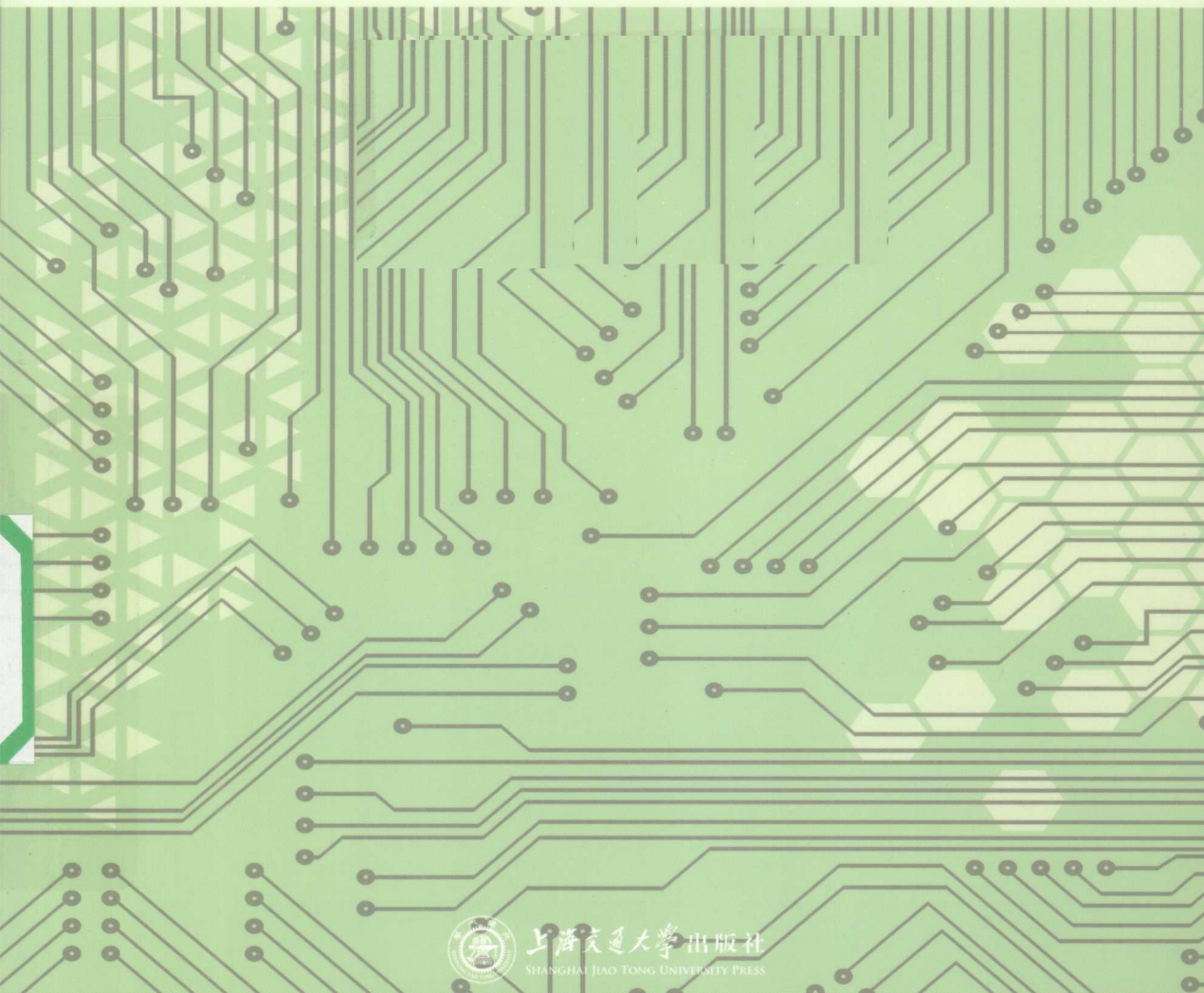




电路及模拟电子技术

(下册)

主 编 贾学堂
副主编 徐 意 蔡春燕



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

电路及模拟电子技术

(下册)

主 编 贾学堂

副主编 徐 意 蔡春燕

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书上册内容包括电路的基本概念、电路的基本定律、正弦交流电路、三相交流电路、电路的暂态分析、非正弦周期电路；下册内容包括电子器件放大电路基础、集成运算放大电路、信号处理电路、信号发生电路、直流稳压电源和电力电子技术基础共 13 章。每章附有小结、习题，书后附有大部分习题的参考答案。

本书可以作为高职高专电子信息工程技术、应用电子技术、机械制造与自动化、计算机应用技术、生产过程自动化等相关专业和电类专升本专业的教材；也可以作为一般本科少学时的电类专业和机械制造与自动化、机电一体化等相关专业的教材；还可以供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路及模拟电子技术. 下册/贾学堂主编. —上海: 上海交通大学出版社, 2010
ISBN 978 - 7 - 313 - 06265 - 9

