

N1974  
62

# 红外手册

第三分册

(红外探测器)

52

红外与激光技术编辑组

红 外 手 册

编辑： 红外与激光技术编辑组  
出版： 天津市(15)215信箱  
印刷： 天津新华印刷厂

第三分册 (全套共有四个)



# 出版说明

一九七五年，红外情报与分析中心根据现代红外技术发展的需要，组织和筹备《红外手册》(The Infrared Handbook)的编辑出版工作。红外情报与分析中心主任George Zissis，与亚利桑那大学光学教授W.L.Wolfe、即一九六五年出版的《军事红外技术手册》(Handbook of Military Infrared)的编辑，作为《红外手册》的编辑，共同合作，经过广泛、深入的调查研究，多方征求意见，在《军事红外技术手册》(该手册国内尚无中译本)的基础上，作了较大的修改，充实了大量数据，增加了新的内容，编成了这本《红外手册》。这本手册于一九七八年在美国出版，去冬引入我国，是目前红外学科领域中最新的一本参考书和必备的工具书。

为了及时地把这本手册推荐给我国从事红外工程技术设计、科教人员，我们全文翻译了这本手册，内部出版；考虑到使用方便，在译本中，根据全书的自然章节，拟分四分册出版：

- 第一分册： 辐射理论与大气传输  
(即原手册的1-6章)
- 第二分册： 光学材料与元件  
(即原手册的7-10章)
- 第三分册： 红外探测器  
(即原手册的11-15章)
- 第四分册： 红外系统  
(即原手册的16-25章)

参加第三分册翻译、校对的有翟树礼、徐向东、贾鸿智、裘效诚、方珙、周赞熙、杜元清、张秀媚、龚琰民和陆荣铿等同志。整个分册由周茂树同志审订。

红外技术涉及的专业面很广，参加译、校和审订者的专业、外文水平有限，在译本中难免有谬误之处，敬请广大读者批评指正。

**《红外与激光技术》编辑组**

一九八〇年五月

# 红 外 手 册

## 第 三 分 册

### 目 录

第十一章	探测器	(1)
第十二章	电荷耦合器件	(66)
第十三章	摄象管	(103)
第十四章	照相胶片	(160)
第十五章	制冷系统	(181)

# 第十一章 探测器

## 目 录

11.1 前 言	(1)
11.1.1 符号、名称和单位	(1)
11.1.2 探测器参数的符号和说明	(4)
11.1.3 响应元	(4)
11.1.4 光电转换过程说明	(4)
11.1.5 窗口	(5)
11.1.6 孔阑	(9)
11.1.7 杜瓦瓶	(9)
11.2 热探测器理论	(9)
11.2.1 测辐射热计	(9)
11.2.2 热电偶和热电堆	(12)
11.2.3 热气动器件	(14)
11.2.4 热释电器件	(14)
11.2.5 热探测器性能的理论限	(15)
11.3 光子探测器的理论描述	(17)
11.3.1 光电导效应	(17)
11.3.2 光伏效应	(19)
11.3.3 光磁电(PEM)效应	(22)
11.3.4 光电发射效应	(23)
11.3.5 光子探测器性能的理论限	(24)
11.4 探测器特性	(29)
11.4.1 探测器参数	(29)
11.4.2 探测器品质因数	(32)
11.4.3 探测器性能测试	(33)
11.4.4 性能计算	(37)
11.5 市售热探测器的性能	(41)
11.6 市售光子探测器的性能	(44)

11·6·1	非本征硅的特性	(56)
11·6·2	三元合金探测器	(58)
11·7	参考资料和文献目录	(63)
11·7·1	参考资料	(63)
11·7·2	文献目录	(63)

# 第十一章 探 测 器

## 11.1 引 言

这一章的目的是提供评价专门用途的红外探测器所需的重要数据、公式和讲义。本章主要限于讨论敏感0.7到1000微米波段的单元探测器和探测器阵列。探测器定义是：

探测器是能提供对入射到器件上辐射进行有效量度的电输出的一种器件。这个定义表明，探测器不仅包括响应元，而且包括响应元的装架以及其他一些零部件，如窗口，限制敏感面积的光阑、杜瓦瓶、内部反射体等，由制造者那里得到的应是所有这些零部件形成的一个探测器整体。<sup>[11-1]</sup>

