

红外探测器

陈继述 胡燮荣 徐平茂 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分五章。第一章绪论，介绍红外探测器的分类、性能指标等；第二章半导体物理基础，介绍晶体结构、能带、缺陷、载流子浓度等；第三章噪声，介绍频谱密度、散粒噪声、热噪声、产生-复合噪声等；第四章热探测器，介绍热释电探测器、测辐射热敏电阻、测辐射热电偶和热电堆等；第五章光子探测器，介绍本征光电导、杂质光电导、薄膜光电导、光电磁探测器、光伏探测器、肖特基势垒探测器、多元列阵探测器及 CCD 等。

本书可供高等院校红外专业的师生使用，也可供从事红外研究的技术人员参考。

红外探测器

陈继述 胡燮荣 徐平茂 编

责任编辑 刘树兰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张15¹/₂ 356千字

1986年6月第一版 1986年6月第一次印刷 印数：0,001—1,550册

统一书号：15034·3085 定价：2.55元

目 录

第一章 绪 论	1
一、探测器的分类	1
二、红外探测器的性能指标	4
三、红外探测器性能指标的测量	10
四、红外探测器工艺发展简史	12
五、红外探测器性能指标的现代水平	14
第二章 半导体物理基础	21
§ 2.1 晶体结构	21
一、单晶与多晶	21
二、重要半导体的晶格结构	22
三、晶体中原子(或离子)间的结合力	23
四、晶向晶面的标志法	26
§ 2.2 理想晶体的能带	27
一、能带	27
二、电子在理想晶格中的运动	29
§ 2.3 缺陷与杂质原子	30
一、晶格热振动产生的影响	30
二、杂质原子产生的影响	31
§ 2.4 平衡载流子浓度	36
一、 $F-D$ 函数与自由电子浓度和自由空穴浓度的基本公式	36
二、本征半导体	39
三、掺杂半导体	39
§ 2.5 载流子的输运现象	45
一、电导	46
二、霍尔效应	48
§ 2.6 复合与寿命	50
一、直接复合	51
二、间接复合	53
三、表面复合	55
§ 2.7 载流子在电磁场中运动的基本方程组	57
一、电流密度方程	57
二、连续性方程	58
§ 2.8 $p-n$ 结	59
第三章 噪声	63
引言	63
§ 3.1 平均值和方差	63
一、分布函数	64
二、平均值和方差	66
§ 3.2 频谱密度	68
一、两个随机变量的相关性	68

二、自相关函数	69
三、维纳-辛钦定理	70
四、康培尔定理	71
五、卡逊定理	73
§ 3.3 散粒噪声	76
一、散粒噪声公式	76
二、P-n结中的散粒噪声	78
三、P-n结中散粒噪声的其它来源	79
§ 3.4 热噪声	82
一、奈奎斯特定理	82
二、热噪声的扩散模型	85
三、朗之万 (Langevin) 方法	86
§ 3.5 产生-复合噪声	87
一、基本公式	88
二、G-R 噪声电流及噪声电压	91
§ 3.6 光子噪声	93
一、光子数和光能量的起伏及其频谱密度	93
二、红外热探测器中的背景光子噪声	95
三、红外光子探测器中的背景光子噪声	96
§ 3.7 其他噪声	98
一、温度噪声	98
二、1/f 噪声	99
第四章 热探测器	102
§ 4.1 基本知识和理想热探测器	102
一、与热探测器有关的基本知识	103
二、温度噪声和理想热探测器	109
§ 4.2 热释电探测器	112
一、热释电材料	112
二、热释电探测器的信号电压公式	122
三、电流响应率和电压响应率	124
四、噪声源和噪声频谱	126
五、噪声等效功率和探测率	129
六、纵向热扩散理论	131
七、径向热扩散理论	135
八、热释电探测器对脉冲辐照的响应	138
九、结束语	142
§ 4.3 测辐射热敏电阻	143
一、热敏电阻和测辐射热敏电阻	144
二、伏安特性	147
三、电压响应率	149
四、噪声、NEP和D*	152
五、桥式电路中测辐射热敏电阻的性能分析	154
§ 4.4 测辐射热电偶和热电堆	156
一、温差电现象和汤姆逊关系	157
二、测辐射热电偶的电压响应率	160
三、噪声、NEP和D*	166
四、测辐射热电堆	167

第五章 光子探测器	170
引言	170
§ 5.1 本征光电导	171
一、激发和复合	171
二、基本方程	174
三、定态光电导	175
四、弛豫现象	178
五、调制信号	179
六、探测率	181
§ 5.2 杂质光电导	182
一、定态情况	183
二、杂质光电导的瞬时情况	186
三、杂质光电导的光谱分布	187
§ 5.3 薄膜光电导	190
一、硫化铅薄膜的敏化	191
二、多数载流子模型	192
三、势垒理论	195
四、噪声	196
§ 5.4 光电磁探测器	197
一、简单分析	197
二、基本方程及其解	199
三、短路电流、开路电压及响应率	200
四、探测率	205
§ 5.5 光伏探测器	206
一、一般讨论	206
二、光照平行于结的定态情况	207
三、光照垂直于结的定态情况	211
四、正弦调制信号	214
五、探测率	215
§ 5.6 肖特基势垒探测器	217
一、肖特基势垒的形成及其高度	217
二、肖特基势垒中载流子的输运过程	220
三、肖特基势垒探测器的 R_0A 值	224
§ 5.7 光子探测器的背景限	224
一、本征光电导探测器的背景限	225
二、P-n 结光伏探测器的背景限	226
三、光子探测器 $BLIP D^*_{\lambda}$ 与背景温度 T_B 的关系	227
§ 5.8 多元列阵探测器及 CCD 简介	228
一、红外多元列阵探测器	229
二、CCD 工作原理	229
三、CCD 中电荷的转移	231
四、电荷转移速率	233
五、转移效率及工作频率	235
六、CCD 中的噪声	236
附录	237
参考书目	240

