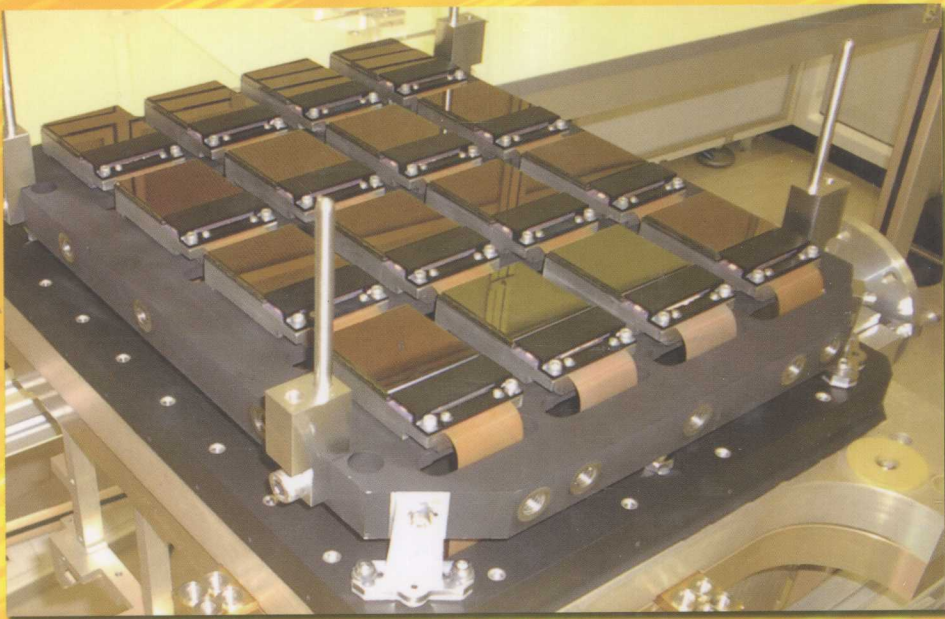


INFRARED DETECTORS

SECOND EDITION

红外探测器

(原书第2版)



(波兰) Antoni Rogalski 著
周海宪 程云芳 译
周华君 程林 校

014035766

TN215
08

红外探测器

(原书第2版)

(波兰) ANTONI ROGALSKI 著
周海宪 程云芳 译
周华君 程林 校



机械工业出版社



北航

C1723066

TN215
08

本书有三个鲜明特点：第一，内容十分丰富，该书由四部分 23 章组成，概述了红外探测器的发展史，详细介绍了各种红外探测器的当前状况，同时根据相关理论预测了其性能极限；第二，内容非常系统，不仅介绍了红外探测技术的基础知识，而且还较为详细地阐述了各种类型的探测器，可使读者对红外探测器有全面了解，又能侧重自己从事的研究项目；第三，内容极具先进性，囊括了各种成熟的红外探测器和研究课题，同时介绍了曾经研究但尚未完全成功应用的一些项目，分析了其中的主要原因，指出未来可能的发展方向。

本书参考了大量的会议文献和技术资料，并根据原书作者研究团队的研究成果和经验，分析和列出了目前已经达到的最高性能，无疑给读者提供了一个参考基准，是一部非常有价值的参考书。

本书可供光电子领域特别是航空航天方向从事红外光学仪器设计、器件设计及研究的工程师和研究人员使用，也可作为大专院校相关专业师生的参 考用书。

Infrared Detectors, second edition/by Antonio Rogalski/ISBN: 9781420076714

Copyright ©2011 by Taylor and Francis Group, LLC.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售。

本书版权登记号：图字 01-2012-1007 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

红外探测器：原书第 2 版/（波）罗格尔斯基（Rogalski, A.）著；周海宪等译. —北京：机械工业出版社，2014. 1

书名原文：Infrared detectors

ISBN 978-7-111-45197-6

I. ①红… II. ①罗…②周… III. ①红外探测器 IV. ①TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 304400 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：王 欢 责任编辑：王 欢

版式设计：霍永明 责任校对：刘志文

封面设计：赵颖喆 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷（三河市胜利装订厂装订）

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 52.5 印张 · 2 插页 · 1306 千字

0 001—2 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-45197-6

定价：268.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010) 68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

