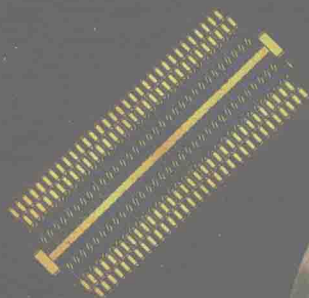


· 空间技术与应用学术著作丛书 ·

航天红外成像探测器

陈伯良 李向阳 著

I nfrared Imaging Detectors
for Space Applications



科学出版社

航天红外成像探测器

陈伯良 李向阳 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

红外光子探测器及以此为基础的红外焦平面成像阵列是当代先进红外技术应用的基础和引领者,也是近三十年来红外物理与技术领域最主要的研究方向和最活跃的研究对象之一。本书在着重论述红外焦平面成像阵列一般原理基础上,以航天红外探测应用中最重要 HgCdTe、InSb、InGaAs、Si·X、QWIP 和 T2SL 等探测器为论述主体,详尽介绍其科学原理、技术路线和性能特点。本书密切结合作者及其同事多年经验和研究成果,也尽量反映国际最新发展。

本书可供红外光电技术领域从事红外成像探测器材料、器件的研究、制造、应用、开发和管理的专业人员阅读参考,也可供高等学校光电器件和信息类专业的教师、研究生和高年级学生,以及对红外技术感兴趣的读者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

航天红外成像探测器/陈伯良,李向阳著. —北京:
科学出版社,2016.7

ISBN 978-7-03-049202-9

I. ①航… II. ①陈… ②李… III. ①航天探测器—
红外探测器 IV. ①V476.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 146973 号

责任编辑:王艳丽

责任印制:谭宏宇 / 封面设计:殷 靓

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>

南京展望文化发展有限公司排版

苏州越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年7月第一版 开本:787×1092 1/16

2016年7月第一次印刷 印张:24 1/4 插页4

字数:550 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

空间遥感与科学实验有效载荷技术系列

专家委员会

主任委员 匡定波

委员 龚惠兴 方家熊 陈桂林 王建宇 何力

编辑委员会

主任委员 陆卫

副主任委员 龚海梅 丁雷

委员 汤心溢 杨建荣 张涛 舒嵘 孙胜利
吴亦农 梁平治 刘定权 冯旗 李向阳
丁瑞军 李雪 陈效双 陈建新 刘银年
夏项团 潘建珍

空间遥感与科学实验有效载荷技术系列·序

1957年世界上第一颗人造卫星发射成功,给人类开辟一个前所未有高度的活动平台。1965年中国科学院提出建议“我们也要搞人造地球卫星”,开启了中国人向空间进军的序幕。自此,中国空间技术得到了部署和发展,并与同时期的“原子弹、导弹”等高技术一起发展,最终形成了“两弹一星”的格局。

经过了半个世纪的发展。当前,我国已经在空间领域形成了通信、气象、环境、海洋、载人、探月等系列。在这些航天系列中,对地观测无疑是重要内容,其中包括气象、海洋、资源、环境、侦察、预警等方面的应用。

中国科学院上海技术物理研究所自1965年参与航天项目,从红外地平仪做起,半个世纪以来,上海技术物理研究所在红外、光电遥感探测技术领域聚焦国家重大需求,坚持为国家重大科技战略做出突破性贡献:1988年发射的“风云一号”是我国第一颗太阳同步极轨运行气象卫星;1997年发射的“风云二号”是我国的第一颗地球同步轨道运行的气象卫星;2008年发射的“风云三号”是我国新一代极轨气象卫星。此外,上海技术物理研究所还为载人航天工程、探月工程、海洋卫星、环境卫星、多种试验卫星等研制了红外、光电应用系统有效载荷和航天单机。在这些航天工程项目中,上海技物所重点是发展对地观测和探月观测的有效载荷和相应的关键技术。为此,所内许多科研人员从事了一辈子与航天相关的科研活动,为我国的航天科研事业贡献了全部青春年华。同时在这些科研过程中,解决了许多技术问题,发展了相应的技术,有些专业技术是一般教科书中没有的。为了让这些宝贵的科研成果和学术积累有所传承,由科学出版社和上海技术物理研究所共同组织出版了这套“空间遥感与科学实验有效载荷系列”专著。

