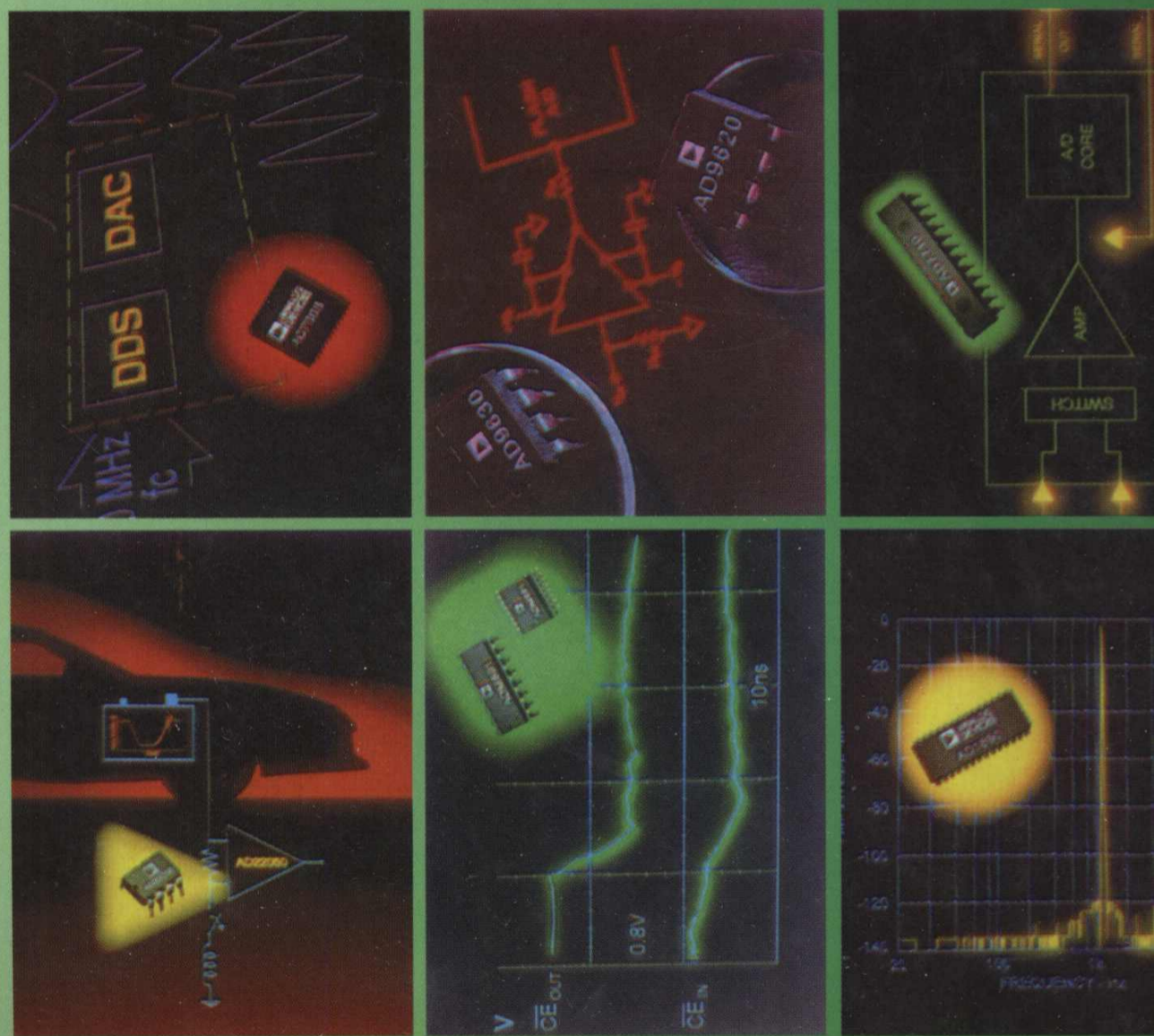


# 模拟电子技术基础

谢红 主编



哈尔滨工程大学出版社



哈尔滨工程大学  
国家工科基础课程教学基地  
电工电子类系列教材

MONI DIANZI JISHU JICHU

2010  
Y 346

# 模拟电子技术基础

主编 谢 红  
主审 阳昌汉

哈尔滨工程大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/谢红主编. —哈尔滨:哈尔滨  
工程大学出版社, 2001. 5  
ISBN 7-81073-156-4

I. 模... II. 谢... III. 模拟电路-电子技术  
IV. TN710...

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 25324 号

---

### 内 容 简 介

本书是在第一版“模拟电路基础”的基础上,根据多年来的教学实践经验和电子技术的新发展修订的。对原教材进行了修改增删和总结提高。全书共分九章,包括半导体器件、基本单元电路、多级放大电路与频率响应、集成运算放大器、放大电路中的反馈、运放的应用、信号发生电路、直流稳压电源。本书内容全面、清楚地阐述了电子技术中的基本概念、基本原理及基本分析方法,并配有一定数量的例题、思考题与习题。

本书可作为高等院校通信与自动化等各电类专业模拟电子技术课程的教材,也可供有关工程技术人员自学与参考。

---

哈尔滨工程大学出版社出版发行  
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼  
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001  
新 华 书 店 经 销  
地矿部黑龙江测绘印制中心印刷厂印刷

\*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 22.25 字数 440 千字

2001年6月第1版 2001年6月第1次印刷

印数:1~5 000册

定价:27.00元

# 前 言

为了适应电子技术发展的新形势,为了配合教学改革的需要,结合多年的教学实践编写了这本教材。本书在1993年12月由哈尔滨船舶工程学院出版社出版的“模拟电路基础”教材的基础上进行了修改和扩充,重新组织编排了全书内容。

在编写过程中,尽量压缩了半导体物理内容,只是简要地阐述了晶体管的某些参数受环境温度影响的原因。对分立元件电路部分也进行了适当的缩减,增加了一些新内容。每章后均有小结。

全书共九章内容,安排合理。其指导思想是以分立元件电路为基础,集成电路为重点。编写的原则是:保证基础、精选内容、加强概念、面向更新、联系实际、利于自学,也可供从事电子技术的工程技术人员自学和参考。每章内容之后均配有思考题与习题,有利于读者对内容的消化理解。

与第一版(原版)相比较,第二版(新版)具有以下几点不同之处。

1. 将原版分散在一、二、三章中的二极管、三极管、场效应管集中起来放在新版的第一章中介绍,并增加了一些特殊二极管。新版第一章的主要任务是介绍各种常用器件,为后续各章电路奠定基础。另外,把原第二章中晶体管混合参数 $\pi$ 型等效电路也安排到新版的第一章中。