### 11.1.1 符号、名称和单位

表11~1列出了本章所用到的符号、名称和单位

表11-1 符号、名称和单位

符 号	名 称	单 位
$A_c$	截面积	厘米 <sup>2</sup>
$A_d$	探测器面积	厘米 <sup>2</sup>
$A_e$	探测器有效面积	厘米 <sup>2</sup>
$a$	吸收系数	厘米 <sup>-1</sup>
$B$	磁场强度	高斯
$b$	电子空穴迁移率之比	—
$C$	电容	法拉
$\mathcal{C}$	热容	焦耳·K <sup>-1</sup>
$C_e$	等效电容	法拉
$c_1$	第一辐射常数	瓦·厘米 <sup>-2</sup> ·微米 <sup>4</sup>
$c_2$	第二辐射常数	微米·K
$c$	光速	米·秒 <sup>-1</sup>
$D$	探测率	瓦 <sup>-1</sup>
$\underline{D}^*$	考虑探测器面积和电学带宽的归一化探测率	厘米·赫 <sup>1/2</sup> ·瓦 <sup>-1</sup>
$D^*(\lambda)$	归一化光谱探测率	厘米·赫 <sup>1/2</sup> ·瓦 <sup>-1</sup>
$D^{**}$	考虑探测器面积、电学带宽和有效加权视场的归一化探测率	厘米·赫 <sup>1/2</sup> 瓦 <sup>-1</sup>
$DQE$	探测量子效率	—
$D_e$	电子扩散系数	厘米 <sup>2</sup> ·秒 <sup>-1</sup>
$D_h$	空穴扩散系数	厘米 <sup>2</sup> ·秒 <sup>-1</sup>
$d$	响应元厚度	厘米
$E$	辐照度	瓦·厘米 <sup>-2</sup>
$\mathcal{E}$	电场强度	伏·厘米 <sup>-1</sup>
$E_g$	光子能量	焦耳



续表

符 号	名 称	单 位
$E_i$	光电导体的杂质激活能	焦耳
$E_k$	自由电子的动能	焦耳
$E_a$	光子通量密度, 或光子辐照度	光子数·厘米 <sup>-2</sup> ·秒 <sup>-1</sup>
$E_{q,B}$	背景辐射的光子通量密度	光子数·厘米 <sup>-2</sup> ·秒 <sup>-1</sup>
$E_{q,s}$	信号辐射的光子通量密度	光子数·厘米 <sup>-2</sup> ·秒 <sup>-1</sup>
$e$	电子电荷	库伦
FOV	探测器几何视场	球面度或圆锥角度
$f$	电学频率	赫
$f_c$	斩光频率	赫
$f_o$	调制频率	赫
$\sigma$	热导	瓦K <sup>-1</sup>
$\sigma_e$	有效热导	瓦K <sup>-1</sup>
$\sigma_0$	有效热导和辐射热导之和	瓦K <sup>-1</sup>
$G_{gen}$	自由载流子的产生率	秒 <sup>-1</sup>
$G_p$	光电导增益	—
$G_{sh}$	有效分流电导	姆欧
$g$	增益	—
$h$	普朗克常数	电子伏·秒
$I$	直流电流	安培
$I_d$	直流扩散电流	安培
$I_s$	直流信号电流	安培
$I_{sa}$	直流饱和电流	安培
$I_{sc}$	直流短路电流	安培
$i, i_s, i_n$	广义均方根交流电流, 均方根交流信号电流, 或均方根交流噪声电流	安培
$i(t), i_s(t), i_n(t)$	广义瞬时电流, 瞬时信号电流或瞬时噪声电流	安培
$K$	常数	—
$k$	波耳兹曼常数	焦耳K <sup>-1</sup>
$L$	扩散长度	厘米
$L_d$	有效扩散长度	厘米
$L_e$	电子扩散长度	厘米
$L_h$	空穴扩散长度	厘米
$l$	长度; 或电极距离	厘米
$M$	自由载流子倍增因子	—
$N$	自由电荷总数	—
NEE	噪声等效照度	瓦·厘米 <sup>-2</sup>
NEP	噪声等效功率	瓦
$N_s$	信号光子速率	秒 <sup>-1</sup>
$N_A$	单位波长和单位面积的平均光子速率	秒 <sup>-1</sup> 微米 <sup>-1</sup> ·厘米 <sup>-2</sup>
$n$	自由电子浓度	厘米 <sup>-3</sup>
$\rho$	热释电系数	安培·厘米 <sup>-2</sup>
$P_{ab}$	热电功率	伏·度 <sup>-1</sup>
$p$	自由空穴浓度	厘米 <sup>-3</sup>
$R$	电阻	欧姆
$\mathcal{R}$	响应率	伏·瓦 <sup>-1</sup> , 或安·瓦 <sup>-1</sup>

