



红外热成像测温 原理与技术

杨立 杨桢 等著



科学出版社

红外热成像测温 原理与技术

杨立 杨楨 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是在海军工程大学工程热物理研究室十多年的教学科研成果经验总结的基础上撰写而成的。本书在介绍红外热像仪的基本概念、红外辐射特性及其传输基本知识的基础上,重点论述红外成像测温原理、非漫射体红外测温技术、变谱法红外测温技术、军事目标和海面的红外成像测温技术,讨论影响红外测温准确性的因素和红外测温修正方法,介绍红外热像仪的标定和测试技术。

本书可作为高等院校能源、动力、光学、机械、船舶和交通运输等专业的高年级本科生和研究生的教学用书,也可作为相关科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

红外热成像测温原理与技术/杨立等著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-034817-3

I. ①红… II. ①杨… III. ①红外成像系统-红外测温仪-研究
IV. ①TH811.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 125652 号

责任编辑:杨向萍 陈 捷 潘继敏 / 责任校对:包志虹
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

陈海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 234 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自从 1964 年研制出具有测温功能的红外热像仪以来,红外成像测温技术得到广泛应用,如传热研究、设备红外检测、红外遥感、军事目标红外测量、大气红外检测、工业设备红外监控、交通管理、医学热诊断等。特别是近年来随着半导体集成电路技术、热辐射探测器材料研究的进步,采用非制冷红外焦平面阵列探测器的热像仪的成功研制,使得热像仪的体积更小、价格更低、使用更方便,红外热像仪的应用已覆盖从民用到国防的诸多领域。由于红外热像仪温度测量原理较复杂,影响温度测量准确性的因素较多,在许多人看来红外测温的准确度不高,因此,开展红外辐射温度测量技术的研究,探索提高红外测温准确性的方法变得日益迫切。红外热像仪测温精度是在实验室近距离通过对黑体辐射源的标定来保证的,但是在实际测量中被测物体往往不满足黑体辐射特性,物体表面发射率和反射率、环境辐射、大气辐射等都会对红外热像仪测温造成影响。目前,红外热像仪测温的修正方法是假设被测物体满足灰体近似,通过设定被测物体表面发射率和环境温度或反射温度来修正温度测量值,这种修正方法对发射率较高的非金属物体的红外测温能基本满足测量准确性的要求。但对低发射率物体、非漫射表面、环境存在多个高温热源和远距离测量等情况,目前的测温修正算法误差太大,不能满足红外测温的需要。近十多年来,作者在红外辐射测温、设备状态红外检测和故障定量识别、军用目标红外特征测量等方面开展了一系列的教学和科研工作,本书归纳整理了部分研究结果。

全书共分 9 章。第 1 章介绍红外热像仪的基本概念和发展历史;第 2 章介绍红外辐射及其传输的基本知识、基本定律;第 3 章介绍红外成像测温原理,着重介绍红外辐射温度测量和发射率测量的基本方法;第 4 章介绍红外成像测温误差分析与修正方法,着重介绍环境温度、邻近高温物体、太阳辐射、探测器温度等因素对红外测温的影响及其修正方法,介绍反射温度补偿法对红外测温的修正与补偿计算;第 5 章介绍非漫射体红外成像测温技术;第 6 章介绍基于变谱法的红外测温技术;第 7 章介绍红外热像仪的标定与性能测试,介绍黑体辐射源和红外热像仪主要性能参数的标定与测试方法;第 8 章介绍军事目标的红外热成像温度测温技术,主要介绍军事目标红外测温的模型、红外测温的计算公式和对影响军事目标测温准确性的方法进行修正;第 9 章介绍海面温度的红外热成像测温技术,主要介绍海面反射率与发射率的计算、海面辐射分析和海面温度红外测量原理与测量方法。

本书第 1~3 章、4.1 节、4.3 节、4.4 节和第 7 章由杨立撰写,第 4.2 节、4.5

节、第 5 章、第 6 章和第 8 章由杨桢撰写,第 9 章由张士成和陈翮撰写,全书最后由杨立统稿和修改。

本书在撰写过程中得到海军工程大学舰艇动力工程专业高年级学生和工程热物理专业的研究生刘慧开、张健、范春利、杨宝东、杜永成、吕事桂、王为清、彭友顺等的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中难免有不妥之处,恳请读者提出宝贵意见和建议。

