

太阳能工程光学

Taiyangneng Gongcheng Guangxue

魏舒怡 张秀霞 王二垒 编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

太阳能工程光学

魏舒怡 张秀霞 王二垒 编



北京邮电大学出版社

• 北京 •

内 容 提 要

本书共分8章,第1章介绍了光学的基本知识;第2章介绍太阳辐射量与地面的接收;第3章介绍光伏效应;第4章介绍单晶硅、多晶硅及非晶硅材料;第5章介绍太阳能光伏发电及太阳能电池;第6章到第8章分别介绍太阳能热动力发电、太阳能热水及采暖、太阳能制冷及空调。本书的重点章节为第5章到第8章,内容力求全面,图片、图形、数据较多,突出实用性和可读性,希望对广大业内读者提供较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能工程光学 / 魏舒怡, 张秀霞, 王二垒编. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2019.1
ISBN 978-7-5635-5327-3

I. ①太… II. ①魏… ②张… ③王… III. ①太阳能—关系—光学 IV. ①TK511.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 309182 号

书 名	太阳能工程光学
编 者	魏舒怡 张秀霞 王二垒
责任编辑	沙一飞
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www.buptpress3.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京建宏印刷有限公司
开 本	787 mm×960 mm 1/16
印 张	7.25
字 数	141 千字
版 次	2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5327-3

定价: 42.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

太阳能工程光学是一门以工程光学为基础,综合利用光学技术、精密机械、太阳能技术及计算机技术解决各种工程应用课题的技术学科。它将光学中的许多基本概念与技术移植到太阳能,解决太阳能利用系统中的工程技术问题。太阳能技术在现代科技、经济、军事、文化等领域发挥着极其重要的作用,人们也在逐步地向这一新能源出发,充分地利用太阳带给我们的一切。太阳能的使用减少了化石能源的浪费,最重要的是对环境起到了保护的作用,从而太阳能技术将会成为竞争激烈、发展迅猛的信息技术产业的主力军。

基于更好地宣传、普及太阳能工程光学的有关知识,提高行业研发生产的技术水平,作者总结了多年讲授工程光学技术类课程的教学经验,并参阅了大量的国内外优秀教材和科技文献,为适应光电类人才培养的需求而编写了这本《太阳能工程光学》实用技术书。本书作者在征求专家、教授和学生等多方面意见的基础上先后对本书进行了3次较大的修改和完善。全书共分8章,第1章介绍光学的基本知识;第2章介绍太阳辐射量与地面的接收;第3章介绍光伏效应;第4章介绍单晶硅、多晶硅及非晶硅材料;第5章介绍太阳能光伏发电及太阳能电池;第6章到第8章分别介绍太阳能热动力发电、太阳能热水及采暖、太阳能制冷及空调。本书的重点章节为第5章到第8章。本书内容力求全面,图片、图形、数据较多,突出实用性和可读性,希望对广大业内读者提供较高的参考价值。

本书的写作分工如下:魏舒怡主编的前7章里,第1到第4章由魏舒怡撰写,第5章和第6章分别由张丽霞和王二垒撰写草稿;张秀霞主编的第7章和第8章里,第8章由杨晓聪撰写草稿。

由于我们水平所限,加上时间紧迫,错误和不当之处在所难免,欢迎专家学者、教师、学生和工程技术人员提出宝贵意见,以便以后不断改进。

编 者

目 录

第 1 章 光学的理论基础	1
1.1 几何光学的理论基础	1
1.1.1 光的基本概念	1
1.1.2 几何光学的基本定律	2
1.1.3 费马原理	5
1.1.4 马吕斯定律	6
1.2 光学材料	6
1.2.1 透射材料的光学特性	7
1.2.2 反射光学材料的光学特性	8
1.3 辐射量和光学量的基础知识	8
1.3.1 辐射量	9
1.3.2 光学量	10
1.3.3 光学量和辐射量间的关系	12
参考文献	14
第 2 章 太阳辐射量与地面的接收	15
2.1 太阳辐射简介	15
2.2 太阳辐射几何学	17
2.2.1 太阳和地球相对位置的两组坐标系	17
2.2.2 太阳方位角和时角之间的关系	18
2.2.3 倾斜阵列上的光强	19
2.2.4 月平均日辐射量和其他参数	20
2.2.5 晴朗指数	20
2.3 太阳辐射到达地面的形式	21
2.3.1 直接辐射	21
2.3.2 散射辐射	21
2.3.3 总辐射	22

