

红外物理学

陈 衡 编著

国防工业出版社

红外物理学

陈 衡 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书以红外辐射与物质相互作用的基本原理为贯穿始终的主线，系统地讨论了红外辐射度量、红外辐射的发射与吸收、红外辐射的传输与探测等过程中的基本物理现象与概念，基本的物理模型、机理和规律。也以一定的篇幅讨论了某些在红外物理与技术研究中占重要地位的实验测量原理与方法。

本书的主要读者对象是红外物理与技术领域的科技工作者和高等院校教师，也可供从事空间技术，能源科学与环境科学等领域的科技工作者参考，或者作为上述有关专业的研究生与高年级大学生的专业教学参考书。

红 外 物 理 学

陈 衡 编著

责任编辑：刘树兰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张28¹/₄ 654千字

1985年10月第一版 1985年10月第一次印刷 印数：0,001—2,630册

统一书号：15034·2892 定价：5.75元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

自从 1800 年英国天文学家威·赫谢耳 (W·Herschel) 发现红外线以来, 至本世纪六十年代, 红外科学在军事技术、空间技术、环境科学、能源科学、激光技术、天文学、工农业生产、生理医学和基础科学研究等许多领域中, 都得到了日益广泛的应用。并且, 作为红外技术的物理学原理和理论基础, 逐步形成了新兴的学科分支——红外物理学 (INFRARED PHYSICS)。为了适应红外科学的迅速发展和有关专业人才培养的需要, 我们把近十年来在河北大学讲授红外物理学的教材, 经过重新修改和补充, 以科技书和教学参考书的形式出版。

红外物理学是一门新兴的技术物理学。它与理论体系业已完善化的其它物理学分支相比, 突出的特点是: 涉及面广, 实用性强, 理论框架尚未成熟和完善化。因此, 欲对这样的学科进行高度概括, 并写好这样一本书, 普遍感到十分困难。为了突破这一困境, 我们通过长期教学实践和研究探索, 认为只有以红外辐射与物质相互作用的基本原理作为贯穿始终的主线, 才能够把红外物理学所涉及的全部内容 (即红外辐射的发射、吸收、传输与探测过程中的基本现象、机理和规律, 以及红外辐射度量学等) 有机地联系起来, 建立一套较完整的理论体系。这就是我们这本书的主导思想和基本特点。但是, 考虑到更广泛的读者需要, 尤其从事实际红外技术应用研究的广大科技工作者的需要, 我们在内容取舍上, 尽可能注意到理论基础的实用性。换言之, 我们除着重把各种红外现象的物理概念和理论模型分析清楚以外, 没有过多地把精力花费在许多繁琐的公式推导上去, 以避免把读者引向冗长的数学演绎。但是, 为了弥补由此而产生的不足, 我们在有关内容的讨论中, 都在书的最后提供了主要的参考文献, 供感兴趣的读者深入研究。

如前所述, 本书是作为科技书和教学参考书出版的, 而不是一部统编的标准专业教材。而且, 由于不同院校的专业方向和教学计划各不相同, 不可能也不应该按照一个模式, 写一本人人感到恰到好处的专业教材。出于上述考虑, 本书中安排了许多已超出大学本科教学基本要求的内容。这些内容主要供从事有关专业研究工作的科技工作者、大学教师和研究生参考, 或者作为本科教学的课外阅读内容。如果将本书作为教材使用, 则希望各院校根据自己的专业方向和教学计划, 作相应的取舍, 并可在 50~120 学时之间进行安排。

本书在修改定稿过程中, 曾收到国内在红外领域里从事不同工作的许多专家和朋友的来信, 提出对本书的要求、建议和鼓励。尤其中国科学院上海技术物理研究所所长汤定元教授、电子工业部华北光电技术研究所林钧挺副总工程师、西北电讯工程学院技术物理系主任方湖宝副教授、清华大学无线电电子学系副主任张克潜副教授给予了热情的支持。我周围的同事们替我做了很多工作, 并对书中内容进行了广泛的讨论, 在此一并表示衷心感谢。

