

高等学校教材

模拟电子线路

孙文治 沙秉政

江苏科学技术出版社
电子工业出版社

内 容 提 要

本书是按机械电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由该部电子机械教材编审委员会无线电设备结构设计教材编审小组评审通过并推荐出版的电子机械类专业《模拟电子线路》课程的教材,也可作为高等院校非无线电技术类专业的本科或专科的教材。

本书介绍了半导体器件的特性和工作原理,各种线性电子线路的工作原理和分析方法,以及无线电发送设备与无线电接收设备的基本知识和组成这些设备的电子线路的工作原理、分析方法。本书内容全面广泛,突出概念,避免过繁的理论分析,每章后还附有大量习题,以便学生巩固学习内容和教师选用。

责任编辑:许顺生

高等学校教材
模 拟 电 子 线 路
孙文治 沙秉政

出版:江苏科学技术出版社
电子工业出版社
发行:江苏省新华书店
印刷:江苏海门印刷厂

开本787×1092毫米 1/16 印张22.75 插页1 字数554,000
1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷
印数1—1,600册

ISBN 7-5345-0559-3

TN·16

定价:4.90元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按机械电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由电子机械教材编审委员会无线电设备结构设计教材编审小组征稿,推荐出版。责任编委吴凤高教授。

本教材由东南大学无线电工程系教授孙文治担任主编,东南大学无线电工程系教授谢嘉奎担任主审。

当前电子线路课程的教材大体有两种类型,即无线电技术类专业和自动控制类专业使用的教材,对于并不从事电路设计的电子机械类专业的学生来说,前一种显得过深过多,后一种又偏重于线性电路,缺乏高频电路,都很难采用。而电子机械类专业无论从设备结构设计考虑或者从后继课程缺乏无线电系统知识考虑都应该压缩器件和电路设计的理论分析,加强系统整机知识,并且有一定的高频电路知识,所以编者从教学的需要于1981年作了尝试,编写了无线电设备结构专业使用的《电子线路》课讲义,在历届学生中反映较好,于1986年我们又总结历届教学实践的经验和调研所得的意见,在进行了重大修改后参加了评审;评审通过后又根据编审小组意见作了修订。本教材的主要特点是内容全面广泛,系统整体知识较强,突出概念,对器件内部的分析和繁琐的理论分析作了较大的压缩,增加了新技术和新电路的知识,删减了陈旧的内容,使之更为适合于电子机械类专业使用。

本课程的参考学时数为90~128学时,各校可结合实际情况而有所增减。本教材主要内容可分三大部分共七章。第一至三章是本课程的基础知识部分,前两章对器件的讨论都着重其外特性和应用知识,而且都是紧接着介绍其基本电路的工作原理。第三章介绍了放大器电路中负反馈的概念和分析。第四、五章为第二部分,集中介绍了集成运算放大器的组成、特性、内部电路和应用电路,以及集成功率放大器电路与集成稳压电路等。第六、七章为第三部分,以发送系统和接收系统分章,并各以整机知识为线索,将其组成的高频电路逐节进行讨论,最后又用实际的整机电路为例,深入地介绍其工作原理,以期使结构设计专业的学生得到比较全面的整机系统知识和有关的高频电路知识。本教材各章均配有一定数量的习题可供选用。

本教材由孙文治教授编写第四章部分内容、第六章和第七章;沙秉政副教授编写第一、二、三、五章和第四章部分内容;全书由孙文治统稿。受编审小组聘请审阅本教材的是武汉大学张肃文教授和中国人民解放军通信工程学院高志鸢教授,他们都详细地审阅了全部初稿,提出过许多宝贵和有益的意见。本教材在整个编写过程中,得到主审人谢嘉奎教授的指导和帮助,并对全书稿作了十分认真细致的审订。同时还得到编委会主任叶尚义教授、责任编委吴凤高教授、秘书杨庚辰副教授的支持与帮助。特在此一并表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

于东南大学

1988.3.

目 录

第一章 晶体二极管及其电路

§1-1 PN结	1
1.1.1 半导体物理基础知识	1
1.1.2 PN结的形成和外特性	5
§1-2 晶体二极管	8
1.2.1 二极管的伏安特性	9
1.2.2 二极管的电路模型	10
1.2.3 万用表检测二极管的方法	11
§1-3 整流电路	12
1.3.1 引言	12
1.3.2 整流电路的工作原理	12
§1-4 特种二极管及其电路	15
1.4.1 稳压二极管及其基本电路	15
1.4.2 变容二极管及其基本电路	17
1.4.3 发光二极管及其基本电路	18
习题	21
参考文献	25

第二章 晶体三极管及其基本放大电路

§2-1 双极型晶体管的特性和模型	26
2.1.1 工作原理	26
2.1.2 三极管的伏安特性曲线和极限参数	29
2.1.3 三极管的小信号模型和频率参数	32
§2-2 双极型晶体管基本放大电路	38
2.2.1 放大的基本工作原理	38
2.2.2 放大电路的一般分析方法	42
2.2.3 三种基本组态的放大电路	45
2.2.4 共发射极放大电路的交流性能分析	47
2.2.5 共基极和共集电极放大电路的交流性能	53
2.2.6 改善交流性能的几种放大电路	58

§2-3 场效应晶体管的特性	60
2.3.1 结型场效应管	60
2.3.2 绝缘栅场效应管	64
2.3.3 场效应管与三极管比较的特点	69
§2-4 场效应管基本放大电路	70
2.4.1 场效应管放大电路的偏置电路	70
2.4.2 场效应管放大电路的三种基本组态	71
2.4.3 场效应管放大电路的交流性能分析	72
§2-5 多级放大电路	75
2.5.1 耦合方式	75
2.5.2 多级放大电路的中频区性能	76
2.5.3 多级放大器的高频特性	79
§2-6 放大电路的噪声	81
2.6.1 噪声的基本概念	81
2.6.2 噪声系数	82
习题	83
参考文献	95

