

 电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业

# 光电信息技术

雷玉堂 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业

# 光电信息技术

雷玉堂 编著

電子工業出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书的内容是按光电信息技术产业对从业人员和人才的需求,对现代光电信息的整个流程,即光信息的拾取变换、检测、传输、处理、存储、显示而编写的。本书共分 12 章,包括:绪论;光电信息技术物理基础;光辐射信息探测器件;光电成像器件;发光器件;光电信息检测电路设计、数据采集与计算机接口;光电信息变换和检测的技术与方法;光电信息传输技术;光电信息处理技术;光电信息存储技术;光电信息显示技术;光电信息技术的典型应用等。各章结尾附有丰富的习题与思考题,附录提供了习题参考答案。本书配有免费电子教学课件。

本书是在作者几十年的教学和科研的实践基础上编写的,着重讲述光电信息的基本理论与整个信息流程的技术与方法。各章节相对独立,可供光电信息工程相关专业根据不同教学要求和学时数灵活选用。本书具有如下特点:内容全、新、精,理论联系实际,深入浅出、覆盖面广,实用性强,参考价值高,并能给人创新启示。

本书可作为高等院校光电信息工程、光信息科学与技术、电子科学与技术、电子信息工程、通信工程、测控技术与仪器等光学类、电子类专业本科生、研究生的“光电信息电子技术”、“光电检测技术”课程教材,还可作为从事上述专业领域的技术工作人员的培训与参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容  
版权所有·侵权必究

### 图书在版编目(CIP)数据

光电信息技术 / 雷玉堂编著. —北京:电子工业出版社, 2011.1

(电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业)

ISBN 978-7-121-11777-0

I. ①光… II. ①雷… III. ①光电子技术—信息技术—高等学校—教材 IV. ①TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 175110 号

策划编辑: 段丹辉

责任编辑: 段丹辉 特约编辑: 王 纲

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 25.75 字数: 780 千字

印 次: 2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 48.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

在信息科技领域,电子学在 20 世纪做出了巨大的贡献,但由于其信息属性的局限性,使其无论在速度、容量还是在空间相容性上都受到很大限制。而光是生命的源泉,它为人类提供青山绿水的生活环境和丰富的衣食住行的资源,并使我们目睹五彩缤纷的世界。因此,光(光学)是人们获取信息的最基本和最有效的手段之一,以光子或光波作为信息载体的光电信息技术则表现出巨大的发展潜力和明显的优越性。如在信息处理速度上,电子器件的响应时间最快也只能达到  $10^{-11}\text{s}$ ,而光子器件则可达到  $10^{-13}\sim 10^{-15}\text{s}$ ,比电子器件快了  $10^3\sim 10^4$  倍。并且,光子在通常情况下互不干涉,具有并行处理信息的能力,在光计算中可大幅度提高信息的处理速度。此外,在存储能力、传播速度、抗干扰能力等很多方面,光子器件弥补了电子器件的很多不足。尤其光电信息技术在高技术战争中扮演着十分重要的角色,如在预警、监视、侦察、观察、瞄准、通信、精确打击、作战效果评估、电子对抗等方面都发挥了极其重要的作用,使作战方式、部队编制和后勤供应都发生了重大变化。因此,光电信息技术不仅全面继承与兼容电子技术,而且具有微电子无法比拟的优越性能与更广阔的应用范围,从而成为人类进入信息时代的具有巨大冲击力的高新技术。

光电信息技术是由光学、光电子、微电子、微计算机、微材料等科学技术相结合而成的多学科综合的高新技术,涉及光信息的辐射、探测、变换、传输、处理、存储与显示等众多的内容。它以极快的响应速度、极宽的频宽、极大的信息容量、极高的存储密度、极快的处理速度、极高的信息效率和分辨率,以及微型化、集成化等特点,推动着现代信息技术的发展,以适应现代信息社会以  $\text{Tbit/s}$  ( $1\text{ Tbit/s} = 10^{12}\text{ bit/s}$ ) 为起点呈现超越摩尔定律的爆炸性增长的信息量的要求,从而使光电信息产业在市场的份额逐年增加。在发达国家,与光电信息技术相关产业的产值已占国民经济总产值的一半以上,对从业人员和人才的需求逐年增多,竞争力也越来越强。为适应现代信息技术的发展,迫切需要培养一大批掌握光电信息技术的专门人才,也迫切需要普及光电信息技术方面的基础知识,虽然不少高等学校相继增设了光电信息类专业或院系,但现行出版的光电信息技术或光电技术等教材的信息流程的内容不全、不新,而不能满足目前光电信息方面人才的需求。基于这样的形势,作者为满足新增光电信息类专业的教学需求,在参考国内外有关文献资料与书籍,并借鉴以前所编教材《光电技术》、《光电检测技术》、《光电检测技术习题与实验》及《光电信息实用技术》经验的基础上编写了本教材。

本教材是作者在几十年从事光电信息技术的教学和科研的实践基础上,按现代光电信息的整个流程编写的,它着重讲述光电信息的基本理论与整个信息流程的技术与方法。本教材主要供光电信息专业使用,但各章节相对独立,便于光电相关专业根据不同教学要求的学时数灵活选用。本书的特点是:内容全、新、精,理论联系实际,层次分明、深入浅出、覆盖面广,实用性强,参考价值高,并能给人创新启示。本教材力求降低学习难度,提高实用价值,读者只要具有大学物理和电子技术知识,就可学习本书内容。并且,在掌握本书内容后,基本有能力去接收日新月异的光电信息技术的新成果,不断设计和开发光电信息技术应用的新产品。

本书共分 11 章,主要内容包括光电信息技术物理基础,光辐射信息探测器件,光电成像器件,发光器件,光电检测电路设计、数据采集与计算机接口,光电信息变换和探测的技术与方法,光电信息传输技术,光电信息处理技术,光电信息存储技术,光电信息显示技术,光电信息技术的典型应用。本书每章结尾附有丰富习题,附录提供了习题参考答案。

本书可作为光电信息工程、光信息科学与技术、电子信息技术、测控技术与仪器、光学工程、通信工程、电子工程、质量工程、计量技术、应用物理、应用电视、安防与视频监控等专业的本科生、研究生的教材，也可作为从事上述专业领域的技术人员或实验室工作人员等培训与参考用书。本书配有免费电子教学课件，可以登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)注册下载或发送电子邮件至 [duandh@phei.com.cn](mailto:duandh@phei.com.cn) 索取。

近几年，出现了不少光电信息技术、光信息技术、光电技术、光电检测或光电测试技术及系统方面的优秀教材和著作，它们为推动我国光电信息专业的教学和科研，以及光电产业的发展做出了重要的贡献。本人在编写过程中，有幸参考了这些教材和著作，并根据光电信息技术体系的需要，在有的章节内采用了其中的部分内容，这些都已书末以参考文献形式给出，本人在此向同行作者们表示衷心的感谢！

本书的编写是作者同他的学生们共同完成的。其中，华中科技大学光电学院教授竺子民博士编写了 8.2 节；武汉大学教授马秦生博士编写了 5.4 节与 5.5 节；武汉理工大学教授黎敏博士(后)编写了 11.3.3 节~11.3.5 节；深圳大学副教授丁金妃博士编写了 11.3.6 节与 11.3.7 节；武汉乐通光电有限公司总经理罗辉编写了 11.5 节；乐通光电高新技术研究所杨中东博士提供了 3.3.5 节与 3.4.4 节；武汉昱升光器件公司总经理明志文编写了 7.1.1 节~7.1.3 节；其余章节为雷玉堂教授编写与统稿。