续表

符 号	名 称	单 位
$\mathcal{A}_{bb}$	黑体响应率	伏·瓦 <sup>-1</sup> ·或安·瓦 <sup>-1</sup>
$\mathcal{A}_{ref}(\lambda)$	标准相对光谱响应率	伏·瓦 <sup>-1</sup> 或安·瓦 <sup>-1</sup>
$R_d$	探测器电阻	欧姆
$R_{dyn}$	动态电阻	欧姆
$R_e$	探测器前置放大器电路等效输入电阻	欧姆
$R_L$	负载电阻	欧姆
$R_m$	电流计电阻	欧姆
RQE	响应量子效率	—
SNR	信噪比	—
$s$	表面复合速度	米·秒 <sup>-1</sup>
$T$	温度	K
$T_B$	背景温度	K
$T_d$	探测器温度	K
$T_0$	散热器温度	K
$t$	时间	秒
$V$	直流电压	伏
$V_B$	直流偏压	伏
$V_{bd}$	直流击穿电压	伏
$V_0$	直流开路电压	伏
$V_p$	珀尔帖电压	伏
$v_s, v_n, v_n$	广义均方根交流电压, 均方根交流信号电压, 或均方根交流噪声电压	伏
$v_c$	均方根交流校准信号电压	伏
$v_n^*$	功率谱平方根	伏·赫 <sup>-1/2</sup>
$v_0$	交流开路电压	伏
$v(t), v_s(t), v_n(t)$	广义瞬时电压, 瞬时信号电压或瞬时噪声电压	伏
$v_T$	均方根热噪声电压	伏
$W_h$	探测器中由 $I^2 R_d$ 产生的热量	焦耳
$w$	探测器宽度	厘米
$Z$	阻抗	欧姆
$\mathcal{Z}$	热阻抗	K·瓦 <sup>-1</sup>
$\tilde{Z}$	复阻抗	欧姆
$\alpha$	电阻温度系数	K <sup>-1</sup>
$\beta$	光电二极管的效率因子	—
$\gamma$	相关因子	—
$\Delta T_d$	探测器的温度改变	K
$\delta$	相角	弧度
$\epsilon$	发射率	—
$\eta$	量子效率	—
$\lambda$	波长	微米
$\lambda_c$	截止波长	微米
$\lambda_p$	峰值波长	微米
$\lambda_s$	信号波长	微米
$\mu$	载流子迁移率	厘米 <sup>2</sup> ·伏 <sup>-1</sup> ·秒 <sup>-1</sup>
$\mu_e$	电子迁移率	厘米 <sup>2</sup> ·秒 <sup>-1</sup> ·伏 <sup>-1</sup>

8

续表

符 号	名 称	单 位
$\mu_h$	空穴迁移率	厘米 <sup>2</sup> ·秒 <sup>-1</sup> ·伏 <sup>-1</sup>
$\nu$	光频率	秒 <sup>-1</sup>
$\pi_{ab}$	珀耳帖系数	伏
$\rho$	表面反射系数	—
$\sigma$	斯蒂芬—玻耳兹曼常数	瓦·米 <sup>-2</sup> ·度 <sup>-4</sup>
$\sigma_c$	俘获截面	厘米 <sup>2</sup>
$\sigma_e$	电导率	姆欧厘米 <sup>-1</sup>
$\tau$	时间常数	秒
$\tau_c$	自由载流子平均寿命	秒
$\tau_e$	电学时间常数	秒
$\tau_{el}$	电子寿命	秒
$\tau_h$	空穴寿命	秒
$\tau_T$	热时间常数	秒
$\phi$	通量、或辐射功率	瓦
$\phi(t)$	瞬时辐射功率	瓦
$\phi_B$	背景辐射功率	瓦
$\phi_{q,\lambda}(\lambda)$	每单位波长光子通量	光子数·秒 <sup>-1</sup> ·微米 <sup>-1</sup>
$\phi_{q,\lambda>B}(\lambda)$	单位波长的背景光子通量	光子数·秒 <sup>-1</sup> ·微米 <sup>-1</sup>
$\phi_{q,\lambda>S}(\lambda)$	单位波长的信号光子通量	光子数·秒 <sup>-1</sup> ·微米 <sup>-1</sup>
$\phi_s$	均方根信号辐射功率	瓦
$\phi_\lambda(\lambda)$	光谱辐射功率, 或通量	瓦·微米 <sup>-1</sup>
$\phi$	材料表面功函数	焦耳·库 <sup>-1</sup>
$\chi_i$	输入通量和输出电压之间的相移	弧度
$\Omega$	立体角(视场)	球面度
$\Omega_e$	有效加权探测器立体角	球面度
$\omega$	角频率	弧·秒 <sup>-1</sup>

11.1.2 探测器参数的符号和说明 表11-2和11-3列出了目前通用的探测器的主要参数和噪声方程的符号及常用单位。这些名称是从档案文献、政府报告及Jones等人<sup>[11-1]</sup>的标准报告中汇集来的。

