

# 模拟电路基础

《模拟电路基础》编写组

哈尔滨船舶工程学院出版社

高等学校教材

# 模拟电路基础

《模拟电路基础》编写组

哈尔滨船舶工程学院出版社

(黑)新登字第9号

## 内 容 简 介

本书是根据国家教委工科电子技术课程教学指导小组关于《电子技术基础课程教学基本要求》编写的。全书共七章,内容包括半导体二极管及其应用电路、放大电路基础、场效应管及其放大电路、集成运放基础、放大电路中的反馈、正弦波振荡电路及集成运放的应用。本书内容全面,注意电子技术电路中的基本概念、基本原理和基本分析方法的阐述。各章附有思考题和习题,部分思考题和习题在书末附有参考答案。

本书可作为高等院校无线电技术、自动化等各电类专业“模拟电子技术基础”课程的教材,也可供有关工程技术人员自学和参考。

### 模拟电路基础

(模拟电路基础)编写组

责任编辑 郭镇明

\*

哈尔滨船舶工程学院出版社出版  
新华书店首都发行所发行  
哈尔滨毕升电脑排版有限公司排版  
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 印张 21.25 字数 493 千字

1993年12月第1版 1993年12月第1次印刷

印数:1-5000册

ISBN 7-81007-332-X  
TN·5 定价:11.00元

# 前 言

本书是根据国家教委工科电子技术课程教学指导小组关于《电子技术基础课程教学基本要求》，结合多年教学实践的经验，考虑到模拟电子技术的发展方向，为适应电类各专业的教学需要而编写的。

本书力求反映现代电子技术的新水平，又适当照顾到现状。编写本书的指导思想是以集成电路为主，大幅度压缩分立元件电路，分立电路为集成电路服务。增加了CMOS集成运放以及集成模拟乘法器等新内容。

本书共七章，内容广泛而全面，在保证打好基础的前提下，精选内容，合理安排，份量适当。全书阐述清楚，注意数学分析和物理概念相结合，理论和实践相结合；例题丰富，论例配合适当，思考题和习题选配恰当而富有启发性，在本书末附有部分思考题和习题参考答案。该书可满足高等院校工科各电类专业的教学需要，也可供有关工程技术人员学习和参考。

本书是哈尔滨船舶工程学院电子工程系模拟电路基础编写组在试用几年原讲义基础上，经集体认真讨论多次反复修改后，采用分工执笔的方式编写而成的。参加编写的有：童国泰（第一、三章）、段振新（第二章）、张庆阁（第四章）、周慎初（第五、六章）、张仲明（第七章）。

本书由哈尔滨船舶工程学院电子工程系卢侃教授主审，卢教授为编写本书提出许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于我们水平有限，难免有错误之处，殷切希望使用本教材的师生及其他读者给予批评指正。

编 者

1993年3月

# 目 录

<b>第一章 半导体二极管及其应用电路</b> .....	1
1.1 半导体器件基础 .....	1
1.2 半导体二极管.....	10
1.3 二极管电路的分析方法.....	14
1.4 半导体二极管应用电路.....	18
1.5 基本滤波电路.....	23
1.6 硅稳压管稳压电路.....	26
思考题和习题 .....	29
<b>第二章 放大电路基础</b> .....	32
2.1 半导体三极管.....	32
2.2 基本放大电路.....	41
2.3 多级放大电路.....	74
2.4 放大电路的频率响应.....	82
思考题和习题.....	111
<b>第三章 场效应管及其放大电路</b> .....	127
3.1 结型场效应管 .....	127
3.2 绝缘栅场效应管 .....	133
3.3 场效应管放大电路 .....	137
思考题和习题.....	146
<b>第四章 集成运放基础</b> .....	148
4.1 概 述 .....	148
4.2 集成运放的基本单元电路 .....	152
4.3 集成运放典型电路分析及 CMOS 电路.....	173
思考题和习题.....	182
<b>第五章 放大电路中的反馈</b> .....	189
5.1 反馈的基本概念 .....	189
5.2 负反馈放大电路的组态 .....	193
5.3 反馈放大电路的方块图及放大倍数的一般表达式 .....	195
5.4 负反馈对放大电路性能的影响 .....	197
5.5 负反馈放大电路的计算 .....	204
5.6 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法 .....	211
思考题和习题.....	219

<b>第六章 正弦波振荡电路</b> .....	227
6.1 概 述 .....	227
6.2 RC 正弦波振荡电路 .....	229
6.3 LC 正弦波振荡电路 .....	232
6.4 石英晶体振荡器简介 .....	238
思考题和习题.....	241
<b>第七章 集成运算放大器的应用</b> .....	247
7.1 集成运放应用电路的分析要点 .....	247
7.2 运算电路 .....	249
7.3 有源滤波电路 .....	274
7.4 晶体管串联型直流稳压电路 .....	292
7.5 电压比较器 .....	301
7.6 非正弦波信号发生电路 .....	310
思考题和习题.....	316
<b>参考文献</b> .....	328
<b>部分思考题和习题参考答案</b> .....	329

# 第一章 半导体二极管及其应用电路

半导体器件是组成半导体电路的核心元件。半导体电路的性能与其所用的半导体器件特性有密切的关系。因此,学习半导体电路,必须首先了解半导体器件的工作原理,掌握其工作特性和参数。