由于本人学识浅薄, 水平有限, 书中缺点和错误在所难免, 诚恳地希望读者批评指正。

作者 1984 年 3 月于河北大学

目 录

第一篇 红外物理学概论和辐射度量	1
第一章 红外物理学的研究对象	2
§ 1.1 红外线的基本知识	2
§ 1.2 红外物理学的研究对象和理论方法	3
第二章 红外辐射度学基础	5
§ 2.1 引言	5
§ 2.2 基本辐射量和光谱辐射量	6
2.2.1 基本辐射量	7
2.2.2 光谱辐射量和光子辐射量	10
§ 2.3 朗伯余弦定律和漫辐射源的辐射特性	11
2.3.1 朗伯余弦定律	12
2.3.2 漫辐射源的辐射特性	12
§ 2.4 辐射量计算举例	14
§ 2.5 辐射在传输媒质中的衰减	16
2.5.1 反射比、吸收比和透射比	17
2.5.2 容易混淆的几个概念 吸收系数	18
2.5.3 散射系数和衰减系数	20
2.5.4 衰减媒质的透射	21
2.5.5 考虑媒质衰减时的辐射计算	22
第三章 红外辐射测量原理	23
§ 3.1 红外辐射计	23
3.1.1 红外辐射计的基本组件和功能	24
3.1.2 红外辐射计的选择和设计考虑	25
§ 3.2 红外辐射计的定标原理	26
3.2.1 响应度定标	26
3.2.2 实际瞬时视场	33
3.2.3 频率响应	34
3.2.4 光谱响应	35
3.2.5 噪声水平	35
§ 3.3 测量及其结果的处理	36
3.3.1 峰值标准化	37
3.3.2 峰值标准化举例	39
3.3.3 其它标准化方法	41
§ 3.4 测量结果的描述	42
3.4.1 背景辐射的非统计描述	43
3.4.2 背景辐射的统计描述	45
第二篇 红外辐射的发射与吸收	50
第四章 红外热辐射与连续谱红外源	51
§ 4.1 辐射起源的经典物理模型	51
4.1.1 自由电子模型	51
4.1.2 谐振子模型	52

4.1.3	阻尼振子模型	52
4.1.4	振子耦合与辐射连续区的形成	54
§ 4.2	黑体热辐射的基本规律	55
4.2.1	基尔霍夫定律和黑体模型	56
4.2.2	黑体辐射的量子模型和普朗克辐射定律	57
4.2.3	维恩位移定律	61
4.2.4	斯蒂芬-玻耳兹曼定律	62
§ 4.3	黑体辐射的简易计算方法	62
4.3.1	黑体辐射函数表	62
4.3.2	近似公式计算法	63
4.3.3	其它简易计算法	64
§ 4.4	黑体辐射定律的推论	68
4.4.1	辐射的光谱效率和工程最佳值	69
4.4.2	辐射对比度	69
§ 4.5	发射率和实际物体的热辐射	71
4.5.1	发射率的定义和实际物体的热辐射	71
4.5.2	影响发射比的因素	73
4.5.3	半透明体的热辐射性质	76
4.5.4	发射比与材料光学及电学参数的关系	80
4.5.5	非均匀涂层的辐射特性	83
§ 4.6	辐射热传递的基本原理	88
4.6.1	两个物体间的直接辐射传递	88
4.6.2	亥姆霍茨互易性定理	90
4.6.3	辐射热传递的一般分析	91
§ 4.7	典型热辐射红外源	91
4.7.1	腔型黑体辐射源	92
4.7.2	目标和背景的辐射	99
第五章	不连续谱红外辐射	105
§ 5.1	分子结构和内部运动	105
5.1.1	分子的结构键合	105
5.1.2	分子的内部运动及其能量	106
§ 5.2	分子光谱的形成	107
5.2.1	分子的能级和带状谱的形成	107
5.2.2	分子的红外光谱及其产生条件	108
§ 5.3	双原子分子的红外光谱	110
5.3.1	双原子分子的转动光谱	110
5.3.2	双原子分子的振动光谱	112
5.3.3	双原子分子的振动-转动光谱	114
5.3.4	吸收带的外形和强度分布	117
§ 5.4	多原子分子的红外光谱	118
5.4.1	多原子分子的转动光谱	118
5.4.2	多原子分子的振动光谱	120
5.4.3	多原子分子的振动-转动光谱	123
§ 5.5	光谱线的展宽和线型	127
5.5.1	谱线的自然宽度	127
5.5.2	压力展宽	130
5.5.3	多普勒展宽	132
5.5.4	两种线型展宽的比较	134

