

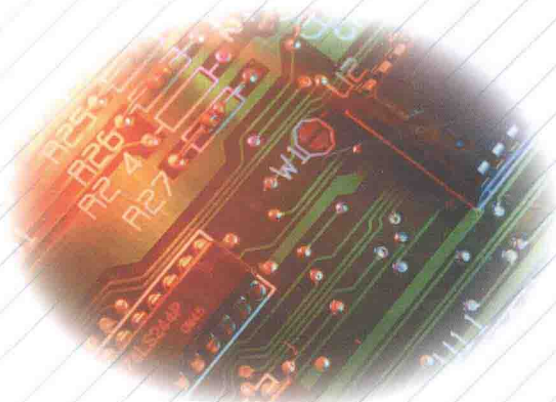


高职高专工科类精品教材

模拟电子技术

MONI DIANZI JISHU

主编◎陶玉贵



中国科学技术大学出版社



高职高专工科类精品教材

模拟电子技术

MONI DIANZI JISHU

主 编 陶玉贵

编写人员 (以姓氏笔画为序)

马玉清 王 冠 白志青

周华龙 陶玉贵 徐红霞

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是根据教育部制定的高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求,本着理论够用、应用为主、注重实践的教学理念,并结合编者长期讲授模拟电子技术课程的丰富教学实践经验编写而成的。

全书由半导体二极管及其应用电路、半导体三极管及其放大电路、场效应管及其放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器、信号产生电路、功率放大电路、直流稳压电源、晶闸管及其应用电路、模拟电路仿真技术等 10 章和附录组成。

本书从工程应用出发,删繁就简,突出重点。内容上循序渐进、由浅入深、结构严谨,且概念准确、语言简洁。书中每章都有思考题、小结和习题,以便因材施教,提高教学效果。

本书可作为高职高专院校、成人高校、民办高校及本科院校二级职业技术学院电子、电气、通信、计算机、自动化等专业模拟电子技术课程的教材,也可供相关专业的教师和从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/陶玉贵主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2010.11
ISBN 978-7-312-02610-2

I. 模… II. 陶… III. 模拟电路—电子技术—高等学校:技术学校—教材
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 152550 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
网址: <http://press.ustc.edu.cn>
印刷 安徽省瑞隆印务有限公司
经销 全国新华书店
开本 710 mm×960 mm 1/16
印张 23.25
字数 469 千
版次 2010 年 11 月第 1 版
印次 2010 年 11 月第 1 次印刷
定价 35.00 元

前 言

本书是根据教育部制定的高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求,本着理论够用、应用为主、注重实践的教学理念,结合编者多年讲授模拟电子技术课程的丰富教学经验和教学反馈编写而成的,可作为高职高专院校电子、计算机、通信、自动化等专业模拟电子技术课程教材。

模拟电子技术是电子、电气、通信及自动控制等专业的一门重要专业基础课。为适应高职高专教育培养应用型高技能人才的需要,本教材在编写过程中突出了以下特点:

(1) 在保证基础理论知识够用的前提下,注重理论与实践相结合,以应用为目的,删除繁琐的公式推导和集成电路的内部结构,以掌握定性分析方法为主要目标,力求授人以渔。

(2) 根据高职、高专培养目标的要求,从工程应用出发,注意循序渐进、由浅入深、结构严谨,力求概念准确、语言简洁。

(3) 为适应现代电子技术迅速发展的需要,在保持电子技术理论完整性的基础上,做到教材内容与时俱进,尽可能引入电子技术领域中的新技术、新器件及新成果。

(4) 顺应现代电子技术的发展潮流,充分利用计算机的辅助设计能力,将理论分析与虚拟仿真有机结合,增强感性认识,提高教学效果。

(5) 书中每节有思考题,每章有小结和习题,力求从结构和内容上突出本课程的特点,做到有层次,便于因材施教。

全书由半导体二极管及其应用电路、半导体三极管及其放大电路、场效应管及其放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器、信号产生电路、功率放大电路、直流稳压电源、晶闸管及其应用电路、模拟电路仿真技术等 10 章和附录组成。本教材理论教学参考学时为 70 学时,部分章节内容可根据各专业要求及学时情况酌情取舍。

