

普通高等教育
兵器工业系列教材

红外技术系列教材 I

红外物理

刘景生 编著



兵器工业出版社

C-43/3
红外物理
@b 物理

1039103

红 外 物 理

刘景生 编著

兵器工业出版社

(京)新登字049号

内 容 简 介

本书是按高等工业学校光电技术教学指导委员会审定的《红外物理》教材编写大纲的要求编写的。本书系统地论述了红外辐射的发射、吸收、传输、探测、计量等过程中的基本原理、规律，并注意到近年来的国内外进展。全书共九章，书后按章附有100道习题，密切配合教学要求，富有理论意义和应用价值。参考教学时间约为70学时。

本书在内容编排和理论阐述上，由浅入深，概念清楚，并注意物理模型的建立。

本书可作为红外技术、光电子技术、应用物理等专业的红外物理课教材，也可供从事红外、遥感、空间光学、光电技术等方面的科学工作者、工程技术人员参考。

红 外 物 理

刘景生 编 著

机械工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京市顺义县后沙峪印刷厂印装

开本：787×1092 1/16 印张：18.5 字数：453.96千字

1992年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数：1~1000 定价：4.80元

ISBN 7-80038-450-0/O·24(课)

序

兵工红外系列教材在兵器部门领导支持下，即将相继出版，这将为红外专业教学和科研的开展起到一定的推动作用。

红外辐射这一物理现象的发现可追溯到1800年。但直到本世纪的50年代，红外技术才开始进入广泛应用的阶段，从而标志红外物理与技术作为一门新兴学科而逐步形成。随着国际性专业刊物《红外物理》(Infrared Physics)问世(1961年)，各种红外专业的学术会议日益频繁，以及60年代激光器的出现，对红外物理与技术的发展产生了深远的影响。

红外光谱学是红外物理与技术研究的重要基础。其中干涉光谱术是近20多年来发展很快、取得显著成就的新技术。它的理论基础虽然可追溯到迈克尔逊早年用干涉图的可见度来估算光谱，但是真正的发展是从1957年国际分光会议开始，特别是把傅里叶变换、干涉以及快速计算机结合起来，干涉光谱术才得到迅速发展，从实验室的原理实现发展成为现代光学仪器——干涉光谱仪。它具有多重光谱同时测定和辐射通过量更高的显著特点……现在从近红外到远红外，甚至到微波，可以说傅里叶光谱仪占绝对优势。

红外探测器的研究，始终是红外物理与技术进展的核心。一百多年来红外技术发展的历史证明：每种性能更好的新型红外探测器的出现，都标志着人类认识红外辐射现象和本质的进步，有力地推动着整个红外学科的发展。当前，红外探测器研究的前沿是：红外焦平面阵列探测器、红外量子阱探测器、超导约瑟夫森结红外探测器、非平衡模式CMT探测器以及外延TGS₂热释电红外探测器。目前，尤其前两种最引人注目。

红外遥感与热成像技术是红外物理与技术研究和应用的最新进展的重要标志。包括陆地、海洋、大气在内的地球环境遥感技术取得卓著的成果，受到世界各国的广泛重视，其中尤其以红外和多波段遥感最为活跃。红外遥感由于保密性好，抗干扰本领强，能昼夜连续工作等优点，首先在空中军事侦察中占据十分重要的地位。80年代以来，第一代红外热成像和多光谱遥感器进入了成熟时期，目前已有数十种军用热像仪。多光谱遥感仪的新趋势是从光机扫描结构过渡到推扫结构。

远红外波段的开拓研究是当前各国科学界密切关注的发展领域之一。激光参与的各种非线性过程，包括差频和频、参量振荡、受激拉曼和极化声子散射等过程，能产生相干宽谱可调谐红外辐射。该方面研究的深入发展，必将给远红外光谱带来革命性的变化，必将给红外在军事上的应用提供新的手段。

兵工红外技术专业系列教材包括：红外物理、红外器件、红外技术以及红外工程系统等诸多广泛的内容。教材配套性将反映红外学科领域及相关技术发展的轮廓。这套教材可供红外技术、光电技术、应用物理等专业的本科学学生使用，也可供从事相应技术研究的科学技术人员和工程技术人员参考。

这套教材得到兵器部门领导的重视，是在高等工业学校光电技术专业教学指导委员会的指导下编写的，将体现兵工教材特点。它的出版必将在国防科学新技术领域中日益显示出巨大的应用潜力，所以，我认为这是一件很有意义的工作。

王大珩

1992年6月

前 言

本书是根据高等工业学校光电技术教学指导委员会1988年8月审定的教材编写大纲的要求编写的。1990年3月被列入兵工专业红外系列教材出版计划。

本教材重点讲述红外辐射发射、吸收、传输的一般原理与探测方法。前三章系统讲授在红外物理与技术中常用的基本概念、常见的各种辐射源的光度量与辐射度量的理论计算，并选取典型计算举例；第四、五章分别讲述黑体辐射源理论及近代发展、常用红外辐射源和制作中温黑体炉的关键技术、军用目标和背景辐射源的介绍；第六、七章介绍了红外物理与技术的重要基础——红外光谱、红外辐射在大气中的传输，并介绍了大气透射比的简单计算，以及大气吸收的基线型方法。第八、九章讲述了辐射测量仪器和红外辐射测量方法。全书约

