

普通高等教育
兵工类规划教材

红外技术系列教材Ⅳ

红外光学系统

冯克成 刘景生 编著



兵器工业出版社

红外光学系统

冯克成 刘景生 编著

兵器工业出版社

(京)新登字 049 号

内 容 简 介

本书较详细地论述了光学系统的设计基础、像差理论、光学薄膜及光学系统像质评价的主要基础知识、基本原理及典型的应用。着重介绍了红外光学系统各种物镜、红外探测器光学系统的结构类型及设计原理和设计方法,使读者初步具备设计红外光学系统的方法和能力。本书适合作红外技术、光电子技术、应用物理专业的教材,也可供从事光电技术、空间光学和应用光学技术的科学技术工作者参阅。

图书在版编目(CIP)数据

红外光学系统/冯克成,刘景生编著. -北京:兵器工业出版社,1995. 3
ISBN 7-80038-814-X

I. 红… II. ①冯… ②刘… III. 红外系统-光学系统-基本知识 IV. TN211

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 02521 号

红外光学系统

冯克成 刘景生 编著

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

廊坊振华纸塑印刷厂印装

※

开本:787×1092 1/16

印张:19.75

字数:474.24千字

1994年8月第1版

1994年8月第1次印刷

印数:1—600册

定价:11.00元

出版说明

遵照国务院国发〔1978〕23号文件精神，中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来，在广大教师的积极支持和努力下，在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下，已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务，共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革及提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要，特别是国防现代化培养人才的需要，反映国防科技的先进水平，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，我们以提高教材质量为主线，完善编审制度、制订质量标准、明确岗位责任，制订了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点，成立了十个专业教学指导委员会，以更好地编制兵工类专业教材建设规划，加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材，全面提高质量，适当发展品种，力争系统配套，完善管理制度，加强组织领导的“八五”教材建设方针。兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的，专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查，认为符合兵工专业培养人才要求，符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套，为教学质量的提高、培养国防现代化人才，为促进兵工类专业科学技术的发展，都将起到积极的作用。

本教材由李铁津主审，经中国兵器工业总公司夜视及激光技术教学指导委员会复查，兵总教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位 and 广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1994年4月

序

光电成像是适应信息社会的需要而迅速发展的一门新技术分支学科。这一先进的技术为人类有效地扩展了自身的视觉能力。利用光电成像技术,可在全黑的夜空不用照明能像白天一样看清周围景物;可利用景物本身在常温下的辐射能获得可见的图像信息;可通过视频信号的转换能完成图像的传输,存贮以及处理等功能。由于光电成像技术首先在军事领域中得到了应用,因此这一技术已成为国防科技中至关重要的专业技术。

中国兵器工业总公司教材编审室最近组织编写了光电成像技术专业的系列教材,这是做了一件很有意义的工作。通过这套教材,读者可以全面了解军事及民用领域中光电成像技术的主要内容及其进展。

光电成像技术,一可以扩展人眼对微弱光图像的探测能力;二可以将超快速现象记下来;三可以开拓人眼对不可见辐射的接收能力。正是由于光电技术的这些作用,才逐步发展成为现在的各类光电成像器件及系统。并由此建立并发展了这一技术学科。

光电成像是以微光图像的增强和红外、紫外、X射线、亚毫米波等非可见辐射图像的探测与处理为基本内容的高新技术分支学科。由于军事工程的迫切需求,这一技术取得了迅猛的发展。当前光电技术已达到接近光子探测的极限水平。其主要标志是:具有高量子效率的负电子亲和势光电阴极的第三代微光像增强器已走出实验室进入商品化市场;以超大规模的电荷耦合器件(CCD)面阵为核心的高性能固态摄像机已在国防和民用领域获得广泛应用;热成像中引入了焦平面技术,多元探测器的光机扫描热成像系统的噪声等效温差已可优于 0.01K ;辐射探测的长波限已延伸到 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的波段; $40\text{ }\mu\text{m}$ 以上波段的开拓工作也有所进展;以红外电荷耦合器件(IRCCD)为核心的凝视热成像系统的发展正方兴未艾,并已开始对体积、重量要求严格的应用场合取代了光机扫描式热像仪。利用光电成像器件,可以将超快速(例如核爆炸、高压放电的形成)在纳秒、皮秒、以至飞秒级变化现象记录下来。