作者

2012 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 红外热像仪概述	1
1.1 红外热像仪简介	1
1.2 红外热像仪的发展	3
1.3 红外热像仪的组成及工作原理	4
1.3.1 红外热像仪的组成部分	5
1.3.2 红外热像仪工作原理	12
1.3.3 红外热像仪的主要性能参数	15
参考文献	16
第 2 章 红外辐射基本理论	18
2.1 概述	18
2.2 黑体的红外辐射规律	20
2.2.1 辐射的光谱分布规律——普朗克辐射定律	20
2.2.2 辐射光谱的移动规律——维恩位移定律	21
2.2.3 辐射功率随温度的变化规律——斯特藩-玻尔兹曼定律	22
2.2.4 黑体辐射能按波段的分布	22
2.3 实际物体的红外辐射规律	23
2.4 辐射度学的一些基本概念	26
2.4.1 常用辐射量	27
2.4.2 辐射度量中的基本规律	29
2.4.3 发射率及其变化规律	30
2.4.4 吸收率及其变化规律	34
2.4.5 反射率及其变化规律	35
2.4.6 反射率、吸收率和发射率之间的关系	37
2.5 红外辐射的大气传输	37
2.5.1 大气吸收	39
2.5.2 大气散射	40
2.5.3 大气辐射传输的计算	43

参考文献	45
第3章 红外热成像测温原理	47
3.1 概述	47
3.2 红外测温原理	48
3.3 红外温度测量方法	52
3.3.1 温度的直接测量法	52
3.3.2 温度的相对测量法	53
3.3.3 双波段测温法	53
3.4 物体发射率测量方法	54
3.4.1 利用热像仪测量表面发射率的误差分析	55
3.4.2 几种测量发射率的方法	55
参考文献	57
第4章 红外成像测温误差分析与修正方法	60
4.1 红外测温误差计算分析	60
4.1.1 被测物体表面发射率的影响	61
4.1.2 被测物体表面吸收率误差的影响	63
4.1.3 大气透射率误差的影响	63
4.1.4 大气发射率误差的影响	64
4.1.5 大气温度误差的影响	65
4.1.6 环境温度误差的影响	65
4.1.7 辐射温度的影响	65
4.2 探测器温度对非制冷微测辐射热计热像仪测温的影响与修正	66
4.2.1 非制冷微测辐射热计热像仪测温原理与计算	67
4.2.2 探测器温度对测温的影响	68
4.2.3 修正原理及方法	68
4.2.4 实验验证	72
4.3 太阳辐射对红外热像仪测温误差的影响	73
4.3.1 测温原理	74
4.3.2 测温计算及误差分析	74
4.3.3 太阳辐射吸收率对测量误差的影响	75
4.3.4 太阳辐射的影响	75
4.4 邻近高温物体对红外测温的影响	76
4.4.1 测温计算及误差分析	77

4.4.2	高温物体对测温的影响分析	78
4.5	反射温度补偿法对红外测温的修正与补偿计算	81
4.5.1	红外热像仪测温原理与计算	81
4.5.2	反射温度补偿法及其原理	81
4.5.3	误差分析与补偿效果比较	83
4.5.4	实验验证	87
	参考文献	88
第5章	非漫射体红外热成像测温技术	90
5.1	实际物体红外热像仪测温原理	90
5.2	红外热像仪测温计算	92
5.3	实际物体温度测量实验验证	93
5.3.1	实验仪器介绍	93
5.3.2	实际物体辐射特性的实验	95
5.3.3	被测物体周围存在高温物体的反射温度补偿法实验	100
5.4	一种测量实际物体发射率的实用方法	104
5.4.1	测量原理	104
5.4.2	实验验证	105
	参考文献	106
第6章	基于变谱法的红外热像仪测温技术	108
6.1	红外热像仪测温原理与计算	108
6.1.1	红外热像仪测温原理	108
6.1.2	热探测器响应度分析	109
6.1.3	非制冷红外热像仪测温计算	111
6.1.4	测温公式准确性的实验验证	113
6.2	红外热像仪测温的变谱法	114
6.2.1	变谱法的原理	114
6.2.2	技术实现	115
6.3	灰体材料的测温	116
6.3.1	灰体材料测温原理	116
6.3.2	测温方法验证	117
6.4	郎伯体材料的测温	120
6.4.1	郎伯体材料的测温原理	120
6.4.2	测量方法验证	121

