

MONI DIANZI JISHU YU SHIXUN

模拟电子技术与实训

主编 王 平 李常峰 贾玉凤 孟宪雷

主审 陈立成



山东科学技术出版社

>>> 编审委员会

主任：王杰恩 王兆晶 杜喜亮

副主任：任东 王涛 于元涛 孟宪雷 纪克玲

编委：(按姓氏笔画排序)

马茂军	王菲	王成安	王平	刘永海	许胜利
李常峰	李加升	吴海燕	张彦江	陆民	邵伯进
陈延祥	周佩翔	姚丙申	姚永刚	高学民	韩莉
燕居怀	魏玉梅				

策划：王洪胜

>>> 本书编审人员

主编：王平 李常峰 贾玉凤 孟宪雷

副主编：(按姓氏笔画排序)

王成安	王印昌	王卫东	吕庚	刘春霞	刘圣涛
纪静波	李亚楠	李秉玉	李文革	李翠	杨清林
吴海燕	张远	张斌	张彦江	陈波	邵伯进
武玉升	范医鲁	姚丙申	郭玉强	常书惠	董仲凤
韩莉					

编者：(按姓氏笔画排序)

马建民	王玉梅	王成安	王平	王印昌	王丹丹
王建强	王卫东	王翠萍	田玉丽	曲海波	吕庚
刘春霞	刘圣涛	纪静波	李亚楠	李常峰	李秉玉
李敏	李文革	李翠	杨清林	吴海燕	宋青龙
张远	张斌	张彦江	张毅	陈莉	陈波
邵伯进	武玉升	范医鲁	林光	孟宪雷	姚丙申
贾玉凤	殷淑英	栾红	郭玉强	郭延伟	曹承军
常书惠	阎学敏	董培良	董仲凤	董圣英	韩莉

主审：陈立成

NEIRONG TIYAO

内 容 提 要

本书是根据高职、高专培养目标的要求,本着理论与工程实践相结合、理论够用、应用为主、注重实践的教学思想而编写的。编写过程中,注意反映模拟技术在工程应用中的新知识、新技术、新器件、新发展,力求简明扼要、通俗易懂,使内容更切合高职、高专学生的特点。书中给出了大量的例题、习题和主要习题的答案以及各模块的小结,便于学生自学。

全书由半导体二极管、半导体三极管及其基本电路、场效应管及其基本电路、负反馈放大电路、集成运算放大电路、信号发生电路、功率放大电路、直流稳压电源等8个模块组成。

本书可以作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校和本科院校开办的二级职业技术学院以及民办高校的电子、电气、计算机、通信、自动化、机电一体化等专业的教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

前言

P R E F A C E

本书是根据高职、高专培养目标的要求,本着理论够用、应用为主、注重实践的教学思想而编写的,可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校和本科院校开办的二级职业技术学院以及民办高校的电子、电气、计算机、通信、自动化、机电一体化等专业的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书的编写人员均为高职、高专从事电子技术教学的一线教师,具有多年讲授《模拟电子技术》课的丰富经验。在保证必要的基本知识和技能的前提下,力求简明扼要、通俗易懂,删除了繁杂的数学公式推导过程,注重理论与工程实践相结合,高职教学特色突出。

编写本书的指导思想:

- (1) 遵循高职高专的教学规律,由浅入深,由易到难,由简到繁,循序渐进;
- (2) 将模拟电子技术的知识体系分成了8个模块,模块下分为若干个任务,任务中有任务分析和任务分解,便于教师教和学生学;
- (3) 增加了实训模块内容,以达到理论与实践相结合的目的,注重学生技能的培养;
- (4) 注重反映模拟电子技术在工程应用中的新知识、新技术、新器件、新发展;
- (5) 每一模块都有知识点、能力点分析,并且给出了大量的例题、习题和主要习题的参考答案以及模块小结,便于学生自学。

本书按照50~70学时左右编写,全书共分8个模块。模块一为半导体二极管,主要包括4项任务;模块二为半导体三极管及其基本电路,主要包括8项任务;模块三为场效应管及其基本电路,主要包括4项任务;模块四为负反馈放大电路,主要包括4项任务;模块五为集成运算放大电路,主要包括4项任务;模块六为信号发生电路,主要包括2项任务;模块七为功率放大电路,主要包括5项任务;模块八为直流稳压电源,主要包括5项任务。

