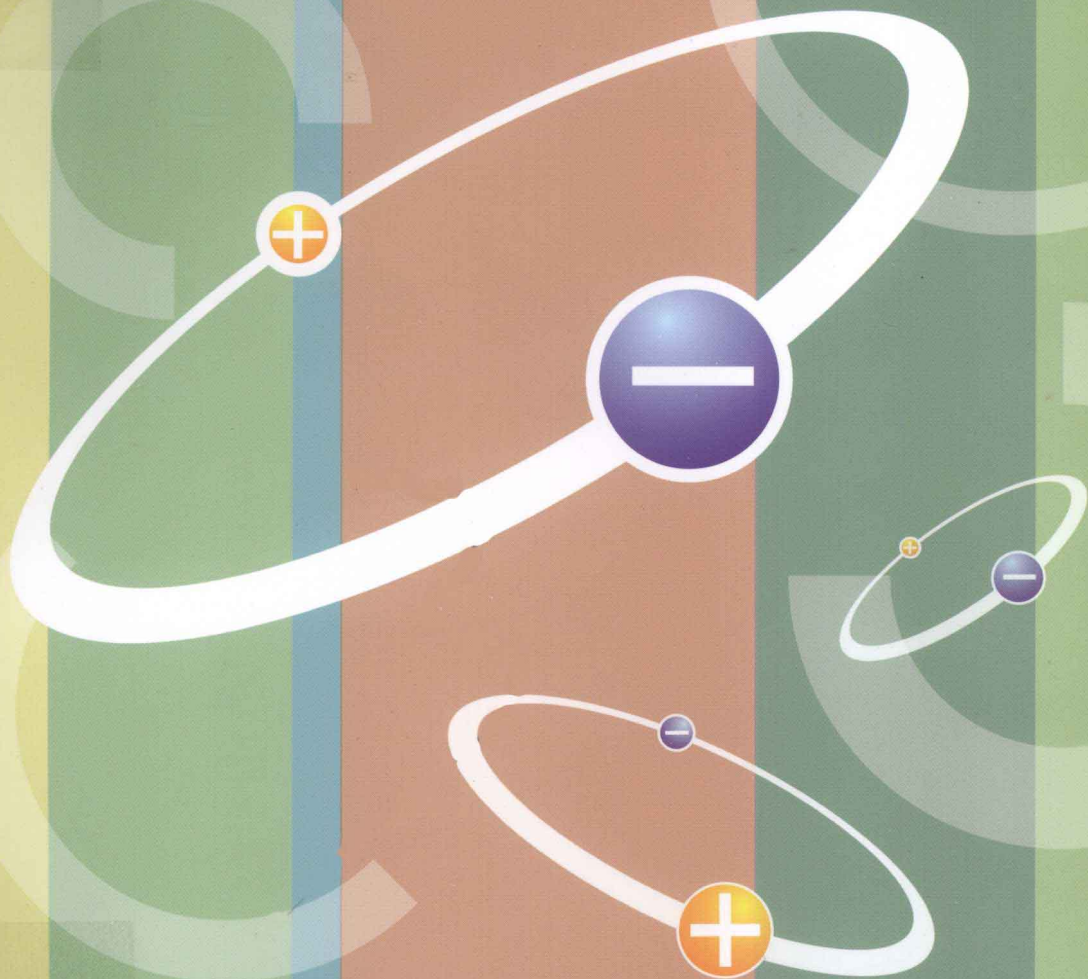


浙江省高校重点教材



 本书配套多媒体教学课件

戈素贞 杜群羊 吴海青 编著

模拟电子技术基础 与应用实例 (第2版)



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

浙江省高校重点教材

模拟电子技术基础与应用实例 (第2版)

戈素贞 杜群羊 吴海青 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

为适应电子技术的飞速发展和应用型人才培养的需求而编写此书。其特点是既具有一定的理论深度,又具有一定的应用实例。这些实例搭建了理论到应用的桥梁,克服了以往教材理论到实践的台阶。全书共分10章,带“*”号内容是选学内容。书中内容由浅入深,系统介绍了模拟电子技术的内容及应用,是编者多年教学经验的积累。

本书适用于应用型本科、专科电类专业模拟电子技术课程,也是电子爱好者自学和实践的指导性参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础与应用实例/戈素贞,杜群羊,吴海清编著. --
2版.--北京:北京航空航天大学出版社,2012.8
ISBN 978-7-5124-0906-4

I. ①模… II. ①戈…②杜…③吴… III. ①模拟电路—电子技术
IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第189412号

版权所有,侵权必究。

模拟电子技术基础与应用实例

(第2版)

戈素贞 杜群羊 吴海青 编著
责任编辑 潘晓丽 刘秀清 张雯佳

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:22.75 字数:510千字

2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷 印数:4000册

ISBN 978-7-5124-0906-4 定价:39.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前言

