

高等院校电子技术系列教材

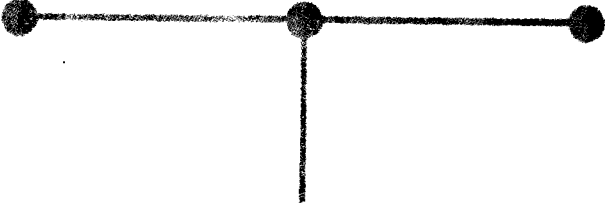
模拟电子技术 基础教程

主编 周跃庆

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS



高等院校电子技术系列教材



模拟电子技术 基础教程



主编 周跃庆



天津大学出版社
Tianjin University Press

内容简介

模拟电子技术是电路与信息科学技术的基础知识。本书内容涵盖了高等学校工科本科电气信息类“模拟电子技术基础”的基本教学要求,且知识面予以适当拓宽。

全书共分9章,主要内容有:常用半导体器件;放大电路的基本构成、工作原理及分析方法;功率放大电路的特点及性能指标的计算方法;模拟集成电路中的基本单元电路,集成运算放大器;反馈的基本概念,负反馈放大电路的分析及性能指标的计算方法;有源滤波等信号处理电路;模拟乘法器及应用;正弦和非正弦信号产生电路;直流稳压电源的构成及工作原理。本书最后一章,适当编排一些反映当代最新科技成果的内容——电流模式电路概念,由于电流模式电路发展历史不长,其学术思想和方法等对本科生都是用的新鲜知识。

本书可作为高等学校电气信息类等各专业本科生教材,也可供成人和职业教育相关专业选用。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础教程/周跃庆主编. —天津:天津
大学出版社,2005.9
ISBN 7-5618-2190-5

I.模... II.周... III.模拟电路—电子技术—高
等学校—教材 IV.TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第097452号

出版发行 天津大学出版社
出版人 杨欢
地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
印 刷 天津市宝坻区第二印刷厂
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm×260mm
印 张 18.75
字 数 478千
版 次 2005年9月第1版
印 次 2005年9月第1次
印 数 1—4000
定 价 26.00元

前 言

模拟电路是电气信息类专业的重要基础课之一,其应用范围很广,它包括线性放大电路,也包括诸如整流、振荡等非线性电路。广义来讲,数字电路以外的所有电路均属于模拟电路。

本书作者认真总结了“模拟电子技术”课程教学的点滴体会,研读了国内外有代表性的教材,吸取了近几年国内有关教学大纲及教学改革的宝贵经验。编写过程中着眼于两个目的:一是力图讲清楚本课程的重要内容和基础理论;二是力图使学生通过本课程的学习能够认识电路,会看电路图,会设计电路,会用电路知识去解决实际问题。

在内容安排上有三方面的考虑:一是加强模拟电子电路的基本概念、基本电路、基本原理、基本分析方法及基本设计和计算方法等重要基础理论和技术;二是适度压缩分立元件电路,加强集成电路及其应用内容;三是强调传统基本理论与技术,且适当加入新内容,如电流模式电路理论与技术等。

参加本书编写工作的教师及具体执笔分工如下:第1、4、5、9章由周跃庆编写,第2、3、8章由赵一群编写;第6章由任英玉编写;第7章由范娟编写。李斌编写部分章节的习题。全书由周跃庆定稿。

在拟定本书编写大纲过程中,电气与自动化工程学院电子学教研组全体教师进行了多次研讨,大家提出了许多宝贵意见,本书作者在此表示感谢。在完成本书编写过程中,作者从所列参考文献中吸取了宝贵的经验,本书作者谨向参考文献的著、编、译者表示感谢。

此外,本书编写过程中,张娟娟、程亦晗、贾鹏、张媛媛、王鸿隽绘制了书中图稿,本书作者表示感谢。

由于作者水平有限,难免存在不妥之处,恳请各位老师、同学及其他读者给予指正。

编者
2005年1月

第 1 章 常用半导体器件	(1)
1.1 半导体导电特性	(1)
1.2 PN 结和半导体二极管	(5)
1.3 双极型三极管	(15)
1.4 场效应晶体管	(22)
习题	(31)
第 2 章 放大电路基础	(36)
2.1 基本放大电路	(36)
2.2 放大电路的分析方法	(39)
2.3 放大电路的静态偏置及工作点的稳定	(49)
2.4 BJT 放大电路的三种基本组态	(52)
2.5 场效应管放大电路	(55)
2.6 多级放大电路	(62)
2.7 放大电路的频率响应	(65)
习题	(77)
第 3 章 功率放大电路	(86)
3.1 功率放大电路的特点及分类	(86)
3.2 互补对称功率放大电路	(88)
3.3 集成功率放大电路	(93)
3.4 功率半导体器件及其安全使用	(95)
习题	(99)
第 4 章 集成运算放大器	(103)
4.1 引言	(103)
4.2 集成运算放大器的基本结构	(103)
4.3 电流源电路	(104)
4.4 差动放大电路	(108)
4.5 集成运算放大器举例	(115)
4.6 集成运算放大器的宏模型	(119)
4.7 集成运算放大器的选用原则及使用中应注意的问题	(124)
习题	(126)
第 5 章 负反馈放大电路	(130)
5.1 引言	(130)
5.2 反馈的基本概念	(130)
5.3 负反馈放大器实现方式	(132)
5.4 负反馈对放大电路性能的影响	(137)
5.5 负反馈放大器的计算方法	(143)

