



主编 苏君红

红外材料与探测技术

Infrared Material and Detection Technology




国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

红外材料与探测技术

主编 苏君红



 浙江出版联合集团
浙江科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

红外材料与探测技术/苏君红主编. —杭州:浙江科学技术出版社,2015.10

ISBN 978-7-5341-6939-7

I. ①红… II. ①苏… III. ①红外材料—探测技术 IV. ①TN213

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 246235 号

书 名 红外材料与探测技术
主 编 苏君红

出版发行 浙江科学技术出版社
杭州市体育场路 347 号 邮政编码: 310006
办公室电话: 0571-85176593
销售部电话: 0571-85176040
网址: www.zkpress.com

排 版 杭州大漠照排印刷有限公司
印 刷 浙江新华数码印务有限公司
经 销 全国各地新华书店

开 本	787×1092 1/16	印 张	39.25
字 数	880 000		
版 次	2015 年 10 月第 1 版		2015 年 10 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5341-6939-7	定 价	190.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现倒装、缺页等印装质量问题,本社负责调换)

责任编辑 莫亚元
装帧设计 孙 菁

责任校对 张 宁
责任印务 崔文红

编 委

主 编 苏君红

执行主编 兰 戈

副 主 编 李恒春 曾戈虹 黄 晖 庄继胜 熊小庆

编 委 (按姓氏笔画排序)

卜进晓 于法鹏 王 超 王 磊 王 懿

王志强 王敏芳 王智红 王懿男 尹春玲

孔令美 邓少生 石 磊 卢天舒 史衍丽

兰 戈 朱 清 朱洪立 朱益辉 庄继胜

刘 川 刘向平 闫 军 安玉德 苏君红

杜仕国 李 萍 李大庆 李旭东 李树虎

李恒春 李桂变 杨佩原 杨晓东 吴 迪

余冬青 张 广 张玉龙 张恭孝 张振文

陈 雷 邵颖惠 郑爱华 官周国 欧阳文慧

官 平 姚立斌 姚春臣 郭云鹏 郭振安

唐莹娟 黄 晖 黄晓霞 韩俊淑 普朝光

曾戈虹 褚云汉

前 言

现代高技术战争的突出特点之一就是信息化贯穿于整个战争的始终,依靠信息系统将参战各类兵种的作战力量有机地集成起来,形成强大的立体作战模式。武器装备信息化则是形成这种作战能力的基础,而武器装备信息化的首要环节便是对敌方目标的探测和图像的获取。实现这一目标的主要手段,目前有可见光探测与成像系统、雷达探测与成像系统和红外探测与成像系统。红外探测与成像系统在光电子技术领域属于一种无源探测技术,不需要光源照射目标,靠目标自身的红外辐射来探测。与雷达探测与成像系统相比,其设备结构简单、体积小、质量轻、分辨率高、隐藏性好、抗干扰能力强。与可见光探测与成像系统相比,红外探测与成像系统穿透烟、尘、雾、霾能力强,具有昼夜和在较复杂气候条件下工作的能力。总之,红外探测技术的发展使得在黑暗中观测和监视存在热辐射的物体,及探测与跟踪机动目标成为轻而易举的事。红外探测技术在武器装备(包括军兵武器、坦克、导弹飞机、舰艇、卫星等)上的应用,可显著地提高武器装备和信息水平,在夜间作战、侦察监视、火力控制、精确制导、毁伤评估、预警探测、电子战和光电对抗中发挥不可替

代的作用。

为了普及红外材料与探测技术的基本知识,宣传推广红外材料与探测技术近年来的研究发展及应用成果,我们组织编写了《红外材料与探测技术》一书。全书共9章32节,较为系统地介绍了红外探测器的设计与发展、碲镉汞材料与红外探测技术、量子阱材料与红外探测技术、超晶格材料与红外探测技术、量子点材料与红外探测技术、双色或多色红外探测技术、高温超导材料与红外探测技术、非制冷探测材料与红外探测技术等内容,是本行业材料研究、产品设计、制造、管理、销售、教学人员必读必备之书。

本书突出实用性、先进性、前瞻性和可操作性,理论部分从简,侧重用数据和实例证明问题,全书结构严谨、语言精练、数据翔实可靠、信息量大。若本书出版后,对我国的红外材料和探测技术的发展有良好的推动作用,作者将感到十分欣慰。