§ 5.1	黑体辐射源	(107)
§ 5.2	热激发的固体红外辐射源	(112)
§ 5.3	受激气体和蒸气的辐射源	(115)
§ 5.4	发光二极管	(119)
§ 5.5	激光器	(120)
§ 5.6	目标和背景辐射特性的计算方法	(126)
第六章	红外光谱概论	(139)
§ 6.1	分子的能量与分子光谱的分类	(139)
§ 6.2	分子光谱的基本理论	(142)
§ 6.3	双原子分子的转动及其转动光谱	(162)
§ 6.4	双原子分子的振动及其振动光谱	(168)
§ 6.5	多原子分子的红外光谱	(178)
第七章	红外辐射在大气中的传输	(181)
§ 7.1	引言	(181)
§ 7.2	地球大气	(182)
§ 7.3	大气吸收概述	(186)
§ 7.4	水蒸气	(189)
§ 7.5	二氧化碳	(192)
§ 7.6	臭氧和其它吸收红外辐射的气体	(194)
§ 7.7	研究大气吸收的实验方法	(196)
§ 7.8	大气散射所导致的衰减	(207)
§ 7.9	大气透射比的简单计算	(212)
§ 7.10	大气吸收的带模型方法	(215)
第八章	辐射测量仪器与红外光学元器件	(226)
§ 8.1	棱镜式光谱仪器	(226)
§ 8.2	光栅单色仪	(235)
§ 8.3	红外辐射测量仪器	(238)
§ 8.4	红外光学材料	(244)
§ 8.5	光学薄膜	(251)
§ 8.6	红外滤光片	(253)
第九章	红外辐射计量	(256)
§ 9.1	红外辐射测量的基本原理	(256)
§ 9.2	辐射量的测量	(258)
§ 9.3	辐射源光谱分布的测量	(267)
§ 9.4	反射比、透射比、吸收比的测量	(269)
§ 9.5	光热辐射计量术	(273)
红外物理习题		(279)
参考文献		(287)

第一章 绪 论

本章的主要内容是介绍红外辐射的基本知识以及明确本课程所承担的主要任务。

§ 1.1 红外辐射的基本知识

1.1.1 电磁波谱

一切物质都在不停地发射和吸收电磁辐射。从经典电磁理论知道，物质内部带电粒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，我们遇见过各种类型的辐射，如 γ 射线、X射线、紫外线、阳光、热辐射、微波、无线电波等。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，称为电磁波谱^[1]，如图1-1所示。

由于产生各种辐射的方法不同，或者探测它们的方法不同，因此在历史上它们就得到了上述各种不同的名称。但是在本质上是相同的，统称为电磁辐射。

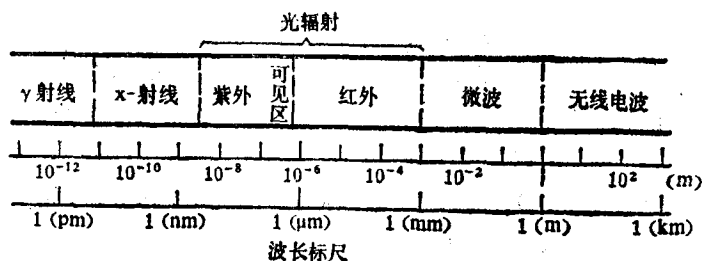


图1-1 电磁波谱

所有的电磁辐射都具有波动性，因此电磁辐射又称为电磁波。它们都遵循同样形式的反射、折射、干涉、衍射和偏振定律。它们在真空中传播的速度都具有同样的数值，称为真空中的光速。其值为 $c = (2.99792458 \pm 0.000000012) \times 10^8 \text{ m/s}$

$$\approx 3.00 \times 10^8 \text{ m/s.}$$

在真空中，频率为 ν 的电磁波，波长为 λ ，真空中的光速为 c ，则有

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

在介质中，同样频率 ν 的电磁波的波长为 λ' ，速度为 v ，则有

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

由前面二式得到

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

式中 $n = c/v$ 称为介质对真空的折射率。(1-3)式表明，同一频率的电磁波，它在介质中的

波长是它在真空中波长的 n 分之一。

在电磁波谱的红外区域中，由于电磁波的频率是很大的数值，不能直接测量，并且得到数值的精度比测得波长数值的精度低，所以多用波长来标志。如无特殊说明，所引用的波长数值均是指在真空中的数值。

在红外辐射的研究中，波长的单位通常用微米(μm)，它与纳米(nm)以及埃(\AA)的关系为

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

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

在光谱学中，除了用波长 λ 或频率 ν 等参数来表征电磁波外，还经常用波数 σ 来标志。如果频率为 ν 的电磁辐射在真空中的波长用米表示，则波长值的倒数就是波数值 σ ，即

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

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长的路程上包含有多少个波长的数目。利用(1-1)式，可得到波数和频率的关系

