

自动化

专业本科系列教材

Moni Dianzi Jishu Jichu

模拟电子技术基础

0101001000100001

主 编 林 涛
副主编 黄知超
李姣军
王德嘉

重庆大学出版社

模拟电子技术基础

主 编 林 涛
副主编 黄知超 李姣军 王德嘉

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书是高校自动化专业本科系列教材之一。编写中参照了多所院校的“模拟电子技术基础教学大纲”，力求内容与课时相适应。本书共分10章，主要内容为：晶体二极管和晶体三极管、基本放大电路、场效应管及其放大电路、多级放大电路与集成运算放大电路、放大电路的频率响应、放大电路中的反馈、信号运算与处理电路、信号产生电路、功率放大电路、直流电源等。每章开始有内容提要，章末有小结，并配有难易程度和数量都比较适当的思考题和习题。

本书可作为高等学校自动化、电子信息工程、仪器仪表等专业及相近专业本、专科生的“模拟电子技术基础”课程的教材和教学参考书，也可供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

模拟电子技术基础/林涛主编. —重庆:重庆大学出版社,2003.3

(自动化专业本科系列教材)

ISBN 7-5624-2831-X

I. 模... II. 林... 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(2003)第 006281 号

模拟电子技术基础

主 编 林 涛

副主编 黄知超 李姣军 王德嘉

责任编辑:曾令维 版式设计:曾令维

责任校对:廖应碧 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400044

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

自贡新华印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:443千

2003年4月第1版 2003年4月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 7-5624-2831-X/TN·70 定价:20.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

本书是依据 2001 年 9 月在重庆大学出版社召开的高校本科自动化系列教材主编会议讨论审定的“模拟电子技术基础”编写大纲编写的,内容安排符合原国家教委颁发的“高等学校电子技术基础课程教学基本要求”(模拟部分)。编写中参照了多所院校的“模拟电子技术基础教学大纲”,力求使教材内容与课时相适应,有利教学,方便自学。

本书可作为高等学校自动化、电子信息工程、仪器仪表等专业及相近专业本、专科生的“模拟电子技术基础”课程的教材和教学参考书,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

“模拟电子技术基础”是自动化和电子信息类学科一门重要的技术基础课,进入 21 世纪,数字化是技术转移的重点之一,但基本器件与基本单元电路目前仍是电子技术的基础,因此,模拟电子技术基础的重要性仍不可动摇。

从目前的教学实际来看,“模拟电子技术基础”一个突出的问题是如何正确处理不断增加的课程内容与课时少的矛盾。新增加的内容主要集中在集成电路方面,而分立元件基本单元电路作为电子技术的基础又难于割舍,因此,在教材编写中如何正确处理这一矛盾显得尤为重要。我们主张“精选内容,保证基础,联系实际,体现先进”。具体做法是:把教材分为正文和阅读两部分内容。正文部分重点保证模拟电子技术的基本单元电路与基本分析方法,强调基本概念,兼顾分立与集成,分立元件电路突出电路原理,集成电路强调应用。阅读内容和重点难点分析及习题解答作为教学参考书“模拟电子技术——阅读材料与学习指导”另编出版。阅读内容主要介绍模拟电子技术的发展方向及新器件的应用,主要供学生自学。

本书是由多所学校的老师合作编写的,具体分工如下:第

目 录

第 1 章 半导体二极管和三极管	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.2 PN 结的形成及特性	5
1.3 二极管及其应用电路分析	10
1.4 特殊二极管	15
1.5 半导体三极管	19
本章小结	28
思考题与习题	28
第 2 章 基本放大电路	31
2.1 基本共射放大电路及放大电路的主要性能指标	31
2.2 放大电路的图解分析法	36
2.3 放大电路的微变等效电路分析法	45
2.4 放大电路的工作点稳定问题	53
2.5 共集电极放大电路与共基极放大电路	59
本章小结	65
思考题与习题	66
第 3 章 场效应管及其放大电路	71
3.1 结型场效应管	71
3.2 金属-氧化物-半导体场效应管	77
3.3 场效应管放大电路	82
3.4 各种放大电路的比较	89
本章小结	91
思考题与习题	91

第4章 多级放大电路与集成运算放大电路	94
4.1 多级放大电路的级间耦合方式	94
4.2 多级放大电路分析	98
4.3 电流源电路	100
4.4 差动放大电路	104
4.5 集成运算放大电路	113
4.6 同相比例器与反相比例器	117
本章小结	120
思考题与习题	120
第5章 放大电路的频率响应	126
5.1 频率响应的概念	126
5.2 晶体三极管的高频等效模型	131
5.3 单管共发射极放大电路的频率响应	135
5.4 多级放大电路的频率响应	139
5.5 放大电路的阶跃响应	142
本章小结	145
思考题与习题	145
第6章 放大电路中的反馈	148
6.1 反馈的基本概念与分类	148
6.2 负反馈放大电路的方框图及放大倍数的一般表达式	155
6.3 负反馈对放大电路性能的影响	158
6.4 负反馈放大电路主要性能指标的定量计算	165
6.5 负反馈放大电路的稳定性	170
本章小结	174
思考题与习题	174
第7章 信号运算与处理电路	178
7.1 基本运算电路	178
7.2 对数和反对数运算电路	184
7.3 RC有源滤波器	185
7.4 集成运放应用举例	190
7.5 电压比较器	193
本章小结	198
思考题与习题	199

