

主编 刘辉 主审 闫世强 蒋跃

红外光电 探测原理

HONGWAI GUANGDIAN TANCE YUANLI



国防工业出版社

National Defense Industry Press

红外光电探测原理

主 编 刘 辉

副主编 姜海林

主 审 闫世强 蒋 跃

编 委 王成良 王树文 石斌斌 欧阳琰

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要介绍红外光电探测技术的基础理论,涵盖红外光电探测的主要方法、技术、前沿知识和发展趋势,重点阐述红外光电探测系统的探测环境、系统组成及功能、信号处理和性能指标分析与测试。全书包括五章,内容安排上分为三篇。第1章红外辐射和第2章大气传输特性为第一篇——基础理论,介绍红外物理的基础知识,以基础理论和基本概念为主。第3章红外光电元件和第4章红外信号处理技术为第二篇——方法和技术,该篇是本书的核心,内容涵盖光学成像、光电转换、光机扫描、热控与制冷、信号处理等,是全书的重点和难点部分。第5章典型的红外光电系统及其应用为第三篇——综合应用,介绍红外光电探测系统的典型应用,通过对具体的红外光电探测系统或装备的分析,达到对本书前四章内容融会贯通的目的,内容编排上侧重于红外光电探测系统的应用分析。

本书可作为学习红外技术入门的教材,也可作为从事红外技术专业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

红外光电探测原理 / 刘辉主编. —北京:国防工业出版社,2016.4

ISBN 978-7-118-10770-8

I. ①红… II. ①刘… III. ①红外技术—光电探测
IV. ①TN247

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 055681 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市鼎鑫印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 388 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

红外辐射是一种电磁波,波长介于可见光和微波之间,在航天遥感和军事侦察、预警领域有着广泛的应用。红外光电探测原理主要研究红外辐射的产生、分布、传输、红外光电系统的应用及红外信息处理等。人类对红外辐射的研究始于十八世纪末,红外光电探测技术的应用在第二次世界大战后才得到迅速的发展。尤其近几十年来,红外光电探测技术不断取得新的突破,其探测能力和探测精度大幅提升,应用日益广泛。当前,红外光电探测技术不仅广泛应用于军事、航空航天遥感、天文观测、工业检测等领域,在非接触测温、数据传输、夜视、加热等日常生活当中也被普遍使用。

红外光电探测技术是涉及红外物理、红外光学、红外探测器、信号处理、热力学、机械控制等多个技术领域的综合性学科。随着红外光电探测技术在国防、科研和商业领域应用的不断扩大,对红外光电探测方面的教材和参考书需求量也在不断增加。目前市面上此类教材和参考书种类繁多,大部分书籍都针对红外光电探测技术的某一方面进行了深入的阐述,相关内容对于初学者而言略显晦涩难懂,比较难以理解和全面掌握。对于红外光电探测系统相关领域的初学者而言,要了解掌握红外光电探测的基本原理,往往需要查阅《红外物理》《红外系统原理》《红外系统》《红外光学工程》《工程光学》等多种书籍,并从中有针对性地进行学习内容的筛选。本书正是基于编者长期以来在红外光电探测技术相关的科研和教学过程中,发现初学者的相关困惑,结合实际的红外光电探测原理课程教学经验,整合空军预警学院相关教学资源编撰而成的。本书涵盖了红外物理、红外光学、红外信号处理、红外系统性能指标评测、红外光电探测系统及应用等方面的内容。本书编写过程中注重针对性,内容丰富、难易度适中,适合科研、教学等不同领域的初学者。

全书共五章,编排为三篇。

第一篇:基础理论。包括第1章红外辐射和第2章大气传输特性。介绍红外物理的基础知识,并有针对性地分析地球大气层的红外辐射传输特性。这部分内容是全书的基础,以基础理论和基本概念为主。

第二篇:方法和技术。包括第3章红外光电元件和第4章红外信号处理技术。这部分内容是本书的核心。内容涵盖光学成像、光电转换、光机扫描、热控与制冷、信号处理等,是全书的重点和难点。

第三篇:综合应用。包括第5章典型的红外光电系统及其应用。介绍红外光电探测系统的典型应用,通过对具体的红外光电探测系统或装备的分析,达到对本书前四章内容融会贯通的目的,内容编排上侧重于红外光电探测系统的应用分析。

本书由空军预警学院的刘辉博士和王成良副教授共同拟定编撰大纲,并以长期讲授的硕士研究生课程“红外光电探测技术”和本科生课程“红外光电探测原理与系统”的课程讲义为蓝本,经编委成员反复论证,有针对性地增加了部分科研项目中的研究成果,形

