

红外探测器

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是根据美国大学出版社出版的《半导体与半金属丛书》(Semiconductors and Semimetals) 的第五卷译出的。

前四卷主要介绍Ⅲ-V族半导体材料的实验和理论方面的应用与发展,从本书开始着重讲述Ⅲ-V族材料的应用。全书共分十二章。书中对近年来新出现的器件和研究成果作了较系统的介绍。内容着重论述了晶体的制备、材料的特性以及器件的制造等。

本书可供生产、研究和使用的红外探测器的工人、技术人员以及有关院校的师生参考。

2008/2

INFRARED DETECTORS

【美】 R. K. 威拉德森, A. C. 比尔
ACADEMIC PRESS 1970

红外探测器

《激光与红外》编辑组 译

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第074号

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

850×1168¹/₃₂ 印张16¹/₈ 414千字

1973年6月第一版 1973年6月第一次印刷 印数: 00,001—14,500册

统一书号: 15034·1309 定价: 1.60元

目 录

第一章 红外探测器的特性	7
一、引言	7
二、探测器的特性	7
第二章 铋化铟光电导和光磁电探测器	16
一、引言	16
二、对设计铋化铟红外探测器有重要意义的电性能、 光学特性和寿命值	18
三、理论探测器的设计	36
四、光电导和光磁电探测器的制备	59
五、光电导和光磁电探测器的性能	67
第三章 窄带宽自滤波探测器	83
一、引言	83
二、理论探讨	84
三、实验数据	95
四、小结	103
第四章 铅-锡碲族化合物单晶	107
一、引言	107
二、晶体制备	111
三、光伏探测器	137
四、光电导探测器	155
五、结语	162
第五章 碲镉汞及其密切相关的合金	169
一、引言	169
二、材料的基本性质	174
三、可用于这些材料的基本红外探测器理论	209
四、晶体的制备	224

五、探测器的制备和特性	236
六、结论	242
第六章 热电探测器	252
一、热电效应	252
二、热电探测器	253
三、热电探测器的结构	265
第七章 辐射热堆	280
一、引言	280
二、理论背景	282
三、作为辐射探测器的热堆	290
四、热堆辐射探测器的特性	295
五、结论	308
第八章 红外小信号相干和非相干探测	312
一、引言	312
二、小信号的非相干探测	312
三、小信号相干辐射探测	335
第九章 红外线的相干探测	350
一、引言	350
二、红外相干探测的量子理论	353
三、信号-噪声比的测量	363
四、对运动的漫反射体的探测	376
五、红外激光雷达	386
六、红外光电导体和光电二极管的比较	390
七、结语	392
第十章 千兆赫中频响应红外外差探测	399
一、引言	399
二、光电导混频器的设计公式	400
三、用 Ge:Cu 测量混频器响应	405
四、中频前置放大器	410
五、按混频器的伏安特性预测性能	411
六、Ge:Cu 外差探测的结果	412

七、偏压和工作温度对混频器响应的影响	416
第十一章 微波偏压光电导探测器	426
一、引言	426
二、欧姆接触的限制	427
三、探测器理论上的响应	428
四、设计细节	431
五、宽带探测器的性能参数	436
六、几种红外光电导体的实验响应	438
七、灵敏度同几种代表性的宽带探测器比较	448
八、需作进一步研究的课题	453
第十二章 成象和显示	457
一、引言	457
二、电子束扫描成象器件	459
三、电子扫描的光电探测器矩阵	471
四、光电探测器矩阵的象读出方法	484
五、光电探测器矩阵的成象特性	492
六、矩阵和扫描电路的集成	495
七、显示器件	496
八、并联读出象转换器	507

红 外 探 测 器

〔美〕 R. K. 威拉德森

A. C. 比 尔

《激光与红外》编辑组 译

国防工业出版社

1980

内 容 简 介

本书是根据美国大学出版社出版的《半导体与半金属丛书》(Semiconductors and Semimetals) 的第五卷译出的。

前四卷主要介绍Ⅲ-V族半导体材料的实验和理论方面的应用与发展,从本书开始着重讲述Ⅲ-V族材料的应用。全书共分十二章。书中对近年来新出现的器件和研究成果作了较系统的介绍。内容着重论述了晶体的制备、材料的特性以及器件的制造等。

