



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材



# 光电检测技术

Guangdian Jiance Jishu

郭天太 陈爱军 沈小燕 刘辉军 编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

# 光电检测技术

Guangdian Jiance Jishu

郭天太 陈爱军 沈小燕 刘辉军 编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了光电检测技术的基础理论、相关检测器件和典型应用,主要包括:光电检测理论基础知识,如能带理论、光电效应、光热效应、辐射度量与光度量的基础知识等;光电检测技术中的常用检测器件,如光电检测器件、发光与耦合器件、电荷耦合器件(CCD)、热电检测器件等;光电检测技术的典型应用,如微弱光信号检测技术、条形码技术、光纤传感技术、激光测距与测速技术等。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、机械设计制造及其自动化、检测技术、电气工程及其自动化、光信息科学与技术等专业的教材,也可作为其他相近专业高年级本科生和硕士研究生的学习参考书。本书还可供相关领域的科研人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

光电检测技术/郭天太 陈爱军 沈小燕 刘辉军 编著. —武汉:华中科技大学出版社,2012.6  
ISBN 978-7-5609-7739-3

I. 光… II. ①郭… ②陈… ③沈… ④刘… III. 光电检测-高等学校-教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 040758 号

### 光电检测技术

郭天太 陈爱军 沈小燕 刘辉军 编著

责任编辑:姚同梅

封面设计:范翠璇

责任校对:李 琴

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:仙桃市新华印务有限责任公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:11.75

字 数:296千字

版 次:2012年6月第1版第1次印刷

定 价:23.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究



# 普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

## 编委会

### 主任:

钟毓宁

(湖北工业大学副校长, 教育部高等学校仪器科学与技术专业教学指导委员会委员)

### 副主任:

孔力

(华中科技大学教授, 教育部高等学校仪器科学与技术专业教学指导委员会委员)

许贤泽

(武汉大学教授, 教育部高等学校仪器科学与技术专业教学指导委员会委员)

### 委员: (以姓氏笔画为序)

王连弟 (华中科技大学出版社)

王先培 (武汉大学)

史红梅 (北京交通大学)

李威宣 (武汉理工大学)

杨帆 (武汉工程大学)

张思祥 (河北工业大学)

何涛 (湖北工业大学)

周荣政 (江汉大学)

胡春海 (燕山大学)

郭天太 (中国计量学院)

康宜华 (华中科技大学)

梁福平 (北京信息科技大学)

董浩斌 (中国地质大学)

曾以成 (湘潭大学)

### 秘书:

刘锦 万亚军



## 普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材

# 总 序

测控技术与仪器专业是在合并原来的11个仪器仪表类专业的基础上新设立的专业，目前设有该专业的高校已经超过250所，是当前发展较快的本科专业之一。经过两届全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会的努力，形成了《测控技术与仪器专业本科教学规范》（以下简称《专业规范》）。《专业规范》颁布后，各高校开始构建面向21世纪的测控技术与仪器本科专业的课程体系，并进行教学改革，以更好地满足科学技术和国民经济发展的需要。

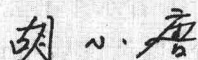
华中科技大学出版社邀请多位全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会委员和具有丰富教学经验的专家编写了这套“普通高等学校测控技术与仪器专业规划教材”，这对于满足各高校测控专业建设需要，加强高校测控专业的建设，进一步落实《专业规范》精神，具有积极的作用。

这套教材基本涵盖了测控技术与仪器专业的专业基础课程和部分专业课程，编写定位清晰，内容适应了加强工程教学的趋势，注重了教材的实用性和创新性教育的推进。这套教材的出版，是测控专业教学领域“百花齐放、百家争鸣”的一个体现，它为测控专业教学选用教材又提供了一个选择。

由于时间所限，这套教材可能存在这样那样的问题。随着这套教材投入教学使用和通过教学实践的检验，它将不断得到改进、完善和提高，为测控专业人才的培养做出积极的贡献。

谨为之序。

全国高等学校仪器科学与技术教学指导委员会主任委员



2009年7月

# 前 言

光电检测技术是将传统光学与现代微电子技术、计算机技术紧密结合在一起而形成的一门高新技术,是获取光信息或者借助光来获取其他信息的重要手段。随着现代科学技术的发展和信息处理技术水平的提高,光电检测技术作为一门研究光与物质相互作用的新兴学科,已成为现代信息科学的一个极为重要的组成部分。随着各种新型光电检测器件的出现,以及电子技术和微电子技术的发展,光电检测技术近年来发展十分迅速。光电检测技术所具有的高精度、高速度、远距离、大量程、非接触测量等特点,使其在工业、农业、日常生活、医学、军事和空间科学技术等许多领域都得到了广泛应用。

