



普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

# 光电子技术及其应用

石顺祥 刘继芳 编著

张贵忠 主审



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》

普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

# 光电子技术及其应用

主任：岳春林 主编：石顺祥 刘继芳 编著

副主任：金亚秋 教授 张贵忠 主审

郝跃 教授 西安电子科技大学

严晓浪 教授 浙江大学

胡华福 教授 西安电子科技大学

要员：(按姓氏笔画)

王卫东

王志华

毛丰发

文玉梅

匡敏

仲顺安

任晓敏

刘纯亮

杨冬晓

时龙兴

余江

邱旭

邹雪城

应质峰

宋梅

教授 西安电子科技大学

教授 浙江大学

教授 河北工业大学

教授 哈尔滨工业大学

教授 东南大学

教授 中国传媒大学

教授 湖南大学

教授 贵州大学

教授 华南理工大学

科学出版社

元 06.00 定价

(北京) 北京

复旦大学 谢泉

北京邮电大学 蔡敏

TN2-43

5539

## 内 容 简 介

本书系统、全面地介绍了光电子技术及其相关应用。第1章介绍光的基本属性,强调光的相干性,为全书讨论的内容奠定基础;第2~4章介绍激光产生的基本理论与典型激光器,激光应用中的基本技术,激光在大气、水下和光纤中的传输特性;第5~7章介绍光电子技术应用中常用的无源器件,光电探测技术及器件,以及光电子技术在精密测量、光信息处理、激光通信、激光雷达与制导、光纤传感、激光加工等领域中的应用。

本书可作为光电子技术相关专业的本科生教材,以及电子信息类非光电子技术专业的选修课教材,也可作为从事光电子技术及应用的工程技术人员参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

光电子技术及其应用/石顺祥,刘继芳编著. —北京:科学出版社,2010.1  
(普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材)  
ISBN 978-7-03-026567-8

I. ①光… II. ①石…②刘… III. ①光电子技术-高等学校-教材  
IV. ①TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 016261 号

责任编辑:匡 敏 张 濮 潘继敏 / 责任校对:郑金红  
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 2 月第一次印刷 印张:18 1/2

印数:1—4 000 字数:485 000

定价:33.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》

## 编委会

顾问:姚建铨 中国科学院院士 天津大学  
蔡惟铮 国家级教学名师 哈尔滨工业大学

主任:吕志伟 教授 哈尔滨工业大学

副主任:金亚秋 教授 复旦大学

郝跃 教授 西安电子科技大学

严晓浪 教授 浙江大学

胡华强 编审 科学出版社

## 委员:(按姓氏笔画为序)

王卫东 教授 中国科学技术大学 张兴 教授 北京大学

王志华 教授 清华大学 张怀武 教授 电子科技大学

毛军发 教授 上海交通大学 张贵忠 教授 天津大学

文玉梅 教授 重庆大学 张雪英 教授 太原理工大学

匡敏 副编审 科学出版社 陈弟虎 教授 中山大学

仲顺安 教授 北京理工大学 陈徐宗 教授 北京大学

任晓敏 教授 北京邮电大学 陈鹤鸣 教授 南京邮电大学

刘纯亮 教授 西安交通大学 欧阳征标 教授 深圳大学

杨冬晓 教授 浙江大学 都思丹 教授 南京大学

杨瑞霞 教授 河北工业大学 高勇 教授 西安理工大学

时龙兴 教授 东南大学 郭树旭 教授 吉林大学

何伟明 教授 哈尔滨工业大学 黄卡玛 教授 四川大学

余江 教授 云南大学 崔一平 教授 东南大学

邸旭 教授 长春理工大学 逯贵祯 教授 中国传媒大学

邹雪城 教授 华中科技大学 曾云 教授 湖南大学

应质峰 教授 复旦大学 谢泉 教授 贵州大学

宋梅 教授 北京邮电大学 蔡敏 教授 华南理工大学

材料、能源和信息是 21 世纪的三大支柱产业,电子科学与技术是电子工程和电子信息技术发展的基础学科。目前,许多发达国家,如美国、德国、日本、英国、法国等,都竞相将电子科学与技术相关领域纳入了国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术等方向的研究也给予了高度重视,在多项国家级战略性科技计划中,如“863 计划”、“973 计划”、国家科技攻关计划、国家重大科技专项等,都有大量立项。在近几年发布的国务院《2006—2020 年国家信息化发展战略》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,对我国的集成电路(特别是中央处理器芯片)、新一代信息功能材料及器件、高清晰度大屏幕平板显示、激光技术等关键领域都提出了明确目标。

电子科学与技术主要研究制造电子、光电子的各种材料及元器件,以及集成电路、集成电子系统和光电子系统,并研究开发相应的设计和制造技术。它涵盖的学科范围很广,是多学科交叉的综合性学科。现在,教育部本科专业目录中,电子科学与技术专业涵盖了微电子技术、光电子技术、物理电子技术、电子材料与元器件及电磁场与微波等专业方向。随着学科的交叉发展和产业的整合,各专业方向已彼此渗透交融。如何拓宽专业方向?如何体现专业特色?是当前我国高校电子科学与技术专业在办学方面所迫切需要探讨的问题。教育部电子科学与技术专业教学指导分委员会起草的《普通高等学校电子科学与技术本科指导性专业规范》,对本专业的核心知识领域和知识单元的覆盖范围作了规定,旨在引导高等学校电子科学与技术专业在办学方向与人才培养方面探索新的模式,不断提高教学质量,增强高校教学的创新能力,更好地培养知识、能力、素质全面协调发展的,适合我国电子科学与技术各领域不同层次发展需求的有用人才。