由于水平有限,文中不足在所难免,敬请批评指教。

苏君红

2015.4

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 基础知识	1
1.2 红外探测器	11
1.3 红外探测材料	20
第 2 章 红外探测器的设计与发展	25
2.1 红外探测器特性参数与设计	25
2.2 红外探测器组件与制冷方式	44
2.3 红外焦平面探测器	49
第 3 章 碲镉汞材料与红外探测技术	77
3.1 基础知识	77
3.2 碲镉汞探测器(组)件	103
3.3 碲镉汞探测器	124
3.4 碲镉汞红外焦平面探测器	140
第 4 章 量子阱材料与红外探测技术	149
4.1 基础知识	149
4.2 GaAs/GaAlAs 量子阱材料与探测器	161
4.3 甚长波量子阱红外探测器	219
4.4 其他量子阱材料与探测器	231
第 5 章 超晶格材料与红外探测技术	244
5.1 基础知识	244
5.2 InAs/GaSb 超晶格材料与红外探测器	255
5.3 其他超晶格红外探测器	278
第 6 章 量子点材料与红外探测技术	299
6.1 基础知识	299
6.2 InAs 量子点材料与红外探测器	319
6.3 PbS 量子点材料与红外探测器	328

第 7 章 双色或多色红外探测技术	340
7.1 基础知识	340
7.2 双色或多色碲镉汞红外探测器	355
7.3 双色或多色量子阱红外探测器	370
第 8 章 高温超导材料与红外探测技术	382
8.1 基础知识	382
8.2 高温超导材料与红外探测器制备技术	387
8.3 高温超导测辐射热型红外探测器	396
第 9 章 非制冷探测材料与红外探测技术	401
9.1 基础知识	401
9.2 铁电型红外探测陶瓷材料	413
9.3 热释电晶体红外探测材料与薄膜	486
9.4 有机铁电材料——聚偏二氟乙烯红外探测材料	522
9.5 热敏电阻型红外探测材料	542
9.6 非制冷红外探测器	565
参考文献	608

第 1 章 概 述

1.1 基础知识

1.1.1 基本概念与特点

1. 红外探测技术

红外探测技术是伴随着军事需求而快速发展起来的,在电子技术领域,属于一种无源探测技术,不需要光源照射目标,靠目标自身的红外辐射来探测。与雷达电磁波探测相比,红外探测具有设备结构简单、体积小、质量轻、分辨率高、隐蔽性好、抗干扰能力强等优点;与可见光探测相比,红外探测具有透烟、雾、霾能力强及可昼夜工作等特点。

2. 红外探测器

红外探测器是用来检测红外辐射存在的器件,它能把接收到的红外辐射转换成体积、压力、电流等容易测量的物理量,是红外探测技术的核心部件,也是红外探测技术的先导。真正有实用价值的红外探测器还必须满足以下两个条件:一是灵敏度高,能探测到微弱的红外辐射;二是物理量的变化形式与受到的辐射量能成某种比例关系,以便定量测量红外辐射。在军事上,红外探测波段主要有三个大气窗口,即 $0.76\sim 3\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段。

3. 红外材料

红外材料是指与红外线的辐射、吸收、透射和探测等相关的一些材料。本书主要介绍红外探测材料。红外探测材料是用于制备探测器的材料,是发展红外探测器和红外探测技术的基础。它的发展与红外探测器的发展相辅相成。目前最常用的有碲镉汞、量子阱、超晶格、量子点等用于制备制冷式探测器的材料,以及电铁陶瓷、热释电晶体

