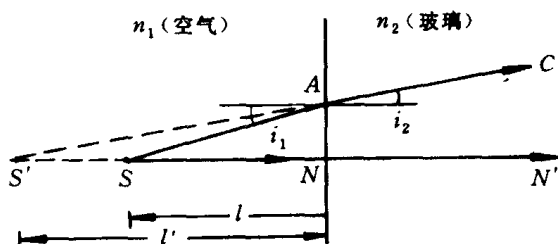


图 1.13 玻璃平表面折射成像

由图 1.13 可知, $i_1 \approx \frac{AN}{l}$, $i_2 = \frac{AN}{l'}$ 。则有,

$$l' = n_2 l, \text{ 或 } n_1 l' = n_2 l \quad (1.10)$$

像点到玻璃面的距离 (像距) l' 是物距 l 的 n_2 倍。玻璃面折射成像也为虚像。

例题 4 如图 1.14 所示, 在水中斜插一根筷子, 其顶端 S 处在水面下 10cm 处, 求筷子顶端 S 的虚像在水面下的深度。

解: S 发出的光线 SN 和 SA 经水面折射后成为 SN' 和 AC , 它们反向延长相交于 S' 。 S' 是 S 的虚像点。由 (1.10) 式, $S'N = \frac{n_2 \cdot SN}{n_1} = \frac{1 \times 10}{4/3} = 7.5\text{cm}$ 。筷子在水下部分各处发出光线的折射情形也可同样分析。这样, 从水面上看下去筷子好像在水面打折了。

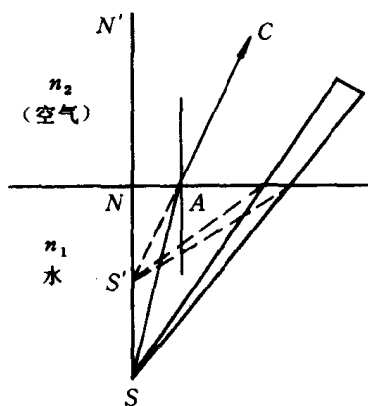


图 1.14 水面折射成像

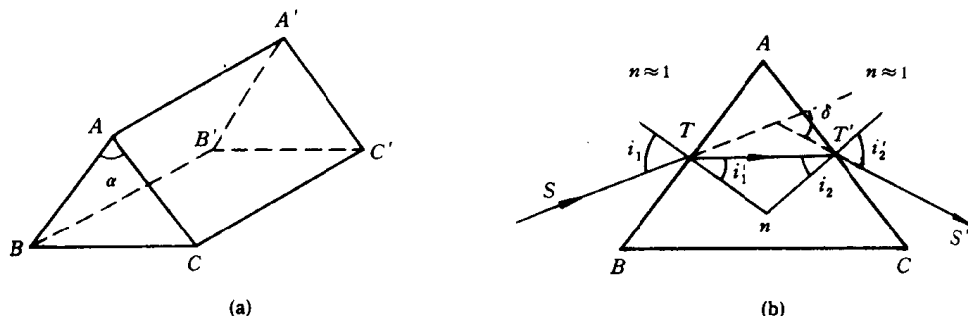
(2) 三棱镜的折射

三棱镜一般是由光学玻璃磨制成的棱柱 [图 1.15(a)], 截面呈三角形, 与棱边垂直的平面叫做棱镜的主截面, 光线一般都在主截面内, 下边来讨论光线在主截面内折射的情况。

光线 ST 在主截面内, 入射到空气和玻璃的界面 AB 上, 产生第一次折射, 入射和折射角分别为 i_1 和 i'_1 。三棱镜中的折射光线 TT' 在 AC 界面又产生折射, 沿 $T'S'$ 射出, i_2 和 i'_2 为入射和折射角。这样, 三棱镜使光线的方向产生了偏折, 其大小由偏向角 δ 来表示。

由图 1.15(b) 可知,

$$\left. \begin{aligned} \sin i_1 &= n \sin i'_1 \\ i'_1 + i_2 &= \alpha \\ n \sin i_2 &= \sin i'_2 \\ \delta &= i_1 + i'_2 - (i'_1 + i_2) = i_1 + i'_2 - \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$