由30年代至今,光电成像技术的发展历程已走过了60年。当前光电成像技术已渗透到许多科学领域中,这一技术开拓了二维高密度以及随时间变化的三维信息源,促成了人类视觉探测域的光谱延伸、阈值扩展和时间暂留。根据当代社会对发展图像信息技术的迫切需要、国防上对夜战和图像制导等技术的重视,可以预计光电成像技术定会有更为迅速的发展前景。为此我深信这套教材的出版将会促进这一新兴分支学科的发展。

王大珩

1992年6月

前 言

本书是根据高等工业学校夜视及激光技术专业教学指导委员会 1990 年 3 月审定的教材编写大纲的要求编写的, 并被列入兵工专业红外系列教材出版计划。

本教材的前两章讲述光学系统设计基础、光学系统的像差及光路计算, 作为全书的基础理论。第三、四章分别重点讲述了红外光学系统物镜的设计和红外探测器光学系统的设计, 作为全书的重点内容。第五、六、七章讲述了光学薄膜、红外光学系统像质评价以及典型红外装置光学系统的设计。

本教材的内容是按 54 学时安排的, 各章后均附有相应的习题。

本教材中的各物理量单位均采用法定计量单位制。

在讨论本教材编写大纲过程中, 沈柯教授(长春光机学院)、周仁忠教授(北京理工大学)、冯家璋研究员(长春光机所)、侯兰田教授(吉林大学)、陈玻若副教授(长春光机学院)提出了许多宝贵意见。

本教材由吉林大学李铁津教授、侯兰田教授担任主审, 长春光机学院副教授马俊芝担任责任编辑。编者向这些同志表示衷心地感谢。

由于作者水平有限, 书中难免还存在一些缺点和错误殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1993 年 1 月

目 录

第一章 光学系统设计基础

1.1 几何光学的基本定律	(1)
1.1.1 基本概念	(1)
1.1.2 几何光学的基本定律	(2)
1.1.3 费马原理和马吕斯定律	(5)
1.1.4 光学成像的基本概念	(6)
1.2 共轴球面系统成像的几何理论	(8)
1.2.1 几何光学的符号规则	(8)
1.2.2 单个球面折射的光路计算公式	(8)
1.2.3 球面的近轴成像	(10)
1.2.4 共轴球面系统和球面反射镜	(12)
1.3 理想光学系统成像的几何理论	(14)
1.3.1 理想光学系统的基点和基面	(14)
1.3.2 理想光学系统的物像位置关系	(17)
1.3.3 理想光学系统的放大率	(18)
1.3.4 光学系统的光焦度	(20)
1.4 光学系统的组合	(20)
1.4.1 两个光组的组合	(21)
1.4.2 共轴多光组的组合	(24)
1.4.3 透镜与薄透镜	(28)
1.5 近轴光学中的矩阵方法	(35)
1.5.1 近轴光线的矩阵表示	(35)
1.5.2 单个折射面的物像矩阵	(36)
1.5.3 用高斯常数表示的基点位置和焦距	(37)
1.5.4 薄透镜系统的矩阵运算	(38)
1.6 平面镜棱镜系统的成像特性	(41)
1.6.1 平面反射镜	(41)
1.6.2 平面折射	(42)
1.6.3 反射棱镜	(45)

1.7 光学系统中的光阑·····	(55)
1.7.1 孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳·····	(55)
1.7.2 视场光阑、入射窗和出射窗·····	(57)
1.7.3 渐晕·····	(58)
1.7.4 消杂光光阑·····	(58)
1.8 望远系统的外形尺寸计算·····	(59)
习题·····	(63)

