

—— 研究生系列规划教材 ——

红外与微光技术

Infrared and Low Light Level Technology

叶玉堂 刘爽 主编



电子科技大学研究生系列教材建设项目

红外与微光技术

叶玉堂 刘爽 主编

吴志明 杨健军 张艳 副主编

吴云峰 杨风暴 方亮 刘霖 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

红外与微光技术 / 叶玉堂, 刘爽主编. —北京:
国防工业出版社, 2010. 5

ISBN 978 - 7 - 118 - 06832 - 0

I. ①红... II. ①叶...②刘... III. ①红外技术②微
光技术 IV. ①TN21②TN223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 072444 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 30½ 字数 549 千字

2010 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422
发行传真: (010) 68411535

发行邮购: (010) 68414474
发行业务: (010) 68472764

序 言

从 20 世纪 80 年代历时至今的二十多年来,信息电子科学技术的发展令人瞩目。以无线通信和互联网技术为代表的现代信息电子科技极大地促进了经济、社会的发展,并深刻地改变了人类生活。如今,信息电子技术不仅自身已蓬勃发展为强大的新兴产业,它对各传统产业在技术进步上的促进也是有目共睹的。而在国防建设和军事技术的发展中,信息电子技术的重要性更为突出,因为现代化战争最关键的环节就是信息的获取、控制与对抗等电子技术的较量。

正因为迅猛发展的信息电子技术对当今社会发展具有如此重要的意义,因此,国内各高校都极其重视信息电子类相关学科的发展、相关专业的成长和相关专业教学水平的提高。而在这一巨大的努力和付出中,研究生教育质量的提升和研究生教材建设则是至关重要的一环。

电子科技大学正是基于上述认识,近年来加大了电子信息类教材建设的力度。我校的学科专业涵盖了从电子材料、电子器件、电路、信号、控制直到各种电子系统的较为完整的电子信息领域,学校极为重视国内外研究生课程的设置和教材内容的比较研究,并建立了专项基金,用于资助具有一定学术水平的研究生教材的编写与出版。

当然,教材建设也是一项学术性很强的工作。研究生教材既要体现理论上的基础性和系统性,又要尽可能地反映本领域研究的最新成果和进展,要求较高。另一方面,高校的骨干师资力量大多既要承担繁重的科研工作,又要承担大量的教学任务,加之各位教授的专业背景不同,教材的最终质量和使用效果仍需通过实践去检验。因此,我们诚恳希望使用这些教材的各个院校的广大师生直言批评,不吝指正,使我校的教材建设能够越做越好。

电子科技大学

二〇〇五年十月十九日

前 言

随着红外与微光技术在材料、器件工艺、制冷技术等方面日新月异的发展以及电子电路、计算机、MEMS 等相关领域的飞速进步,红外与微光技术在军事装备与民用系统中的应用越来越广泛,因而各个领域的相关学生都希望了解红外与微光方面的一些基础知识和前沿进展。为满足非红外与微光专业本科生与研究生的这一迫切需求,由成都电子科技大学和中北大学长期从事红外与微光领域科研、教学的几位教授、学者合作,编著成了本书。

作为可能面向不同行业非红外专业本科生与研究生的教学参考书,在概括地介绍一些必备理论知识的基础上,本书特别注重内容的新颖和普适性。为此,一方面,在红外辐射源、红外探测器、红外成像技术、红外制冷技术等部分都着重介绍相关最新进展;另一方面,考虑到各领域很多红外技术的现代应用都离不开红外图像处理,而原始红外图像信号往往非常微弱、模糊,本书专辟两章介绍红外图像的新颖处理技术,一章介绍对于微弱、模糊图像具有特别强的处理功能的水平集(level set)处理方法,另一章则介绍红外图像融合技术。在红外技术应用一章中,化学反应进程中热场的实时监测、激光辅助微细加工中微小曝光区温度或温度分布的实时测量等内容则汇集了编著者及其指导的研究团队近年在国内发表的一些研究成果。

本书由成都电子科技大学刘爽博士编著第 1、2、7 章及第 8 章的一部分,并负责全书的统稿;张艳博士、吴云峰博士编著第 3 章;吴志明教授编著第 4 章;方亮博士编著第 5 章;中北大学杨风暴博士编著第 6 章;成都电子科技大学刘霖博士、吴云峰博士编著第 8 章的一部分;杨健军博士编著第 9 章;叶玉堂教授负责全书整体框架的构建及相关新技术和前沿进展方面的内容组织。

