

量子点红外探测器 性能表征与评估

刘红梅 著



科学出版社

山西大同大学著作出版基金资助

量子点红外探测器性能 表征与评估

刘红梅 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从量子点红外探测器的应用背景、发展现状以及探测器相关基础理论入手,着重研究了量子点红外探测器在无光照情况下和有光照情况下的特性表征、评估问题,系统地分析了垂直入射模式和斜入射模式对量子点红外探测器性能的影响,给出了探测器的常见仿真设计方法。本书遵从量子点红外探测器的实际探测机理及满足的科学规律,将探测器微观载流子运动行为和探测器宏观性能参数有效结合,对量子点红外探测器的暗电流、噪声、增益、光电流、响应率、探测率等参数的评估问题有独特的见解,具有科学性、学术性、专业性和创造性。

本书在涵盖了量子点红外探测器相关知识的基础上,还给出了探测器结构参数、材料参数、工作环境参数等对量子点红外探测器性能的调控作用,可供光电探测器相关专业的研究人员和工程人员学习和阅读。

图书在版编目(CIP)数据

量子点红外探测器性能表征与评估 / 刘红梅著. — 北京: 科学出版社, 2018.12

ISBN 978-7-03-059335-1

I. ①量… II. ①刘… III. ①量子—红外探测器—性能—研究 IV. ①TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 249464 号

责任编辑: 王 哲 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京中石油彩色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

*

2018 年 12 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2018 年 12 月第一次印刷 印张: 13

字数: 252 000

定价: 96.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介

刘红梅，女，生于 1980 年 3 月，山西山阴人，中共党员，山西大同大学物理与电子科学学院副教授，太原理工大学硕士研究生导师，山西师范大学硕士研究生导师。2012 年毕业于西安电子科技大学技术物理学院光学工程专业，获得工学博士学位。

近年来一直从事光电探测器的研究，尤其是量子点红外探测器的物理建模、器件仿真、探测机理以及性能评估等方面的工作，包括研究影响不同光电探测器件及系统特性的结构、效应、机理、技术等因素，并预测、评价、估算不同应用条件下的探测器件及系统的性能。

目前已在国内外期刊发表论文 30 余篇，以第一作者发表的 10 篇论文被 SCI 收录，其中在 *IEEE Photonics Journal* 发表的论文 *Photodetection of infrared photodetector based on surrounding barriers formed by charged quantum dots* 受到同行的高度评价。申请专利 10 多项，以第一发明人申请专利 8 项。主持了国家自然科学基金项目 (No.61307121)、山西省应用基础研究项目 (No.201701D221096)，并参与了多项国家级、省部委项目，如国家自然科学基金青年基金项目 (No.11504212)、航空基金项目 (No.20122481002)、山西省应用基础研究项目 (No.201701D121038) 等。

前 言

红外辐射是指波长范围介于可见光与微波之间的电磁辐射，其对应的波长为 $0.78\sim 1000\mu\text{m}$ ，具有与无线电波和可见光一样的本质，但人眼对其不敏感，因此人们研发了红外探测器来实现对它的观察和检测。具体来说，红外探测器是一种以红外辐射信息为理论基础的探测器，能将物体表面或物体的某一部分发射的红外辐射转变成实际所需要的、可测量的信息(如电、热等)，从而将人类的感知领域拓展到裸眼看不到的红外辐射光谱区。这种探测器具有环境适应性好、隐蔽性好、能以被动方式工作等特点，可广泛地应用到雷达系统侦察、航空航天红外遥感、成像制导跟踪、红外对抗、夜视、天文学观察、医疗成像、环境监测、农产品杀菌和保鲜等领域。