成本书的基本框架和内容。其中:第1章、第2章、第3章前三节和第4章第一节由刘辉编写;第4章第三节由姜海林编写;第3章后两节和第5章前两节由王树文编写;第5章第三节由王成良和欧阳琰编写;第4章第二节由石斌斌编写。全书由刘辉主持编写和统稿、校对。

本书撰写过程中,得到了空军预警学院闫世强教授的鼎力支持;空军预警学院潘谊春教授精心指导全书的编写;空军预警学院蒋跃教授细心审阅全书,提出了宝贵意见;中国科学院上海技术物理研究所航天领域和红外遥感领域专家裴云天研究员对本书的撰写给予了极大的鼓励和支持,并悉心为本书作序。在此,对各位专家教授的指导致以诚挚的谢意!

空军预警学院为本书的出版提供了资金帮助,国防工业出版社的郑廷编审和欧阳黎明为本书的出版给予了大力支持并付出了辛勤努力。在此向他们表示由衷的感谢。

本书在编写过程中虽然对内容进行了反复的整理、修改,对相关理论、公式进行了反复推敲验证,但是由于编者水平有限,错误与不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2015 年 12 月于武汉

序 言

自 1800 年赫胥尔发现红外线以来,已经二百多年了。但是,红外技术的迅速发展,却是第二次世界大战期间及战后的几十年的事情。随着对红外线的发生、传输、接收和处理的了解及相关红外光学材料、光学系统、探测器、制冷机及电子学处理技术的发展,红外技术已发展成一门独立的学科。

红外技术的发展离不开军事应用的需求,如红外导引头、红外告警系统、夜视仪等。在最近几十年航天技术的蓬勃发展更是进一步丰富与发展了红外技术。卫星上使用的红外地平仪、各类遥感仪器中通常都会用到红外谱段。随着红外探测器技术的发展,从单元探测器、线阵探测器到面阵探测器的应用,红外遥感仪器也不断升级换代。总的趋势是红外遥感仪器的分辨率与灵敏度越来越高。相对于可见光,红外遥感仪器具有全天候的优势。

本书除了介绍红外辐射的产生,在大气中的传输特性等基础理论外,主要从红外技术应用的角度,介绍了红外遥感仪器各分部件的基础原理、信号处理过程及仪器的标定等技术。本书还介绍了几个典型红外光电系统作为红外技术应用的范例。

本书可作为学习红外技术入门的教材,也可作为从事红外技术专业人员的参考书。期待广大读者对红外技术有进一步的了解,使用红外技术,发展与完善红外技术,能使红外技术进一步服务于人类。

裴云天

2015 年 4 月于上海

目 录

第一篇 基础理论

第 1 章 红外辐射	1
1.1 辐射理论	2
1.1.1 红外光谱	3
1.1.2 辐射度学和光度学基础	6
1.1.3 辐射基本定律	13
1.1.4 材料的辐射特性	19
1.2 标准红外辐射源	27
1.2.1 黑体型辐射源	27
1.2.2 工程用辐射源	31
1.3 目标和背景的辐射特性	36
1.3.1 环境的辐射特性	36
1.3.2 目标的辐射特性	43
1.4 弹道导弹的红外和运动特性	49
1.4.1 弹道导弹运动特性	50
1.4.2 弹道导弹红外特性	57
练习题	59
第 2 章 大气传输特性	60
2.1 地球大气	63
2.1.1 大气层及其基本组成	63
2.1.2 大气的气象条件	67
2.2 大气吸收	72
2.2.1 水蒸气	72
2.2.2 二氧化碳	74
2.3 大气散射	75
2.4 大气传输特性计算方法	77
2.4.1 大气传输特性计算软件	77

2.4.2 红外辐射大气传输特性工程计算方法	77
练习题	82

第二篇 方法和技术

第3章 红外光电元部件	84
3.1 红外光学系统	85
3.1.1 光学基本定律	85
3.1.2 理想光学系统	92
3.1.3 实际光学系统	97
3.2 红外分光元件	120
3.2.1 分光技术	121
3.2.2 滤光片	122
3.2.3 棱镜	128
3.2.4 光栅	131
3.2.5 迈克尔逊干涉仪	135
3.3 红外探测器组件	137
3.3.1 红外探测器	137
3.3.2 红外探测器读出电路	142
3.3.3 红外探测器制冷系统	146
3.3.4 红外探测器的性能指标	150
3.4 光机扫描及其控制电路	153
3.4.1 光机扫描技术	154
3.4.2 光机扫描部件	156
3.4.3 光机扫描的控制系统	161
3.5 热控与制冷系统	166
3.5.1 红外光电系统的热控系统	166
3.5.2 红外光学系统的制冷技术	168
3.5.3 低温光学系统	170
练习题	173
第4章 红外信号处理技术	174
4.1 背景抑制技术	174
4.1.1 红外辐射背景	176
4.1.2 滤波技术	180
4.1.3 温控技术	189
4.2 辐射定标	191