由于时间仓促,教材内容尚有待改进之处,恳切希望各位读者批评指正。

编者

目录

CONTENTS

模 拟 电 子 技 术 与 实 训

模块一 半导体二极管	(1)
任务一 PN结	(1)
任务二 半导体二极管	(6)
任务三 常用二极管简介	(11)
任务四 半导体二极管的应用	(13)
小结	(14)
思考与练习题	(15)
实训 用万用表测量半导体二极管	(16)
模块二 半导体三极管及其基本电路	(17)
任务一 半导体三极管	(17)
任务二 放大电路概述	(23)
任务三 共发射极基本放大电路	(25)
任务四 稳定静态工作点的放大电路	(33)
任务五 共集电极放大电路	(36)
任务六 共基极基本放大电路	(39)
任务七 多级放大电路	(42)
任务八 放大电路的频率特性简介	(46)
小结	(49)
思考与练习题	(50)
实训 半导体三极管放大电路的安装	(52)
模块三 场效应管及其基本电路	(54)
任务一 结型场效应管	(54)
任务二 绝缘栅场效应管	(60)

任务三 晶闸管	(65)
任务四 场效应管基本放大电路	(70)
小结	(72)
思考与练习题	(72)
实训 场效应管放大器	(73)
模块四 负反馈放大电路	(77)
任务一 负反馈的基本概念	(77)
任务二 负反馈放大电路的基本类型及分析	(80)
任务三 负反馈对放大电路性能的影响	(84)
任务四 深度负反馈放大电路电压放大倍数的估算	(87)
小结	(89)
思考与练习题	(89)
实训 负反馈放大电路性能分析研究	(90)
模块五 集成运算放大电路	(93)
任务一 集成运算放大器中的电流源电路	(93)
任务二 差分放大电路	(96)
任务三 集成运算放大器	(107)
任务四 集成运算放大器的基本运算	(111)
小结	(117)
思考与练习题	(118)
实训一 差分放大电路	(121)
实训二 基本集成运算电路	(124)
模块六 波形产生电路	(128)
任务一 正弦波产生电路	(128)
任务二 非正弦波产生电路	(137)
小结	(140)
思考与练习题	(140)
实训 函数信号发生器的制作	(141)

模块七 功率放大电路	(143)
任务一 功率放大电路的特点和分类	(143)
任务二 变压器耦合功率放大电路	(145)
任务三 OTL 功率放大电路	(149)
任务四 OCL 功率放大电路	(155)
任务五 集成功率放大电路简介	(157)
小结	(159)
思考与练习题	(160)
实训 集成功率放大器 LM386 的应用	(162)
模块八 直流稳压电源	(163)
任务一 小功率整流与滤波电路	(163)
任务二 稳压二极管稳压电路	(170)
任务三 串联型稳压电路	(171)
任务四 开关稳压电源	(174)
任务五 集成稳压电源	(177)
小结	(180)
思考与练习题	(181)
实训 串联型稳压电源	(182)
部分习题答案	(185)
参考文献	(188)

模块 一 半导体二极管

知识点

- ★ PN 结、PN 结单向导电性；
- ★ 半导体二极管的伏安特性；
- ★ 稳压二极管；
- ★ 半导体二极管的应用。

能力点

- ★ 半导体二极管的伏安特性及其主要参数；
- ★ 半导体二极管的应用。

任务一 PN 结



任务分析

模拟电子技术基础课程主要介绍半导体器件电路,PN 结是半导体器件的最重要的组成部分,学习半导体器件必须对 PN 结有一个基本的了解。本节的主要任务包括本征半导体和本征激发、N 型半导体和 P 型半导体、PN 结的形成、PN 结的单向导电性,重点掌握 PN 结的单向导电性。



任务分解

1. 本征半导体

自然界的物质,按其导电性能的不同,大体可分为 3 类。一类是导电性能良好的物质,称为导体(其电阻率低于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$),金属一般都是导体,如金、银、铜、铝、铁等;另一类是在一般条件下不能导电的物质,称为绝缘体(其电阻率高于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$),如陶瓷、玻璃、橡胶、塑料等;还有一类物质其导电性介于导体和绝缘体之间,称为半导体(其电阻率在 $10^{-3} \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间),如硅、锗、砷化镓及某些氧化物、硫化物等。

半导体之所以引起人们的注意,得到广泛的应用,主要原因是半导体具有一些重要的特性。例如,当半导体受到外界光和热作用时,其导电能力会显著变化;在纯净的半导体中掺入某些微量的其他元素时,它的导电性会明显增强。这些特性都与半导体本身的结构有关。

制作半导体器件时,用得最多的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge)。硅和锗都是单晶体,它

们的原子按一定的规则整齐地排列,形成晶格。通常把这种非常纯净的且原子排列整齐的半导体称为本征半导体。

硅或锗原子构成的单晶体,原子之间靠得很紧,原来分属于每个原子的价电子就会受到相邻原子的影响而为两个相邻原子所共有。我们把这种共用电子形成的结合作用称为共价键。硅或锗原子都有 4 个价电子,每个原子的 4 个价电子与周围的 4 个原子的价电子形成 4 个共价键。图 1.1 所示为硅或锗单晶体的共价键结构示意图。每个原子的周围就相当于有 8 个价电子,形成了稳定的原子结构。

