



国防科工委“十五”规划教材·光学工程

光电成像原理与技术

白廷柱 金伟其 编

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书依据教学指导委员会审定的大纲编写,是电子科学与技术(光电子方向)专业本科生必修专业课程的教材,课程计划学时为64学时(内容可扩展至96学时)。书中内容的编排遵循专业课程的教学要求,以光学图像、辐射图像的获取、处理以及光电成像过程所涉及的相关理论和技术为主,涉及光电成像器件的图像变换、信号放大、图像信息的存储、传输、处理和显示的基本原理,光电成像系统的结构与设计,光电成像器件与系统的性能分析与测试,人眼、光源、辐射源和大气传输特性等。

图书在版编目(CIP)数据

光电成像原理与技术/白廷柱,金伟其编.—北京:
北京理工大学出版社,2006.1
国防科工委“十五”规划教材.光学工程
ISBN 7-5640-0482-7

I. 光… II. ①白…②金… III. 光电效应-成像
原理-高等学校-教材 IV. ①O435.2②O482.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第114194号

光电成像原理与技术

白廷柱 金伟其 编

责任编辑 高志洪

责任校对 张宏

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081)

电话:010-68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

<http://www.bitpress.com.cn>

E-mail:chiefeditor@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16

印张:34.25 字数:713千字

2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷

印数:3000册

ISBN 7-5640-0482-7 定价:50.00元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春

目 录

| | |
|---|-----|
| 第 1 章 绪 论 | 1 |
| § 1.1 光电成像技术的产生及发展 | 1 |
| § 1.2 光电成像对可见光谱域的延伸 | 2 |
| § 1.3 光电成像技术的应用范畴 | 5 |
| § 1.4 光电成像器件的分类 | 7 |
| § 1.5 光电成像器件的特性 | 9 |
| 习题与思考题 | 29 |
| 第 2 章 人眼的视觉特性与图像探测 | 30 |
| § 2.1 人眼的视觉特性与模型 | 30 |
| § 2.2 图像探测理论与图像探测方程 | 39 |
| § 2.3 目标的探测与识别 | 47 |
| 习题与思考题 | 53 |
| 第 3 章 辐射源与典型景物辐射 | 54 |
| § 3.1 辐射度量及光度量 | 54 |
| § 3.2 朗伯辐射体及其辐射特性 | 60 |
| § 3.3 黑体辐射定律 | 65 |
| § 3.4 辐射源及其特性 | 69 |
| 习题与思考题 | 84 |
| 附表 3-1 黑体函数表 $y=f(x)$ | 86 |
| 附表 3-2 黑体函数表 $z=f(x)$ | 87 |
| 第 4 章 辐射在大气中的传输 | 89 |
| § 4.1 大气的构成 | 89 |
| § 4.2 大气消光及大气窗口 | 94 |
| § 4.3 大气吸收和散射的计算 | 96 |
| § 4.4 大气消光对光电成像系统性能的影响 | 104 |
| 习题与思考题 | 106 |
| 附表 4-1 用作大气光学性质计算依据的模式大气 | 107 |
| 附表 4-2 函数 $H_r=100\%$ 时不同温度下,每千米大气中的可降水分厘米数 | 112 |
| 附表 4-3 海平面水平路程上的水蒸气的光谱透射比(水蒸气 $0.3\sim 13.9\ \mu\text{m}$) | 114 |
| 附表 4-4 海平面水平路程上的二氧化碳的光谱透射比(二氧化碳 $0.3\sim 13.9\ \mu\text{m}$) | 118 |
| 第 5 章 直视型电真空成像器件成像物理 | 122 |