教育部为了推进“质量工程”,自 2007 年 10 月开始,先后第三批遴选了国家级特色专业建设点。目前,有三十余个院系被批准为电子科学与技术国家级特色专业建设点。在教材建设方面,2008 年 10 月,教育部高教司在《关于加强“质量工程”本科特色专业建设的指导性意见》中指示:“教材建设要反映教学内容改革的成果,积极推进教材、教学参考资料和教学课件三位一体的立体化教材建设,选用高质量教材,编写新教材。”为了适应新形势下对电子科学与技术领域人才培养的需求,本届电子科学与技术教学指导分委员会经过广泛深入调研,依托电子科学与技术专业国家级、省级特色专业建设点,与科学出版社共同组织出版本套《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》,旨在贯彻专业规范和教学基本要求,总结和推广各特色专业建设点的教学经验和教学成果,以提高我国电子科学与技术专业本科教学的整体水平。

本套丛书在组织编写中,重点考虑了以下几方面的特色:

1. 体现专业特色,贯彻专业规范和教学基本要求。依托“国家级、省级特色专业建设点”,汇总优秀教学成果,将特色专业建设的内容、国内外科研教学的成果、电子科学与技术方向的专业规范与教学基本要求结合起来,教材内容安排围绕专业规范,体现核心知识单元与知识点。

2. 按照分类指导原则,满足多层面的需求。针对同一类课程,根据不同的教学层次(普通院校、重点院校或研究型大学、应用型大学)和学时要求(多学时、少学时),涵盖不同范围的拓展知识单元,编写适合不同层次需求的教材。注重与先修课程、后续课程的有机衔接,每本教材在重视系统性和完整性的基础上,尽量减少内容重复。

3. 传承精品,吐故纳新。本套丛书吸纳了科学出版社2004年出版的《高等院校电子科学与技术专业系列教材》中受到高校师生欢迎的精品教材。在保证前一版教材准确诠释基本概念、基本理论的基础上,新一版教材更新内容,注重反映本学科领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

4. 拓宽专业基础,面向工程应用,加强实践环节。适当拓宽专业基础知识的范围,以增强学生的适应性;面向工程应用,突出工科特色,反映新技术、新工艺;注重实践环节的设置,以促进学生的实际动手能力和创新能力的培养。

5. 注重立体化建设。本套丛书除了主教材外,还将逐步配套学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等,为任课教师提供丰富的配套教学资源,方便教师教学,同时帮助学生复习与自学,使教材更加易教易学。

本套丛书的编写汇聚了全国高校的优势资源,突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关高校教务处及学院的帮助,在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求,我们将对本套丛书不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议!

吕志伟

教育部高等学校电子科学与技术专业  
教学指导分委员会主任  
哈尔滨工业大学教授

## 前言

21 世纪,人们进入了一个崭新的时代——信息时代。信息时代的鲜明特征是支撑这个时代的重要基础产业(如能源、交通、材料、信息等)将得到高度发展,能充分满足社会发展和人民生活多方面的需求。

与信息产业相应的信息科学的基础是电子学与电子技术、光子学与光子技术。电子学与电子技术是 20 世纪发展起来的科学技术,现已处于高度发展的水平,广泛地应用于社会各个领域,并且已渗透到日常生活之中,目前正由微电子学与技术向纳米电子学与技术、分子电子学与技术发展。光子学与光子技术可以认为是从 1960 年激光器诞生才开始出现的一门新型科学与技术,目前正处于成长与发展时期。光子学的概念是在 1970 年由荷兰科学家 Polder-vaart 首先提出来的,我国著名科学家龚祖同、钱学森在 70 年代就已指出,“光子学是一门与电子学平行的科学”。作为光子学与光子技术发展的一个阶段,目前的光电子学与光电子技术正迅速地发展。

一般认为,光电子学与光电子技术是光学与电子学的结合。光电子学与光电子技术在理论上主要研究光与物质的相互作用特性,在应用上主要研究光的产生、传输、控制、探测及各种应用。需要指出的是,光电子学与光电子技术作为高新科学技术的产生和发展始于激光器的诞生;光电子学与光电子技术是伴随微电子学与微电子技术、材料学等诸多学科的发展而发展起来的;光电子学与光电子技术的快速发展和遍及各个领域的广泛应用,使其不断地向其他学科领域渗透,同时也推动着其他学科的发展。

鉴于目前我国光电子学与光电子技术的发展及地位,除了从事光电子技术专业的学生需要深入系统地学习和研究外,许多将来从事诸如微电子技术、材料、电子科学与技术等相关专业工作的非光电子(激光)技术专业的学生,也需要对基本概念和基本知识有了解。因此,需要有一本专门针对非光电子(激光)技术专业学生系统学习光电子(激光)技术的教科书。本书就是为此目的编写的。

作者长期在西安电子科技大学从事光电子技术专业教学工作,为西安电子科技大学非光电子技术专业学生讲授“光电子技术”课程,并于 1994 年和 2000 年分别作为“八五”、“九五”全国电子信息类专业部级规划教材,编著出版了两本《光电子技术及其应用》。在此基础上,作者编写了本书。全书共分 7 章,较全面、系统地介绍有关激光产生的基本理论基础,典型的激光器件,光电子技术应用中的基本激光技术和光学元器件,光在光纤、大气和水下传输,光电探测技术和器件,以及有关光电子技术在精密测量、光学全息及光信息处理、光纤通信、激光雷达与制导、光纤传感、激光加工等诸多领域内的应用。根据非光电子技术专业本科生的专业基础知识,本书的编写着重于基本概念和物理模型,尽量避免繁杂的数学推导。为扩大学生的知识面,有利于学科交叉,本书取材广泛,并尽可能反映光电子技术的最新进展。此外,在每一章后还备有一些思考题和参考文献,以帮助读者自学和进一步研究。