本书可供生产、研究和使用的红外探测器的工人、技术人员以及有关院校的师生参考。

2008/2

INFRARED DETECTORS

【美】 R. K. 威拉德森, A. C. 比尔
ACADEMIC PRESS 1970

红外探测器

《激光与红外》编辑组 译

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第074号

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

850×1168¹/₃₂ 印张16¹/₈ 414千字

1973年6月第一版 1973年6月第一次印刷 印数: 00,001—14,500册

统一书号: 15034·1309 定价: 1.60元

译者的话

红外技术是一门有较长历史的科学技术。近年来，随着新型红外探测器的出现，它在国防和工农业方面的应用有了新的发展。在激光这一新的相干光源问世之后，红外探测器作为它的一种接收器件亦日益得到人们的重视。为了赶超世界先进技术水平 and 了解国外有关红外探测器的发展，我们遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，翻译了“红外探测器”一书，供有关人员参考。

本书前半部叙述用Ⅲ-V族化合物和Ⅳ-V、Ⅰ-V族三元系合金制造的红外探测器和热电探测器。其中介绍的碲锡铅和碲镉汞探测器是近年来新出现的器件，书中对晶体的制备、材料的特性和器件的制造都作了介绍。1970年以后，这两种器件又有了新的进展。铋化铟探测器、热电探测器和热堆探测器虽然是比较成熟的器件，但是它们仍在发展和提高，书中对近年来的研究成果作了归纳。后半部介绍外差探测技术、微波偏压探测器和成象显示技术。其中重点是介绍外差探测技术，这种技术对于探测极微弱的相干信号是很有效的，但是应该指出，它迄今尚未脱离实验研究的阶段而得到实用。在成象显示一章中主要介绍多元探测器的应用。

目 录

第一章 红外探测器的特性	7
一、引言	7
二、探测器的特性	7
第二章 铋化铟光电导和光磁电探测器	16
一、引言	16
二、对设计铋化铟红外探测器有重要意义的电性能、 光学特性和寿命值	18
三、理论探测器的设计	36
四、光电导和光磁电探测器的制备	59
五、光电导和光磁电探测器的性能	67
第三章 窄带宽自滤波探测器	83
一、引言	83
二、理论探讨	84
三、实验数据	95
四、小结	103
第四章 铅-锡碲族化合物单晶	107
一、引言	107
二、晶体制备	111
三、光伏探测器	137
四、光电导探测器	155
五、结语	162
第五章 碲镉汞及其密切相关的合金	169
一、引言	169
二、材料的基本性质	174
三、可用于这些材料的基本红外探测器理论	209
四、晶体的制备	224

五、探测器的制备和特性	236
六、结论	242
第六章 热电探测器	252
一、热电效应	252
二、热电探测器	253
三、热电探测器的结构	265
第七章 辐射热堆	280
一、引言	280
二、理论背景	282
三、作为辐射探测器的热堆	290
四、热堆辐射探测器的特性	295
五、结论	308
第八章 红外小信号相干和非相干探测	312
一、引言	312
二、小信号的非相干探测	312
三、小信号相干辐射探测	335
第九章 红外线的相干探测	350
一、引言	350
二、红外相干探测的量子理论	353
三、信号-噪声比的测量	363
四、对运动的漫反射体的探测	376
五、红外激光雷达	386
六、红外光电导体和光电二极管的比较	390
七、结语	392
第十章 千兆赫中频响应红外外差探测	399
一、引言	399
二、光电导混频器的设计公式	400
三、用 Ge:Cu 测量混频器响应	405
四、中频前置放大器	410
五、按混频器的伏安特性预测性能	411
六、Ge:Cu 外差探测的结果	412

七、偏压和工作温度对混频器响应的影响	416
第十一章 微波偏压光电导探测器	426
一、引言	426
二、欧姆接触的限制	427
三、探测器理论上的响应	428
四、设计细节	431
五、宽带探测器的性能参数	436
六、几种红外光电导体的实验响应	438
七、灵敏度同几种代表性的宽带探测器比较	448
八、需作进一步研究的课题	453
第十二章 成象和显示	457
一、引言	457
二、电子束扫描成象器件	459
三、电子扫描的光电探测器矩阵	471
四、光电探测器矩阵的象读出方法	484
五、光电探测器矩阵的成象特性	492
六、矩阵和扫描电路的集成	495
七、显示器件	496
八、并联读出象转换器	507