本书由芜湖信息技术职业学院陶玉贵担任主编。第 6、9、10 章和附录部分由陶玉贵编写,第 1、8 章由滁州职业技术学院周华龙编写,第 2、3 章由安徽工商职业

学院马玉清编写,第4、5章由阜阳职业技术学院徐红霞编写,芜湖信息技术职业学院王冠和安徽工贸职业技术学院白志青共同编写了第7章,全书由陶玉贵统稿。

本书在编写出版过程中得到中国科学技术大学出版社和芜湖信息技术职业学院领导和老师的大力支持与帮助,在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者给予批评指正,不胜感激。

编 者

2010年6月

目 录

前言	(i)
第 1 章 半导体二极管及其应用电路	(1)
1.1 半导体基础知识	(1)
1.2 半导体二极管	(6)
1.3 二极管电路的分析方法	(14)
1.4 二极管的检测与应用	(17)
本章小结	(24)
习题 1	(25)
第 2 章 半导体三极管及其放大电路	(29)
2.1 半导体三极管	(29)
2.2 放大电路基本知识	(39)
2.3 放大电路的基本分析方法	(43)
2.4 三种基本组态放大电路	(53)
2.5 多级放大电路	(63)
2.6 放大电路的频率特性	(69)
本章小结	(77)
习题 2	(78)
第 3 章 场效应管及其放大电路	(86)
3.1 概述	(86)
3.2 场效应管	(88)
3.3 场效应管的检测与使用	(99)
3.4 场效应管放大电路	(103)
本章小结	(110)
习题 3	(111)

第 4 章 负反馈放大电路	(116)
4.1 反馈的基本概念	(116)
4.2 负反馈放大电路的基本类型及分析	(121)
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	(125)
4.4 深度负反馈放大电路的分析	(130)
本章小结	(134)
习题 4	(135)
第 5 章 集成运算放大器	(140)
5.1 差分放大电路	(140)
5.2 集成运算放大器	(147)
5.3 基本运算电路	(153)
5.4 有源滤波电路	(160)
本章小结	(166)
习题 5	(167)
第 6 章 信号产生电路	(172)
6.1 正弦波振荡电路的基本原理	(172)
6.2 RC 正弦波振荡电路	(174)
6.3 LC 正弦波振荡电路	(179)
6.4 石英晶体振荡电路	(185)
6.5 非正弦波信号产生电路	(189)
本章小结	(199)
习题 6	(200)
第 7 章 功率放大电路	(206)
7.1 功率放大电路概述	(206)
7.2 乙类互补对称功率放大电路	(210)
7.3 甲乙类互补对称功率放大电路	(216)
7.4 集成功率放大电路	(222)
本章小结	(230)
习题 7	(231)
第 8 章 直流稳压电源	(236)
8.1 单相整流与滤波电路	(236)
8.2 串联型稳压电路	(248)
8.3 线性集成稳压器	(256)

8.4 开关集成稳压电路	(262)
本章小结	(269)
习题 8	(270)
第 9 章 晶闸管及其应用电路	(274)
9.1 晶闸管	(274)
9.2 晶闸管应用电路	(284)
9.3 晶闸管的保护	(295)
本章小结	(298)
习题 9	(299)
第 10 章 模拟电路仿真技术	(301)
10.1 电路仿真软件 Multisim 2001 概述	(301)
10.2 Multisim 的器件库和虚拟仪器仪表	(312)
10.3 模拟电路 EDA 仿真实例	(328)
本章小结	(342)
习题 10	(343)
附录 1 常用电子元件使用知识	(344)
附录 2 半导体分立器件型号命名法	(357)
附录 3 模拟集成电路简介	(360)
参考文献	(363)

第 1 章 半导体二极管及其应用电路

学习目标

- 熟悉 P 型和 N 型半导体的构成；
- 掌握 PN 结的单向导电性、二极管的伏安特性及主要技术参数；
- 掌握二极管的分析方法；
- 领会二极管的检测技巧，熟悉二极管的初步应用。

