

高等学校教材

計量光学

洪佩智 编



兵器工業出版社

高等学校教材

计 量 光 学

洪 佩 智 编

兵器工业出版社

(京) 新登字 049 号

内 容 简 介

本书着重讲述几何光学和波动光学的基本理论，并在此基础上介绍精密计量中常见的各类光学系统的基本原理、性能及其与精密测量的关系，同时还介绍了光的干涉和衍射原理在精密计量中的应用实例。除基本内容外，还专题介绍了光学仪器史话和著名光学家传略。

本书可作为工科大专以上精密仪器检测和长度计量专业的教材，也可作为同等文化程度的在职计量工程技术人员和管理人员的自学参考书。

计 量 光 学

洪 佩 智 编

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

沈阳工业学院印刷厂印装

开本：787×1092 1/16 印张：17 字数：426 千字

1992 年 7 月第 1 版 1992 年 7 月第 1 次印刷

印数：0,001~2,000 册 定价：4.40 元

ISBN 7-80038-437-3/TN·18 (课)

出 版 说 明

遵照国务院关于高等学校教材工作的分工，原兵器工业部教材编审室，自成立之日起就担负起兵工类专业教材建设这项十分艰巨而又光荣的任务。由于各兵工院校、特别是参与编审工作的广大教师的积极支持和努力，以及国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的紧密配合，自 1985 年到 1988 年共编审出版了 89 种教材。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映兵工科学技术的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，在总结第一轮教材编审出版工作的基础上，制订了兵工教材编审工作的五个文件。指导思想是：以提高教材质量为主线，完善编审制度，建立质量标准，明确岗位责任，充分发挥各专业教学指导委员会的学术和咨询作用，加强从教材列选、编写到审查整个教材编审过程中的科学管理。

1985 年根据教学需要，我们组织制订了“七五”教材编写规划，共列入教材 176 种。这批教材主要是从经过两遍教学使用、反映较好的讲义中遴选出来的，较好地反映了当前兵工教材的科学性和适合我国情况的先进性，并不同程度地更新了教材内容，是一批较好的新型教材。

本教材由丁汉章主审，经机械电子工业部兵工教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有错误之处，希望广大读者批评指正。

机械电子工业部兵工教材编审室

1989年 8 月

前 言

本教材把精密测试和计量中涉及到的光学知识通过几何光学和波动光学两大知识体系展开,引导学生在学习光学基本理论的基础上分析和研究精密测试和计量中的应用实例。

全书分几何光学和波动光学两大部分,共十三章。第一章到第十章为第一部分,主要讲授几何光学。其中第一章到第六章叙述几何光学的基本理论,包括各种光学元件的成像规律,系统中光束的限制及像差基本知识;第七章到第十章叙述眼睛和显微、望远、投影等系统的一般光学原理,并在此基础上着重讨论精密计量光学系统的特性及其与精密测量的关系。第十一章到第十三章为第二部分,主要讲授波动光学中光的干涉、衍射的基本理论及其在精密计量中的应用。

本教材还适当介绍了精密计量中的光学新技术及其发展趋势,增加了光学仪器史话与光学家传略等专题。希望能帮助学生开阔视野,拓宽知识面。

本书选编了一定量例题与应用实例。例题解答中提供了解题思路和方法,强调了规范化解题训练;应用实例增加了教材的启发性和实用性。课后习题在选取上注意了与教材内容的适当配合,也选入了一些富有思考性和趣味性的题目。

本教材内容按100学时安排。可作为工科大专以上精密仪器、精密测量、几何量计量等专业的计量光学课程的教学用书,也可作为同等文化程度非光学专业学生的学习用书,以及在职计量工程技术人员和管理人员的自学参考书。

北京理工大学的丁汉章教授对本书进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此深表感谢!