本系列专著是“空间技术与应用学术著作丛书”的重要组成部分,涉及到红外探测器、不同波段的焦平面器件、空间用致冷器、各种功能的红外光学薄膜、遥感探测系统、红外地平仪、光电扫描辐射计、成像光谱仪、激光测高、激光成像以及空间微重力下的科学仪器、空间照明系统等。相信本系列专著能够为广大科技人员及科技爱好者,尤其是为光电技术领域的年轻科技人员带来具有实用价值的参考。

撰写这系列专著,需要相关科技人员、业内专家付出极大劳力和智慧。同时,作为上海技术物理研究所的重要科技活动,我所将始终给予人力和财力上的积极支持。

愿丛书顺利出版,特此为序。

匡定波 陆旦

二〇一六年六月

近年来航天红外成像探测器技术的发展十分迅速。本书通过对这一技术的基础理论、技术路线和当前发展状况的简明介绍,为我国从事红外探测器特别是航天红外成像探测器材料、器件的研究、制造、应用和管理的专业人员和希望涉足这一领域的青年科技工作者包括研究生,以及对红外技术感兴趣的读者提供一种基础材料和路径指引。

红外探测器按其工作机理可分为光子探测器和热探测器两大类。本书只涉及光子探测器,主要集中于航天和遥感应用最重要的几种探测器。全书共9章。第1~3章介绍红外成像探测器技术的物理学基础。过去已有汤定元、糜正瑜等编著的《光电器件概论》,周世椿编著的《高级红外光电工程导论》等著作,对红外探测器的物理基础作了详细的介绍,所以本书只在第2章中对红外光子探测器的原理作简明陈述,目的在于方便读者阅读和理解本书后面的内容。红外焦平面阵列是新兴的迅速发展的技术,本书第3章用很大篇幅较系统和深入地讨论红外焦平面阵列的基本概念和核心理论。第4~7章介绍重要的航天红外成像探测器,第4章讨论 InSb,第5章讨论 HgCdTe,这两种探测器发展最为成熟,技术水平最为先进,在航天应用中占据中心地位,在整个红外市场中占据大部分份额。第6章介绍 InGaAs 和 Si:X,这两种材料在航天工程中也有重要应用。第7章介绍 QWIP 和 InAs/GaSb T2SL,前者已经相当成熟,后者虽未有航天应用,却被视为红外成像探测器的未来之星。红外焦平面阵列的制造技术十分复杂,第8章对焦平面阵列制造若干关键的特殊工艺技术作概要介绍。第9章介绍红外探测器的数值仿真。本书的介绍密切结合了作者及其同事在这一领域多年实际经验和研究成果,也尽量反映国际上的最新发展。

航天红外成像探测器的技术架构简单来说分为四块:敏感材料、探测器芯片、读出电路和致冷封装。本书只涉及其中一部分。本书以器件为主体,上游知识只限于介绍对器件性能有重要影响的材料参数,下游知识仅达到信号读出的输入接口和组件封装可靠性的初步入口。探测器敏感材料的制备和表征,读出电路的设计、制造和性能测试,致冷、封装、结构可靠性等内容,本身都是十分复杂而困难的技术,对红外焦平面阵列性能和使用影响甚巨,而本书涉及甚少。一方面限于篇幅,另一方面由于作者学识浅陋,力有不逮,只能浅尝辄止。敬请读者谅解。本书部分章节内容是在作者近两年为部

分年轻同事、研究生讲授红外探测器基础课程和面向资深研究人员的器件高级研修班上的主题发言讲稿基础上深化扩充而成的。本书第1~4章、第6~8章由陈伯良撰写,第5章和第9章由李向阳撰写,徐国庆撰写第5章部分内容,刘大福撰写第9章部分内容。虽然我们小心谨慎,尽量避免学术性的错误,仍恐力不从心,疏漏和不足之处,衷心欢迎读者批评指正。

