

# 光电探测 技术及应用

卢春生 编著



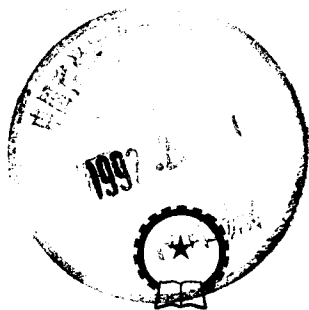
机械工业出版社

73-7311

171

# 光电探测技术及应用

卢春生 编著



机械工业出版社

9210158

(京)新登字054号

本书主要介绍光电系统中的光电探测技术。全书围绕提高探测系统的灵敏度问题展开讨论。

本书在讲述了各类光电探测器的工作原理、性能参数、结构特点及使用方法后,又介绍了光信号及光电信号在光电探测系统中的处理方法。在此基础上讨论了直接探测系统的应用实例。最后介绍了光外差探测原理、特性及应用举例。

书中搜集了光电探测方面的大量图表数据。可供具有大专文化程度工程技术人员参考,也可作为大学光电子专业学生教学用书。

DL35/29

## 光电探测技术及应用

卢春生 编著

\*

责任编辑:刘思源 周娟 版式设计:王颖

封面设计:肖晴 责任校对:熊天荣

责任印制:尹德伦

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可登出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张 10·字数 264 千字

1992年3月北京第1版·1992年3月北京第1次印刷

印数 0,001--2,050·定价:8.90元

\*

ISBN 7-111-02822-8/TN·51

## 前 言

光电探测系统包括以下三个独立的部分：光源（发射光学系统）、传输场及接收系统。习惯上把接收系统称为光电探测系统。本书将重点讨论这部分的内容。考虑到光电探测系统（接收系统）的性能直接与光源及传输场的特性有关，为使读者对整个光电探测系统有一全面的了解；也便于工程技术人员设计探测系统参考，本书在绪论中简单介绍了光发射场、光源、传输介质及背景辐射特性，着重介绍实用性较强的图表数据。

光电探测系统的型式和性能在很大程度上依赖于光电探测器的类型及性能，因为光电探测器是光电探测系统的关键元件。本书的前三章介绍各类光电探测器（包括成像探测器）的工作原理、性能参数、结构特点及使用方法；第四章介绍光信号在光电探测系统中的处理方法。包括光信号的调制理论、空间滤波与光谱滤波等；第五章讨论探测器的偏置条件，探测器与前置放大器的最佳匹配及电子滤波等问题。这两章的内容是提高探测系统灵敏度及探测精度的有力措施。第六、七两章在前几章内容的基础上分述了直接探测系统的品质指标、应用实例及光外差探测原理、特性和应用实例。

光电探测系统内容广泛，覆盖面较宽，由于篇幅有限，本书不可能包含光电探测系统的全部内容。例如，光电探测系统中的主光学系统的设计、选择；电子信号处理电路及探测器的制冷系统都未加讨论，感兴趣的读者可参阅有关专著。