本章在简要说明半导体的导电规律之后,讨论了半导体PN结的特性,然后介绍由一个PN结构成的半导体二极管(包括稳压二极管)以及应用二极管和稳压管组成的几种常用的低频电子电路。

## 1.1 半导体器件基础

### 1.1.1 本征半导体

半导体是一类导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。高度提纯的、晶体结构完整的半导体材料单晶体称为“本征半导体”。

在最常用的半导体材料中,硅的原子序为 14,锗的原子序为 32。它们各有 14 个和 32 个电子,分层围绕原子核旋转。其中最外层轨道上的电子叫做价电子。价电子受原子核的束缚力最小,价电子数决定了物质的化学性质。为强调价电子的作用,原子结构用简化模型表示,如图 1-1 所示。图中,·表示价电子,⊕表示惯性核,其电荷量(+4)是原子核和除价电子以外的内层电子电荷量之和。在本征半导体硅或锗的晶体结构中,原子按一定规律整齐排列,组成一定形式的空间点阵。由于原子间距离很近,各原子间的相互影响很大,使原来属于某一原子的一个价电子为相邻两个原子所共有,从而形成晶体中的“共价键”的结构。在共价键结构中,每一原子的 4 个价电子与相邻的 4 个原子的各一个价电子分别组成 4 对共价键,使每一原子外层形成拥有 8 个共有电子的稳定结构,如图 1-2 所示。共价键结构决定了本征半导体特殊的导电机能。

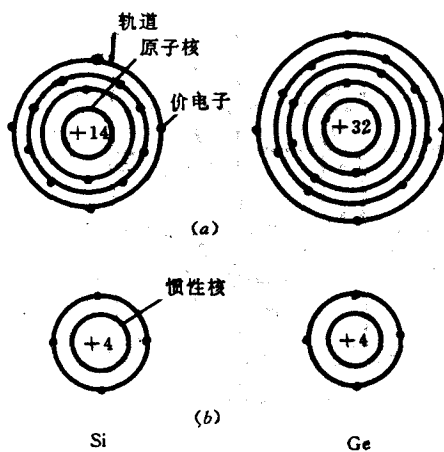


图 1-1 原子结构简化模型  
(a)原子结构; (b)简化模型

## 一、本征半导体中的两种载流子——自由电子和空穴

金属导体的导电机理是带负电荷的“自由电子”在电场作用下的定向移动形成电流。自由电子是金属导体中的载流子，而且是唯一的载流子。

半导体导电机理与金属导体的导电机理有很大差异，主要是因为半导体中的载流子有其特有的性质。下面研究半导体中的载流子。

### 1. 绝对零度(0K)时,本征半导体中无载流子

共价键中的两个电子受相邻两个原子核的共同束缚,叫“束缚电子”。在绝对零度且无外部激发能量时,价电子不能挣脱原子核的束缚成为自由电子。此时,本征半导体中无运载电荷的载流子。这种情况下的本征半导体是良好的绝缘体。

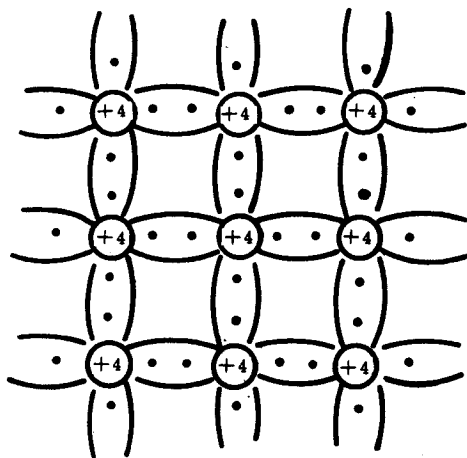


图 1-2 共价键模型

### 2. 本征半导体受光能或热能激发产生自由电子和空穴

价电子在光能或热能等外部能量作用下,脱离共价键成为自由电子的过程称为“激发”。电子脱离共价键束缚所需要的最小能量叫“激活能”,用  $E_g$  表示。硅的  $E_g=1.1\text{eV}$ , 锗的  $E_g=0.68\text{eV}$ 。电子获得激活能,脱离共价键成为自由电子。它是带负电荷的粒子,称为“载流子”。自由电子是本征半导体中的一种载流子。而价电子脱离共价键成为自由电子后,在原共价键中便留下一个空位,这个空位称为“空穴”。带有空穴的原子因缺少一个

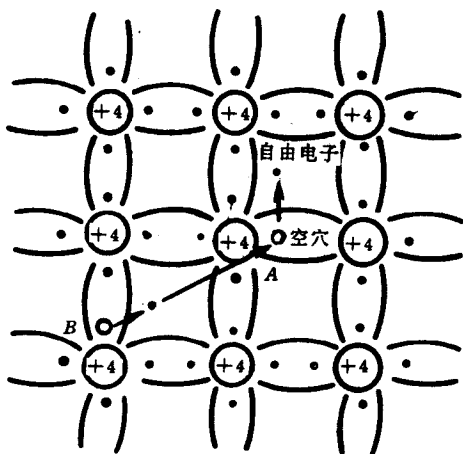


图 1-3 本征半导体中的载流子

电子而带正电,我们把这个正电看成是空穴所带的正电荷量。在本征半导体中,激发出一个自由电子,必定产生一个空穴,电子和空穴总是成对地产生,所以,称为电子空穴对。空穴也能运动,空穴的运动实质上是价电子填补共价键上空位的运动的结果。例如在图 1-3 上,共价键 A 处有一个空穴,附近共价键上的价电子便过来填补这个空位。假设共价键 B 处的电子去填补共价键 A 处的空位,于是 A 处的空穴消失, B 处出现了空穴,这就如同空穴从 A 处移到 B 处。由于空穴带有正电荷,空穴的移动必然伴随着正电荷的移动,所以,空穴也是载流子。