6.5	复杂背景环境中红外热像仪测温的变谱法	124
6.5.1	理论基础	124
6.5.2	方法验证	126
	参考文献	129
第7章	红外热像仪的标定与性能测试	131
7.1	黑体型辐射源	131
7.1.1	黑体和黑体型辐射源	131
7.1.2	典型黑体辐射源的结构	133
7.2	黑体腔的有效发射率	134
7.3	红外热像仪的标定	137
7.3.1	准确度校准	137
7.3.2	测温一致性校准	138
7.4	红外热像仪性能测试	138
7.4.1	噪声等效辐射测试	138
7.4.2	等效噪声温差测试	139
7.4.3	最小可分辨温差测试	140
7.4.4	最小可探测温差测试	142
7.4.5	相对光谱响应测试	143
	参考文献	143
第8章	军事目标红外热成像温度测量技术	144
8.1	军事目标测温模型与测温计算	145
8.2	军事目标表面发射率的测量技术	147
8.2.1	影响发射率大小的因素分析	147
8.2.2	测量发射率的方法	149
8.3	大气透射率的测量	150
8.3.1	大气衰减的原因	150
8.3.2	现有大气影响的修正方法评述	151
8.3.3	大气透射率计算法	152
8.3.4	大气透射率的现场标定法	153
8.3.5	一种测量大气透射率的方法	154
8.4	背景辐射的修正	155
8.4.1	太阳辐射	155
8.4.2	天空背景辐射	157

8.4.3 地表辐射	158
8.4.4 等效背景辐射的测量	158
参考文献.....	159
第9章 海面温度的红外热成像测温技术.....	161
9.1 海面反射率与发射率计算	161
9.2 海面辐射分析	167
9.3 海面温度测量原理	170
9.3.1 垂直海面方向温度测量	171
9.3.2 观测方向天顶角较大时海面温度测量	171
9.3.3 考虑太阳辐射影响时海面温度的测量原理	173
参考文献.....	175

第 1 章 红外热像仪概述

1.1 红外热像仪简介

红外热像仪是接收物体发出的红外辐射,并将其转换为可见光图像的装置。这种热像图与物体表面的表观温度分布场相对应,实质上是被测目标各部分的红外辐射分布图。热辐射图像主要是由温度差和发射率差产生的。由于红外热像仪利用景物自身发射的热辐射成像,从根本上解决了夜间的成像探测和观察问题。红外成像技术有三大功能:一是将人眼的观察范围扩展到红外光谱区;二是极大提高人眼观察的灵敏度;三是获得客观世界与热运动相关的信息^[1]。

红外热像仪不但在军事应用中占有重要地位,在民用方面 also 具有很强的生命力。它具有以下特点^[2]:

(1) 它属于非接触测量技术,适合检测快速运动目标、带电目标和微小目标的温度。

(2) 测温面积大,测温效率高,能直观显示物体表面温度场。热像仪可同时测量物体表面各点温度的高低,并以图像形式显示出来。民用热像仪的热图可以显示 640×640 个单元的温度分布,空间分辨率很高。

(3) 温度分辨率高。由于热像仪可以同时显示两点的温度值,可准确区分很小的温差,温度分辨率可达 0.01°C 甚至更高。

(4) 可采用多种显示方式。热像仪输出的视频信号可以用伪彩色或灰度的形式显示热图像。通过模数转换处理,还可用数字显示物体各点温度。

(5) 可进行数据存储和计算机处理。

红外热像仪按工作方式可分为主动系统与被动系统、单元系统与多元系统、光点扫描系统与调制盘扫描系统、成像系统与非成像系统。

按检测物体的点、线、面分,红外辐射测温系统依次有红外点温仪(又称红外测温仪)、红外行扫仪、红外热电视和红外热像仪。

红外点温仪主要用于测量物体一个相对小的面积上的平均温度,因此每次测量的区域有限,当需要大面积测量时,必须在被测区域内选择多点、多次测量才能完成,相当麻烦。但由于它轻巧便携、坚固耐用、使用方便,因而成为设备巡检和维护人员的得力工具和必要手段。红外热电视采用热释电靶面探测器和标准电视扫描方式,结构简单、造价低、无机械转动、无需特殊冷却,不足之处是温

