



红外探测器

INFRARED DETECTOR

张建奇 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

红外探测器

张建奇 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了各种红外探测器的工作原理、性能参数,并对典型红外探测器的研究水平、性能指标等进行了详细的描述。同时,还对一些新型红外探测器进行了介绍。

本书叙述由浅入深、循序渐进;内容全面、系统,重点突出。

本书可作为电子科学与技术、光学工程、光电信息科学与工程等专业的本科高年级学生及研究生的专业教材,也可供红外技术、红外与光电系统等相关专业的科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

红外探测器/张建奇编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.8

ISBN 978-7-5606-4074-7

I. ①红… II. ①张… III. ①红外探测器 IV. ①TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 191260 号

策划编辑 毛红兵

责任编辑 刘玉芳 张 玮

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 29.5

字 数 703千字

印 数 1~2000册

定 价 63.00元

ISBN 978-7-5606-4074-7/TN

XDUP 4366001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

红外探测器是红外技术的核心，它的发展引领着红外技术的发展。近半个世纪以来，特别是近 30 多年，以红外探测器为核心的红外技术得到了迅速发展，一方面其应用领域大大拓宽，在军事、科学、工农业生产、医疗卫生等领域以及日常生活方面都得到了广泛应用；另一方面，红外探测器本身的创新也层出不穷，各种新型材料及新型探测器被发现、发明，经历了从第一代、第二代向第三代探测器技术演进的过程。目前，红外探测器已经进入了以大规模、高分辨率、多波段、高集成、轻型化和低成本为特征的第三代焦平面时代。

红外探测器是一种辐射能转换器件，其原理是将红外辐射能转换为可以测量的热能、电能等不同形式的能量。依据能量转换方式或红外辐射与物质相互作用效应的不同，可以将红外探测器分为热探测器和光子探测器两个主要大类。第一类热探测器包括测辐射热电偶和热电堆、测辐射热计、热释电探测器、气动探测器以及双材料探测器等；第二类光子探测器包括光电导探测器、光伏探测器、光电磁探测器以及量子阱、量子点和超晶格探测器等。同时，还有一类不太被关注的辐射场耦合探测器。对于种类繁多的红外探测器，还可根据其使用条件、作用波段、结构特征和制作材料等进行进一步的划分，如根据工作温度，可分为低温探测器、中温探测器和室温探测器；根据响应波长范围，可分为短波红外、中波红外、长波红外、双色/多色红外探测器；根据结构和用途，可分为单元探测器、多元探测器和阵列成像探测器；根据制作材料，可分为热敏材料、窄带半导体红外探测器等。

对于红外探测器性能好坏的判定，需要根据其工作原理和使用条件来定义一些指标参数，这些参数应该能描述红外探测器的主要特性：输入/输出特性、转化特性(量子效率)、光谱特性、响应速度(时间常数)，以及工作条件等。同时，这些性能参数也可用来衡量红外探测器的发展水平，指导使用者根据系统需求从市场中选择所需要的红外探测器。

近几十年来，新材料、新结构、新工艺不断涌现，红外探测器得到了快速发展，使红外探测器从概念到性能都有了重大突破，并且随着理论和技术的不断进步，一些新的原理将被提出，一些古老的物理效应将被拓展，新型的红外探测器将一个个地出现在人们面前。

为了使学生们全面掌握红外探测器的基本工作原理，同时使相关研究人员了解红外探测器的研究水平和未来发展，编者结合多年来的科研和教学体会，编写了本书。本书力求做到既注重基础，又具有一定的深度；既系统描述工作原理，又重点介绍典型器件。全书以器件性能参数为基础，对不同类型的红外探测器的组成结构、工作机理、材料特性、使用条件、发展水平等进行了全面描述和对比分析。同时，在每一章最后，都列举了最新的参考文献，使用者可根据需要进行必要的选择。

本书共十二章，第 1 章介绍红外探测器的基本知识、性能参数和发展历史；第 2 章讨论热探测器的基本理论，为后续描述不同类型的热探测器奠定必要的基础；第 3 章讨论测辐射热电偶和热电堆的基本工作原理，并介绍典型测辐射热电偶和热电堆的主要性能；第 4 章讨论几种不同类型的测辐射热计，并介绍典型测辐射热计的主要性能；第 5 章首先介绍材料的热释电性、铁电性等基本物理性质，然后讨论热释电红外探测器的工作原理，并

