

现代光学技术丛书

GUANGDIAN TANCE  
JISHU YU YINGYONG

# 光电探测 技术与应用

◎ 主编 郝晓剑 李仰军  
编著 刘吉 赵辉 王小燕

本书特色

1. 独特新颖的体系结构、丰富实用的教学实例;
2. 力求理论与应用并重、知识传授与能力培养并重;
3. 以光电检测技术为主线, 将各章知识点有机融合贯穿;
4. 以工程实际为背景, 详解光电探测系统的设计和应用;
5. 从基本概念和实际应用出发, 由浅入深、循序渐进, 强调学以致用。



国防工业出版社

National Defense Industry Press

现代光学技术丛书

# 光电探测技术与应用

主编 郝晓剑 李仰军  
编著 刘吉 赵辉 王小燕

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以编者多年从事光电探测技术专业本科、研究生的教学讲义为基础,结合编者在光电探测技术领域的最新研究成果,参考近年来光电探测技术的最新进展编写而成。本书主要讲述了光电探测系统中所涉及的光(辐射)源、光电探测器以及常用的光电探测技术;最后介绍了光电探测技术的典型应用。全书以光电探测技术为主线,阐明光电探测系统的理论、技术、方法和应用。

本书力求为光电探测技术专业本科生、研究生和工程技术人员提供光电探测系统分析、设计的基本理论、先进技术和最新方法。

### 图书在版编目(CIP)数据

光电探测技术与应用 / 郝晓剑, 李仰军主编. —北京:  
国防工业出版社, 2009. 8  
(现代光学技术丛书)  
ISBN 978-7-118-06388-2

I. 光... II. ①郝... ②李... III. 光电探测 IV. TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 090418 号

※

国防工业出版社出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)  
腾飞印务有限公司印刷  
新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 15 1/4 字数 374 千字  
2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 31.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422 发行邮购:(010)68414474  
发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

# 前 言

现代科学技术中,光电探测技术是以激光、红外、微光、光纤、微电子等现代光电子器件为基础,由光学、精密机械、电子学和计算机科学相结合的新兴科技领域,在国民经济和国防建设中占有十分重要的地位。利用光电探测技术,能将人眼不易或不能看见的 X 射线、紫外辐射、红外辐射和极微弱的星光甚至瞬变的目标景物逼真地再现或记录下来,从而弥补了人眼在空间、时间能量和光谱分辨能力上的局限性。光探测器件是光电探测技术的一个重要组成部分。在探测过程中,光探测器件的作用是发现信号、测量信号,并为随后的应用提取某些必需的信息。光电探测技术不仅具有重要的军用价值,而且还具有广阔的民用市场。

本书强调光电探测技术的系统性,从内容构成上以光电探测系统设计思想和方法为导航,分别系统性地介绍了光电探测技术基础、光电探测系统中的常用光(辐射)源、探测器以及微弱信号检测技术和常用光电探测技术,指出设计光电探测系统时应注意的问题。在此基础上用创新设计思想组织机、光、电、计算机相结合的几个典型探测系统设计方法和实现过程。本书力求反映光电探测技术学科中的新思想、新工具、新手段,结合近几年光电探测系统中发展的新技术,通过实际应用范例,将最新的科研成果融进本书以供读者借鉴,使读者循序渐进地理解和掌握光电探测系统设计的主要知识点、探测理论、探测方法及最新发展,全面提升读者的光电探测系统设计及应用能力。

本书在编写过程中参阅了很多文献,在此向这些文献的作者表示谢意。中北大学的潘德恒教授和周汉昌教授对本书的编写工作给予了大力帮助和支持,本书中应用了他们的科研成果,特向他们表示敬意和谢意。潘保武教授和姜三平博士为本书的编写付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢。同时,要感谢国防工业出版社多位编辑的辛勤工作和热情帮助。

本书第 1 章、第 5 章和实验部分由中北大学刘吉编写,第 2 章、第 4 章由中北大学赵辉编写,第 3 章由中北大学李仰军编写,第 6 章、第 9 章由中北大学郝晓剑编写,第 7 章、第 8 章由中北大学王小燕编写,郝晓剑负责统编全稿。