## 二、载流子的产生与复合,载流子浓度

本征半导体受外界能量激发产生电子



空穴对,称为载流子的“产生”。电子和空穴在热运动过程中相遇而互相抵消的过程叫载流子的“复合”。电子空穴对的产生和复合是半导体内不断进行着的一对矛盾的运动。在一定温度下,伴随着电子空穴对的产生,其复合数量也逐渐增加,最终使产生和复合达到动态平衡。如果温度升高,本征激发增强,载流子产生量增加;载流子数量的增加又使电子和空穴复合机会增加,最终又会在较高载流子浓度的水平上达到新的动态平衡。所以,温度一定时,空穴浓度  $p_i$  和电子浓度  $n_i$  一定,且  $p_i = n_i$ 。 $p_i$  和  $n_i$  都叫本征载流子浓度。

理论分析证明: $p_i(n_i)$ 与温度  $T$  的关系可用下式表示

$$n_i(T) = p_i(T) = AT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

式中, $E_g$  为激活能; $T$  为绝对温度; $A$  为系数; $k$  为波尔兹曼常数 ( $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ )。

在室温 ( $T=300\text{K}$ ) 时,本征硅的载流子浓度  $n_i = p_i = 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ;本征锗的载流子浓度  $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。硅和锗本征载流子浓度的差异是因激活能不同所致。在近似估算中,温度每增加  $10^\circ\text{C}$ ,本征硅的  $n_i(p_i)$  将增加一倍。因为载流子浓度随温度上升而增加,所以,本征半导体的导电能力也随温度上升而显著增强,这就是半导体的温度特性。

下面介绍半导体的另一重要特性——掺杂特性。

### 1.1.2 杂质半导体

本征半导体的电阻率很大,不能用来制造半导体器件。如果在本征半导体中掺入微量的其它某种元素,其导电能力会有巨大变化,这就是半导体的“掺杂特性”。掺入的微量元素叫“杂质”;掺入杂质后的半导体叫“杂质半导体”。杂质半导体才是制造半导体器件的材料。

根据掺杂元素的不同,杂质半导体又分为电子型半导体(N型半导体)和空穴型半导体(P型半导体)两种。

#### 一、N型半导体

在本征半导体(例如硅)中掺入微量的五价元素(如磷、砷、锑等),基本不改变硅的晶体结构,而仅在晶体点阵的个别位置上,硅原子被磷原子所替代,如图 1-4 所示。磷的 5 个价电子,在与相邻的 4 个硅原子组成相应共价键时,多余一个价电子。这个多余的价电子不受共价键束缚,受磷原子核的引力又小,所以,在室温下就能脱离磷原子而成为自由电子,从而使半导体中的自由电子数猛增。杂质原子则因失去一个电子而成为正离子。应当强调,这些正离子并非空穴,它们的共价键上没有空位,不能象空穴那样运动,不能参与导电,所以,不是载流子。五价杂质原子能施放出一个电子,称施主杂质。除了施主杂质原子施放的电子外,还有本征激发产生的少量电子空穴对。在这种半导体中,自由电子数远大于空穴数,所以,把这种半导体称为 N 型半导体,其中的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)。其简化符号如图 1-4(b)所示。

杂质原子电离产生一个自由电子,同时产生一个正离子;本征激发产生一个自由电子同时产生一个空穴。所以,在 N 型半导体中正负电荷量相等,保持电中性。

#### 二、P型半导体

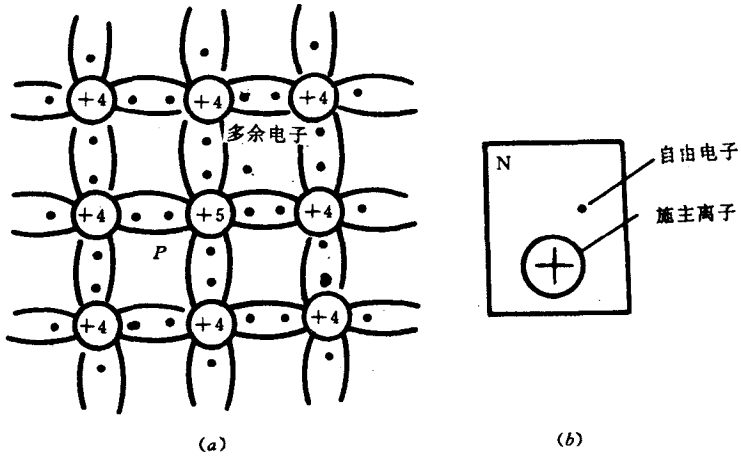


图 1-4 N 型半导体中的载流子  
(a)原子结构; (b)简化符号

在本征半导体例如硅中掺入微量的三价元素(如铝、镓、铟等),这些杂质原子取代晶体中某些晶格位置上的硅原子。由于三价杂质原子只有 3 个价电子,与周围 4 个原子组成共价键时,缺少一个电子而有一个空位(不是空穴,因为杂质原子仍呈电中性),如图 1-5 (a)所示。但是,邻近原子的价电子很容易来填补这个空位,于是,在这个电子原来的位置上产生了一个空穴,而杂质原子则因得到一个电子而成为负离子,其简化符号如图 1-5 (b)所示。三价杂质原子在电离中接受了一个电子,称为受主杂质。价电子只需很小的能量就能够填补杂质原子的空位。实际上,常温条件下所有杂质原子的空位全部填满,产生与