由于编写水平有限,书中难免存在一些疏漏,殷切期望广大读者批评指正。

作者

## 目 录

## 丛书序

## 前言

## 第1章 光的基本属性..... 1

## 1.1 光的波粒二重性..... 1

## 1.2 光的电磁理论..... 2

## 1.2.1 光电磁波..... 2

## 1.2.2 电磁波谱..... 4

## 1.2.3 光的能量及其量度单位..... 5

## 1.3 光的相干性..... 10

## 1.3.1 基本概念..... 10

## 1.3.2 普通光源的相干性..... 12

## 1.3.3 激光器的相干性..... 15

## 思考题 1..... 15

## 参考文献..... 16

## 第2章 激光器..... 17

## 2.1 激光器的组成..... 17

## 2.2 激光器工作原理..... 18

## 2.2.1 激光工作物质的增益特性..... 18

## 2.2.2 光的受激放大与振荡..... 22

## 2.2.3 光学谐振腔及模式特性..... 24

## 2.2.4 激光器的工作特性..... 31

## 2.2.5 激光特性..... 36

## 2.3 高斯光束的传输..... 39

## 2.3.1 基模高斯光束..... 39

## 2.3.2 高斯光束的传输规律..... 40

## 2.3.3 高斯模的匹配..... 45

2.3.4 利用  $q$  参数讨论高斯光束的传输..... 45

## 问题——ABCD 定则..... 45

## 2.4 典型激光器..... 49

## 2.4.1 激光器的分类..... 49

## 2.4.2 固体激光器..... 50

## 2.4.3 气体激光器..... 60

## 2.4.4 染料激光器..... 70

## 2.4.5 半导体激光器..... 73

## 思考题 2..... 81

## 参考文献..... 82

## 第3章 激光基本技术..... 83

## 3.1 几种物理效应..... 83

## 3.2 激光调制及激光调制器..... 88

## 3.3 激光偏转技术..... 96

## 3.4 激光脉冲技术..... 100

## 3.4.1 调 Q 技术..... 101

## 3.4.2 锁模技术..... 105

## 3.5 激光选模技术..... 113

## 3.5.1 横模选择技术..... 114

## 3.5.2 纵模选择技术..... 116

## 3.6 激光稳频技术..... 118

## 3.6.1 激光器的频率稳定性和再现度..... 119

## 3.6.2 影响频率稳定的因素..... 119

## 3.6.3 稳频技术..... 120

## 3.7 激光频率变换技术..... 123

## 3.7.1 非线性光学概述..... 123

## 3.7.2 光倍频——二次谐波产生(SHG)..... 125

## 3.7.3 光参量振荡器..... 128

## 思考题 3..... 131

## 参考文献..... 131

## 第4章 激光传输..... 133

## 4.1 光在介质中的传播..... 133

## 4.1.1 光在介质表面上的反射和折射..... 133

## 4.1.2 光在单层介质膜上的反射..... 135

## 4.1.3 光在晶体中的传播规律..... 137

## 4.2 激光在大气中的传播..... 137

## 4.2.1 大气衰减..... 138

## 4.2.2 大气湍流效应..... 141

## 4.3 激光在水中的传输..... 143

## 4.3.1 激光在水中传输的衰减特性..... 144

## 4.3.2 激光在水中传输的散射效应..... 145

|                            |     |                            |     |
|----------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 4.4 激光在光纤中的传输 .....        | 146 | 6.2.2 光电导探测器 .....         | 206 |
| 4.4.1 光纤结构 .....           | 146 | 6.2.3 光伏探测器 .....          | 210 |
| 4.4.2 光在光纤中的传播原理 .....     | 147 | 6.2.4 特种光电探测器 .....        | 219 |
| 4.4.3 光纤的传输特性 .....        | 155 | 6.3 光电探测技术 .....           | 223 |
| 4.4.4 特殊光纤 .....           | 157 | 6.3.1 直接探测技术 .....         | 223 |
| 思考题 4 .....                | 163 | 6.3.2 光外差探测技术 .....        | 225 |
| 参考文献 .....                 | 163 | 思考题 6 .....                | 231 |
| <b>第 5 章 常用光学元件</b> .....  | 165 | 参考文献 .....                 | 232 |
| 5.1 基本光学元器件 .....          | 165 | <b>第 7 章 光电子技术应用</b> ..... | 233 |
| 5.1.1 反射器 .....            | 165 | 7.1 精密测量应用 .....           | 233 |
| 5.1.2 法布里-珀罗标准具 .....      | 168 | 7.1.1 干涉测长 .....           | 233 |
| 5.1.3 光栅 .....             | 170 | 7.1.2 激光测径 .....           | 234 |
| 5.1.4 偏振器 .....            | 174 | 7.1.3 激光测速 .....           | 235 |
| 5.1.5 波片 .....             | 177 | 7.1.4 转动测量 .....           | 237 |
| 5.2 光隔离器及环流器 .....         | 178 | 7.2 激光全息及光信息处理 .....       | 239 |
| 5.2.1 光隔离器 .....           | 178 | 7.2.1 激光全息 .....           | 239 |
| 5.2.2 环流器 .....            | 179 | 7.2.2 光学信息处理 .....         | 247 |
| 5.3 光纤无源器件 .....           | 181 | 7.3 激光通信 .....             | 253 |
| 5.3.1 自聚焦透镜 .....          | 181 | 7.3.1 光纤通信 .....           | 253 |
| 5.3.2 光纤定向耦合器 .....        | 184 | 7.3.2 激光大气通信 .....         | 259 |
| 5.3.3 光合波分波器 .....         | 187 | 7.3.3 激光卫星通信 .....         | 260 |
| 5.3.4 光衰减器 .....           | 188 | 7.3.4 激光水下通信 .....         | 262 |
| 5.3.5 光开关 .....            | 189 | 7.4 光纤传感 .....             | 263 |
| 思考题 5 .....                | 191 | 7.4.1 光纤传感技术 .....         | 263 |