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

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，常常把波数 σ 称为“频率”。在使用“频率”一词时，应该注意，不要将它与真正的频率 ν 弄混。真正的频率 $\nu = c\sigma$ 。

由于电磁辐射具有波动性和量子性的二象性，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。在考虑辐射的发射和吸收问题时，必须把辐射看成分立的“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。

利用(1-5)式，光子能量与波数的关系为

$$\varepsilon = hc\sigma \quad (1-7)$$

即光子的能量与波数 σ 成比例。在光谱学中，有时就直接用波数 σ 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，一个自由电子在一伏特电位差的加速下所获得的动能。

几种表示光子能量的单位之间的换算关系为

$$1\text{eV} = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{J}$$

$$1\text{cm}^{-1} = 1.9864778 \times 10^{-23} \text{J}$$

$$1\text{eV} = 8065.477\text{cm}^{-1}$$

1.1.2 红外辐射

红外辐射，是从可见光的红光边界开始，一直扩展到电子学中的微波区部分。红外辐射的波长范围是从 $0.75\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 左右相当宽广的区域。

在红外技术领域，由于不同的波长的红外辐射在地球大气层中传播特性的不同，通常把整个红外辐射按波长分为四个区^[2]，如表1-1所示。

红外波段的波长范围是从 $0.75\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 。相应的频率范围是从 $4 \times 10^{14} \text{Hz}$ 到 $3 \times$

表1-1 红外辐射的详细划分

名称	缩写	波长边界 (μm)
近红外	NIR	0.75~3
中红外	MIR	3~6
远红外	FIR	6~15
极远红外	XIR	15~1000

10^{11}Hz ；所对应的波数范围是从 $1.33 \times 10^4\text{cm}^{-1}$ 到 10cm^{-1} ；所对应的光子能量是从 1.66eV 到 $1.24 \times 10^{-5}\text{eV}$ 。上述划分方法并不是十分严格的，在不同的文献中，彼此也不完全一致。但是，上述划分方法方便之处是前三个波段中每一个波段都至少包含一个大气窗口。所谓大气窗口，是指地球大气层中对红外辐射是透明的波段。其中，近红外区，包含几个大气窗口；中红外区，包含 $3\mu\text{m}$ 到 $5\mu\text{m}$ 的大气窗口；远红外区，包含 $8\mu\text{m}$ 到 $14\mu\text{m}$ 的大气窗口；在极远红外区，没有很好的大气窗口。实际上在超过几米的传输路程上，大气就基本上不透明了。

在光谱学中，根据红外辐射产生的机理不同，红外辐射按波长分成三个区域。

极近红外区： $0.75 \sim 2.5\mu\text{m}$ ，对应原子能级之间的跃迁和分子振动泛频区的振动光谱带；

近红外区： $2.5 \sim 25\mu\text{m}$ ，对应分子转动-振动能级之间的跃迁；

远红外区： $25 \sim 1000\mu\text{m}$ ，对应分子转动能级之间的跃迁。

§ 1.2 红外技术与红外物理

1800年，英国的天文学家赫谢耳 (S. W. Herschel) 为了寻找在观察太阳时保护自己的方法，发现了所谓的“不可见光线”，而且产生热效应最大的波长位置是在可见光谱的红端以外，由此才得名“红外线”，也就是现在所说的红外辐射。但是，由于当时科学技术水平的限制，尤其是缺乏灵敏的探测器，致使在红外辐射发现之后的三十年间，对红外辐射及其应用的研究发展缓慢。

1830年出现的温差热电偶，比从前用的温度计更灵敏。1833年，出现了用几个热电偶串联而成的热电堆，它比当时做得最好的温度计至少灵敏40倍，而且能够从9m以外探测到人体的红外辐射。

19世纪80年代，又出现了一些高灵敏度的新型探测器，特别是出现了测辐射热计。它比热电堆的灵敏度约高30倍。同期，对太阳辐射进行了定量测量。从1883年到1900年间报导的这类测量已超出了 $5\mu\text{m}$ ，到1917年将其扩展到 $13\mu\text{m}$ 。

大量的实验和理论研究工作，确定了红外辐射同样遵守可见光的基本定律，两者在本质上是相同的。1879年，斯忒藩 (Stefan) 根据他亲手的测量，同时也分析了别的研究工作者所测得的数据，得出结论：总辐射能量 (1s内 1cm^2 上所发出的能量) 与辐射体的绝对温度的四次方成正比。1884年，玻尔兹曼 (Boltzmann) 根据热力学的研究，在理论上证明：绝对黑体的总辐射能量应与温度的四次方成比例，即斯忒藩的结论只对于绝对黑体是正确的。