本书动笔之初,匡定波院士审阅撰写提纲并提出指导性意见。回想匡先生在国家863计划信息获取与处理技术主题专家组组长任上对发展我国红外焦平面阵列成像技术所做的开创性和富有远见的布局以及对后辈工作的支持和慰勉,作者铭感殊深。作者的同事许多出色的原创性工作成果,对本书构成有很重要的贡献,他们的名字在参考文献中列出,在此不一一赘述。本书初稿第3章承胡晓宁研究员,第4~5章承杨建荣研究员精心审阅,贾嘉、杨晓阳、王仍副研究员审阅有关章节,并和兰添翼、薛世伟、陈心恬、黄波、邢怀昌、操神送等为本书制作部分插图并校正参考文献,作者在此表示衷心感谢。最后,对我们的家人对研究工作的支持,谨表示内心的歉疚和深深的谢意。

陈伯良 李向阳

2016年4月 上海

空间遥感与科学实验有效载荷技术系列·序
前言

第 1 章 绪论	1
1.1 红外辐射与红外探测	1
1.2 红外探测器的发展历程	5
1.3 红外探测技术的重要地位	7
1.4 应用需求激励和关键技术突破促进红外成像探测器不断发展	9
参考文献	10
第 2 章 红外光子探测器原理	12
2.1 半导体的光吸收	12
2.2 半导体中少数载流子寿命和扩散长度	16
2.3 红外探测器的特性参数	18
2.3.1 响应率	19
2.3.2 噪声	20
2.3.3 噪声等效功率	22
2.3.4 探测率	22
2.3.5 响应时间	24
2.3.6 量子效率	24
2.3.7 其他参数	25
2.4 红外探测器的噪声机构	27
2.4.1 热噪声	27
2.4.2 散粒噪声	28
2.4.3 温度噪声	31
2.4.4 1/f 噪声	32
2.4.5 随机电报信号噪声	32

2.5	光电导型红外探测器理论	33
2.5.1	半导体的光电导效应	33
2.5.2	光电导型探测器的性能	34
2.5.3	实际使用条件	39
2.5.4	杂质光电导红外探测器	40
2.6	光生伏特型红外探测器理论	42
2.6.1	半导体的光生伏特效应	42
2.6.2	光生伏特型红外探测器基本结构	46
2.6.3	量子效率和噪声	47
2.6.4	载流子复合机构和少子寿命	52
2.6.5	光伏红外探测器的电流机构和优值因子	55
2.6.6	光伏红外探测器的实际使用条件	58
2.7	红外光子探测器背景限性能和工作温度	60
2.7.1	背景限性能	60
2.7.2	低温工作的必要性	61
2.8	光电导和光生伏特探测器性能特点比较	62
	参考文献	63
第3章	红外焦平面阵列概论	65
3.1	从扫描成像到凝视成像	65
3.1.1	红外成像的对比度要求	65
3.1.2	单元探测器光学-机械扫描成像原理和性能描述	65
3.1.3	凝视阵列成像	67
3.1.4	光-机扫描成像和凝视阵列成像的限制性因素	68
3.2	红外焦平面阵列的结构及成像原理	69
3.2.1	单片焦平面器件和混成焦平面器件	70
3.2.2	用于焦平面阵列的探测器类型	72
3.2.3	焦平面阵列成像原理简述	73
3.2.4	凝视焦平面和扫描焦平面	74
3.3	红外焦平面阵列特性参数	75
3.4	红外焦平面阵列的信号读出	79
3.4.1	电压读出和电流读出	79
3.4.2	交流信号读出和直流信号读出	80
3.4.3	红外焦平面读出电路的基本结构	80