在自然界中，温度高于绝对零度的任何物体，都会不断地向四周辐射红外谱线，物体各部位温度不同，辐射率不同，就会显示出不同的辐射特征。物体发出的辐射，都要通过大气传输才能到达红外接收装置。由于大气中二氧化碳、水蒸气等气体对红外辐射会产生选择性吸收和微粒散射，使红外辐射发生不同程度的衰减。通常，将红外大气窗口（简称红外窗口）分为近红外（Near Infrared, NIR）（ $0.76 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ）、短波红外（Short Wavelength Infrared, SWIR）（ $1 \sim 3 \mu\text{m}$ ）、中波红外（Medium Wavelength Infrared, MWIR）（ $3 \sim 6 \mu\text{m}$ ）、长波红外（Long Wavelength, LWIR）（ $6 \sim 15 \mu\text{m}$ ）、甚长波红外（Very Long Wavelength Infrared, VLWIR）（ $15 \sim 30 \mu\text{m}$ ）、远红外（Far Infrared, FIR）（ $30 \sim 100 \mu\text{m}$ ）和亚毫米波（Submillimeter, SubMM）（ $100 \sim 1000 \mu\text{m}$ ）。但目前，最常使用的三个是近红外、中波红外和长波红外（包括军事和民用）。

众所周知，人眼能直接感知的光谱范围是 $400 \sim 700 \text{nm}$ ，而红外线是一种人眼不可见的光波。红外探测技术是利用目标与背景间的红外辐射差所形成的热点或图像获取目标及背景信息。由于红外系统所探测的目标处于各自的特定背景之中，从而使探测过程复杂化。因此，在设计红外系统时，不但要考虑红外辐射在大气中的传输效应，还要采用抑制背景技术以提高红外系统探测和识别目标的能力。

根据全国科学技术名词审定委员会确定的规范，红外探测器定义为：能把接收的红外辐射能量转换成一种便于计量的物理量的器件。因此，红外探测器（Infrared Detector）是非常关键的器件，它要察觉红外辐射的存在并测量其强弱，并可以将入射的红外辐射经光电转换，变为肉眼可观察的图像。

在原理上，红外探测器可以分为两大类：热探测器和光子探测器。

第一类热探测器，在吸收红外辐射后，使探测材料的温度、电动势、电阻率及自发极化强度等发生变化，根据这些变化就可以测定探测目标的红外辐射能量或功率。热探测器包括①高莱气动红外探测器；②热电偶和热电堆；③非制冷红外成像阵列；④测辐射热计（热敏电阻）；⑤热释电探测器。第二类光子探测器，在吸收光子后产生内和外光电效应，从而可以测定吸收的光子数。光子探测器包括①光电导探测器（光敏电阻）；②光伏探测器；③光发射肖特基（Schottky）势垒探测器；④量子阱红外探测器（Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP）。

由于红外探测技术有其独特优点：①环境适应性好，在夜间和恶劣气候条件下的工作能力优于可见光；②隐蔽性好，不易被干扰；③识别伪装目标的能力优于可见光；④体积小、重量轻、功耗低。因此，红外探测器在军事、国防和民用领域都得到了广泛研究和应用，特别是在军事方面的强烈需求和相关技术发展的推动下，作为高新技术的红外探测技术未来将会有更加广泛的应用和极其重要的地位。

绝大多数红外探测器的研究和发展都是为了满足军事需求。虽然，20世纪最后10年以来，和平领域的应用不断增大，如全球监控环境污染和气候变化、对农作物产量的长期预

测、化学工艺监控、傅里叶变换红外光谱术、红外天文学、汽车驾驶、医学诊断中的红外成像以及其它领域中的应用（如刑侦、安全防范、森林防火、电力及通信巡线、场院看护等）。但至今，绝大多数红外探测器应用仍以军事应用为主，如反装甲（坦克）武器制导、防空武器制导、舰载火控、前视红外（Forward Looking Infrared, FLIR）成像系统、红外搜索跟踪（Infrared Search and Track,IRST）系统，点源探测和成像系统以及导弹导引头等。在夜间和恶劣气候条件下，在高强度电子对抗、光电对抗的战场环境中，红外探测系统的优越性得到更充分的发挥。另外，大气层外空间最适用的是红外探测系统。红外探测是空间探测、侦察卫星、导弹预警卫星采用的主要手段，也是气象、资源普查、遥感卫星必备的探测方式。

一个理想的红外探测器应当具备下述条件：①良好的线性输入-输出特性；②高量子效率（或者高探测率）；③正常条件（非低温或超低温）下可靠工作；④响应速度快，时间常数小；⑤工作波段应与被测目标的辐射光谱相适应。对红外探测器的研究主要集中在以下几个方面：