由于编者水平有限,缺少经验,对于书中的错误和不妥之处,诚恳希望读者提出批评和指正。

编 者

1991年1月于沈阳工业学院

目 录

出版说明

前 言

第一章 几何光学的基本定律和物像概念	(1)
§ 1—1 几何光学及其适用范围	(1)
§ 1—2 发光点、光线和光束	(1)
§ 1—3 几何光学的基本定律	(2)
§ 1—4 全反射现象	(7)
§ 1—5 费马原理	(9)
§ 1—6 物像概念	(11)
§ 1—7 光学材料	(14)
习 题	(15)
第二章 共轴球面系统的成像理论	(17)
§ 2—1 符号规则	(17)
§ 2—2 单个折射球面近轴范围内的成像性质	(19)
§ 2—3 单个折射球面的物像关系公式	(20)
§ 2—4 共轴球面系统	(23)
§ 2—5 单个折射球面物像关系的高斯公式和牛顿公式	(25)
§ 2—6 球面反射镜	(29)
§ 2—7 薄透镜与薄透镜系统	(32)
习 题	(42)
光学仪器史话 形形色色的光学透镜	(44)
第三章 理想光学系统	(46)
§ 3—1 理想光学系统和理想成像	(46)
§ 3—2 理想光学系统的主点、主平面和焦点、焦平面	(46)
§ 3—3 求解理想光学系统物像关系的两种方法	(49)
§ 3—4 理想光学系统的拉赫公式、两焦距关系及光焦度	(52)
§ 3—5 理想光学系统的放大率	(54)
§ 3—6 节点和节平面	(57)
§ 3—7 光学系统中光组的组合	(58)
§ 3—8 简单光组的基点、基面	(63)
习 题	(71)
科学家与光学 牛顿	(73)

第四章 平面光学元件	(75)
§ 4—1 平面反射镜.....	(75)
§ 4—2 平行平板.....	(79)
§ 4—3 反射棱镜.....	(82)
§ 4—4 折射棱镜与光楔.....	(88)
习 题.....	(89)
第五章 光学系统中光束的限制	(91)
§ 5—1 光阑及其作用与分类.....	(91)
§ 5—2 孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳.....	(92)
§ 5—3 视场光阑、入射窗和出射窗.....	(95)
§ 5—4 光阑在计量光学仪器中的作用.....	(98)
习 题.....	(100)
第六章 像差概述	(102)
§ 6—1 轴上点的单色像差——球差.....	(102)
§ 6—2 轴外点的单色像差.....	(103)
§ 6—3 轴外点的单色像差的性质.....	(106)
§ 6—4 色 差.....	(109)
习 题.....	(110)
第七章 人 眼	(111)
§ 7—1 人眼的构造.....	(111)
§ 7—2 人眼的调节与适应.....	(112)
§ 7—3 人眼的视角分辨率、瞄准精度与估读精度.....	(113)
§ 7—4 人眼的缺陷与目镜的视度调节.....	(115)
习 题.....	(118)
第八章 显微系统	(119)
§ 8—1 放大镜.....	(119)
§ 8—2 显微镜简述.....	(121)
§ 8—3 显微镜中的光束限制.....	(123)
§ 8—4 显微镜的分辨率.....	(125)
§ 8—5 显微镜的景深.....	(126)
§ 8—6 显微镜的光学性能与精密测量.....	(130)
§ 8—7 显微镜的物镜和目镜.....	(131)
§ 8—8 显微镜的照明系统.....	(136)
习 题.....	(139)

光学仪器史话 显微镜	(140)
第九章 望远系统	(142)
§ 9—1 望远镜概述	(142)
§ 9—2 望远镜的光学性能参量及其相互关系	(144)
§ 9—3 转像系统和场镜	(147)
§ 9—4 望远镜物镜	(149)
§ 9—5 望远镜目镜	(152)
习 题	(156)
科学家与光学 龚祖同	(157)
光学仪器史话 望远镜	(158)
第十章 投影系统	(159)
§ 10—1 投影仪概述	(159)
§ 10—2 投影物镜	(160)
§ 10—3 投影仪中的照明系统	(162)
习 题	(165)
第十一章 波动光学基础	(166)
§ 11—1 光波与电磁波	(166)
§ 11—2 波动的一般描述	(168)
§ 11—3 波的叠加与干涉	(171)
附录 11—1 多个同频率、同振动方向的谐振动的合成	(175)
习 题	(177)
第十二章 光的干涉	(178)
§ 12—1 产生光干涉现象的条件	(178)
§ 12—2 历史上获取相干光波的著名实验	(180)
§ 12—3 双光束干涉	(183)
§ 12—4 影响条纹对比度的因素	(188)
§ 12—5 介质膜的干涉	(194)
§ 12—6 介质膜干涉在精密测量中的应用	(203)
§ 12—7 干涉仪	(210)
习 题	(214)
科学家与光学 托马斯·杨	(216)
菲涅耳	(217)
光学仪器史话 干涉仪	(218)
第十三章 光的衍射	(220)
§ 13—1 光的衍射现象	(220)