本书根据系统设计者的需要，搜集了大量的有关光电探测方面的图表、数据供读者查阅。希望这些数据、资料对读者的工作有所帮助。

西安科技大学杨宜禾教授对本书进行了认真、细致的审阅，

#### IV

提出了许多宝贵意见，在此表示深切感谢，并向在本书编写过程中作过贡献的同志一并表示谢意。

由于作者水平有限，难免会存在错误及不足之处。恳请读者提出批评指正。

卢春生

1990年12月

# 目 录

前言	
绪论	1
第一章 光电探测器概述	18
§ 1.1 光电探测器分类	18
§ 1.2 光电探测器性能参数	20
§ 1.3 光电探测器的噪声	23
§ 1.4 半导体材料的光电性质	33
第二章 光电探测器	45
§ 2.1 光电导探测器	45
§ 2.2 光伏探测器	60
§ 2.3 光电发射探测器	83
§ 2.4 热探测器	103
第三章 真空及固体摄像器件	122
§ 3.1 真空摄像器件的特性参数	123
§ 3.2 真空摄像管	125
§ 3.3 固体摄像器件	138
第四章 光信号处理技术	156
§ 4.1 光学调制概述	156
§ 4.2 调制盘	166
§ 4.3 光栅莫尔条纹调制	184
§ 4.4 电光调制	189
§ 4.5 声光调制	193
§ 4.6 光学机械扫描	197
§ 4.7 辅助光学系统	204
§ 4.8 光谱滤波	210
第五章 光电信号的放大与滤波	212
§ 5.1 放大器的噪声性能	212

## VI

§ 5.2	放大器最佳源阻抗与实际源阻抗的匹配方法	218
§ 5.3	探测器的偏置电路	224
§ 5.4	电子滤波	235
第六章	光电直接探测及应用	242
§ 6.1	光电直接探测系统的特性参数	242
§ 6.2	直接探测系统的距离方程	251
§ 6.3	直接探测系统应用举例	254
第七章	光外差探测及应用	283
§ 7.1	光外差探测原理	283
§ 7.2	光外差探测特性	286
§ 7.3	影响光外差探测灵敏度的因素	293
§ 7.4	光外差探测系统举例	300
参考文献		311

# 绪 论

## 一、光电探测简介

光电探测系统接收从目标（泛指被探测的对象）来的电磁辐射，利用光电探测器将目标携带的光信息转变成电信号，同时在光学系统和电子线路或计算机中进行信息处理，以使光辐射携带的信息转变成为可以理解的电信号。进而输入计数、显示或记录装置，实现目标参数的自动测量或提供清晰的目标图象或者输入自动控制系统自动跟踪目标以及完成其它自动控制任务。

光电探测利用的电磁辐射波谱范围是整个电磁波辐射（如表 0-1 所列）的一部分，从  $0.32\mu\text{m}$  到中近红外的  $100\mu\text{m}$  波段。虽然长波光电探测器件目前亦可制做，甚至能与毫米波连通，但它们的应用范围极窄，使用温度极低，本书略去了这一部分内容。

表 0-1

波 段	波 长	
	常 用 单 位	cm
低频振动	$2 \times 10^4 \text{m}$ 以上	$2 \times 10^6$ 以上
无线电波 {	长波 $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^8 \text{m}$	$2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^5$
{	中波 $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^2 \text{m}$	$2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^4$
{	短波 $2 \times 10^2 \sim 10 \text{m}$	$2 \times 10^4 \sim 1 \times 10^3$
{	超短波 $10 \sim 0.5 \text{m}$	$1 \times 10^3 \sim 0.5 \times 10^2$
{	毫米波 $0.5 \text{m}$ 以下	$0.5 \times 10^2$ 以下
红外线 {	长波 $420 \sim 100 \mu\text{m}$	$4.2 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-2}$
{	中波 $100 \sim 15 \mu\text{m}$	$1 \times 10^{-2} \sim 1.5 \times 10^{-3}$
{	短波 $15 \sim 0.75 \mu\text{m}$	$1.5 \times 10^{-3} \sim 0.76 \times 10^{-4}$



(续)

波段	波 长	
	常用单位	cm
可见光 红 橙 黄 绿 青 兰 紫	760~620nm	$0.76 \times 10^{-4} \sim 0.62 \times 10^{-4}$
	620~590nm	$0.62 \times 10^{-4} \sim 0.59 \times 10^{-4}$
	590~560nm	$0.59 \times 10^{-4} \sim 0.56 \times 10^{-4}$
	560~500nm	$0.56 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$
	500~480nm	$0.48 \times 10^{-4} \sim 0.45 \times 10^{-4}$
	480~450nm	$0.48 \times 10^{-4} \sim 0.45 \times 10^{-4}$
	450~400nm	$0.45 \times 10^{-4} \sim 0.40 \times 10^{-4}$
紫外线	400~5nm	$0.40 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-7}$
伦琴射线	5~0.004nm	$5 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-10}$
丙种射线	40x及以下	$4 \times 10^{-10}$ 及以下