3.4.4	红外焦平面读出电路的其他功能单元	92
3.4.5	读出电路的噪声	96
3.5	红外焦平面阵列的热灵敏度表征	102
3.5.1	表征红外焦平面阵列热灵敏度的特性参数	102
3.5.2	红外成像系统和红外焦平面阵列 $NE\Delta T$ 表达式的导出	104
3.5.3	基于光子通量计数的 $NE\Delta T$ 公式	107
3.5.4	各种性能限制条件下的 $NE\Delta T$ 表达式	109
3.5.5	实际例子	111
3.5.6	HgCdTe 阵列和 QWIP 阵列读出电路限制 $NE\Delta T$ 的比较	114
3.5.7	实验室测量方法	115
3.5.8	直观的估计方法	116
3.5.9	最小可分辨温差概念	120
3.5.10	红外焦平面阵列灵敏度的其他表示方式	122
3.6	红外焦平面阵列成像空间分辨率	124
3.6.1	简单红外成像系统的光路	124
3.6.2	红外系统成像空间分辨率	125
3.6.3	调制传递函数	126
3.6.4	$F\lambda - d$ 参数空间	129
3.6.5	减小探测器光敏面尺寸的好处	131
3.6.6	减小探测器尺寸的工艺技术困难	134
3.6.7	用 HDVIP 技术制备的 $5\mu\text{m}$ 阵列	135
3.6.8	空间过采样概念及亚衍射限像元前景	137
3.6.9	焦平面阵列像元的最佳尺寸	138
3.6.10	探测器像元相关 MTF 的测量	140
3.7	红外焦平面阵列性能非均匀性问题	142
3.7.1	影响红外焦平面阵列性能均匀性的因素	142
3.7.2	焦平面阵列非均匀性的表示方法	145
3.7.3	非均匀性对凝视红外焦平面灵敏度和热成像的影响	147
3.7.4	焦平面阵列非均匀性校正方法	149
3.7.5	当前商品红外焦平面阵列非均匀性实际水平	152
3.8	红外焦平面阵列的响应速度	153
3.8.1	焦平面阵列成像的帧频	153
3.8.2	关于 D^* 公式中 Δf 的取值问题	155
	参考文献	157

第 4 章 InSb 红外探测器阵列	163
4.1 InSb 单晶材料的性质	163
4.1.1 InSb 单晶的冶金学与机械性质	163
4.1.2 InSb 单晶的电学与光学性质	165
4.1.3 商品 InSb 单晶片的技术参数	169
4.2 InSb 光伏探测器	170
4.2.1 InSb 光伏探测器的制备技术	170
4.2.2 InSb 光伏探测器的电流机构	172
4.2.3 InSb 光伏探测器性能	177
4.3 InSb 红外焦平面阵列的制备	179
4.3.1 工艺技术路线	179
4.3.2 InSb 二极管阵列和读出结构参数设计	180
4.3.3 台面结构和平面结构的优缺点	186
4.4 InSb 红外焦平面阵列性能与应用	186
4.4.1 战术应用 InSb 焦平面阵列	186
4.4.2 空间和战略应用 InSb 焦平面阵列	189
4.5 InSb 焦平面阵列制备的替代技术路线	191
4.6 势垒 InSb 焦平面阵列	193
4.6.1 AlInSb-InSb 焦平面阵列	193
4.6.2 AlAsSb/InAsSb 势垒二极管	194
4.6.3 AlInSb-InSb 光伏串	195
参考文献	196
第 5 章 Hg_{1-x}Cd_xTe 红外探测器	200
5.1 碲镉汞(Hg _{1-x} Cd _x Te)概述	200
5.2 Hg _{1-x} Cd _x Te 材料的性质	202
5.2.1 Hg _{1-x} Cd _x Te 组分在材料基本的物理化学性质中的重要性表现	202
5.2.2 Hg _{1-x} Cd _x Te 的光学性质	205
5.2.3 Hg _{1-x} Cd _x Te 基本电学性质	207
5.3 航天应用 Hg _{1-x} Cd _x Te 光电导探测器	210
5.3.1 碲镉汞光电导探测器的基本设计考虑的问题	211
5.3.2 Hg _{1-x} Cd _x Te 光电导探测器的响应光谱形状的深入理解和优化 设计技术	215
5.3.3 航天 Hg _{1-x} Cd _x Te 光电导探测器芯片照片和性能参数	219