§ 13—2 惠更斯-菲涅耳原理	(221)
§ 13—3 菲涅耳圆孔(盘)衍射	(223)
§ 13—4 夫琅和费单缝衍射	(231)
§ 13—5 夫琅和费双缝衍射	(236)
§ 13—6 光栅衍射	(240)
§ 13—7 夫琅和费圆孔衍射	(250)
§ 13—8 光的衍射在计量工程中的应用	(251)
习 题	(254)
习题答案	(256)
主要参考资料	(260)

第一章 几何光学的基本定律和物像概念

§1—1 几何光学及其适用范围

人一睁开眼就看到一个光的世界，人的一切活动都离不开光。这里所说的“光”，指的是频率（或波长）在一定范围内能引起人眼视觉的电磁波，称为可见光。光的频率约为 $4 \times 10^{14} \text{ Hz} \sim 7.8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ，它在真空中的波长约为 $7600 \times 10^{-10} \text{ m} \sim 3800 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。人眼对不同波长的光产生不同的颜色感觉。因此，同一波长的光，由于具有单一的颜色，称为“单色光”；由不同波长的光波混合而成的光称为“复色光”。白光就是由可见光波段中各种波长的光波混合而成的一种复色光。此外，波长约在 $10^{-4} \text{ m} \sim 7.6 \times 10^{-7} \text{ m}$ 内的电磁波，称为“红外辐射”；波长约在 $3.8 \times 10^{-7} \text{ m} \sim 10^{-8} \text{ m}$ 内的电磁波，称为“紫外辐射”，它们都不能引起人眼视觉，故不能叫做“光”。

光学中，常用的波长单位是微米(μm)和纳米(nm)，它们与米(m)的关系分别为

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

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

例如，对人眼最敏感的光在真空中的波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 或 550 nm 。

几何光学是人们在观察和解释光的传播、成像以及制造光学仪器过程中所积累的经验 and 智慧的结晶。几何光学完全不考虑光的波动特性，仅以光的直线传播性质为基础，采用几何学的方法，研究光在透明介质中的传播和成像规律。几何光学是研究光的传播现象及其应用的有效方法之一。但是，几何光学不能解释光的干涉、衍射等物理现象，因为这些现象都是由光的波动性质决定的。所以，几何光学的理论有一定的局限性。波动光学能够解释光的直线传播、反射、折射以及干涉、衍射等传播现象。而且，在一定条件下，由波动光学的理论还可以导出几何光学的基本定律。所以，几何光学是波动光学在一定条件下的近似。

几何光学只适用于有限的范围，即要求它所研究的对象的几何线度必须远远大于光的波长，在此条件下，几何光学的结果才与实际情况基本相符。不过，一般光学仪器都能符合这一要求。所以，对于这些光学仪器中的绝大多数光学问题，用几何光学都可以得到合理、正确的结果。而且，几何光学在描述和处理光的传播和成像时，可以用几何作图和简单的数学证明、运算等方法来导出公式，并利用这些公式计算和设计光学系统。这种解决问题的方法简洁、明了，数据合理、可靠。所以直到今天，几何光学仍然是绝大多数光学仪器设计者、制造者和使用者手中的强有力的工具。

§1—2 发光点、光线和光束

一 发光点

在几何光学中，无论是本身发光的物体，还是本身不发光而被其它光源照明才发光的物

体都叫发光体。而发光点则定义为一个没有体积和大小的发光的几何点。因此，任何发光体都可以看作是由无数个这样的发光点所组成。在研究发光体的成像规律时，常常用发光体上某些特定位置的发光点的组合来代表发光体。这样，一个发光体的成像问题就可以归结为这些特定发光点的成像问题。

二 光线

光既然是电磁波，研究光的传播问题，应当是一个波动的传播问题。但在几何光学中，并不把光看作是电磁波，而是把光看作是“能够传输光能的几何线”，这样的几何线称为“光线”。发光点发光就是由发光点向四周发出无数条光线，并沿着每一条光线向外发散光能，如图 1—1 所示。在研究光的传播过程中，光线与几何线具有完全相同的性质，不同的只是光线具有方向，光线的方向就是光能传播的方向。

借助于“发光点”与“光线”的概念，几何光学研究光的传播问题，就转化为简单的几何作图和数学运算问题，这就使得本质上十分复杂的光能传播和成像问题大大简化。当然，在自然界中，“发光点”与“光线”实际上并不存在，它们都只不过是人们从无数客观光学现象中抽象出来的理想模型。