1. 探测系统组成 光电探测系统可化简为下述方块图表示。

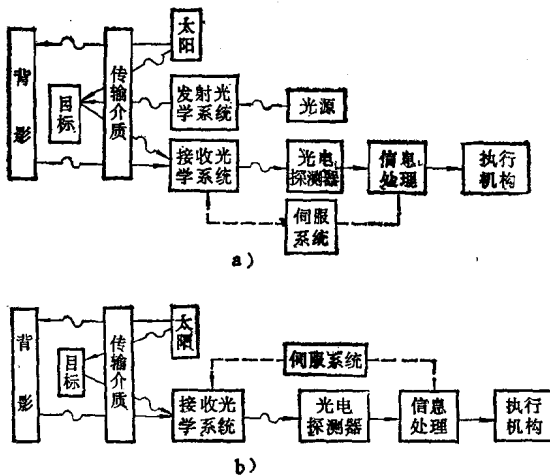


图0-1 光电探测系统方块图

光电探测系统由信息源、传输介质及接收系统组成。信息源和背景杂光经传输介质（大气、水、光纤）一起进入接收光学系统（或者还包括光调制）把它们会聚到光电探测器上，光电探测器把光信号转变为电信号经电子线路处理后把信号送到执行部件中，或直接显示；或存储、记录；或控制、转换。

2. 光电探测的任务 光电探测的任务是利用目标所携带的光频电磁辐射（简称光辐射），经探测系统测量出光辐射的光谱分布、辐射通量或光强分布、温度分布等参数，从而识别目标的种类、形状、大小及目标在空间的位置、运动速度等。

目标所携带的光辐射（信息）可以是它自身发射的光辐射波，也可以是反射太阳光的辐射波或者是人造光源照射物体后经它反射或散射的光辐射波。

3. 光电探测的用途 光电探测技术的应用极其广泛。在军事上用于侦察、通信、制导、测距及定向等；在工业上用于计量（长度、角度、内外直径、表面质量、速度、温度等）、生产过程监测、控制以及监测环境污染等；医学上利用热图象诊断疾病；农业上根据植物反射阳光光谱的不同可估计农业收成、预报病虫害、调查森林资源、探测森林火灾；地质上用于勘探矿物资源。此外，在天文、地理、科学实验等各行各业都会碰到光电探测的问题，连日常生活中的防盗报警、火车轴温测量也离不开光电探测技术。

4. 光电探测系统分类 光电探测系统的种类繁多、形式各异。分类方法也不同。

按携带信息光源分 可分成被动探测系统及主动探测系统。它们的原理方块图分别示于图0-1 a 和 b 里。

主、被动接收系统的组成大致相同，不同的是信息源。它们的接收系统都包含接收光学系统、光电探测器及信息处理电路这几部分。但被动探测系统的光调制在接收系统内，主动探测系统的光调制在发射系统内。被动探测的信息源是目标自身辐射或外来光辐射，它没有专门的光发射系统；主动探测的信息源是人造

光源。为充分利用人造光源的辐射能量，需要专门的发射光学系统压缩光束发散角，以提高单位立体角内的发射量。把压缩前、后的立体角的比值  $G$ ，称为光学天线增益。

按被探测光源的光谱分，可分为可见光（400~760nm）探测系统和红外光及紫外光探测系统。常用的红外光谱波段为  $0.76\sim 15\mu\text{m}$ 。军用探测系统都在红外波段。因为它的保密性好。