红外实验和理论的发展，推动了红外辐射在军事和国民经济方面的应用，导致了红外技

术的发展。20世纪初，人类开创了红外光谱学和精密辐射学的应用，制订并沿用了一套热辐射的国际标准，对恒星和行星的温度进行了辐射测量，把红外光源用于医疗过程，发展了保护眼睛用的红外吸收玻璃。1910年到1920年间出现了为探测船舰、飞机、人体、炮兵阵地和冰山的装置，还有如保密通讯、防盗预警、温度遥测等设备。第一次到第二次世界大战间，出现了光子探测器和变像管以及发展了红外光谱学。第二次世界大战期间发展了夜视技术，但只有少数的红外装置达到了生产阶段。第二次世界大战后，尤其是50年代以来，由于半导体技术和激光技术的发展，为红外技术提供了单色性好、能量集中的相干辐射源和灵敏度高、响应速度快的光子探测器，使红外技术得到了突飞猛进的发展。直至今日，广泛应用于工业、农业、军事、医疗、交通、空间技术等各方面的红外技术，已逐步形成了一个相对独立的红外系统工程领域。应用于各个方面的红外系统也相继出现，日新月异。

红外系统，又称为红外整机，它是各个部件的组合，通过部件相互间的协调作用来达到某种目的。红外系统，常分为主动式和被动式两大类。主动式红外系统与雷达一样，必须发射红外辐射照射目标，然后再探测由目标反射回来的辐射，完成探测目标的目的；被动式红外系统并不发射红外辐射，只是接收来自目标的辐射。一个较为完善的红外系统是由光学、机械、电子、计算机等各个相互协调的部件组成的。红外系统的基本原理如图1-2所示。

下面对红外系统的各个部件作一个简要说明。

目标是红外系统所探测的对象。目标的辐射经过地球大气，受到大气中某些气体分子的选择性吸收以及大气中悬浮微粒的散射而衰减。透过大气的目标辐射由光学接收器接收，并且会聚到探测器上。光学调制器安装在光学系统的焦平面处。它是在透红外辐射的基板上绘制着各种花纹图案。图案的不同部分，对红外辐射有不同的透射比。在红外系统工作时，调制器与目标的像相对运动，使透过调制器的像随时间变化。调制器的主要作用是：(1) 将入射辐射变为交流信号，以使探测器的输出变为交流信号，以利于电子系统放大；(2) 空间滤波，即滤除背景的干扰辐射，以鉴别背景中的目标；(3) 给出目标方位和高低的信息。探测器是一个辐射能转换器，把辐射能转换为另一种可测量的能量形式，如电能、热能等。由于某些探测器必须在低温下工作，所以对这样的探测器进行制冷是不可缺少的。探测器输出的信号经过电子系统的放大处理，然后再以必要的形式显示出来以供判读。

“红外物理学”(Infrared Physics)这一名词最早出现在1959年。当时，美国人首先部分地公开了他们在十多年的保密状态下发展起来的红外技术，把红外技术所牵涉到的物理基础通称为红外物理学。1961年开始出版的一份国际性学术刊物《红外物理学》也是沿用这个意义。这样，红外物理学才作为一门分支学科正式形成。红外物理的主要内容包括：①红外光谱学；②各种类型的红外探测器(包括多元列阵和成像器件)及相关联的信息处理和制冷技术；③红外波段的光学材料、光学系统、滤波器件、偏振器件、空间滤波以及调制技术；④固体、液体、气体(尤其是大气)的红外波段的性质及其测量；⑤红外激光等。由上述内

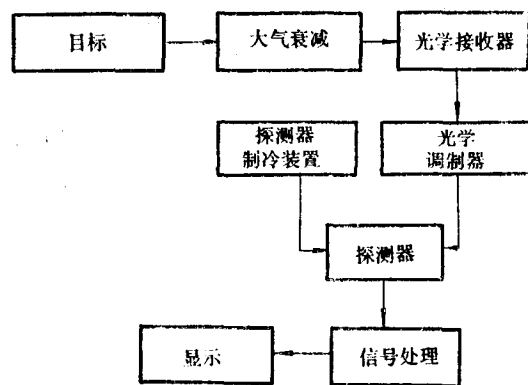


图1-2 红外系统原理

容看来, 红外物理学研究的内容是很广泛的, 实质上是以红外技术应用的目的为其内在联系的一门应用学科。红外物理学是现代物理学的一个分支。它是以红外辐射为特定的对象, 研究其产生、传输、探测以及与物质相互作用的规律的学科。

如果说现代光学技术、电子技术和精密机械技术提供了必要的技术基础, 那么, 不可否认, 红外物理学则为现代红外技术奠定了可靠的理论基础。它不仅能预言各种技术应用的原则可行性, 而且它还通过对各种物质、不同目标与背景红外辐射特性的研究, 对地球大气红外光学性质的研究, 对不同材料红外吸收特性以及由此而引起的各种物理效应的研究, 为红外系统工程设计和新型元部件的研制, 提供了丰富的实际资料和必要的理论依据。

此外, 红外物理学与物理学、化学、生物学、天文学、地质学等基础学科也有着密切联系和相辅相成的关系。

现代红外物理与技术主要向下述几个方面发展。

1. 红外光谱学

它是红外物理与技术的主要基础。最近发展的主要成果是傅里叶变换光谱技术在整個红外波段得到完全的应用。这种建立在双光束干涉度量基础上、应用数学傅里叶变换原理而实现的光谱技术方法, 与传统的色散光谱技术相比较, 具有多重光谱同时测定和辐射通过量更高的优点。