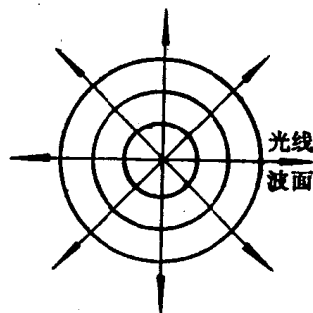


图 1—1

三 光束

在各向同性的均匀介质中，发光点所发出的光波波面，是以发光点为球心的球面，光沿着球形波面的法线方向传播，如图 1—1 所示。显然，波面的法线就是几何光学中的光线，而与波面对应的法线束即称为“光束”。因此，“光束”是具有一定关系的无数条光线的集合。通常光波波面可分为球面、平面和任意曲面。其中，球面波对应于由同一点发出的发散光束或相交于同一点的会聚光束，几何光学称它们为“同心光束”，如图 1—2(a) 所示；平面波对应“平行光束”，平行光束也可以看作是同心光束，即认为光线是由无限远处某点发出或会聚于无限远处某点，如图 1—2(b) 所示；曲面波对应的光束是一些既不相交于同一点又不彼此平行的光线的集合，几何光学称它们为“像散光束”，如图 1—2(c) 所示。

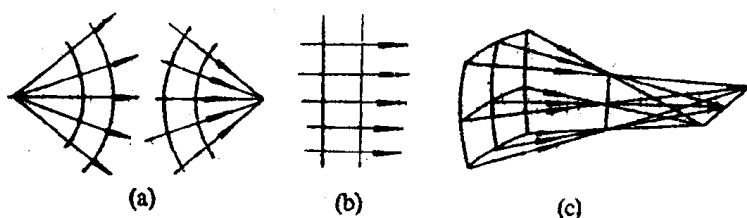


图 1—2

(a) 同心光束 (b) 平行光束 (c) 像散光束

几何光学就是利用以上这些概念研究光的传播。研究的方法是，首先找出光线的传播规律，即几何光学的基本定律，然后根据这些定律研究光的传播现象，并以此设计、制造和使用光学仪器。

§1—3 几何光学的基本定律

几何光学把光看作是光线，从而进行光的传播现象的研究。因此，我们必须首先找出光线的传播规律。自然界中光的传播现象虽说是千变万化，但是，按几何光学理论可以归纳为

三条基本定律：光的直线传播定律，光的独立传播定律，光的反射和折射定律。现在分述如下：

一 光的直线传播定律

在均匀透明介质中，光沿直线传播。这就是光的直线传播定律。早在远古时代起，人们就已经认识并总结出这一条定律。利用这一定律，古代科学家成功地解释了影的形成和针孔成像，继而又科学地认识并解释了日蚀、月蚀等光学现象。直到今天，一切精密的天文测量、大地测量和其它许多宏观测量仍然以此定律为基础。

但是，光也并非在所有场合都沿直线传播。实验表明，当光在传播过程中遇到线度很小 ($<10^{-5} \text{ m}$) 的不透明障碍物或细孔、缝时，光将偏离直线传播，产生衍射现象。不过，一般计量光学仪器的物镜孔径都远比光波长大多。因此，在这些光学仪器中，光仍然可以看作是沿直线传播。

二 光的独立传播定律

在均匀透明介质中，以不同方向通过空间某点的光线彼此不发生影响，在相遇点，光强只是简单地相加，显得更亮一些，在相遇后又分别沿各自原有的方向传播。这就是光的独立传播定律。利用这一定律，当我们在研究某一光线的传播情况时，可以不考虑其它光线对它的影响，从而使问题大为简化。

光的独立传播定律对于非相干光来说是正确的。对于相干光，由于光的干涉效应，光的独立传播定律就不再适用。

三 光的反射和折射定律

一束光在入射到两种透明介质的交界面时，通常要产生反射和折射现象，如图 1—3 所示。其中一部分光线在分界面上被反射回原来的介质，称为“反射光线”；另一部分则通过分界面折入到第二种介质中，称为“折射光线”。光线的这种反射与折射现象将分别遵循光的反射定律与折射定律。

为了表述这些定律，首先引入几个名词。入射光线 AO 与两介质界面法线 ON 之间的夹角 $\angle AON$ 称为“入射角”，用 I_1 表示；反射光线 OB 和法线 ON 之间的夹角 $\angle BON$ 称为“反射角”，用 I'_1 表示；折射光线 OC 和法线 ON' 之间的夹角 $\angle CON'$ 称为“折射角”，用 I_2 表示；入射光线 AO 与法线 NN' 所构成的平面称为“入射面”。

