

光探测器与红外探测器

〔美〕 R. J. 凯斯 主编

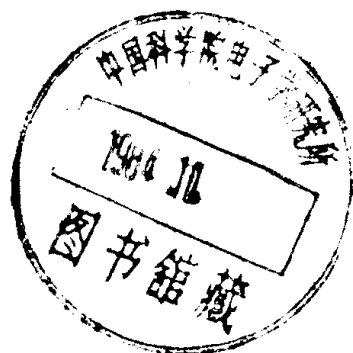


科学出版社

光探测器与红外探测器

〔美〕R. J. 凯斯 主编

董培芝 等译



科学出版社

1984

1111672

内 容 简 介

红外线和可见光的探测在现代科学技术中起着重要作用。各种类型的红外探测器和光探测器,采用单元、线列和焦平面阵列等形式,广泛应用于成像、跟踪、制导、侦察、预警、遥感以及辐射测量等许多方面。

本书是目前光探测器与红外探测器的最新综述,比较详细地介绍各种探测器的基本原理、制造、性质、用途以及技术现状。

本书可供从事光探测器与红外探测器及其整机的研究、试制、教学、生产的科研人员、工程技术人员、教师及其他有关人员参考。

R. J. Keyes (Editor)

Optical and Infrared Detectors

2nd edition, Springer-Verlag, 1980

光探测器与红外探测器

〔美〕R. J. 凯斯 主编

董培芝 等译

责任编辑 陈咸亨

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年5月第一版 开本:787×1092 1/32

1984年5月第一次印刷 印张:13

印数:0001—5,000 字数:295,000

统一书号:13031·2582

本社书号:3548·13—3

定价: 2.00 元

译 者 的 话

红外和光学探测在现代科学技术中起着重要作用。各种类型的红外探测器和光探测器广泛应用于成像、跟踪、制导、侦察、预警、遥感、微弱信号探测(相干雷达)以及辐射测量、自动控制和激光探测等许多方面。

《光探测器与红外探测器》于1977年出版,1980年修订再版,是目前光探测器与红外探测器的最新专著。原书主编是美国麻省理工学院林肯实验室知名学者,作者分属美国霍尼威尔公司、美国海军研究实验室、英国皇家信号及雷达研究所、美国哥伦比亚大学和林肯实验室,都是本专业的知名人士。

本书涉及目前已知的各种主要的光探测器和红外探测器,重点在于它们的基本原理、制造、性质及用途。书中对红外与光探测领域截至1980年的技术现状作了比较完整的总结和评论,对今后的发展作了概略展望。然而必须说明,红外镶嵌焦平面阵列技术自1980年以来又取得了长足进展,书中缺少这方面的论述,这是本书的不足之处。

本书可供从事光探测器与红外探测器及整机研究、试制、教学、生产的科研人员、工程技术人员、教师和其他人员参考。

本书第一、二章由李竹怀翻译,第三、四、五、六、七、八章分别由吴锡培、袁继俊、严隽达、陈世达、胡德明、董培芝翻译。全书由董培芝负责校订。吴宗兰同志作了认真的审核和必要的修改,译者在此表示谢意。

由于译者水平有限,不当之处在所难免,尚祈读者指正。

第二版前言

本版与第一版相同，是为那些希望全面分析红外探测器技术的最新发展及深刻了解对发展中的探测技术有重要意义的基本过程的读者而写的。本书中，每一种最重要的探测器，均由该专业中公认的第一流权威作了详细论述。为集中讨论各种探测器的技术现状和每位作者的独特见解，书中并未引述大量背景性基础知识，有关这方面的内容，读者可由列举的许多参考文献中得到。对于希望有更多系统介绍光子辐射及其探测过程的读者，编者推荐参阅金斯顿（R.H.Kingston）所著的《光学与红外辐射探测》（*Detection of Optical and Infrared Radiation*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1978）一书。

第一章绪论泛述了从1800年W. 赫谢耳爵士发现红外辐射以来研制成的各种红外探测器。第二章介绍红外探测器技术的全貌，以便把后面各章中更深入的论述连结成一个紧密整体。由于这样或那样的原因，至今尚未得到广泛应用的各种探测器亦在第二章中讨论。

比较重要的应用较广泛的红外探测器可以分成三大类，它指明了光子与探测器之间相互作用所产生的主要效应，即热效应、光电导与光伏效应以及光电发射效应。第三、四、五章详细论述了这些重要的探测过程。

