

高等学校教材

电子技术

(电工学 II)

焦阳 主编

董子舟 段辉娟 副主编



机械工业出版社
China Machine Press

高等学校教材

电子技术

(电工学Ⅱ)

主 编 焦 阳
副主编 董子舟 段辉娟
参 编 马献果 孙玉杰
主 审 王德奎



机械工业出版社

本书符合原国家教育委员会 1995 年颁发的高等工业学校“电子技术(电工学Ⅱ)”课程教学基本要求,是为适应 21 世纪教学和科技发展新形势的需要而编写的,分量适当,内容更新,注重应用。本书可与陈众起主编的《电工技术(电工学Ⅰ)》配套使用,作为高等学校非电类专业教材,也可供其他工科专业、工程技术人员参考。

主要内容有:半导体器件、放大电路基础、集成运算放大器、正弦波振荡电路、功率电子电路、数字电路、数-模转换与模-数转换、半导体存储器及可编程控制器。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术:电工学Ⅱ/焦阳主编. —北京:
机械工业出版社, 2000. 8

高等学校教材

ISBN 7-111-07918-3

3P26/04

I. 电… II. 焦… III. ①电子技术-高等学校-教材
②电工学-高等学校-教材 IV. TN TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 60122 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:韩雪清、冯铤 版式设计:冉晓华 责任校对:唐海燕

封面设计:方芬 责任印制:何全君

煤炭工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32·10,625 印张·282 千字

0 001—8 000 册

定价:14.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

本书是在近几年开展面向 21 世纪课程教学内容和课程教学体系改革的研究、进行教学改革的基础上,根据教学中所遇到的具体问题,为适应高等学校非电类专业电工学的教学需要而编写的一本新教材。

本教材根据原国家教育委员会 1995 年颁发的高等工业学校“电子技术(电工学Ⅱ)”课程教学基本要求,同时考虑到不断涌现出来的新器件、新技术和新成果,编写时既保证了基本理论、基本知识和基本技能方面的内容,同时也进行了适当的拓宽,在数字电子技术、电力电子技术等方面增加了一些新的内容。本书主要有以下特点:

首先,对电子技术的基本理论、基本知识和基本技能方面的内容进行了精选,安排合理紧凑,深入浅出,便于自学,可使学生在较短时间里系统地掌握全部内容。

第二,教材内容充分反映了现代电子技术的新器件、新技术和新成果。例如,在电力电子技术一章中,介绍了几种全控型功率半导体器件,像门极可关断晶闸管、功率场效应管等;又如,在数字电路部分,由小规模集成电路入门,以中规模集成电路为重点;在第八章中,系统地介绍了可编程控制器的有关内容。

第三,教材内容突出电工电子技术的应用。主要表现在两个方面:一是从应用的角度出发,重点介绍集成电路,主要研究它们的外部性能,培养学生对集成电路的使用技能;二是在多数章的最后举出了本章内容的实际应用电路。

本教材力求概念准确、叙述清楚、篇幅适当;书中的图形符号和文字符号全部采用新的国家标准,并有较丰富的例题和习题,以便于教与学。

《电子技术(电工学Ⅱ)》可与陈众起主编的《电工技术(电工学Ⅰ)》配套使用,其使用对象以非电类专业本科大学生为主,亦可供工程技术人员学习使用。

本教材第一、三章由段辉娟执笔,第二章的第一、二、三节及第四章由马献果执笔,第二章的四、五、六、七节由孙玉杰执笔,第五、八章由董子舟执笔,第六、七章及附录由焦阳执笔。全书由焦阳任主编并统稿。

本教材由河北科技大学朱金钩、王德奎,河北工业大学徐桂芝,河北师范大学王树建审阅,王德奎任主审。他们以严谨的科学态度和高度负责的精神,认真审阅书稿,提出了许多宝贵的修改意见,在此,对他们的辛勤劳动和贡献,表示衷心的感谢。

限于编者的水平,加上时间短促,教材中必存在不少缺点和疏漏,恳请使用本教材的教师、学生以及广大读者批评指正。

编者

目 录

前言

第一章 半导体器件

第一节 半导体的基础知识	1
第二节 半导体二极管	6
第三节 半导体三极管	13
第四节 绝缘栅场效应管	22
小结	30
习题	31

第二章 放大电路基础

第一节 共射极放大电路	35
第二节 射极输出器	55
第三节 多级放大电路	58
第四节 放大电路中的负反馈	63
第五节 差动放大电路	71
第六节 功率放大电路	80
第七节 场效应管放大电路	87
小结	90
习题	91

第三章 集成运算放大器

第一节 集成运算放大器简介	98
第二节 集成运算放大器的线性应用	103
第三节 集成运算放大器的非线性应用	117
小结	124
习题	125

第四章 正弦波振荡电路

第一节	自激振荡	132
第二节	RC 振荡电路	135
第三节	LC 振荡电路	136
第四节	晶体振荡电路	140
第五节	正弦波振荡电路应用举例——半导体接近开关	143
小结		145
习题		145

第五章 功率电子电路

第一节	直流稳压电源	148
第二节	功率半导体器件和变流技术	166
第三节	功率电子电路应用举例	192
小结		194
习题		195

第六章 数字电路

第一节	数字信号与数字电路	198
第二节	分立元件门电路	200
第三节	集成门电路	207
第四节	逻辑代数的运算规则	219
第五节	逻辑函数及其化简	221
第六节	组合逻辑电路	227
第七节	触发器	240
第八节	时序逻辑电路	250
第九节	555 定时器及其应用	263
第十节	数字电路应用举例	268
小结		271
习题		272

第七章 数-模转换与模-数转换

第一节	概述	279
第二节	数-模转换器	280
第三节	模-数转换器	283

第四节 模-数转换器和数-模转换器应用举例——数据采集系统	289
小结	290
习题	291

第八章 半导体存储器及可编程控制器

第一节 半导体存储器	292
第二节 可编程控制器	298
第三节 PC 应用举例	309
小结	312
习题	313
(部分习题参考答案)	315

附录

附录 A 常用半导体器件、集成电路和数字电路一些元件的新旧图形符号对照表	319
附录 B 半导体分立器件型号命名法	322
附录 C 部分半导体器件型号和参数	323
附录 D 半导体集成电路型号命名法	327
附录 E 部分半导体集成电路型号和参数	328
参考文献	331

第一章 半导体器件

半导体器件是电子电路中的核心元件。PN 结是构成各种半导体器件的共同基础。本章首先介绍半导体的导电特性和 PN 结的基本特点，然后介绍半导体二极管、半导体三极管和绝缘栅场效应管的基本结构、工作原理、特性曲线和主要参数，为以后的学习打下基础。

第一节 半导体的基础知识

一、半导体的导电特性

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。硅、锗、硒以及大多数的金属氧化物和硫化物都是半导体。目前制作半导体器件的主要材料是硅 (Si) 和锗 (Ge)。

半导体的导电能力在不同条件下有着显著的差异。例如有些半导体受热或受光照时，它的导电能力会明显地增强。利用半导体的热敏性、光敏性，可制成各种热敏元件和光敏元件。又如在纯净的半导体中掺入微量的杂质元素后，其导电能力可提高几十万乃至几百万倍。利用半导体的掺杂性制造了各种不同用途的半导体器件，如半导体二极管、三极管、场效应管及晶闸管等。

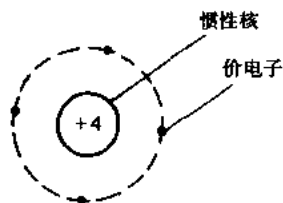
半导体特殊的导电性质是由其本身的结构决定的。下面简单介绍一下半导体的内部结构和导电机理。

1. 本征半导体

完全纯净的、具有晶体结构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。

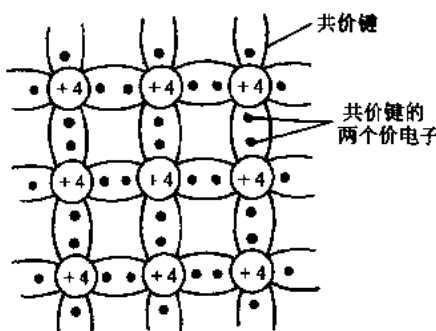
硅和锗都是四价元素，在原子结构中最外层轨道上有四个价电子。物质的导电性能主要与价电子有关，因此常把它们的原子结构模型简化为图 1-1 所示。

在硅或锗晶体结构中，原子的排列非常有规律，每个原子最外层的四个价电子分别和相邻的四个原子的价电子形成共价键，如图 1-2 所示。

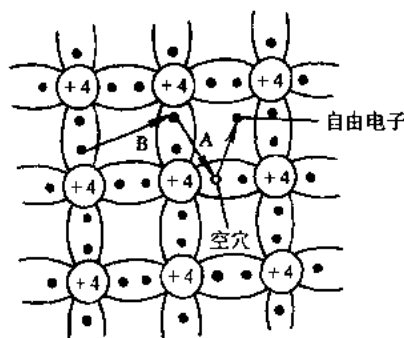


共价键结构中，价电子不像绝缘体中的电子那样被紧紧束缚着，在室温下，少数价电子受热激发获得足够的能量，可以挣脱共价键的束缚成为自由电子。

同时，在原来共价键处留下一个空位，称为空穴，如图 1-3 所示。由于自由电子带负电荷，所以失去电子的原子成为正离子，就好像空穴带正电荷一样。空穴一出现，邻近共价键中的价电子会很容易地来填补空穴，而在该电子所在位置产生一个新空穴，就如同空穴在移动。



可见，本征半导体中不仅有带负电荷的自由电子，而且有带正电荷的空穴，它们在外电场作用下都能定向运动参与导电，所以我们将这两种带电荷粒子称为载流子。



在本征半导体中，自由电子和空穴是成对产生的，称为电子-空穴对。同时它们又可能随时相遇复合而成对消失。当温度一定时，这种产生与复合

的过程呈现动态平衡，电子-空穴对浓度维持一定。当温度升高时，电子-空穴对浓度增大，因此本征半导体的导电性能随温度上升而明显增强。

2. 杂质半导体

本征半导体在常温下的载流子浓度很低，故其导电性能很差。如果在其中掺入微量的杂质，成为杂质半导体，其导电性能会大大增强。

(1) N型半导体 在硅（或锗）晶体中掺入微量的五价元素磷（或锑）等，由于磷原子外层有五个价电子，其中四个价电子分别与相邻的四个硅（或锗）原子组成共价键，多余的一个价电子便很容易地挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子，如图 1-4a 所示，磷原子则因失去电子而成为正离子。

可见，掺入这种杂质后，自由电子数量大幅增加，远大于晶体本身由于热激发而产生的空穴数。自由电子称为多数载流子，简称多子；空穴称为少数载流子，简称少子。这种杂质半导体称为电子型半导体或 N 型半导体。

(2) P型半导体 在硅（或锗）晶体中掺入微量三价元素硼（或镓）等，由于硼原子外层只有三个价电子，它与相邻的四个硅（或锗）原子组成共价键时，因缺少一个价电子而形成空位。在常温下，附近共价键中的价电子会很容易地填补这个空位，而在原来价电子处形成一个空穴，如图 1-4b 所示，硼原子则因得到一个电子而成为负离子。

可见，掺入这种杂质后，空穴数量大幅增加，远大于由于热激发而产生的自由电子数。所以，空穴为多数载流子，自由电子为少数载流子。这种杂质半导体称空穴型半导体或 P 型半导体。

二、PN 结

在一块晶片上，采用不同掺杂工艺，于两边分别形成 P 型和 N 型半导体，二者交界处就形成 PN 结。PN 结是构成半导体二极管、三极管的核心部分。因此，研究 PN 结的特性是了解半导体器件工作原理的基础。

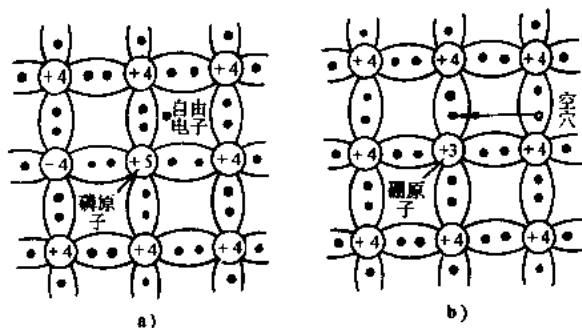


图 1-4 杂质半导体

a) N型半导体 b) P型半导体

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时，交界面两侧的电子和空穴浓度相差甚远，因此，载流子将从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。即 P 区的多子空穴向 N 区扩散，N 区的多子电子向 P 区扩散，如图 1-5a 所示。扩散的结果，在交界面 P 区一侧留下负离子，在 N 区一侧留下正离子，于是在交界面两侧形成一层很薄的空间电荷区，如图 1-5b 所示。在此区内，多子已扩散到对方并被复合掉了，或者说消耗尽了，故又称它为耗尽层。这个区域就是 PN 结。

空间电荷区的存在，使交界面两侧产生一电场，称为内电场，其方向由 N 区指向 P 区，如图 1-5b 所示。内电场阻止多子的扩散，所以空间电荷区又可称为阻挡层。同时，内电场又促使 P 区的少数电子和 N 区的少数空穴作定向运动。这种少数载流子在内电场作用下的定向运动称为漂移运动。显然，多子的扩散和少子的漂移是两类方向相反的运动。

PN 结形成过程中，同时存在着扩散和漂移运动。当两种运动达到动态平衡时，就形成具有一定宽度的 PN 结。

2. PN 结的单向导电性

(1) 外加正向电压 PN 结外加正向电压的电路如图 1-6a 所

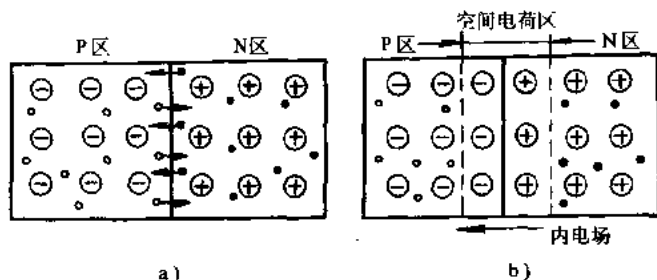


图 1-5 PN 结的形成

a) 多子扩散 b) 空间电荷区的形成

示，P 区接电源正极，N 区接电源负极。这种联接又称为正向偏置。此时电源 E 在 PN 结中产生的外电场与其内电场方向相反，扩散和漂移运动的平衡被打破。外电场驱使 P 区的空穴进入空间电荷区与一部分负离子中和，同时 N 区的自由电子进入空间电荷区与一部分正离子中和，结果使空间电荷区变窄，内电场被削弱，多子的扩散运动增强，形成较大的正向电流。

在一定范围内，正向电流随外电场增强而增大，这时 PN 结呈现低电阻值，PN 结处于导通状态。

(2) 外加反向电压 PN 结加上反向电压时的电路如图 1-6b 所示，N 区接电源正极，P 区接电源负极。这种联接又称为反向偏置。此时外电场与内电场方向相同，扩散和漂移的平衡被破坏。外电场驱使 P 区的空穴和 N 区的自由电子都背离空间电荷区，结果使空间电荷区变宽，内电场增强，使多子扩散难以进行。同时少子的漂移运动被加强。但由于少子数量很少，所以只能形成很小的反向电流。这时 PN 结呈现的反向电阻很高，PN 结处于截止状态。

综上所述，外加正向电压时，PN 结电阻很低，正向电流较大，处于导通状态；外加反向电压时，PN 结电阻很高，反向电流很小，处于截止状态。这就是 PN 结的单向导电性。

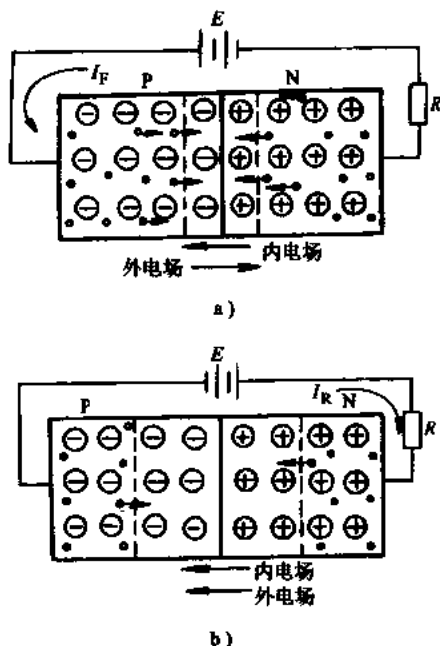


图 1-6 PN 结的单向导电性

a) 正向偏置 b) 反向偏置

第二节 半导体二极管

一、基本结构

半导体二极管又称晶体二极管，是由一个 PN 结加上相应的电极引线及管壳封装而成。由 P 区引出的电极称为阳极，由 N 区引出的电极称为阴极。图形符号如图 1-7c 所示，箭头方向表示二极管正向导通时电流的方向。

根据内部结构不同，二极管可分为点接触型和面接触型，如图 1-7 所示。点接触型二极管的 PN 结结面积很小，结电容也小，因此允许通过的正向电流小。但高频性能好，一般适用于高频和小功率的工作场合，也用作脉冲数字电路的开关元件。面接触型二极管的 PN 结结面积较大，结电容也大，可通过较大的电流。

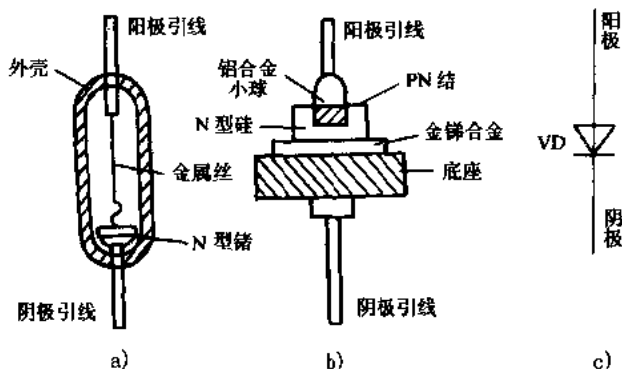


图 1-7 二极管的结构和图形符号

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 图形符号

但只能工作在低频范围，一般用在大功率整流电路上。

根据制作材料的不同，二极管可分为硅管和锗管。

二、伏安特性

二极管最重要的性能是单向导电性，这可由其伏安特性来描述。图 1-8 所示为典型的二极管伏安特性曲线。

由图可见，当正向电压较小时，正向电流几乎为零。这是由于外电场还不能克服 PN 结内电场对多子扩散运动的阻力，二极管呈现高电阻值所致。这一段称为死区。当正向电压超过某一值（称死区电压）后，内电场被大大削弱，电流增长很快，此时二极管呈现低电阻值，处于正向导通状态。硅管的死区电压约为 0.5V，锗管的死区电压约为 0.1V。二极管正向导通后的管压降变化较小，硅管约为 0.6~0.8V，锗管约为 0.2~0.3V。

当二极管加上反向电压时，由少子漂移运动形成很小的反向电流。反向电流有两个特点：第一是它随温度升高增长很快；第二是当反向电压在一定范围内增大时，反向电流的大小基本不变，所以通常称它为反向饱和电流。

当反向电压继续增加而达到一定数值时，反向电流突然增大，二极管失去单向导电性。这种现象称为反向击穿，此时的电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。击穿的原因，一是在强电场作用下价

电子可以挣脱共价键的束缚,产生大量的电子-空穴对(齐纳击穿);或是由于载流子在强电场中获得足够大的动能,将原子中的价电子碰撞出来,形成大量的电子-空穴对(雪崩击穿),从而形成较大的反向电流。反向击穿可能导致PN结损坏,因此二极管所加反向电压值应小于其反向击穿电压。

三、主要参数

半导体器件的参数反映了其本身的性能和适用范围,是正确选用半导体器件的依据。二极管的主要参数有以下几种。

1. 最大整流电流 I_{FM}

最大整流电流是指二极管长时间使用时允许通过的最大正向平均电流值。它是由半导体材料和PN结面积决定的。使用时正向电流平均值应小于 I_{FM} , 否则管子容易过热而损坏。

2. 最大反向工作电压 U_{RM}

它是为保证二极管不被反向击穿而规定的反向峰值电压,一般为反向击穿电压 U_{BR} 的一半或三分之二。为了防止管子被击穿,要求反向电压小于 U_{RM} 。

3. 反向峰值电流 I_{RM}

它是指二极管加上最大反向工作电压时的反向电流值。反向电流大,说明管子的单向导电性差,且受温度的影响大。硅管的反向电流较小,一般在几微安以下;锗管的反向电流较大,为硅管的几十到几百倍。

此外,半导体二极管还有最高工作频率、极间(结)电容等参数。常用二极管的型号和参数,可参看本书附录B和C。

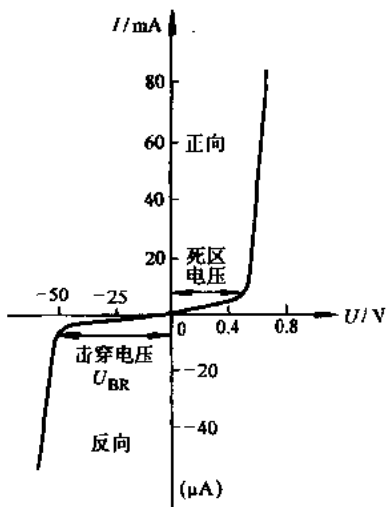


图 1-8 二极管的
伏安特性曲线

二极管的应用很广，主要是利用其单向导电性。它可用于整流、检波、元件保护以及在脉冲数字电路中作开关元件。

例 1-1 图 1-9a 所示为单相半波整流电路。设二极管为理想元件。当 $u_i = U_m \sin \omega t$ 时，试画出 u_o 的波形。

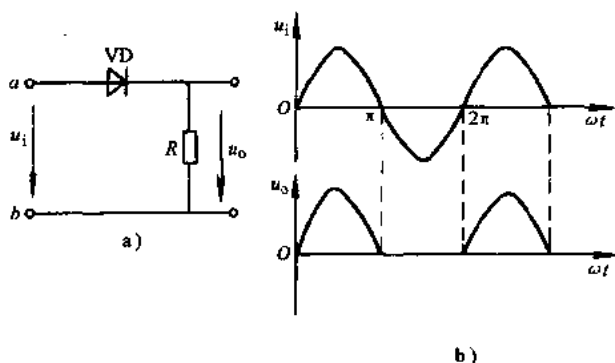


图 1-9 半波整流电路

解 当 $u_i > 0$ (正半周) 时，VD 导通， $u_o = u_i$ 。

当 $u_i < 0$ (负半周) 时，VD 截止， $u_o = 0$ 。

波形如图 1-9b 所示。

例 1-2 图 1-10 a 所示为二极管限幅电路。已知 $u_i = 10 \sin \omega t$ V， $E_1 = E_2 = 5$ V，二极管正向压降忽略不计，试画出输出电压 u_o 的波形。

解 当 $u_i > E_1$ 时，VD₁ 导通 (VD₂ 截止)， $u_o = E_1$ 。当 $u_i < -E_2$ 时，VD₂ 导通 (VD₁ 截止)， $u_o = -E_2$ 。当 $-E_2 < u_i < E_1$ 时，VD₁、VD₂ 均截止， $u_o = u_i$ 。波形如图 1-10b 所示。

四、几种常用的特殊二极管

除了前面介绍的普通二极管外，还有一些特殊二极管。下面简要介绍常用的稳压管、发光二极管、光电二极管。

1. 稳压管

稳压管是一种特殊的面接触型半导体硅二极管。它是利用二极管反向击穿特性实现稳压功能的半导体器件。由于它在电路中