

中等专业学校教材

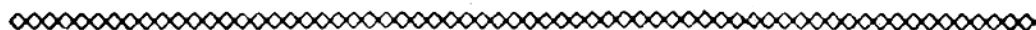


# 电子技术基础

广东省水利电力职业技术学校 周宝銮  
四川省水利电力学校 徐绍兴 合编



# 中等专业学校教材



## 电子技术基础

广东省水利电力职业技术学院 周宝銮  
四川省水利电力学校 徐绍兴 合编

中国水利水电出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

电子技术基础/周宝奎, 徐绍兴编. —北京: 中国水利水电出版社, 1993 (2007 重印)

中等专业学校教材

ISBN 978-7-80124-187-0

I. 电… II. ①周…②徐… III. 电子技术—专业学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 112215 号

中等专业学校教材

电子技术基础

广东省水利电力职业技术学院 周宝奎 合编  
四川省水利电力学校 徐绍兴

\*

中国水利水电出版社 出版、发行  
(原水利电力出版社)

(北京市三里河路 6 号 100044)

网址: [www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

E-mail: [sales@waterpub.com.cn](mailto:sales@waterpub.com.cn)

电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)

北京科水图书销售中心 (零售)

电话: (010) 88383994、63202643

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经售

北京纪元彩艺印刷有限公司印刷

\*

787mm×1092mm 16 开本 23.5 印张 533 千字

1993 年 6 月第 1 版 2007 年 7 月第 7 次印刷

印数 50851—52850 册

ISBN 978-7-80124-187-0

(原 ISBN 7-120-01674-1/TM·450)

定价 29.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

本教材是根据水利部 1989 年制定的全日制中专水电站电力设备专业《电子技术基础》教学大纲的要求编写的。参考授课时数为 142 学时。对教材内容作适当删节,也适用于中专水电站动力设备专业《电子技术基础》课程使用。

本教材编写的主导思想是:精选内容,保证基础,加强实用性,有专业特色,做到深浅适度,好教易学。在内容处理上,是管为路用,讲述单元电路为主,以分立元件电路为基础,集成电路为重点,同时,从专业实际需要出发,对分立元件脉冲电路作了专章介绍。

在编写过程中,着重讲清基本原理和物理概念。力求循序渐进,突出重点,分散难点;力求简明扼要,通俗易懂,利于自学。全书各章编有小结和习题,书末编有读图练习(不占授课时数)和附录,目的是帮助读者巩固所学知识。书中加“\*”的章节可作为选讲内容。逻辑代数如数学课程未讲授,本课程应适当增加授课时数。

本教材由广东省水利电力职业技术学院周宝銮和四川省水利电力学校徐绍兴合编,其中第二、三、五、六章由徐绍兴编写,第七、八、九章由周宝銮编写,绪论由二人合写。湖南省水利水电学校周元伟编写了第一、四章。编者在 1987 年 11 月广州会议研究大纲的基础上,于 1990 年 4 月在武汉会稿,对教材的初稿进行了认真的研讨和酌定,并于 1990 年 7 月在四川召开的“水电、水动专业电子技术课程教研组会议”上介绍了教材的编写情况,与会的水利部部分中专学校近 20 位代表对教材初稿进行了认真讨论,提出了宝贵意见。会后,编者根据代表们的意见对部分书稿内容作了适当修改和补充。最后,全书由周宝銮统稿。

湖北省水利学校盛传鼎为本教材的主审。盛老师仔细审阅了全部书稿,并参加了会稿,对书稿提出了详细的修改意见和建议。

电子技术是一个飞速发展的科技领域,新的元器件和电路层出不穷,日新月异。限于编者水平,既要做到满足目前中、小型水电站的实际需要,又要放眼于未来,在题材选取方面,在内容叙述方面,错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1992 年 1 月