11.1.3 响应元 响应元是一个辐射能转换器，它可将入射辐射转变为可由附加电子线路放大的电信号。

转换方法可分为两类：即热探测器和光子探测器。热探测器的响应元能敏感入射辐射引起的温度变化。光子探测器的响应元则敏感由入射红外光子数目变化引起的自由载流子（即电子和/或空穴）数目或迁移率的变化。热探测器的转换过程包括测辐射热效应、热电压效应、热气动效应和热释电效应。光子探测器的转换过程则包括光伏效应、光电导效应、光磁电效应和光电发射效应。下面对各转换过程加以说明。

#### 11.1.4 光电转换过程的说明

测辐射热过程：入射红外辐射使响应元温度发生变化，从而引起电导率变化，这种变化可用电学方法检测。

光电导过程：入射到半导体上的光子数目的改变，使材料中自由载流子的平均数目改

变。半导体的电导率与材料中自由载流子平均数目成正比。因此，电导率的改变正比于入射到半导体上光子数目的改变。

光磁电过程：在半导体表面或其附近吸收的光子，激发出自由载流子。载流子向体内扩散，途中被磁场分离。电荷分离产生一个正比于入射光子数的输出电压。

光伏过程：入射到半导体p-n结上光子数的改变引起结电压值的改变。

热释电过程：入射红外辐射使晶体响应元的温度升高，从而改变了电偶极矩，产生一个可观察到的外部电场。

热气动过程：辐射使室内的气体温度升高（因而增大了压力），从而使小室膨胀，附在小室外壁上的镜子产生移动。镜子的移动可用光学方法检测出来。

热电压过程：两种不同金属的结点温度随所吸收的入射辐射强度的变化而改变，从而引起结点电压（因塞贝克效应）的起伏。

11.1.5 窗口 窗口的用途是将响应元所要求的特殊环境与外界环境隔离开来。致冷型探测器的响应元是保持在真空中。窗口对入射到响应元上光子的光谱分布有影响。

表11-2 探 测 器 参 数

名称、符号和常用单位	定 义	在方程式中的定义	函数关系
敏感面积 $A_d$ (厘米 <sup>2</sup> )	对由薄膜或单晶制成的敏感元件来说，其敏感面积通常是几何面积。对具有积分室的探测器，其敏感面积是入射孔径。有效面积 $A_e$ 可以定义为归一化响应率对敏感面积的积分。	$A_d =$ 探测器（几何）面积 $A_e = \iint_{A_d} \frac{\mathcal{R}(x,y) dx dy}{\mathcal{R}_{max}}$ 式中 $\mathcal{R}_{max} = \mathcal{R}(x,y)$ 的最大值 $\mathcal{R} =$ 响应率, $x, y =$ 敏感面的平面坐标	
阻 抗 $Z_d$ (欧姆)	在偏压为 $V_B$ 时，瞬时电压——瞬时电流曲线的斜率。	$Z_d = \left. \frac{dv(t)}{di(t)} \right _{V_B}$	$Z_d$ 是偏压、极间电容和辐照强度的函数。
电 阻 $R_d$ (欧姆)	探测器两端的直流电压与通过探测器的直流电流的比值。	$R_d = V/I$	$R_d$ 是探测器温度和辐照强度的函数。
背景温度 $T_B$ (K)	完全充满探测器视场并观测到入射在探测器上的总辐射通量的均匀黑体的温度。		
探测器立体角 $\Omega$ (球面度)	探测器所接收辐射能的立体角(视场)。		
有效加权探测器立体角 $\Omega_e$ (球面度)	探测器所接收辐射的余弦函数加权立体角。	$\Omega_e = \iint_{A_d} \left[ \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\theta \sin\theta \mathcal{R}(x,y,\phi,\theta)}{A_e \mathcal{R}_{max}(0,0)} d\phi d\theta \right] dx dy$ 式中 $\mathcal{R}_{max}(0,0) =$ 用小视场 $d\Omega$ 测量得到的 $\mathcal{R}(x,y,0,0)$ 最大值。 $\phi$ 和 $\theta =$ 球坐标, 同时 $\phi$ 是方位角。 $\cos \theta =$ 加权函数。	

