

红外技术系列教材 II

普通高等教育
兵工类规划教材

红外探测器

王义玉 编



兵器工业出版社

红 外 探 测 器

王义玉 编

兵器工业出版社

(京)新登字049号

内 容 简 介

本书主要介绍各类红外探测器的物理原理、工作性能及噪声。全书共分五章，第一章红外探测器概述，介绍红外探测器的分类、主要性能参数及测量方法；第二章半导体物理基础，介绍能带、缺陷、载流子浓度、复合和寿命、P-N结等；第三章噪声源，介绍探测器中的噪声、背景辐射的光子噪声和放大器中的噪声；第四章光子探测器，介绍光电导探测器、光磁电探测器、光伏探测器、肖特基势垒探测器及CCD等；第五章热探测器，介绍测辐射热敏电阻、测辐射热电偶和热电堆、热释电探测器等。

本书可供高等院校红外技术专业本科生使用，也可供从事红外技术、光电技术工作的科技人员参考。

红 外 探 测 器

王义玉 编

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

顺义县后沙峪印刷厂印装

开本：787×1092 1/16 印张：11.25 字数：274.56千字

1993年8月第1版 1993年8月第1次印刷

印数：1—2000 定价：2.95元

ISBN 7-80038-577-9/TN·28(课)

出版说明

遵照国务院国发〔1978〕23号文件精神，兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵工教材编审室成立以来，在广大教师的积极支持和努力下，在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下，已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要，特别是国防现代化培养人才的需要，反映国防科技的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，我们以提高教材质量为主线，完善编审制度、建立质量标准、明确岗位责任，建立了由主审审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点，成立了九个专业教学指导委员会和两个教材编审小组。以加强对兵工类专业教材建设的规划、评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材，全面提高质量，适当发展品种，力争系统配套，完善管理制度，加强组织领导”的“八五”教材建设方针。兵工教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的。专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查，认为符合兵工专业培养人才要求，符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套，为教学质量的提高、培养国防现代化人才，为促进兵工类专业科学技术的发展，都将起到积极的作用。

本教材由贾欣志主审，经兵器工业总公司光电技术专业教学指导委员会复查，兵工教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1992年8月

前 言

红外探测在现代科学技术中起着重要作用,各种红外探测器广泛应用于成像、跟踪、制导、侦察、预警、遥感、弱信号探测、辐射测量、自动控制和激光探测等许多方面。

为了适应红外科学的迅速发展和培养有关专业人才,并结合突出兵工特色,为此编写了《红外探测器》一书,作为高等院校红外技术专业本科生教材。

本教材系由高等工科院校光电技术专业教学指导委员会1988年会议审定,并推荐出版。编者是根据光电技术专业教材编审组审定的编写大纲进行编写的。

红外探测器的类型很多,此书仅讨论几种理论上较典型、成熟、目前使用较广泛的探测器。全书共分五章,教学参考时数为68学时。第一章介绍红外探测器分类和性能参数以便把以后各章的内容连成一个整体;第二章介绍有关半导体物理基础,为专业内容阅读提供必要的基础知识;第三章主要介绍探测器中的起伏现象;第四、五章介绍各类光子探测器和热探测器的探测机理,推导出响应度和探测率的表达式。

本教材中的物理量和单位采用法定计量单位,必要时保留了习惯使用单位。

本书经长春光学精密机械研究所贾欣志研究员、西安电子科技大学张显炽教授、吉林工业大学钟江帆副教授、北京理工大学蓝天讲师审阅,并提出了许多宝贵意见。

在编写过程中得到了兵器工业总公司兵工教材编审室前主任杨实诚高级工程师、长春光学精密机械学院陈玻若副教授的大力支持和帮助,杨万达同志绘制了全书的图稿。

编者对上述各位同志表示真挚的谢意!

由于水平所限,又缺乏一定的教学和实践经验,书中一定会存在不少错误和不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

·编者

1992.8

目 录

第一章 红外探测器概述	(1)
§ 1.1 红外探测器的分类	(1)
§ 1.2 红外探测器的性能参数	(4)
§ 1.3 红外探测器性能参数的测量	(8)
思考题和习题.....	(14)
第二章 半导体物理基础	(15)
§ 2.1 理想晶体的能带	(15)
§ 2.2 晶格中的缺陷	(17)
§ 2.3 本征半导体的载流子浓度	(20)
§ 2.4 杂质半导体的载流子浓度	(24)
§ 2.5 电导率和霍尔效应	(29)
§ 2.6 复合和寿命	(33)
§ 2.7 非平衡载流子的扩散、漂移和连续性方程	(38)
§ 2.8 P-N结	(41)
思考题和习题.....	(45)
第三章 噪声源	(46)
§ 3.1 探测器中的噪声	(46)
§ 3.2 背景辐射的光子噪声	(58)
§ 3.3 放大器的噪声	(59)
思考题和习题.....	(61)
第四章 光子探测器	(63)
§ 4.1 光子效应的定性描述	(63)
§ 4.2 本征光电导	(65)
§ 4.3 定态光电导	(67)
§ 4.4 光谱响应曲线	(71)
§ 4.5 弛豫时间和调制信号	(72)
§ 4.6 杂质光电导	(75)
§ 4.7 杂质光电导的光谱分布	(78)
§ 4.8 薄膜光电导	(81)
§ 4.9 常用光电导探测器	(86)
§ 4.10 光磁电探测器	(89)
§ 4.11 光伏探测器	(94)
§ 4.12 肖特基势垒探测器	(103)
§ 4.13 常用光伏探测器	(111)