第一章 绪 论

红外探测器是红外系统最重要的组成部分。绪论一共分五段。第一段讨论红外探测器的分类。第二段介绍红外探测器的主要性能指标。第三段叙述这些主要指标的测量方法。第四段略述红外探测器工艺的发展历史。第五段给出现有的几种主要红外探测器的性能指标数据的一些图表,以便查阅。

一、红外探测器的分类

按探测机理的不同,红外探测器可以分为热探测器和光子探测器两大类。我们只举出常见的探测器,其中有些是性能优良的探测器,有些是新型的和迅速发展中的探测器,今分述如下。

(1) 热探测器

热探测器吸收红外辐射后,先引起温度升高。然后由于温度升高,伴随着发生某种物理性质的变化。测量这些物理性质的变化就可以确定被吸收的红外辐射的能量或者功率。常用的物理变化有下列四种,利用其中一种就可以制出一类红外探测器。

(i) 温差电现象

把两种不同的金属丝或者半导体细线,连接成一个封闭环。当一个接头吸收红外辐射,因而它的温度比另一个接头高时,环内就产生电动势。从电动势的大小可以测定接头所吸收的红外辐射功率。

利用温差电现象制成的红外探测器,叫做热电偶。若干个热电偶串联在一起,就成为热电堆。

(ii) 金属或半导体电阻的变化

当吸收红外辐射温度升高时,金属的电阻会增加,半导体的电阻反而减小。从它们电阻的变化可以测定被吸收的红外辐射功率。利用电阻变化制成的红外探测器,叫做电阻测辐射热计。

电阻测辐射热计有半导体测辐射热计(通常叫做热敏电阻)、金属炭和锗制成的测辐射热计和致冷的测辐射热计三种。热敏电阻常用的材料为Mn、Ni、Co的氧化物薄片。薄片放在金属底板上,中间夹一层绝缘膜,外表面再镀上一层吸收膜。光敏面积从 $0.1 \times 0.1 \text{mm}^2$ 到数平方毫米。它常采用浸没光学的办法,加锗半球形透镜。

(iii) 气体压强的变化

当吸收红外辐射温度升高时,气体在体积一定的条件下,压强增加。从压强的增加可以测定被吸收的红外辐射功率。这样的红外探测器,叫做气体探测器。较常见的一种是高莱盒。

(iv) 热释电现象(简称热电现象)

有些晶体,如硫酸三甘酞(TGS)、铌酸锶钡(SBN)等,当受到红外辐射照射后温度升高时,在某个晶体方向上能够产生电压。由此,就能测量出红外辐射功率。这样

的红外探测器，叫做热释电探测器（简称热电探测器）。

除了上述四种物理变化外，还有利用金属热膨胀，液体薄膜的蒸发等物理现象制成的热探测器。

所有上述各类热探测器，在理论上，对一切波长的红外辐射都具有相同的响应。但实际上对不同波长的红外辐射，响应往往不都是相同的。热探测器响应的快慢，决定于探测器的热容量大小和散热的快慢（即热迁移的快慢）。减小热容量，增加热迁移可以加快器件的响应速度。

（2）光子探测器

光子探测器吸收光子后，本身发生电子状态的改变，从而引起几种电学现象，它们统称为光子效应。从光子效应的大小可以测定被吸收的光子数。利用光子效应制成的红外探测器统称为光子探测器。常用的光子效应有下列四种。

（i）光电子发射（光电效应）

光照射在某些金属氧化物表面、半导体表面或金属表面上时，如果光子能量 $h\nu$ 足够大，就能够使表面发射出电子。这一现象叫做光电子发射，又叫做光电效应。利用光电效应制成的可见光探测器和红外探测器，统称为光电子发射器件（PE器件），其中有光电二极管和光电倍增管。光电倍增管的时间常数很短，只有几个毫微秒，所以在激光通信中，常采用特制的光电倍增管作为探测元件。

大部分PE器件只对可见光有响应。用于红外辐射的光电阴极只有两种，分别叫做S-1(Ag-O-Cs)和S-20(Na-K-Cs-Sb)。S-20只响应到 $0.9\mu\text{m}$ ，它基本上是可见光的光电阴极。S-1的响应也只扩展到 $1.2\mu\text{m}$ ，而且它的量子效率不到0.001（即平均吸收1000个光子，才释放一个电子）。所以发展新的红外光电阴极是红外技术中一件很有意义的事情。近来有人研究在窄禁带半导体表面上生长一层GaAs，再镀一层Cs的复合阴极，希望能探测到波长较长的红外辐射。研究的结果尚未见发表。

（ii）光电导

吸收能量足够大的光子后，半导体中有些电子和空穴能从原来不导电的束缚状态转变到能导电的自由状态，从而使半导体的电导增加。这种现象叫做光电导。利用半导体光电导制成的红外探测器品种最多，应用最广，统称为光电导探测器（PC器件）。

光电导探测器都用半导体作材料，可以分为多晶薄膜形式和单晶形式两种类型。薄膜型的PC探测器品种较少，常用的只有PbS和PbSe两种。PbS适用于 $1\sim 3\mu\text{m}$ （近红外附近的大气窗）。PbSe适用于 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的大气窗。单晶型的PC探测器可再细分为本征型和掺杂型两类。过去本征型只限于探测波长在 $7\mu\text{m}$ 以下的红外辐射，主要为InSb探测器。它是 $3\sim 5\mu\text{m}$ 区间最优良的探测器。后来发展出适用 $8\sim 14\mu\text{m}$ 大气窗的HgCdTe和PbSnTe探测器。此外还有适用于极近红外的Si与适用于 $1\sim 4\mu\text{m}$ 的Te等探测器。掺杂型主要为适用于 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的Ge:Hg。此外，Ge:Cu和Ge:Cd虽能探测波长更长的红外辐射，但须冷却到4K，不方便。60K的Ge:Au，一度被广泛采用，但能探测的最长波长在 $7\mu\text{m}$ 左右，在大气窗外，所以用处也不大。此外Si掺杂的探测器近来亦有较大的进展。