按显示形式分 可分成成像探测系统或称面探测系统和非成像探测系统也称点探测系

统。成像探测系统可测量出目标在象面上的光强分布或温度分布。因而可分辨出目标的形状及其它特征；点探测系统只能测出目标总辐射功率的大小，无法分辨目标的形状。

按接收方法分：可分成直接（非相干或功率）探测系统和外差（相干）探测系统。它们的接收光学系统原理示意图表示在图0-2 a 和 b 里。

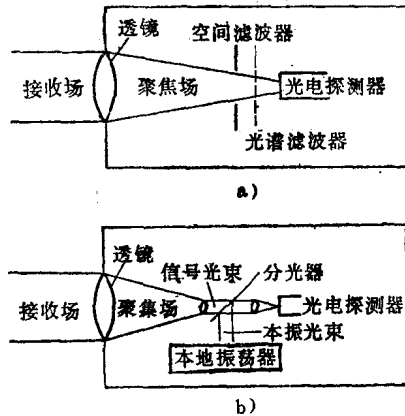


图0-2 直接和外差探测光学系统原理示意图

直接探测系统中的光电探测器直接响应光波的瞬时功率；外差探测系统中的光电探测器响应的是信号光波与本振光波的混频波。外差探测既可敏感光波的幅度变化，亦可敏感光波的频率及相位变化。外差探测能够测量的信息量比直接探测要多，比直接探测有更多的优点（见第七章）。但外差探测系统比较复杂，且只能用于相干性能较好的激光光源的系统中。

## 二、光场

光场是电磁场，空间任意点的电磁场可由麦克斯韦尔电磁方程求解。令  $\xi$  为空间坐标系中的某点，场源位于坐标原点。如图

0-3所示。

若产生光场的光源为点源，则在空间任意点 $\xi$ 的光场 $f(t, \xi)$ 为：

$$f(t, \xi) = \frac{A}{L} \exp\left[j\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} L\right] \quad (0-1)$$

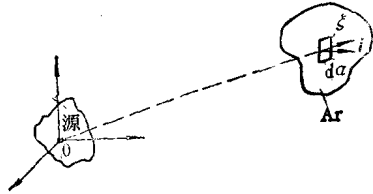


图0-3 光场

式中， $A$ 为光源的光波振幅； $2\pi L/\lambda$ 是传播距离为 $L$ （即场源 $0$ 到 $\xi$ 点的距离）时，光波的相位滞后； $\omega$ 、 $\lambda$ 分别为光波的振荡圆频率及波长； $t$ 为时间。

由波动光学可知，光场强度与光波振幅的平方成正比。所以 $\xi$ 点的光场强度表示为：

$$I(t, \xi) \propto |f(t, \xi)|^2 \quad (0-2)$$

设想光源 $L$ 处的 $\xi$ 点上有一个接收面积 $A_r$ ，在 $t$ 时刻通过该面上的光场功率 $P_r(t)$ 为：

$$P_r(t) = \int_{A_r} I(t, \xi)(i \cdot d\alpha) \quad (0-3)$$

式中， $i$ 为功率流（辐射通量）方向单位矢量； $d\alpha$ 为接收面积的法向矢量；括号中“点积”是该两个矢量间的方向余弦。

式(0-2)和式(0-3)表明了发射场与接收面上接收功率的关系。若认为光源向空间辐射是各向同性的，且不考虑传输介质的损耗，则距点光源 $L$ 处的总的光场功率 $P(t)$ 等于以 $L$ 为半径的球面 $4\pi L^2$ 上的光场功率，即：

$$P(t) = 4\pi L^2 I(t, \xi)$$

$$\text{或} \quad I(t, \xi) = \frac{P(t)}{4\pi L^2} \quad (0-3a)$$

在 $A_r$ 面上的功率 $P_r(t)$ 为：

$$P_r(t) = \frac{P(t)}{4\pi L^2} A_r \quad (0-4)$$

点光源在 $A$ 面上的光场功率等于以源点为中心, 以 $A$ 面为界的立体角内的辐射功率。在此条件下, 光场强度 $I(t, \xi)$ 就等于辐射强度 $I(I = dP/d\Omega \text{ W/sr})$ 。