2. 红外探测器

它的研究, 始终是红外物理与技术发展的中心。一百多年来的红外发展历史证明, 每种性能更好的新型红外探测器的出现, 都标志着人类认识红外辐射现象和本质的进步, 有力地推动着整个红外学科的发展。近年来正在研究的探测器有单元热释电探测器、热释电CCD。在光子探测器方面有锗掺杂和硅掺杂红外探测器、三元系半导体红外探测器、多元阵列红外探测器(如单片红外成像器件)、SPRITE(Signal processing in the element)探测器、混合红外成像器件等。

任何红外系统的发展始终受到红外探测器性能的制约。采用单元或线列阵红外探测器, 由光机扫描方式组成的红外系统, 其探测灵敏度和空间分辨率等技术指标已接近极限。为了满足高性能红外系统的要求, 已经发展新一代的红外焦平面阵列探测器(IRFPA)。它是由多元红外探测器构成的一个面阵, 并与具有一定信息处理功能电路(通常是CCD)相集成。这类器件通常放置在红外系统的焦平面上。

由于象元数 N 的增加, 使IRFPA的信噪比比单元探测器提高了 N 倍, 同时可采用较小尺寸的探测单元, 以提高红外系统的分辨率; 由于采用凝视模式工作, 因而可省去机械扫描装置。另外, IRFPA又具有对光信号的积分和读出功能, 以及其它信号处理功能, 因此使整个系统得以简化, 使其重量轻、体积小、可靠性高、功能增多。

IRFPA将应用于星载或机载红外望远镜系统、战略导弹的成像制导、动能武器的高精度跟踪、星载或机载成像光谱仪、前视和夜视系统、机器人视觉系统、热像仪以及红外天文观察等。

量子阱红外探测器(QWIP)是近年来在半导体超晶格量子阱人工结构材料和光电子学研究方面的一个重要领域。量子阱红外探测器具有响应快、量子效率高、可变波长、可变宽度(10—50%)等优点, 从而为新一代红外探测器的研制, 以及新型红外成像技术、新型红外光谱仪的研制开辟了广阔的道路。

量子阱红外探测器是在近年来MBE和MOCVD技术发展的基础上研制成功的。利用MBE、MOCVD技术可以生长能带结构可调的半导体超晶格量子阱人工结构材料，以设计研制出具有特定光学、电学特性的材料。半导体异质结构也可以调节偏压来调节子能带能量。在二维结构中，电子在垂直于样品平面的方向上被限制在量子化能级上运动，形成二维电子气。其电子能带能量间隔可以调节在红外波段，并可以设计不同结构或调节外加电场来改变响应波长范围。

目前世界上主要用HgCdTe来研制 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的红外探测器。单元HgCdTe红外探测器已达到非常高的水平，列阵和面阵也有相当的规模。国外已用液相外延HgCdTe研制出 256×256 元的多元面阵探测器。然而面阵HgCdTe长波探测器仍有几个问题：①隧道电流大；②大面积组分均匀性；③要在77K温度下工作。目前国际上探索超晶格量子阱红外探测器主要有两个方向：一是HgCdTe/CdTe超晶格， $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{InSb}$ 超晶格或 $\text{InAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}$ 超晶格，利用内应力效应或能带位差来调节基本带隙，以适应 $8\sim 12\mu\text{m}$ 的波段，并获得大的光吸收系数；二是利用量子阱内子能带之间的光跃迁来探测红外辐射，即所谓QWIP。目前国际上已有采用GaAs/Al_xGa_{1-x}As掺杂多量子阱来研制长波红外探测器。其原理是利用基态子能带电子在红外光激发下跃迁到第一激发态，而第一激发态接近连续态，从而光电子逸出量子阱，在外电场作用下形成光电流，实现红外探测。这种探测器具有很多优点。由于可以采用MBE技术生长不同层次的材料，因此量子阱的宽度、阱深可以人工调节，从而把峰值响应设定在宽阔的红外波段，从几个毫电子伏特($100\mu\text{m}$)到几百个毫电子伏特($5\mu\text{m}$)。同时也可以采用电致可调谐的方法使波长范围落在我们所需要的波段。另外，可以研制出窄带探测器。

此外，以激光为泵源的红外上转换，是一种非线性的参量转换过程。它可以直接把入射的红外辐射转变成可见或近红外辐射，不仅能转换单一的红外辐射信号，而且能转换完整的红外图像。因此，它为红外探测与成像提供了很有希望的新途径。

3. 红外遥感技术

这是红外物理与技术研究和应用进展的重要标志。近二十年来，在空间科学技术和大容量电子计算机迅速发展的促进下，包括陆地、海洋、大气在内的地球环境遥感技术取得显著成果，受到世界各国的广泛重视。其中，以红外和多波段遥感最活跃。红外遥感由于保密性好、抗干扰本领强、能昼夜连续工作等优点，首先在空中军事侦察中占据十分重要的地位。红外遥感在污染检测、天文观察、卫星姿态监测等许多方面也获广泛应用。红外遥感研究和应用的发展对信息处理和判读、大气传输、探测器、各种目标辐射特性等基础工作不断提出更高的要求，从而必然进一步推动整个红外科学向纵深发展。