5.6 负反馈放大器的稳定性问题	(162)
习题	(168)
第6章 信号处理电路	(172)
6.1 集成运放在信号处理方面的应用	(172)
6.2 模拟乘法器及其应用	(189)
习题	(198)
第7章 信号产生电路	(201)
7.1 自激振荡的条件	(201)
7.2 正弦波振荡器	(203)
7.3 非正弦波产生电路	(211)
7.4 单片集成多功能函数发生器	(219)
习题	(222)
第8章 直流稳压电源	(230)
8.1 小功率整流电路	(230)
8.2 滤波电路	(233)
8.3 直流稳压电路	(237)
习题	(246)
第9章 电流模式电路概述	(252)
9.1 引言	(252)
9.2 电流模式电路基本概念和发展概况	(252)
9.3 电流镜	(253)
9.4 跨导线性电路	(254)
9.5 电流传输器	(264)
习题	(283)
附录1 本书常用符号说明	(285)
附录2 名词术语汉英对照	(289)
参考文献	(293)

第1章 常用半导体器件

虽然电子技术的发展异常迅猛,但以大规模集成电路、计算机技术为先导的电子技术发展,并没有动摇电子器件仍以PN结为基础的现实。PN结在现代电子学中有着重要的作用,因为就PN结本身而言,它就是一种有着广泛用途的二极管;另外,它也是双极型晶体管和场效应晶体管的重要组成部分。因此,了解PN结的结构和电特性是很有必要的。本章首先简单介绍半导体的一些基本知识,再讨论PN结的导电机理和电特性,而后介绍半导体二极管、双极型晶体管(BJT)和场效应管(FET)的工作原理、特性及主要参数。

1.1 半导体导电特性

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,其电阻率为 $10^{-9} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 。常用的半导体材料有Si(硅)、Ge(锗)和Ⅲ~Ⅴ族化合物砷化镓(GaAs)等,其中以硅用得最广泛,在以后的讨论中,常以硅作为例子。

半导体之所以被用来制造各种电子器件,主要在于其独特的导电特性:在纯净半导体中掺入少量其他元素(称为杂质),可以改变和控制半导体的导电能力;温度变化、光照及外界磁场也可以改变半导体的导电能力。利用半导体的这些特性可制造出具有不同性能的半导体器件。例如,半导体二极管、双极型三极管、场效应管及热敏器件、光电器件、磁敏器件等。

1.1.1 本征半导体

本征半导体是指纯净的、结构完美的单晶半导体,它不含有任何杂质。现以硅和锗为例予以说明。

1. 本征半导体的原子结构

硅和锗都是Ⅳ族元素,它们的原子序数分别为14和32,原子结构如图1-1-1所示。它们的最外层都有4个电子,通常称为价电子。半导体的导电性能与价电子有关,为便于讨论导电机理,常采用图1-1-1(c)所示的简化模型。在这个模型中只画出价电子,除价电子以外的所有内层电子与原子核组成惯性核,它的净电量为正4个电子电量。

在形成晶体时,每个原子的价电子都与其周围的原子所共有,形成共价键结构,如图1-1-2(a)所示。在绝对零度(0 K)下,所有价电子都被原子核束缚在共价键上,而不能自由运动,所以相当于绝缘体。

2. 本征激发及载流子

当本征半导体受热或光照时,有些价电子将由于热“激发”获得能量而摆脱共价键的束缚,成为自由电子(带一个单位负电荷);同时,价电子离开后,在原来的共价键中将因缺少电子留下一个空位(带一个单位正电荷),这个空位被称为空穴。周围的价电子受到热激发也会跳到这个空穴处,在其原来的位置形成新的空穴,这相当于空穴从一个位置移到另一个位置,如图1-1-2(b)所示。并把上述现象称为本征激发。