本书的编写与出版，首先最诚挚、最衷心地要感谢中国工程院院士、天津大学叶声华教授和清华大学孙培懋教授对本书的审核，以及他们对知识体系结构、内容安排等多方面提出的宝贵的意见与建议；其次要感谢夫人、孩子们与武汉乐通光电公司及研究所的同志们的支持；尤其要感谢电子工业出版社的段丹辉编辑及其有关领导与同事们付出的辛苦劳动。

由于光电信息技术发展迅速，涉及的学科范围很宽，加上作者的知识局限与时间紧迫，难免出现错误与不足，敬请专家学者、技术工作者、教师与学生们提出批评指正。作者的邮箱：[tang3833@163.com](mailto:tang3833@163.com)。

编 者  
2010 年 6 月

# 目 录

|                                 |      |                                      |      |
|---------------------------------|------|--------------------------------------|------|
| 第 1 章 光电信息技术物理基础 .....          | (1)  | 2.3.5 光敏三极管 .....                    | (52) |
| 1.1 光的基本性质及其度量 .....            | (1)  | 2.3.6 PV 器件与 PC 器件的区别及使用<br>要点 ..... | (54) |
| 1.1.1 光的基本性质 .....              | (1)  | 2.4 半导体组合型光电探测器件 .....               | (55) |
| 1.1.2 光辐射的度量 .....              | (2)  | 2.4.1 象限探测器件 .....                   | (56) |
| 1.2 半导体物理基础 .....               | (5)  | 2.4.2 楔环探测器件 .....                   | (56) |
| 1.2.1 半导体的能带 .....              | (6)  | 2.4.3 光电位置探测器件(PSD) .....            | (57) |
| 1.2.2 热平衡载流子 .....              | (8)  | 2.4.4 半导体色敏探测器件 .....                | (59) |
| 1.2.3 非平衡载流子 .....              | (9)  | 2.4.5 光电耦合器件 .....                   | (60) |
| 1.2.4 载流子的运动 .....              | (11) | 2.5 热电偶与热电堆 .....                    | (61) |
| 1.2.5 半导体对光的吸收 .....            | (12) | 2.5.1 热电偶 .....                      | (61) |
| 1.2.6 半导体的 PN 结 .....           | (14) | 2.5.2 热电堆 .....                      | (62) |
| 1.2.7 半导体与金属的接触 .....           | (17) | 2.5.3 热电偶与热电堆的应用及使用<br>要点 .....      | (63) |
| 1.3 光辐射电效应 .....                | (19) | 2.6 热敏电阻 .....                       | (64) |
| 1.3.1 光电效应 .....                | (19) | 2.6.1 热敏电阻的类型、结构及原理 .....            | (64) |
| 1.3.2 热电效应 .....                | (26) | 2.6.2 热敏电阻的特性参数 .....                | (65) |
| 习题与思考题 .....                    | (29) | 2.6.3 热敏电阻的参数选择、应用及<br>使用要点 .....    | (66) |
| 第 2 章 光辐射信息探测器件 .....           | (30) | 2.6.4 几种新型热敏电阻 .....                 | (68) |
| 2.1 光电发射型探测器件 .....             | (30) | 2.7 热释电探测器件 .....                    | (69) |
| 2.1.1 光电发射材料 .....              | (30) | 2.7.1 热释电探测器件的结构与原理 .....            | (69) |
| 2.1.2 光电倍增管的结构及原理 .....         | (31) | 2.7.2 热释电探测器件的类型 .....               | (70) |
| 2.1.3 光电倍增管的主要特性参数 .....        | (32) | 2.7.3 热释电器件的特性参数 .....               | (72) |
| 2.1.4 光电倍增管的工作电路 .....          | (35) | 2.7.4 热释电探测器对前置放大器的<br>要求 .....      | (73) |
| 2.1.5 光电倍增管的使用要点 .....          | (36) | 2.7.5 热释电探测器的应用及使用要点 .....           | (74) |
| 2.2 半导体光电导型探测器件 .....           | (37) | 习题与思考题 .....                         | (74) |
| 2.2.1 光敏电阻的结构及原理 .....          | (37) | 第 3 章 光电成像器件 .....                   | (76) |
| 2.2.2 几种常用的光敏电阻 .....           | (38) | 3.1 光电成像器件的类型与电视制式 .....             | (76) |
| 2.2.3 光敏电阻的特性参数 .....           | (39) | 3.1.1 光电成像器件的类型 .....                | (76) |
| 2.2.4 光敏电阻的特点、应用及使用<br>要点 ..... | (40) | 3.1.2 电视扫描方式及制式 .....                | (77) |
| 2.3 半导体光伏型探测器件 .....            | (42) | 3.2 电荷耦合器件(CCD) .....                | (78) |
| 2.3.1 光电池 .....                 | (42) | 3.2.1 CCD 的结构及原理 .....               | (79) |
| 2.3.2 光敏二极管 .....               | (45) |                                      |      |
| 2.3.3 PIN 光敏二极管 .....           | (49) |                                      |      |
| 2.3.4 雪崩光敏二极管(APD) .....        | (50) |                                      |      |

