

FEIZHILENG
HONGWAI TANCE
CAILIAO JISHU

非制冷红外探测 材料技术

普朝光 黄晖 张玉龙 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

非制冷红外探测材料技术

主 编 普朝光
副 主 编 黄 晖 张玉龙 杨 漾 耿卫东
编写人员 尹 瑞 吕 励 王喜梅 李 萍

国防工业出版社

内 容 简 介

本书较为详细地介绍了非制冷热释电陶瓷材料(钛酸铅、锆钛酸铅、钛酸钡、锆钛酸钡材料及其薄膜)、红外热释电晶体材料(铌酸锂、钽铌酸锂和硫酸三甘钛及其薄膜)、有机热释电材料(聚偏氟乙烯与钛酸铅/聚偏氟乙烯复合材料及其薄膜)、氧化钒(VO_2)非晶硅、铂/钛金属、钇钡铜氧化物及其薄膜热敏电阻型非制冷探测材料的基本特性、制造工艺与技术、性能与应用;并列举了大量实例,每一实例均按照简介、制造方法、性能与效果编写格式逐一介绍。在探测器一章中重点介绍了微测辐射热计、热释电红外探测器和其他红外探测器的结构、选材、制造工艺、性能与应用;在应用一章中重点介绍了军用红外探测器原理、类型与性能,非制冷焦平面红外探测器、非制冷单元/多元红外探测器和非制冷系列红外探测器的军事应用等。

本书可供从事红外技术研究、产品设计、制造加工、管理与销售和教学人员阅读,也可作为高等院校相关专业的教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

非制冷红外探测材料技术/普朝光编著. —北京:国防工业出版社,2011.9

ISBN 978-7-118-07532-8

I. ①非... II. ①普... III. ①红外探测器—红外光学材料 IV. ①TN21

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第115050号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 26 $\frac{1}{4}$ 字数 502千字

2011年9月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价88.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

红外技术的发展使得在黑暗中观测和监视存在热辐射物体和探测与跟踪机动目标成为轻而易举的事。然而庞大的体积和笨重的设备,使得制冷型红外探测设备在很大程度上限制了它的使用。为解决这一难题,世界各国一直致力于红外探测设备的小型化研究。经过长期的探索研究,非制冷型红外探测器孕育而生。非制冷型红外探测设备取代了笨重的制冷设备,使得探测设备结构紧凑,小巧灵便,便于安装,方便携带。其应用领域明显拓宽,深受用户欢迎。红外探测设备的核心技术是红外探测材料,材料的品质质量与制造工艺是红外技术领域的关键技术,其发展备受业内人事关注。随着高新技术在红外探测材料选材与制造中的应用,使红外技术有了长足进步,并展现出光明的发展前景。

为了普及非制冷型红外探测基本知识,宣传并推广非制冷型红外探测材料生长与器件制造技术,特别是近年来出现的新技术,根据我们长期研究的经验教训,编著了《非制冷红外探测材料技术》一书。书中较为详细地介绍了非制冷热释电陶瓷材料(钛酸铅、锆钛酸铅、钛酸钡、锆钛酸钡材料及其薄膜)、红外热释电晶体材料(铌酸锂、钽铌酸锂和硫酸三甘钛及其薄膜)、有机热释电材料(聚偏氟乙烯与钛酸铅/聚偏氟乙烯复合材料及其薄膜)、氧化钒(VO_2)非晶硅、铂/钛金属、钇钡铜氧化物及其薄膜热敏电阻型非制冷探测材料的基本特性、制造工艺与技术、性能与应用。并列举了大量实例,每一实例均按照简介、制造方法、性能与效果的编写格式逐一加以阐述;重点介绍了微测辐射热计、热释电红外探测器和其他类型的非制冷型红外探测器的结构、选材、制造工艺、性能与效果;介绍了军事应用,即军用红外探测器原理、类型与性能,并采用较大篇幅介绍了非制冷焦平面红外探测器、非制冷单元/多元红外探测器和非制冷系列红外探测器的军事应用,详细介绍了其应用技术与效果。本书是从事红外技术研究人员、产品设计人员、生产制造人员、管理与销售人员及其教学人员必读必备之书,也是高新技术爱好者及其用户良好的参考资料,亦可作为教材使用。

