


普通高等教育“十二五”规划教材

光电检测 技术及应用

GUANGDIAN JIANCE JISHU JI YINGYONG

徐熙平 张宁 编著



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

光电检测技术及应用

徐熙平 张 宁 编著



机械工业出版社

本书为高等工科院校“测控技术与仪器”、“光电信息工程”、“光学工程”、“光信息科学与技术”、“光电子技术”、“计量技术”、“电子技术”等专业的“光电检测技术”课程的通用教材。

本书分为上下两篇：上篇主要讲述了光电检测系统的组成、基本概念、基础知识，对光电检测技术中的光源、光电检测器件的结构、原理、特性参数和使用方法进行了详细说明，并对辐射信号检测的原理与方法及与典型器件对应的检测电路的设计进行了系统论述；下篇结合作者光电检测技术方面的科研成果，具体与系统地描述了光电检测系统的应用，如光学相关检测、外形尺寸检测、位移量检测、外观检测、光纤传感检测以及光电检测技术综合应用的具体实例。

本书具有理论和实际密切结合、论述系统深入而又通俗易懂的特点，既可以作为相关专业的大学本科教材，也可以作为研究生教材和相关工程技术人员设计光电检测系统的参考资料。

为方便教学，本书配有免费教学课件，各章节后的思考题和习题配有免费的参考答案，欢迎选用本书作教材的老师索取，索取邮箱：xyp@cust.edu.cn 或 custzn@126.com。

图书在版编目 (CIP) 数据

光电检测技术及应用/徐熙平, 张宁编著. —北京: 机械工业出版社, 2012. 1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-37068-0

I. ①光… II. ①徐…②张… III. ①光电检测—高等学校—教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 002988 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 贡克勤 责任编辑: 贡克勤 任正一
版式设计: 霍永明 责任校对: 刘秀丽
封面设计: 路恩中 责任印制: 杨 曦
北京京丰印刷厂印刷
2012 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷
184mm × 260mm · 18.75 印张 · 474 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-37068-0
定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

销售二部: (010)88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

光电检测技术是现代检测技术最重要的手段和方法之一，是计量检测技术的一个重要的发展方向，是“测控技术与仪器”、“光电信息工程”、“光学工程”、“光信息科学与技术”、“光电子技术”、“计量技术”、“电子技术”等专业的重要课程。为适应当前光电技术和光电检测技术的发展，满足当前信息化社会对高等学校人才培养的需要，结合多年来教学实践和科研成果并汲取相关书刊资料的精华，特编著了《光电检测技术及应用》这本教材。

本书力求做到实用性、先进性和创新性，在理论方面力求简明易懂，选材方面力求紧跟技术发展动向。为了帮助学生及教师了解光电检测系统的组成、理解光电检测器件的性能及应用、掌握运用各种光电器件进行检测的方法，书中引入了大量工程实例，并且各章都给出了思考题和习题。

本书分为上下两篇，共12章。上篇为基础理论篇：第1章介绍了光电检测系统的组成及特点；第2章介绍了各类光电效应；第3章分别介绍了光电导器件、光生伏特器件、光电发射器件、热辐射探测器件、热释电器件、光电耦合器件和图像传感器等各种光电传感器的结构、工作原理、特性参数和使用方法；第4章介绍了发光二极管、激光器常用光源的工作原理、特性及其应用；第5章介绍了辐射信号检测的方法，如直接检测、光外差检测、基于几何光学方法的光电信息变换检测、温度检测、莫尔条纹检测，并结合实例说明了使用调制盘检测、投影放大法、光三角法、光扫描法、光焦点法等进行长、宽尺寸测量的原理；第6章介绍了常用的光电传感器如光敏电阻、光敏二极管、CCD等对应的典型电路，并举例说明了使用可编程逻辑器件进行CCD驱动的方法，视频信号的二值化处理方法，光电信号常用的辨向处理和细分电路。下篇为技术应用篇：第7章讲述了光学相关检测的基本概念和应用、光学相关探测器的原理和典型电路；第8~10章分别讲述了光电检测技术在外形尺寸检测、位移量检测、外观检测方面的应用；第11章讲述了光导纤维的基本知识以及光纤传感器的原理和应用；第12章讲述了光电检测技术的综合应用，如光电多功能二维自动检测系统、曲臂光电综合测量系统、激光扫描圆度误差测量系统、飞轮齿圈总成圆跳动非接触检测系统、座圈尺寸光电非接触测量系统、管道直线度光电检测系统。本书内容全面，理论与实践紧密结合，既可方便本科生学习光电检测技术的理论知识，为今后科研、生产解决光电检测技术问题打下基础，又可为相关专业研究生和科研工作者开拓思路提供参考。