|                                 |              |                                          |              |
|---------------------------------|--------------|------------------------------------------|--------------|
| 3.2.2 CCD 的输入/输出及外围驱动电路 .....   | (80)         | 4.3.1 白光 LED 的结构与原理 .....                | (121)        |
| 3.2.3 CCD 的类型 .....             | (83)         | 4.3.2 白光 LED 的特点及与现行照明光源的比较 .....        | (122)        |
| 3.2.4 CCD 的特性参数 .....           | (86)         | 4.4 高效节能平面分布式固态光源——OLED 灯 .....          | (123)        |
| 3.2.5 CCD 的应用 .....             | (90)         | 4.4.1 OLED 灯的结构与原理 .....                 | (123)        |
| 3.3 CMOS 图像传感器 .....            | (91)         | 4.4.2 OLED 灯的特点及与现有光源的比较 .....           | (124)        |
| 3.3.1 CMOS 图像传感器的结构及原理 .....    | (92)         | 4.5 激光器 .....                            | (124)        |
| 3.3.2 CMOS 图像传感器的特性参数 .....     | (94)         | 4.5.1 激光的基本特征 .....                      | (125)        |
| 3.3.3 CMOS 图像传感器与 CCD 的比较 ..... | (98)         | 4.5.2 激光的产生 .....                        | (125)        |
| 3.3.4 CMOS 摄像器件的应用 .....        | (98)         | 4.5.3 气、固、液体激光器 .....                    | (127)        |
| 3.4 自扫描光电二极管阵列(SSPA) .....      | (99)         | 4.6 半导体激光器 .....                         | (129)        |
| 3.4.1 SSPA 的结构及原理 .....         | (99)         | 4.6.1 半导体激光器的特点与分类 .....                 | (129)        |
| 3.4.2 SSPA 类型、信号读出及放大电路 .....   | (99)         | 4.6.2 半导体激光器的主要特性参数 .....                | (130)        |
| 3.4.3 SSPA 与 CCD 的性能比较 .....    | (101)        | 4.6.3 几种典型的半导体激光器 .....                  | (132)        |
| 3.5 接触式图像传感器 CIS .....          | (101)        | 4.6.4 半导体激光器的安全使用 .....                  | (137)        |
| 3.5.1 CIS 的结构及原理 .....          | (101)        | 4.7 光纤激光器 .....                          | (138)        |
| 3.5.2 CIS 与 CCD 的比较 .....       | (102)        | 4.7.1 光纤激光器的结构和原理 .....                  | (138)        |
| 3.5.3 CIS 的应用 .....             | (102)        | 4.7.2 光纤激光器的特点与基本特性参量 .....              | (139)        |
| 3.6 直视型光电成像器件—变像管和像增强管 .....    | (103)        | 4.7.3 几种典型的光纤激光器 .....                   | (140)        |
| 3.6.1 像管的结构与工作原理 .....          | (103)        | 4.8 光子晶体激光器 .....                        | (143)        |
| 3.6.2 主要性能参数 .....              | (104)        | 4.8.1 光子晶体 .....                         | (143)        |
| 3.6.3 像增强管的级联 .....             | (104)        | 4.8.2 光子晶体激光器 .....                      | (143)        |
| 3.7 特种光电成像器件 .....              | (107)        | 4.8.3 光子晶体光纤激光器 .....                    | (145)        |
| 3.7.1 红外光电成像器件 .....            | (107)        | 习题与思考题 .....                             | (146)        |
| 3.7.2 紫外光电成像器件 .....            | (109)        |                                          |              |
| 3.7.3 X 射线光电成像器件 .....          | (111)        |                                          |              |
| 习题与思考题 .....                    | (113)        |                                          |              |
| <b>第 4 章 发光器件 .....</b>         | <b>(114)</b> | <b>第 5 章 光电信息探测电路设计、数据采集与计算机接口 .....</b> | <b>(148)</b> |
| 4.1 常用的普通光源 .....               | (114)        | 5.1 光电信息输入电路的设计 .....                    | (148)        |
| 4.1.1 光源的基本特性参数 .....           | (114)        | 5.1.1 缓变光信号输入电路的设计 .....                 | (148)        |
| 4.1.2 常用的普通光源 .....             | (116)        | 5.1.2 交变光信号输入电路的设计 .....                 | (154)        |
| 4.2 发光二极管(LED) .....            | (117)        | 5.2 光电信息探测电路频率特性与低噪声设计 .....             | (156)        |
| 4.2.1 LED 的结构、原理及特点 .....       | (117)        | 5.2.1 光电信息探测电路的带宽 .....                  | (156)        |
| 4.2.2 LED 的主要特性参数 .....         | (118)        | 5.2.2 光电探测电路频率特性的设计 .....                | (157)        |
| 4.2.3 发光二极管的应用 .....            | (120)        | 5.2.3 光电信息探测电路的低噪声设计 .....               | (159)        |
| 4.3 固体环保照明光源——白光 LED .....      | (121)        | 5.3 光电信息低噪声放大器的设计 .....                  | (162)        |
|                                 |              | 5.3.1 放大器噪声 .....                        | (162)        |
|                                 |              | 5.3.2 低噪声前置放大器的设计 .....                  | (164)        |

|                                         |       |                                   |       |
|-----------------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| 5.3.3 低噪声运算放大器的选用 .....                 | (168) | 6.5.3 双频光相干的差频探测方法 .....          | (220) |
| 5.3.4 光电探测器件和运算放大器的<br>连接方法 .....       | (169) | 6.5.4 差频探测与直接探测法的<br>比较 .....     | (226) |
| 5.4 光电信息的二值化与量化 .....                   | (170) | 习题与思考题 .....                      | (228) |
| 5.4.1 光电信息的二值化处理 .....                  | (170) | <b>第 7 章 光电信息传输技术</b> .....       | (230) |
| 5.4.2 光电信息的量化处理 .....                   | (172) | 7.1 光纤传输技术 .....                  | (230) |
| 5.5 光电信息的数据采集与计算机<br>接口 .....           | (175) | 7.1.1 光纤与光缆 .....                 | (230) |
| 5.5.1 光电信息的二值化数据采集与<br>计算机接口 .....      | (175) | 7.1.2 光纤的传光原理 .....               | (232) |
| 5.5.2 线阵成像器件图像数据采集与<br>计算机接口 .....      | (177) | 7.1.3 光纤的连接耦合技术 .....             | (232) |
| 5.5.3 面阵成像器件图像数据的采集与<br>计算机接口 .....     | (180) | 7.1.4 光纤传输系统的组成及特点 .....          | (236) |
| 5.6 嵌入式系统视频图像的数据采集 .....                | (182) | 7.1.5 光纤传输系统的设计 .....             | (237) |
| 5.6.1 嵌入式技术产品的特点 .....                  | (182) | 7.2 无线光波传输技术 .....                | (240) |
| 5.6.2 线阵 CCD 图像数据的采集 .....              | (182) | 7.2.1 无线光波传输系统的特点 .....           | (240) |
| 5.6.3 面阵 CCD 图像数据的采集 .....              | (183) | 7.2.2 无线光波传输系统的组成及<br>工作原理 .....  | (241) |
| 习题与思考题 .....                            | (184) | 7.2.3 无线光波传输技术的难点及<br>其解决办法 ..... | (242) |
| <b>第 6 章 光电信息变换和检测的技术<br/>与方法</b> ..... | (186) | 7.3 电线电缆传输技术 .....                | (243) |
| 6.1 时变光信息的直接检测技术 .....                  | (186) | 7.3.1 同轴电缆传输技术 .....              | (243) |
| 6.1.1 光信息的幅度检测技术 .....                  | (186) | 7.3.2 双绞线或双芯线传输技术 .....           | (247) |
| 6.1.2 光信息的频率检测技术 .....                  | (190) | 7.4 无线电波传输技术 .....                | (250) |
| 6.1.3 光信息的相位和时间检测技术 .....               | (191) | 7.4.1 微波传输技术 .....                | (250) |
| 6.2 时变光信息的调制检测技术 .....                  | (193) | 7.4.2 无线移动视频传输技术 .....            | (253) |
| 6.2.1 光信息调制的基本原理与类型 .....               | (193) | 习题与思考题 .....                      | (257) |
| 6.2.2 光信息调制器 .....                      | (195) | <b>第 8 章 光电信息处理技术</b> .....       | (259) |
| 6.2.3 调制信号的解调技术 .....                   | (199) | 8.1 光电信息处理的特征、内容及<br>方法 .....     | (259) |
| 6.3 光学图像的扫描检测技术 .....                   | (201) | 8.1.1 光电信息处理的特征、方法和<br>目标 .....   | (259) |
| 6.3.1 扫描的基本原理与分类 .....                  | (201) | 8.1.2 数字图像分析的基本方法及<br>处理的内容 ..... | (260) |
| 6.3.2 图像扫描技术 .....                      | (202) | 8.1.3 图像处理的基本方法——像素<br>处理 .....   | (263) |
| 6.3.3 实体扫描技术 .....                      | (204) | 8.2 光学图像处理 .....                  | (267) |
| 6.4 几何变换的光电检测方法 .....                   | (207) | 8.2.1 光学图像处理的理论基础和<br>方法 .....    | (267) |
| 6.4.1 光电准直方法 .....                      | (207) | 8.2.2 相干光学信息处理 .....              | (270) |
| 6.4.2 光电测长方法 .....                      | (209) | 8.2.3 非相干光学信息处理 .....             | (274) |
| 6.4.3 光电编码方法 .....                      | (211) | 8.2.4 白光信息处理 .....                | (276) |
| 6.5 物理变换的光电检测方法 .....                   | (216) | 8.3 光电图像处理 .....                  | (278) |
| 6.5.1 光电干涉测量的技术方法 .....                 | (216) |                                   |       |
| 6.5.2 单频光相干的条纹探测方法 .....                | (218) |                                   |       |