本书突出实用性、先进性和可操作性,理论叙述从简,侧重于以实用数据和实例说明问题,本书信息量大,数据翔实可靠,结构层次清晰,语言简练,图文并茂。若本书的出版能对我国非制冷型红外探测技术的进步和产品质量提高起到促进作用,那么作者将感到无比欣慰。

由于水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指教。

作者

2011年2月

目 录

第一章 概述	1
第一节 简介	1
一、红外探测器的主要类型与特点	1
二、制冷型与非制冷型探测器特点对比	2
第二节 非制冷红外探测器及其材料	4
一、热释电红外探测器工作原理、参数及其材料	4
二、测辐射热计红外探测器及其敏感材料	12
三、两种非制冷型红外探测器间的比较	13
第三节 非制冷红外探测器材料与探测器的应用与发展前景	14
一、在国民经济和国防建设中的应用	14
二、主要应用	15
三、非制冷红外探测器的应用前景	15
第二章 铁电型非制冷红外探测陶瓷材料	17
第一节 简介	17
一、基础知识	17
二、铁电陶瓷与薄膜的制备技术	19
三、铁电或热释电陶瓷	32
第二节 钛酸铅系列铁电陶瓷与薄膜	34
一、钛酸铅(PbTiO_3)的性质	34
二、掺杂钛酸铅陶瓷	35
三、钛酸铅及掺杂铁电薄膜	44
第三节 锆钛酸铅陶瓷与薄膜	51
一、简介	51
二、锆钛酸铅陶瓷	57
三、掺杂锆钛酸铅陶瓷	59
四、PZT 薄膜	68

第四节	钛酸钡陶瓷与薄膜	75
一、	简介	75
二、	钛酸钡陶瓷铁电材料	91
三、	掺杂钛酸钡陶瓷	96
四、	钛酸钡薄膜铁电材料	127
五、	锆钛酸钡铁电陶瓷与薄膜	143
第五节	其他铁电陶瓷	158
一、	钽铌酸铅—钛酸铅陶瓷	158
二、	钽铁酸铅铁电陶瓷	161
三、	溶胶—凝胶法制备 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 铁电陶瓷薄膜	161
四、	钽酸锂薄膜	162
五、	$\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 铁电陶瓷	164
六、	脉冲激光沉积法制备 In 掺杂 SrTiO_3 薄膜	166
七、	钛酸铋铁电薄膜	167
八、	Nd 掺杂 BiTiO_3 陶瓷	168
第三章	热释电晶体材料	171
第一节	简介	171
一、	热释电晶体的生长方法与技术	171
二、	性能表征方法与技术	175
第二节	铌酸锂热释电晶体	178
一、	简介	178
二、	铌酸锂晶体热释电材料	190
三、	掺杂铌酸锂晶体	192
四、	铌酸锂薄膜	204
第三节	钽酸锂晶体与薄膜	205
一、	简介	205
二、	近化学计量比的钽酸锂晶体	209
三、	钽酸锂晶体及其集成应用	212
四、	掺铁钽酸锂晶体	215
五、	溶胶—凝胶法制备钽酸锂薄膜	218
第四节	硫酸三甘钛晶体	219
一、	简介	219