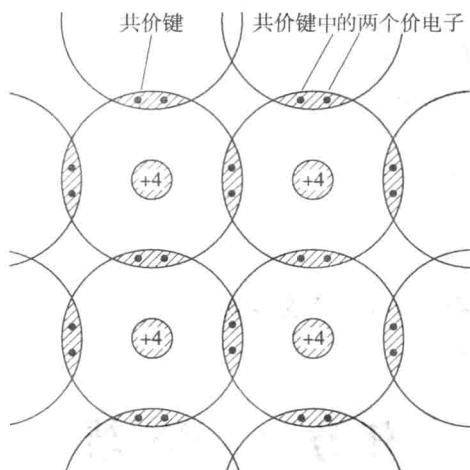


图 1.1 硅或锗单晶体的共价键结构示意图

本征半导体在 -273.15°C (绝对温度为零度) 和没有其他影响的条件下,由于共价键中的价电子被束缚着,而不能导电,相当于绝缘体。但是本征半导体中的价电子不像绝缘体中的电子那样被紧紧束缚着,在室温下,有些价电子受到热或光的作用,获得了足够的能量而挣脱共价键的束缚,成为自由电子,这种现象称为本征激发。在价电子挣脱共价键束缚成为自由电子后,共价键中就留下了一个空位,称为空穴。

由于本征激发而出现了空穴,使原来是电中性的原子因失去带负电的电子而成为带正电的离子。这种正离子固定在晶格中,不能移动,它由原子和空穴构成,可以认为空穴带正电,其电量与电子的电量相等。本征激发时,电子和空穴成对产生,称电子—空穴对,也就是说,在激发出一个带负电的电子的同时,相应地产生一个带正电的空穴,如图 1.2 所示。

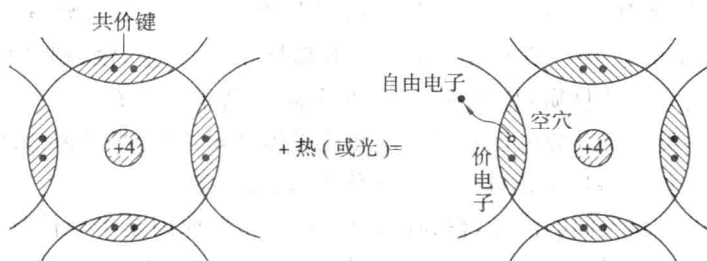


图 1.2 本征激发产生电子—空穴对

当本征半导体中出现空穴后,在外加电场或其他能量源的作用下,邻近的价电子就能较容易地填补到这个空穴中,而这个价电子所在的位置上又留下新的空穴,其他的价电子又可填补到这个新的空穴中,这就形成了空穴的迁移,也就是正电荷的运动,如图 1.3 所示。本征半导体中的自由电子和空穴都可以携带电荷作定向移动,形成电子流和空穴流。所以我们把电子和空穴统称为载流子。半导体中的电流由自由电子流和空穴流两部分构成,而电子流和空穴流的运动方向是相反的。

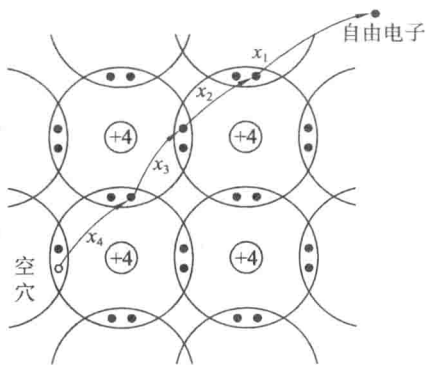


图 1.3 电子和空穴的移动

本征半导体在常温下产生的电子—空穴对很少,所以导电性相当差。然而,当环境温度升高时,热激发使电子—空穴对数目显著增多,其导电性也就明显提高,这就是半导体的导电性随温度变化而明显变化的原因。

2. 杂质半导体

本征半导体的导电能力很差,但在本征半导体中掺入微量的其他元素(称杂质),就会使它的导电性能发生显著的变化,这种掺杂的半导体称为杂质半导体。按掺入杂质性质的不同,它可分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类。

(1) N 型半导体

在硅(或锗)本征半导体中掺入微量的 5 价元素,如磷(或锑)等,就会形成 N 型半导体。

由于掺入杂质的原子数与整个半导体的原子数相比,其数量非常少,半导体的晶体结构基本不变,只是晶格中某些硅(或锗)原子的位置被磷原子所代替。磷原子有 5 个价电子,其中 4 个价电子与相邻的 4 个硅原子的价电子形成共价键后,还多余 1 个价电子,如图 1.4 所示。这个多余的价电子虽不受共价键束缚,但仍受磷原子核正电荷的吸引,它只能在磷原子周围活动,不过它所受的吸引力比共价键的束缚作用要微弱得多,只要获取较小的能量就能挣脱磷原子的束缚,成为自由电子。可见,硅半导体中每掺入 1 个磷原子,就产生 1 个自由电子。