第二章 光学系统的像差及光线的光路计算

2.1 光线的光路计算·····	(65)
2.1.1 近轴子午光线的光路计算·····	(66)
2.1.2 非近轴子午光线的光路计算·····	(70)
2.1.3 轴外点主光线细光束的光路计算·····	(75)
2.2 非球面子午光线的光路计算·····	(78)
2.2.1 非球面曲面方程表达式·····	(78)
2.2.2 非球面子午面内近轴光线的光路计算·····	(79)
2.2.3 轴对称二次曲面近轴光线的光路计算·····	(80)
2.3 轴上点球差·····	(84)
2.3.1 球差的定义及量度·····	(84)
2.3.2 初级球差表达式及计算·····	(85)
2.3.3 高级球差的计算·····	(86)
2.3.4 折射球面的齐明点及其应用·····	(88)
2.4 正弦差与慧差·····	(89)
2.4.1 等晕条件、正弦条件·····	(89)
2.4.2 正弦差的定义及量度·····	(90)
2.4.3 慧差的定义及量度·····	(91)
2.4.4 初级正弦差、初级慧差的表达式·····	(93)
2.5 像散与像面弯曲(场曲)·····	(94)
2.5.1 像散的定義与量度·····	(94)
2.5.2 像面弯曲的定义及量度·····	(96)
2.5.3 初级场曲与初级像散的表达式·····	(97)
2.6 畸变·····	(100)
2.6.1 畸变的定义及量度·····	(100)
2.6.2 初级畸变的表达式·····	(102)
2.7 色差·····	(102)
2.7.1 光学材料的色散及其有关物理量·····	(103)

2.7.2	光学系统消像差谱线的选择	(103)
2.7.3	位置色差的定义和量度	(104)
2.7.4	倍率色差的定义和量度	(105)
2.7.5	初级色差的表达式	(107)
2.7.6	薄透镜系统的初级色差及具体应用	(109)
2.8	像差综述及应用	(115)
2.8.1	光学系统对像差校正的要求	(115)
2.8.2	光学系统初级像差表达式及其与视场和孔径的关系	(116)
2.8.3	光学系统子午像差特性曲线	(118)
2.8.4	波像差	(120)
2.8.5	光学系统的像差容限	(121)
	习题	(122)

第三章 红外光学系统物镜的设计

3.1	红外光学系统的概述	(124)
3.1.1	典型红外系统的构成	(124)
3.1.2	红外光学系统的功用和特点	(125)
3.1.3	红外光学系统的性能参数及设计原则	(126)
3.2	折射式物镜——单透镜	(130)
3.2.1	薄透镜的初级球差与结构参数的关系	(130)
3.2.2	物体位于无限远时初级像差的表达式	(132)
3.2.3	物体在有限远时的初级像差表达式	(135)
3.2.4	几种特殊形状的单薄透镜初级像差表达式	(136)
3.2.5	红外物镜——单薄透镜的应用实例	(138)
3.2.6	单薄透镜中心厚度的确定	(141)
3.3	折射式物镜——复合透镜	(142)
3.3.1	双胶合物镜的初级像差	(142)
3.3.2	双分离物镜的初级像差	(144)
3.3.3	组合式红外物镜及应用实例	(146)
3.4	反射式物镜——单反射镜	(150)
3.4.1	球面反射镜	(150)
3.4.2	非球面反射镜	(151)
3.4.3	轴对称非球面的初级像差	(153)
3.5	反射式物镜——双反射镜系统	(155)
3.5.1	双反射镜系统的概述	(155)
3.5.2	双反射镜系统的设计	(157)

3.5.3 双反射镜系统主次镜面型的确定	(160)
3.5.4 各种类型的双反射镜系统实例介绍	(163)
3.6 折反射式物镜	(168)
3.6.1 施密特系统	(169)
3.6.2 曼金折反射式物镜	(171)
3.6.3 包沃斯-马克苏托夫系统	(172)
习题	(175)

第四章 红外探测器光学系统的设计

4.1 场镜	(176)
4.1.1 场镜的主要作用	(176)
4.1.2 光学系统中场镜参数的计算	(177)
4.1.3 光学系统中场镜的像差及校正方法	(179)
4.2 光锥	(181)
4.2.1 光锥的种类及其工作原理	(181)
4.2.2 空心圆锥型光锥的设计	(182)
4.2.3 实心圆锥的设计	(184)
4.2.4 场镜与光锥的组合结构	(185)
4.3 浸没透镜	(187)
4.3.1 浸没透镜的成像特点	(187)
4.3.2 浸没透镜的类型及工作原理	(187)
4.3.3 浸没透镜的使用限制	(190)
4.4 整流罩和窗口	(192)
4.4.1 整流罩	(193)
4.4.2 窗口	(194)
4.5 常用光机扫描元件	(194)
4.5.1 光机扫描的分类及特点	(194)
4.5.2 摆动平面反射镜和平面平行平板	(196)
4.5.3 旋转的 45°平面反射镜	(199)
4.5.4 旋转的多面体反射棱柱	(199)
4.5.5 旋转的折射棱镜	(201)
4.5.6 旋转折射光楔	(202)
4.5.7 其他类型的扫描元件	(204)
4.5.8 各种扫描图形的产生方法	(205)
习题	(206)