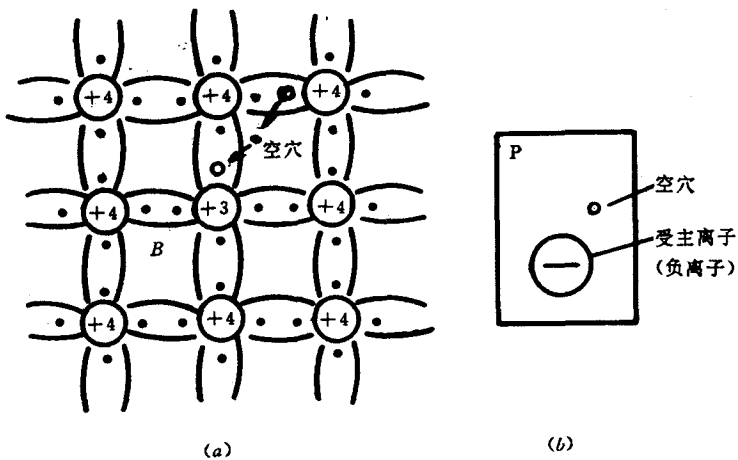


图 1-5 P 型半导体中的载流子  
(a)原子结构; (b)简化符号

杂质原子个数相同的空穴。

除了受主杂质产生的空穴之外,还有本征激发产生的电子空穴对。在这种半导体中,空穴数远大于电子数,所以,称为P型半导体。在P型半导体中,空穴是多数载流子(多子),电子是少数载流子(少子)。

同样,在整块的P型半导体中,正负电荷量相等,保持电中性。

### 1.1.3 PN 结

用掺杂工艺使同一块半导体的一侧形成P型半导体,另一侧形成N型半导体。这样,在两种半导体交界处的一段区域内将形成“PN”结,如图1-6所示。

#### 一、PN 结是载流子运动的结果

##### 1. 扩散运动建立了空间电荷区和内电场

由于P区空穴浓度高于N区;而N区电子浓度高于P区,且P区和N区均为电中性体。载流子因浓度差要产生扩散运动,P区的空穴向N区扩散;N区的电子向P区扩散。这时,在两种半导体的交界面附近区域,P区的空穴与N区的电子复合;而N区的电子则与P区的空穴复合。扩散的结果破坏了交界面附近的电中性条件。P区一侧失去空穴,留下了不能移动的负离子(受主离子);N区一侧失去电子,留下了不能移动的正离子(施主离子)。这些不能移动的正负离子所在区域称为“空间电荷区”。空间电荷区中带电的正负离子建立了由N区指向P区的“内电场” $\epsilon_{PN}$ 。

##### 2. 内电场 $\epsilon_{PN}$ 的作用

内电场  $\epsilon_{PN}$  的方向与多子扩散方

向相反,它将阻碍多子继续向对方区域扩散;但P区和N区的少子却在  $\epsilon_{PN}$  的作用下产生了漂移运动。漂移运动的方向与扩散运动的方向相反,即P区的少子电子向N区漂移,N区的少子空穴向P区漂移。漂移运动随着内电场  $\epsilon_{PN}$  的增强而增强,当漂移运动增强到与扩散运动相等时,漂移作用与扩散作用互相抵消,通过交界面的净载流子数为零。这时,空间电荷数不再增多,空间电荷区宽度不再变化,PN结达到平衡状态。

#### 二、空间电荷区是高阻区

空间电荷区内是个载流子缺少的区域,电阻率很高,是高阻区。这个区域的载流子“耗尽”,只剩下不能导电的正负离子,所以又称“耗尽区”。

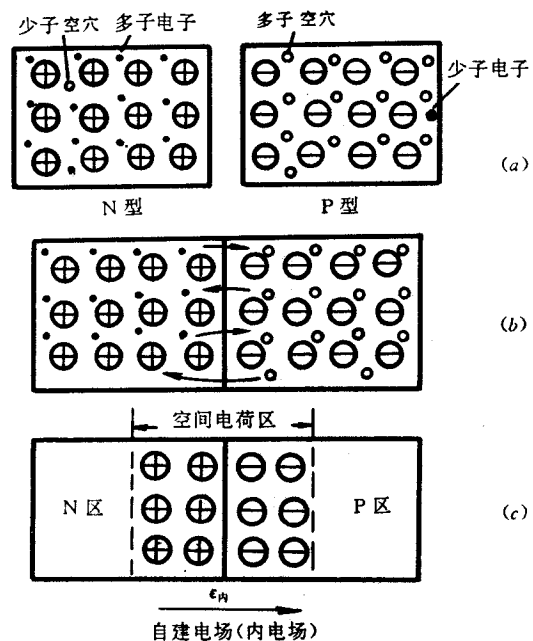


图1-6 PN结的形成

(a)P型半导体和N型半导体; (b)多子的扩散运动;  
(c)空间电荷区形成

### 三、PN 结内电场 $\epsilon_{内}$ 的大小

PN 结内电场  $\epsilon_{内}$  是自建电场,表明空间电荷区两边电位不相等,即 N 区的电位比 P 区高。这个电位差好似一个电位壁垒,阻碍了多子的扩散运动,所以也称“势垒区”或“阻挡层”。