第 8 章 信号产生电路	202
8.1 正弦波振荡电路的组成及振荡条件	202
8.2 RC 正弦波振荡电路	204
8.3 LC 正弦波振荡电路	208
8.4 非正弦信号发生电路	216
本章小结	221
思考题与习题	222
第 9 章 功率放大电路	227
9.1 功率放大电路的一般问题	227
9.2 互补对称功率放大电路	229
9.3 集成功率放大电路	236
本章小结	237
思考题与习题	237
第 10 章 直流电源	240
10.1 直流电源概述	240
10.2 整流电路	242
10.3 滤波电路	248
10.4 串联型稳压电路	253
10.5 开关型稳压电路	264
本章小结	269
思考题与习题	270
参考文献	273

第 1 章

半导体二极管和三极管

内容提要 半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高优点而得到广泛的应用,是组成各种电子电路的基础。本章首先简要地介绍半导体的基本知识,接着讨论半导体器件的核心环节——PN 结,并重点讨论半导体二极管和三极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 半导体的基本知识

1.1.1 半导体材料及其特性

自然界中存在着各种不同性质的物质,按导电能力的强弱可分为导体、绝缘体和半导体。导电能力介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体。常用的半导体材料如硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)等,以及掺杂或制成其他化合物半导体的材料如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。其中,硅和锗是目前最常用的半导体材料。除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外,半导体还具有一些特殊的性质,如光敏特性、热敏特性及掺杂特性等,即半导体受到光照和热辐射时,或在纯净的半导体中掺入微量的其他特定元素(也叫“杂质”)后,它的导电能力将有明显的增强。正是半导体的这些特点,大多数现代电子器件都是由半导体材料制造而成的。另外,这些特点也说明半导体的导电机理必然不同于其他物质。为了理解这些特点,必须了解半导体的结构。

1.1.2 本征半导体的结构

完全纯净且结构完整的半导体晶体叫做本征半导体。硅和锗是在电子器件中用得最多的半导体材料,它们都是四价元素,原子最外层轨道上具有 4 个电子,称为价电子。在研究半导体的导电特性时,常用图 1.1 表示简化原子模型。由于原子呈中性,故用 $\oplus 4$ 表示 4 个与电子等电量的正电荷。

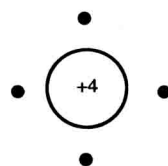


图 1.1 硅和锗的原子结构简化模型

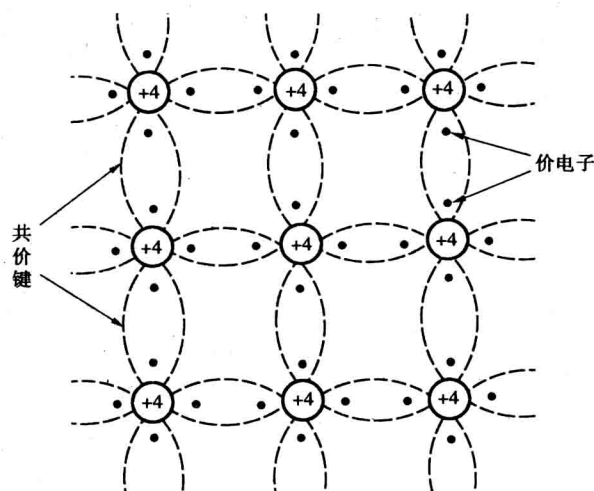


图 1.2 硅和锗的二维晶格结构图

本征半导体为晶体结构,它们的原子形成有序的排列,邻近原子之间由共价键连接,每个硅(锗)原子的 4 个价电子与相邻的 4 个硅(锗)原子的各一个价电子分别组成 4 个共价键,使每个硅(锗)原子最外层形成拥有 8 个共有电子的稳定结构,如图 1.2 所示。图中表示的是二维结构,实际上半导体晶体结构是三维的。物质的化学性质是由价电子数决定的,半导体的导电性质也与价电子有关。

