

21 世纪高等学校教材

电子技术

李忠波 主编

DIAN ZI JI SHU

(非电类专业)

13



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高等学校教材

电子技术

(非电类专业)

主编 李忠波
参编 袁 宏 申永山
 龚淑秋 高有华
主审 范振铨



机械工业出版社

本书内容包括：双极型半导体器件、放大电路基础、场效应晶体管及其放大电路、功率放大电路、差动放大电路、集成运算放大电路、反馈与振荡电路、直流稳压电源、晶闸管及其电路、逻辑函数及其化简、门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路、脉冲信号的产生与整形、数模(D/A)与模数(A/D)转换、半导体存储器与可编程逻辑阵列等。本书节后有练习与思考，章后有习题，习题中加入了用电子设计自动化(EDA)软件对教学内容进行分析、研究和设计的题目。书中有较多的例题和应用实例。

本书可供高等理工院校本、专科机械类、材料类、经贸管理类、化工类、建筑类、计算机类等有关专业教学使用。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/李忠波主编. —北京: 机械工业出版社,
2002.12

21世纪高等学校教材·非电类专业

ISBN 7-111-11007-2

I. 电… II. 李… III. 电子技术-高等学校-教材 IV. TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第075950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: 贡克勤 版式设计: 冉晓华 责任校对: 姚培新

封面设计: 张静 责任印制: 闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·22.75印张·563千字

0 001—5 000册

定价: 31.00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

封面无防伪标均为盗版

前 言

《电子技术》是与《电工技术》、《电工技术试题题型精选汇编》、《电子技术试题题型精选汇编》配套的系列教材。本教材是根据国家教育部电工学课程教学指导小组拟定的电子技术课程教学基本要求和面向 21 世纪人才培养目标而编写的。本教材可供高等理工院校本科、专科机械类、材料类、化工类、建筑类、经贸管理类、机电一体化类、计算机类等有关专业教学使用。

“电子技术”是非电类专业的技术基础教程。通过本课程的学习，应使学生得到电子技术必要的基础理论、基本知识和基本技能，了解电子技术发展的概况，为学习后续课程、从事有关的工程技术和科学研究工作打好理论和实践基础。

为适应科学技术新发展和教育教学改革的需要，本书加强了电子技术基础内容；加强了模拟集成电路和中大规模数字集成电路的介绍、分析和应用；在体系和内容的编排上力求适应多媒体教学的需要。

“电子技术”是编者在多年教学实践中，经过多个教学过程，对课程体系、内容及教学方法不断研究和总结，并广泛吸取兄弟院校有关教师的意见和建议的基础上编写的。第一篇模拟电子技术（第一～九章）可供 48～64 学时教学使用。第二篇数字电子技术（第十～十五章）可供 32～48 学时教学使用。书中带 * 号内容属于加宽、加深内容，可由教师根据专业特点和学时多少决定取舍。为便于教学和学生自学，书中还编写了练习与思考、例题和习题。为使掌握先进的分析、设计工具，促进教学手段现代化，大部分章节后有利用电子设计自动化（EDA）软件对教学内容进行分析、研究和设计的习题。在《电子技术试题题型精选汇编》中有相关的引导性例题。

本书由沈阳工业大学李忠波（编写第七、八、九、十二、十三、十四、十五章和附录）担任主编。沈阳工业大学袁宏编写第一、二章，申永山编写第三、四章，龚淑秋编写第五、六章，高有华编写第十、十一章。范振铨教授对本书原稿进行了仔细审阅，提出许多修改意见，在此深表谢意。由于编者学识有限，本书难免有不妥和错误之处，恳请使用本书的读者提出批评指正。

编 者

目 录

前言

第一篇 模拟电子技术

第一章 双极型半导体器件	1	第二节 互补对称功率放大电路	69
第一节 半导体的导电特性	1	* 第三节 集成功率放大器	73
第二节 PN 结	3	* 第四节 晶体功率管的散热与保护	75
第三节 半导体二极管	5	小结	76
第四节 硅稳压二极管	7	习题	76
第五节 半导体三极管	9	第五章 差动放大电路	78
小结	13	第一节 典型差动放大电路	78
习题	13	第二节 具有恒流源的差动放大电路	84
第二章 放大电路基础	16	小结	87
第一节 基本放大电路的组成	16	习题	88
第二节 放大电路的静态估算法	17	第六章 集成运算放大电路	90
第三节 放大电路的图解分析方法	17	第一节 集成运算放大器芯片	90
第四节 放大电路的微变等效电路分析		第二节 集成运算放大器的线性应用	93
方法	21	第三节 集成运算放大器的非线性	
第五节 工作点稳定的共射极典型放大		应用	103
电路	28	第四节 集成运算放大器应用实例	109
第六节 共集电极放大电路	32	第五节 使用集成运算放大器应注意的	
* 第七节 共基极放大电路	35	问题	111
第八节 多级放大电路	37	小结	114
小结	40	习题	114
习题	41	第七章 反馈与振荡电路	119
第三章 场效应晶体管及其放大		第一节 反馈的基本概念	119
电路	45	第二节 负反馈放大电路的一般表	
第一节 结型场效应晶体管	45	达式	129
第二节 绝缘栅场效应管	48	第三节 负反馈对放大电路性能的	
第三节 场效应晶体管的主要参数	51	影响	131
第四节 场效应晶体管放大电路	52	第四节 负反馈放大电路的近似估算	136
* 第五节 功率场控器件	60	* 第五节 负反馈放大电路的自激振荡	
* 第六节 场效应晶体管的应用电路	63	及消除方法简介	139
小结	65	第六节 正弦波振荡的基础知识	141
习题	65	第七节 RC 正弦波振荡电路	142
第四章 功率放大电路	68	第八节 LC 正弦波振荡电路	145
第一节 概述	68	第九节 石英晶体正弦波振荡电路	148
		小结	151