介绍典型热释电红外探测器的主要性能；第 6 章讨论基于其他物理效应的热探测器，如二极管测辐射热计、双材料微悬臂梁热探测器，以及微机械气动红外探测器的工作原理和性能参数；第 7 章讨论本征光电导和杂质光电导红外探测器的工作原理，并介绍典型光电导红外探测器的主要性能；第 8 章讨论光伏型红外探测器，如 PN 结、肖特基势垒以及金属-绝缘体-半导体红外探测器的工作原理，并介绍典型光伏红外探测器的主要性能；第 9 章讨论光电磁、磁聚集和丹倍红外探测器的工作原理；第 10 章讨论天线耦合探测器(也称辐射场探测器)的基本工作原理；第 11 章对新型量子结构红外探测器，如量子阱、量子点以及超晶格红外探测器等进行了简单的介绍；第 12 章介绍了红外焦平面成像阵列的工作原理，并介绍了典型热探测器焦平面阵列、光子探测器焦平面阵列以及其他新型焦平面阵列的性能参数。

本书由张建奇执笔，刘红梅参与第 11 章内容的编写，全书校稿由刘鑫和王昱程完成。

本书在编写过程中得到了西安电子科技大学出版社、西安电子科技大学物理与光电工程学院红外技术系的教师和同学的支持与帮助，谨向他们表示诚挚的感谢。同时，本书在编写过程中，参考了大量的文献资料，在此向所有作者同仁深表谢意。

尽管本书编写历经数年，几易其稿，但由于编者水平有限，难免有一些不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2016 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 红外探测器的分类	1
1.1.1 热探测器	1
1.1.2 光子探测器	3
1.1.3 辐射场探测器	5
1.1.4 热探测器与光子探测器的比较	5
1.2 红外探测器性能参数	6
1.2.1 主要工作条件	6
1.2.2 主要性能参数	7
1.2.3 多元及焦平面探测器品质参数	14
1.3 噪声源	18
1.3.1 探测器噪声	18
1.3.2 背景辐射光子噪声	22
1.3.3 放大器噪声	24
1.4 红外光学材料与红外探测器制冷器	24
1.4.1 红外光学材料	24
1.4.2 红外探测器制冷器	26
1.5 红外探测器的发展简史	30
1.5.1 早期热探测器的发展	30
1.5.2 早期光子探测器的发展	31
1.5.3 现代红外探测器的发展	31
参考文献	35
第 2 章 热探测器基本理论	36
2.1 热探测器的工作原理	36
2.1.1 基本工作模式	37
2.1.2 基本工作原理	37
2.2 热辐射探测器的噪声	39
2.3 热探测器的比探测率	41
2.4 噪声等效温差	43
参考文献	45
第 3 章 测辐射热电偶和热电堆	46
3.1 热电偶的基本工作原理	46
3.1.1 温差电效应	46
3.1.2 测辐射热电偶	49
3.2 热电材料	51
3.2.1 材料品质因子 Z	51

3.2.2 典型热电材料	53
3.3 典型测辐射热电堆红外探测器	55
3.3.1 薄膜型热电堆探测器	55
3.3.2 微机械热电堆探测器	55
参考文献	59
第4章 测辐射热计	61
4.1 热敏电阻	61
4.2 测辐射热计的工作原理	63
4.2.1 零偏置条件	64
4.2.2 直流偏置条件	64
4.2.3 脉冲偏置条件	67
4.3 测辐射热计的性能分析	68
4.3.1 响应度	68
4.3.2 噪声分析	70
4.4 典型测辐射热计	72
4.4.1 金属测辐射热计	72
4.4.2 半导体测辐射热计	73
4.4.3 微机械室温测辐射热计	75
4.4.4 复合测辐射热计	78
4.4.5 超导测辐射热计	79
参考文献	84
第5章 热释电探测器	85
5.1 热释电体和铁电体	85
5.1.1 热释电效应	86
5.1.2 铁电效应	87
5.1.3 热释电材料的基本参数	88
5.1.4 铁电材料用于红外探测的两种工作模式	93
5.2 热释电探测器的工作原理	95
5.2.1 热释电探测器的响应度	95
5.2.2 热释电探测器的噪声	103
5.2.3 噪声等效功率和比探测率	107
5.2.4 外部环境影响及补偿措施	110
5.3 典型热释电探测器	111
参考文献	113
第6章 其他热探测器	114
6.1 二极管测辐射热计	114
6.1.1 二极管电压温度系数	114
6.1.2 二极管测辐射热计的性能参数	116
6.2 双材料微悬臂梁热探测器	116