由于“模拟电子技术”课程是电类各专业的重要专业技术基础课,编写一本既有一定的理论深度,又有一定量的应用实例的书很重要。这些实例搭建了理论与应用的桥梁,克服了以往教材理论到实践的台阶,所以本书的特点是:保证基础,适度深化,注重应用,强调集成。

为了适应电子技术的飞速发展,为了适应应用型人才培养的需求,为了使电子技术教材更具可读性、实用性、前瞻性,我们编写了此书。在内容上安排有10章,带“*”号内容是选学内容。第1章介绍半导体的基本知识、半导体二极管;第2章介绍双极结型三极管及放大电路基础;第3章介绍放大电路的频率响应;第4章介绍场效应三极管及其放大电路;第5章介绍集成电路运算放大器;第6章介绍反馈放大电路;第7章介绍集成放大器的应用;第8章介绍直流稳压电源;第9章是模拟电路综合应用实例;第10章是EDA技术简介。

学习本书需先修“电路原理”课程。书中用到了非正弦周期电路的求解方法,即线性电路的叠加定理;求放大电路模型时用到了戴维宁定理;求三极管的等效电路时用到了双口网络的H参数和H参数等效电路。

全书由戈素贞组织编写和统稿。其中第1~6章和第7章的7.1~7.4节由戈素贞编写;第7章的7.5节、第8~9章由杜群羊编写;第10章由吴海青编写。

由于能力有限,书中内容不妥之处,恳请读者不吝指出,便于我们修正提高。

在此向本书引用和参考的资料的编者表示深深的感谢,向对本书出版有过帮助的所有朋友表示衷心的感谢。

作 者

2012年7月

本书配套多媒体教学课件,需要的读者请发送邮件至 bhkejian@126.com 或致电 010-82317027 申请索取。

目 录

第 1 章 半导体二极管	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 半导体的共价键结构	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.2 PN 结的形成及特性	4
1.2.1 PN 结的形成	4
1.2.2 PN 结的单向导电性	5
1.2.3 PN 结的反向击穿	6
1.2.4 PN 结的电容效应	7
1.3 半导体二极管	8
1.3.1 半导体二极管的结构	8
1.3.2 二极管的 $V-A$ 特性	9
1.3.3 二极管的主要参数	9
1.3.4 半导体分立器件型号命名方法	10
1.4 二极管基本电路分析方法	11
1.4.1 二极管正向 $V-A$ 特性的建模	11
1.4.2 模型分析法应用举例	13
1.5 特殊二极管	15
1.5.1 齐纳二极管(稳压管)	15
1.5.2 其他特殊二极管	17
1.6 半导体二极管应用实例	18
1.7 小 结	20
1.8 习 题	21
1.9 部分习题参考答案	25
第 2 章 双极结型三极管及放大电路	28
2.1 BJT 基本知识	28
2.1.1 BJT 的结构简介	28
2.1.2 BJT 放大原理	30

2.1.3 BJT 的特性曲线	33
2.1.4 BJT 的主要参数	36
2.2 共射基本放大电路	39
2.2.1 放大电路的分析方法	39
2.2.2 BJT 的小信号模型	41
2.2.3 共射基本放大电路	44
2.3 分压式共射极放大电路	50
2.3.1 放大电路的静态工作点稳定问题	50
2.3.2 分压式共射放大电路	51
2.4 共集和共基基本放大电路	54
2.4.1 共集基本放大电路	54
2.4.2 共基极基本放大电路	55
2.4.3 三种基本组态放大电路的比较	57
2.5 多级放大电路和组合放大电路	58
2.5.1 BJT 多级放大电路	58
2.5.2 BJT 组合放大电路	61
* 2.6 BJT 三极管应用实例	62
2.7 小 结	65
2.8 习 题	66
2.9 部分习题参考答案	72
第 3 章 放大电路的频率响应	77
3.1 研究频率响应的意义	77
3.2 BJT 的频率参数	78
3.3 单级放大电路的高频响应	82
3.4 单级放大电路的低频响应	85
3.5 小 结	90
3.6 习 题	90
3.7 部分习题参考答案	92