2.4 地面对太阳辐射的反射	22
2.4.1 颜色对反射率的影响	22
2.4.2 土壤湿度对反射率的影响	23
2.4.3 粗糙度对反射率的影响	23
参考文献	23
第3章 光伏效应	24
3.1 光伏效应理论基础	24
3.2 PN结的形成	26
3.3 PN结光电效应	26
3.4 PN结电流方程、耗尽区宽度与结电容	27
3.5 光伏电池	28
3.6 光伏技术的发展	30
参考文献	31
第4章 单晶硅、多晶硅及非晶硅材料	32
4.1 单晶硅、多晶硅及非晶硅材料简介	32
4.1.1 单晶硅简介	32
4.1.2 多晶硅简介	33
4.1.3 非晶硅简介	33
4.1.4 单晶硅、多晶硅、非晶硅的区别	34
4.2 单晶硅、多晶硅及非晶硅太阳能电池介绍	34
4.2.1 单晶硅太阳能电池介绍	34
4.2.2 多晶硅太阳能电池介绍	35
4.2.3 非晶硅太阳能电池介绍	36
4.2.4 硅太阳能电池材料的优异性能	37
参考文献	38
第5章 太阳能光伏发电及太阳能电池	39
5.1 光伏发电概述	39
5.1.1 光伏发电装置的优点	39
5.1.2 光伏发电装置的缺点	40
5.1.3 光伏发电装置的主要用途	40
5.1.4 光伏技术的类型	40
5.1.5 光伏发电的发展趋势	40
5.2 国内外光伏发电发展现状	41
5.2.1 世界光伏产业的新进展及应用特点	41

5.2.2 我国光伏产业发展现状	42
5.3 光伏发电系统	42
5.3.1 独立光伏系统	42
5.3.2 并网光伏系统	43
5.3.3 光伏发电系统设备	44
5.4 太阳能电池的结构及发电原理	45
5.4.1 太阳能电池的结构	45
5.4.2 太阳能电池数学模型	46
5.4.3 太阳能电池的 $I-V$ 特性曲线	47
5.4.4 太阳能电池的表征参数	48
5.4.5 太阳能电池效率的基本限制	49
参考文献	52
第 6 章 太阳能热动力发电	53
6.1 国内外太阳能热动力发电的现状	53
6.2 太阳能热动力发电的概述	55
6.2.1 太阳能热发电分类	55
6.2.2 电站热系统	56
6.2.3 太阳能热动力发电发展简史	57
6.3 太阳能热动力发电的能量平衡及系统循环效率	59
6.3.1 太阳能热动力发电系统的能量平衡原理	59
6.3.2 系统循环效率	61
6.4 太阳能热动力发电站的基本组成	61
6.4.1 聚光集热子系统	61
6.4.2 蓄热子系统	62
6.4.3 辅助能源子系统	63
6.4.4 监控子系统	63
6.4.5 热动力发电子系统	64
6.5 六种太阳能热动力发电系统	64
6.5.1 塔式太阳能热动力发电	64
6.5.2 槽式太阳能热动力发电	66
6.5.3 盘式太阳能热动力发电	67
6.5.4 条式太阳能热动力发电	69
6.5.5 太阳池太阳能热动力发电	70
6.5.6 太阳能烟囱热气流动力发电	71