红外探测器综合了光学、机械学、电子学等方面的技术，并随着这些相关技术的发展而发展。1940 年以前，市面上主要使用的是热探测器，如温差热电偶探测器、热释电探测器等。1940 年以后人类进入了光子探测器的时代，它克服了热探测器响应较慢的缺点。首次出现的光子探测器是响应波长为 $3\mu\text{m}$ 的 PbS 探测器，后续 Ge:Hg、PbSe、Ge:X、InSb、HgCdTe 红外探测器陆续研制成功。其中，HgCdTe 探测器由于可以通过调节 Cd 和 Hg 的含量来控制探测器的性能，逐渐成为探测器应用市场的主流。然而 HgCdTe 探测器也存在材料结构完整性差、均匀性差等问题，很大程度上限制了其在大面积焦平面器件中的应用。要脱离这个困境，人们必须寻求性能更优越的低维探测器来满足实际发展的需求。GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器能借助异质结界面的量子效应吸收红外辐射，性能比传统的体相探测器(如 HgCdTe 探测器)更优越，唯一的局限性是不能直接探测垂直入射红外光，需要借助光电耦合装置来攻破这个难题。因此，为了克服这一缺点，人们把半导体的维数进一步降低得到了量子点红外探测器。量子点红外探测器是一种采用量子点纳米结构为光敏区的新型低维探测器，能通过子带间的跃迁实现光探测，其量子效应更加明显，且性能也更加优越，不仅能直接探测垂直入射到光敏区的红外辐射光，还显示出比量子阱红外探测器更加优越的特性，如更长的弛豫时间、更大的增益、更高的探测率等。然而此类探测器在提升性能的同时，也使影响其性能的因素发生了明显的变化，而以往探测器性能评估方法没有充分考虑这些因素的影响，因此非常有必要对量子点红外探测器的性能表征、评估方法进行研究，以期适应其优化设计、总体性能评价、质量控制等的应用需求。基于这种现状，本书根据量子点红外探测器的结构特点，以红外探测器的综合性能为基础，通过分析探测器内部的物理机制、载流子运动情况等，结合探测器的材料参数、结构参数、外部环境参数等，构建了合理、恰当、

有效的探测器性能模型,对量子点红外探测器的性能表征、评估问题进行了研究,实现了对探测器的性能参数(包含探测器暗电流、噪声、增益、光电流、吸收系数、响应率、探测率等)的准确预测和评价。

本书是作者在近十年从事光电探测器方面研究工作的基础上完成的,具有很强的专业性、可读性,特别强调了探测器内部载流子微观运动、结构参数、材料参数、工作环境参数等与探测器众多光电性能参数(如光电流、响应率等)之间的关联性。

全书共分为7章。第1章介绍了红外探测器的应用背景、意义,并给出了红外探测器的发展历程、现状以及本书的内容及章节安排。第2章给出了量子点红外探测器的基本理论,包括红外辐射理论、量子点纳米材料、量子点红外探测器的结构、探测原理、制备技术、特性参数等方面的内容。第3章通过考虑微米、纳米尺度电子传输构建了量子点红外探测器的暗电流模型,并对探测器 R_0A 特性的评估方法进行了拓展研究。第4章构建了量子点红外探测器的噪声模型,解决了探测器噪声的准确估算问题。第5章从电子激发和电子连续势能分布两个角度建立了量子点红外探测器的性能模型,实现了量子点红外探测器光电流、响应率、探测率的准确表征和评估。第6章分析比较了斜入射模式和垂直入射模式下量子点红外探测器的光电性能。第7章介绍了量子点红外探测器的设计及优化方法。

作者在撰写本书的过程中,得到了单位领导的大力支持、导师的悉心教诲及同事的热心帮助。在此,谨向学校领导、导师、同事以及所有关心帮助过我的人们表达最诚挚的谢意。此外,本书的写作过程中参阅了众多的国内外书籍、文章等资料,在此谨向各作者表示衷心的感谢。

此书的出版得到了国家自然科学基金项目(N型量子点红外探测器性能评估, No.61307121)、山西省应用基础研究项目(量子点红外探测器光电性能表征研究, No.201701D221096)和山西大同大学著作出版基金的资助。

刘红梅

2018年8月于山西大同大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 红外探测器的研究背景及意义	1
1.2 红外探测器的发展历程	7
1.3 量子点红外探测器性能评估的研究现状	12
1.3.1 无光照情况下探测器的特性	13
1.3.2 光照情况下探测器的特性	14
1.3.3 入射模式对探测器特性的影响	15
1.4 本书的基本内容及结构	17
1.4.1 基本内容	17
1.4.2 章节安排	19
1.5 本章小结	20
参考文献	21
第 2 章 量子点红外探测器的基本理论	29
2.1 红外辐射理论	29
2.1.1 黑体辐射定律	31
2.1.2 斯特藩定律	32
2.1.3 维恩位移定律	33
2.2 量子点红外探测器的结构与机理	34
2.2.1 量子点纳米材料	34
2.2.2 量子点红外探测器	36
2.3 量子点红外探测器的制备材料与方法	39
2.3.1 分子束外延生长术	39
2.3.2 金属有机物化学气相沉积法	40
2.3.3 化学溶胶-凝胶法	40
2.4 量子点红外探测器的特性参数	40
2.5 本章小结	43
参考文献	43
第 3 章 量子点红外探测器的暗电流模型	45
3.1 暗电流模型的背景及意义	45