第4章 场效应三极管及其放大电路 93

4.1 半导体场效应管 93

4.1.1 N沟道增强型 MOSFET 93

4.1.2 N沟道耗尽型 MOSFET 97

4.1.3 P沟道 MOSFET 98

4.1.4 结型场效应三极管(JFET) 99

4.1.5 各种 FET 特性比较 102

4.2 FET 的主要参数 104

4.3 FET 放大电路分析 105

4.3.1 FET 的交流小信号线性化模型 105

4.3.2 FET 放大电路分析 106

* 4.4 FET 三极管应用实例 112

4.5 FET 与 BJT 的比较 113

4.6 小 结 114

4.7 习 题 114

4.8 部分习题参考答案 119

第5章 集成电路运算放大器 120

5.1 电 流 源 121

5.2 集成运放的输入级——差分放大电路 123

5.2.1 直接耦合放大电路的零点漂移现象 124

5.2.2 差分放大电路的功能 124

5.2.3 差分放大电路工作原理及分析 125

5.2.4 FET 差分放大电路 131

5.3 集成运放的输出级——直接耦合互补功率放大电路 131

5.3.1 乙类互补对称功率放大电路 132

5.3.2 甲乙类互补对称功率放大电路 135

5.3.3 复合管组成的准互补对称电路 136

5.3.4 复合管组成的准互补对称电路 136

5.4 通用型集成运放 BJTLM741 简介 136

5.5 集成运放的主要参数 139

5.6 小 结 140

5.7 思考题与习题 141

5.8 部分习题参考答案 145

第6章 反馈放大电路 148

6.1 反馈的类型与判别方法 148

6.1.1 反馈的概念 148

6.1.2 反馈的分类 148

6.2 负反馈放大电路的四种组态 152

6.3 深度负反馈放大电路的分析方法 156

6.3.1 负反馈放大电路增益的一般表达式 156

6.3.2 深度负反馈条件下的近似计算 157

6.4 负反馈对放大电路性能的改善 159

6.4.1 提高增益的稳定性 159

6.4.2 减小非线性失真 160

6.4.3 扩展通频带 161

6.4.4 抑制环内噪声与干扰 161

6.4.5 负反馈对输入输出电阻的影响 162

6.5 负反馈放大电路的稳定问题 164

6.6 正反馈电路——正弦信号产生电路 166

6.6.1 正弦波产生的条件 166

6.6.2 RC 正弦波振荡电路 167

6.6.3 LC 正弦波振荡电路 170

6.6.4 石英晶体振荡电路 177

6.7 小 结 180

6.8 习 题 182

6.9 部分习题参考答案 189

第7章 集成放大器的应用 192

7.1 运算电路 192

7.1.1 常用运算放大器简介	192	8.3.4 $LC-\pi$ 型滤波电路	253
7.1.2 基本运算电路	196	8.4 硅稳压管稳压电路	253
* 7.1.3 实际运算放大器运算电路的误差分析	206	8.4.1 稳压电路的主要指标	253
7.2 信号处理电路	208	8.4.2 硅稳压管稳压电路	254
7.2.1 滤波器的概念与分类	208	8.5 串联型直流稳压电路	255
7.2.2 一阶低通有源滤波器	209	8.5.1 电路组成和工作原理	256
7.2.3 二阶有源滤波器	210	8.5.2 输出电压的调节范围	257
7.2.4 电压电流变化电路	214	8.5.3 调整管的选择	257
7.2.5 采样保持电路	216	8.5.4 稳压电路的过载保护	258
7.3 非正弦信号产生电路	216	8.6 三端集成稳压器及其应用	259
7.3.1 电压比较器	217	8.6.1 三端集成稳压器的组成	259
7.3.2 方波发生器	222	8.6.2 三端集成稳压器的主要参数	260
7.3.3 三角波发生器	223	8.6.3 三端集成稳压器的应用	261
7.3.4 锯齿波发生器	224	8.7 开关型稳压电路	264
7.4 集成运放应用中的实际问题	225	8.7.1 开关型稳压电路的特点和分类	264
7.5 集成运放应用实例	228	8.7.2 开关型稳压电路的组成和工作原理	265
7.5.1 单电源反相放大器	228	8.8 小 结	267
7.5.2 具有限流特性的电压-电流变换器	228	8.9 习 题	268
7.5.3 峰值检波器	229	8.10 部分习题参考答案	271
7.5.4 精密电子温度测量电路	229	第 9 章 模拟电子技术应用举例	273
7.5.5 简单的电压-频率转换器	230	9.1 函数发生器设计	273
7.6 小 结	231	9.1.1 函数发生器的组成	273
7.7 习 题	232	9.1.2 函数发生器设计举例	276
7.8 部分习题参考答案	238	9.2 语音放大电路设计	278
第 8 章 直流稳压电源	241	9.2.1 语音放大电路原理与组成	278
8.1 小功率直流电源的组成	241	9.2.2 语音放大电路设计举例	280
8.2 单相整流电路	242	9.3 水温控制器设计	281
8.2.1 单相半波整流电路	242	9.3.1 水温控制器原理与组成	281
8.2.2 单相全波整流电路	243	9.3.2 水温控制器放大电路设计举例	284
8.2.3 单相桥式整流电路	244	9.4 思考题	285
8.2.4 整流电路的主要参数	245		
8.3 滤波电路	248		
8.3.1 电容滤波电路	248		
8.3.2 $RC-\pi$ 型滤波电路	250		
8.3.3 电感滤波电路和 LC 滤波电路	251		

第10章 EDA 技术简介	286
10.1 概 述	286
10.2 PSPICE	287
10.2.1 PSPICE 功能简介	287
10.2.2 PSPICE 集成环境	288
10.2.3 PSPICE 中有关规定	288
10.2.4 绘制电路图	290
10.2.5 元器件模型	294
10.2.6 仿真分析	301
10.2.7 PSPICE 的应用实例	316
10.3 Multisim	321

