

# 激光与红外技术手册

国防工业出版社

# 激光与红外技术手册

杨臣华 梅遂生 林钧挺 主编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

激光与红外技术近二十年来发展迅速，在军事、工农业生产、医学和科学技术各领域得到越来越多的应用。

本手册主要介绍激光与红外技术的材料、元器件、单元技术和测量。全书分为基础、激光和红外三个部分。基础部分主要介绍辐射、大气传输和常用光学零件、系统和材料；激光部分侧重介绍固体激光器及其单元技术、材料和器件；红外部分主要介绍Ⅱ-Ⅶ族、Ⅲ-V族化合物、三元系合金和热电等材料及器件，以及红外系统等。

本手册可供有关科研、工程技术人员和技术管理干部使用，也可供高等学校教师和学员参考。

### 激光与红外技术手册

杨臣华 梅遂生 林钧挺 主编

责任编辑 刘树兰

国防工业出版社 出版、发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/16 印张70<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 插页2 1655千字

1990年5月第一版 1990年5月第一次印刷 印数：0,001—2,000册

ISBN 7-118-00063-9/TN12 定价：50.00元

科技新书目 215-043

## 序

六十年代以来，激光与红外技术的出现和兴起，标志着人类在掌握和利用光电子技术上进入了一个新的阶段。激光与红外技术将与计算机、光纤通信等技术成为当今世界新技术革命中一个重要的组成部分。

为了总结和系统介绍我国激光技术和红外技术的工作和成果，进一步促进我国激光和红外技术的发展，由我会组织了国内富有实践经验的专家和学者，在总结我国激光、红外主要科学技术成就的基础上，并吸收了国外的成熟经验，编写了这本实用性技术手册。经过多次讨论，认真审定，今天终于出版了。我们相信，本手册将会满足读者的要求，希望这部手册能成为大家身边有益的工具书。

最后，值此出版之际，我谨向各位主编、编写单位、全体编审同志和出版单位所付出的辛勤劳动深表谢意，对全国各有关单位所给予的大力支持表示衷心的感谢。

中国电子学会理事长 孙俊人

## 前 言

激光和红外技术是一个知识密集、渗透性强、增长速度快、发展潜力很大的学科。二十余年来，它们在军事和国民经济各领域得到越来越多的应用。为了总结和介绍我国激光和红外技术的工作和成果，推动和加速我国激光和红外技术的发展，我们组织编写了《激光与红外技术手册》。

本手册是供有关科研、工程技术人员、工人和技术管理干部使用的实用性手册，也可供大专院校有关专业的教师和学生参考。

本手册主要介绍激光和红外技术的材料、元器件、单元技术和参数测量。材料、器件以设计为主，着重介绍电、物理参数、性能和结构。整机应用技术未编入。有关材料、器件的制备工艺已在《电子工业生产技术手册》第一卷“激光与红外器件”篇中反映，这里不再赘述。

全书共二十五章，分基础、激光和红外三个部分。基础部分主要介绍辐射、大气传输、常用的光学零件、系统和材料；激光部分主要介绍各种激光器及其单元技术和材料，例如固体激光器及其工作物质、气体激光器、半导体激光器、染料激光器、光调制技术及其材料，非线性光学晶体及器件、谐振腔、激光探测器、光泵、电源和激光参数测量等；红外部分以Ⅱ-Ⅵ族、Ⅲ-V族化合物、三元系合金和热电等材料 and 器件为主，还包括红外摄像管、红外系统、红外材料及器件参数测量、制冷器、调制盘和红外探测器的偏置与放大等。

在编写中，内容力求全面，以实用为主；在表达上，尽量简明扼要，易于检索；常用材料、器件的性能数据力求齐全，公式、曲线、图表力求典型。取材来源于国内外有关专业手册、主要书刊；有些部分素材较多取材于国内科研与教学中的成果和实际使用的电路。对于某些正在发展中的材料和器件，如光学纤维和远红外器件也以一定篇幅作了介绍，集成光学未列入。

本手册由中国电子学会组织编写。由电子工业部11所、12所、55所、中国科学院半导体所、北京光电所和华中工学院与西北电讯工程学院等单位的40余位专家和富有实践工作经验的同志参加编写。

在编写过程中得到了中国科学院上海光机所、上海技术物理所、安徽光机所、上海硅酸盐所、北京物理所、兵器工业部211所、航天工业部8358所、上海新耀仪表厂、国家专利局、山东大学、浙江大学、吉林大学、天津大学、河北大学、北京大学、复旦大学、南开大学、中山大学、南京大学、北京工业学院、华中工学院、华东工程学院、西北电讯工程学院、长春光机学院、成都电讯工程学院、上海激光所和福建光学技术研究所、电子工业部27所等单位的大力支持和热情帮助，委托有关专家和专业人员担承本手册的审校工作，约请了很多同志对讨论稿提出了宝贵的意见，提供了有关的资料，在此敬致谢意。因参加本手册审阅的单位和同志很多，在此一并致谢，恕不一一署名。