（iii）光生伏特效应

半导体的p-n结（或p-i-n结，或金属与半导体接触区）及其附近，在吸收能

量足够大的光子后，能释放出少数载流子（自由电子和空穴）。它们在结区域以外时，靠扩散进入结区域。在结区域中则受到结内静电场的作用，电子漂移到 n 区，空穴漂移到 p 区。如果 p-n 结短路，就产生反向电流。如果 p 区、n 区开路，两端就产生电压。这叫做光生伏特效应。利用光生伏特效应，制成的红外探测器，叫做光生伏特探测器(PV 器件)。PV 器件工作时不必加偏置电压。材料都采用单晶（用 PbS、PbSe 制造 PV 器件，尚未成功）。常用的单晶材料有 Si(约对 0.5~1.5 μm 有响应)、Ge(峰值响应波长约为 1.5 μm)、室温 InSb(1~3.8 μm)、77K InAs(1~3.5 μm)、77K InSb(2~5.8 μm)以及 HgCdTe、PbSnTe 等。

如果对 p-n 结或 p-i-n 结加上反向偏压，则当结区域吸收了能量足够大的光子后，反向电流就会增加，这情况类似于光电导现象，但实际上它是光生伏特效应引起的。这类红外探测器，工作时要加反向偏压，常叫做光二极管。

对仔细制成的 Si 或 Ge 等的 p-n 结或 p-i-n 结，加上较大的反向电场，则在结区域附近吸收光子后，在结内能够产生载流子大量增加的雪崩现象。反向电流就比无雪崩时有显著的增加。这类红外探测器叫做雪崩光二极管。

雪崩光二极管由于结电容小，因而响应时间很短，它主要用于探测高调制频率的激光。

(iv) 光电磁效应

如图 1-1 所示，半导体的上表面吸收光子后，在上表面产生的电子空穴对，要向体内扩散。在扩散过程中，因受到强磁场的作用，电子和空穴各偏向一侧，因而产生电位差。这个现象就叫做光电磁效应。利用这个效应测量红外辐射的红外探测器叫做光电磁探测器 (PEM 器件)。常用的材料有 InSb 与 HgTe (加 5% 的 ZnTe 和 5% 的 CdTe) 等。

以上讲的是四类光子探测器。

要在某种光子探测器中发生某种具体光子效应，光子的能量必须超过某一个确定值。但光子能量

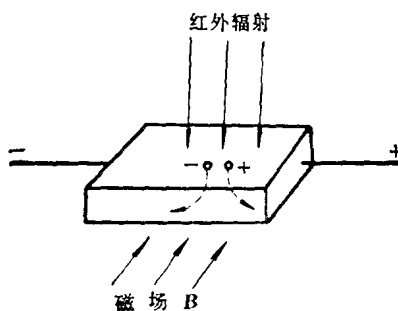


图1-1 光电磁效应

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

欲 E 超过某一确定值，波长必须小于某一极限值 λ_c 。这个极限波长叫做该光子效应的长波限。波长大于长波限的红外辐射，不能产生所需要的光子效应，因此也就不能被探测器探测出来。另一方面，波长短于 λ_c 的红外辐射，当各波段的功率一定时，长波段包含的光子数较多。所以在理论上光子探测器的响应度应该与波长 λ 成正比例的增加，直到 λ_c 为止，此时响应度陡降为零。但实际上常有与此不同的情况，这是因为器件内部存在着与光子效应相制约的过程。例如光子效应产生自由载流子，而复合和俘获过程则使自由载流子重新回到束缚态。这些制约过程在不同器件中是彼此不同的，因而产生不同的光谱响应。至于光子探测器的响应时间，则通常决定于自由载流子的产生与复合过程的速度。

拿热探测器与光子探测器相比，热探测器有下列优点：

(i) 热探测器对各种波长都有响应，光子探测器只对它的长波限以下的一段波长区间有响应。

(ii) 热探测器（除低温测辐射热计外）工作时不需要冷却，光子探测器则多数需要冷却。

但热探测器有下列缺点：

(i) 热探测器的响应度一般低于光子探测器，响应时间一般比光子探测器长。

(ii) 热探测器的性能与器件尺寸、形状，以及工艺细节等很有关系，因此，须要十分讲究工艺技巧，产品规格常不容易稳定，有点类似于薄膜型光子探测器。而单晶型光子探测器，无论是单晶材料的生长还是器件的制造，在物理机制方面都比较清楚，工艺也比较先进和定型，因之产品比较能够规格化。

拿薄膜型光子探测器和单晶型光子探测器比较，薄膜型还具有下列缺点：

(i) 光敏面各处的响应度的不均匀性，比较严重。

(ii) 由于薄膜厚度（ $\sim 1\mu\text{m}$ ）比单晶厚度（ $>10\mu\text{m}$ ）小，所以容易受到太阳光，紫外光，以及高温的破坏。

(iii) 薄膜噪声比单晶大（低频时有电流噪声）。

(iv) 有的薄膜出现两个响应时间，应用不方便。迄今，常用的薄膜型光子探测器只有光电导型中的 PbS 和 PbSe 两种，远不及单晶光子探测器品种繁多，在 PC、PV、PEM 型中都有。