习题	152
第八章 直流稳压电源	157
第一节 单相桥式整流电路	157
*第二节 三相桥式整流电路	161
第三节 滤波电路	164
第四节 硅稳压二极管稳压电路	168
第五节 集成稳压电源	171
小结	177
习题	177

第九章 晶闸管及其电路	180
第一节 晶闸管	180
第二节 可控整流电路	184
*第三节 晶闸管的保护	193
第四节 单结晶体管触发电路	195
*第五节 晶闸管集成触发电路	201
*第六节 晶闸管电路应用举例	204
小结	207
习题	208

第二篇 数字电子技术

第十章 逻辑代数及逻辑门电路	210
第一节 逻辑代数基础知识	210
第二节 逻辑函数的化简	212
第三节 逻辑门电路	218
第四节 典型集成门电路的结构与特性	222
第五节 集成逻辑门电路使用中的几个实际问题	227
第六节 EDA 应用举例	228
小结	231
习题	232
第十一章 组合逻辑电路	236
第一节 组合电路的分析和设计	236
第二节 常用集成组合逻辑电路	239
*第三节 组合电路的竞争冒险	250
小结	250
习题	251
第十二章 触发器及时序逻辑电路	254
第一节 RS 触发器	254
第二节 JK 触发器	259
第三节 D 触发器	261
第四节 触发器功能的转换	262
第五节 寄存器	264
第六节 计数器	271
第七节 脉冲分配器	282
小结	283
习题	284
第十三章 脉冲信号的产生与整形	291
第一节 555 定时器	291

第二节 单稳态触发器	293
第三节 施密特触发器	296
第四节 多谐振荡器	297
小结	301
习题	302
*第十四章 数模 (D/A) 与模数 (A/D) 转换	304
第一节 数模转换器 (DAC)	304
第二节 模数转换器 (ADC)	309
小结	318
习题	318
*第十五章 半导体存储器与可编程逻辑阵列	320
第一节 随机存取存储器 (RAM)	320
第二节 只读存储器 (ROM)	328
第三节 可编程逻辑阵列 (PLA)	335
小结	339
习题	340
附录	342
附录 A 半导体分立器件型号命名方法	342
附录 B 常用半导体器件的参数	343
附录 C 集成电路型号命名方法	347
附录 D 国内外部分集成运算放大器同类产品型号对照表	349
附录 E 几种国产集成运算放大器参数规格表	350
附录 F 音频功率器件 D810 电路主要技术指标的典型值	351
附录 G 三端式集成稳压器性能参数	352
附录 H 功率场控器件的主要参数	352

附录 I 电气及电子元、器件新旧图形符 号对照表	353
附录 J 二进制逻辑单元新、旧图形符号	

对照表	354
附录 K 555 定时器的主要性能参数	355
参考文献	357

第一篇 模拟电子技术

第一章 双极型半导体器件

自由电子和空穴两种载流子参与导电的半导体器件称为双极型半导体器件，只有一种载流子参与导电的半导体器件称为单极型半导体器件。双极型半导体器件的基本单元是PN结，PN结是由半导体构成的。本章将介绍半导体的导电特性，PN结以及最基本的双极型半导体器件——半导体二极管、稳压管和三极管。

第一节 半导体的导电特性

在常温下，导电能力介于导体与绝缘体之间的物体称为半导体。半导体的电阻率一般为 $(10^{-3} \sim 10^8) \Omega \cdot \text{cm}$ 。常用的半导体材料有硅、锗以及砷化镓、碳化硅等。纯净的硅在常温时的电阻率约为 $23 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

半导体具有如下特殊性质：

(1) 掺杂性 在纯净的硅晶体中掺入百万分之一的硼，其电阻率将下降为原电阻率的50万分之一左右，利用这种导电性能的可控性，可以制成各种类型的半导体器件。

(2) 热敏性 半导体的电阻率随温度变化很敏感，一般情况下（非重掺杂），温度升高电阻率下降。可制成热敏器件。

(3) 光敏性 受光照后，半导体的电阻率大为降低。依此特性可制成各种光电器件和太阳能电池等。

半导体的这些特殊性质是由其内在的矛盾和运动规律所决定的。

一、本征半导体

本征半导体或称纯净半导体，即无杂质、无位错、晶格完整、没有任何缺陷的单晶体结构的半导体。本征半导体的结构和导电性能如下。

1. 共价键结构

以半导体硅为例，组成晶体时，每个硅原子的4个价电子分别与相邻4个硅原子的价电子组成共价键结构，如图1-1所示。图中的硅原子只画出最外层的价电子，每个硅原子是具有8个外层价电子的稳定状态。在热力学0K时，价电子被牢牢地束缚在原子核周围，晶体中没有自由电子，呈现绝缘体状态。