本书得到了仪器科学与动态测试教育部重点实验室、电子测试技术国家重点实验室、中北大学的资助,在此表示衷心感谢。

尽管全体编者都尽心尽力,但终因水平有限,书中难免有不足或错误之处,恳请广大读者批评指正。

编者  
2009 年 3 月

# 目 录

第 1 章 光电探测技术基础	1
1.1 光电探测系统的描述	1
1.2 辐射度学和光度学	1
1.2.1 辐射度学的基本物理量	1
1.2.2 光度学的基本物理量	3
1.2.3 辐射度与光度学的基本定律	5
1.2.4 黑体辐射	6
1.3 半导体基础知识	8
1.3.1 半导体结构	8
1.3.2 半导体中的载流子	10
1.4 半导体的光电效应	14
1.4.1 光电导效应	14
1.4.2 p-n 结光伏效应	15
1.4.3 光电发射效应	17
1.5 光电探测器的噪声和特性参数	18
1.5.1 光电探测器的噪声	18
1.5.2 探测器的主要特性参数	20
思考题与计算题	21
参考文献	22
第 2 章 光电探测中的常用光源	23
2.1 光源的基本特性参数	23
2.1.1 辐射效率和发光效率	23
2.1.2 光谱功率分布	24
2.1.3 空间光强分布	24
2.1.4 光源的颜色	25
2.1.5 光源的色温	25
2.2 热辐射源	25
2.2.1 太阳	25

2.2.2	黑体模拟器	26
2.2.3	白炽灯	27
2.3	气体放电光源	27
2.3.1	汞灯	28
2.3.2	氙灯	29
2.3.3	空心阴极灯	29
2.4	固体发光光源	30
2.4.1	场致发光光源	30
2.4.2	发光二极管	32
2.4.3	其他固体发光光源	36
2.5	激光器	37
2.5.1	激光器的基本原理	38
2.5.2	激光器的分类	38
2.5.3	激光的特性	43
	思考题与计算题	44
	参考文献	44
<b>第3章</b>	<b>光电导器件</b>	<b>45</b>
3.1	光敏电阻的工作原理与结构	45
3.1.1	光敏电阻的基本原理	45
3.1.2	光敏电阻的基本结构	46
3.1.3	几种典型的光敏电阻	46
3.2	光敏电阻的基本特性参数	48
3.2.1	光电导增益	49
3.2.2	光谱响应率	49
3.2.3	光电特性	50
3.2.4	伏安特性	51
3.2.5	时间响应	52
3.2.6	前历效应	54
3.2.7	温度特性	54
3.3	光敏电阻的变换电路	55
3.3.1	基本偏置电路	55
3.3.2	恒流电路	56
3.3.3	恒压电路	56
3.3.4	应用举例	57
3.4	光敏电阻的应用实例	59

3.4.1	照明灯的光电控制电路	59
3.4.2	火焰探测报警器	59
3.4.3	照相机电子快门	60
	思考题与计算题	61
	参考文献	62
<b>第4章</b>	<b>半导体结型光电器件</b>	<b>63</b>
4.1	结型光电器件基本原理	63
4.1.1	热平衡状态下的 p-n 结	63
4.1.2	光照下的 p-n 结	64
4.2	光电池	66
4.2.1	硅光电池的基本结构	66
4.2.2	硅光电池的工作原理	67
4.2.3	硅光电池的特性参数	67
4.3	硅光电二极管	69
4.3.1	硅光电二极管基本结构	69
4.3.2	硅光电二极管的工作原理	70
4.3.3	光电二极管的电流方程	70
4.3.4	光电二极管的基本特性	71
4.4	硅光电三极管	73
4.4.1	硅光电三极管基本结构	73
4.4.2	硅光电三极管工作原理	74
4.4.3	硅光电三极管的特性	75
4.5	结型光电器件的偏置电路和放大电路	77
4.5.1	反向偏置电路	77
4.5.2	零伏偏置电路	79
4.5.3	光电器件和放大电路的连接	80
4.6	特殊结型光电器件	81
4.6.1	PIN 光电探测器	81
4.6.2	光电位置传感器(PSD)	82
4.6.3	象限探测器	85
4.7	半导体光电器件的特性参数与选择	88
4.7.1	半导体光电器件的特性参数	88
4.7.2	半导体光电器件的应用选择	90
	思考题与计算题	91
	参考文献	92