若光源不是点光源而是面光源, 则点源辐射强度 $I$ 与面源辐射亮度 $N$ 之间存在下述关系:

$$N = \frac{1}{\cos\theta} \frac{dI}{dA} \quad (0-5)$$

式中,  $\theta$  为面积 $dA$ 的法线方向与功率流方向的夹角。

若把面源做为理想的漫辐射体(也称朗伯辐射体)处理, 则辐射亮度 $N$ 为:

$$N = \frac{R}{\pi} \quad (0-6)$$

式中,  $R$  为物体的辐出度, 辐出度 $R$ 可根据黑体辐射定律求得。它们是:

### (1) 基尔霍夫比辐射定律

$$\varepsilon = \frac{R}{R_B} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} R_{B\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} R_{B\lambda} d\lambda} \quad (0-7)$$

式中,  $R$  为实际物体的辐出度;  $R_B$  为黑体辐出度;  $R_{B\lambda}$  为黑体的光谱辐出度;  $\varepsilon$  为比辐射率。

### (2) 绝对黑体的斯蒂芬-玻尔兹曼全辐射定律

$$R_B = \sigma T^4 \quad (0-8)$$

其中,  $\sigma = 5.669606 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度。

### (3) 绝对黑体的普朗克光谱辐射定律

$$R_{B\lambda} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (0-8a)$$

式中,  $R_{B\lambda}$  为绝对黑体的光谱辐出度;  $\lambda$  为波长 ( $\mu\text{m}$ );  $T$  是绝对温度 (K);  $h = 6.626196 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$  为普朗克常数;  $k =$

$1.380622 \times 10^{-23} \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ , 为玻尔兹曼常数;  $c = 2.997925 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 为光速。

通常根据比辐射率  $\epsilon_\lambda$  的值把物体分成为三类:

- 1) 绝对黑体  $\epsilon_\lambda = \epsilon = 1$ ,  $\epsilon$  不随波长变化, 自然界中除天空近似黑体外, 没有绝对黑体存在。
- 2) 灰体  $\epsilon_\lambda < 1 = \epsilon$ , 是常数。
- 3) 选择性辐射体  $\epsilon_\lambda < 1$ , 且随波长变化。

图0-4 a 给出不同温度时的黑体辐射光谱分布曲线; 图0-4 b 标出了非黑体辐射随波长变化的相对关系曲线。

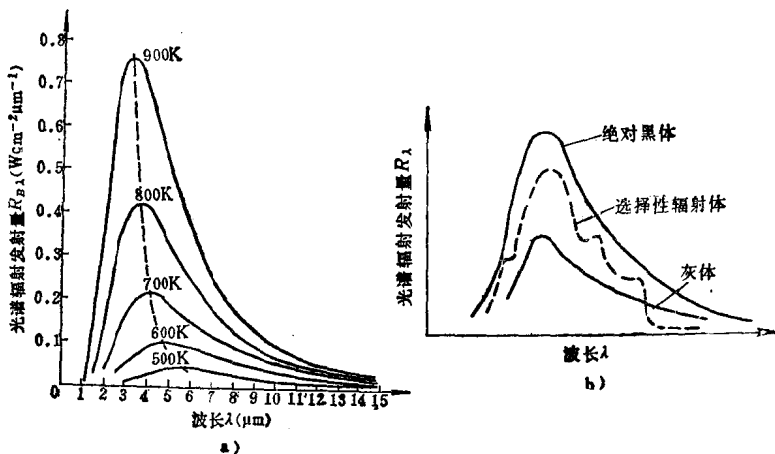


图0-4  $R_{B\lambda}$ 、 $R_\lambda$ 与 $\lambda$ 的关系曲线

当物体的温度  $T$  已知时, 可利用式 (0-7) 和式 (0-8) 求出物体的全辐出度  $R$ :

$$R = \epsilon \sigma T^4 \quad (0-9)$$

如果需要知道物体某一段范围  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  的辐出度  $R_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ , 则可通过积分普朗克公式得到:

$$R_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \times \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda \quad (0-10)$$