名称、符号和常用单位	定义	在方程式中的定义	函数关系
<p>瞬时信号电压, <math>v_s(t)</math> 或电流 <math>i_s(t)</math>, (伏) 或 (安)</p>	<p>它是电学输出电压 (或电流) 的一个成分, 与输入信号辐射功率的瞬时值 <math>\phi_s(t)</math> 有关。</p>	<p><math>z</math> 轴垂直于敏感元件平面。如果响应率不是 <math>\phi</math> 的函数, 就称元件具有圆对称性, 此时,</p> $\Omega = \pi \sin^2(\Theta/2)$ <p>式中 <math>\Theta</math> 是总圆锥角。</p> <p>若入射辐射功率 <math>\phi_s(t)</math> 随时间周期地变化:</p> $\phi_s(t) = \Phi_0 + \Phi_1 \cos(2\pi ft + \delta_1) + \Phi_2 \cos(2 \cdot 2\pi ft + \delta_2) + \dots$ <p>则:</p> $v_s(t) = V_0 + V_1 \cos(2\pi ft + \psi_1) + V_2 \cos(2 \cdot 2\pi ft + \psi_2) + \dots$ $v_s = (2)^{-1/2} V_1$	<p>信号电压是电学频率 <math>f</math> 的函数, 对于一个有单一时间常数的探测器来说,</p> $V_s = \frac{V_{s, \max}}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}}$
<p>基波信号电压 (或电流) 分量的均方根振幅, <math>v_s</math> 或 <math>i_s</math>, (伏) 或 (安)</p>	<p>取一系列中第一个时变分量 (即基波) 的时间平均平方的平方根值为基波信号分量的均方根振幅。</p>	<p>如果附加电路的直流增益为零, 则</p> $v_n = (\overline{V_n^2(t)})^{1/2}$	<p><math>v_s</math> 与频率 <math>f</math> 和偏压有关。</p>
<p>均方根噪声电压 <math>v_n</math> 或电流 <math>i_n</math>, (伏) 或 (安)</p>	<p>与信号辐射功率无关的输出电压 (或电流) 分量, 确定这个值时要除去信号功率。</p>	<p>如果附加电路的直流增益为零, 则</p> $v_n = (\overline{V_n^2(t)})^{1/2}$	<p><math>v_n</math> 与探测器面积、<math>\Delta f</math>、<math>f</math> 有关, 在某些情况下还与 <math>\Omega</math>、<math>T_B</math> 有关。</p>
<p>光谱响应率 <math>\mathcal{R}(\lambda)</math>, (伏瓦<sup>-1</sup>) 或 (安瓦<sup>-1</sup>)</p>	<p>是均方根信号电压 (电流) 与单色入射时的均方根信号功率之比, 是相对于无穷大负载阻抗和探测器终端而言的。</p>	$\mathcal{R}(\lambda) = \frac{v_s}{\Phi_{s, \lambda} \Delta \lambda}$	<p>响应率是 <math>\lambda</math>, <math>f</math>, <math>T</math> 以及偏压 (或偏流) 的函数。</p>
<p>黑体响应率 <math>\mathcal{R}_{bb}</math>, (伏瓦<sup>-1</sup>) 或 (安瓦<sup>-1</sup>)</p>	<p>除入射信号功率是来自黑体外, 与光谱的响应率相同。</p>	$\mathcal{R}_{bb} = \frac{v_s}{\Phi_{s, bb}}$	<p>响应率是 <math>f</math>, <math>T</math> 及偏压 (或偏流) 的函数。</p>
<p>时间常数 <math>\tau</math>, (秒)</p>	<p>探测器响应速度的一种度量。若噪声功率谱是平滑的 (参考 11.4.3 节), 并且响应率随频率按下式变化:</p> $\mathcal{R}(f) = \frac{\mathcal{R}(0)}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}}$ <p>则有关 <math>\tau</math> 的各个方程式 (见下一栏) 都相同。</p>	<p>(a) 衰减时间常数给定为:</p> $\tau = 1/(2\pi f_c)$ <p>式中 <math>f_c</math> 是响应率下降到它的最大值的 <math>2^{-1/2}</math> 时的斩光频率。</p>	<p>—</p>
		<p>(b) 上升时间常数是信号电压 (或电流) 上升到其渐近值的 <math>1-1/e</math> (或 0.63) 倍时所需要的时间。它可用光脉冲即将探测器暴露到方波辐射脉冲测量。</p>	<p>—</p>
		<p>(c) 响应时间常数</p> $\tau_r = \frac{\mathcal{R}_{\max}^2}{4 \int_0^\infty [\mathcal{R}(f)]^2 df}$	<p>—</p>
		<p>(d) 探测时间常数</p> $\tau_d = \frac{(D_{\max}^*)^2}{4 \int_0^\infty [D^*(f)]^2 df}$	<p>—</p>
		<p>(e) 实验的响应时间常数</p>	<p>—</p>