6.2.1	热力学模型	117
6.2.2	电读出式微悬臂梁热探测器	118
6.2.3	光读出式微悬臂梁探测器	124
6.3	微机械高莱盒红外探测器	127
6.3.1	高莱盒的热致形变	127
6.3.2	电容读出式高莱盒	129
6.3.3	隧道电流读出式高莱盒	132
	参考文献	137
第7章 光电导探测器		138
7.1	半导体中的光生载流子	138
7.1.1	半导体中的光吸收	138
7.1.2	半导体中光生载流子的产生	144
7.1.3	非平衡载流子的复合	145
7.1.4	半导体中光生载流子的输运	149
7.2	本征光电导探测器	151
7.2.1	光电导探测器的响应度	152
7.2.2	光电导探测器的噪声和比探测率	157
7.2.3	影响光电导探测器性能的因素	162
7.2.4	典型本征光电导探测器	166
7.3	杂质光电导探测器	177
7.3.1	杂质光电导探测器的响应度	178
7.3.2	噪声和比探测率	183
7.3.3	典型非本征光电导探测器	184
7.4	受阻杂质带红外探测器	187
7.4.1	BIB 器件结构	187
7.4.2	工作原理	188
	参考文献	190
第8章 光伏探测器		191
8.1	PN 结的基本特性	191
8.1.1	PN 结的基本结构	191
8.1.2	平衡状态下的 PN 结	191
8.1.3	PN 结电流-电压特性	194
8.1.4	PN 结电容	195
8.2	PN 结光伏探测器的工作原理	196
8.2.1	PN 结的光生电流	197
8.2.2	光照下 PN 结的 $I-U$ 特性	202
8.2.3	光伏探测器的响应度	205
8.2.4	光伏探测器的噪声	208
8.2.5	光伏探测器的比探测率	209
8.2.6	光伏探测器的 $R_0 A_d$	210
8.2.7	光伏探测器的响应时间	212

8.3 PIN 光电二极管	215
8.3.1 PIN 光电二极管的量子效率	217
8.3.2 PIN 光电二极管的响应时间	217
8.4 雪崩光电二极管	220
8.4.1 PN 结雪崩倍增效应	220
8.4.2 雪崩光电二极管的特性	222
8.5 肖特基势垒光电二极管	225
8.5.1 金属和半导体的接触电势差	226
8.5.2 金属半导体接触整流	227
8.5.3 肖特基势垒光电二极管工作原理	229
8.6 金属-绝缘体-半导体光电二极管	234
8.6.1 MIS 结构的表面电场效应	234
8.6.2 MIS 结构的非平衡态特性	238
8.6.3 MIS 结构的电容	240
8.6.4 MIS 型红外探测器工作原理	241
8.7 典型光伏探测器	245
8.7.1 InGaAs 光电二极管	246
8.7.2 InAs、InAsSb 和 InSb 光电二极管	250
8.7.3 HgCdTe 光伏探测器	253
参考文献	255
第 9 章 光电磁探测器、磁聚集探测器和丹倍探测器	257
9.1 光电磁探测器	257
9.1.1 光电磁效应	257
9.1.2 PEM 探测器的性能参数	260
9.1.3 典型 PEM 探测器	263
9.2 磁聚集探测器	265
9.2.1 EMCD 探测器中的电流分布	266
9.2.2 光照下的信号电流	267
9.2.3 EMCD 探测器的性能分析	269
9.3 丹倍探测器	271
9.3.1 丹倍电势差	271
9.3.2 电压响应度和比探测率	272
9.3.3 丹倍探测器性能分析	274
9.4 光子牵引探测器	276
参考文献	278
第 10 章 天线耦合探测器	280
10.1 天线的基本概念	280
10.2 天线耦合热电偶	282
10.3 天线耦合测辐射热计	285
10.4 天线耦合金属-氧化物-金属二极管	289
参考文献	293