在 N 型半导体中,除了掺杂产生自由电子外,其本身仍存在本征激发,而产生电子—空穴对。N 型半导体因掺杂而产生的自由电子数比空穴数大得多,所以自由电子称为多数载流子(简称多子),而空穴称为少数载流子(简称少子)。N 型半导体以自由电子导电为主,所以又称电子型半导体。

当磷原子失去 1 个价电子后就成为正离子。它不能移动,不能参与导电。但它在产生 1 个自由电子的同时并不产生新的空穴,这是它与本征激发的不同点。图 1.5 为 N 型半导体载流子和杂质离子的示意图,图中用 $\oplus$ 表示带正电荷的离子(正离子)。

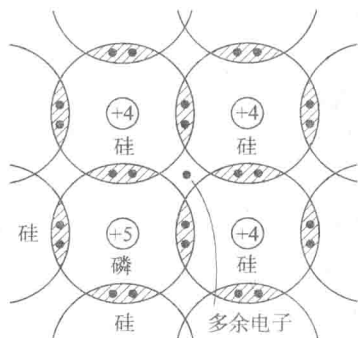


图 1.4 N 型硅半导体中的共价键结构

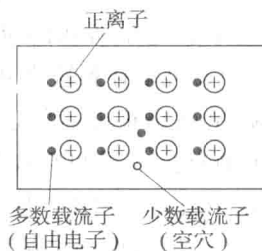


图 1.5 N 型半导体载流子和杂质离子示意图

(2) P 型半导体

在硅(或锗)本征半导体中掺入微量的三价元素,如硼(或铟)等,就会形成 P 型半导体。

硼原子只有 3 个价电子,当它取代半导体硅原子在晶格中的位置时,与周围 4 个硅原子的价电子组成共价键,因缺少 1 个价电子,其中 1 个共价键内出现 1 个空穴,那么相邻共价键中的价电子,只要获得较小的能量,就能挣脱束缚,去填补这个空穴,使硼原子成为不能移动的负离子。原来硅原子的共价键因缺少 1 个电子而产生了空穴,如图 1.6 所示。可见,硅半导体中每掺入 1 个硼原子,就会产生 1 个空穴。

控制掺入杂质的多少就可控制 P 型半导体中空穴的多少。此外,P 型半导体中也存在本征激发而产生少量的电子—空穴对。然而,在 P 型半导体中,空穴数比电子数要大得多,即空穴是多子,电子是少子。它的导电性主要取决于空穴数,所以又称它为**空穴型半导体**。图 1.7 为 P 型半导体载流子和杂质离子的示意图,图中用 $\ominus$ 表示杂质原子因提供了一个空穴而成为带负电荷的离子(负离子),它不能移动,不能参与导电。

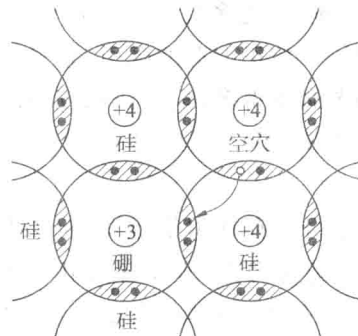


图 1.6 P 型硅半导体中的共价键结构

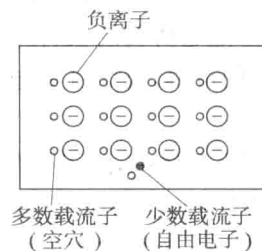


图 1.7 P 型半导体载流子和杂质离子示意图

3. PN 结的形成

用掺杂工艺,在一块本征半导体的两边,掺以不同的杂质,使一边成为 N 型半导体,另一边成为 P 型半导体,则在两种不同类型的半导体的交界处就会形成一个特殊导电薄层,称为 PN 结。现结合图 1.8 来说明 PN 结的形成。