反射定律和折射定律分别表述如下：

反射定律：

1. 反射光线位于入射面内，与入射光线分别位于法线的两侧；
2. 反射角等于入射角

$$I'_1 = I_1 \quad (1-1)$$

折射定律：

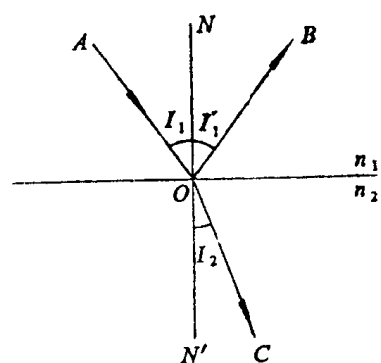


图 1—3

1. 折射光线位于入射面内，与入射光线分别位于法线的两侧；
2. 入射角的正弦与折射角的正弦之比值，是一个与入射角的大小无关的常数，它只与分界面两侧介质的折射率有关。即

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = n_{1,2} \quad (1-2a)$$

或 $n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2 \quad (1-2b)$

式中 $n_{1,2}$ 为介质 2 相对介质 1 的折射率，也叫两介质的相对折射率； n_1 、 n_2 分别称为介质 1、介质 2 相对真空的折射率，也叫“绝对折射率”，简称介质的折射率。显然两介质的相对折射率等于两介质各自的绝对折射率之比，即其关系式为 $n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1}$ 。

比较折射定律公式(1—2a)与(1—2b)，从中发现公式(1—2b)两边的形式对介质 1、2 来说完全对称。因此，我们既可以把 I_1 看作入射角，把 I_2 看作折射角；反过来也可以把 I_2 看作入射角，把 I_1 看作折射角。也就是说(1—2b)式既可以用于光线由介质 1 射向介质 2，也可以用于光线由介质 2 射向介质 1。可见，在处理折射问题中，用折射定律(1—2b)式要比用(1—2a)式方便得多。

折射率是表征介质光学性质的一个重要参数。由光的电磁理论可知，不同波长的单色光在真空中具有完全相同的传播速度： $c = 3 \times 10^8$ m/s。但在一般透明介质中，如水、玻璃等，不同波长的光具有不同的速度。若某单色光在某一介质中的速度为 v ，则 c 和 v 的比值就定义为该介质的绝对折射率，即

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

根据以上定义，介质 1 和介质 2 的绝对折射率 n_1 和 n_2 可分别表示为

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

两式相除得

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

由以上定义，介质 2 相对介质 1 的折射率，即相对折射率 $n_{1,2}$ 可表示为

$$n_{1,2} = \frac{v_1}{v_2}$$

比较上面两式，得

$$n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1}$$

这就证明了两介质的相对折射率与两介质各自的绝对折射率之间的关系。若把以上关系式代入(1—2a)式中即可得(1—2b)式。

由于不同波长的光在同一介质中的传播速度不同，因此，同一介质对不同波长光的折射率也不相同。在给出某一介质的折射率时，应当指明是相对哪一种波长的光而言，如果不加说明，通常是指相对人眼最敏感的黄绿光而言。折射率一般可用实验测得。表 1—1 给出了常见一些物质相对真空的折射率。由于光在空气中的速度和在真空中的速度相差极小，通常把空气的绝对折射率取作 1，而把介质相对空气的折射率作为“绝对折射率”。

折射定律是斯涅耳[W. Snell, 1591~1626]在实验中发现的, 所以折射定律又叫斯涅耳定律。

表 1—1 某些物质的折射率
(对于 $\lambda = 589 \text{ nm}$)

物 质	折 射 率	物 质	折 射 率
冰	1.309	水	1.333
萤 石	1.434	乙 醇	1.362
氯化钠	1.544	甲 醇	1.329
石 英	1.544	四氯化碳	1.461
聚苯乙烯	1.590	松节油	1.472
重火石玻璃	1.66	甘 油	1.473
冕牌玻璃	1.52	二硫化碳	1.628
金刚石	2.417	二碘甲烷	1.74
金红石	2.616, 2.903	空气(1 大气压 20°C)	1.000 3

注: 这是相对于真空测得的折射率。在多数情况下, 物质对空气的折射率同物质对真空的折射率差别很小。

四 折射定律的两个重要推论

1. 反射可看成是折射的一种特殊情况

在折射定律(1—2b)式中, 若令 $n_2 = -n_1$, 则得 $I_2 = -I_1$ 。这说明反射定律可看成是折射定律在 $n_2 = -n_1$ 时的一种特殊情况。式中负号表明反射光线与入射光线分别位于法线的两侧。由于反射定律可以由折射定律导出, 因此可得出一个重要结论: 在由折射定律导出的一切适合于折射情况的公式中, 只要令 $n_2 = -n_1$, 便可得到所有适合于反射情况的相应公式。这一结论在以后处理折、反射光学系统的物像关系时, 将会有重要应用。