| | |
|-----------------------------------|------------|
| § 5.1 像管成像的物理过程 | 122 |
| § 5.2 像管结构类型与性能参数 | 124 |
| § 5.3 辐射图像的光电转换 | 138 |
| § 5.4 电子图像的成像理论 | 162 |
| § 5.5 电子图像的发光显示 | 184 |
| § 5.6 光学图像的传像与电子图像的倍增 | 193 |
| 习题与思考题 | 209 |
| 第 6 章 直视型光电成像系统与特性分析 | 211 |
| § 6.1 直视型光电成像系统的原理 | 211 |
| § 6.2 夜视光电成像系统的主要部件及特性 | 213 |
| § 6.3 直视型夜视成像系统的总体设计 | 228 |
| § 6.4 夜视系统的作用距离 | 237 |
| 习题与思考题 | 244 |
| 附表 6-1 国产红外变像管主要技术参数 | 246 |
| 附表 6-2 国内部分像增强器性能表 | 247 |
| 附表 6-3 国外部分二代像增强器性能表 | 250 |
| 附表 6-4 国外第三代像增强器性能表 | 250 |
| 第 7 章 电视型电真空成像器件成像物理 | 252 |
| § 7.1 电视摄像的基本原理 | 252 |
| § 7.2 摄像管的主要性能参数 | 257 |
| § 7.3 摄像管的分类 | 266 |
| § 7.4 热释电摄像管 | 281 |
| § 7.5 电子枪简介 | 290 |
| 习题与思考题 | 295 |
| 第 8 章 固体成像器件成像原理及应用 | 297 |
| § 8.1 CCD 的物理基础与工作原理 | 297 |
| § 8.2 CCD 的结构与特性 | 308 |
| § 8.3 CCD 成像原理 | 338 |
| § 8.4 增强型(微光)电荷耦合成像器件 | 347 |
| § 8.5 CCD 的应用 | 351 |
| § 8.6 CMOS 成像器件及其应用 | 358 |
| 习题与思考题 | 366 |
| 第 9 章 电视型光电成像系统与特性分析 | 367 |
| § 9.1 电视系统的组成与工作原理 | 367 |
| § 9.2 电视型微光成像系统(微光电视) | 385 |
| § 9.3 成像光子计数探测系统 | 393 |
| 习题与思考题 | 395 |



| | |
|-------------------------------------|-----|
| 第 10 章 红外热成像器件成像物理 | 396 |
| § 10.1 红外探测器的分类 | 396 |
| § 10.2 红外探测器的工作条件与性能参数 | 400 |
| § 10.3 光电导型红外探测器 | 406 |
| § 10.4 光伏型红外探测器 | 432 |
| § 10.5 红外焦平面阵列探测器 | 443 |
| § 10.6 非制冷红外焦平面阵列探测器 | 457 |
| § 10.7 量子阱红外探测器 | 472 |
| 习题与思考题 | 475 |
| 第 11 章 红外热成像系统的结构与特性分析 | 477 |
| § 11.1 热成像系统类型与基本参数 | 477 |
| § 11.2 光机扫描系统 | 484 |
| § 11.3 制冷器工作原理与分类 | 496 |
| § 11.4 信号的处理与显示 | 501 |
| § 11.5 热成像系统的性能与作用距离模型 | 508 |
| § 11.6 热成像系统的实验室评价 | 522 |
| § 11.7 热成像系统总体设计的基本考虑 | 527 |
| 习题与思考题 | 530 |
| 主要参考文献 | 533 |



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当



今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影 响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

《光电成像原理与技术》是国防科工委“十五”规划的重点教材,依据教学指导委员会审定的大纲编写。

“光电成像原理与技术”是电子科学与技术(光电子方向)专业本科生的必修专业课程,课程计划学时为64学时(内容可扩展至96学时)。本书遵循专业课程的教学要求,以光学图像、辐射图像的获取、处理以及光电成像过程所涉及的相关理论和技术为主,涉及光电成像器件的图像变换;信号放大;图像信息的存储、传输、处理和显示的基本原理;光电成像系统的结构与设计;光电成像器件与系统的性能分析与测试;人眼、光源、辐射源和大气传输特性等内容。