§ 4.14 受光子噪声限制的光子探测器的工作性能	(114)
§ 4.15 信号起伏的限制	(121)
§ 4.16 获得受光子噪声限制的工作性能的方法	(122)
§ 4.17 多元列阵探测器和CCD简介	(124)
§ 4.18 应用电路举例	(135)
思考题和习题	(138)
第五章 热探测器	(139)
§ 5.1 测辐射热敏电阻	(139)
§ 5.2 测辐射热敏电阻的理论分析	(142)
§ 5.3 温差电效应和测辐射热电偶	(147)
§ 5.4 测辐射热电偶和热电堆的响应特性	(151)
§ 5.5 热释电效应和热释电探测器	(154)
§ 5.6 热释电探测器的电压响应度	(158)
§ 5.7 热释电探测器的噪声源和噪声频谱	(162)
§ 5.8 噪声等效功率和探测率	(164)
§ 5.9 一维和三维扩散模型	(166)
§ 5.10 热探测器的光子噪声限制	(170)
§ 5.11 应用电路举例	(171)
思考题和习题	(173)
参考文献	(174)

第一章 红外探测器概述

红外探测器是红外探测系统中的核心元件，它是把入射的红外辐射能转变成其它形式能量的红外辐射能转换器，在多数情况下是转变成电能，或是变成另一种可测量的物理量，如电压、电流或探测材料其它物理性质的变化。随着半导体材料、工艺技术和器件的发展，根据红外辐射与物质相互作用时产生的各种次级效应，到目前已研制出结构新颖、灵敏度高、响应快、品种繁多的红外探测器。本章首先介绍各种红外探测器的基本原理和分类，其次，介绍探测器的性能参数和测量方法。最后，将给出常用的几种红外探测器的性能指标数据的一些图表。

§ 1.1 红外探测器的分类

对于品种繁多的红外探测器，可有不同的分类方法，如根据工作温度，可以分为低温（需要用液态He、Ne、N致冷）探测器、中温（工作温度在195~200K的热电致冷）探测器和室温探测器；根据响应波长范围，可分为近红外、中红外和远红外探测器；根据结构和用途，可分为单元（单元）探测器、多元阵列（镶嵌）探测器和成像探测器。而本书，则根据探测机构的不同，将它们分为热探测器和光子探测器两大类，并仅举一些常见的器件为例，其中，有些是性能优良的、有些是新型的和正在迅速发展中的探测器。

我们知道物体之间的热交换有三种形式，热传导、热对流和热辐射。红外探测器所涉及的是热辐射。假设一块半导体材料同外界隔离，以使热传导或热对流所引起的能量损失非常少或者不损失，这是可以做到的，只要把样品支承在一个不良热传导的物体上(比如塑料)，并且密封在真空容器中，这样，热交换的主要形式就全靠热辐射了，并假设这种辐射透过容器时不衰减。

辐射和半导体的相互作用也有三种基本形式，首先，假如入射光子的能量足够大，半导体材料吸收了能量就足以使一个电子完全脱离这个材料，即从半导体表面逸出，这称为光电子发射效应（或叫外光电效应）。其次，假如光子的能量没有那么大，但大于材料所需要的某一个定值时，这个能量的吸收，就会在半导体中产生一个自由电子或一个自由空穴，或者二者同时产生，这称为内光电效应。有三种内光电效应是重要的，一是如果信号的探测机理是基于附加载流子所引起的电导率变化的测量，则这种效应称为光电导效应；二是如果产生载流子的地方有势垒存在，趋向于把不同电荷分开而形成电势差，这种效应称为光生伏特效应；三是如果电荷的扩散受磁场的作用而向相反方向分离形成电势差，这种效应称为光磁电效应。基于内光电或外光电效应制成的探测器均称为光子探测器。第三种形式是辐射引起材料的升温，因为电导率依赖于温度，测量电导率的变化就等于测量所吸收的能量。根据这样原理制成的探测器称为测辐射热器。另一种根据辐射引起的升温原理制成的探测器为辐射温差电偶，它是由两种不同温差电动势率的金属或半导体连接而成的。还有一种就是辐射引起的升温使得某些晶体的表面电荷发生变化，从而可以探测辐射能量，这种探测器称为热

释电探测器。上述几种探测器统称为热探测器。

一 热探测器

热探测器吸收红外辐射后，温度升高，可以使探测材料产生温差电动势、电阻率变化、自发极化强度变化、或者气体体积与压强变化等，测量这些物理性能的变化就可以测定被吸收的红外辐射能量或功率。利用其中的任一性能，就可以制成一种热探测器，下面分述如下。