2. 光路可逆定理

当光线自 B 点或 C 点 (见图 1—3) 投射在分界面上 O 点时, 根据反射定律和折射定律可知, 反射光线或折射光线必沿 OA 方向射出。这说明光线在传播过程中具有可逆性。光线的这种可逆性称为“光路可逆定理”。根据这一定理, 在研究光线的传播规律时, 既可以按照实际光线进行的方向路线进行研究, 即从已知物体的位置寻求像的位置; 也可以按照与实际光线相反的方向路线进行研究, 即从已知像的位置寻求物的位置。两者的结果完全相同。而且, 无论光线经过多少次反射、折射, 也不管光线通过什么样的介质, 光路可逆定理永远成立。

以上我们阐述了光在均匀介质中的传播规律。如果光在不均匀介质中传播, 则可以把不均匀介质看作是由无限多层均匀介质组成。这样, 光线在不均匀介质中的传播, 就可以看作是一种连续的折射。由此可见, 光的直线传播定律、独立传播定律、反射和折射定律, 能够说明自然界中光线的各种传播现象。它们是几何光学中仅有的物理定律。几何光学的全部内容, 就是在这三个基本定律的基础上用几何方法研究光的传播问题。

求解几何光学习题, 通常应遵循如下解题步骤

1. 根据题意正确画出光路图;
2. 由基本定律和几何关系列出方程;
3. 求解方程, 得出结果, 必要时进行讨论。

〔例 1—1〕 若太阳光以与水平方向成 80° 角射向地面, 怎样放置平面镜, 可使反射光沿水平方向射入坑道。

〔解〕 根据题意, 首先作光路图。如图 1—4 所示, 将入射光线 AO 与坑道轴线 BO 之交点 O 视为入射点, 然后过 O 点作 $\angle AOB$ 的角平分线 ON , 再过 O 点作一直线 KL , 使 $KL \perp ON$, 则 KL 即为平面镜所应放置的位置。显然, 以上作图满足光的反射定律, 因为 AO 为入射光, OB 为反射光, ON 为入射点 O 的法线, 且有 $I'_1 = I_1$ 。

设 KL 与水平方向的夹角为 β , 由已知条件和几何关系可知 $\angle AOB = 80^\circ$, 故

$$I'_1 = I_1 = \frac{1}{2} \angle AOB = 40^\circ$$

所以 $\beta = \angle BOK = 90^\circ - I'_1 = 50^\circ$

由此可见, 将平面镜与水平方向成 50° 放置, 就可使反射光经平面镜反射后沿水平方向射进坑道。

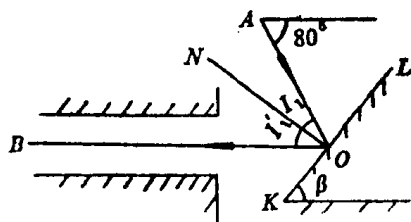


图 1—4

〔例 1—2〕 有一圆柱形空筒, 高 16 cm, 直径为 12 cm。人眼若在离筒侧某处能见到筒侧的深度为 9 cm; 当筒中盛满某种液体时, 则人眼在原处恰能看到筒侧底。求该液体的折射率。

〔解〕 由题意画光路图。如图 1—5 所示, 若眼睛位于 P 点, 则空筒时的光路应为直线 DOP , 其中 $\overline{AD} = 9$ cm; 当筒中盛满液体时, 由于光在空气与液体界面的折射, 光路应为 BOP 折线, 且 $\overline{AB} = 16$ cm。

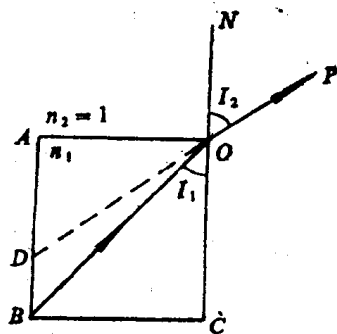


图 1—5

在 $\triangle AOD$ 中, 根据几何关系有

$$\angle AOD = \arctg\left(\frac{\overline{AD}}{\overline{AO}}\right) = \arctg\left(\frac{9}{12}\right) = 36.86^\circ$$

$$\text{且 } I_2 = \angle DOC = 90^\circ - \angle AOD = 53.14^\circ$$

在 $\triangle BOC$ 中

$$I_1 = \arctg\left(\frac{\overline{BC}}{\overline{OC}}\right) = \arctg\left(\frac{12}{16}\right) = 36.86^\circ$$