度分辨率较低,适合于工业系统使用。

按应用领域,红外成像系统可以分为军用系统与民用系统两大类型。

(1) 军用热像仪。它只要求对目标清晰成像,不需要定量监测温度,它的性能要求重点是高的取像速度和高的空间分辨率,被称为“红外前视系统(forward looking infrared system, FLIRS)”,现在用来泛指任何快速帧扫描热像仪。

(2) 民用热像仪。在大量工业、医疗、交通、科研实验等场合,不仅需要对被测物体表面的热场分布进行清晰成像,而且强调精确的温度测量。与军用红外系统相比,民用热像仪更强调温度测量的灵敏度,称为“红外热像仪”。

按扫描读出方式,热像仪可分为光机扫描热像仪和凝视型热像仪。

(1) 光机扫描热像仪。早期研制和生产的热像仪大都采用光学机械扫描仪对单元器件进行高速扫描,得到物体的实时热图,但系统的探测能力不高。采用线列探测器进行扫描,可提高系统的探测能力。根据扫描器在光路中位置的不同,热像仪又分为物方扫描和像方扫描两种扫描方式。根据探测器相对于行扫方向排列方式的不同,热像仪又分为串扫热像仪和并扫热像仪。

(2) 凝视型热像仪。随着焦平面列阵探测器的发展,现代热像仪采用了大面阵探测器,系统取消了光学机械扫描器,实现了凝视成像,使热像仪结构大大简化,性能大幅提高,使用十分方便。

红外热像仪发展到目前已有三代产品。第一代红外热像仪就是制冷型的光机扫描热像仪,探测器单元数少于 200 元。光机扫描热像仪的成像清晰度相当好,取得的热信息相当丰富,但是扫描系统繁杂,制造和使用维护都十分不便。为此又研制出第二代红外热像仪,其特点是探测器采用了扫描型的焦平面探测器,探测器单元数少于 106 元。第三代红外热像仪采用大面阵焦平面探测器,探测器单元数大于 106 元,革除了高速运动的机械扫描机构,采用自扫描的固体器件做成凝视型红外焦平面热像仪。

按工作波段分类,热像仪可分为长波红外热像仪、中波红外热像仪、短波红外热像仪、双波段红外热像仪和多波段红外热像仪。

根据完成帧扫描的时间分类,热像仪又可分为低速热像仪、中速热像仪和高速热像仪^[2]。低速热像仪的帧扫描时间高于 10s,如美国巴恩斯(Barnes)工程公司生产的第一台获得广泛应用的机械扫描远红外热像仪,采用无需制冷的半导体测辐射计,每帧扫描时间为 2min,温度分辨率为 0.04℃;苏联生产的红宝石热像仪采用液氮制冷的 InSb 光导探测器,帧扫描时间为 40s,每帧 240 行,温度分辨率为 0.1℃。中速热像仪的帧扫描时间为 0.1~10s,如日本生产的红外眼热像仪,在水平和垂直方向的扫描时间为 10s,采用 HgCdTe 红外探测器,温度分辨率为 0.1℃;美国得克萨斯仪器公司生产的 Texas 热像仪,采用 HgCdTe 红外探测器,帧频为 0.25Hz,温度分辨率达到 0.07℃。高速热像仪的帧扫描时间低

于 0.1s, 通常的帧频为 16~25Hz, 采用多元探测器帧频可提高到 50Hz, 如瑞典 AGA 公司生产的 AGA680 型、AGA750 型和 AGA780 型系列热像仪等。

按系统是否具有制冷装置分类, 热像仪分为制冷型热像仪和非制冷型热像仪。制冷型热像仪温度分辨率高、重量较轻, 但体积大、价格高, 使用不方便; 非制冷型热像仪在探测性能方面不及制冷型的, 但价格便宜、体积小、重量轻、使用方便, 在军事领域的低端应用和民用等方面有广阔的应用前景。