和热敏电阻材料等用于制备非制冷式探测器的材料。

1.1.2 分类

红外探测技术分类方法较多,为了叙述方便,本书仅介绍红外探测器的分类。

按红外探测器分类法,可将红外探测器分为制冷型红外探测器和非制冷型红外探测器两类。

制冷型红外探测器主要包括由碲镉汞、量子阱、超晶格、量子点和高温超导等探测材料制备的红外探测器。

非制冷型红外探测器主要包括由电铁陶瓷、热释电晶体和热敏电阻材料制成的红外探测器。

按红外探测器工作原理分类,可将其分为热敏型红外探测器和光子型红外探测器(又称光电探测器)两大类。

热敏型红外探测器主要包括:温差电型探测器、气动探测器、热敏电阻探测器和热释电探测器等。

光子型红外探测器主要包括:光电探测器(属光敏电阻型)、光伏探测器、光磁探测器等。

1.1.3 红外探测技术基础知识

1.1.3.1 红外辐射

1. 红外线与电磁波

早在 1800 年,英国天文学家 F. W. 赫歇尔在研究太阳光谱的热效应时,首先发现红外线。由于这种光线处在红光以外的光谱区,很自然地就称之为红外线。同时,红外线又属于电磁频谱的一个部分,因此也被称为红外辐射。它位于可见光与微波之间,属不可见光线,和其他电磁波一样具有光波的性质,在真空中以光速沿直线传播,遵守同样的反射、折射、衍射、干涉、偏振定律,区别只是波长(频率)不同而已。现已测得其波长范围为 $0.76 \sim 1\,000\mu\text{m}$,频率为 $3 \times 10^{11} \sim 4 \times 10^{14}\text{Hz}$,如图 1-1 所示。同时也已证明,自然界中的一切物体,只要它的温度高于热力学零度(-273°C)就会不断地向外界发射红外线。

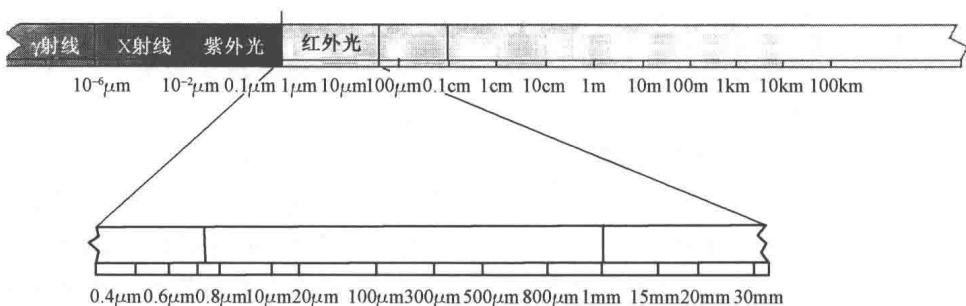


图 1-1 光谱

2. 红外线的传播

红外线的传播和可见光相似,在传播过程中遇到障碍物会被反射(散射)、吸收和透射。在大气中传播时,吸收是影响红外线传播的主要因素,如水蒸气、 CO_2 、 NO 、 NO_2 等物质都对红外线具有强烈的吸收,但是这些物质都有其相对应的特征吸收谱线,对某些波长的红外线吸收比较强烈,使其传播的能量受到损失,而对另外一些波长的红外线却几乎不产生吸收,透过率很高。大气对红外线吸收比较少的波段,也就是透过率比较高的波段,被形象地称为“大气窗口”。红外波段根据大气窗口不同,可分为短红外波段 $0.76\sim 3\mu\text{m}$ 、中红外波段 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和长红外波段 $8\sim 14\mu\text{m}$ 。图 1-2 所示为红外线在大气中传播的透射曲线。

红外辐射在大气中传输时能量会衰减,影响最大的是水蒸气、二氧化碳和气溶胶。气溶胶由尘埃、烟、水、盐类与其他有机物的微粒构成。水蒸气 and 气溶胶在低高度下对红外辐射的衰减更加突出,如在海平面高度的水平方向,大气对红外辐射有最大的衰减,尤其当水蒸气与气溶胶浓度很大时,会严重影响红外系统的应用效果。定性地讲,水蒸气对 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的红外线吸收比对 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段严重;气溶胶对 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的红外线吸收与散射比对 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段严重。

3. 红外辐射与红外吸收

任何物体能辐射红外线,也能吸收红外线。辐射和吸收都是能量转换的过程。假若物体能够吸收外来的全部电磁辐射,且没有任何反射和透射,这种物体就称为黑体。黑体能 100% 吸收入射到表面的全部辐射,它的吸收系数是 1。很显然,当物体温度恒定时,它的吸收和辐射应当相等,它的吸收系数和辐射系数也应当相等,所以黑体的辐射系数也是 1。黑体是最好的吸收体,也是最好的辐射体。但是,实际物体达不到 100% 吸收,将实际物体的吸收与相同温度黑体的吸收之比称为物体的吸收率。当物体温度恒定时,吸收率与辐射率相等。物体辐射红外线的强弱是由其温度和辐射率决定的。