第一章 红外探测器的特性

H. Levinstein

一、引言

红外探测器的特性可以用三个基本参数来表示，它们是光谱响应范围、响应速度和最小可测辐射功率。其中某些参数并不是绝对量，可能随测量条件和探测器的工作环境而有所变化。这样一来，通常称为噪声等效功率（NEP）的最小可测功率，可能随光源的能量分布而变化；并且它也随由热背景到达探测器的额外辐射量而变化。这些参数可能是探测器材料所固有的性质，也可能随制造工艺和几何设计而变化。在说明探测器特性时，必须明确地指出测量条件，这点很重要，因为只有这样做，它们才能随意互换使用。此外，在测量探测器参数时，为了能预计它们在特殊条件下的特性，应该很好地了解它们工作时的物理过程。

二、探测器的特性

在确定各参数时，需要测量探测器的几种特性，或者需要用几种技术来对某一特性进行测量。特别是在评价噪声等效功率时，需要测量两个量，即：探测器暴露在调制的黑体辐射源时产生的信号；遮蔽黑体辐射时探测器的噪声。必须指出的测量条件是，辐射源的温度、调制频率和放大器的带宽。黑体温度需要标准化。这是因为发射辐射的光谱分布将决定探测器所“接收”的辐射量。500°K的黑体通常用来作为响应波长超过2微米的探测器的辐射源。因为探测器的信号和噪声都可能和频率有关，所以也必须指出调制频率。因为放大器的带宽决定了所测噪声的数值，所以它必须也是已知的。为了尽量减少在测量噪声所用的频率间隔内噪

声的变化，放大器的带宽应做得尽量地窄（市场上出售的谐波分析器的带宽通常是 4 或 5 赫）。

表示某一组测量条件的噪声等效功率（NEP）可写为：

$$\text{NEP} (500^\circ \text{K}, 900 \text{赫}, 5 \text{赫}) = \frac{P_D A}{S/N} \quad (1)$$

括弧中的量分别为黑体温度、调制频率和放大器的带宽； S 和 N 表示测量条件下的信号和噪声； A 为探测器面积； P_D 为由黑体到达探测器的辐射功率密度。

为了表达方便，常常还要提出 NEP 的倒数，即探测度 D （单位是瓦的倒数）。为了对探测器进行比较，探测度通常要标准化为放大器带宽为 1 赫，探测器面积为 1 厘米²。这样就得到参数 $D^{*(1)}$ ，即

$$D^* = \frac{S/N}{P_D} \left(\frac{\Delta f}{A} \right)^{1/2} \quad (2)$$

标准化的根据是，噪声随放大器带宽的平方根而变化； D 随探测器面积的平方根成反比变化。第一个假设通常可以很好地得到证明。这是因为，探测器测量时所用的频率通常不会改变噪声，或者测量时所用的带宽很窄，致使噪声随频率的变化很小。第二个假设有时并不能得到完全的证明，而可能在标准化的过程中出现相当大的误差。但是由于它使用方便，特别是在对它的缺点有所了解的情况下，使用起来还是可行的。

红外探测器在一定的光谱范围内使用时，除了“接收”给定光源的辐射外，还会接收从热背景来的数量相当多的辐射。因为背景可能严重地影响探测器的特性，所以，对探测器周围背景的数量和类型必须加以说明。除非另有说明，不然在给出 D^* 时，视场都是 2π 弧度，背景温度都是 300°K 。不同背景对 D^* 有什么样的影响，这点往往有可能计算出来^[2]。此外，不同背景对其他特性的影响，例如对响应速度的影响，往往不需要经常去估计。

虽然 D^* 是对比探测器的一个有用的参数，但它对系统设计者

来说意义并不大，因为系统设计者必须制造出可以和探测器连接使用的放大器。在设计放大器时，要考虑信号的大小（用响应度——一瓦入射功率的信号电压表示）和探测器噪声的类型。因此，必须掌握这两个量的数据。噪声和响应度都和频率有关。在探测器中可观测到好几种类型的噪声。在所有导体中，热噪声⁽³⁾是一种起限制作用的噪声。在声频和射频频段内，热噪声与频率无关，而且也与通过探测器的电流数值无关。它由下式给出：

$$V_j = (4KTR\Delta f)^{1/2},$$

式中， R 是导体的电阻（欧姆）； K 是玻耳兹曼常数（ 1.38×10^{-23} 焦耳/度）； T 是探测器的温度（°K）； Δf 是放大器带宽（赫）。

通称 $1/f$ 噪声的这类噪声，在含有半导体元素的探测器中都存在。这类噪声都有一定的频率范围。在此范围内，噪声电压随 $1/f^n$ 而变化，这里 n 大约为 $1/2$ ，但可以有一些出入⁽⁴⁾。