红外探测器的作用是发现信号、测量它，并为随后的应用提取某些必需的信息。电荷耦合器件（CCD）和光子的非线性混频是从弱红外信号中提取更多信息的新技术。这些器件若

直接或间接与各大类探测器相结合，就能形成大量成本低廉的小型低噪声逻辑电路，供红外传感器设计人员任意选用。CCD 原理与探测器技术的结合是新发展起来的，进展迅速，并且预示着将大大提高从复杂辐射环境中获取小信号信息的能力。第五章将介绍这一独特领域内的某些最新成果和方案。

为从激光信号中提取最大量的信息，相干红外信号的相位与频率测量法已成为重要的方法。相干红外辐射可在标准探测器材料中进行高效率的非线性混频，所达到的灵敏度接近理论极限(每一测量周期几个光子)，因而促进了激光器在通信、雷达和光谱学等领域中的新应用。一本论述红外探测器的书籍，必须涉及外差探测即非线性探测的某些主要方面(第七章)才是全面的。第八章介绍本书初版以后光学和红外探测器领域中取得的最新进展。作者认为，这一章所叙述的都是读者要了解探测器技术现状所必需的。

R. J. 凯斯

1980 年 5 月于马萨诸塞州，列克星敦

目 录

第一章 绪论	1
第二章 光子探测过程	6
2.1 某些光子探测机理的分类及其唯象描述	8
2.1.1 光子效应	10
2.1.2 热效应	32
2.1.3 波相互作用效应	41
2.2 辐射探测器中的噪声	45
2.2.1 半导体探测器中的噪声	46
2.2.2 光电发射器件中的噪声	51
2.3 优值	52
2.3.1 光谱响应	52
2.3.2 响应率	53
2.3.3 D^*	54
2.3.4 D^{**}	56
2.3.5 噪声等效功率	56
2.3.6 探测率	57
2.3.7 频率响应, 响应时间, 时间常数, f^*	57
2.3.8 噪声频谱	58
2.4 信号起伏极限和背景起伏极限	58
2.4.1 信号起伏极限	59
2.4.2 背景起伏极限	62
2.4.3 信号起伏及背景起伏的综合极限	70
2.5 红外和光学探测器技术的现状	72
参考文献	80

第三章 热探测器	85
3.1 基本原理	86
3.2 温差电堆	94
3.3 测辐射热计	98
3.4 高莱元件与有关的探测器	106
3.5 热电探测器	109
3.6 其它类型的热探测器	115
3.7 热探测器在红外成像系统中的应用	116
参考文献.....	120
第四章 光伏和光电导红外探测器	122
4.1 基本理论	125
4.1.1 光子的直接探测	125
4.1.2 光电流,增益和响应率	125
4.1.3 噪声机理	127
4.1.4 探测率	130
4.1.5 探测器的其他参数	131
4.2 光伏探测器	133
4.2.1 理论	133
4.2.2 材料	139
4.3 本征光电导探测器	147
4.3.1 理论	147
4.3.2 材料	152
4.4 非本征光电导探测器	159
4.4.1 理论	159
4.4.2 材料	161
4.5 本章提要与几个结论	164
参考文献.....	179
第五章 光电发射探测器	182
5.1 引言	182

5.1.1	应用及优点	182
5.1.2	局限性	183
5.1.3	光电发射表面的类型: 经典表面和负电子亲和 势表面	184
5.1.4	反射式和透射式器件	185
5.1.5	本章提要	186
5.2	光电发射过程	187
5.2.1	电子逸出能原理	187
5.2.2	金属和半导体的逸出能参数	188
5.2.3	各种材料的阈值和光电发射物质的选择	191
5.3	经典光电发射表面	196
5.3.1	(CsSb)光电发射体	196
5.3.2	S-1(AgCsO)光电阴极	199
5.4	负电子亲和势 (NEA) 器件	202
5.4.1	引言和优点	203
5.4.2	负电子亲和势作用的物理基础	204
5.4.3	负电子亲和势 GaAs.....	207
5.4.4	负电子亲和势表面模型的建立	210
5.4.5	反射和透射式负电子亲和势 GaAs 的制备和最 佳性能的获取	213
5.4.6	其它负电子亲和势红外光电阴极	221
5.4.7	负电子亲和势硅	226
5.5	光电发射器件: 光电倍增管	228
5.5.1	引言	228
5.5.2	光电阴极的暗电流	229
5.5.3	电子倍增器	232
5.5.4	光谱响应数据	237
5.5.5	负电子亲和势的专用分析工具	241
	参考文献.....	243
	第六章 用于红外成像的电荷转移器件.....	248