|                                   |       |                                 |       |
|-----------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| 8.3.1 光电图像处理与光学图像处理<br>处理的比较····· | (278) | 10.2.2 液晶显示器的类型及比较·····         | (326) |
| 8.3.2 视频标准·····                   | (278) | 10.2.3 大尺寸 TFT 液晶显示屏·····       | (327) |
| 8.3.3 视频图像处理的特点与研究<br>内容·····     | (281) | 10.2.4 液晶显示器的优缺点·····           | (328) |
| 8.3.4 视频滤波·····                   | (282) | 10.3 PDP 显示技术·····              | (329) |
| 8.3.5 视频图像的编码压缩·····              | (285) | 10.3.1 PDP 的结构、原理与类型·····       | (329) |
| 8.4 基于 DSP 的数字图像处理·····           | (290) | 10.3.2 交流 PDP 显示板结构·····        | (330) |
| 8.4.1 DSP 及其系统·····               | (291) | 10.3.3 PDP 显示器的优缺点·····         | (331) |
| 8.4.2 DSP 处理系统的设计·····            | (293) | 10.4 LED 阵列显示屏技术·····           | (331) |
| 习题与思考题·····                       | (295) | 10.4.1 LED 显示屏的结构与原理·····       | (332) |
| <b>第 9 章 光电信息存储技术</b> ·····       | (296) | 10.4.2 LED 显示屏的特点与类型·····       | (332) |
| 9.1 光盘存储技术·····                   | (296) | 10.4.3 LED 大屏幕显示器·····          | (333) |
| 9.1.1 光盘存储的原理·····                | (296) | 10.4.4 LED 大屏幕显示器真彩实现·····      | (334) |
| 9.1.2 光盘存储的类型·····                | (297) | 10.5 OLED 显示技术·····             | (334) |
| 9.1.3 光盘存储器·····                  | (303) | 10.5.1 OLED 的基本结构及其发光原理·····    | (334) |
| 9.2 全息存储技术·····                   | (305) | 10.5.2 OLED 的分类·····            | (336) |
| 9.2.1 全息存储的原理·····                | (305) | 10.5.3 OLED 的优缺点·····           | (338) |
| 9.2.2 全息存储的特点·····                | (306) | 10.5.4 OLED 与 TFT-LCD 的比较·····  | (338) |
| 9.2.3 全息存储的应用·····                | (306) | 10.6 其他显示技术·····                | (339) |
| 9.3 超高密度光电存储技术·····               | (307) | 10.6.1 硅基液晶显示技术·····            | (339) |
| 9.3.1 双光子双稳态等三维数字存储<br>技术·····    | (307) | 10.6.2 数字微镜器件显示技术·····          | (340) |
| 9.3.2 电子俘获存储技术·····               | (309) | 10.6.3 光阀投影显示技术·····            | (342) |
| 9.3.3 光谱烧孔存储技术·····               | (309) | 习题与思考题·····                     | (345) |
| 9.3.4 近场光学存储技术·····               | (310) | <b>第 11 章 光电信息技术的典型应用</b> ····· | (346) |
| 9.3.5 超高密度光电存储技术的发展<br>趋势·····    | (310) | 11.1 激光测量技术·····                | (346) |
| 9.4 其他存储技术·····                   | (311) | 11.1.1 激光测距·····                | (346) |
| 9.4.1 半导体存储技术·····                | (311) | 11.1.2 激光多普勒测速·····             | (350) |
| 9.4.2 磁带磁盘存储技术·····               | (314) | 11.1.3 激光线径的测量·····             | (350) |
| 习题与思考题·····                       | (317) | 11.1.4 激光热轧带钢板形测量·····          | (351) |
| <b>第 10 章 光电信息显示技术</b> ·····      | (319) | 11.2 微弱光电信息检测技术·····            | (352) |
| 10.1 CRT 显示技术·····                | (319) | 11.2.1 相关检测·····                | (353) |
| 10.1.1 黑白 CRT 显示技术·····           | (319) | 11.2.2 锁相放大器·····               | (354) |
| 10.1.2 彩色 CRT 显示技术·····           | (321) | 11.2.3 取样积分器·····               | (357) |
| 10.1.3 CRT 显示器的优缺点·····           | (324) | 11.2.4 光子计数系统·····              | (359) |
| 10.1.4 CRT 显示器的发展趋势及应用·····       | (324) | 11.3 光纤传感技术·····                | (363) |
| 10.2 LCD 显示技术·····                | (325) | 11.3.1 光纤传感概述·····              | (363) |
| 10.2.1 LCD 的基本结构及工作原理·····        | (325) | 11.3.2 基于强度的光纤传感器·····          | (364) |
|                                   |       | 11.3.3 基于相位的光纤传感器·····          | (365) |
|                                   |       | 11.3.4 基于偏振的光纤传感器·····          | (368) |
|                                   |       | 11.3.5 基于频率(或波长)的光纤传<br>感器····· | (368) |

|        |                          |       |               |                             |       |
|--------|--------------------------|-------|---------------|-----------------------------|-------|
| 11.3.6 | 光纤光栅型传感器 .....           | (369) | 11.5.3        | 视频监控系统的控制设备 .....           | (389) |
| 11.3.7 | 多路复用和分布式光纤传感器 ...        | (373) | 11.5.4        | 视频监控系统的终端设备 .....           | (390) |
| 11.4   | 视频图像检测技术 .....           | (377) | 11.6          | 光谱测量技术 .....                | (391) |
| 11.4.1 | 视频图像检测系统的分类及<br>组成 ..... | (378) | 11.6.1        | 单色光的产生 .....                | (391) |
| 11.4.2 | 一维尺寸视频图像测量 .....         | (379) | 11.6.2        | 傅里叶变换红外光谱仪 .....            | (392) |
| 11.4.3 | 二维尺寸视频图像测量 .....         | (382) | 11.6.3        | 用 CCD 检测的光学多通道<br>分析仪 ..... | (394) |
| 11.4.4 | 三维尺寸视频图像测量 .....         | (383) | 习题与思考题 .....  | (395)                       |       |
| 11.5   | 视频监控技术 .....             | (384) | 各章计算题答案 ..... | (397)                       |       |
| 11.5.1 | 视频监控系统的组成 .....          | (384) | 参考文献 .....    | (399)                       |       |
| 11.5.2 | 视频监控系统的前端设备 .....        | (387) |               |                             |       |