1.1 半导体基础知识

物体按其导电性能可分为三类：导体、绝缘体和半导体。导电能力介于导体和绝缘体之间的物体叫半导体，常用的半导体材料有硅、锗、硫化镉等。物体的导电性是由物体内部可自由移动的带电粒子的多少来决定的，这种能在物体内部自由移动的带电粒子称为载流子。物体内部载流子的浓度越大，物体的导电能力越强。像金、银、铜、铝等金属导体，其内部含有大量带负电荷的载流子——自由电子，所以它们具有良好的导电能力；而橡胶、塑料、云母、陶瓷等物体，其内部几乎没有载流子，所以它们没有导电性能。

半导体的电阻率约为导体的 1000 亿倍。半导体得到广泛应用并不在于它的电阻率的大小，而在于其电阻率的特性。经研究，半导体的电阻率具有如下特性：

(1) 热敏特性：半导体的电阻率随温度上升迅速下降，呈负温度系数的特性。利用其特性可以制成热敏电阻。

(2) 光敏特性：半导体的电阻率随光照的不同而改变，光照越强，电阻率下降越多。利用这个特性，可把它制成光敏元件。

(3) 掺杂特性：半导体电阻率与所含微量杂质元素的浓度有很大关系。利用

此特性,通过不同的工艺手段可制成各种类型的半导体器件。

半导体一般分为本征半导体和杂质半导体。

1.1.1 本征半导体

纯度很高、晶格结构完整的半导体称为本征半导体。如:半导体材料硅和锗,它们每个原子的最外层均有四个价电子,而原子最外层电子数目为八个时为稳定结构。但在它们制成单晶后,最外层的四个价电子不仅受到自身原子核束缚,而且与它们相邻的四个原子核相吸引,两个相邻原子之间共有一对价电子,构成稳定结构,这种结构称为共价键结构,如图 1.1 所示。

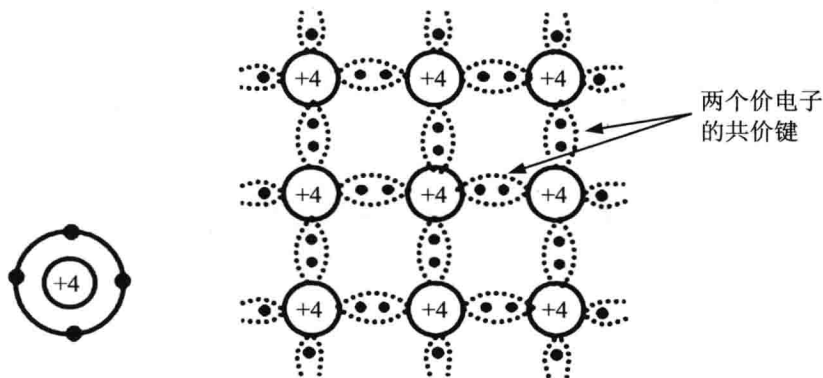


图 1.1 硅、锗的原子结构模型及共价键结构示意图

本征半导体在温度为绝对零度($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,共价键上的价电子不能挣脱原子核的束缚,内部没有载流子,此时本征半导体就相当于绝缘体。但是,在常温下由于热能的作用,使一些价电子可以获得足够能量挣脱原子核的束缚成为自由电子。这样,在原来的共价键位置上就留下一空位,这个空位我们称为空穴。由此可见,在本征半导体中自由电子和空穴是成对产生的,我们称为电子-空穴对。产生电子-空穴对的过程称为热激发,如图 1.2 所示。自由电子在不断地作无规则热运动时也会填充某些空穴,使电子-空穴对消失,这种过程称为复合。在一定温度下,电子-空穴对的产生与复合达到动态平衡,半导体中的载流子数目维持稳定。显然,环境温度越高,热激发越强烈,内部载流子数目越多。因此,温度对半导体的导电性能有影响,这是半导体器件工作不稳定的一个重要因素。