6.5.7 六种太阳能热动力发电的比较	73
参考文献	74
第7章 太阳能热水及采暖	75
7.1 国内外太阳能热水与采暖技术的现状	75
7.1.1 太阳能热水系统的现状	75
7.1.2 太阳能采暖技术的现状	76
7.2 太阳能热水系统	76
7.2.1 太阳能热水系统的定义	76
7.2.2 太阳能热水系统的组成	77
7.2.3 太阳能热水系统的特征	79
7.2.4 太阳能热水系统的结构特点	80
7.3 太阳能采暖系统	82
7.3.1 太阳能采暖的定义	82
7.3.2 太阳能采暖的意义	82
7.3.3 太阳能采暖的特点	83
7.3.4 太阳能采暖的分类	84
7.3.5 太阳能采暖系统的基本类型	86
参考文献	94
第8章 太阳能制冷及空调	95
8.1 太阳能制冷方式	95
8.2 吸收剂-制冷剂二元溶液的特性	97
8.2.1 混合特性	97
8.2.2 二元溶液的压力——温度特性	98
8.2.3 常用二元溶液的物理性质	100
8.3 氨吸收式制冷机	101
8.3.1 氨吸收式制冷机的基本原理	101
8.3.2 吸收扩散式制冷机内部结构	103
8.4 太阳能空调	106
8.4.1 太阳能空调的简介	106
8.4.2 太阳能空调的工作原理	106
8.4.3 太阳能空调的优点	107
8.4.4 太阳能空调的性能分析	107
参考文献	108

第 1 章 光学的理论基础

1.1 几何光学的理论基础

1.1.1 光的基本概念

光就其本质而言是一种电磁波,只是光波的波长比普通无线电波的波长要短。光波波长范围大致为 $1\text{ mm} \sim 10\text{ nm}$,其中波长在 $380 \sim 760\text{ nm}$ 之间的电磁波能为人眼所感知,称为可见光。波长大于 760 nm 的光称为红外光,而波长小于 380 nm 的光称为紫外光。光波在真空中的传播速度为 $c \approx 2.997\,924\,58 \times 10^8\text{ m/s}$,在介质中的传播速度都小于 c ,且随波长的不同而不同^[2,3]。

可见光随波长的不同而引起人眼不同的颜色感觉。我们把具有单一波长的光称为单色光,而由不同单色光混合而成的光称为复色光。单色光是一种理想光源,现实中并不存在。激光是一种单色性很好的光源,可以近似看作单色光。太阳光是由无限多种单色光组成的。在可见光范围内,太阳光可分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种颜色的光。

通常,我们把能够辐射光能量的物体称为发光体或光源。发光体可看作是由许多发光点或点光源组成的,每个发光点向四周辐射光能量。为讨论问题的方便,在几何光学中,我们通常将发光点发出的光抽象为许许多多携带能量并带有方向的几何线,即光线。光线的方向代表光的传播方向。发光点发出的光波向四周传播时,某一时刻其振动相位相同的点所构成的等相位面称为波阵面,简称波面。光的传播即为光波的波阵面的传播。在各向同性介质中,波面上某点的法线即代表了该点处光的传播方向,即光是沿着波面法线方向传播的。因此,波面法线即为光线,与波面对应的所有光线的集合称为光束。

通常,波面可分为平面波、球面波和任意曲面波。与平面波对应的光线束相互平

行,称为平行光束,如图 1-1(a)所示。与球面波对应的光线束相交于球面波的球心,称为同心光束。同心光束可分为发散光束和会聚光束,如图 1-1(b)、(c)所示。同心光束或平行光束经过实际光学系统后,由于像差的作用,将不再是同心光束或平行光束,对应的光波则为非球面光波。图 1-1(d)所示为非球面光波和对应的像散光束。

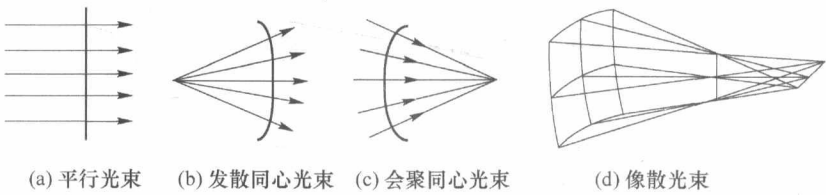


图 1-1 光束与波面的关系

1.1.2 几何光学的基本定律

几何光学把研究光经过介质的传播问题归结为如下四个基本定律,它们是研究光的传播现象、规律以及物体经过光学系统的成像特性的基础。

1. 光的直线传播定律

几何光学认为,在各向同性的均匀介质中,光是沿着直线方向传播的。这就是光的直线传播定律。影子的形成、日蚀和月蚀等现象都能很好地证明这一定律。“小孔成像”即是运用这一定律的很好例子。许多精密测量,如精密天文测量、大地测量、光学测量及相应的光学仪器都是以这一定律为基础的。