10.3.1 Multisim 的特点	322
10.3.2 启 动	322
10.3.3 工作窗口	323
10.3.4 电路图的绘制	328
10.3.5 虚拟仪器的使用	331
10.3.6 仿真分析法	336
10.3.7 Multisim 应用实例	342
10.4 小 结	353
10.5 思考题与习题	353
参考文献	354

第 1 章

半导体二极管

本章主要介绍半导体的基本知识、PN 结、半导体二极管的物理结构、工作原理、特性曲线、主要参数、基本电路、分析方法以及半导体二极管应用实例。

1.1 半导体的基本知识

物体根据导电性分成：导体、半导体、绝缘体。半导体的导电性介于导体与绝缘体之间。

电子技术中常用的半导体材料有：

元素半导体：如，硅(Si)、锗(Ge)等，其原子结构见图 1.1。最外层的 4 个电子称为价电子，它决定物体的化学性质和导电性。

化合物半导体：如，砷化镓(GaAs)等。

可掺杂制成杂质半导体的材料：如，硼(B)、磷(P)、铝(Al)等。

半导体材料的特点：

➤ 受外界光和热的刺激，导电能力显著变化。

➤ 掺杂后，其导电能力也显著变化。

这些特点是由半导体的结构决定的。所以，下面讲半导体的结构。

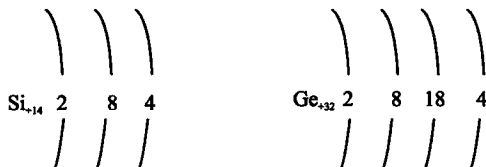


图 1.1 硅(Si)、锗(Ge)原子结构

1.1.1 半导体的共价键结构

在电子技术中用的 Si、Ge 均是晶体形式，称为单晶硅和单晶锗，也称为本征半导体。它们是由自然界中固态的硅、锗经过一个复杂的提纯过程得到的。单晶硅、单晶锗的结构是正四面

体,每个原子处于同等地位。图 1.2 和图 1.3 分别是单晶硅的立体结构图和平面示意图。

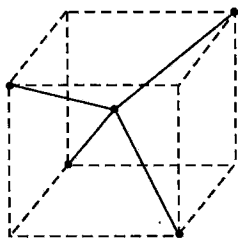


图 1.2 单晶硅的立体结构图

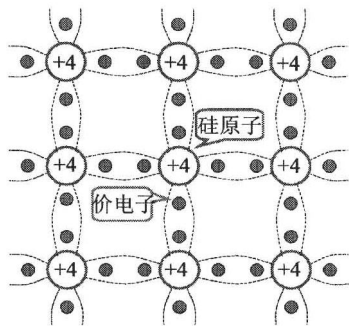


图 1.3 单晶硅的平面示意图和共价键

由于晶体内,各原子处于同等地位且各原子之间靠得很近,相邻的原子相互影响,使原来分属于每个原子的价电子成为两个原子共有,形成共价键,见图 1.3。共价键内的两个电子称为束缚电子。

共价键中的电子受两个原子核引力的约束,只有在激发时,少数电子获得一定的动能挣脱共价键的束缚成为自由电子,在原共价键中留下一个空位称空穴。在本征半导体中,自由电子与空穴是成对出现的,为空穴电子对。

电子得到足够的能量挣脱共价键的束缚成为自由电子的现象,称为激发。

在自由电子和空穴的产生过程中,同时还存在自由电子和空穴的复合,也就是自由电子在热运动过程中和空穴相遇而释放能量,电子-空穴对消失。

可以自由运动的带电粒子称为载流子,载流子包括自由电子和空穴。空穴参与导电是半导体区别于导体的一个重要特征。

在一定温度下,本征半导体激发和复合在某一热平衡载流子浓度值上达到动态平衡。用 n_i 和 p_i 分别表示一定温度下本征半导体中自由电子和空穴的热平衡浓度,有

$$n_i = p_i \quad (1.1)$$

理论和实验均证明,它们与温度 T 的关系为

$$n_i(T) = p_i(T) = A \cdot T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1.2)$$

式中: T 是绝对温度; k 是玻尔兹曼常数 ($8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$) 或 $(1.380\,658 \pm 0.000\,012) \times 10^{-23} \text{ J/K}$; A 是与半导体材料、载流子有效质量以及有效能级密度有关的常量。对于硅, $A = 3.87 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$; 对于锗, $A = 1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$ 。 E_g 表示 $T = 0 \text{ K}$ 时破坏共价键所需的能量,又称禁带宽度,单位为 eV (电子伏)。对于硅, $E_g = 1.21 \text{ eV}$; 对于锗, $E_g = 0.785 \text{ eV}$ 。由式(1.2)可以得知在一定温度下,半导体内有一定浓度的自由电子和空穴。在半导体两侧外加电压,自由电子作定向运动,空穴也作相对运动(以后直接说空穴运动),当自由