6.1	历史	248
6.2	电荷耦合器件	252
6.2.1	基本工作原理	252
6.2.2	极限性能	256
6.3	延时积分(TDI)和红外灵敏的 CCD	269
6.4	直接注入: 混合式和非本征硅	272
6.5	积累模式: 非本征硅	277
6.6	红外电荷注入器件(CID)	278
6.7	结论	288
	参考文献	289
第七章	非线性外差探测	290
7.1	双频单光子外差探测	290
7.2	双频多光子外差探测	294
7.2.1	多量子直接探测	294
7.2.2	多光子光混频理论	297
7.2.3	信噪比和最小可探测光子数	301
7.2.4	实验	303
7.2.5	讨论	307
7.3	利用非线性器件的三频单光子外差探测	309
7.3.1	系统结构	310
7.3.2	应用于具有正弦波输入信号的连续波雷达	316
7.3.3	应用于具有高斯输入信号(高斯谱)的连续波 雷达	326
7.3.4	应用于具有高斯输入信号(洛伦兹谱)的连续波 雷达	335
7.3.5	应用于模拟通讯系统	339
7.3.6	在低频下和各种结构中的运用	340
7.3.7	数值计算例子: CO ₂ 激光雷达	343
7.3.8	应用于二进制通信和脉冲雷达(真空通道)	343
7.3.9	应用于二进制通信和脉冲雷达(对数正态大气通	

道).....	358
7.3.10 讨论	364
7.4 用于探测远处目标的多频单光子选择性外差辐射 测量技术	366
7.4.1 两种接收频率的结构	367
7.4.2 n 个接收频率和因子 k	370
7.4.3 两个高斯信号的信噪比和最小可探测功率	372
7.4.4 数值实例: 天体的 CN 辐射	374
7.4.5 讨论	376
参考文献.....	379
第八章 光学和红外探测技术的晚近发展	382
8.1 热探测器	382
8.1.1 温差电堆	383
8.1.2 测辐射热计	383
8.1.3 高莱探测器及其他同类探测器	385
8.1.4 热电探测器	385
8.1.5 其他类型的热探测器	387
8.1.6 热探测器在红外成像系统中的应用	388
8.2 光伏、光电导和雪崩光电二极管探测器	389
8.2.1 本征光伏探测器	389
8.2.2 本征光电导探测器	390
8.2.3 非本征光电导探测器	390
8.2.4 雪崩光电二极管	391
8.3 光电发射探测器	392
8.4 电荷转移成像器件	394
8.4.1 近红外和可见光 CCD 成像仪.....	394
8.4.2 热景物 CCD 成像仪.....	395
8.5 外差探测器	398
8.6 光学和红外探测器技术的发展设想	399
参考文献.....	401

第一章 绪 论

R. J. 凯斯

太阳发射出来的光学光子(或称可见光光子)为我们这个行星提供了最重要的辐射源。自生物进化开始之日起,太阳光就为一切生物所感知、感觉和利用(虽然人们对它还不完全理解)。视网膜的自然进化过程形成了一个能觉察出少数几个光子的光学探测器阵列。在过去一百年中,由于照相乳剂、视频增强管以及电荷耦合器件的发展和完善,探测技术已接近视网膜的灵敏度。

红外线是我们周围第二强的辐射源,但直到十九世纪初(1800),才由 W. 赫谢耳(1738—1822)所发现并定名。在其后 150 年间,红外探测器的发展缓慢。直到 1947 年, W. 肖克莱(Shockley), J. 巴丁(John Bardeen)和 W. 布拉顿(Walter Brattain)发明了晶体管,才激发了人们对半导体能带结构和输运过程进行大规模的研究。其后 30 年,美国政府和工业界的巨额投资所起的刺激作用,几乎改变了红外探测技术各方面的面貌(这里只举几个例子:二元、三元和 IV 族化合物中的杂质光电导和本征光电导;铯化合物半导体的光电发射;热敏电阻;硅靶光导摄像管;电荷耦合器件以及外差探测)。目前,红外探测器的研究和发展重点,正由各类新材料的完整性转向以电荷耦合器件逻辑信号处理和外差信号处理为手段的信息检索技术。这种转变,部分原因是探测器材料已逐渐接近灵敏度的理论极限(再没有什么显著提高的余地),而先进的信号处理很可能通过目标发射和反射的红外

辐射,从复杂景物中提取目标的重要信息. 这些信号处理方法虽然相当新颖,但作为一系列信号处理的第一步,已利用了第四、第五章中所介绍的许多基本材料和方案.