5.4	Hg _{1-x} Cd _x Te 光伏探测器	221
5.4.1	Hg _{1-x} Cd _x Te 光伏探测器的制备技术	223
5.4.2	关于 Hg _{1-x} Cd _x Te 光伏探测器的结构: n ⁺ -p 还是 p ⁺ -n?	234
5.4.3	关于台面结和平面结、环孔结的讨论	238
5.5	多色碲镉汞红外焦平面探测器	239
5.6	Hg _{1-x} Cd _x Te 雪崩光电二极管	241
5.7	Hg _{1-x} Cd _x Te 高工作温度的红外探测器	243
5.8	碲镉汞红外焦平面探测器在航天中的应用	245
	参考文献	247
第 6 章	InGaAs 和 Si : X 红外焦平面阵列	252
6.1	InGaAs 红外焦平面阵列	252
6.1.1	InGaAs 材料性质	252
6.1.2	InGaAs 光子探测器	254
6.1.3	NIR - SWIR InGaAs 焦平面阵列	261
6.2	非本征硅和锗焦平面阵列	264
6.2.1	Ge : Hg 探测器	264
6.2.2	阻挡杂质带光电导探测器原理	265
6.2.3	Si : As BIB 和 Si : Sb BIB 焦平面阵列	268
6.2.4	航天应用低背景和高背景 Si : As BIB 焦平面阵列简介	272
6.2.5	Ge : Ga 焦平面阵列	275
	参考文献	276
第 7 章	量子阱和超晶格红外探测器阵列	279
7.1	QWIP 光电探测器阵列	279
7.1.1	GaAs - AlGaAs 量子阱光电探测器工作原理	279
7.1.2	QWIP 的制作和性能	288
7.1.3	QWIP 成像焦平面阵列的热灵敏度	292
7.1.4	兆元级 MWIR 和 LWIR QWIP FPA 简介	293
7.1.5	双波段(中波/长波)QWIP FPA	295
7.1.6	QWIP FPA 的航天应用举例	297
7.2	InAs/GaSb II 类超晶格探测器	298
7.2.1	InAs/GaSb II 类超晶格的能带结构特点	298
7.2.2	InAs/GaSb II 类超晶格探测器	300

7.2.3	InAs/GaSb II类超晶格探测器的暗电流	303
7.2.4	InAs/GaSb II类超晶格焦平面阵列	306
	参考文献	308
第8章	红外焦平面阵列若干关键制造技术	313
8.1	钢柱互连技术	313
8.1.1	高密度钢柱阵列制备工艺	314
8.1.2	互连技术	317
8.1.3	三维互连	323
8.2	焦平面阵列芯片减薄	325
8.2.1	红外焦平面阵列芯片(衬底)减薄的目的和作用	325
8.2.2	焦平面芯片的CMP加工	328
8.2.3	焦平面芯片的金刚石车削加工	331
8.3	航天红外焦平面组件结构和可靠性组装	333
8.3.1	冷却型红外探测器组件的一般结构	333
8.3.2	军用红外探测器组件	337
8.3.3	航天红外探测器组件结构	341
8.3.4	航天红外焦平面阵列的结构优化和封装可靠性	343
	参考文献	351
第9章	红外探测器的数值仿真	356
9.1	数值仿真概述	356
9.2	光电子器件数值仿真的基本原理和方法	359
9.3	HgCdTe红外探测器数值仿真计算进展	365
9.4	热敏探测器件的热力学有限元仿真分析简介	368
9.4.1	有限元法热学分析引言	368
9.4.2	热敏电阻红外探测器的热学仿真实例	369
9.5	结论	372
	参考文献	373

1.1 红外辐射与红外探测

视觉是人类最发达的感觉之一。可是大自然宽广的电磁波谱只给人类的视觉开启了一扇很小的窗口。人眼只能感知可见光。可见光是电磁波谱中波长为 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 的一个很小的窗口,其频率为 $430\sim 750\ \text{THz}$ 。如图 1.1 所示,电磁波谱的构成按波长由短到长,依次为 γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线、微波和无线电波。可见光谱的长波一端延伸一段相当宽的红外区,其波长为 $0.7\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ 。这个波段特别引起人们关注,因为能够辐射这一波段电磁波的物体的种类和数量实在太多了。严格地说,有温度的物体都发射红外辐射。