(a) 三棱镜: ABC , 主截面: AA' , 折射顶角: α ; 折射顶角 (b) 光线在三棱镜主截面内的折射

图 1.15

上面的式子表明, 对给定的顶角 α , 偏向角 δ 随 i_1 而变。由实验得知, 当 $i_1 = i'_2, i'_1 = i_2$ 时, δ 为最小值, 称为三棱镜的最小偏向角 $\delta_{\min}$ 。在这种情况下, 折射光线 TT' 平行于底边 BC , 可知,

$$i'_1 = i_2 = \frac{\alpha}{2}, \delta_{\min} = i_1 + i'_2 - \alpha = 2(i_1 - \frac{\alpha}{2}), \sin i_1 = \sin i'_2 = n \sin \frac{\alpha}{2}$$

则有

$$\sin \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2} = n \sin \frac{\alpha}{2} \quad (1.12)$$

用测角仪器测量了三棱镜的顶角 α 和最小偏向角 $\delta_{\min}$ 后, 玻璃的折射率 n 可由上式算出。这是一种常用测量玻璃折射率的方法。

折射顶角 α 很小的棱镜称光楔, 光通过它也产生偏折, 其偏向角可由 (1.12) 式得到,

$$\frac{\alpha + \delta_{\min}}{2} \approx n \cdot \frac{\alpha}{2}, \delta_{\min} = (n - 1)\alpha$$

可见, 光楔对光线产生的偏向角仅与顶角 α 和折射率 n 有关。

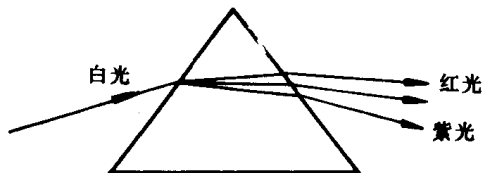


图 1.16 三棱镜的分光

三棱镜主要的应用在于把不同颜色的光(即波长不同的光)在空间上分离开, 用来分析物质发光的光谱分布。玻璃棱镜对不同波长的折射率不相同, 称为**色散现象**。当一束白光或由几种波长混在一起的光束入射到棱镜上时, 由于不同波长(颜色)光的折射率不同,

也就具有不同的偏向角,它们将以不同方向射出(图 1.16)。通常棱镜的折射率 n 随波长 λ 的减少而增加。这样,紫光的偏向角最大,红光偏向角最小,棱镜光谱仪是用三棱镜的这种分光作用制成的,它是研究光谱的重要仪器(参见 1.3.7 节)。

例题 5 顶角为 50° 的三棱镜的最小偏向角是 35° 。如果把它浸在水中,最小偏向角等于多少?(水的折射率 $n_{\text{水}}=1.33$)。

解:由(1.12)式可知

$$n = \frac{\sin \frac{(\alpha + \delta_{\min})}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{50^\circ + 35^\circ}{2}}{\sin \frac{50^\circ}{2}} \approx 1.60$$

再由(1.11)式,

$$n_{\text{水}} \sin i_1 = n \sin i'_1 = n \sin \frac{\alpha}{2} = 1.60 \sin \frac{50^\circ}{2},$$

$$i_1 = 30.6^\circ$$

所以

$$\delta_{\min} = i_1 + i'_2 - \alpha = 2i_1 - \alpha = 61.2^\circ - 50^\circ = 11.2^\circ$$

三棱镜放在水中最小偏向角变小,亦即对光的偏折能力变小。

1.1.4 全反射定律

折射率 n 大的介质叫做光密介质, n 小的为光疏介质。光线从光密介质入射光疏介质中,折射角 i'_1 大于入射角 i_1 。当入射角 i_1 增至某一角度 i_c 时,折射角 $i'_1=90^\circ$, $n_1 \sin i_c = n_2$

$$i_c = \sin^{-1}(n_2/n_1), n_2 < n_1 \quad (1.13)$$

光线的入射角 $i_1 \geq i_c$ 时,光线全部返回光密介质(图 1.17),这种现象称全反射, i_c 称为全反射临界角。由玻璃($n \approx 1.5$)到空气的全反射临界角约 42° ,水到空气的全反射临界角约为 49° 。

光的全反射原理在光学中有许多应用,下面列举两个例子。

(1) 全反射棱镜

图 1.18(a)所示是等腰直角三棱镜,光线从一个直角面上垂直入射,折射光以 45° 角($> i_c$)入射到斜面上,在该面上发生全反射后从另一直角面上垂直射出。棱镜使光线方向改变 90° 。若使光线在两个直角面上相继发生两次全反射[图 1.18(b)]光线方向将改变 180° ,这样的光路安排使上下方位的光线 A, B 光线(即垂直顶棱的光线)的位置倒转过来,而左右位置的 A, C 光线(即平行顶棱的光线)位置不变。如果让两个等腰直角三棱镜的顶棱相互垂直放置,则上下和左右方位都产生倒转。这类棱镜装置常在观察地面物体用的双筒望远镜中使用(在低处看高处)。