第五章 光学薄膜

5.1 光学薄膜设计的理论基础	(207)
5.1.1 单色平面电磁波	(207)
5.1.2 平面电磁波在单一界面上的反射和折射	(211)
5.2 光学薄膜特性的理论计算	(216)
5.2.1 单层介质薄膜的反射比	(216)
5.2.2 多层介质薄膜的反射比	(219)
5.3 矢量作图法和有效界面法	(225)
5.3.1 矢量作图法	(225)
5.3.2 有效界面法	(227)
5.4 对称膜系的等效层	(228)
5.4.1 等效光学导纳	(228)
5.4.2 等效层的光谱特性	(230)
5.4.3 周期对称膜系的特征矩阵	(231)
5.5 增透膜	(233)
5.5.1 $\lambda_0/4$ 和 $\lambda_0/2$ 膜系的导纳	(233)
5.5.2 单层增透膜	(234)
5.5.3 双层增透膜	(236)
5.5.4 多层增透膜	(239)
5.5.5 红外增透膜	(242)
5.6 红外带通滤光片	(244)
5.6.1 带通滤光片的光学特性描述	(244)
5.6.2 红外带通滤光片	(245)
5.7 膜厚监控原理 光电极值法	(248)
习题	(250)

第六章 红外光学系统的像质评价

6.1 导言	(252)
6.2 几个基本概念	(253)
6.2.1 线性成像系统	(253)
6.2.2 空间频率	(253)
6.2.3 对比和调制传递函数	(253)
6.2.4 理想光学系统	(254)
6.2.5 截止频率	(254)
6.2.6 线扩散函数	(254)
6.3 点光源的像和点扩散函数	(255)

6.4 非相干扩展目标的像和基本定理	(257)
6.4.1 非相干扩展目标的像	(257)
6.4.2 基本定理	(258)
6.4.3 复合系统的光学传递函数	(261)
6.5 光学传递函数的计算	(263)
6.6 光学传递函数的测量	(265)
6.6.1 测量原理	(266)
6.6.2 红外光学系统 OTF 的测量	(267)
6.6.3 用红外 MTF 测量仪测定红外透镜的焦距	(268)
习题	(269)

第七章 典型红外装置光学系统的设计

7.1 概述	(270)
7.2 透射式红外测温仪光学系统的设计	(271)
7.3 反射式红外测温仪光学系统的设计	(275)
7.4 红外跟踪系统	(278)
7.5 红外热像仪	(282)
7.5.1 旋转折射棱镜热像仪的光学系统	(282)
7.5.2 多元线列并扫热像仪的光学系统	(285)
7.6 机载多光谱扫描仪的设计	(287)
习题	(292)
附录	(293)
参考文献	(304)

第一章 光学系统设计基础

本章重点讲述几何光学的基本定律和成像的概念、球面和共轴球面系统、理想光学系统以及平面镜和棱镜等。

1.1 几何光学的基本定律

1.1.1 基本概念

一、电磁波谱

任何高于绝对零度的物体都要发射电磁辐射,而且实验和理论都证明了光是特定波长的电磁波。电磁波谱的范围很广,从频率比 10^3Hz 更低的无线电波扩展至比 10^{24}Hz 更高的 γ 射线,其大至分布如图 1-1 所示。在 $0.38\sim 0.78\text{ }\mu\text{m}$ 的波长范围内的电磁辐射能被人眼感知,称为可见光,在此范围之外的电磁波,人眼就感受不到了。

光和任何其它波长的电磁波一样,在真空中都以光的速度 c 传播, $c = 299792458\text{ m/s} \approx 3 \times 10^8\text{ m/s}$ 。在空气中的速度也近似于该值。在其它透明介质中光传播的速度随波长不同而变化。