由 PN 结内电场  $\epsilon_{内}$  建立的电位差,用  $V_{ho}$  表示, $V_{ho}$  是 P 型半导体和 N 型半导体的“接触电位差”。 $V_{ho}$  的大小与半导体材料、掺杂浓度及环境温度有关。室温下,硅材料的  $V_{ho} = 0.6 \sim 0.8V$ ; 锗材料的  $V_{ho} = 0.1 \sim 0.3V$ 。

#### 1.1.4 PN 结的伏安特性

PN 结的伏安特性是指 PN 结两端的外加电压与流过 PN 结电流之间的关系曲线。在不同极性的外加电压作用下,PN 结的导电能力有显著差异。

##### 一、PN 结外加正向电压(正向偏置,简称正偏)

外加电压使 PN 结 P 区一侧接电源的正极,N 区一侧接电源的负极,如图 1-7(a)所示。即外加电场与 PN 结内电场方向相反。在这种情况下,N 区的多子(电子)和 P 区的多子(空穴)将向 PN 结移动,如图 1-7(b)所示。当 N 区的电子进入空间电荷区后,就要与部分正离子中和,使正空间电荷层的厚度和空间电荷量减小,同样,当 P 区的空穴进入空间电荷区后,就要与部分负离子中和,使负空间电荷层的厚度和空间电荷量减小。结果使 PN 结的宽度变窄,内电场电位差降低,如图 1-7(c)、(d)所示。这将有利于多子的扩散,只要外加电压增大到一定值,扩散电流将大大增

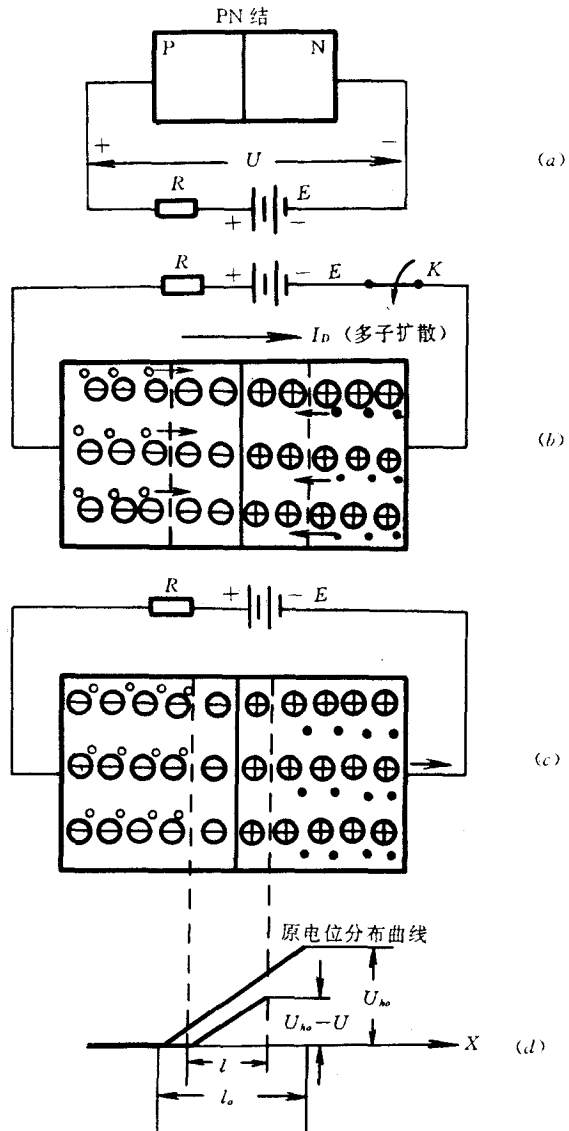


图 1-7 PN 结外加正向电压

(a)PN 结正偏接法; (b)多子向结内运动;  
(c)PN 结减薄; (d)结区电位分布曲线变化

加。此时,只要外加电压有微小变化,扩散电流  $I_D$  将有显著变化。

因为少子的数量只与温度有关而与外加电压无关,漂移电流远小于扩散电流。所以,PN 结正偏时,通过 PN 结的电流近似为扩散电流。这种电流称为正向电流,其大小受外电路限流电阻  $R$  的限制。

## 二、PN 结外加反向电压(反向偏置,简称反偏)

外加电压使 PN 结 P 区一侧接电源的负极, N 区一侧接电源的正极,如图 1-8(a)所示,即外加电场与 PN 结内电场方向相同。在这种情况下, N 区的多子(电子)和 P 区的多子(空穴)将背离 PN 结而使空间电荷区变宽,电位差加大,扩散受到的阻碍加大,扩散电流大大减弱,少子的漂移加强。通过 PN 结的电流主要由漂移电流决定,外电路电流方向与正向电流方向相反,所以称为反向电流,因为少子是因热激发产生的其浓度很小,因而反向电流远小于正向电流。温度一定时,少子浓度一定,因而反向电流几乎不随外加电压变化,故又称反向饱和电流。

综上所述,PN 结正偏时的正向电流远大于反偏时的反向饱和电流。我们把这一特征称为 PN 结的单向导电特性。单向导电是 PN 结最重要的特性。

## 三、PN 结的伏安特性表达式

根据理论分析,PN 结两端的外加电压  $U$  与流过 PN 结电流  $I$  之间的关系可用下式表示

$$I = I_s(e^{U/U_T} - 1)$$

(1.1.1)