1.1.3 本征半导体中的两种载流子——自由电子和空穴

(1) 两种载流子——自由电子和空穴

大家知道,金属导体的导电机理是导体中存在大量带负电荷的“自由电子”在电场作用下的

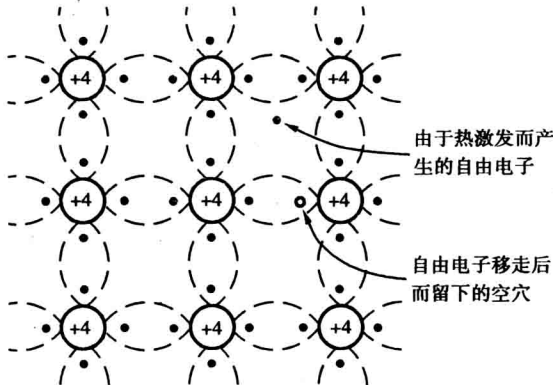


图 1.3 共价键被打破而产生空穴-自由电子对

定向移动形成电流。因此,自由电子是金属导体中的载流子,而且是惟一的。半导体的重要物理特性是它的电导率,电导率与材料内单位体积中所含的载流子的数目有关。载流子的浓度愈高,其电导率愈高。半导体内载流子的浓度取决于许多因素,包括材料的基本性质、温度值以及杂质的多少等。在热力学温度为零度($T = 0\text{K}$)和没有外界激发时,由于每一原子的外围电子(价电子)被共价键所束缚,因此,晶体

中没有自由电子,半导体如同绝缘体一样不能导电。但是,半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中束缚得那样紧。在室温下,价电子就会获得足够的随机热振动能量而挣脱共价键的束缚,成为自由电子,如图 1.3 所示,这种现象称为本征激发。当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,共价键中就留下一个空位,这个空位叫做空穴。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特征。

由于共价键中出现了空穴,在外加电场或其他能源的作用下,邻近价电子就可填补到这个空位上,而在这个电子原来的位置上又留下新的空位,以后其他电子又可转移到这个新的空位,如图 1.4 所示。这样,在半导体中出现了价电子填补空穴的运动。在外电场的作用下,填补空穴的价电子做定向移动将形成漂移电流。但这种价电子的填补运动是由于空穴的产生而引起的,而且始终是在原子的共价键之间进行的,它不同于自由电子在晶格中的自由运动。同时,价电子填补空穴的运动无论在形式上还是在效果上都相当于空穴在与价电子运动方向相反的方向上运动。为了区别电子的这两种不同的运动,把后一种运动叫做“空穴运动”,空穴被看做带正电荷的带电粒子——“空穴载流子”。出现空穴载流子是半导体导电机理的重要特点。

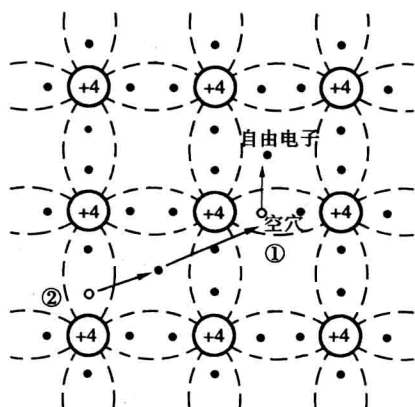


图 1.4 半导体中的两种载流子

综上所述,本征半导体中存在两种载流子:带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。它们是成对出现的,也叫做“电子空穴对”。由于两者电荷量相等,极性相反,因此本征半导体是电中性的。本征半导体受外电场作用时,电子形成电子电流,空穴形成空穴电流。虽然两种载流子的运动方向相反,但因为它们所带的电荷极性也相反,所以两种电流的实际方向是相同的,它们的和就是半导体中的电流。

(2) 载流子的“产生”和“复合”

本征半导体受外界能量激发,可产生电子空穴对,这叫载流子的“产生”。电子和空穴在无规则热运动过程中也会相遇而互相填补,使自由电子和空穴成对消失,这一过程叫载流子的“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大量产生,其复合数量也逐渐增加,最终使产生和复合达到动态平衡(载流子的产生和复合仍不断进行,但单位时间内产生和复合数量相等)。此时,半导体中自由电子和空穴浓度(单位体积 1cm^3 中的载流子数)将保持一定数值。如果温度升高,本征激发增强,使载流子的产生量大于复合量,就打破了原来的平衡。载流子数量的增多又使电子和空穴的复合机会增加。所以,在新的升高了的温度下,载流子的产生和复合最终又会达到新的动态平衡。此时,电子和空穴的数量仍相等,但载流子浓度将稳定在较高数值。

总之,在本征半导体中,当温度一定时,空穴浓度 p_i 和电子浓度 n_i (都叫本征载流子浓度)一定,并且相等。理论分析证明,本征载流子浓度随温度上升会迅速增大。因此,半导体的导电能力也随温度上升而显著增强,这是半导体的一个重要特性(热敏性)。

1.1.4 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质,就会使半导体的导电性能发生显著的改变。掺入杂质的半导体叫“杂质半导体”,杂质半导体是制造半导体器件的基础材料。因掺入杂质的性质不同,杂质半导体可分为空穴(P)型半导体和电子(N)型半导体两大类。