2. 将原版第四章中的差放、电流源电路部分,第二章中的基本放大电路以及第三章中的场效应管放大电路组合成新版的第二章基本单元电路。这是全书的基础内容,也是重点内容。

把原版第二章中的多级放大电路及频率响应抽出来单独构成新版的第三章;将功率放大电路另作为一章内容安排在新版的第五章,作了较详细的讨论,并增加了集成功率放大电路。

3. 新版的第四章是将原版的第四章中的集成电路部分抽出来加以充实、扩展而成。讲了通用型集成运放,并把原版第七章中理想运放的三种输入方式合并到新版第四章中来。

4. 原版中的难点内容第五章放大电路中的反馈,概念抽象,不易掌握。本书将这部分内容安排在第六章,通过更多的实例将抽象的概念加以具体化,从而降低了学习的难度。举例中,兼顾了集成电路和分立元件电路。经过教学实践,效果比较好。

5. 本书的第七章运放的应用比原版内容拓宽了,新增加了开关电容滤波、集成乘法器及集成比较器。

6. 将原版中第六章正弦波振荡电路及第七章中非正弦波振荡电路合并为新版的第八章信号发生电路。

7. 本书第九章直流稳压电源是将原版第一章中的整流、滤波电路、硅稳压管稳压电路以及第七章中晶体管串联型直流稳压电路集中起来构成的。

8. 凡带“\*”号的内容作为选讲内容。

本书的编写提纲由有关专家审查认定,参加本书编写的有谢红(第一、二、三、五、六、八章)、李万臣(第七章)、郑向荣(第四、九章)。全书由谢红副教授主编,由阳昌汉教授主审。

由于我们水平有限,编写中存在的问题与错误敬请读者批评指正。

编 者

2000年12月

于哈尔滨工程大学

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第一章 半导体器件 .....</b>	<b>3</b>
第一节 半导体基础知识 .....	3
第二节 半导体二极管 .....	7
第三节 半导体三极管 .....	24
第四节 场效应晶体管(FET) .....	38
本章小结 .....	49
思考题与习题 .....	50
<b>第二章 基本单元电路 .....</b>	<b>57</b>
第一节 放大概念及放大电路的性能指标 .....	57
第二节 放大电路的组成及工作原理 .....	59
第三节 放大电路的分析方法 .....	61
第四节 工作点稳定电路 .....	79
第五节 放大电路的三种组态及其性能比较 .....	84
第六节 场效应管基本放大电路 .....	90
第七节 差动放大电路 .....	95
第八节 电流源电路 .....	110
本章小结 .....	113
思考题与习题 .....	115
<b>第三章 多级放大电路与频率响应 .....</b>	<b>127</b>
第一节 多级放大电路的一般问题 .....	127
第二节 直接耦合放大电路 .....	129
第三节 阻容耦合多级放大电路简介 .....	133
第四节 放大电路的频率响应 .....	134
本章小结 .....	145
思考题与习题 .....	146
<b>第四章 集成运算放大器 .....</b>	<b>150</b>
第一节 集成运放简介 .....	150
第二节 通用型集成运算放大器 .....	152
第三节 集成运放的主要参数 .....	155
第四节 集成运放使用中的一些实际问题 .....	157
第五节 理想运放及三种基本输入方式 .....	162
本章小结 .....	165
思考题与习题 .....	165
<b>第五章 功率放大电路 .....</b>	<b>167</b>
第一节 功率放大电路的特点及分类 .....	167

第二节	基本 OCL 电路与交越失真 .....	169
第三节	无失真的 OCL 电路 .....	170
第四节	OTL 电路简介 .....	174
第五节	互补对称功放分析计算举例 .....	176
第六节	集成功率放大电路 .....	180
本章小结	.....	183
思考题与习题	.....	183
<b>第六章</b>	<b>放大电路中的反馈</b> .....	<b>186</b>
第一节	反馈的基本概念 .....	186
第二节	反馈放大电路的方框图及闭环放大倍数的一般表达式 .....	188
第三节	负反馈放大电路的四种组态 .....	189
第四节	负反馈对放大电路性能的改善 .....	195
第五节	正确引入负反馈的原则 .....	200
第六节	深度负反馈放大电路的计算 .....	201
第七节	负反馈放大电路的自激振荡及消除方法 .....	207
本章小结	.....	211
思考题与习题	.....	212
<b>第七章</b>	<b>集成运算放大器的应用</b> .....	<b>220</b>
第一节	基本运算电路 .....	220
第二节	集成模拟乘法器 .....	237
第三节	有源滤波电路 .....	244
* 第四节	开关电容滤波器(SCF) .....	261
第五节	电压比较器 .....	268
本章小结	.....	276
思考题与习题	.....	277
<b>第八章</b>	<b>信号发生电路</b> .....	<b>288</b>
第一节	概述 .....	288
第二节	RC 正弦波振荡电路 .....	290
第三节	LC 正弦波振荡电路 .....	294
第四节	石英晶体振荡器简介 .....	300
第五节	矩形波发生电路 .....	303
第六节	三角波发生电路 .....	305
第七节	锯齿波发生电路 .....	306
* 第八节	集成函数发生器 8038 简介 .....	308
本章小结	.....	309
思考题与习题	.....	310
<b>第九章</b>	<b>直流稳压电源</b> .....	<b>316</b>
第一节	整流电路 .....	316
第二节	滤波电路 .....	319
第三节	稳压电路 .....	323

* 第四节 开关稳压电源电路(SMR 电路) .....	338
本章小结 .....	344
思考题与习题 .....	345
参考文献 .....	348

# 绪 论

## 一、课程的性质与任务

本课程是电气类、自控类和电子类专业在电子技术方面入门性质的技术基础课。本书所涉及到的基本电子电路包括分立元件电路和集成电路两大部分。读者应掌握基本电子电路的工作原理、主要特性以及电路之间的互联匹配等基本知识,以便给以后深入学习电子技术新领域中的内容以及电子技术在专业中的应用打下良好的基础,通过实践环节培养学生分析问题与解决问题的能力 and 实际操作技能。

## 二、课程的特点

### (一)内容丰富,涉及面宽

本课程的基本概念、基本单元电路、基本分析方法不但内容多,而且复杂,不易入门,给初学者造成一定的困难。器件有二极管、三极管、场效应管、集成电路;电路部分包括基本单元电路、多级放大电路及集成运算电路、各种运放的应用电路等。学习时应注意及时总结归纳、对比,掌握它们的异同点,找出记忆规律。制作电路时应以设计计算为参考,以调试结果为准。