由于激光、红外技术内容广泛，许多方面尚不成熟，有些材料、器件还未定型标准

化,测试方法也不统一,有关名词术语国内也尚未统一,有些正在起草国家标准,本手册使用的都经过多次征求意见,讨论后选定。有关单位符号均按国家标准GB3100~3102-82执行。由于编著者水平有限,谬误和不妥之处难免,请读者不吝指正。

主编：杨臣华、梅遂生、林钧挺

主编助理：王戎瑞、孙星南

编审人：

章次	编写人	审稿人
第一章	张德欣	陈衡
第二章	宋福山	宋正方
第三章	钱时恒、王京湧	顾培夫
第四章	赵祖德、赵秀丽	何国雄
第五章	虞孝舜、王戎瑞	何国雄
第六章	张世文、梁柱	李世忱
第七章	杜金波、李庆祥、施聿修 王俊民、王佩臣、梁作亮	李正佳、黄维玲 孙云龙
第八章	潘承志	杨正名、王宗进
第九章	杜宝勋	虞丽生
第十章	颜炳玉	杨香春
第十一章	杜金波、 <u>丁光昧</u>	初桂荫
第十二章	关长祥、张征祥、鲍永民	兰信钜
第十三章	冷长庚、姚广涛	梅克俊
第十四章	梅遂生、林钧跃	
第十五章	洪名家	费浩生
第十六章	吴锡培、邓世鹏	胡燮荣
第十七章	袁继俊、 <u>杨焕文</u>	周茂树
第十八章	陈世达	易新建
第十九章	田如钧、刘寓中	陈祖培
第二十章	何叔崑	罗正发、唐良晶
第二十一章	王文华	孔沐生、刘德俊
第二十二章	张国刚	叶虎年
第二十三章	李景据	尹达人、梁定发
第二十四章	刘贤德、刘德俊、杨宜禾、莘滇雄、孙星南	张德欣、莘滇雄
第二十五章	裴朝楨	陈衡

# 目 录

<b>第一章 热辐射</b> .....	1	2.2.1 大气透射率的理论基础 .....	45
1.1 黑体辐射的基本定律 .....	1	2.2.2 透射率的估算 .....	47
1.1.1 普朗克定律 .....	1	<b>2.3 湍流效应</b> .....	64
1.1.2 斯忒藩-玻耳兹曼定律 .....	1	2.3.1 大气折射率结构常数 .....	64
1.1.3 维恩位移定律 .....	2	2.3.2 闪烁 .....	67
1.1.4 用每秒光子数表示的光谱 辐射度 .....	2	2.3.3 光束漂移与像点抖动 .....	71
1.1.5 黑体辐射函数 .....	2	2.3.4 有限光束扩展 .....	75
1.1.6 辐射对比度 .....	3	2.3.5 外差效率 .....	76
1.2 黑体辐射曲线 .....	5	<b>2.4 折射效应</b> .....	77
1.3 黑体辐射数据表 .....	6	2.4.1 折射率 .....	77
1.4 辐射源的发射率 .....	11	2.4.2 角度修正 .....	78
1.4.1 发射率 .....	11	2.4.3 地平俯角与地平视程 .....	79
1.4.2 几种常见材料的发射率 .....	12	2.4.4 距离修正 .....	80
<b>1.5 辐射源</b> .....	21	<b>第三章 光学薄膜</b> .....	84
1.5.1 目标 .....	21	3.1 引言 .....	84
1.5.2 其他红外辐射源 .....	23	3.2 光学薄膜的分类 .....	84
1.5.3 黑体 .....	26	3.3 光学薄膜的计算 .....	84
1.5.4 太阳 .....	27	3.3.1 矢量作图法 .....	84
1.5.5 月亮 .....	28	3.3.2 导纳矩阵法 .....	88
1.5.6 恒星和行星 .....	29	3.3.3 计算膜系反射率 $R$ 的电子 计算机程序 (BCY 语言) .....	89
1.5.7 地球 .....	31	<b>3.4 常用光学材料及其特性</b> .....	91
1.5.8 人体和地面车辆 .....	32	<b>3.5 增透膜</b> .....	105
<b>1.6 背景辐射</b> .....	32	3.5.1 单层增透膜 .....	105
1.6.1 天空 .....	32	3.5.2 双层增透膜 .....	107
1.6.2 自然光照度等级汇总及其 时间变异 .....	35	3.5.3 三层增透膜 .....	109
1.6.3 海洋背景 .....	36	3.5.4 四层增透膜 .....	111
<b>第二章 大气传输</b> .....	38	<b>3.6 反光膜</b> .....	112
2.1 大气结构及物理性质 .....	38	3.6.1 金属反光膜 .....	112
2.1.1 标准大气模式 .....	38	3.6.2 多层介质反光膜 .....	113
2.1.2 气溶胶模式 .....	42	<b>3.7 分光膜</b> .....	121
2.1.3 大气成分 .....	44	3.7.1 强度分光膜 .....	121
2.2 大气透射率 .....	44	3.7.2 偏振分光膜 .....	124
		<b>3.8 滤光膜</b> .....	125
		3.8.1 带通滤光片 .....	125