I. ①电… II. ①贾… III. ①电路理论—高等学校—教材②模拟电路—电子技术—高等学校—教材
IV. ①TM13②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 022564 号

电路及模拟电子技术

(下册)

贾学堂 主编

上海交通大学 出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

常熟市梅李印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 17.75 字数: 329 千字

2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1~3030

ISBN 978 - 7 - 313 - 06265 - 9/TM 定价: 28.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

电路和模拟电子技术基础分上下册出版,突出基本概念,兼顾高职高专培养应用性人才的教学需求,结合教改研究的任务和成果编写本书。

本书具有以下特点:体系结构合理,内容深入浅出、循序渐进、层次分明、重点突出、易教易学;在编写过程中较好地处理了“理论的严谨性”和“理论够用的实用性”(另有实验实训配套教材),有利于培养学生分析问题和解决问题的能力;模拟电子技术基础较大幅度地压缩了分立元件电路,加强了集成电路,比较贴近实际;具有模块化结构,只要合理取舍,提高拓宽内容(多数打*)和基本要求内容,可适用于不同层次和不同学时的需要;精选的习题,覆盖面广,对读者深入理解正文内容,有很好的辅助作用。书后所附的习题答案有利于读者自学,是培养分析问题和解决问题能力的抓手。

本书适用于讲课和实验(实训)72~90学时的专业。

本书由贾学堂教授担任主编,负责统稿和定稿,上册由周燕军、刘国文担任副主编,下册由徐意、蔡春燕担任副主编。参加编写工作的有徐意、周燕军、刘国文、蔡春燕、蒋洪明、汤峰平、陈晓贤、朱慧红等同志。其中,陈晓贤编写第1,7章,刘国文编写第2章,周燕军编写第3,12章,蔡春燕编写第4,10章,蒋洪明编写第5,13章,徐意编写第6,8,11章,汤峰平编写第9章。朱慧红副教授做了全部习题答案并审阅了全书。

本书编写过程中得到了许多同行、专家及领导的关心和支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中存在不足和错漏之处在所难免,恳请广大读者不吝批评指正。

编 者

2010年1月

目 录

下 册

| | |
|---------------------------------|----|
| 第 7 章 电子器件 | 1 |
| 7.1 半导体基本知识 | 1 |
| 7.1.1 半导体及其特点 | 1 |
| 7.1.2 本征半导体 | 2 |
| 7.1.3 杂质半导体 | 3 |
| 7.1.4 PN 结及其单向导电性 | 4 |
| 7.1.5 PN 结的伏安特性及其他特性 | 6 |
| 7.2 半导体二极管 | 7 |
| 7.2.1 半导体二极管结构和伏安特性 | 7 |
| 7.2.2 二极管的主要参数 | 9 |
| 7.2.3 二极管的等效电路及简单应用 | 10 |
| 7.2.4 稳压二极管 | 14 |
| 7.3 双极型晶体管 | 15 |
| 7.3.1 晶体管的结构及分类 | 15 |
| 7.3.2 晶体管的电流放大原理 | 16 |
| 7.3.3 晶体管的共射特性曲线 | 19 |
| 7.3.4 晶体管的主要参数 | 21 |
| 7.3.5 温度对晶体管参数的影响 | 23 |
| 7.4 单极型晶体管——场效应管 | 24 |
| 7.4.1 结型场效应管 | 25 |
| 7.4.2 绝缘栅场效应管 | 29 |
| 7.4.3 场效应管的主要参数 | 34 |
| 7.4.4 场效应管与晶体管特点比较及使用注意事项 | 35 |
| * 7.5 光电器件 | 37 |
| 7.5.1 发光二极管 | 37 |