为了研究和比较不同大小和形状物体的辐射特性,不直接用总能量,而是规定 1cm^2 面积上 1s 内辐射到半球空间的能量的大小称为辐射通量密度。辐射通量密度随着辐射的波长不同而变化。单位波长间隔内的辐射通量密度称为光谱辐射通量密度,其大小应与温度、辐射率和波长有关。光谱辐射通量密度的最大值与温度的 4 次方成正比。物体辐射的峰值波长与其所处的温度成反比,即

$$\lambda_m T = \text{常数} = 2897.9\mu\text{m} \cdot \text{K} \approx 2898\mu\text{m} \cdot \text{K}$$

此关系称为维恩位移定律。图 1-3 所示为黑体的温度、光谱辐射通量密度和辐射的波长之间的关系。

从上述关系中可以看到,黑体的热辐射非常强烈地依赖于温度,温度高的黑体,热辐射很强,其峰值波长较短。实际物体的辐射特性与黑体相似,只不过与材料种类和表面特性(辐射率)有关。物体的温度与辐射峰值波长的关系见表 1-1。从表中可以看出,武器装备和军事方面感兴趣的目标辐射的红外线,大多在 $1\sim 10\mu\text{m}$ 。所以,前面介绍的短红外波段、中红外波段和长红外波段三个大气窗口,在军事应用上最为重要。