光电成像是适应信息社会需要而迅速发展的新兴分支学科,是目前光电技术发展的最高阶段。随着相关学科的进步和发展,光电成像技术领域也在不断地涌现出新思想、新器件、新技术。因此,要在有限的篇幅内系统、深入、完整、全面地描述光电成像技术的进展是不现实的,本教材只能从教学角度出发,讨论有关光电成像领域的基础知识、基本理论,简述典型光电成像系统的结构、工作原理、性能分析、设计思想和设计要点等。

为了使学生了解和掌握有关的理论知识,培养他们理论联系实际的能力,为他们今后从事本领域的研究工作奠定必要的基础并适应新技术的发展,本教材在编写过程中,尽力收集了一些新的科技成果,增补了一些最新的器件和系统的内容。

本书内容广泛,基本上可以兼顾从事光电成像技术研究的科技工作者的需要。在相应章节的附录中还编入了有关的国内外技术资料和数据表,以供相关专业的研究生和同业人员参考。

本书第1、5、7、8、10章由白廷柱执笔,第2、3、4、6、9、11章由金伟其执笔,全书由白廷柱统稿。本书集中了北京理工大学光电成像技术教研室全体同志多年的教学实践和科研积累,充分吸收了国内外光电成像技术领域同行们的经验和工作成果。内容的选取力求全面反映当代光电成像领域的主要技术内涵和技术现状,编排尽量考虑适应教学规律的要求,旨在为学生和有关读者提供一座了解光

电成像的技术范畴、掌握光电成像原理的桥梁。

本书承蒙北京理工大学高稚允教授和南京理工大学常本康教授主审。在此作者向他们致以诚挚的谢意,并向引为本书内容和作为本书参考资料的作者、译者表示由衷的感谢。

由于时间所限,加之光电成像是综合、广泛的高技术学科,正处于迅速发展的进程中,因此,要编出一本全面、完整、成熟的教材乃是作者之力所不能及的。此外,限于作者的学识与水平,书中的缺欠、遗漏在所难免,对此,诚恳地希望广大读者予以批评指正。

作 者

2005年3月

第 1 章 绪 论

现代人类生活在信息时代,获取图像信息是人类文明生存和发展的基本需要。据统计,通过人眼获取的信息占人类能够获取的信息的 80% 以上。但是由于人眼视觉性能的限制,通过直接观察所获得的图像信息仍然是有限的。这包括:灵敏度的限制,夜间无照明时人的视觉能力很差;分辨力的限制,没有足够的视角和对比度就难以辨识;时间上的限制,变化过去的影像无法存留在视觉上;空间上的限制,隔开的空间人眼将无法观察;光谱上的限制,人眼只对电磁波谱中很窄的可见光区敏感。总之,人类的直观视觉只能有条件地提供图像信息。为了突破人眼的限制,很早以前人类就为开拓自身的视见能力进行了探索并取得了不少有成效的进展。灯具的出现改善了人类夜晚的照明环境,望远镜的出现为人类延伸了视见距离,显微镜的应用为人类观察微小物体提供了方便。但是,在扩展视见光谱范围、视见灵敏度和时空限制方面,人类则经历了漫长的时间才有所进展。这一进展是由光电成像技术的出现与进步带来的。光电成像技术是当今信息时代的重要高新技术之一。