| | | |
|------------|-------------------|-----------|
| 7.5.2 | 光敏二极管 | 38 |
| 7.5.3 | 光敏晶体管 | 39 |
| 7.5.4 | 光电耦合器 | 39 |
| 本章小结 | | 40 |
| 习题 | | 40 |
| 第8章 | 放大电路基础 | 43 |
| 8.1 | 放大电路概述 | 43 |
| 8.1.1 | 放大的概念 | 43 |
| 8.1.2 | 放大电路的性能指标 | 43 |
| 8.2 | 共发射级放大电路 | 47 |
| 8.2.1 | 基本共射电路的组成及各元件的作用 | 47 |
| 8.2.2 | 基本共射的静态(直流)分析 | 48 |
| 8.2.3 | 基本共射的动态分析 | 48 |
| 8.2.4 | 工作点稳定的共射电路 | 52 |
| 8.3 | 共集电极放大电路——射极输出器 | 56 |
| 8.4 | 共基极放大电路 | 59 |
| 8.5 | 三种方法电路的比较 | 61 |
| 8.6 | 场效应管放大电路 | 62 |
| 8.6.1 | 场效应管的微变等效电路 | 63 |
| 8.6.2 | 共源放大电路 | 63 |
| 8.6.3 | 共漏放大电路——漏极输出器 | 66 |
| 8.7 | 多级放大电路 | 68 |
| 8.7.1 | 多级放大电路的耦合方式 | 68 |
| 8.7.2 | 多级放大电路的一般分析方法 | 69 |
| 8.8 | 阻容耦合放大电路的频率特性 | 71 |
| 8.8.1 | 基本概念 | 71 |
| 8.8.2 | 单级共射电路频率特性的定性分析 | 72 |
| 8.8.3 | 单级共射电路频率特性的定量分析 | 74 |
| 8.8.4 | 阻容耦合多级放大电路的频率特性概述 | 79 |
| 8.9 | 直接耦合放大电路 | 80 |
| 8.9.1 | 直接耦合放大电路存在的主要问题 | 80 |
| 8.9.2 | 差动放大电路 | 81 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 8.10 功率放大电路 | 88 |
| 8.10.1 功率放大电路的基本概念 | 88 |
| 8.10.2 互补对称功率放大器 | 90 |
| 本章小结 | 95 |
| 习题 | 95 |
| 第9章 集成运算放大电路 | 102 |
| 9.1 集成运算放大电路概述 | 102 |
| 9.1.1 集成运放的框图结构及各部分的主要作用 | 102 |
| 9.1.2 集成运放的主要参数及理想集成运放 | 104 |
| 9.1.3 集成运放的符号及传输特性 | 105 |
| 9.1.4 理想运放的分析原则 | 107 |
| 9.1.5 集成运放的性能扩展及使用注意事项 | 108 |
| 9.2 负反馈放大电路 | 110 |
| 9.2.1 反馈的基本概念 | 110 |
| 9.2.2 负反馈的框图结构及基本关系式 | 111 |
| 9.2.3 反馈类型的判断方法 | 112 |
| 9.2.4 负反馈对放大器性能的影响 | 116 |
| 9.2.5 深度负反馈放大电路电压放大倍数的近似计算 | 125 |
| 9.3 基本运算电路 | 129 |
| 9.3.1 比例运算电路 | 129 |
| 9.3.2 积分与微分运算电路 | 137 |
| 9.3.3 对数运算电路和指数运算电路 | 141 |
| *9.3.4 集成模拟乘法器及其应用 | 142 |
| 本章小结 | 145 |
| 习题 | 145 |
| 第10章 信号处理电路 | 154 |
| 10.1 电压比较器 | 154 |
| 10.1.1 电压比较器概述 | 154 |
| 10.1.2 单限电压比较器 | 155 |
| 10.1.3 双限电压比较器——窗口比较器 | 156 |
| 10.1.4 双限电压比较器——滞回比较器 | 157 |

| | | |
|-------------|------------------|------------|
| 10.2 | 有源滤波器 | 159 |
| 10.2.1 | 一阶有源低通滤波器 | 160 |
| *10.2.2 | 二阶有源低通滤波器 | 161 |
| 10.2.3 | 有源高通滤波器 | 164 |
| *10.2.4 | 有源带通及带阻滤波器 | 166 |
| *10.3 | 信号的变换电路 | 168 |
| 10.3.1 | 理想二极管与精密整流电路 | 168 |
| 10.3.2 | 电压-电流变换电路 | 170 |
| 10.3.3 | 电流-电压变换电路 | 171 |
| | 本章小结 | 172 |
| | 习题 | 172 |
| 第11章 | 信号发生电路 | 179 |
| 11.1 | 信号发生电路的分类 | 179 |
| 11.2 | 正弦波发生电路 | 180 |
| 11.2.1 | 正弦波发生电路的原理及组成 | 180 |
| 11.2.2 | RC正弦波发生电路 | 182 |
| 11.2.3 | LC正弦波发生电路 | 184 |
| *11.2.4 | 石英晶体正弦波发生电路 | 192 |
| 11.3 | 非正弦波发生电路 | 194 |
| 11.3.1 | 方波和矩形波发生电路 | 195 |
| 11.3.2 | 三角波和锯齿波发生电路 | 197 |
| *11.4 | 函数发生器 | 200 |
| | 本章小结 | 203 |
| | 习题 | 205 |
| 第12章 | 直流稳压电源 | 213 |
| 12.1 | 直流稳压电源的结构及各部分的作用 | 213 |
| 12.2 | 整流电路 | 214 |
| 12.2.1 | 单相半波整流电路 | 214 |
| 12.2.2 | 单相桥式整流电路 | 215 |
| 12.2.3 | 三相整流电路的基本概念 | 217 |
| 12.3 | 滤波电路 | 218 |