### (二)实践性强

本课程设有实验课和适量的练习题,与理论知识相配合。只懂得理论知识是不够的,通过实验能够验证理论的正确性,通过练习题可深入地理解、消化理论知识。只有理论计算而无经过实际调试的电路是无用的电路。

### (三)工程近似计算

工程近似计算又称估算。对电路性能的计算,我们本着严密分析、定量估算的原则,抓主要矛盾,忽略次要矛盾,当大量与小量相比相差十倍或十倍以上时,可以忽略小量,只考虑大量的影响。这样做所带来的误差在工程上是允许的,而且会使计算大为简化。

## 三、什么是电子器件、电子系统和电子技术

电子器件是指电真空器件、半导体器件和集成电路等。

电真空器件是以电子在高度真空中运动为工作基础的器件。如电子管、示波管、显像管、雷达荧光屏和大功率发射管等。

半导体器件是以带电粒子(电子和空穴)在半导体中运动为工作基础的器件。如半导体二极管、三极管、场效应管等。

集成电路是将一定数量的元器件及电路用集成化工艺制作在很小的芯片上,成为一个不可分割的“固体电路”称集成电路。按集成的元器件数目的多少分为小规模、中规模、大规模乃至超大规模集成电路。目前,在几十平方毫米的芯片上可集成百万个元器件,已进入微电子时代。

电子系统是指由若干相互联接、相互作用的基本电路组成的具有特定功能的电路整体。由于大规模集成电路和模拟—数字混合集成电路的大量出现,在单个芯片上可能集成许多种不同类型的电路,从而自成一个系统。例如,目前有多种单个芯片构成的数据采集系统产品,



芯片内部往往包括多路模拟开关、可编程放大电路、取样—保持电路、模数转换电路、数字信号传输与控制电路等多种功能电路,并且已互相联接成为一个单片电子系统。

电子技术是研究电子器件、电子电路和电子系统及其应用的科学技术。现代电子技术的应用概括为通信、控制、计算机和文化生活等方面,其中文化生活包括的内容很广泛,如广播、电视、录音、录像、多媒体技术、电化教学、自动化办公设备、电子文体用具和家庭电子化等。

#### 四、课程的研究对象

本课程的研究对象是模拟信号。本课程研究模拟信号的传输、放大、控制等问题。

什么是信号?什么是模拟信号呢?一般地讲,信号是信息的载体。例如,声音信号可以传达语言、音乐或其他信息,图像信号可以传达人类视觉系统能够接受的图像信息。模拟信号是指在时间上和幅值上均具有连续性的信号,在一定动态范围内可能取任意值。从宏观上看,我们周围的世界大多数物理量都是时间连续、数值连续的变量,如压力、温度及转速等。这些变量通过相应的传感器都可转换为模拟信号输入到电子系统中去。处理模拟信号的电子电路称模拟电路,如放大电路、滤波电路、电压/电流变换电路等。本书主要讨论各种模拟电子电路的基本概念、基本原理、基本分析方法及基本应用。

#### 五、学习中注意些什么

##### (一)基本概念

本课程基本概念占了相当大的比例,如果概念不清楚或者掌握得不准确,必然会造成对电路分析计算上的错误,肯定学不好本课程。对于一般的术语要知道叫“什么”,有的概念还需要知道“为什么”。

##### (二)基本单元电路

复杂电路是由基本单元电路组成的,只要把基本单元电路的工作原理、定量计算熟练掌握了,复杂电路的分析计算也就不难了,所以基本放大电路是学习的重点。

##### (三)基本分析方法

基本分析方法包括图解法、估算法、等效电路法,这些分析方法的利用率很高,必须重点学习,熟练运用。

##### (四)基本原理

每遇到一个新电路,它是怎么工作的,它有什么特点,能够熟练地叙述出来,换句话说就是要会读电路图。这是学好电路最起码的本领,否则,电路的性能计算就无从下手。

##### (五)基本规律

前两章规律性不强,比较难学,需要多下点功夫。以后各章逐步表现出规律性,只要初学者用心注意一下,就会体会到分析思路重复率高。掌握它的规律性会使学习轻松起来,感到越学越好学,随之学习兴趣也越来越浓。

综上所述,可以说是几点基本功,只要练好这些基本功就不难学好本课程。当然,上好实验课也是一个必要环节。

# 第一章 半导体器件

半导体器件是指各种半导体晶体管。它们是放大电路的核心部件。电路的性能与其所用器件的特性密切相关。因此,在学习电路之前,必须先了解半导体器件。

本章在简要说明半导体的导电规律之后,讨论了PN结的特性,又讨论了二极管、稳压管、三相管、场效应管的工作原理、特性及参数。其目的是使读者能正确地选用各种器件。

## 第一节 半导体基础知识

### 一、本征半导体

#### (一) 半导体及其特点

半导体是一类导电能力介于导体与绝缘体之间的物质。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。

最常用的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge)。它们都是四价元素,其结构为共价键结构。由于每个原子外层拥有八个价电子,十分稳定。因此,在绝对零度(0K)时,本征半导体中无载流子,不导电。

然而,在光照或加热的情况下,本征硅(或锗)的导电性能就不一样了。导电能力随着温度的变化而变化,这种性质称半导体的热敏特性;导电能力随着光照的强弱而变化的性质,称半导体的光敏特性。人们可以利用半导体的这两个特性制造热敏元件和光敏元件。另外,半导体还有一个很重要的特性,就是掺杂特性,其导电能力随着掺杂的多少而变化。晶体管就是利用掺杂特性而制造的半导体器件。

#### (二) 半导体中的载流子

载流子是指运载电流的粒子。导体能导电是因为有载流子。导体(如金属)中的载流子只有一种,即自由电子,带负电,运动方式是在自由空间内自由飞翔;半导体中的载流子有两种,除了自由电子外还有空穴。空穴带正电性,沿着共价键做依次递补的运动,如图1-1所示。

空穴是怎样产生的呢?本征热激发能产生电子-空穴对。当温度升高(加热或光照)时,价电子获得足够的能量挣脱原子核及共价键的束缚,进入自由空间成为自由电子参加导电,同时在原来位置上留下空位,称空穴。该过程称本征热激发。其效果产生电子-空穴对,因电子与空穴是成对出现的,由此得名。