严格地讲对选择性辐射体的全辐射量也应该由普朗克公式积分得到:

$$R = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \times \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right] d\lambda \quad (0-11)$$

显然,从理论上讲,只要知道物体的温度 $T$ ,就可求得某一波长范围内的辐出度。实际上对式(0-10)和式(0-11)积分相当困难,因为它是超越函数。为此,人们利用数值计算法计算出各种温度下不同波长的绝对黑体辐出度,供大家查阅。表0-2是上海技术物理所编制的温度为300K、波长在0.3~20 $\mu\text{m}$ 范围的黑体辐出度 $R_{B\lambda}$ 和 $R_{B0-\lambda}$ 的表格。其它温度的辐出度表格略。

表0-2 黑体辐出度

 $T = 300\text{K}$ 

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{\lambda}$ ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ )	$R_{0-\lambda}$ ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{\lambda}$ ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ )	$R_{0-\lambda}$ ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
0.60	$9.2668 \times 10^{-30}$	$7.2234 \times 10^{-82}$	4.60	$5.3853 \times 10^{-4}$	$3.2033 \times 10^{-4}$
0.80	$1.0497 \times 10^{-21}$	$1.4733 \times 10^{-23}$	4.80	$6.7216 \times 10^{-4}$	$4.4118 \times 10^{-4}$
1.00	$5.5443 \times 10^{-17}$	$1.2314 \times 10^{-16}$	5.00	$8.1737 \times 10^{-4}$	$5.8996 \times 10^{-4}$
1.20	$6.5990 \times 10^{-14}$	$2.1377 \times 10^{-15}$	5.20	$9.7160 \times 10^{-4}$	$7.6873 \times 10^{-4}$
1.40	$9.2133 \times 10^{-12}$	$4.1147 \times 10^{-13}$	5.40	$1.1322 \times 10^{-3}$	$9.7903 \times 10^{-4}$
1.60	$3.4214 \times 10^{-10}$	$2.0216 \times 10^{-11}$	5.60	$1.2963 \times 10^{-3}$	$1.2218 \times 10^{-3}$
1.80	$5.3079 \times 10^{-9}$	$4.0209 \times 10^{-10}$	5.80	$1.4615 \times 10^{-3}$	$1.4976 \times 10^{-3}$
2.00	$4.5011 \times 10^{-8}$	$4.2644 \times 10^{-9}$	6.00	$1.6253 \times 10^{-3}$	$1.8064 \times 10^{-3}$
2.20	$2.4725 \times 10^{-7}$	$2.8714 \times 10^{-8}$	6.20	$1.7855 \times 10^{-3}$	$2.1475 \times 10^{-3}$
2.40	$9.8442 \times 10^{-7}$	$1.3784 \times 10^{-7}$	6.40	$1.9403 \times 10^{-3}$	$2.5202 \times 10^{-3}$
2.60	$3.0688 \times 10^{-6}$	$5.1093 \times 10^{-7}$	6.60	$2.0880 \times 10^{-3}$	$2.9231 \times 10^{-3}$
2.80	$7.9119 \times 10^{-6}$	$1.5478 \times 10^{-6}$	6.80	$2.2274 \times 10^{-3}$	$3.3548 \times 10^{-3}$
3.00	$1.7555 \times 10^{-5}$	$3.9946 \times 10^{-6}$	7.00	$2.3575 \times 10^{-3}$	$3.8135 \times 10^{-3}$
3.20	$3.4530 \times 10^{-5}$	$9.0581 \times 10^{-6}$	7.20	$2.4776 \times 10^{-3}$	$4.2972 \times 10^{-3}$
3.40	$6.1581 \times 10^{-5}$	$1.8479 \times 10^{-5}$	7.40	$2.5872 \times 10^{-3}$	$4.8038 \times 10^{-3}$
3.60	$1.0131 \times 10^{-4}$	$3.4537 \times 10^{-5}$	7.60	$2.6861 \times 10^{-3}$	$5.3313 \times 10^{-3}$
3.80	$1.5588 \times 10^{-4}$	$5.9995 \times 10^{-5}$	7.80	$2.7741 \times 10^{-3}$	$5.8775 \times 10^{-3}$
4.00	$2.2671 \times 10^{-4}$	$9.7976 \times 10^{-5}$	8.00	$2.8514 \times 10^{-3}$	$6.4403 \times 10^{-3}$
4.20	$3.1441 \times 10^{-4}$	$1.5181 \times 10^{-4}$	8.20	$2.9182 \times 10^{-3}$	$7.0174 \times 10^{-3}$
4.40	$4.1871 \times 10^{-4}$	$2.2485 \times 10^{-4}$	8.40	$2.9748 \times 10^{-3}$	$7.6069 \times 10^{-3}$