本书主要注重光电检测系统原理与应用，特别是对光电检测系统总体技术方面进行了详细介绍。在编写的过程中得到了长春理工大学多位老师的支持，特别是长春理工大学光电工程学院马宏教授对本书进行了详细的审阅，提出了许多有价值的修改意见。同时参考了王庆有老师编著的《光电技术》、雷玉堂老师编著的《光电检测技术》和曾庆永老师编著的《微弱信号检测》等教材。另外，本书编写过程中，长春理工大学光电工程学院光电检测实验室的研究生们付出了辛勤的劳动，进行了文字、公式和图表的编辑

工作，在此一并致谢。

由于作者知识面所限，书中错误之处难免，呈请各位老师、同学提出宝贵意见。

作 者

目 录

前言

上篇 基础理论篇

第1章 绪论	1	3.5.2 热释电器件的电压灵敏度	67
第2章 光电效应	4	3.5.3 热释电器件的噪声、响应时间与阻抗特性	68
2.1 半导体物理基础	4	3.5.4 快速热释电探测器	69
2.1.1 半导体的特性	4	3.6 光耦合器件	70
2.1.2 能带理论	4	3.6.1 光耦合器件的结构与电路符号	70
2.1.3 半导体的导电结构	6	3.6.2 光耦合器件的特性参数	71
2.1.4 载流子的运动	8	3.6.3 光耦合器件的应用	74
2.1.5 半导体的PN结	10	3.7 图像传感器	76
2.1.6 半导体对光的吸收	12	3.7.1 图像传感器的分类	76
2.2 内光电效应	13	3.7.2 真空摄像管	77
2.2.1 光电导效应	13	3.7.3 电荷耦合器件	80
2.2.2 光生伏特效应	15	3.7.4 CMOS图像传感器	90
2.3 外光电效应	17	3.7.5 红外热成像	93
思考题与习题	18	3.7.6 图像的增强与变像	94
第3章 光电检测器件	19	思考题与习题	99
3.1 光电导器件	19	第4章 半导体发光管与激光器	101
3.1.1 光敏电阻的原理与结构	19	4.1 发光二极管	101
3.1.2 典型光敏电阻	20	4.1.1 发光二极管的发光机理	101
3.1.3 光敏电阻的基本特性	21	4.1.2 发光二极管的应用	106
3.2 光生伏特器件	26	4.2 半导体激光器	107
3.2.1 光敏二极管	26	4.2.1 半导体激光器的发光原理	107
3.2.2 硅光电池	31	4.2.2 半导体激光器的结构	109
3.2.3 光敏晶体管	33	4.3 几种典型的激光器	113
3.2.4 色敏光生伏特器件	37	4.3.1 气体激光器	113
3.2.5 光生伏特器件组合件	39	4.3.2 固体激光器	115
3.2.6 光电位置敏感器件	43	4.3.3 染料激光器	116
3.3 光电发射器件	47	思考题与习题	118
3.3.1 光电倍增管	47	第5章 辐射信号检测	119
3.3.2 真空光电管	56	5.1 直接探测法	119
3.4 热辐射探测器件	56	5.1.1 光学系统	119
3.4.1 热敏电阻	57	5.1.2 调制盘	120
3.4.2 热电偶探测器	60	5.1.3 调制盘对背景信号的空间滤波	122
3.4.3 热电堆探测器	62	5.2 光外差探测法	123
3.5 热释电器件	64	5.2.1 光外差探测原理	123
3.5.1 热释电器件的基本工作原理	64		

5.2.2 光外差探测的特性	124	6.2 光生伏特器件的偏置电路	147
5.3 白噪声中的脉冲探测	125	6.2.1 反向偏置电路	147
5.3.1 探测阈值及信噪比	125	6.2.2 零伏偏置电路	150
5.3.2 滤波器带宽的选择	127	6.3 光电管的偏置电路	150
5.4 几何光学方法的光电信息变换	128	6.4 CCD 器件驱动电路	152
5.4.1 长、宽尺寸信息的光电变换	128	6.4.1 CCD 驱动电路时序方法	154
5.4.2 位移信息的光电变换	134	6.4.2 可编程器件产生 CCD 驱动时序	154
5.4.3 速度信息的光电变换	137	6.5 视频信号二值化处理电路	157
5.5 温度检测	140	6.5.1 阈值法	157
5.6 莫尔条纹	141	6.5.2 微分法	159
思考题与习题	143	6.6 光电信号辨向处理与细分电路	159
第 6 章 光电检测系统典型电路	144	6.6.1 光电信号辨向处理	160
6.1 光敏电阻的变换电路	144	6.6.2 电子细分	162
6.1.1 基本偏置电路	144	思考题与习题	174
6.1.2 恒流电路	145		
6.1.3 恒压电路	146		