1) 充分利用大气窗口，探测器光谱响应从近红外光谱扩展到长波红外光谱，甚至甚长波红外光谱；

2) 实现对目标的非制冷探测；

3) 从单元器件发展到多元、“凝视”型焦平面阵列，以及探测器与读出电路实现单片集成，从而无需笨重和缓慢的光机扫描模式；

4) 采用镶嵌式结构，满足大尺寸红外探测器的需求；

5) 由单波段发展到双波段甚至多波段的红外探测器。

研制新一代红外探测器涉及物理、化学、材料、机械、微电子、计算机等诸多学科，并都是各领域的高端科学技术，如红外材料生长工艺（MBE、LPE[⊖]等）、新型材料和器件的研制技术（二极管和异质结结构）、先进的测试和封装方法、精密的光学机械制造技术（二元光学透镜阵列、微透镜阵列和微光机电系统）以及硅读出集成电路（Readout Integrate Circuit, ROIC）和数字处理技术等。

近20年来，红外探测器技术发展极其迅速，新型红外材料（如三元合金和四元合金）、微米和纳米光学制造技术（如微光学、微机电学和微光机电系统制造技术）、分子束外延（MBE）生长技术、量子阱（Quantum Well, QW）和量子点（Quantum Dot, QD）生长工艺对红外探测器的快速发展起着重要作用，使红外探测器从概念到性能都有了极大突破，红外探测器技术发生了很大变化。在此期间，召开了一系列有关红外探测器技术的国际会议，发表和公布了大量的相关文章及数据，提供了大量珍贵的参考文献。为了与时俱进地适应上述变化，同时使光电子学领域的研究人员更加系统和完整地理解红外探测器新的设计、制造和封装技术，出版一本“红外探测器”专著势在必行。安东尼·罗格尔斯基（Antoni Rogalski）教授撰写的本书英文原版——《红外探测器（Infrared Detectors）》——应运而生，而第2版在第1版（2000年）的基础上进行了重大修订。

安东尼·罗格尔斯基（Antoni Rogalski）先生分别于1976年和1982年获得技术物理学

⊖ MBE: Molecule Beam Epitaxy, 分子束外延。

LPE: Liquid Phase Epitaxy, 液相外延。

和电子学方面的学术研究型博士和理学博士，是波兰华沙军事技术大学应用物理研究所教授、所长和固体物理系主任，并担任波兰及他国多所大学的客座教授；一直致力于红外光电子学，尤其是红外探测器的研究和教育事业，是红外光电子领域最主要的研究者和国际资深专家，2004年被推选为波兰科学院院士。在其科学研究生涯中，对不同类型的红外探测器理论、设计及制造技术都做出了开拓性贡献，尤其在红外探测器三元合金结构研究中，发明了一种新的碲镉汞（HgCdTe）三元合金探测器，例如铅盐、InAsSb、HgZnTe和HgMnTe，也因此于1997年获得了波兰自然科学基金奖（波兰最具声望的奖项）。

安东尼·罗格尔斯基教授取得的主要科学成就包括确定了InAsSb、HgCdTe、HgZnTe、HgMnTe和铅盐的主要物理参数；确定了三元合金探测器的最终性能；精心从事 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\mu\text{m}$ 光谱范围内高质量PbSnTe、HgZnTe和HgCdTe光敏二极管的研究。在他的带领下，对HgCdTe光敏二极管与其它类型光子探测器（尤其是量子阱红外光探测器和量子点红外光探测器）的性能极限进行了比较性探讨。

安东尼·罗格尔斯基教授在国际会议上做过约50次特邀报告，作为作者和共同作者发表过200多篇科技论文和11本著作，并参加了13本著作有关章节的编写。他是国际光学工程协会（International Society of Optical Engineering, SPIE）成员，波兰光电子委员会副主席，波兰科学院电子通信分部副主席，《Opto-Electronics Review》杂志总编辑，波兰科学院院刊《Technical Science》副主编，《红外和毫米波（Infrared and Millimeter Waves）》期刊和《国际物理述评（International Review of Physics）》杂志编委。同时，安东尼·罗格尔斯基教授是国际技术委员会的热心成员，是光电子器件和材料科学领域国内外众多会议的科学委员会成员、组织者、主席和共同主席。