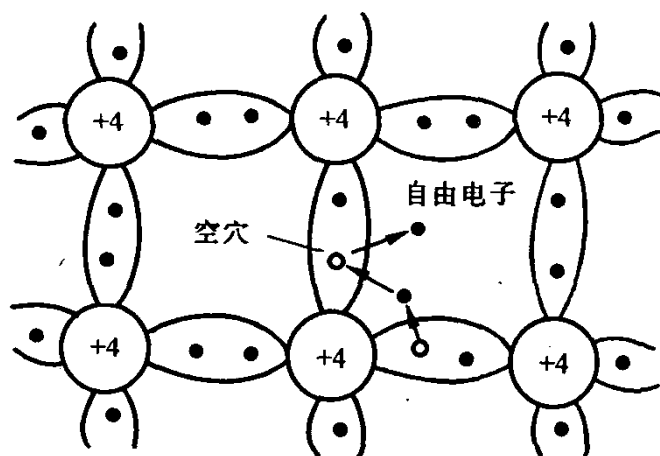


图1-1 本征半导体中的载流子

当温度一定,由于热运动使本征热激发产生多少个电子-空穴对,就有多少个电子-空穴对被复合,即电子又落回到空穴上使原子中和。这种状态称动态平衡。

当温度升高时,热运动加剧,旧的平衡被打破,新的平衡又建立起来,使载流子浓度升高,容易导电。这就是半导体具有热敏特性与光敏特性的原因。

在一定温度下,电子浓度与空穴浓度相同。

## 二、杂质半导体

常温下,本征半导体的载流子浓度远远小于导体中的载流子,导电能力很差,没有什么用处。但掺杂后的半导体就大不相同了。掺过杂质的半导体称杂质半导体。按掺杂的不同分为P型(空穴型)和N型(电子型)两种杂质半导体。

### (一)P型半导体

在本征硅(或锗)中,掺入微量的三价元素(如硼B),就形成含大量空穴的P型杂质半导体。如图1-2(a)所示,由于三价杂质原子只有三个价电子,与相邻四个Si(或Ge)原子组成共价键时缺少一个电子而留有一个空位(不是空穴,因为杂质原子仍呈电中性)。相邻的价电子很容易填补这个空位,于是在这个电子原来的位置上产生了一个空穴,而杂质原子则获得一个电子而成为负离子,用“ $\ominus$ ”表示。三价杂质原子在电离中接受了一个电子,称受主杂质。常温下,所有杂质原子的空位全部填满,产生与杂质原子个数相同的空穴。

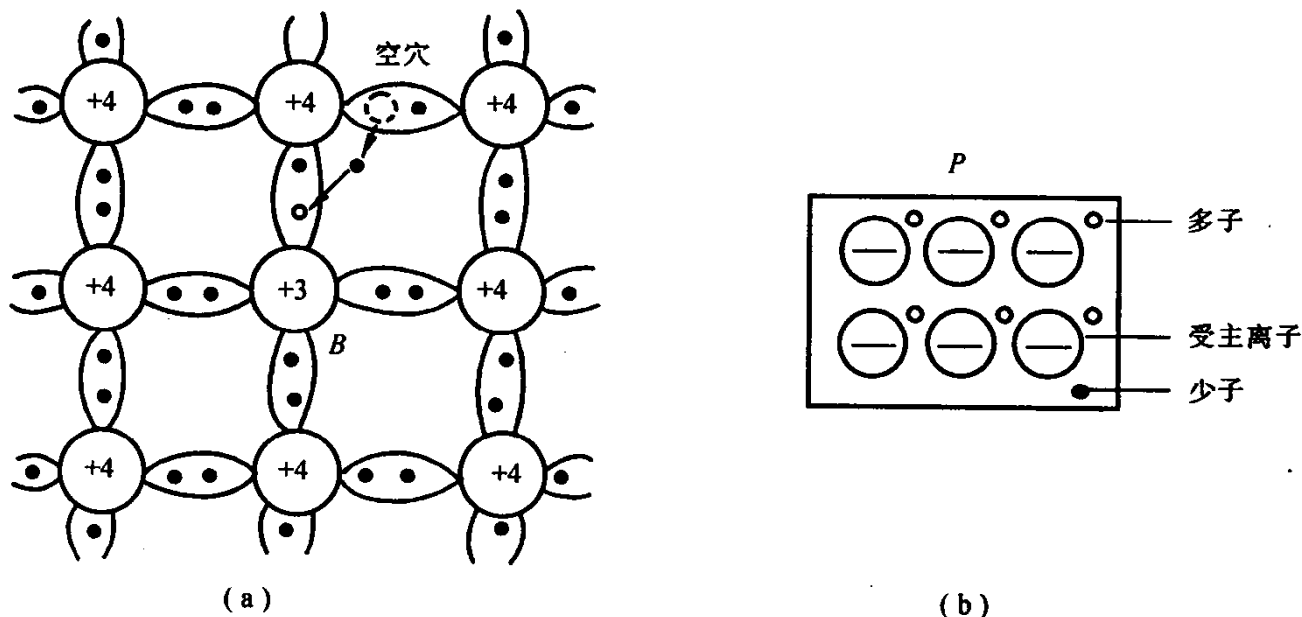


图1-2 P型半导体中的载流子  
(a)共价键结构; (b)带电粒子分布图

另外,还有本征热激发产生的空穴。总之,在这种半导体中,空穴浓度远大于电子浓度,因此,将空穴称为多数载流子,简称多子;而将电子称为少数载流子,简称少子。将这两种半导体的载流子情况用带电粒子分布图来描写,如图1-2(b)所示。

### (二)N型半导体

在本征硅(或锗)中掺入微量的五价元素(如磷P),就形成含大量电子的N型杂质半导体。如图1-3(a)示,杂质磷的五个价电子除了与相邻的硅(或锗)原子组成共价键外,还多余一个电子。这个多余电子仅受原子核的引力,因为距离远,所以这个引力很弱,极易挣脱这个束缚变成自由电子参加导电。当磷原子丢失一个电子时就变成了带正电的正离子,用“ $\oplus$ ”表