在半导体中有两种载流子——自由电子和空穴。然而,电子-空穴对的热运动是杂乱无章的,整块半导体对外呈电中性。只有在外电场的作用下,电子和空穴的

运动才有方向性。

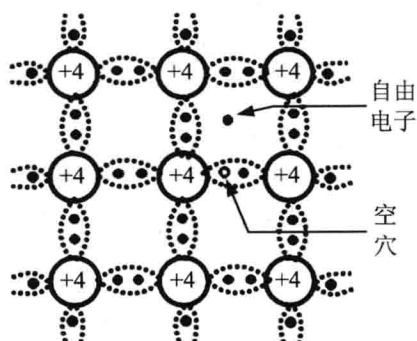


图 1.2 本征激发产生电子-空穴对

1.1.2 杂质半导体

在常温下,本征半导体中的载流子数目与金属导体相比仍然很少,所以本征半导体的导电能力很弱,实际使用价值不大,但如果在本征半导体中掺入微量的某种杂质元素,就会使其导电能力大大提高。根据掺入杂质的不同,可产生 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体(以硅为例)中掺入微量的五价元素,如磷(P)、砷(As)等,如图 1.3 所示。这时磷原子自然就要取代某些硅原子与相邻的硅原子的最外层价电子

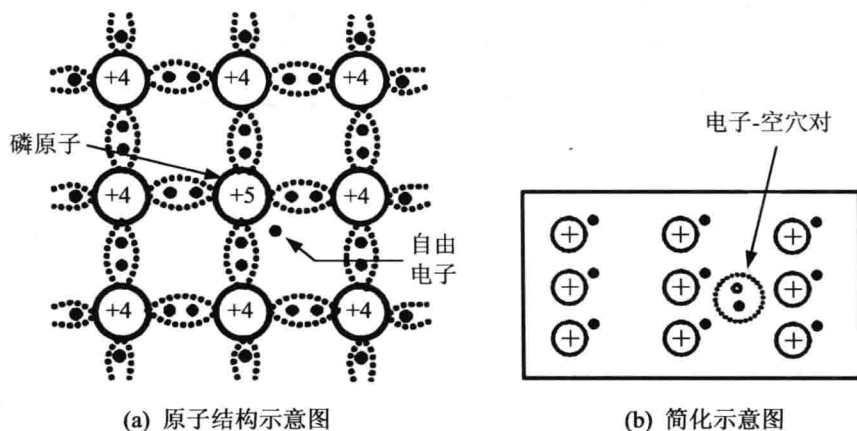


图 1.3 N 型半导体的结构

组成共价键结构,由于磷原子最外层有五个价电子,所以有一个磷原子就多余一个价电子,这些多余的价电子不受共价键的束缚,在常温下很容易受激发成为自由电子。掺入的磷元素越多则自由电子数目就越多。另外,这种掺杂半导体在常温下还会热激发产生电子-空穴对,但它们的数目比磷原子提供的自由电子数目少得多。那么,就整块半导体而言,自由电子数目较多,是多数载流子;空穴的数目较少,是少数载流子,因此,这种半导体主要靠自由电子导电,所以称为电子型半导体,由于电子呈负的(Negative)电性,故也叫 N 型半导体。

2. P 型半导体

在本征半导体硅中掺入微量的三价元素,如硼(B),如图 1.4 所示。那么,由于硼原子最外层只有三个价电子,当硼原子与相邻四个硅原子组成共价键时,在一个共价键上就少一个电子,形成一个空穴。这样,每多掺入一硼原子就会多出现一个空穴,使这种掺杂半导体内产生大量空穴。另外,在常温下还有热激发会产生电子-空穴对,但它们的数量比硼原子提供的数目少得多。因此,就整块半导体而言,空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子,因此,这种半导体主要靠空穴导电,所以称为空穴型半导体,因为空穴呈正的(Positive)电性,故叫 P 型半导体。