本书有三个鲜明特点：第一，内容十分丰富，该书由四个部分共23章组成，包括638幅插图和90个列表，既概述了红外探测器的发展史（从第一个红外探测器诞生开始），又详细介绍了各种红外探测器的当前状况，同时根据相关理论预测了其性能极限；第二，内容非常系统，不仅介绍了红外探测技术的基础知识，而且还较为详细地阐述了各种类型的探测器，因此，既可以使读者对红外探测器有全面了解，又能侧重自己从事的研究项目；第三，内容极具先进性，该书囊括了各种成熟的红外探测器和研究课题；同时，还介绍了曾经研究但尚未完全成功应用的一些项目，分析了其中的主要原因，指出未来可能的发展方向。本书参考了大量的会议文献和技术资料，并根据研究成果和经验，分析和列出了目前已经达到的最高性能，无疑给读者提供了一个参考基准，是一部非常有价值的参考书。

本书由四部分共23章组成：

第 I 部分 红外探测技术的基础知识

第 1 章 辐射度学

第 2 章 红外探测器的性质

第 3 章 红外探测器的基本性能极限

第 4 章 外差式探测技术

第 II 部分 红外热探测器

第 5 章 温差电堆

第 6 章 测辐射热计

第 7 章 热释电探测器

- 第 8 章 新型热探测器
- 第Ⅲ部分 红外光子探测器
 - 第 9 章 光子探测器理论
 - 第 10 章 本征硅和锗探测器
 - 第 11 章 非本征硅和锗探测器
 - 第 12 章 光电发射探测器
 - 第 13 章 III-V 族 (元素) 探测器
 - 第 14 章 碲镉汞 (HgCdTe) 探测器
 - 第 15 章 IV-VI 族 (元素) 探测器
 - 第 16 章 量子阱红外光电探测器
 - 第 17 章 超晶格红外探测器
 - 第 18 章 量子点红外光电探测器
- 第Ⅳ部分 焦平面阵列
 - 第 19 章 焦平面阵列结构概述
 - 第 20 章 热探测器焦平面阵列
 - 第 21 章 光子探测器焦平面阵列
 - 第 22 章 太赫兹探测器和焦平面阵列
 - 第 23 章 第三代红外探测器

在本书中文版的翻译、出版过程中,与安东尼·罗格尔斯基教授进行了充分的讨论和沟通,对原书中的印刷错误进行了修订,增加了“译者注”。为使读者更准确地理解和使用本书,保留了英文参考文献。

周海宪主要翻译了第 1~22 章,程云芳主要翻译了第 23 章。在美国工作的周华君和程林先生也参加了翻译工作,并对全书进行了认真核对。高级工程师张良、曾威、贾俊涛和程云芳完成了部分翻译工作之后,还对全书做了专业核对和最终审核。

本书的出版得到了清华大学教授、中国工程院院士金国藩先生,波兰华沙军事技术大学应用物理学院教授、波兰科学院院士安东尼·罗格尔斯基先生,北京理工大学王涌天教授的极大支持;参加翻译工作的还有常本康教授,孙隆和、祖成奎、孙维国和黄存新研究员,翟文军高级工程师,汪江华和李沛工程师,刘永祥、李志强、郭世勇、鲁保启、金朝瀚、郭华鹏、王增光、李艳、韩鹏、周华伟、张庆华、仇志刚等。

机械工业出版社电工电子分社的牛新国社长和王欢编辑对本书的出版给予了非常大的鼓励和支持,在此特别致以谢意!

本书可供工作在光电子学领域、空间传感器及系统、遥感、热成像、军事成像、光通信、红外光谱学、光探测和测距(利用 LIDAR)领域从事红外探测器设计和制造、光电子仪器总体设计、光学系统和光机结构设计的设计师和工程师阅读,也可用作大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。希望本书能够对军事、航空航天、天文学和民用光学仪器的设计和制造提供有益指导。

译者

2013 年 12 月

原书前言

红外探测器的技术进步主要与光子探测器领域半导体红外探测器的发展有关。半导体红外探测器既有理想的信噪比性能，又有非常快的响应。然而，为了达到此目的，需要对光子探测器低温制冷。为了满足半导体光电探测器为基础的红外系统的制冷需要，系统会制造得很笨重、成本很昂贵且不便使用，所以制冷需求就成为较广泛使用此类红外系统的主要障碍。