1.2 红外热像仪的发展

利用红外辐射原理进行温度测量的仪器是从简单到复杂逐渐发展而成的, 最先应用于军事。1929 年, Czerny 等研制出蒸发式热像仪^[3]。蒸发式热像仪是根据如下原理设计而成的: 当红外辐射投射到涂有挥发性的薄油膜上时, 膜片吸收热辐射使其局部温度发生变化, 进而导致油膜的蒸发和膜厚度的改变, 在可见光的照射下可看到不同颜色的干涉条纹。1929 年, 科勒发明了对近红外辐射响应灵敏的银氧铯光电阴极。20 世纪 30 年代初, 美国工程师法恩斯沃思和霍尔斯特提出了光电图像转换原理。在此基础上, 荷兰、德国和美国等国研制成红外变像管。红外变像管是将不可见的红外图像变成可见图像的真真空电子器件。在红外变像管中, 当外来辐射成像于光电阴极时, 光电阴极发射电子, 电子经电子透镜聚焦并加速后, 轰击荧光屏使之产生较亮的可见图像。由于很少有军事目标能在变像管的响应范围内产生强辐射, 于是就需要提供一种照射源, 因此这种使用变像管的系统称为主动式系统^[4]。1952 年, 美国陆军研制出第一台光机扫描的慢帧速热像记录仪, 它使用一个 16in(1in=2.54cm) 的探照灯反射镜、一个双轴扫描器和一个辐射热探测器, 所成的热像被记录在照相胶片上, 属于非实时装置。随着制冷型、短时间常数的碲化铟(InSb) 和掺镉汞(Ge:Hg) 等光电探测器的出现, 1956 年芝加哥大学在空军资助下试制出第一台长波前视红外仪器, 它由 AN/AAS-3 型条幅式绘图仪改进而成, 在绘图仪的计数回转光楔扫描器上加一个节点俯仰反射镜, 使单个探测器能描绘出二维光栅图形^[5]。1960 年, Perkin-Elmer 公司为美国陆军研制出第二台实时长波前视红外仪器。这台仪器叫做棱镜式扫描仪, 它利用两个旋转折光棱镜对单个 InSb 探测器产生螺旋式扫描, 它对后续军用和民用热像仪的发展起到很大的促进作用。1965 年, 得克萨斯仪器公司开发研制出第一代用于军事领域的机载红外成像装置, 称为前视红外系统(FLIR)。从此以后, 前视红外系统如雨后春笋, 快速发展。在 1960 年至 1974 年间, 美国至少研制出 60 种不同的前视红外系统, 并生产了数百具产品^[6]。

1964 年, 瑞典 AGA 公司和瑞典国家电力局联合成功研制第一台工业用热像仪(Thermovision 650), 它用液氮制冷, 仪器重量达 30 多公斤, 使用很不方便。

尽管笨重,但在各种应用中,特别是电力设备维修中,这台工业用热像仪体现了其应用价值。此后,工业用热像仪的发展经历了以下过程^[6]:

(1) 1973年,世界上第一台便携式红外热成像系统诞生(Thermovision 750)。

(2) 1979年,世界上第一台与计算机连接的、具有数字成像处理系统的热成像系统诞生。

(3) 1986年,世界上第一台热电制冷红外成像系统面世,从而摆脱了大的气瓶。

(4) 1991年,世界上第一台真正双通道数字式12bit研究型热成像系统——THV900(AGEMA)诞生。

(5) 1995年,第一台获得ISO 9001国际质量体系认证的、焦平面、内循环制冷性热成像系统出现。

(6) 1997年,世界上第一台非制冷、长波、焦平面热像仪THV570诞生,这是红外技术领域的一次革命性转变,将世界红外检测技术推向一个崭新的阶段,启动速度由原来的5min下降到45s。

(7) 2000年,世界上第一台集红外和可见光图像于一体的非制冷、长波、焦平面的红外热像仪诞生。

红外成像属于技术密集度高、投资强度大、研究周期长、应用前景广泛的高新技术产业,其发展方向主要有以下6个方面^[1]:

(1) 集成化。探测器材料与电路集成,光、机、电集成。

(2) 大阵列。长线列如 6000×1 (美国已用于高空预警机),大面阵如 2048×2048 (中短波)、 640×480 (长波)。

(3) 小型化。缩小体积,减轻重量,便于携带。

(4) 多色化。向双色、多光谱发展,包括拓展光谱波段,将光谱波段划分为更细致的波段等。

(5) 高速化。增加探测器单元数量,快速获取目标热图,提高焦平面探测器的帧速和采样频率。

(6) 智能化。在探测器芯片上实现非均匀性校正、图像处理、对背景辐射的自适应探测等。

1.3 红外热像仪的组成及工作原理

在热像仪中具体实现由红外光变为电信号、由电信号变为可见光的转换功能是由热像仪各个部件完成的。热成像系统一般包括四个基本组成部分:光学成像系统(包括扫描系统)、红外探测器及制冷器、电子信息处理系统和显示系