示。把磷称作施主杂质。

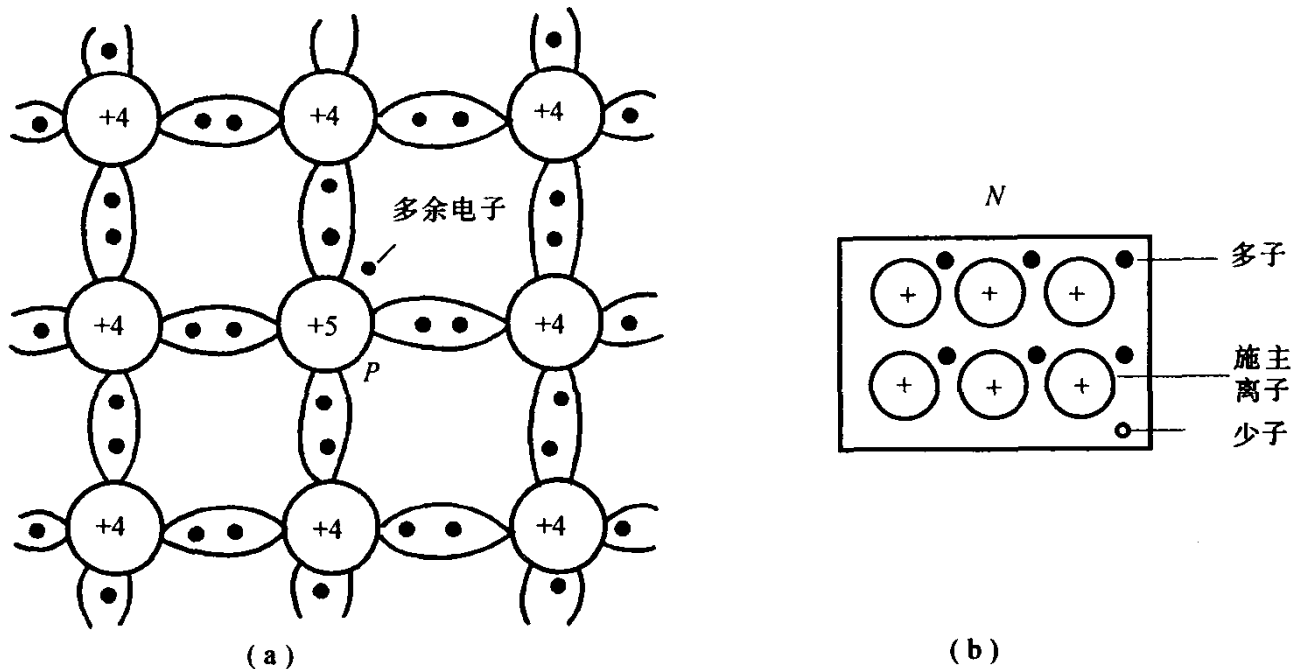


图 1-3 N 型半导体中的载流子  
(a)共价键结构； (b)带电粒子分布图

除了磷原子在电离时释放出的电子,还有本征热激发产生的电子数。可见,电子的浓度远远大于空穴的浓度。因此,在 N 型半导体中,电子是多子,空穴是少子。用带电粒子分布图表示如图 1-3(b)所示。

必须指出,以上所说的正、负离子不是载流子,不能参加导电。

### 三、PN 结

#### (一)PN 结的形成与特点

将一块 P 型杂质半导体与一块 N 型杂质半导体放在一起,通过一定的工艺将它们有机地结合起来,在其交界面上形成一个结,称 PN 结。

如图 1-4 所示,PN 结形成的物理过程实际上就是两种运动:多子作扩散运动,少子作漂

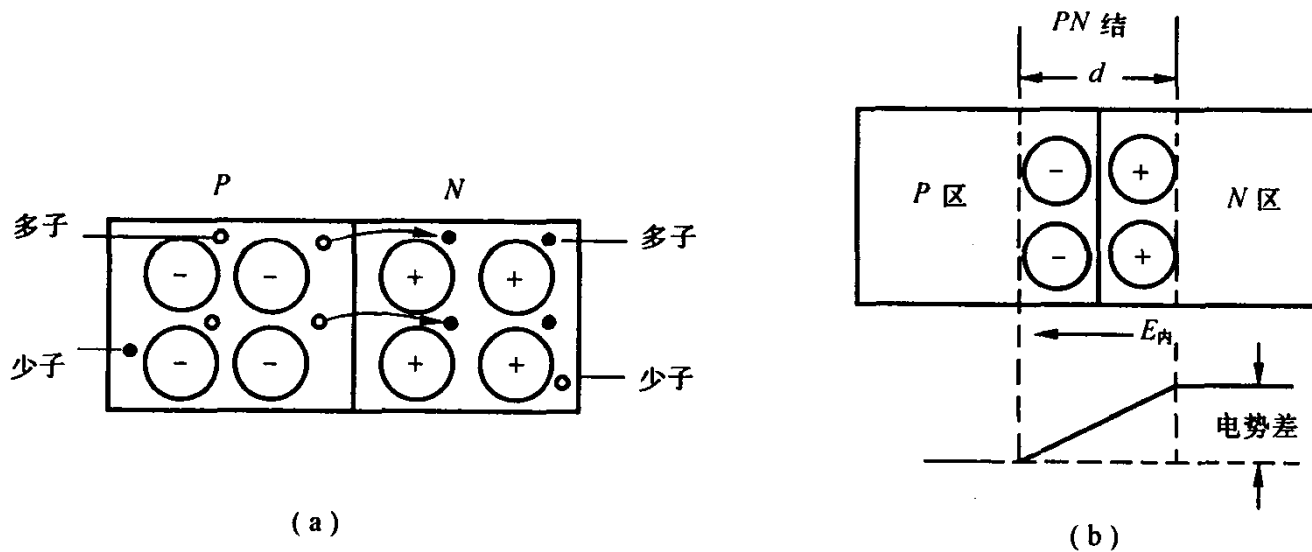


图 1-4 PN 结的形成过程  
(a)多子的扩散； (b)PN 结形成

移运动。下面以空穴的运动情况为例说明这两种运动。

由于P区中空穴(多子)浓度远远大于N区,所以空穴由P区向着N区扩散,形成较大的扩散电流,同时建立起内电场  $E_{内}$ ,由正离子指向负离子。另外,N区中的空穴(少子)在内电场的作用下向着P区运动,形成很小的漂移电流。这两种运动形成的电流方向相反。结电流等于这两种电流的代数和,即  $I_j = I_{扩} - I_{漂}$ 。

内电场的建立阻止扩散运动的进行,当  $E_{内}$  大到一定值时,扩散运动停止,PN结内只有漂移电流,并且PN结的厚度  $d$  也就固定下来。PN结很薄,约为几微米至几十微米。 $E_{内}$  与材料有关,对于硅材料为0.6V至0.8V;对于锗材料为0.1V至0.3V。