3.2 暗电流模型	46
3.2.1 暗电流基础模型	46
3.2.2 基于电子漂移速度的改进模型	50
3.2.3 基于 Monte Carlo 统计法的改进模型	60
3.3 零偏压下探测器电阻面积乘积 R_0A 特性	64
3.4 本章小结	67
参考文献	67
第 4 章 量子点红外探测器的噪声特性	70
4.1 噪声概述	70
4.2 增益特性	72
4.2.1 类球形势探测器增益特性	73
4.2.2 类透镜势探测器增益特性	77
4.3 噪声特性	81
4.3.1 类球形势探测器噪声模型	81
4.3.2 类透镜势探测器噪声模型	83
4.4 本章小结	88
参考文献	88
第 5 章 量子点红外探测器的性能模型	91
5.1 性能模型的背景及意义	91
5.2 基于电子激发的性能模型	92
5.2.1 性能模型的基本假设	92
5.2.2 性能模型	93
5.2.3 性能模型的结果分析	98
5.3 基于连续势能分布的性能模型	109
5.3.1 基础性能模型	109
5.3.2 基于偏置电压对增益影响的改进模型	126
5.3.3 基于入射光高斯特性的改进模型	131
5.3.4 基于电子漂移速度的改进模型	135
5.3.5 基于量子点周围势垒的改进模型	144
5.4 本章小结	150
参考文献	150
第 6 章 不同入射模式下的探测器特性	154
6.1 背景及意义	154
6.2 垂直入射模式下的探测器特性分析	155

6.2.1 基本原理	155
6.2.2 物理模型	156
6.2.3 仿真结果分析	158
6.3 不同入射模式下的探测器特性比较	163
6.3.1 暗电流特性	163
6.3.2 光照情况下探测器的特性	165
6.4 量子点红外探测器特性优势分析	169
6.4.1 垂直入射模式下的特性比较	169
6.4.2 低暗电流	171
6.4.3 长载流子寿命	172
6.4.4 高探测率	172
6.5 本章小结	172
参考文献	173
第 7 章 量子点红外探测器的仿真与设计	176
7.1 常用的仿真软件介绍	176
7.1.1 基于 Comsol Multiphysics 的仿真与设计	176
7.1.2 基于 FDTD Soulations 的仿真与设计	178
7.1.3 基于 CST Microwave Studio 的仿真与设计	180
7.2 量子点红外探测器的设计实例	182
7.2.1 量子点红外探测器的设计	182
7.2.2 量子点红外探测器的优化	184
7.3 本章小结	194
参考文献	194

第 1 章 绪 论

红外探测技术以独特的优势在众多军用和民用领域得到了广泛的应用，其核心器件——红外探测器是决定其广泛应用的前提和基础。本章首先介绍红外探测技术及其探测器件在军用、民用方面的应用背景及研究意义，进而给出红外探测器的发展历程，之后详细地讨论当前量子点红外探测器性能表征、评估的国内外研究现状，最后针对传统光电导探测器性能表征方法与现有量子点红外探测器结构、探测机制等之间存在的一些不一致问题，给出本书的研究内容及章节安排。

1.1 红外探测器的研究背景及意义

红外辐射又叫热辐射，是指波长范围介于可见光与微波之间的电磁辐射，如图 1.1 所示，其对应的波长为 $0.78\sim1000\mu\text{m}$ ，具有与无线电波和可见光一样的本质。在红外技术领域中，通常把红外辐射光谱区按波长分为近红外 ($0.78\sim3\mu\text{m}$)、中红外 ($3\sim6\mu\text{m}$) 和远红外 ($6\sim15\mu\text{m}$) 和极远红外 ($15\sim1000\mu\text{m}$)^[1]。正是红外辐射在电磁光谱的特殊位置导致其具有光子能量小，热效强，易被物体吸收，能穿透烟、雾、尘、阴影区、树丛等特性，因而在军用和民用领域中显示出极大的实用价值和应用意义，备受广大工程师及科研人员的青睐。当然，红外辐射也有弊端，需要借助外面的设备来实现对它的观察和检测，因此人们发展了红外探测技术，为红外辐射的应用奠定了坚实的基础。