二、硫酸取代的硫酸三甘钛单晶	219
三、稀土掺杂硫酸三甘钛	222
第四章 有机铁电材料——聚偏二氟乙烯	224
第一节 简介	224
一、PVDF 的结构	224
二、PVDF 的性能	225
三、PVDF 压电体	226
第二节 PVDF 铁电薄膜	228
一、溶液法制备 PVDF 薄膜	228
二、PVDF 压电薄膜	230
三、传感器与红外探测器用 PVDF 薄膜	235
四、PVDF 薄膜与单片热释电红外图像传感器	237
第三节 PVDF 复合铁电薄膜	240
一、BaTiO ₃ /PVDF 热释电复合膜	240
二、LATGS - PVDF 热释电复合薄膜	241
三、定向 BaTiO ₃ 晶须/PVDF 压电复合材料	242
四、0-3 型锆钛酸铅 (PZT)/PVDF 压电复合材料	246
五、PZT/PVDF 压电复合材料	248
六、PbTiO ₃ /PVDF 压电复合材料	250
七、钛酸铅/聚偏氟乙烯/三氟乙烯 (PT/P(VDF - TrFE)) 热释电 复合薄膜	252
八、PT/P(VDT/TrFE)/多孔氧化硅衬底热释电传感器	255
九、热释电膜衬底上复合敏感膜热释电传感器	256
十、PFA/多孔 PTFE/PFA 三层驻极体膜	258
第五章 热敏电阻型非制冷探测材料	260
第一节 氧化钒薄膜材料	260
一、简介	260
二、VO ₂ 薄膜	267
三、掺杂 VO ₂ 薄膜	280
第二节 非晶硅(α-硅)薄膜	287
一、简介与制备技术	287

二、红外探测晶体管用多晶硅薄膜与器件	289
三、掺硼非晶硅薄膜	292
第三节 其他热敏电阻材料	294
一、铂/钛金属薄膜	294
二、TiO ₂ 薄膜	296
三、钇钡铜氧化物薄膜	303
四、镧钙锰氧化物薄膜	307
五、多晶锗硅薄膜	308
第六章 非制冷红外探测器	312
第一节 微测辐射热计	312
一、VO _x 探测器	313
二、 α -Si 探测器	317
三、YBaCuO 非制冷 IRFPA 探测器	319
第二节 热释电非制冷红外探测器	320
一、简介	320
二、材料的选择及器件的制备	325
三、非制冷热释电探测器实例	338
第三节 其他非制冷 FPA 红外探测器	358
一、SOI 二极管非制冷 IRFPA 探测器	358
二、新型热机械非制冷红外焦平面阵列	358
三、基于光学读出的热电光非制冷红外探测器	360
四、新型热光非制冷红外探测器	360
第四节 发展趋势	361
第七章 非制冷红外探测器的军事应用	362
第一节 简介	362
第二节 军用红外探测器	364
一、红外探测系统的概念与原理	364
二、非制冷与制冷型红外探测器	366
三、铁电型及热敏电阻型非制冷焦平面红外探测器	366
四、集成式及混合式铁电型非制冷红外探测器	372
第三节 非制冷探测器的军事应用	374

一、非制冷焦平面红外探测器的军事应用	374
二、非制冷单元/多元红外探测器的军事应用	379
三、非制冷线列红外探测器的军事应用	397
参考文献	402

第一章 概述

第一节 简介

一、红外探测器的主要类型与特点

红外探测器是广泛应用于军事、工业、医疗、环境等诸多领域的一类器件,根据探测原理的不同可分为光子探测器与热探测器两大类。光子探测器基于光电效应,优点是对波长的探测选择性强,信噪比高,响应速度快,因而已深入应用于航空航天、导弹寻的、红外夜视等军事领域。但光子型探测器需要低温工作,必须配备昂贵且笨重的制冷设备,高成本和难以小型化的缺点制约着其向民用领域应用的扩展。热红外探测器基于热敏材料吸收红外辐射产生的热效应,根据热效应的机制不同又可分为微测辐射热计、热释电和热堆三种类型。它们的最大优点是可在室温工作,从而大大减小了器件的体积和成本。虽然和某一特定波长敏感的光子探测器相比,其灵敏度较低,响应时间也较长,但 20 世纪 90 年代以来,随着焦平面阵列(FPA)、超大规模集成电路和微机电系统(MEMS)以及信息处理等技术的发展,使得非制冷热红外探测器的探测率得到了极大提高,响应时间同时也满足了成像要求,为其在军用和民用两大领域开拓了更广阔的应用前景。