2. 两种导电粒子（载流子）——自由电子与空穴

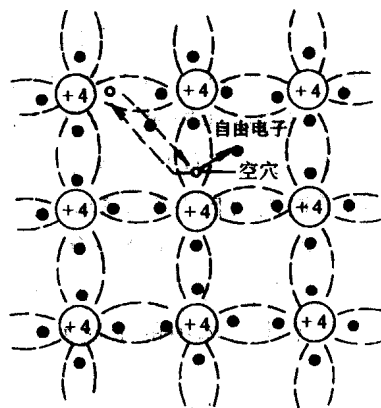


图1-1 本征半导体的晶体结构

当温度升高到 300K 时,许多价键电子得到足够的能量,摆脱原子核的束缚,成为自由电子,同时留下一个空位,称为空穴,这一过程称为热激发或本征激发。如图 1-1 中实线箭头所示。

空穴的属性如何?能否自由移动参与导电呢?热激发使硅原子失去一个价键电子,硅原子不再保持电中性,可认为空穴带一个电子当量的正电荷。在纯硅晶体中,价键电子所处的能级相同,运行轨道重叠,因此空穴很容易被相邻的硅原子的价键电子填补,使空穴移到了相邻的硅原子处,如图 1-1 中虚线箭头所示。空穴的移动是价键电子在相反方向移动的结果,价键电子在晶体中的移动是自由的,因此空穴的移动也是自由的,当在晶体的两侧加上电场时,空穴就会顺着电场的方向定向运动,参与导电,形成电流。可见空穴相当于带有当量正电荷的导电粒子。在室温时,纯净的硅半导体中有两种导电粒子——自由电子和空穴。

3. 自由电子和空穴成对地产生成对地复合

热激发的过程产生了自由电子和空穴对,当自由电子落回价键时,它们又成对地消失,称为复合,在一定的温度下产生与复合达到动态平衡,有一定的自由电子和空穴的浓度。当温度变化时,例如温度升高,产生将大于复合,载流子的浓度将增大,在新的温度下,产生与复合达到新的动态平衡,对应一个新的载流子浓度。

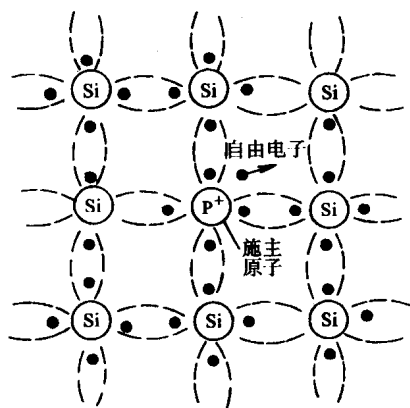


图 1-2 N 型半导体中的杂质电离

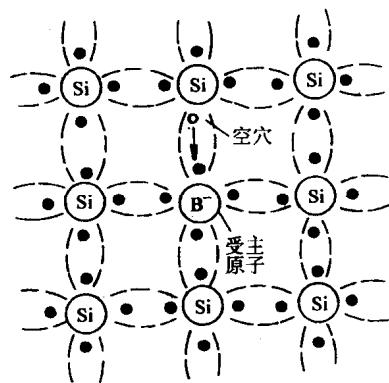


图 1-3 P 型半导体中的杂质电离

二、N 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量的五价元素磷(P),如图 1-2 所示,磷原子最外层有 5 个价电子,其中 4 个价电子与相邻的 4 个硅原子的价电子组成共价键,剩下一个价电子由于受原子核的束缚较弱,在室温下很容易成为自由电子。同时,磷原子因失去一个电子电离为正离子。每个杂质原子施舍一个自由电子,这就使得半导体中的自由电子数目大大地增加。杂质原子提供的自由电子数将远远超过由热激发产生的空穴数。这种杂质半导体以电子导电为主,故称其为电子型半导体或 N 型半导体。在 N 型半导体中,自由电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。

N 型半导体中的杂质元素磷的原子在硅晶体中给出一个多余的电子,故称磷为施主杂质。

三、P 型半导体

若在本征半导体硅中掺入微量的三价元素硼(B),硼原子最外层有 3 个价电子,这 3 个

价电子在与相邻的 4 个硅原子组成共价键时还有一个空位未被填满，与其相邻的硅原子的价电子很容易填补这个空位，于是就产生了一个空穴，见图 1-3。硼原子在晶体中接受了一个电子后电离为负离子。

由于掺杂，这种杂质半导体中的空穴数目增加了，空穴数目远远超过了自由电子数目，这种以空穴导电为主的半导体叫做空穴型半导体或 P 型半导体。在 P 型半导体中，空穴为多数载流子，自由电子为少数载流子。

由于硼原子在硅晶体中接受了电子，故称其为受主杂质。

练习与思考

1-1-1 什么叫本征半导体？本征半导体的载流子浓度是由什么决定的？

1-1-2 半导体中空穴的物理意义是什么？

1-1-3 什么叫 P 型半导体？什么叫 N 型半导体？P 型半导体和 N 型半导体的多子和少子各是什么？P 型半导体中的受主杂质负离子和 N 型半导体中的施主杂质正离子能否参与导电？

第二节 PN 结

一、PN 结的形成

通过某种工艺过程使 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时，因交界面两侧的多子存在浓度差，就必然产生双方多子向对方的扩散运动，形成扩散电流 I_F ，如图 1-4 所示。

图中 $\bigcirc$ 代表 P 型半导体的多数载流子空穴， $\ominus$ 代表 P 型半导体中被晶格固定而不能移动的负离子。图中 $\bullet$ 代表 N 型半导体中的多数载流子自由电子， $\oplus$ 代表 N 型半导体中被晶格固定而不能移动的正离子。

多子的扩散运动首先在交界面附近（因浓度差）进行。由 P 型区扩散到 N 型区的多子空穴与 N 型区交界面附近的电子复合；由 N 型区扩散到 P 型区的多子电子与 P 型区交界面附近的空穴复合。多子扩散的结果是在交界面两侧分别暴露出很薄一层不能移动的