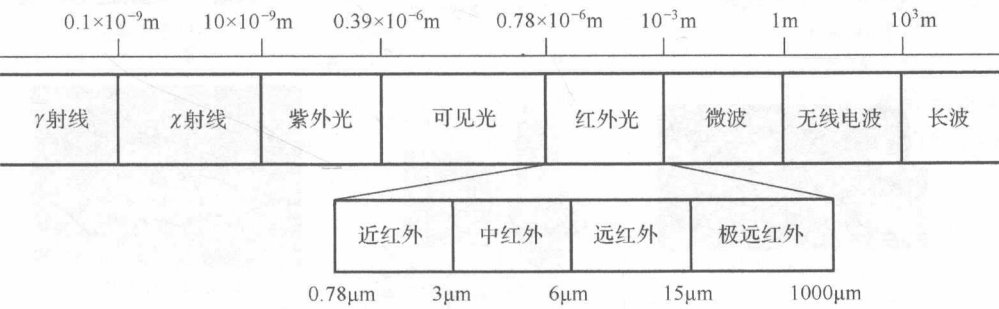


图 1.1 电磁光谱分布示意图

红外探测技术是一种以红外辐射信息为理论基础的探测技术，能根据各种物体或物体的各个部分具有不同的红外辐射特性区分其差异性，把物体表面自然发射的

红外辐射分布转变成实际所需要的、可测量的信息(如电、热等),从而将人类的感知领域拓展到肉眼看不到的红外辐射光谱区^[2]。一般而言,温度在绝对零度以上的物体,都会因自身的分子运动而辐射出红外光,因而与之相应的红外探测技术具有环境适应性好、隐蔽性好、作用距离较远、能以被动方式工作、适用于夜间和恶劣天气下工作、不易被发现和干扰等特点,且相应的探测器件及系统具有体积小、重量轻、功耗低等优点,因而红外探测技术及器件能广泛应用到众多领域^[3,4]。如图 1.2 所示,红外探测技术及器件可以广泛地应用到雷达系统侦察、航空航天侦察、航空航天红外遥感、成像制导跟踪、导弹识别、红外对抗、夜视、空间定位、体育安保监测、光谱学战场、远距离传感、天文学观察、医疗成像、红外自动化工业设备故障诊断、红外测温、环境监测、矿井有害气体探测、农产品杀菌和保鲜、医学病理检查和诊断等领域,因此其在国家安全、国民经济等的发展中具有非常重要的地位。