1 测辐射热电偶和热电堆

测辐射热电偶是利用温差电效应制成的红外探测器。把两种不同的金属或半导体细丝连接成一个封闭环路，当一个接头吸收红外辐射，因而它的温度高于另一个接头时，环内就产生电动势，从电动势的大小可以测定接头处所吸收的红外辐射功率。

若干个热电偶串接在一起成为热电堆。

2 金属或半导体热敏电阻测辐射热器

当吸收红外辐射温度升高时，金属的电阻率增加，而半导体的电阻率却减小，从它们电阻率的变化可以测定被吸收的红外辐射的功率。另外，某些金属和化合物具有超导的特性，利用这些材料在转变温度（其电阻突然变为零的临界温度）邻近时电阻率随温度变化非常陡峭的特性，可以制成超导测辐射热器。目前，在高临界温度氧化物超导材料的制备方面，以复旦大学经验为例，以1:2:3的高纯氧化钇、碳酸钡和氧化铜经研磨、压制和煅烧后可得到零电阻温度在85~91K的黑色超导材料。

3 气动探测器

当吸收红外辐射温度升高时，在体积一定的条件下，气体压强增加。从压强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动探测器，常见的一种为高莱管。

4 热释电探测器

有些晶体，如硫酸三甘酞(TGS)、铌酸锆钽(SBN)等，当受到红外辐射照射温度升高时，引起自发极化强度变化，结果在垂直于自发极化方向的晶体两个外表面之间产生微小电压，由此能测量红外辐射的功率。

综上所述，热探测器是依据辐射产生的热效应，所以热探测器的响应只依赖于吸收的辐射功率，与辐射的光谱分布无关。理论上，热探测器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光响应往往是不同的，这是因为热探测器敏感面的吸收率可能在某一光谱区间要比较低的缘故。此外，热探测器响应速度的快慢决定于探测器热容量的大小和热迁移的快慢，减小热容量，增加热迁移，可以加快器件的响应速度。

二 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，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。依据所产生的不同电学现象，制成下列各种光子探测器。

1 光电子发射探测器

当光照射在某些金属、金属氧化物或半导体材料表面时，如果光子的能量 $h\nu$ 足够大，就能使其表面发射电子，这种现象叫作光电子发射。利用这种效应制成的可见光探测器和红外光探测器，统称为光电子发射器件。其中有真空光电二极管和光电倍增管，这类探测器有响应快的优点（仅几个毫秒），但大部分的光电子发射器件只对可见光起作用，用于红外区

的光电阴极有S-1 (Ag-O-Cs阴极) 和S-20 (Na-K-Cs-Sb阴极) 及Ⅲ-V族负电子亲和势光电阴极。S-1峰值在 $0.84\mu\text{m}$ 处, 峰值处的量子效率为 3×10^{-3} , 长波限在 $1.2\mu\text{m}$ 处, 基本上是近红外光电阴极。S-20峰值在蓝绿色处, 峰值处的量子效率为0.4, 长波限在 $0.87\mu\text{m}$ 处, 所以它基本上还是可见光的光电阴极。

2 光电导探测器

半导体吸收能量足够大的光子后, 半导体内一些载流子, 从束缚状态转变到自由状态, 从而使半导体电导率增大, 这种现象叫做光电导效应。利用半导体光电导效应制成的红外探测器称为光电导探测器。目前, 这种器件的品种最多、应用最广。其中, 可分为多晶薄膜型和单晶型两种。薄膜型的光电导器件较少, 常见的有PbS和PbSe, PbS适用于 $1 \sim 3\mu\text{m}$ 的近红外波段, PbSe适用于 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 的中红外波段。单晶型的光电导器件可再分为本征型和掺杂型两类, 本征型有 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 区间的InSb和 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 区间的HgCdTe(77K)和PbSnTe(77K)。掺杂型主要有适用于 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 区间的Ge:Hg(38K)及长波限分别在 $30\mu\text{m}$ 处的Ge:Cu(4K)、 $21\mu\text{m}$ 处的Ge:Cd(4K)、 $7\mu\text{m}$ 处的Ge:Au(60K)。

3 光伏探测器

半导体的P-N结及其附近, 在吸收了能量足够大的光子后, 在结处或结的附近就会产生电子-空穴对, 它们在结区外靠扩散进入结区, 在结区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。于是, 当N区和P区开路状态时, 两端会产生电压, 这种现象叫做光生伏特效应, 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。常用的有室温InSb, $1 \sim 3.8\mu\text{m}$ 有响应、InSb(77K), $3 \sim 5\mu\text{m}$ 有响应、HgCdTe(77K)和PbSnTe(77K), $8 \sim 14\mu\text{m}$ 有响应。