需特别提及的是,昆明物理所苏君红院士对本书的编著和出版给予巨大的支持和关心;成都电子科技大学研究生院对本书的出版提供部分资助;成都电子

科技大学杨先明博士、王昱琳博士和刘霞、谢煜等研究生都为本书的文稿编辑和资料整理做了大量工作。编著者谨此向他们表示诚挚的谢意！

由于编著者学识有限,加之时间仓促,书中难免出现缺点、错误或疏漏,恳请广大读者不吝指正。

编 者

2010 年 1 月

于电子科技大学

目 录

第一章 基础理论	1
1.1 电磁波谱与红外辐射	1
1.1.1 红外辐射的发现	1
1.1.2 电磁波谱	1
1.1.3 电磁波表示	2
1.1.4 红外光谱	3
1.2 红外辐射理论	5
1.2.1 普朗克公式	5
1.2.2 斯忒藩—玻耳兹曼定律	11
1.2.3 维恩位移定律	12
1.3 黑体辐射的简易计算	15
1.3.1 $f(\lambda T) = M_\lambda / M_{\lambda_m}$ 函数	15
1.3.2 $F(\lambda T) = M_{0-\lambda} / M_{0-\infty}$ 函数	16
1.4 红外传输理论	19
1.4.1 大气的吸收	19
1.4.2 大气的散射	24
1.5 红外与微光探测理论	29
1.5.1 光电导效应	30
1.5.2 光伏效应	34
1.5.3 温差电效应	35
1.5.4 热释电效应	36
1.5.5 光电转换定律	37
1.6 噪声理论	37
1.6.1 噪声源	38
1.6.2 热噪声	38

1.6.3	1/f 噪声	40
1.6.4	产生—复合噪声	40
1.6.5	散粒噪声	42
1.6.6	背景辐射噪声	42
1.6.7	晶体管噪声	44
1.6.8	变压器噪声	46
1.6.9	值得注意的几个问题	46
习题		47
参考文献		47
第二章	红外辐射源	48
2.1	自然红外辐射源	48
2.1.1	太阳辐射	48
2.1.2	月球及其他恒星、行星的辐射	51
2.1.3	地面和云层的辐射	52
2.1.4	天空的辐射	54
2.2	实验室和工业用辐射源	58
2.2.1	绝对黑体	58
2.2.2	其他辐射源	63
2.3	飞行体与运载工具	68
2.3.1	飞机的辐射	68
2.3.2	火箭的辐射	71
2.3.3	坦克的辐射	71
2.3.4	火炮的辐射	72
2.4	红外激光源	74
2.4.1	钕铝石榴石(Nd: YAG)激光器	75
2.4.2	半导体激光器	76
2.4.3	CO ₂ 激光器	78
2.4.4	染料激光器	79
2.4.5	化学激光器	81
2.5	红外发光二极管	84
2.5.1	红外发光二极管的结构	84

2.5.2 典型的红外发光二极管	85
2.5.3 新型的红外发光二极管	89
习题	91
参考文献	91
第三章 红外探测器	92
3.1 红外探测器的发展概述	92
3.1.1 红外探测器的发展	92
3.1.2 红外探测器的分类	95
3.2 红外探测器的性能参数	100
3.2.1 探测器的主要工作条件	100
3.2.2 红外探测器的性能参数	101
3.2.3 红外探测器性能参数的测量	106
3.3 典型的光子红外探测器	111
3.3.1 InGaAs 探测器	111
3.3.2 InSb 探测器	124
3.3.3 HgCdTe 探测器	132
3.4 新型红外探测器件与技术	148
3.4.1 量子阱红外探测器	148
3.4.2 红外单光子探测器	156
3.4.3 双/多光子红外探测	164
3.4.4 多/超光谱探测	169
3.4.5 探测红限的 Franz-Keldysh 偏移	177
习题	182
参考文献	183
第四章 热像技术	190
4.1 概述	190
4.2 热探测器的基本工作原理	192
4.2.1 基本工作原理	192
4.2.2 传热机理分析	194
4.3 几种常见的热探测器	197
4.3.1 热敏电阻型热探测器	197