# 第1章 光电信息技术物理基础

## 1.1 光的基本性质及其度量

### 1.1.1 光的基本性质

光，不仅是支持生命的重要能量，也是生活中的重要信息源。显然，如果没有光，就不可能有我们现在的文明。正是光，为我们提供了很有价值的信息资源。很久以前，人们就对光学现象进行了研究，并认识到光有直线传播的特点。在 17 世纪，牛顿根据光直线传播的现象，提出光是由光源飞出的微粒流的假说，认为这些微粒在均匀媒质中沿着直线方向等速度飞行，并以微粒流的观点对反射和折射定律做出了解释。随着生产和科学技术的发展，又发现了许多用光的直线传播概念不能解释的较为复杂的光现象，如光的干涉、衍射和偏振等。于是，惠更斯、杨氏和菲涅耳等人提出了光的波动学说，认为光是发光材料中分子振动的结果，这些振动通过一种假想的弹性媒质，以水波一样的方式传播出去。光的波动理论能够解释光的干涉和衍射等现象。到 1860 年，麦克斯韦电磁理论建立后，才认识到光也是一种电磁现象。原来光和无线电波一样，也是一种电磁波，只不过光的波长比无线电波短得多而已。

电磁波包括的范围很广，如现在已经发现的宇宙射线，其波长小于几个皮米( $1\text{ pm}=10^{-12}\text{ m}$ )，而广播用的无线电波的波长则达上千米，它们都属于电磁波的范畴。光波仅仅是电磁波中的一小部分，它包括的波长区间约从几个纳米( $1\text{ nm}=10^{-9}\text{ m}$ )到  $1\text{ mm}$  左右。这些光并不是人眼都能看得见的。其中只有波长从约  $380\text{ nm}$  到  $780\text{ nm}$  范围内的电磁波，才能引起人眼感光细胞的直接感觉。我们称这一段波谱为可见光区。为了清楚起见，分别将紫外、可见和红外光部分放大，如图 1-1 所示。

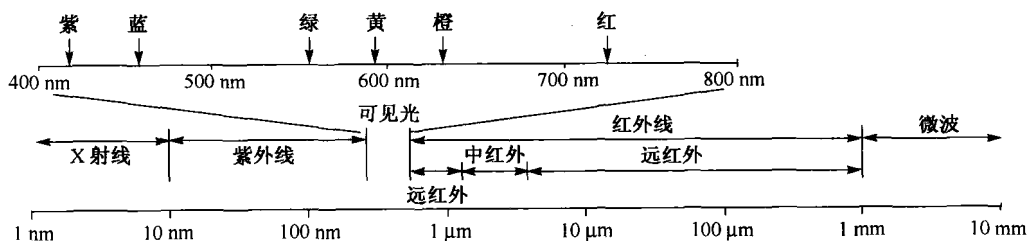


图 1-1 紫外、可见和红外光波长

在可见光中，波长最短的是紫光，稍长的是蓝光，以后的顺序是青光、绿光、黄光、橙光和红光，红光的波长最长。而在不可见光中，波长比紫光短的光称为紫外线，波长比红光长的光称为红外线。表1-1列出了光的各个波长区域。波长小于  $200\text{ nm}$  的光成为真空紫外，因为这部分光在空气中很快被吸收，所以只能在真空中传播。

现在常用的光波波长的单位是微米( $\mu\text{m}$ )、纳米( $\text{nm}$ )。它们之间的关系为  $1\text{ }\mu\text{m}=10^3\text{ nm}$ 。

应当指出，图1-1和表1-1只示出了各波长区间的大致范围和相互位置，并没有也不可能给出区间的严格界限。实际上，各个区域之间都是逐步过渡而不是截然分开的。

由于光波也是一种电磁波，因此可以用麦克斯韦方程来描写。由麦克斯韦方程知道，迅速变化着的电磁场必定要向四周传播。电磁波在媒质中的传播速度  $v$  由下式决定：

表 1-1 光的各个波长区域

| 波长区域/nm          | 区域名称         |                  |
|------------------|--------------|------------------|
| 10~200           | 真空紫外区远紫外区    | 紫<br>外<br>区      |
| 200~300          | 日盲区中紫外区      |                  |
| 300~380          | 大气紫外窗口, 近紫外区 |                  |
| 380~420          | 紫光           | 可<br>见<br>光<br>区 |
| 420~450          | 蓝光           |                  |
| 450~490          | 青光           |                  |
| 490~560          | 绿光           |                  |
| 560~590          | 黄光           |                  |
| 590~620          | 橙光           |                  |
| 620~780          | 红光           |                  |
| 780~1500         | 近红外区         | 红<br>外<br>区      |
| 1500~10 000      | 中红外区         |                  |
| 10 000~1 000 000 | 远红外区         |                  |

$$\nu = \lambda \nu / n \quad (1-1)$$

式中,  $\nu$  的单位是 m/s;  $\lambda$  为波长(m);  $\nu$  为频率(Hz);  $n$  为媒质的折射率。在真空中,  $n=1$ , 光传播速度  $c=299\,792\,458$  m/s, 一般近似记为  $3 \times 10^8$  m/s。除非特别指明, 今后凡提到光的波长、速度, 通常均指真空中的波长、速度。

利用麦克斯韦理论能很好地说明光在传播过程中的反射、折射、干涉、衍射、偏振及光在各向异性介质中的传播等现象。但在研究过程中, 人们发现在光与物质的相互作用方面, 如物质对光的吸收、色散和散射等, 用电磁理论仍不能给出令人满意的解释。1900 年普朗克在研究黑体辐射的能量按波长分布这一问题时认为, 谐振子辐射是不连续的, 提出了辐射的量子论。1905 年, 爱因斯坦在解释光电发射现象时也提出了光量子的概念, 从而逐渐地形成了新的微粒理论——量子论。量子论认为, 光是由许多光子组成的, 这些光子具有的能量为  $h\nu$ 。其中  $h=(6.626\,075\,5 \pm 0.000\,004\,0) \times 10^{-34}$  J·s, 称为普朗克常量。以后的光电效应、X 光散射等实验证实了光子理论, 并肯定了光具有粒子

性。然而, 光的干涉、衍射等现象又必须肯定光具有波动性。事实使人们认识到光具有波粒二重性。后来发展的量子电动力学也较好地反映了光的这种二重性, 从而使人们对光的本性有了进一步认识。当然, 这种认识仍然是近似的, 但它更接近客观实际了。

### 1.1.2 光辐射的度量

辐射是一种能的形式。它有电磁本质, 又具有量子性质。凡高于热力学零度的物体都要进行热辐射, 温度低的物体发射红外光, 温度升高到  $500^\circ\text{C}$  时开始发射暗红色可见光, 温度升高到  $1500^\circ\text{C}$  时开始发白光。这种靠加热物体并保持一定温度而使内能不变的持续辐射, 称为物体热辐射或温度辐射。因此, 凡能发射连续光谱而辐射是温度函数的物体, 就称为热辐射体, 如一切动、植物体、太阳及钨丝白炽灯等。

若物体不是靠加热保温维持辐射, 而是靠外部能量激发的辐射, 则称为发光。显然, 它不是温度的函数, 其发光光谱是非连续光谱。这种靠外部能量激发的发光方式有电致发光、光致发光、化学发光等。一般地, 发光的物体也就是光源。由于发光是一种非平衡辐射过程, 其发光光谱主要是线光谱或带光谱。

#### 1. 辐射度量

由于光辐射伴随着辐射能的转移, 这种辐射能及其引起的特性, 需以能量或有效的物理量来测量。因此, 为了研究光辐射现象的规律, 测定出供给光源的能量(如电能)转换成光能效率的高低, 通常以表1-2 中所列出的一些基本参量来描述光源的辐射特性。