直到 20 世纪 90 年代，尽管进行了大量的研究工作，并且期望能够在室温下工作并且成本较低，但是，与热成像应用中的制冷光子探测器相比，热探测器的研究所获得的发展很有限；只有热电光导摄像管受到了更多注意，希望寻找某些实际的应用。在 20 世纪 80 年代和 90 年代初期，美国的许多公司（尤其是德州（Texas Instruments）仪器公司和霍尼韦尔（Honeywell）实验室）按照不同的热探测原理开展器件的研发工作，在 20 世纪 90 年代中期，该类项目的研制成功使美国国防部高等研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）减少了对碲镉汞（HgCdTe）项目的支持，试图在非制冷技术方面能取得大的飞跃；同时，希望生产具有良好性能的阵列，而对大相对孔径（或小 F 数）长波红外光学系统无需进行大的修改。

为适应红外探测器的这种新变化，必须综合介绍红外探测器物理学基础知识和工作原理，以及重要的参考文献。为此，2000 年我首次编写出版了《红外探测器（Infrared Detectors）第 1 版》一书。此后 10 年，在探测器概念和性能方面都有了极大突破，已经发生了很大变化。显然，对本书内容必须进行重大修订。

本书（第 2 版）对第 1 版 70% 的内容进行了重新修改和更新，许多材料经再次组织和整理。本书分为四个部分：红外探测器基础知识，红外热探测器，红外光子探测器和焦平面阵列。第 I 部分对该技术课题做了简单介绍，是整体了解不同类型红外探测器和系统的基础；第 II 部分阐述不同类型热探测器的理论和技术；第 III 部分介绍光子探测器的理论和技术；第 IV 部分是红外焦平面阵列的有关内容，讨论探测器阵列性能与红外系统之间的关系。

下面，简要介绍本书（第 2 版）和第 1 版的区别：在第 I 部分，增加了红外探测器和系统分析所需要的辐射度学和光通量传输内容；在后面的两部分中，除了更新第 1 版中的传统问题外，还包含了新的红外探测器研究成果和趋势，最为明显的是：

- 新型非制冷探测器，如悬臂梁探测器（cantilever detectors）、天线及光耦合探测器（antenna and optically coupled detectors）；
- II 类超晶格结构红外探测器；
- 量子点红外探测器。

此外，还突出阐述设计和制造太赫兹（THz）阵列和三代红外探测器的新方法。现在，太赫兹技术受到了越来越多的关注，并且在人类活动的不同领域（安全、生物、毒品和爆炸物探测、气体指纹、成像等），使用该波段的器件也变得愈加重要。今天，研究人员正在研发具有更强功能的第三代系统，例如更多的像素、更高的帧速率、更好的热分辨率、多色功能

和片上功能。

本书将奉献给那些希望对红外探测技术的最新进展进行综合分析和需要基本理解探测技术主要过程的读者。本书特别关注探测器性能的物理极限，并对不同类型探测器的性能做了比较。读者会更好理解一个多世纪以来所研发的众多方法的相似和不同之处，以及其优点和缺点，从而提高红外辐射探测方面的能力。

本书适合接受过现代固体物理学和电子线路正规教育的物理系和工程系的研究生使用，同时，也供工作在空间传感器及系统、遥感、热成像、军事成像、光通信、红外光谱学、光探测和测距（利用 LIDAR）领域的技术人员阅读。为了满足前者的需求，许多章节在阐述每项课题的最新科技资料之前，首先介绍其工作原理及历史背景。对目前工作在该领域的读者，可以将本书看成资料的汇总和积累，作为文献指南以及对各领域应用项目的述评。本书还可以作为相关工厂技术人员和短期学习班学员的参考书。

本书对红外探测技术的最新进展做了全面分析，对探测技术非常重要的主要过程进行了基本讨论。本书涵盖了红外探测器的方方面面，包括理论、材料类型、物理性质及其制造技术。

安东尼·罗格尔斯基
(Antoni Rogalski)

致 谢

在本书的编撰过程中，得到许多人的帮助和支持。首先，我想感谢波兰华沙（Warsaw）军事技术大学（Military University of Technology）应用物理学院（Institute of Applied Physics），为本书的编写提供了良好的环境。本书编写的部分内容是在波兰科学和高等教育部的财政支持（重点项目 POIG. 01. 03. 01-14-016/08 “新型光子材料及其先进应用”）下完成的。