第三章 放大电路中的负反馈

§3-1 负反馈放大器的基本概念	96
§3-2 负反馈对放大器性能的影响	98
3.2.1 降低放大器的增益	98
3.2.2 提高增益的稳定性	99
3.2.3 改变输入电阻和输出电阻	100
3.2.4 减小非线性失真	104
3.2.5 扩展通频带(减小频率失真)	105
§3-3 负反馈放大器的分析	106
3.3.1 分析方法	106
3.3.2 分析举例	107
习题	114
参考文献	119

第四章 集成运算放大电路

§4-1 概述	120
4.1.1 模拟集成电路的特点和分类	120
4.1.2 半导体集成电路的制造工艺	120

4.1.3 集成运算放大器简介	124	5.3.3 开关稳压器	206
§4-2 恒流源电路	124	习题	210
4.2.1 镜像恒流源	124	参考文献	217
4.2.2 比例恒流源	125	第六章 发送系统电路	
4.2.3 微电流源	125	§6-1 概述	218
4.2.4 电流负反馈镜像恒流源	126	6.1.1 发送设备的分类与主要性能指标	218
4.2.5 高输出阻抗镜像恒流源	126	6.1.2 发送设备的结构框图	219
§4-3 差动输入级电路	127	§6-2 高频功率放大电路	220
4.3.1 典型差动放大电路的基本性能	127	6.2.1 高频功率放大器的特点	220
4.3.2 几种运放的差动输入级电路	134	6.2.2 高频功率放大器的工作原理	221
§4-4 互补输出级电路	136	6.2.3 高频功率放大器的分析	225
4.4.1 互补输出电路的工作原理	136	6.2.4 高频功率放大器的实际电路	230
4.4.2 准互补输出级电路	138	6.2.5 高频功率放大器的功率合成	231
4.4.3 带过载保护的互补输出级电路	138	§6-3 正弦波振荡电路	234
§4-5 集成运放内部电路举例	139	6.3.1 反馈式振荡器基本原理	235
4.5.1 双极型管集成运放电路	139	6.3.2 LC正弦波振荡电路	237
4.5.2 简单CMOS集成运放电路	140	6.3.3 石英晶体振荡电路	242
§4-6 集成运放的主要参数	141	6.3.4 RC正弦波振荡电路	246
4.6.1 输入失调特性参数	141	6.3.5 集成振荡电路	248
4.6.2 开环差模特性参数	142	§6-4 振幅调制电路	250
4.6.3 开环共模特性参数	142	6.4.1 调幅波的性质	250
§4-7 集成运放的几种基本应用电路	143	6.4.2 环形调幅电路	253
4.7.1 理想集成运放及其线性等效模型	144	6.4.3 单边带调幅电路	256
4.7.2 集成运放的闭环特性	144	6.4.4 双差分对相乘器调幅电路	258
4.7.3 集成运放应用电路举例	148	6.4.5 高电平调幅电路	260
§4-8 集成运放的粗测、调零和相位补偿	161	§6-5 频率调制电路	262
4.8.1 万用表粗测法	161	6.5.1 调频波的性质	262
4.8.2 零点调整	162	6.5.2 直接调频电路	266
4.8.3 相位补偿	163	6.5.3 变容管间接调频电路	271
习题	169	6.5.4 间接调频发射机框图	272
参考文献	181	§6-6 发射机整机电路分析举例	273
第五章 功率集成电路		6.6.1 整机框图	273
§5-1 功率集成电路的共性问题	182	6.6.2 音频电路	275
5.1.1 对功率集成电路的基本要求	182	6.6.3 调制电路	276
5.1.2 功率管的散热	184	6.6.4 机械滤波器和中频放大电路	277
§5-2 低频集成功率放大电路	187	6.6.5 环形混频器和波道振荡器电路	277
5.2.1 引言	187	6.6.6 宽带放大器电路	278
5.2.2 互补对称乙类功率放大电路	188	6.6.7 高频功率放大器电路	279
§5-3 集成稳压电路	199	习题	280
5.3.1 线性稳压器的基本原理	199	参考文献	291
5.3.2 线性集成稳压器的电路分析	201		

第七章 接收系统电路

§7-1 概述	292	7.4.3 包络检波电路	317
7.1.1 引言	292	7.4.4 检波器电路实例	321
7.1.2 接收设备的分类与主要性能指标	292	§7-5 频率解调电路	322
7.1.3 接收系统的结构框图	294	7.5.1 鉴频原理	322
§7-2 混频器电路	295	7.5.2 斜率鉴频电路	323
7.2.1 混频器的功能	295	7.5.3 相位鉴频电路	326
7.2.2 三极管混频器	296	7.5.4 比例鉴频电路	328
7.2.3 混频器的组合频率干扰	300	§7-6 接收系统的附加电路	329
7.2.4 抑制干扰的几种混频电路	302	7.6.1 自动增益控制电路(AGC)	329
§7-3 小信号谐振放大电路	305	7.6.2 自动频率微调电路(AFC)	331
7.3.1 引言	305	7.6.3 锁相电路(PLL)	333
7.3.2 单回路谐振放大器电路	306	7.6.4 频率合成电路	336
7.3.3 分立和集成中频放大器电路举例	313	7.6.5 其它电路	338
§7-4 振幅解调电路	314	§7-7 接收系统的整机电路	341
7.4.1 引言	314	7.7.1 超外差广播接收机	341
7.4.2 乘积型检波电路	315	7.7.2 集成电路接收机	345
		7.7.3 单边带通信接收机	346
		习题	349
		参考文献	355

第一章 晶体二极管及其电路

§ 1-1 PN结

晶体二极管或半导体二极管，其核心部分是由对某种半导体材料经过掺杂等特殊工艺而形成的所谓PN结。在图1-1-1中示出了几种二极管的外形图和结构示意图。虽然晶体二极管品种繁多，有普通二极管用来整流与检波，有各种特种二极管用来稳压、发光、变容乃至振荡等，它们在各种电子设备中有着极其广泛和重要的应用。由于它们大都由PN结所组成，所以，研究晶体二极管必须首先从半导体物理的基础知识入手，了解如何在纯（本