能够用来描述“理想的”红外探测器的一组特征量不是唯一的. 因为理想探测器有多少种应用几乎就有多少种定义. 例如应用它探测火车热轴时,可靠性和保养简单是衡量其优劣的标准;在卫星上应用,则体积小、重量轻、功耗低以及灵敏度高是重要的衡量尺度. 在下面的讨论中,凡一个探测器,其最小可探测功率由照射在其表面上的光子流的统计起伏所决定,可称为理想探测器. 所有的红外传感器(除工作于封闭的低温实验室环境中的以外)都是曝露在相当强的红外背景辐射之中,因此,探测小信号的能力最终总是由背景辐射引起的光子噪声所决定. 在有关的光谱区域内,背景辐射源具有泊松分布,因此,发射光子数的均方根起伏(光子噪声)等于总发射光子的平方根,亦即

$$\Delta N_B = (N_B)^{1/2}.$$

这种噪声可以用功率表示为

$$\Delta P_B = (P_B h\nu / t)^{1/2},$$

式中, $h\nu$ 是光子的平均能量, t 是该功率积累的时间,也称为积分时间. 即使所设计的探测器把背景辐射影响减到极小,大地和天空背景辐射在 8—12 微米光谱区域所引起的噪声也是显著的. 作为一个说明问题的例证,我们来考虑一个传感器,其中有一个最小的高效率探测器(大小等于弥散圆)置于理想的 $f/1$ 望远镜焦点上. 当观察大地景物时,该探测器接收到 2×10^{-8} 瓦背景辐射,而当曝露于天空漫射辐射中时,大约接收到 6×10^{-11} 瓦. 这两个极限背景所产生的光子噪声分别等于 2×10^{-14} 瓦和 3.5×10^{-18} 瓦.

还有许多与探测过程相关的其他噪声源可能会超过光子

噪声。本书中将详细论述这些噪声源。探测器材料必定是很完整,以致只要在低温下工作,就能把内部产生的噪声减少到可以忽略的水平。对于光电发射体已不灵敏的红外光谱区域(> 2 微米)来说,前置放大器的热噪声通常确定了低背景辐射条件下可实现的最小可探测功率。如果放大器噪声电流等于或小于功率为 P_s 的信号所产生的电流,则可以证明,探测器的无噪声增益必定为

$$G \geq \frac{h\nu(kTC)^{1/2}}{eP_s t}.$$

为实现每个测量周期内的信号为一个光子的最终探测极限(量子效率假定为 1),所需的增益为

$$G \geq \frac{2(kTC)^{1/2}}{e},$$

式中, k 是斯忒藩-玻耳兹曼常数; e 是电子电荷; C 是前置放大器的有效输入电容。值得注意的是,一个工作在 300K 的放大器,如果具有 10^{-12} 法拉的输入电容和 1 秒的积累时间,则探测器只要具有 2.4 的增益,就足以达到星体背景下的光子噪声极限。而为实现每个测量周期一个光子的最终极限所需的增益是 800。

除上面所述外,弱红外信号测量的另一问题是要知道从哪里进行探测。电荷耦合器件(CCD)是在二元、三元和 IV 族光电导体上制成的,具有许多适于作小信号探测的特性。具有多元特征的 CCD 提供了阵列器件所特有的大视场,而为了便于捕获目标,每个探测器元件又保持着低背景光子噪声所必须的小视场,每个阵列元件在一帧时间内积累的所有光生电荷,可以依次由直接制作在衬底上的一个低噪声前置放大器读出。目前,在硅上制作的 CCD 能够构成有 3,000,000 个探测元件的阵列,其光谱灵敏波段达 1 微米,噪声大约相当于每