§ 1.1 光电成像技术的产生及发展

光电成像技术是在人类探索和研究光电效应的进程中产生和发展的。追溯到 1873 年,史密斯(W. Smith)首先发现了光电导现象。随后,普朗克(Planck)于 1900 年提出了光的量子属性,而后在 1916 年,爱因斯坦(Einstein)完善了光与物质内部电子能态相互作用的量子理论,人类从此揭示了内光电效应的本质。在相继的大量研究工作中,伴随着近代物理学的发展,建立了半导体理论并研制出了各类光电器件。由此带来了内光电效应的广泛应用,开拓了人类探测光子的技术手段,为扩展人眼的视见光谱范围创造了基本条件。人类在探索内光电效应的同时也探索了外光电效应。1887 年,赫兹(Hertz)首先发现了紫外辐射对放电过程的影响,第二年哈尔瓦克(Hallwacks)实验证实了紫外辐射可使金属表面发射负电荷,其后由斯托列托夫(Столетов)、勒纳(Lenard)和爱因斯坦相继建立了光电发射的基本定律。在此基础上,1929 年,科勒(Koller)制成了第一个实用的光电发射体——银氧铯光阴极,随后利用这一技术研制成功了红外变像管,实现了将不可见的红外图像转换成可见光图像。此后,相继出现了紫外变像管和 X 射线变像管,使人类的视见光谱范围获得了更有成效的扩展。对外光电效应的深入研究使格利胥(Görlich)在 1936 年研制出铯铯光阴极,萨默(Sommer)在 1955 年研制出铯钾钠铯多碱光阴极。西蒙(Simon)在 1963 年提出了负电子亲和势光阴极理论,伊万思(Evans)等人在该理论的指导下,成功研制了负电子亲和势镱砷光阴极。这些高量子效率光



阴极的出现使微光图像的增强技术达到了实用阶段。利用像增强器,人类突破了视见灵敏阈的限制。

在发展光电成像技术的进程中,为扩展视界,人类从 20 世纪 30 年代开始致力于电视技术的研究。以弗兰兹沃思(Fransworth)开发的光电析像管为起端的电视摄像技术,为人类提供了不必面对目标即可观察的可能性。电视效能所具有的极大吸引力为它带来了极为迅速的进展。在短短的半个多世纪中,电视摄像器件从初期的析像器,逐步提高并发展出众多类型的摄像器件。相继出现的摄像器件有:超正析像管、分流摄像管、视像管、二次电子导电摄像管、硅靶摄像管、热释电摄像管等。

在发展电真空类型的摄像器件的同时,1970 年,玻伊尔(Boyle)和史密斯(Smith)开发出一种具有自扫描功能的电荷耦合器件(CCD),由此诞生了固体摄像器件,使电视摄像技术产生了质的飞跃,小型摄像机“飞进了”百姓家。特别是近年来 CMOS 成像器件的突起,使成像技术进一步走向小型化、低成本化和高清晰度化。与此同时,各种特殊用途的成像器件也在不断涌现和发展,尤其是在各种红外探测器件出现和获得较大的发展后,采用红外焦平面探测器件的凝视红外热成像技术将人类的视见能力扩展提高到一个新的阶段。

归结起来,上述种种改善人类视见能力的新技术都是以光电转换技术、光电子理论和半导体物理等为基础,通过各类光电成像器件来实现的。采用这一类器件完成成像过程的技术可以统称为光电成像技术。光电成像技术在学科上归属于光电子物理学。

§ 1.2 光电成像对视见光谱域的延伸

自然界中存在着大量的非可见的电磁波,这些电磁波也同可见光一样,构成了景物的辐射强度分布。例如在常温下(约 300 K),景物本身的热辐射构成了红外线辐射分布的图像。但人眼却不能直接感受到这种图像。存在于自然界的电磁波,其波长范围很宽。从波长仅有 10^{-16} m 的宇宙射线到波长为 10^8 m 的长电振荡,对于如此广泛的电磁波谱,如何利用其来传递图像信息并转换为可见光图像呢?这一问题只有借助于光电成像技术来获得解决。

经典理论可以证明,全部波段的电磁波都可成为图像信息的载体。这是因为全部电磁波所形成的电磁场都遵循同一形式的 Maxwell (麦克斯韦)方程组关系。Maxwell 方程组给出了关于电磁场分布的经典理论描述。其微分形式如下