如果在P-N结或P-I-N结上加一个反向偏压, 当结区吸收了能量足够大的光子后, 反向电流就会增加, 这类红外探测器叫半导体光电二极管, 常见的有硅光电二极管。

4 光磁电探测器

如图1-1所示, 半导体的表面吸收光子后, 产生的电子-空穴对要向体内扩散, 在扩散过程中, 因受到横向磁场的作用, 电子、空穴各偏向一侧, 因而产生电位差, 这种现象叫做光磁电效应, 利用这个效应制成的红外探测器叫光磁电探测器, 常用的有InSb探测器。

上面所述的是各种光子探测器, 而要在某种光子探测器中发生某种具体的光子效应, 光子的能量必须要超过某一个确定的值 E , 即吸收光子的能量 $h\nu = hc/\lambda > E$, 也就是辐射波长必须要小于某一个极限波长 λ_c , 这个极限值叫做该光子探测器的长波限。波长大于长波限的红外光, 不能产生所需要的光子效应, 因此也不能被探测器探测出来。另一方面波长短于 λ_c 的红外光, 当各波段的功率一定时, 长波段包含的光子数要多, 所以, 理论上光子探测器的响应应该与波长 λ 成正比, 直到 λ_c 为止, 此时响应陡落为零。但实际上常常还有与此不同的情况, 这是因为在器件内部还存在着与光子效应相制约的过程, 例如, 载流子的复合和俘获, 另外, 这些制

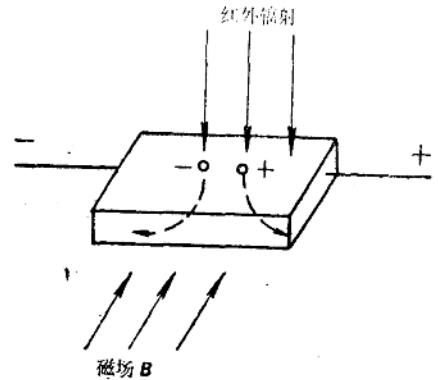


图1-1 光磁电效应

约过程在不同器件中彼此是不同的，因而产生不同的光谱响应。至于光子探测器的响应时间通常决定于载流子产生和复合过程的快慢。

§ 1.2 红外探测器的性能参数

红外探测器工作性能的好坏可用一些参数来描述，这些参数称为红外探测器的性能参数。根据探测器的性能参数再加上整个红外系统其它组成部分的参数，就可以确定整个红外系统的性能指标。下面分二个方面来讨论红外探测器的性能参数。

一 探测器的主要工作条件

探测器的性能参数与其工作条件有密切关系，所以，在给出性能参数时，必须要注明有关的工作条件，而主要的工作条件有下面几个方面：

1 入射辐射的光谱分布

许多红外探测器对不同波长的红外光响应是不一样的，所以在给出探测器的性能参数时一般需要给出入射辐射的光谱分布，如果入射辐射是黑体辐射，则要给出黑体的温度。如果是单色光，则要给出波长。入射辐射经过了相当距离的大气层和光学系统，则要考虑大气和光学系统的吸收。如果入射辐射经过调制，一般要给出调制的频率分布，但当放大器的测量带宽较窄时，只须给出调制的基频与幅值。

2 电路的频率范围

因为器件的噪声电压与电路的通频带宽度 Δf 的平方根成正比，有些噪声还与频率 f 有关，所以在描述器件的性能时要给出电路的通频带。

3 工作温度

有许多红外探测器，特别是半导体器件，无论其输出信号、噪声，还是器件电阻都与工作温度有很大关系，所以必须说明其工作温度，室温取293K、干冰温度（CO₂升华温度）194.6K、液氮沸点77.3K、液氦沸点4.2K、液氮沸点27.2K、液氢沸点20.4K、液氧沸点90K。

4 光敏面的形状和尺寸

器件的信号和噪声都与光敏面的形状和大小有关，所以必须注明光敏面的形状和尺寸。

对光电导器件光敏面一般为方形从 $0.1 \times 0.1 \text{mm}^2 \sim 1 \times 1 \text{cm}^2$ ，再大封装有困难。

对光伏器件分生长结和扩散结两种，生长结光伏器件，辐照是平行于结平面的，光敏面细而长，宽为少数载流子扩散长度之和，长可以任意取，一般较宽大许多倍。扩散结光伏器件，辐照是垂直于结平面的，所以光敏面可取任意形状和大小，但要与光学系统匹配。

对光磁电器件，光敏面小的常为正方形，可从很小到 $2 \times 2 \text{mm}^2$ ，大的常为长方形，为了在磁极间获得较强磁场，沿磁场方向长度不超过2mm，两个电极之间的间隔可达2cm。