4. 向远红外波段开拓

远红外波段的开拓研究是当前各国科学技术界密切关注的发展领域之一。迄今为止，红外物理与技术的研究和应用，绝大部分都集中在 $0.75\sim 25\mu\text{m}$ 的狭窄波段范围，而从数十微米到一千微米的宽阔远红外波段尚未得到充分发展。因此，远红外开拓的重要科学意义是不言而喻的。当前，主要集中在分子的纯转动光谱、固体的远红外光学性质、等离子体物理、天体观测、军事应用等方面的研究。

由上述可知，红外物理学的内容是十分广泛的。作为一门红外物理课，主要讲述红外技术的物理基础、辐射测量技术的原理和方法。

第二章 光度与辐射度基础

在红外物理及其应用的科学实践和工程设计中，经常会遇到各种形式的辐射源发出辐射的计算问题和测量问题。要解决这些问题，必然要涉及到一些有关辐射量和光度量的基本概念、定义、单位及其计算。

§ 2.1 引言

2.1.1 辐射源和辐射度学

我们知道，所有在绝对零度以上的物体都要发出电磁辐射，凡是发射电磁辐射的物体，都可以称为辐射源。例如，典型的辐射源包括太阳、激光器、放电灯、荧光材料等。辐射源所发出的辐射，可以是自身发射的，也可以是经辐射照射时，被它反射出去的那部分辐射。

辐射度学是一门测量电磁辐射能的科学和技术。在图1-1所示的整个电磁波谱范围内，在不同波段使用测量辐射能的方法不同。我们的目的在于阐述一些适合于测量电磁波谱光辐射区域内的辐射能的概念、元件和技术。以电磁波形式或粒子（光子）形式传播的能量，可用平面镜、透镜或棱镜之类的光学元件反射、成像或色散。这种能量传播过程称为光辐射。在图1-1所示的电磁波谱中，光辐射位于X射线和微波之间，即波长约在1nm与1mm之间。最熟悉的部分是可见光，约位于380nm和780nm之间，即人眼明视响应的近似极限。各个波段的界限不是很分明的，因此，图1-1中波长范围也只是近似的边界。

2.1.2 辐射度学的特征

辐射度学的基本概念集中于电磁辐射的三个互补特性：传播的直线性、波动性和量子性。一般说来，在微波和波长较长的波段上，辐射会显现出波动性；相反，在X射线和波长较短的波段上，辐射会显现出传播的直线性 and 量子性；在光辐射波段，传播的直线性、波动性和量子性在不同的程度上显现出它们的重要性。

辐射度学主要是建立在几何光学的基础上。几何光学的第一个假设是：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。事实上，几何光学并不考虑衍射效应。辐射度学中的第二个假设是：辐射能是不相干的。所以辐射度学也不考虑干涉效应。

与其他物理量的测量相比较，测量辐射能或辐射功率的误差是很大的，百分之一的误差就认为是很精确的了。这也只能在操作非常小心，所采用的元件、技术、测试标准与上述误差十分匹配的条件下才能达到的。一般认为，百分之十或稍大一点的误差就可满足要求，并且是采用较好测量技术的结果。

误差大的原因之一在于辐射能是扩散的。这种扩散与位置、方向、波长、时间和偏振态有关。此外，辐射与物质的相互作用——发射、吸收、散射或反射和折射，也都与上述五个辐射参量有关。仪器参量和环境参量（例如温度、湿度、磁场等）也可影响测量。因此，我们虽然不能方便而周密地表示这些因素，但还是要提供在各种情况下辨认和处理所有这些因素的系统方法。

除测量误差大以外，辐射度学中的一些术语、符号、定义和单位彼此容易混淆。过去在一些应用技术领域中已经各自建立了相应的术语系统，如照明工程、军事红外应用、大气物理、气象学以及辐射传导等术语系统。现在我们用国际单位制（SI）来阐述有关的术语、单位等⁽³⁾。

2.1.3 光度学

可见光在传播过程中携带的能量，称为光能。把研究光能测量的科学与技术称为光度学。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（光谱光视效率，即视见函数）这个“权”，因而使光度学成为一门心理物理学。所以光度学的方法是心理物理学法，而不是纯粹的物理学方法，同时光度学也不可能单纯地依据质量、长度、时间那些类似的物理量来描述。当然，光度学的一些概念就只适用于可见光范围。而辐射量是建立在物理测量基础上的客观物理量，它不受人们主观视觉的限制，因此，辐射度学的一些概念适用于整个电磁波谱范围。

2.1.4 术语和符号

有关辐射量的术语和符号很多，不恰当地使用常会发生差错，当引入新单位时则更容易出错。

辐射量是纯物理量，而光度量则是通过标准光度观察者进行测量和计算的。二者的对应量以相同的符号表示，仅以不同的下标来区分。对于辐射量用下标“e”或不用下标，对于光度量则用下标“v”，例如 X_e 或 X_v 。