二、光线与波面

在几何光学中可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。任何光源所发生的光波,在某一时刻其振动位相相同的各点所构成的曲面称为波面。波面为平面的称为平面波,波面为球面的称为球面波。波面也可为任意曲面。在各向同性的介质中,光沿着波面的方向传播,因此可认为波面的法线就是几何光学中的光线。换言之,光线就是波面的法线。反之,波面就是所有光线的垂直曲面。

三、光束

与波面对应的法线(光线)的集合就是光束。球面波对应于会聚光束或发散光束,平面波对应于平行光束,如图 1-2 所示。一般说来,球面波通过实际光学系统后,总要发生变形,不再是球面波了,相应的光束也不再是同心光束。由不相交于一点的有一定关系的一些光线的集合,

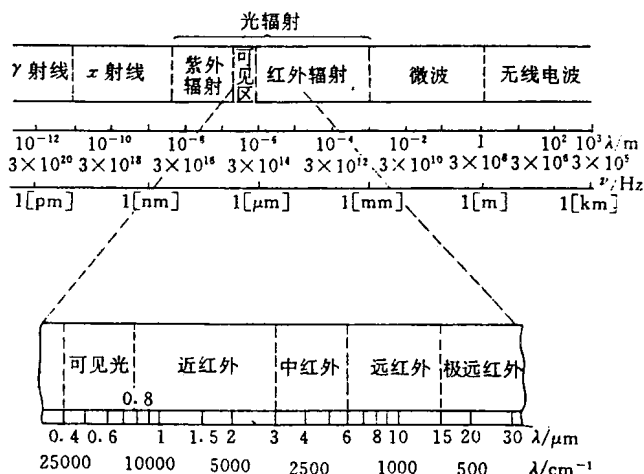


图 1-1 电磁波谱

称为像散光束。

1.1.2 几何光学的基本定律

一、光的直线传播定律

在均匀透明的介质中,光沿直线传播。即在均匀介质中,光线为一直线。

二、光的独立传播定律

自不同方向或由不同物体发生的光线在空间某一点相交时,彼此互不影响,各光线独立传播。

三、光的反射定律和折射定律

当光线由一介质进入另一介质时,光线在两个介质的分界面上被分为反射光线和折射光线。对于此二光线的行进方向,可分别由反射定律和折射定律来表达。如图 1-3 所示。

反射定律 入射光线 AB 入射到两种不同介质的理想光滑分界面的 B 点,入射光线 AB 和法线 BN 所构成的平面称为入射面,而二者之间的夹角 I 称为入射角。反射光线 BC 和法线 BN 之间的夹角 I'' 称为反射角。角 I 和 I'' 以锐角来量度,由光线转向法线,顺时针方向旋转形成的角度为正,反之为负。图中 I 为正, I'' 为负。反射定律可表述为:反射光线在入射面内,并和入射光线分别在法线的两侧;入射角和反射角大小相等符号相反。因此,可表示为

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

折射定律 在图 1-3 中,入射光线 AB 在 B 点发生折射, BD 为折射光线。折射光线 BD 和法线 NN' 的夹角 I' 称为折射角。入射角和折射角的符号法则也是从光线转向法线,按锐角来量度,顺时针旋转为正,反之为负。折射定律可表述为:折射光线在入射面内,并且和入射光线分别在法线的两侧;对于单色光而言,入射角的正弦与折射角的正弦之比与入射角的大小无关,而与两种介质的性质有关。对一定波长的光线,在一定的温度和压力条件下,该比值为一常数,等于折射光线所在介质的折射率 n' 与入射光线所在介质折射率 n 之比。折射定律可表示为

$$\frac{\sin I}{\sin I'} = \frac{n'}{n} \quad (1-2)$$

或写成

$$n \sin I = n' \sin I' \quad (1-3)$$

在式(1-3)中,若令 $n' = -n$,得 $I' = -I$,即为反射定律。

应当指出,上述四个基本定律是在入射光不太强的情况下总结出来的。对于在极强的激光束的照射下,例如,激光的输出功率为 $10 \sim 100 \text{ MW}$,把它聚焦为 10^{12} W/cm^2 的功率密度是不困难的。介质的折射率将随入射光强发生变化。光束之间要产生相互作用,不再保持彼此独立,出现所谓的“非线性光学”效应。