4.3.2	热释电型探测器	209
4.3.3	热电堆红外探测器	221
4.4	热探测器器件及热像仪性能分析与比较	222
4.4.1	热探测器器件及热像仪性能分析	222
4.4.2	热探测器器件性能比较	227
4.5	发展趋势	229
	习题	233
	参考文献	233
第五章	IR 图像处理的水平集方法和数值计算	236
5.1	水平集方法	236
5.2	数值计算	240
5.2.1	控制方程的差分格式	240
5.2.2	窄代法	242
5.3	符号距离函数的生成	244
5.3.1	快速行进法	244
5.3.2	源点扫描法	246
5.4	基于 Mumford-Shah 模型的水平集方法	248
5.4.1	C - V 模型	249
5.4.2	多相位 C - V 模型	254
5.4.3	多相位阶次 C - V 模型	256
5.4.4	二值 Mumford-Shah 模型	260
5.5	C - V 模型在红外图像处理中的应用	263
	参考文献	265
第六章	红外图像融合处理	268
6.1	图像融合的基本概念	268
6.1.1	图像融合的定义与层次	268
6.1.2	图像融合效果的评价	271
6.1.3	常用图像融合方法分析	278
6.1.4	图像融合的应用	280
6.2	可见光与红外图像的融合	281
6.3	红外中、长波段图像的融合	284

6.3.1	红外中、长波段图像的目标特征比较分析	284
6.3.2	基于粗糙集的中、长波段图像的融合	285
6.3.3	基于极大值的中、长波段图像的融合	294
6.4	红外中波细分波段图像的融合	294
6.4.1	红外中波细分波段图像特征比较分析	294
6.4.2	基于小波包变换的中波细分图像的融合	296
6.5	红外短、长波段图像的融合	302
6.5.1	拉普拉斯金字塔算法	302
6.5.2	融合规则的确定及融合结果分析	304
	习题	305
	参考文献	305
第七章	制冷技术	308
7.1	概述	308
7.2	液态制冷	309
7.2.1	杜瓦瓶的工作原理	309
7.2.2	杜瓦瓶的分类	310
7.2.3	杜瓦瓶研究发展	311
7.2.4	杜瓦瓶的应用状况	312
7.3	半导体制冷	314
7.3.1	半导体制冷技术中的基本效应	315
7.3.2	半导体制冷的工作原理	317
7.3.3	半导体制冷在红外技术中的应用	318
7.3.4	半导体制冷的发展	319
7.4	辐射制冷	320
7.4.1	W型和L型辐射制冷器	321
7.4.2	G型辐射制冷器	323
7.4.3	辐射制冷研究应用状况	325
7.5	斯特林制冷	327
7.5.1	斯特林制冷机的工作原理	327
7.5.2	斯特林制冷机的分类	327
7.5.3	斯特林制冷机的发展及研究现状	332

7.6 其他方式的制冷	334
7.6.1 微型节流制冷	334
7.6.2 脉冲管制冷	338
习题	340
参考文献	340
第八章 红外技术应用	342
8.1 化学腐蚀中的红外监测	342
8.1.1 化学腐蚀区热场的实时监测	342
8.1.2 基片化学刻蚀面粗糙度的红外实时监测	353
8.1.3 腐蚀反应启动时长的红外测定	356
8.2 激光微细加工区的红外辐射测温	360
8.2.1 激光微细加工及其温度测量的意义	360
8.2.2 微小激光曝光区温度测量的原理、装置和难点	362
8.2.3 点扩展函数与激光曝光区温度测量的空间分辨能力	365
8.2.4 脉冲激光曝光区骤变温度场的测量	368
8.3 红外制导	370
8.3.1 制导的基础知识	370
8.3.2 红外激光制导	385
8.3.3 红外末敏制导	401
8.4 军用红外夜视	407
8.5 红外对抗	412
8.5.1 红外有源干扰	412
8.5.2 红外无源干扰	418
8.6 红外热成像技术最新应用	420
8.6.1 医疗应用领域	421
8.6.2 设备故障检测	425
8.6.3 能耗审核与房屋检修领域热成像技术	426
8.6.4 灾难预警与观测	429
参考文献	430
第九章 微光技术与应用	434
9.1 微光探测器件及最新进展	434

9.1.1	光电倍增管	434
9.1.2	微通道板电子倍增器	438
9.1.3	光纤传像元件特性参数及应用	442
9.1.4	微光像增强器	443
9.2	微光探测系统	455
9.2.1	直视微光成像系统	455
9.2.2	微光电视系统	463
9.2.3	CCD 微光摄像机	469
9.2.4	成像光子计数探测系统	472
习题		474
参考文献		474