| | | |
|--------------|-------------------|-----|
| 12.3.1 | 电容滤波电路 | 219 |
| 12.3.2 | 电感滤波电路 | 222 |
| 12.3.3 | 复式滤波电路 | 223 |
| *12.3.4 | 有源滤波电路 | 224 |
| 12.4 | 稳压电路 | 224 |
| 12.4.1 | 稳压二极管稳压电路 | 224 |
| 12.4.2 | 串联稳压电路 | 225 |
| 12.4.3 | 集成稳压电路 | 230 |
| *12.4.4 | 开关型稳压电源 | 234 |
| 本章小结 | | 236 |
| 习题 | | 237 |
| *第13章 | 电力电子技术基础 | 241 |
| 13.1 | 电力电子器件 | 241 |
| 13.1.1 | 晶闸管(SCR) | 241 |
| 13.1.2 | 双极型功率管(GTR、BJT) | 244 |
| 13.1.3 | 功率场效晶体管(P-MOSFET) | 245 |
| 13.1.4 | 绝缘层双极型功率管(IGBT) | 246 |
| 13.2 | 可控整流器 | 247 |
| 13.2.1 | 单相半波可控整流 | 247 |
| 13.2.2 | 单结晶体管触发电路 | 250 |
| 13.3 | 逆变器 | 254 |
| 13.3.1 | 单相逆变的原理 | 254 |
| 13.3.2 | 三相逆变的原理 | 255 |
| 13.3.3 | 脉冲宽度调制的原理 | 256 |
| 13.4 | 电力电子技术的应用举例 | 259 |
| 本章小结 | | 262 |
| 习题 | | 262 |
| 部分习题答案 | | 264 |
| 参考文献 | | 271 |

第7章

电子器件

电子器件是构成各类电子电路的基础,其重要性和电路中的电阻、电感及电容相当,因此,对电子器件有一个基本了解十分必要。本章简单地介绍了常用半导体器件的基本原理、符号、外部特性和主要参数,各类器件的基本应用将在后续各章涉及。

7.1 半导体基本知识

7.1.1 半导体及其特点

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的一类物质的统称,其电阻率约在 $10^{-4} \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 的范围内。半导体材料之所以得到广泛的应用,主要是因为它们具有一些独特的导电性能:

(1) 热敏性:半导体的电阻率随温度升高而显著减少,具有负温度系数。例如:纯锗,当温度从 20°C 升至 30°C 时,其电阻率约降低一半。利用这种特性制成的热敏元件,常用于检测温度的变化。

(2) 光敏性:有的半导体材料一旦受到光线照射后电阻率即显著下降。例如硫化镉在一般灯光照射下,它的电阻率是移去灯光后电阻率的几十分之一或几百分之一,利用这种特性可制成光敏器件。

(3) 杂敏性:在纯净的半导体材料中掺入某种微量的合适元素后,导电能力将猛增几万倍甚至百万倍。例如在纯硅中掺入百万分之一的硼,即可使其电阻率从 $0.214 \times 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 下降到 $0.4 \Omega \cdot \text{m}$ 。这是半导体最显著、最突出的特性。利用掺杂的方法,能制造出各种不同性能、不同用途的半导体器件,它们具有体积小、重量轻、耗电少、寿命长、工作可靠、价格低廉等优点,使它很快便在电子技术中得到广泛的应用。

7.1.2 本征半导体

常用的半导体有硅、锗等,在硅的原子结构中,硅原子有 14 个电子,分成三层围绕着原子核旋转。最外一层有 4 个电子,最外层的电子称作价电子,因此硅元素称为 4 价元素。锗元素有 32 个电子,最外层也有 4 个电子,锗也是 4 价元素。图 7.1.1(a)和(b)分别是硅和锗元素的原子结构图。

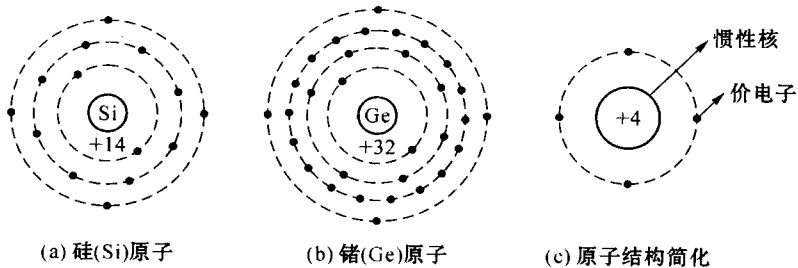


图 7.1.1 硅和锗原子结构的平面示意图

硅或锗经过高度提纯和拉单晶处理后制成的半导体称为本征半导体,即本征半导体是完全纯净的具有单晶结构的半导体,本征半导体又称为晶体。

为了画图方便,无论硅或锗都采用图 7.1.1(c)的简化模型,图中标有+4 的圆圈代表内层电子和原子核的电量之和,将惰性核最外层电子称为价电子。

我们知道,任何原子最外层只有 4 个电子的结构是不稳定的,最外层的电子要达到 8 个才稳定。因此在硅或锗晶体的结构中,每一个原子都有与相邻的 4 个原子结合时,把相邻原子中的 4 个价电子作为自己最外层的电子,以达到最外层 8 个电子的稳定结构的倾向。因此每个硅与锗原子的价电子是它自身原子和与它相邻的原子共有的,每一个原子的一个价电子与相邻原子的一个价电子组成一对价电子对,这一对价电子把两个相邻的原子结合在一起。原子的这种结构称为共价键结构。图 7.1.2 画出了原子间的共价键结构。