电子和空穴的浓度足够时,就会形成电流 i 。

1. 半导体的特性之一

在半导体中,温度 $T \uparrow \rightarrow$ 激发 $\uparrow \rightarrow$ 载流子浓度 $\uparrow \rightarrow$ 外加压不变,但电流 $\uparrow$,即 $T \uparrow \rightarrow$ 半导体的导电性大大增强。利用该特性可制成半导体热敏元件。但该特性又造成半导体器件的温度稳定性差。

2. 半导体的特性之二

在半导体中,光照 $\uparrow \rightarrow$ 激发 $\uparrow \rightarrow$ 载流子浓度 $\uparrow \rightarrow$ 外加压不变,但电流 $\uparrow$,即光照 $\uparrow \rightarrow$ 半导体的导电性大大增强。利用该特性可制成半导体光敏元件。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中人为地掺入微量元素作为杂质,可使半导体的导电性发生显著变化,这是半导体的另一个特性。掺入的杂质主要是三价或五价元素,掺入杂质的半导体称为杂质半导体。杂质半导体有两种:是 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体(电子型半导体)

在本征半导体中掺入五价元素如磷 P_{15} 、砷 As_{33} 、锑 Sb_{51} ,掺杂后,由于磷原子周围都是 Si 原子,所以其外层的 4 个价电子形成共价键,多余的一个价电子受核的引力比共价键的束缚弱得多,所以较小的能量就使其挣脱磷原子的吸引成为自由电子(称为电离)。掺入一个磷原子,给出了一个自由电子,故磷为施主杂质(施主原子, N 型杂质)。自由电子带负电(Negative electricity),英文字头为 N,故称 N 型半导体。在 N 型半导体中

$$\text{载流子} \begin{cases} \text{自由电子数} = \begin{cases} \text{掺杂原子数} & \text{多子} \\ \text{激发产生的自由电子} & \end{cases} \\ \text{空穴数} & \text{由激发产生} & \text{少子} \end{cases}$$

所以自由电子数远大于空穴数,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)。

2. P 型半导体(空穴型半导体)

在半导体中掺入微量三价元素如 Al、Ga,由于 Al 外层三个价电子与周围四个 Si 原子形成共价键时,缺少一个电子,在晶体中便产生一个空位,当相邻共价键上的电子获得足够的能量时,有可能填补这个空位,原来硅原子的共价键则因为缺少一个电子形成了空穴(称为电离)。空穴带正电(Positive electricity),英文字头为 P,故称为 P 型半导体。在 P 型半导体中

$$\text{载流子} \begin{cases} \text{空穴数} = \begin{cases} \text{掺杂原子数} & \text{多子} \\ \text{激发产生的空穴} & \end{cases} \\ \text{自由电子数} & \text{由激发产生} & \text{少子} \end{cases}$$

空穴为多子,主要由掺杂形成;自由电子为少子,由热激发形成。空穴很容易俘获电子,使

杂质原子成为负离子,三价杂质因而称为受主杂质。用 Al 掺杂时,Al 为受主杂质。

1.2 PN 结的形成及特性

本节学习四个问题:① PN 结的形成;② PN 结的单向导电性;③ PN 结的反向击穿;④ PN 结的电容效应。

1.2.1 PN 结的形成

1. PN 结的形成

N 型半导体中:

$$\begin{array}{cc} \text{自由电子浓度} & \gg & \text{空穴浓度} \\ (\text{多子}) & & (\text{少子}) \end{array}$$

P 型半导体中:

$$\begin{array}{cc} \text{空穴浓度} & \gg & \text{自由电子浓度} \\ (\text{多子}) & & (\text{少子}) \end{array}$$

需强调一点:无论是 N 型半导体还是 P 型半导体,半导体中的正负电荷数是相等的。因此呈现电中性(激发和复合是一个动平衡)。

当 N 型半导体与 P 型半导体结合后,由于 N 型半导体电子浓度大,P 型半导体空穴浓度大,于是出现扩散(扩散是一种自然现象),电子和空穴都要从浓度较高的地方向浓度较低的地方扩散,见图 1.4。P 区的空穴向 N 区扩散,N 区的电子向 P 区扩散。

当 N 区的电子越过界面,遇到的首先是界面附近的空穴,于是补充这个空穴即复合。

当电子与界面附近的空穴复合后,则界面附近的载流子用尽了,于是 P 型半导体和 N 型半导体的界面处形成了只有不能移动的正、负杂质离子(空间电荷),这一区域称为空间电荷区。

因为在空间电荷区载流子被耗尽了,故称为耗尽层。又因耗尽层处于 P 型半导体和 N 型半导体的交界处(结合的位置)故称为 PN 结。

2. PN 结的作用

电子、空穴扩散,必经 PN 结,而 PN 结形成内电场(由于该电场是半导体内载流子的扩散运动形成的,故称为内电场),内电场对多子的扩散起阻碍作用,见图 1.5。所以,PN 结又称阻挡层。

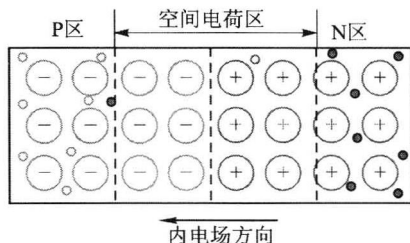
内电场促使 P 区的少子电子向 N 区运动,N 区的少子空穴向 P 区运动。这种运动称为漂移。