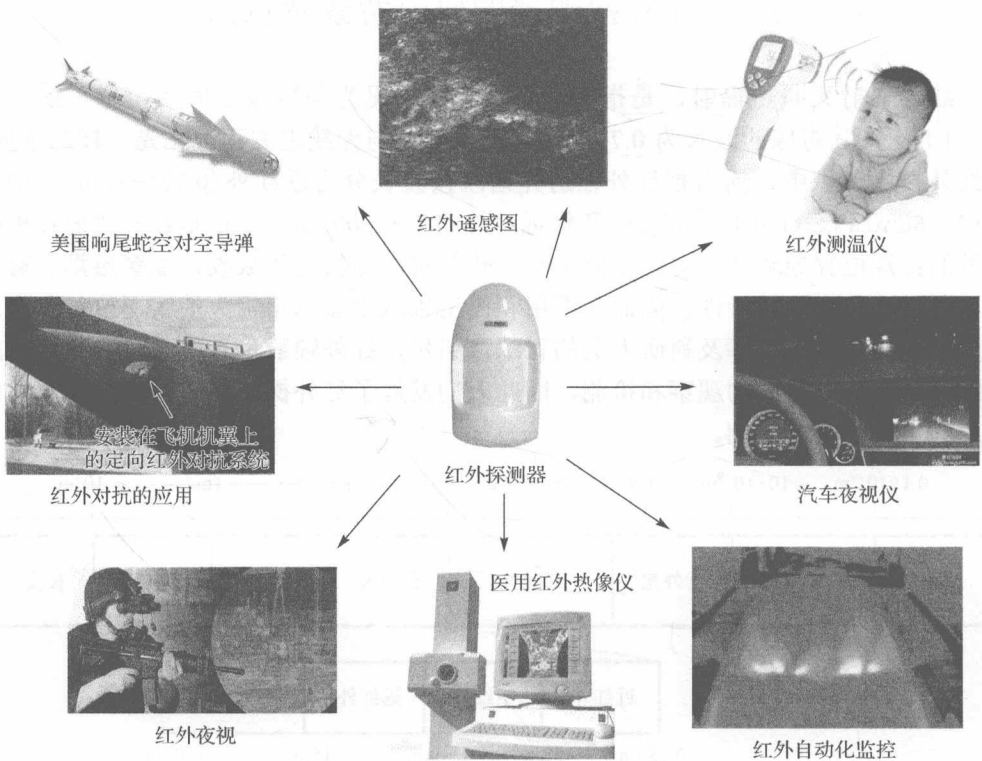


图 1.2 红外探测技术的应用

红外探测技术几乎是一切红外辐射应用的基础,它的发展情况与红外辐射的军事应用息息相关。更确切地说,红外辐射的军事应用一直以来都是红外探测技术发

展最强劲的推动力。红外探测技术在军事领域中最重要和最典型的应用体现在精确制导、侦察预警、红外对抗、红外夜视和红外隐身等方面^[3,5-12]。在红外精确制导应用中,首先通过光学系统接收热目标本身的红外辐射光,经由红外探测设备将其转变为电信号,再经信号处理单元检测出目标位置偏差信息,之后通过陀螺跟踪系统控制光学系统,使其光轴向目标位置的误差方向运动,构成角跟踪回路,从而使导引系统对目标进行跟踪,直到命中为止。该导引系统能完成导弹对目标的精确定位、跟踪,尽可能地实现对目标的准确打击,提高了导弹的命中率。红外制导是空-空、空-地、地-空反坦克导弹中最常采用的工作方式。此外,它还能根据不同物体具有不同的辐射特性,识别各类诱饵,对真目标有较高的命中率。在红外对抗技术应用方面,首先导弹要根据航空目标发出的红外辐射信息来攻击航空目标,而航空目标为了保全自己必然采取反向措施对导弹的攻击进行干扰,使导弹失去控制力而不能正常工作。这样,为了更加准确有效地攻击航空目标,导弹的精确制导系统抗干扰性能必然要进一步地提高。这一航空目标和导弹之间的博弈过程就是众所周知的“红外对抗技术”。本质上来说,红外精确制导技术的不断发展必然迫使红外对抗技术不断地跟进和提高,因而出现了红外干扰、红外诱饵弹、红外侦察预警、红外假目标、红外烟幕、红外隐身等多种先进的技术手段,以达到对抗红外精确制导的目的。

在红外侦察预警应用中,基于红外探测器的红外成像系统能通过被动方式来获取目标自身发出的红外辐射信息,以达到对空间、空中和地面状况的侦察,如发现威胁,立即给出警报。一般而言,大型的或者重要的攻击性武器(像作战飞机、导弹的发动机等)通常拥有很强的热辐射源,这些热辐射源与背景之间巨大的温差必然能给红外成像系统提供有效的辐射信息来提早发现来袭危险,为给出应对措施、解除来袭危险争取了一定的预警时间。具体来说,空间侦察是通过携带红外设备的侦察卫星来获得地面目标的信息,以达到监视和熟知敌方正在进行的军事行动的目的;空中侦察是利用携带红外装置的有人或无人驾驶的侦察机对敌方的阵地、地形等情况进行监视;地面侦察是通过将红外设备隐蔽地布置在被监视区域附近来被动地发现监视目标,并给出其精确方位。在红外隐身方面的应用,目标由于自身的红外特性极易被发现,通过利用红外抑制器,低发射率涂料等技术,降低了目标的红外辐射特性,使目标因为减弱了红外辐射强度而隐身,达到不易被敌方发现的目的。红外隐身技术可以降低武器装备的目标辐射信号,不仅增强了武器自身的隐身性能,而且加大了敌方防御的难度,从而获得了较高的杀伤比,最终达到提升相关武器在战场上的自我生存能力的目的。在红外夜视方面的应用主要体现在各种作战飞机、坦克、军舰、狙击枪等的夜间导航瞄准。例如,如果在飞机的导向吊舱和瞄准吊舱中配备夜视红外设备,那么飞机在夜间飞行和攻击时,导航就能对目标进行精准搜索、跟踪和瞄准,提高了命中概率。当然类似的功能也体现在配有红外瞄准器的反