| 参考文献 .....                 | 191 | 7.4.2 几种典型光纤传感器 .....      | 265 |
| <b>第 6 章 光电探测技术</b> .....  | 193 | 7.5 光信息存储技术 .....          | 272 |
| 6.1 光电探测物理基础 .....         | 193 | 7.5.1 光盘存储技术 .....         | 272 |
| 6.1.1 光电探测的物理效应 .....      | 193 | 7.5.2 激光唱机 .....           | 275 |
| 6.1.2 光电转换定律 .....         | 197 | 7.6 激光雷达和制导 .....          | 276 |
| 6.1.3 光电探测器的特性参数和噪声 .....  | 198 | 7.6.1 激光雷达 .....           | 277 |
| 6.2 光电探测器件 .....           | 202 | 7.6.2 激光制导 .....           | 279 |
| 6.2.1 光电倍增管 .....          | 202 | 7.7 激光在工业加工中的应用 .....      | 279 |
| 6.2.2 光电导探测器 .....         | 206 | 参考文献 .....                 | 286 |
| 6.2.3 光伏探测器 .....          | 210 |                            |     |
| 6.2.4 特种光电探测器 .....        | 219 |                            |     |
| 6.3 光电探测技术 .....           | 223 |                            |     |
| 6.3.1 直接探测技术 .....         | 223 |                            |     |
| 6.3.2 光外差探测技术 .....        | 225 |                            |     |
| 思考题 6 .....                | 231 |                            |     |
| 参考文献 .....                 | 232 |                            |     |
| <b>第 7 章 光电子技术应用</b> ..... | 233 |                            |     |
| 7.1 精密测量应用 .....           | 233 |                            |     |
| 7.1.1 干涉测长 .....           | 233 |                            |     |
| 7.1.2 激光测径 .....           | 234 |                            |     |
| 7.1.3 激光测速 .....           | 235 |                            |     |
| 7.1.4 转动测量 .....           | 237 |                            |     |
| 7.2 激光全息及光信息处理 .....       | 239 |                            |     |
| 7.2.1 激光全息 .....           | 239 |                            |     |
| 7.2.2 光学信息处理 .....         | 247 |                            |     |
| 7.3 激光通信 .....             | 253 |                            |     |
| 7.3.1 光纤通信 .....           | 253 |                            |     |
| 7.3.2 激光大气通信 .....         | 259 |                            |     |
| 7.3.3 激光卫星通信 .....         | 260 |                            |     |
| 7.3.4 激光水下通信 .....         | 262 |                            |     |
| 7.4 光纤传感 .....             | 263 |                            |     |
| 7.4.1 光纤传感技术 .....         | 263 |                            |     |
| 7.4.2 几种典型光纤传感器 .....      | 265 |                            |     |
| 7.5 光信息存储技术 .....          | 272 |                            |     |
| 7.5.1 光盘存储技术 .....         | 272 |                            |     |
| 7.5.2 激光唱机 .....           | 275 |                            |     |
| 7.6 激光雷达和制导 .....          | 276 |                            |     |
| 7.6.1 激光雷达 .....           | 277 |                            |     |
| 7.6.2 激光制导 .....           | 279 |                            |     |
| 7.7 激光在工业加工中的应用 .....      | 279 |                            |     |
| 参考文献 .....                 | 286 |                            |     |

# 第 1 章

## 光的基本属性

我们生活在一个充满着光明的世界里,光是我们最熟悉的现象之一,没有光就没有人类。那么,光是什么?光的本质是什么?光的基本属性是什么?这是一个非常基本的问题,只有了解了光的本质,认识了光的基本属性,才能更深刻地理解光电子学、光电子技术。

人们对于光的本质、基本属性的认识过程,也就是光科学发展的历史过程。回顾整个光学发展的历史进程,人们一直围绕着光的粒子性和波动性进行着激烈地争论。

早在 17 世纪,西方对于光的本质的认识就形成了两种对立的学说:一种是以牛顿(Newton)为首的微粒说,他们认为光是直线传播的微粒流;另一种是以惠更斯(Huygens)为首的波动说,他们认为光是在弹性介质中传播的波动。在当时的生产水平条件下,这两种学说都可以解释一定的光学现象,但又显示不出哪种理论更优越。由于牛顿在科学界的威望极高,加之微粒说能较自然地说明光的直进现象,微粒说一时占了上风,致使波动说观点被忽视,甚至被遗忘近百年。

到了 19 世纪,人们进行了有关光的干涉、衍射和偏振等现象的实验,这些现象都是光的波动性的基本特征,与微粒说格格不入。直到 19 世纪中期,麦克斯韦(Maxwell)电磁理论的提出和发展,才确认光是一种电磁波,否定了惠更斯的机械波动说。19 世纪末,迈克耳孙(Michelson)干涉实验进一步摒弃了有关“以太”的假设。