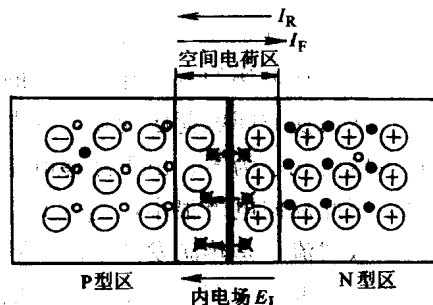


图 1-4 PN 结的形成

负离子和正离子。这样在 P-N 交界面两侧就形成了一边带正电荷，而另一边带负电荷的“空间电荷区”。在空间电荷区内产生了方向由正电荷区指向负电荷区的内电场 E_i 。内电场 E_i 出现后对两区多子的扩散起阻碍作用，正是由于这个原因也常把空间电荷区叫做阻挡层。

内电场阻止两区多子继续扩散的同时，却有利于两区的少子越过空间电荷区进入对方区内。少数载流子在内电场作用下有规则地运动形成漂移电流 I_R 。

PN 结形成之初，多子扩散运动占绝对优势，随着内电场的形成、增强，多子扩散运动逐渐减弱，而少子漂移运动却逐渐增强。当扩散电流 I_F 和漂移电流 I_R 大小相等、方向相反，达到动平衡时，空间电荷区的宽度就确定下来，一个平衡的 PN 结也就形成了。由于 PN 结在形成过程中载流子已耗尽，所以 PN 结也称为耗尽层。

二、PN 结的单向导电性

在 PN 结两端施以外电压称为给 PN 结以偏置。如果所加的外电压是 P 端的电位高于 N

端的电位,称为正向偏置(简称正偏),反之称为反向偏置(简称反偏)。

1. PN 结的正向偏置

PN 结上加正向偏置电压(即外电源正极接 P 区,负极接 N 区),如图 1-5 所示。

此时外加电场 E_s 的方向与内电场的方向相反,外加电场削弱了内电场,空间电荷区变窄。原来处于平衡状态的多子扩散运动和少子漂移运动失去了平衡,致使多子扩散运动的规模超过了少子漂移运动的规模。由于参与扩散的是多数载流子,所以形成了较大的扩散电流 I_F ,这就是流过 PN 结的正向电流。PN 结正向偏置时呈现了很小的电阻,即 PN 结导通。

2. PN 结的反向偏置

PN 结上加反偏电压(即外电源正极接 N 区,负极接 P 区),如图 1-6 所示。

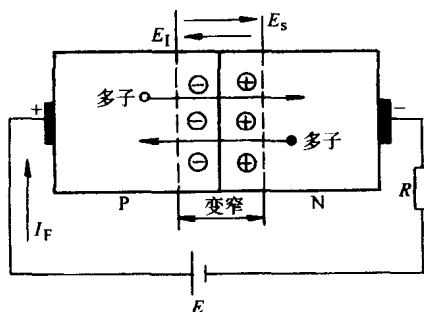


图 1-5 PN 结正向偏置

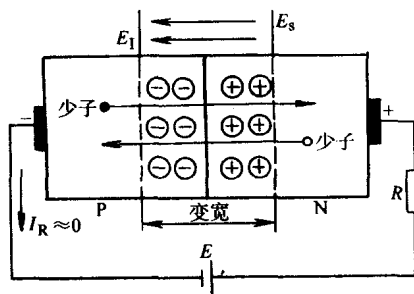


图 1-6 PN 结反向偏置

此时外加电场的方向与内电场的方向一致,外电场使 PN 交界面两侧的空穴和自由电子移走,从而使空间电荷区变宽,内电场增强。增强了的内电场阻止两区多子的扩散运动,致使扩散电流几乎为零。由于漂移电流是少数载流子定向运动形成的,而少数载流子的数量又很少,因此反向电流很小,这时 PN 结呈现很高的电阻,即 PN 结截止。

少数载流子是热激发产生的,随着环境温度的升高,少数载流子的数量增多。即使是在相同的反向电压作用下,反向电流也会因温度升高而增大,也就是说温度对反向电流的影响很大。

综上所述,PN 结正向偏置时呈现低阻性,正向电流较大,此时 PN 结处于正向导通状态;当 PN 结反向偏置时呈高阻性,反向电流很小,此时 PN 结处于反向截止状态。可见 PN 结具有单向导电性。

练习与思考

1-2-1 什么是载流子的扩散和漂移?

1-2-2 内电场形成后使得空间电荷区内存在电势差。将 PN 结两端用导线连接起来,导线中是否有电流产生?

1-2-3 怎样将 PN 结正向偏置、反向偏置?

1-2-4 PN 结正向偏置时为什么会产生较大的正向电流? PN 结反向偏置时为什么产生的反向电流却很小?

1-2-5 反向电流为什么会随环境温度而变化?