§ 5.6	固体中的结构键合与能态	135
5.6.1	固体的结构键合	135
5.6.2	固体中电子的能带和运动	135
5.6.3	固体中电子的能量分布	136
5.6.4	晶格振动和能量交换	137
§ 5.7	固体红外光谱的一般特征	137
5.7.1	从气态到固态时的光谱变化	137
5.7.2	固体光谱的其它特征	138
§ 5.8	固体中的本征吸收带和晶格振动吸收带	139
§ 5.9	局部态间跃迁产生的红外光谱	140
5.9.1	晶场光谱	141
5.9.2	激子光谱	142
5.9.3	色心吸收	143
§ 5.10	半导体的复合辐射与吸收光谱	144
5.10.1	带际跃迁吸收	144
5.10.2	复合辐射	148
5.10.3	杂质参与的吸收和发射	149
5.10.4	自由载流子吸收	151
第六章	强相干红外辐射的产生与远红外谱的开拓	152
§ 6.1	引言	152
§ 6.2	光学混频产生的红外辐射	154
6.2.1	非线性光学效应的基本原理	154
6.2.2	差频混频产生的红外辐射	155
6.2.3	相位匹配问题	158
6.2.4	非线性晶体和激光源的选择	162
§ 6.3	红外参量振荡器	162
6.3.1	参量增益和阈值泵浦条件	163
6.3.2	参量转换效率	167
6.3.3	参量振荡器的输出和光谱性质	168
§ 6.4	通过拉曼过程产生的红外辐射	170
6.4.1	自发拉曼散射和斯托克斯光发射	170
6.4.2	受激拉曼散射产生的红外辐射	171
6.4.3	通过拉曼过程的四波混频产生的红外辐射	174
6.4.4	通过自旋反转拉曼混频产生的红外辐射	177
§ 6.5	光泵气体激光器	179
6.5.1	光泵气体激光器的一般原理	179
6.5.2	基于电子跃迁的光泵气体激光器	181
6.5.3	基于振动-转动跃迁的光泵激光器	182
6.5.4	基于纯转动跃迁或反演跃迁的光泵激光器	184
6.5.5	光泵远红外激光器性能的理论分析	185
第七章	材料基本辐射参数的测量	188
§ 7.1	红外光谱测量的基本设备	188
7.1.1	单色仪	188
7.1.2	色散型红外分光光度计	189
7.1.3	傅里叶变换红外光谱仪	190
§ 7.2	红外发射比测量	192
7.2.1	测量红外发射比的意义和注意事项	192
7.2.2	半球全发射比测量	194

7.2.3	法向全发射比测量	197
7.2.4	法向光谱发射比测量	199
7.2.5	宽带发射比测量	204
7.2.6	地物发射比的野外测量	206
§ 7.3	红外反射比测量	208
7.3.1	反射度学的基本概念	208
7.3.2	积分球反射计	211
7.3.3	热腔反射计	215
7.3.4	半球镜反射计	216
7.3.5	椭球镜和抛物镜反射计	218
7.3.6	镜向反射比测量	221
7.3.7	地物反射比的野外测量	222
§ 7.4	红外吸收和透射测量	223
第三篇	红外辐射的传输	225
第八章	红外辐射在大气中的传输	226
§ 8.1	大气效应及其对辐射传输的影响	226
§ 8.2	地球大气层的结构和性质	229
8.2.1	大气组成及其分布	229
8.2.2	大气的温度和压强分布	235
8.2.3	模型大气	237
8.2.4	大气的辐射透射特性	239
§ 8.3	大气的吸收衰减	239
8.3.1	大气组分红外吸收光谱及其特征	239
8.3.2	分子吸收的逐线计算法	241
8.3.3	分子吸收的带模型计算法	245
8.3.4	大气窗口区的连续吸收和气溶胶吸收	251
§ 8.4	大气的散射衰减	257
8.4.1	散射系数	258
8.4.2	大气散射系数的经验计算法	261
8.4.3	云雾雨雪的散射与衰减	262
§ 8.5	大气传输的实验测量方法	264
8.5.1	野外测量	264
8.5.2	实验室模拟测量	266
§ 8.6	辐射在湍流大气中的传输	267
8.6.1	大气闪烁及其对红外系统性能的影响	268
8.6.2	湍流引起的光束方向、相位和偏振抖动	269
§ 8.7	激光辐射在大气中的传输	271
8.7.1	线性传输效应	271
8.7.2	非线性传输效应——热晕	279
第九章	红外辐射在凝聚态媒质中的传输	281
§ 9.1	红外光学材料的性能要求	281
9.1.1	红外光学材料性能的一般要求	281
9.1.2	典型红外透射材料性能	283
9.1.3	专用红外材料的选择	289
§ 9.2	均匀媒质中辐射传输的普遍电磁理论	290
9.2.1	辐射在自由空间和均匀电介质中的传播	291
9.2.2	辐射在无限均匀导电媒质中的传播	293
§ 9.3	不连续媒质界面上的辐射传输理论	296