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (1-1)$$



换为积分形式,则为

$$\left\{ \begin{array}{l} \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dV \\ \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \\ \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \int_S \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \end{array} \right. \quad (1-2)$$

式中,电位移 \mathbf{D} ,场强 \mathbf{E} ,磁感应强度 \mathbf{B} 和磁场强度 \mathbf{H} 都是矢量; V 为封闭曲面 S 的体积; ρ 为自由电荷的密度; S 为闭合曲线 L 的面积; \mathbf{J} 为传导电流密度。

Maxwell 方程组定量描述的电磁场取决于辐射源及传播介质的性质。一切辐射现象都可以通过求解一定边界条件下的 Maxwell 方程组进行确定。用于讨论光学成像过程的电磁场通常是处于不包括辐射源的理想非导电各向同性的介质中。介质的介电常数和磁导率分别为 ϵ 和 μ ,由此可代入条件

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \rho = 0 \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{J} = 0 \end{array} \right. \quad (1-3)$$

获得简化的 Maxwell 方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} = \mu \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (1-4)$$

式中,电场矢量 \mathbf{E} 和磁场矢量 \mathbf{B} 都是时间 t 和空间点 \mathbf{r} 矢量的函数。利用上面的方程组可以证明两个矢量函数的所有分量都满足波动方程

$$\left[\nabla^2 - \mu \epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (1-5)$$

$$\left[\nabla^2 - \mu \epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (1-6)$$

研究电磁波传递图像信息需要确定物空间场分布与像空间场分布之间的定量关系。这一问题可以在已知初始条件及边界条件下通过求解波动方程解决。但是由于解析困难,所以需要进行线性变换处理。

由于与 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 及 $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ 相应的复解矢量也满足波动方程,故它们的傅氏变换 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 及 $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ 分别满足 Helmholtz(亥姆霍兹)方程



$$[\nabla^2 + \mu \varepsilon \omega^2] \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (1-7)$$

$$[\nabla^2 + \mu \varepsilon \omega^2] \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (1-8)$$

式(1-7)的一个解是平面波

$$\mathbf{E}(\mathbf{r} \cdot \omega) \propto \exp(-j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) \quad (1-9)$$

式中, \mathbf{K} 为波矢量, 其标量 $|\mathbf{K}| = \mu \varepsilon \omega$, ω 称为空间圆频率。

借助于式(1-7)对所有可能的频率和波矢量的平面波连续谱进行加权求和即可得到式(1-5)的通解

$$\mathbf{E}(\mathbf{r} \cdot t) = \int \mathbf{E}(\mathbf{r} \cdot \omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (1-10)$$

同理也可求出式(1-6)的通解

$$\mathbf{B}(\mathbf{r} \cdot t) = \int \mathbf{B}(\mathbf{r} \cdot \omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (1-11)$$

上述数学过程所描述的物方和像方分布函数之间的关系表明, 广泛的电磁波都具有同一的传播规律, 因此, 通过经典电磁场理论可以处理电磁波的全部成像问题, 并且可以用 Poynting (波印廷) 矢量 \mathbf{w} 来表示电磁能密度

$$\mathbf{w} = \frac{1}{\mu} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (1-12)$$

应用波动方程讨论电磁波成像可知, 只要像空间两点的距离大于衍射极限即可分辨其间的光强分布, 也就是能构成图像信息。根据简化的电磁波衍射理论模型, 两个像点间能够被分辨的最短距离 d 为

$$d = \frac{0.61\lambda}{n' \sin \theta'} \quad (1-13)$$

式中, λ 为电磁波的波长; n' 为电磁波在像空间的介质折射率; θ' 为电磁波在像方的会聚角。从这一衍射公式可知, 当电磁波的波长增大时, 所能获得的图像分辨力将显著降低。对波长超过毫米量级的电磁波而言, 用有限孔径和焦距的成像系统所获得的图像分辨力将会很低。因此, 实际上已排除了波长较长的电磁波的成像作用。目前光电成像对光谱长波谱的延伸仅扩展到亚毫米波成像。