(1) P 型半导体

在本征硅(或锗)的晶体内掺入少量三价元素杂质,如硼(或镓、铟)等,则晶体中的某些位

置上硼原子将替代硅原子,因硼原子只有3个价电子,它与周围硅原子组成共价键时,因缺少一个电子,在晶体中便产生一个空位(不是空穴,因为硼原子仍呈电中性)。当相邻共价键上的电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时,就有可能填补这个空位,使硼原子获得电子而变为不能移动的带负电的离子,而原来硅原子的共价键则因缺少一个电子,成为带正电的空穴,如图1.5所示。常温下每个硼原子都能产生一个空穴(与此同时并不产生自由电子),从而使半导体中空穴的数量大大增加。控制掺入杂质的多少,便可控制空穴数量。在这种类型的杂质半导体中,空穴数远大于自由电子数,导电以空穴为主,因而空穴为多数载流子,自由电子为少数载流子。又因为空穴带正电,所以这种杂质半导体叫“P型半导体”或“空穴型半导体”。

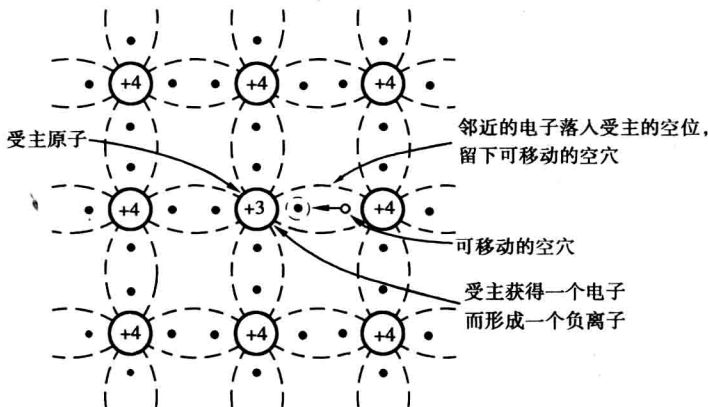


图 1.5 P 型半导体的共价键结构

因为硼原子在硅晶体中能接受电子变为负离子,故称硼为受主杂质。硼原子变为负离子后称其为受主离子,它由硼原子核和核外电子组成,由于受晶格束缚不能自由移动,因此负离子不是载流子。

P 型半导体中正电荷量(硅原子失去电子而形成的空穴和本征激发产生的空穴的电荷量)与负电荷量(负离子和本征激发产生的自由电子的电荷量)相等,所以它呈电中性。

(2)N 型半导体

在本征硅(或锗)的晶体内掺入少量五价元素杂质,如磷(或砷、锑)等,则晶体中的某些位置上磷原子将替代硅原子。因磷原子有5个价电子,当一个磷原子与周围硅原子组成共价键时,就会多出一个价电子。这个价电子受原子核的束缚力很弱,只需获得很少的能量就可成为自由电子。而磷原子因受晶格制约且又失去电子,故变为不能移动的正离子,如图1.6所示。由于磷原子可以提供电子,故称之为施主原子。

需要指出的是,在产生自由电子的

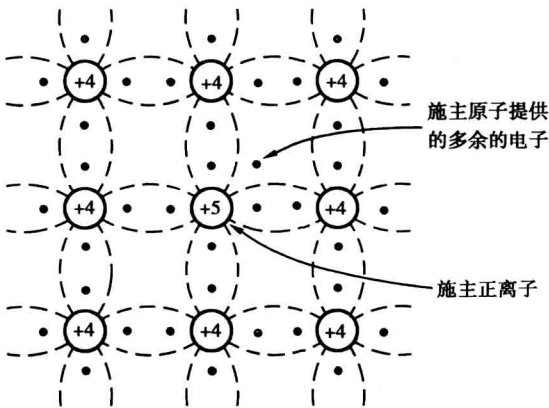


图 1.6 N 型半导体的共价键结构

同时,并不产生相应的空穴,所以使半导体中自由电子的数量远远大于空穴的数量。正因为掺入施主原子的半导体会较多的自由电子,故称之为电子型半导体或N型半导体。在N型半导体中,电子为多数载流子,空穴为少数载流子。

综上所述,在掺入杂质后,尽管杂质含量很低,但载流子的数目都有相当程度的增加,它们对半导体的导电能力有很大的影响,因而对半导体掺杂是提高半导体导电能力的最有效的方法。当然,仅仅提高导电能力不是最终目的,因为导体的导电能力更强。杂质半导体的奇妙之处在于掺入不同性质、不同浓度的杂质,并使P型半导体和N型半导体采用不同的方式组合,可以制造出形形色色、品种繁多、用途各异的半导体器件。

1.2 PN结的形成及特性

1.2.1 PN结的形成

用不同的掺杂工艺使同一半导体(如本征硅)一侧形成P型半导体,而另一侧形成N型半导体。此时,在它们的交界面处就出现了自由电子和空穴的浓度差别。P区的多子空穴浓度大大高于N区的少子空穴浓度,而N区的多子自由电子浓度大大高于P区少子自由电子浓度。由于存在载流子的浓度差,载流子将从浓度较高的区域向浓度较低的区域扩散。因此,P区的多子空穴向N区扩散,而N区的多子自由电子向P区扩散,如图1.7所示。由载流子扩散运动形成的电流叫扩散电流。