名称、符号和常用单位	定义	在方程式中的定义	函数关系
光谱噪声等效功率 $(NEP)_\lambda$ (瓦)	使均方根信号与均方根噪声比等于 1 所需的波长为 $\lambda$ 的单色入射均方根信号功率的值。斩光频率、测量时用的电学带宽以及探测器面积都应规定。	$\tau_{rs} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \frac{[A(f_1)]^2 - [A(f_2)]^2}{[f_2 A(f_2)]^2 - [f_1 A(f_1)]^2} \right\}^{1/2}$ 必须指定 $f_1$ 和 $f_2$ 。 (f) 实验的探测时间常数 $\tau_{d1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \frac{[D^*(f_1)]^2 - [D^*(f_2)]^2}{[f_2 D^*(f_2)]^2 - [f_1 D^*(f_1)]^2} \right\}^{1/2}$ 必须指定 $f_1$ 和 $f_2$ 。 $(NEP)_\lambda = \Phi_{s,\lambda} \Delta\lambda \left( \frac{v_n}{v_s} \right) = \frac{v_n}{A_\lambda}$	与 $f$ 、 $A$ 、 $f$ 、 $\Delta f$ 有关，在某些情况下还与 $\Omega$ 、 $T_B$ 有关。
黑体噪声等效功率 $NEP_{bb}$ (瓦)	使均方根信号对均方根噪声比为 1 所需的入射均方根信号功率（具有黑体光谱特性）的值。除了指定探测器面积，测量时所用的电学带宽以及斩光频率以外，还必须规定黑体温度。	$NEP_{bb} = \Phi_{s,bb} \left( \frac{v_n}{v_s} \right) = \frac{v_n}{A_{bb}}$	与黑体温度、 $A$ 、 $f$ 、 $\Delta f$ 有关，在某些情况下，还与 $\Omega$ 和 $T_B$ 有关。
光谱探测率 $D(\lambda)$ (瓦 <sup>-1</sup> )	光谱噪声等效功率的倒数。测量时所用的斩光频率、电学带宽以及探测器敏感面积应当规定。	$D(\lambda) = 1/(NEP)_\lambda$	与 $\lambda$ 、 $A$ 、 $f$ 、 $\Delta f$ 有关，在某些情况下，还与 $\Omega$ 和 $T_B$ 有关。
黑体探测率， $D_{bb}$ (瓦 <sup>-1</sup> )	黑体噪声等效功率的倒数。测量时用的带宽、探测器面积、斩光频率以及黑体温度应当规定。	$D_{bb} = 1/NEP_{bb}$	与黑体温度、 $A$ 、 $f$ 、 $\Delta f$ 有关，在某些情况下，还与 $\Omega$ 和 $T_B$ 有关。
光谱 $D^*$ $D^*(\lambda, f_c)$ (厘米·赫 <sup>1/2</sup> ·瓦 <sup>-1</sup> )	考虑到面积、电学带宽关系的归一化光谱探测率。需指出测量时所用的斩光频率 ( $f_c$ )，如第一栏中那样，将 ( $f_c$ ) 写入括号中。对于受背景光子到达速率起伏限制的探测器，必须指定 $\Omega$ 和 $T_B$ 。	$D^*(\lambda, f_c) = \sqrt{A_d \Delta f} D(\lambda)$	对于背景噪声限探测器， $D^*(\lambda, f_c)$ 与 $\Omega$ 和 $T_B$ 有关。
黑体 $D^*$ $D^*(T_{bb}, f_c)$ (厘米·赫 <sup>1/2</sup> ·瓦 <sup>-1</sup> )	考虑到探测器面积和带宽的归一化黑体探测率。在括号中注明斩光频率和黑体温度 ( $T_{bb}$ )。对于背景噪声限探测器还需指出 $\Omega$ 和 $T_B$ 。	$D^*(T_{bb}, f_c) = \sqrt{A_d \Delta f} D_{bb}$	对背景噪声限探测器 $D^*(T_{bb}, f_c)$ 与 $\Omega$ 和 $T_B$ 有关。
最大 $D^*$ $D^*(\lambda_p, f_c)$ (厘米·赫 <sup>1/2</sup> ·瓦 <sup>-1</sup> )	当波长为 $\lambda_p$ 、所用斩光频率使均方根信号与均方根噪声之比为最大时，所获得的探测率。	$D^*(\lambda_p, f_c) = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{(NEP)_{\lambda_p}}$	与 $D^*(\lambda, f)$ 的相同。
光谱 $D^{**}$ $D^{**}(\lambda, f_c)$ (厘米·赫 <sup>1/2</sup> ·球面度 <sup>1/2</sup> ·瓦 <sup>-1</sup> )	考虑到探测器有效加权视场 $\Omega_c$ 的归一化。 $D^*(\lambda, f_c)$ (注：如果 $\Omega_c = \pi$ ，则 $D^{**} = D^*$ )	$D^{**}(\lambda, f_c) = (\Omega/\pi)^{1/2} D^*(\lambda, f_c)$	—