表 1-2 辐射度量与单位

| 度量的名称 | 符 号   | 定 义 式     | 单 位 名 称           | 单 位 符 号          |
|-------|-------|-----------|-------------------|------------------|
| 辐射能   | $Q_e$ |           | 焦耳                | J                |
| 辐射能密度 | $w_e$ | $dQ_e/dV$ | 焦耳/米 <sup>3</sup> | J/m <sup>3</sup> |

(续表)

| 度量的名称 | 符 号         | 定 义 式                                          | 单 位 名 称                 | 单 位 符 号                |
|-------|-------------|------------------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| 辐射通量  | $\Phi_e, P$ | $dQ_e/dt$                                      | 瓦                       | W                      |
| 辐射出射度 | $M_e$       | $d\Phi_e/dA$                                   | 瓦/米 <sup>2</sup>        | W/m <sup>2</sup>       |
| 辐射强度  | $I_e$       | $d\Phi_e/d\omega$ , $\omega$ 为点光源辐射通量所张开的立体角   | 瓦/球面度                   | W/sr                   |
| 辐射亮度  | $L_e$       | $dI_e/dA\cos\theta$ , $\theta$ 为观察方向与光源表面法线的夹角 | 瓦/(米 <sup>2</sup> ·球面度) | W/(m <sup>2</sup> ·sr) |
| 辐照度   | $E_e$       | $d\Phi_e/dA$                                   | 瓦/米 <sup>2</sup>        | W/m <sup>2</sup>       |

表 1-2 中已详细列出了各参量的定义式与单位, 这里仅对表中未列入的部分做一简要说明。辐射亮度  $L_e$  的数值与辐射源的性质有关, 并随给定方向而变。若  $L_e$  不随方向而变, 则  $I_e$  正比于  $\cos\theta$ , 即

$$I_e = I_0 \cos\theta \tag{1-2}$$

此式可用图 1-2 表示。满足式 (1-2) 的特殊光源称为余弦辐射体。余弦辐射体也称为均匀漫反射体或朗伯体。除了黑体、灰体外, 实验表明, 抛毛乳白玻璃的透视光或反射光, 抛毛乳白板的反射光及氧化镁、硫酸钡等表面的反射光很接近于理想的余弦辐射体。白雪对阳光的反射也符合余弦辐射体的规律。对余弦辐射体, 即服从朗伯定律的辐射体, 可推算出

$$M_e = \pi L_e \tag{1-3}$$

上式表明, 余弦辐射体的辐射出射度在数值上为其辐射亮度的  $\pi$  倍。

对于理想的散射面, 满足条件  $M_e = E_e$ , 于是由式 (1-3) 可得

$$E_e = \pi L_e \tag{1-4}$$

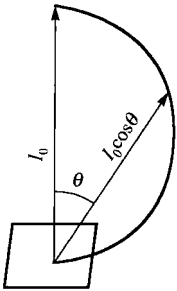


图 1-2 余弦辐射体

2. 光谱辐射度量(辐射量的光谱密度)

为了表征辐射, 不仅要知道辐射的总通量和强度, 还应知道其光谱组分。因为光源发出的光, 往往由许多波长的光组成。为了研究各种波长的光所分别辐射的能量, 还需要引入光谱辐射度量, 即单位波长间隔内的辐射度量, 其度量和单位如表 1-3 所示。

表 1-3 光谱辐射度量和单位

| 度量的名称   | 符 号            | 定 义 式              | 单 位                        | 单 位 符 号                                |
|---------|----------------|--------------------|----------------------------|----------------------------------------|
| 光谱辐射通量  | $\Phi_\lambda$ | $d\Phi_e/d\lambda$ | 瓦/微米                       | W/ $\mu\text{m}$                       |
|         | $\Phi_\nu$     | $d\Phi_e/d\nu$     | 瓦/赫                        | W/Hz                                   |
| 光谱辐射出射度 | $M_\lambda$    | $dM_e/d\lambda$    | 瓦/(米 <sup>2</sup> ·微米)     | W/(m <sup>2</sup> · $\mu\text{m}$ )    |
| 光谱辐照度   | $E_\lambda$    | $dE_e/d\lambda$    | 瓦/(米 <sup>2</sup> ·微米)     | W/(m <sup>2</sup> · $\mu\text{m}$ )    |
| 光谱辐射强度  | $I_\lambda$    | $dI_e/d\lambda$    | 瓦/(球面度·微米)                 | W/(sr· $\mu\text{m}$ )                 |
| 光谱辐射亮度  | $L_\lambda$    | $dL_e/d\lambda$    | 瓦/(米 <sup>2</sup> ·球面度·微米) | W/(m <sup>2</sup> ·sr· $\mu\text{m}$ ) |

光源发出的光在每单位波长间隔内的辐射通量称为光谱辐射通量(曾称为辐射通量的光谱密度或单色辐射通量), 记为  $\Phi_\lambda$ 。由于光源发出的各种波长的  $\Phi_\lambda$  一般是不同的, 因此若在波长  $\lambda \sim \lambda + d\lambda$  间隔内的辐射通量是  $d\Phi_e$ , 则在波长  $\lambda$  处的光谱辐射通量为

$$\Phi_\lambda(\lambda) = d\Phi_e(\lambda) / d\lambda \tag{1-5}$$

若按整个光谱积分该函数, 则可求得总的辐射通量值为

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_\lambda(\lambda) d\lambda \tag{1-6}$$

其他光谱辐射度量也有类似的关系。

### 3. 光度量

照明光源的特性只用前面所叙述的一些能量参数来描述是不够的, 因为能量参数并没有考虑到人眼的作用。由于照明的效果最终是以人眼来评定的, 因此照明光源的光学特性必须用基于人眼视觉的光学参量即光度量来描述。

光度量是人眼对相应辐射度量的视觉强度值。人的视神经对各种不同波长的光的感光灵敏度不一样, 能量相同而波长不同的光, 在人眼中引起的视觉强度不相同。国际照明委员会(CIE)用平均值的方法, 确定了人眼对各种波长的光的平均相对灵敏度, 称为光谱光视效率或视见函数  $V(\lambda)$ 。图1-3为明视觉和暗视觉两种情况下的人眼视见函数曲线。明视觉视见函数  $V(\lambda)$  的最大值在 555 nm 处, 此时  $V(\lambda)=1$ , 其他波长的  $V(\lambda)$  都小于 1; 暗视觉视见函数  $V'(\lambda)$  的最大值在 507 nm 处, 波长略偏短。各种波长下的  $V(\lambda)$  值可由 GB3102.6—93《光及有关电磁辐射的量和单位》中的附录 A 查出。表1-4列出了光度量和单位。