由于载流子产生复合起伏引起的噪声⁽⁵⁾，像 $1/f$ 噪声一样，它随电流而线性地变化。这种噪声可能是由于从背景来的光子无规则到达（光子噪声）而产生的，或者可能是由于晶格振动造成载流子密度的起伏（ $g-r$ 噪声）而产生的。它的频谱由自由载流子寿命决定。温度噪声是由环境温度起伏，特别是安装探测器元件的表面上温度起伏产生的。

探测器的响应速度，可用两种方法测得：当探测器暴露于方形辐射脉冲时（这种脉冲有足够的间隔，可在探测器中建立平衡），观察信号的上升和衰退时间；以及当改变入射功率的调制频率时，确定探测器的频率响应。如果信号的上升和衰退特性是指数的，即可用单一的时间常数表示，那么，这两种方法给出的时间常数是相同的。探测器对方形辐射脉冲的响应往往是这样的：开始是出现时间常数短，快速上升，然后是较慢地增加信号。在此条件下，探测器的速度可用每一特性对于总信号产生影响的部分给出。因为对这类经常看到的特性和更为复杂的上升和衰退的特性来说，需要详细描述测量技术以及示波器的轨迹和频率响应曲

线。单纯地说明探测器的响应时间,只能表示一个数量级的估算。

此外,上升和衰退特性决定于从信号源和背景到达探测器的辐射量,但有时也可能随信号源的光谱分布而变化。很明显,只有清楚地指出测量条件,而且其数据能够外推到探测器实际使用的条件时,说明探测器的响应速度才有实际意义。

探测器的光谱响应可以用相对单位或绝对单位给出。如果只对响应的形状感兴趣,即在各个波段上比较探测器的响应,那末利用单色仪改变入射到探测器上的辐射波长和使探测器响应与已知响应的探测器相比较就足够了。测定绝对响应时要校准对比用的探测器,或者是借助于一个标准黑体校准未知探测器的响应。此后,就可说明 D_{λ}^* ——某一波长上的探测度。探测器在光谱峰值处的 D_{λ}^* 值通常比参考于黑体的 D^* 更有意义,因为它不需要说明黑体温度,且能给出光谱响应的一般形状。当然,对与波长无关的响应来说, D_{λ}^* 和 D^* 是相等的,而且当已知光谱响应时,它们可以进行换算。有很大一类探测器的响应随波长线性地上升,然后突然下降。图 1 表示光谱峰值 D^* 和 500°K 黑体 D^* 比值以及长波限(或探测器峰值响应波长)的关系^[6]。