坦克导弹、狙击步枪、坦克和火炮等武器在夜间对敌方目标进行精确定位、跟踪和射击。

红外探测技术在民用领域的典型应用主要有红外测温、红外成像、消防领域的火灾探测预警、设备内部缺陷检测、食品工业的检测、体育安保监测系统、农产品的检测、太阳能电池、医学诊断、汽车夜视仪以及自动测温贴膜等^[13-19]。具体来说,在红外测温方面,首先通过红外探测器将物体辐射的红外功率信号转换成电信号,该信号经电子系统处理完,传至显示屏上,显示出物体的温度状态和读数。运用上述方法,可以实现对所测试对象或目标的远距离热状态测温,并进行实时监测和分析判断^[20]。该测温方法不需要直接接触被测目标或对象,能实现目标的无损测温,正是这个优势使红外测温仪开始成为测温领域的主流测温器件。基于红外测温的原理,红外热像仪亦是通过光电设备来检测和测量辐射,并在辐射与表面温度之间建立相互联系的系统,主要由红外光学系统、红外探测器组件、电子信号处理系统、显示系统组成^[21]。具体来说,它是通过光学系统和光机扫描系统或者焦平面技术将被测目标或者被测对象的红外辐射能量分布情况照射到红外探测器的光敏区上,由探测器组件将红外辐射能转换成电信号,经电子信号处理系统进行放大处理、转换成标准视频信号,并通过电视屏或监测器显示红外热像图。这种热像图与物体表面的热分布场是一一对应的,其上面的不同颜色代表被测物体的不同温度,也就是说,红外热像仪就是将物体发出的不可见红外能量转变为可见的热图像。通过查看热图像,可以观察到被测目标的整体温度分布状况以及研究目标的发热情况,进行下一步工作的判断和处理。红外热像仪主要的性能参数有热灵敏度、红外分辨率、视场角、空间分辨率、测温范围等,由于其具有不需要接触待测目标、快速生成热分布图像、实时响应等特点,所以可以使用户远离危险、不会侵扰或者影响目标、能比较物体不同区域的温度、利用图像可以观察整体目标、捕获高速移动物体、捕捉高频温度变化的图像等。红外热像仪可以广泛地应用在工业、农业领域,如芯片内部温度测试、元器件极限测试等方面的电子电路研发,或者太阳能电池、新能源电池、充电桩等新能源方面的研究与检测,抑或体育安保系统以及电子健身器件等方面的监测与应用^[22-24]。红外探测技术及器件还可以与其他电子设备相结合构成汽车用品,如汽车夜视仪、自动测温贴膜等汽车电子产品^[25]。消防领域中最典型的应用实例就是红外火灾探测器,它能通过被动方式,在火灾发生之前或之中探测火灾迹象。众所周知,当物体正常工作时整个工作环境的温度场处于平衡状态,如果某时局部物体的温度突然开始升高,必将破坏原有工作环境温度场的平衡状态,而高于环境温度的局部物体升高的温度,最终导致物体向空间辐射的红外能量发生变化。红外火灾探测器就是通过探测现场环境内红外辐射能量的变化情况实现对被保护物体的温度变化实时跟踪和探测,一旦被保护范围内的物体温度超过规定的警戒温度时,马上发出火灾报警信号,以便人们在火灾到来之前提早采取必要措施,避免火灾的