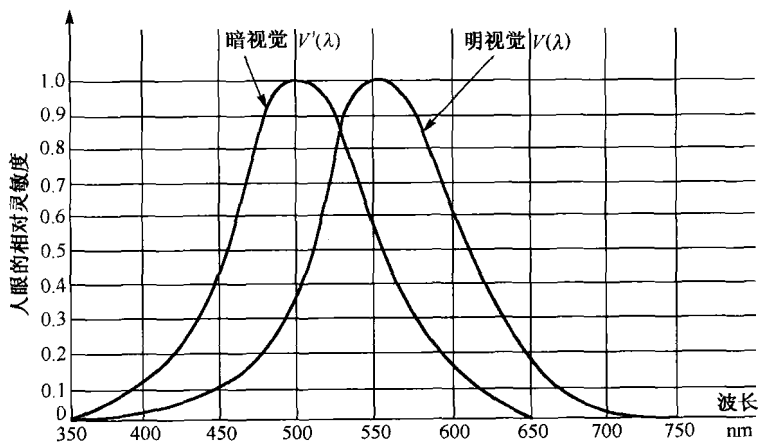


图 1-3 视觉典型的响应曲线

表 1-4 光度量和单位

| 度量的名称 | 符 号    | 定 义 式                                                   | 单 位 名 称                 | 单 位 符 号                 |
|-------|--------|---------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 光通量   | $\Phi$ | $K_m \int \lambda \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$ | 流明                      | lm                      |
| 光出射度  | $M$    | $d\Phi/dA$                                              | 流明/米 <sup>2</sup>       | lm/m <sup>2</sup>       |
| 光照度   | $E$    | $d\Phi/dA$                                              | 勒克斯(流明/米 <sup>2</sup> ) | lx (lm/m <sup>2</sup> ) |
| 发光强度  | $I$    | $d\Phi/d\omega$                                         | 坎德拉(流明/球面度)             | cd (lm/sr)              |
| 光亮度   | $L$    | $dI/(dA \cdot \cos\theta)$                              | 坎德拉/米 <sup>2</sup>      | cd/m <sup>2</sup>       |
| 光量    | $Q$    | $\int \Phi dt$                                          | 流明·秒                    | lm·s                    |

若在波长  $\lambda \sim \lambda + d\lambda$  间隔内光源的辐射通量为  $\Phi_{e,\lambda} d\lambda$ , 则光通量的表达式为

$$\Phi = K_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda = K_m \int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1-7)$$

式中,  $K_m$  为辐射度量与光度量之间的比例系数;  $V(\lambda)$  为人眼的光谱光视效率, 积分限的变换是由于对波长小于 380 nm 和大于 780 nm 的不可见光,  $V(\lambda)=0$ 。

式(1-7)中等号左边的  $\Phi$  是光通量, 其单位是流明(lm); 而等号右边的  $\Phi_{e,\lambda} d\lambda$  是辐射通量, 其单位是瓦(W);  $V(\lambda)$  是一个无量纲(即量纲为 1)的系数。所以, 等号右边引进了一个系数  $K_m$ , 从而使两边的单位一致。显然,  $K_m$  的单位为流明/瓦, 其值为 683 lm/W, 称为最大光谱光视效能。它表示在波

长为 555 nm 处, 即  $V(\lambda) = 1$  处, 与 1 W 的辐射通量相当的光通量为 683 lm; 换句话说, 此时 1 lm 相当于 1/683 W。

对于点光源所产生的照度, 有下述的距离平方反比定律: 用点光源照明时, 被照面的照度与光源的发光强度  $I$  成正比, 而与被照面到光源的距离  $l$  的平方成反比, 即

$$E = I/l^2 \quad (1-8)$$

如果被照面不垂直于光线方向, 而其法线与光线的夹角为  $\theta$ , 则式 (1-8) 应改写成

$$E = I/l^2 \cdot \cos\theta \quad (1-9)$$

对于受到光照后成为面光源的表面来说, 其光出射度与光照度 (两者的不同如图 1-4 所示) 成正比, 即

$$M = \rho E \quad (1-10)$$

式中,  $\rho$  为小于 1 的系数 (漫反射率), 与表面的性质有关。

对于余弦辐射体, 光亮度不随方向而变, 它和光出度  $M$  之间存在着与式 (1-3) 相似的关系:

$$M = \pi L \quad (1-11)$$

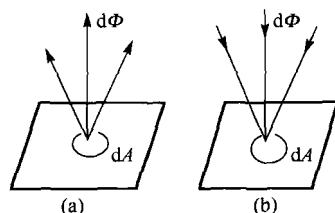


图 1-4 光出射度与光照度

必须注意, 不要把照度跟亮度的概念混淆起来。它们是两个完全不同的物理量。照度表征受照面的明暗程度, 照度与光源至被照面的距离的平方成反比。而亮度是表征任何形式的光源或被照射物体表面是面光源时的发光特性。如果光源与观察者眼睛之间没有光吸收现象存在, 那么亮度值与二者间的距离无关。

## 1.2 半导体物理基础

自然界中存在着气体、液体或固体, 而固体, 按其原子排列来说, 可以分成晶体与非晶体两类; 按导电能力, 则可分成导体、绝缘体和介于二者之间的半导体三类。

通常, 把电阻率在  $10^{-6} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  范围内的物质称为导体 (如银、铜、铝、铁等金属); 把电阻率在  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  以上的物质称为绝缘体 (如塑料、陶瓷、橡皮、石英玻璃等); 把电阻率介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。正是由于这种半导体具有重要的特殊性能, 因而才得到了广泛的应用。其特性是: (1) 半导体的电阻温度系数一般是负的, 它对温度的变化非常敏感。根据这一特性, 制作了许多半导体热探测元件。(2) 半导体的导电性能可受极微量杂质的影响而发生十分显著的变化。如纯硅在室温下的电导率为  $5 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 当掺入硅原子数的  $1/10^6$  的杂质时, 其纯度虽仍高达 99.9999%, 但电导率却上升至  $2 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 几乎增加了  $10^6$  倍! 此外, 随着所掺入的杂质的种类不同, 可以得到相反导电类型的半导体。如在硅中掺入硼, 可得到 P 型半导体; 掺入锑, 可得到 N 型半导体等。(3) 半导体的导电能力及性质会受热、光、电、磁等外界作用的影响而发生非常重要的变化。例如, 沉积在绝缘基板上的硫化镉层不受光照时的阻抗可高达几十甚至几百兆欧, 但一旦受到光照, 电阻就会下降到几十千欧, 甚至更小。

常见的半导体材料有硅、锗、硒等元素半导体, 砷化镓 (GaAs)、铝砷化镓 ( $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ )、锑化铟 (InSb)、硫化镉 (CdS) 和硫化铅 (PbS) 等化合物半导体, 还有如氧化亚铜的氧化物半导体、砷化镓-磷化镓的固溶体半导体, 以及有机半导体、玻璃半导体、稀土半导体等。利用半导体的特殊性质, 可制成光敏器件、热敏器件、场效应器件、体效应器件、霍耳器件、红外接收器件、电荷耦合器件等, 以及各种二极管、三极管、集成电路等。

### 1.2.1 半导体的能带

为了解释固体材料的不同导电特性,人们从电子能级的概念出发引入了能带理论,它是半导体物理的理论基础。应用能带理论,可以解释发生在半导体中的各种物理现象和各种半导体器件的工作原理。

#### 1. 原子中电子的能级

大家知道,原子是由一个带正电的原子核与一些带负电的电子所组成的。这些电子环绕着原子核在各自的轨道上不停地运动着。根据量子论,电子运动有如下三个重要特点:(1)电子绕核运动,具有完全确定的能量,这种稳定的运动状态称为量子态。每一量子态所取的确定能量称为能级。图 1-5 是硅原子中电子绕核运动的轨道及与其相应的能级示意图。最里层的量子态,电子距原子核最近,受原子核束缚最强,能量最低。越外层的量子态,电子受原子核束缚越弱,能量越高。电子可以吸收能量从低能级跃迁到高能级上。电子也可在一定条件下放出能量重新落回到低能级上。但不可能有介于各能级之间的量子态存在。(2)由于微观粒子具有粒子与波动的两重性,因此严格地说,原子中的电子没有完全确定的轨道。这里的“轨道”所代表的是电子出现概率最大的一部分区域。(3)在一个原子或原子组成的系统中,不能有两个电子同属于一个量子态,即在每一个能级中,最多只能容纳两个自旋方向相反的电子,这就是泡利不相容原理。此外,电子首先填满最低能级,而后依次向上填,直到所有电子填满为止。