<b>第5章 光电成像器件</b> .....	93
5.1 真空成像器件 .....	93
5.1.1 像管 .....	93
5.1.2 摄像管 .....	97
5.2 固体成像器件 .....	102
5.2.1 CCD .....	102
5.2.2 CMOS 图像传感器 .....	107
5.2.3 固体成像器件应用举例 .....	112
思考题与计算题 .....	113
参考文献 .....	114
<b>第6章 红外与微光技术</b> .....	115
6.1 红外探测器 .....	115
6.1.1 热探测器 .....	115
6.1.2 光子探测器 .....	118
6.1.3 红外探测器阵列 .....	119
6.2 微光夜视系统 .....	120
6.3 红外辐射测量仪器 .....	121
6.3.1 单色仪 .....	121
6.3.2 光谱辐射计 .....	122
6.3.3 红外分光光度计 .....	123
6.3.4 傅里叶变换红外光谱仪 .....	124
6.3.5 多通道光谱仪 .....	126
6.4 红外技术的应用 .....	126
思考题与计算题 .....	128
参考文献 .....	128
<b>第7章 微光信号处理技术</b> .....	129
7.1 光电信号的滤波 .....	129
7.1.1 维纳滤波器 .....	129
7.1.2 匹配滤波器 .....	131
7.2 相关检测 .....	133
7.2.1 相关检测的数学原理 .....	133
7.2.2 相关检测在光电信号处理中的应用 .....	136
7.3 锁相放大技术 .....	137



7.4	取样积分技术	140
7.5	光子计数器	143
	思考题与计算题	147
	参考文献	147
<b>第8章</b>	<b>常用光电探测技术</b>	<b>148</b>
8.1	激光测试技术	148
8.1.1	激光干涉测试技术	148
8.1.2	激光衍射测试技术	160
8.1.3	激光测速技术	164
8.2	光纤测试技术	169
8.3	其他光电探测技术	174
8.3.1	三角法测试技术	174
8.3.2	机器视觉测试技术	176
8.3.3	莫尔测试技术	178
	思考题与计算题	181
	参考文献	182
<b>第9章</b>	<b>典型光电探测系统</b>	<b>183</b>
9.1	瞬态表面高温测量及校准系统	183
9.1.1	瞬态表面高温光电探测系统	183
9.1.2	可溯源瞬态表面温度传感器动态校准系统	191
9.1.3	瞬态超高温测试的外推方法探索	199
9.2	激光光幕靶光电探测系统及校准	200
9.2.1	整体框架型激光光幕靶	201
9.2.2	分离型激光光幕靶	203
9.2.3	激光光幕靶的校准	209
9.2.4	激光光幕靶的应用拓展	210
9.3	其他光电探测系统	212
9.3.1	归一化植被指数光电探测系统	212
9.3.2	光纤传像元件光学特性光电探测系统	215
9.3.3	基于PSD的自动机运动参数光电探测系统	218
9.3.4	导弹轨上运动参数光电探测系统	220
	思考题与计算题	221
	参考文献	221

附录	223
实验一 光电二极管光谱响应的测试	223
实验二 光敏电阻特性测试及应用	226
实验三 光纤位移传感实验	228
实验四 PSD 位移测试	229
实验五 CCD 摄像法测量圆形工件直径实验	231

# 第 1 章 光电探测技术基础

## 1.1 光电探测系统的描述

光电探测系统就是以光波作为信息和能量的载体而实现传感、传输、检测等功能的测量系统。它在各个领域特别是军事领域取得了很大的成功,并已经渗透到许多科学领域,得到迅猛发展。光电探测技术是建立在现代光、机、电、计算机等科技成果基础上的综合学科,它所涉及的基础理论和工程技术内容十分广泛,光电探测系统的典型配置如图 1.1 所示。它包括了光源(或辐射源)、信息载体、光电探测器以及信息处理装置。

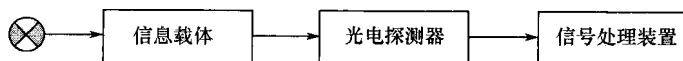


图 1.1 光电探测系统的组成

## 1.2 辐射度学和光度学

为了对光辐射进行定量描述,需要引入计量光辐射的物理量。而对于光辐射的探测和计量,存在着辐射度单位和光度单位两套不同的体系。

在辐射度单位体系中,辐通量或者辐能是基本量,是只与辐射客体有关的量。其基本单位是瓦(W)或者焦(J)。辐射度学适用于整个电磁波段。

光度单位体系是一套反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位,被选作基本量的不是光通量而是发光强度,其基本单位是坎(cd)。光度学只适用于可见光波段。