根据红外探测器的类型和发展历程,可将红外探测器分为三代。

第一代是光子探测器,它以数目有限的探测单元为特征,借助光机扫描来实现图像探测,同时还需要低温制冷器协同工作。

第二代是以二维 $N \times M$ 元焦平面阵列探测器为特征,探测单元数目在万元以上,且自带有信息读出电路。其中又分为低温制冷器和非制冷型两种。

第三代称为“灵巧”型凝视大阵列焦平面,其特征是集成探测器后续的信号处理电路,包括信号读出电路、前放、模数转换器等。

现在国外处于一、二代并存的状态,三代“灵巧”焦平面阵列正在研制中。值得注意的是,很久以来热成像系统的高昂成本一直阻碍它拓展除军用以外的其他市场领域。近年来在第二代热成像系统的快速发展进程中,这一僵局已被采用非制冷焦平面阵列的热成像系统迅速打破,有人称之为红外热成像发展中的一次变革。

目前研制非制冷焦平面阵列(UFPA)的两大代表是以德克萨斯仪器公司(TI公司)为首的热释电 UFPA 和霍尼威尔公司为首的微测辐射热计 UFPA。

二、制冷型与非制冷型探测器特点对比

(一) 传统制冷到 FPA 的特点

为避免大气吸收,红外热成像通常选择 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 或 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 大气窗口,由于 25°C 时物体在 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 波段发射的辐射量约是 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 波段的 50 倍,故 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 波段更适合夜视应用。

目前所有工作于 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ 波段制冷型焦平面阵列都基于光子探测原理,即依赖入射红外光子在探测器中激发的光生载流子,定向生成的光生电荷产生正比于入射红外辐射通量的信号。采用 HgCdTe、InSb、PtSi 等材料制作 FPA 阵列在趋于较高的工作温度下,探测器材料固有的热激发迅速增强,而暗电流和噪声的增大会严重降低探测器的性能,故这一类光子探测器通常工作在 200K 温度以下。

在低温制冷下工作的光子探测器取得目前领先于其他各类阵列的高探测性能指标(表 1-1)。也正是由于低温制冷器、杜瓦瓶的缘故,使得制冷型 FPA 成像系统制造成本高,难以下降;同时整机的使用寿命有限,且体积、重量、功耗都较大。这些特点决定了制冷型 FPA 主要用于军事领域,尤其是在要求中、长远距离目标探测和高灵敏度的中、高级武器系统中,如坦克瞄准具、导引头、吊舱等。

(二) 非制冷 UFPA 的特点

1995 年以来,最引人注目的是非制冷焦平面阵列的实用化,其低成本的优势,将“使传感器领域发生变革”;而且整机工作寿命、可靠性、体积、重量、可操作性等都优于制冷型 FPA;且不需要制冷时间就能提供 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 窗口的快速热图像。它们正向着中短程探测距离的民用和军用市场进军。

目前的非制冷 UFPA 阵列从传感器的材料上看,又分为热释电和微测辐射热计两种类型。不需要制冷器、杜瓦瓶是这两类 UFPA 的共同点,也是整机成本明显低于制冷型 FPA 以及其他一些优势(相对于制冷型 FPA)的原因所在。另一方面,从机理上看,目前的 UFPA 属于热探测器,制冷型 FPA 属于光子探测器。UFPA 的灵敏度目前比制冷型的光子探测器阵列如 InSb、HgCdTe 低 2 个 ~ 3 个数量级,但对许多应用,特别是监视与夜视而言已足够了。在相同的阵列单元数和观察条件下,UFPA 摄像机的目视像质实际上与使用制冷型 FPA 的摄像机所得像质没有大的区别。另外,UFPA 的单元间距目前还稍微偏大,随着热绝缘技术的提高可望进一步降低。具体的一些参数比较见表 1-1。

表 1-1 制冷和非制冷型 FPA 的一些典型参数比较

内 容	制冷型 FPA (HgCdTe)(参考值)	非制冷 UFPA (bolometer)(参考值)
相应波段/ μm	8 ~ 14	8 ~ 14
像元尺寸/ $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$	28 \times 25	50 \times 50
探测率 $D/(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W})$	1×10^{11}	6×10^{11}
NETD/K	0.005	<0.1
工作温度/K	77	环境温度
启动时间	3min ~ 10min	30s