与红外探测器技术领域内积极工作的许多科学家的和谐合作，使本书作者受益匪浅。华沙军事技术大学应用物理学院的同事们提供的许多资料以及与他们进行的有益讨论，非常有助于本书的编写准备工作。非常感谢下列人员在本书出版过程中提供的初稿、未发表的资料以及某些原图：L. Faraone 博士和 J. Antoszewski 博士（University of Western Australia, Perth）、J. L. Tissot 博士（Ulis, Voroize, France）、S. D. Gunapala 博士（California Institute of Technology, Pasadena）、M. Kimata 博士（Ritsumeikan University, Shiga, Japan）、M. Razeghi 博士（Northwestern University, Evanston, Illinois）、M. Z. Tidrow 博士和 P. Norton 博士（U. S. Army RDECOM CERDEC NVESD, Fort Belvoir, Virginia）、S. Krishna 博士（University of New Mexico, Albuquerque）、H. C. Liu 博士（National Research Council, Ottawa, Canada）、G. U. Perera/先生（Georgia State University, Atlanta）、J. Piotrowski 教授（Vigo System Ltd., Ożarów Mazowieki, Poland）、M. Reine 博士（Lockheed Martin IR Imaging Systems, Lexington, Massachusetts）、F. F. Sizov 博士（Institute of Semiconductor Physics, Kiev, Ukraine）和 H. Zogg 博士（AFIF at Swiss Federal Institute of Technology, Zürich）。还要感谢 CRC 出版社，特别是 Luna Han 女士，在本书再版过程中的合作和照顾，并一直鼓励作者撰写第 2 版。

最后，感谢我的家庭对我的鼓励、理解和支持，使我有勇气从事本书的撰写，并最终得到出版。

作者简介



作者安东尼·罗格爾斯基 (Antoni Rogalski) 是波兰华沙军事技术大学应用物理学院教授，红外光电子学领域最主要的研究人员之一。在其科学研究生涯中，对不同类型红外探测器理论、设计和制造技术都做出了开拓性贡献，主要是发明了新型碲镉汞 (HgCdTe) 三元合金探测器，例如铅盐、InAsSb、HgZnTe 和 HgMnTe。为了表彰在红外探测器三元合金结构中的研究成就，1997 年他获得波兰自然科学基金奖 (波兰最有声望的奖项)，2004 年被推选为波兰科学院院士。

安东尼·罗格爾斯基教授的科学成就包括确定了 InAsSb、HgCdTe、HgZnTe、HgMnTe 和铅盐的主要物理参数；确定了三元合金探测器的最终性能；精心从事 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12\mu\text{m}$ 光谱范围内高质量 PbSnTe、HgZnTe 和 HgCdTe 光敏二极管的研究，并在其领导下，对 HgCdTe 光敏二极管与其它类型的光子探测器 (尤其是量子阱红外光探测器和量子点红外光探测器) 的性能极限进行了比较性研究。

安东尼·罗格爾斯基教授在国际会议上做过约 50 次特邀报告，作为作者和共同作者发表过 200 多篇科技论文、撰写了 11 本著作，以及参与编写 13 本书的有关章节；是国际光学工程协会 (SPIE) 成员，波兰光电子委员会副主席，波兰科学院电子通信分部副主席，Opto-Electronics Review 杂志总编辑，波兰科学院院刊 Technical Science 副主编，红外和毫米波 (Infrared and Millimeter Waves) 期刊和国际物理述评 (International Review of Physics) 杂志编委。

安东尼·罗格爾斯基教授是国际技术委员会的热心成员，光电子器件和材料科学领域国内外众多会议的科学委员会成员、组织者、主席和共同主席。

目 录

译者序	
原书前言	
致谢	
作者简介	

第 I 部分 红外探测技术的基础知识

第 1 章 辐射度学	2
1.1 辐射度学和光度学的相关量和单位	3
1.2 辐射度学物理量的定义	5
1.3 辐射率	6
1.4 黑体辐射	9
1.5 发射率 (比辐射率)	12
1.6 红外光学系统	13
1.7 红外系统辐射度学的相关概念	16
1.7.1 夜视系统	16
1.7.2 大气透射和红外光谱	19
1.7.3 景物辐射和对比度	20
参考文献	21
第 2 章 红外探测器的性质	22
2.1 现代红外技术的发展史	24
2.2 红外探测器分类	28
2.3 红外探测器制冷	31
2.3.1 低温杜瓦瓶	31
2.3.2 焦耳-汤普森制冷器	32
2.3.3 斯特林循环制冷技术	32
2.3.4 珀耳帖制冷器	33
2.4 探测器的品质因数	33
2.4.1 响应度	34
2.4.2 噪声等效功率	34
2.4.3 探测率	34
2.5 基本的探测率极限	35
参考文献	40
第 3 章 红外探测器的基本性能极限	44
3.1 热探测器	44
3.1.1 工作原理	44
3.1.2 噪声机理	47