3.8.2	截止滤光片	132	5.3.3	限制扫描效率的因素	203
3.8.3	常用14种激光多层介质膜的特性	145	5.4	偏振器	204
<b>第四章 光学系统</b>		149	5.4.1	偏振器的几个基本关系	201
4.1	符号、名称、单位以及符号规则	149	5.4.2	棱镜偏振器	205
4.1.1	符号、名称和单位	149	5.4.3	二向色性和衍射型偏振器	215
4.1.2	符号规则	149	5.4.4	斜入射的反射和透射偏振器	217
4.2	激光与红外光学系统的基本特点和主要选用原则	149	5.4.5	延迟板(波片)	223
4.2.1	基本特点	149	5.5	角反射器	226
4.2.2	选用原则	150	5.5.1	角反射器的反射特性	226
4.3	望远系统	150	5.5.2	影响角反射器定向反射能力的因素	227
4.3.1	望远系统的基本参数	151	5.5.3	角反射器的回波强度	229
4.3.2	望远系统在激光与红外技术中的应用	151	5.5.4	角反射器的有效孔径和有效反射面积	230
4.4	望远物镜	153	5.5.5	角反射器的有效反射率	230
4.4.1	折射式物镜	153	5.6	傅里叶变换透镜	231
4.4.2	反射式物镜	156	5.6.1	透镜的傅里叶变换特性	231
4.4.3	双反射镜物镜(系统)	158	5.6.2	傅里叶变换透镜的基本参数	232
4.4.4	折反射物镜	159	5.6.3	傅里叶变换透镜的消象差要求	232
4.4.5	某些光学系统象差弥散圆的快速算法	162	5.6.4	傅里叶变换透镜的基本类型	233
4.5	显微镜系统及其显微物镜	165	5.7	光学纤维	235
4.6	光学材料	167	5.7.1	光学纤维的结构形式	235
4.6.1	激光应用的光学玻璃	167	5.7.2	光学纤维的基本特性和参数	235
4.6.2	红外应用的光学材料	167	5.7.3	制备光学纤维的材料	242
4.7	计算实例	171	<b>第六章 光束、模式和光学谐振腔</b>		246
4.7.1	激光应用的光学系统实例	171	6.1	近轴光线	246
4.7.2	红外应用的光学系统实例	177	6.1.1	一般概念与射线矩阵	246
<b>第五章 光学元件</b>		193	6.1.2	几种基本光学系统的射线矩阵	247
5.1	引言	193	6.1.3	射线矩阵应用举例	249
5.2	探测器光学元件	193	6.2	高斯光束	250
5.2.1	场镜	193	6.2.1	高斯光束的一般理论	250
5.2.2	光锥	194	6.2.2	高斯光束变换	252
5.2.3	浸没透镜	195	6.2.3	高斯光束在特殊介质中的传播	254
5.3	扫描器	196	6.2.4	高斯光束模式	254
5.3.1	扫描器的种类及其性能比较	196	6.2.5	高斯光束的模式匹配	255
5.3.2	物方扫描和象方扫描	202	6.3	传播圆的图解法及圆图	257
			6.3.1	传播圆的图解法	257
			6.3.2	圆图	259