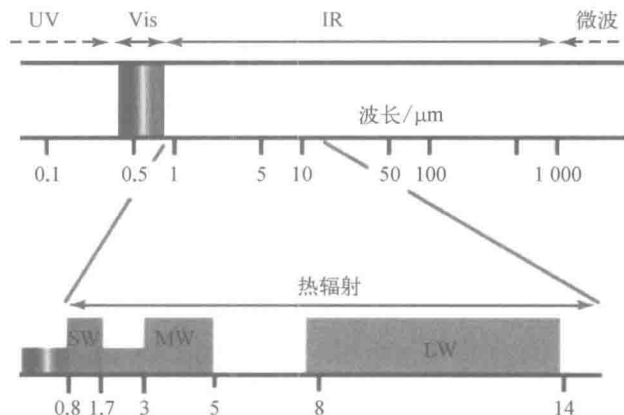


图 1.1 红外线是电磁波谱中的一段,其波长为 $0.7\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$

红外辐射的能量称为辐射能。在红外探测技术中,人们有时关心探测某一指定时间间隔内传递的辐射能的总量,有时关心单位时间内传递的辐射能。后者在辐射度学中相应的物理量为辐射通量或辐照功率。

辐射率(或辐射亮度, radiance)描述一个有一定尺度的扩展源在某 θ 方向上单位投影面积 A 向单位立体角发射的辐射通量,用 L 表示,单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ (瓦·米⁻²·球面度⁻¹)。辐射出射度(简称辐出度, radiant exitance)表征的是扩展源在单位面积上向半球空间发射的辐射通量,用 M 表示,单位是 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (瓦·米⁻²)。对均匀的漫射体(朗

伯源),有 $M = \pi L$ 。辐照度(irradiance)定义为被照物体表面单位面积上的辐射通量,用 E 表示,单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (瓦·米⁻²)。辐照度和辐出度的单位相同,它们的定义式形式也相同,但两者却具有不同的物理意义。辐出度是离开辐射源表面的辐射通量分布,它包括辐射源向 2π 空间发射的辐射通量;而辐照度则是入射到被照表面上的辐射通量分布,它可以是一个或多个辐射源投射的辐射通量,也可以是来自指定方向的一个立体角中投射来的辐射通量。

通常辐射能量随波长而变化。光谱辐射量就是用来描述辐射的光谱特征,即在指定波长处,单位波长间隔内的单色辐射量。与上述各个物理量相对应的,有光谱辐射通量(P_λ , $\text{W} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)、光谱辐亮度(L_λ , $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)、光谱辐射出射度(M_λ , $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)、光谱辐照度(E_λ , $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)。在红外探测技术领域,人们仍习惯用 cm 作为长度单位,所以在文献中辐射物理量的单位有时与上述不同,不过只要通过简单换算就可达到一致。

红外辐射自身遵从一些基本的规律。

各种物体对外来辐射的吸收,以及它本身向外的辐射都不相同。任何温度下能够全部吸收任何波长入射辐射的物体,称为黑体(black body)。黑体是一个理想化的物体概念。

物体的发射率(或比辐射率) ϵ 表示该物体在温度 T 时的辐射出射度与具有同一温度的黑体的辐射出射度之比。 ϵ 越接近于 1,物体的辐射特性与黑体越接近。

普朗克(Planck)根据他自己提出的微观粒子能量不连续的假说,导出了描述黑体辐射光谱分布的公式,即黑体的光谱辐射出射度为

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1.1)$$

式中, M_λ 为光谱辐出度,一般单位选为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; λ 为波长; h 为普朗克常量, $(6.6256 \pm 0.0005) \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$; T 为黑体的热力学温度,单位是 K ; c 为真空中的光速, $(2.997925 \pm 0.000003) \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为玻尔兹曼常量, $(1.38054 \pm 0.00018) \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

黑体的总的辐射出射度,可由普朗克公式对波长从 0 到无穷大积分导出:

$$M_b = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (1.2)$$

实际物体(灰体)的辐射出射度为

$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad (1.3)$$

式中, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常量 $(5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$ 。