9.3.1	反射、折射和斯涅耳定律	296
9.3.2	两种电介质界面上的反射和菲涅耳定律	297
9.3.3	空气-导电媒质界面上的反射	299
§ 9.4	高反射膜的物理基础	301
9.4.1	金属高反射膜	309
9.4.2	介质-金属高反射膜	301
9.4.3	多层全介质高反射膜	302
§ 9.5	增透膜的物理基础	303
9.5.1	单层增透膜	303
9.5.2	双层和多层增透膜	305
§ 9.6	分色滤光片的物理基础	309
§ 9.7	红外辐射在透射材料中的衰减	311
9.7.1	固态红外透射材料中的吸收衰减	312
9.7.2	红外透射区中的散射衰减	316
§ 9.8	色散理论	318
9.8.1	电介质的色散理论	318
9.8.2	自由载流子引起的色散	321
9.8.3	克喇末-克朗尼格关系和光学参数的内在联系	323
第四篇	红外探测的物理基础	327
第十章	红外探测器概论	328
§ 10.1	红外探测器的分类和基本原理	328
10.1.1	热探测器	328
10.1.2	光子探测器	329
10.1.3	成像探测器	332
§ 10.2	探测器参数和性能指标	335
10.2.1	测量与使用条件参数	335
10.2.2	探测器的性能指标	340
§ 10.3	探测器参数测量	344
10.3.1	响应特性的测量	344
10.3.2	噪声特性的测量	347
10.3.3	时间常数测量	348
§ 10.4	特定条件下的响应度和 D^* 计算	349
第十一章	理想光子探测器	351
§ 11.1	载流子在偏置电场和磁场中的运动	351
11.1.1	平衡状态下的载流子浓度分布	351
11.1.2	非平衡载流子的产生与复合	354
11.1.3	载流子在外加电场和磁场中的运动	357
§ 11.2	光电导效应和光电导探测器	360
11.2.1	本征光电导	360
11.2.2	杂质光电导	366
§ 11.3	光磁电效应和光磁电探测器	368
§ 11.4	光伏效应和光伏探测器	371
§ 11.5	理想光子探测器的限制性噪声和性能极限	375
11.5.1	光电事件的随机分布和探测噪声	375
11.5.2	背景限光子探测器性能	376
11.5.3	信号噪声限光子探测器性能	379
§ 11.6	理想光子探测器的外差探测性能	379

11.6.1	外差转换和噪声	379
11.6.2	天线定理	381
11.6.3	混频定理	383
第十二章 理想热探测器		386
§ 12.1	电阻测辐射热器	386
§ 12.2	测辐射温差电偶和热电堆	389
§ 12.3	热释电探测器	393
12.3.1	热释电效应和热释电探测器	394
12.3.2	热释电探测器的响应特性	394
§ 12.4	理想热探测器的性能极限	398
12.4.1	热探测器自身温度起伏决定的性能	398
12.4.2	背景辐射决定的热探测器性能极限	399
第十三章 实际红外探测器的噪声和性能限制		405
§ 13.1	实际红外探测器的限制性噪声机构	405
13.1.1	热噪声	405
13.1.2	电流噪声或 $1/f$ 噪声	406
13.1.3	产生-复合 ($g-r$) 噪声	407
13.1.4	散粒噪声	410
13.1.5	温度噪声	412
13.1.6	介质损耗噪声	414
§ 13.2	不同噪声限的探测器性能	416
13.2.1	光电导探测器性能	416
13.2.2	光伏探测器性能	418
13.2.3	测辐射热敏电阻性能	420
13.2.4	热释电探测器性能	421
§ 13.3	放大器噪声及其对探测器性能的影响	425
§ 13.4	噪声与探测的统计学	427
13.4.1	噪声的统计学	427
13.4.2	探测的统计学	429
主要参考文献		432