四、折射率

一定波长的单色光在真空的传播速度 c 与它在给定介质中传播速度 v 之比,定义为该介

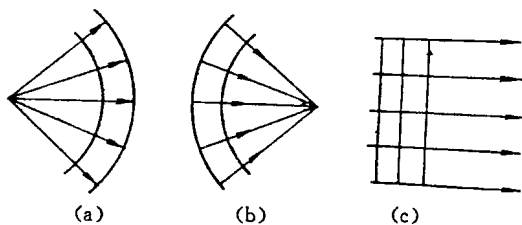


图 1-2 光波的波面

(a)发散球面波;(b)会聚球面波;(c)平面波

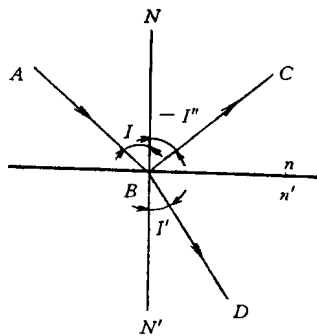


图 1-3 光线经过两种均匀介质分界面的传播规律

质对指定波长的光的绝对折射率。如图 1-4 所示。假设有一束平行光投射到两个介质的平面分界面上,所有光线的入射角为 I_1 ,折射角为 I_2 ,折射光线也相互平行。 OQ 为入射平面波, $O'Q'$ 为折射后的平面波,设光在两介质中的速度分别为 v_1 和 v_2 ,则有

$$OQ = v_1 t, \quad OO' = v_2 t$$

$$\text{但知, } \sin I_1 = \frac{OQ}{OO'}, \quad \sin I_2 = \frac{OO'}{OQ'}$$

$$\text{由此 } \frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{OQ}{OO'} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

式中: n_1 ——光在介质 1 中的折射率;

n_2 ——光在介质 2 中的折射率。

$$\text{如果令 } n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1-4)$$

称为第 2 介质对第 1 介质的相对折射率,则 n_{21} 等于光波在第 1 介质与第 2 介质中传播相速度之比。

如果光线从真空射到某种介质,它在真空中的速度为 c ,在介质中的传播速度为 v ,则该种介质的绝对折射率为

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-5)$$

由于光在空气中传播的速度近似于在真空中传播的速度。因此,通常所说的介质的折射率实际上是该介质对空气的相对折射率。由式(1-5)可知,介质的折射是由真空传播到介质时,在该介质中速度减少的量度。如图 1-4 所示,第 1 和第 2 介质的绝对折射率分别为

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2} \quad (1-6)$$

这样,折射定律可表示为

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (1-7)$$

对于给定的媒质,光学参数($N=n-j\kappa$)随辐射频率(或波长)变化的现象,称为色散现象。通常把材料的折射率 n 随波长 λ 的变化率,即

$$v = \frac{n_2 - n_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$$

或

$$v = \frac{dn}{d\lambda} = \frac{df(\lambda)}{d\lambda} \quad (1-8)$$

就称为它的色散。式 $N=n-j\kappa$ 中 N 为复折射率, κ 为消光系数。表示折射率 n 与波长 λ 关系的曲线称为色散曲线。习惯上常用几个具有不同谱线代号的波长来标明材料的折射率,表 1-1 列出了某些典型玻璃的折射率^① 在光学仪器设计中,光学材料的折射率通常都是对钠黄光(D 线: $\lambda=589.3 \text{ nm}$)而言的。

五、全反射

产生全反射的条件:入射光由光密介质进入光疏介质;入射角必须大于一定的角度,按折

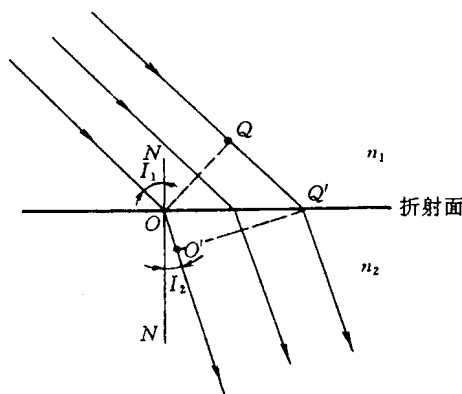


图 1-4 平行光在两种介质分界面上的折射

① 主要的红外透光单晶的性质、碲硒碲化合物玻璃的性质、红外区镀膜材料,以及优选的红外光学材料见附录 6~9。

表 1-1 常用无色光学玻璃的折射率^[1]