(三) 两种 UFPA 间的比较

显然,热释电和微测辐射热计 UFPA 除了相对于制冷型光子敏感 FPA 的一些优势外,它们二者间也还存在着一些差异。微测辐射热计较好地满足了以下几方面。

(1) 低制造成本。这主要是由于采用了标准硅 IC 制造工艺和无需调制器的缘故。

(2) 较高的响应动态范围和较好的线性响应。

(3) 较低的串音和图像模糊。因为 VO_2 材料具有较低的热导率 ($0.22\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$),故像元间的热绝缘较好。

(4) 较低的 $1/f$ 噪声。

(5) 较高的帧速(60Hz)和潜在的灵敏度提高(理论 NETD 值低于 10mK)。

这些优点既提高了系统的可靠性也扩展了系统的工作范围,同时也是它们之间差异主要表现的地方。

从这两种 UFPA 的信号和噪声特性来看:①在电阻型微测辐射热计探测单元上所施加的偏置,几乎由其在实际工作电平上的耗散功率限制住了。通过施加脉冲偏置电压,可以部分改善这一问题,但随着阵列元数增多,要求采样脉冲精度提高和偏置脉冲宽度降低又在技术上带来一些困难;而对热释电 UFPA 来说,其偏置可以认为几乎无功率耗散。②在热释电 UFPA 探测单元中,设计了大的隔直电容,以滤除探测元中产生的噪声,只产生几百赫的噪声带宽;而电阻型微测辐射热计的 Johnson 噪声没有在探测元中滤除,只能在线列输出后滤除,这就导致了一个较大的噪声带宽,再加上随偏置加大而增加的电阻噪声,最终抵消了部分响应增益。

从这种角度出发,热释电 UFPA 也有潜在的高性能,满足大阵列(如 1000×1000 像元)的要求。当然,要发展这种大阵列,需建立一套和标准硅 IC 制造工艺兼容的热电陶瓷材料淀积技术,目前国外正在开展这一方面的研究工作;对于微测辐射热计 UFPA,随阵列单元数的增加,需提高相应的响应电平和热电阻系数

(TCR)值,以抵消噪声带宽的增加。例如:对于 300×300 阵列,要求 $TCR > 2.5\%$; 对于 500×500 阵列,要求 $TCR > 4\%$ 。

另外,也看到目前微测辐射热计阵列的材料制备和工艺控制技术较为困难,且为少数几个公司所垄断。从现在已有的两种 UFPA 系统看,二者都具有大致的总体性能指标。

第二节 非制冷红外探测器及其材料

目前,非制冷红外探测器已经发展成为非制冷红外焦平面阵列(UFPA)。UFPA 主要分为两大类:微测辐射热计 UFPA 和热释电 UFPA。在 20 世纪 70 年代采用陶瓷制备了热释电 UFPA。随着材料科学和微电子技术的迅猛发展,这种非制冷、低成本红外器件的探测灵敏度不断得到提高。

一、热释电红外探测器工作原理、参数及其材料

(一) 热释电探测器工作原理

热释电探测器通常由单个或双个响应元以及简单的晶体管组合封装而成,并采用特定波长范围内透明的窗口。其结构一般是将非常薄的热释电元件接入高输入阻抗放大器(通常是场效应管)。热释电元件吸收外界辐射后,其温度发生变化产生了热释电电流 i_p ,热释电电流通过放大电路转变为信号电压,通过测量信号电压就可以得到外界辐射的信息。热释电探测器元件的简明示意图如图 1-1 所示。

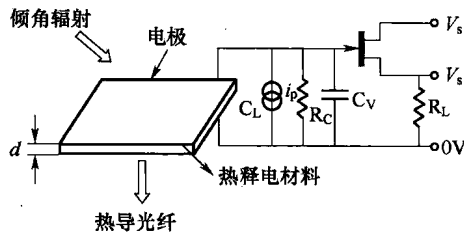


图 1-1 热释电探测器元件的简明示意图

热释电探测器的核心部件之一是具有热释电效应的热释电材料。热释电效应是极化随温度改变的现象。在 32 种对称点群的晶体材料中,有 10 种具有单轴。在温度发生改变时,这些晶体的极化发生变化,在垂直于极化方向的两个晶面出现感应电荷,若将其与外电路连接,就能在电路中检测到电流信号。图 1-2 为热释电电流产生过程的简明示意图。