4.2.1	辐射定标基本理论	191
4.2.2	实验室定标	191
4.2.3	外场定标	192
4.2.4	星上定标	192
4.3	几何定标	193
4.3.1	几何定位误差来源	194
4.3.2	光学畸变校正	194
4.3.3	像旋的产生与校正	198
4.3.4	几何定标方法	200
4.4	点目标检测能力计算	202
4.4.1	虚警概率计算	203
4.4.2	信噪比(SNR)计算	204
4.4.3	检测概率计算	204
4.4.4	多帧检测概率和虚警概率计算	207
	练习题	209

第三篇 综合应用

第5章	典型的红外光电系统及其应用	210
5.1	红外扫描系统	210
5.1.1	扫描系统的功用	210
5.1.2	红外扫描系统的组成及工作原理	211
5.1.3	对扫描系统的基本要求	213
5.1.4	目标自动截获	214
5.2	红外凝视系统	216
5.2.1	凝视系统的功能	216
5.2.2	跟踪系统的组成及工作原理	216
5.2.3	对跟踪系统的基本要求	217
5.2.4	成像跟踪器	219
5.3	气象卫星有效载荷及其工作原理	222
5.3.1	气象卫星的工作原理	222
5.3.2	典型气象卫星的有效载荷	231
	练习题	260
	参考文献	261

第一篇 基础理论

第1章 红外辐射

早在公元前,罗马的唯物主义哲学家狄脱·留克利茨基·卡尔就曾在他的著作《论事物的本质》中写道:“太阳是个拥有巨大能量的粉红色发光天体,它向周围大量的发射出肉眼看不见的热射线。”

对热辐射的研究始于十八世纪末。热辐射的概念是由瑞典化学家卡尔·谢利提出的,他在著作《空气和火焰的化学论述》(1777)中用一整章的内容阐述了“热辐射”的性质。

直到1800年,这种不可见的热射线才被英国天文学家威廉·赫谢尔(F. W. Herschel)通过测量的手段予以证实,此后有关热和光辐射之间相互作用的问题变得特别尖锐。1800年初,赫谢尔发现,用作望远镜滤光片的各色玻璃对太阳射线的光和热吸收各不相同。这件事触发了赫谢尔的好奇,于是他进行了一系列试验,想弄清楚热效应的强度在太阳射线通过玻璃棱镜而形成的波谱中的分布情况。赫谢尔通过放置带涂黑小球的灵敏温度计测太阳波谱的每一色带,发现温度计读数随着紫色谱带向红色谱带的移动而增加。当时他产生了一个想法:不断增长的射线热效应不应在给出最大热量的红色谱带处终止。赫谢尔在科学史上第一次测到了可见光谱范围以外的温度,并且发现了一种不可见的“具有最大加热能力的射线”^[1]。

赫谢尔的观点受到了英国物理学家托马斯·杨(T. Young)的支持,早在1802年托马斯·杨就曾经推断光和热辐射之间只有振荡频率的差异。

直到1830年,赫谢尔的试验被重复了相当多次,从而可以确信,在太阳光谱的红光之外还存在着一种具有很强热效应的不可见辐射。稍后法国物理学家白克兰把这种辐射称之为红外辐射。

在红外热辐射得到公认后,人们开始为测定红外辐射波长而进行不懈的研究,同时也开始了热辐射理论的探讨。其中最重要的理论包括基尔霍夫定律、维恩位移定律和普朗克黑体辐射公式。

从二十世纪初开始,人们着手应用红外技术来解决实际问题。红外光谱学得到了很大的发展,它是研究辐射与物质相互作用以及鉴别各种物质的有效工具。在1900—1920

年间的专利文献中,载有大量有关制造各种用来探测舰船、飞机和人的红外仪器以及通信系统和目标自动跟踪系统的发明^[2]。

尽管红外技术在第一次和第二次世界大战期间的应用有限,但军用的研究项目在战后期间促进了红外辐射探测器的发展,加速了红外光学材料以及工业、交通、科学和医学红外仪器的研制。