20 世纪初,爱因斯坦(Einstein)量子理论的提出,开创了人们对光属性的深层次认知。由光的干涉、衍射等现象所证实的光的波动性,以及由黑体辐射、光电效应及康普顿效应所证实的光的粒子性,都客观地反映了光的特性,光实际上具有波粒二重性。这两种看起来完全不同的属性的统一,实际上是一切微观粒子的共同特性,这个观点使人们对光的本质有了更深刻的认识。并且,正是在这个理论的推动下,1960 年激光问世,一度沉寂的光学又焕发了青春,开始了一个新的发展时期。

应当指出的是,人们对光的本性的认识还远远没有完结,对光的本性、传播规律及光与物质相互作用的研究,仍然是一个不断探索、不断深入的研究课题。

### 1.1 光的波粒二重性

1905 年,爱因斯坦在普朗克量子假说的基础上,提出关于光的本性的光子假说。理论和实验都已证明,光子和所有微观粒子一样,具有波粒二重性。

#### 1. 光子的粒子性

根据爱因斯坦理论,光在发射、吸收及空间传播时均具有粒子性,一束光是以光速运动的光子流,每一个光子的能量是

$$\epsilon = h\nu = \hbar\omega \quad (1.1-1)$$

式中,  $h$  是普朗克常量,  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ,  $\nu$  是光的频率,  $\omega$  是光的圆频率。光的能量密度或光强  $I$  (单位时间内垂直通过单位面积的光能) 决定于单位时间内通过的光子数  $N$ , 其表示式为

$$I = Nh\nu \quad (1.1-2)$$

光子除了具有能量外,还具有质量  $m$  和动量  $p$ 。根据狭义相对论,光子的动量大小为

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.1-3)$$

式中,  $m_0$  为光子的静止质量,  $v$  为光子的速度,  $c$  为真空中的光速。由相对论的能量和动量关系

$$\epsilon^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (1.1-4)$$

因为光子的静止质量为零,故光子的动量大小为

$$p = \frac{\epsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} \quad (1.1-5)$$

由于光子具有动量,所以光作用于物体上时,将产生光压力。假设单位体积内的光子流能量为  $W$ ,利用动量原理可以求得垂直于物体单位面积上的光子流作用力为

$$P_{\text{光压}} = (1+R)W \quad (1.1-6)$$

式中,  $R$  为物体表面反射率。考虑到

$$W = nh\nu = \frac{I}{c} \quad (1.1-7)$$

式中,  $n$  为单位体积内的光子数,则光压  $P_{\text{光压}}$  可表示为

$$P_{\text{光压}} = (1+R) \frac{I}{c}$$

因为光的传播速度非常大,所以对于各种实际上可以得到的光能流而言,光压都很小。例如,晴天直射的日光被完全吸收时,它所产生的光压为  $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ ,所以觉察到它是十分困难的。

## 2. 光子的波动性

描述光子波动特征的物理量是频率  $\nu$  和波长  $\lambda$ 。光子具有波动特性表现为它在空间运动轨迹的不确定性,即在考察每个光子的运动时,光子没有确定的轨迹,但是在考察光子束的全部光子的运动时,光子的运动就表现出与经典电磁波动理论计算结果一致的规律性。

利用统计的观点,可以将光子的波动性与粒子性统一起来:一方面,光子具有集中的能量、质量和动量,也就是具有微粒性;另一方面,它们在空间各处出现,各有一定的概率,由这个概率可以计算出它们的空间分布,而这种空间分布与波动的概念一致。这就是光子的波粒二重性。事实上,这种二重性(二象性)是所有微观粒子所共有的特性。

描述光子的粒子性物理量  $\epsilon$  和  $p$  与波动性物理量  $\nu$  和  $\lambda$  之间,存在如下关系:

$$\epsilon = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad (1.1-8)$$

## 1.2 光的电磁理论

光的电磁理论认为,光是一种电磁波。由于目前光电子技术中所遇到的绝大部分问题,都可以将光视为电磁波,采用麦克斯韦电磁理论处理,所以,若无特殊说明,本书内容的讨论均按该理论体系进行。

### 1.2.1 光电磁波

麦克斯韦电磁理论指出,光是一种光频电磁波,它具有电磁波的一切特性,并且这些特性

都可以从电磁场的基本方程,即麦克斯韦方程组推导出来。

### 1. 光波的基本形式

求解麦克斯韦方程组,可以得到光波的几种特殊形式:平面波、球面波和柱面波。

平面波波动的复数表示式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{E}_0 e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \mathbf{H}_0 e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \end{aligned} \quad (1.2-1)$$

式中,  $\mathbf{E}_0$  和  $\mathbf{H}_0$  分别为光波的电场强度和磁场强度复振幅,  $\mathbf{k}$  为光波的波矢量,其大小(称为波数)为  $k = 2\pi/\lambda$ , 方向为光波的传播方向。可以证明,平面波具有横波特性,其电场矢量和磁场矢量的振动方向垂直于光波的传播方向,且  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  和  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$  的相位相同、振动方向互相垂直。由于通常的光与物质相互作用均由电场强度引起(电效应),所以,光波可以只采用电场描述。

如果光波是由点源发出的,则该光波是球面波,它的表示式为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mathbf{E}_1}{r} e^{-i(\omega t - kr)} \quad (1.2-2)$$

式中,  $\mathbf{E}_1$  是距点源单位距离处的电场强度。

如果光波是由一无限长的线光源发出的,它的波阵面具有柱面形式,其表示式为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mathbf{E}_1}{\sqrt{r}} e^{-i(\omega t - kr)} \quad (1.2-3)$$

### 2. 光的波动性

光的波动性主要表现在它具有干涉、衍射及偏振等特性。

当频率相同、振动方向相同、相位相同或具有固定相位关系的光波相遇时,在重叠的区域内将产生稳定的强弱分布,这就是干涉现象。光的干涉现象在日常生活中会经常遇到,例如,肥皂泡和水面上的油膜所呈现的美丽色彩;将两玻璃片擦干净后贴在一起并压紧,会出现不规则的彩色条纹,这都是光波干涉的结果。