(续)

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{\lambda}$ ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ )	$R_{0-\lambda}$ ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{\lambda}$ ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ )	$R_{0-\lambda}$ ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
8.60	$3.0216 \times 10^{-3}$	$8.2067 \times 10^{-3}$	12.60	$2.6784 \times 10^{-3}$	$2.0182 \times 10^{-2}$
8.80	$3.0590 \times 10^{-3}$	$8.8149 \times 10^{-3}$	12.80	$2.6510 \times 10^{-3}$	$2.0713 \times 10^{-2}$
9.00	$3.0876 \times 10^{-3}$	$9.4297 \times 10^{-3}$	13.00	$2.5829 \times 10^{-3}$	$2.1234 \times 10^{-2}$
9.20	$3.1079 \times 10^{-3}$	$1.0049 \times 10^{-2}$	13.20	$2.5344 \times 10^{-3}$	$2.1746 \times 10^{-2}$
9.40	$3.1205 \times 10^{-3}$	$1.0672 \times 10^{-2}$	13.40	$2.4856 \times 10^{-3}$	$2.2248 \times 10^{-2}$
9.60	$3.1258 \times 10^{-3}$	$1.1297 \times 10^{-2}$	13.60	$2.4366 \times 10^{-3}$	$2.2740 \times 10^{-2}$
9.80	$3.1246 \times 10^{-3}$	$1.1922 \times 10^{-2}$	13.80	$2.3877 \times 10^{-3}$	$2.3223 \times 10^{-2}$
10.00	$3.1172 \times 10^{-3}$	$1.2546 \times 10^{-2}$	14.00	$2.3388 \times 10^{-3}$	$2.3695 \times 10^{-2}$
10.20	$3.1043 \times 10^{-3}$	$1.3169 \times 10^{-2}$	14.20	$2.2902 \times 10^{-3}$	$2.4158 \times 10^{-2}$
10.40	$3.0863 \times 10^{-3}$	$1.3788 \times 10^{-2}$	14.40	$2.2419 \times 10^{-3}$	$2.4611 \times 10^{-2}$
10.60	$3.0638 \times 10^{-3}$	$1.4403 \times 10^{-2}$	14.60	$2.1940 \times 10^{-3}$	$2.5055 \times 10^{-2}$
10.80	$3.0373 \times 10^{-3}$	$1.5013 \times 10^{-2}$	14.80	$2.1465 \times 10^{-3}$	$2.5489 \times 10^{-2}$
11.00	$3.0070 \times 10^{-3}$	$1.5618 \times 10^{-2}$	15.00	$2.0996 \times 10^{-3}$	$2.5914 \times 10^{-2}$
11.20	$2.9736 \times 10^{-3}$	$1.6216 \times 10^{-2}$	15.20	$2.0532 \times 10^{-3}$	$2.6329 \times 10^{-2}$
11.40	$2.9373 \times 10^{-3}$	$1.6807 \times 10^{-2}$	15.40	$2.0075 \times 10^{-3}$	$2.6735 \times 10^{-2}$
11.60	$2.8985 \times 10^{-3}$	$1.7391 \times 10^{-2}$	15.60	$1.9625 \times 10^{-3}$	$2.7132 \times 10^{-2}$
11.80	$2.8576 \times 10^{-3}$	$1.7966 \times 10^{-2}$	15.80	$1.9181 \times 10^{-3}$	$2.7520 \times 10^{-2}$
12.00	$2.8149 \times 10^{-3}$	$1.8533 \times 10^{-2}$	16.00	$1.8745 \times 10^{-3}$	$2.7899 \times 10^{-2}$
12.20	$2.7706 \times 10^{-3}$	$1.9092 \times 10^{-2}$	17.00	$1.6882 \times 10^{-3}$	$2.9669 \times 10^{-2}$
12.40	$2.7250 \times 10^{-3}$	$1.9642 \times 10^{-2}$	18.00	$1.4821 \times 10^{-3}$	$3.1243 \times 10^{-2}$