许多年以来,红外技术被天体物理学家用以获取有关太阳、行星和恒星的信息。借助红外仪器确定了金星大气中含有大量的二氧化碳气体,木星、土星、天王星和海王星的大气中含有大量的沼气。苏联学者在这方面做出了很大的贡献,他们曾用多级电子光学转换器观察天体,首先证明了对微弱星球摄影时将曝光量降低几个数量级是可能的。同时大量的地基和天基天文望远镜(如哈勃太空望远镜),还被用于进行宇宙观测,绘制了宇宙的背景辐射图谱,为宇宙起源和宇宙大爆炸理论的研究提供了大量的论据。

这一章将重点讲述红外辐射和红外光电探测技术的相关基础知识,包括:辐射理论,系统介绍红外光谱、辐射度学和光度学、辐射基本定律、材料的辐射特性等基础理论知识;标准辐射源,简要介绍几种典型的红外辐射光源;目标和背景的辐射特性,讨论各种环境的红外辐射特性,以及典型目标的红外光谱辐射特性;最后重点讨论弹道导弹及其红外和运动特性,尤其是弹道导弹助推段和中段的红外辐射特性。

1.1 辐射理论

物体的发光(即辐射)是要消耗能量的。物体发光消耗的能量可以是其自身的能量,也可以是从外界得到的能量。由于能量的供给方式不同,可把发光分为如下不同的类型^[1]:

(1) 化学发光(Chemiluminescence):又称为冷光,它是在没有任何光、热或电场等激发的情况下由化学反应而产生的光辐射。由于化学反应(通常是氧化反应)产生电子能级处于激发态的物质,后者通过跃迁释放能量产生光子,从而导致的发光现象,如腐木的辉光、磷在空气中渐渐氧化时的辉光等,都属于化学发光。在这种情况下,辐射能量的过程伴随着物质成分的变化。也就是说化学发光是将化学能转化为光能。

(2) 光致发光(Photoluminescence, PL):是指物体依赖外界光源进行照射,从而获得能量,产生激发导致发光的现象。也指物质吸收光子(或电磁波)后重新辐射出光子(或电磁波)的过程。也就是说光致发光是将光能转化为光能。

(3) 电致发光(Electroluminescence):是指物体在外加电场作用下,在高速运动电子、离子等的碰撞下产生能级跃迁,向外释放能量产生光子,从而导致发光的现象。最常见的是气体或金属蒸气在放电作用下产生的辉光,如辉光放电、电弧放电、火花放电等。除此之外,用电场加速电子轰击某些固体材料也可以产生辉光,例如变像管、显像管、荧光屏的发光就属于这类情况。电致发光所需的能量是由电能直接转化而来的,也就是说电致发光是将电能转化为光能。

(4) 热辐射(Thermoraoliation):物体在一定的温度下在全谱段内向外发射能量的过程,是物体间热能传递的一种方式。任何物体在接受辐射使自身温度升高的同时,也在不断地向外发出辐射使自身的温度降低,在其向外发出的辐射与接受的辐射达到一个平衡

状态时,物体的温度就达到了平衡温度。显然,要维持物体发出辐射就必须给物体加热。一般的钨丝灯泡发光,表面上看是电致发光,其实,钨丝灯因为所供给灯丝的电能并不是直接转化为辐射能,而是首先转化为热能,使钨丝灯的温度升高,导致发光,因而钨丝灯的辐射属于热辐射。也就是说热辐射是将热能转化为光能。

本书中将要讨论的红外辐射就是指上面介绍的四种发光机理的第四种——热辐射。

1.1.1 红外光谱

从电磁学理论知道,物质内部带电粒子(如电子)的变速运动都会发射或吸收电磁辐射。电磁辐射在空间传播过程中所携带的能量称为电磁辐射能。在日常生活中,我们遇到的各种辐射,如 γ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线、微波、无线电波等都是电磁辐射。由于产生或探测各种辐射的方法不同,人们对不同谱段的电磁辐射冠以不同的名称,然而在本质上它们是相同的,所以把各种辐射统称为电磁辐射,也叫电磁波。如果把这些辐射按其波长(或频率)的次序排列成一个连续谱,就称之为电磁波谱,图1-1显示了各种电磁辐射的谱段分布情况。