光的衍射也是光的波动性的标志之一,它有两个主要特点:①光波经过障碍物后,其传播方向会发生变化,会在某种程度上绕到其几何阴影区域中去;②在几何阴影区附近,光波的强度会有起伏。但在日常生活中所见者,多为光的直线传播和反射、折射等现象,而极少发现光绕到障碍物后面去的衍射现象。这是因为只有当障碍物的尺寸与波长相近时,衍射现象才较显著。例如,对于空气中的无线电波,其波长为  $10 \sim 10^3 \text{ m}$ , 可闻声波的波长为  $10^{-2} \sim 10 \text{ m}$ , 其衍射现象极为常见;而对于可见光区的光波波长仅为  $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ , 故其衍射现象少见。

在上面光波的表示式中,电磁波均采用矢量表示,它给出了光波电磁场的振动方向。如果光束中的电场振动方向漫无规则,则该光为自然光或非偏振光;如果电场矢量具有一定的规则,则称为偏振光。若光波电场矢量沿一直线方向反复振动,则称为线偏振光,或平面偏振光。线偏振光的振动方向与传播方向构成的平面称为振动面。由于线偏振光的电场矢量总是沿着一个方向,因此可将波动表示式写成标量形式

$$E(\mathbf{r}, t) = E_0 e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (1.2-4)$$

若光波电场矢量端点随时间变化所描绘的轨迹是一个椭圆,则称为椭圆偏振光。在特殊情况下,电场矢量端点轨迹是一个圆,称为圆偏振光。

与一切振动一样,光振动也可以分解为两个互相垂直的光振动。反之,两个方向互相垂直的光振动也可以合成得到任意取向的光振动。

### 1.2.2 电磁波谱

自从 19 世纪人们证实了光是一种电磁波后又经过了大量的实验,进一步证实了 X 射线(伦琴射线)、 $\gamma$  射线等也都是电磁波。因此,电磁波的频率(或波长)范围分布很宽。

如果按电磁波频率(或波长)的次序排列成如图 1.2-1 所示的谱,则称其为电磁波谱。通常所说的光学区域(或光学频谱)包括紫外线、可见光和红外线。由于光的频率极高,为  $10^{12} \sim 10^{16}$  Hz,数字很大,使用起来很不方便,所以通常采用波长表征;光谱区域的波长范围为  $10^{-7}$  cm $\sim$ 1mm。可见光是人眼可以看到的各种颜色的光波,波长范围为  $0.4 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 。相应的各色光的波长范围:红色,  $0.76 \sim 0.63 \mu\text{m}$ ;橙色,  $0.63 \sim 0.60 \mu\text{m}$ ;黄色,  $0.60 \sim 0.57 \mu\text{m}$ ;绿色,  $0.57 \sim 0.50 \mu\text{m}$ ;青色,  $0.50 \sim 0.45 \mu\text{m}$ ;蓝色,  $0.45 \sim 0.43 \mu\text{m}$ ;紫色,  $0.43 \sim 0.40 \mu\text{m}$ 。紫外线和红外线不能引起视觉。红外线波段的波长范围为  $0.76 \mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ (相应的频率范围是  $4 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{11}$  Hz)。在红外技术领域,由于不同波长的红外线在地球大气层中的传播特性不同,通常它可以分为如下几个波段:  $0.76 \sim 3 \mu\text{m}$  为近红外波段;  $3 \sim 6 \mu\text{m}$  为中红外波段;  $6 \sim 15 \mu\text{m}$  为远红外波段;  $15 \sim 1000 \mu\text{m}$  为极远红外波段。有时根据红外辐射产生的机理不同,也可将红外线划分为:近红外波段,  $0.76 \sim 2.4 \mu\text{m}$ (相应于原子能级间跃迁);中红外波段,  $2.5 \sim 25 \mu\text{m}$ (相应于分子振动-转动能级间的跃迁);远红外波段,  $25 \mu\text{m}$  以上(相应于分子转动能级间的跃迁)。

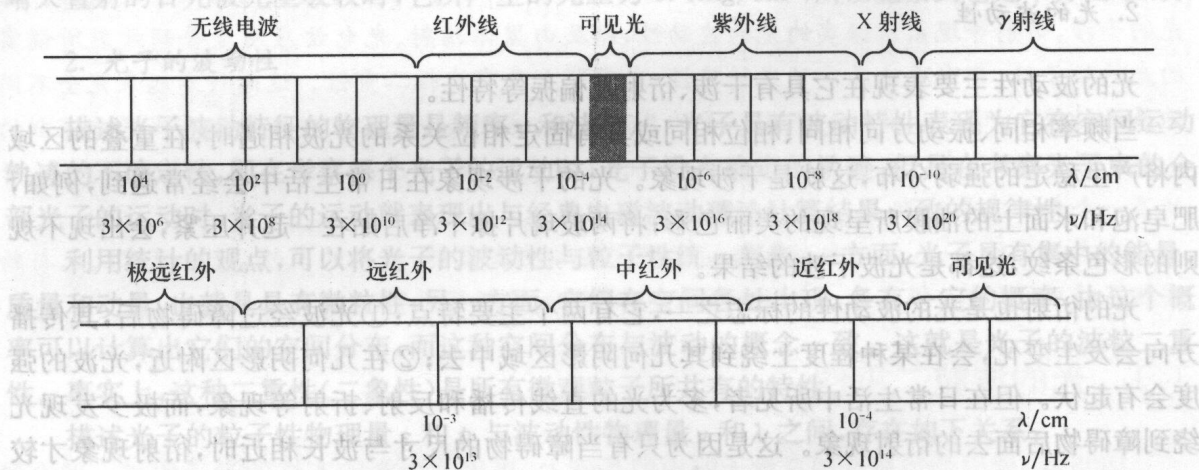


图 1.2-1 电磁波谱

在上述电磁波谱中的所有电磁波,虽其波长范围不同,产生方法及其与物质间的相互作用各不相同,但其本质相同,都遵守同样的反射、折射、干涉、衍射和偏振规律,在真空中的传播速度都为  $c = 2.9979 \times 10^8$  m/s。如果将电磁波在真空中的传播速度与介质中的传播速度相比,可以得到介质的绝对折射率为