总的来说，单晶制备（熔融法、外延法）和各种半导体加工工艺（切割研磨、电学测量、制造欧姆接触、腐蚀、制合金 p-n 结、扩散、氧化、光刻、封装等）乃是研制大多数重要红外探测器所必不可少的工艺技术。除了红外探测器外，制造半导体激光器、固体激光器、某些激光调制器等也都离不开单晶制备和各种半导体加工工艺。其次，致冷技术和电子学技术，也是研制许多红外探测器所需要的，因为探测长波的光子探测器必须致冷，特别是采用掺杂半导体时尤其是如此。而对于阻抗过低或阻抗过高的探测器以及对于探测器阵列，都必须解决信号放大的电子学问题。

以上我们对各类红外探测器中的主要品种和探测器主要制造工艺作了轮廓的介绍，下面两段我们讨论红外探测器的性能指标及其测试方法。

二、红外探测器的性能指标

红外探测器或红外系统的性能好坏都用一些性能参数来表示。这些参数又叫做性能指标。从红外探测器的性能指标，再加上红外系统其他组成部分的参数以后，就可以确定整个红外系统的性能指标。我们下面分两点讨论红外探测器的性能指标。

(1) 探测器的性能指标与其工作条件有密切关系，所以，在给出性能指标时，必须注明有关的工作条件。主要的工作条件有下列几方面：

(i) 信号（输入辐射）的光谱分布

许多探测器，对不同波长的红外辐射，响应的程度不同。所以在描述探测器性能时，一般需要给出输入辐射的光谱分布。如果输入辐射是单色的，则只要给出波长。如果黑体辐射是输入辐射，则要给出黑体的温度。如果入射辐射通过了相当距离的大气层和光学系统，则必须考虑大气和光学系统的吸收。如入射辐射经过调制，一般要给出调制的

频率分布，但当放大器通频带比较窄时，那就只须给出调制的基频与幅值。

(ii) 电路频率范围

因为器件的噪声（方均根电压）与电子线路的通频带宽度的平方根 $\sqrt{\Delta f}$ 成比例，其他噪声还与频率有关，所以在描述器件性能时，必须给出电路通频带。

(iii) 工作温度

许多探测器，特别是半导体探测器，无论其输出信号、噪声，还是器件电阻都与工作温度有关系，所以必须说明工作温度。最重要的工作温度有室温（取为295K）、干冰温度（194.6K，它是固态CO₂的升华温度）、液氮温度（77.3K，它是液氮的沸点）。此外，还有液氦温度（27.2K）、和液氢温度（20.4K）。

(iv) 光敏面的形状与尺寸

器件的信号与噪声都与光敏面积有关，所以必须注明光敏面的大小和形状。光电导探测器的光敏面，常呈方形。大小从0.1mm×0.1mm到1cm×1cm左右。光敏面再大，封装就比较困难。光生伏特型探测器分生长结与扩散结两种。用生长结制成的光生伏特型探测器，光敏面细而长，只适用于光谱分析仪。用扩散结制成的光生伏特型探测器，光敏面可取随意的大小和形状。光电磁型探测器的光敏面，小的常为正方形（从很小到2mm×2mm）。大的则为长方形，沿磁场方向长度不超过2mm，电极间间隔可大到2cm。

(v) 偏置情况

例如，光电导型探测器的直流偏置电流、光电磁型探测器的磁场强度均必须注明，因为探测器某些性质与偏置大小有关。

(vi) 特殊工作条件

例如薄膜探测器非密封工作时，要注明湿度。光子噪声为主要噪声的探测器须注明视场立体角和背景温度（通常为300K）。某些非线性响应（即信号与入射辐射功率不成比例）的探测器，须注明入射辐射的功率，等等。

在说明了上述各种工作条件之后，我们就可以讨论探测器的性能指标了。

(2) 探测器性能指标

探测器的性能指标可分为实际指标与参考指标两种。实际指标是指对每个实际探测器直接测量出来的指标。参考指标则是对某类探测器折合到标准条件时的指标值。下面列举的探测器指标中，除了 D^* 之外，都是实际性能指标。即它们都是对个别探测器而言的。 D^* 则是参考性能指标，它是对某类探测器而言的。

探测器的主要性能指标有下面几个：

(i) 响应度 \mathcal{R}

器件的输出信号 S （方均根电压）与入射到探测器上的（平均）辐射功率 P 之比，定义为探测器的响应度 \mathcal{R} ，即

$$\mathcal{R} = \frac{S}{P} \quad [\text{V/W}] \quad (1.2)$$

有些作者把功率 P 规定为方均根功率，即调制后按正弦（或余弦）变化的功率的方均根值。测 \mathcal{R} 时，常用的辐射源为500K黑体，这样测得的响应度即用 \mathcal{R} 表示。如果采用单色光源（波长 λ ），则测得的是单色响应度，记为 \mathcal{R}_λ 。 \mathcal{R}_λ 随 λ 而变化。变化的情况叫

做器件的光谱响应。通常给出的 \mathcal{R}_λ 常常是指响应最大的波长 (λ_{peak}) 下的响应度。有时记为 $\mathcal{R}_{\lambda_{peak}}$ 或 \mathcal{R}_{λ_p} 。

响应度 \mathcal{R} 还与调制频率 f 有关 (此关系叫做探测器的频率响应)。在给出 \mathcal{R} 时, 应注明调制频率 f 的数值。不注明频率 f 时, 响应度 \mathcal{R} 的值是指低频时的值。在低频下, \mathcal{R} 的值与 f 无关。

给出 \mathcal{R} 时, 无须说明通频带宽 Δf , 因为 Δf 只限制噪声电压的大小, 而和 \mathcal{R} 无关。但探测器的工作温度和光敏面积通常与 \mathcal{R} 是有关的, 故在给出 \mathcal{R} 时须注明工作温度和光敏面积。此外, 探测器在输入辐射功率高时 (例如 1W 以上时), S 与 P 常不再成比例。有的探测器此时 S 随 \sqrt{P} 上升, 即响应变成非线性的。此情况下, 必须给出输入的辐射功率。