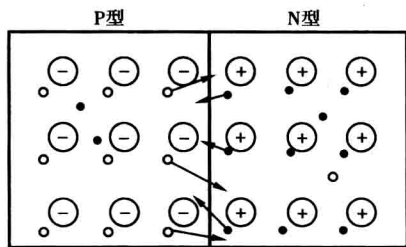


图1.7 载流子的扩散运动

当载流子通过两种半导体的交界面后,在交界面附近的区域里,P区扩散到N区的空穴与N区的自由电子复合,N区扩散到P区的自由电子与P区的空穴复合。扩散的结果破坏了P区和N区交界面附近的电中性条件。在P区一侧由于失去空穴,留下了不能移动的负离子(受主离子);在N区一侧由于失去自由电子,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的区域叫空间电荷区,如图1.8(a)所示。在这个区域内,多数载流子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗了,因此空间电荷区又叫耗尽层,它的电阻率很高。扩散作用越强,空间电荷区越宽。

在出现了空间电荷区以后,正负离子的电荷在空间电荷区中形成了一个由N区指向P区的电场。由于这个电场是因内部载流子的扩散运动而不是由外加电压形成的,因此叫内电场。空间电荷区越宽,内电场也越强。显然,内电场的方向与多子扩散方向相反,因此它阻碍P区和N区的多子继续向对方区域扩散。

另一方面,在内电场作用下,P区和N区的少数载流子将做定向运动。这种运动叫漂移运动,由此引起的电流叫漂移电流。这样,P区的少子自由电子向N区漂移,从而补充了N区交界面附近因扩散而失去的自由电子,使正离子减少;而N区的少子空穴向P区漂移,从而补充了P区交界面附近因扩散而失去的空穴,使负离子减少。因此,漂移运动的结果使空间电荷区变窄,其作用正好与扩散运动相反。

由此可见,在有 P 区和 N 区的同一半导体内,多子的扩散运动和少子的漂移运动是相互联系又相互对立的。多子的扩散运动使空间电荷区加宽,内电场增强。内电场的建立和增强又阻止多子的扩散,增强少子的漂移,其结果使空间电荷区变窄,内电场减弱,有利于多子的扩散。如此相互制约,相互促进,最后多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡。此时,扩散电流和漂移电流大小相等,方向相反,通过空间电荷区的净电流等于零,空间电荷区的宽度和内电场的强度都是定值。至此,PN 结(即空间电荷区)宣告形成。

PN 结的内电场所建立的电位差 U_0 是不同性质半导体的接触电位差,它的大小与半导体材料、掺杂浓度及环境温度有关。在室温下,硅材料的 $U_0 \approx 0.6 \sim 0.8 \text{ V}$,锗材料的 $U_0 \approx 0.1 \sim 0.3 \text{ V}$ 。

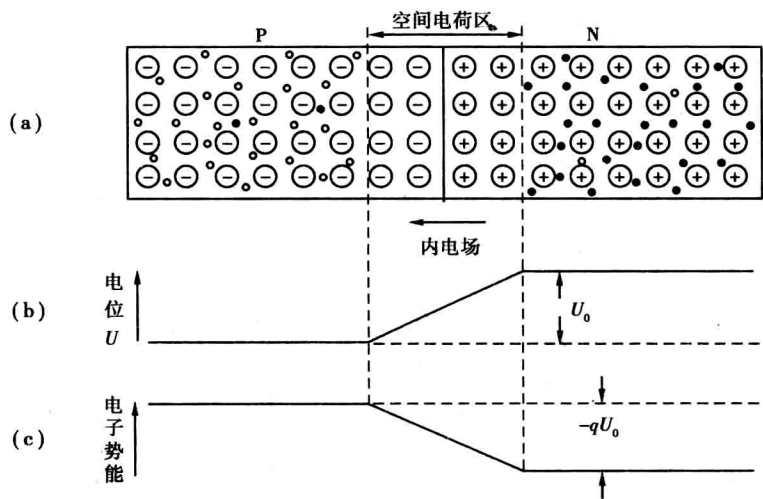


图 1.8 PN 结的形成

(a)空间电荷区 (b)电位分布 (c)电子势能

PN 结的电位分布如图 1.8(b)所示。N 区的电位比 P 区高 U_0 ,而在 PN 结以外的区域要保持电中性,所以是等电位的。

PN 结的出现,使空间电荷区两侧的电子势能($= -qU_0$)发生了变化,如图 1.8(c)所示。电子要从 N 区到 P 区必须越过一个能量高坡(即多子的扩散受到抑制),因此空间电荷区又叫势垒区或阻挡层。

在 PN 结交界面两边的正负离子的电荷量应相等,因此,PN 结在 P 区和 N 区中的宽度与掺杂浓度有关。若 P 区和 N 区的掺杂浓度相同,PN 结在分界面两边的宽度应相等,叫做对称结,否则叫非对称结。