评价热释电探测器的响应时,热释电材料优值因子往往作为评价性能的重要指标,如电压响应优值因子 F_v 、电流响应优值因子 F_i 、探测率优值因子 F_d 等,其中

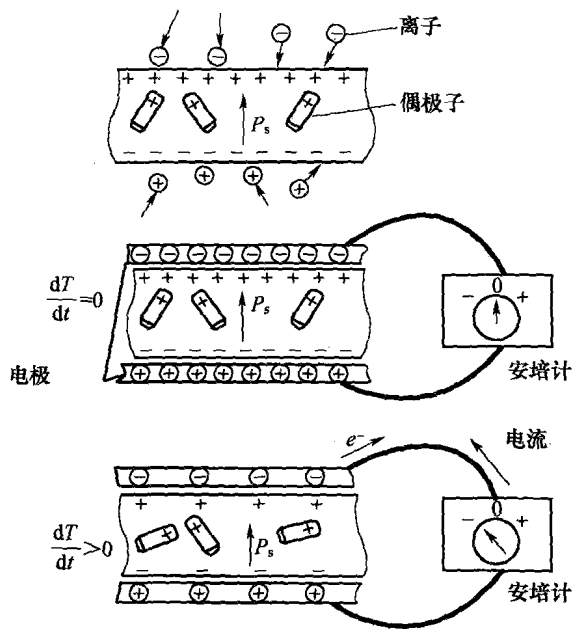


图 1-2 热释电电流产生过程

F_d 是评价材料综合性能的重要技术指标。国际上定义 F_d 为

$$F_d = \frac{p}{c \sqrt{\epsilon \tan \delta}}$$

式中： p 为热释电系数； c 为比热容； ϵ 为材料的绝对介电常数； $\tan \delta$ 为介电损耗。

(二) 热释电工作参数

1. 热释电效应

热释探测器是以热电材料为介质，在其两面分别蒸发电极，其结构好像一只低损耗薄片电容器。当它受到交变的红外辐射时，会引起介质的温度变化，导致材料自发极化，若外电路短路，就会形成热电电流 i ，这一现象称为热释电效应。

图 1-3、图 1-4 分别表示该类探测器的基本结构及等效电原理图。

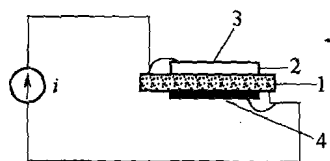


图 1-3 热释电探测器基本结构

1—热电材料；2—红外吸收层兼电极；
3—红外辐射；4—下电极。

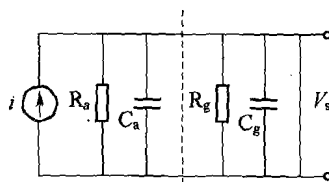


图 1-4 探测器及前置放大器输入端的等效电原理图

热释电电流的大小可表示为

$$i = A_0 \lambda \frac{dT}{dt} \quad (1-1)$$

式中: λ 为材料的热释电系数; $\frac{dT}{dt}$ 为辐射引起的温度变化率; A_0 为探测器灵敏元面积。

2. 响应率 R

响应率 R 是探测器的主要质量参数, 它表示输出信号与入射辐射功率之比。若入射信号经过角频率为 ω 的正弦调制, R 值可表达为

$$R = \frac{\alpha \lambda A_0}{CK'} \cdot \frac{\omega \tau_T \tau_e}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_T^2} \sqrt{1 + \omega^2 \tau_e^2}} \quad (1-2)$$

式中: α 为探测器红外吸收率; λ 为热释电系数 ($C/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$); A_0 为探测器灵敏面 (cm^2); C 为等效输入回路总电容 (F); K' 为探测器热容量 ($\text{J}/^\circ\text{K}$); τ_T 为热时间常数 (s); τ_e 为电时间常数 (s)。

τ_T 一般在毫秒到几秒之间, 它由灵敏元的热容和灵敏元与周围环境的热导决定。 τ_e 一般在毫微秒到几十秒之间, 它由电路的电阻、电容值决定。为了提高探测器的灵敏度, 器件的结构往往采用“悬空”组装方法, 以减小热容量。对于悬空结构的探测器来说, 热容量可近似看作仅与灵敏元有关, 即

$$K' = C_p A_0 d \quad (1-3)$$

式中: C_p 为介质材料比热 ($\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$); d 为灵敏元介质厚度 (cm)。