第一篇 红外物理学概论和辐射度量

什么是红外？什么是红外物理学？这是首先应该了解的问题。其次，在红外物理学研究中，总不可避免地要涉及红外辐射的度量。与此有关的基本概念和原理，就是本篇的中心课题。

第一章 红外物理学的研究对象

§ 1.1 红外线的基本知识

1800年,英国天文学家威·赫谢耳(W. Herschel)为了寻找观察太阳时保护眼睛的方法,研究了太阳光谱各部分的热效应。当他把灵敏的水银温度计放在被棱镜色散的太阳光谱的不同部分时,发现产生热效应最大的位置是在可见光谱的红端以外,从而首先发现了太阳光谱中还包含看不见的辐射能。当时他称这种辐射能为“看不见的光线”,后来称为红外线,简称红外。

现已周知,红外线也是一种电磁波。在电磁波谱中,它是比微波波长还短、比可见光波长还长的电磁波。因此,红外线与其它波长的电磁波具有共同的特征:都以横波的形式在空间传播,它们在真空中都有相同的传播速度:

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

式中 $c = (2.9979250 \pm 0.000003) \times 10^{10}$ 厘米/秒 $\approx 3 \times 10^8$ 米/秒 为真空中的光速, λ 为波长, ν 为频率。通常认为,红外线在电磁波谱中所占波长范围是在 $\lambda = 0.75 \sim 1000$ 微米 (= 1 毫米) 之间。因此,红外线所占的频率范围是在 $\nu = 3 \times 10^{11} \sim 4 \times 10^{14}$ 赫之间。

在红外光谱学中,除了使用波长 λ 或频率 ν 等基本参数来表征红外辐射以外,还经常使用波数 $\tilde{\nu}$ 。如果频率为 ν 的红外辐射在真空中的波长用厘米表示,则波长的倒数就是波数 $\tilde{\nu}$ 的数值:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda (\text{厘米})} = \frac{10^4}{\lambda (\text{微米})} \quad (1-2)$$

波数的单位是[厘米⁻¹],它表明在真空中1厘米路程中包含波的数目。利用式(1-1)不难得到波数 $\tilde{\nu}$ 与频率 ν 的关系为

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{c} \nu \quad (1-3)$$

可见波数 $\tilde{\nu}$ 与频率 ν 成正比。因此,波数的大小同样可以反映频率的高低。在光谱学中,常把波数 $\tilde{\nu}$ 称为“频率”。但是,应该特别注意,在如此使用频率一词时,不要把它与真正的频率 ν 混淆,后者应该等于 $c\tilde{\nu}$ 。从红外线的波长和频率范围,不难知道红外波段的波数范围是在 $\tilde{\nu} = 10 \sim 1.3 \times 10^4$ (厘米)⁻¹ 之间。

由于电磁辐射具有波动性和量子性这双重属性,所以红外辐射除了作为一种电磁波而遵从上述的波动规律以外,它还以红外光量子的形式存在,并同样简称光子。因为光子的能量值 $E = h\nu = hc\tilde{\nu}$, 式中 $h = (6.6256 \pm 0.0005) \times 10^{-34}$ 瓦·秒² 或焦耳·秒是普朗克(Planck)常数,所以,红外波段的光子能量范围在 $1.24 \times 10^{-3} \sim 1.65$ 电子伏之间。

在电磁波谱中,实验上有意义的频率(或波长)范围包括20个数量级以上。为方便起见,常用倍频程等级表征所研究的频率或波长范围。例如,波长在 $0.38 \sim 0.75$ 微米之间的可见光谱只跨过一个倍频程,而红外波段却跨过大约10个倍频程。因此,无论从科学研究还是从技术应用的角度来看,红外光谱区比可见光谱区将有更丰富的内容和更大

的发展潜力。

在不同的研究领域和技术应用中，往往根据红外辐射的产生机理与方法、传输特性和探测方法的不同，又把整个红外光谱区划分为几个波段。虽然划分的方法至今并不完全统一，但大体上可用表 1-1 来概括。今后，随着红外科学发展水平的逐渐提高以及应用的不断推广，也可能会出现更细致、更合理的分段方法。