下篇 技术应用篇

第 7 章 光学相关检测	176	9.1 激光干涉位移检测	206
7.1 基本概念	176	9.1.1 激光干涉原理	206
7.1.1 能量信号与功率信号	176	9.1.2 激光干涉仪原理	208
7.1.2 相关函数	176	9.2 光栅线位移检测	211
7.1.3 相关接收	177	9.2.1 光栅位移传感器(光栅尺) 的光电读数头	211
7.1.4 相敏检波器	179	9.2.2 光源和光强调制	214
7.2 互相关器	180	9.2.3 四相交流信号和前置放大器	214
7.2.1 互相关器的工作原理	180	9.2.4 光栅位移检测装置 (光栅尺)	216
7.2.2 互相关器的典型电路	183	9.3 光栅角位移检测	217
7.3 光学相关检测与识别	184	9.3.1 概述	217
7.3.1 光学相关检测概况	184	9.3.2 增量式轴角编码器	218
7.3.2 光学相关检测原理	184	9.3.3 绝对式光电轴角编码器 的基本原理	219
7.3.3 实时联合变换相关器的结构	188	9.3.4 读数和细分	223
7.3.4 光学相关器主要部件的确定	188	9.3.5 狭缝及光电信号	224
7.3.5 光学相关器的应用	190	9.3.6 编码器误差	226
思考题与习题	191	9.4 轴向位移测量	227
第 8 章 外形尺寸检测	192	9.5 激光测距	229
8.1 概述	192	9.5.1 脉冲法测距	230
8.2 模拟变换检测法	192	9.5.2 相位法测距	232
8.3 光电扫描检测法	194	9.5.3 典型仪器简介	236
8.3.1 光学扫描法	194	思考题与习题	238
8.3.2 电扫描法	198	第 10 章 外观检测	239
8.4 CCD 自扫描检测法	200		
思考题与习题	205		

10.1 外观检测的方式和原理	239	第 12 章 光电检测技术的	
10.1.1 反射式与透射式外观检测	239	综合应用	263
10.1.2 正反射式与非正反射式 (漫反射式) 检测	240	12.1 光电多功能二维自动 检测系统	263
10.1.3 扫描方式	241	12.1.1 测量系统的总体结构	263
10.2 光电变换器	242	12.1.2 同轴度误差测量系统	264
10.2.1 疵病信号	242	12.1.3 环距测量方法的研究	265
10.2.2 光源选择	244	12.2 曲臂光电综合测量系统	268
10.3 信号处理及检测装置	245	12.2.1 系统的组成与总体布局	269
10.3.1 通量式疵病信号的 处理方法	245	12.2.2 被测参数测量原理	271
10.3.2 检测装置	246	12.3 激光扫描圆度误差测量系统	278
10.4 表面粗糙度检测	250	12.3.1 圆度误差测量原理	278
10.4.1 概述	250	12.3.2 工件安装偏心误差的检测	279
10.4.2 激光外差法检测粗糙度原理	251	12.3.3 实验结果与分析	280
10.5 内表面疵病检测	252	12.4 飞轮齿圈总成圆跳动非 接触检测系统	280
10.5.1 管道内表面疵病检测 系统组成	252	12.4.1 测量系统原理	280
10.5.2 检测系统工作原理与特点	254	12.4.2 实验结果和分析	281
思考题与习题	255	12.5 座圈尺寸光电非接触测量系统	281
第 11 章 光纤传感测量	256	12.5.1 总体结构与工作原理	282
11.1 光导纤维的基本知识	256	12.5.2 直径测量原理	282
11.1.1 光纤传光原理	256	12.5.3 数据处理系统设计	283
11.1.2 光纤的分类	256	12.5.4 测量结果与分析	284
11.1.3 光纤的基本特性	257	12.6 管道直线度光电检测系统	284
11.2 光纤传感器原理及应用	259	12.6.1 直线度光电检测 的结构与工作原理	284
11.2.1 分类与特点	259	12.6.2 检测系统的组成	285
11.2.2 光纤传感器	259	思考题与习题	288
11.2.3 光变换器与光纤兼容	261	部分习题参考答案	289
思考题与习题	262	参考文献	291

上篇 基础理论篇

第1章 绪 论

1. 学习光电检测技术的目的和意义

采用不同的手段和方法获取信息,运用光电技术的方法来检验和处理信息,从而实现各种几何量和物理量的测量,称为光电检测技术。光电检测技术具有系统性和综合性,涉及光学、电子学、计算机科学等多个领域。其中,光学理论包括几何光学理论、量子光学理论、干涉衍射理论、光栅理论、光电发射理论等;电子学理论包括电磁波理论、放大器理论、晶体管电路基础理论、集成电路理论、模拟电路和数字电路理论、噪声理论、电子元器件失效的浴盆效应理论等;计算机科学包含计算机硬件、软件(程序设计)技术、网络技术。