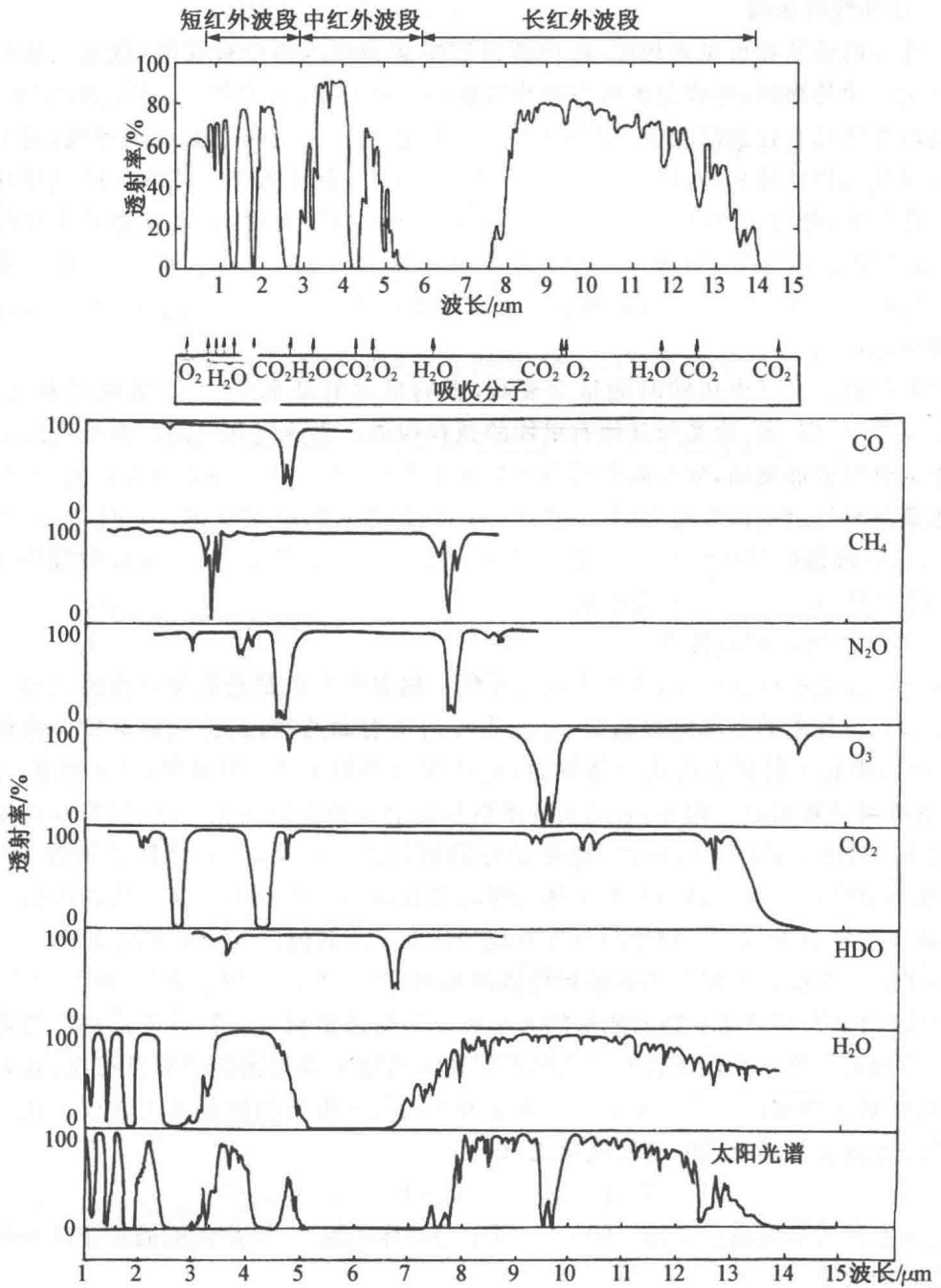


图 1-2 大气主要成分对红外辐射的吸收谱

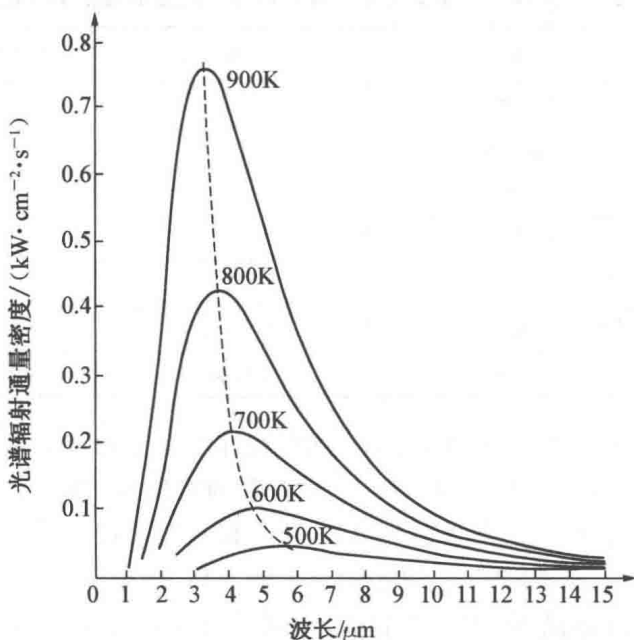


图 1-3 黑体的温度、光谱辐射通量密度和辐射的波长间的关系

表 1-1 物体的温度与辐射峰值波长的关系

物体名称	温度/K	辐射峰值波长 $\lambda_m/\mu\text{m}$	物体名称	温度/K	辐射峰值波长 $\lambda_m/\mu\text{m}$
太阳	5 900	0.49	F-16 飞机蒙皮	333	8.70
钨丝灯	3 000	0.97	人体(37℃)	310	9.66
	2 000	1.45	冰水(0℃)	273	10.6
波音 707 发动机喷嘴	890	3.62	液态氮	77	37.6
M-46 坦克尾部	473	6.13			

4. 目标特性和背景特性

在应用中对红外探测的要求是具有高灵敏度和强识别功能,能在复杂的背景中分辨出目标,因此了解目标和背景的辐射特性对于设计红外整机而言是至关重要的。

(1) 目标特性。目标的红外辐射特性是系统选择红外波段的主要依据。选择波段首先要和目标的温度相匹配。表 1-2 列出了目标特性与典型温差及对噪声等效温度的最低要求的关系。

对略高于 300K 温度的目标,其最大辐射值对应的波长为 9~10 μm ,就是说选择 8~14 μm 这一大气窗口是恰当的;对略高于 600K 温度的目标,其最大辐射值对应的波长在 4~5 μm ,同时考虑到背景如云层、海面以及沙滩对阳光强烈反射带来的干扰,选择 3~5 μm 是非常合适的。红外制导的空对空导弹所用探测器已经从 0.76~3 μm 改为 3~5 μm ,减少阳光的干扰就是重要原因之一。因此红外系统对波段的选择需要综合权衡,在对目标特性的分析中,不但要了解其温度、辐射系数,还要进一步分析、测试其光谱特征,因为光谱特征是目标识别与光电对抗的重要依据之一。