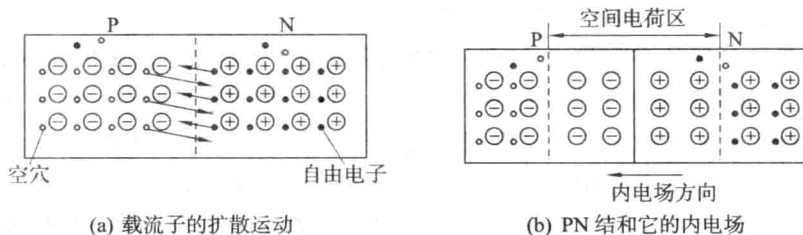


图 1.8 PN 结的形成

(1) 载流子的扩散运动和内电场的建立

在 P 型半导体中,有大量的空穴和少量的电子,而 N 型半导体中则相反,多数载流子是电子,少数载流子是空穴。P 区中的空穴密度大于 N 区,而 N 区中的电子密度大于 P 区,如图 1.8(a)所示。由于电子和空穴浓度差的原因,在交界处,便产生电子和空穴的扩散运动。靠近 N 区界面的电子向 P 区扩散,并与 P 区空穴复合,在 N 区界面处,剩下不能移动的正离子,形成一个正电荷层。同样,P 区的空穴向 N 区扩散,并与 N 区的电子复合,在 P 区界面剩下不能移动的负离子,形成一个负电荷区。结果在 PN 结边界附近形成一个空间电荷区,边界的左边带负电,右边带正电。因此,在 PN 结中产生一个内电场,内电场的方向由 N 区指向 P 区,如图 1.8(b)所示。空间电荷使交界面两侧的电中性被破坏,但是,空间电荷区以外的 P 区和 N 区仍呈电中性。

(2) 内电场对载流子运动的作用

随着载流子扩散运动的进行,空间电荷区加宽,内电场加强。内电场的存在对空穴和电子的扩散运动起阻碍作用,P 区带正电的空穴继续向 N 区扩散要受到电场的阻力,N 区带负电的电子继续向 P 区扩散也要受到电场的阻力。另外,内电场又推动 P 区的少数(电子)向 N 区运动,N 区的少数(空穴)向 P 区运动,这种在电场力作用下载流子的运动称为漂移运动。漂移运动的结果使空间电荷区变窄,内电场削弱,这样又将导致多子扩散运动的加强。所以,漂移运动与扩散运动是 PN 结中载流子运动的主要矛盾。

(3) PN 结的形成

由以上分析可见,载流子在 P 区和 N 区的交界面同时发生着扩散运动和漂移运动。开始时,扩散运动占优势;随着扩散的进行,PN 结的空间电荷区不断加宽,电场增强,电场引起的漂移运动也不断增强。当两者作用相等时,就达到了动态平衡,形成了一个宽度稳定的空间电荷区,这就是 PN 结。这时 PN 结中没有电流(从宏观看电流为零,并不意味着在任何时候都没有载流子流过 PN 结)。空间电荷区内缺少载流子,结内电阻率很高,因此 PN 结是个高阻区,因结内载流子很少,所以又常称为耗尽层。PN 结很薄,一般为 0.5 微米左右。

4. PN 结的单向导电性

在了解了 PN 结内部载流子的运动规律后,下面进一步分析 PN 结在外部电源作用下所表现出来的一个重要特性,即单向导电特性。

(1) PN 结外加正向电压

如图 1.9(a)所示,给 PN 结加上正向电压,即外电源正极接 P 区,负极接 N 区。此时称 PN 结加正向偏置,简称正偏。由于外加电压在耗尽层中所建立的外电场与耗尽层中的内电

场方向相反,从而削弱了空间电荷所产生的内电场,使空间电荷区变窄,有利于多数载流子的扩散运动,于是P区的多数载流子(空穴)能顺利通过PN结耗尽层扩散到N区,N区的多数载流子(电子)能顺利通过PN结耗尽层扩散到P区。扩散结果会在P区一侧积累大量的电子,N区一侧积累大量的空穴。这些积累的电子和空穴是不能久留的,P区一侧积累的电子向P区体内扩散,并和P区中的多数载流子空穴复合而消失;而N区一侧积累的空穴向N区体内扩散,并和N区中的多数载流子电子复合而消失。同时,外电源不断向P区和N区补充多数载流子(空穴和自由电子),形成正向电流 I_F ,此时PN结呈低阻导通状态。在一定范围内,外加电压 U_F 越大,正向电流 I_F 越大。为了限制 I_F 过大,回路中串入了限流电阻 R 。

(2) PN 结外加反向电压

如图 1.9(b)所示,如果给PN结外加一个反向电压,即外电源正极接N区,负极接P区,此时称PN结加反向偏置,简称反偏。这时,外电场与内电场的方向一致,空间电荷区的电场增强,耗尽层的厚度比动态平衡时加宽,使多数载流子的扩散运动更难进行。

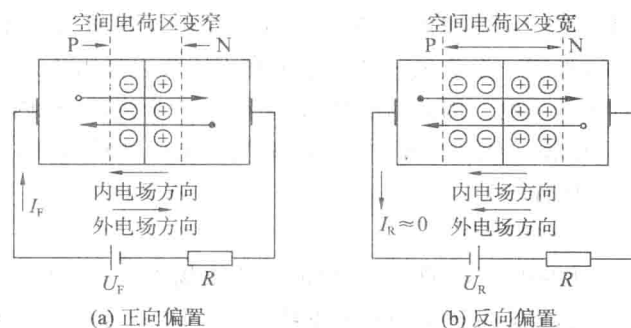


图 1.9 PN 结的单向导电性

应当注意到,P区和N区都有少数载流子(即P区中的电子和N区中的空穴),空间电荷区的电场增强后却有利于少数载流子的漂移运动。此时流过PN结的电流,主要是少数载流子的漂移运动形成的,其方向由N区到P区,称为反向电流 I_R 。当温度不变时,少数载流子的浓度不变, I_R 几乎不随外加电压而变化,故又称为反向饱和电流 I_S 。在常温下,少数载流子的浓度很低,所以反向电流很小,PN结呈高阻状态。