本书密切结合工科专业的教学特点,面向实际应用领域,强调光电检测技术在测量中的重要作用。在系统介绍光电检测的基础理论和检测器件的基础上,突出了光电检测技术的典型应用,如微弱光信号检测技术、条形码技术、光纤传感技术、激光测距与测速技术等。全书知识比较全面,详略得当,以光电器件及其应用为主线,结合实例展开,有助于读者更好地理解相关内容。

本书共分9章,由中国计量学院郭天太、陈爱军、沈小燕、刘辉军四位老师合作编著。其中,郭天太编写了第1、5、9章,陈爱军编写了第3、7章,沈小燕编写了第4、8章,刘辉军编写了第6章,第2章由郭天太、陈爱军、沈小燕合作编写。全书由郭天太统稿。

中国计量学院计量测试工程学院对本书的编写工作给予了大力支持。李东升教授、陈吉武教授对本书的编写提出了许多宝贵意见,国家第一类特色专业——测控技术与仪器专业建设项目(TS10291)对本书的出版给予了资助,在此表示衷心的感谢!

此外,还要特别感谢我们那些可爱的学生们,没有他们的支持和鼓励,这本书在保证质量的前提下按时完稿几乎是不可能的。

华中科技大学出版社万亚军、姚同梅、肖阁编辑为本书的及早出版做了大量的工作,在此深表谢意!

由于编者水平有限,加之本书内容涉及较多学科,书中肯定存在疏漏、欠妥和不足之处,恳请读者批评指正。

编著者

2011年10月  
于杭州钱塘江畔

# 目 录

<b>第 1 章 光电检测理论基础</b> .....	(1)
1.1 光电检测技术概论 .....	(1)
1.2 半导体物理基础 .....	(3)
1.3 光电检测器件的基本物理效应.....	(14)
1.4 辐射度量与光度量的基础知识.....	(21)
思考题与习题 .....	(25)
<b>第 2 章 光电检测器件</b> .....	(26)
2.1 光电检测器件的分类.....	(26)
2.2 光电检测器件的特性参数.....	(26)
2.3 光电导器件.....	(32)
2.4 光电池.....	(41)
2.5 光电二极管和光电三极管.....	(44)
2.6 光电倍增管.....	(50)
2.7 光电检测器件的性能比较与应用选择.....	(55)
思考题与习题 .....	(57)
<b>第 3 章 发光与耦合器件</b> .....	(58)
3.1 发光二极管.....	(58)
3.2 激光器.....	(62)
3.3 电致发光屏、液晶显示器件与电子束显示器件 .....	(65)
3.4 热辐射光源与气体放电光源.....	(72)
3.5 光电耦合器件.....	(77)
思考题与习题 .....	(85)
<b>第 4 章 电荷耦合器件</b> .....	(86)
4.1 电荷耦合器件的基本结构与工作原理.....	(86)
4.2 电荷耦合摄像器件.....	(91)
4.3 电荷耦合器件的应用.....	(95)
思考题与习题.....	(101)
<b>第 5 章 热电检测器件</b> .....	(102)
5.1 热电检测的基本原理 .....	(102)
5.2 热敏电阻 .....	(104)
5.3 热电偶和热电堆 .....	(108)
5.4 热释电检测器件 .....	(111)
思考题与习题.....	(117)
<b>第 6 章 微弱光信号检测技术</b> .....	(118)
6.1 锁相放大器 .....	(118)

---

6.2 取样积分器 .....	(122)
6.3 光子计数器 .....	(125)
思考题与习题 .....	(129)
<b>第7章 条形码技术</b> .....	<b>(130)</b>
7.1 条形码的基本概念 .....	(130)
7.2 条形码的码制及工作原理 .....	(132)
7.3 条形码识读系统的组成及识读设备 .....	(133)
思考题与习题 .....	(138)
<b>第8章 光纤传感技术</b> .....	<b>(139)</b>
8.1 光纤传感器的基本知识 .....	(139)
8.2 强度调制型光纤传感器 .....	(143)
8.3 相位调制型光纤传感器 .....	(147)
8.4 偏振态调制型光纤传感器 .....	(151)
8.5 分布式光纤传感器 .....	(153)
8.6 光纤光栅传感器 .....	(156)
思考题与习题 .....	(164)
<b>第9章 激光测距与测速技术</b> .....	<b>(165)</b>
9.1 激光测距技术 .....	(165)
9.2 激光多普勒测速技术 .....	(169)
思考题与习题 .....	(176)
<b>参考文献</b> .....	<b>(177)</b>