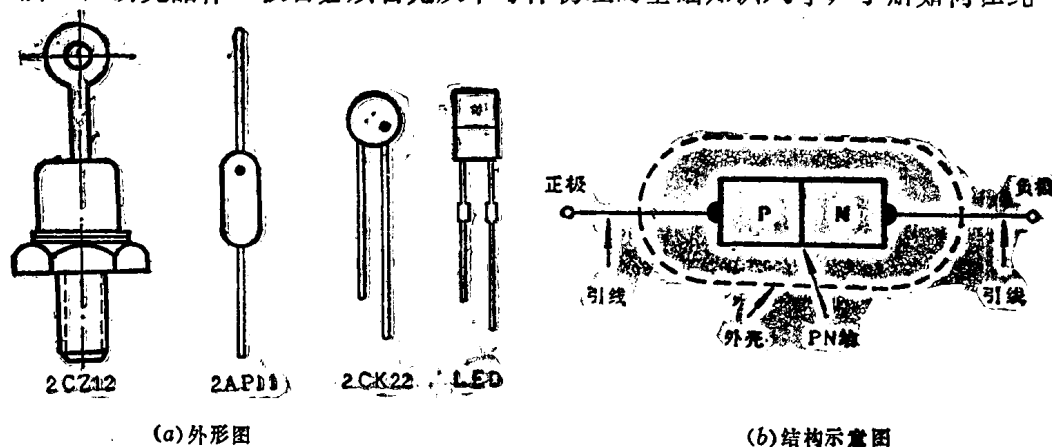


图1-1-1 晶体二极管的外形和结构

征) 半导体中掺入杂质元素形成所谓P型或N型杂质半导体，如何形成PN结，PN结有哪些主要特性等。这样，不仅可以很方便地得到晶体二极管的各种特性，而且还为进一步研究晶体三极管、场效应晶体管等电子器件奠定了必要的理论基础。

1.1.1 半导体物理基础知识

一切物质可按其导电性能被划分为导体、绝缘体和半导体三大类。顾名思义，半导体是导电性能介于导体与绝缘体之间的物体，其电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。其中硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)是用来制造半导体器件的主要材料。半导体的导电性能具有下述两个主要特点：

1. 在纯半导体中掺入微量的其它元素亦即经掺杂后，其导电能力可在很大范围内改变，这就是制作PN结的基础。

2. 对纯半导体加热或光照时，就可明显地改变其导电能力，这就是制作热敏元件或光

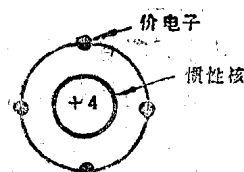
敏元件的基础。

下面我们先讨论本征半导体的特性，再介绍如何掺杂而得杂质半导体的问题，从而就可具体理解上述两个特点。

一、本征半导体

本征半导体就是纯度很高的半导体，通常要求达到小数点后面有7至9个9的纯度。大家知道，硅（Si）和锗（Ge）都是四价元素，即其外层均含有四个价电子，虽然硅的原子序为14（一个原子有14个核外原子），而锗的原子序为32，但根据任何物体的原子均呈电中性，可将它们各自除最外层电子外的所有核外电子，连同带正电荷的原子核一起，视为带有四个电子电荷的正电荷的惯性核，所以硅和锗的简化了的原子结构模型均如图1-1-2所示。

由于价电子处于原子的最外层，受原子核的束缚力最弱，而且所具有的能量比其余各内层的电子为大，所以只有价电子才有可能参与导电。



硅和锗的原子排列很有规则，这种半导体叫做晶体。在图1-1-2 硅或锗的原子结构模型整块晶体内部晶格排列完全一致的又称为单晶。由硅或锗元素组成的单晶近似为纯净半导体，即本征半导体。它的特点是通过由价电子组成的共价键把相邻各原子牢固地联系在一起。

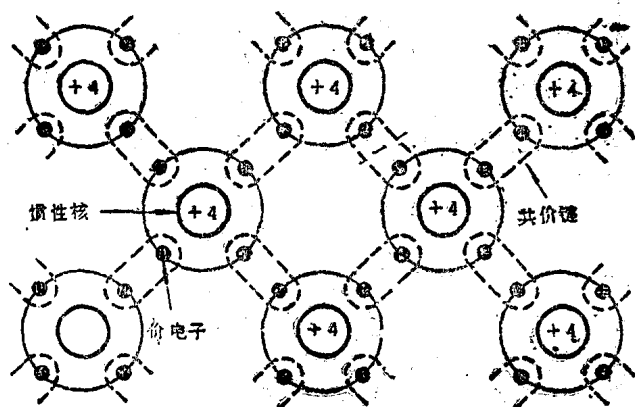


图1-1-3 硅或锗的晶体结构

所谓共价键就是相邻两原子各拿出一个价电子作为共用电子对而形成的相互作用力，如图1-1-3所示。此时，价电子均受共价键束缚，在热力学温度为零度时不存在自由电子。

但是，半导体在温度升高或受到光照时，某些价电子会因获得足以摆脱共价键束缚的能量而离开原子，成为自由电子；此时，某些失去电子的共价键中必然留下空位，而且空位总数与自由电子总数相等。这种因升温、光照等外因在本征半导体内部激发出

电子-空穴对的过程，称为本征激发。本征激发所产生的自由电子固然是半导体借以导电的载流子；而且与之同时产生的空位也是可以参与导电的载流子。因为当某一个共价键中留下一空位时，邻近一个共价键中的价电子就会很容易地转移到这个空位上来，同时这个共价键中留下了一个新的空位；而后，新的空位又会被与之相邻的一个共价键中的价电子所填补。这样连锁地持续下去，就相当于空位在晶体中移动，如图1-1-4所示。这种带负电荷的价电子依次填补空位的运动等效于带正电荷的粒子作反方向的运动，从而可把空位视为带正电荷的粒子，并把它称为“空穴”。由此可见，半导体是依靠自由电子和空穴两种载流子导电的物质。