再根据折射定律: $n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2$, 且已知 $n_2 = 1$, 解得

$$n_1 = \frac{\sin I_2}{\sin I_1} = \frac{\sin 53.14^\circ}{\sin 36.86^\circ} = 1.33$$

〔例 1—3〕 空气中一束极细的光束投射在一块石英平面上, 且与该石英表面的法线成 30° 角。若此光束中含有 400 nm 与 500 nm 两种波长的单色光, 且已知石英对这两种单色光的折射率分别为 1.470 2 和 1.462 4, 试问两种单色折射光之间夹角有多大?

〔解〕 由折射定律: $n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2$, 且已知 $n_1 = 1$, $I_1 = 30^\circ$ 。

对于 400 nm 的单色光, 可由

$$\sin 30^\circ = 1.470 2 \sin I_2$$

解得

$$I_2 = 19.88^\circ$$

对于 500 nm 的单色光, 可由

$$\sin 30^\circ = 1.462 4 \sin I_2$$

解得

$$I_2 = 19.99^\circ$$

因此, 两条单色折射光线之间的夹角 $\Delta I = 0.11^\circ$ 。其中波长较大的单色光有较大的折射角, 即它相对原入射光线偏转的角度比较小些, 如图 1—6 所示。

此例说明, 由于介质的折射率通常随着光波长的不同而变化, 因此, 利用光的折射现象可以把光束按波长的大小次序分散开, 而光的反射就做不到这一点。

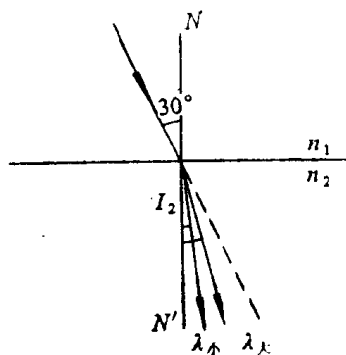


图 1—6

§1—4 全反射现象

当光线入射到两种透明介质的交界面时, 通常将产生反射与折射现象, 但在一定条件下, 入射光线可以全部被反射回原介质而不产生任何折射, 这时, 即产生所谓“全反射”现象。

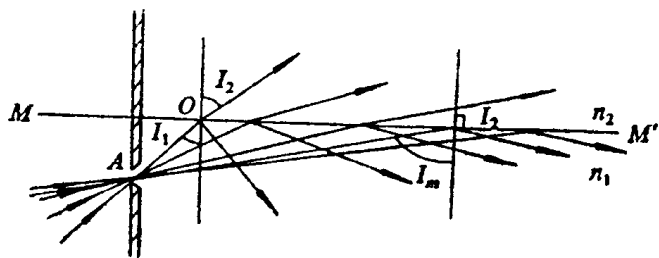


图 1—7

如图 1—7 所示, 由位于介质 n_1 内的发光点 A 发出一束光线, 投射在折射率为 n_1 与 n_2 的两介质的交界面 MM' 上, 若设 $n_1 > n_2$, 则 n_1 介质为光密介质, n_2 介质为光疏介质。

由折射定律: $n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2$, 可知, 这时的折射角

I_2 大于 I_1 , 即折射光线比入射光线更偏离法线。若增大入射角, 则相应的折射角也随之增大。同时, 反射光的强度随之加大, 而折射光的强度逐渐减小。当入射角增大到 I_m 时, 折射光线便沿交界面掠射而出, 即折射角 $I_2 = 90^\circ$, 并且光强度趋近于零。若继续再增大入射角, 即当 $I_1 > I_m$ 时, 实验表明, 入射光线在交界面上将不发生折射, 而是按反射定律全部被反射。这种现象就叫“全反射”现象, 或称为“全内反射”现象。折射角 $I_2 = 90^\circ$ 时所对应的入射角 I_m 称之为“临界角”。临界角的大小可由折射定律

$$n_1 \sin I_m = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

得出

$$\sin I_m = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-3)$$

综上所述, 全反射现象的产生条件可归纳为:

1. 光线必须从光密介质(n_1)射向与光疏介质(n_2)的交界面上($n_1 > n_2$)。
2. 入射角需大于临界角, 即 $I_1 > \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ 。