统。光学成像系统的作用是将物体发射的红外线会聚到焦面上,扫描器既要实现光学系统大视场与探测器小视场匹配,又要按照显示制式进行扫描,探测器将红外辐射变成电信号,电子处理单元对电信号进行放大和处理,显示器将电信号用可见的图像形式显示出来。

1.3.1 红外热像仪的组成部分

1. 光学系统

红外光学系统的作用是收集辐射,将辐射会聚到探测器灵敏面上。光学系统的使用可大大提高灵敏面上的照度,提高仪器信噪比,增大系统探测能力。红外光学系统分为透射式光学系统、反射式光学系统和混合式光学系统^[2]。

1) 透射式光学系统

透射式红外光学系统也称折射式红外光学系统,它一般由几个透镜或组合透镜构成,每个组合透镜可看做一个光学系统。组合透镜系统由若干个单透镜组成,这种系统能很好地消除像差,获得较好的像质,但总透过率较低。近年来,高透过率红外光学材料的发展为透射式系统的应用创造了条件。在前视红外系统设计中,多半倾向于采用透射系统。

2) 反射式光学系统

由于红外辐射波长较长,能透过它的材料很少,因而早期的光学系统大都采用反射式红外光学系统。透镜的通光口径和焦距一定时,反射系统的反射和吸收损失比透射系统的吸收损失小,且造价低廉,但像质比不上透射系统。反射式光学系统按截面形状不同可分为球面形、抛物面形、双曲面形及椭球面形等4种。

3) 混合式光学系统

混合式光学系统也称折射-反射式光学系统,它结合了反射式和透射式系统的优点,采用球面镜取代非球面镜,同时用补偿透镜来校正球面反射镜的像差,从而获得较好的像质。但这种系统往往体积大,加工困难,成本较高。

2. 增透膜

碱金属卤族化合物红外材料折射率大多在1.5~2.0,其红外透过率较高。而硫族化合物、硅和锗的折射率要高得多,在材料表面会产生高反射损失。为了消除在给定波长上的反射,可在表面镀一层增透膜,其光学厚度等于1/4波长,可在一个波带内减小这种反射损失。对于硅、锗和三硫化砷,可在一定波长间隔内将绝对透射率提高一倍^[4]。通常对折射系数大于1.6的任何透射材料都镀膜。

3. 滤光片

为了避免来自背景、大气和接收器周围环境的干扰辐射,常常要用到滤光片。滤光片分为短波通、长波通和带通三种。短波通滤光片能透过短于某特定截止波长的辐射;长波通滤光片能透过大于某特定截止波长的辐射;带通滤光片只能透过一定波段的辐射。

滤光片按其工作原理可分为两类:吸收滤光片和反射或干涉滤光片。吸收滤光片会吸收不希望透过的波长的辐射。吸收滤光片用得较少,因为它的吸收特性只有在极少情况下符合所希望的光谱特性。然而对长波通和短波通滤光片来说,一般仍用这一类滤光片。干涉滤光片是以程序控制的方法在基片上或直接在透镜以及对辐射敏感的材料上蒸发一层甚至上百层 $1/4$ 波长厚的介电材料而制成的。为了提高反射率要交替使用具有高折射率和低折射率的材料作干涉膜。目前已可做成任意希望的光谱波段滤光片。

4. 红外探测器

1) 红外探测器分类

红外探测器是将红外辐射转换为电信号的元件,可分为量子探测器和热电探测器(非量子探测器)两大类。量子探测器吸收红外辐射后,入射光子与探测器材料的电子间直接相互作用,其晶格原子范围内的电子状态发生变化,产生光电效应。热电探测器吸收红外辐射后,引起探测器某一电特性的变化,它不是对光子的响应,而是正比于所吸收的辐射能量。探测器的响应正比于吸收的光子数,因此有量子计数器之称。