发生。红外探测技术还可用于工业生产系统和设备(如钢炉、轴瓦、发电机等)故障以及内部缺陷的检测。就运行机电设备的故障检测而言,在设备不停止工作的情况下,人们根据设备的红外辐射特性,通过检测机电设备运行中辐射出来的红外能量,将其转变成电信号,经过一系列的信号处理步骤,最后将设备表面的温度变化转换成肉眼可以识别的直观的热像图,这样人们就能通过机电设备的热像图清楚地了解到设备运行时表面温度分布情况的变化,然后根据设备性质、故障程度以及热图像温度信息等,准确且快速地确定机电设备潜在故障的类型、位置和严重等级等,以便安排维修,确保设备安全运转。当然,机电设备的内部缺陷也可以通过类似的方法来进行诊断。总之,与传统的接触性诊断方法相比,这种非接触性探测技术在诊断时不需要直接接触机电设备,不仅大量节省了人力、财力,而且能快速、方便、形象直观地显示出设备的问题所在,减少了对生命安全威胁的同时,还具有高灵敏度、高效率等特点。红外探测技术也可以用在农产品的加热杀菌、干燥、收购和运输中。例如,将红外辐射技术与芹菜、荔枝等农产品的干燥过程相结合,不仅能强化这些农产品的干燥过程,提高农产品的干燥品质,而且能进一步为这些农产品收获后的保鲜、干燥和综合利用制定相应的操作工艺,并精准控制这些操作过程,为后续农产品的封装和运输技术提供了可靠的方法和途径。此外,红外探测技术在遥感方面的应用也是不可忽视的,通过应用各种探测器对远距离目标反射或者自身辐射的红外辐射信息进行收集处理并成像,从而实现对地面各种景物的探测和识别。如果用于植被探测,能确定地面物体的性质、病虫害状况、生长状态和变化规律等;当然它还能用于森林火情的检测,海洋生态环境污染的检测,地质、地矿、地热、水资源以及土壤地质构造的调查和探测等方面。地球遥感时代开始于1972年由美国发射的第一颗地球资源技术卫星^[26]。之后在半导体技术、微电子技术等的推动下,1983年美国喷气推进实验室(jet propulsion laboratory, JPL)成功研制了第一台成像光谱仪^[27],标志着红外遥感技术进入了蓬勃发展的时代。在医疗方面,红外探测技术可以用于患者身体内早期肿瘤的诊断和辨别,而且基于红外辐射特有的热效应,有望在临床上进一步利用近红外技术对肿瘤进行热疗治疗。

综上所述,红外探测技术在军事和民用方面都有着非常重要的应用价值和意义,对国家安全、国民经济的发展起着重要的推动作用。也正是这种推动作用促使红外探测技术不断向前发展,性能不断提升。红外探测技术是一门主要以光学、机械学、电子学为基础的综合性学科,而且随着这些相关技术的发展而发展。20世纪70年代起,随着微电子技术和信号处理技术的快速发展,红外系统从利用光机扫描结构和模拟信号处理技术实现二维成像的点元红外探测器或线列红外探测器,向采用时间延迟积分技术(time delay integration, TDI)的扫描型红外成像系统和凝视型红外成像系统发展,并向多光谱成像系统迈进。伴随着红外系统的这一发展进程,红外系统的核心器件——红外探测器也发生着很大的变化。从材料上看,探测器从传统的

碲化铟(InSb)、硅化铂(PtSi)和碲镉汞(HgCdTe)向 III-V 族元素发展;从原理机制上看,出现了各种利用半导体异质结中的量子效应工作的新型红外探测器,例如,量子阱红外探测器、量子点红外探测器和 II 类超晶格红外探测器。人们通过使用不同禁带宽的半导体材料进行外延生长,构造出能带不连续的半导体异质结。正是通过形成这些类型不同的异质结结构,人们构造出性能差异很大的新型探测器。例如,量子阱红外探测器(quantum well infrared photodetector, QWIP)由于跃迁选择定则的限制不能直接探测垂直入射光,并且有比较窄的红外响应区,而量子点红外探测器(quantum dot infrared photodetector, QDIP)恰好能吸收垂直入射的红外光,有望克服量子阱红外探测器的这些缺点。总之,这些新型探测器以优于其他探测器的特性受到了广大研究者越来越多的重视和关注。

在红外探测器的整个发展历程中,如何将探测器件整体所涉及的各种材料特性、各种技术进行匹配设计来获取最佳的器件性能,始终是广大研究人员所要解决的关键技术问题。而要解决此关键问题,就需要将红外探测器基本结构和材料参数与探测器综合性能指标有效结合,建立探测器的性能模型,并通过与器件实验测量结果进行比较来验证器件性能模型的正确性,以作为器件优化设计的可靠依据。此外,纵观红外探测器的发展历程,红外探测器的优化设计与器件性能表征和评价是紧密联系的,而且红外探测器的优化设计也是以红外探测器的性能表征和评估为基础开展的。