6.4 稳定光学谐振腔	260	7.2 激光放大器	300
6.4.1 谐振腔的稳定性	260	7.2.1 脉冲放大器	301
6.4.2 谐振腔类型	261	7.2.2 稳态放大	305
6.4.3 谐振腔模式的一般概念	262	7.3 固体激光工作物质	305
6.4.4 激光谐振腔的积分方程	262	7.3.1 激活离子	305
6.4.5 激光束尺寸和共振条件	264	7.3.2 常用激光晶体	306
6.4.6 衍射损耗和相移	267	7.3.3 正分高浓度激光晶体	306
6.4.7 等效谐振腔系统	268	7.3.4 太阳能泵浦激光工作物质	307
6.5 非稳定光学谐振腔 (非稳腔)	270	7.3.5 可调谐固体激光工作物质	307
6.5.1 非稳腔的一般介绍	270	7.3.6 激光玻璃	307
6.5.2 各种非稳腔结构和主要 参数	270	7.4 聚光器	308
6.5.3 两种应用较多的非稳腔	271	7.4.1 聚光器的类型	308
6.6 模式花样与模式偏振	274	7.4.2 聚光器的能量传输效率	310
6.6.1 稳定腔的近似模式花样	274	7.4.3 聚光器的反射表面	311
6.6.2 $N = 1$ 的精确模式花样	276	7.5 泵浦光源	312
6.6.3 模式偏振	276	7.5.1 惰性气体放电灯	312
6.7 各种非稳腔的模式花样	277	7.5.2 钨丝灯	320
6.7.1 非稳腔的模式损耗	277	7.5.3 金属蒸气放电灯	320
6.7.2 非稳腔的模式强度和相位 分布	279	7.5.4 二极管泵浦	321
6.7.3 非稳腔的基模近场和远场 分布	279	7.5.5 太阳能泵浦	322
6.8 模式选择技术	282	7.6 固体激光器电路	322
6.8.1 横模选择技术	282	7.6.1 脉冲固体激光器电源	323
6.8.2 纵模选择技术	286	7.6.2 连续固体激光器电源	333
<b>第七章 固体激光器</b>	<b>291</b>	7.7 热效应及其冷却措施	336
7.1 激光振荡器	291	7.7.1 热效应	336
7.1.1 玻耳兹曼统计分布	291	7.7.2 冷却措施	340
7.1.2 单色辐射与理想的二能级原子 系统的相互作用	291	7.8 典型固体激光器的性能	342
7.1.3 原子跃迁线型和线宽	292	7.8.1 微型钕激光器	342
7.1.4 受激吸收截面和受激发射 截面	293	7.8.2 小型单脉冲激光器	343
7.1.5 激光速率方程	294	7.8.3 中小功率电光Q开关重复频率 激光器	344
7.1.6 激光器的振荡阈值条件	296	7.8.4 声光调Q高重复频率激光器	345
7.1.7 增益系数和增益饱和	297	7.8.5 内腔锁模倍频Nd:YAG激 光器	345
7.1.8 稳态输出功率与最佳输出 耦合度	297	7.8.6 高功率亚纳秒倍频激 光器	346
		7.8.7 SHIVA激光装置-20路激光 系统	347
		7.8.8 325D振荡/放大器型TEM <sub>00</sub> 模 激光器	349
		7.8.9 可调谐固体激光器	349

附表及附图 .....	353	9.4 主要理论结果 .....	496
<b>第八章 气体激光器</b> .....	<b>417</b>	9.4.1 单异质结构宽面激光二极管 .....	496
8.1 引言 .....	417	9.4.2 双异质结构条形激光二极管 .....	501
8.2 气体激光器的激励方式 .....	417	9.5 GaAs-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As异质结构 激光二极管 .....	505
8.2.1 放电激励 .....	417	9.5.1 GaAs-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As单异质结构宽 面激光二极管 .....	505
8.2.2 气动热激励 .....	422	9.5.2 GaAs-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As双异质结构条 形激光二极管 .....	506
8.2.3 化学激励 .....	422	9.5.3 GaAs-Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As异质结构激 光二极管的退化和寿命 .....	508
8.2.4 光激励 .....	424	9.6 其他材料和结构的半导体激 光器 .....	516
8.2.5 核能激励 .....	424	9.6.1 InGaPAs-InP双异质结构条形激 光二极管 .....	510
8.3 原子气体激光器 .....	425	9.6.2 PbSnTe-PbTe双异质结构条形 激光二极管 .....	512
8.3.1 原子气体激光器的激励类型 ..	425	9.6.3 分布反馈激光器 .....	513
8.3.2 原子气体激光器的激励机理 ..	426	9.6.4 PNP 负阻激光器 .....	513
8.3.3 惰性气体原子激光器-He-Ne 激光器 .....	427	9.7 光纤通信用的激光二极管 .....	514
8.3.4 铜及其他金属原子蒸气激 光器 .....	439	<b>第十章 染料激光器</b> .....	<b>516</b>
8.4 离子气体激光器 .....	440	10.1 引言 .....	516
8.4.1 惰性气体离子激光器 .....	440	10.2 激光泵浦的脉冲染料激 光器 .....	517
8.4.2 金属蒸气离子激光器 .....	449	10.2.1 结构及工作原理 .....	517
8.5 分子气体激光器 .....	451	10.2.2 调谐方法 .....	519
8.5.1 双原子分子气体激光器 .....	451	10.2.3 脉冲染料激光放大器 .....	526
8.5.2 三原子和多原子分子气体 激光器 .....	454	10.3 闪光灯泵浦的染料激光器 ..	532
8.6 准分子激光器 .....	472	10.3.1 直管闪光灯泵浦的染料 激光器 .....	532
8.6.1 准分子系统的特征 .....	473	10.3.2 同轴式闪光灯泵浦的染 料激光器 .....	533
8.6.2 激励方法和结构 .....	474	10.3.3 闪光灯泵浦的染料激光 器性能 .....	534
8.6.3 准分子激光器分类 .....	475	10.4 连续波染料激光器 .....	538
8.7 气体激光器的选模技术 .....	480	10.4.1 直腔连续波染料激光器的谐 振腔结构及性能 .....	539
8.7.1 “粗略的”选频方法 .....	480	10.4.2 环形腔连续波染料激光器的 结构及性能 .....	543
8.7.2 横模选择 .....	481	10.4.3 连续波染料激光器的频率稳	
8.7.3 纵模选择 .....	482		
<b>第九章 半导体激光器</b> .....	<b>487</b>		
9.1 引言 .....	487		
9.2 激光二极管的材料 .....	488		
9.2.1 III-V族化合物及其固溶体 .....	488		
9.2.2 I-III族化合物及其固溶体 .....	491		
9.3 激光二极管的结构 .....	491		
9.3.1 按垂直于结方向的结构分类 ..	491		
9.3.2 按平行于结方向的结构分类 ..	493		