随着科学技术和生产的发展,光电技术已深入到各行各业,在信息与信号提取和分析中起到重要作用。光电信息的检测和处理已成为十分重要的研究内容,国内对光电技术的发展日益重视,已形成现代高新技术的光电子产业。作为高等院校,从培养创新人才的角度出发,对光电检测技术尤为重视,几乎所有工科院校均设有光电技术方面的课程。光电检测相关的教材与各种论著也大量出现,但为了配合本科生教学,内容多侧重于元器件原理与特性介绍,对于光电检测技术总体设计与应用讲解较少。而近年来国内应用光电技术,针对不同的检测需求,开发了大量典型光电检测仪器与系统,形成许多光电检测新技术与新方法。鉴于这种情况需要对光电检测技术应用进行介绍,以供广大学生对现代光电检测的基本原理和有关新技术有所了解,达到抛砖引玉的目的。

2. 光电检测技术的特点和发展状况

光电检测技术有强大的生命力,并已得到广泛应用。它具有以下主要优点:

(1) 便于数字化和智能化 因为被测非电量经光电变换后成为电信号,可用电子技术进行处理,易于实现数字化和微型计算机处理;它与计算机结合,可形成各种智能检测仪器。

(2) 检测精度高、速度快 光电信息量的变换是以光为媒介,并以光子数、光的波长和速度为测量依据。因此,用于检测非电量时精度高、速度快。例如,以光的波长为基准的激光干涉测长仪,其分辨率为波长的 $1/8$,采用细分后甚至更小;光栅测长装置,其分辨率可小于 $1\mu\text{m}$;光电轴角编码器,其分辨率可达到 $0.05''$ 量级。

(3) 非接触式检测 被测对象和传感器之间是以光为媒介,进行光信息变换和传输。因此,克服了接触式传感器由于磨损而影响检测精度和寿命以及损坏被检测对象的缺点。另外,如果采用光导光纤传输光信息,被测量将不受方向和位置的限制,使用起来更为方便。因此,光电检测适于生产、计量过程中的自动检测和控制,特别是在线无损检测。

(4) 遥测遥控 利用光信息远距离传输的特点,便于实现遥测遥控。例如,激光测距、激光通信、光电火炮控制、光电制导和光电跟踪等。

总之，由于光电检测有上述优点，所以在工农业生产、科研和国防等方面得到广泛的重视和应用。尤其是在精密计量、生产过程中的自动检测、遥感及图像处理、光通信和军事等方面都卓有成效地应用光电检测技术。此外，在医疗卫生、环境保护、防火防盗等方面也得到了较好的应用。

3. 光电检测系统的组成

光电检测系统组成框图如图 1-1 所示。包括辐射源、光学系统、光电系统、电子学系统和计算机系统 5 大部分。不管是何种光电检测系统，不管它多么简单或复杂，总离不开这 5 个关键核心部分，只是结构有些差异。

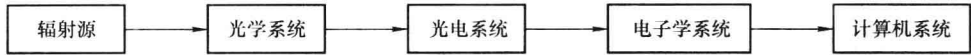


图 1-1 光电检测系统组成框图

辐射源一般由光源及其电源组成，是将电能转换成光能的系统，通过该系统得到符合后面光学系统所要求的波段范围和光强度（光通量）。辐射源类型各有差异，但它是一切光电检测系统不可缺少的部分，有些光电检测系统将待测物体本身作为检测对象，此时是将待测物体本身作为辐射源。如使用热释电检测器件做成的自动感应灯（见图 1-2），热释电晶片表面必须罩上一块由一组平行的棱柱形透镜所组成的菲涅尔透镜以提高其视场范围，当人体在透镜的监视视野范围中运动时，晶片上的两个反向串联的热释电单元将输出一串交变脉冲信号，再经过信号处理电路对获得的信息进行放大、鉴别处理后即可用于自动亮灯。也可以将该系统应用于其他领域，如在房间无人时会自动停机的空调机、饮水机；判断无人观看或观众已经睡觉后能够自动关机的电视机；能在有人进入时开启监视器或门铃的可视自动对讲系统；自动记录动物或人的活动的摄影机或数码照相机等。

光学系统是将辐射源发出的光进行光学色散、几何成像、分束和改变辐射流的传送方向等，目的是让光信号携带有待测物体信息的同时还便于进行后续的光电转换。光学系统一般都是由物镜、目镜、滤光镜（有些系统还有调制盘、光机扫描器、探测器辅助光学系统）等组成。如分光光度计、光度计以及色谱仪器里的单色器系统，简单的