(2) 光学纤维

利用光在透明玻璃柱内壁上的接连不断的全反射,可以将光从其一端传送到另一端[图 1.19(a)]。当玻璃柱的截面直径很小,甚至细到 $5-10\mu\text{m}$ 时,传送光的效果也不变,这

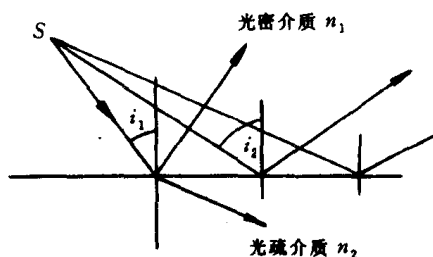


图 1.17

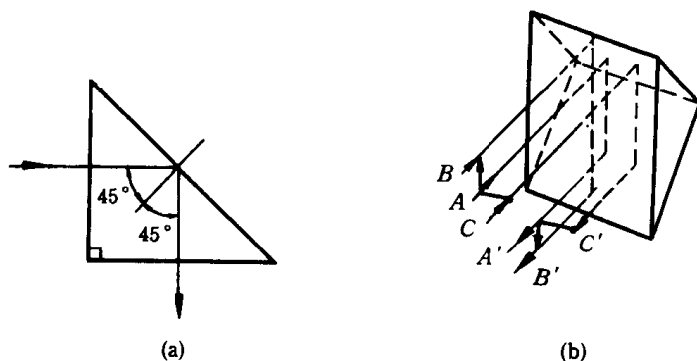


图 1.18 全反射棱镜

种传播光的细玻璃丝称为光学纤维。光学纤维一般是在一根折射率较高的玻璃纤维(纤芯)外面包一层折射率较低的玻璃材料(包层)组成[图 1.19(b)],假定纤芯的折射率为 n_0 ,包层折射率为 n_c ,光纤外面的介质折射率为 n_a ,光线从介质 n_a 入射到光纤端面 A 处,经折射后到达光纤内壁,当光线在壁上的入射角 i_1 大于全反射临界角 i_c 时,光线在壁上就会发生全反射,不断的反射,光便能从一端传播到另一端。

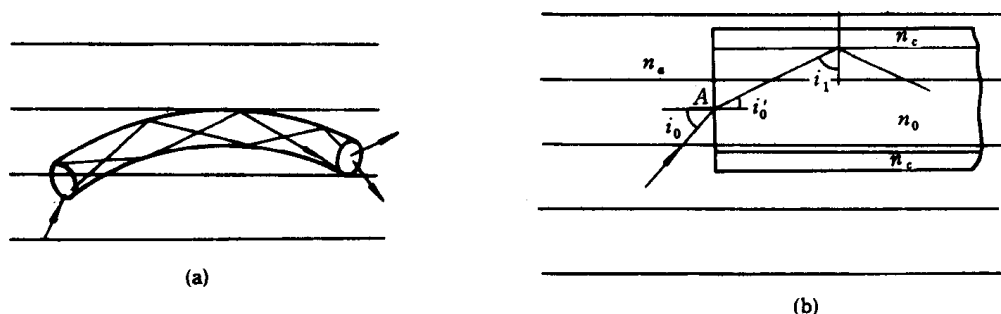


图 1.19 光学纤维

由图 1.19(b),可知,

$$\sin i_1 > n_c/n_0 = \sin i_c, n_a \sin i_0 = n_0 \sin i'_0 = n_0$$

$$\sin(90^\circ - i_1) = n_0 \cos i_1 = n_0 \sqrt{1 - \sin^2 i_1} \leq n_0 \sqrt{1 - \left(\frac{n_c}{n_0}\right)^2}$$

所以,

$$i_0 \leq \sin^{-1} \left(\frac{1}{n_a} \sqrt{n_0^2 - n_c^2} \right) \quad (1.14)$$

凡是入射角 i_0 小于(1.14) 式所给角度值的入射光线都将通过接连不断地全反射从一端传到另一端;大于上述角度值的入射光线在内壁上不能发生全反射,将透过内壁逐渐进入包层,不能继续传送。(1.14)式表征了光纤能从端面处接收多少光能而传送的能力,在光学上称为光纤的数值孔径(NA),现重写如下:

$$NA = n_a \sin i_0 = \sqrt{n_0^2 - n_c^2} \quad (1.15)$$