表1-1 在不同研究领域中红外光谱区划分的几个波段 (微米)

适用的研究和应用领域	近 红 外	中 红 外	远 红 外	极远红外
军事、空间和大多数工业应用	0.75~3.0	3.0~6.0	6.0~15.0	15.0~1000
红外烘烤加热技术	0.75~1.4	1.4~3.0	3.0~1000	
红外光谱学研究	0.75~2.5	2.5~25	25~1000	

§ 1.2 红外物理学的研究对象和理论方法

自从1800年威·赫谢耳发现红外线以后，红外科学经历了一个漫长的不平坦的道路。首先，随着整个物理学的发展，人们花了一百多年的时间去认识红外辐射的本质和建立基本的辐射定律，为红外科学奠定了理论基础。其次，随着红外辐射源、红外辐射探测技术及红外光谱学的研究进展和应用，在1961年，以国际性学术刊物“*Infrared Physics*”（《红外物理学》）的创刊为标志，红外物理学才作为一门分支学科正式形成。

为了说明红外物理学的研究对象，我们首先分析一个典型的红外系统。如图 1-1 所示，任何一个典型的实用红外系统，总是把来自目标或辐射源的红外辐射，经大气传输后，被适当的光学系统接收、调制并聚焦到红外探测器响应平面上，在此通常把输入的红外辐射信号转变为电输出信号，再经放大和信息处理，最后在显示系统中显示出来，或驱动执行机构工作。

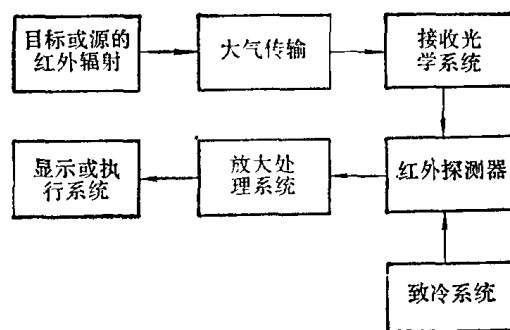


图1-1 典型红外系统的组成和原理图

从图 1-1 看出，研制一个红外系统，除了工程问题以外，遇到的主要物理问题就是根据目标或辐射源的特征或状态，估计它发射的红外辐射特性，分析计算该辐射在传输过程中被媒质（大气及光学材料）吸收、散射所造成的衰减，传输过程中的调制现象以及探测器中发生的信号转换过程与特性。总而言之，就是红外辐射与物质的相互作用。

根据上述分析和其它基础研究工作，我们可以说，红外物理学是现代物理学的一个分支，它是以电磁波谱中的红外辐射为特定的对象，研究红外辐射与物质之间相互作用的学科。具体讲，就是运用物理学的理论和方法，研究与分析红外辐射的产生、各种物质的红外辐射特性、红外辐射的传输与探测过程中的现象、机理、特性和规律，从而为红外辐射的技术应用，探索新的原理、新的材料、新型器件和开拓新的波谱区，提供理论基础和实验依据。

到目前为止，红外在现代军事技术、工农业生产、空间技术、资源勘测、气象预报和环境科学等许多领域中的应用日益增多。例如，应用红外技术的夜视、摄影、通信、搜

索、跟踪、制导、火控、热成象和前视、目标侦察和伪装探测等，不仅保密性好，抗电子干扰性强，而且分辨率高，准确可靠，大大提高了军队装备的现代化水平。利用红外遥感技术进行地球资源勘测、海洋研究、气象观测、大气研究和污染监视，覆盖面积大，不受地理位置和条件限制，获得信息迅速、丰富，并可及时掌握动态变化。在工农业生产中广泛使用的红外辐射测温、无损检测、成分分析与流程控制、辐射加热技术等，也都显示出红外技术的独特优点。

如果说现代光学技术、电子技术和精密机械技术为现代红外技术提供了必要的技术基础，那末，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，对地球大气层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。