红外光子探测器对入射辐射的响应往往与每秒接收到的光子数相关。描述光子探测器的性能和与其有关的辐射时,采用光子通量更为方便。根据普朗克的量子论,辐射也可以用光子数来度量,相应的有光子辐出度、光子通量、光子辐照度等术语。

用光子表示的辐射量与用功率表示的辐射量之间的换算相当方便。因为每个光子的能量为 $h\nu$, ν 为光的频率,所以简单地有,光子通量=辐射通量/光子能量($h\nu$),即 $\Phi_\lambda = P_\lambda/h\nu$,

单位为光子数/秒 ($\text{ph} \cdot \text{s}^{-1}$)。

由普朗克公式可以计算辐射源的单色光子辐出度。因为采用光子数表示,符号也可以写作 Q_λ 或 n_λ , 有

$$n_\lambda = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1.4)$$

图 1.2 是按式(1.4)计算的几种不同温度的典型黑体的光谱光子出射度。温度由高到低依次为太阳表面、钨丝灯泡、熔融的金、战斗机尾气、厨房烤炉、温暖的白天和寒冷黑夜的环境。这些曲线表明,随着温度下降,光子出射度的峰位向长波移动。300 K 背景的光子出射度峰位在 $9 \mu\text{m}$ 左右。巧合的是,这正好位于大气红外透射窗口 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 。这注定是利用长波红外窗口探测近室温目标的天然优势。

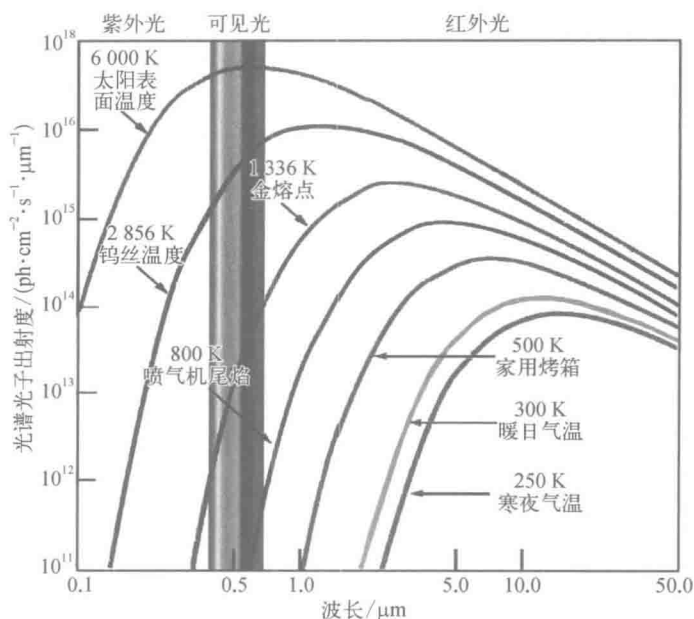


图 1.2 由普朗克定律得到的黑体辐射光谱分布
横轴是对数表示的波长,纵轴是光谱光子出射度

对 n_λ 在整个波长范围积分,可以得到温度为 T 的黑体的全光子辐出度

$$N = \int_0^\infty n_\lambda d\lambda = \int_0^\infty \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad (1.5)$$

当然也可以计算在感兴趣的波段范围落到探测器表面的总光子数。在现代微型计算机中这些十分有用的参数是不难计算的。读者也可以从现有的数据表中查到相关数据^[1]。

太阳和地球表面是最重要的自然辐射源。美国国家航空航天局一个较为正式的数据是太阳光球有效黑体温度为 5778 K ^[2]。太阳辐射的光谱分布可以用 5778 K 的黑体的辐射来近似表示,其峰值波长为 $\lambda_p \approx 0.502 \mu\text{m}$ 。太阳的全辐出度为 $M = 6.31 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。太阳