1.2.2 PN 结的单向导电性

上面所讨论的 PN 结处于动态平衡状态,称为平衡 PN 结。PN 结的单向导电性是指 PN 结在不同极性的外加电压作用时,其导电能力有显著差异这一特性。

(1) 外加正向电压

如图 1.9 所示,当使 PN 结外加电压的正端接 P 区,负端接 N 区(称为正向偏置,简称正

偏)时,产生的电场与 PN 结内电场方向相反。在这个外加电场作用下,PN 结原来扩散与漂移之间的动态平衡状态被打破,使多子的扩散运动增强,少子的漂移运动减弱。P 区中的多数载流子空穴和 N 区中的多数载流子电子都要向 PN 结移动,当 P 区空穴进入空间电荷区内后,就要和原来的一部分负离子中和,使 P 区一侧的空间电荷量减少。同样,当 N 区电子进入 PN 结时,中和了部分正离子,使 N 区一侧的空间电荷量减少,结果使空间电荷区变窄,即耗尽区厚度变薄(从原来未加电压时的 11' 变到 22')。由于半导体本身的体电阻和 PN 结上的电阻相比是很小的,因此加上外加电压后,这个电压将集中降落在 PN 结上。所以,外加电压将使 PN 结的内电场减弱,电子的电势能将由 $-qU_0$ 减为 $-q(U_0 - U_F)$,也就是势垒降低了,这样 P 区和 N 区中能越过这个势垒的多数载流子大大增加,这时扩散运动将大于由少数载流子形成的漂移运动。随着 N 区电子不断扩散到 P 区,P 区空穴不断扩散到 N 区就形成了扩散电流。当外加电压 U_F 升高,PN 结电场便进一步减弱,扩散电流随之增加,在正常工作范围内,PN 结上外加电压只要稍有变化(如 0.1V),便能引起电流的显著变化,因此电流 I_F 是随外加电压急速上升的。这样,正向的 PN 结表现为一个很小的电阻。当然,由少数载流子漂移运动形成的漂移电流也存在于 PN 结,其方向与扩散电流相反,和正向电流比较,其数值很小,可忽略不计。所以,表现在外电路上形成一个流入 P 区的电流,称为正向电流 I_F 。

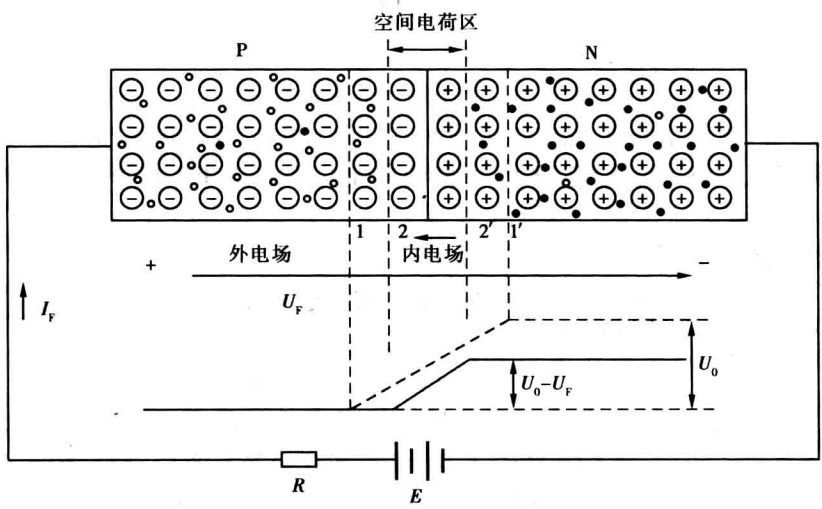


图 1.9 外加正向电压时的 PN 结

(2) 外加反向电压

在图 1.10 中,外加电压的正端接 N 区,负端接 P 区,称 PN 结处于反向偏置。这时外加电场方向与 PN 结内电场方向相同,PN 结电场增强。在这种外电场作用下,P 区中的空穴和 N 区中的自由电子都将进一步离开 PN 结,使耗尽区厚度加宽(从 11' 变为 22'),电子的电势能将由 $-qU_0$ 增至 $-q(U_0 + U_R)$,这样 P 区和 N 区中的多数载流子就很难越过势垒,因此扩散电流趋近于零。但此时,N 区和 P 区中的少数载流子更容易产生漂移运动而形成漂移电流,因此在这种情况下,PN 结的电流主要是漂移电流。漂移电流的方向与扩散电流相反,表现在外电路上是一个流入 N 区的电流 I_R ,称为反向电流。由于少数载流子的浓度很小,因此 I_R 是很微弱的,一般为微安数量级。同时,少数载流子是由本征激发产生的,其数值决定于温度,而几乎与

外加电压 U_R 无关。在一定温度 T 下,由于热激发而产生的少数载流子的数量是一定的,电流的值趋于恒定,如图 1.10 所示。这时的反向电流 I_R 就是反向饱和电流,用 I_S 表示。

由于 I_S 很小,因此 PN 结在反向偏置时,呈现出一个很大的电阻,此时可认为它基本还是不导电的。但 I_S 受温度的影响较大,在某些实际应用中,还必须予以考虑。