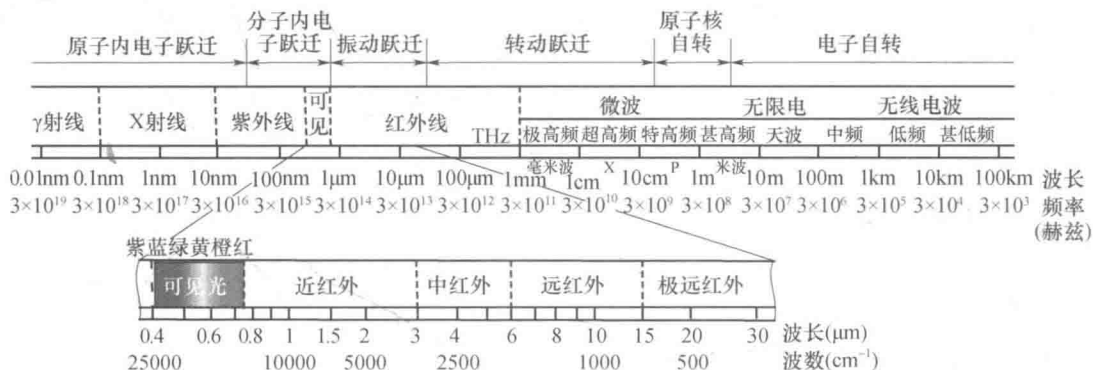


图 1-1 电磁波谱

这些电磁波都遵循同样的反射、折射、干涉、衍射和偏振等基本定律,且在真空中具有相同的速度,即光速 $c = (2.99792458 \pm 0.00000012) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

1. 电磁辐射的基本物理量

在介绍红外光谱之前,我们先介绍几个用于描述电磁辐射的通用的基本物理量。

物理学上描述电磁波三个基本量分别是:频率 ν 、波长 λ 和传播速度 c 。

在真空中,频率为 ν 的电磁波,波长为 λ ,真空中的电磁波的传播速度为光速 c ,则有

$$\lambda \nu = c \quad (1-1)$$

在介质中,同样频率为 ν 的电磁波,波长为 λ' ,速度为 c' ,则有

$$\lambda' \nu = c' \quad (1-2)$$

由前面两式可得

$$\lambda = \frac{c}{c'} \lambda' = n \lambda' \quad (1-3)$$

式中: $n = c/c'$ 称为介质对真空的折射率。公式(1-3)表明,同一频率的电磁波,在介质中的波长是真空中波长的 $1/n$ 。也就是说电磁波在不同介质中传播时,其频率是保持不变

的,其传播速度和波长将随介质折射率的变化而变化,且同一频率的电磁波在真空中的传播速度和波长值最大。

在光谱学中,由于电磁波的频率是很大的数值,不易直接测量,并且频率测量的精度通常比波长测量的精度低,因此,多用波长来表示紫外线、可见光和红外辐射。如无特殊说明,本书中使用的波长都是指电磁波在真空中的波长值。

在描述红外辐射时,波长的单位通常用 μm (微米) 表示,它与 nm (纳米) 等单位的关系如下:

$$1\mu\text{m} = 10^{-3}\text{mm} = 10^{-4}\text{cm} = 10^{-6}\text{m}$$

$$1\mu\text{m} = 10^3\text{nm} = 10^4\text{\AA}$$

在光谱学中,电磁波除了用波长 λ 或频率 ν 等参数来表征外,还经常用波数 $\tilde{\nu}$ 来表示。如果电磁辐射在真空中的波长用米(m)来表示,则波长值的倒数就是波数值,即

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad (1-4)$$

在国际单位制中,波数的单位是 m^{-1} 。它的意义相当于在真空中 1m 长的路程上包含的波长个数。通常波数还有另外一个单位—— cm^{-1} 。利用公式(1-1),可得到波数 $\tilde{\nu}$ 和频率 ν 的关系为

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} \quad (1-5)$$

即波数和频率成正比,波数大小同样可反映频率的高低,因此,在光谱学中,有时又把波数 $\tilde{\nu}$ 称为“频率”。应该注意,在使用此“频率”一词时,不要将它与真正的频率弄混。

由于电磁辐射具有波粒二象性,因此,电磁辐射除了作为一种电磁波而遵守上述的波动规律以外,它还以光量子的形式存在。在考虑电磁辐射的辐射和吸收问题时,需要把电磁辐射看成独立的微粒集合,这种微粒称为光子。一个光子具有的能量为

$$\varepsilon = h\nu \quad (1-6)$$

式中, $h = (6.626176 \pm 0.000036) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$, 称为普朗克(Planck)常数。

由公式(1-1)与公式(1-4)得,光子能量与波长和波数的关系为

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = hc\tilde{\nu} \quad (1-7)$$

即光子的能量与波长 λ 成反比,或者说,光子的能量与波数 $\tilde{\nu}$ 成正比。在光谱学中,有时直接用波数 $\tilde{\nu}$ 来表示光子的能量。