在本征半导体中，一方面由于本征激发不断地产生自由电子-空穴对；另一方面自由电子在运动过程中可能与空穴相遇，又回到共价键的空位上而变成束缚电子，这种使自由电子-空穴对消失的过程称为“复合”。显然，产生与复合总是同时存在，在一定的温度

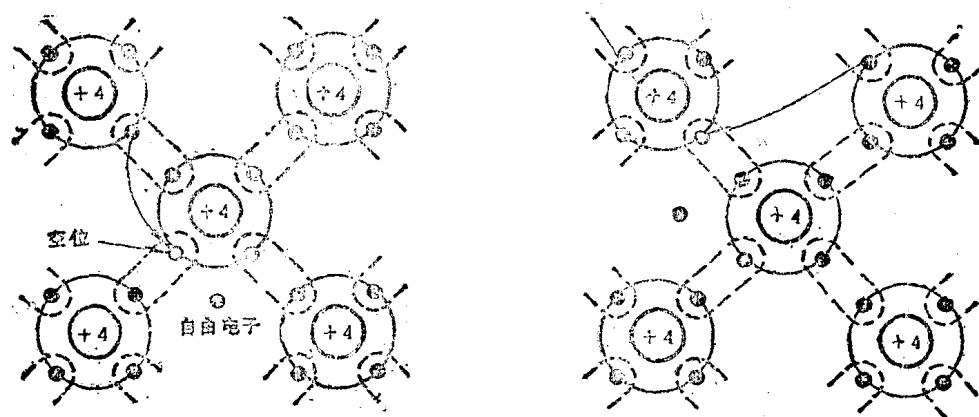


图1-1-4 空位在晶体中的移动

下，当电子-空穴对的产生与复合的机会相等时，便达到动态平衡。这时的载流子浓度（即单位体积内载流子的数量）叫热平衡浓度，它将保持为一确定数值。

设热平衡自由电子浓度为 n_0 ，热平衡空穴浓度为 p_0 ，它们被统称为本征热平衡载流子浓度，而且数值相等，通常用 n_i 表示，单位为 cm^{-3} 。对于本征半导体，在热力学温度 $T=300\text{K}$ （室温）时，硅的 $n_i \approx 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ，锗的 $n_i \approx 2.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。随着温度的增加，由于本征激发将使 n_i 值明显增大。必须指出，这个 n_i 值虽然很大，其实与原子密度相比却是微乎其微的。例如，硅的原子密度为 $4.93 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ ，则在室温下硅的本征载流子浓度仅为其原子密度的三万亿分之一。

二、杂质半导体

实际上，用来制造半导体器件的材料并不是本征半导体，而是人为地掺入一定杂质后的杂质半导体，它根据所掺杂质的不同有N型杂质半导体和P型杂质半导体两种。

N型杂质半导体又称电子型杂质半导体，它是在本征硅或本征锗中掺入微量的磷（P）或砷（As）或锑（Sb）等五价元素而形成的一种杂质半导体。

现以掺磷于本征硅为例来说明N型杂质半导体的形成过程。由于属于五价元素的磷原子有五个价电子，以使每个磷原子与相邻四个硅原子组成共价键后还多出一个价电子，这个不在共价键中的价电子受原子核的束缚很弱，在常温下很容易因热激发而脱离磷原子的束缚而成为自由电子，如图1-1-5所示。这种能供给一个自由电子的杂质原子叫做施主原子或施主杂质。

磷原子本身在失去一个电子后便成为带有一个电子电荷量的正离子。正离子束缚在晶格中不能自由运动，当然不能参与导电。至于因掺入磷原子所释放的大量自由电子，既不是共价键中的价电子，又不会像本征激发那样同时产生空穴，甚至还会因自由电子的增加使复合的机会增多，从而减少原有的空穴数。结果，在掺

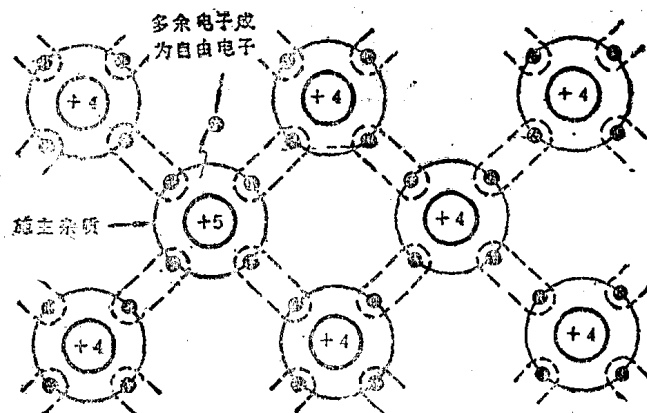


图1-1-5 N型半导体的结构示意图

磷原子所释放的大量自由电子，既不是共价键中的价电子，又不会像本征激发那样同时产生空穴，甚至还会因自由电子的增加使复合的机会增多，从而减少原有的空穴数。结果，在掺

磷后的硅半导体中的自由电子必然大大地多于空穴，所以又称N型半导体为电子型半导体。并且把N型半导体中的自由电子称为多数载流子，简称多子，其浓度近似等于掺杂浓度；而把数值小于 n_i 的空穴称为少数载流子，简称少子。

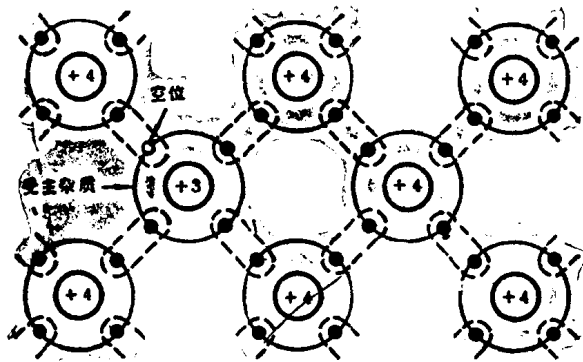


图1-1-6 P型半导体的结构示意图

如果在本征硅或本征锗中掺入少量的铟(In)或硼(B)等三价元素，情况就有所不同。如图1-1-6所示，此时每个铟原子或硼原子的三个价电子，在与其周围四个硅原子组成共价键时，其中就有一个键因缺少一个电子而留有一个空位。因此，在室温下，相邻硅原子上的价电子就很容易填补这个空位，从而产生空穴。也就是说每个三价杂质原子能提供一个空穴或即接受一个电子，故称之为受主原子或受主杂质。掺入的杂质接