表 1-2 目标特性与典型温差及对噪声等效温度的最低要求的关系

功能	目 标	典型温差/K	对噪声等效温度的最低要求/K
侦察	人的皮肤	8	1.5
侦察	穿衣服的人	2	0.4
侦察	飞行器	10	2.0
侦察	车辆	5	1.0
侦察	船舶	2	0.4
医疗诊断	皮肤温度、血液循环温度	0.2~0.5	0.05~0.1
天文学	行星、宇宙尘埃、气体云团等	尽可能小	—

(2) 背景特性。在红外系统的军事应用中,目标的探测和识别是首要的。背景的影响可以从两个方面来加以考虑:首先是目标对背景的对比度,这里的对比度是指亮度或温度对比度。假定目标周围的背景是均匀的,对目标探测与识别的必要条件是目标对背景有足够高的对比度。只要知道地表(包括海洋等水体)的温度,就可以定量地估算系统对特定目标的探测与识别距离,然而在白天,特别是晴天,阳光的反射辐射则是一复杂变化的因素,因为对不同波段阳光在地面产生的照度相差很大。其次是背景形成杂波干扰,当需要从背景中探测和识别目标时,如果目标对背景的对比度不够高,背景就会同目标混淆。现代的红外系统大多需要进行目标的自动探测与识别,自动化处理器要时时处理成像传感器送来的视频信号,和目标混在一起的背景信号就形成了杂波,它会严重干扰红外系统的功能。为此,必须研究基于各种应用目的的图像和信号处理技术,开发对所感兴趣目标的特征提取与识别技术,包括物理数学模型、相应的元件和硬件技术。热像仪夜间拍摄的热图像,它是景物的热图,不受有无阳光照射的影响。

1.1.3.2 辐射度学与光度学

在辐射单位体系中,辐射通量或者辐射能是基本量,是只与辐射客体有关的量,其基本单位是瓦(W)或者焦(J)。辐射度学适用于整个电磁波段。光度单位体系是一套反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位,被选作基本量的不是光通量而是发光强度,其基本单位是坎(cd),光度学只适用于可见光波段。

以上两类单位体系中的物理量在物理概念上是不同的,但所用的物理符号是相互对应的,为了区别起见,以下角标 e 表示辐射度学物理量,下角标 v 表示光度学物理量。

1. 辐射度学物理量

(1) 辐射能。辐射能是以辐射形式发射或传输的电磁波(主要指紫外、可见光、红外辐射)能量。辐射能一般用符号 Q_e 表示,单位为 J。

(2) 辐射能通量。辐射能通量 Φ_e 又称为辐射功率,定义为单位时间内通过某一截面的辐射能量,即 $\Phi_e = dQ_e/dt$,单位为 W 或 J/s。

(3) 辐射出射度。辐射出射度 M_e 是用来反映物体辐射能力的物理量,定义为从辐射源单位面积发射出的辐射通量,即 $M_e = d\Phi_e/dA$,单位为 W/m^2 。

(4) 辐射强度。辐射强度 I_e 定义为点辐射源在给定方向上单位立体角内的传送辐

射通量,用 I_e 表示,即 $I_e = d\Phi_e/d\Omega$,单位为 W/sr 。

(5) 辐射亮度。辐射亮度 L_e 定义为面辐射源上某点在某一给定方向上的辐射通量,即 $L_e = dI_e/(dS\cos\theta) = d^2\Phi_e/(d\Omega dS\cos\theta)$,其中 θ 为给定方向和辐射源面元法线间的夹角,单位为 $W/(sr \cdot m^2)$ 。

(6) 辐射照度。在辐射接收面上的辐射照度 E_e 定义为照射在面元 dA 的辐射通量与该面元面积之比,即 $E_e = d\Phi_e/dA$,单位为 W/m^2 。