光子的能量还常用电子伏特(eV)来表示。一个电子伏特的能量是指在真空中一个自由电子在 1V 电位差电场中加速所获得的动能。

电子伏特和焦耳(J)之间的换算关系为

$$1\text{eV} = 1.6021892 \times 10^{-19}\text{J} \quad (1-8)$$

有了这些电磁辐射基本物理量的知识,我们就能更加容易地解读图 1-1 的电磁波谱图了。

2. 红外辐射

1800 年英国天文学家赫谢尔通过实验发现了红外辐射之后,人们就开始了红外光谱的研究工作,赫谢尔测量红外辐射的实验装置如图 1-2 所示。经过长期的实验测量和研

究工作,物理学上最终确定波长在 $0.75 \sim 1000\mu\text{m}$ 的电磁波为红外辐射。它是介于可见光和微波之间的一种电磁波,其短波段与可见光波段的红光相邻,长波段与微波相接。事实上红外辐射属于热辐射,因此任何温度在绝对零度(约 -273.15°C) 以上的物质都会发出红外辐射。

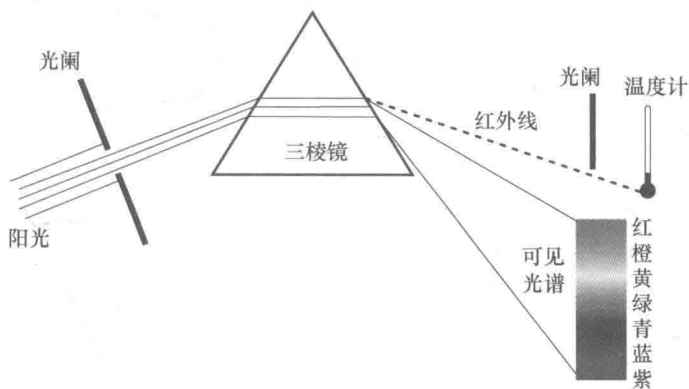


图 1-2 棱镜分光示意图

前面介绍四种发光类型时已经指出,热辐射是将热能转化为光能,物质的热能主要是其分子、原子、电子的运动形成的。而物质的电子、原子、分子在不同运动状态之间转变(跃迁),就会产生热能的改变,从而发出热辐射。下面就来简单介绍一下与红外辐射相关的物质运动状态的跃迁情况,如图 1-3 所示。

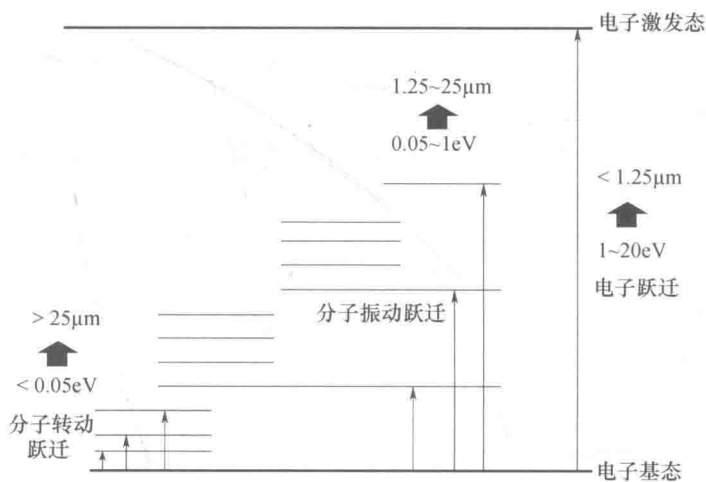


图 1-3 与红外辐射有关的物质能级跃迁模式

图 1-3 给出了与红外辐射相关的三种能级跃迁模式:

(1) 电子跃迁,也称原子能级跃迁,是指原子中的电子在电子基态和电子激发态之间的跃迁。电子跃迁的能级之间的能量差一般在 $1\text{eV} \sim 20\text{eV}$,利用前面给出的公式(1-7)和公式(1-8)可以计算出,电子跃迁产生的辐射波长为 $62.5\text{nm} \sim 1.25\mu\text{m}$,涵盖了大部分紫外线、全部可见光和近红外部分。

(2) 分子振动跃迁,是指组成分子的各个原子产生的相对振动运动。分子振动跃迁

的能级之间的能量差一般在 $0.05\text{eV} \sim 1\text{eV}$, 利用前面给出的公式(1-7)和公式(1-8)可以计算出, 分子振动跃迁产生的辐射波长为 $1.25\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$, 全部属于红外辐射。

(3) 分子转动跃迁, 是指组成分子的各个原子产生的相对转动运动。分子转动跃迁的能级之间的能量差一般小于 0.05eV , 利用前面给出的公式(1-7)和公式(1-8)可以计算出, 分子振动跃迁产生的辐射波长大于 $25\mu\text{m}$, 覆盖了大部分红外波段, 还包含了部分微波波段。

根据红外辐射的产生机理、红外辐射的应用发展情况并考虑红外辐射在地球大气层中的传输特性, 将 $0.75\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ 的红外辐射划分为四个波段, 如表 1-1 所示。

表 1-1 红外谱段细分

名称	缩写	波长范围/ μm	产生机理
近红外/短波红外	NIR/SWIR	$0.75 \sim 3$	原子能级跃迁和分子振动能级跃迁
中红外/中波红外	MWIR	$3 \sim 6$	分子转动能级跃迁和振动能级跃迁
远红外/长波红外/热红外	LWIR/TIR	$6 \sim 15$	
极远红外	XIR	$15 \sim 1000$	分子转动能级跃迁

红外辐射是一种电磁辐射, 它既具有与可见光相似的特性, 如反射、折射、干涉、衍射和偏振, 又具有粒子性, 即它可以以光量子的形式被发射和吸收。此外, 红外辐射还有一些与可见光不一样的独有特性:

(1) 红外辐射的光量子能量比可见光的小, 例如 $10\mu\text{m}$ 波长的红外光子的能量大约是可见光光子能量的 $1/20$;

(2) 红外辐射的热效应比可见光要强得多;

(3) 红外辐射更易被物质所吸收, 但对于薄雾来说, 长波红外辐射更容易通过。

至此我们已经对红外辐射有了一个初步的认识:

红外辐射是一种电磁波, 经典的电磁理论在这个领域是适用的;

红外辐射是人眼看不见的光, 不能直接被人眼感知, 所以通常红外探测系统都需要通过光电转换后形成图像, 而可见光系统则不需要光电转换系统而直接用人眼作为探测器;

红外辐射是热辐射, 任何温度在绝对零度以上的物体都会向外辐射包括红外辐射在内的全谱段辐射信号;

对红外辐射的研究属于光学范畴, 这是区别于雷达探测而言的, 红外光电探测技术的理论基础将是工程光学和物理光学。

1.1.2 辐射度学和光度学基础

为了研究红外辐射的相关基础理论, 需要对辐射能的度量定义一整套的物理量。由于人类对电磁波的认识是在漫长的历史长河中逐渐建立起来的, 且针对不同类型的电磁波, 其测量方法和手段也往往不同, 从而出现了不同的度量单位。

人类最先感知的是可见光, 历史上人们首先对可见光的度量进行了比较充分的研究, 引入了一些描述人眼对光敏感程度的物理量, 并创建了研究光能测量的科学与技术——光度学。研究可见光就必须把相应的辐射度量加上人眼的视觉特性, 这样光度学除了包

括辐射能这一客观物理量的度量外,还应考虑人眼视觉机理的生理和感觉印象等心理因素。所以光度学的方法是心理物理学方法,而不是纯粹的物理学方法。也就是说光度学不能单纯的依据质量、长度、时间等类似的物理量来描述,光度学的一些概念只能适用于可见光范围。

随着辐射理论的发展,物理学中逐渐形成了一门研究电磁辐射能测量的科学与技术——辐射度学。与光度学中的光度量依赖于人眼的视觉响应特性不同,辐射度学中的辐射量是建立在物理测量基础上的客观物理量,它不受人的主观视觉限制,因此,辐射度学的各种概念适用于整个电磁波谱范围。

1. 辐射度学

辐射度学主要建立在几何光学的基础上,基于以下两个假设:第一,辐射按直线传播,因此,辐射的波动性不会使辐射能的空间分布偏离一条几何光线所规定的光路;第二,辐射能是不相干的,所以辐射度学不考虑干涉效应。

下面将介绍辐射度学中一些重要的物理量——辐射术语,在国内的各种文献资料中这些辐射术语的中文译名非常混乱,本书中将采用《红外系统原理》(Hudson 著,中译本)所推荐使用的中文译名。