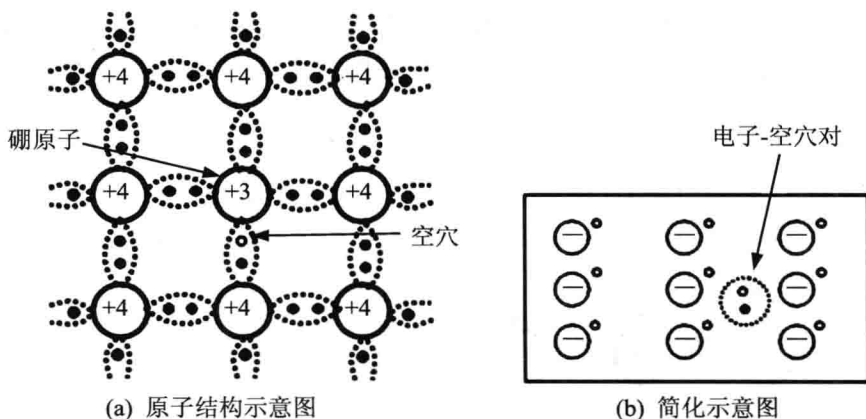


图 1.4 P 型半导体的结构

通过以上的阐述可知:不论 N 型半导体还是 P 型半导体都是电中性的,对外不显电性。

另外,N 型半导体和 P 型半导体还可以相互转化。一块 N 型半导体放入浓度很大的三价元素,在一定的条件下,这三价元素不仅复合了绝大多数自由电子,而且还剩余了空穴,这样,原来的 N 型半导体便改变为 P 型半导体了。这种特性被广泛应用于半导体器件(特别是集成电路)的生产中。

1.1.3 PN 结的形成与特性

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体接触后,由于界面两侧半导体类型不同,存在电子和空穴的浓度差。这样,P 区的空穴向 N 区扩散,N 区的电子向 P 区扩散。由于扩散运动,在 P 区和 N 区的接触面就产生正、负离子层。通常称这个正、负离子层为 PN 结,如图 1.5(a)所示。

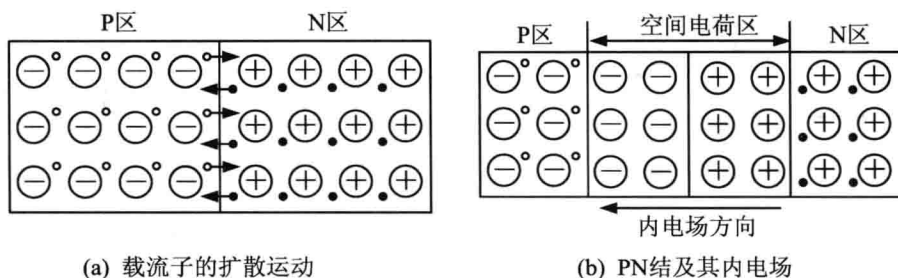


图 1.5 PN 结的形成

N 区失去电子产生正离子,P 区得到电子产生负离子。正负离子层之间产生了内电场,内电场的方向从 N 区指向 P 区。随着扩散运动的进行,内电场不断加强,它既阻碍了 N 区的自由电子向 P 区扩散,同样也阻碍了 P 区的空穴向 N 区扩散。另外,除了上述的扩散运动外,N 区的少数载流子借助于内电场的作用顺利地向 P 区漂移;P 区的自由电子也向 N 区漂移,形成少数载流子的漂移运动。漂移运动的方向与扩散运动的方向相反,当扩散运动的载流子数等于漂移运动的载流子数时,达到了动态平衡,界面两侧就维持了一定厚度的空间电荷区,如图 1.5(b)所示。

2. PN 结的单向导电特性

(1) PN 结的正向导通特性

如果给 PN 结加正向电压,即 P 区接正电源,N 区接负电源,此时称 PN 结为正向偏置,如图 1.6(a)所示。这时 PN 结外加电场与内电场方向相反,外加电场抵消内电场使空间电荷区变薄,有利于多数载流子运动,形成正向电流 I_F ,外加电场越强,正向电流越大,这意味着 PN 结的正向电阻变小。

(2) PN 结的反向截止特性

若给 PN 结加反向电压,即正电源接 N 区,负电源接 P 区,此时称 PN 结为反向偏置,如图 1.6(b)所示。这时 PN 结外加电场与内电场方向相同,使内电场的作

用增强,PN 结变厚,多数载流子的扩散运动几乎不可能,但少数载流子的漂移运动却得以加强,形成漏电流 I_R ,由于少数载流子的数目很少,所以只有很小的电流通过,接近于零,即 PN 结的反向电阻很大。