但这一定律是有局限性的。当光经过尺寸与波长接近或更小的小孔或狭缝时,将发生“衍射”现象,光将不再沿直线方向传播。光在非均匀介质中传播时,光线传播的路径为曲线,也不再是直线。

2. 光的独立传播定律

不同光源发出的光在空间某点相遇时,彼此互不影响,各光束独立传播,这就是光的独立传播定律。在各光束的同一交会点上,光的强度是各光束强度的简单叠加,离开交会点后,各光束仍按原来的方向传播。

光的独立传播定律没有考虑光的波动性质。当两束光是由光源上同一点发出、经过不同途径传播后在空间某点交会时,交会点处光的强度将不再是两束光的强度的简单叠加,而是根据两束光所走路程的不同,有可能加强,也有可能减弱。这就是光的“干涉”现象。

3. 光的折射定律与反射定律

光的直线传播定律与光的独立传播定律概括的是光在同一均匀介质中的传播规

律,而光的折射定律与反射定律则是研究光传播到两种均匀介质分界上时的现象与规律。

当一束光投射到两种均匀介质的光滑分界表面上时,一部分光在光滑分界表面“反射”,回到原介质中,这种现象称为光的反射,反射回原介质的光称为反射光;另一部分光将“透过”光滑表面进入第二种介质,这种现象称为光的折射,透过光滑表面进入第二种介质的光称为折射光。与反射光和折射光相对应,原来投射到光滑表面发生折射和反射前的光称为入射光。

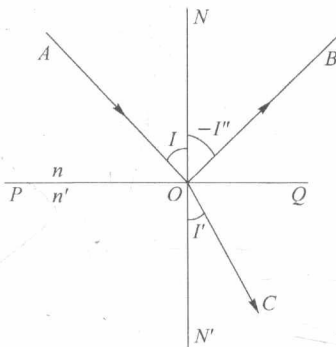


图 1-2 光的反射与折射

如图 1-2 所示,入射光线 AO 入射到两种介质的分界面 PQ 上,在 O 点发生折射和反射。其中,反射光线为 OB ,折射光线为 OC , NN' 为界面上入射点 O 的法线。入射光线、反射光线和折射光线与法线的夹角 I 、 I'' 、 I' 分别称为入射角、反射角和折射角。它们均以锐角度量,由光线转向法线,顺时针方向形成的角度为正,逆时针方向形成的角度为负。

反射定律归结为:1)反射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内;2)反射光线和入射光线位于法线的两侧,且反射角与入射角绝对值相等,符号相反,即

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

折射定律归结为:1)折射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内;2)折射角的正弦与入射角的正弦之比和入射角大小无关,仅由两种介质的性质决定。对于一定波长的光线而言,在一定温度和压力下,该比值为一常数,等于入射光所在介质的折射率 n 与折射光所在介质的折射率 n' 之比,即

$$\frac{\sin I'}{\sin I} = \frac{n}{n'}$$

通常表示为

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

折射率是表征透明介质光学性质的重要参数。我们知道,各种波长的光在真空中的传播速度均为 c ,而在不同介质中的传播速度 v 各不相同,且都比真空中的光速小。介质的折射率就是用来描述介质中的光速相对于真空中的光速减慢程度的物理量,即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-3)$$

这就是折射率的定义。因为真空中的折射率为 1,因此我们把介质相对于真空的折射率称为绝对折射率。在标准条件(大气压强 $p = 101\,275\text{ Pa} = 760\text{ mmHg}$, 温度 $t = 293\text{ K} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,空气的折射率 $n = 1.000\,273$,与真空的折射率非常接近。因此,为方便起见,常把介质相对于空气的相对折射率作为该介质的绝对折射率,简称折射率。

在式(1-2)中,若令 $n' = -n$,则有 $I' = -I$,即折射定律转化为反射定律。这一结论有很重要的意义。后面我们将看到,许多由折射定律得出的结论,只要令 $n' = -n$,就可以得出相应反射定律的结论。

4. 光的全反射现象

光线入射到两种介质的分界面时,通常都会发生折射与反射。但在一定条件下,入射到介质上的光会被全部反射回原来的介质中,而没有折射光产生,这种现象称为光的全反射现象。下面我们就来研究在什么条件下会产生全反射现象。