第 11 章 量子结构红外探测器	295
11.1 低维量子结构的基本概念	295
11.1.1 超晶格	295
11.1.2 量子阱	297
11.1.3 量子点	299
11.2 量子阱红外探测器	300
11.2.1 基本组成	301
11.2.2 探测机理	301
11.2.3 主要类型	303
11.2.4 性能表征	305
11.2.5 光伏型量子阱红外探测器	311
11.2.6 典型量子阱红外探测器	313
11.3 量子点红外探测器	316
11.3.1 量子点红外探测器结构	316
11.3.2 量子点红外探测器光电转化机理及性能参数	319
11.3.3 量子点红外探测器的特性优势	322
11.4 超晶格红外探测器	324
11.4.1 超晶格材料的特点	324
11.4.2 典型超晶格红外探测器	326
11.5 多色/多波段探测器	327
11.5.1 基本结构及原理	327
11.5.2 典型多波段探测器	328
参考文献	334
第 12 章 红外焦平面阵列	335
12.1 多元红外探测器与红外焦平面阵列	335
12.1.1 红外焦平面阵列的特点	336
12.1.2 红外焦平面阵列的分类	336
12.2 固体成像器件工作原理	340
12.2.1 电荷耦合器件	341
12.2.2 电荷耦合成像器件	351
12.2.3 CMOS 成像器件	362
12.3 热探测器焦平面阵列	372
12.3.1 热电堆焦平面阵列	372
12.3.2 微测辐射热计焦平面阵列	380
12.3.3 热释电焦平面阵列	397
12.3.4 新型非制冷焦平面阵列	407
12.4 光子探测器焦平面阵列	429
12.4.1 非本征硅、锗焦平面阵列	429
12.4.2 肖特基势垒焦平面阵列	430
12.4.3 InGaAs 焦平面阵列	432
12.4.4 InSb 焦平面阵列	435

12.4.5 HgCdTe 焦平面阵列	438
12.4.6 铅盐焦平面阵列	445
12.4.7 新型光子探测器焦平面阵列	447
参考文献	458

第1章 绪 论

红外探测器是把入射的红外辐射转变成电信号(或其他信号)输出的器件,其基本原理是红外辐射与物质(材料)相互作用产生各种物理效应。根据不同的物理效应,可将红外探测器分为不同的类型,同时,通过对这些物理效应的分析,可加深对红外探测器工作机理的理解。下面,先对红外探测器的分类进行说明,然后再介绍探测器性能的有关参数,为今后详细讨论不同红外探测器奠定基础。

1.1 红外探测器的分类

在对红外探测器技术的发展进行总结后,人们普遍有这样一个认识,即“在大约 $0.1\sim 1\text{ eV}$ 范围内的所有物理现象都可以用红外探测器探测”。可以这样理解,当红外辐射与物质(材料)间相互作用的效应发生在 $0.1\sim 1\text{ eV}$ 范围内时,这些效应即可用来制作红外探测器。

红外辐射与物质的相互作用有多种形式,主要可分为光子效应、热效应以及辐射场耦合效应等几类。在光子效应中,光子直接与物质中的电子相互作用。因为电子可以束缚在晶格原子或杂质原子周围,也可以是自由电子,因而可能有各种各样的相互作用。热效应的特点是,物质因吸收辐射而产生温度变化,从而导致物质某些性质的变化。辐射场耦合效应是电磁场与物质之间的耦合作用,从而引起物质内部某些属性发生变化。因此,根据上述不同物理效应可制作不同类型的红外探测器,即光子探测器、热探测器以及辐射场探测器等。在红外技术和红外系统中最常用到的是光子探测器和热探测器。

对于种类繁多的红外探测器,还可根据其使用条件、作用波段和结构特征等进行种类的划分。如根据工作温度,可分为低温探测器、中温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,可分为单元探测器、多元探测器和阵列成像探测器。

为了便于理解红外探测器的工作原理,按物理效应对红外探测器进行分类,用特征参数来描述其工作温度、响应波长和结构类型等是普遍采用的方式。

1.1.1 热探测器

探测器材料吸收红外辐射后产生温升,然后伴随着某些物理性质的变化,测量这些物理性质的变化,就可以测量出它吸收的能量或功率,这类探测器就是热探测器。根据热致物理性质变化的不同,热探测器可进一步分为测辐射热电偶和热电堆、测辐射热计、热释电探测器、气动探测器以及双材料探测器等。

一、测辐射热电偶和热电堆

把两种不同的金属或半导体细丝连成一个封闭环路，当一个接头(结点)的温度与另一个接头(结点)的温度不同时，环路内就产生电动势，其大小与冷热两结点处的温差成正比，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热电偶(也称温差电偶)。如果两结点处的温差是由一端吸收辐射而引起的，则测量热电偶温差电动势的大小，就能测得结点处所吸收的辐射功率。此时，将这种热电偶称为测辐射热电偶。

制造热电偶的材料有纯金属、合金和半导体。常用于直接测温的热电偶一般由纯金属与合金相配而成，如铂铑-铂、镍铬-镍铝和铜-康铜等，它们被广泛用于测量 1300℃ 以下的温度。用半导体材料制成的热电偶比用金属做成的热电偶的灵敏度高，响应时间短，常用作红外辐射的探测元件。

将若干个热电偶串联在一起就成为热电堆。在相同的辐照下，热电堆可提供比热电偶大得多的温差电动势。

二、测辐射热计

热敏材料吸收红外辐射后，温度升高，阻值发生变化，其阻值变化的大小与吸收的红外辐射能量成正比。利用材料吸收红外辐射后电阻发生变化而制成的红外探测器叫做测辐射热计。依据所选用的热敏材料不同，有几种不同的测辐射热计：金属测辐射热计、半导体测辐射热计、超导测辐射热计以及复合测辐射热计。

金属测辐射热计的电阻温度系数为正值，即电阻随温度升高而增加。用于制作金属测辐射热计的典型材料有钨、镍、铋、铂、铟等，但它们的电阻温度系数比较小，所以金属测辐射热计的灵敏度较差。

半导体测辐射热计可分为室温测辐射热计和低温测辐射热计，室温测辐射热计就是人们常说的热敏电阻测辐射热计。

热敏电阻测辐射热计所采用的热敏材料是锰、钴或镍的氧化物，这些氧化物的电阻温度系数为负值，即温度增加时电阻减小。由于热敏电阻测辐射热计是在加电偏置情况下工作的，随着偏流增加，温度将迅速升高，而动态电阻(伏安特性曲线的斜率)减小。超过某一临界偏流时，动态电阻变成负值，在这种偏流范围内，需要采用镇流电阻器，以防止发生热击穿烧毁热敏电阻。

低温测辐射热计主要以单晶半导体(如 Ge:Ga、Ge:In、InSb)为敏感元件，使其保持在液氮温度(4K)附近。由于该元件的电阻温度系数在低温下有很大的(负)值，且比热又小，所以低温测辐射热计是一种高灵敏度的探测器，且噪声低、重复性好。

某些金属及合金，当其温度低于某一临界温度时，电阻下降为零，这种现象称为超导，具有超导现象的物体称为超导体。将超导样品的环境温度保持在略低于临界温度，吸收入射辐射而产生的微小温升就将引起样品电阻的显著变化，这种变化可以用来产生相当大的输出信号。由此可制成超导测辐射热计，其灵敏度非常高，光谱响应非常宽，可提供延伸到毫米波的平坦响应。

复合测辐射热计是将辐射吸收单元和温度传感单元分别制作，然后组合到一起的一种测辐射热计，可使器件灵敏度提高的同时，保持较低的噪声。

三、热释电探测器

有些晶体,如硫酸三甘肽(TGS)、铌酸锶钡 SBN($\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$)等,当受到红外辐射照射时,温度升高,引起自发极化强度的变化,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,电压的大小与吸收的红外辐射功率成正比。利用这一原理制成的红外探测器叫热释电探测器。