少数载流子是由本征激发(和温度有密切关系)产生的,所以PN结的反向电流是随温度而变化的。例如,当温度由 25°C 增大到 95°C 时,反向电流增大 100 倍。因此,制造和使用半导体器件时,必须考虑环境温度对半导体元件特性的影响这一重要因素。

由上面分析可知,PN结正偏时呈导通状态,正向电阻很小,正向电流很大;PN结反偏时呈截止状态,反向电阻很大,反向电流很小,这就是PN结的单向导电性。

任务二 半导体二极管



任务分析

半导体二极管是最基本的电子器件之一。本任务的主要内容有半导体二极管的结构及

分类、半导体二极管的伏—安特性、半导体二极管的主要参数。要求了解半导体二极管的结构及分类、半导体二极管的伏—安特性、半导体二极管的主要参数,重点掌握半导体二极管的伏—安特性。

任务分解

1. 半导体二极管的结构及分类

在 PN 结的 P 区引出一个电极称为正极,也叫阳极,用符号 a 表示;在 PN 结的 N 区引出一个电极称为负极,也叫阴极,用符号 k 表示。再将这个 PN 结封装起来就形成了半导体二极管,也称晶体管二极管,简称二极管。符号如图 1.10 所示,箭头方向表示二极管正向导通时电流的方向。二极管的外形如图 1.11 所示。



图 1.10 二极管的符号

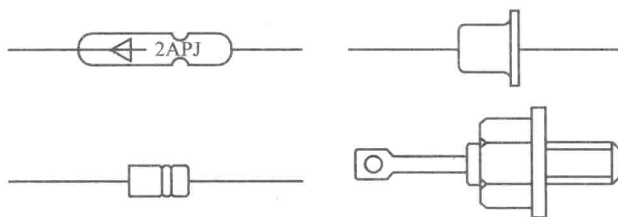


图 1.11 二极管的外形举例

二极管的分类方法很多,一般有以下几种。

(1) 按半导体材料分

可分为硅二极管、锗二极管、砷化镓二极管等。

(2) 按 PN 结的结构分

可分为点接触型、面接触型、平面型等,如图 1.12 所示。点接触型二极管的 PN 结结面积小,结电容小,可工作在高频或超高频范围,但它允许通过的正向电流也小;面接触型二极管的 PN 结结面积大,结电容大,只能工作在低频范围,但它允许通过的正向电流也大,可用于大功率整流电路;平面二极管常在数字电路中作开关用。