通常,把PN结可称作空间电荷区,因为在PN结中只有不会移动的正、负离子(空间电荷),而缺少载流子;人们有时也把PN结称作耗尽区,是指在该区中耗尽了载流子。PN结也叫阻挡层,因为  $E_{内}$  阻止扩散运动的进行,表现电阻效应。当扩散运动与  $E_{内}$  平衡时,扩散运动停止, $E_{内}$  一定,在空间电荷区建立起势垒(电势差),所以,又把PN结称作势垒区。

## (二)PN结的单向导电特性

PN结具有单向导电性的原因是PN结具有电阻效应。由于PN结中充满着不导电的正、负离子,电阻率很高,而两边的P区及N区中充满大量的载流子,电阻率很低,相当于导体。外加电压时主要集中降落在阻挡层上,其厚度  $d$  将随着外加电场的极性变化或变厚(电阻增大)或变薄(电阻减小),因而表现出单向导电特性。

### 1. 外加正向电压(正偏置)——PN结导通

如图1-5所示,外加正向电压时,P区的多子(空穴)浓度增加。多子主要来源于外电场  $V_{外}$ ,有利于扩散。P区中的空穴与N区中的电子(多子)受  $V_{外}$  的驱使进入阻挡层,并与其中的一部分正、负离子中和,减少了空间电荷,使PN结厚度  $d$  变薄,并且  $E_{内}$  减小,使结电阻大大减小,结电流剧增,相当于导体导电的情况,这种状态称导通状态。

### 2. 外加反向电压(反偏置)——PN结截止

如图1-6所示,外加反向电压时,其效果与正向加压相反,此时  $V_{外}$  与  $E_{内}$  同向, $E_{内}$  被加强,PN结变厚,结电阻增加,结电流基本为零。

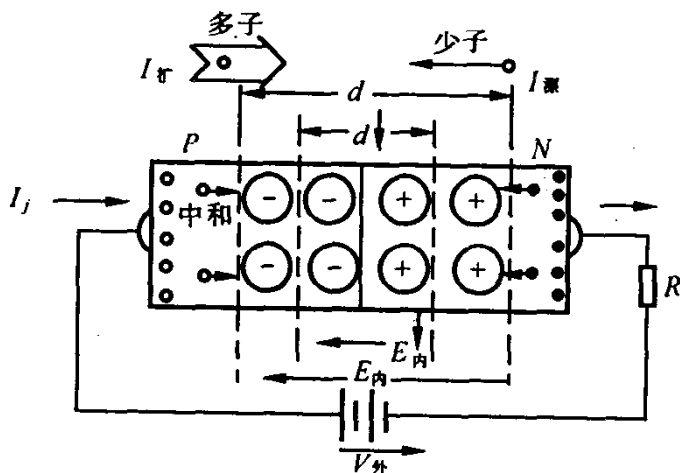


图1-5 PN结正向加压

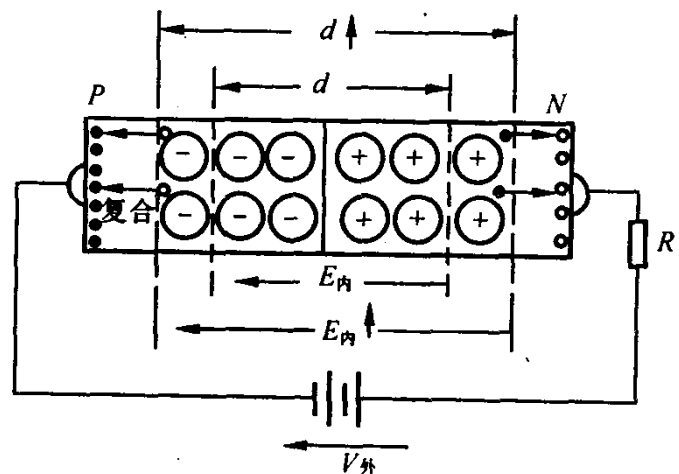


图1-6 PN结反向加压

### 3. 单向导电性

综上所述,PN 结正偏导通,结电流很大,表现低阻;而反偏时 PN 结截止,结电流基本为零,表现高阻,这种性质称 PN 结的单向导电特性。

#### (三)PN 结的电容效应

PN 结不仅有电阻效应,而且还有电容效应(充放电效应),称结电容。结电容与结电阻成并联关系,如图 1-7 所示。其中  $r_j$  表示结电阻; $C_j$  表示结电容。 $C_j$  数值较小,在中、低频下可视为开路,但在高频下它的影响不可忽视,它可造成反向漏电,破坏单向导电性。PN 结正偏时, $r_j$  称正偏电阻,阻值很小,可忽略不计;反偏时阻值较大,称反偏电阻,经常作开路处理。

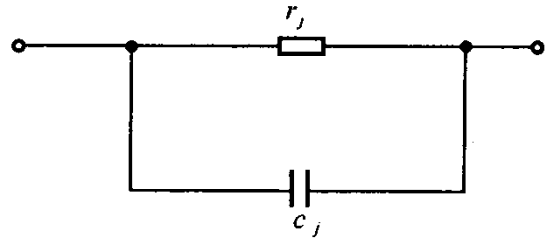


图 1-7 PN 结高频等效电路

结电容由两种电容组成,它们是扩散电容  $C_D$  及阻挡层电容(或势垒电容)  $C_B$

$$C_j = C_D + C_B \quad (1-1)$$

#### 1. 扩散电容 $C_D$

扩散电容是多子作扩散运动中的贮存所造成的电容效应。正偏时,由 P 区扩散到 N 区的空穴(多子)不可能同时与电子全部复合,还未来得及复合的空穴与 P 区中的少子(电子)、N 区中的部分多子(电子)分别组成点电容,所有点电容的集合称扩散电容。 $C_D$  的数量级为  $C_D \geq 0.01\mu\text{F}$ 。

#### 2. 阻挡层电容 $C_B$

阻挡层电容发生在阻挡层。阻挡层内的正、负电荷的多少能随  $V_{\text{外}}$  的变化而变化,相当于平行板电容器的充放电作用。正偏时,PN 结较薄,正、负电荷量较少,相当于放电;反偏时,PN 结较厚,正、负电荷量较多,相当于充电。 $C_B$  的数量级很小,约为 0.5 至 100pF。PN 结正偏时,主要是扩散运动,所以  $C_j$  主要由  $C_D$  决定;而反偏时,阻挡层变厚, $C_j$  主要由  $C_B$  决定。利用  $C_j$  随  $V_{\text{外}}$  而变化的特点可以制作容变二极管。