式中,  $I_s$  为反向饱和电流;  $U_T = \frac{kT}{q}$  为温度的电压当量,其中  $k =$

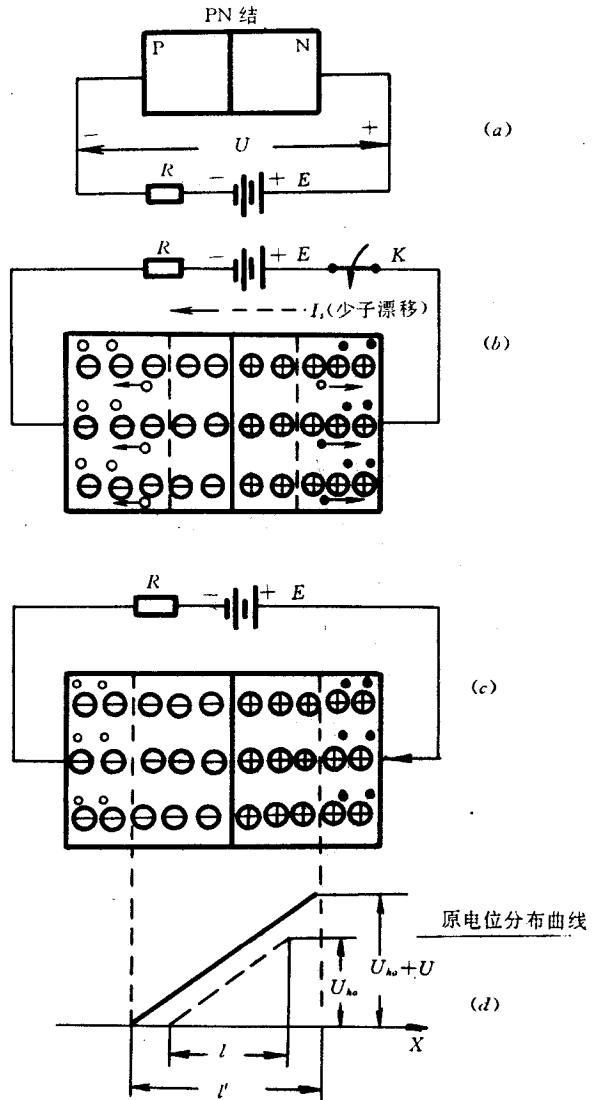


图 1-8 PN 结外加反向电压  
 (a)PN 结反偏接法; (b)多子背离结区;  
 (c)PN 结增厚; (d)结区电位分布曲线变化

$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , 为波尔兹曼常数;  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , 为电子电量, 所以,  $U_T = T/11600$ . 在室温  $T = 300 \text{ K}$  时,  $U_T = 300/11600 \approx 26 \text{ mV}$ .

当 PN 结正向偏置时, 若  $U > U_T$ , 例如  $U = 100 \text{ mV}$  时,  $e^{U/U_T} \approx e^4 \approx 55 \gg 1$ , 式(1.1.1)可简化为

$$I \approx I_s e^{U/U_T} \quad (1.1.2)$$

或者

$$U = U_T \ln \frac{I}{I_s} = 26 \ln \frac{I}{I_s} \\ \approx 60 \log \frac{I}{I_s} \text{ (mV)} \quad (1.1.3)$$

由式(1.1.3)可知, 流过 PN 结的电流每增大 10 倍, PN 结电压约增加 60mV. 这说明 PN 结的正向特性很陡, 如图 1-9 所示.

当 PN 结反向偏置时, 例如  $U \leq -100 \text{ mV}$ , 则  $e^{U/U_T} \leq e^{-4} \ll 1$ , 此时, 式(1.1.1)可写作

$$I \approx -I_s \quad (1.1.4)$$

对硅材料 PN 结  $I_s$  约仅为几十毫微安(nA), 且在一定电压范围内基本不变, 如图 1-9 所示.

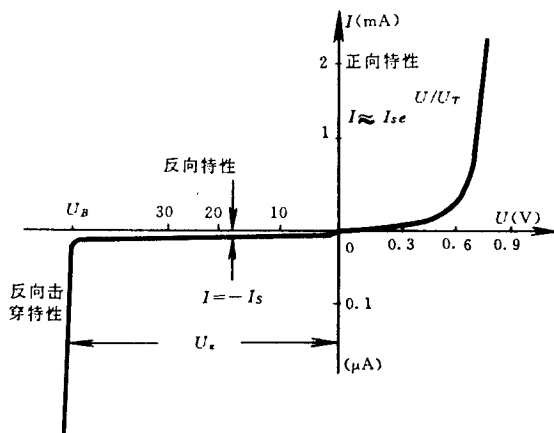


图 1-9 PN 结的伏安特性

#### 1.1.4 PN 结的反向击穿特性

当加在 PN 结上的反向电压值超过反向击穿电压  $U_B$  时, 反向电流将急剧增大, 这种现象称为 PN 结的反向击穿. 反向击穿时反向电流急剧增加, 而 PN 结上的反向电压值  $U_s$  却增加很少. 利用 PN 结这一特性可以制成稳压二极管(稳压管). 当 PN 结反向击穿时, 为避免 PN 结烧坏, 在外电路应采取保护措施, 限制电流的过大增加. 只要不超过 PN 结的允许功耗, 反向击穿是可恢复的.