定技术 .....	549	基础 .....	633
10.4.4 连续波染料激光器的喷 流技术 .....	551	12.2.1 一些物理效应在电光、声光 器件中的应用 .....	634
10.5 超短脉冲染料激光器 .....	554	12.2.2 折射率椭球及其应用 .....	635
10.5.1 锁模染料激光器 .....	554	12.3 电光调制器和偏转器 .....	642
10.5.2 同步泵浦锁模染料激光器 .....	554	12.3.1 电光调制器的分类 .....	643
10.6 染料激光器的应用 .....	555	12.3.2 电光调制器的主要参数 .....	645
10.6.1 激光光谱学 .....	555	12.3.3 电光调制器设计中的一些主 要问题 .....	647
10.6.2 激光分离同位素 .....	556	12.3.4 横向LiTaO <sub>3</sub> 强度调制器 .....	656
10.6.3 其他 .....	556	12.3.5 电光Q开关 .....	656
<b>第十一章 激光倍频与参量振荡</b> .....	558	12.3.6 电光腔倒空 .....	659
11.1 光学非线性相互作用 .....	558	12.3.7 电光偏转器 .....	660
11.1.1 介质的非线性极化 .....	558	12.4 声光器件 .....	662
11.1.2 非线性光学系数 .....	559	12.4.1 声光相互作用的分类及声光 器件的组成 .....	662
11.1.3 非线性耦合波方程 .....	563	12.4.2 声光器件的主要参数 .....	664
11.2 二次谐波产生 .....	564	12.4.3 声光器件的设计考虑 .....	665
11.2.1 二次谐波的输出功率 .....	565	12.4.4 声光器件在连续泵浦脉冲激 光器中的应用 .....	675
11.2.2 相位匹配 .....	566	12.4.5 声光偏转器 .....	677
11.2.3 有效非线性光学系数 .....	571	12.5 锁模 .....	678
11.2.4 聚焦束倍频 .....	572	12.5.1 锁模激光器的输出特性 .....	679
11.2.5 腔内倍频 .....	574	12.5.2 振幅调制锁模 .....	680
11.2.6 基波光束质量的影响 .....	577	12.5.3 相位调制锁模 .....	681
11.2.7 高功率倍频过程中热量的产 生及克服措施 .....	579	12.5.4 声光锁模调制器 .....	682
11.3 光学参量振荡 .....	583	12.5.5 电光锁模相位调制器 .....	683
11.3.1 光学参量振荡器概述 .....	583	12.5.6 电光锁模振幅调制器 .....	684
11.3.2 参量互作用的增益 .....	584	12.5.7 锁模瞬态解 .....	684
11.3.3 参量振荡器的泵浦阈值 功率 .....	586	12.5.8 锁模激光器 .....	684
11.3.4 参量振荡器的功率转换 效率 .....	587	<b>第十三章 激光参数测量</b> .....	688
11.3.5 参量振荡器的调谐和输 出特性 .....	590	13.1 脉冲能量和连续功率的 测量 .....	688
11.4 常用非线性晶体简介 .....	594	13.1.1 直接量热法 .....	688
11.4.1 非线性晶体的基本要求 .....	594	13.1.2 热电法 .....	689
11.4.2 常用非线性晶体 .....	595	13.1.3 光电法 .....	689
附表 .....	596	13.1.4 光化学法 .....	690
<b>第十二章 电光、声光器件和材料</b> .....	633	13.1.5 光压法 .....	691
12.1 引言 .....	633	13.1.6 光学衰减器 .....	692
12.2 电光、声光器件的理论		13.2 脉冲宽度的测量 .....	694
		13.3 光束发散角的测量 .....	695