除了衍射造成分辨力下降限制了将长波电磁波用于成像外, 用于成像的电磁波也存在一个短波限。通常把这个短波限确定在 X 射线 (Roentgen 射线) 与 γ 射线 (Gamma 射线) 波段。这是因为波长更短的辐射具有极强的穿透能力, 所以, 宇宙射线难以在普通条件下聚焦成像。

上述分析告诉我们, 通常用于光电成像的电磁波, 其波长范围是从无线电超短波到 γ 射线。有效波谱区是: 亚毫米波、红外辐射、可见光、紫外辐射、X 射线、 γ 射线等。



§ 1.3 光电成像技术的应用范畴

人们采用光电成像技术突破了人类视觉的部分限制,特别是突破了人眼在低照度和有限光谱响应下的视觉限制。同时,视觉机能在时间和空间两个方面也得到了扩展。时间上的扩展如数码照相、印刷、静电复印、录像像等。空间上的扩展如电视、微光观察镜等可以将肉眼不能直接观察到的远处的图像传输到视网膜上。

图像记录以随时可看和长时间保存为特点,图像传输以即时可看和长距离传输为特点。两者的特点可以互补,如在电视方面发展了图像记录-录像技术,在照相方面发展了图像传输-传真技术等。

除了视觉机能的空问扩大和时间延长,即图像传输和图像记录技术外,正在发展扩大的是视觉识别技术,例如,将超出人类视觉响应能力的红外和紫外图像转换成可见光图像或者将细节模糊的图像处理成细节清晰的图像处理技术。由此可见,图像与视觉是密切相关的。

随着科学技术的迅速发展,包括微光与红外成像技术在内的光电成像技术受到普遍重视且不断地开拓着新的应用领域,光电成像技术的应用如表 1-1 所示。

表 1-1 光电成像技术的应用

| 应用波段 | 应用类型 | 使用部门或领域 | 应 用 | |
|----------|----------------|------------------|---|---|
| 可见光谱区的应用 | 观察黑暗过程 | 警 务 | 隐蔽监视某地点,监视记录暗藏的犯罪活动 | |
| | | 心理学和医学 | 行为状态研究的记录 | |
| | | 军 事 | 水下监视、隐蔽的远程监视记录,夜间射击控制 | |
| | | 科学研究工作 | 记录空气动力学、核物理等方面的高速微光现象,记录空间探测的确定方位,水下自然现象的记录 | |
| | 材料折射、色散和透明性的拍照 | 材料检查 | 应变光学 | |
| | | 天文学 | 天像的记录 | |
| | 显微镜工作 | 冶金学和地质学 | 厚且不透明断面内的现象的快速记录和一般记录 | |
| | | 动物学 | 在极微光下发生的现象的记录 | |
| | 红外辐射的应用 | 在红外光照明条件下,观察黑暗过程 | 照相工业 | 在照相乳胶不起作用的光谱区进行目视工作,对乳胶和相纸进行试验,黑暗中修理发生故障的仪器 |
| | | | 动物学 | 研究动物,特别是夜间活动的动物的行为 |
| 公 安 | | | 管理某一地区,夜间巡视,工事的防御 | |
| 心理学和医学 | | | 研究某种行为 | |