共价键中的电子在热力学温度为零度时,价电子将全部束缚在共价键中,此时半导体相当于绝缘体。在热量、光照等能量激发下,有少量电子获得足够大的能量而挣脱共价键束缚后成为自由电子,留下的相应空位称为空穴,如图 7.1.3 所示,电子和空穴相伴而生,相伴而灭,形成电子空穴对,电子带负电、空穴带正电,它们作为带电的粒子都能形成电流,故都称为载流子。载流子的数量随温度的变化而显著变化,温度升高,载流子数目增加,导电能力强;温度降低,自由电子与空穴复合,使两者均消灭,载流子数目变少,导电能力弱,所以,温度对半导体器件导电性的影响很大,这点务必引起注意。

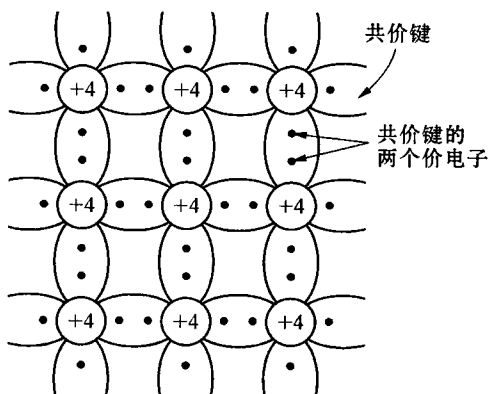


图 7.1.2 晶体的共价键结构图

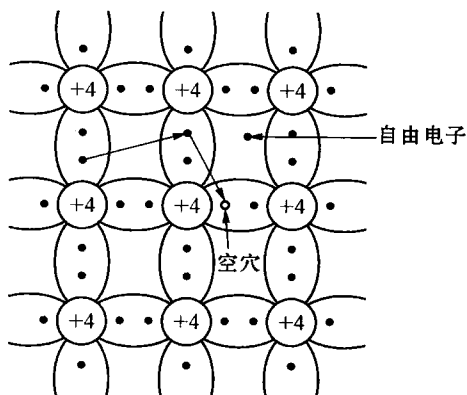


图 7.1.3 本征半导体电子、空穴对的形成

7.1.3 杂质半导体

在本征半导体中掺入某种微量的合适元素,半导体的导电能力不但将大大提高而且易于控制,掺入的微量元素称为杂质,掺入杂质的半导体称为杂质半导体。根据掺入的杂质不同,可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体硅中掺入微量的 5 价元素例如磷(P),如图 7.1.4 所示。由于磷原子有 5 个价电子,当磷原子取代硅晶体中的硅原子与相邻的 4 个硅原子组成共价键时,还多余一个价电子,这个价电子只受磷的原子核束缚,不受共价键束缚,在室温下很容易挣脱磷原子核的引力束缚,成为自由电子。因此每掺入一个磷原子就提供一个自由电子,半导体中的自由电子数量大量增加,大大超过了空穴的数量,这种半导体是以电子导电为主,称为 N(电子)型半导体。N 型半导体中电子是多数载流子(多子),空穴是少数载流子(少子)。

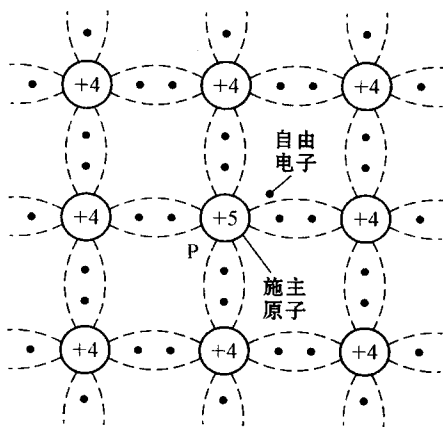


图 7.1.4 N 型半导体结构示意图

由于在 N 型半导体中磷原子失去了一个价电子,形成了带正电的正离子,称为杂质正离子,也称为施主离子,磷元素提供电子故称施主杂质。虽然 N 型半导体中电子是多数载流子,但存在着相应数量的正离子和空穴,整个 N 型半导体仍然是电