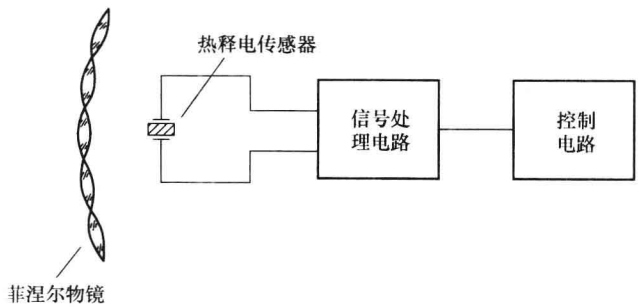


图 1-2 使用热释电器件做成的自动感应灯

单色器可以直接用滤光片从复合光中得到单色光，复杂的单色器则由入射狭缝、出射狭缝、准直镜、光栅、物镜等元器件组成的光学系统得到单色光。

光电系统是将光信号转换成电信号的系统，是任何光电检测系统中不可替代的部分，只是光电系统的类型不同、结构不同而已。例如，有的用光电倍增管，有的用硅光电池，有的用光敏二极管阵列或 CCD 器件。光学信息必须转换为电信号才能进行电学处理、计算、输出显示等。光电元器件的质量必须稳定可靠，必须有很高的转换效率并有相应的光谱响应范围，有的元件还要求有相应的电源供电电路，如光电倍增管必须加一个非常稳定的 300 ~ 1000V 的直流高压电源才能保证器件正常工作。

电子学系统是对光电系统传输过来的电信号进行放大,使之满足后续 A/D 系统和计算机系统的要求,从而保证计算机系统能够进行数据处理、计算和控制,它同样也是必备的部分。电子学系统的噪声和漂移非常重要,是影响整个光电检测系统可靠性的主要性能指标。电子学系统主要由模拟电路和数字电路组成。进行电子学系统的设计除了需要掌握电子学理论之外,还需要对各种光电器件的光电特性有所了解,例如,设计光电倍增管电路时,一般将负载电阻取为 $10 \sim 100\text{k}\Omega$,最佳的选择是 $10 \text{ k}\Omega$ 左右,如果设计成几十兆欧就会使得器件噪声很大,很不稳定。放大器的设计不能简化,一般采用两级或两级以上的放大器组成一个完整的放大器。在弱信号检测时,需要尽量降低光电器件和前置放大器的噪声,但即使这样仍不能解决来自背景和外部干扰的噪声,还必须采取有效办法来抑制或降低一切来自系统内部和外部的噪声,如取样积分器、锁相放大器、光子计数器等。电子学系统的任务就是从噪声中准确而不失真地将信号检取出来。

计算机系统包括自动控制、数据处理、显示输出等,可以采用单片机或微型计算机。计算机系统是现代智能仪器的重要组成部分,它直接决定所设计的光电检测系统的自动化程度。同时可以避免人为操作误差,保证系统工作安全运转并工作在最佳状态。计算机系统采用的计算方法的正确性、准确性将最终决定分析数据的可靠性。

这 5 个组成部分是相互关联的,设计时需要了解各部件间的相互关系,性能技术指标对其前后部件的影响以及影响大小,对前后部件的要求等,在设计前都要用具体数据明确规定。如辐射源发出的光通量太小时,后续的光学系统接收的光信号也较小,从而影响光电系统的输出信号,使后续的电子学系统放大倍数增大,增加放大器的噪声,从而使光电检测系统的噪声增大而稳定性或精度下降。

要实现检测指标要求,采用一般的直接检测办法有时难以完成,必须采用新的检测技术,如激光位移检测技术、激光扫描检测技术、CCD 信号处理技术、光学相关检测技术、光外差探测技术、光纤检测技术、数字传感技术及由此技术组成的测量系统。本书在编写过程中尽量做到理论和实际相结合,为便于学习和理解,还编写了辐射信号检测、激光测距、公差尺寸检测和外观检测等,并介绍了计算机在相应检测中的应用。

总之,光电检测技术是一门交叉科学,涉及的知识面比较广泛。通过本课程学习,可以开拓视野、增长知识,并培养学生具有初步研究、分析和设计光电检测系统的能力,为今后从事电子技术、检测技术、精密仪器等方面的工作打下基础。

第2章 光电效应

光与物质作用产生的光电效应分为内光电效应与外光电效应两类。被光激发所产生的载流子（自由电子或空穴）仍在物质内部运动，使物质的电导率发生变化或产生光生电动势的现象，称为内光电效应。而被光激发产生的电子逸出物质表面，形成真空中的电子的现象，称为外光电效应。内光电效应是光敏电阻、光敏二极管、光电池、光敏晶体管等的核心技术，外光电效应是真空光电倍增管、摄像管、变像管和像增强器等的核心技术。本章主要讨论内光电效应与外光电效应的基本原理，它是光电检测技术的重要基础。

2.1 半导体物理基础

2.1.1 半导体的特性

自然界中存在着各式各样的物质，它们可以分成气体、液体或固体三种。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种。由于半导体具有许多特殊的性质，因而在电子工业与光电工业等方面占有极其重要的地位。

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是 $5 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，当掺入硅原子数的百万分之一的杂质时，其纯度虽仍高达 99.9999%，但电导率却上升至 $2 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，几乎增加了一百万倍！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。

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-磷化镓固熔体半导体，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，制成了热敏器件、光电器件、场效应器件、体效应器件、霍尔器件、红外接收器件、电荷耦合器件、二极管、晶体管、集成电路等半导体器件。