受一个价电子后，变成带有一个电子电荷量的负离子，这种负离子束缚在晶格中，不能起导电作用。同理，由于掺入极少量的受主原子而使半导体中的空穴数目大大增加，同时还存在着由本征激发产生的极少量自由电子，因此，在这种杂质半导体中空穴是多子，电子是少子。故称为空穴型半导体或P型杂质半导体。

必须指出，如果在经过掺入一定浓度的施主杂质而形成的N型半导体中，再掺入浓度更高的受主杂质，就会使N型半导体转变为P型半导体。这种现象叫做杂质补偿，它是制造PN结的基础，也是在平面管和集成电路的生产中得到广泛应用的基本工艺。

三、载流子的漂移与扩散

载流子在电场作用下所作的定向运动称为载流子的漂移运动，由此产生的电流称为载流子漂移电流，如图1-1-7所示。这种电流不是半导体独有的，因为在金属导体中同样存在。但是，在半导体中，还存在另一种金属导体中不存在的所谓载流子扩散电流。

当半导体的某一截面受到光照或从外部注入载流子时，半导体中将存在载流子的浓度差异，近光照或载流子注入的截面处浓度最高，离开这个截面越远处的浓度越低，这样，载流子就会从高浓度处向低浓度处运动，这种因浓度差产生的运动称为载流子的扩散运

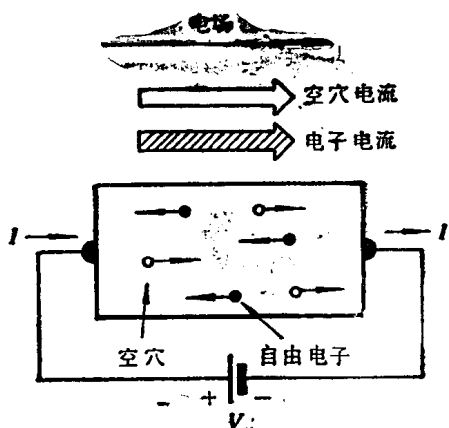


图1-1-7 电场作用下的漂移电流

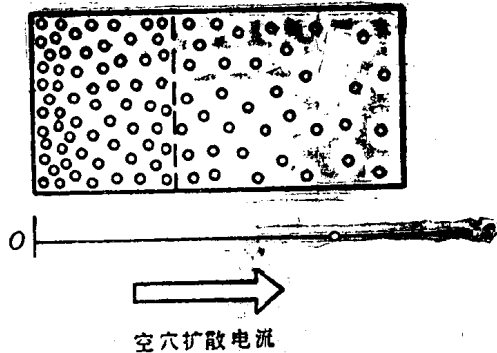


图1-1-8 空穴扩散电流

动，由此而产生的电流叫载流子扩散电流，如图1-1-8所示。通常规定扩散电流的正方向为多子扩散的实际方向，而与电子扩散的方向相反。因此，空穴扩散电流方向与浓度减小的方向相同，自由电子扩散电流的方向则与浓度减小的方向相反。

1.1.2 PN结的形成和外特性

一、PN结的形成

通过掺杂补偿的方法，可将N型（或P型）杂质半导体材料的某一部分转变为P型（或N型）杂质半导体，就会在P型和N型杂质半导体的交界面两侧的小范围内形成一个PN结。

PN结形成的物理过程是这样的，由于在P型与N型杂质半导体的交界面两侧有不同的多子，P区一侧的多子为空穴，其浓度远大于N区一侧的少子空穴浓度；N区一侧的多子为电子，其浓度又远大于P区一侧的少子电子浓度。因而，P区一侧的空穴必向N区扩散，而N区一侧的电子必向P区扩散，而且扩散到对侧的载流子都会很快与对侧的多子复合，从而在交界面两侧一个很窄的区域内留下不能移动的正、负离子（P区留下负离子，N区留下正离子），如图1-1-9所示，形成一个带正、负电荷的空间电荷区，并在这个区域内产生由N区指向P区的内建电场。这个内建电场的作用，一方面阻止多子继续扩散；另一方面推动交界面附近的少子向对侧漂移，即推动P区中的电子向N区漂移，N区中的空穴向P区漂移。

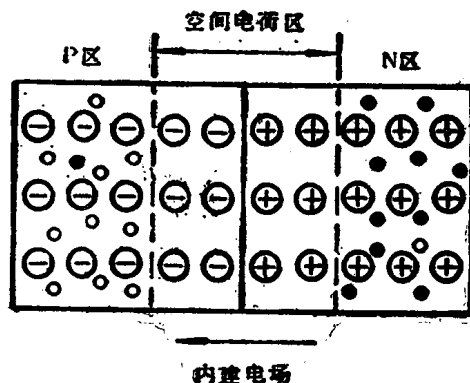


图1-1-9 PN结的形成

在开始扩散时，内建电场较小，随着扩散运动的继续进行，空间电荷区的宽度随之增大，使内建电场增强，因而扩散运动受到减弱，漂移运动得到加强。当扩散进行到一定程度时，内建电场增强到恰好使扩散电流被漂移电流所抵消，交界面两侧的电荷量便达到动态平衡，这样就形成了PN结，又称阻挡层或耗尽层。当然在PN结区以外的仍然都是保持电中性的P区和N区，而且在没有外加电场时流过PN结的总电流恰好为零。