第三节 半导体二极管

半导体二极管,简称二极管,是由PN结加上欧姆接触电极,两端引出线,管壳封装制成。接在P区的引出线叫阳极A,接在N区的引出线叫阴极K。规定二极管文字符号为VD,图形符号用箭头和一短线表示,箭头方向表示正向电流方向,箭头一侧为阳极,短线一侧为阴极,见图1-7。

二极管通常有点接触型二极管、面接触型二极管、硅平面开关管等几种类型。

1. 二极管的伏安特性曲线

二极管的管压降 U_D 与其电流 I_D 的关系曲线,叫做二极管的伏安特性曲线,可用实验方法测得,或用

图示仪JT-1测之。在直角坐标系中横坐标轴表示二极管管压降 U ,纵坐标轴表示其电流 I ,如图1-7所示。图1-7a为硅二极管2CP10的伏安特性,图1-7b为锗二极管2AP15的伏安特性。

从伏安特性曲线上可得出如下规律:

(1) 正向特性 二极管正向偏置,在坐标的第一象限。它又可分为两段:从坐标原点0到a点为第一段,二极管外加正向电压较小,外部电场不足以克服内电场对载流子扩散运动造成的阻力,此时正向电流很小,呈现电阻较大。这段区域称为“死区”。对应a点的门坎电压 U_{on} 叫“死区电压”,其数值大小随二极管的结构材料不同而异,并受环境温度影响。一般来说,硅二极管“死区电压”约为0.5V,锗二极管为0.1V。

正向电压超过门坎电压 U_{on} 后,随着正向电压的增加,内电场大大削弱,有利于扩散,电流按指数曲线规律迅速增长。但正向电压在小范围内变化,其电流变化很大。通常硅管压降为0.6~0.8V;锗管为0.2~0.3V。当环境温度变化时,在室温附近,温度每升高1°C,二极管的正向压降减小2~2.5mV。

(2) 反向特性 二极管反向偏置,在坐标第三象限。因为加的反向电压,故漂移运动起主要作用,反向电流几乎不变,叫反向饱和电流。其值对于硅管是纳安级的,锗管在十几微安,并且随着温度升高,反向饱和电流明显增加。

当反向电压超过一定数值后,反向电流急剧增大,这时二极管被“反向击穿”,对应的电压叫做“反向击穿电压” U_{RB} 。使用二极管时,应避免反向电压超过击穿电压,防止损坏二极管。

2. 二极管的伏安方程

二极管特性实际上是PN结特性,按照载流子运动统计规律,其伏安方程有

$$I = I_{SR}(\exp(U/U_T) - 1) \quad (1-1)$$

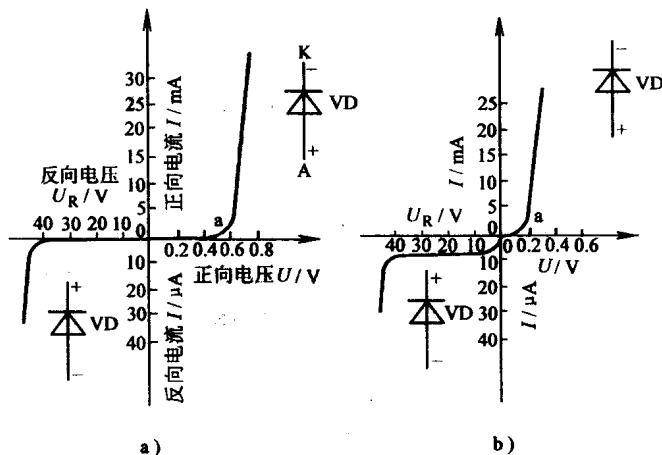


图1-7 二极管的符号及伏安特性

式中, U_T 为温度电压当量, 在常温 (300K) 情况下, $U_T = 26\text{mV}$; I_{SR} 为反向饱和电流; I 为二极管的电流; U 为二极管两端的电压降 (V)。

下面用伏安方程解释伏安特性曲线:

当二极管承受反向偏置电压 U 为负值, 若 $|U| \gg 26\text{mV}$ 时, 有 $\exp(U/U_T) \approx 0$,

$$\text{则} \quad I = -I_{\text{SR}} \quad (1-2)$$

式 (1-2) 中 I_{SR} 就是反向饱和电流值, 前面的负号表明二极管的电流为反向。反向饱和电流典型值硅管约为纳安 (nA 即 10^{-9}A) 量级; 锗管为微安 (μA 即 10^{-6}A) 量级。

若二极管承受正向偏压时, 通常 $U \gg 26\text{mV}$, 有 $\exp(U/U_T) \gg 1$, 则

$$I = I_{\text{SR}} \exp(U/U_T) \quad (1-3)$$

这就是二极管电流随正向偏压按指数上升的规律。当 U 在 0 到门坎电压之间时, PN 结厚度受影响很小, 因参加运动的载流子数量相对较少, 其统计规律的方程不适用。

式 (1-1) 只有在二极管两端电压不过小, 也不过大时才能比较准确表征其伏安特性曲线。

3. 二极管的主要参数

结合二极管的伏安特性曲线, 不难引出如下主要参数。

(1) 直流参数

1) 最大整流电流 I_{FM} 指管子长期工作时, 允许通过的最大正向平均电流。因为流过电流太大时, PN 结的管压降要引起发热, 超过一定限值要烧坏 PN 结。

2) 反向电流 I_{R} 指在一定环境温度条件下, 二极管承受反向工作电压、又没有反向击穿时, 其反向电流的值。它的值愈小, 表明管子的单向导电特性愈好。温度对反向电流影响较大, 经验值是, 温度每升高 10°C , 反向电流约增大一倍。使用时应加注意。

3) 最大反向工作电压 U_{RM} 指管子运行时允许承受的最大反向电压。通常取反向击穿电压 U_{BR} 的一半。

4) 直流电阻 R_{D} 指二极管两端所加的直流电压与流过它的直流电流之比。阻值与工作点有关。良好的二极管正向电阻等于几十欧至几千欧; 反向电阻大于几十千欧至几百千欧。