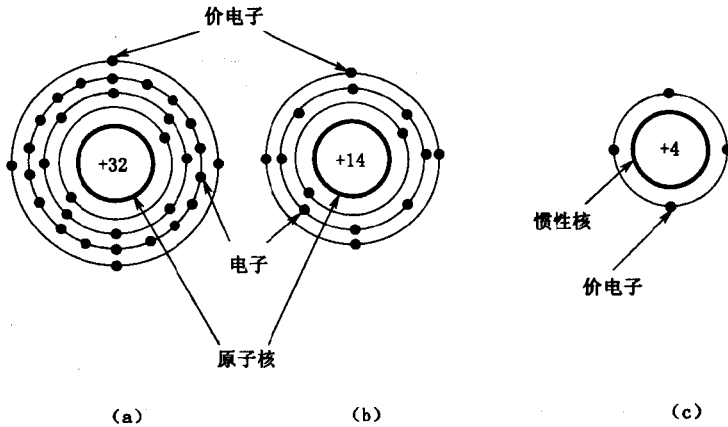


图 1-1-1 硅和锗原子结构模型
(a)Ge(锗);(b)Si(硅);(c)简化模型

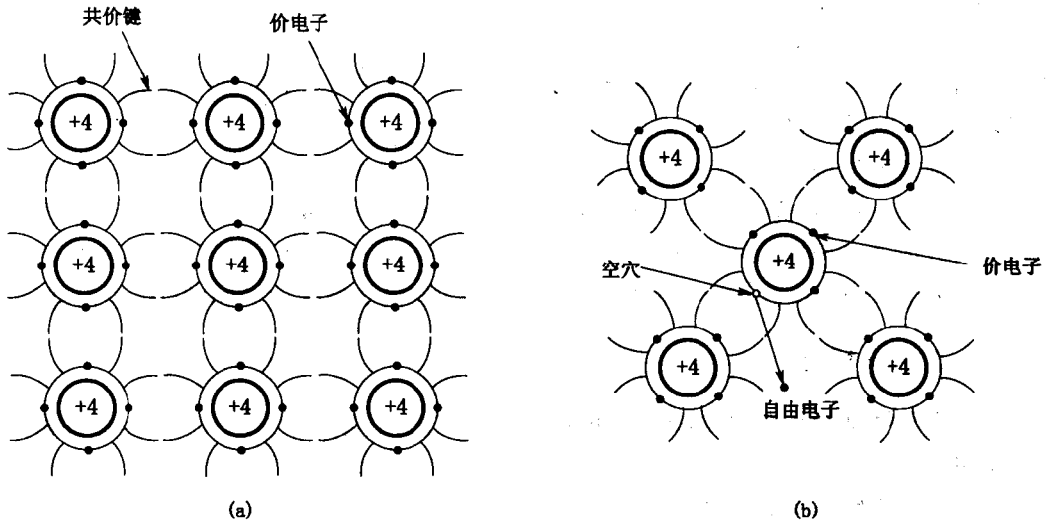


图 1-1-2 共价键结构示意图
(a) $T=0\text{ K}$; (b) $T>0\text{ K}$

不加电场时,自由电子和空穴的运动是随机的,不会形成电流。在外加电场作用下,虽然在微观上电子和空穴的运动仍是杂乱无章的,但从宏观上看,自由电子和空穴在沿电场方向作定向运动(二者运动方向相反),形成电流。可见,在半导体中存在两种载流子——自由电子和空穴。它们是成对出现的,电荷量相等,极性相反,也称作“电子空穴对”。

值得指出的是,空穴并不是一个物理实体,引进空穴的概念只是为了处理问题方便。半导体中所说的电子导电和空穴导电实际上都是电子参与导电,所谓空穴导电,只是价电子在电场作用下依次填补空穴的统计结果。

3. 本征载流子浓度

在本征半导体中,产生“电子空穴对”的同时,还会出现载流子复合现象,即自由电子在热运动中可能与空穴相遇,释放出能量,填补空穴,恢复共价键结构,使“电子空穴对”消失。在一定温度下,本征激发和载流子复合都在不停地进行,最终达到动态平衡,使本征半导体

内载流子浓度处于某一热平衡值,并把热平衡时的自由电子浓度 n_i 和空穴浓度 p_i 统称为本征载流子浓度。理论分析表明,本征载流子浓度可用下式表示:

$$n_i = p_i = A_0 T^{\frac{3}{2}} e^{(-E_{g0}/2kT)} \quad (1-1-1)$$

式中, A_0 是与半导体材料有关的常数,硅的 $A_0 = 3.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-\frac{3}{2}}$, 锗的 $A_0 = 1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-\frac{3}{2}}$; k 是玻耳兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$; T 是绝对温度,单位为 K; E_{g0} 是 0 K 时的禁带宽度,它表示把一个价电子激发成自由电子所需要的最小能量,单位为 eV [$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ (焦耳)], 硅、锗的禁带宽度分别为 1.21 eV 和 0.785 eV。

式(1-1-1)表明,本征载流子浓度与半导体材料有关,也与温度密切相关。温度 T 升高, n_i (p_i) 增大,导电能力增强。在室温下 ($T = 300 \text{ K}$), 由式(1-1-1)计算可得,硅的 $n_i = p_i \approx 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 锗的 $n_i = p_i \approx 2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。

1.1.2 杂质半导体

在室温下,本征载流子浓度数值虽然很大,但与其原子密度(硅原子密度为 $5.1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$) 相比,却是很小的数字,其导电能力很弱。但是,在本征半导体中掺入微量其他元素,其导电能力发生显著变化。掺入的元素称为“杂质”,掺入杂质后的半导体称为杂质半导体。根据掺入的杂质不同,杂质半导体分为 N 型(电子型)半导体和 P 型(空穴型)半导体两种类型。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入少量 V 族元素(例如磷),能使半导体中的自由电子浓度显著增加。由于磷原子有 5 个价电子,当掺入硅中后,有 4 个电子与周围的硅原子形成共价键,还多余 1 个电子。这个多余的价电子受到的束缚比共价键上的电子小得多,很容易被激发使它挣脱原子核的束缚成为自由电子,而失去多余电子的杂质原子变为不能移动的正离子,由于五价元素杂质可以提供多余电子,故称为施主杂质。掺入杂质原子数越大,产生的自由电子数就越多,其导电能力就越强。N 型半导体结构如图 1-1-3 所示。

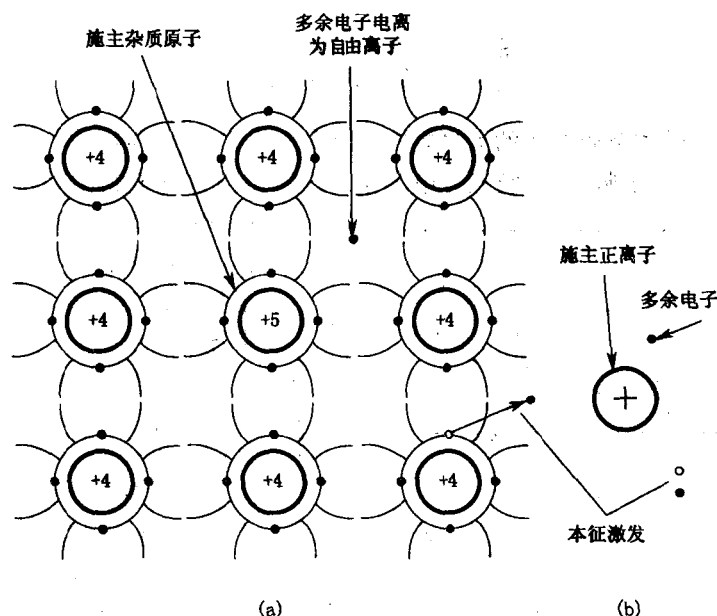


图 1-1-3 N 型半导体结构示意图

(a) 共价键结构; (b) 模型

半导体中,除施主杂质提供的大量自由电子外,同时还存在本征激发产生的电子空穴对,但自由电子数远大于空穴数,故以自由电子导电为主。因此,称掺入五价元素杂质的半导体为电子型或N型半导体(N表示 Negative),并把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”。N型半导体的模型表示如图 1-1-3(b)所示。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入少量Ⅲ族元素(例如硼),能使半导体中的空穴浓度显著增加。由于三价元素硼的最外层只有3个价电子,当将其掺入硅中之后,在与周围的硅形成共价键时尚缺少1个价电子,产生一个空位。在室温下,相邻原子的价电子很容易填补这个空穴,从而产生一个空穴,而三价杂质原子接受1个价电子变为不能移动的负离子。由于三价元素杂质接受价电子,故称为受主杂质,其结构如图 1-1-4 所示。