## 第二节 半导体二极管

### 一、二极管的结构

半导体二极管是由一个 PN 结(管芯)加上电极引线和管壳构成的。从 P 型区引出的电极称为正极;与 N 型区相连的电极为负极,其结构示意图和电路符号如图 1-8 所示,二极管的文字符号用 V 表示。使用时正极加高电平,负极加低电平,二极管内才能有电流流过。

二极管按结构不同分为点接触型和面接触型两类。

#### (一)点接触型二极管

这类二极管的 PN 结是用电形成法制造的,在一块 N 型锗片上,放一根很细的含有三价元素的金属触丝,然后通入一个电流脉冲(大小有几安培,时间在 0.1~0.4 秒),触丝尖端被加热熔化,三价元素渗入到 N 型锗中,触丝下面的那部分 N 型锗就变成 P 型,从而形成一个

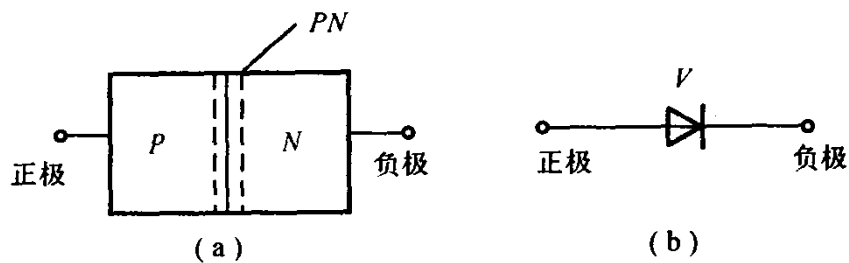


图 1-8 二极管的结构示意图与电路符号  
(a)结构示意图; (b)电路符号

PN 结,如图 1-9(a)所示。

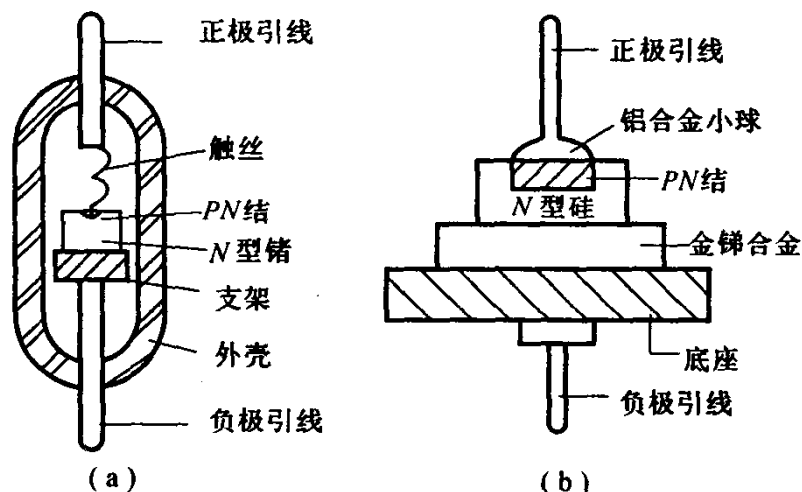


图 1-9 二极管的结构  
(a)点接触型; (b)面接触型

点接触型的优点是 PN 结面积小,结电容小,工作频率高,可达 100MHz 以上;缺点是不能承受大的正向电流和反向电压。所以这类二极管适用于高频检波或在数字电路中作开关元件。

### (二)面接触型二极管

这类二极管的 PN 结是用合金法或扩散法制成的,图 1-9(b)是用合金法制成的面接触型二极管的结构。这类管子的 PN 结面积较大,可通过较大的工作电流,但结电容也大,工作频率低,反向击穿电压高,能承受大的反向电压。多用于低频整流电路中。

半导体器件的种类很多,需要用型号加以区别和表示。国家标准规定了半导体器件型号命名方法(见表 1-1)。半导体二极管的型号可以表示出器件的材料和极性以及器件的类型。例如 2AP1 表示是用 N 型锗制成的普通二极管,2CZ52A 表示是用 N 型硅材料制成的整流二极管。

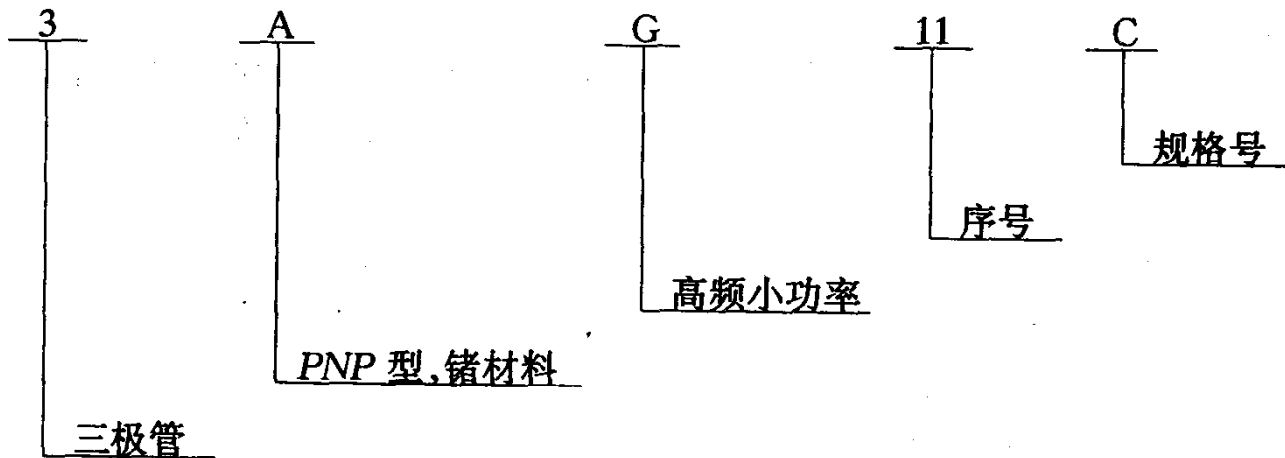
国产半导体器件的类型、材料和参数用一组数字和汉语拼音字母表示。这个数字和字母的组合代表了器件的型号。型号中各组成部分的含义如表 1-1 所示。

表 1-1 半导体器件型号命名方法(GB249-74)