13.4	波长和谱线宽度的测量	697	15.6.4	激光自动跟踪和制导	743
13.5	偏振的测量	698	<b>第十六章 红外探测器及其材料的参数定义和测量</b> 744		
13.6	模式的测量	698	16.1	红外探测器的参数定义	744
13.7	激光器输出功率(能量)稳定度和工作寿命的测量	699	16.2	红外探测器的参数测量	753
13.8	激光晶体性能参数和测量	699	16.2.1	探测率 $D^*$ 的测量	753
13.8.1	影响激光晶体性能的因素	699	16.2.2	光谱响应的测量	755
13.8.2	激光晶体性能参数和测量方法	699	16.2.3	响应时间的测量	757
<b>第十四章 激光危害与防护</b> 705			16.2.4	伏安特性的测量	759
14.1	引言	705	16.2.5	其他	760
14.2	激光辐射的危害	705	16.3	红外探测器的稳定性	761
14.3	电气危害	706	16.4	红外探测材料的参数定义	762
14.4	激光危险分级	707	16.5	红外探测材料的参数测量	763
14.5	激光安全防护措施	711	16.5.1	电学参数的测量	767
14.6	激光器使用环境与安全防护	712	16.5.2	热电参数的测量	772
14.7	选用激光防护镜的注意事项	712	16.5.3	其他	775
14.8	激光器制造厂的责任	715	<b>第十七章 红外光子探测器和材料</b> 777		
14.9	激光的医学监护	715	17.1	红外光子探测器的分类和特点	777
附表		715	17.2	红外光子探测器的基本原理	778
<b>第十五章 激光探测器</b> 717			17.2.1	光电导探测器	778
15.1	引言	717	17.2.2	光生伏特探测器	780
15.2	探测器的基本特性	717	17.2.3	光磁电(PEM)探测器	783
15.3	光电管和光电倍增管	718	17.3	常用探测器性能	783
15.3.1	光电倍增管的特性	719	17.3.1	硫化铅(PbS)探测器	783
15.3.2	光电倍增管的工作电路	723	17.3.2	硒化铅(PbSe)探测器	787
15.3.3	光电倍增管使用注意事项	724	17.3.3	砷化镓(InAs)探测器	789
15.4	光电二极管	725	17.3.4	锑化铟(InSb)探测器	791
15.4.1	光电二极管的工作原理	725	17.3.5	碲镉汞( $Hg_{1-x}Cd_xTe$ )探测器	795
15.4.2	光电二极管的基本特性	726	17.3.6	碲锡铅(PbSnTe)探测器	801
15.5	雪崩光电二极管	731	17.3.7	锗掺杂(Ge:X)探测器	803
15.6	激光探测器件的选择	732	17.3.8	硅掺杂(Si:X)探测器	804
15.6.1	1.06 $\mu m$ 固体脉冲激光测距	732	17.4	其他探测器	809
15.6.2	0.6943 $\mu m$ 与0.5320 $\mu m$ 波长的人造卫星激光测距	733	17.4.1	光子牵引探测器	809
15.6.3	激光通信	733	17.4.2	约瑟夫逊结探测器	809
			17.4.3	肖脱基势垒探测器	810
			17.4.4	异质结红外探测器	811
			17.4.5	MOM结构探测器	812

17.4.6 宽带铋化锑探测器	813	19.6.2 热电探测器的性能	922
17.4.7 窄带可调谐铋化锑探测器	813	19.6.3 热电探测器的结构	927
17.4.8 砷化镓非本征光电导探测器	813	19.6.4 热电探测器的选用	931
17.4.9 多色探测器	813	<b>第二十章 红外摄象管</b>	935
17.4.10 扫积探测器	814	20.1 引言	935
17.5 红外探测器的封装结构	815	20.2 摄象管的结构和工作原理	935
17.6 红外探测器的选择、使用和失效原因	821	20.3 光导型近红外摄象管	937
17.7 红外敏感半导体材料	825	20.3.1 氧化铅硫化铅复合靶摄象管	937
17.7.1 锗、硅和锗-硅合金	826	20.3.2 硅靶摄象管	938
17.7.2 铅盐类半导体材料	831	20.3.3 衡量光导摄象管性能的几个参数	940
17.7.3 III-V族化合物半导体材料	837	20.4 热电摄象管	940
17.7.4 三元系红外敏感材料	843	20.4.1 热电摄象管的结构	940
<b>第十八章 红外电荷转移器件</b>	873	20.4.2 热电摄象管的靶面材料	940
18.1 引言	873	20.4.3 关于热电摄象管的一些问题	941
18.2 硅电荷耦合器件(SiCCD)	873	20.4.4 热电摄象管的参数	943
18.2.1 器件物理	873	<b>第二十一章 红外探测器的偏置与低噪声前置放大器</b>	949
18.2.2 器件结构	878	21.1 低噪声放大技术	949
18.2.3 器件特性	880	21.1.1 放大器的噪声性能的描述	949
18.3 红外电荷转移器件(IR CTD)	884	21.1.2 晶体管的噪声性能	950
18.3.1 基本类型	884	21.1.3 低噪声放大技术	952
18.3.2 混合式红外电荷耦合器件(IR CCD)	884	21.2 光伏型探测器的特点及工作方式	955
18.3.3 单片式红外CTD器件	893	21.2.1 光伏型探测器的小信号参数	955
18.3.4 IR CTD的基本成象方式	899	21.2.2 光伏型红外探测器的工作方式	956
<b>第十九章 热探测器和热电材料</b>	904	21.2.3 前置放大器线路举例	957
19.1 引言	904	21.3 光电导探测器的偏置和前置放大器	959
19.2 辐射温差电偶和辐射温差电堆	905	21.3.1 光电导探测器的光电特性	959
19.3 辐射热计	907	21.3.2 光电导探测器的典型偏置电路	960
19.4 高莱探测器	910	21.3.3 光电导探测器的偏置和放大器举例	961
19.5 热电材料及其主要参数	911	21.4 热电探测器的前置放大器	962
19.5.1 热电效应	911	21.4.1 热电探测器的等效电路	962
19.5.2 热电材料及其主要参数	912		
19.6 热电探测器	920		
19.6.1 热电探测器的原理	920		