# 第 1 章 光电检测理论基础

## 1.1 光电检测技术概论

### 1.1.1 信息技术与光电检测技术

信息技术是指有关信息的收集、识别、提取、变换、存储、处理、检索、检测、分析和利用等的技术。

以光辐射为传输载体的随时间变化或按空间分布的信息统称为光学信息。光学信息是人类重要的信息来源,因为任何过程和现象都直接或间接地伴随着电磁辐射(如可见光、红外线、紫外线等),这些辐射作为载体,承载着关于周围世界的极其丰富的信息。这些信息与被研究的过程、现象之间有着必然的内在联系,根据这些信息,人们可以定量地确定客观物体的各种性能参数。

光电检测是指利用各类光电传感器实现检测,将被测量的量转换成光学量,再转换成电量,并综合利用信息传输和处理技术,完成在线和自动测量。光电检测技术是将传统光学与现代微电子技术、计算机技术紧密结合在一起的一门高新技术,是获取光信息或者借助光来获取其他信息的重要手段。随着现代科学技术的发展和信息处理技术的提高,光电检测技术作为一门研究光与物质相互作用的新兴学科,已成为现代信息科学的一个极为重要的组成部分。随着各种新型光电检测器件的出现,以及电子技术和微电子技术的发展,光电检测技术近年来发展十分迅速,在工业、农业、医学、军事、空间科学技术和家居生活等领域得到了广泛应用。

光电检测技术的构成技术主要包括光信息获取技术、光电转换技术,以及测量信息的光电处理技术等。光电检测技术将光学技术与现代电子技术相结合,以实现对各种量的测量,它具有如下特点。

(1) 高精度 光电测量是各种测量技术中精度最高的一种,如:用激光干涉法测量长度的精度可达  $0.05 \mu\text{m}/\text{m}$ ;用光栅莫尔条纹法测角度的精度可达  $0.04^\circ$ ;用激光测距法测量地球与月球之间的距离,分辨力可达  $1 \text{ m}$ 。

(2) 高速度 光电检测以光为媒介,而光是各种物质中传播速度最快的,因此用光学方法获取和传递信息的速度是最快的。

(3) 远距离、大量程 光是最便于远距离传递信息的介质,尤其适用于遥控和遥测,如武器制导、光电跟踪等。

(4) 非接触测量 光照到被测物体上可以认为是没有测量力的,因此几乎不影响被测物的原始状态,可以实现动态测量,是各种测量方法中效率最高的一种。

### 1.1.2 光电检测系统的组成

#### 1. 光电检测系统的组成

光电检测是以激光器、光电探测器、光纤等现代光电子器件为基础,通过接收被检测物体

的光辐射(包括紫外线、可见光和红外线),经光电检测器件将接收到的光辐射转换为电信号,再通过放大、滤波等电信号调理电路提取有用信息,经模/数转换后输入计算机处理,最后显示、输出所需要的检测物理量等参数。光电检测系统的组成如图 1-1 所示。

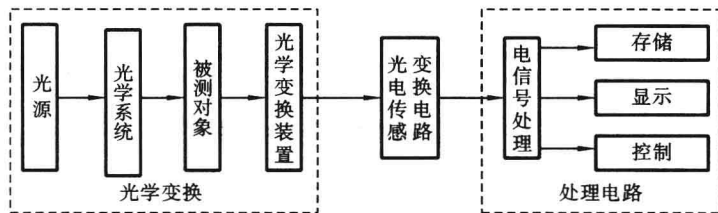


图 1-1 光电检测系统的组成

## 2. 光电检测系统中的信息变换

在光电检测系统中,信息通常要经过两个基本的变换环节:调制和解调。

### 1) 调制

为了更加方便、可靠地处理光信号并获得更多的信息,常将直流信号转换为特定形式的交变信号,这一转换过程就称为调制。光辐射通过光学系统投射到被检测物体上,利用被检测物体对入射辐射的反射、吸收、透射、衍射、干涉、散射、双折射等光学特性,将被测变量调制到光载波的特性参量上。这些特性参量可以是光载波的变化幅度、频率、相位或光的偏振态,甚至可以是光束的传播方向或介质折射率的变化。

调制的作用包括两个方面:一方面是使光辐射随时间有规律地变化以形成载波信号,如机械调制、声光调制、电光调制、磁光调制等;另一方面是使载波信号的一个或几个特性参量随被测信息而改变。