2.1.2 能带理论

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。

原子是由一个带正电的原子核与一些带负电的电子组成。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，电子运动有下面三个重要特点：

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的能量称为能级。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。最外层的量子态，电子受原子核束缚最弱，能量最强。电子可以吸收能量从低能级跃迁到高能级上去。电子也可以在一定条件下放出能量重新落回到低能级上来。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，严格说原子中的电子没有完全确定的轨道。但为方便起见，我们仍用“轨道”这个词，这里的“轨道”所代表的是电子出现几率最大的一部分区域。

3) 在一个原子或由原子组成的系统中，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。

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去。结果，原来隶属于某一原子的电子，不再是此原子私有的了，而是可以在整个晶体中运动，成为整个晶体所共有，这种现象称作电子的共有化。晶体中原子内层和外层电子的轨道交叠程度很不相同。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。由于电子的这种共有化，整个晶体成了统一的整体。通常将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，内层原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。在热力学温度零度下，硅、锗、金刚石等共价键结合的晶体中，从其最内层的电子直到最外边的价电子都正好填满相应的能带。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是空的，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 2-1 所示为绝缘体、半导体、导体的能带情况。一般，绝缘体的禁带比较宽，价带被电子填满，而导带一般是空的。半导体的能带与绝缘体相似，在理想的热力学温度零度下，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去。半导体的许多重要特性就是由此引起的。而导体的能带情况有两种：一种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；另一种是它的价带与导带相重叠。

必须指出，上面关于能带形成的通俗论证是十分粗糙而不严格的。能带和原子能级之间的对应关系并不简单，也并不永远都是一个原子能级对应于一个能带。并且，能带图并不实际存在，而只是用来着重说明电子的能量分布情况。

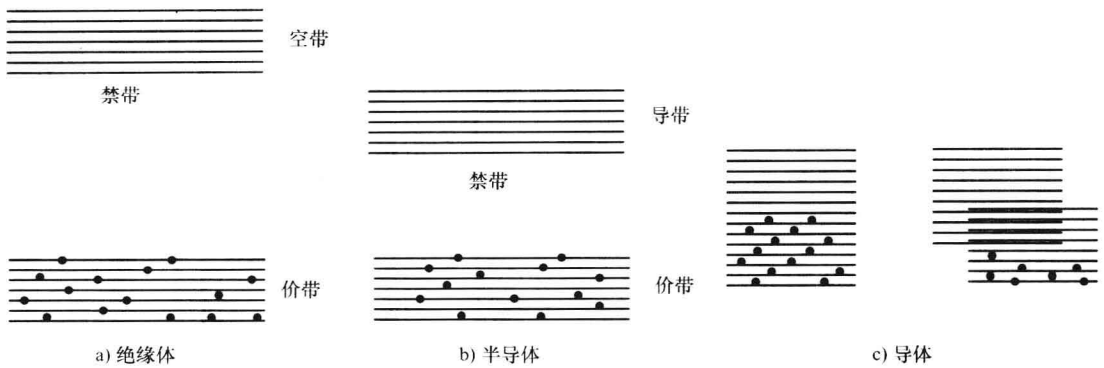


图 2-1 绝缘体、半导体、导体的能带情况

2.1.3 半导体的导电结构

当在一块半导体的两端加上电压后，则价电子在无规则的热运动基础上叠加了由电场引起的定向运动，形成了电流。并且它的运动状态也发生了变化，因而其运动能量必然与原来热运动时有所不同。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去，即导带电子能够改变运动状态。这也就是说，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。

如果价带中填满了电子而没有空能级，在外加电场的作用下，电子又没有足够能量激发到导带。那么，电子运动状态也无法改变，因而不能形成定向运动，也就没有电流。因此，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：导带的电子愈多，其导电能力愈强；而价带的电子的空位愈多，即电子愈少，其导电能力就愈强。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，它所带的电荷量与电子相等，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，一般把它们统称为载流子。

完全纯净和结构完整的半导体称为本征半导体。它的能带如图 2-2 所示。其中图 2-2a 是假设在热力学温度零度时，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 2-2b 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结构的特性。