21.4.2	热电探测器的噪声	963	23.2	调制盘的空间滤波	1003
21.4.3	热电探测器的工作方式	964	<b>第二十四章 红外系统</b>		1012
21.4.4	热电探测器的前置放大器举例	965	24.1	引言	1012
<b>第二十二章 红外探测器的制冷技术</b>		969	24.2	红外辐射检测原理	1012
22.1	制冷原理	969	24.2.1	统计学概念及信号的检测	1013
22.1.1	相变制冷	969	24.2.2	终端系统及其特性	1016
22.1.2	焦耳-汤姆逊效应	969	24.2.3	识别概论	1023
22.1.3	气体等熵膨胀制冷	969	24.3	红外系统的性能分析	1027
22.1.4	绝热放气制冷	969	24.3.1	红外系统的频谱分析方法	1028
22.1.5	涡流制冷	970	24.3.2	红外系统性能的综合分析方法	1032
22.1.6	辐射制冷	971	24.3.3	红外系统性能的计算机分析方法	1069
22.1.7	珀尔帖冷效应	971	24.4	系统设计举例	1069
22.2	用相变制冷的制冷器	971	24.4.1	总体考虑	1070
22.2.1	杜瓦瓶	971	24.4.2	可见与红外多光谱扫描仪	1070
22.2.2	液氮双相传输制冷器	972	24.4.3	CCD推帚式扫描仪	1078
22.2.3	固体制冷器	975	24.4.4	热成象系统	1081
22.3	焦耳-汤姆逊制冷器	978	24.4.5	热电摄像管成象装置	1085
22.4	用气体等熵膨胀的制冷器	981	24.4.6	跟踪装置的检测系统	1088
22.4.1	斯特林气体制冷器	981	24.4.7	辐射测温仪	1090
22.4.2	VM循环制冷器	985	<b>第二十五章 辐射度学、光度学及其它基本单位和物理常数</b>		1096
22.5	绝热放气制冷器	986	25.1	引言	1096
22.5.1	S循环制冷器	986	25.2	国际单位制中用数量级表示的十进位倍数词头	1096
22.5.2	G-M循环制冷器	988	25.3	辐射度量和光度量单位	1097
22.6	涡流制冷器	989	25.4	辐射度量和光度量的单位换算表	1100
22.7	辐射制冷器	991	25.5	温度、声学、热学、电学、磁学计量单位	1102
22.8	半导体制冷器	994	25.6	长度、质量、角度、面积、体积、时间、力、功、能的一些单位	1104
22.9	制冷器的选择	996	25.7	理化常数及能量转换因子	1113
<b>第二十三章 调制盘</b>		998	25.8	太阳、月球、地球的一些数据	1115
23.1	典型调制盘图案的结构参数及有关频率计算公式	998			
23.1.1	偏轴旋转辐条式调制盘	998			
23.1.2	圆锥扫描式调制盘	999			
23.1.3	直线扫描式调制盘	1000			
23.1.4	同心旋转式调制盘	1000			
23.1.5	双色调制盘	1001			
23.1.6	调制盘图案举例	1001			

# 第一章 热 辐 射

凡是温度高于绝对零度的物体均发出热辐射, 它是由组成物质的微观粒子(分子、原子、离子和电子等) 热激励后能态之间的跃迁而发射出来的电磁辐射。热辐射定律是描述黑体辐射的基本定律, 即黑体辐射特性与其温度和波长之间的关系。