(1) 辐射能(U)——Radiation Energy

辐射能描述了电磁波所传递的能量,单位为焦耳(J)。它是基本物理量。

(2) 辐射能密度(u)——Radiation Energy Density

物体发出的辐射能量,通常将在整个空间内传播扩散,而我们往往只关注在一定空间范围内的能量,此时就需要知道辐射能的密度,即空间单位体积内包含的电磁波的能量,这就是辐射能密度,单位为 J/m^3 。

$$u = \frac{\partial U}{\partial V} \quad (1-9)$$

(3) 辐射通量(P)——Radiation Flux

实际上我们不仅关注辐射能量在空间的密度分布,更关注辐射能量在时间上的分布情况,此时就需要用到辐射通量的概念。辐射通量表示辐射源单位时间内发射的辐射能总量,即辐射功率,单位为 W。

$$P = \frac{\partial U}{\partial t} \quad (1-10)$$

(4) 辐射通量密度(W 或 M)——Radiation Flux Density

可以看出,要评价辐射体辐射能量的强弱,不能单纯地看其辐射能量总量的大小,而应考虑时间和空间的影响,在辐射度学中通常用辐射通量密度表征物体表面辐射能量的强弱。辐射通量密度表示辐射源单位辐射面积发出的辐射通量,如图 1-4 所示,单位为 W/m^2 。

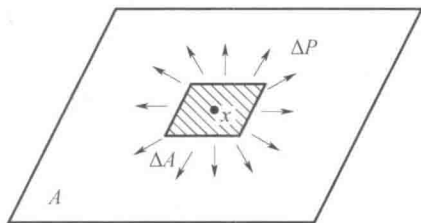


图 1-4 辐射通量密度的定义

$$W = \frac{\partial P}{\partial A} \quad (1-11)$$

从辐射通量密度的定义可知,它表示的是具有一定面积的辐射源的辐射能力,这样的

辐射源通常被称为“面源”。也就是说辐射通量密度可以用于表征“面源”辐射体的辐射能力。

对于面源辐射体,其辐射通量与辐射通量密度之间满足如下关系式:

$$P = \int_A W dA \quad (1-12)$$

(5) 辐射强度(J 或 I)——Radiation Intensity

与“面源”辐射体相对应,我们将可以不考虑其大小的辐射体称为“点源”辐射体。需要指出的是所谓“面源”和“点源”是相对的概念。与面源类似,为了描述点源的辐射能力,人们引入了辐射强度这一物理量。辐射强度表示辐射源在某个方向上向单位立体角内辐射的辐射通量,通常用来描述点辐射源的辐射能力,如图 1-5 所示,单位为 W/sr 。

$$J = \frac{\partial P}{\partial \Omega} \quad (1-13)$$

对于点源辐射体,其辐射强度与辐射通量密度之间满足如下关系式:

$$P = \int_{\Omega} J d\Omega \quad (1-14)$$

式中: Ω 为空间立体角。

(6) 辐射亮度(N 或 L)——Radiance

在点源的辐射能力度量中,我们考虑了其在空间方向上的变化。实际上面源目标在全空间的辐射能量也会具有方向性,不一定是全空间均匀辐射的,为此我们在辐射通量密度的基础上,考虑辐射空间的因素,引入了描述面源辐射体辐射能力的另一个物理量——辐射亮度。

辐射亮度表示辐射源在某个方向上的单位投影面积向单位立体角内发出的辐射通量,通常用来描述扩展辐射源(即面辐射源)的辐射能力,如图 1-6 所示,单位为 $W/(sr \cdot m^2)$ 。

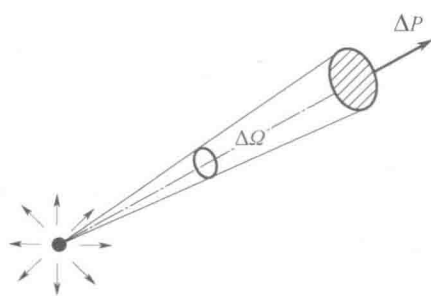


图 1-5 辐射强度的定义

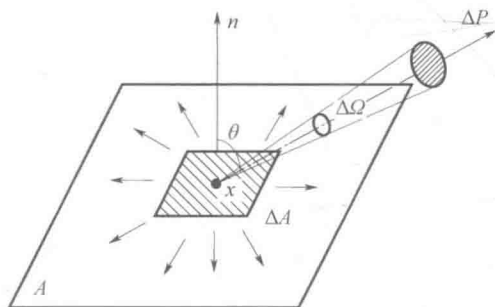


图 1-6 辐射亮度的定义

$$N = \frac{\partial^2 P}{\partial A \partial \Omega \cos \theta} \quad (1-15)$$

对于描述面源辐射体辐射能力的两个物理量——辐射通量密度和辐射亮度,根据其定义式可以得出,辐射通量密度等于辐射亮度在全空间立体角上的积分,即

$$W = \frac{\partial P}{\partial A} = \int_{2\pi \text{ 球面度}} N \cos \theta d\Omega \quad (1-16)$$