对 PN 结反向击穿的原因有两种解释:

1. 雪崩击穿 当反向电压足够高时, PN 结内电场较强, 使漂移运动的载流子加速. 加速后的载流子与中性原子相撞, 使中性原子中的价电子受到激发, 产生新的电子空穴对. 这些新的载流子又被加速, 形成连锁反应, 使反向电流“滚雪球”般地增大, 通常称为雪崩击穿.

2. 齐纳击穿 掺杂浓度较高的半导体, PN 结的空间电荷层很薄, 只要加上不很高的反向电压, 空间电荷区就可获得  $2 \times 10^6 \text{ V/cm}$  以上的场强. 这足以将价电子直接从共价键中拉出来, 使得反向电流剧增, 通常称为齐纳击穿.

#### 1.1.5 PN 结的温度特性

PN 结电流的大小与  $U_T (=kT/q)$  和  $I_s$  有关, 而  $U_T, I_s$  均为温度的函数, 所以, PN 结

的伏安特性和反向击穿特性都与温度有关。

实验证明,室温下,温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ,反向饱和电流大约增加一倍。当  $T=T_1$  时,  $I_s=I_{s1}$ ,则当温度升到  $T_2$  时

$$I_s(T_2) = I_{s1} \times 2^{(T_2-T_1)/10} \quad (1.1.5)$$

温度升高,产生同样大小的正向电流的PN结正向电压减小,其变化率为

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = -2.5\text{mV}/^{\circ}\text{C} \quad (1.1.6)$$

所以,PN结的正向压降具有负的温度系数。

图 1-10 反映了温度对PN结正、反向特性曲线的影响。

理论分析表明,雪崩击穿的PN结反向击穿电压  $U_B$  (通常大于  $6\text{V}$ ) 具有正温度系数;而处于齐纳击穿情况下的反向击穿电压  $U_B$  (通常小于  $4\text{V}$ ) 具有负的温度系数。

PN结电流过大或环境温度过高,将造成PN结结温升高,以致于本征激发的少数浓度超过杂质原子提供的多子浓度。此时,杂质半导体变得与本征半导体相似,PN结就不存在了。因此,为保证正常工作,应限制PN结的最高结温。一般,硅材料PN结最高结温为  $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ,锗材料PN结最高结温为  $75\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

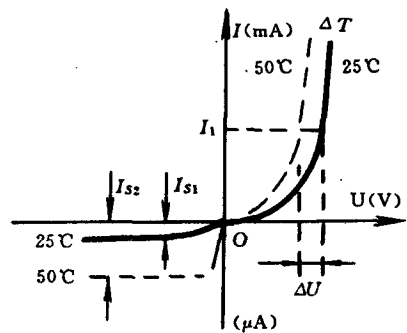


图 1-10 PN结温度特性

### 1.1.6 PN 的电容效应

PN结的电容效应由PN结势垒电容和扩散电容两部分组成。

#### 一、势垒电容 $C_B$

PN结的势垒电容用来描述势垒区的空间电荷随外加电压变化而产生的电容效应。

当外加正向电压升高时,N区的电子和P区的空穴便进入阻挡层,中和一部分带正电荷的施主离子和带负电荷的受主离子,相当于电子和空穴分别向势垒电容“充电”;而当外加电压降低一些时,又有一部分电子和空穴离开阻挡层,相当于电子和空穴分别从势垒电容“放电”,如图 1-11 所示。这种充放电效应和普通电容在外加电压作用下进行充放电的过程相似,所不同的仅是势垒电容是随外加电压改变的。当外加电压保持不变时,阻挡层中空间电荷数目保持不变,势垒电容充放电也就停止了。当外加电压频率

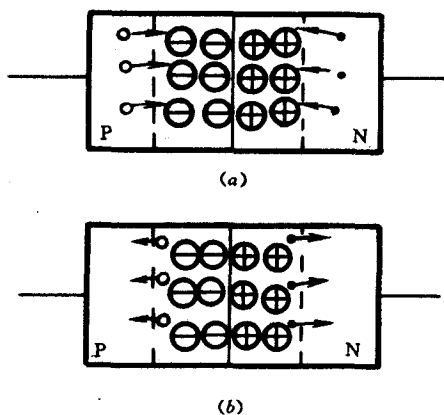


图 1-11 PN结势垒电容

(a)势垒电容充电; (b)势垒电容放电

越高时,势垒电容的作用越显著。势垒电容  $C_B$  的大小与 PN 结面积  $S$  成正比,与阻挡层厚度  $\delta$  成反比,因此,它与一个极板面积为  $S$ 、间距为  $\delta$  的平行板电容器相似,但势垒电容的  $\delta$  随外加电压极性而改变。从电路上看,势垒电容与结电阻并联。由于反偏时结电阻很大,尽管势垒电容很小,但作用不能忽视。正偏时,其结电阻很小,尽管势垒电容较大,但其作用较小。所以,势垒电容在反偏时显得更加重要。

## 二、扩散电容 $C_D$

扩散电容  $C_D$  反映了在外加电压作用下载流子在扩散过程中的积累情况。当 PN 结正向电压加大时,正向电流随着加大,有较多的载流子积累,以满足电流加大的要求;而当正向电压减小时,正向电流减小,积累在 P 区的电子和 N 区的空穴就要相对减小。积累在 P 区的电子或 N 区的空穴随外加电压的变化构成了 PN 结的扩散电容  $C_D$ 。PN 结正偏时,积累在 P 区的电子和 N 区的空穴随正向电压的增加而很快增加,扩散电容较大,而反偏时,载流子数目很少,扩散电容数值很小,一般可以忽略。