续表

名称、符号和常用单位	定义	在方程式中的定义	函数关系
峰值波长 $\lambda_p$ 或 $\lambda_{max}$ (微米)	光谱探测率最大值所对应的波长	—	取决于元件温度和所用探测器材料。
截止波长 $\lambda_c$ (微米)	$D^*(\lambda, f_c)$ 降到峰值一半时对应的辐射波长	—	取决于元件温度和所用探测器材料。
响应量子效率 RQE	可数的输出量数值 $N_o$ 与入射光子数 $N_p$ 的比值。	$RQE = N_o/N_p$	与偏压、时间常数和元件几何形状有关。
探测量子效率 DQE	实测的探测率与理论限探测率比值的平方。两个探测率必须在相同条件下得到。	$DQE = \left[ \frac{D(\lambda)_{\text{实测的}}}{D(\lambda)_{\text{理论限}}} \right]^2$	—
$D^*f^*$	最大 $D^*$ 值与 $f^*$ 的乘积。在最高频率下, $D^*(f)$ 减少到其最大值的 $2^{-1/2}$ 。	$D^*f^*, D^*(f^*) = 2^{-1/2} D^*_{max}$	—

表11-3 探测器噪声<sup>[11-8]</sup>

噪声类型	物理机理	有关的探测器	噪声 $v_n$ 方程式
约翰逊噪声 (也称奈奎斯特噪声或热噪声)	热平衡时, 载流子在电阻性元件中作随机运动, 元件两端产生一个随机电压。随着电阻温度的增加, 载流子的平均动能增加, 产生的噪声电压也会增大。	所有探测器	$v_n = (4kT_d R_d \Delta f)^{1/2}$ (参见11-45)
温度噪声	由于与背景的辐射交换或与散热装置的传导交换, 敏感元的温度有起伏, 致使信号电压发生起伏。对热探测器而言, 如果它的温度噪声来自与背景辐射的热交换, 就说这个探测器达到理论限。	所有探测器特别是用薄膜制成的探测器。	对于热探测器, $\Delta T^2 = \frac{4kT_d^2 g \Delta f}{g^2 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}$ (参见p.11-28) $\Delta T^2$ 与 $v_n$ 之间的关系因探测器而异。
调制噪声 (或 $1/f$ 噪声)	这种机理还不清楚。顾名思义, 它具有 $1/f^n$ 噪声功率谱特征, 这里的 $n$ 从0.8变到2。	所有探测器	$v_n \propto R_d I \left( \frac{\Delta f}{A_d} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{f} \right)^n$ (参见p.11-44)
产生复合噪声 (G-R噪声)	灵敏元中载流子产生速率和复合速率的统计起伏引起的电噪声。由载流子——光子相互作用或由背景光子的随机到达速率可以引起这些起伏。若背景光子对G-R速率起伏起重要作用, 则这种噪声常常称为光子噪声, 辐射噪声或背景噪声。	全部光子探测器	$v_n = R_d I \left( \frac{2\tau \Delta f}{N(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)} \right)^{1/2}$ (参见p.11-44) 对光伏探测器, $v_n$ 值要小 $\sqrt{2}$ 倍, 因为仅是自由载流子产生速率起伏对噪声有贡献。自由载流子复合速率起伏不影响探测器输出电压。
散粒噪声	由电荷不连续性引起的噪声, 流过响应元的电流 $I$ 是由单个电子和/或空穴产生的电流脉冲。	光伏探测器或薄膜探测器	$v_n = R_d (2eI \Delta f)^{1/2}$ (参见p.11-45) 式中 $e$ 是电子电荷。

11.1.6 孔阑 孔阑用来限制响应元的视场，常常用于背景噪声限的致冷型探测器，以削减外来背景光子，从而减小噪声。（见11.4节）

11.1.7 杜瓦瓶 杜瓦瓶用来贮藏降低响应元工作温度所需要的致冷剂，改善探测率。

## 11.2 热探测器理论

前面已指出，热探测器是利用四个基本过程之一来探测红外辐射的。这四个过程是：

- (1) 测辐射热效应。
- (2) 热电压效应。
- (3) 热气动效应。
- (4) 热释电效应。

每个过程的基本理论叙述如下：

11.2.1 测辐射热计 测辐射热效应是由于响应元吸收了入射的红外辐射，使其温度发生变化，从而电阻随之改变的一种现象。图11-1和11-2就是利用这种效应的两个电路图。