5 偏置情况

例如光电导探测器、热敏电阻探测器的直流偏置和光磁电探测器的磁场强度，均必须注明，因为器件的某些性质与偏置大小有关。

6 特殊工作条件

例如薄膜探测器非密封工作时注明湿度，以光子噪声为主要噪声的探测器要给出视场立体角和背景温度（通常300K），对非线性响应的探测器要注明入射辐射功率。

在说明了上述各种工作条件后，我们就可以来讨论探测器的性能参数

二 红外探测器的性能参数

1 响应度（响应率）

探测器的输出信号 S 与入射到探测器的辐射功率 P 之比，称作为探测器的响应度 \mathcal{R} 。

$$\mathcal{R} = \frac{S}{P} \quad (1-1)$$

\mathcal{R} 的单位为V/W。它表示了探测器把红外辐射转换成信号电压的能力。

如果入射的辐射是恒定的，则器件的输出也是恒定的，这时的响应度叫直流响应度，用 \mathcal{R}_0 表示，但实用上为了避免直流在放大方面的困难，常常把辐射调制成交变辐射，那么，探测器的输出信号也相应的成为交变信号，这时的响应度为交流响应度用 \mathcal{R}_a 表示。

由于探测器的响应速度是有限的、对辐射的响应就不能是瞬时的，在较高的调制频率下 $\mathcal{R}_a < \mathcal{R}_0$ ，且 \mathcal{R}_a 是调制频率的函数；在低频下 \mathcal{R}_a 值与调制频率无关，所以在讨论交流响应度时，为了明确起见，应说明所用的调制频率，响应度随调制频率的变化叫做探测器的频率响应。

在给出响应度时，不须说明放大器的测量带宽 Δf ，但与器件的工作温度和光敏面面积有关，因此在给出响应度时要说明工作温度和光敏面面积。此外，当入射辐射的功率比较高时，有的器件表现出响应是非线性的，此时要说明入射的辐射功率。

在测量响应度时，常用的辐射源为500K黑体，测得的响应度用 \mathcal{R} 表示，如用单色光（波长为 λ ），则测得的响应度记为 \mathcal{R}_λ 。

2 探测器的响应时间（时间常数）

由于探测器的响应速度是有限的，所以，对辐射的响应就不能是瞬时的，为了说明探测器响应速度的快慢，定义一个探测器的响应时间，见图1-2(a)。可以考虑在某一时刻($t=0$)突然以一恒定辐射去照射探测器，以此来观察探测器的输出如何在一段时间内逐渐上升到稳定值的。这一上升过程反应了探测器内部效应的物理过程，事实上输出信号的上升过程是遵从指数上升规律，见图1-2(b)。所以，在某一时刻($t=0$)以恒定辐射去照射探测器，其输出信号 U_t 按指数规律上升到一个稳定值 U_0 。

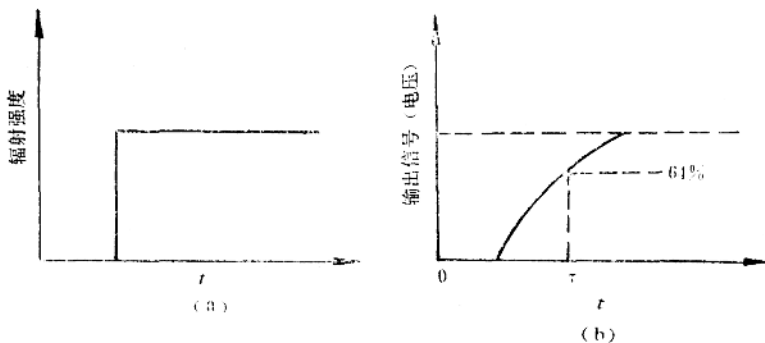


图1-2 探测器的响应时间

$$U_t = U_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-2)$$

式中 τ 为探测器的一特征常数,称作响应时间(时间常数)。式中如取 $t=\tau$ 则

$$U_t = U_0 \left(1 - \frac{1}{e}\right) = 63\% U_0 \quad (1-3)$$

由此可以看出响应时间 τ 的物理意义:当探测器受辐射照射时,输出信号上升到稳定值的63%时所需要的时间。它表征着探测器对辐射响应的快慢,这个参数越小越好。

对于调制频率为 f 的正弦辐射,交流响应度 \mathcal{R}_a 与直流响应度 \mathcal{R}_0 之间有如下关系

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

知道 τ 即可画出探测器的频率响应曲线,反之,由频率响应曲线也可以确定 τ 的值,图1-3表示了上式的曲线。在低频 $f \ll 1/2\pi\tau$ 时,交流响应度不依赖于频率 $\mathcal{R}_a = \mathcal{R}_0$;在较高频率时就开始下降,当 $f = 1/2\pi\tau$ 时, $\mathcal{R}_a = 0.71\mathcal{R}_0$;在更高频率 $f \gg 1/2\pi\tau$ 时,交流响应度 $\mathcal{R}_a \propto 1/f$ 。

有些探测器具有两个时间常数,其中一个比另一个大得多,这时候的频率响应有如图1-4所示,在其不同的光谱响应区间出现不同的时间常数,在大多数的实际应用中,不希望有两个时间常数。