中性的。由于N型半导体存在着大量的自由电子,因此它的导电能力比本征半导体强得多。

2. P型半导体

在本征半导体硅或锗中掺入微量的3价元素硼,硼元素只有3个价电子,当硼原子与相邻的四个硅原子组成共价键结构时,在共价键中就会缺少一个电子,形成一个空位(这个空位是电中性,故不是空穴)。在室温下,与硼原子相邻的硅原子的共价键上的价电子获得能量就会移动到这个空位上来,填补这个空位。于是在该价电子原来所处的共价键位置上就出现一个空穴,如图7.1.5所示。这样每掺入一个硼原子就形成一个空穴,使硅晶体中产生大量的空穴,其数量远远超过了自由电子,这种半导体以空穴导电为主,称为P(空穴)型半导体。P

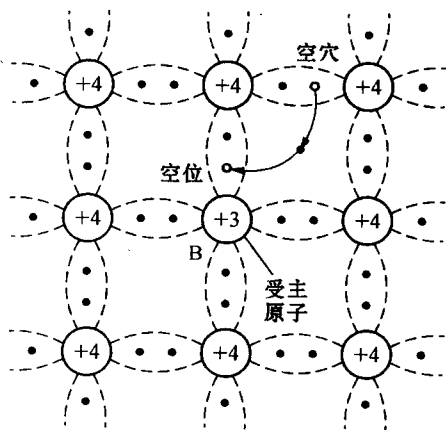


图 7.1.5 P型半导体结构示意图

型半导体中空穴是多数载流子(多子),自由电子是少数载流子(少子)。

在P型半导体中,硼原子得到了一个价电子,形成了带负电的负离子,称为杂质负离子,也称受主离子,硼元素则称为受主杂质。虽然P型半导体中空穴是多数载流子,但存在着相应数量的负离子和自由电子,整个P型半导体亦是电中性的。由于P型半导体存在着大量空穴,故它的导电能力也比本征半导体强得多。

7.1.4 PN结及其单向导电性

1. PN结的形成

在一块本征半导体的两端通过一定的工艺分别掺入不同的杂质,使它两边分别形成P型半导体和N型半导体,P型半导体的区域称为P区,N型半导体的区域称为N区,如图7.1.6(a)所示。由于P区半导体中的多数载流子空穴浓度大于N区中的空穴浓度,浓度差将引起扩散运动,即P区中的空穴就要向N区扩散,空穴通过两种半导体的交界面与靠近交界面的N区中的自由电子复合,与此同时,N区中的多数载流子电子的浓度要比P区中的电子浓度大得多,N区中的电子向P区扩散,电子通过交界面与靠近交界面的P区中的空穴复合。扩散和复合首先在交界面处进行,在交界面附近的P区一侧,因复合失去空穴,只剩下施主杂质形成的负离子,在N区一侧则形成正离子,因此在交界面两侧形成了由正负离子组成的一个区域,这个区域称为空间电荷区。

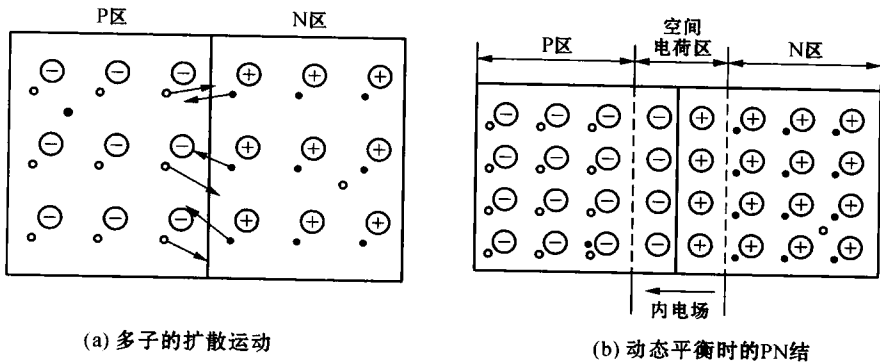


图 7.1.6 PN 结的形成

空间电荷区内的正、负离子分别带正电和负电，正、负离子是不能移动的，它们形成了一个电场，这个电场称作内电场，内电场的电场方向由 N 区指向 P 区。在电场作用下，电子逆电场方向运动，空穴则沿电场方向运动，故内电场阻挡了 P 区和 N 区多数载流子的扩散运动；但却有助于 P 区中的少数载流子电子向 N 区移动以及 N 区中的少数载流子空穴向 P 区移动，这种少数载流子在内电场作用下的移动称为漂移运动。漂移运动的结果是由 P 区来的自由电子到达空间电荷区，使空间电荷区内的正离子得到电子而恢复成中性原子，由 N 区来的空穴到达空间电荷区，使空间电荷区内的负离子得到空穴恢复成中性原子，空间电荷区内的正、负离子均减少，空间电荷区变窄，内电场的电场强度减弱，内电场减弱一方面使漂移运动减弱，一方面却使扩散运动又加强了，扩散运动结果再使空间电荷区加宽。如此周而复始，当扩散运动和漂移运动中的载流子数目相等时，载流子运动达到了动态平衡，空间电荷区的宽度就保持不变，此时的空间电荷区称为 PN 结。如图 7.1.6(b) 所示。