3.1.3 比探测率和基本极限	48
3.2 光子探测器	52
3.2.1 光子探测过程	52
3.2.2 光子探测器的理论模型	55
3.2.2.1 光学生成噪声	56
3.2.2.2 热生成和复合噪声	57
3.2.3 光电探测器的最佳厚度	58
3.2.4 探测器材料的品质因数	58
3.2.5 减小器件体积以提高性能	60
3.3 光子和热探测器基本限制的比较	62
3.4 光电探测器的建模	66
参考文献	68
第 4 章 外差式探测技术	72
参考文献	80
第 II 部分 红外热探测器	
第 5 章 温差电堆	84
5.1 温差电堆的基本工作原理	84
5.2 品质因数	87
5.3 热电材料	89
5.4 利用微机械技术制造温差电堆	93
5.4.1 设计优化	93
5.4.2 温差电堆的结构布局	94
5.4.3 微温差电堆技术	95
参考文献	97
第 6 章 测辐射热计	100
6.1 测辐射热计的基本工作原理	100
6.2 测辐射热计类型	102
6.2.1 金属测辐射热计	102
6.2.2 热敏电阻	103
6.2.3 半导体测辐射热计	104
6.2.4 微型室温硅测辐射热计	107
6.2.4.1 测辐射热计的传感材料	109
6.2.4.2 氧化钒	109
6.2.4.3 非晶硅	110
6.2.4.4 硅二极管	111
6.2.4.5 其它材料	111
6.2.5 超导测辐射热计	112
6.2.6 高温超导测辐射热计	116
6.3 热电子测辐射热计	121
参考文献	124
第 7 章 热释电探测器	132

7.1 热释电探测器的基本工作原理	132
7.1.1 响应度	133
7.1.2 噪声和探测率	136
7.2 热释电材料选择	138
7.2.1 单晶	141
7.2.2 热释电聚合物	142
7.2.3 热释电陶瓷	142
7.2.4 电介质测辐射热计	144
7.2.5 材料选择	145
7.3 热释电摄像机	146
参考文献	147
第8章 新型热探测器	150
8.1 高莱辐射计	150
8.2 新型非制冷探测器	152
8.2.1 电耦合悬臂梁结构	153
8.2.2 光学耦合悬臂梁结构	156
8.2.3 热-光传感器	160
8.2.4 天线耦合微测辐射热计	161
8.3 热探测器性能比较	163
参考文献	164

第Ⅲ部分 红外光子探测器

第9章 光子探测器理论	170
9.1 光电导探测器	170
9.1.1 本征光电导理论	170
9.1.1.1 扫出效应	172
9.1.1.2 光电导体中的噪声机理	174
9.1.1.3 量子效率	176
9.1.1.4 光电导体的最终性质	177
9.1.1.5 背景影响	178
9.1.1.6 表面复合的影响	178
9.1.2 非本征光电导理论	179
9.1.3 本征和非本征红外探测器的工作温度	187
9.2 p-n 结光敏二极管	190
9.2.1 理想扩散限 p-n 结	192
9.2.1.1 扩散电流	192
9.2.1.2 量子效率	193
9.2.1.3 噪声	194
9.2.1.4 比探测率	196
9.2.2 实际的 p-n 结	197
9.2.2.1 生成-复合电流	198
9.2.2.2 隧穿电流	200

9.2.2.3 表面漏电流	201
9.2.2.4 空间电荷限电流	203
9.2.3 响应时间	204
9.3 p-i-n 光敏二极管	206
9.4 雪崩光敏二极管	209
9.5 肖特基势垒光敏二极管	214
9.5.1 肖特基-莫特理论及其修正	214
9.5.2 电流传输过程	216
9.5.3 硅化物	217
9.6 金属-半导体-金属光敏二极管	218
9.7 金属-绝缘体-半导体光敏二极管	220
9.8 非平衡光敏二极管	224
9.9 nBn 探测器	225
9.10 光电磁、磁致浓差和登伯探测器	226
9.10.1 光电磁探测器	227
9.10.1.1 光电磁效应	227
9.10.1.2 利乐解	228
9.10.1.3 制造技术和性能	229
9.10.2 磁致浓差探测器	230
9.10.3 登伯探测器	231
9.11 光子牵引探测器	234
参考文献	236
第 10 章 本征硅和锗探测器	246
10.1 硅光敏二极管	247
10.2 锗光敏二极管	254
10.3 锗化硅光敏二极管	256
参考文献	258
第 11 章 非本征硅和锗探测器	261
11.1 非本征探测技术	262
11.2 非本征光电探测器的工作特性	264
11.3 非本征光电导体的性能	265
11.3.1 硅掺杂光电导体	265
11.3.2 锗掺杂光电导体	268
11.4 受阻杂质带器件	269
11.5 固态光电倍增管	273
参考文献	273
第 12 章 光电发射探测器	278
12.1 内光电发射过程	278
12.1.1 散射效应	281
12.1.2 暗电流	283
12.1.3 金属电极	283
12.2 肖特基势垒探测器截止波长的控制	285