续表

| 应用波段 | 应用类型 | 使用部门或领域 | 应用 |
|---------|------------------------------|---|--|
| 红外辐射的应用 | 利用与可见光相比有不同折射、色散和透明度的红外照相或观察 | 材料检查 | 应变光学 |
| | | 动物学 | 发射红外线(例如甲壳虫)的研究 |
| | | 法律技术 | 证据的检查与提取 |
| | | 艺术史 | 赝品检查 |
| | | 测量学 | 扩展浓雾大气的可见区 |
| | | 光学 | 红外区双折射的研究 |
| | | 天文学 | 行星和恒星星像的记录 |
| | 红外显微镜工作 | 生物学和动物学 | 光敏制品的鉴定 |
| | | 冶金学和地质学 | 金属或矿物断面的检查 |
| | 使温度高于绝对零度产生的热辐射成为可见的工作 | 材料检查 | 机器上存在热应力部分的温度分布 |
| | | 消防 | 研究起火原因,寻找火的中心区域 |
| | | 钢铁工业 | 炼钢、轧钢过程的监控,高炉料面温度的测定、热风炉破损的诊断,出炉板坯温度的测量等 |
| | | 石化工业 | 输油管道状态检查,焦炭塔物料界面、HF 储罐物料界面的检测,动力设备热泄漏及保温结构状况的检测等 |
| 电力工业 | | 输电线、电力设备热状态检查,故障诊断 | |
| 医学 | | 癌症及与温度变化有关的病变早期诊断 | |
| 军事 | | 洲际导弹的探测、识别、跟踪,拦截武器的制导,大气层内外核爆炸的探测,战术侦察、观瞄、火控、跟踪制导和报警等 | |
| 紫外辐射的应用 | 利用衍射、物质辐射和透过辐射等性质的紫外照相 | 材料检查 | 利用液体磷光的表面伤痕记录,瞬时薄膜现象的记录 |
| | | 动物学和生物学 | 记录在辐射影响下动物活动和植物生长的变化情况,快速变化的生理过程的非干涉研究等 |
| | | 法律技术 | 证据的检查与提取 |
| | | 军事 | 利用紫外辐射的预、告警等 |
| | | 光学 | 用菲涅耳波带片成像 |
| | | 天文学 | 用装在人造卫星上的望远镜进行天体的紫外照相 |
| | | 物理学 | 等离子现象和高能现象的记录 |
| | 紫外显微镜工作 | 动物学 | 标本横断面和有关现象的研究 |
| | | 冶金、地质学 | 金属和矿物断面检查 |



续表

| 应用波段 | 应用类型 | 使用部门或领域 | 应 用 |
|-----------|--------|----------|---|
| X 射线谱段的应用 | X 射线照相 | 材料检查 | 检查静止和运动物体两者的内部情况,以及超高速运动物体的状态检查 |
| | | 动物学和生物学 | 利用低辐射强度的放射性跟踪,记录动、植物内部的活动情况 |
| | | 天文学 | 利用人造卫星研究 X 射线辐射 |
| | | 医 学 | 病灶与创伤的检查和记录 |
| | | 机场、海关的安检 | 违禁品检查 |
| | | 物理学 | 快速结晶体取向的劳厄图形的直接观察,瞬时效应的记录;用电视技术进行 X 射线图形的远程显示;根据谱线宽度的变化测量结晶的程度,高能现象的记录等 |

由表 1-1 中所列举的光电成像技术应用情况可以看出,光电成像技术就是利用光电变换和信号处理技术获取目标图像。它在工农业生产、科学研究和国防建设中占有重要地位。综上所述,光电成像技术所研究的内容可以概括为以下四个方面:

- ① 在空间上扩大人类视觉机能的图像传输技术;
- ② 在时间上扩大人类视觉能力的图像记录、存储技术;
- ③ 扩大人类视觉光谱响应范围的图像变换技术;
- ④ 扩大人类视觉灵敏机能的图像增强技术。

就获取目标图像的基本过程而论,光电成像技术所涉及的内容相当广泛,主要包括:

- ① 各种辐射源及目标、背景特性;
- ② 大气光学特性对辐射传输的影响;
- ③ 成像的光学系统;
- ④ 光辐射探测器及制冷器;
- ⑤ 信号的电子学处理;
- ⑥ 图像的显示;
- ⑦ 人眼的视觉特性。

§ 1.4 光电成像器件的分类

光电成像器件的结构及工作原理有很大差异,按其工作方式可以分为如下两大类。