自然界的物体大多数是选择性辐射体。不过在光电探测技术中可把许多物体近似地看成是灰体。例如地球、天空、人体、喷气发动机尾管等。有些选择性辐射体在某一波段范围内也可认为是灰体。

表0-3列出几种材料的法向比辐射率  $\epsilon$  值。

有了表0-2和表0-3就可得到物体温度为  $T$  的某一波段的辐出度。

例：计算常温下  $T = 300\text{K}$  的海水在  $8 \sim 14\mu\text{m}$  的辐出度  $R_{8 \sim 14}$ 。根据表0-2查得：

$$R_{10 \sim 14} = 2.3695 \times 10^{-2} \quad \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$$

$$R_{10 \sim 8} = 6.4403 \times 10^{-3} \quad \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$$



表0-3 几种材料的法向比辐射率

类型	材料名称及表面特征	温度 (°C)	比辐射率 $\epsilon$
石灰	粗刷墙粉	20	0.91
	鹅卵石	25~30	0.94
	沙子	20	0.9
	混凝土	20	0.92
	水泥	25~30	0.93
沥青	沥青	25~30	0.95
泥土	干泥土	20	0.92
	饱和水泥土	20	0.95
作物	新鲜绿叶树	20	0.95~0.98
	大麦、黍类作物	25~30	0.95
冰水	光滑冰	-10	0.96
	雪	-10	0.85
	海水	20	0.99
油漆	黑漆涂在铁上	24	0.87
	黑色或白色喷漆	38~93	0.85~0.95
钢	表面氧化不锈钢 (18-8型)	60	0.85
	抛光钢材	100	0.07
	粗糙的钢板	38~370	0.94~0.97

则  $R_{B8\sim14} = R_{B0\sim12} - R_{B0\sim8} = 1.7255 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

由表0-3查得300K海水的比辐射率  $\epsilon \approx 0.99$ , 所以海水在  $8 \sim 14\mu\text{m}$  的辐出度  $R_{8\sim14}$  为:

$$R_{8\sim14} = \epsilon R_{B8\sim14} = 1.7082 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$$

由上述得到热辐射体的辐射量, 也就可求得辐射功率。

热辐射体是被动探测系统的主要信息源。

主动探测系统的信息源主要是激光。激光以其亮度高、方向性好、单色性好著称, 因而得到广泛应用。激光既可连续地发射电磁波, 也可以脉冲形式发射电磁波。脉冲宽度一般为  $(0.7 \sim 40) \times 10^{-9} \text{ s}$ 。目前用锁模技术可做到  $1.2 \times 10^{-15} \text{ s}$ 。由于脉宽很窄, 瞬时功率可作得很高。表0-4和表0-5分别给出几种连续激光