总之:PN 结的作用是阻碍多子的扩散,促进少子的漂移。

当 P 型半导体与 N 型半导体结合后,P 区空穴向 N 区扩散,同时 N 区电子向 P 区扩散,并伴随着复合。一段时间后,当扩散和漂移达到动平衡,就形成了 PN 结,其厚度一定,且杂质

掺杂越多,则空间电荷区越薄,反之越厚。如果 P 区、N 区掺杂浓度不一样,则界面两边的 PN 结的厚度不一样。PN 结形成后,存在两个动平衡:

- 多子的扩散运动与少子的漂移运动形成的动态平衡。
- P 区和 N 区内激发与复合也处于动态平衡,而且整个 P 区和 N 区呈现电中性。



注:示意图中只画出了带电粒子(包括电子、空穴和离子),未画出原子。

图 1.4 PN 结的形成分析

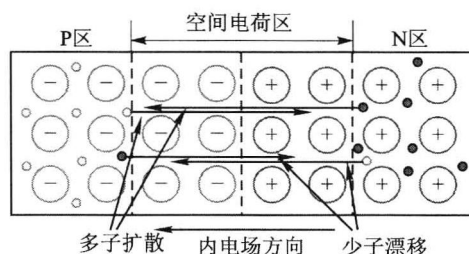


图 1.5 PN 结的作用

1.2.2 PN 结的单向导电性

1. PN 结外加正向电压(或正向偏置电压)

如图 1.6 所示,P 区接电源正极,N 区接电源负极,称为 PN 结外加正向电压,或 PN 结正向偏置。由于半导体本身的体电阻 $\ll$ PN 结上的电阻,所外加电压几乎全部降落在 PN 结上,产生的外电场与内电场方向相反,即削弱内电场,多子的扩散能力增强,与部分空间电荷离子中和,使 PN 结变窄,打破了原来的动态平衡,使扩散电流 $i_{\text{扩}} \nearrow$,漂移电流 $i_{\text{漂}} \searrow$,正向电流 $i_{\text{f}} = i_{\text{扩}} - i_{\text{漂}}$ 。由于可供漂移的少子 $\ll$ 可供扩散的多子, $i_{\text{扩}}$ 占主要地位, $i_{\text{漂}}$ 微不足道。故

$$i_{\text{f}} = i_{\text{扩}} - i_{\text{漂}} \approx i_{\text{扩}} (\text{正向扩散电流})$$

总之:PN 结外加正向电压时:

➤ 使 PN 结变窄,使 $i_{\text{扩}} > i_{\text{漂}}$,从而外电路中形成的正向电流 $i_{\text{f}} \approx i_{\text{扩}}$,称正向导通,且外加正向电压增加, i_{f} 增加。

➤ PN 结处于导通状态时,由于空间电荷区载流子较多,所以导通电阻很小。

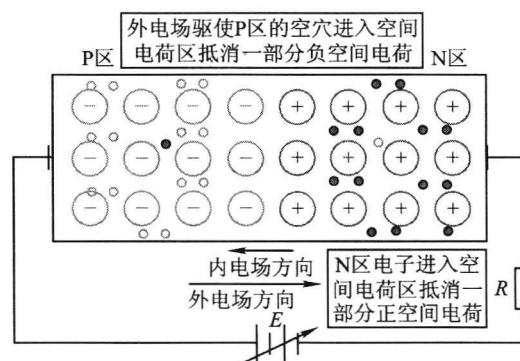


图 1.6 PN 结的单向导电性

2. PN 结外加反向电压(PN 结反向偏置)

当 PN 结外加反向电压时,外电场与内电场方向相同,使 P 区和 N 区的多子进一步离开

PN 结,使空间电荷区变宽,使扩散能力下降,即 $i_{\text{扩}}$ 趋于零,使漂移能力增强。而 $i_{\text{漂}}$ 的增加是微弱的(由激发产生的少子的浓度极小),但整个效果仍然是漂移为主,反向电流 $i_{\text{R}} \approx i_{\text{漂}}$,且 i_{R} 随外加电压的增加,基本不变,且很小,硅 $\text{nA}(10^{-9} \text{ A})$,锗 $\mu\text{A}(10^{-6} \text{ A})$ ——故用 I_{S} 表示,称为反向饱和电流。

总之:PN 结反向偏置时:

- 外电场与内电场方向相同,使 PN 结增厚,使 $i_{\text{扩}}$ 趋于零,反向电流 $i_{\text{R}} = I_{\text{S}} = i_{\text{漂}}$ 。
- PN 结反向电阻很大,称反向截止。

因为 $i_{\text{漂}}$ 的大小取决于少子的浓度,而少子的浓度又取决于激发,而激发又取决于温度,所以,当外加电压 $= \text{Const}$ 时, $T \uparrow \rightarrow I_{\text{S}} \uparrow$,这一点值得注意。