以上两类单位体系中的物理量在物理概念上是不同的,但所用的物理符号是相互对应的。为了区别起见,以下角标 $e$ 表示辐射度物理量,下角标 $v$ 表示光度物理量。下面重点介绍辐射度单位体系中的物理量。光度单位体系中的物理量可对比理解。

### 1.2.1 辐射度学的基本物理量

#### 1. 辐[射]能

辐能是以辐射形式发射或传输的电磁波(主要指紫外、可见光和红外辐射)能量。辐能一般用符号 $Q_e$ 表示,其单位是焦(J)。

#### 2. 辐[射能]通量

辐通量 $\Phi_e$ 又称为辐[射]功率,定义为单位时间发射、传输或接收的辐射能量,即

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1.1)$$

单位为瓦(W)或焦/秒(J/s)。

### 3. 辐[射]出[射]度

辐出度  $M_e$  是用来反映物体辐射能力的物理量。定义为辐射体单位面积发射的辐通量,即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1.2)$$

单位为瓦/米<sup>2</sup>(W/m<sup>2</sup>)。

### 4. 辐[射]强度

辐强度  $I_e$  定义为:点辐射源在给定方向上发射的在单位立体角内的辐通量,用  $I_e$  表示,即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1.3)$$

单位为瓦/球面度(W/sr)。

一个任意形状的封闭锥面所包含的空间称为“立体角”,用  $\Omega$  表示。立体角的求法是以锥顶为球心,以  $r$  为半径作一圆球,如果锥面在圆球上所截面积等于  $r^2$ ,则该立体角为一个“球面度”(sr),如图 1.2 所示。

因为整个空间球面面积为  $4\pi r^2$ ,因此整个空间球面度为

$$\Omega = 4\pi r^2/r^2 = 4\pi(\text{sr}) \quad (1.4)$$

由辐射强度的定义可知,如果一个置于各向同性均匀介质中的点辐射体向所有方向发射的总辐通量是  $\Phi_e$ ,则该点辐射体在各个方向的辐强度  $I_e$  是常量,有

$$I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi} \quad (1.5)$$

对于一个圆锥面,如图 1.3 所示,当其半顶角为  $\alpha$  时,圆锥所包含球缺面积为

$$A = 2\pi rh = 2\pi r^2(1 - \cos\alpha) \quad (1.6)$$

则圆锥所包含立体角为

$$\Omega = 2(1 - \cos\alpha) = 4\pi \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (1.7)$$

如果  $\alpha$  很小,则式(1.7)可以简化为

$$\Omega = \pi\alpha^2 \quad (1.8)$$

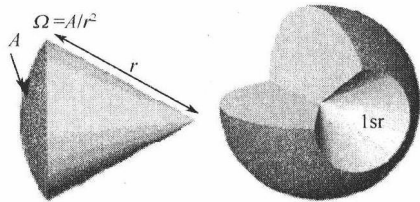


图 1.2 立体角及球面度的定义图

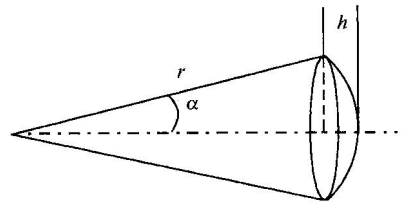


图 1.3 圆锥所包含立体角

### 5. 辐[射]亮度

辐亮度  $L_e$  定义为面辐射源在某一给定方向上的辐通量,如图 1.4 所示。

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos\theta} \quad (1.9)$$

式中  $\theta$ ——给定方向和辐射源面元法线间的夹角。

单位为瓦/(球面度·米<sup>2</sup>)(W/(sr·m<sup>2</sup>))。

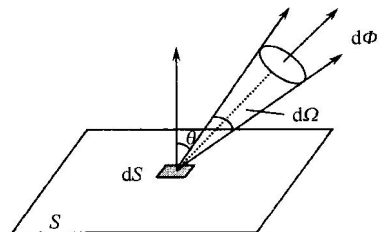


图 1.4 辐射亮度示意图

## 6. 辐[射]照度

在辐射接收面上的辐照度  $E_e$  定义为照射在面元  $dA$  上的辐通量  $d\Phi_e$  与该面元的面积  $dA$  之比,即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1.10)$$