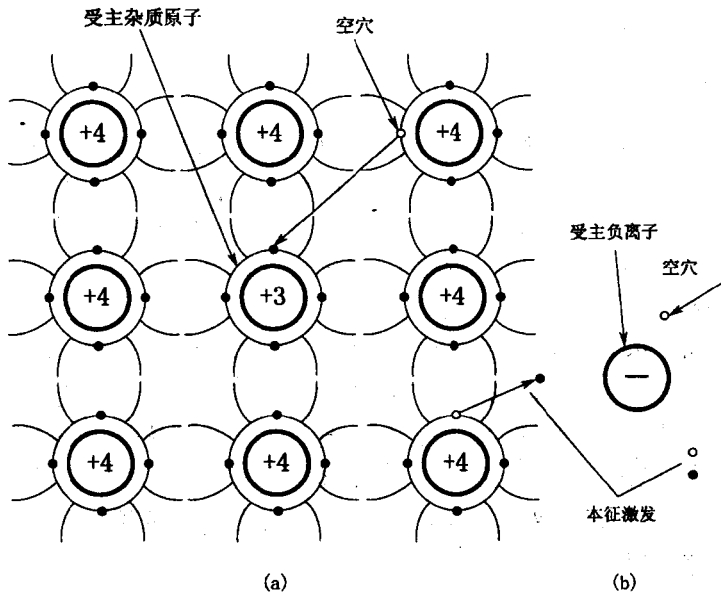


图 1-1-4 P型半导体结构示意图
(a)共价键结构;(b)模型

半导体中,除受主杂质提供的大量空穴外,同时还存在本征激发产生的电子空穴对,但空穴数远大于自由电子数,故以空穴导电为主。这种以空穴导电为主的半导体称为空穴型

或P型半导体(P表示 Positive)。即在P型半导体中,空穴是多数载流子,电子是少数载流子。图 1-1-4(b)是P型半导体的模型表示。

3. 载流子的两种运动

电流是载流子定向运动的结果。半导体中的载流子有两种运动形式,即漂移运动和扩散运动。

漂移运动是载流子在电场作用下的定向运动,如图 1-1-5 所示。空穴带正电荷顺电场方向运动,而电子逆电

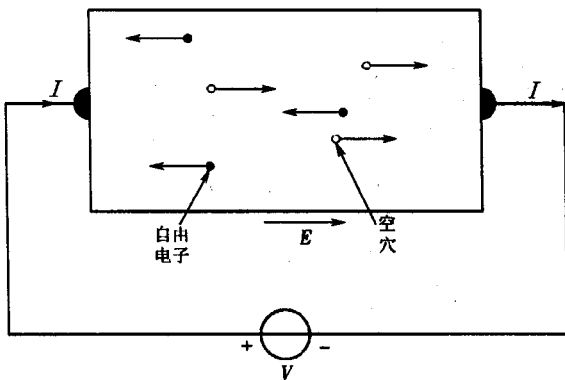


图 1-1-5 载流子的漂移运动

场方向运动。由于它们所带的电荷极性相反,所以两种载流子运动所产生的电流方向一致,并将由载流子的漂移运动所产生的电流叫漂移电流。

由前面分析可知,热平衡时,半导体中载流子浓度的分布是均匀的,没有外电场作用不会形成电流。当半导体的一端面受到光照或注入载流子时,半导体中载流子浓度的热平衡状态受到破坏,并在半导体内形成浓度差,导致载流子作定向运动,如图 1-1-6 所示。载流子从浓度高的区域向浓度低的区域的定向运动称为扩散运动,由载流子扩散运动形成的电流称为扩散电流。

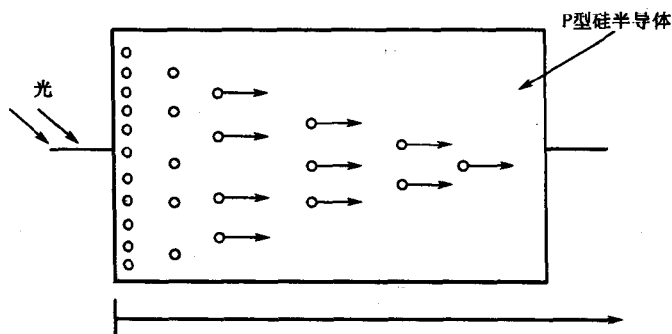


图 1-1-6 载流子的扩散运动

1.2 PN 结和半导体二极管

在 N 型(或 P 型)半导体衬底上,采用扩散、外延或合金等杂质补偿方法,将其部分区域转变成 P(或 N)区,则在 P 区与 N 区的交界处形成 PN 结。PN 结是半导体器件及集成电路中元器件的基本结构。

1.2.1 PN 结的形成

图 1-2-1(a)表示在同一半导体中的 P 区和 N 区,其交界处 PN 结形成的物理过程简述如下。

首先,在 P、N 半导体界面两侧存在多子浓度的显著差异,导致了载流子的扩散运动。P 区内的空穴向 N 区扩散,并与 N 区内的电子复合,使得交界面附近的 P 区一侧因失去空穴而留下不能移动的正离子;同理,N 区内的电子将向 P 区扩散并与 P 区的空穴复合,N 区一侧因失去电子而留下不能移动的正离子。这样由于多子扩散,在交界面两侧形成了一个正负离子区,称为“空间电荷区”。在该区域内,多数载流子因扩散和复合而消耗掉,因此空间电荷区又称为耗尽层,如图 1-2-1(b)所示。在空间电荷区内正负离子的积累形成了方向由 N 区指向 P 区的内电场 E_0 ,并在 PN 结中产生电位差 V_0 ,而在 PN 结以外的区域是等电位的,以保持电中性,其电位分布及电位势能曲线如图 1-2-1(c)、(d)所示。

伴随着内电场的建立,将对载流子的运动产生两种影响。一是不利于多子的扩散,即内电场将阻碍 P 区的空穴和 N 区的电子继续向对方区域扩散,故空间电荷区又称阻挡层。二是有利于少子的漂移,即内电场将驱使 N 区的空穴向 P 区漂移,P 区的电子向 N 区漂移,从而产生少子的漂移运动。P 区的电子向 N 区漂移并补充失去的电子,使正离子数减少;同理,P 区的空穴也得到补充,使负离子数减少,从而导致空间电荷区内正负离子积累数量减

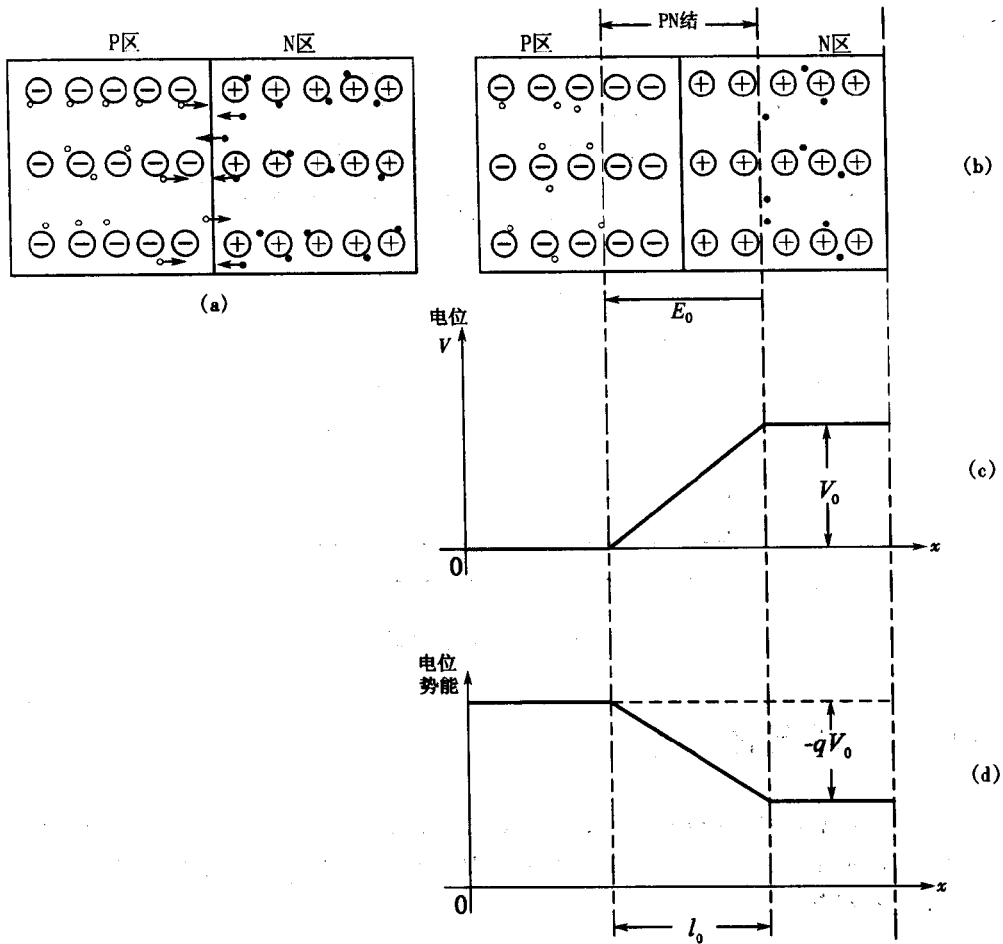


图 1-2-1 PN 结的形成

(a)扩散后的 P 区和 N 区交界面;(b)PN 结的形成;(c)电位分布曲线;(d)电位势能

少。

可见,多子的扩散运动和少子的漂移运动是同时存在的,随着扩散运动的进行,空间电荷区加宽,电场 E_0 增强,又使扩散运动减弱,漂移运动则随之增强,使空间电荷区变窄,电场 E_0 削弱,再次促使多子扩散,最终将达到扩散运动和漂移运动的动态平衡。此时,空间电荷区的宽度相对稳定下来,内电场强度为恒定值,这就是所谓的 PN 结。由于在动态平衡中,总的多子扩散电流与总的少子漂移电流大小相等,方向相反,所以 PN 结中总电流为零。

1.2.2 PN 结的特性

在以上 PN 结无外加电压时的讨论中,强调了 PN 结的形成过程和动态平衡概念。现在讨论 PN 结在外加电压作用下的特性。需要指出的是,加上外加电压时,因为 N 区和 P 区的材料电阻很小,所以外电压主要降落在空间电荷区。

1. 单向导电性

(1) 外加正向电压

将 PN 结的 P 区一侧接电源的正极, N 区一侧接电源的负极, 称为 PN 结的“正向偏置”, 简称“正偏”, 如图 1-2-2 所示。PN 结正偏时, 外加电场与内电场方向相反, 削弱了内电场的作用, 空间电荷量减少, 阻挡层宽度由 l_0 减小为 l , 耗尽层两端电位差由 V_0 降为 $V_0 - V_F$, 从而破坏了 PN 结的动态平衡状态, 使多子扩散数目远远大于少子漂移数目, 越过 PN 结的电流近似为扩散电流, 称为正向电流 I_F , 且正向电流将随着电压的增大而迅速增大, 使正偏的 PN 结表现为一个阻值很小的电阻。

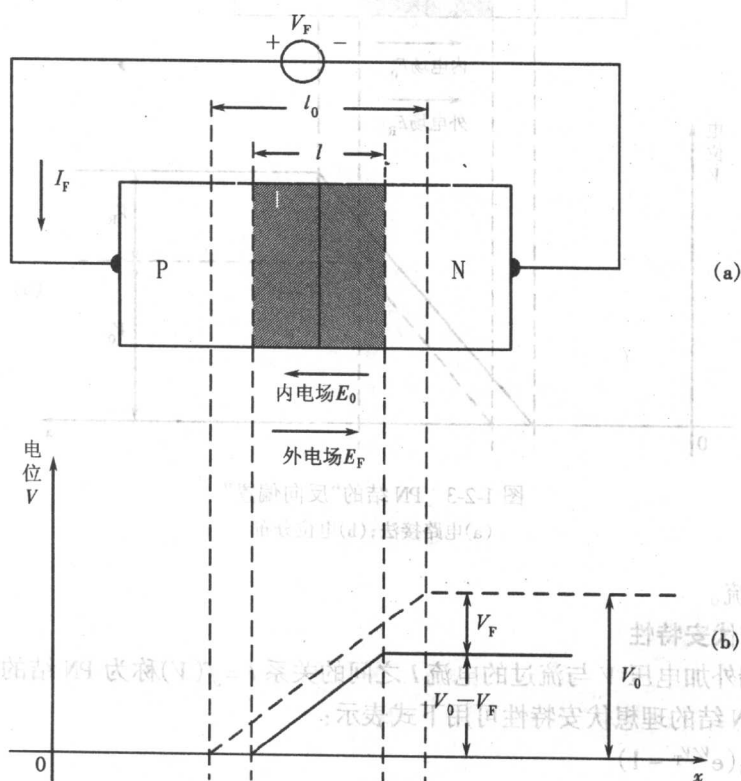


图 1-2-2 PN 结的“正向偏置”

(a) 电路接法; (b) 电位分布

(2) 外加反向电压

将 PN 结的 P 区接电源的负极, N 区接电源的正极, 称为 PN 结的“反向偏置”, 简称“反偏”, 如图 1-2-3 所示。PN 结反偏时, 外加电场与内电场的方向相同, 起增强内电场的作用, 空间电荷区加宽, 由 l_0 变为 l , 电位差由 V_0 增加到 $V_0 + V_R$, 从而有利于少子漂移, 不利于多子扩散, 使多子扩散数目近似为零, PN 结同样失去动态平衡, 此时, 通过 PN 结的电流主要由漂移电流决定, 称为反向电流 I_R 。由于少数数量是由本征激发引起的, 其浓度很小, 且当温度一定时, 少数数量为恒定值, 因此反向电流 I_R 很小且几乎不随反偏电压变化, 故亦称反向饱和电流 I_S , 此时 PN 结表现为一个大电阻。

可见, PN 结具有单向导电特性。PN 结正偏时, 产生的正向电流远远大于 PN 结反偏时

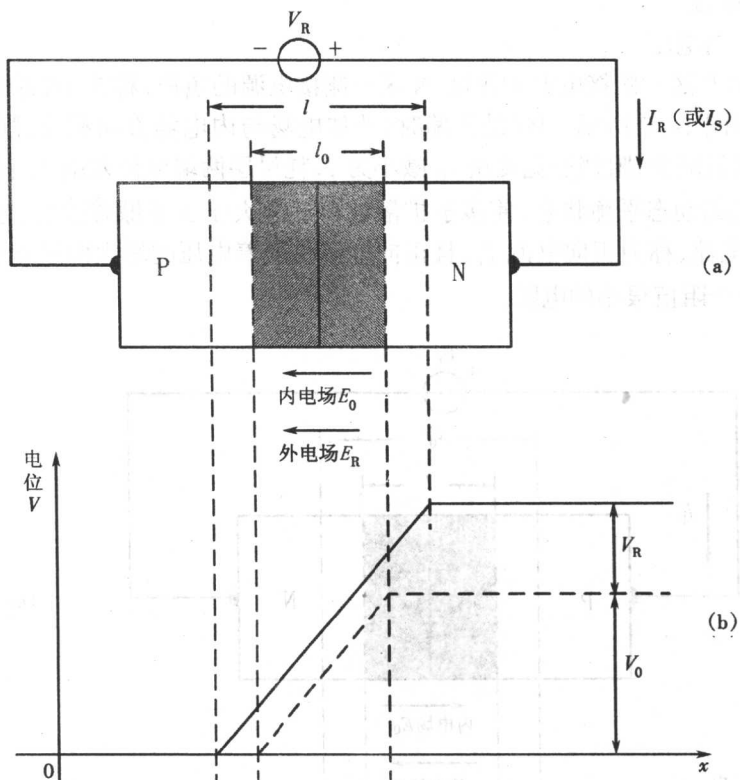


图 1-2-3 PN 结的“反向偏置”

(a)电路接法;(b)电位分布

的反向饱和电流。

2. PN 结的伏安特性

PN 结两端外加电压 V 与流过的电流 I 之间的关系 $I = f(V)$ 称为 PN 结的伏安特性。根据理论分析,PN 结的理想伏安特性可用下式表示:

$$I = I_S(e^{V/V_T} - 1) \quad (1-2-1)$$

式中, I_S 为反向饱和电流; $V_T = kT/q$ 为温度的电压当量,其中 q 为电子电荷,当温度为室温 $T = 300 \text{ K}$ 时, $V_T = 26 \text{ mV}$ 。

由式(1-2-1)可知,当正偏电压 $V \gg V_T$ 时, $e^{V/V_T} \gg 1$, 则 $I \approx I_S e^{V/V_T}$, 即当 V 大于一定值后, I 与 V 成指数关系;当反偏压 $|V| \ll V_T$ 时,指数项趋于零,则 $I \approx -I_S$, 即反向电压达到一定值后,PN 结反向电流为常数,也就是所说的反向饱和电流。总的伏安特性如图 1-2-4 中实线所示。

3. 击穿特性

图 1-2-4 中的实线是理想情况,实际 PN 结的反向电流 I_S 在反向电压大于某一值时将急剧增加,这种现象称为 PN 结的反向击穿,如图 1-2-4 中的虚线所示,图中的 V_{BR} 称作击穿电压。

击穿的机理有两种,一种是雪崩击穿,另一种是齐纳击穿。雪崩击穿多发生在低掺杂的 PN 结中,这种结的空间电荷区较宽。当反向电压足够高时,PN 结中内电场较强,穿越耗尽

层的少子受到电场加速,获得足够的动能,把共价键上的价电子碰撞下来,产生电子空穴对,这些新的载流子又被加速,又会碰撞产生新的电子空穴对,形成连锁反应。这种过程如同雪崩一样,会导致反向电流随着反偏压的增大而迅速增大,造成PN结雪崩击穿。

齐纳击穿多发生于高掺杂的PN结中,这种结的空间电荷区较窄,不太大的反偏压就会产生很强的电场,足以将价电子直接从共价键上拉出来,从而获得很多的电子空穴对,使得反向电流剧增,PN结产生齐纳击穿。

一般来说,击穿电压低于5V者为齐纳击穿,大于7V者为雪崩击穿,介于二者之间两者均可有之。雪崩击穿时,电压温度系数为正;齐纳击穿时,电压温度系数为负。当两种击穿均存在时,其电压温度系数很低,甚至接近于零。

以上两种电击穿,只要满足 $I_R V_{BR}$ 小于PN结功耗,就是可逆的,即反向电压降低或去掉后,PN结仍可恢复原状态。一旦 $I_R V_{BR}$ 大于PN结功耗,就会因结温升高产生热击穿,使PN结被烧毁。可以利用电击穿制造特殊的二极管,但热击穿必须避免。

4. 电容效应

PN结两端电压改变时,会引起积累在PN结的空间电荷量和两中性区的非平衡少数载流子数量发生变化,从而显示出PN结的电容效应。PN结电容 C_J 包括势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 。

(1) 势垒电容

由以上讨论可知,当PN结正偏压增大或反偏压减小时,空间电荷量减少,耗尽层变窄,相当于势垒区放电;当PN结正偏压减小或反偏压增大时,空间电荷量增加,耗尽层加宽,相当于对势垒区充电。因此,PN结的势垒电容是用来描述势垒区的空间电荷量随电压变化而产生的电容效应,并用 C_B 表示。

由于PN结正偏时,结电阻很小,所以 C_B 的作用相对较小;但在PN结反偏时, C_B 的作用就显得尤为重要。

(2) 扩散电容

由于PN结正偏时,多子扩散运动将随电压改变而变化,两中性区也发生电荷充放电现象。随着PN结的正偏,多子扩散增强,使P区和N区的多子进入对方中性区而成为非平衡少子,并在中性区不断扩散的过程中,与其中的多子复合而消失。结区边界附近少子浓度最高,随后以指数规律衰减。因此,扩散电容是用来描述势垒区外侧的非平衡少子积累引起的电容效应,用 C_D 表示。

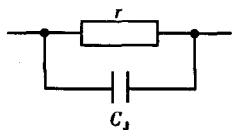


图 1-2-5 PN 结的高频等效电路

C_D 和 C_B 是并联的,PN 结总电容

$$C_J = C_B + C_D \quad (1-2-2)$$

正偏时, $C_D \gg C_B$, $C_J \approx C_D$; 反偏时 $C_D \approx 0$, $C_J \approx C_B$ 。

值得注意的是,在高频运用时,必须考虑结电容的影响,PN 结的高频等效电路如图 1-2-5 所示。其中, r 表示结电阻, C_J 表示结

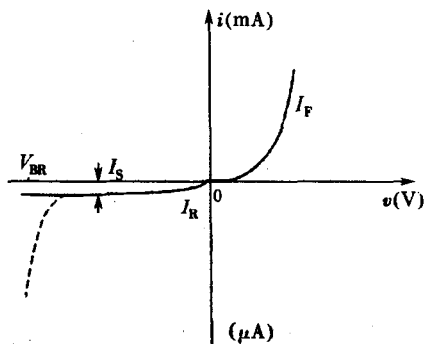


图 1-2-4 PN 结的伏安特性

电容。结电容的大小除了与外加电压有关,还与本身结构和工艺有关。

1.2.3 半导体二极管

1. 结构和类型

将半导体 PN 结加上欧姆接触电极、引出线并封装管壳就构成了一个半导体二极管(简称二极管)。其中,由 P 区引出的电极称为正极,由 N 区引出的电极称为负极,其结构与符号如图 1-2-6 所示。符号中的箭头(图 1-2-6(d))是由 P 区指向 N 区,表示其正向导通时,实际的电流方向。尽管二极管存在半导体中性区的体电阻、接触电极电阻和引线电阻,使二极管的特性与 PN 结特性有所不同,但是差异不大,所以半导体二极管的特性基本上与 PN 结特性相同。

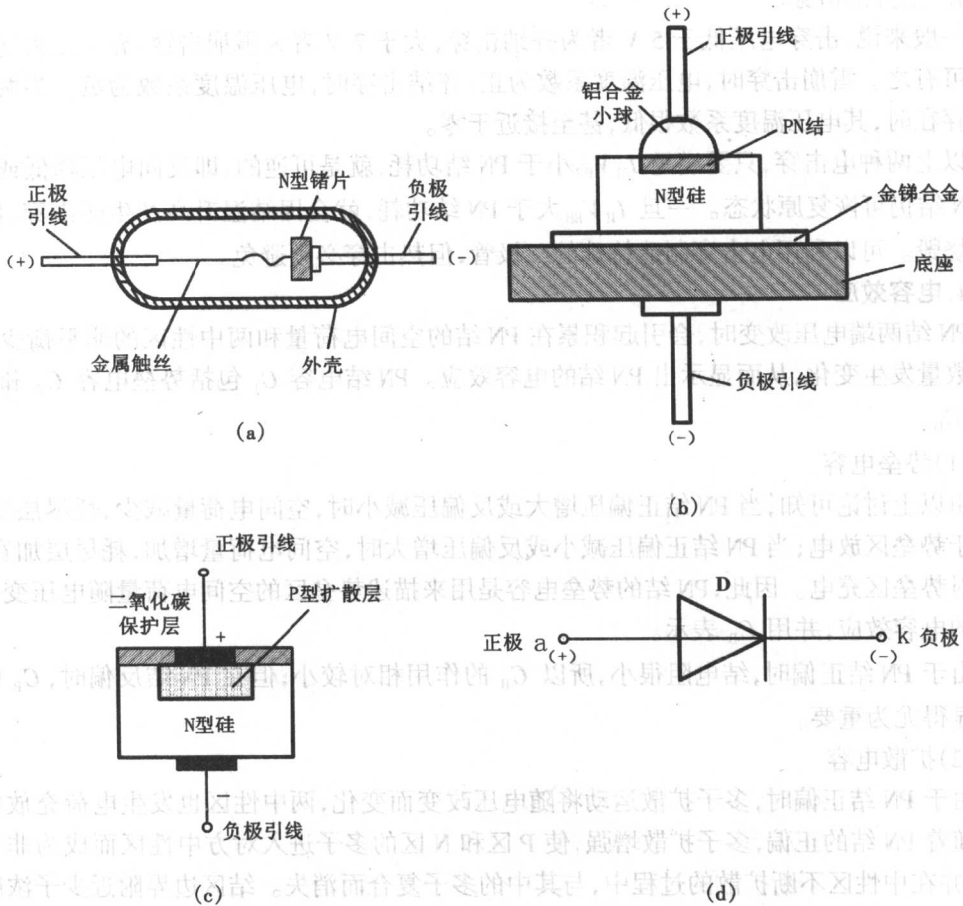


图 1-2-6 二极管的结构与符号

(a)点接触型;(b)面接触型;(c)平面型;(d)符号

二极管按结构分为点接触型、面接触型、平面型三种,分别如图 1-2-6(a)、(b)、(c)所示。点接触型的特点是 PN 结面积小、极间电容小、工作电流小、工作频率高,主要用于高频检波、混频或作为开关元件用。

面接触型的特点是 PN 结面积大、工作电流大、频率低,主要用于整流。

平面型二极管是集成电路中常见的一种形式。PN 结面积较大时,可作大功率整流。结面积较小时,结电容也小,可用在脉冲数字电路中作开关管。

制造二极管的材料有硅和锗,分别称为硅二极管和锗二极管。

2. 伏安特性

二极管的伏安特性与 PN 结的理想伏安特性相似,实测两例二极管伏安特性 $i_D = f(v_D)$,见图 1-2-7 所示。

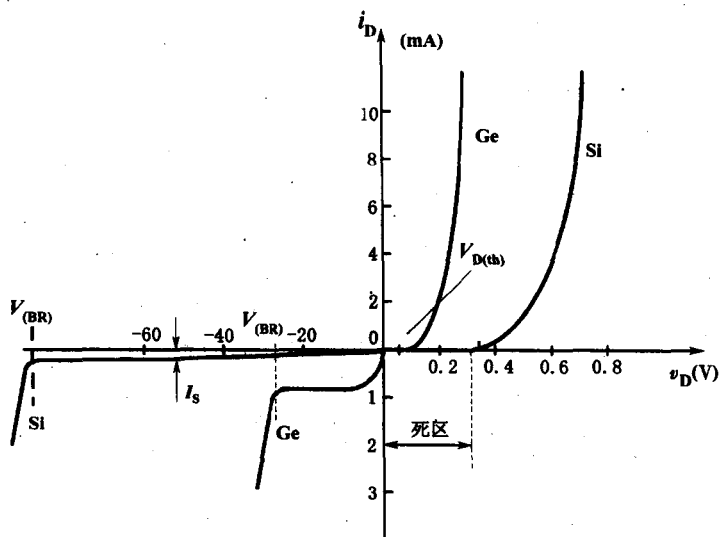


图 1-2-7 二极管伏安特性

二极管伏安特性曲线分为三个区域。

(1) 正向工作区

在图 1-2-7 中, $v_D > 0$ 的区域为正向工作区。在该区域,二极管的正向特性是非线性的。在起始部分,由于正偏压较小,PN 结上形成的外电场对内电场的影晌小,因此这时的正向电流很小,几乎为零,二极管此时并未导通;只有当正偏压增到一定数值出现正向电流时,才认为导通,并把此时所对应的电压称为开启电压(或阈值电压,门限电压,死区电压),以 V_{th} 表示。常温下,硅管的 $V_{th} \approx 0.5 \sim 0.6 \text{ V}$,锗管的 $V_{th} \approx 0.1 \sim 0.2 \text{ V}$ 。二极管的理想伏安特性可用 PN 结电流方程(式(1-2-1))表示。

(2) 反向工作区

在图 1-2-7 中, $-V_{BR} < v_D < 0$ 的区域为反向工作区。在该区域,二极管的反向电流很小,且基本上不随反向电压变化,而趋向于反向饱和电流 I_S 值。通常锗管的 I_S 较大,为 μA 量级;硅管的 I_S 较小,在 $10^{-9} \sim 10^{-15} \text{ A}$ 量级。

(3) 击穿区

在图 1-2-7 中, $v_D \leq -V_{BR}$ 的区域为击穿区。在该区域,当反向电压负向增加到 V_{BR} ,即 $v_D \leq -V_{BR}$ 时,二极管反向电流剧增,使二极管反向击穿, V_{BR} 称为反向击穿电压。

3. 主要参数

器件的参数表征了半导体器件的性能和运用条件,是用户合理选择和正确使用器件的依据。二极管的主要参数如下。