红外探测器的性能表征和评估是红外探测器总体技术的重要组成部分。最常见的表征和评估探测器性能的方法有试验测试法、半实物仿真法和性能理论模型法^[28]。试验测试法由于不能在复杂多变的环境下进行而受到很大的限制。半实物仿真法由于需要建立昂贵的红外场景投影系统得不到广泛的应用。此外,试验测试法和半实物仿真法都只能针对已研制定型的器件的特性进行预测和评价,对于所设想或设计中的探测器件无法开展其性能的预测评价。性能理论模型法是以红外探测器件的综合性能参数为基础,通过理论分析器件各组成部分的物理特性,结合各种材料参数、结构参数、外部环境参数等之间的关系,建立相应的数学模型,借助计算机进行模拟和仿真,对红外探测器件的性能进行预测和评价。与前面两种方法相比,这种方法不仅可避免烦琐的实验、节约研究经费,还可为红外探测器的优化设计和分析提供理论依据,缩短了相应的器件设计周期,提高了工作效率。

随着人类在探测领域的不断扩大和深入,高性能红外探测器的需求也将不断地增加。另一方面,科学的进步使新工艺、新结构和新技术不断涌现,同样也推动着人们不断地构造出高灵敏度、探测率等综合性能好的新型探测器。这必然迫使探测器的理论建模及系统性能表征和评估要不断更新,以适应不断发展的探测器设备的优化设计、总体性能评价、质量控制等的应用需求。基于上面的这些分析,本书针对影响新型量子点探测器性能的因素(包含结构参数和材料参数),采用性能理论模

型法研究了表征、评估探测器件性能的新方法，建立了合理、恰当、有效的探测器性能的物理模型。该方法通过将器件的结构参数、材料参数、工作环境参数等与器件的主体性能有机结合来预测探测器件的众多特性和性能，为红外探测器设计者在进行器件优化设计时提供可靠的参考依据和技术指导。

1.2 红外探测器的发展历程

早在 1666 年，英国物理学家牛顿发现，太阳光经过三棱镜后分裂成彩色光带——红、橙、黄、绿、青、蓝、紫，这条彩色光带就是我们所说的“可见光”。之后，1800 年英国天文学家威赫歇尔 (Herschel) 在用水银温度计研究太阳光谱的热效应时，发现热效应最明显的位置不在可见彩色光带的波长范围内，而是位于红光之外^[29]。由此认定红光之外存在一种特殊的光，它最显著的特征就是热效应。后来实验证明，这种光与可见光类似，能发生反射、透射、折射等现象，且满足电磁波的运动规律，但人眼看不到这种光，我们称之为红外光，或者称为“红外辐射、红外线”，自此以后红外辐射进入了人类视野。随着对红外辐射认知的越来越深，人们逐步意识到通过分辨和探测不同物体或者物体不同部分的红外辐射信息可以实现对目标的精确跟踪、制导、电子对抗等。而且在时间的推移和科学技术的不断推动下，红外探测技术获得了长足的发展，已广泛应用到众多领域。红外探测器是红外探测技术的核心器件，其发展水平的高低直接决定着红外探测技术的应用能力和范围。第二次世界大战以后，红外技术在军事中的巨大应用潜力不断地显现出来，人们便真正开始了努力寻找性能优越的红外探测器的旅程。从此，红外探测器进入了飞速发展的时期，很快地从最初的热探测器发展到了性能优良的半导体光子探测器。

图 1.3 详细地给出了探测器发展的整个历程^[30]。1940 年以前，由于技术的限制，市面上主要使用的是热探测器，如温差热电偶探测器、电阻测辐射热计、热释电探测器等。其中热电偶探测器的工作原理为：将温差热电偶的冷端分开并与一个电表相连，那么当光照熔接端时，吸收光能使热电偶接头温度升高，电表就有相应的电流读数，其数值间接反映了光照能量的大小。这些热探测器都是利用材料特性对温度的敏感性来探测红外辐射能量的，虽然它们工作时无需冷却，适合在室温下使用，也无需偏压电源，且结构简单、实用方便，具有较宽的响应波长范围，可以实现远紫外到远红外的波谱范围内的均匀光谱响应，但也存在着高频时探测率低、响应时间太慢等不足之处。1940 年以后，随着半导体技术的发展，人类进入了光子探测器的时代。光子探测器是通过光子与电子间的相互作用来实现对红外辐射能量的探测。这类探测器克服了热探测器对入射光响应较慢的缺点，能快速对入射的红外光进行响应，成为目前市场上使用率最高的探测器。