(2) 二极管的动态微变参数

1) 二极管的动态微变电阻 R_{d} 二极管在小信号工作情况下, 用微变电阻 R_{d} 描述。它是在二极管伏安特性曲线上的工作点处切线斜率的倒数。

从特性方程可求出:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{d}}} &= \frac{dI}{dU} = \frac{d}{dU} \{I_{\text{SR}} [\exp(U/U_T) - 1]\} \\ &= I_{\text{SR}} \exp(U/U_T) / U_T = \frac{I_{\text{Q}}}{U_T} \end{aligned}$$

则

$$R_{\text{d}} = \frac{U_T}{I_{\text{Q}}} = \frac{26\text{mV}}{I_{\text{Q}}} \quad (1-4)$$

例如, $I_{\text{Q}} = 2\text{mA}$ 时, $R_{\text{d}} = \frac{26}{2} \Omega = 13\Omega$

可见微变电阻 R_{d} 与工作点有关。

2) 二极管的极间电容 二极管实际是个 PN 结, 空间电荷区相当于电介质, P 区和 N 区

相当金属极板, 因此类似平行板电容器。PN 结空间电荷改变, 存在一个结势垒电容, 它与 PN 结面积成正比, 与空间电荷区厚度成反比, 其值为 $0.5 \sim 100 \text{pF}$ 。反向偏置时, 因为二极管反向电阻较大, 那么结势垒电容作用显得突出。

二极管正向偏置时, 由于多数载流子扩散到对侧形成电荷堆积而构成扩散电容, 其值在 0.1pF 至几十皮法。结势垒电容与扩散电容之和称为极间电容。由于极间电容值较小, 在低频工作时可略去, 但在高频工作时, 必须考虑其影响。

4. 理想二极管

从特性曲线上看到, 二极管正向偏置导通时存在管压降, 硅管约为 0.7V ; 锗管约为 0.3V 。反向偏置时有漏电流。在理想情况下, 取正向导通管压降为零, 二极管用短路线代替; 取反向漏电流为零, 二极管处于断路状态。在二极管电路分析中常常认为二极管是理想的。

5. 二极管应用举例

二极管的单向导电特性, 可用来进行整流、检波、限幅和钳位等。

例 1-1 电路如图 1-8a 所示, 已知 $E=2\text{V}$, $R=100\Omega$, $u_i=5\sin\omega t (\text{V})$, 试画出输出电压 u_o 的波形。设二极管 VD 是理想的。

解 由图 1-8a 可知, 二极管 VD 的阴极电位为 2V , 由于输出端开路, 所以当 $u_i > 2\text{V}$ 时 VD 正偏导通, 管压降为 0 , 输出 $u_o = E = 2\text{V}$; 当 $u_i < 2\text{V}$ 时 VD 反偏截止, 相当于开路, 电阻 R 中无电流, 故 $u_o = u_i$ 。输出波形见图 1-8b。

显然, 电路把输出电压的正峰值限制在 2V 。这种电路叫限幅电路。由于它起到修整波形的作用, 又称整形电路。

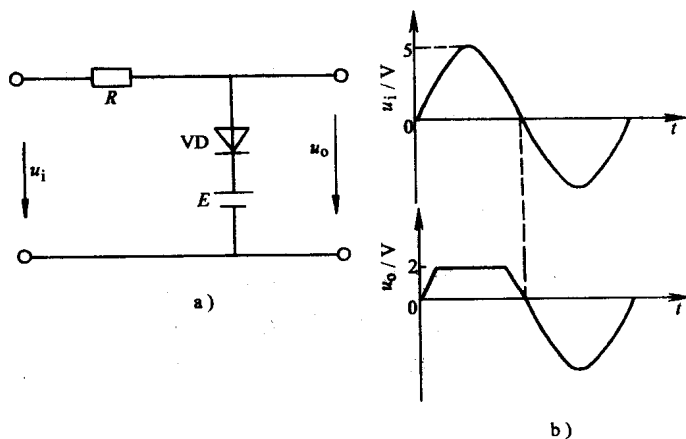


图 1-8 例 1-1 图
a) 电路 b) 输入输出波形

第四节 硅稳压二极管

硅稳压二极管简称稳压管, 结构与二极管相同, 一般工作在反向击穿状态, 符号见图 1-9。

1. 稳压管的伏安特性

通过实验测得稳压管伏安特性曲线如图 1-9 所示。

从特性曲线看到, 稳压管正向偏压时, 其特性和普通二极管一样; 反向偏压时, 开始一段和二极管一样, 当反向电压大到一定数值以后, 反向电流突然上升, 而且电流在一定范围 ($I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$) 内增长时, 管两端电压只有少许增加, 变化很小, 具有稳压性能。这种“反向击穿”是可恢复的, 只要外电路限流电阻保证电流在限制范围内, 不致引起热击穿损坏稳压管。

2. 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压 U_Z 指稳压管在正常工作时管子的端电压, 一般 $3 \sim 25\text{V}$, 高的可达 200V 。

(2) 稳定电流 I_Z 稳压管正常工作时的参考电流。开始稳压时对应的电流叫最小稳压电流 $I_{Z\min}$; 对应额定功耗时的稳压电流叫最大稳压电流 $I_{Z\max}$ 。正常工作电流 I_Z 取其 $I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$ 间某个值。