单位为瓦 / 米<sup>2</sup> ( $W/m^2$ )。

## 7. 单色辐[射]度量

对于单色光辐射,同样可以采用上述物理量表示,只不过均定义为单位波长间隔内对应的辐射度量,并且对所有辐射量  $X_e$  来说,单色辐度量与辐度量之间均满足

$$X_e = \int_0^\infty X_e(\lambda) d\lambda \quad (1.11)$$

### 1.2.2 光度学的基本物理量

由于人眼的视觉细胞对不同频率的辐射有不同响应,故用辐射度单位描述的光辐射不能正确反应人的亮暗感觉。光度单位体系是一套反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位,在光频区域光度学的物理量可以用与辐度学的基本物理量  $Q_e, \Phi_e, I_e, M_e, L_e, E_e$  对应的  $Q_v, \Phi_v, I_v, M_v, L_v, E_v$  来表示,其定义完全一一对应,其关系见表 1.1。

表 1.1 常用辐度量度和光度量之间的对应关系

辐射度物理量				对应的光度量			
物理量名称	符号	定义或定义式	单位	物理量名称	符号	定义或定义式	单位
辐[射]能	$Q_e$		J	光量	$Q_v$	$Q_v = \int \Phi_v dt$	$lm \cdot s$
辐[射能]通量	$\Phi_e$	$\Phi_e = dQ_e/dt$	W	光通量	$\Phi_v$	$\Phi_v = \int I_v d\Omega$	lm
辐[射]出[射]度	$M_e$	$M_e = d\Phi_e/dS$	$W/m^2$	光出射度	$M_v$	$M_v = d\Phi_v/dS$	$lm/m^2$
辐[射]强度	$I_e$	$I_e = d\Phi_e/d\Omega$	$W/sr$	发光强度	$I_v$	基本量	cd
辐[射]亮度	$L_e$	$L_e = dI_e/(dS \cos\theta)$	$W/(m^2 \cdot sr)$	[光]亮度	$L_v$	$L_v = dI_v/(dS \cos\theta)$	$cd/m^2$
辐[射]照度	$E_e$	$E_e = d\Phi_e/dA$	$W/m^2$	[光]照度	$E_v$	$E_v = d\Phi_v/dA$	lx

光视效能描述某一波长的单色光辐射通量可以产生多少相应的单色光通量。即光视效能  $K(\lambda)$  定义为同一波长下测得的光通量与辐射通量的比之,即

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} \quad (1.12)$$

单位为流 / 瓦 ( $lm/W$ )。

通过对标准光度观察者的实验测定,在辐射频率  $540 \times 10^{12} Hz$  (波长 555nm) 处,  $K(\lambda)$  有最大值,其数值为  $K_m = 683 lm/W$ 。单色光视效率是  $K(\lambda)$  用  $K_m$  归一化的结果,其定义为

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{1}{K_m} \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} \quad (1.13)$$

国际照明委员会(CIE)根据对多人的大量观察结果确定了人眼对各种波长光的平均相对灵敏度,成为“标准观察者”光谱光视效率,或视见函数,如图 1.5 所

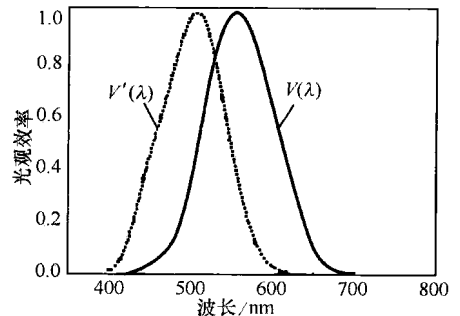


图 1.5 光谱光视效率曲线

示。 $V(\lambda)$  表示明视觉效率曲线,  $V'(\lambda)$  表示暗视觉效率曲线。

表 1.2 给出了人眼的明视觉光谱效率的数值。

表 1.2 明视觉光谱光视效率(最大值 = 1)