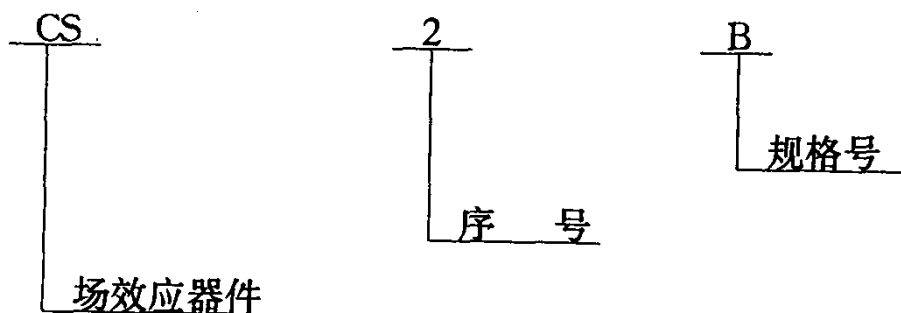
第一部分		第二部分		第三部分		第四部分	第五部分
用数字表示器件电极数目		用字母表示器件材料和极性		用字母表示器件类型		用数字表示器件序号	用字母表示器件规格号
2	二极管	A	N型锗材料	P	普通管		实际型号中第五部分也可能空白
		B	P型锗材料	V	微波管		
		C	N型硅材料	W	稳压管		
		D	P型硅材料	Z	整流管		
3	三极管	A	PNP型锗材料	X	低频小功率管		
		B	NPN型锗材料		$f_c < 3\text{MHz}$		
		C	PNP型硅材料		$P_c < 1\text{W}$		
		D	NPN型硅材料	G	高频小功率管		
		E	化合物材料		$f_c \geq 3\text{MHz}$		
				D	低频大功率管		
					$f_c < 3\text{MHz}$		
					$P_c \geq 1\text{W}$		

说明:场效应器件、半导体特殊器件、复合管、PIN型管、激光器件的型号命名只有第三、四、五部分。

示例 1: 锗 PNP 型高频小功率三极管



示例 2: 场效应器件





## 二、二极管的伏安特性曲线及电流方程式

二极管的主要特性就是 PN 结的单向导电特性,可以用电流方程式和伏安特性曲线来描写。

### (一)二极管的电流方程式

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

其中,  $I$  表示二极管的正向电流;  $I_S$  表示二极管的反向饱和电流,即反偏时少数载流子作漂移运动所形成的漂移电流;  $U$  表示二极管的外加电压;  $U_T$  是温度电压当量,常温下  $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

### (二)伏安特性曲线

由二极管方程式用逐点描迹法绘成曲线,如图 1-10 所示。

#### 1. 正向特性

当外加正向电压较小时,不足以克服内电场的作用,结电阻仍较大,扩散运动基本不能进行,所以正向电流趋于零,将该区称为死区。当正向电压增加到一定数值  $U_{on}$  时,开始出现正向电流,此时的电压称为开启电压  $U_{on}$  (或称死区电压),所对应的区域称死区。常温下,硅二极管的  $U_{on} \approx 0.5\text{V} \sim 0.7\text{V}$ ; 锗二极管的  $U_{on} \approx 0.1\text{V} \sim 0.3\text{V}$ 。

当外加正向电压大于  $U_{on}$  时,正向电流成指数规律上升,近似线性上升,因此,将该区称为线性工作区。二极管正向导通时应工作在该区。

#### 2. 反向特性

在反向电压作用下,没有多数载流子做扩散运动,只有少数载流子做漂移运动,形成很小的漂移电流,称为反向饱和电流  $I_S$ 。当温度一定,  $I_S$  表现饱和性质,因此,将该区称为反向饱和区,管子基本呈截止状态。硅管的  $I_S$  约在纳安(nA)量级; 锗管约在微安( $\mu\text{A}$ )量级。

当反向电压增加到一定数值时,反向电流  $I_S$  剧增,二极管反向击穿,曲线出现长尾现象,将该区称为反向击穿区,所对应的反向电压  $U_{(BR)}$  称反向击穿电压。这是因为随着反向电压加大,空间电荷区的电场很强,在强电场作用下,少数载流子获得足够大的能量与价电子碰撞,产生新的电子-空穴对。它们又去碰撞别的价电子产生新的电子-空穴对。如此下去,像雪崩一样,载流子个数成倍增加,使  $I_S$  剧增。这种击穿称雪崩击穿。

当 PN 结很薄时,无需加很大的反向电压就可以产生强电场作用,直接将价电子拉出参加导电,使  $I_S$  剧增。这种击穿称齐纳击穿。二极管反向加压时,PN 结较厚,主要是雪崩击穿。

## 三、环境温度对伏安特性曲线的影响

二极管的伏安特性曲线随着环境温度的变

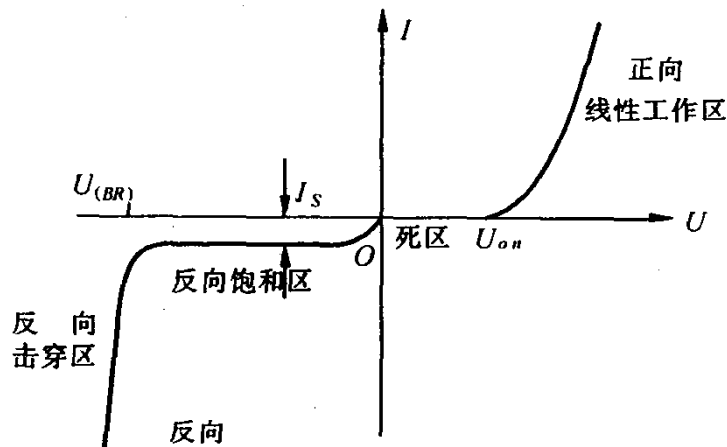


图 1-10 二极管的伏安特性

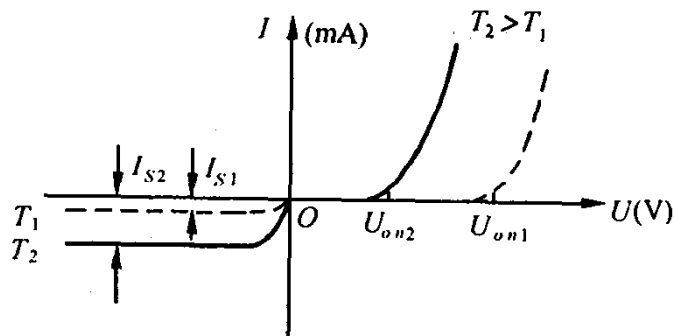


图 1-11 伏安特性曲线受温度的影响