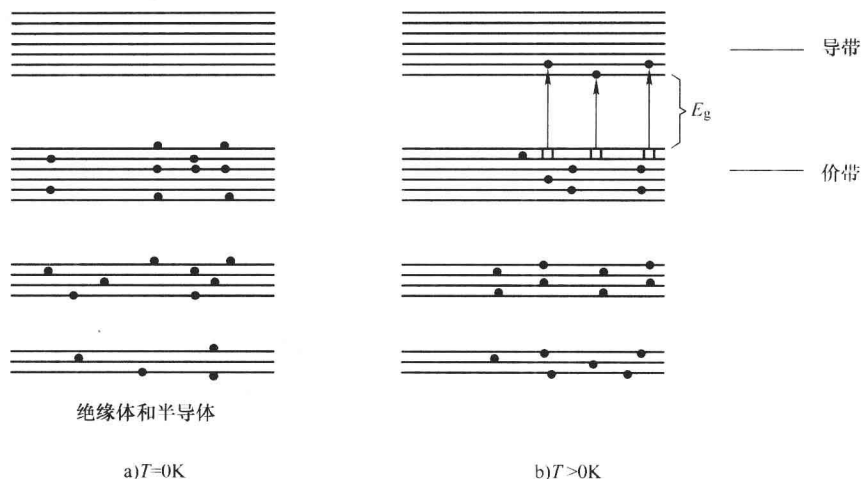


图 2-2 本征半导体能带图

实际上，晶体总是含有缺陷和杂质的，半导体的许多特性是由所含的杂质和缺陷决定的。杂质和缺陷在半导体中所以有决定性的影响，主要是由于在杂质和缺陷附近可形成束缚电子态，这就如同在孤立原子中电子被束缚在原子核附近一样。我们知道，能带的能量是和晶体基本原子的各能级相对应的（至少在能带不很宽的情况下是如此）。而杂质原子上的能级和晶体中其他原子不同，所以它的位置完全可能不在晶体能带的范围之内。换句话说，杂质的能级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。

在硅晶体中，硅有 4 个价电子，V 族元素（如磷、砷、锑等）的原子取代了硅原子的位置，V 族原子中 5 个价电子中有 4 个价电子与硅原子形成共价键，多余的一个价电子不在共价键中，因而成为自由电子参与导电。能够导电的电子一般就是导带中的电子。所以，硅中掺入一个 V 族杂质能够释放一个电子给硅晶体的导带，而杂质本身成为正电中心。具有这种特点的杂质称为施主杂质，因为它能施予电子。离子晶体中，间隙中的正离子或负离子缺位，实际上也是正电中心，所以也是施主。被束缚于施主的电子的能量状态称为施主能级。

在硅晶体中，当用具有 3 个价电子的 III 族元素（如硼、铝、镓、铟等）的原子取代硅原子组成 4 个共价键时，尚缺一个电子，即存在一个空的电子能量状态，它能够从晶体的价带接受一个电子，这就等于向价带提供一个空位。III 族原子本来呈电中性，当它接收了一个电子时，成了一个负电中心。具有这种特点的杂质称为受主杂质，因为它能接受电子。受主的空能量状态称为受主能级。离子晶体中，正离子缺位或间隙负离子都同样起着负电中心的作用，也是受主。

施主（或受主）能级上的电子（或空穴）跃迁到导带（或价带）中去的过程称为电离，这过程所需的能量就是电离能。必须注意，所谓空穴从受主能级激发到价带的过程，实际上就是电子从价带激发到受主能级中去的过程。图 2-3 是半导体中杂质能级的示意图。图中 E_c 表示导带底， E_v 表示价带顶。一般，施主能级离导带底较近，即杂质的束缚态能级略

低于导带底，这样就可常温下由于束缚态中的电子激发到导带而使导带中的电子远多于价带中的空穴，这种主要由电子导电的半导体，称为 N 型半导体。一般受主能级离价带顶较近。即当在半导体中掺入某一杂质而使其束缚态略高于价带顶时，就可在常温下由于价带中的电子激发到束缚态，因而使价带中的空穴远多于导带中的电子。这种主要由空穴导电的半导体，称为 P 型半导体。由于杂质的电离能比禁带宽度小得多，所以杂质的种类和数量对半导体的导电性能影响很大。

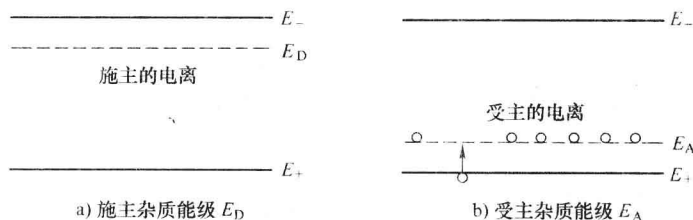


图 2-3 半导体的杂质能级示意图

在 N 型半导体中，由于 $n \gg p$ (n 为电子浓度， p 为空穴浓度)，一般把电子称为多数载流子，而空穴称为少数载流子；在 P 型半导体中，则与上相反，空穴称为多数载流子，电子为少数载流子。

2.1.4 载流子的运动

半导体中存在能够自由导电的电子和空穴，在外界因素作用下，半导体又会产生非平衡电子和空穴。这些载流子的运动形式有两种，即扩散运动和漂移运动。扩散运动是在载流子浓度不均匀的情况下，载流子无规则热运动的自然结果，它不是由电场力的推动而产生的，我们把载流子由热运动造成的从高浓度处向低浓度的迁移运动称为扩散运动。对于杂质均匀分布的半导体，其平衡载流子的浓度分布也是均匀的。因此，不会有平衡载流子的扩散，这时只考虑非平衡载流子的扩散。当然，对于杂质分布不均匀的半导体，需要同时考虑平衡载流子和非平衡载流子的扩散。