(ii) 不同温度下, 噪声的频率分布 (简称噪声谱)

无目标辐射输入时, 器件的输出方均根电压 (或电流) N 叫做噪声。器件噪声包含有各种频率成分。噪声电压按频率的分布即称为噪声谱。给出器件的噪声电压时, 必须注明电子线路的通频带。

不同类型的红外探测器, 噪声与响应度的大小以及噪声与响应度的频率分布都是不同的。同一类型的探测器 (特别如热敏电阻, 薄膜型探测器), 如果工艺控制不严, 不同的两个探测器的噪声, 响应度以及它们的频率分布, 彼此也都互有出入, 即具有一定的分散性, 或不稳定性。但对同一种探测器, 光谱相应通常是比较一致的。

各类探测器中出现的噪声, 主要由下列几种组成:

① 热噪声

热噪声是由于固体中载流子混乱运动引起的。所有导体、半导体、无论其中有无电流流过, 都有热噪声。热噪声电压为

$$V_j = (4kTR\Delta f)^{1/2} \quad (1.3)$$

式中 R 为电阻 (Ω); T 为绝对温度 (K); Δf 为放大器带宽 (Hz); k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K。

例如, $1M\Omega$ 电阻的探测器, 在室温下操作时, 放大器每一赫带宽 (不论在低频、高频) 都有 $0.13\mu V$ 热噪声电压, 即每赫带宽的噪声电压与频率无关。这样的噪声包含等量的各种频率成分, 叫做白噪声。热噪声是一种白噪声。

② $1/f$ 噪声

在所有半导体中, 均有 $1/f$ 噪声。 $1/f$ 噪声的真正原因还没有弄清楚。但它与表面情况有关, 因而与工艺有关。 $1/f$ 噪声电压大致与频率的平方根成反比, 所以在低频比较严重。这种噪声随流过探测器电流的增加而成比例地增加。它在薄膜型探测器中和多数热探测器中都比在单晶探测器中显著。前者到 1000Hz 后还有, 后者, 当工艺好时在 $f > 50\text{Hz}$ 后就不显著。

③ 产生-复合噪声与光子噪声

由于晶格热振动引起载流子产生与复合的涨落, 形成产生-复合噪声。由于投射到探测器上的背景光子数的涨落引起载流子数的涨落形成光子噪声。这两种噪声 (当不是以后者为主时) 常合称为产生-复合噪声 ($G-R$ 噪声)。它出现在所有光子探测器中, 且随着通过探测器的电流的增加而增加。其频率分布决定于载流子的寿命。

④ 温度噪声

温度噪声是环境温度涨落（对薄膜探测器，主要是底板温度涨落）引起的噪声。它出现在所有探测器中，特别是薄膜形状的探测器中。它也随着通过探测器电流的增加而增加。

⑤ 散粒噪声

由于电流是由带电的微粒（电子和空穴）组成的，所以好象光的微粒性引起光子涨落那样，电的微粒性也引起电流的涨落，形成所谓散粒噪声。这种噪声出现在光电子发射器件，光生伏特器件和薄膜型探测器中。

红外探测器中的噪声，主要的就是上述五种。

(iii) 噪声等效功率 (NEP)

信号方均根电压 S 等于噪声方均根电压 N 时，入射到探测器上的功率 P （有的作者用方均根功率）叫做噪声等效功率 (NEP)。即

$$NEP = \frac{P}{(S/N)} = \frac{N}{\mathcal{R}} \quad (1.4)$$

测量时，常用的辐射源为 500K 黑体。带宽 Δf 常为 1Hz、4Hz 或 5Hz。中心频率 f 常为 90、400、800 或 900Hz。温度用室温 (295K) 或其他致冷工作温度。探测器面积常折合到 1cm^2 。此外，要注明辐射强度和视场立体角。光源用单色光时，测得的 NEP 记为 NEP_λ 。

(iv) 探测度 D 。它定义为 NEP 的倒数：

$$D = \frac{1}{NEP} = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)}{P} = \frac{\mathcal{R}}{N} \quad (1.5)$$

由于响应的非线性，根据低功率（如 $1\mu\text{W}$ ）下测定的 D ，推算高功率（如 1W 下的 S/N ），往往得到不准确的结果。

光源用单色光时，测得的是单色探测度，记为 D_λ 。通常引用的为 $D_{\lambda_{peak}}$ 或 D_{λ_p} 。

(v) $D^*(T, f, \Delta f)$ 与 $D^*(\lambda, f, \Delta f)$ ，叫做比探测度或归一化的探测度。 D^* 是从探测度 D 定义出来的：

$$D^* = D \sqrt{A_D \Delta f} \quad (1.6)$$

式中， A_D 为探测器面积。 D^* 与测量条件有关。如用黑体作为辐射源，测得的 D^* 要注明黑体温度 T ，此外还要注明调制频率 f 和放大器带宽 Δf ，记为 $D^*(T, f, \Delta f)$ 。如测量用单色辐射，就要注明波长，常用的为 λ_{peak} ，记为 $D^*(\lambda, f, \Delta f)$ 。带宽 Δf 常用 1Hz。

我们在前面说过， D^* 不是实际指标，而是参考指标。采用 D^* 的条件是 $D \propto (A_D \Delta f)^{-1/2}$ 。满足这个条件时，对整类探测器，（例如对 PbS 薄膜探测器），只要对其中一个探测器测定了 D^* ，它就能代表所有同一类探测器的性能。因为同类中，别的探测器的 D 值，可以按下式估算：

$$D = \frac{D^*}{\sqrt{A_D \Delta f}}$$

但这样估算的结果，可能与该探测器的实际性能指标有偏差。这是因为，我们假定的条

件 $D \propto (A_b \Delta f)^{-1/2}$ 并不是严格准确的缘故。这就是参考描述的局限性。只要记住参考描述的这个局限性，采用参考描述显然是很方便的。它能够用一个 D^* 值描述整类探测器的性能。并且不同类的探测器的性能，也可以用 D^* 值互相进行比较。在给出 D^* 时，应注明视场立体角和背景温度。但视场立体角通常为 2π 球面度，背景温度通常为 300K，有时就不注明了。