### 2) 解调

将承载着信息的光信号通过不同类型的光电接收器转换成电信号,经过放大、滤波等预处理后输入解调器,在此将输入信号和调制器中作为调制基准的参考信号相比较,消除载波信号的影响,从而得到与被测参量成比例的输出信号。这种光电信号的能量再转换和信号检波过程称为解调。

解调的电信号可用常规的电子系统作进一步处理和数据输出,以得到最终的测量结果。

## 1.1.3 光电检测技术的发展趋势

### 1. 光电检测技术的发展趋势

光电检测技术的发展趋势主要表现在以下几个方面。

(1) 高精度 检测精度向高精度方向发展,纳米、亚纳米精度的光电检测新技术是今后的研究热点。

(2) 智能化 检测系统向智能化方向发展,如发展光电跟踪与光电扫描测量技术。

(3) 数字化 检测结果向数字化和光电测量与控制一体化方向发展。

(4) 多元化 光电检测系统的检测功能向综合性、多参数、多维测量等多元化方向发展,并向人们以前无法检测的领域发展,如微空间三维测量技术和大空间三维测量技术。

(5) 微型化 光电检测仪器所用电子元件及电路向集成化方向发展,光电检测系统朝着小型、快速的微型光、机、电检测系统方向发展。

(6) 自动化 检测技术向自动化、非接触、快速和在线测量方向发展,检测状态向动态测量方向发展。

以上这些发展趋势是现代工业生产、国防建设等的需要,也是现代科学技术发展的需要。

## 2. 光电检测技术的应用前景

光电检测技术使人类能更有效地扩展自身的视觉能力,使视觉的长波段延伸到亚毫米波,短波段延伸到紫外线、X射线,并可以在超快速度条件下检测诸如核反应、航空器发射等变化过程。光电检测技术由于具有别的检测技术无法替代的一系列优点,具有极其广阔的应用前景。

在工业领域,光电检测技术主要应用于生产过程的视觉检查、精密工作台的自动定位、各种性能参数的精密测试、图形检测与分析判断等。

光电检测技术在家居生活中的应用,主要表现为日常生活用品的智能化,如红外测距传感器、CCD在数码相机、数码摄像机中的应用,光敏电阻在自动感应灯亮度检测中的应用,热敏电阻、光电开关在空调、冰箱、电饭煲中的应用等。

光电检测技术在医疗卫生方面的应用,主要表现为热敏电阻在接触式数字体温计中的应用、红外传感器在非接触式数字体温计中的应用、压力传感器在电子血压计中的应用等。

在国防和军事领域,光电检测技术主要应用于夜视瞄准系统的非冷却红外传感、激光制导、热定向、飞行物自动跟踪、卫星红外线检测等。

在航天领域,光电检测技术主要应用于参数检测,如加速度、温度、压力、振动、流量、应变等的检测。

可以看出,随着光电检测技术的发展及现代化进程的不断推进,光电检测技术的应用领域也将越来越广。

## 1.2 半导体物理基础

按照电阻率的不同,可以将材料分为三类:导体(如银、铜、铝、铁等)、绝缘体(如塑料、陶瓷、橡皮、石英玻璃等)和半导体(如硅、锗等)。三者之间虽然在电阻率的区分上无绝对明确的界限,但在性质上却有很大差别。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领域占有极其重要的地位,例如,大部分光辐射探测器都是采用半导体材料制成的。

半导体材料大多数是晶体材料。晶体可分为单晶体和多晶体。在一块材料中原子全部有规则地呈周期性排列,这种晶体称为单晶体。如果只在很小范围内原子有规则地排列,形成小晶粒,而晶粒之间还有无规则排列的晶粒界,这种材料称为多晶体。

### 1.2.1 能带理论基础

为了解释固体材料的不同导电特性,人们从电子能级的角度引入了能带理论,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. 电子的共有化运动

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。在晶体中,电子的运动状态与孤立原子中的电子状态有所不同。在孤立原子中,原子核外的电子按照一定的壳层排列,每一壳层容纳一定数量的电子。电子在壳层上的分布遵守泡利不相容原理和能量最低原理,并具有确定的分立能量值,也就是电子按能级分布。

当原子结合成晶体时,由于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,而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,不再为此原子所私有,而是可以在整个晶体中运动,为整个晶体所共有,这种现象称为电子的共有化(见图 1-2)。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。

电子共有化会使得本来处于同一能量状态的电子出现微小的能量差异。例如,组成晶体的  $N$  个原子在某一能级上的电子本来都具有相同的能量,现在它们由于处于共有化状态而具有各自不尽相同的能量,因为它们在晶体中不仅仅受本身原子势场的作用,而且还受周围其他原子势场的作用。如果一块晶体中具有  $N$  个原子,那么这  $N$  个原子中每一个相同能级都将分裂成为  $N$  个新的能级,这  $N$  个能级之间的能量差异极小。这一能量区域中密集的能级通常称为能带。一般  $N$  值很大,这  $N$  个能级就形成了有一定宽度的能带。图 1-3 为能带的示意图,能带是描述晶体中电子状态的重要方法。