# 目 录

前 言

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| 绪 论 .....               | ( 1 )   |
| 第一章 半导体二极管和三极管 .....    | ( 3 )   |
| 第一节 半导体的基本知识 .....      | ( 3 )   |
| 第二节 半导体二极管 .....        | ( 9 )   |
| 第三节 特殊二极管 .....         | ( 13 )  |
| 第四节 半导体三极管 .....        | ( 15 )  |
| 本章小结 .....              | ( 24 )  |
| 习题一 .....               | ( 24 )  |
| 第二章 晶体管放大电路 .....       | ( 28 )  |
| 第一节 基本放大电路 .....        | ( 28 )  |
| 第二节 静态工作点稳定的放大电路 .....  | ( 39 )  |
| 第三节 多级阻容耦合放大电路 .....    | ( 43 )  |
| 第四节 负反馈放大电路 .....       | ( 47 )  |
| 本章小结 .....              | ( 55 )  |
| 习题二 .....               | ( 56 )  |
| 第三章 场效应管放大电路 .....      | ( 60 )  |
| 第一节 结型场效应管 .....        | ( 60 )  |
| 第二节 绝缘栅型场效应管 .....      | ( 65 )  |
| 第三节 场效应管放大电路 .....      | ( 69 )  |
| 本章小结 .....              | ( 74 )  |
| 习题三 .....               | ( 75 )  |
| 第四章 正弦波振荡电路 .....       | ( 77 )  |
| 第一节 自激振荡的产生与稳定 .....    | ( 77 )  |
| 第二节 $LC$ 振荡电路 .....     | ( 79 )  |
| 第三节 石英晶体振荡电路 .....      | ( 85 )  |
| 第四节 $RC$ 振荡电路 .....     | ( 89 )  |
| 本章小结 .....              | ( 93 )  |
| 习题四 .....               | ( 93 )  |
| 第五章 直接耦合放大电路 .....      | ( 96 )  |
| 第一节 直接耦合放大电路的特殊问题 ..... | ( 96 )  |
| 第二节 差动放大电路 .....        | ( 100 ) |
| 第三节 功率放大电路 .....        | ( 113 ) |
| 本章小结 .....              | ( 121 ) |
| 习题五 .....               | ( 121 ) |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 第六章 集成运算放大器 .....          | (124) |
| 第一节 集成电路简介 .....           | (124) |
| 第二节 集成运算放大电路 .....         | (127) |
| 第三节 集成运算电路 .....           | (134) |
| 第四节 运算放大器的其它应用 .....       | (140) |
| 本章小结 .....                 | (143) |
| 习题六 .....                  | (144) |
| 第七章 脉冲电路 .....             | (147) |
| 第一节 脉冲电路的基本知识 .....        | (147) |
| 第二节 反相器 .....              | (155) |
| 第三节 集—基耦合双稳态触发器 .....      | (161) |
| 第四节 集—基耦合单稳态触发器 .....      | (166) |
| 第五节 自激多谐振荡器 .....          | (170) |
| 第六节 射极耦合双稳态触发器 .....       | (173) |
| 本章小结 .....                 | (177) |
| 习题七 .....                  | (178) |
| 第八章 数字电路 .....             | (183) |
| 第一节 数的表示法 .....            | (183) |
| 第二节 逻辑门电路 .....            | (186) |
| 第三节 逻辑代数 .....             | (199) |
| 第四节 集成电路触发器 .....          | (212) |
| 第五节 寄存器 .....              | (225) |
| 第六节 计数器 .....              | (228) |
| 第七节 译码器和显示电路 .....         | (235) |
| 第八节 加法器 .....              | (246) |
| 第九节 集成脉冲形成电路 .....         | (252) |
| 第十节 数模转换和模数转换 .....        | (259) |
| 本章小结 .....                 | (263) |
| 习题八 .....                  | (265) |
| 第九章 电源电路 .....             | (276) |
| 第一节 单相整流电路 .....           | (276) |
| 第二节 三相整流电路 .....           | (281) |
| 第三节 滤波电路 .....             | (283) |
| 第四节 稳压电路 .....             | (286) |
| 第五节 可控整流电路 .....           | (300) |
| 第六节 可控硅逆变电源 .....          | (319) |
| 本章小结 .....                 | (323) |
| 习题九 .....                  | (325) |
| 读图练习 .....                 | (332) |
| 附 录 .....                  | (340) |
| 附录一 电阻器和电容器的型号及标称值系列 ..... | (340) |

|      |                    |       |
|------|--------------------|-------|
| 附录二  | 半导体器件型号命名方法.....   | (343) |
| 附录三  | 常用半导体器件的型号和参数..... | (344) |
| 附录四  | 集成电路型号命名方法.....    | (349) |
| 附录五  | 常用集成电路的型号和参数.....  | (350) |
| 参考文献 | .....              | (368) |

# 绪 论

电子技术是研究各种电子器件的性能和由电子元器件组成的各种电子线路工作原理及其应用的一门科学技术。

## 一、电子技术的发展概况

电子技术是19世纪末从物理学中脱颖而出的一门新兴科学技术。从1904年真空二极管和1906年真空三极管的发明并用于无线电发送和接收开始,诞生了由真空管组成的第一代电子产品,它标志着电子时代的来临。1948年半导体三极管的研制成功,不仅使电子产品进入第二代,而且它是电子技术发展的一个新里程碑。五十年代末出现的集成电路,使电子技术又获得飞跃进步,至今,它经历了从小规模、中规模、大规模到超大规模集成电路的发展历程。目前,电子技术正朝量子隧道器件方向发展。量子隧道器件的尺寸比半导体集成电路约小100倍,而运算速度要高1000倍。科学家们预言,量子隧道器件将是继真空器件、半导体器件之后的又一个新里程碑。