(vi) 光谱响应

相同功率的单色辐射所产生的信号 S 与辐射波长 λ 的关系，叫做光谱响应。通常用单色辐射的响应度 \mathcal{R}_λ 对 λ 作图或者用单色的 $D^*(\lambda, f, \Delta f)$ 对 λ 作图来表达探测器的光谱响应。纵坐标 \mathcal{R}_λ 或者 $D^*(\lambda, f, \Delta f)$ 有时给出准确的测量值，有时只给出相对的数值。前者给出绝对光谱响应，后者给出相对光谱响应。

\mathcal{R}_λ 下降到峰值 \mathcal{R}_{λ_p} 的 50% (或者 1%，或者 10%) 时的波长，叫做截止波长 (λ_{cutoff} 或 λ_c)，究竟用 50%、1% 还是 10%，没有统一规定。

(vii) 频率响应与响应时间 (或时间常数)

响应度 \mathcal{R} 随调制频率的变化叫做频率响应。记为 $\mathcal{R}(f)$ 。探测器的噪声电压 N 也随频率改变， $N(f)$ 叫做噪声谱。探测度 $D = \mathcal{R}/N$ 。所以探测度随频率的改变 (或 D^* 随频率的改变) 要同时看频率响应和噪声谱而定。

当正弦调制辐射投射到探测器上时，如果调制频率较低，输出电压与调制频率无关。调制频率提高时，由于光子探测器中的载流子具有一定的寿命，结果，载流子浓度的瞬时值跟不上调制辐射的快速变化，高频响应度因而逐渐下降。大多数探测器， $\mathcal{R}(f)$ 如附图 1-2 所示，用公式表达时，得

$$\mathcal{R}(f) = \frac{\mathcal{R}_0}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (1.7)$$

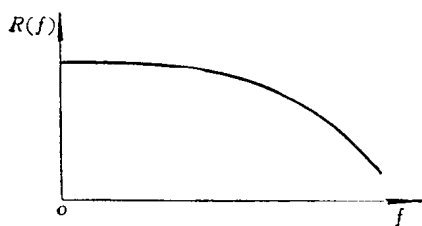


图1-2 探测器的频率响应

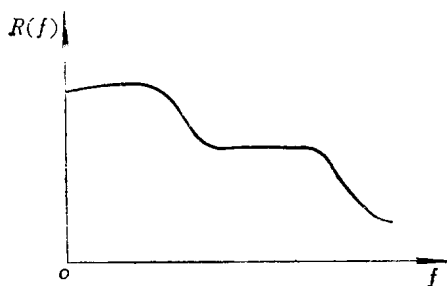


图1-3 具有两个时间常数的频率响应

式中的 τ 就叫做响应时间，它接近于载流子的寿命。

有些探测器具有两个时间常数。如附图 1-3 所示。这是因为探测器对一种辐射波长具有一个时间常数，而对另一段辐射波长，则有另一个时间常数之故。有些探测器只具有一个时间常数，但它与辐射波长、辐射强度以及探测器的温度都有关，在此情况下我们必须注明测量的条件。在实用上，希望在工作频率范围内， \mathcal{R} 与 D 均与 f 无关，但常常做不到这一点。具有两个时间常数并不好，这种探测器用起来不方便。

式 (1.7) 是响应时间或时间常数 τ 的一个定义。但 τ 还有另外一个定义。以一个矩形辐射脉冲照射到探测器上，并用示波器观察其输出。可以看到，输出信号上升或下降

都落在矩形脉冲之后。大多数情况，信号的下降系按指数 $e^{-t/\tau}$ 形式，其中的 τ ，即信号电压从最大值下降到 $1/e$ 倍的时间乃是探测器中载流子的寿命。它也被定义为探测器的响应时间。这就是响应时间的另一个定义。通常，信号的上升和下降特性与目标和背景的辐射强度以及它们的光谱分布有关。当信号按精确的同一指数形式上升或下降时，用载流子寿命定义的响应时间和根据频率响应曲线定义的响应时间，彼此在数值上是一致的。但信号常常不是精确地按同一指数规律上升或下降。这时候，我们只能近似地应用载流子寿命的概念。上面两个响应时间的定义，在数值上也就彼此互不一致。在这种情况下，最好详细说明测试条件，并同时给出示波器图形和频率响应曲线。如果单单给出一个响应时间的估计值，那就只有粗略的意义。

(viii) 其他性能指标

一个探测器，除了红外探测方面的性能指标以外，还有其他方面的性能指标，有时也很重要。举例如下。

电学性能：我们最好能知道探测器的等效电路中的全部参数。对光子探测器，绝大多数等效于一个纯电阻。其中 $100\ \Omega$ 以下为低阻的。电阻太低时，与放大器须作变压器耦合，这就有磁掇拾干扰问题。 $100\ \Omega$ 到 $1\text{M}\Omega$ 为中阻的，配合放大器最容易。 $1\text{M}\Omega$ 以上为高阻的。电阻太高时，热噪声就大，同时，放大器需要高输入阻抗，从而有附带的静电掇拾和振动噪声问题。此外，电路时间常数 RC 还可能显著超过探测器的时间常数，使频率响应性能下降。所以，中等阻值的光子探测器最好。

光电导探测器和光电磁探测器的电阻由材料的电阻率决定，采用图 1-4 所示的电极形状，可以减小电阻。光生伏特探测器由 p-n 结电阻决定。由于光导探测器方形光敏面的电阻与边长无关，所以常用 Ω/\square 作为电阻单位。