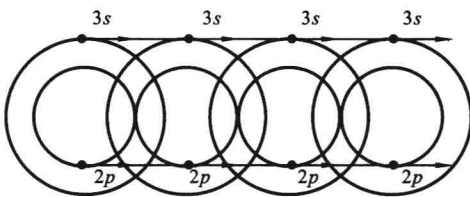


图 1-2 电子共有化运动示意

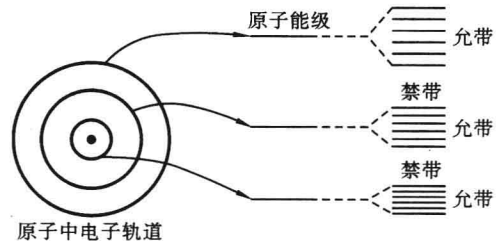


图 1-3 原子能级分裂成能带示意

### 2. 晶体中电子的能带

原子中每一电子所在能级在晶体中都分裂成能带。这些允许被电子占据的能带称为允带。允带之间的范围是不允许电子占据的,这一范围称为禁带。

如同在原子中一样,在晶体中电子的能量状态也遵守能量最低原理和泡利不相容原理。电子总是先占满内层能级所分裂的允带,然后再占据能量更高的外面一层允带。原子中最外层电子称为价电子。晶体最外层电子壳层分裂所形成的能带称为价带。价带可能被电子填满,也可能不被填满。被填满的能带称为满带。

根据泡利不相容原理,每个能级只能容纳自旋方向相反的两个电子,在外加电场上,这两个自旋相反的电子受力方向也相反,它们最多可以互换位置,不可能出现沿电场方向的净电流,所以满带电子不导电。同理,未被填满的价带就能导电。金属之所以有导电性就是因为其价带是不满的。

图 1-4 所示为绝缘体、半导体、导体的能带情况。一般情况下,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,在绝对零度时,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,其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;一种是它的价带与导带相重叠。

需要说明的是,以上关于能带形成的论述是十分粗糙且不严格的。能带和原子能级之间的对应关系,并不像图 1-4 所示那样单纯,也并不永远都是一个原子能级对应于一个能带。能

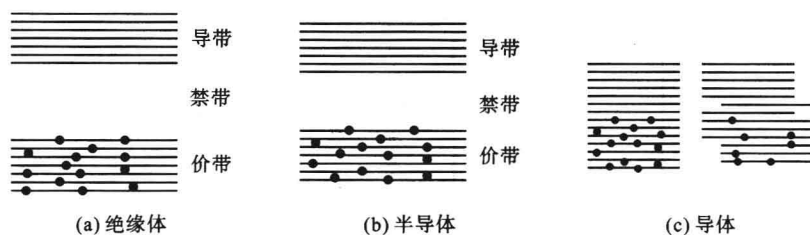


图 1-4 绝缘体、半导体、导体的能带情况

带图并不实际存在,而只是用来说明电子的能量分布情况。

### 3. 本征半导体和非本征半导体

半导体中的导带电子和价带空穴可在体内自由运动,二者统称为载流子。按照半导体中载流子的激发机理不同,可以将半导体分为本征半导体和非本征半导体。

#### 1) 本征半导体

本征半导体是指没有杂质、没有缺陷的理想半导体,即设想半导体中不存在任何杂质原子,并且原子在空间的排列也遵循严格的周期性。

半导体材料中原子的化学结构多为共价键。例如,锗(Ge)或硅(Si)原子外层有 4 个价电子,它们与相邻原子组成共价键后形成原子外层有 8 个电子的稳定结构。在绝对零度时,半导体材料不导电。但是,共价键上电子所受束缚力较小,它会因为受到热激发而越过禁带,去占据禁带上面的能带。比价带能量更高的允带称为导带。从价带跃迁到导带后,在导带中的电子称为自由电子。它们能量很高,不附着于任何原子上,因此有可能在晶体中游动,在外加电场作用下形成电流。价带中的电子跃迁到导带后,价带中出现的空缺称为自由空穴。在外电场作用下,附近电子可以去填补空缺,相当于自由空穴发生定向移动形成自由空穴运动,从而形成电流。所以,在常温下半导体有导电性。