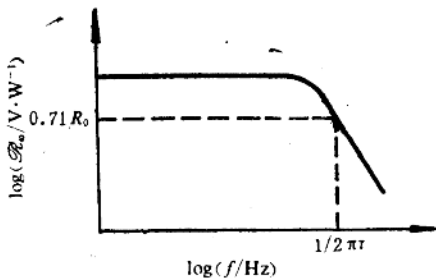


图1-3 探测器的频率响应曲线

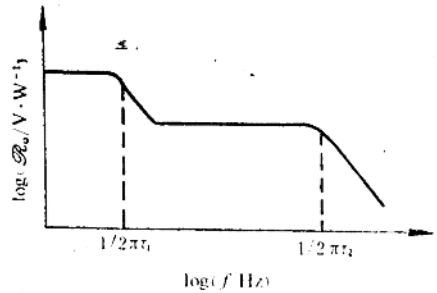


图1-4 具有两个时间常数的频率响应

3 噪声等效功率

由于探测器存在噪声,所以不能无限地测量小的辐射信号,当辐射小到它在探测器上产生的信号完全被探测器的噪声所淹没时,这时探测器就无法肯定是否有辐射信号投射在探测器上,探测器探测辐射的能力有了一个限度,通常我们用噪声等效功率NEP(P_N)来表征探测器的这个特征。

当辐射在探测器上产生的信号电压正好等于探测器本身的噪声电压值(即信号噪声比为1)时,所需投射到探测器上的辐射功率称作为探测器的噪声等效功率,即

$$NEP = \frac{HA}{S/N} \quad (1-5)$$

式中 H 是投射到探测器面积 A 上的辐照度, S/N 是在该照度下探测器的输出信号电压与探测器噪声电压之比,NEP的量纲为 W ,它标志探测器所能探测的最小功率。

另外,由响应度的定义,又可将噪声等效功率的表达式写为

$$NEP = \frac{N}{\mathcal{R}} \quad (1-6)$$

由式(1-6)知,NEP值与探测器的噪声值成正比,与探测器的响应度成反比。

在测量NEP时,为明确起见,将NEP写成 $NEP(\lambda, f, \Delta f)$ 。若用500K黑体,则所得结

果为NEP(500K, $f, \Delta f$)。通常调制频率 f 取为90, 400, 800和900Hz, 带宽 Δf 为1、4或5Hz。探测器面积通常折合到1cm²。

4 探测率

用噪声等效功率基本上能够描述探测器的探测极限, NEP值越小, 表明探测器的探测能力越强。但人们总是认为, 探测器越好, 性能指标应该越大。为了适应这种心理上的习惯制定了另一个性能参数探测率, 取为NEP的倒数, 以 D 表示。

$$D = \frac{1}{\text{NEP}} \quad (1-7)$$

单位为W⁻¹, 它表示每瓦的辐射功率所能获得的信号噪声电压比, 因为许多红外探测器的信号电压并不与辐射功率成线性关系, 从测得的辐射功率, 譬如, 由1μW外推到1W时应有的信号噪声电压比, 实际上是不现实的, 只是探测率越大, 表明探测器的探测能力越强, 因此, 用探测率比用噪声等效功率更适合些。

大部分探测器的噪声等效功率与探测器的面积 A 的平方根带宽 Δf 的平方根成正比, 因此, 仅用噪声等效功率的数值很难来比较两个不同来源的探测器的优劣, 为了避免这一缺点, 再定义一个性能参数, 即用面积和带宽的平方根去除NEP能到一个与面积、带宽无关的数值, 这个数值的倒数称为星探测率或叫做归一化探测率, 记为 D^* , 因此

$$\begin{aligned} D^* &= \frac{(A \cdot \Delta f)^{1/2}}{\text{NEP}} = D(A \cdot \Delta f)^{1/2} \\ &= \frac{S/N}{P} (A \cdot \Delta f)^{1/2} = \frac{\mathcal{R}}{N} (A \cdot \Delta f)^{1/2} \end{aligned} \quad (1-8)$$

从 D^* 的表达式可以看到, D^* 实质上是当探测器的敏感元具有单位面积, 放大器的测量带宽为1Hz时, 单位辐射功率所能获得的信号噪声电压比。

D^* 的单位为cm·Hz^{1/2}/W。所以, 现在一般使用探测率这个术语时, 已不是指 D , 而是指 D^* 了。

按照上述方式所制定的探测率, 原则上与探测器的敏感元面积、放大器的测量带宽无关, 它的数值越大就表明探测器的性能越好, 这样噪声等效功率的缺点就纠正过来了, 但在它的量纲中却出现了功率的倒数, 在实际应用中遇到的是功率, 而不是它的倒数, 因此, 在实用中噪声等效功率仍是一个有用的性能参数, 并没有废弃掉, 可以这样说: 在探测器的制造和评定探测器的性能时 D^* 更为有用, 在实际应用中NEP更为有用。