12.3 肖特基势垒探测器的结构优化和制造	285
12.4 新型内光电发射探测器	287
12.4.1 异质结内光电发射探测器	287
12.4.2 同质结内光电发射探测器	288
参考文献	290
第13章 III-V族(元素)探测器	295
13.1 III-V族窄带隙半导体的物理性质	295
13.2 InGaAs光敏二极管	301
13.2.1 p-i-n InGaAs光敏二极管	302
13.2.2 InGaAs雪崩光敏二极管	304
13.3 二元III-V探测器	308
13.3.1 InSb光电导探测器	308
13.3.2 InSb光电磁探测器	309
13.3.3 InSb光敏二极管	310
13.3.4 InAs光敏二极管	318
13.3.5 InSb非平衡光敏二极管	321
13.4 三元和四元III-V探测器	323
13.4.1 InAsSb探测器	324
13.4.1.1 InAsSb光电导体	324
13.4.1.2 InAsSb光敏二极管	327
13.4.2 以GaSb三元和四元合金为基础的光敏二极管	333
13.5 以Sb为基础的新型III-V窄带隙光电探测器	337
13.5.1 InTlSb和InTlP	337
13.5.2 InSbBi	338
13.5.3 InSbN	338
参考文献	338
第14章 碲镉汞(HgCdTe)探测器	351
14.1 HgCdTe探测器的发展史	351
14.2 HgCdTe材料:技术和性质	354
14.2.1 相图	354
14.2.2 晶体生长技术	355
14.2.3 缺陷和杂质	362
14.2.3.1 固有缺陷	362
14.2.3.2 掺杂物	363
14.3 HgCdTe的基本性质	364
14.3.1 能带隙	366
14.3.2 迁移率	367
14.3.3 光学性质	369
14.3.4 热生成-复合过程	373
14.3.4.1 肖克莱-里德过程	373
14.3.4.2 辐射过程	374
14.3.4.3 俄歇过程	375

14.4 俄歇效应为主的光电探测器性能	378
14.4.1 平衡型器件	378
14.4.2 非平衡型器件	379
14.5 光电导探测器	380
14.5.1 探测技术	381
14.5.2 光电导探测器的性能	382
14.5.2.1 工作在温度 77K 的器件	382
14.5.2.2 工作温度高于 77K 的器件	386
14.5.3 俘获模式光电导体	388
14.5.4 排斥光电导体	389
14.5.5 扫积型探测器	392
14.6 光伏探测器	397
14.6.1 结的形成	397
14.6.1.1 Hg 向内扩散	398
14.6.1.2 离子束铣	399
14.6.1.3 离子植入	399
14.6.1.4 反应离子刻蚀	402
14.6.1.5 生长期间掺杂	402
14.6.1.6 钝化	404
14.6.1.7 接触层金属化工艺	406
14.6.2 对 HgCdTe 光敏二极管性能的主要限制	407
14.6.3 对 HgCdTe 光敏二极管性能的次要限制	419
14.6.4 雪崩光敏二极管	423
14.6.5 俄歇抑制光敏二极管	429
14.6.6 金属-绝缘体-半导体光敏二极管	433
14.6.7 肖特基势垒光敏二极管	436
14.7 Hg 基探测器	437
14.7.1 晶体生长	437
14.7.2 物理性质	438
14.7.3 HgZnTe 光电探测器	440
14.7.4 HgMnTe 光电探测器	442
参考文献	444
第 15 章 IV-VI 族 (元素) 探测器	469
15.1 材料制备和性质	469
15.1.1 晶体生长	469
15.1.2 缺陷和杂质	472
15.1.3 物理性质	473
15.1.4 生成-复合过程	477
15.2 多晶光电导探测器	481
15.2.1 多晶铅盐的沉积	481
15.2.2 制造技术	482
15.2.3 性能	483
15.3 p-n 结光敏二极管	486