这时式(1-2)可简化为

$$R = \frac{\alpha \lambda}{CC_p d} \frac{\omega \tau_T \tau_e}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_T^2} \sqrt{1 + \omega^2 \tau_e^2}} \quad (1-4)$$

从式(1-4)可见:

(1) 当 $\omega = 0$ 时, $R = 0$, 即对于恒定辐射没有信号输出。

(2) 当 $\omega \tau_e \ll 1$ 、 $\omega \tau_T \ll 1$ 时, 有

$$R = \frac{\alpha \lambda}{CC_p d} \cdot \omega \tau_T \tau_e \quad (1-5)$$

R 正比于 ω 。

(3) 当 $\omega \tau_e \gg 1$ 、 $\omega \tau_T \gg 1$ 时, 有

$$R = \frac{\alpha \lambda}{C_p d} \cdot \frac{1}{\omega C} \quad (1-6)$$

R 反比于 ω 。

这是实际应用中最普遍的情况,称为一般使用区,此时, $\tau_T \tau_e$ 一般为 $0.1\text{s} \sim 10\text{s}$ 。 R 值随 ω 上升而下降,其调制频率在几周以上。

(4) 当 $\omega\tau_T \gg 1$ 、 $\omega\tau_e \ll 1$ 时,有

$$R = \frac{\alpha\lambda}{C_p d} \cdot \frac{\tau_e}{C} = \frac{\alpha\lambda}{C_p d} \cdot R \quad (1-7)$$

式中: R 是 R_s 与 R_g 的并联值。

可见,这时 R 的大小与频率无关。

3. 噪声等效功率

常用 NEP 表示,也称“最小可测功率”,它表示噪声输出 V_N 和信号输出相等时的入射功率。但实际中使用的是指单位带宽的等效噪声功率,即

$$\text{NEP} = \frac{V_N}{R \sqrt{\Delta f}} \quad (\text{W}/\text{H}^{1/2})$$

当使用在低频情况下时,对钽酸锂红外探测器, FET 栅漏电流噪声及介质损耗噪声是噪声的主要来源,如何选择低损耗的 $\tan\delta$ 晶体材料及低 I_{GSS} 的结型场效应管,对降低器件的 NEP 极为重要。

4. 探测率 D^*

D^* 表指在放大器的带宽为 Δf 时,测量的响应率 R 和噪声输出 V_N 的比值,它为 NEP 的倒数,即

$$D^* = \sqrt{A_0 \Delta f} \frac{R}{V_N} = \frac{\sqrt{A_0}}{\text{NEP}}$$

乘上 $\sqrt{A_0}$ 是为了消除探测器面积影响的归一化因子,对于量子探测器来说, NEP 正比于 $\sqrt{A_0}$, 因此 D^* 的意义就表示辐射到单位灵敏元面积上的单位辐射功率时,在单位等效噪声带宽条件下产生信噪比,但对于热释电探测器来说, NEP 与 $\sqrt{A_0}$ 在不同条件下有着不同关系,因而这里的 D^* 就失去了原有的意义,但人们还是习惯使用 D^* 来比较热释电探测器性能,只是在使用时应注意,当调制频率较低时, D^* 正比于 $\sqrt{A_0}$, 当中等频率时, D^* 与 A_0 无关;当较高频率时, D^* 反比于 $\sqrt{A_0}$;这一情况,读者可直接从上式得到验证。

由于 NEP 和 D^* 值都与测量条件有关,所以生产厂商给出的 NEP 和 D^* 值应注明辐射源温度和调制频率等条件。如 $D^*(500, 20, 6)$ 表示辐射源为 500°K , 正弦调制频率为 20Hz , 测试放大器带宽 Δf 为 6Hz , 有的也可注明等效噪声带宽 1Hz , 即 $D^*(500, 20, 1)$ 二者意义是一样的。

(三) 热释电材料

热释电材料的种类非常多。从工作模式上可以分为两大类:工作于居里温度