波长 /nm	$V(\lambda)$	波长 /nm	$V(\lambda)$	波长 /nm	$V(\lambda)$
380	0.00004	510	0.503	640	0.175
390	0.00012	520	0.710	650	0.107
400	0.0004	530	0.862	660	0.061
410	0.0012	540	0.954	670	0.032
420	0.0040	550	0.995	680	0.017
430	0.0116	560	0.995	690	0.0082
440	0.023	570	0.952	700	0.0041
450	0.038	580	0.870	710	0.00210
460	0.060	590	0.757	720	0.00105
470	0.091	600	0.631	730	0.00052
480	0.139	610	0.503	740	0.00025
490	0.2088	620	0.381	750	0.00012
500	0.323	630	0.265	760	0.00006

与辐射度量体系不同,在光度学单位体系中,被选作基本单位的不是光量或光通量,而是发光强度,其单位是坎(cd)。坎不仅是光度体系的基本单位,而且也是国际单位制(SI)的七个基本单位之一。

对辐射度学和光度学中物理量的换算关系总结如图 1.6 所示。

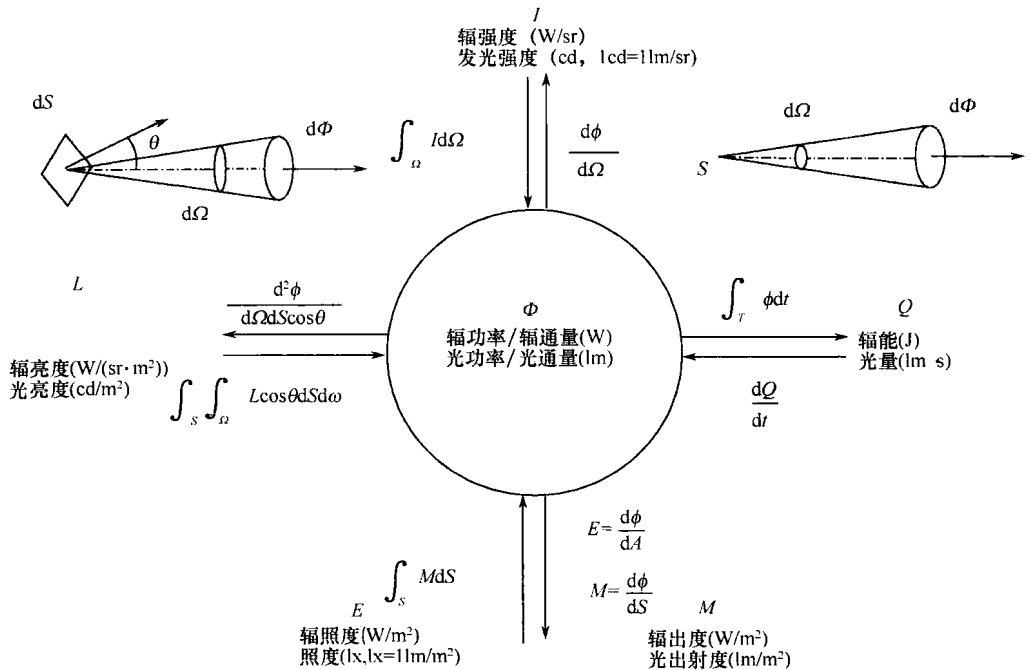


图 1.6 辐射度学和光度学物理量换算关系图

### 1.2.3 辐射度与光度学的基本定律

#### 1. 辐照度的余弦定律

如图 1.7 所示,与光束成  $\theta$  角的表面积  $S'$  和它在垂直传播方向上的投影  $S$  对  $O$  点所张的立体角  $\Omega$  是相同的,在该立体角内点光源发出的辐通量不随传输距离而变化,即有

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad E' = \frac{\Phi}{S'}$$

因为  $S = S' \cos\theta$ , 所以

$$E' = E \cos\theta \quad (1.14)$$

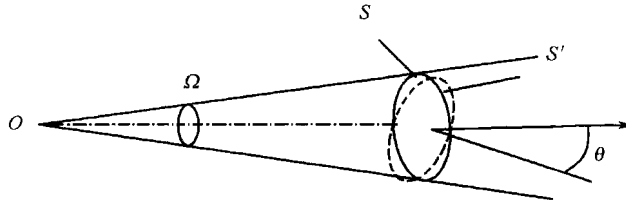


图 1.7 点光源光能量的传输

任一表面上的辐照度随该表面法线和辐能传输方向之间夹角的余弦而变化,称为辐照度的余弦定律。

另外一种情况是相对完全漫反射体而言的,也称为朗伯余弦定律。朗伯表面是一个对入射辐射提供均匀的漫射的表面,从不同角度观察该表面,其明暗程度是一样的。例如,乳白玻璃、聚四氟乙烯(Teflon)、毛石英玻璃可认为是朗伯表面。图 1.8 表明了光在朗伯表面发生折射和反射的情况。