3. PN 结的 V - A 特性

PN 结的 V - A 特性见图 1.7。 U_{th} 为死区电压或门坎电压,当 $u_{\text{D}} > U_{\text{th}}$ 时,正向电流迅速增加。 U_{BR} 为反向击穿电压,当外电压小于 U_{BR} 时,反向电流迅速增加。

PN 结正向 V - A 特性的表达式为:

$$i_{\text{D}} = I_{\text{S}} (e^{\frac{u_{\text{D}}}{U_{\text{T}}}} - 1) \quad (1.3)$$

式中, i_{D} 、 u_{D} 为流过 PN 结的电流和加在 PN 结两端的电压; I_{S} 为反向饱和电流,分立元件典型值为 $10^{-8} \sim 10^{-14} \text{ A}$; U_{T} 为温度的电压当量。

$$U_{\text{T}} = KT/q \quad (1.4)$$

式中, T 为绝对温度(K), q 为电子电荷(C) ($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。

当 $T = 27^\circ \text{C} = 300 \text{ K}$ 时,由式(1.4)得 $U_{\text{T}} = 26 \text{ mV}$ 。

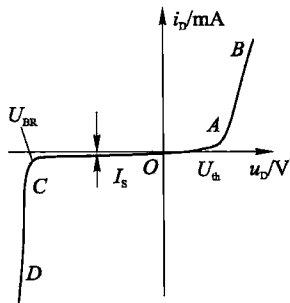


图 1.7 PN 结的 V - A 特性

1.2.3 PN 结的反向击穿

根据 PN 结的击穿状态,可以将 PN 结的击穿分成电击穿和热击穿;根据掺杂杂质浓度的不同可以将 PN 结的击穿分成雪崩击穿和齐纳击穿。

(1) 电击穿

当 PN 结反向电压增大到 U_{BR} 时,反向电流突然增加如图 1.7,这种现象就称为 PN 结的反向击穿(电击穿), U_{BR} 称反向击穿电压。电击穿是可逆的,条件:反向电压 $\times$ 反向电流 $\leq$ PN 结容许的耗散功率。

在电击穿情况下,若 $u_{\text{D}} < U_{\text{BR}}$ (绝对值),则管子仍能恢复原来的状态。电击穿时电流变化电压几乎不变,可以作稳压用。

(2) 热击穿

一旦电击穿,则 PN 结上压降很大,若电流也很大,功耗就很大,功耗转变为热,导致 PN 结温 $\nearrow \rightarrow$ 电流 $\nearrow$ 恶性循环,最终,二极管(PN 结)烧坏,即为热击穿。所以,PN 结的反向

工作电压为 U_{BR} 的一半,留有余量,以保安全运行。

(3) 雪崩击穿

在电击穿情况下,又有雪崩击穿和齐纳击穿。

PN 结加一定的反压→空间电荷区的电场较强→通过空间电荷区的电子和空穴的运动能力较强,在空间电荷区中的空穴和电子与晶体原子碰撞,发生碰撞电离;新产生的空穴、电子获能量参与碰撞,产生载流子的雪崩倍增效应,载流子的迅速增加,使反向电流急剧增加。PN 结就发生了雪崩击穿。

(4) 齐纳击穿

当 PN 结掺杂浓度较大时,PN 结很窄(μm 数量级),而结电阻 $\gg$ P 区、N 区的体电阻,所以,外加电压几乎全部降到 PN 结上,使单位 μm 上压降很大,也即电场很强,能拉出共价键中的束缚电子,造成电子-空穴对。形成较大的反向电流。

1.2.4 PN 结的电容效应

PN 结的结电容 C_{PN} 包括: 势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 。

(1) 势垒电容 C_B

改变 PN 结上外加电压,空间电荷区中正负离子电荷数相应改变,引起的电容效应称为势垒电容,类同于平行板电容器。 $C_B \propto A/\delta$ 。其中, δ 为空间电荷区厚度; A 为 PN 结面积。

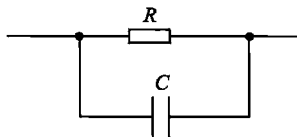


图 1.8 PN 结的高频等效电路

PN 结的高频等效电路见图 1.8。

PN 结加正压时, δ 小, C_B 大, $1/\omega C_B$ 小,但由于并联的结电阻更小,所以 C_B 的作用不明显;

PN 结加反压时, δ 大, C_B 小, $1/\omega C_B$ 大,但由于并联的结电阻更大,所以 C_B 的作用明显。

反压 $\nearrow \rightarrow \delta \nearrow \rightarrow C_B \searrow$, 所以有变容效应,可制成变容二极管。

(2) 扩散电容 C_D

C_D 是由于 N 区电子和 P 区空穴在相互扩散过程中,P 区的电子和 N 区的空穴的积累所引起的。当 PN 结反偏时,注入到 P 区的少子(电子)沿 P 区有浓度差,越靠近结处浓度越大,即 P 区有电子的积累,同样 N 区有空穴的积累。