2. PN 结的单向导电性

1) 外加正向电压时导通

当电源的正极接半导体的 P 区，电源的负极通过电阻 R 接半导体的 N 区，如图 7.1.7 所示，这时 PN 结所处的工作状态称为正向偏置（简称正偏）。正向偏置在 PN 结上产生一个外电场，其方向由 P 区指向 N 区、与 PN 结上的内电场方向相反，打破了动态平衡，有利于扩散运动，不利于漂移运动。在电源的作用下，扩散运动源源不断进行，形成了从 P 区到

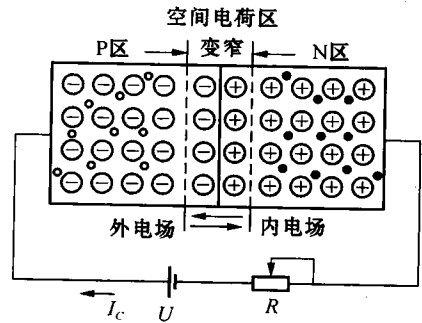


图 7.1.7 PN 结外加正向电压导通

N区的正向电流,PN结导通。

2) 外加反压电压时截止

当电源的正极经电阻 R 接半导体的 N区,电源的负极接半导体的 P区,如图 7.1.8 所示,这时 PN 结所处的工作状态称为反向偏置(简称反偏)。反向偏置在 PN 结上产生一个外电场,其方向由 N 区指向 P 区,与 PN 结上的内电场方向相同,也打破了动态平衡,但有利于漂移运动,不利于扩散运动,在电源的作用下,虽然也能形成从 N 区到 P 区的反向电流,但因为少子的数量很少,故形成的反向电流甚微,一般忽略不计,称这种状态为 PN 结反向截止。

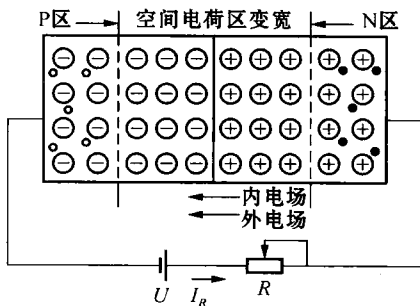


图 7.1.8 PN 结外加反压电压截止

PN 结正向偏置导通,反向偏置截止的导电性能称为 PN 结的单向导电性。

7.1.5 PN 结的伏安特性及其他特性

1. PN 结的伏安特性

由理论分析可知,若设 PN 结所加端电压 u 为正偏电压(假定方向),流过它的电流 i 的方向与 u 的方向关联,则 u 与 i 的关系为

$$i = I_S(e^{\frac{qu}{kT}} - 1) \quad (7.1.1)$$

式中, I_S 为反向饱和电流; q 为电子的电量; k 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度。令式(7.1.1)中 $kT/q = U_T$, U_T 为温度的电压当量,则得

$$i = I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (7.1.2)$$

常温下,即 $T = 300 \text{ K}$ 时, $U_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

由式(7.1.2)可知,当 PN 结外加正向电压,若 $u \geq 5U_T$, 可认为 $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$, 即 i 随 u 按指数规律变化;当 PN 结外加反向电压,且 $|u| \geq 5U_T$ 时, $i \approx -I_S$ 。画出 i 与 u 的关系曲线如图 7.1.9 所示,称为 PN 结的伏安特性。其中 $u \geq 0$ 的部分称为正向特性, $U_{(BR)} < u \leq 0$ 的部分称为反向特性。应当注意, $u \leq U_{(BR)}$ 时,不能用方程(7.1.2)描述其特性。