第一章 基础理论

1.1 电磁波谱与红外辐射

1.1.1 红外辐射的发现

“红外辐射”又称“红外光”、“红外线”。不同名称中“红外”是必不可少的，它不仅限定了一种特定“辐射”、“光”、“射线”的意义，也表明了这些名称的由来。

公元前，罗马的唯物主义哲学家就提出了“热射线”概念。对热辐射的系统研究始于18世纪末。1777年^[2]瑞典科学家卡尔谢利提出“辐射热”名词，该术语到20世纪初变更为“热辐射”。早期的研究看到并强调了热辐射和光辐射之间的相似性——直线传播、反射，但对两者的同一性几乎未涉及。只是由于热辐射理论的进一步发展，并经过实验数据加以证实，才对热辐射和光辐射的相互关系有了深入的认识。

如果让一束太阳光通过三棱镜，然后投射到白色屏幕上，将看到一条由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等色组成的彩色光带，物理学上定义其为“太阳光谱”，这就是有名的“分光实验”。该实验表明太阳是由多种彩色光混合而成的。这也引发了新的思考：红光与紫光外面是什么？各种彩色光除色彩不同外，有无其他不同？1800年^[2]英国天文学家赫谢耳（Herschel）在用水银温度计研究太阳光谱中各种彩色光的热效应时，发现了热效应从紫光到红光逐渐增大，在红光的外面热效应相对较大，人眼看不见有任何光线的黑暗区。这表明，太阳光谱的红光之外还有一种东西存在，当时称它为“不可见光”。经过以后几十年的研究，逐渐证明，这种不可见光与各种彩色光（可见光）是同一类东西，很多物理性能都是相同的，只是由于不能被人眼所感受，才一直不知道它的存在。由于它处于太阳光谱红光之外，很自然被称为“红外光”。“光”这个词习惯上是指人眼看得见的辐射，因此又称其为“红外辐射”。

1.1.2 电磁波谱

现在人们已经知道，红外辐射像可见光一样，也是一种电磁波。电磁波包括

的范围很广,从无线电波到光波,从 X 射线到 γ 射线,都属于电磁波的范畴,只是波长不同而已。按照频率或波长的顺序把这些电磁波排列成图表,称为电磁波谱,图 1-1 给出了电磁波谱。由图 1-1 可知^[3],红外辐射从可见光的红光边界开始,一直扩展到电子学中的微波区边界。红外辐射的波长范围是 $0.78\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$,是个相当宽的区域。

目前已经发现并得到广泛应用的电磁波有波长达 10^4m 以上的,也有波长短到 10^{-5}nm 以下的。

1.1.3 电磁波表示

在光学谱中,由于电磁波的频率是很大的数值,不便直接测量,并且与波长数值测量相比,频率数值测量精度比较低,因此,多用波长来标志紫外线、可见光和红外线。同时波长与电磁波所在的媒质折射率有关,如无特殊说明,本书所引用的波长数值均是指在真空中的数值。