(3) 动态电阻 R_Z 稳压管端电压的变化量 ΔU_Z 与对应电流变化量 ΔI_Z 之比, 叫稳压管的动态电阻 R_Z 。

即

$$R_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (1-5)$$

其值在几欧至十几欧。

(4) 稳定电压的温度系数 指稳压管的稳压值 U_Z 随工作温度变化影响的系数。例如 2CW17 的电压温度系数为 $9 \times 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$, 并且有个规律: 稳压值低于 4V 的稳压管, 电压温度系数为负 (表现齐纳击穿); 高于 7V 的稳压管, 系数为正 (表现雪崩击穿); 而 6V 左右的管子 (呈现两种击穿), 稳压值受温度影响较小。

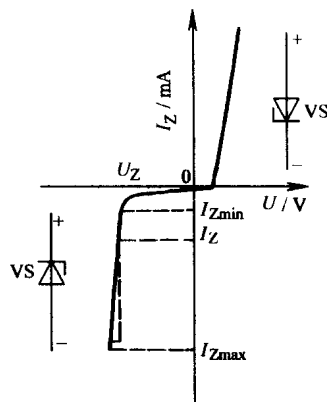


图 1-9 稳压管伏安特性

(5) 稳压管额定功耗 P_{ZM} 保证稳压管安全工作所允许的最大功率损耗

$$P_{ZM} = U_Z I_{Z\max} \quad (1-6)$$

3. 稳压二极管的应用

稳压二极管主要用来构成稳压电路, 如图 1-10 所示。

U_1 是不稳定的可变直流电压, 需要得到稳定的电压 U_o , 在二者之间加稳压电路。它由限流电阻 R 和稳压管 VS 构成, R_L 是负载电阻。更深入的内容在第八章将详细讨论。

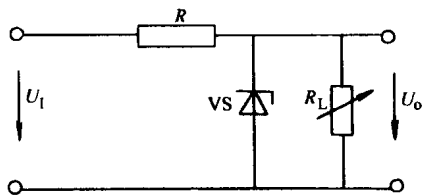


图 1-10 稳压管稳压电路

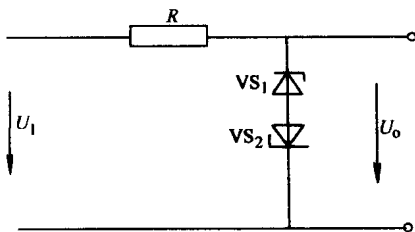


图 1-11 例 1-2 图

例 1-2 在图 1-11 中, 已知稳压二极管 VS 的 $U_Z = 6.3\text{V}$, 当 $U_1 = \pm 20\text{V}$, $R = 1\text{k}\Omega$, 求 U_o ? 已知稳压二极管的正向压降 $U = 0.7\text{V}$ 。

解 当 $U_1 = +20\text{V}$, VS 反向击穿稳压 $U_{Z1} = 6.3\text{V}$, VS_2 正向导通, $U_{Z2} = 0.7\text{V}$, 则 $U_o = +7\text{V}$; 同理 $U_1 = -20\text{V}$, $U_o = -7\text{V}$ 。

练习与思考题

1-4-1 怎样用万用表电阻档 $\times 1\text{k}$ 判断二极管的阳极、阴极和好坏?

1-4-2 有一个二极管, 在温度 15°C 时, 正向导通管压降为 0.65V , 反向饱和电流 I_{SR} 为 $0.1\mu\text{A}$, 问温度 45°C 时, 管压降和反向饱和电流各是多少?

1-4-3 试说明图 1-10 稳压过程? 若 $U_1 = 12\text{V}$, $U_Z = 6\text{V}$, $R_L = 3\text{k}\Omega$, $R = 9\text{k}\Omega$, 求 U_o 的值。

第五节 半导体三极管

一、半导体三极管的构造和工作原理

半导体三极管又称晶体三极管，简称晶体管或三极管。

1. 半导体三极管的构造

在纯净的半导体基片上，按生产工艺扩散掺杂制成两个紧密相关的PN结，分三个区，引出三个电极，封装在金属或塑料外壳内，半导体三极管的结构示意图和符号如图1-12所示。夹在两个PN结中间的区域叫基区，它的特点是掺杂浓度较小，很薄，约几微米到十几微米。由基区引出的电极叫基极，文字符号记做B或b。基区两侧分别是发射区和集电区。与基区接触面积较小，且掺杂浓度较大（高掺杂）的区域，叫发射区。引出电极叫发射极，记做E或e。另一侧是掺杂浓度较小，接触面较大的区域叫集电区，相应的引出线叫集电极，记做C或c。集电区与基区间的PN结叫集电结，发射区与基区间的PN结叫发射结。

按掺杂方式不同制成的半导体三极管分为NPN型和PNP型两种；由于基片材料选取硅或锗不同，可分为硅三极管和锗三极管；按其工作频率可分为低频、高频、超高频半导体三极管；按额定功率不同分为小功率、中功率、大功率半导体三极管等。

半导体三极管的图形符号见图1-12b，其中带箭头的电极是发射极，箭头方向指示晶体三极管工作时实际的电流方向。文字符号用V表示。

2. 半导体三极管的工作原理

半导体三极管与外电路连接后，并满足一定条件时，才能谈及工作原理。图1-13电路是以NPN型硅三极管接成共射形式的示意图。

现在外电路提供给晶体三极管的条件是：电压源 U_{BB} 通过电阻 R_B 提供给发射结正向偏置；而电压源 U_{CC} 通过电阻 R_C 加到集电极，使集电结处于反向偏置。在这种外部条件下，半导体三极管内的载流子在外电场作用下产生定向运动，形成图中箭头方向所示的基极电流 I_B ，集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 。