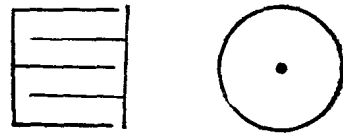


图1-4 电极形状

光学性能：材料的折射率、表面反射率、透射率等。

温度特性：工作的最高、最低温度，贮藏的最高、最低温度。

时间特性：有些探测器、特别如薄膜型探测器，在短时期内性能会有变动，即具有时间特性。

机械特性：是否耐震，有无机械共振频率。机械共振即使不严重，也可能产生显著的振动噪声。

光敏面响应的不均匀分布情况，它常用等响应度曲线表示出来。

光敏面大小和形状（它主要考虑与光学系统的配合问题）。

在上述所有性能指标中，最重要的性能指标为下述三方面。

(i) 探测度方面的 $D^*(T, f, \Delta f)$ 、 $D^*(\lambda_p, f, \Delta f)$ 与 $N(T, f, \Delta f)$ 。响应度 \mathcal{R} 则可以由下式得出：

$$\mathcal{R} = \frac{D^* N}{\sqrt{A_D \Delta f}}$$

在设计放大器和红外系统时，常常不但须要知道探测器的 D^* ，而且还须要知道响应度 \mathcal{R} 与噪声 N 。例如，两个 D^* 相同的探测器， \mathcal{R} 与 N 都较大的那个就比较好。因为此

时，放大器的增益可以较小，同时也不要要求放大器噪声必须很低。

(ii) 光谱响应方面的 D_{λ}^* 与 λ 的关系，亦即 \mathcal{R}_{λ} 与 λ 的关系。由此即可得到 λ_{peak} 与 λ_{cutoff} 它们都是探测器光谱响应方面很有用的参数。

(iii) 频率响应方面的时间常数 τ 。

下面，我们将叙述这三方面性能指标的实验室测量方法。

三、红外探测器性能指标的测量

(1) 探测度 D 的测量方法。

探测度 D 的测法，随探测器类型而异。公共装置方块图如图 1-5 所示。前置放大器的噪声必须比探测器的噪声低得多。在测量对 $3\mu\text{m}$ 以上波长有显著响应的探测器时，所用黑体的温度常为 500K 。探测器上的照度常在 $10^{-9}\text{W}/\text{cm}^2$ 附近。调制频率视探测器的响应速度而定，从慢的热探测器的 10Hz 直到快的光子探测器的 1000Hz 。频率适宜时，探测度最高。斩光器可采用等间距狭缝，狭缝宽度为黑体孔径的 1.15 倍时，可以得到近似的简谐调制。

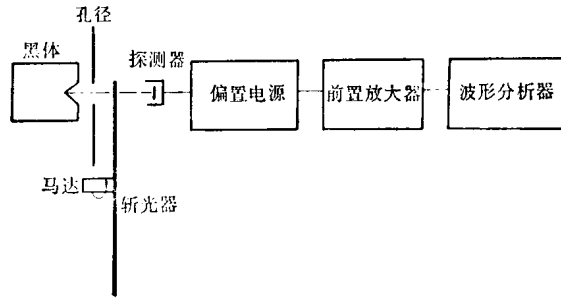


图1-5 测量探测度 D 的实验装置

探测器的测量电路和偏置电源的连接法，随探测器类型而异，大致情况分述如下。

(i) 光电导探测器

光电导探测器的测量电路如图 1-6 所示。负载电阻 R_L 通常与探测器电阻 R_C 在同一数量级。可变偏置电压常选取使信噪比为最大的值。在较低的偏置电压下，信号与噪声都较低。此时探测器的性能常受到放大器噪声的限制。提高偏置电压，使探测器噪声超过放大器噪声后，信噪比通常就维持恒定。直到偏置电压过高，信噪比才开始下降。此时，信号随偏置电压的增加比线性慢，而噪声随偏置电压的增加比线性快。探测器在应用时，不能采用这样过高的电压。

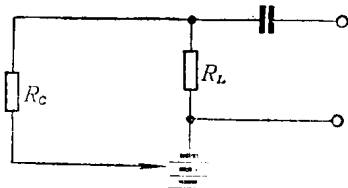


图1-6 光电导探测器的测量电路

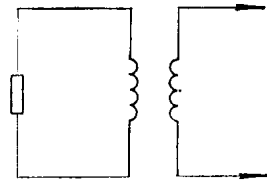


图1-7 光生伏特探测器的测量电路

(ii) 光生伏特探测器

光生伏特探测器不需要偏置电源。由于探测器的噪声较低，所以与放大器耦合时，需要用升压变压器，如图 1-7 所示，使探测器阻抗能够与放大器阻抗互相匹配。如果应

用中须作宽带放大，则匝数比高的变压器就不能用，而须采用特殊设计的低噪声晶体管放大器。其输入阻抗、噪声电平应与探测器阻抗、探测器噪声分别在同一数量级。此时，由于放大器噪声并不是远比探测器噪声低，所以整个系统的探测度要比探测器的探测度来得低。

有些光生伏特探测器能在反向偏压下工作。此时，一个小的反向偏压能使信号与噪声都比不加反向偏压的通常光生伏特探测器高得多，因而不需要变压器。

(iii) 热敏电阻

热敏电阻的工作温度常取在其电阻温度系数较大的温度区间内。为了抵消底板温度涨落引起的电阻变化，测试与应用热敏电阻时，常把两个热敏电阻连接成桥电路，如图 1-8 所示。被测试的热敏电阻，其底板温度涨落的影响被第二个热敏电阻补偿掉。第二个热敏电阻加上屏蔽，受不到信号辐射的照射。如热敏电阻底板温度能够严格控制，也可以不用电桥形式的电路。要注意，偏置电压必须严格控制，否则，超过某一临界值，热敏电阻会被烧毁。