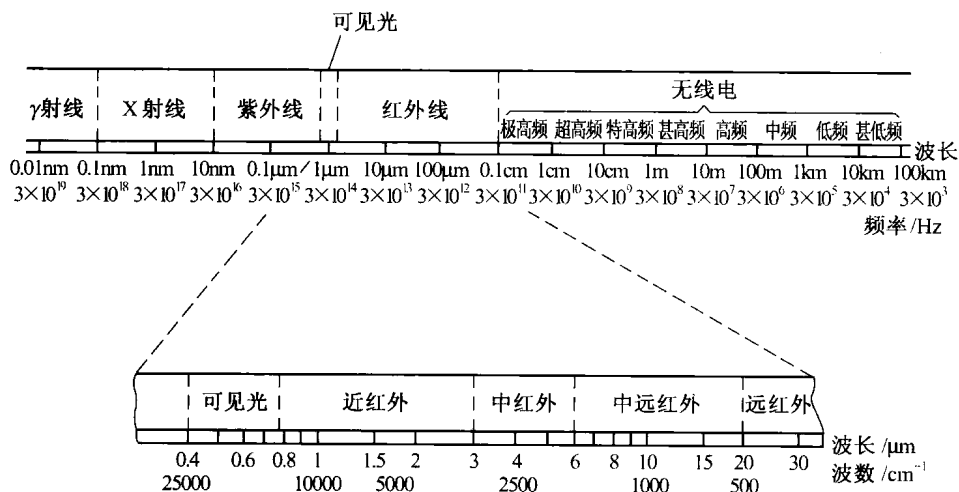


图 1-1 电磁波谱

描述红外辐射时,波长的单位通常用微米(μm)表示,它与纳米(nm)以及埃($\text{\AA}$)的关系为

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

$$1\mu\text{m} = 10^3\text{nm} = 10^4\text{\AA} \quad (1-2)$$

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)表示,则波长值的倒数就是

波数值,即

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

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值。利用式(1-1)

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

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,在将波数 $\tilde{\nu}$ 称为“频率”时,“频率”一词指的是空间“频率”,不要将它与时间频率混淆。

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。在考虑电磁辐射的散射和吸收问题时,必须把电磁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

$$\varepsilon = h\nu \quad (1-5)$$

式中, $h = (6.626\,176 \pm 0.000\,036) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 称为普朗克(Planck)常数。

由式(1-3)与式(1-5)得,光子能量与波长和波数的关系为

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = hc\tilde{\nu} \quad (1-6)$$

即光子的能量与波长成反比,或者说,光子的能量与波数成正比。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 电位差的加速下所获得的动能。

电子伏特和焦耳(J)之间的换算关系为

$$1\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{J} \quad (1-7)$$

1.1.4 红外光谱

红外线存在于自然界的任何一个角落。事实上,一切温度高于绝对零度的有生命和无生命的物体时时刻刻都在不停地辐射红外线^[4]。太阳是红外线的巨大辐射源,整个星空都是红外线源,而地球表面,无论是高山大海,还是森林湖泊、冰川雪地都在日夜不断地辐射红外线。特别是活动在地面、水面和空中的军事装置,如坦克、车辆、军舰、飞机、导弹等,由于它们有高温部位,往往都是强红

外辐射源。在人们的生活环境中,如居住的房间里照明灯、火炉,甚至一杯热茶,都在放出大量红外线。更有趣的是,人体自身就是一个红外辐射源,一切飞禽走兽也都是红外辐射源。总之,红外线充满整个空间。

在电磁波谱中,红外辐射只占有小部分波段。整个电磁波谱包括 20 个数量级的频率范围,可见光谱的波长范围($0.38\mu\text{m} \sim 0.78\mu\text{m}$)只跨过一个倍频程,而红外波段($0.78\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$)却跨过大约 10 个倍频程。因此,红外光谱区比可见光谱区含有更丰富的内容。可以设想,一个具有能看见红外线的眼晴的人,所能欣赏到的颜色是多么绚丽多彩,因为除了我们所熟知的 7 种颜色之外,他还能看到大约 70 种新颖的色彩。在红外技术领域,通常把整个红外辐射光谱区按波长分为 4 个波段,见表 1-1。

表 1-1 红外辐射波段划分

波 段	近 红 外	中 红 外	远 红 外	极远红外
波段/ μm	0.78 ~ 3	3 ~ 6	6 ~ 15	15 ~ 1000

这样的划分方法基本上是考虑了红外辐射在地球大气层中的传输特性而确定的。例如,前 3 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,是指在这一波段内,大气对红外辐射损耗很小,基本上是透明的,如图 1-2 所示。

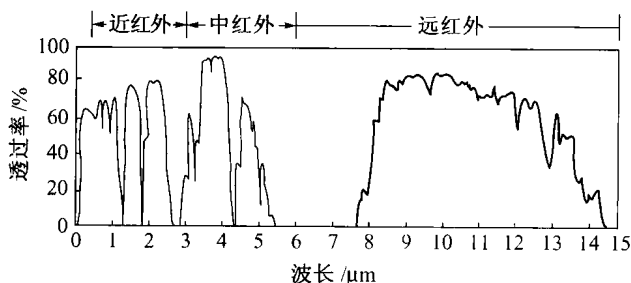


图 1-2 红外大气窗口

另外,需要说明的是,在光谱学中,根据红外辐射产生的机理不同,红外辐射按波长分为 3 个区域。

近红外区: $0.78\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$,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。

中红外区: $2.5\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$,对应分子转动能级和振动能级之间的跃迁。

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