PN结的宽度很窄，一般只有零点几微米到几十微米。由内建电场产生的内建电位差，又称接触电位差用 V_B 表示，在室温下的数值与半导体材料有关，硅为0.6~0.8V，而锗为0.1~0.3V。

二、PN结的外特性

1. PN结的伏安特性

当PN结在如图1-1-10 (a) 所示，外加正向电压（即P区接电源的正极，N区接负极）作用下，有正向电流通过PN结，其值随外加正向电压的升高而迅速增大，反之如图1-1-10 (b) 所示，当PN结在外加反向电压作用下，PN结的反向电流很小，且其大小与外加反向电压几乎无关。这种特性叫做PN结的单向导电性。

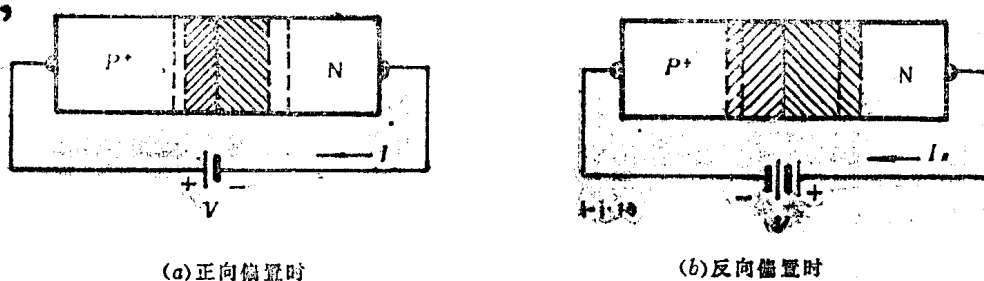


图1-1-10 外加电压对PN结电流的影响

这种现象可作如下解释：在理想情况下，由于在PN结区两侧的P区和N区中各有较多的载流子而有很低的电阻率，但在PN结中由于载流子几乎均被耗尽而有很高的电阻率，因此，可以认为外加电压几乎全部作用在PN结上。这样在外加正向电压时，所加电压的方向与内建电位差 V_B 的方向相反，内建电场的作用削弱，因此，外加的正向电压，使阻挡层宽度变窄（见图1-1-10(a)），导致载流子的扩散运动大于漂移运动。所以，由多子注入形成的正向电流增加，其方向从P区流向N区，大小随外加正向电压的升高而越来越迅速地增大，通常把使正向电流开始明显增大时所对应的正向电压称为PN结的导通电压，用 $V_{D(ON)}$ 表示，其值一般为零点几伏。

反之，当外加反向电压时，外加电压的方向在PN结内与内建电位差 V_B 的方向一致，加强了内建电场的作用，会使阻挡层宽度变宽（见图1-1-10(b)），导致载流子的漂移运动大于扩散运动。于是通过PN结的电流，仅仅是由P区热平衡少子向N区漂移和N区热平衡少子向P区漂移所形成的漂移电流，方向从N区指向P区，这个反向电流在温度不变时由于少子浓度不变而不会随外加反向电压的变化而变化，故称之为反向饱和电流，通常用符号 $I_{R(sat)}$ 表示，其值一般为纳安或微安数量级。

理论与实践证明，通过PN结的电流 I 与外加电压 V 的关系式，即PN结的伏安特性方程为

$$I = I_{R(sat)} \left(\exp \frac{qV}{KT} - 1 \right) = I_{R(sat)} \left(\exp \frac{V}{V_T} - 1 \right) \quad (1-1-1)$$

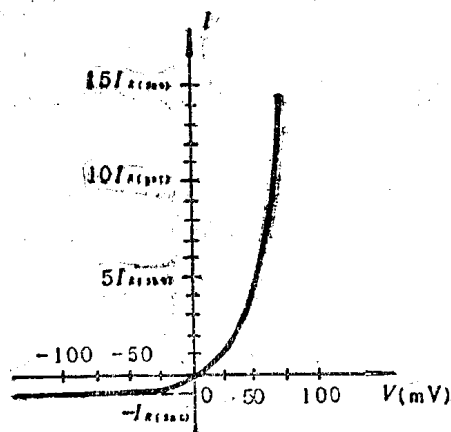


图1-1-11 PN结的伏安特性

式中， T 为热力学温度； $q = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑，为电子电荷量； K 是玻尔兹曼常数， $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； $V_T = \frac{KT}{q}$ 为温度的当量电压，在室温 $T = 300 \text{ K}$ 时， $V_T \approx 26 \text{ mV}$ 。图1-1-11示出了按上式描绘的曲线，即PN结的伏安特性曲线。由图可见，PN结的正向特性是电流随外加电压按指数规律增加的，至于PN结的反向特性，除了 $|V| \leq V_T$ 时电流将随电压而变化外，在 $|V| > V_T$ 时， $\exp(V/V_T) \approx 0$ ， $I \approx -I_{R(sat)}$ ，反向电流近似为一很小的恒定值，这就说明了PN结单向导电特性的机理。

2. PN结的击穿特性

当PN结外加的反向电压增加到某一数值 V_{BR} 时，反向电流突然急剧增大，如图1-1

-12所示。这种现象称为PN结的击穿特性，而 $V_{(BR)}$ 这个电压称为PN结反向击穿电压。引起PN结击穿的原因有雪崩击穿和齐纳击穿两种。

(1) 雪崩击穿 当PN结内部电场随反向电压的增大而增强时，PN结附近的少数载流子就会因漂移速度的加快而增大动能。当反向电压增大到足以使少数载流子获得的动能可把PN结内的中性原子的价电子从共价键中碰撞出来，产生新的自由电子-空穴对，那么新产生的和原先有的自由电子和空穴，会在强电场作用下再去碰撞其它中性原子，又产生出更多的自由电子-空穴对。如此连锁反应就会使PN结中的载流子数目急剧增多，从而导致PN结的反向电流急剧增大。由于这种增长过程象雪崩那样，故称为雪崩击穿。