综上所述,用  $C_j$  表示 PN 结电容时, $C_j$  为势垒电容  $C_B$  和扩散电容  $C_D$  之和。当外加电压频率较高,考虑 PN 结电容效应时,其等效电路如图 1-12 所示。其中, $r$  表示结电阻; $C_j$  表示结电容。

当 PN 结正偏时, $r$  为正向电阻,其数值很小,结电容较大(主要决定于扩散电容)。当 PN 结反偏时, $r$  为反向电阻,其数值较大,结电容较小(主要决定于势垒电容)。

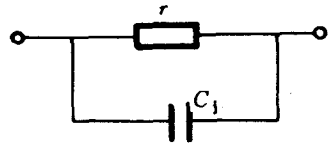


图 1-12 PN 结高频等效电路

## 1.2 半导体二极管

### 1.2.1 半导体二极管的结构和分类

半导体 PN 结加上管壳和引线制成半导体二极管。其电路符号如图 1-13(a)所示。半导体二极管因其 PN 结制造工艺的差异,分为点接触型二极管和面接触型二极管。

点接触型二极管的 PN 结面积很小,结电容小,一般在  $1\text{pF}$  以下,因此,其工作频率高,但不能承受较高的正向电压和通过较大的正向电流。一般用于高频检波及数字电路的开关电路。

面接触型二极管的 PN 结面积较大,结电容也大,因此,其工作频率低,但工作电流大,反向击穿电压高,所以,多用于低频整流电路中。

还有一种用特殊工艺制造的面接触型二极管,称为稳压二极管(简称稳压管),利用 PN 结的反而击穿特性工作。不同规格的稳压管具有不同的击穿电压(稳定电压),以满足不同电路的需要。



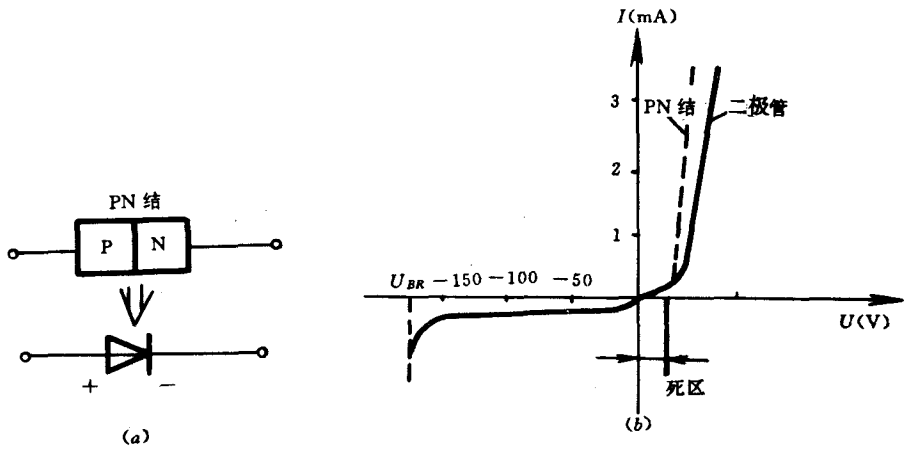


图 1-13 二极管电路符号及硅二极管特性

(a) 二极管符号; (b) 硅二极管特性

### 1.2.2 半导体二极管特性曲线及参数

#### 一、二极管的特性曲线

实际二极管特性与理想 PN 结特性有一定差异。图 1-13(b)所示为硅二极管的特性曲线。

##### 1. 正向特性

由于二极管的引线电阻、半导体中性区的体电阻以及电极的接触电阻都将引起电压降,使二极管内实际作用在 PN 结上的电压比外加电压要小一些,但在近似计算中,仍采用 PN 结的伏安特性方程式(1.1.1)。

当外加正向电压较小时,二极管的正向电流近似为零。只有当正向电压大于一定值后,正向电流才明显增强。这是因为外加正向电压较小时,不足以抵消内电场的强度,载流子的扩散运动尚未明显增加,所以正向电流小。定义正向电流开始从零明显增大的外加电压为阈值电压  $U_{on}$  (又称死区电压)。室温下硅二极管  $U_{on} \approx 0.5 \sim 0.7V$ ; 锗二极管  $U_{on} \approx 0.1 \sim 0.3V$ 。

##### 2. 反向击穿特性

在一定范围内,二极管的反向电流不随反向电压的增加而增加,但当反向电压达到某一数值 ( $U_{BR}$ ) 时,反向电流突然增大,称为二极管的反向击穿,  $U_{BR}$  称为“击穿电压”。若在二极管电路中接入适当的限流电阻  $R$ ,使反向电流  $I$  和反向电压  $U_{BR}$  的乘积不超过二极管的允许功耗,这样,在去掉或减少反向电压后,二极管的单向特性仍可恢复;若功耗超过允许值,二极管将造成永久性损坏。

#### 二、半导体二极管的主要参数

二极管参数是对其特性和极限运用条件的定量描述,是设计电路时选择器件的依据。《半导体器件手册》列举了各种型号器件的性能参数,供使用者选择。二极管的主要参数