通常,我们把分界面两边折射率高的介质称为光密介质,而把折射率低的介质称为光疏介质。由式(1-3)可知,光在光密介质中的传播速度较慢,而在光疏介质中的传播速度较快。当光从光密介质向光疏介质传播时,因为 $n' < n$,所以由式(1-2)可知 $I' > I$,即折射光线相对于入射光线而言,更偏离法线方向,如图 1-3 所示。

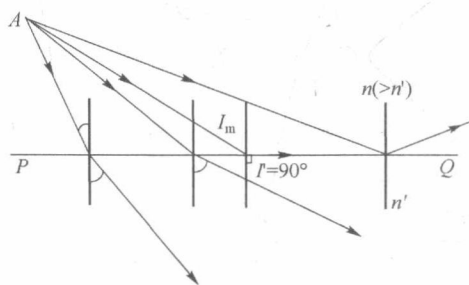


图 1-3 光的全反射现象

当光线入射角 I 增大到某一程度时,折射角 I 达到 90° ,折射光线沿分界面折射出去,这时入射角称为临界角,记为 I_m 。由折射定律公式(1-2)得

$$\sin I_m = n' \sin I' / n = n' \sin 90^{\circ} / n = n' / n \quad (1-4)$$

若入射角继续增大,使 $I > I_m$,即 $\sin I > n' / n$,由式(1-4)可知, $\sin I' > 1$,显然,这是不可能的。这表明入射角大于临界角的那些光线没有折射光线进入第二种介质,而

是全部反射回第一种介质,即发生了全反射现象。

由上述分析可知,发生全反射的条件是:1) 光线从光密介质向光疏介质入射;
2) 入射角大于临界角。

全反射现象在工程实际中有着广泛的应用。在光学仪器中,常常利用各种全反射棱镜代替平面反射镜,以减少反射时的光能损失。图 1-4 所示是一种最常用的全反射等腰直角棱镜。从理论上讲,全反射棱镜可以将入射光全部反射,而镀有反射膜层的平面反射镜只能反射 90% 左右的入射光能。

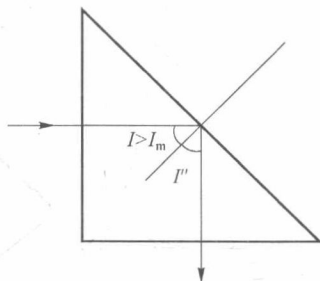


图 1-4 全反射等腰直角棱镜

5. 光路的可逆性原理

在图 1-2 中,若光线在折射率为 n' 的介质中沿 CO 方向入射,由折射定律可知,折射光线必定沿着 OA 方向出射。同样,如果光线在折射率为 n 的介质中沿 BO 方向入射,则由反射定律可知,反射光线也一定沿着 OA 方向出射。由此可见,光线的传播是可逆的。这就是光路的可逆性原理。

1.1.3 费马原理

费马原理用“光程”的概念对光的传播规律做了更简明的概括^[7]。

所谓光程是指光在介质中传播的几何路程 l 与所在介质的折射率 n 的乘积 s ,即

$$s = nl \quad (1-5)$$

将式(1-3)及 $l = vt$ 代入上式,有

$$s = ct \quad (1-6)$$

由此可见,光在某种介质中的光程等于同一时间内光在真空中所走过的几何路程。

费马原理指出,光从一点传播到另一点,其间无论经过多少次折射和反射,其光程为极值。也就是说,光是沿着光程为极值(极大、极小或常量)的路径传播的。因此,费马原理也叫光程极端定律。

我们知道,在均匀介质中光是沿直线方向传播的。但是,在非均匀介质中,由于折

射率 n 是空间位置的函数,因此光线将不再沿直线方向传播,其轨迹是一空间曲线,如图 1-5 所示。此时,光线从 A 点传播至 B 点,其光程由以下曲线积分来确定。

$$s = \int_A^B n dl \quad (1-7)$$

根据费马原理,此光程应具有极值,即式(1-7)表示的一次变分为零,即

$$\delta s = \delta \int_A^B n dl = 0 \quad (1-8)$$

这就是费马原理的数学表示。

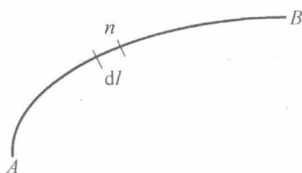


图 1-5 非均匀介质中的光线与光程

费马原理是描述光线传播的基本规律,无论是光的直线传播定律,还是光的反射定律与折射定律,均可以由费马原理直接导出。比如,对于均匀介质,由两点间的直线距离为最短这一公理,即可以证明光的直线传播定律。