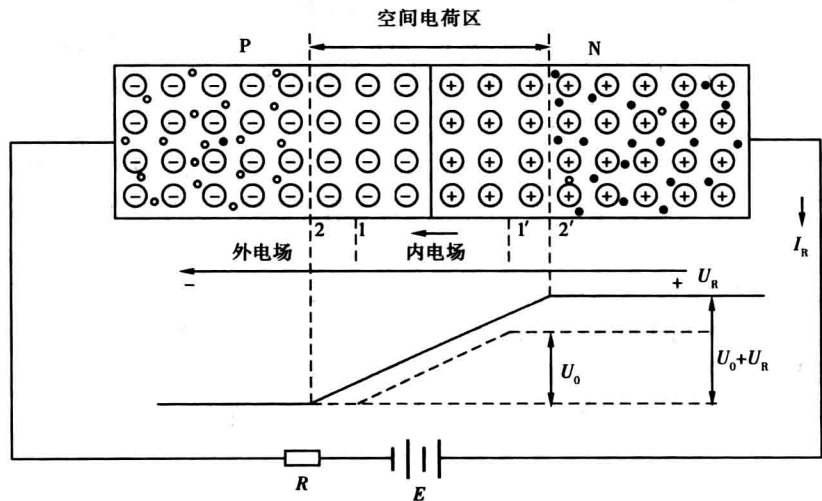


图 1.10 外加反向电压时的 PN 结

综上所述,当 PN 结正偏时,正向电阻很小,回路产生一个较大的电流,PN 结处于导通状态;当 PN 结处于反偏时,反向电阻很大,回路的电流几乎为零,PN 结处于截止状态。这就是 PN 结的单向导电性。

(3) 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 结的电流之间的关系曲线。

根据理论分析,PN 结的伏安特性可用下式表示:

$$i = I_S(e^{u/U_T} - 1) \tag{1.1}$$

式中 i 为通过 PN 结的电流, u 为 PN 结两端的外加电压; U_T 为温度的电压当量, $U_T = kT/q = 0.026 \text{ V}$, 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 为电子电荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$); e 为自然对数的底; I_S 为反向饱和电流。由式 (1.1) 可以画出其伏安特性如图 1.11 所示。关于图 1.11,可解释如下:

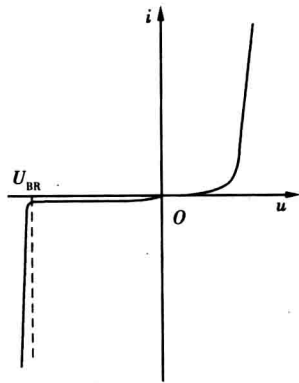


图 1.11 PN 结的伏安特性

1) 当 PN 结两端加正向电压时,电压 u 为正值,当 u 比 U_T 大几倍时,式 (1.1) 中的 e^{u/U_T} 远大于 1,式中的 1 可以忽略。这样,PN 结的电流 i 与电压 u 成指数关系,如图 1.11 中的正向电压部分所示。

2) 当 PN 结外加反向电压时, u 为负值。若 $|u|$ 比 U_T 大几倍时,指数项趋近于零,因此 $i = -I_S$,即反向电压达到一定数值后,PN 结的反向电流就是反向饱和电流,与外加反向电压的大小基本无关,为一常数 I_S ,如图 1.11 中的反向电压部

分所示。

(4) 温度对 PN 结特性的影响

PN 结的特性对温度的变化特别敏感,反映在伏安特性上即为:温度升高,正向特性曲线左移,反向特性曲线下移。具体变化规律为:温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,正向压降减小 $2\sim 2.5\text{ mV}$;温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,反向饱和电流 I_s 约增大一倍。

1.2.3 PN 结的反向击穿特性

当加到 PN 结两端的反向电压增大到一定数值(U_{BR})后,反向电流会急剧增加,如图 1.11 中虚线左边所示。这个现象就称为 PN 结的反向击穿(电击穿)。发生击穿所需反向电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。由于 PN 结电击穿后电流很大,电压又很高,因此消耗在 PN 结上的功率很大,容易使 PN 结温度升高,而结温升高使反向电流更加增大,电流增大又使结温进一步升高,如此恶性循环,很快把 PN 结烧毁,这种现象称为热击穿。

产生 PN 结电击穿的原因是:自由电子和空穴的数目在强电场作用下大大地增加,引起反向电流的急剧增加,这种现象产生的机理有雪崩击穿和齐纳击穿两种。

雪崩击穿的物理过程可以这样来解释:当 PN 结外加反向电压增加时,空间电荷区中的电场随着增强,从而在漂移运动中少子(既有电子也有空穴)的运动速度加快,并获得足够的动能。它们在晶体中不断地与晶体原子发生碰撞,当电子和空穴的能量足够大时,通过这样的碰撞,可使共价键中的电子激发形成自由电子-空穴对,这种现象称为碰撞电离。新产生的电子和空穴与原有的电子和空穴一样,在电场作用下,又会受到电场的加速获得能量,并撞击别的原子,再产生电子-空穴对,这就是载流子的倍增效应。当反向电压增大到某一数值后,载流子的倍增情况就像在陡峻的积雪山坡上发生雪崩一样,载流子增加得多而快,使反向电流急剧增大,造成 PN 结击穿,称为雪崩击穿。雪崩击穿电压与半导体的掺杂浓度有关,掺杂浓度低时击穿电压数值大。