当反向电压超过一定数值 $U_{(BR)}$ 后,反向电流急

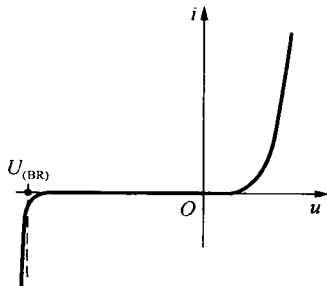


图 7.1.9 PN 结的伏安特性

剧增加,称之为反向击穿,反向击穿不属于单向导电性范畴。击穿分为齐纳击穿和雪崩击穿两种情况。在高掺杂的情况下,因空间电荷区宽度很小,较低的反向电压就可在空间电荷区形成很强的电场,而直接破坏共价键,使价电子脱离共价键束缚,产生电子-空穴对,致使电流急剧增大,这种击穿称为齐纳击穿。可见齐纳击穿电压较低。如果掺杂浓度较低,空间电荷区宽度较宽,那么低反向电压下不会产生齐纳击穿。当反向电压增加到较大数值时,空间电荷区的电场使少子加快漂移速度,从而与共价键中的价电子相碰撞,把价电子撞出共价键,产生电子-空穴对。新产生的电子与空穴被电场加速后又撞出其他价电子,载流子雪崩式地倍增,致使电流急剧增加,这种击穿称为雪崩击穿。无论哪种击穿,若对其电流不加限制,都可能造成PN结的永久性损坏,因此击穿现象对PN结的应用是一种限制,应对最高反压电压加以规定。若反向击穿电压高于6V,一般以雪崩击穿为主,反之以齐纳击穿为主。

2. PN结的其他特性

1) 电阻特性

PN结具有非线性的电阻特性。PN结正偏时,电阻较小,反之电阻较大。

2) 电容特性

当PN结两端加上频率较高的交变电压时,PN结将呈现电容效应而失去了单向导电性。PN结等效的电容 C_j 可用下式表示:

$$C_j = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{d} A \quad (7.1.3)$$

式中, ϵ_s 是半导体的相对电容率; ϵ_0 为真空电容率($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m); d 是空间电荷区的宽度(m); A 为结的截面积(m^2); C 的单位为(F)。

结电容 C_j 的数值一般都很小,对低频率信号将呈现极高的容抗,其作用可以忽略不计,只有在高频信号下,才考虑其作用。

3) 温度特性

前已述及,在反向偏置下,少子形成的反向电流甚微,但少子的数目是随温度升高而显著增加的,所以反向电流亦随之显著增加,这就是PN结的温度特性。在温度变化幅度较大时,此特性需定性考虑。

7.2 半导体二极管

7.2.1 半导体二极管结构和伏安特性

1. 半导体二极管结构和伏安特性

半导体二极管是由具有一个PN结的半导体加上相应的引出线(电极)和管壳

制成的。二极管的外形和符号如图 7.2.1 所示。由 P 型半导体引出的电极称为正(阳)极,由 N 型半导体引出的电极称为负(阴)极,根据结构的不同,半导体二极管分为点接触和面接触两种。面接触型用于大功率整流,点接触型用于高频检波和开关电路等。

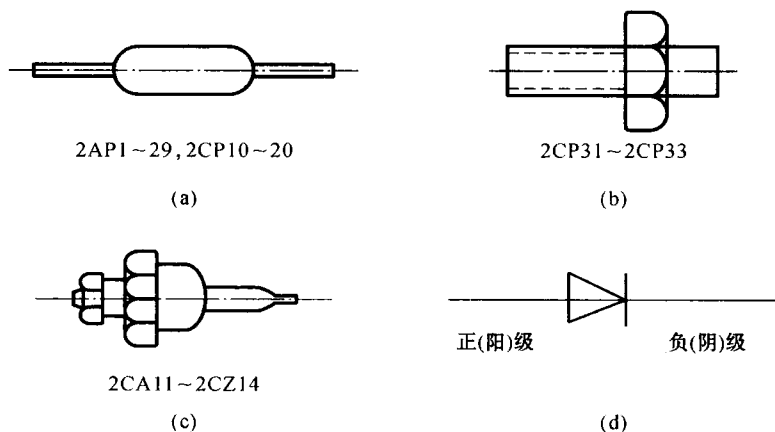


图 7.2.1 二极管的外形和符号

2. 二极管的伏安特性

与 PN 结一样,二极管具有单向导电性。但因二极管存在半导体电阻和引线接触电阻,所以当外加正向电压时,在电流相同的情况下,二极管的端电压大于 PN 结上的压降;或者说,在外加正向电压相同的情况下,二极管的正向电流要小于 PN 结的电流;在大电流情况下,这种影响更为明显。另外,由于二极管表面漏电流的存在,使外加反向电压时二极管的反向电流大于 PN 结的反向电流。

在小电流的近似分析时,采用式(7.1.2)描述二极管的伏安特性与实测结果较为吻合,所以在小电流情况下,PN 结的电流方程适用于二极管,图 7.2.2 示出了二极管的伏安特性。

从图 7.2.2 的伏安特性可发现,在正向电压较小时,正向电流几乎为零,该段称为死区,死区对应的最大电压 U_{th} 称为死区电压或门坎电压;只有在正向电压足够大时,正向电流才从零随端电压按指数规律增大。使二极管开始产生较大电流的电压 U_{on} 称为导通电压。

当二极管所加反向电压的数值足够大时,反向电流为 I_s 。反向电压太大将使二极管击穿,不同型号二极管的击穿电压差别很大,从几十伏到几千伏。

表 7.2.1 列出两种材料小功率二极管死区电压、正向导通电压范围、反向饱和电流的数量级。