1.1.4 马吕斯定律

在各向同性的均匀介质中,光线为光波的法线,光束对应着波面的法线束。马吕斯定律描述了光经过任意多次折射、反射后,光束与波面、光线与光程之间的关系^[8]。

马吕斯定律指出,光线束在各向同性的均匀介质中传播时,始终保持着与波面的正交性,并且入射面与出射波面对应点之间的光程均为定值。这种正交性表明,垂直于波面的光线束经过任意多次折射、反射后,无论折射面、反射面如何,出射光束仍垂直于出射波面。

折射与反射定律、费马原理和马吕斯定律三者中的任意一个均可以视为几何光学的基本定律,而把另外两个作为其基本定律的推论。

1.2 光学材料

各种折射、反射光学元件,如透镜、棱镜、平面镜、球面镜和分划板等是构成光学系

统的基本元件。其所用材料必须满足这样的要求,即折射材料对工作波段具有良好的透过率,反射元件对工作波段具有很高的反射率^[1]。

1.2.1 透射材料的光学特性

透射材料分为光学玻璃、光学晶体和光学塑料三大类,它们的光学特性主要由其对各种色光的透过率和折射率决定。

光学玻璃是最常用的光学材料,其制造工艺成熟,品种齐全。一般光学玻璃能透过波长为 $0.35 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的各种色光,超出这个波段范围的光将会被光学玻璃强烈地吸收。光学晶体的透射波段范围一般比光学玻璃更宽,其应用日益广泛。光学塑料是指可用来代替光学玻璃的有机材料,因其具有价格便宜、密度小、重量轻、易于模压成型、成本较低、生产效率高和不易破碎等诸多优点,近年来已在一些中低档的光学仪器中逐步取代光学玻璃。其主要缺点是热膨胀系数和折射率的温度系数比光学玻璃大得多,制成的光学元件受温度影响大,成像质量不稳定。

透射材料的折射特性一般用夫琅和费特征谱线的折射率表示。用于目视仪器的常规光学玻璃以 D 光或 d 光的折射率 n_D 或 n_d , F 光和 C 光的折射率 n_F 和 n_C 为主要特征。这是因为 F 光和 C 光位于人眼灵敏光谱区的两端,而 D 光或 d 光位于其中间,比较接近人眼最灵敏的谱线 555 nm 。根据特征谱线的折射率,定义如下几种光学常数。

(1) 平均折射率 n_D 和平均色散 $d_n = n_F - n_C$ 。

(2) 阿贝常数: $v_D = (n_D - 1)/(n_F - n_C)$ 。阿贝常数越大,色散越低,反之,色散越大。

(3) 部分色散:任意一对谱线的折射率之差 $n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}$ 。

(4) 相对色散:部分色散与平均色散之比 $(n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2})/(n_F - n_C)$ 。

这些光学常数在国产光学玻璃目录中均可以查到。此外,国产光学玻璃还给出了光学玻璃的物理化学性能参数,如密度、热膨胀系数、化学稳定性等,对光学均匀性、应力消除程度、玻璃中的气泡、杂质和条纹等均有一定的标准和规定。

根据光学玻璃的折射率 n_D 或 n_d 和阿贝常数的不同,光学玻璃分为两大类,即冕牌玻璃和火石玻璃,分别用符号 K 和 F 表示。一般冕牌玻璃具有低折射率和低色散(v_D 大),火石玻璃具有高折射率和高色散(v_D 小)。冕牌玻璃和火石玻璃分别加不同的其他元素,如氟、磷、钡、镧等元素,形成各自的系列。目前,国产光学玻璃目录(参见 GB 903/T—1987)中列出的无色光学玻璃共计 135 种,其中冕牌玻璃有 57 种,冕火石