§ 2.2 立体角

2.2.1 立体角

在平面上，几何学讨论了角的概念。角既可以用角度来度量，也可以用弧度来度量。在空间，相应地有立体角的概念及其计算问题。立体角的概念在光度学与辐射度学中广泛使用。

立体角的定义是：一个任意形状的封闭锥面所包含的空间称为立体角，用符号 Ω 表示，如图2-1所示。立体角的单位是球面度，以sr表示。

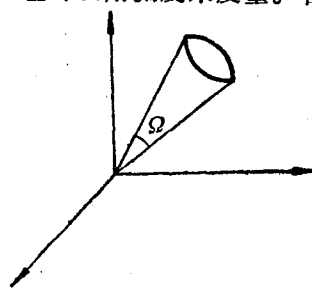


图2-1 立体角的定义

2.2.2 立体角的计算

如果给定一个顶点 O 和一个微小面积 dS ，求它所对的立体角的数值，可以以 O 为球心，以 O 到 dS 的中心 P 的距离为半径（ $OP=r$ ）作球面，被以 dS 为底、以 O 为顶点的锥面截下的球面部分为 dA ，如图2-2所示。 dA 为 dS 在 OP 方向上的投影面积，所以

$$dA = dS \cos \theta$$

式中 θ ——为 dS 面与 dA 面的夹角。

由单位立体角的定义可知

$$d\Omega = \frac{dS \cos \theta}{r^2} \quad (2-1)$$

如果要计算一个球冠所对的立体角，如图2-3所示，球冠的面积为

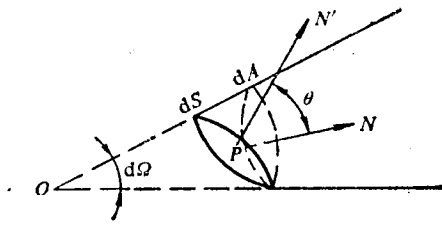


图2-2 元立体角的计算

$$S = 2\pi r \cdot CD$$

根据立体角的定义，可知该球面所对的立体角为

$$\Omega = \frac{S}{r^2} = 2\pi(1 - \cos\alpha) = 4\pi \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (2-2)$$

当 α 角很小时，即 $\alpha \approx \sin\alpha \approx \tan\alpha$ ，把小球面近似地看成小平面计算，结果是用小平面计算时

$$\Omega_1 = 4\pi \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

用小平面计算时

$$\Omega_2 = \pi \tan^2 \alpha$$

当满足小角度近似时， $\Omega_2 \approx \Omega_1 \approx \pi\alpha^2$ 。如果 Ω_2 和 Ω_1 的相对误差为

$$\frac{\Omega_2 - \Omega_1}{\Omega_1} = 1.1\%$$

此时，相应于 $\alpha = 7^\circ$ ，即在 α 小于 7° 时可用平面代替球面计算立体角而误差小于1%。

如果要计算一个球台侧面所对的立体角，如图2-4所示，球台的侧面积可用两个球冠的面积差来表示

$$\begin{aligned} S &= S_2 - S_1 = 2\pi r \cdot EG - 2\pi r \cdot FG \\ &= 2\pi r^2 (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \end{aligned}$$

所以，球台侧面积所对应的立体角为

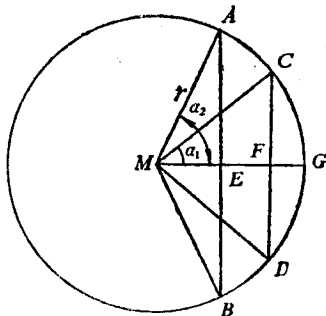


图2-4 球台侧面所对的立体角

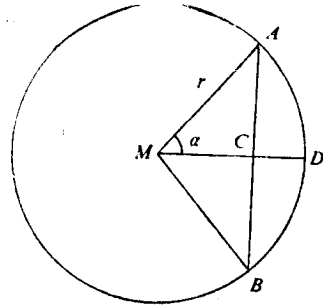


图2-3 球冠所对的立体角

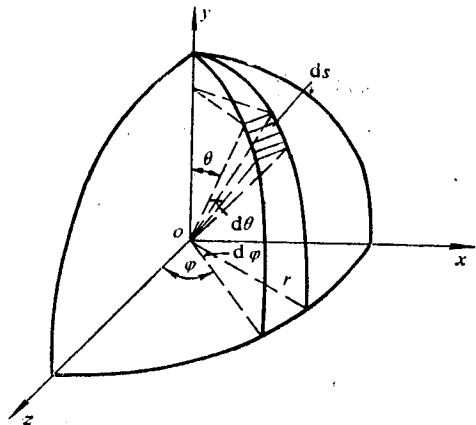


图2-5 用球坐标计算立体角

$$\begin{aligned}\Omega &= \frac{2\pi r^2}{r^2} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \\ &= 2\pi(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)\end{aligned}\quad (2-3)$$