除上面所述，红外物理学与物理学、化学、生物学、天文学和地学等基础学科，也有着密切联系和相辅相成的关系。因此可以说，红外物理学是物理学中一个重要的新兴科学分支。

为了帮助初学者学习和研究好红外物理学，我们以为，除了应该强调实践第一的观点以外，还必须遵循正确的理论方法。

我们知道，在红外以及其它光谱区，辐射的产生、传输和探测过程的基础是辐射与物质之间的相互作用。因此，在研究红外辐射的起源和特性，红外辐射在媒质中传播时所发生的反射、折射、色散、散射和偏振等现象，以及研究作为产生辐射的逆过程和衰减机构与探测依据的吸收过程时，必然要涉及与辐射发生相互作用的物质材料的结构模型和内部运动状态。例如，在经典理论范围内，全部红外光学现象都是以辐射电磁场与组成物质的电荷之间的相互作用为基础的。组成物质的电荷结构与运动状态的不同——自由的还是受到束缚的，彼此孤立的还是相互耦合的结构键，不仅决定着物质本身的特性（如电导率、介电常数和磁导率等），而且还决定着与红外辐射能够发生什么样的相互作用（如发射与吸收谱的类型；产生光电导、光生伏特、热释电等不同的效应），这种相互作用发生在什么频率范围（如发射与吸收等相互作用的选择性），以及相互作用的强弱程度等。由此可见，物质的内部结构和运动状态，对于红外辐射与物质相互作用有着决定性的影响。因此，学习和研究红外物理学，必须从物质的结构模型入手，研究不同结构的物质和它们具有的各种可能运动状态。根据运动状态之间的可能变化所进行的能量转换过程，提出红外辐射与物质相互作用的物理模型。最后找出相互作用的普遍规律，以公式化的形式给出这种相互作用的数学模型。这就是研究红外物理学的理论方法。因此，本书自始至终以红外辐射与物质相互作用为基本线索，从物质的结构模型和运动状态，讨论相互作用过程的物理模型，直至得到能够描述普遍规律并能用来指导红外科学实践的数学模型。这也就是本书采用的处理方法。

第二章 红外辐射度学基础

红外辐射度学是红外物理学的基础内容之一。本章着重讨论红外物理学研究中经常遇到的各种辐射量的基本概念、严格的定义、彼此之间的相互关系和理论计算方法。至于有关辐射量的实验测量，留在第三章系统讨论。

§ 2.1 引言

研究红外辐射的产生、传输和探测等红外辐射与物质的相互作用现象时，不可避免地要涉及许多辐射量的概念和度量。红外辐射度学就是研究红外辐射转换的各种物理量的基本概念、理论分析和测量技术。具体内容主要包括：

- (1) 各种红外辐射量的概念、定义和相互关系的讨论，实际问题中辐射量计算方法的研究；
- (2) 辐射量的测量方法和有关仪器的研究；
- (3) 辐射测量中标准源的研究；
- (4) 辐射测量中探测器件的研究；
- (5) 红外辐射热传递和辐射热转换的研究。

本世纪六十年代以来，随着红外物理与技术的迅速发展和广泛应用，红外辐射度学有了较大的进展。但是，进一步改进与红外物理和技术研究相联系的大量辐射测量问题，仍是红外辐射度学今后的重要发展方向。

本章只着重讨论红外辐射度学上述内容中的第一项，其余内容将融合到本书后面的有关章节中讨论。

众所周知，标志一个可见光源（如照明灯泡）发射性能的重要指标是它发射的光通量（单位为〔流明〕），或发光强度（单位为〔烛光〕）等。而对于一个被光照射的物体表面来讲，表征其接受光照强弱的指标是照度（单位为〔勒克司〕）。所有这些都是光度学的概念和度量方法。我们知道，光度学是以人们的眼睛对入射辐射刺激所产生的视觉为基础的，因此，光度学的方法不是客观的物理学描述方法。例如，设想对三个辐射源作比较。假定其中一个源只发射绿色光，一个只发射红色光，另一个只发射红外线，除此之外，三者的其余特性（如外形尺寸和发射的电磁辐射功率等）均相同。那末，光度学给出的描述结果是：绿色源的发光强度最大（或最亮），红色次之，而红外源的发光强度（烛光数）等于零。这是因为人们视觉对绿色辐射最敏感，红色辐射次之，而对红外辐射没有视觉能力的缘故。因此，光度学的方法只适用于整个电磁波谱中很窄的（可见光）那部分区域。对于电磁波谱中广泛的不可见辐射，如红外辐射、紫外线、X射线等，就必须采用辐射度学的概念和度量方法。辐射度学是建立在物理测量系统基础上的辐射能的客观度量，它不受人们主观视觉的限制。因此，辐射度学的概念和方法，适用于整个电磁波谱范围。