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1.2-5)$$

式中,  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  分别为介质的相对介电常量和相对磁导率。在自然界中,除了铁磁物质外,大多数物质的磁性都很弱小,  $\mu_r \approx 1$ , 因此式(1.2-5)可写为

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1.2-6)$$

这个关系称为麦克斯韦关系。对于一般物质来说,  $\epsilon_r$  或  $n$  都是频率的函数, 具体关系形式取决于物质的结构。

### 1.2.3 光的能量及其量度单位

#### 1. 光的能量

光的电磁理论证明, 伴随着光波的传播, 光的能量也不断地向空间传播。单位时间通过垂直于传播方向的单位面积的电磁能量称为辐射强度矢量或玻印亭矢量  $\mathbf{S}$ , 并且有

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.2-7)$$

它描述了光的电磁能量的传播特性。由于光的频率为  $10^{14}$  Hz 的量级, 所以  $\mathbf{S}$  值变化极快, 人眼和其他任何接收器都不可能接收到它的瞬时值, 只能接收它的平均值。对于平面光波来说, 在一个周期内的平均值为

$$\bar{S} = \frac{1}{T} \int_0^T S dt = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E^2 \quad (1.2-8)$$

式中,  $\epsilon$  和  $\mu$  分别为介质的介电常量和磁导率。在实际应用中, 通常把辐射强度的平均值  $\bar{S}$  称为光强度, 即单位时间通过垂直光的传播方向单位面积的能量, 以  $I$  表示。

在光的量子理论中, 光传播的能量就是由许多单个光子组成的光子流的能量。设频率为  $\nu$  的光束的强度为  $I$ , 光束的光子密度为  $n$ , 则

$$I = nh\nu \quad (1.2-9)$$

#### 2. 光能量的量度单位

由于历史上的原因, 人们先对电磁辐射中的可见光进行了比较充分的研究, 引进了光通量、光强、亮度、照度等光度学量, 用以描述不同情况下人眼对光的敏感程度。但是, 由于这些光度学量是以人眼对可见光刺激所产生的视觉为基础的, 所以它受到了主观视觉的限制, 不是客观的物理学描述方法。在光电子技术及其应用中, 经常要遇到的是包括可见光在内的各种波段电磁辐射量的计算和测量, 显然不能再采用光度学量, 必须采用不受人们主观视觉限制、建立在物理测量基础上的辐射度量学量。光度学量可视为辐射度量学量的特例。下面分别介绍。

##### 1) 基本辐射量

###### (1) 辐射功率 $P$

辐射功率又称为辐射通量, 它是发射、传输或接收辐射能量的时间变化率, 单位是 W, 定义为

$$P = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1.2-10)$$

式中,  $Q$  是辐射能量。由于辐射能量通常是波长、面积、立体角等许多因素的函数, 所以辐射功率用辐射能量对时间的偏微商定义。类似地, 对其他辐射量也用偏微商定义。

###### (2) 辐(射)出(射)度 $M$

辐出度又称为辐射通量密度, 它是描述面源辐射特性的量, 其数值是源的单位面积向半球空间发射的辐射功率, 其定义为

$$M = \frac{\partial P}{\partial A} \quad (1.2-11)$$

式中,  $A$  是辐射源面积。辐出度的单位是  $\text{W}/\text{m}^2$ 。由于源面积发射不一定均匀, 所以面上各点附近单位面积发射的功率也不一样, 故  $M$  通常是源上位置的函数。

### (3) 辐射强度 $I_\Omega$

辐射强度是为了描述点源辐射的功率在空间不同方向上的分布情况而引入的量。所谓点源, 顾名思义, 是源尺寸很小的辐射源。实际上, 确定点源首要的不是辐射源真实物理尺寸的大小, 而是它相对观察者(或探测器)所张的角。例如, 距地球遥远的星星, 其物理尺寸可能很大, 但相对地面上的观察者所张的角度来说, 它完全可以看成是一个点。一般来说, 只要观测距离比源本身的最大尺寸大 10 倍以上, 并且观测装置是不带光学系统的简单探测器, 就可以将辐射源视为点源。如果观察装置采用光学系统, 则判别标准由探测器的尺寸和辐射源在探测器表面上的成像尺寸决定, 若像比探测器小, 则可将辐射源视为点源。