由于发射结正向偏置，基区低掺杂，发射区高掺杂，载流子浓度差别很大，于是发射区的多数载流子——自由电子在正向偏压作用下，有利于扩

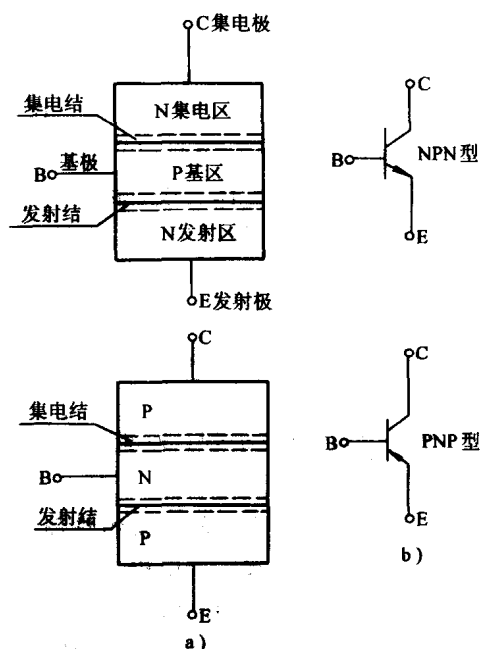


图 1-12 半导体三极管的结构示意图和符号
a) 结构 b) 符号

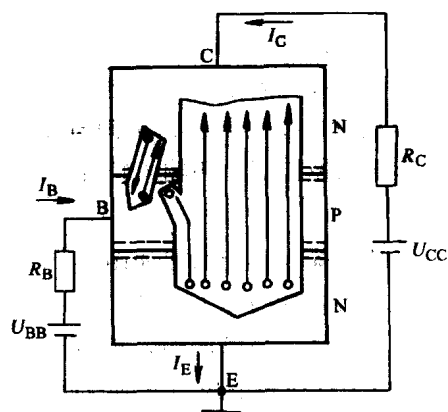


图 1-13 NPN 型三极管共射电路示意图

散,即发射区向基区注入大量自由电子。扩散到基区的自由电子,在基区将发生复合和继续扩散。由于基区很薄,同时又是低掺杂,所以从发射区注入过来的自由电子仅有少量与基区的空穴复合,形成基极电流 I_B ,其余大多数继续扩散,因集电结反向偏置,有利于收集由基区来的大量自由电子,被集电极收集的电子形成集电极电流 I_C 的主要部分。

显然,基极电流 I_B 远小于集电极电流 I_C ,并且发射极电流 I_E 一定等于 I_B 与 I_C 之和,即

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-7)$$

若考虑集电结反向饱和电流 I_{CBO} ,则有

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (1-8)$$

$$I_B = (1 - \alpha) I_E - I_{CBO} \quad (1-9)$$

由式 (1-9) 和式 (1-8) 可得

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO} \quad (1-10)$$

其中 $\alpha = I_C / I_E$; $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$; $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$ 。

综上可知,半导体三极管的发射结正向偏置,集电结反向偏置,半导体三极管有电流放大作用,电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \quad (1-11)$$

因此半导体三极管为电流控制器件。因为参加导电的有多数载流子和少数载流子,故又叫双极型半导体三极管。

至于 PNP 型三极管,外部电压源极性相反,注入载流子为空穴,实际电流方向相反,分析方法相似。

二、半导体三极管的伏安特性曲线

半导体三极管有三个电极,以哪一个电极为其公共端,就会有相应的伏安特性曲线。这里我们主要介绍以发射极为公共端,即共射组态的伏安特性曲线。半导体三极管是两端口的非线性器件,如图 1-14 所示。其中图 1-14a 为 NPN 型,图 1-14b 为 PNP 型。

半导体三极管的特性曲线可通过晶体管图示仪测得。

1. 输入伏安特性曲线

当集电极与发射极间的电压 u_{CE} 为某一常数值时,半导体三极管的基极与发射极间电压 u_{BE} 改变对基极电流 i_B 的影响关系曲线,叫输入特性曲线。

$$i_B = f(u_{BE}) \big|_{u_{CE}=\text{常数}} \quad (1-12)$$

具体的输入特性曲线如图 1-15 所示。

从输入特性曲线上看到:

1) 半导体三极管的输入特性与二极管的正向特性相似。但由于存在集电极与发射极间电压 u_{CE} 的影响,输入特性曲线通常以两条典型曲线代表:一条对应 $u_{CE} = 0V$,另一条对应 $u_{CE} > 1V$ 。前一条相当于二极管正向特性;后

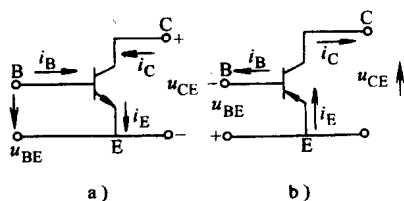


图 1-14 NPN 和 PNP 三极管
两端口电路
a) NPN 型 b) PNP 型

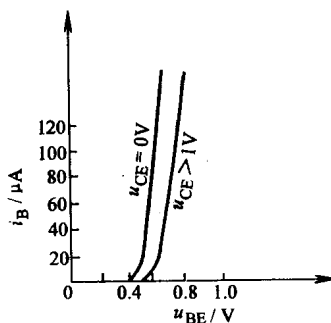


图 1-15 NPN 三极管 3DG6 的
输入特性曲线