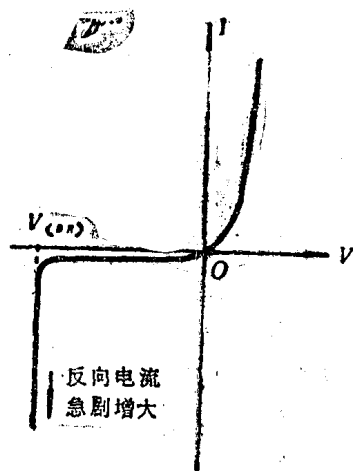


图1-1-12 PN结的击穿特性

(2) 齐纳击穿 在PN结很薄的情况下就不容易产生因碰撞电离而形成的雪崩击穿。但是，由于在很薄的PN结上即使是不大的反向电压就能建立很强的电场，它可以把PN结内中性原子的价电子直接从共价键中拉出来，从而产生许多新的自由电子-空穴对。这种现象称为场致激发。当场致激发使PN结内出现大量载流子时，PN结的反向电流就会剧增而呈现的击穿现象称为齐纳击穿。

一般，由硅材料制成的PN结，其击穿电压值，大于8V者属于雪崩击穿，小于5V者属于齐纳击穿，在5~8V之间者则两者兼而有之。

应该指出，雪崩击穿和齐纳击穿都是电击穿。PN结在发生电击穿后，只要功耗并不大，结温又不过高，PN结就不会损坏，当反向电压重新降低后仍可恢复正常，因此这种击穿是可逆的。

3. PN结的温度特性

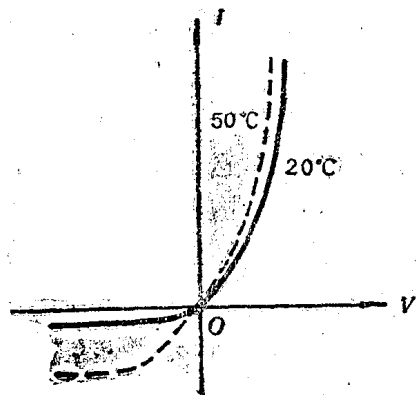


图1-1-13 PN结的温度特性

PN结的温度特性表示温度对PN结伏安特性的影响。当结温升高时，会使PN结的正向特性略向上移，而反向特性则显著下移，如图1-1-13所示。这是因为少数载流子浓度与本征激发热平衡载流子浓度 n_i 的平方成正比。实验结果表明，锗PN结的反向饱和电流 $I_{R(sat)}$ 随温度变化的规律与硅PN结的 $I_{R(sat)}$ 略有不同；但在工程估算时可大致认为每升高结温10°C时，二者的 $I_{R(sat)}$ 均

将加倍。而当加正向电压时，虽然 $e^{\frac{qV}{kT}}$ 随温度升高而减小，但是 $I_{R(sat)}$ 随温度升高而增大的程度往往大于 $e^{\frac{qV}{kT}}$ 减小的程度，结果使正向电流随温度的升高略有所增。

当温度进一步升高时，少数载流子浓度因本征激发而急剧增加，在极端情况下，其值会超过原来杂质电离产生的多数载流子浓度，这时本征激发起主要作用，使杂质半导体变得与本征半导体相似，PN结就不复存在。因此，PN结有一个保证正常工作的最高工作温度，用符号 T_{jm} 表示，其值与半导体材料有关，一般，锗的 T_{jm} 为75~100°C，而硅的 T_{jm} 可达150~200°C。

关于PN结的击穿电压的温度特性与击穿的类型有关。雪崩击穿时，击穿电压随温度

升高而增高，具有正温度系数；齐纳击穿时，击穿电压随温度升高而降低，具有负温度系数；因而在两种击穿兼而有之之时，击穿电压的温度系数还可能接近于零。

至于PN结的导通电压 $V_{D(ON)}$ 将随温度升高而减小。这是因为温度升高后，漂移电流增大，动态平衡时所需扩散电流也较大，所以，阻挡层的宽度变窄，内建电位差变小， $V_{D(ON)}$ 随之减小。

4. PN结的电容特性

PN结的结电容由势垒电容和扩散电容两部分组成。

首先讨论势垒电容。由于在PN结内不存在载流子，只存在不能移动的正、负离子，所以相当于贮存着数量相等的许多正、负电荷，而且这些电荷量将随外加电压的变化而变化。这种贮存电荷量随外加电压变化的现象就是一种电容效应，这部分电容叫做PN结的势垒电容，用 C_T 表示。具体地说，当PN结外加正向电压时，使其阻挡层宽度变窄，贮存的电荷量减少，相当于“放电”效应；反之，当PN结外加反向电压时，使其贮存的电荷量增加，相当于“充电”效应。所以，PN结的势垒电容可定义为

$$C_T = \frac{dQ}{d(V_B - V)} = - \frac{dQ}{dV} \quad (1-1-2)$$

并且可以证明 C_T 与外加电压 V 的关系为

$$C_T = \frac{C_{T0}}{\left(1 - \frac{V}{V_B}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1-1-3)$$

式中， C_{T0} 为外加电压 $V=0$ 时的势垒电容。

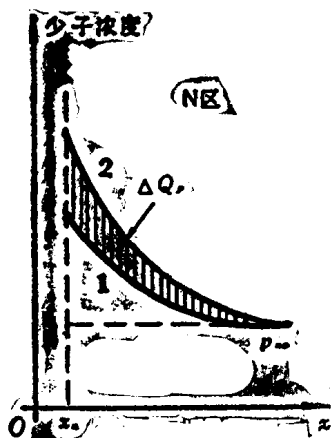


图1-1-14 正向电压增加时N区少数浓度分布的变化

再来讨论扩散电容。在正向电压 V 的作用下，P区的多子空穴注入到N区后，必然向空穴浓度低的地方扩散，相应的浓度分布情况如图1-1-14中的曲线1所示。当外加正向电压有一增量 ΔV 时，P区注入到N区的空穴浓度随之增大，相应的浓度分布曲线上移而变为曲线2，显然，两曲线之间的面积正比于所增加的空穴电荷量 ΔQ ；反之，当外加电压减少时，积累的空穴电荷量也会随之减少。所以，这种在扩散过程中积累的电荷量随外加正向电压而变化的现象也是一种电容效应，这部分电容叫做PN结的扩散电容，用 C_D 表示。