D^* 的测量数值用类似NEP的方式标出, 例如 $D^*(500\text{K}, 900, 1)$, 参考带宽总是1Hz。

5 探测器的光谱响应

响应度随入射辐射波长的变化, 称为探测器的光谱响应。

探测器的光谱响应如图1-5所示, 从图中可以看到光子探测器对辐射的波长有选择性, 存在着长波限 λ_c 。

$$\lambda_c = \frac{hc}{E} = \frac{1.24}{E} \quad (\mu\text{m}) \quad (1-9)$$

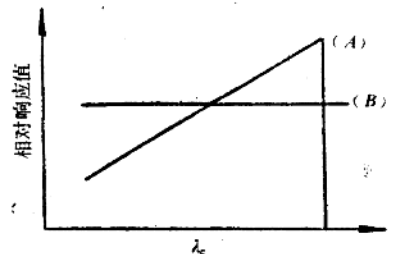


图1-5 探测器的光谱响应

对波长大于 λ_c 的辐射, 光子探测器不再有响应, 事实上存在着量子效率的问题, 在长波

限内，响应的下降要比直线慢些，因为波长较短的辐射的量子效率要高些。另外，在 λ_c 处也不像图中那样突然下降为零，而是在 $1\mu\text{m}$ 更大的间隔内逐渐下降的，所以，为了确定长波限，往往把它定义在响应值下降到最大值的50%处所对应的波长。

对于热探测器的光谱响应，从图中可以看出对辐射波长是无选择性的，但事实上也不完全是这样，而随着波长向远红外延伸时，也有所下降，但不像光子探测器存在长波限，通常可认为热探测器是无选择性的。

以上描述了红外探测器的几个主要性能参数，除此以外，在探测器的使用时要注意以下几点：

- (1) 探测器内阻的问题，因为在与放大器连用时，要考虑到阻抗匹配。
- (2) 探测器的接收面积，因为在与光学系统匹配时必须考虑到探测器接收面积的大小，一般应使探测器接收面积与光学系统成像大小相同。
- (3) 探测器的响应度与辐射强度之间是否是线性关系。
- (4) 探测器接收面上响应度是否均匀。

§ 1.3 红外探测器性能参数的测量

一 探测率的测量方法

探测率 D^* 的测量方法随探测器类型不同而有差异，但公共装置的方框图如图1-6所示。

前置放大器的噪声必须比器件的噪声要低，所用黑体辐射源的温度，在测量对 $3\mu\text{m}$ 以上的波长有显著响应的器件时常为500K，照射到器件上的辐射照度约为 $10^{-6}\text{W}/\text{cm}^2$ 。调制频率视器件的响应速度而定，从响应速度慢的热探测器的10Hz一直到响应速度快的光子探测器的1000Hz或更高，频率适宜时，探测率最高。调制盘可采用等间距狭缝，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。

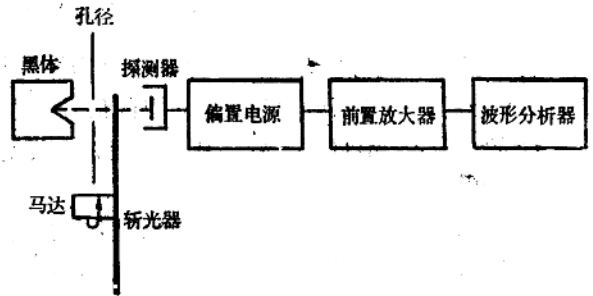


图1-6 测量探测率 D^* 的实验装置图

连接探测器的测量电路和偏置电源，随探测器类型的不同而不同，大致情况分述如下

1 光电导探测器

测量电路如图1-7所示，负载电阻 R_L 通常与器件电阻 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电压值，在较低的偏置电压下，信号与噪声都比较低，此时器件的性能常常受放大器噪声的限制，提高偏置电压后信噪比通常就维持恒定，直到偏置电压过高信噪比开始下降。

图1-8所示为致冷到77K PbSe探测器的信号电压、噪声电压、信噪比与偏流的关系曲线，从图中可以看到，低偏流时，信号电压随偏流直线上升，噪声没有信号增加得快，偏流增大时噪声比信号增加得快，在信噪比与偏流关系曲线上最大值范围比较宽，在这范围内信噪比维持恒定。

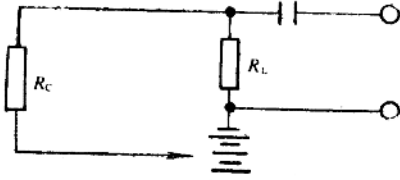


图1-7 光电导探测器的测量电路

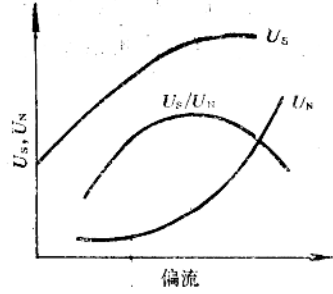


图1-8 致冷到77K PbSe最佳偏流的确定

2 光伏探测器

光伏器件不需要偏置电源，光伏器件如一个开路电压发生器，通过耦合电容可接到高输入阻抗的前置放大器输入端，这种状态常限于面积为 10^{-3}cm^2 以下的器件，其短路电流小于 $1\mu\text{A}$ 。由于器件阻抗比较小，也可用变压器与放大器耦合，使器件阻抗与放大器阻抗能够匹配，如图1-9所示。