四、气动探测器

气动红外探测器,也叫做高莱(盒)探测器。它由一个充满气体的容器构成,容器的一端是涂黑的薄膜,用来吸收聚焦在薄膜上面的红外辐射。薄膜吸收的能量加热了容器内的气体,使容器另一端的柔性薄膜反射镜发生膨胀。气体吸收能量而引起反射镜的这一微小形变,可用光学系统来检测。虽然高莱(盒)探测器在实验室光谱仪中普遍用作远红外辐射探测器,但它的灵敏度低,也不够牢固,因而不宜在大多数场合使用。

另一种类型的气动红外探测器是充气电容式探测器,它与上述高莱(盒)探测器的主要不同在于辐射吸收方法和信号读出方式。它不是由涂黑的薄膜吸收辐射,而是直接由充于室内的气体吸收辐射;它也不是用光学方法来检测柔性薄膜的形变,而是应用电学方法来检测。气体由于吸收入射辐射而被加热,因而使构成电容器的一个板极的薄膜形变,其所引起的电容变化由一个振荡—放大系统来确定。由于充入的气体具有它所特有的吸收光谱,所以此探测器可用在非色散的红外气体分析仪中。

五、双材料探测器

双材料探测器的热敏单元通常是由两种材料(双金属或双压电晶片)构成某种形式的悬臂梁。由于双材料的热膨胀系数不同,当温度变化时,由双材料组成的悬臂梁会因膨胀而产生变形,该形变测量可采用电学读出法或光学读出法进行。利用这种双材料效应制作的探测器常被称为双材料悬臂梁探测器。

除了上述五种类型的热探测器外,还有利用热磁效应、金属丝热膨胀效应、液体薄膜蒸发效应、氧化物阴极热发射效应、半导体吸收边的热移动效应、液晶光学特性热致变化效应以及能斯特效应(在有温度梯度的样品上,垂直施加外磁场时,在横向方向可测得一个电场)等物理效应制成的热探测器。

综上所述,热探测器是依据红外辐射的热效应,所以热探测器的响应只依赖于吸收的功率,与辐射的光谱分布无关。理论上,热探测器对于一切波长的红外辐射都具有相同的响应,但实际上对某些波长的红外辐射的响应偏低,其等能量光谱响应曲线并不是一条水平直线,这主要是由于热探测器敏感面对不同波长的红外辐射的反射和吸收存在着差异。涂覆良好的吸收层有助于改善吸收性能,增加了对于不同波长响应的均匀性。热探测器的响应速度取决于热探测器材料温度变化的快慢,因此与热容量和散热速度有关。减小热容量、增大热导,可以提高热探测器的响应速度。

1.1.2 光子探测器

光子探测器吸收光子后,探测器材料的电子状态会发生改变,从而引起几种电学现

象, 这些现象统称为光电效应。在红外和光学探测器的发展中, 最受重视的效应是光电效应。光电效应可以再分成内光电效应和外光电效应两类。在内光电效应中, 光子所激发的载流子(电子或空穴)仍保留在样品内部; 外光电效应也称为光电子发射效应, 是入射光子引起光吸收物质表面(称为光阴极)发射电子的效应。

通过测量光电效应的大小可以测定被吸收的光子数。利用光电效应制成的探测器称为光子探测器, 几乎在所有情况下, 所用的材料都是半导体材料。

一、光电子发射(外光电效应)器件

当光入射到某些金属、金属氧化物或半导体表面时, 如果光子的能量足够大, 能使其表面发射电子, 这种现象统称为光电子发射效应, 也称做外光电效应。利用光电子发射制成的器件称为光电子发射器件, 如光电倍增管。光电倍增管的灵敏度很高, 时间常数较短(约几个毫微秒), 所以在激光通信中常使用特制的光电倍增管。

大部分光电子发射器件只对可见光起作用, 目前用于微光及红外的光阴极只有两种, 一种是叫 S-1 的银氧铯(Ag-O-Cs)光阴极, 另一种是叫做 S-20 的多碱(Na-K-Cs-Sb)光阴极。S-20 光阴极的响应长波限为 $0.9 \mu\text{m}$, 基本上属于可见光的光阴极; S-1 光阴极的响应长波限为 $1.2 \mu\text{m}$, 属近红外光阴极。光阴极的量子效率(每一入射光子所发射的电子数)不高, 一般在 $10^{-5} \sim 10^{-1}$ 之间。近年来, 在窄禁带半导体上生长一层 GaAs 再镀一层铯的复合阴极, 可以探测较长波长的红外辐射。