个积分时间内 50 个光子。没有任何先验的理由怀疑在二元和三元光电导体上制造的 CCD 探测器,将来可在更长的波长下达到类似的性能。

就红外领域未来的发展来说,CCD 存储、加减和重新排列信息的能力,也许比用作单元传感器更为重要。这些效能可产生先前大型机构用昂贵而笨重的计算机才能取得的逻辑功能,这样,就能供个体的研究和设计人员使用。另一种完全不同的相干辐射信号处理方法,也有希望扩大红外辐射的探测距离。

稳定激光器极窄的谱线宽度,配合上相干探测技术,就能够提取从目标热发射不能获得的信息。通过激光反射信号与稳定的本机振荡器辐射在探测器中混频,就能够测量目标的移动速度和角运动。实际上,即使当目标比光学系统的极限分辨率还要小时,通过相干频谱的分析,也能够测定目标的许多几何特征。

奇怪的是,与非外差探测器系统相比,接近探测器理论极限的外差探测器系统,比较不容易受探测器材料缺陷的影响。受热噪声或放大器噪声支配的普通红外探测器,当以外差方式使用时,可以起接近理想的接收器的作用。这是探测器中相干激光信号与本机振荡器辐射作非线性混频时的固有增益的结果。只要本机振荡器辐射产生的光子噪声超过所有其他噪声源,探测器就能探测每个测量周期几个光子的信号。提高本机振荡器功率,就能使低劣的无源探测器转变成理想的外差传感器。原则上,只要有足够大的本机振荡器功率,并且能将它产生的热量足够快地从探测器传走,因而不发生热击穿,上述情况甚至在室温下也能达到。

由于红外领域发展很快,要想对红外探测器技术的现状写一本适时的和全面的书籍是很不容易的。为了介绍范围广

泛的探测器学科的最近发展,本书分成六章,每章都是由一位从事这方面工作的知名权威撰写的;他们都对其所撰写课题的历史沿革和背景作了阐述,并且对其技术作了分析.凡是在公开文献中已发表的长篇指导性论述,通常只注明资料来源,正文中不再引述.然而,当作者觉得有必要用详尽的数学语言来充实某一论点时,有时也有引述的,如第七章中对非线性探测的论述,就是这样的一个例证.

虽然没有明确划分,但本书也可分为三大部分.第一部分论述各种红外探测器,以及以后各章中介绍的所有材料.这一部分可以作为本书的导论,把红外工艺技术现状的全貌介绍给读者;也可以作为以后进一步深入讨论的纽带.第二部分(第三、第四和第五章)详细地分析了现今广泛应用的探测器:热探测器,光电导和光伏探测器以及光电发射探测器.

第三部分(第六、第七章)介绍从探测元件提取信息的新技术.这些新技术主要包括电荷耦合器件和相干辐射的非线性混频.

每个科学工作者和工程技术人员都是从不同的有利地位来了解他的专业领域的.编者一直从事固体物理工作,他对最近 25 年中红外探测器的显著发展,以及对未来事物发展趋势的判断,很可能具有个人的偏见.

第二章 光子探测过程

P. W. 克鲁斯

同其它类型的传感器件一样,光学探测器¹⁾和红外探测器可按它们的工作方式进行分类。它们的性能可用其特有的优值描述;这些优值可使系统设计者预言和计算使用这些器件的系统的性能。而且与所有的传感器一样,它们的性能不能超过同类型理想器件的性能,即存在着限制它们性能的基本极限。

本章除节 2.4 外,大部分是描述性的,而不是数学的。作者的意图是向读者介绍光学和红外探测器技术中有共同性的主要方面。节 2.1 介绍红外探测器的基本分类方法,并对重要探测机理的现象进行讨论。虽然这一节描述了大量的光效应,但重点放在几种已广泛利用的效应上,并对这些效应作了简单分析。

为了制出实用的光电探测器,只对引起光电效应的辐射与材料的相互作用进行研究和计算是不够的。象各种类型的传感器一样,内部噪声限制了从探测器输出信号中检测很弱信号的能力。因此,在研究材料的光电效应同时,必须研究材料的噪声问题。因为最有用的效应是使信号表现为材料的电性能变化的那些效应,所以 2.2 节描述了光敏材料中的电噪声。

为了定量描述光电探测器的性能,必须定义优值。在本

1) 光学探测器包括在紫外和可见光谱区域运用的探测器。