作为当代电子产品的精华——电子计算机被誉为电脑,它的研制和生产过程反映了电子技术发展的惊人速度。1946年研制成功的第一台电子管型计算机,主机和外部设备占了一幢楼房。1956年生产的晶体管型计算机,只占一个房间。1989年用超大规模集成电路制成的、具有优良性能的个人计算机,体积只有 $22\text{cm} \times 10\text{cm} \times 2\text{cm}$ ,重450g。计算机的运算速度也从早期的每秒几十次发展到今天的每秒90多亿次。计算机的功能,已由过去的单纯数学运算,发展到生产的程序控制,经济、事务管理等各个方面,并向人工智能化方向发展,各种电脑机器人的出现就是一个标志。

今天,高效太阳能电池,激光唱盘、录像,液晶彩色电视,移动式程控电话,光纤通讯设备等等五光十色的电子新产品不断涌现,琳琅满目。

在短短的八、九十年间,电子技术取得了辉煌的成就。它已渗透到工业、农业、国防、科技、教育、文化、卫生、财贸等各个领域,并与人们的工作、学习、生活息息相关。目前,电子技术这一庞大的科技体系,已形成许多分支,如无线电电子学,电力电子学,信息电子学,生物医学电子学,光电子学,微电子学等等。毫无疑问,电子技术的发展和应用水平,必然成为一个国家现代化程度的重要标志之一。

## 二、本课程的性质和任务

电子技术基础是理论性和实践性都很强的、电类各专业的一门重要技术基础课程。它讲述的是电子技术中最基本的理论和最常用的电子线路,操作训练是最基本的电子技术技能。它担负着普及电子技术基础知识和为学习专业电子线路打基础的双重任务。它与水电站电力设备专业的继电保护、自动装置、水轮机调节以及选修课微型计算机应用等后续课程密切相关。在被称为“电子世界”的今天,每个工程技术人员都必须具备一定的电子技术知识。

本课程主要讲授有关电子器件的结构、原理、特性、主要参数和测试选用方法；讲述放大、振荡、脉冲、数字、电源电路的基本原理、典型电路及其分析、估算。全书分为模拟电子技术和脉冲数字电子技术两大部分。

### 三、学习本课程的方法和要求

初学者必须掌握本课程的特点，采用正确的学习方法，才能达到学习的目的和要求。

第一，应了解模拟电子技术和脉冲数字电子技术这两个部分在研究内容、电路特点和分析方法上的显著区别。模拟电路主要研究对连续变化的微弱电信号的不失真放大，放大电路中的三极管工作在线性放大区，它可以等效为受控电流源，放大电路可以等效为线性网络；脉冲电路主要研究脉冲信号的产生和波形变换，数字电路主要研究输出和输入数字信号之间的逻辑关系。脉冲和数字电路中的三极管工作在饱和或截止的非线性区，等效于开关。

第二，在学习中要掌握好基本知识和基本理论。例如，各种半导体器件大都由 PN 结构成的，PN 结的特性就是一个重要的基本知识。又如，要分析复杂的电子线路，必须掌握好半导体器件的特性和典型单元电路的工作原理。再如，分析电子线路的基本方法是运用电工基础知识结合电子线路的特点，采用简化、等效和近似估算的方法等。

第三，要十分重视实验和实习，加强基本技能训练。工厂生产的元器件参数分散性较大，必须用仪器测量才能获得准确的参数值；电子电路分析估算误差较大，也必须通过仪器测试调整才能使之满足技术要求。只有通过实验和实习，掌握常用电子仪器的使用方法、元器件的测试方法以及电子电路的检测调整方法，才能提高基本技能。同时，通过实验和实习，还能加深对基本理论的理解，巩固所学的知识。

另外，坚持课后先复习后作业和实验前预习，认真完成作业，编写好实验报告和实习报告，也是巩固“三基”的重要环节。只要脚踏实地，知难而进，采取科学的态度和方法，是能够学好本门功课的。

# 第一章 半导体二极管和三极管

本章在阐明半导体导电特性之后，着重讲述PN结的单向导电原理，并在此基础上讲述两个最基本的半导体器件——二极管和三极管。这两个半导体器件的结构特点、导电原理、特性曲线和主要参数是本章学习的重点。本章还对稳压二极管和发光二极管作了介绍。

## 第一节 半导体的基本知识

### 一、半导体的导电特性

各类半导体器件，如半导体二极管和三极管等，都是用半导体材料、采用一定的工艺制成的。要了解半导体器件的工作原理，首先需要了解半导体材料的导电特性。

自然界的各种物质，根据其导电能力的差别，分为导体、绝缘体和半导体三大类。银、铜、铝等金属的电阻率小于 $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ ，是良好的导电材料；橡胶、陶瓷、塑料等的电阻率大于 $10^9\Omega\cdot\text{cm}$ ，是不导电的绝缘材料；而硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs）、磷化镓（GaP）、锑化铟（InSb）和硫化镉（CdS）等，其电阻率在 $10^{-3}\sim 10^7\Omega\cdot\text{cm}$ 的范围内。人们通常把这类导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，称为半导体。硅和锗是大多数半导体器件所用的主要材料。

半导体之所以在电子器件中得到广泛应用，是由于它具有以下不同于导体和绝缘体的特殊性能：

（1）热敏性 纯净的半导体对温度很敏感，电阻率随温度变化显著。当温度升高时，电阻率随温度成指数规律下降，导电能力显著增强。

（2）光敏性 纯净的半导体对光照也很敏感，光照增强时，其电阻率显著减小。例如某些光敏电阻，无光照时的电阻（称暗电阻）为几十 $\text{M}\Omega$ ，而受光照时，电阻迅速下降到几十 $\text{k}\Omega$ ，变化达几百倍。

（3）可掺杂性 半导体的导电能力可随掺入微量杂质而发生显著变化。例如在纯净的硅中掺入百万分之一的磷，其电阻率几乎下降到原有电阻率的百万分之一，即导电能力增加近一百万倍。这是半导体区别于导体和绝缘体的最显著的特性。人们正是利用这一特性，用掺入不同数量和不同性质的微量杂质来控制半导体的导电能力和类型，制造出各种半导体器件的。

除上述三个主要特性之外，电场、磁场、压力以及不同气体等都对半导体的导电性能有影响。利用半导体的这些特性，可以制成各种半导体管和热敏、光敏、磁敏、压敏、气敏等元件，广泛应用于电子技术的各个领域。

## 二、本征半导体

半导体的上述导电特性是由其内部结构和独特的导电机理决定的。下面先讲述本征半导体的导电原理。

纯净的不含其它杂质且结构完整的半导体，称为本征半导体，它是制造半导体器件的基本材料。最常用的本征半导体是硅和锗的单晶体。图1-1(a)是硅原子结构示意图。硅的原子序数是14，在原子核的周围共有14个电子分层围绕核旋转，最外层轨道上有4个价电子。锗的原子序数是32，其原子核周围有32个电子分层围绕核旋转，它和硅原子有个相同点，就是最外层也是4个价电子，所以硅和锗都是4价元素。由于硅和锗的导电性能仅与价电子有关，为了简便起见，常将原子核和内层电子视为一个整体，用带有+4电量的正离子表示，称它为惯性核。用惯性核和周围4个价电子来表示一个4价元素的原子，这样就得到硅和锗原子结构的简化模型，如图1-1(b)所示。

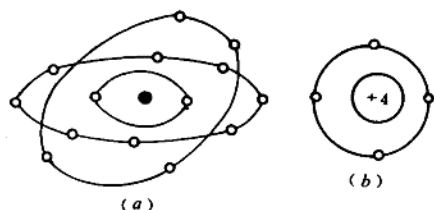


图 1-1 硅原子结构及硅和锗原子的简化模型  
(a) 硅的原子结构；(b) 硅和锗原子的简化模型

当把硅或锗制成单晶体后，晶体中的原子排列非常整齐，在空间形成规则的晶格，各原子之间的距离都相等。每个原子的价电子不仅受自身原子核的束缚，同时还受到相邻原子的原子核的吸引。因此，价电子不仅围绕自身原子核运动，还时常出现在相邻原子所属的轨道上，于是，出现自身原子的每个价电子与相邻原子的一个价电子组成共有的电子对，它们同属于这两个原子，它们像键一样联系起来，这种结构称为共价键结构。在晶体中，每个原子的外层都有4对电子（即8个价电子）以共价键形式与周围4个原子紧密联系起来，这种共价键结构比较稳定。图1-2是这种结构的平面示意图。

本征半导体的上述结构，其共价键的结合力较强，价电子不易挣脱共价键的束缚。但在一定温度下，例如室温，由于热运动，将有少数价电子获得足够能量克服共价键的束缚，脱离共价键而成为半导体内能自由运动的自由电子，这种现象称为热激发。值得注意的是价电子脱离共价键后，就在共价键中留下一个空位，这种空位称为空穴，如图1-3所示。空

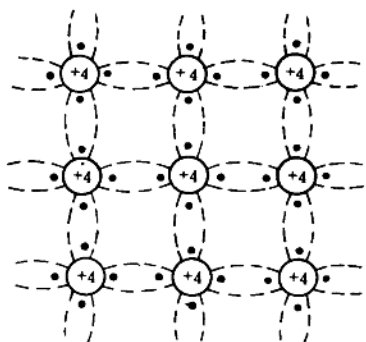


图 1-2 硅和锗晶体共价键结构示意图

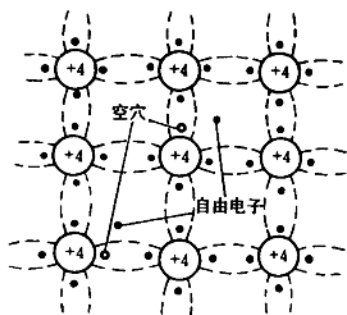


图 1-3 本征半导体中的自由电子和空穴

穴是由于原子失去一个价电子而形成的，可视为带正电。在常温下，空穴附近共价键中的价电子很容易转移过来填补这个空穴，同时又产生一个新的空穴，这种价电子填补空穴的运动，从效果和现象上看，都好像一个带正电荷的空穴在作相反方向的运动。为了区别于自由电子的运动，将这种价电子在共价键之间的转移运动称为空穴运动。

由此可见，半导体中存在着两种载流子：一种是带负电荷的自由电子；另一种是带正电荷的空穴。在半导体两端接上电源  $E$ ，则其内的自由电子在电场力的作用下向电源正极运动，而空穴向电源负极运动，分别形成电子电流  $I_N$  和空穴电流  $I_P$ ，在外电路中电流为两者之和，即  $I = I_N + I_P$ ，方向是从电源正极流向负极，如图 1-4 所示。

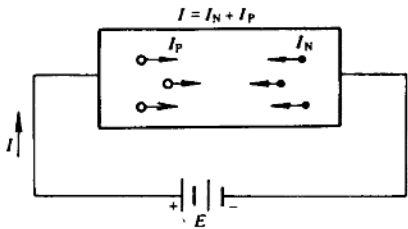


图 1-4 半导体中电子和空穴形成的电流

本征半导体中的自由电子和空穴是由热激发产生的，总是成对出现，称为电子——空穴对（又称本征载流子），这两种载流子的浓度是相等的。在室温条件下，因温度不高，热激发产生的电子——空穴对还不多，所以导电性能还很差。若温度升高，则热激发增强，载流子数量就会增多，导电能力增大，故半导体的导电性能与温度密切相关，具有热敏性。

由于热激发，半导体中的电子——空穴对不断地产生，但同时当电子和空穴相遇时又会重新结合而消失，这种相反的过程称为复合。电子——空穴对又产生又复合，在一定的温度下会达到动态平衡，这时激发和复合两个过程虽仍在不断地进行，但电子——空穴对却维持一定的数目，即本征载流子浓度达到一定，不再增减。此外，本征载流子浓度还与半导体材料有关，由于硅原子的价电子脱离共价键所需能量比锗原子的要大，故在相同温度下，硅材料本征载流子浓度要比锗材料小。本征载流子浓度与温度的关系是：硅材料大约温度每升高  $8^{\circ}\text{C}$ ，本征载流子浓度增加一倍；锗材料大约温度每升高  $12^{\circ}\text{C}$ ，本征载流子浓度增加一倍。作为估算，不论是硅材料还是锗材料，可以认为温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ，本征载流子浓度增加一倍。

本征载流子除热激发产生外，还可通过光或其它射线激发产生，故半导体还具有光敏性等。

### 三、杂质半导体

在本征半导体中掺进微量的某种特定的杂质元素，成为杂质半导体后，其导电性能将发生质的变化。随掺入的杂质不同，杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体两种。

#### 1. N 型半导体

若在 4 价的硅（或锗）中，掺入微量的 5 价杂质元素磷（或砷），那么，每个磷原子在晶体中将占据原来一个硅原子的位置，如图 1-5(a) 所示。由于磷原子的 5 个价电子只有 4 个能和相邻 4 个硅原子组成共价键，结果多出一个价电子，这个多余的价电子不受共价键的束缚，只受磷原子核本身的吸引，这比共价键的束缚微弱得多，在室温条件下，就很容易脱离磷原子而成为自由电子。可见，每掺入一个磷原子就可提供一个自由电子，像磷、砷这类能提供多余电子的杂质元素，称为施主杂质。应当注意，磷原子给出多余价电子后，

因失去一个电子而成为带正电荷的正离子，它虽然带正电荷，但不能移动，故不是载流子，而且它提供自由电子时并不产生空穴，这和本征载流子的产生有本质的不同。在这种掺杂半导体中，还有因热激发而产生的少量电子——空穴对，但由于掺杂产生的自由电子数量远大于热激发产生的载流子数量，使得半导体中的自由电子成为多数载流子（简称多子），而空穴成为少数载流子（简称少子）。这种以自由电子导电为主的半导体，称为电子型半导体，简称为N型半导体。

图1-5(b)是N型半导体内部结构示意图，图中表示了载流子和杂质离子的情况。虽然N型半导体自由电子的数量远多于空穴，但整块半导体中正负电量是相等的，仍呈电中性。

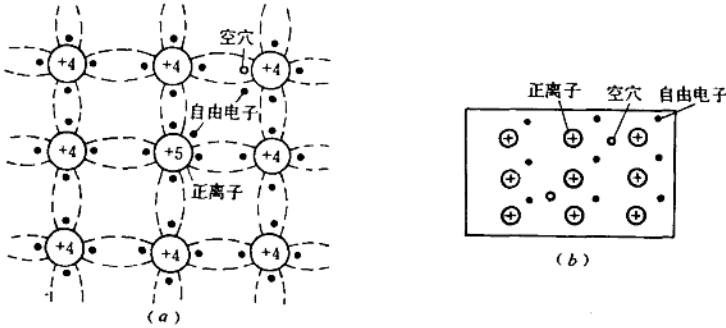


图 1-5 N型半导体  
(a)结构平面图；(b)结构示意图

## 2. P型半导体

若在4价的硅(或锗)中，掺入3价的硼(或铟)，则晶体中原子的排列如图1-6(a)所示。因为硼原子只有3个价电子，它与相邻的4个硅原子组成共价键时，有一条共价键出现一个空位(即空穴)，这个空位很容易被附近硅原子的价电子填补，例如图1-6(a)中b处的价电子填补a处的空位，这样，就使b处产生一个空穴。可见每掺入一个硼原子就会为半导体提供一个空穴。显然，掺入3价杂质元素后，半导体中的空穴数会远大于自由电子数，空穴为多数载流子，自由电子为少数载流子。这种以空穴导电为主的杂质半导体称为

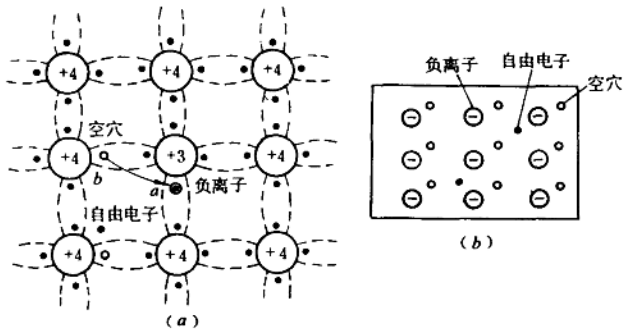


图 1-6 P型半导体  
(a)结构平面图；(b)结构示意图

空穴型半导体，简称为 P 型半导体。由于硼原子能接受价电子，称为受主杂质。硼原子接受一个价电子后成为带负电的负离子，同样不能移动，不是载流子。P 型半导体中虽然空穴数远多于自由电子，但和 N 型半导体一样，整块半导体中正负电量相等，也呈电中性。图 1-6(b) 是 P 型半导体的内部结构示意图。

综上所述，杂质半导体的结构特点归纳如下：

①杂质半导体内也存在两种载流子，但两者数量不相等。N 型半导体的多子是自由电子，少子是空穴；P 型半导体的多子是空穴，少子是自由电子。

②在 N 型和 P 型半导体内分别存在正、负离子，这些离子虽然带电，但不能移动，不是载流子。

③杂质半导体内的多数载流子是掺杂形成的，其数量决定于杂质浓度，杂质浓度高，多子就多。而少数载流子是热激发产生的，其数量与温度有关，温度升高，少子增多。

④无论是 N 型还是 P 型半导体，都呈电中性。

#### 四、PN 结

##### (一) PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体采用适当工艺相结合时，在它们的交界面附近，将形成一层很薄的由正、负离子组成的空间电荷区，称为 PN 结，如图 1-7(b) 所示。这是因为在 P 型和 N 型半导体交界面的两侧，多数载流子的浓度相差很大，P 区的多子空穴便向 N 区扩散，而 N 区的多子自由电子则向 P 区扩散，如图 1-7(a) 所示。于是，在交界面两侧的一个薄层内原来的电中性被破坏，靠 P 区一侧失去空穴剩下负离子，靠 N 区一侧失去电子剩下正离子，这样便形成一个空间电荷区。该区域由于多数载流子已扩散到对方并被复合掉了，缺少可以自由运动的载流子，所以又称为耗尽层，其电阻率很高。空间电荷区出现后，其内部就形成一个方向由 N 区指向 P 区的内电场，此内电场形成的电位壁垒  $U_D$ ，将阻碍两侧的多子扩散。从这个意义上看，空间电荷区又称为阻挡层。

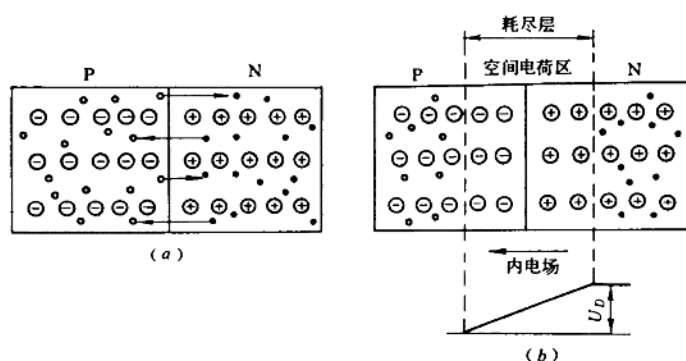


图 1-7 PN 结的形成

(a) 多子的扩散运动；(b) 形成的空间电荷区

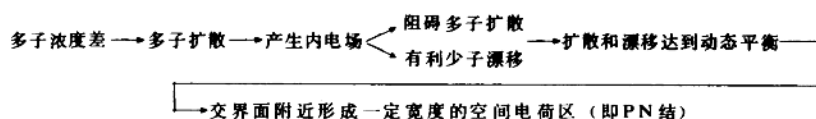
在空间电荷区内，除了多子的扩散运动之外，还存在着与扩散运动相反的少子漂移运动。少子在内电场力的作用下所作的定向运动称为少子漂移运动。内电场的方向有利于 P

区电子向N区漂移和N区空穴向P区漂移。少子漂移的结果，使空间电荷区的部分正、负离子被中和，空间电荷区变窄。

这样，随着多子扩散的进行，空间电荷区逐渐加宽，内电场不断增强，多子扩散由强变弱；而同时，随着内电场增强，少子漂移运动由弱变强，空间电荷区又变窄，内电场被削弱。当这两种相互联系而又相反的过程达到动态平衡时，多子扩散和少子漂移的数量相等，空间电荷区的宽度达到稳定，PN结便形成。

PN结一般很薄，宽度约为几 $\mu\text{m}$ 。电位壁垒 $U_D$ 的大小与半导体的材料、掺杂情况、工作温度等因素有关。通常情况下，硅材料 $U_D$ 约为0.6~0.8V，锗材料 $U_D$ 约为0.2~0.3V。

上述PN结的形成过程可简要表示如下：



## (二) PN结的单向导电性

### 1. PN结外加正向电压时导通

电源正极接P区，负极接N区，这种连接方法称为正向接法（或称PN结正向偏置，简称正偏），如图1-8(a)所示。此时，外加电压 $U_F$ 产生的外电场与PN结的内电场方向相反，削弱了内电场，于是在外电场力的作用下，P区中的空穴向右边移动，N区中的自由电子向左边移动，分别中和掉空间电荷区的一部分正、负离子，从而使空间电荷区变窄，结果是有利于多子扩散，不利于少子漂移，多子的扩散电流大大超过少子的漂移电流，在回路中形成一个较大的正向电流 $I_F$ ，方向由P区流向N区。由于空间电荷区两侧的电位差只有零点几伏，故外加正向电压也只需零点几伏就可大大削弱内电场的阻挡作用，产生较大的正向电流 $I_F$ ，从而使PN结处于导通状态。

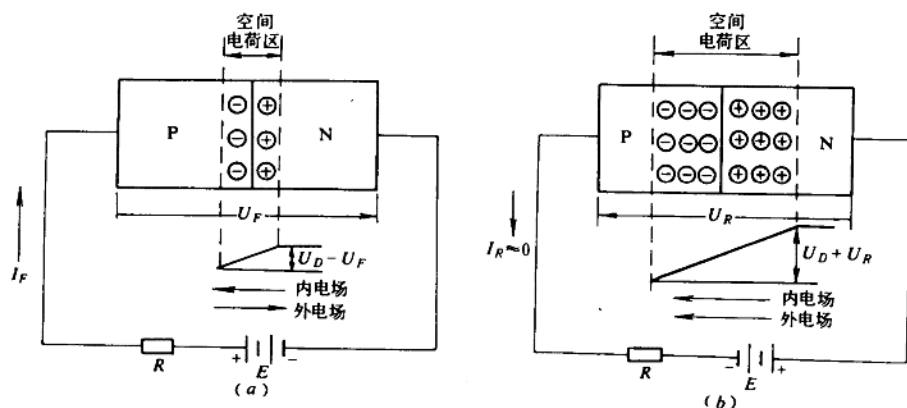


图 1-8 PN结的单向导电性

(a)正向偏置PN结导通；(b)反向偏置PN结截止

## 2. PN 结外加反向电压时截止

电源正极接 N 区，负极接 P 区，这种连接方法称为反向接法（或称 PN 结反向偏置，简称反偏），如图 1-8(b) 所示。此时，外加电压  $U_R$  产生的外电场方向与 PN 结内电场方向一致，增强了内电场的阻挡作用，外电场使 P 区和 N 区的多子背离空间电荷区移动，从而使空间电荷区增宽，多子的扩散大大减弱以至不能进行，而少子的漂移增强，在回路中便形成一个反向电流  $I_R$ ，方向由 N 区流向 P 区。由于少子是依靠热激发形成，常温下数量很少，因而反向电流是十分微小的。由此可见，PN 结反偏时，呈现出很大的反向电阻而处于截止状态。

综上所述，PN 结正偏时导通，反偏时截止，这就是 PN 结的单向导电特性，它是 PN 结最主要的特性。

### （三）PN 结的电容效应

PN 结除了具有单向导电性以外，当加于其上的电压发生变化时，PN 结的空间电荷也要发生变化，这如同电容器充放电一样，因此，PN 结具有电容效应，可以看成是一个等效电容，称为 PN 结电容。PN 结电容与 PN 结电阻并联，其大小与 PN 结面积成正比，与 PN 结宽度成反比，数值一般为几 PF 至几十 PF。

PN 结电容的存在使 PN 结的高频特性变坏，甚至当加于其上的电压频率达到一定值时，会因结电容的旁路而使 PN 结双向导通，从而使 PN 结丧失单向导电特性。但是，可以利用它制成变容二极管和集成电路中的电容等。