有些光伏探测器，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时高得多，因而也就不需要变压器。

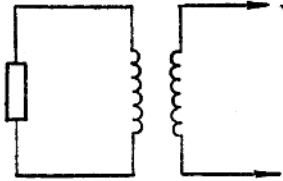


图1-9 光伏探测器的测量电路

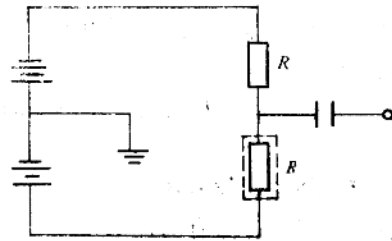


图1-10 热敏电阻测量电路

3 热敏电阻

热敏电阻依阻值随温度的变化而工作的，工作温度常取在其电阻温度系数较大的温度区间内。为了抵消温度涨落引起的电阻变化，应用中常把两个热敏电阻连接成桥式电路，如图1-10所示，被测热敏电阻其底板温度高低的影响被第二个热敏电阻所补偿，电桥是平衡的。起补偿作用的那个热敏电阻是屏蔽的，不受入射辐射的照射，当然，如果热敏电阻底板的温度能够严格控制的话，也可不用桥式电路。热敏电阻的偏置电压必须要严格控制，否则超过某一个临界值，热敏电阻会被烧坏。

4 热电偶

过去常用电流计来测量热电偶对恒定辐射的直流响应，由于直流放大方面的困难，所以现在多采用调制辐射，由于热电偶的电阻低，一般须用变压器与放大器耦合。

二 光谱响应的测量方法

测量红外探测器相对光谱响应的实验装置方框图如图1-11所示。

热电偶对一切波长的响应几乎是相等的，所以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固定值，这就表示不同波长的红外光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光依次照射到探测器上，并记

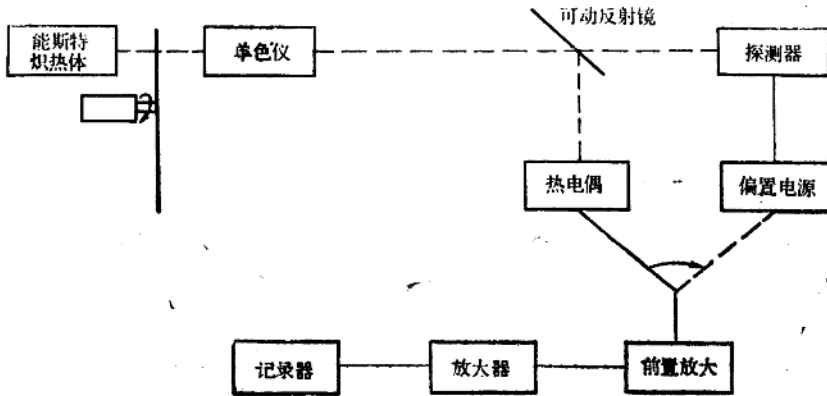


图1-11 测量相对光谱响应的实验装置框图

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辐射的响应度的相对变化，这就是我们所要求的相对光谱响应。实践中为方便，常常对同一缝宽，先测出热电偶对标准光源不同波长辐射的响应，然后，以此组读数去除探测器在相应波长上的读数来获得相对响应。

测量时，对光子探测器，调制频率不妨取几十赫，尽管这时的探测率比较低，但对测光谱响应仍是可以的。

对于绝对光谱响应，只要有一个测定的 $D^*(T, f, \Delta f)$ 值，就可以确定绝对光谱响应。

三 响应时间的测量方法

测量响应时间的方法有两种

1 矩形辐射脉冲法

红外探测器的时间常数约在 $50\text{ms} \sim 10^{-2}\mu\text{s}$ 之间时，都可用矩形辐射脉冲法进行测量，获得矩形辐射脉冲的方法有两个，对响应较慢的探测器，可用半圆型调制盘，脉冲上升时间比探测器响应时间短，对响应较快的探测器（时间常数 $< 10\mu\text{s}$ ）常用旋转反射镜（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规律，如图1-12所示。

2 频率响应法

这种方法一般适用于测量大于 $10\mu\text{s}$ 的时间常数，其测量装置与测量探测率的实验装置相同，但须用一个变速马达来改变调制频率，并用真空管伏特表来测量输出电压，结果得到信号随频率的变化曲线，这就是探测器的频率响应。如图1-13所示，在横坐标上取二个适当的频率 f_1 、 f_2 ，并从曲线的纵坐标上得出对应的信号值 S_1 、 S_2 ，则器件的响应时间由下式算出

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{S_1^2 - S_2^2}{f_2^2 S_2^2 - f_1^2 S_1^2} \right)^{1/2} \quad (1-10)$$

S_1 、 S_2 必须在相差 10% 以上，否则误差较大。