如图 1.9 所示,法线方向上辐强度为  $I_0$ , 表面积为  $dA$  的辐射表面,其辐亮度为  $I_0/dA$ , 对于朗伯表面有  $I_\theta/dA = I_0(dA \cos\theta)$ , 所以

$$I_\theta = I_0 \cos\theta \quad (1.15)$$

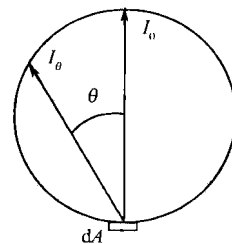
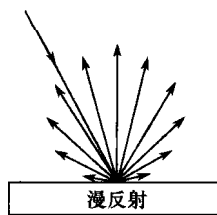
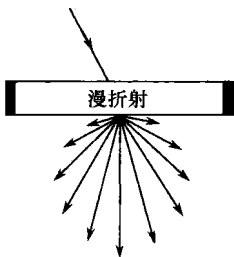


图 1.8 朗伯表面发生折射和反射的情况

图 1.9 朗伯表面的余弦定律

朗伯辐射表面在某方向上的辐射强度随与该方向和表面法线之间夹角的余弦而变化。

#### 2. 距离平方反比定律

一定的立体角内,所张的立体角所截的面积与球半径平方成正比。若无损失,点光源在此空间发出的辐通量不变,因此,点光源在传输方向上某点的辐照度和该点到点光源的距离平方成反比。如果非点光源,尺寸较小,距表面足够远,则用平方反比定律不会产生明显的误差。

#### 3. 亮度守恒定律

光束传输路径上两个面源 1 和 2, 面积为  $dA_1$  和  $dA_2$ , 通过  $dA_1$  的光束都通过  $dA_2$ 。辐射亮度

守恒关系如图 1.10 所示。

$$d\Omega_1 = \frac{dA_2 \cos\theta_2}{r^2}, \quad d\Omega_2 = \frac{dA_1 \cos\theta_1}{r^2} \quad (1.16)$$

面源 1 作光源,面源 2 接收的辐通量为

$$d^2\Phi_{12} = L_1 dA_1 \cos\theta_1 d\Omega_1 = L_1 dA_1 \cos\theta_1 \frac{dA_2 \cos\theta_2}{r^2} \quad (1.17)$$

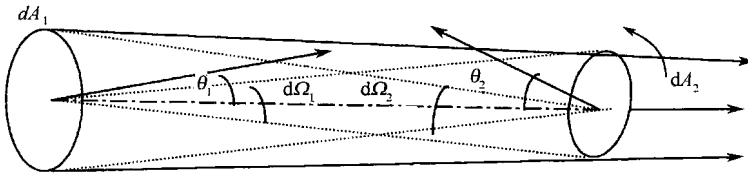


图 1.10 辐射亮度守恒关系

面源 2 的辐亮度

$$L_2 = \frac{d^2\phi_{12}}{d\Omega_2 dA_2 \cos\theta_2} = \frac{d^2\Phi_{12}}{dA_2 \cos\theta_2 dA_1 \cos\theta_1 / r^2} \quad (1.18)$$

将辐通量代入,就有

$$L_1 = L_2 \quad (1.19)$$

可见,光辐射能在传播介质中没有损失时辐射亮度是恒定的。

## 1.2.4 黑体辐射

任何温度在 0K 以上的物体都会发射各种波长的电磁波,这种由于物体中的分子、原子受到热激发而发射电磁波的现象称为热辐射。热辐射具有连续的辐射谱,波长自远红外区到紫外区,并且辐射能按波长的分布主要决定于物体的温度。

### 1. 单色吸收比和单色反射比

任何物体向周围发射电磁波的同时,也吸收周围物体发射的辐射能。当辐射从外界入射到不透明的物体表面上时,一部分能量被吸收,另一部分能量从表面反射(如果物体是透明的,则还有一部分能量透射)。