二、光电导探测器

当半导体材料吸收入射光子后, 半导体内有些电子和空穴从原来不导电的束缚状态转变为能导电的自由状态, 从而使半导体的电导率增加, 这种现象称为光电导效应。利用半导体的光电导效应制成的红外探测器叫做光电导探测器, 目前, 它是种类最多、应用最广的一类光子探测器。

光电导探测器可分为单晶型和多晶薄膜型两类。多晶薄膜型光电导探测器的种类较少, 主要有响应于 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 波段的硫化铅(PbS)、响应于 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的硒化铅(PbSe)和碲化铅(PbTe)(PbTe 探测器有单晶型和多晶薄膜型两种)。单晶型的光电导探测器可再分为本征型和掺杂型两种。本征型的探测器早期以锑化铟(InSb)为主, 只能探测 $7 \mu\text{m}$ 以下的红外辐射, 后来发展了响应波长随材料组分变化的碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)和碲锡铅($\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$)三元化合物探测器。掺杂型红外探测器主要是锗、硅和锗硅合金掺入不同杂质而制成的多种掺杂探测器, 如锗掺金(Ge:An)、锗掺汞(Ge:Hg)、锗掺锌(Ge:Zn)、锗掺铜(Ge:Cu)、锗掺镉(Ge:Cd)、硅掺镓(Si:Ga)、硅掺铝(Si:Al)、硅掺锑(Si:Sb)和锗硅掺锌(Ge-Si:Zn)等。掺杂探测器在历史上起过重要作用, 今后在远红外波段仍有重要应用。硅掺杂探测器的性能与锗掺杂探测器的性能差不多, 但使用得较少。

三、光伏探测器

光伏效应与光电导效应不同, 光伏效应需要一个内部电势垒, 由内部电场把光激发的空穴-电子对分开。产生光伏效应的最普通形式是用一些标准工艺制备的半导体 PN 结, PN 结内、外吸收光子后产生电子和空穴。在结区外, 它们靠扩散进入结区; 在结区内, 电

子受静电场作用漂移到N区,空穴则漂移到P区。N区获得附加电子,P区获得附加空穴,结区获得一附加电势差,它与PN结原来存在的势垒方向相反,将降低PN结原有的势垒高度,使得扩散电流增加,直到达到新的平衡为止。如果把半导体两端用导线连接起来,电路中就有反向电流流过,用灵敏电流计可以测量出来;如果PN结两端开路,可用高阻毫伏计测量出光生伏特电压,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。

常用的光伏探测器有碲化铟(InSb)、碲镉汞(HgCdTe)和碲锡铅(PbSnTe)等。

虽然非本征光伏效应也是可能的,但几乎所有实用的光伏探测器都采用本征光电效应。通常简单的PN结可以实现这种效应,采用的其他结构还有PIN结、肖特基势垒结,以及金属—绝缘体—半导体(MIS)光电二极管等。

四、光电磁探测器

当光辐射入射到置于横向磁场中的半导体样品上时,可通过本征激发产生空穴—电子对。因为辐射被材料所吸收,其强度按其进入材料的深度呈指数关系而降低,所以将产生一个载流子浓度梯度,方向垂直于表面。这样一来,光激发载流子由表面向体内扩散,并在扩散中切割磁力线。由于这些带相反电荷的载流子朝相同的方向运动,所以它们在磁场的作用下分别向样品相互对立的两端偏转,从而在样品的两端产生电位差,这种现象叫做光电磁效应。利用光电磁效应制成的探测器称为光电磁探测器。

目前制成的光电磁探测器有碲化铟(InSb)、砷化铟(InAs)和碲镉汞(HgCdTe)等。

光电磁探测器的实际应用很少。因为对于大部分半导体来说,不论是在室温或是在低温条件下工作,这一效应的本质使它的响应比光电导探测器低,光谱响应特性与同类光电导或光伏探测器相似,由于工作时必须加磁场又增加了其使用的不便,所以其使用受到限制。