载流子在电场的加速作用下，除热运动之外获得的附加运动称为漂移运动。

下面分别讨论这两种运动的机理。

1. 扩散运动

我们研究一维稳定扩散的情形。例如光均匀地照射一块均匀的半导体，如图 2-4 所示。假设光在表面很薄的一层内几乎全部被吸收，而非平衡载流子的产生也局限于这个薄层内。

由图 2-4 可见，在 $x=0$ 处，因光照而产生的非平衡载流子浓度为 $\Delta p(0)$ 或 $\Delta n(0)$ ，由于在 x 方向存在浓度梯度，光生载流子将沿 x 方向扩散，最后在体内复合而消失。只要入射光保持不变，在 $x=0$ 处 $\Delta p(0)$ 与 $\Delta n(0)$ 也将不变，扩散与复合就不断进行。显然，扩散电流与浓度梯度成正比，即

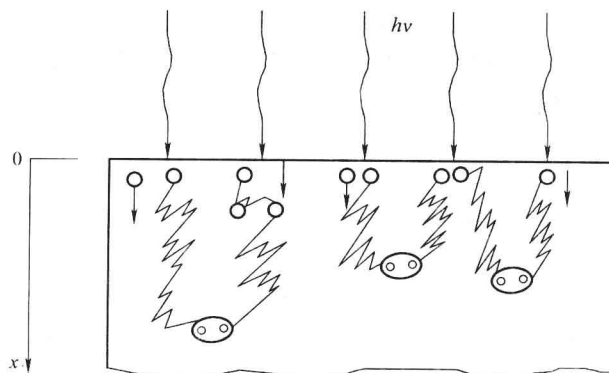


图 2-4 均匀半导体中载流子的扩散

$$j_n = -D_n \frac{d(\Delta n)}{dx}, \quad j_p = -D_p \frac{d(\Delta p)}{dx} \quad (2-1)$$

式中, j_n 和 j_p 分别为电子和空穴的扩散电流密度; D_n 和 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数; “-”号表示扩散电流的方向与浓度梯度方向相反。

2. 漂移运动

半导体中晶格原子和杂质离子在晶格点阵位置附近做热运动, 而载流子则在晶格间做不规则的热运动, 并在运动过程中不断与原子和杂质离子发生碰撞, 从而改变其运动速度的大小和方向, 这种现象称为散射。

由于外加电场的存在, 使载流子做定向的漂移运动。而由于有散射作用, 因而载流子的漂移运动在恒定的电场下具有一个稳定的平均漂移速度。在 N 型半导体中, 漂移所引起的电流密度为

$$j = nqv \quad (2-2)$$

式中, j 为电流密度; n 为载流子密度; q 为电子电荷量; v 为载流子的平均漂移速度。

欧姆定律的微分形式为

$$j = \sigma \varepsilon \quad (2-3)$$

式中, σ 为电导率; ε 为电场强度。

由此可知, 一定的电场强度, 就有一定值的电流密度, 因而也就有一定值的平均漂移速度。即: 一定值的 ε 对应于一定值的 v 。实际上, 载流子密度一般不因电场的存在而改变, 只有在特殊情况下, 当电场强到改变能级或使载流子加速到产生碰撞电离, 才会引起载流子密度的变化。因此, 电场强度与平均漂移速度关系为

$$v = \mu \varepsilon \quad (2-4)$$

式中, μ 称作迁移率, 它代表载流子在单位电场下所取得的漂移速度, 其单位 $\text{cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ 。显然, 电导率 σ 与迁移率有如下关系:

$$\sigma = nq\mu \quad (2-5)$$

在电场强度 ε 的作用下, 载流子所得的加速度 a 为

$$a = \frac{q\varepsilon}{m^*} \quad (2-6)$$

式中, m^* 为载流子的有效质量; q 为载流子所带的电荷 (C)。

载流子在漂移运动中, 因为散射作用, 在每次碰撞之后漂移速度就下降为零。如果两次碰撞之间的平均自由时间为 τ_f , 则 τ_f 以后载流子的平均漂移速度 v 为

$$v = a\tau_f = \frac{q\varepsilon}{m^*} \tau_f \quad (2-7)$$

将式 (2-6) 代入式 (2-7), 可得

$$\mu = \frac{q\tau_f}{m^*} \quad (2-8)$$

由此看出, 迁移率与载流子的有效质量及平均自由时间 τ_f 有关。而电子的有效质量 m_n^* 比空穴的有效质量 m_p^* 小, 所以电子的迁移率 μ_n 比空穴的迁移率 μ_p 大。

3. 扩散运动和漂移运动同时存在

在扩散运动和漂移运动同时存在的情况下, 载流子的扩散系数和迁移率之间有爱因斯坦关系: