

铁路职业教育铁道部规划教材

模拟电子技术

MONIDIANZIJISHU

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAOBU GUIHUA JIAOCAI

王彦 / 主编 戚磊 / 副主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



铁路职业教育铁道部规划教材

模拟电子技术

王彦 主编

戚磊 副主编

(130001; 网编书编 号 8 清西門安路(北京宣武区) 中国铁道出版社 100054)

文: 2008 年 2 月第 1 次印刷
本: 187mm × 109mm 1/16 印张: 8 字数: 230 千

中国铁道出版社

2008 年 · 北京

内 容 简 介

本书主要包括:基本知识、放大电路基本理论与分析方法、放大器功能应用电路分析等内容。其中,基本知识包括半导体的基础知识及常用5类半导体器件介绍(晶体二极管、晶体三极管、晶闸管、场效应管、集成运算放大器);放大电路基本理论与分析方法主要介绍放大器的基本组成、主要性能指标及两种分析方法;放大器功能应用电路主要分析:集成运算放大电路、正弦波振荡电路、低频功率放大电路、直流稳压电源等。

本书主要作为高等职业学院和中专学校铁路信号专业《模拟电子技术》课程的通用教材,也可以作为高职高专及中专电子信息、电气自动化、通信工程、机电一体化、汽车电子等的专业技术基础课教材,还可供从事电子技术的工程技术人员自学与参考使用。(带*号的内容为中专学生的选学内容,在书中用楷体编排)

主 编 王 彦
副 主 编 戚 磊

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/王彦主编. —北京:中国铁道出版社,
2008. 2

铁路职业教育铁道部规划教材

ISBN 978-7-113-08565-0

I. 模… II. 王… III. 模拟电路—电子技术—职业教育—
教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 005944 号

书 名:模拟电子技术

作 者:王 彦 主编 戚 磊 副主编

责任编辑:武亚雯 刘红梅 电话:010-51873132

电子信箱:wyw716@163.com

封面设计:陈东山

责任校对:孙 玫

责任印制:金洪泽

出版发行:中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街8号 邮政编码:100054)

印 刷:河北新华印刷二厂

版 次:2008年2月第1版 2008年2月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:9 字数:220千

书 号:ISBN 978-7-113-08565-0/TM·74

定 价:19.50元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电话:市电(010)63549495 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

前 言

本书为铁路职业教育铁道部规划教材,是根据铁路职业教育“铁道信号”专业教学计划“模拟电子技术”课程教学大纲编写的。

本书在编写过程中始终注意体现职业教育的特点,以现代电子技术的基本知识与基本理论为主线,充分体现模拟电子技术的应用性,克服了以往学生学完本课程后不知其用处的缺陷,理论分析主要体现应用之目的,删繁就简,遵循“够用”、“实用”的基本原则,增强教学的实践性。在教材内容的安排上,以岗位需求和培养学生独立分析解决问题的能力为目的。每章都有小结,并配有练习题,方便学生练习,并培养学生独立自学、开拓视野的能力。

《模拟电子技术》是铁路信号专业的一门技术基础课。主要包括:基本知识、放大电路基本理论与分析方法、放大器功能应用电路分析三方面内容。其中,基本知识包括半导体的基础知识及常用5类半导体器件介绍(晶体二极管、晶体三极管、晶闸管、场效应管、集成运算放大器);放大电路基本理论与分析方法主要介绍放大器的基本组成、主要性能指标及两种分析方法;放大器功能应用电路主要分析包括:集成运算放大电路、正弦波振荡电路、低频功率放大电路、直流稳压电源等。通过本课程的学习,学生能掌握模拟电子技术的基本理论、基本分析方法、基本测量技能,提高学生分析问题、解决问题的能力,拓宽知识面,为今后的学习、创新和科学研究工作打下扎实的理论基础和实践基础。

本书主要作为高等职业学院和中专学校铁路信号专业《模拟电子技术》课程的通用教材,也可以作为高职高专和中专学校电子信息、电气自动化、通信工程、机电一体化、汽车电子等的专业技术基础课选用教材,还可供从事电子技术的工程技术人员自学与参考使用。作为高职和中职的通用教材,高职和中职课程内容的主要区别在于:带*号的内容为中职课程选修的内容,在书中用楷体编排。

本书由武汉铁路职业技术学院王彦副教授担任主编,南京铁道职业技术学院的戚磊担任副主编。第1章、第5章分别由华东交通大学职业技术学院的许期英和刘敏军两位老师编写,第2章、第4章分别由南京铁道职业技术学院的戚磊和何莉两位老师编写,王彦负责编写第3章及本书的统稿工作。

因编者水平所限,书中难免有不妥和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2007年11月

目 录

第1章 晶体管	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.2 晶体二极管	6
1.3 硅稳压二极管	9
1.4 晶体三极管	10
* 1.5 晶闸管	17
1.6 场效应管	21
本章小结	29
复习思考题	30
第2章 放大器	32
2.1 放大器的基本概念	32
2.2 放大器的基本分析方法	35
2.3 负反馈放大器	41
* 2.4 多级放大电路	47
* 2.5 集成运算放大器	49
本章小结	57
复习思考题	59
第3章 低频功率放大电路	66
3.1 低频功率放大电路概述	66
3.2 乙类推挽功率放大电路	68
* 3.3 集成功率放大电路	78
本章小结	82
复习思考题	82
第4章 正弦波振荡器	86
4.1 正弦波振荡器的基本概念	86
4.2 LC振荡器	88
4.3 RC正弦振荡器	90
4.4 石英晶体振荡器	92
本章小结	94
复习思考题	95
第5章 直流稳压电源	98
5.1 概述	98

5.2 单相整流电路	99
5.3 滤波电路	105
5.4 硅稳压管并联型稳压电路	109
5.5 晶体管串联型稳压电路	113
5.6 集成稳压器	115
* 5.7 开关型稳压电源	121
本章小结	126
复习思考题	127
附录一 常用半导体器件的命名方法及主要参数	130
附录二 部分硅整流稳压二极管的主要参数	132
附录三 常用符号说明	133
参考文献	137

第 1 章

晶 体 管

【学习目标】

- (1) 了解半导体的特点、PN 结的导电特性。
- (2) 了解二极管、三极管、场效应管的工作特性。
- (3) 了解二极管、三极管、场效应管的一般分类。
- (4) 掌握二极管、三极管的简单测试方法。
- (5) 了解晶闸管的工作原理及特性。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 半导体的导电特性

自然界中的各种物质按其导电性能的不同可划分为：导体、半导体和绝缘体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，它具有独特的掺杂性、热敏性和光敏性。自然界中半导体材料有：(1) 元素半导体，如硅(Si)、锗(Ge)等；(2) 化合物半导体，如砷化镓(GaAs)等；(3) 掺杂材料，如硼(B)、磷(P)等。其中，硅和锗是目前用得最多的半导体材料，由于硅和锗都是以晶体结构存在于自然界中，因此半导体二极管、三极管常称作晶体二极管和晶体三极管。

1. 本征半导体

完全纯净的、结构完整的半导体晶体就是本征半导体。其纯度要达到 99.99%，它在物理结构上呈单晶体形态。

(1) 本征半导体的共价键结构

由化学元素周期表可知，硅和锗都是四价元素，即它们的原子最外层轨道上都有四个电子（称之为价电子），它们的空间排列模型如图 1-1(a)所示，其核外电子的共价键结构平面示意图如图 1-1(b)所示。

(2) 本征半导体的导电特性

在 $T=0\text{K}$ 和没有外界激发时，本征半导体中的每一个原子的外围电子被共价键所束缚，不能自由移动。这样，本征半导体中虽然有大量的价电子，但没有能够自由移动的电子，此时半导体是不能导电的。当温度升高或受光照射时，共价键中的价电子会获得足够能量，从共价键中挣脱出来，变成自由电子；同时，在原共价键的相应位置上流下一个空位，这个空位称为空穴，如图 1-2 所示。显然，电子和空穴是成对出现的，所以称之为电子——空穴对，在本征半导体中电子和空穴的数目总是相等的。我们把在热或光的作用下，本征半导体中的价电子挣脱共价键的束缚产生电子——空穴对的现象，称为本征激发。

由图 1-2 可见，一个完整的共价键的价电子数等于原子核的正电荷数，所以原子中正负电荷数目相等，半导体呈电中性。电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，原子核因失去电子而

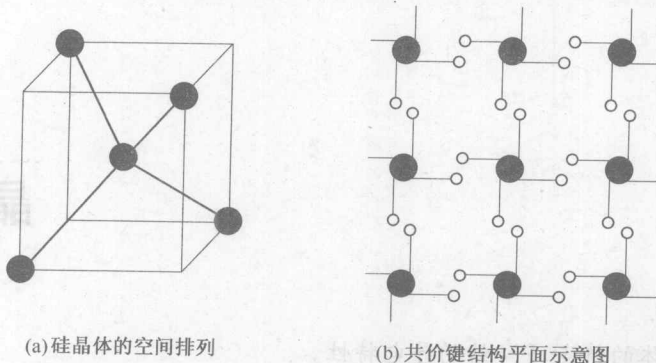


图 1-1 硅原子空间排列及共价键结构平面示意图

带等量的异性电荷,因自由电子带负电荷,所以空穴带等量的正电荷。

由于共价键中出现了空穴,在外电场或其他能源(如:光能、热能)的作用下,邻近的价电子就可填补到这个空穴上来,而这个价电子的原来位置上又留下新的空穴,以后其他价电子又可以转移到这个新的空穴上。这样,电子和空穴的就产生了相对移动,它们的运动方向相反,而形成的电流方向是一致的。因此说明,半导体具有热敏性和光敏性。

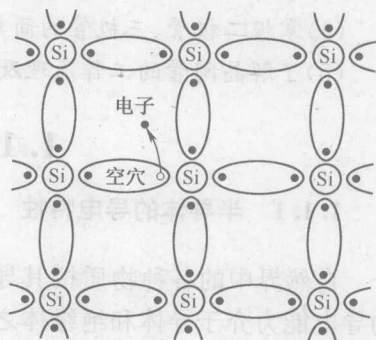


图 1-2 共价键结构与空穴产生示意图

由上分析可见,本征半导体中存在两种载流子:电子和空穴。而导体中只有一种载流子——电子,这是半导体与导体的一个本质区别。

2. 杂质半导体

本征半导体的导电能力差,但是在本征半导体中掺入某种微量元素(杂质)后,它的导电能力可增加几十万甚至几百万倍。掺入的微量元素主要是三价或五价元素。因掺入的杂质性质不同,杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

(1) N 型半导体

在本征半导体(硅)中掺入微量五价元素(如磷)后,有五个价电子的磷原子取代硅原子,而与相邻的四个硅原子组成四个共价键时,因多出一个价电子,这个电子便成为自由电子。这使得 N 型半导体中的载流子——电子和空穴的数目不再相等,自由电子的数目远大于空穴的数目,这就是 N 型半导体。

在 N 型半导体中,电子为多数载流子,其浓度取决于掺杂浓度;空穴为少数载流子,因激发产生,其浓度与温度有关。因此, N 型半导体又称为电子型半导体。N 型半导体的结构如图 1-3(a)所示。

(2) P 型半导体

如果在四价的本征半导体(硅)中掺入微量三价元素(硼),就形成了 P 型半导体。因三价杂质原子与硅原子形成共价键时,缺少一个价电子而在共价键中留下一个空穴。这使得 P 型半导体中空穴是多数载流子,其浓度取决于掺杂浓度;电子是少数载流子,因激发产生,其浓度与温度有关。因此, P 型半导体又称为空穴型半导体。P 型半导体的结构如图 1-3(b)所示。

N 型半导体和 P 型半导体的简化示意图如图 1-4(a)、(b)所示。

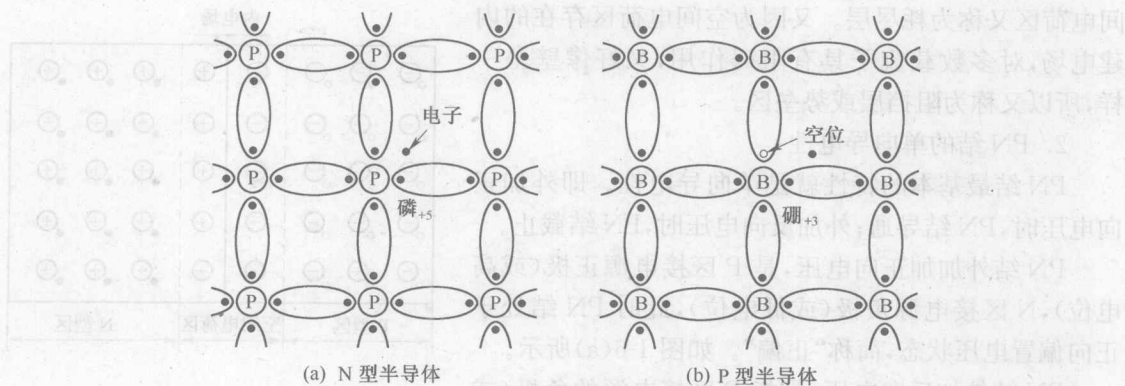


图 1-3 杂质半导体中的杂质电离

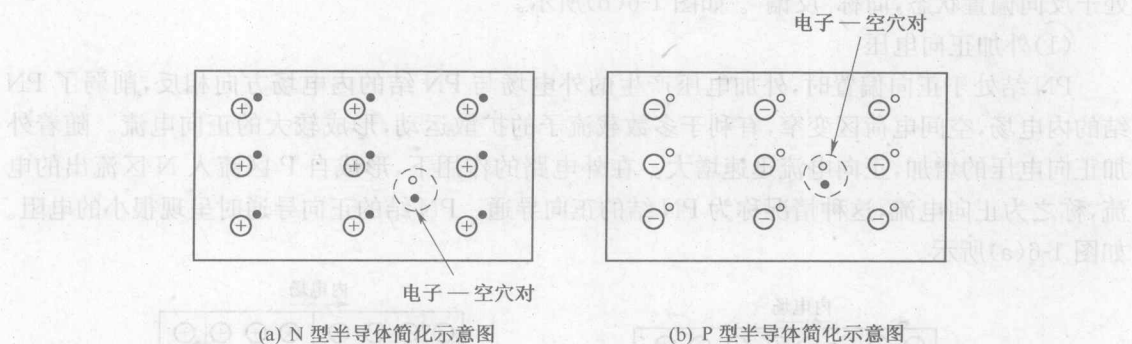


图 1-4 杂质半导体的简化示意图

1.1.2 PN 结

1. PN 结的形成

在一块本征半导体两侧通过扩散不同的杂质,分别形成 N 型半导体和 P 型半导体,同时,在 N 型半导体和 P 型半导体的结合面上就会形成一个具有单向导电性的薄层,称为 PN 结。PN 结的形成参见图 1-5 所示。

因为 P 区的多数载流子是空穴,少数载流子是电子;而 N 区的多数载流子是电子,少数载流子是空穴。因此,P 区一侧的空穴浓度远大于 N 区的空穴浓度,而 N 区一侧的电子浓度远大于 P 区的电子浓度。由于浓度差的存在,P 区的空穴向 N 区扩散,N 区的电子向 P 区扩散,我们把因浓度差而产生的多数载流子的移动,称之为扩散运动。因电子与空穴在扩散过程中会产生复合,因此,在交界面靠近 P 区一侧留下了负离子,靠近 N 区一侧留下了等量的正离子。P 区和 N 区交界面两侧形成的正、负离子薄层,称为空间电荷区。

由于空间电荷区的出现,建立了 PN 结的内电场。内电场的方向由 N 区指向 P 区,它阻碍了多数载流子的扩散运动,却对两边的少数载流子(即 P 区的电子、N 区的空穴)向对方的漂移起到了推动作用,我们把在电场的作用下而产生的少数载流子的移动,称之为漂移运动。因此,在 PN 结中,同时存在两种载流子的运动,即扩散运动与漂移运动。当扩散运动与漂移运动达到动态平衡时,空间电荷区的宽度保持不变,就形成了稳定的空间电荷区,即 PN 结。

在空间电荷区内,由于电子和空穴几乎全部复合完了,或者说载流子都消耗尽了,因此,空

间电荷区又称为耗尽层。又因为空间电荷区存在的内建电场,对多数载流子具有阻碍作用,又好像壁垒一样,所以又称为阻挡层或势垒区。

2. PN 结的单向导电性

PN 结最基本的特性就是单向导电性。即外加正向电压时,PN 结导通;外加反向电压时,PN 结截止。

PN 结外加正向电压,是 P 区接电源正极(或高电位),N 区接电源负极(或低电位),此时 PN 结处于正向偏置电压状态,简称“正偏”。如图 1-6(a)所示。

PN 结外加反向电压,是指 P 区接电源的负极(或低电位),N 区接电源的正极(或高电位),此时 PN 结处于反向偏置状态,简称“反偏”。如图 1-6(b)所示。

(1) 外加正向电压

PN 结处于正向偏置时,外加电压产生的外电场与 PN 结的内电场方向相反,削弱了 PN 结的内电场,空间电荷区变窄,有利于多数载流子的扩散运动,形成较大的正向电流。随着外加正向电压的增加,正向电流迅速增大。在外电路的作用下,形成自 P 区流入 N 区流出的电流,称之为正向电流,这种情况称为 PN 结的正向导通。PN 结的正向导通时呈现很小的电阻。如图 1-6(a)所示。

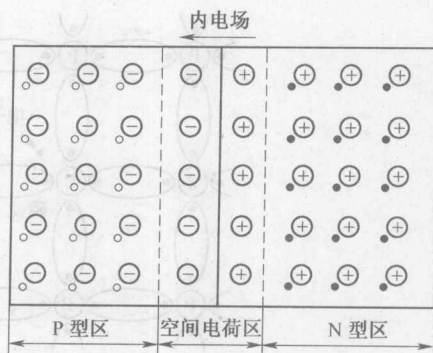


图 1-5 PN 结的形成

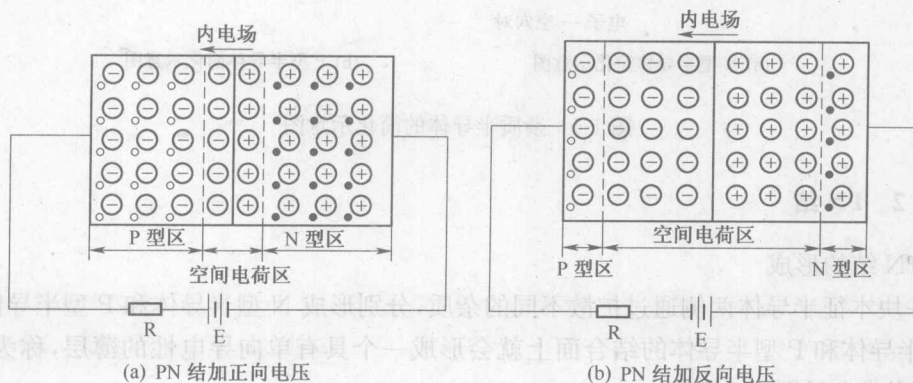


图 1-6 PN 结的单向导电性

(2) 外加反向电压

当 PN 结外加反向电压时,外加电场的方向与 PN 结内电场方向相同,内电场得到了增强,使得多子的扩散运动被减弱而少子的漂移运动被加强,在 PN 结内部造成空间电荷区变宽,PN 结呈现高阻性,少子的漂移运动形成了微弱的漂移电流。在外电路的作用下,形成自 N 区流入 P 区流出的电流,称之为反向电流。由于少子的浓度很小,当温度一定时,漂移电流的数值趋于恒定,这个电流也称为反向饱和电流,一般仅有微安数量级,几乎可以忽略,这就是 PN 结的反向截止状态。如图 1-6(b)所示。

反向饱和电流与所加反向电压的大小无关,基本上只与温度有关。

PN 结外加正向电压时,呈现低电阻,具有较大的正向扩散电流;PN 结加反向电压时,呈现高电阻,具有很小的反向漂移电流。由此可以得出结论:PN 结具有单向导电性。

3. PN 结的电容效应

PN 结中的电荷量随着外加电压的变化而变化,具有一定的电容效应,称为结电容。按结电容产生的机制和作用的差别可分为势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 。

(1) 势垒电容 C_B

PN 结交界处的空间电荷区是积累空间电荷的区域,极性不同的电荷分别处于界面两侧,就好像平行板电容器的两个极板一样。这两个区域能够存放电荷(载流子),即充电;也能够被取走电荷,即放电。于是,当外加电压使 PN 结上压降发生变化时,将引起 PN 结空间电荷的改变,这相当 PN 结中存储的电荷量也随之变化,表现为电容效应,同时引起空间电荷区(即势垒层)的变化,可以用势垒电容来描述这种效应。势垒电容的示意图见图 1-7 所示。

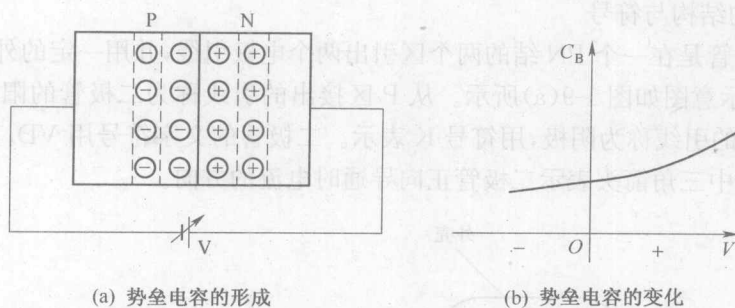


图 1-7 势垒电容示意图

势垒电容不是一个不变的数值,其大小随外加电压的变化而改变。势垒电容只有在外加电压变化时才起作用,外加电压频率越高,势垒电容作用越明显。势垒电容的大小与 PN 结截面积成正比,与空间电荷区的宽度成反比。

(2) 扩散电容 C_D

扩散电容是由多子扩散后,在 PN 结的另一侧面积累而形成的。因 PN 结正偏时,由 N 区扩散到 P 区的电子,与外电源提供的空穴相复合,形成正向电流。刚扩散过来的电子就堆积在 P 区内紧靠 PN 结的附近,形成一定的多子浓度梯度分布曲线。反之,由 P 区扩散到 N 区的空穴,在 N 区内也形成类似的浓度梯度分布曲线。可见,在这个扩散长度内存储了一定量的电荷,扩散电容的示意图如图 1-8 所示。

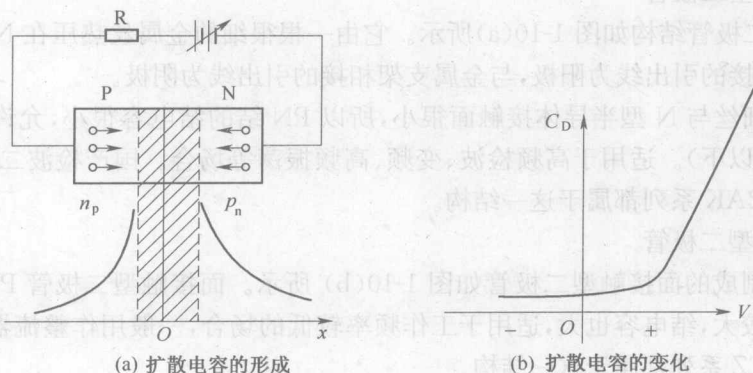


图 1-8 扩散电容示意图

当外加正向电压不同时,扩散电流即外电路电流的大小也就不同。所以,PN 结两侧所堆积多子的浓度梯度分布也不相同,空间电荷区内存储的电荷也不同,正向电流越大,存储的电

荷就越多,这就相当电容的充放电过程。扩散电容仅在正向偏置时起作用。

势垒电容和扩散电容均是非线性电容,正向电压较低时,势垒电容为主,正向电压较高时,扩散电容为主。结电容影响 PN 结的工作频率,特别是在高速开关状态下,会使 PN 结的单向导电性变差。

1.2 晶体二极管

1.2.1 二极管的结构与符号

1. 二极管的结构与符号

半导体二极管是在一个 PN 结的两个区引出两个电极引线,并用一定的外壳封装,就制成二极管,其结构示意图如图 1-9(a)所示。从 P 区接出的引线称为二极管的阳极,用符号 A 表示;从 N 区接出的引线称为阴极,用符号 K 表示。二极管的文字符号用 VD,其电路符号如图 1-9(b)所示。其中三角箭头表示二极管正向导通时电流的方向。

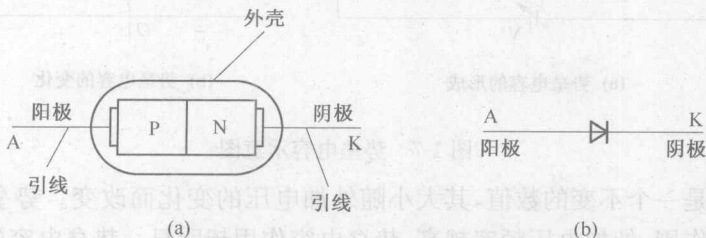


图 1-9 二极管的结构及符号

2. 二极管的分类

按所用材料不同可分为:硅管和锗管。

按制造工艺不同可分为:点接触型和面接触型两类。

按用途分有:普通二极管、整流二极管、检波二极管、开关二极管、稳压二极管、变容二极管、发光二极管、光敏二极管等。

(1) 点接触型二极管

点接触型二极管结构如图 1-10(a)所示。它由一根很细的金属丝热压在 N 型锗片上制成的,与金属丝相接的引出线为阳极,与金属支架相接的引出线为阴极。

由于金属细丝与 N 型半导体接触面很小,所以 PN 结的结电容很小,允许通过的电流也很小(几十毫安以下)。适用于高频检波、变频、高频振荡等场合。国产检波二极管 2AP 系列和开关二极管 2AK 系列都属于这一结构。

(2) 面接触型二极管

用合金法制成的面接触型二极管如图 1-10(b)所示。面接触型二极管 PN 结面积大,允许通过的电流较大,结电容也大,适用于工作频率较低的场合,一般用作整流器件。国产硅二极管 2CP 和 2CZ 系列都属于这一结构。

采用光刻、杂质原子扩散等生产工艺制成的硅平面型二极管结构如图 1-10(c)所示。它的结面积小、允许通过的电流也小。国产开关管 2CK 系列就是硅平面型结构二极管。

国产半导体器件命名方法见本书附录一。例如:2AP9,查表可知为 N 型锗材料制成的普

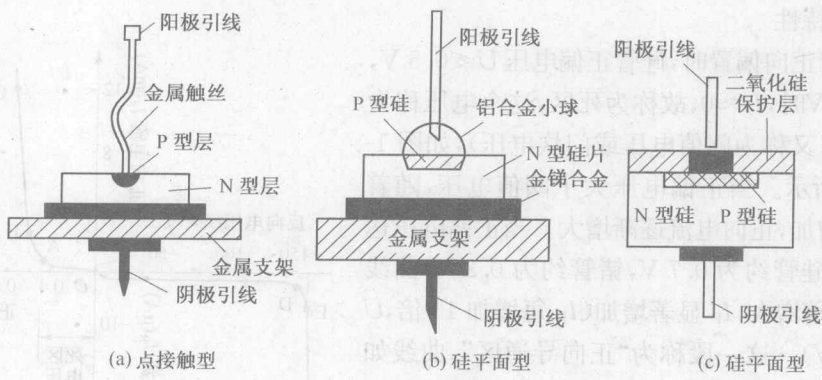


图 1-10 二极管结构

通二极管,序号为 9;2CZ52K 为 N 型硅材料制成的整流二极管,它的序号为 52,规格号为 K。

1.2.2 二极管的伏安特性曲线

1. 二极管的单向导电性

二极管正向偏置电路如图 1-11(a)所示电路。当开关 S 闭合,二极管阳极接电源正极,阴极接电源负极,这时灯泡亮,电流表中显示出电流值较大,二极管(PN 结)处于导通状态,流过二极管电流 I_F 称作正向电流。

二极管反向偏置电路如图 1-11(b)所示电路。当开关 S 闭合时,二极管接电源负极,阴极接正极,这时灯泡不亮,从电流表中看到电流几乎为零,二极管(PN 结)处于截止状态。实际上,在这种状态下,二极管中仍有微小电流通过,由于此种状态下电流基本上不随外加反向电压变化而变化,故称为反向饱和电流(亦称反向漏电流),用 I_S 表示。 I_S 很小,它会随温度上升而显著增加。所以,半导体二极管的热稳定性较差,在使用半导体器件时,要考虑温度对器件和由它构成电路的影响。

我们把二极管(PN 结)正向偏置导通、反向偏置截止的这种特性称之为单向导电性。

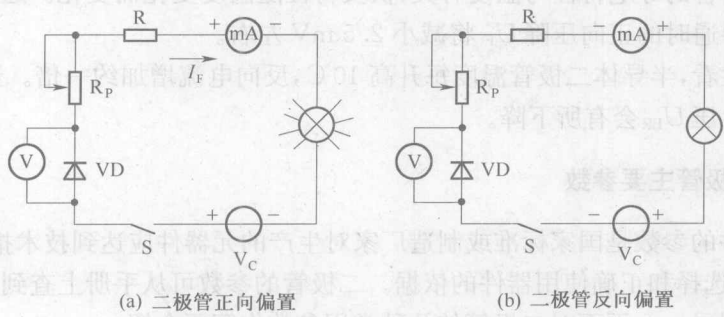


图 1-11 半导体二极管单向导电性实验

2. 二极管的伏安特性

半导体二极管的核心部分是 PN 结,其特性就是 PN 结的单向导电性。所谓伏安特性,就是指二极管两端的电压与流过二极管电流的关系,它能全面反映二极管的主要特点和性能,它是使用 and 选择二极管的重要依据。

(1) 正向特性

当二极管正向偏置时,硅管正偏电压 $U < 0.5 \text{ V}$, 锗管小于 0.1 V 时, $I_F \approx 0$, 故称为死区, 这个电压称为死区电压 U_{th} (又称为阈值电压或门坎电压), 如图 1-12 中 OA 段所示。当正偏电压大于阈值电压, 随着外加电压的增加, 正向电流逐渐增大。当正偏电压达到导通电压 (硅管约为 0.7 V , 锗管约为 0.2 V) 曲线陡直上升, U 稍增大, I_F 显著增加 (I_F 每增加 10 倍, U 约增加 60 mV)。这一段称为“正向导通区”, 曲线如图中 BC 段所示。其中曲线 AB 段称之为“缓冲带”。BC 段对应的二极管两端电压称为二极管的正向管压降 U_F , 硅二极管 U_F 为 $0.6 \sim 0.7 \text{ V}$, 一般取 0.7 V , 锗管 U_F 为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$, 通常取 0.2 V 。这一段二极管正向管压降近似恒定。在实际使用中, 二极管正偏导通就是指工作在这一段。

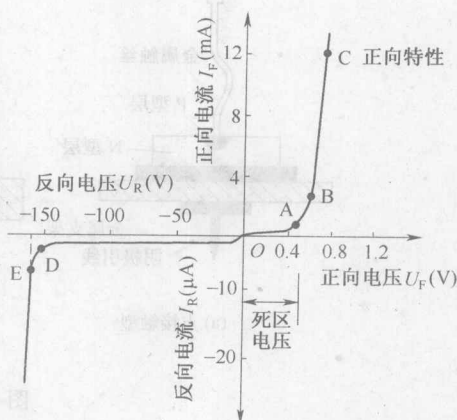


图 1-12 半导体二极管(硅管)伏安特性

(2) 反向特性

二极管反向偏置时, 二极管有微小电流通过, 称为反向电流, 如图 1-12 中 OD 段所示。由图可见, 反向电流基本上不随反向偏置电压的变化而变化。这时, 二极管呈现很高的反向电阻, 处于截止状态, 在电路中相当于开关处于关断状态。

二极管的反向电流越小, 表明二极管的反向性能越好。小功率硅管的反向电流在 $10 \sim 15 \text{ A}$ 以下, 小功率锗管达几微安到几十微安。

(3) 反向击穿特性

在图 1-12 中, 当由 D 点继续增加反偏电压时, 反向电流在 E 处急剧上升, 这种现象称之为反向击穿, 发生击穿时的电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。各类二极管的反向击穿电压大小各不相同。普通二极管、整流二极管等不允许反向击穿情况发生, 因二极管反向击穿后, 电流不加限制, 会使二极管 PN 结过热而损坏。

半导体二极管的导电特性与温度有关, 伏安特性随温度变化而变化。通常温度升高 1°C , 硅和锗二极管导通时的正向压降 U_F 将减小 2.5 mV 左右。

从反向特性看, 半导体二极管温度每升高 10°C , 反向电流增加约一倍。当温度升高时, 二极管反向击穿电压 U_{BR} 会有所下降。

1.2.3 二极管主要参数

电子元器件的参数是国家标准或制造厂家对生产的元器件应达到技术指标所提供的技术要求, 也是合理选择和正确使用器件的依据。二极管的参数可从手册上查到, 常用二极管主要参数参阅本书附录一。下面对二极管的几种常用参数作简要介绍。

1. 最大整流电流 I_{FM}

最大整流电流 I_{FM} 是指二极管长时间连续安全工作时, 允许通过的最大正向平均电流。实际应用时, 二极管的平均电流不能超过此值, 否则因为通过 PN 结的电流过大, 引起 PN 结过热, 而使 PN 结烧坏。

2. 最大反向工作电压 U_{RM}

最高反向工作电压 U_{RM} 是指二极管在使用时所允许加的最大反向电压。反向电压增大到

一定值时,二极管反向电流急剧增大,二极管的单向导电性被破坏,甚至因过热而烧坏。反向电流剧增时所对应的电压称为击穿电压 U_{BR} ,一般手册上给出的最高反向工作电压约为击穿电压的一半,以确保管子的安全运行。

3. 反向电流 I_R

反向电流 I_R 是指二极管未击穿时的反向电流值。此值越小,二极管的单向导电性能越好。由于温度增加,反向电流会急剧增加,所以在使用二极管时要注意温度的影响。

4. 最高工作频率 f_M

二极管的工作频率若超过一定值,就可能失去单向导电性,这一频率称为最高工作频率。

它主要由 PN 结的结电容的大小来决定。点接触型二极管结电容较小, f_M 可达几百兆赫[兹],面接触型二极管结电容较大, f_M 只能达到几十兆赫[兹]。

必须注意的是,手册上给出的参数是在一定测试条件下测得的数值。如果条件发生变化,相应参数也会发生变化。因此,在选择使用二极管时注意留有余量。

1.3 硅稳压二极管

二极管的种类很多,利用 PN 结的单向导电性制成的二极管有整流二极管、检波二极管、开关二极管等。此外,PN 结还有一些其他特性,采用适当工艺方法可制成特种功能用途的二极管,如稳压二极管、变容二极管、肖特基二极管、快速恢复二极管等。

1.3.1 硅稳压二极管的符号及稳压特性

稳压二极管是一种特殊工艺制造的结面型硅二极管,它具有很陡峭的反向击穿特性。它的电路符号与典型稳压二极管的伏安特性如图 1-13 所示。常用稳压二极管有 2CW 和 2DW 系列。由图中可以看出,稳压管的正向伏安特性与普通二极管相同,不同的是其反向击穿特性很陡峭,只要在外接电路上采取适当的限制电流措施,就能保证管子工作在击穿区内安全工作。稳压管通常工作在反向击穿区。

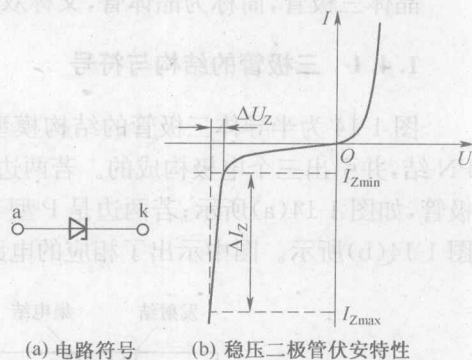


图 1-13 稳压二极管电路符号与伏安特性

1.3.2 硅稳压二极管的主要参数

1. 稳定电压 U_Z

U_Z 是稳压二极管的反向击穿电压,又称稳压管的稳定电压。通常是指在规定的测试电流下,管子两端的电压值,不同型号的管子有不同的稳定电压值,但对每一个稳压管来说,对应一定的工作电流,都有一个确定的稳定电压值。图中 I_{Zmin} 和 I_{Zmax} 是保证稳压管能安全有效地实现稳压的最小和最大工作电流。

2. 动态的内阻 r_Z

r_Z 为稳压管在稳压范围内两端电压变化量 ΔU_Z 与对应电流变化量 ΔI_Z 之比,即

$$r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z \quad (1-1)$$

稳压管的 r_Z 很小,一般为十几至几十欧。 r_Z 越小,说明管子的反向击穿特性曲线越陡,稳压性能越好。使用时,应选 r_Z 小的管子。

3. 稳定电流 I_Z

稳定电流也称最小稳压电流 I_{Zmin} , 即保证稳压管具有正常稳压性能的最小工作电流。稳压管工作电流低于此值时, 稳压效果差或不能稳压。高于此值时, 而在管子耗散功率不超过额定功耗的情况下, 稳压管均能正常工作, 且电流越大, 稳压效果越好。

4. 最大耗散功率 P_M 和最大工作电流 I_{ZM}

P_M 为稳压管所允许的最大功耗, I_{ZM} 为稳压管允许流过的最大工作电流。超过 P_M 或 I_{ZM} 时, 管子将因温度过高而损坏。

$$P_M = U_Z I_{ZM} \quad (1-2)$$

5. 稳定电压的温度系数 C_{TV}

稳压管中流过的电流为 I_Z 时, 环境温度每变化 1°C , 稳定电压的相对变化量(用百分数表示)称为稳定电压的温度系数。它表示温度变化对稳定电压 U_Z 的影响程度。

$$C_{TV} = \frac{\Delta U_Z}{U_Z \Delta T} \times 100\% \quad (1-3)$$

通常, $U_Z < 5\text{ V}$ 的稳压管具有负温度系数, $U_Z > 8\text{ V}$ 具有正温度系数, 而 U_Z 在 6 V 左右时稳压管(如 2DW7 型)的温度系数最小。