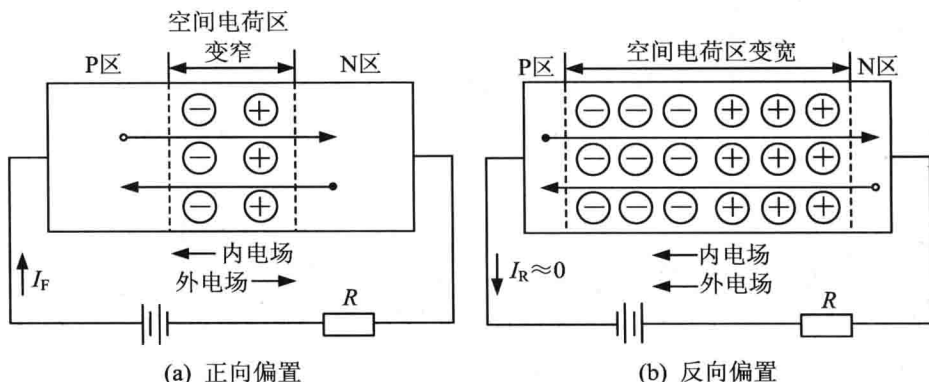


图 1.6 PN 结的单向导电特性

综上所述,PN 结具有单向导电性,加上正向电压时电阻很小,电流较大,是多数载流子的扩散运动形成的;加上反向电压时 PN 结电阻很大,电流很小,是少数载流子的漂移运动形成的。

思考题

1. 本征半导体有何特点? 什么是 N 型半导体和 P 型半导体?
2. 半导体的电阻率有何特点?
3. PN 结是如何形成的? 何谓 PN 结的单向导电性?
4. 扩散电流与漂移电流的区别是什么?

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构与分类

1. 二极管的结构

半导体二极管是由一个 PN 结作管芯,再加上接触电极、相应的外引线,然后

用塑料、玻璃或铁皮等材料做外壳封装而成的。

常用的几种半导体二极管的结构示意图和图形符号如图 1.7 所示。由二极管 P 区引出的电极叫阳极,由 N 区引出的电极叫阴极。图形符号中的箭头表示正向电流的方向。正向电流从二极管的阳极流入,阴极流出。



图 1.7 二极管的结构示意图与符号

2. 二极管的类型

二极管有许多类型:根据所用半导体材料的不同,有硅二极管、锗二极管;按用途分有普通型(如:整流二极管、检波二极管)和特殊型(如:稳压二极管、光电二极管、发光二极管和开关二极管)等;从制作工艺上分,有点接触型和面接触型。具体型号可查阅相关的半导体器件手册。下面从二极管的制作工艺来分析二极管的结构。

(1) 点接触型二极管

如图 1.8(a)所示,它是用一根含杂质元素的金属丝压在半导体晶片上,经特殊工艺和方法,使金属丝上的杂质掺入到晶片中,从而形成导电类型与原晶片不同的区域,即 PN 结。因为 PN 结面积小,所以允许通过的电流小,但结电容小,工作频率高,适用于高频和小电流的检波电路。

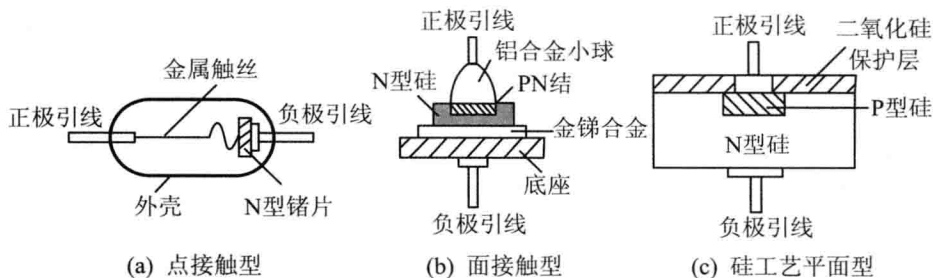


图 1.8 二极管的分类

(2) 面接触型二极管

如图 1.8(b)所示,在 N 型硅片衬底中掺入 P 型硅,那么,在两者的交界面形成扩散层(即 PN 结),由于 PN 结接触面积较大,故允许通过较大电流,但 PN 结电容