(1) 量子探测器(光电探测器)。

量子探测器主要利用外光电效应和内光电效应工作。

外光电效应是由某些金属、金属氧化物或半导体材料吸收辐射或吸收光子后发射电子产生的,这种现象统称为光电子发射。这种效应实际上是把光能转变为电能的效应,其前提是吸收的光子能量要大于或等于电子逸出功。电子逸出功是材料的一种特征值。光电管、光电倍增管、光电图像转换器和增强器都是根据这种原理工作的。

内光电效应是指材料吸收辐射后产生准自由电子或者电子-空穴对的现象。它与外光电效应相反,产生的载流子没有离开材料本身,而是留在材料内部并改变材料电子状态。内光电效应又分为光电导效应和光伏效应。当半导体吸收光子后,半导体内有些电子和空穴从原来的不导电束缚状态转变为能导电的自由状态,使它的电导率明显增大,这种现象称为光电导效应。利用半导体光电导效应制成的红外探测器叫做光电导探测器(简称 PC 器件),它是种类最多应用最

广泛的一类量子探测器。

光电导探测器又可分为单晶型和多晶薄膜型两类。单晶型光电导探测器分为本征型和掺杂型两类,早期以本征型碲化铟(InSb)为主,能探测 $7\mu\text{m}$ 以下的红外辐射,后来发展了响应长波的本征型碲镉汞(HgCdTe)和碲锡铅(PbSnTe)等探测器。掺杂型主要有适用于 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的Ge:Hg及长波限分别在 $30\mu\text{m}$ 处的Ge:Cu、 $21\mu\text{m}$ 处的Ge:Cd和 $7\mu\text{m}$ 处的Ge:Au。多晶薄膜型探测器的种类较少,主要有响应 $1\sim 3\mu\text{m}$ 的硫化铅(PbS)、响应 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的硒化铅(PbSe)和PbTe(碲化铅)^[8]。

pn结及其附近吸收光子后产生电子-空穴对,结间的电场使这两类载流子分开,形成光生伏特电压,这就是pn结的光伏效应,利用光伏效应制成的红外探测器称为光伏探测器(简称PV器件)。光敏电阻、光电二极管和光电池都是根据这种效应制成的。常用的光伏型探测器有砷化铟(InAs)、碲镉汞(HgCdTe)和光伏型碲化铟(InSb)。

除以上三种主要光电效应外,还有其他许多不太重要的效应,如光电磁效应、光子牵引效应、光电晶体管、红外量子计数器、磷光体和红外照相胶片等^[9]。

量子探测器的优点:

- ① 探测器响应度与波长有关,探测器响应是有区间的。例如,碲化铟(InSb)响应区间为 $3\sim 5.6\mu\text{m}$;碲镉汞(HgCdTe)响应区间为 $8\sim 14\mu\text{m}$ 。
- ② 探测器响应频率快,能分辨高频脉冲($< 1\text{GHz}$)辐射。
- ③ 量子效率高,探测器很灵敏。
- ④ 对长波探测器需要制冷,波长越长,制冷温度越低。开发能在高温下工作的探测器是发展趋势,在灵敏度要求不高时,可采用常温下工作的热探测器。

(2) 热电探测器。

热电探测器利用材料的热效应而制成。某些材料因吸收红外辐射后,其温度发生变化,从而导致材料某些性质的变化^[9]。热电探测器有以下几种:

- ① 热敏电阻红外探测器。它是一种根据物体受热后电阻会发生变化的性质而制成的红外探测器。它是一种无选择探测器,从X射线到微波波段都可响应。它的时间常数大,为毫秒级。一些红外测温仪常用此探测器。

- ② 温差电堆探测器(热电堆探测器)。两种不同的导体以及它们之间的接头所组成的电路中,一个接头受热,回路就会产生电压,这种效应称为温差电效应。利用温差电效应制成的感温元件称为温差电偶(也称热电偶)。器件接头上因吸收辐射而出现温度差时,称该器件为辐射温差电偶。几个热电偶串联,可组成辐射温差热电堆。辐射温差电堆通常的制作方法是在衬底上蒸发一层金属薄膜,然后再蒸发第二种金属,并与第一层金属膜部分重叠,从而形成若干接头。采用蒸发技术制成的热电堆时间常数可达毫秒级。红外测温仪常用此探测器。