谱线代号	—	h	g	F	e	D	C	A'	—	—
光 色	(紫外)	蓝	青	青绿	绿	黄	橙红	红	(红外)	(红外)
波长/ <i>nm</i>	365.0	404.7	435.8	486.1	546.1	589.3	656.3	766.5	863.0	950.8
冕玻璃(K ₉)	1.53582	1.52982	1.52626	1.52195	1.51829	1.51630	1.51389	1.51104	1.50918	1.50778
钡冕玻璃(BaK ₇)	1.59417	1.58620	1.58154	1.57597	1.57130	1.56880	1.56582	1.56238	1.56023	1.55866
重冕玻璃(ZK ₆)	1.63862	1.63049	1.62573	1.61999	1.61519	1.61260	1.60949	1.60592	1.60268	1.60206
轻火石玻璃(QF ₃)	1.61197	1.59968	1.59280	1.58481	1.57832	1.57490	1.57089	1.56638	1.56366	1.56172
钡火石玻璃(BaF ₁)	1.57371	1.56553	1.56080	1.55518	1.55050	1.54800	1.54502	1.54160	1.53946	1.53791
重火石玻璃(ZF ₁)	1.70022	1.68229	1.67245	1.66119	1.65218	1.64750	1.64207	1.63609	1.63254	1.63007

射定律,当折射角 $I' = 90^\circ$, 有

$$\sin I_c = \frac{n'}{n} \sin 90^\circ = \frac{n'}{n}$$

式中入射角 I_c 称为临界角,此时折射光线沿分界面掠射。若入射角 I 大于临界角 I_c , 折射定律已不适用。实验证明,此时光线不发生折射,而按反射定律把光线完全反射回原介质中去。

1.1.3 费马原理和马吕斯定律

一、费马原理

费马(Fermat)原理是从光程的角度来阐述光的传播规律。

光程 $[l]$ 是指光在介质中经过的几何路程 l 与该介质折射率 n 的乘积。即

$$[l] = nl \quad (1-9)$$

因为 $n=c/v$, 于是得

$$\frac{[l]}{c} = \frac{l}{v} = t$$

式中: t ——光在介质中通过路程 l 所用的时间。上式表示光在真空中通过某种介质的光程 $[l]$ 所需要的时间,等于在介质中通过真实路程 l 所需要的时间。由此可知,光在某种介质中的光程,就等于光在同一时间内在真空中所走过的路程。借助光程这个概念,可将光在各种介质中所通过的路程折算为真空中的路程,因此光程又可称为光的“折合路程”。

若光线通过 m 层均匀介质,则光线由许多折射线组成,其光程为

$$[l] = \sum_{i=1}^m n_i l_i \quad (1-10)$$

式中: n_i ——第 i 层介质的折射率;

l_i ——第 i 层介质的光路长度。

若光线通过连续变化的非均匀介质,即折射率 n 逐点连续变化,光由 A 点传到 B 点,则光程为

$$[l] = \int_A^B n dl \quad (1-11)$$

费马原理可表述为:光线由 A 点传到 B 点,经过任意多次折射或反射,其光程为极值(极大或极小,或恒定值),即光程的一次变分为零。

$$\delta[l] = \delta \int_A^B n dl = 0$$

费马原理又称为极值光程定律。

二、马吕斯定律

马吕斯(Malus)定理:垂直于波面的光线束(法线集合)经过任意多次反射和折射以后,无论折射面和反射面的形状如何,出射光束仍垂直于出射波面,保持光束仍为法线集合的性质。并且入射波面与出射波面对应点之间的光程均为定值。

折射(及反射)定律、费马原理、马吕斯定律三者中任意一个均可作为几何光学的基本定律,其余两个可视为其推论。三者之间可以互相推导。