较大,一般适用于低频和大功率的场合,常用作整流器件。

图 1.8(c)所示是硅工艺平面型二极管结构图,是集成电路中常见的一种形式。

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指二极管两端所加的电压与通过二极管的电流之间的关系特性。根据实验可得普通二极管的伏安特性,如图 1.9 所示。其数学表达式为

$$i_D = I_S (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \quad (1.2.1)$$

式中, I_S 为 PN 结的反向饱和电流; $U_T = kT/q$ 称为温度的电压当量,其中 k 为玻耳兹曼常数 ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T 为热力学温度; q 为电子电量 ($q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$),在常温下 ($T = 300 \text{ K}$) 时, $U_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

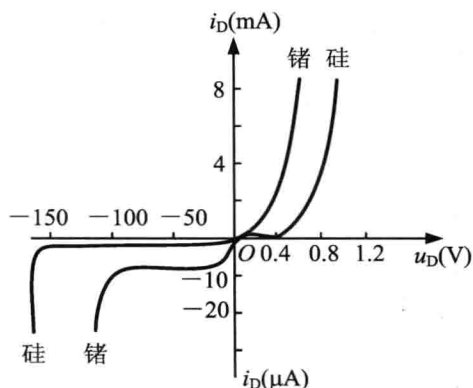


图 1.9 二极管的伏安特性曲线

1. 正向特性

当二极管承受正向电压很低时,还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动所造成的阻力,二极管呈现很大的正向电阻,正向电流 I_F 很小,几乎等于零,该区段称为死区,相应的电压叫死区电压(又称门槛电压)。通常,硅材料二极管的死区电压约为 0.5 V ,锗材料二极管的死区电压约为 0.2 V 。

当正向电压超过死区电压值时,外电场抵消了内电场,正向电流逐渐增大,因此,死区电压也称为开启电压。在小电流时,正向电流随着电压的增加按指数规律变化;当二极管完全导通后,电流按直线规律变化,而正向压降基本维持不变,此压降称为二极管正向导通压降(U_F),普通硅管的 U_F 约为 0.7 V ,普通锗管的 U_F 约为 0.3 V 。

2. 反向截止特性

当二极管承受反向电压时,外电场与内电场方向一致,只有少数载流子的漂移

运动,形成很小的反向电流,称为漏电流(I_R),此时,二极管呈现很大的反向电阻而处于截止状态,故这种特性称为反向截止特性。从图 1.9 可看出:反向电压在很大范围内变化,而反向电流基本不变。

3. 反向击穿特性

当二极管反向电压增大到某一数值时,反向电流将急剧增大,这种现象称为二极管反向击穿,此时的反向电压称为反向击穿电压。由图 1.9 可见:该区域电压基本保持不变,而电流变化很大。在反向击穿状态下,会造成大多数二极管永久性损坏。因此,一般二极管不允许反向击穿,但稳压管正是利用此特性来实现稳压功能的。

1.2.3 二极管的主要参数

二极管的参数是反映二极管性能质量的定量指标,是正确使用和合理选择二极管的依据。二极管的主要参数有:

1. 最大整流电流 I_{FM}

最大整流电流也叫最大正向电流,它是指二极管长期工作时允许通过的正向平均电流值,用 I_{FM} 表示。工作时,管子通过的电流不应超过这个数值,否则将导致二极管过热而烧毁。为了确保二极管正常工作,对于大功率二极管还要按手册上要求加装合格的散热片,有些二极管甚至采用风冷、水冷或油冷,以满足散热要求。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

它是指二极管不击穿时所允许加的最高反向电压的峰值。最高反向工作电压 U_{RM} 通常为反向击穿电压的 $1/2 \sim 2/3$ 。

3. 最大反向电流 I_{RM}

它是指二极管在常温下承受最高反向工作电压 U_{RM} 时的反向电流。一般很小,但其受温度影响较大,当温度升高时, I_{RM} 显著增加。其数值越小,反映该二极管的单向导电性能越好。

4. 最高工作频率 f_M

它是指保持二极管单向导通性能时外加电压的最高频率。二极管工作频率 f_M 与 PN 结的极间电容大小有关,容量越小,工作频率越高。

二极管的参数很多,除了上述主要参数外还有结电容、正向压降等,在实际应用时,可查阅半导体器件手册。下面列出几种类型二极管的主要技术参数,如表 1.1 所示。