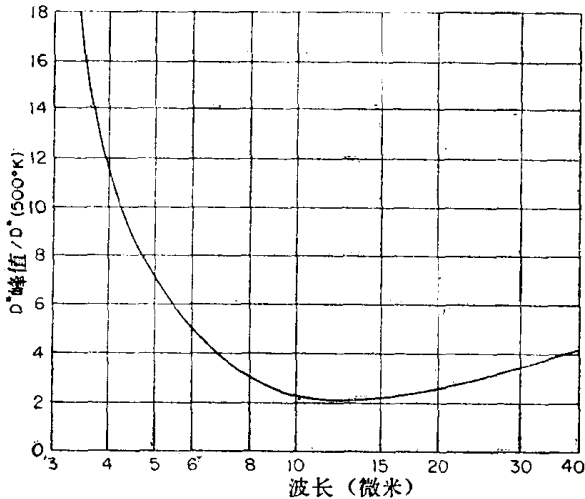


图 1 光谱峰值探测度与 500°K 黑体探测度比值和探测器长波限的关系。此曲线假定是理想光子探测器的曲线,其对等能量的响应随波长线性上升,然后突然下降到零

为了说明探测器的一些特殊情况，应当研究探测器工作时的机理。

红外探测器是赫什尔 (Herschel) 在1800年用涂黑的温度计发现红外线后出现的。以后的一百年中，所有红外探测器和温度计一样，都是热型的，入射到吸收层的辐射使该层变热。这就转而使与吸收器相接触的热敏材料变热。然后，就可通过热敏材料特性的变化测得入射辐射功率。有许多种热探测器得到了发展，而且大量的热探测器可作为商品出售。如果有可能制造出吸收与波长无关的材料，那么，这些器件对整个电磁波谱区内相等的入射功率应有均匀的响应。实际上，均匀的“黑色”是不存在的，因此，热探测器的光谱响应通常是随波长变化的。因为这些探测器常常作为其他光谱响应变化更快的探测器的标准，特别是作为宽的光谱范围内的标准，所以校准时要十分小心。由于它们的响应随波长而缓慢地变化，故当入射功率已知时，测量黑体探测度就无需精确地说明黑体温度。响应时间是由元件变热或冷却的速度决定的，它的大小、比热和与环境绝热程度决定了响应时间。这些因素也影响到最小可测功率，这时，响应更快的器件通常有较低的探测度。

应用于制作热探测器的物理现象有热电的发生（热电偶和热堆），金属和半导体的电阻温度变化（金属和热敏电阻测辐射热计），热电效应以及气体压力随温度的变化（红外线指示器）。虽然起初多数热探测器是在环境温度下工作，但电性能在液氮温度附近变化更快，同时热容量更低的各种半导体的发展，导致了冷却的热探测器的出现，其中多数是测辐射热计型的。在环境温度下工作的普通热探测器，其 D^* 值（如果适用的话）为 $10^8 \sim 10^9$ 厘米赫^{1/2}瓦⁻¹，时间常数在毫秒范围内。在液氮温度下使用的半导体测辐射热计，探测度要大几个数量级，而时间常数在微秒范围。

光子探测器与热探测器相反，其入射光子和电子的能态起作

用。在多数的普通探测器中，这种作用会释放载流子增加电子，或者是获得光电动势。十九世纪末，在硒中第一次观察到光电导，但是一直到四十年代以前，红外光子探测器的制造并未得到很快的发展。这些器件与热探测器相反，有一个明确的截止光谱，它决定于在某一种材料中释放载流子所需的能量。如果量子效率恒定，而不象热探测器那样在入射能量恒定时与波长无关，那么，在光子流恒定的情况下，理想光谱响应的形状在波长限以前是与波长无关的。当然，能量不变时，在波长限之前，理想光谱响应随波长线性地上升。但实际的探测器并没有这种理想的响应曲线。光谱峰值通常出现在波长限附近，而不是在波长限上。在光谱峰值以后，响应可能不是突然下降，而且可能不随波长线性地上升。因此，图 1 表示的关系只能看成是一条指导原则。

光子探测器不象热探测器那样，主要由几何学的考虑来决定响应时间，其响应时间取决于自由载流子的寿命——这是材料的一个特性。由于复合机理不尽相同，上升和衰减特性是比较复杂的，需要仔细地分析。光子探测器的发展重点是使响应波长更长，响应时间更短。同时，要大力提高探测度，以达到理论极限。最初的光子探测器是用蒸发或化学淀积的薄膜制成的，采用通过试验来克服误差的敏化技术。可惜的是，许多这种探测器已经制造了有二十多年了，但是造成这些工艺的成功或失败的物理过程还未得到很好地了解。第一个薄膜式红外探测器是 Tl_2S_3 ，其响应波长到 1.2 微米。今天它已很少应用。以后很快采用了响应到 3 微米的 PbS 、6 微米的 $PbTe$ 和约 7 微米的 $PbSe$ 。

半导体工艺，特别是 Ge 和 Si 所使用的提纯和晶体生长技术的发展，导致了一组全新的红外光子探测器的出现。现在不仅能生产近红外 Ge 和 Si 探测器，而且有选择地掺入具有各种激活能的杂质，还可以生产响应超过 100 微米的锗探测器。这些非本征探测器有两条互相重叠的光谱曲线，一条是基质晶体的曲线，一条是掺入锗内的某种杂质的曲线。用半导体工艺来合成新的化