在国内红外物理与技术文献中^[1~5]，各辐射量的术语名称存在着不同程度的混乱。在

本书中, 采用当前广为接受的术语名称、符号、意义和单位, 并统一列于表 2-1 中^[6]。在后面的讨论中, 再陆续给出它们的更严格的定义。

表2-1 常用辐射量的名称、符号、意义和单位

名称	符号	意义	定义式	单位 (SI)
辐射能	Q	以电磁波的形式发射、传递或接收的能量		[焦耳]
辐射能密度	w	辐射场单位体积中的辐射能	$w = \frac{\partial Q}{\partial V}$	[焦耳·米 ⁻³]
辐射功率	P	单位时间内发射、传输或接收的辐射能	$P = \frac{\partial Q}{\partial t}$	[瓦]
辐射度	M	源单位表面积向半球空间发射的辐射功率	$M = \frac{\partial P}{\partial A}$	[瓦·米 ⁻²]
辐射强度	I	点源向某方向单位立体角发射的辐射功率	$I = \frac{\partial P}{\partial \Omega}$	[瓦·球面度 ⁻¹]
辐亮度	L	扩展源在某方向上单位投影面积和单位立体角内发射的辐射功率	$L = \frac{\partial^2 P}{\partial A_0 \partial \Omega}$	[瓦·米 ⁻² ·球面度 ⁻¹]
辐照度	E	入射到单位接收表面积上的辐射功率	$E = \frac{\partial P}{\partial A}$	[瓦·米 ⁻²]
光谱辐射功率	P_λ	在指定波长 λ 处单位波长间隔的辐射功率	$P_\lambda = \frac{\partial P}{\partial \lambda}$	[瓦·微米 ⁻¹]
光谱辐射度	M_λ	在指定波长 λ 处单位波长间隔的辐射度	$M_\lambda = \frac{\partial M}{\partial \lambda}$	[瓦·米 ⁻² ·微米 ⁻¹]
光谱辐射强度	I_λ	在指定波长 λ 处单位波长间隔的辐射强度	$I_\lambda = \frac{\partial I}{\partial \lambda}$	[瓦·球面度 ⁻¹ ·微米 ⁻¹]
光谱辐亮度	L_λ	在指定波长 λ 处单位波长间隔的辐亮度	$L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$	[瓦·米 ⁻² ·球面度 ⁻¹ ·微米 ⁻¹]
光谱辐照度	E_λ	在指定波长 λ 处单位波长间隔的辐照度	$E_\lambda = \frac{\partial E}{\partial \lambda}$	[瓦·米 ⁻² ·微米 ⁻¹]
光子辐射度	M_q	源单位表面积每秒向半球空间发射的光子数	$M_q = \frac{M}{h\nu}$	[光子数·米 ⁻² ·秒 ⁻¹]
光谱光子辐射度	$M_{q\lambda}$	在指定波长 λ 处单位波长间隔的光子辐射度	$M_{q\lambda} = \frac{\partial M_q}{\partial \lambda}$	[光子数·米 ⁻² ·秒 ⁻¹ ·微米 ⁻¹]

§ 2.2 基本辐射量和光谱辐射量

通常, 把以电磁波的形式传播的能量称为辐射能, 用 Q 表示, 单位为 [焦耳]。辐射能既可表示在给定的时间间隔内由辐射源发射出去的全部电磁能量, 也可表示被阻挡物体表面 (如照相底片之类的累积型探测器) 所接收到的能量。但是, 在红外系统中使用的大多数探测器, 都不是累积型的, 即它们响应的不是传递的总能量, 而是辐射能传递的时间速率, 亦即辐射功率。因此, 辐射功率以及由它派生出来的几个辐射度学的物理量, 属于基本辐射量。它们的量值都可以使用专门的红外辐射计在离开辐射源一定距离上进行测量 (见第三章)。通常在进行辐射测量时, 来自源的辐射到达测量仪器的探测器之前, 受到插入媒质 (如大气和测量仪器的光学系统) 的衰减。为了首先弄清各辐射量的物理意义, 我们暂不考虑插入媒质造成的衰减, 在 2.5.5 节再对衰减的影响进行修正。