(1) 吸收比。被物体吸收的能量与入射的能量之比称为该物体的吸收比。在波长  $\lambda \sim (\lambda + d\lambda)$  范围内的吸收比称为单色吸收比,用  $\alpha_\lambda(T)$  表示。

(2) 反射比。反射的能量与入射的能量之比称为该物体的反射比。在波长  $\lambda \sim (\lambda + d\lambda)$  范围内相应的反射比称为单色反射比,用  $\rho_\lambda(T)$  表示。对于不透明的物体,单色吸收比和单色反射比之和等于 1,即

$$\alpha_\lambda(T) + \rho_\lambda(T) = 1 \quad (1.20)$$

若物体在任何温度下,对任何波长的辐能的吸收比都等于 1,即  $\alpha_\lambda(T) \equiv 1$ ,则称该物体为绝对黑体(简称黑体)。

### 2. 基尔霍夫辐射定律

在同样的温度下,各种不同物体对相同波长的单色辐出度与单色吸收比之比值都相等,并等于该温度下黑体对同一波长的单色辐出度,即

$$\frac{M_{\nu\lambda 1}(T)}{\alpha_{\nu\lambda 1}(T)} = \frac{M_{\nu\lambda 2}(T)}{\alpha_{\nu\lambda 2}(T)} = \dots = M_{\nu\lambda b}(T) \quad (1.21)$$



式中  $M_{\nu\lambda b}$ ——黑体的单色辐出度。

### 3. 普朗克公式

黑体处于温度  $T$  时,在波长  $\lambda$  处的单色辐出度由普朗克公式可得

$$M_{\nu\lambda b}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_B T} - 1)} \quad (1.22)$$

式中  $h$ ——普朗克常数;  
 $c$ ——真空中的光速;  
 $k_B$ ——玻耳兹曼常数。

令  $C_1 = 2\pi hc^2, C_2 = hc/k_B$ , 则式(1.22) 可改写为

$$M_{\nu\lambda b}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} (\text{W}/(\text{cm} \cdot \mu\text{m})) \quad (1.23)$$

于是有

$$C_1 = (3.741832 \pm 0.000020) \times 10^{-12} \text{W} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{第一辐射常数})$$

$$C_2 = (1.438786 \pm 0.000045) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (\text{第二辐射常数})$$

图 1.11 为不同温度条件下黑体的单色辐出度(辐亮度)随波长的变化曲线。可见:

- (1) 对应任一温度,单色辐出度随波长连续变化,且只有一个峰值,对应不同温度的曲线不相交。因而温度能唯一确定单色辐出度的光谱分布和辐出度(即曲线下的面积)。
- (2) 单色辐出度和辐出度均随温度的升高而增大。
- (3) 单色辐出度的峰值随温度的升高向短波方向移动。

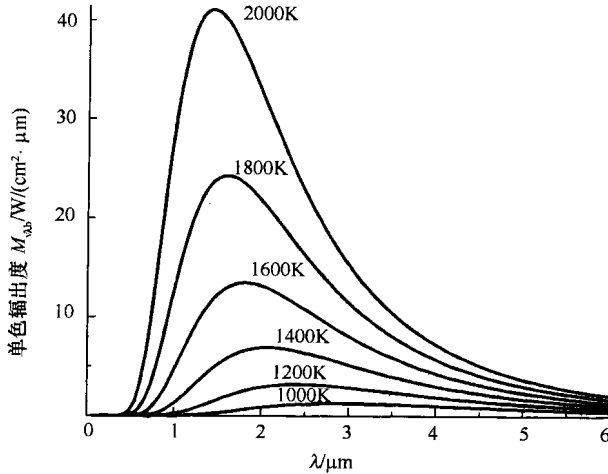


图 1.11 黑体辐射单色辐出度的波长分布

### 4. 瑞利 — 琼斯公式

当  $\lambda T$  很大时,  $e^{C_2/\lambda T} \approx 1 + \frac{C_2}{\lambda T}$ , 可得到适合于长波长区的瑞利 — 琼斯公式, 即

$$M_{\nu\lambda b}(T) = \frac{C_1}{C_2} T \lambda^{-4} \quad (1.24)$$

在  $\lambda T > 7.7 \times 10^5 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  时, 瑞利 — 琼斯公式与普朗克公式的误差小于 1%。