除了上述光子探测器外,还有利用其他光子效应制成的探测器,如磁聚集、丹倍探测器、光子牵引探测器等。

此外,随着半导体超晶格、量子阱材料的研制成功,一些新型的红外探测器,如超晶格、量子阱以及量子点红外探测器等相继出现,大大地拓展了红外光子探测器的类型。

1.1.3 辐射场探测器

在讨论红外辐射与一般探测器的作用时,对于入射辐射的描述均采用了平均辐射量,并不考虑辐射场的概念。利用红外辐射场(电磁场)与物质相互作用时所呈现的某些特性,也可以进行红外辐射探测,将这种基于场效应的探测器称为辐射场探测器,由于这种辐射场探测器常有一个天线,因此也称为天线耦合探测器。

在天线耦合探测器中,入射辐射直接与天线作用,从而在天线内产生高频谐振电流,该电流与传感元件(也称整流元件)进行耦合,并根据传感元件的作用机理完成辐射探测器。

1.1.4 热探测器与光子探测器的比较

在红外技术和红外系统中用的最多,且最成熟的是光子探测器和热探测器,所以,这里主要针对热探测器和光子探测器的特点进行简单的比较。

根据前述可知,红外探测器是利用红外辐射对物体的某些物理效应,把不可见的红外

辐射转变成可以探知或测量的物理量。热探测器利用的是热效应，热效应的主要特点有：热吸收与入射辐射的波长分布无关；热敏单元的温度变化较慢；通常情况下，室温环境下即可观测到热敏单元的温度变化。光子探测器利用的是光子效应，光子效应的主要特点是：入射光子能量要大于一定值时才能产生光电效应；光电效应是半导体中电子直接吸收光子而产生的效应；通常情况下，必须将光敏单元冷却到较低温度才能观测到光电效应。

由于热探测器和光子探测的工作机理不同，所以这两类探测器的特点有很大的差别，一般地讲，主要体现在以下三个方面。

(1) 热探测器对各种波长的红外辐射均有响应，是无选择性的探测器；光子探测器只对小于或等于特定波长的入射红外辐射才有响应，是有选择性的探测器。

(2) 热探测器的灵敏度较低，响应速度较慢；而光子探测器的灵敏度比热探测器高1~2个数量级，响应速度比热探测器的快得多。

(3) 热探测器一般在室温下工作，不需要制冷；多数光子探测器必须工作在低温条件下才具有优良的性能。

1.2 红外探测器性能参数

红外探测器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或性能指标。根据红外探测器的性能参数，再加上红外系统其他组成部分的参数，就可以确定整个红外系统的性能指标。下面讨论红外探测器的主要性能参数。

1.2.1 主要工作条件

红外探测器的性能参数与探测器的具体工作条件有关，因此，在给出探测器的性能参数时，必须注明探测器的工作条件。探测器的工作条件主要有以下几个方面。

一、辐射源的光谱分布

许多红外探测器对不同波长的辐射响应是不同的，所以，在描述探测器性能时，需说明入射辐射的光谱分布。如果是单色光源，就要给出单色光的波长；如果是黑体源，则要给出黑体的温度；如果入射辐射通过了相当距离的大气和光学系统，则必须考虑大气和光学系统所造成的影响；如果入射辐射经过了调制，则应给出调制频率分布，但当放大器通频带很窄时只需给出调制的基频和幅值即可。

二、工作温度

许多探测器，特别是由半导体制备的红外探测器，其性能与它的工作温度有密切的关系，所以，在给出探测器的性能参数时必须给出探测器的工作温度。最重要的几个工作温度为室温(295 K 或 300 K)、干冰温度(194.6 K，它是固态 CO_2 的升华温度)、液氮沸点(77.3 K)、液氦沸点(4.2 K)，此外，还有液氮沸点(27.2 K)、液氢沸点(20.4 K)和液氧沸点(90 K)。在实际应用中，除将这些物质注入杜瓦瓶获得相应的低温条件外，还可根据不同的使用条件采用不同的制冷器获得相应的低温条件。