齐纳击穿只会在掺杂浓度特别大的 PN 结中出现。因为杂质浓度大,空间电荷区内电荷密度(即杂质离子)也大,因而空间电荷区很窄,进行漂移运动的少子,在通过空间电荷区时,由于路径短,它与晶体中离子的碰撞机会较少,不会产生雪崩击穿。但因为空间电荷区很窄,在加有不太高的反向电压(一般为几伏)下,PN 结空间电荷区中就形成一个强电场,它能够共价键中束缚电子强行拉出产生电子-空穴对,形成较大的反向电流,造成 PN 结击穿,这就叫齐纳击穿。显然,它的物理过程和雪崩击穿完全不同。发生齐纳击穿需要的电场强度约为 $2\times 10^5\text{ V/cm}$,这只有在杂质浓度特别大的 PN 结中才能达到。

必须指出,上述两种电击穿过程是可逆的,当加在 PN 结上的反向电压降低后,PN 结仍可以恢复原来的状态。但它有一个前提条件,就是反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结容许的耗散功率,超过了就会因为热量散不出去而使 PN 结温度上升,直到过热而烧毁。所以热击穿和电击穿的概念是不同的。电击穿往往可为人们所利用(如稳压管),而热击穿则是必须尽量避免的。

1.2.4 PN 结的电容效应

PN 结除具有单向导电性以外,当加在 PN 结上的电压发生变化时,由于 PN 结中储存的电荷量也随之发生变化,因此,它还具有一定的电容效应。PN 结的电容效应包括两部分,即势垒

电容和扩散电容。

(1) 势垒电容 C_B

势垒电容是由 PN 结的空间电荷区(或耗尽层)形成的。

在空间电荷区中,不能移动的正、负离子具有一定的电荷量,所以在 PN 结中存储了一定的电量。当加上正向电压时,空间电荷区变窄,则电荷量减少;当加上反向电压时,空间电荷区变宽,使电荷量增加。总之,当加在 PN 结上的电压改变时,就会引起积累在 PN 结的空间电荷量的改变,从而显示出 PN 结的电容效应。

需要指出的是,势垒电容只在外加电压改变时才起作用。外加电压频率越高,势垒电容的作用越显著。经过分析证明,势垒电容 C_B 的大小与 PN 结面积 S 成正比,与耗尽区厚度 δ 成反比,因此它与一个极板面积为 S 、间距为 δ 的平板电容器相似。但势垒电容的 δ 是随外加电压而变的。反向偏置电压的增加,会使 δ 增大而使 C_B 减小。正向偏置时, δ 减小会使 C_B 增大。从电路上来看,势垒电容是和结电阻并联的。由于反向偏置时结电阻很大,尽管势垒电容很小,它的作用还是不能忽视的,特别在高频时影响更大。而正向偏置时结电阻很小,尽管势垒电容较大,其作用相对来说反而比较小。因此势垒电容在反向偏置时显得更加重要。

(2) 扩散电容 C_D

扩散电容是由多数载流子在扩散过程中的积累而引起的。

PN 结的正向电流是由 P 区空穴和 N 区电子的相互扩散造成的,为了使 P 区形成扩散电流,注入的少数载流子(称为非平衡少数子)电子沿 P 区必须有浓度差,在结的边缘处浓度大,离结远的地方浓度小,也就是说在 P 区有电子的积累。同理,在 N 区也有空穴的积累。当 PN 结正向电压加大时,正向电流随着加大,就要有更多的载流子积累起来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 区的电子或 N 区的空穴就要相对减小,这样就相应地要有载流子的“充入”和“放出”(相当于电容的充电和放电的过程),这就是扩散电容的效应。它反映了积累在 P 区的电子和 N 区的空穴在扩散过程中随外加电压变化的情况。

PN 结正向偏置时,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。而反向偏置时,载流子数目很少,因此反偏时扩散电容数值很小,一般可以忽略。

综上所述,PN 结总的结电容 C_j 包括势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 两部分。一般来说,当 PN 结正向偏置时,扩散电容起主要作用,即可以认为 $C_j = C_D$;当 PN 结反向偏置时,势垒电容起主要作用,可以认为 $C_j = C_B$ 。 C_B 和 C_D 的值都很小,通常为几个皮法至几十皮法,有些结面积大的 PN 结可达几百皮法。

1.3 二极管及其应用电路分析

1.3.1 半导体二极管的结构和类型

半导体二极管由 PN 结外加上引线 and 管壳组成,按结构不同可分为点接触型和面接触型两种。

(1) 点接触型二极管

它的结构如图 1.12(a)所示,是由一根金属丝与半导体表面相接触,经过特殊工艺,在接