辐射出射度在各个光谱区分布的百分数大致为紫外区 ($0 \sim 0.4 \mu\text{m}$) $M_{0 \sim 0.4} \approx 0.14M$ 、可见区 ($0.4 \sim 0.75 \mu\text{m}$) $M_{0.4 \sim 0.75} \approx 0.42M$ 、红外区 ($0.75 \mu\text{m} \sim \infty$) $M_{0.75 \sim \infty} \approx 0.44M$ 。太阳常数是指在日-地平均距离上,在地球大气层外测得的辐照度。可以根据上述数据计算得到太阳常数 $\approx 0.1361 \text{ W/cm}^2$ 。而在地球表面(标准海平面),由于大气层的衰减作用,地面的辐照度只有太阳常数的 $2/3$,约为 0.09 W/cm^2 。

地球表面白天的热辐射由反射和散射的太阳光线及地球本身热辐射组成。夜间其光谱分布相当于地球环境温度的灰体的光谱分布。在地外空间看来,地球相当于一个 290 K 的辐射体。

地球大气是由多种气体分子和悬浮微粒(固态、液态)组成的混合物。红外辐射在大气中传输时,会遭到大气的吸收和散射,强度不断减弱。大气中所含重要吸收成分有水蒸气、二氧化碳、臭氧、甲烷和二氧化氮。大气中云、雾、雨、雪、尘埃、烟等悬浮微粒的直径分布为 $10^{-2} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 。红外辐射受到大气气溶胶散射而衰减,主要遵循米氏散射规律。大气中的雾和云的颗粒尺寸以 $5 \sim 15 \mu\text{m}$ 分布较多。对 $\lambda < 15 \mu\text{m}$ 的红外辐射,其波长与雾、云颗粒大小差不多,透过率很低。但微粒尺寸 $\gg 15 \mu\text{m}$ 时,对 $\lambda < 15 \mu\text{m}$ 的红外线散射是不显著的。短波红外线相对于可见光,在大气气溶胶中的透过率更高,对霾、雾、烟的穿透本领更强,对此近年来研究和应用实践有了重要进展^[3,4]。

图 1.3 是大气红外辐射透过率谱,波长为 $0.2 \sim 70 \mu\text{m}$ 。图中由下而上,标出了瑞利散射、各种大气成分的吸收、水汽吸收,以及经过总的吸收和散射以后的大气红外透射光谱。图的最上部显示了地球表面受到的太阳辐射谱分布,以及在大气层上部的地球辐射谱分布。大气红外透射光谱表明,地球大气层存在三个明显的红外传输窗口,即 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ (SWIR), $3 \sim 5 \mu\text{m}$ (MWIR), $8 \sim 14 \mu\text{m}$ (LWIR)。在很长时间内,红外技术的应用和红外探测器的研发,都优先集中在这三个窗口。随着人类航天活动拓展到广阔深邃的宇宙空间,红外技术的发展不再受到大气窗口的限制,而得到更广泛的应用。读者可在文献[5]中看到对红外辐射有关内容的更详细论述。

发展红外探测和成像技术的原动力就在于人们希望扩大自己的视觉窗口。在自然界,蛇、蝙蝠和某些昆虫能够以某种方式感知红外辐射。这些动物的这种能力为人们提供了灵感。研制出人工红外视网膜是人们长久以来的一个愿望。将来红外仿生眼势必能够革新人们对于外部世界的观感。自 1800 年英国天文学家赫胥尔(W. Herschel)发现红外辐射以来,尤其是 20 世纪 50 年代起半导体红外探测器技术迅速发展和应用,人类的视觉能力在广度和深度上有了飞跃的扩展。人们不仅掌握了白天,也能够洞察黑夜。借助红外探测技术,人们不仅可以看清有了光线之后的宇宙,而且正在努力穿透初光(First Light)之前的暗世纪宇宙,探索暗物质的奥秘。

红外探测与可见光探测相比,在某些方面具有不可替代的优势。首先,由于红外辐射来源于物体自身,不需要外加光源就能够探测。这种“被动”式探测,在夜视和某些无光照的极端场合是十分重要的。其次,地球大气中存在 3 个对红外辐射吸收和散射很小的“窗口”,红外辐射在这 3 个窗口波段是“透明的”,这种透明性使得红外辐射探测技术在自由空间通信联络、军事技术、遥感技术和天文学中获得了重要而广泛的应用。再次,在大气窗口之外的