一个半径为 r 的球面的面积为 $4\pi r^2$ ，则由单位立体角的定义，可知整个空间的立体角为 4π ，即

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$$

在高等数学中，用球坐标计算立体角，如图2-5所示。我们在球面上取一微小面积 dS ，由于它很小，可以把 dS 看成是一个矩形。它的面积可以用长宽相乘来表示，按图所示，得

$$dS = r^2 \sin\theta d\theta d\varphi$$

则 dS 所对应的立体角为

$$d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (2-4)$$

如果计算整个空间的立体角，可作如下积分

$$\begin{aligned}\Omega &= \int d\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin\theta d\theta \\ &= 4\pi\end{aligned}$$

这与前面给出的结果相同。

在光度与辐射度的计算中，遇到立体角时，虽然立体角本身是无量纲的，但为了表达其物理意义，又必须把它的单位写进去。

§ 2.3 辐射量

2.3.1 辐射能

所谓辐射能，就是以电磁波的形式发射、传输或接收的能量，用 Q 表示。当辐射能被物质吸收时，可以转换成其他形式的能量，如热能、电能等。辐射能的单位是 J 。

辐射场内单位体积中的辐射能称为辐射能密度，用 u 表示

$$u = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (2-5)$$

u 的单位是 J/m^3

2.3.2 辐射通量

在单位时间内通过某一面积的辐射能，称为经过该面积的辐射通量。辐射通量也称为辐射通量，用 ϕ 表示。辐射通量与辐射功率 P 混用。辐射通量的大小就是辐射能随时间的变化率，即以辐射形式发射，传输或接收的功率或辐射能流

$$\phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2-6)$$

ϕ 的单位是 W 。

2.3.3 辐射强度

点辐射源在某一方向上的辐射强度是指辐射源在包含该方向的单位立体角内所发出的辐射通量，用 I 表示。

辐射强度是描述点源特性的辐射量，如图2-6所示。

若一个点源在围绕某指定方向的小立体角 $\Delta\Omega$ 内发射的辐射通量为 $\Delta\Phi$ ，则 $\Delta\Phi$ 与 $\Delta\Omega$ 之比的极限，就是辐射源在该方向上的辐射强度 I ，即

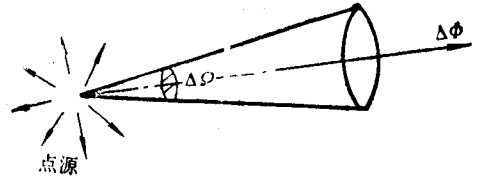


图2-6 辐射强度的定义

$$I = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} = \frac{\partial\Phi}{\partial\Omega} \quad (2-7)$$

辐射强度在数值上就等于点源在单位立体角内发射的辐射通量。因此，它是辐射源所发射的辐射通量在空间分布特性的描述。或者说，它是辐射通量在某方向上的角密度的度量。按定义，它的单位是W/sr。

辐射强度对整个发射立体角(Ω)的积分，就可给出辐射源发射的总辐射通量 Φ ，即

$$\Phi = \int_{\Omega} I d\Omega \quad (2-8)$$

对于各向同性的辐射源， I 等于常数，则由(2-8)式，得 $\Phi = 4\pi I$ 。对于辐射通量在空间分布不均匀的辐射源，一般说来，辐射强度与方向有关，计算起来也比较繁琐。

在实际情况下，能否把辐射源看成是点源，主要是由测试精度要求决定的。最重要的问题并不是辐射源的物理尺寸，而是它对探测器(或观测者的眼睛)的张角。例如，距地面遥远的一颗星星，它的真实物理尺寸可能是很大的，但是我们可以把它看作点源。在不同的场合，同一辐射源，既可以是点源，也可以是扩展源。例如，喷气式飞机的尾喷口，在1km以外的距离观测，可以作为点源处理，而在3m的距离观测，就表现为一个扩展源。一般地说，把比辐射源的最大尺寸大10倍的距离上的辐射源作为一个点源，那也是指辐射计只是一个不带光学系统的简单探测器。如果辐射计用了光学系统，基本的判断标准是探测器的尺寸和辐射源像的尺寸之间的关系：如果像比探测器小，辐射源可以认为是一个点源；如果像比探测器大，则辐射源可认为是一个扩展源。理想的点辐射源在物理上是不存在的。

2.3.4 辐射出射度

对于面源，辐射源单位表面积向半球空间(2π sr立体角)内发射的辐射通量，称为辐射出射度。辐射出射度也简称为辐出度，用 M 表示。

若面积为 A 的面源上围绕 x 点的一个小面元 ΔA ，向半球空间内发射的辐射通量为 $\Delta\Phi$ ，则 $\Delta\Phi$ 与 ΔA 之比的极限值，就是该面源在 x 点的辐射出射度，即

$$M = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta A} = \frac{\partial\Phi}{\partial A} \quad (2-9)$$

辐射出射度是描述面源辐射特性的量，因此，又称为辐射通量密度。在数值上，就是面源在单位面积上向半球空间发射的辐射通量，所以，辐射出射度的单位是W/m²。

对于发射不均匀的辐射源表面，面上各点附近将有不同的辐射出射度。所以，一般地说，辐射出射度 M 是源面上位置 x 的函数。辐射出射度对源发射表面的积分，给出辐射源发射的总辐射通量，即

$$\Phi = \int_A M dA \quad (2-10)$$