1.4 晶体三极管

晶体三极管, 简称为晶体管, 又称双极型晶体管。它是放大电路的最基本元件之一。

1.4.1 三极管的结构与符号

图 1-14 为半导体三极管的结构模型, 它是由一块本征半导体中掺入不同杂质制成两个 PN 结, 并引出三个电极构成的。若两边是 N 型半导体、中间是 P 型半导体, 则称为 NPN 型三极管, 如图 1-14(a) 所示; 若两边是 P 型半导体、中间是 N 型半导体, 则称为 PNP 型三极管, 如图 1-14(b) 所示。图中示出了相应的电路符号。

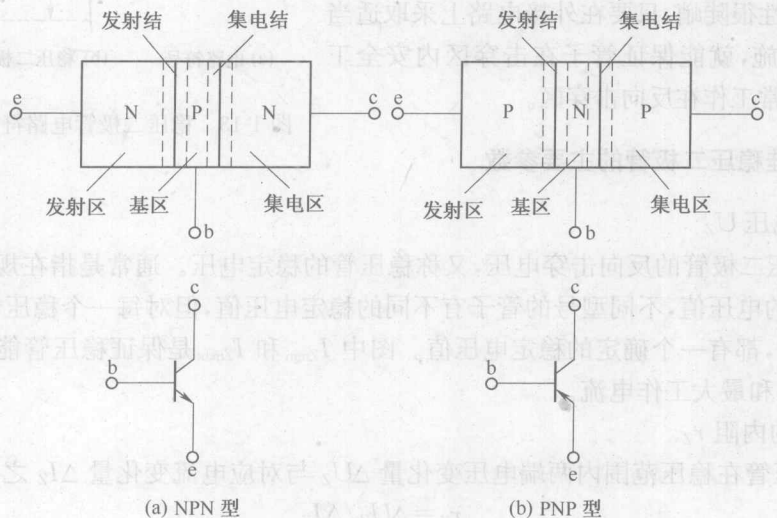


图 1-14 半导体三极管的结构示意图和符号

从图中可以看出,一个三极管的基本结构包括:三个区(发射区、集电区、基区)、两个 PN 结(集电结、发射结)、三个电极(基极 B、发射极 E、集电极 C)。从结构上看,虽然发射区和集电区都是 N 型(或 P 型)半导体,但是它们的掺杂浓度不同。半导体三极管制造工艺的特点是:发射区掺杂浓度最高,基区掺杂浓度最低且很薄(微米量级),集电结面积大。因此使用时,必须弄清管脚,避免接错。

三极管种类很多。除按上述结构分为 NPN 型和 PNP 型外,按工作频率可分为低频管和高频管,按功率大小可分为小功率管、中功率管和大功率管,按所用半导体材料分为硅管和锗管,按用途分为放大管和开关管等。双极型半导体三极管命名方法参阅附录一表 A-1。例如 3AX31B 为锗材料 PNP 型低频小功率三极管,序号为 31,规格号为 B。3DG6C 为硅材料 NPN 型高频小功率管,序号为 6,规格号为 C。3DA2A 为硅材料高频大功率三极管,序号为 2,规格号为 A。

1.4.2 三极管的电流分配关系和电流放大作用

1. 三极管各电极上的电流分配

三极管具有电流放大作用。下面从实验入手来分析它的放大原理。

要保证三极管正常工作,必须加上适当的直流偏置电压。若要使三极管工作于放大状态,必须满足的外部条件是:发射结外加正向偏置电压,集电结外加反向偏置电压。

现以 NPN 型三极管的放大状态为例,说明三极管内部载流子的运动规律。如图 1-15 所示。

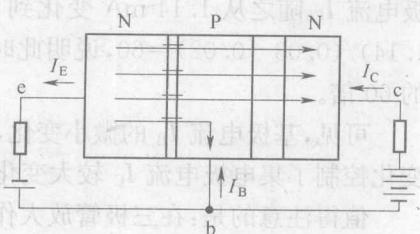


图 1-15 三极管内部载流子运动规律

发射结加正偏时,从发射区将有大量电子向基区扩散,形成发射极电流,与 PN 结中的情况相同。从基区向发射区也有空穴的扩散运动,但其数量小,这是因为发射区的掺杂浓度远大于基区的掺杂浓度。

进入基区的电子流因基区的空穴浓度低,被复合的机会较少。又因基区很薄,在集电结反偏电压的作用下,电子在基区停留的时间很短,很快就运动到了集电结的边上,进入集电结的结电场区域,被集电极所收集,形成集电极电流。在基区被复合的电子形成基极电流 I_B 。

下面以 NPN 型三极管构成的放大电路为例,分析三极管的电流分配关系,实验电路如图 1-16 所示。

在图 1-16 所示电路中,用三只电流表分别测量三极管的集电极电流 I_C 、基极电流 I_B 和发射极电流 I_E , 它们的方向如图中箭头所示。基极电源 V_{BB} 通过基极电阻 R_b 和电位器 R_P 给发射结提供正偏压 U_{BE} ; 集电极电源 V_{CC} 通过集电极电阻 R_C 给集电极与发射极之间提供电压 U_{CE} 。

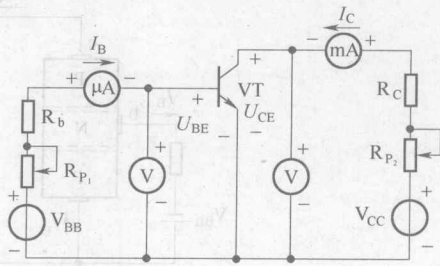


图 1-16 三极管电流分配实验电路

调节电位器 R_P , 可以改变基极上的偏置电压 U_{BE} 和相应的基极电流 I_B 。而 I_B 的变化又将引起 I_C 和 I_E 的变化。每产生一个 I_B 值, 就有一组 I_C 和 I_E 值与之对应, 该实验所得数据见表 1-1。