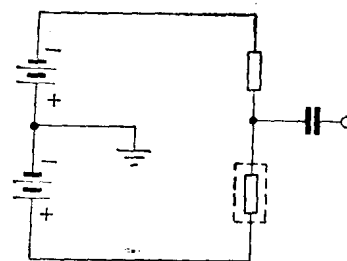


图1-8 热敏电阻的测量电路

(iv) 热电偶

过去常用电流计测量热电偶对稳定（未调制）辐射的直流电响应。由于直流电不方便，所以现在多采用调制辐射，并对热电偶交流输出进行放大。由于热电偶的电阻低，响应度也低，所以需要升压变压器与放大器耦合，情况与光生伏特探测器相类似，即如图 1-7 所示，而且变压器的匝数比要高。

热电偶输出信号的电子学放大问题要比高阻抗红外探测器输出信号的放大问题更加复杂些，通常需要特殊设计的放大器。

(2) 光谱响应的测量方法

测量相对光谱响应的实验装置方框图如图 1-9 所示，热电偶（或热电堆）对一切波长的响应度几乎都是相等的。在单色仪的各种不同波长辐射的照射下，调节单色仪的缝宽，使得热电偶的响应始终为某一个固定值，那么，这就表示不同波长红外辐射的辐射功率已经被调节到彼此相等了。用这些辐射功率相等的红外辐射依次照射到探测器上，并记录探测器的输出信号值，就可以得到探测器对各种不同波长的辐射的响应度的相对变化。这也就是我们所欲求的相对光谱响应。对光子探测器进行测量时，调制频率不妨取几十赫，尽管此时探测度比较低，但测相对光谱响应仍是可行的。

测绝对光谱响应须要对热电偶或热电堆进行校正。但从探测器的相对光谱相应曲线和一个已测定的 $D^*(T, f, \Delta f)$ 值，也可以确定其绝对光谱响应。后一种方法比较方便。

(3) 响应时间的测量方法

测量响应时间有两类方法，分述如下：

(i) 矩形辐射脉冲法

红外探测器的时间常数的变化范围，约从 50ms 到 $10^{-2}\mu\text{s}$ 。它们都可以用矩形辐射

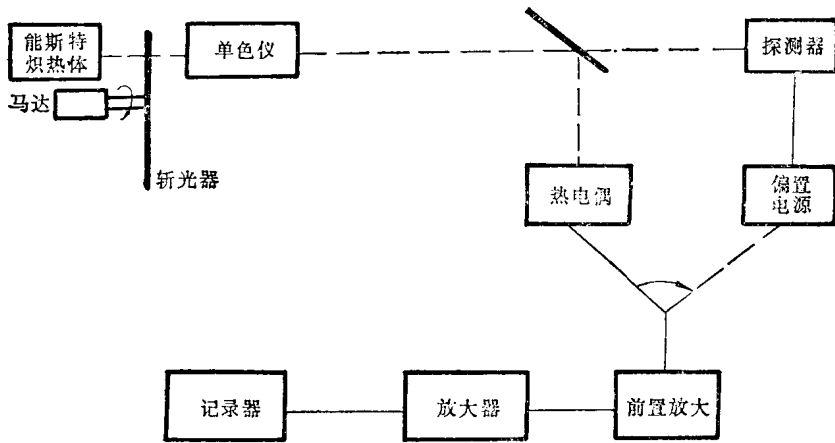


图1-9 测量相对光谱响应的实验装置方框图

脉冲法测量。获得矩形辐射脉冲的方法有两个。对较慢的探测器,可用半圆形斩波器,此时必须脉冲上升时间比探测器响应时间短。对较快的(时间常数 $<10\mu\text{s}$ 的)探测器,常用旋转反射镜,此时脉冲上升与下降时间可低到 10^{-8}s 。

用宽带放大器与示波器可以观察到器件输出信号随时间的变化。结果如图1-10所示。它通常近似按指数率 $e^{-t/\tau}$ 下降,由此即可求出时间常数 τ 。

(ii) 改变调制频率法

此法适用于测量大于 $10\mu\text{s}$ 的时间常数。其实验装置与测量 D 的实验装置(图1-5)相同,但用一个变速马达改变调制频率,并用真空管伏特表测量输出电压。结果得到信号随频率的变化,这就是探测器的频率响应,如图1-11所示。在图1-11的横坐标上取两个适当的频率 f_1 和 f_2 ,并从曲线的纵坐标得出对应的信号值 S_1 和 S_2 。则器件的响应时间 τ ,可由下式推算:

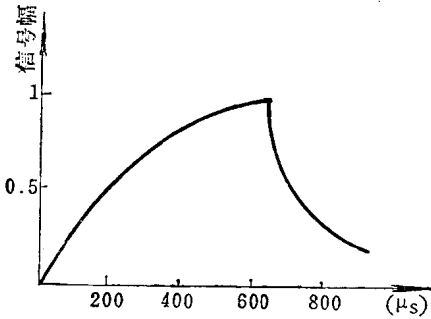


图1-10 测响应时间的矩形脉冲法输出

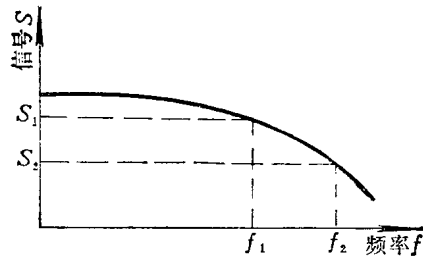


图1-11 信号随频率的变化

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{S_1^2 - S_2^2}{f_2^2 S_2^2 - f_1^2 S_1^2} \right)^{1/2} \quad (1.8)$$

S_1 和 S_2 必须相差在 10% 以上, 否则误差太大。

四、红外探测器工艺发展简史

第二次世界大战后期, PbS 探测器问世。到五十年代, 用化学沉淀法生产的 PbS 薄