(7) 单色辐射度量。对于单色辐射,同样可以采用上述物理量表示,只不过均定义为单位波长间隔内对应的辐射度量,并且对所有辐射量 X_e 来说,单色辐射度量与辐射度量之间均满足 $X_e = \int_0^\infty X_e(\lambda) d\lambda$ 。

2. 常用辐射度学物理量与光度学物理量之间的对应关系

常用辐射度学物理量与光度学物理量之间的对应关系见表 1-3。

表 1-3 常用辐射度学物理量与光度学物理量之间的对应关系

物理量名称	符号	定义或定义式	单位	物理量名称	符号	定义或定义式	单位
辐射能	Q_e	基本量	J	光量	Q_v	$Q_v = \int \Phi_v dt$	$lm \cdot s$
辐射能通量	Φ_e	$\Phi_e = dQ_e/dt$	W	光通量	Φ_v	$\Phi_v = \int I_v d\Omega$	lm
辐射出射度	M_e	$M_e = d\Phi_e/dA$	W/m^2	光出射度	M_v	$M_v = d\Phi_v/dA$	lm/m^2
辐射强度	I_e	$I_e = d\Phi_e/d\Omega$	W/sr	发光强度	I_v	基本量	cd
辐射亮度	L_e	$L_e = dI_e/(dS\cos\theta)$	$W/(sr \cdot m^2)$	光亮度	L_v	$L_v = dI_v/(dS\cos\theta)$	cd/m^2
辐射照度	E_e	$E_e = d\Phi_e/dA$	W/m^2	光照度	E_v	$E_v = d\Phi_v/dA$	lx

3. 辐射度学与光度学的基本定律

辐射照度的余弦定律:任一表面上的辐射照度随该表面法线和辐射能传输方向之间夹角的余弦而变化。

朗伯余弦定律:朗伯辐射表面在某方向上的辐射强度随该方向和表面法线之间夹角的余弦而变化(朗伯辐射表面:指一个对入射辐射提供均匀漫射的表面,从不同角度观察该表面,其明暗程度是一样的)。

距离平方反比定律:一定的立体角内,所张的立体角所截的面积与球半径平方成正比。若无损失,点光源在此空间发出的辐射通量不变。因此,点光源在传输方向上的某点的辐射照度和该点到点光源的距离平方成反比。

亮度守恒定律:光辐射能在传播介质中没有损失时辐射亮度是恒定的。

1.1.3.3 黑体辐射及其相关定律、公式

任何温度在 $0K$ 以上的物体都会发射各种波长的电磁波,这种由于物体中的分子、原子受到热激发而发射电磁波的现象称为热辐射。热辐射具有连续的辐射谱,波长自远红外区到紫外区,并且辐射能按波长的分布主要决定于物体的温度。

1. 单色吸收比和单色反射比

任何物体向周围发射电磁波的同时,也在吸收周围物体发射的辐射能。当某一辐射入射到不透明的物体表面上时,一部分能量被吸收,另一部分能量从表面反射(如果物体是透明的,则还有一部分能量透射)。

(1) 吸收比。被物体吸收的能量与入射的能量之比称为该物体的吸收比。在波长 $\lambda \sim (\lambda + d\lambda)$ 范围内的吸收比称为单色吸收比,用 $\alpha_\lambda(T)$ 表示。

(2) 反射比。被物体反射的能量与入射的能量之比称为该物体的反射比。在波长 $\lambda \sim (\lambda + d\lambda)$ 范围内的反射比称为单色反射比,用 $\rho_\lambda(T)$ 表示。

对于不透明的物体,单色吸收比和单色反射比之和等于 1,即 $\alpha_\lambda(T) + \rho_\lambda(T) = 1$;若物体在任何温度下,对任何波长的辐射能的吸收比都等于 1,即 $\alpha_\lambda(T) = 1$,则称该物体为绝对黑体,简称黑体。

2. 基尔霍夫辐射定律

在同样温度下,各种不同物体对相同波长的单色辐射出射度与单色吸收比之比值都相等,并等于该温度下黑体对同一波长的单色辐射出射度。

3. 普朗克公式

黑体处于温度 T 时,在波长 λ 处的单色辐射出射度 M 由普朗克公式可得

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)^{-1}$$

式中, h ——普朗克常数;

c ——真空中的光速;

k ——玻尔兹曼常数。

令 $c_1 = 2\pi hc^2$, $c_2 = hc/k$, 则上式改写为 $M = c_1 / [\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)]$, 于是 $c_1 = (3.741\ 775 \pm 0.000\ 002) \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$ (第一辐射常量); $c_2 = (1.438\ 769 \pm 0.000\ 012) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ (第二辐射常量)。