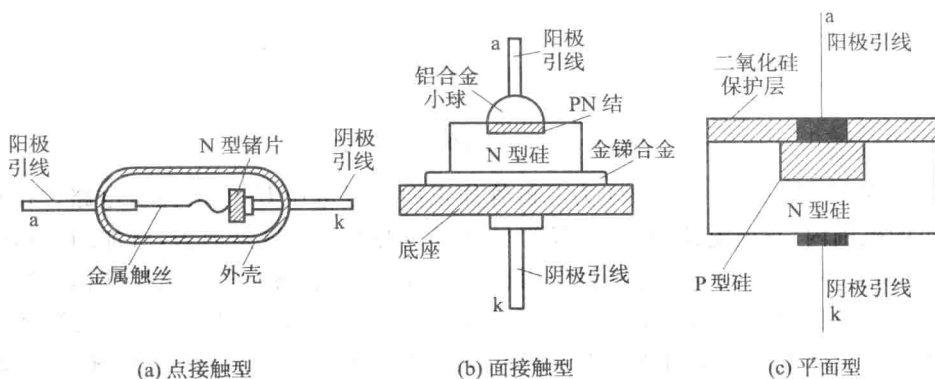


图 1.12 二极管的结构示意图

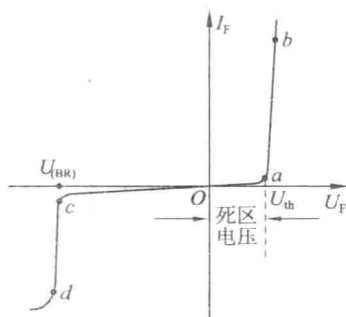
(3) 按用途分

可分为普通二极管、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、发光二极管等。

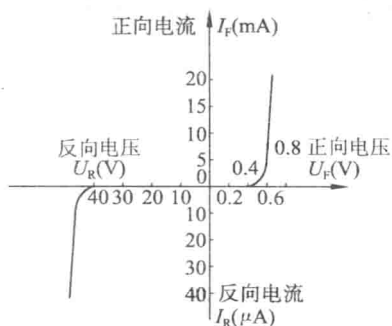
2. 半导体二极管的伏—安特性

(1) 二极管的伏—安特性曲线

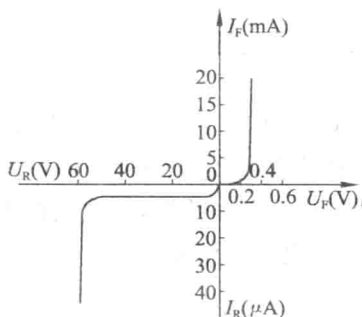
加到二极管两端的电压与流过二极管电流的关系曲线,叫做二极管的伏—安特性曲线,简称为二极管的伏—安特性。二极管的伏—安特性可以用实验的方法逐点测绘得出,也可以从图示仪荧光屏上直接观察。图 1.13(a)是二极管的伏—安特性示意图,我们把它分成三个部分来讨论。



(a) 伏—安特性示意图



(b) 硅二极管 2CP10 的伏—安特性



(c) 锗二极管 2AP15 的伏—安特性

图 1.13 二极管的伏安—特性

① 正向特性(Oab 段):图 1.14 为二极管加正向偏置电压 U_F 时的测试电路。在正向电压比较小的范围内,正向电流很小,二极管呈现很大的电阻。这是因为,所加的正向电压较小时,外电场就小,它对内电场的抵消作用也小。这时,内电场对多子的扩散仍有很大的阻碍作用,因此,由扩散而通过 PN 结的多子就非常少,形成的电流也很小,二极管几乎不导通。常把这个正向电压较小的范围称为死区,相应的电压称为死区电压,见图 1.13(a)曲线中的 Oa 段。死区电压的最大值称为门限电压(又称为导通电压或阈值电压),用 U_{on} 表示。硅管的门限电压 U_{on} 约为 0.5 V,而锗管的 U_{on} 约为 0.1 V。当外加电压超过 U_{on} 值以后,内电场被大大削弱,PN 结的结电阻迅速减小,正向电流迅速增大,这时二极管处于正向导通状

态,见图 1.13(a)曲线中的 ab 段。二极管正向导通时,硅管的正向电压降为 $0.6\sim 0.8\text{ V}$ (通常取 0.7 V),锗管的正向电压降为 $0.2\sim 0.3\text{ V}$ (通常取 0.2 V)。

② 反向特性(Oc 段):图 1.15 为二极管加反向偏置电压 U_R 时的测试电路。在 U_R 由零逐渐增大的过程中,PN 结的阻挡层也随之加宽,半导体中只有少数载流子能漂移过 PN 结,形成反向电流 I_R 。反向电压 U_R 虽不断增大,但由于在环境温度一定的条件下,少子的数目几乎是一定的,反向电流 I_R 也就几乎不变,如图 1.13(a)曲线中的 Oc 段所示。对于小功率硅管, I_R 为零点几微安,锗管的 I_R 为十几微安。但是,当温度升高时,本征激发使少子的数目急剧增加,反向饱和电流将随之迅速增大。

③ 反向击穿特性(cd 段):在一定温度下,当二极管加的反向电压 U_R 高到一定程度时,反向电流将会突然急剧增大,这种现象叫做二极管的反向击穿,如图 1.13(a)曲线中的 cd 段所示。二极管反向击穿时的电压称为反向击穿电压,用符号 $U_{(BR)}$ 表示。二极管在正常使用时应避免出现反向击穿,因此所加的反向电压应小于 $U_{(BR)}$ 。二极管反向击穿时并不一定损坏,只有在没有限流措施时,反向电流 I_R 超过一定限度,PN 结过热,才会烧坏,造成永久性损坏。

采用不同材料、不同结构和不同工艺制成的二极管,其伏—安特性曲线基本相似,是非线性的,所以二极管是非线性器件。

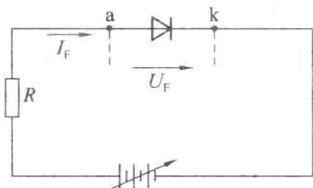


图 1.14 二极管接正向偏置电压的电路

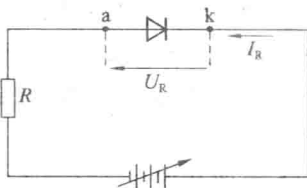


图 1.15 二极管接反向偏置电压的电路

(2) 二极管(PN 结)的伏—安特性方程

根据理论分析,PN 结两端的电压 U 和流过 PN 结的电流 I 之间的关系可用下列方程表示:

$$I = I_S (e^{U/U_T} - 1) \quad (1.1)$$

其中, I_S 为 PN 结的反向饱和电流; $U_T = \frac{kT}{q}$ 称为温度的电压当量,其中 k 为玻耳兹曼常数($1.38 \times 10^{-23}\text{ J/K}$), T 为热力学温度, q 为电子电量($1.602 \times 10^{-19}\text{ C}$),在常温($T = 300\text{ K}$)时, $U_T \approx 26\text{ mV}$ 。 U 和 I 的参考方向如图 1.16 所示,故正偏时 U 和 I 为正值,反偏时 U 和 I 为负值。