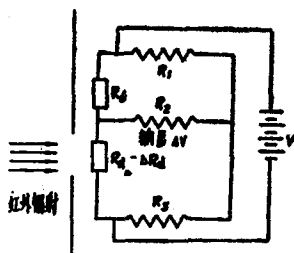


图 11-1 测辐射热计直流工作桥式电路图。

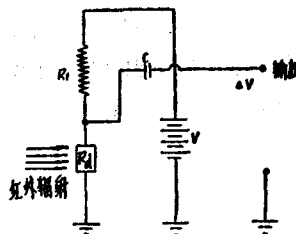


图 11-2 测辐射热计电路图。

应用电桥电路时（图11-1），两个探测器彼此相邻放置，其中有一个屏蔽作用，使其只能接受环境辐射。当没有附加的辐射照到未屏蔽的探测器上时，电桥处于平衡状态，入射红外辐射使未屏蔽的探测器温度升高，因而降低电阻值，电桥就不平衡，这时有电流流过  $R_2$ 。在图11-2交流电路中，只有通过耦合电容器来改变探测器两端的电压。

测辐射热计温度升高引起的电阻变化与电阻温度系数  $\alpha$  有关，即

$$\alpha = \frac{1}{R_d} \frac{dR_d}{dT_d} \quad (11-1)$$

式中  $R_d$  = 探测器电阻

$T_d$  = 探测器温度

图11-1和11-2中电路的信号方程式分别为：

$$v_s = \Delta v = \frac{I(\Delta R_d) R_2}{2R_2 + R_1 + R_3} \quad (11-2)$$

$$v_s = \Delta v = \frac{R_1 V \Delta R_d}{(R_d + R_1)^2} \quad (11-3)$$



$$\Delta R_d = \frac{dR_d}{dT_d} \Delta T_d \quad (11-4)$$

式中  $I$  = 电桥电路中通过测辐射热计的稳态电流

$$\Delta R_d = \frac{dR_d}{dT_d} \Delta T_d$$

$\Delta T_d$  =  $T_d$  随时间的改变量

$\Delta v$  = 引起的电压变化

$v_s$  = 交流信号电压

$V$  = 直流偏压

式中  $R_1, R_2, R_3$  在图11-1和11-2中已标明

$R_d$  和  $T_d$  与上述方程式 (11-1) 中的一样。

响应率: 响应率  $\mathcal{R}$  定义为:

$$\mathcal{R} = \frac{\Delta v}{\Delta \phi} \quad (11-5)$$

式中  $\Delta v$  是当红外辐射功率输入增加  $\Delta \phi$  时, 负载电阻两端的开路输出电压,  $\Delta T_d$  是由  $\Delta \phi$  引起的测辐射热计温度增量, 可用下面的微分方程表示

$$\mathcal{C} \frac{d\Delta T_d}{dt} + \mathcal{G}_0 \Delta T_d = w_h + \Delta \phi \quad (11-6)$$

式中  $\mathcal{C}$  = 测辐射热计元件的热容, 焦耳  $K^{-1}$

$\mathcal{G}_0 \Delta T_d$  = 流过元件的导热和辐射热

$w_h$  = 测辐射热计中由于  $I^2 R_d$  发热而产生的热功率  
在稳态条件下

$$\mathcal{G}_0 \Delta T_d = w_h = I^2 R_d \quad (11-7)$$

当  $\Delta T_d$  很小时, 方程 (11-6) (11-7) 可以写成:

$$\mathcal{C} \frac{d\Delta T_d}{dt} + \mathcal{G} \Delta T_d = \frac{dw_h}{dT} \Delta T_d + \Delta \phi \quad (11-8)$$

式中  $\mathcal{G}$  为温度变化很小时的热导, 单位是瓦  $K^{-1}$ 。  $w_h$  随温度  $T$  的变化率与电路设计有关。对于图11-2所示电路则有:

$$\frac{dw_h}{dT} = \alpha w_h \left( \frac{R_1 - R_d}{R_1 + R_d} \right) \quad (11-9)$$

$$\frac{dw_h}{dT} = \alpha (\Delta T_d) \mathcal{G}_0 \left( \frac{R_1 - R_d}{R_1 + R_d} \right) \quad (11-10)$$

现在方程 (11-8) 可以重写为:

$$\frac{d\Delta T_d}{dT} + \mathcal{G}_e \Delta T_d = \Delta \phi \quad (11-11)$$

式中:  $\mathcal{G}_e$  是有效热导, 给定为:

$$\mathcal{G}_e = \mathcal{G} - \alpha \mathcal{G}_0 (\Delta T_d) \left( \frac{R_1 - R_d}{R_1 + R_d} \right) \quad (11-12)$$

若  $\mathcal{G}_e < 0$ , 则当  $\Delta \phi = 0$  时, 方程 (11-11) 有指数解。在这种条件下, 测辐射热计不稳定, 将