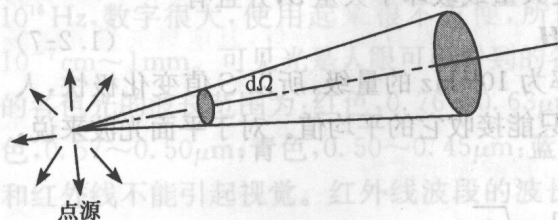


图 1.2-2 辐射强度的定义

辐射强度是点源在单位立体角内发射的辐射功率, 因此它是辐射功率在某个方向上角密度的量度, 如图 1.2-2 所示, 它的定义为

$$I_\Omega = \frac{\partial P}{\partial \Omega} \quad (1.2-12)$$

式中,  $\Omega$  是点源所张的立体角。辐射强度的单位是  $\text{W}/\text{sr}$ 。

### (4) 辐射亮度

辐射亮度是为描述扩展源辐射功率在空间和源表面上的分布情况而引入的量。辐射亮度又称为面辐射强度或辐射率。

所谓扩展源是指尺寸很大的辐射源。实际上同一个辐射源既可以看成是点源, 又可以看成是扩展源。例如, 喷气式飞机的尾喷口, 在 1km 以上的距离观测时, 可以看成是一个点源, 而在 3m 距离观察时, 表现为一扩展源。当采用光学系统观测时, 光辐射源的像比探测器大或者说辐射源充满光学系统的视场, 则该辐射源称为扩展源。

扩展源在某个方向上的辐射亮度是它在该方向上的单位表观面积向单位立体角内发射的辐射功率。如图 1.2-3 所示, 如果在扩展源表面上某点附近的一个小面积元  $dA$  向半球空间 ( $2\pi \text{ sr}$ ) 发射的辐射功率为  $dP$ , 当我们考虑该面积元向与面积元法线夹角为  $\theta$  的方向上发射辐射时, 则由于在  $\theta$  方向上看到面积元  $dA$  的表观面积为  $dA \cos \theta$ , 所以  $dA$  向  $\theta$  方向  $d\Omega$  立体角内发射的辐射功率可以看成是由源的表观面积元  $dA \cos \theta$  发出的辐射功率, 表示为

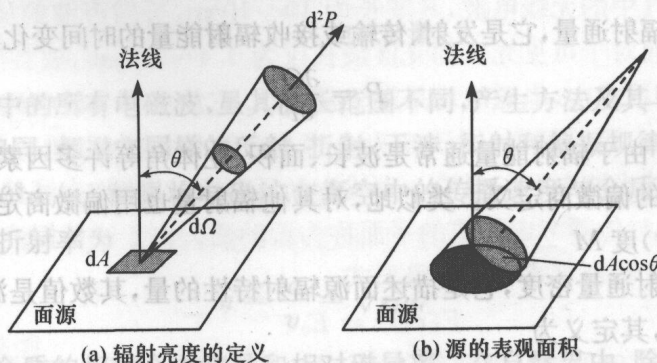


图 1.2-3 辐射亮度的定义与源的表观面积

$$L = \frac{\partial^2 P}{\partial A \partial \Omega \cos \theta} \quad (1.2-13)$$

辐射亮度的单位是  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。一般来说,辐射亮度与球面上的位置及观测的方向  $\theta$  有关。

以上讨论的各个辐射量都是描述辐射源发射特性的量。为了描述受照表面接收辐射功率的分布情况,引入辐射照度这个量。

#### (5) 辐照度

假设辐射源投射到被照表面某点附近小面积  $dA$  上的辐射功率为  $dP$ , 则被照表面该点的辐照度为

$$E = \frac{\partial P}{\partial A} \quad (1.2-14)$$

其意义表示投射被照面上单位面积上的辐射功率,单位为  $\text{W}/\text{m}^2$ 。虽然它与辐出度的单位相同,但两者的物理意义不同。辐出度是离开辐射源表面的辐射功率密度,它包括源向整个半球空间发射的辐射功率。而辐照度则是入射到被照表面上的辐射功率密度,它可以包括一个或几个源投射来的辐射功率。 $E$  除与被照面上的位置有关外,还与辐射源的特性及被照表面与源的相对位置有关。

上面所给出的几个基本辐射量只考虑了辐射功率的空间分布特性。实际上任何一个辐射源发出的辐射或投射到一个表面上的辐射功率,都有一定的频率分布特征(即光谱特征),故对于所讨论过的辐射量均可定义相对应的光谱辐射量。

此外,在光电子技术及其应用中,还常遇到单色辐射量、某波长间隔辐射量和全辐射量。这里仅以辐射功率为例进行说明,其他量的情况完全类似。

由光谱辐射功率  $P_\lambda$  的意义可知,在波长为  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  的波长间隔内的辐射功率为

$$dP = P_\lambda d\lambda \quad (1.2-15)$$

若  $d\lambda$  足够小,式中  $dP$  可称为波长为  $\lambda$  的单色辐射功率,用  $dP_\lambda$  表示。在一个有限波长范围  $\lambda_1 \sim \lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$  内的辐射功率,称为该波长间隔  $\Delta\lambda$  的辐射功率,用  $P(\Delta\lambda)$  表示,其定义为

$$P(\Delta\lambda) = P(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_\lambda d\lambda \quad (1.2-16)$$

如果  $\lambda_1 = 0, \lambda_2 \rightarrow \infty$ , 则

$$P = \int_0^\infty P_\lambda d\lambda \quad (1.2-17)$$

称为全辐射功率。

### 2) 基本光度学量

如前所述,光度学涉及的是电磁辐射中能引起视觉响应的可见光域的辐射场。所以,光度学量是辐射度量学量的特例,在研究方法上和概念上基本相同,并且光度学量与辐射度量学量是一一对应的。但是应当指出,辐射度量学度量的是电磁辐射场的能量,而光度学度量的是可见光场产生的视觉响应。下面,先介绍基本光度学量及其单位,然后说明它们与辐射度量学量之间的关系。

#### (1) 基本光度学量

历史上,人们曾用烛光作为光强度的单位,并把它作为光度学的基本单位,即其他光度学量的单位都由它定义出来。在科学技术发展的过程中,曾对烛光采取过不同的规定。