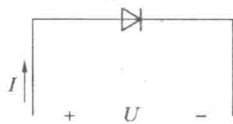


图 1.16 U 和 I 的参考方向

由式(1.1)可见,当 $U = 0$ 时, $I = 0$;当正偏($U > 0$)时,只要 U 大于 U_T 几倍,则 $I \approx I_S e^{\frac{U}{U_T}}$, I 随 U 按指数规律变化;当反偏($U < 0$)时,只要 $|U|$ 大于 U_T 几倍,则 $I \approx -I_S$,即 I 与外加电压 U 无关,且 I 的实际方向与参考方向相反。

3. 半导体二极管的主要参数

二极管的特性除了用伏—安特性曲线描述外,还可以用特定的参数来描述,它是合理选用和正确使用二极管的依据。二极管的主要参数有:

(1) 最大整流电流 I_{FM}

它是二极管长期工作允许通过的最大正向平均电流,由 PN 结的面积和散热条件所决定,使用时不能超过此值,否则可能烧坏二极管。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM}

它是指允许加在二极管两端的反向电压的最大值(峰值)。为安全起见,最高反向工作电压一般小于击穿电压的一半。

(3) 反向电流 I_R

它是在室温下,二极管两端加上规定的反向电压时的反向电流,其值越小,二极管的单向导电性能越好。其值随温度升高而增加,在高温工作环境中要特别注意。

(4) 最高工作频率 f_M

二极管工作在高频时,由于结电容的存在,其单向导电性能变差,甚至可能失去单向导电性,为此规定一个最高工作频率。它主要决定于 PN 结结电容的大小,结电容越大,则 f_M 愈低。

此外,二极管还有正向压降、结电容及最高结温等参数,不再一一说明。

【例 1.1】 电路如图 1.17(a) 所示,输入电压 $u_i = 4\sin\omega t$ V, 其波形如图 1.17(b) 所示。求输出电压 u_o 的波形(二极管视为理想器件)。

解: 当输入电压的幅度小于 2 V 时,二极管反偏截止,电源电压 E 对输出无影响,此时输出电压 u_o 与输入电压 u_i 相同。当输入电压的幅度大于 2 V 时,二极管正偏导通,输出电压 u_o 等于电源电压 $E = 2$ V。

电阻 R 起限流作用,输出电压与输入电压的差值就降在电阻 R 上。输出电压波形如图 1.17(c) 所示。

【例 1.2】 电路图如图 1.18 所示,求输出电压 U_o 。(二极管视为理想器件)。

解: 假设将二极管 D_1 、 D_2 从电路中断开,则 A_1 、 B_1 两点间的电压为 15 V, A_2 、 B_2 两点间的电压为 12 V,即 D_1 、 D_2 的正向偏压分别为 15 V 和 12 V。

在原电路中, D_1 、 D_2 不可能同时导通,因为 D_1 两端的电压大于 D_2 两端的电压,所以 D_1 优先导通,将输出端的电压钳位在 6 V,使二极管 D_2 反偏截止。因此输出电压 $U_o = 6$ V。

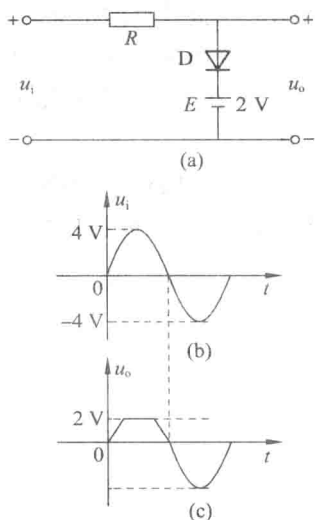


图 1.17 例 1.1 电路

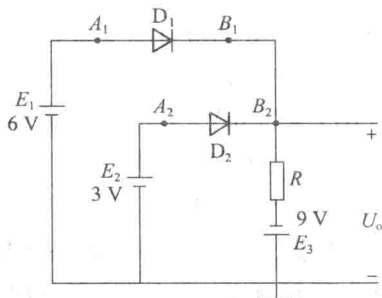


图 1.18 例 1.2 电路