玻璃有 3 种,火石玻璃有 75 种。

随着激光的不断发展,激光光学系统得到了日益广泛的应用。国产光学玻璃目录还给出了波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光波长的折射率和 YAG 固体激光器(波长 1 064 nm)的折射率。但是,由于激光器种类很多,输出的激光波长各不相同,且又不等于夫琅和费特征谱线的波长,因此,玻璃目录中没有与之相应的折射率。这时,必须根据玻璃折射率随波长变化的色散公式进行插值计算,得到相应波长的折射率。常用光学玻璃的色散公式有以下两种。

哈特曼公式:

$$n = n_0 + C/(\lambda_0 - \lambda)^\alpha \quad (1-9)$$

式中, n_0 、 C 、 λ_0 和 α 为与介质折射率有关的系数。 α 值对于低折射率玻璃可取为 1,对于高折射率玻璃取为 1.2。系数 n_0 、 C 和 λ_0 可由玻璃目录中已知的三个介质折射率求出,然后再根据公式计算所需波长的折射率。

德国肖特玻璃厂的色散公式:

$$n_\lambda^2 = A_0 + A_1/\lambda^2 + A_2/\lambda^4 + A_4/\lambda^6 + A_6/\lambda^8 + A_8/\lambda^{10} \quad (1-10)$$

式中,波长 λ 以 nm 为单位,系数 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_4 、 A_6 、 A_8 可由玻璃目录中查出。

利用上述公式,计算精度在 400~750 nm 波长范围内可达 $\pm 3 \times 10^{-6}$,在 365~400 nm 和 750~1 014 nm 波长范围内可达 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 。这个计算精度对实际应用是足够的。

1.2.2 反射光学材料的光学特性

反射光学元件是在抛光玻璃或金属表面镀上高反射率金属材料的薄膜而成的。反射不存在色散,因此,反射光学材料的唯一光学特性是其对各种色光的反射率 $\rho(\lambda)$ 。各种金属镀层的反射率各不相同,同一金属材料的反射率随波长的不同而不同。

1.3 辐射量和光学量的基础知识

可见光是波长在 $3.8 \times 10^{-7} \sim 7.6 \times 10^{-7}$ m 范围内的电磁辐射,描述电磁辐射的物理量,即辐射量,也可用来描述可见光;可见光是能对人的视觉形成刺激并能被人感受的电磁辐射,因而人们很自然地用视觉受到刺激的程度,即视觉感受来度量可见光。按这种视觉响应原则建立的表征可见光的量称作光学量^[4,5]。

由此可见,可见光是可以用辐射量和光学量这两种量值系统来度量的,把可见光作为纯物理现象来研究时,应采用辐射量量值系统;而研究与人的视觉有关问题时,则采用光学量量值系统更方便。

下面简要介绍各种辐射量和光学量及其单位,以及两种量值系统间的关系。

1.3.1 辐射量

1. 辐射能 Q_e

同其他电磁辐射一样,可见光辐射也是一种能量传播形式。以电磁辐射形式发射、传输或接收的能量称为辐射能,通常用字符 Q_e 表示。度量辐射能的单位名称为焦耳(J)。

2. 辐射通量 Φ_e

单位时间内发射、传输或接收的辐射能称为辐通量,通常用字符 Φ_e 表示。若在 dt 时间内发射、传输或接收的辐射能为 dQ_e ,相应的辐通量 Φ_e 为

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1-11)$$

辐通量与功率有相同的单位,为瓦(W)。

3. 辐射出射度 M_e

辐射源单位发射面积发出的辐通量,定义为辐射源的辐射出射度,简称辐出度,以字符 M_e 表示。假定辐射源的微面积 dA 发出的辐通量为 $d\Phi_e$,则辐出度 M_e 为

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-12)$$

辐出度的单位名称为瓦特每平方米(W/m^2)。

4. 辐射照度 E_e

辐射照射面单位受照面积上接收的辐通量,定义为受照面的辐照度,以字符 E_e 表示。假定受照面的微面积 dA 上接收的辐通量为 $d\Phi_e$,则辐照度 E_e 为

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-13)$$

辐照度和辐出度有相同的单位,单位名称为瓦特每平方米(W/m^2)。

5. 辐射强度 I_e

点辐射源向各方向发出辐射,在某一方向,在单位立体角 $d\Omega$ 内发出的辐通量为 $d\Phi_e$,则辐强度 I_e 为