## 1.1 黑体辐射的基本定律<sup>[1]</sup>

### 1.1.1 普朗克定律

它描述了黑体辐射的光谱分布, 表达式为

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

也可写成

$$M_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (1-2)$$

式中  $M_{\lambda}(T)$  为光谱辐出射度 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ );  $\lambda$  为波长 ( $\mu\text{m}$ );  $h$  为普朗克常数,  $h = (6.6262 \pm 0.0005) \times 10^{-34} \text{W} \cdot \text{s}^2$ ;  $T$  为绝对温度 (K);  $c$  为光速,  $c = (2.997925 \pm 0.000003) \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $C_1$  为第一辐射常数,  $C_1 = 2\pi hc^2 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$ ;  $C_2$  为第二辐射常数,  $C_2 = ch/k = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ;  $k$  为玻耳兹曼常数,  $k = (1.38054 \pm 0.00018) \times 10^{-23} \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

### 1.1.2 斯忒藩-玻耳兹曼定律

在由零到无穷大的波长范围内, 积分普朗克公式得到的辐出射度 (即从一平方米表面积的黑体辐射到半球空间的总辐射通量) 为

$$M(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1-3)$$

式中  $\sigma$  为斯忒藩-玻耳兹曼常数,

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15C^2 h^3} = (5.6697 \pm 0.0029) \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

由于黑体是朗伯源<sup>[2]</sup>, 它是一种均匀漫射的物体, 光谱辐亮度与其观察方向无关, 因此

$$L_{\lambda}(T) = \frac{M_{\lambda}(T)}{\pi}$$

而用辐亮度表示的斯忒藩-玻耳兹曼定律为

$$L(T) = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad (1-4)$$

式中  $L_{\lambda}(T)$  的单位为:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,  $L(T)$  的单位为  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。



### 1.1.3 维恩位移定律<sup>[1]</sup>

微分普朗克公式, 求出极大值, 得到温度和峰值波长的关系为

$$\lambda_m T = A \quad (1-5)$$

式中  $\lambda_m$  为光谱辐出射度的峰值波长( $\mu\text{m}$ );  $A = 2897.8 \pm 0.4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

将  $\lambda_m T$  值代入普朗克公式, 给出峰值光谱辐出射度的表达式为

$$M_{\lambda_m}(T) = bT^5 \quad (1-6)$$

式中  $M_{\lambda_m}(T)$  为峰值光谱辐出射度 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ );  $b = 1.2862 \times 10^{-11} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-5}$ 。  
式(1-6)为维恩位移定律的另一种表达式。

### 1.1.4 用每秒光子数表示的光谱辐亮度<sup>[2]</sup>

光谱辐亮度若以每秒光子数表示, 其表达式为

$$L_{q\lambda}(T) = L_\lambda(T)/h\nu = \frac{2c}{\lambda^4(e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (1-7)$$

式中  $L_{q\lambda}(T)$  的单位为光子数  $\cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ;  $\nu$  为辐射频率。每秒光子数在较长的波长  $\lambda'_m$  处出现一个极大值,  $\lambda'_m$  由下式解出:

$$\lambda'_m T = 3670 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (1-8)$$

以每秒光子数表示的斯忒藩-玻耳兹曼定律为

$$M'_q(T) = \sigma' T^3 \quad (1-9)$$

式中  $M'_q(T)$  为光子辐出射度(光子数  $\cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $\sigma' = 1.52041 \times 10^{15}$  光子数  $\cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-3}$ 。

### 1.1.5 黑体辐射函数<sup>[3]</sup>

因为  $M_\lambda(T) = [(M_{\lambda T})/(M_{\lambda_m T})] \cdot M_{\lambda_m T}$ , 设

$$f(\lambda T) = \frac{M_{\lambda T}}{M_{\lambda_m T}} = \frac{(\lambda_m T)^5 (e^{c_2/\lambda_m T} - 1)}{(\lambda T)^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)},$$

由式(1-6)得到

$$M_\lambda(T) = M_{\lambda T} = f(\lambda T) M_{\lambda_m T} = f(\lambda T) bT^5 \quad (1-10)$$

式中  $f(\lambda T)$  是  $\lambda T$  的函数。当温度  $T$  已知时, 利用表 1-3 给出的  $f(\lambda T)$  值可求出任意波长处的光谱辐出射度。同理, 还可根据

$$M_{0-\lambda T} = \frac{M_{0-\lambda T}}{M_{0-\infty}} \cdot \sigma T^4$$

设  $F(\lambda T) = M_{0-\lambda T}/M_{0-\infty}$ , 则

$$M_{0-\lambda T} = F(\lambda T) M_{0-\infty} = F(\lambda T) \sigma T^4 \quad (1-11)$$

式中  $F(\lambda T)$  是  $\lambda T$  的函数。当温度  $T$  已知时, 利用表 1-3 给出的  $F(\lambda T)$  值, 可求出波长  $0$  到  $\lambda$  间隔内的黑体辐出射度值。

在温度为  $T$  时, 根据式(1-11)可求出波长  $\lambda_a$  和  $\lambda_b$  之间的黑体辐出射度

$$M_{\lambda_a-\lambda_b}(T) = C_1 \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \frac{d\lambda}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} = (F_b - F_a) \sigma T^4 \quad (1-12)$$