4. 瑞利—琼斯公式

当 λT 很大时, $e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \approx 1 + c_2/\lambda T$ 可以得到适合于长波区的瑞利—琼斯公式,即

$$M = \frac{c_1}{c_2} \lambda^{-4} T$$

在 $\lambda T > 7.7 \times 10^5 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 时,该公式与普朗克公式的误差小于 1%。

5. 维恩位移定律

利用普朗克公式中的 M 对 λ 微分,并令其等于零,则单色辐射出射度最大值对应的波长 λ_m 的关系式为 $\lambda_m T = 2\ 897.9 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

6. 斯忒藩—玻耳兹曼定律

斯忒藩—玻耳兹曼定律表述为

$$M = \delta T^4$$

式中, $\delta = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 为斯忒藩—玻耳兹曼常数,该定律表明黑体的辐射出射度只与黑体的温度有关,而与黑体的其他性质无关。

1.1.4 探测材料(半导体)基础知识

1.1.4.1 载流子与PN结

1. 载流子

本征半导体中共价键电子所受束缚力较小,它会因为受到热激发而越过禁带,占据价带上面的能带。电子从价带跃迁到导带后,导带中的电子成为自由电子;价带中电子跃迁到导带后,价带中出现电子的空缺成为自由空穴。导带中的自由电子和价带中的自由空穴统称为载流子。

2. 载流子的扩散和漂移

材料的局部位置受到光照时,材料吸收光子产生光生载流子,在这局部位置的载流子浓度就比平均浓度高,电子将从浓度高的地方向浓度低的地方运动,这种现象称为扩散。扩散电流密度正比于光生载流子的浓度梯度。载流子在外电场作用下,电子向正电极方向运动,称为漂移。在弱电场作用下,半导体中载流子漂移运动服从欧姆定律。本征半导体:就是完全纯净的半导体,没有任何杂质,如硅晶体。

3. N型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量的5价元素,如磷,则磷原子就取代了硅晶体中的少量硅原子所占据的晶格上某些位置。磷原子最外层有5个价电子,其中4个价电子分别与邻近4个硅原子形成共价键结构,多余的1个价电子在共价键之外,只受到磷原子对它微弱的束缚,因此在室温下,即可获得挣脱束缚所需要的能量而成为自由电子,游离于晶格之间,而失去电子的磷原子则成为不能移动的正离子。磷原子由于可以释放1个电子而被称为施主原子,又称为施主杂质。在本征半导体中,每掺入1个磷原子,就可产生1个自由电子,而本征激发产生的空穴数目不变,这样在掺入磷的半导体中,自由电子的数目就远远超过了空穴数目,称为多数载流子(简称多子),空穴则成为少数载流子(简称少子)。显然,参与导电的主要是电子,故这种半导体称为电子型半导体,简称N型半导体。

4. P型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量的3价元素,如硼,则硼原子就取代了硅晶体中少量硅原子所占据的晶格上某些位置。硼原子的3个价电子分别与邻近3个硅原子形成完整的共价键,而与其相邻的另一个硅原子的共价键中则缺少1个电子,出现了1个空穴。这个空穴被附近硅原子中的价电子填充后,使3价的硼原子获得了1个电子而变成负离子,同时邻近共价键上出现了1个空穴。由于硼原子起着接受电子的作用,故被称为受主原子,又称为受主杂质。在本征半导体中,每掺入1个硼原子,就可以提供1个空穴,当掺入一定数量的硼原子时,就可以使半导体中空穴的数目远大于本征激发产生的电子数目,成为多数载流子,而电子则成为少数载流子。显然,参与导电的主要是空穴,故这种半导体称为空穴型半导体,简称P型半导体。

1.1.4.2 半导体的光电效应

光电效应分为内光电效应和外光电效应,其中内光电效应又可分为光电导效应和光生伏特效应(简称光伏效应)。