当正向电压增加时,积累增加;当正向电压减小时,积累减小,构成了 PN 结的扩散电容 C_D ,PN 结正偏时,扩散电容作用较大;PN 结反偏时,扩散电容可忽略。

总之: PN 结的电容 $C_{PN} = C_B + C_D$ 。

PN 结加正压时, $C_{PN} \approx C_D$; PN 结加反压时, $C_{PN} \approx C_B$ 。

1.3 半导体二极管

1.3.1 半导体二极管的结构

(1) 定义

将PN结装入壳内加上电极,引出引线,就成了二极管。理论上PN结就是二极管。

(2) 类型

参见图 1.9,半导体二极管具有以下类型:

① 点接触型: PN 结面小,允许通过电流小,故适用于高频、小电流场合,如数字脉冲电路中的开关。

② 面接触型: 接触面大,电容效应大,适用于低频、大电流场合,如: 整流。

③ 平面型: 可用于大功率整流和数字电路中的开关。

(3) 符号

参见图 1.9(d)。

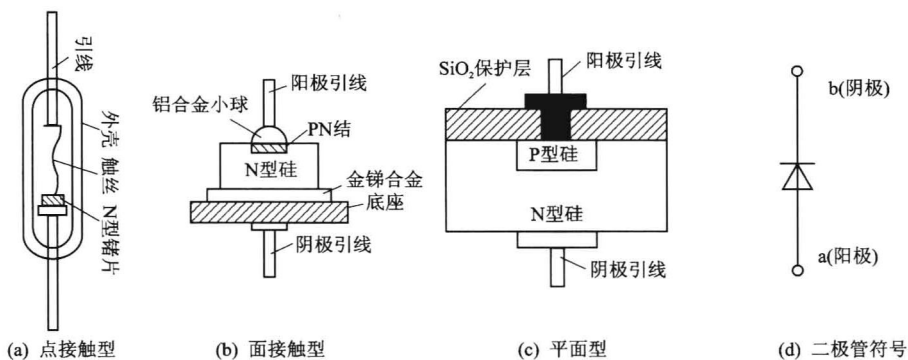


图 1.9 二极管结构和符号

(4) 外型

常见二极管外形参见图 1.10。

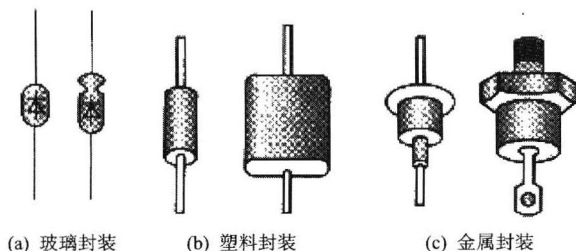


图 1.10 常见二极管外型

1.3.2 二极管的 V - A 特性

PN 结的 V - A 特性,即为二极管的 V - I 特性。二极管外特性获得方法:

➤ 测量获得 V - A 特性曲线。

➤ 用 $i_D = I_S (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1)$ 计算。

某二极管的外特性见图 1.7。 U_{th} 称门坎电压或死区电压, U_{BR} 为反向击穿电压。现将外特性分成三部分讨论:

(1) 正向特性

OA 段: $u_D < U_{th}$ 。由于正向电压较小,外电场不足以克服 PN 结的内电场,所以正向电流近似为零,电阻很大。

AB 段: $u_D > U_{th}$ 。电流迅速增加,电阻很小,而 u_D 变化不大,利用这点可作为限幅、稳压用。

➤ 硅管: 曲线较陡, U_{th} 约为 0.5 V, 正常工作时管压降为 0.6~0.8 V。

➤ 锗管: 曲线较缓, U_{th} 约为 0.1 V, 正常工作时管压降为 0.2~0.3 V。

(2) 反向特性

OC 段: $i_D \approx I_S$ 很小,因为少子的数目很小, $T \nearrow \rightarrow |i_D| \nearrow$ 。

(3) 反向击穿

CD 段: $u_D > U_{BR}$ 时,二极管出现反向击穿,反向电流迅速增加,但电压变化微小。

总之: ➤ 二极管承受正向电压 $u_D > U_{th}$ 时导通,电阻很小。

➤ 二极管承受反向电压截止,反向电流为 $I_S \approx 0$,电阻很大。

➤ 二极管是压控元件,具有单向导电性,电阻可变。

➤ 由二极管的外特性可知,二极管为非线性电阻元件。

1.3.3 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_{FM}

是管子长期运行时,允许通过的最大正向平均电流,由管子的功耗所决定,使用时注意环境温度和散热条件。

(2) 反向击穿电压 U_{BR}

管子反向击穿时的电压值。

(3) 反向工作峰值电压 U_{BWM}

一般为 U_{BR} 的一半或三分之一。

(4) 反向峰值电流 I_{RM}

指二极管加反向工作峰值电压时的反向电流。 I_{RM} 愈小,管子的单向导电性愈好。锗管的