在多数情况下, 光线是从某介质射向与空气的交界面时产生全反射现象的, 例如由玻璃到空气, 或者由水到空气。这时 $n_2 = 1$, 由(1—3)式可算出不同折射率介质所对应的临界角数值, 如表 1—2 所示。

按此表所示, 介质的折射率愈大, 相应的临界角愈小。由于一般玻璃的折射率 $n > 1.5$, 所以, 当光线从玻璃射向玻璃与空气的交界面时, 入射角大于 42° 即可产生全反射现象。

表 1—2

n	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
I_m	50°	45°	42°	39°	36°	34°	32°	30°

于平面反射镜的金属膜层对光约有 6~10% 的吸收, 加之金属膜层还容易因氧化、腐蚀而变质, 使反射率减低; 而全反射棱镜在理论上可以实现将全部入射的光能反射回原介质, 且其化学与装配稳定性也要比平面反射镜好得多。又如, 近年来发展很快的光导纤维, 也是利用全反射原理制成的光学元件。如图 1—9 所示, 光导纤维是由高折射率(n_1) 材料做成的芯子外包一层低折射率(n_2) 材料做成的包皮所构成。由于芯子的折射率 n_1 大于包皮的折射率 n_2 , 则进入光纤内的光线, 凡入射角大于临界角的, 都将在芯子与包皮界面上连续产生全反射, 从一端传向另一端。

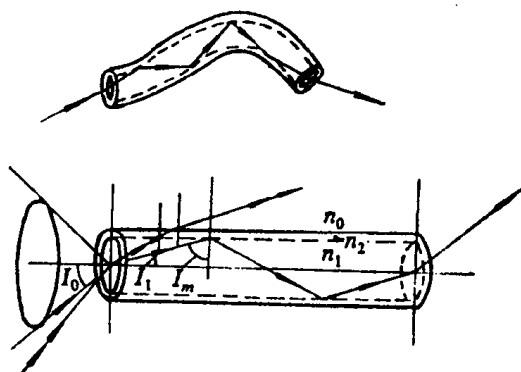


图 1—9

即

$$I_0 = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1-4)$$

由上式可知, 从空气中射到光纤端面的入射光线, 凡入射角小于由 (1-4) 式所决定的 I_0 值时, 光线进入光纤后, 即在光纤与包皮的界面上不断产生全反射, 并从光纤的一端传到另一端。而入射角大于 I_0 的那些入射光线在进入光纤后, 只能透过包皮逸出光纤, 不能继续在光纤内传播。所以, 由空气中射到光纤端面的光线, 只有在位于光纤光轴上顶角为 $2I_0$ 的空间锥体内的光线才能进入光纤, 并在光纤中传播。

通常, 光导纤维是由高折射率光学玻璃为芯料, 首先将其制成棒状, 再在外面套上用低折射光学玻璃做成的包皮, 于是就制成所谓“预制棒”。然后, 将此棒装在高频加热炉中拉制成单丝光纤。单丝光纤的截面一般是圆形, 直径约在几微米到几百微米。光导纤维可以单根使用, 也可以成束使用。由数以千计的单丝光纤构成的光导纤维不仅能导光, 而且还能把图像从一端传送到另一端。仅用来传光的光导纤维束称为导光束, 能传光同时又能传像的光导纤维束称为传像束。由于它们具有体积小, 重量轻, 抗电磁干扰, 抗腐蚀, 不怕震动, 弯曲时也能传光或传像等等优点, 因此在国防、医学、通讯和自动检测等领域内都有十分广泛的应用。

全反射现象在光学仪器中有着广泛的应用。例如, 用全反射棱镜代替平面反射镜来实现光路转折, 可以减少光能的反射损失, 如图 1—8 所示。这是由于

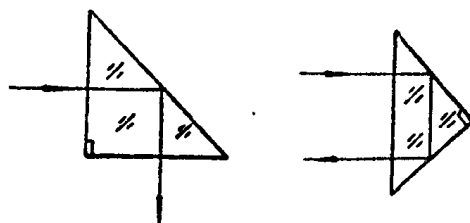


图 1—8

设一光导纤维位于空气中, 即 $n_0 = 1$, 如图 1—9 所示。根据临界角公式

$$\sin I_m = \frac{n_2}{n_1}$$

和折射定律

$$n_0 \sin I_0 = n_1 \sin I_1$$

可得

$$\sin I_0 = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - I_m \right) = n_1 \cos I_m$$

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