由上可知,与半导体导电特性有关的能带是导带和价带。本征半导体的能带结构如图 1-5(a)所示。在本征半导体中,电子获取热能后从价带跃迁到导带,导带中出现自由电子,价带中出现自由空穴,出现电子-空穴对导电载流子。本征半导体导电性能高低与材料的禁带宽度有关。禁带宽度越小,电子越容易跃迁到导带,因而导电性就越高。

锗的禁带宽度比硅的小,所以其导电性随温度的变化就比硅更显著。绝缘体因禁带宽度很大而无导电性。

#### 2) 非本征半导体

在半导体中人为掺入少量杂质而形成的掺杂半导体,通常称为非本征半导体。杂质对半导体的导电性有很大的影响,非本征半导体的导电性能完全由掺杂情况决定。

如果在四价原子锗(Ge)组成的晶体中掺入五价原子砷(As),在晶格中某个锗原子被砷原子所替代。五价原子砷用 4 个价电子与周围的锗原子组成共价键,尚有 1 个电子多余,这个多余电子受原子的束缚力要比共价键上的电子所受束缚力小得多,它很容易被砷原子释放,跃迁到导带而形成自由电子。易释放电子的原子称为施主。施主束缚电子的能量状态称为施主能级,它位于禁带之中,比较靠近材料的导带底(能级能量用  $E_d$  表示)。施主能级能量  $E_d$  和导带底能级能量  $E_c$  之间的能量差为  $\Delta E_d$ ,它称为施主电离能。这种由施主控制材料导电性的半导体称为 N 型半导体,其能带结构如图 1-5(b)所示。在 N 型半导体中,自由电子浓度高于自由空穴浓度。

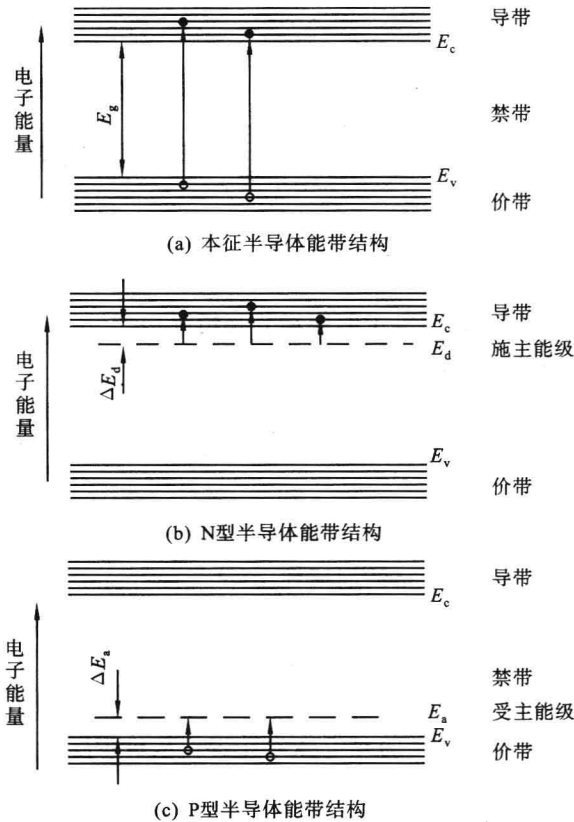


图 1-5 半导体的能带结构

同理，如果在四价锗晶体中掺入三价原子硼(B)，将形成 P 型半导体。晶体中某锗原子被硼原子所替代，硼原子的 3 个价电子和周围锗原子的 4 个价电子组成共价键，形成 8 个电子的稳定结构还缺 1 个电子，于是它很容易从锗晶体中获取 1 个电子形成稳定结构。这样就使硼变成负离子而在锗晶体中出现自由空穴。容易获取电子的原子称为受主。受主获取电子的能量状态称为受主能级。受主能级能量用  $E_a$  表示。如图 1-5(c) 所示，受主能级也处于禁带之中，比较靠近材料的价带顶(能级能量用  $E_v$  表示)附近。 $E_a$  和  $E_v$  之差  $\Delta E_a$  称为受主电离能。受主电离能愈小，价带中的电子愈容易跃迁到受主能级上去，在价带中的自由空穴浓度也愈高。在 P 型半导体中，自由空穴浓度高于自由电子浓度。