由于 PN 结具有单向导电等特性，这使它成为构成半导体二极管、三极管和其它多种半导体器件的基础。

## 第二节 半 导 体 二 极 管

### 一、二极管的结构和类型

半导体二极管（简称二极管）是由一个 PN 结加上电极引线 and 外壳封装而成。P 端的引出线叫正极，N 端的引出线叫负极，图 1-9 是几种常见二极管的结构示意图、外形和在电路中的代表符号。

二极管的类型较多，按制作二极管的半导体材料分为锗二极管和硅二极管；按管芯结构特点分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管的管芯结构如图 1-9(a) 所示，是用一根细金属触丝和一块 N 型锗晶片接触，采用瞬时通以强脉冲电流的“电形成”工艺，使部分金属原子转移到晶片中去，从而在接触处出现一个点状 P 区，并形成一个 PN 结。点接触型二极管的特点是 PN 结面积小，结电容很小，可以在高频电路中工作，最高使用频率可达几百 MHz，但由于结面小，不易散热，允许通过的电流小，能承受的反向电压也低，允许耗散功率小。这类二极管适用于高频检波和作脉冲数字电路中的开关元件，也可用于小功率整流。我国目前生产的普通型锗二极管 2AP 系列和开关型 2AK 系列均属于点接触型。

面接触型（又称面结型）二极管的管芯结构如图 1-9(b) 所示，其 PN 结是用合金烧

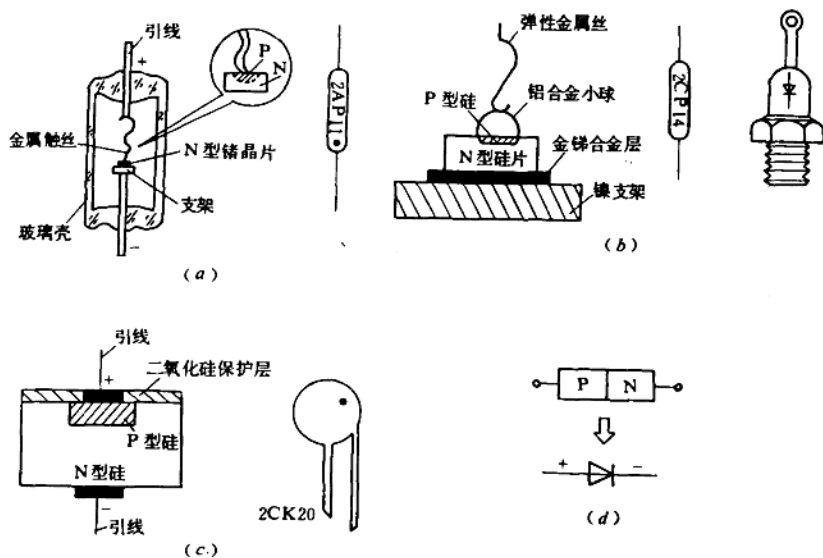


图 1-9 二极管的主要结构类型、外形及符号  
(a)点接触型；(b)面接触型；(c)平面型；(d)代表符号

结法或扩散法工艺制成,它的特点是PN结的面积较点接触型大,允许通过的正向电流较大,但结电容较大,工作频率较低,常用于整流电路中。我国目前生产的面结型二极管多为硅管,如2CP系列和2CZ系列,2CP系列的功率较小,2CZ系列的功率较大。

此外,还生产一种硅平面型开关二极管,如2CK系列,见图1-9(c),它常在脉冲数字电路中作为开关使用。

二极管的代表符号如图1-9(d)所示,图中箭头方向表示单向导电的方向,该方向的电流称为正向电流。

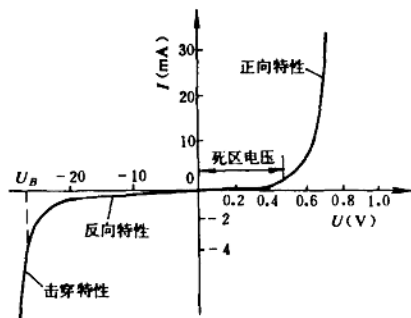


图 1-10 硅二极管的伏安特性曲线

整个特性曲线分为三部分:加正向电压时( $U > 0$ )的特性称为正向特性;加反向电压时( $U_B < U < 0$ )的特性称为反向特性;当反向电压加至击穿电压 $U_B$ 时的特性称为击穿特性。现对这三部分特性作如下简要说明。

### 1. 正向特性

在二极管两端加正向电压时,将产生正向电流。但当正向电压较小时,由于外电场还

## 二、二极管的伏安特性

加于二极管两端的电压 $U$ 和通过它的电流 $I$ 之间的关系,称为二极管的伏安特性。

### (一) 二极管的伏安特性曲线

二极管的伏安特性曲线,可用实验电路通过测试描绘出来,也可用晶体管特性图示仪(如JT-1型)显示。图1-10是一个硅二极管的伏安特性曲线。

整个特性曲线分为三部分:加正向电压时