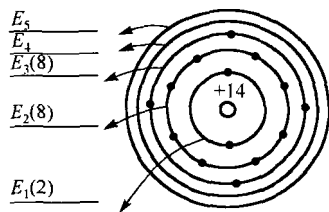


图 1-5 硅原子中电子绕核运动轨道及其相应能级示意图

#### 2. 晶体中电子的能带

物质是由原子组成的。原子以一定的周期重复排列所构成的物体称为晶体。当原子结合成晶体时,因为原子之间的距离很近,不同原子之间的电子轨道(量子态)将发生不同程度的交叠。当然,晶体中两个相邻原子的最外层电子的轨道重叠最多。这些轨道的交叠,使电子可以从一个原子转移到另一个原子上。结果,原来隶属于某一原子的电子,不再是此原子私有的,而是可以在整个晶体中运动,成为整个晶体所共有,这种现象称为电子的共有化。越外层电子的交叠程度越大,且原子核对它的束缚越小。因此,只有最外层电子的共有化特征才是显著的。

晶体中电子虽然可以从一个原子转移到另一个原子,但它只能在能量相同的量子态之间发生转移。所以,共有化的量子态与原子的能级之间存在着直接的对应关系。因此, $N$ 个原子排列起来结合成晶体,原来分属于 $N$ 个单个原子的相同能级,由于在晶体中不同的位置而对应分裂或属于整个晶体的 $N$ 个能量稍有差别的能级,如图 1-6 所示。这些能级互相靠得很近,分布在一定的能量区域。将这

能量区域中密集的能级形象地称为能带。由于能带中能级之间的能量差很小,所以通常可以把能带内的能级看成是连续的。在一般的原子中,内层电子的能级都是被电子填满的。当原子组成晶体后,与这些内层的能级相对应的能带也是被电子所填满的。能量最高的是价电子填满的能带,称为价带。价带以上的能带基本上空的,其中最低的带称为导带。价带与导带之间的区域则称为禁带。

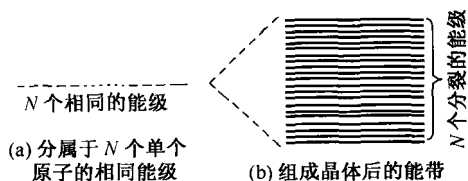


图 1-6  $N$  个原子结合成晶体前后的能级状态变化

绝缘体、半导体、导体的能带情况如图 1-7 所示。一般地,绝缘体的禁带比较宽,价带被电子填

满,而导带是空的。半导体的能带与绝缘体相似,在理想的热力学零度下,也有被电子填满的价带和全空的导带,但其禁带比较窄。正因为如此,在一定的条件下,价带的电子容易被激发到导带中。半导体的许多重要特性就是由此引起的。导体的能带情况有两种:一是它的价带没有被电子填满,即最高能量的电子只能填充价带的下半部分,而上半部分空着;二是它的价带与导带相重叠。

值得指出的是,能带图并不实际存在,只是用来说明电子的能量分布情况。

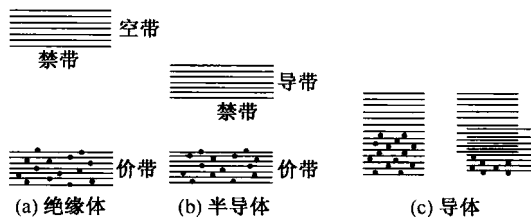


图 1-7 绝缘体、半导体、导体的能带

### 3. 半导体的导电机构

在晶体中,根据泡利不相容原理,每个能级上最多能容纳两个电子。因此,要改变晶体中电子的运动状态,以便改变电子的运动能量,使它跃迁到新的能级中去,一般需要满足两个条件:一是具有能向电子提供能量的外界作用;二是电子要跃入的那个能级是空的。

由于导带中存在大量的空能级,当有电场作用时,导带电子能够得到能量而跃迁到空的能级中,即导带电子能够改变运动状态。也就是说,在电场的作用下,导带电子能够产生定向运动而形成电流。所以导带电子是可以导电的,而填满电子的价带中的电子是不能导电的。如果价带中的一些电子在外界作用下跃迁到导带,那么在价带中就留下了缺乏电子的空位。可以设想,在外加电场作用下,邻近能级的电子可以跃入这些空位,而在这些电子原来的能级上又出现了新的空位。以后,其他电子又可以再跃入这些新的空位,这就好像空位在价带中移动一样,只不过其移动方向与电子相反罢了。因此,对于有电子空位的价带,其电子运动状态就不再是不可改变的了。在外加电场的作用下,有些电子在原来热运动上叠加了定向运动,从而形成了电流。

导带和价带电子的导电情况是有区别的,即导带的电子越多,其导电能力越强;而价带的电子的空位越多,即电子越少,其导电能力越强。为了处理方便,我们把价带的电子空位想象为带正电的粒子。显然,它所带的电量与电子相等,符号相反。在电场作用下,它可以自由地在晶体中运动,像导带中的电子一样能够起导电作用,这种价带中的电子空位,我们通常称之为空穴。由于电子和空穴都能导电,因此一般把它们统称为载流子。

#### (1) 本征半导体的能带

完全纯净和结构完整的半导体称为本征半导体。它的能带图如图 1-8 所示。其中图 1-8(a)是假设在热力学零度时,又不受光、电、磁等外界作用的本征半导体能带图。此时,导带没有电子,价带也没有空穴。因此,这时的本征半导体和绝缘体一样,不能导电。但是,由于半导体的禁带宽度  $E_g$  较小,因而在热运动或其他外界因素的作用下,价带的电子可激发跃迁到导带,如图 1-8(b)所示。这时,导带有了电子,价带也有了空穴,本征半导体就有能力导电了。电子由价带直接激发跃迁到导带称为本征激发。对于本征半导体来说,其载流子只能依靠本征激发产生。因此,导带的电子和价带的空穴是相等的。这就是本征半导体的导电机构的特性。

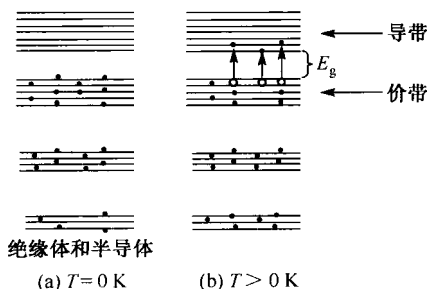


图 1-8 本征半导体能带图

#### (2) 杂质半导体的能带

实际上,晶体总是含有缺陷和杂质的,而杂质原子上的能级和晶体中其他原子不同,它可以在晶体能级的禁带中,即束缚态的能量一般处在禁带中。如在 4 价的硅或锗晶体中,掺入 5 价原子(如磷、砷、锑等)就可构成 N 型半导体。5 个价电子中有 4 个价电子与硅原子形成共价键,多余的一个价