### 1.2.2 热平衡下的载流子

半导体的电学性质与材料的载流子浓度有关。所谓载流子浓度是指单位体积内的载流子数。在一定温度下，若没有其他的外界作用，半导体中的自由电子和空穴是由热激发产生的。电子从不断热振动的晶体中获得一定的能量，从价带跃迁到导带，形成自由电子，同时在价带中出现自由空穴。在热激发的同时，也有电子从导带跃迁到价带并向晶格放出能量，这就是电子-空穴对的复合。在一定温度下激发和复合两种过程形成平衡，称为热平衡，这时的载流子浓度即为某一稳定值。当温度改变后，原来的平衡状态就被破坏而建立起新的平衡状态，即达到另一个稳定值。由固体理论得知，热平衡时半导体中自由载流子浓度与两个参数有关：一是能带中能级的分布；二是在这些能级中每一个能级可能被电子占据的概率。

### 1. 能级密度

能级密度是指在导带和价带内单位体积、单位能量的能级数目,用  $N(E)$  表示。由固体理论得知,在导带内的能级密度

$$N(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_c^*)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} \quad (1-1)$$

在价带内的能级密度

$$N(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_p^*)^{3/2} (E_v - E)^{1/2} \quad (1-2)$$

式中:  $N(E)$  为在电子能量为  $E$  处的能级密度;  $m_c^*$  为自由电子的有效质量;  $m_p^*$  为自由空穴的有效质量;  $h$  为普朗克常量;  $E_c$  为导带底能量;  $E_v$  为价带顶能量。

由式(1-1)、式(1-2)可知,当离导带底或价带顶愈远时,能级密度  $N(E)$  愈大。

### 2. 费密能级能量和电子占据率

关于电子占据能级的规律,根据量子理论和泡利不相容原理,半导体中电子的能级分布服从费密统计分布规律。在热平衡条件下,能量为  $E$  的能级被电子占据的概率为

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp \frac{E - E_F}{kT}} \quad (1-3)$$

式中:  $E_F$  为费密能级能量;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为热力学温度。

$E_F$  是热平衡条件下的一个重要参数。可以说,  $E_F$  可决定电子在能级上的分布。实际上,  $E_F$  等于把一个任意能量的电子加入热系统后所引起的系统自由能的改变。

当  $T=0$  K 时,由式(1-3)可以看出,若  $E < E_F$ , 则  $f_n(E) = 1$ 。这说明:在绝对零度时,凡是能量比  $E_F$  小的能级,被电子占据的概率均为 1。也就是说,电子全部占据费密能级以下的能级,而费密能级以上的能级是空的,不被电子占据。

当  $T > 0$  K 时,可以分为三种情况:

- ① 若  $E = E_F$ , 则  $f_n(E) = 0.5$ , 因此通常把电子占据率为 0.5 的能级定义为费密能级;
- ② 若  $E < E_F$ , 则  $f_n(E) > 0.5$ , 说明比费密能级能量低的能级被电子占据的概率大于 0.5;
- ③ 若  $E > E_F$ , 则  $f_n(E) < 0.5$ , 说明比费密能级能量高的能级被电子占据的概率小于 0.5。

比费密能级能量高得愈多的能级,被电子占据的概率愈小。此外,电子占据高能级的概率还随温度的升高而增加。

在价带中,如已知电子的占据概率,即可求出空穴的占据概率  $f_p(E)$ 。空穴的占据概率也就是不被电子占据的概率,即

$$f_p(E) = 1 - f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp \frac{E_F - E}{kT}} \quad (1-4)$$

### 3. 平衡载流子浓度

在导体中,能级能量为  $E$  的电子浓度等于在该能级处的能级密度和被电子占据概率的乘积。即

$$n(E) = N(E) \cdot f_n(E)$$

在整个导带中总的电子浓度  $n$  应该是  $n(E)$  在导带底以上所有能量状态上的积分。即

$$n = \int_{E_c}^{\infty} n(E) dE = \int_{E_c}^{\infty} N(E) \cdot f_n(E) dE$$

将式(1-1)及式(1-3)代入上式,得积分结果为

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) \quad (1-5)$$

式中: $N_c$ 为导带有效能级密度, $N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_c^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$ 。

式(1-5)说明,自由电子浓度  $n$  与温度有关,在温度一定时  $n$  与  $E_F$  呈指数关系。

同样,在价带中能级能量为  $E$  的能级处空穴浓度为

$$p(E) = N(E) \cdot f_p(E)$$

整个价带中的空穴浓度  $p$  为

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} N(E) \cdot f_p(E) dE = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) \quad (1-6)$$

式中: $N_v$ 为价带有效能级密度, $N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$ 。

式(1-6)说明,价带中的自由空穴浓度  $p$  也是温度的函数,也与费密能级的位置有关。

把式(1-5)和式(1-6)相乘,可得

$$n \cdot p = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (1-7)$$

式中: $E_g$ 为禁带宽度, $E_g = E_c - E_v$ 。由式(1-7)可得到如下结论:

- ① 在半导体中,平衡载流子的电子数和空穴数的乘积与  $E_F$  无关;
- ② 禁带宽度  $E_g$  愈小, $n$  和  $p$  的乘积愈大,半导体的导电性愈好;
- ③ 半导体中的载流子浓度随温度的增加而增大。

#### 4. 本征半导体中的载流子浓度

在本征半导体中,自由电子浓度等于自由空穴浓度。即

$$n_i = p_i$$

由式(1-5)、式(1-6)得

$$N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$$

于是,得到本征半导体的费密能级能量

$$E_{Fi} = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{1}{2}kT \ln \frac{N_v}{N_c} = E_i + \frac{3}{4}kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_c^*}\right) \quad (1-8)$$

式中: $E_i$ 为中间能级能量,中间能级处于禁带中间位置。对于硅、锗等半导体材料, $m_p^*/m_c^* = 0.5 \sim 1$ ;对于砷化镓, $m_p^*/m_c^* = 7.4$ 。式(1-8)右侧的第二项很小,可以忽略。由此可知,本征半导体的费密能级位于禁带中线处,大体上与中间能级重叠。

由式(1-7)得到本征半导体载流子浓度为

$$n_i = p_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (1-9)$$

#### 5. 掺杂半导体载流子浓度

N型半导体中,施主原子的多余价电子易跃迁进入导带,使导带中的自由电子浓度高于本征半导体的电子浓度。室温下施主原子基本上都电离,此时导带中的电子浓度

$$n = N_d + p_i \approx N_d \quad (1-10)$$

式中: $N_d$ 为N型半导体中掺入的施主原子浓度。



空穴的浓度为

$$p = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (1-11)$$

将式(1-5)代入式(1-10),得 N 型半导体的费密能级密度为

$$N_d = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fi}}{kT}\right)$$

式中:  $n_i$  为本征半导体载流子浓度。于是

$$E_{Fn} = E_{Fi} + kT \ln \frac{N_d}{n_i} \approx E_i + kT \ln \frac{N_d}{n_i} \quad (1-12)$$

由式(1-12)可知: N 型半导体中的费密能级位于禁带中央以上; 掺杂浓度愈高, 费密能级离禁带中央愈远, 愈靠近导带底。

同样, 在 P 型半导体中, 由于受主原子易从价带中获得电子, 因此价带中的自由空穴浓度将高于本征半导体中的自由空穴浓度。设掺入的受主浓度为  $N_a$ , 那么室温下价带中的空穴浓度  $p$  和电子浓度  $n$  分别为

$$p = N_a + n \approx N_a \quad (1-13)$$

$$n = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (1-14)$$

将式(1-6)代入式(1-13), 得到 P 型半导体的费密能级能量

$$E_{Fp} = E_i - kT \ln \frac{N_a}{n_i} \quad (1-15)$$

由式(1-15)可知: P 型半导体的费密能级位于禁带中央位置以下; 掺杂浓度愈高, 费密能级离禁带中央愈远, 愈靠近价带顶。

图 1-6 所示为本征半导体和掺杂半导体中的费密能级位置。

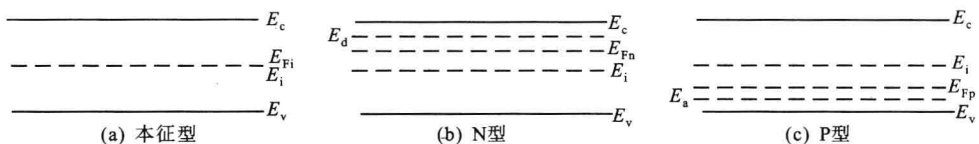


图 1-6 半导体中的费密能级位置

### 1.2.3 非平衡载流子

大多数半导体器件通过外部注入载流子或用光激发方式而使载流子浓度超过热平衡时的浓度。这些超出部分的载流子通常称为非平衡载流子或过剩载流子。

#### 1. 材料的光吸收效应

物体受光照射时, 一部分光被物体反射, 一部分光被物体吸收, 其余的光透过物体。那些被物体所吸收的光会改变物体的一些性能。

##### 1) 本征吸收

半导体材料可吸收光子能量并将其转换成电能, 这是光电器件的工作基础。半导体材料吸收光的原因在于光与处在各种状态的电子、晶格原子和杂质原子的相互作用。其中最主要的光吸收是在光子的作用下, 电子由价带跃迁到导带而引起的, 这种吸收称为本征吸收, 图1-7为本征吸收的能带示意图。电子从半导体价带跃迁到导带是一种本征激发, 所以本征光吸收