当然，在PN结中势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 是同时存在的，而且均与外加电压有关。不过，当PN结外加正向电压时， $C_D \gg C_T$ ，结电电容可近似为扩散电容；当PN结外加反向电压时， $C_T \gg C_D$ ，结电电容可近似为势垒电容 C_T 。一般， C_T 的电容量在0.5~100pF范围内，而 C_D 的电容量则介乎几十皮法到0.01微法之间。

§ 1-2 晶体二极管

晶体二极管有点接触型和面结合型两种不同结构。但是均由一个PN结、接触电极、

引线和管壳组成。图1-2-1(a)和(b)分别示出了它们的基本结构和电路符号。

点接触型二极管中的PN结面积甚小,允许通过的电流就小,结电容容量也小,因此它的工作频率较高;面结合型二极管中的PN结面积较大,允许通过的电流就大,结电容容量也较大,因而它的工作频率很低。

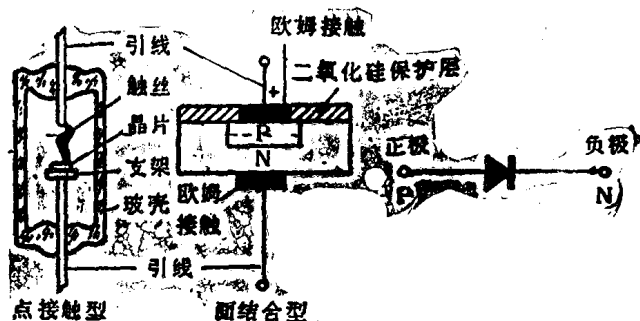


图1-2-1 二极管的内部结构和电路符号

1.2.1 二极管的伏安特性

晶体二极管的核心是PN结,所以它的伏安特性可近似用PN结的伏安特性方程式(1-1-1)来表示。但实际二极管的伏安特性曲线如图1-2-2中的实线所示,它与理想PN结的指数规律稍有不同。产生这种差异的原因很多,例如,实际存在于PN结两侧的N区和P区这两个中性区的体电阻和半导体与引线之间的接触电阻,可等效为一个与PN结串联的电阻,用 r_s 表示。当正向电流较小时, r_s 上的压降可略去不计,则认为外加电压全部加到PN结上;但当正向电流较大时, r_s 上的压降就不能忽视,使得加到PN结上的电压小于外加正向电压。因此,在同样大小的正向电流时,二极管两端的实际电压就需要比理想PN结大。又如因制造工艺的缺陷而引起的表面漏电流以及阻挡层中产生自由电子-空穴对所造成的反向电流,往往都会使二极管的反向饱和电流明显增加。

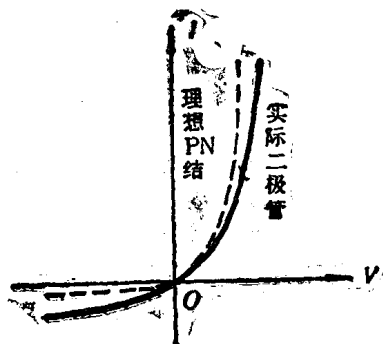


图1-2-2 实际二极管与理想PN结伏安特性比较

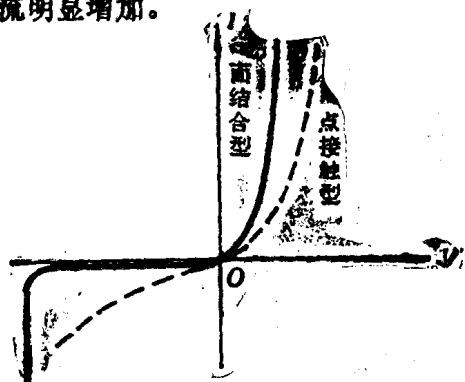


图1-2-3 点接触型和面结合型二极管伏安特性比较

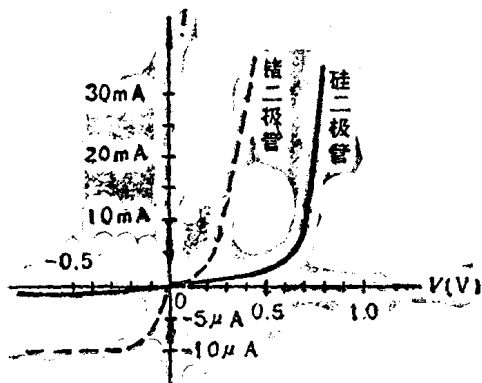


图1-2-4 硅和锗二极管伏安特性比较

点接触型二极管和面结合型二极管的伏安特性也有一定的差异。点接触型二极管的串联电阻大,需要在电压较大时伏安特性曲线才趋于直线,其斜率近似等于 $1/r_s$ 。同时,点接触型二极管的反向电流也会由于工艺缺陷而增大,而且还会出现软击穿现象,亦即在反向电压增大时,反向电流随之逐渐增大,如图1-2-3中左下方的虚线所示。

再则,二极管的伏安特性还与所用半导体材料有关,如图1-2-4所示。硅二极管的反向饱和电

流远小于锗二极管，通常硅管的 $I_{R(sat)}$ 为纳安数量级（而锗管为微安数量级），并且硅二极管的导通电压 $V_{D(ON)}$ 大于锗二极管（通常硅管为0.6~0.8V；锗管为0.1~0.3V）。类似PN结导通电压的温度特性，可近似认为每升高结温1℃，二极管的 $V_{D(ON)}$ 值将下降2.5 mV。

1.2.2 二极管的电路模型

一、二极管的小信号模型

在实际应用时，交流信号总是迭加在直流电量上，而直流电量在二极管伏安特性曲线

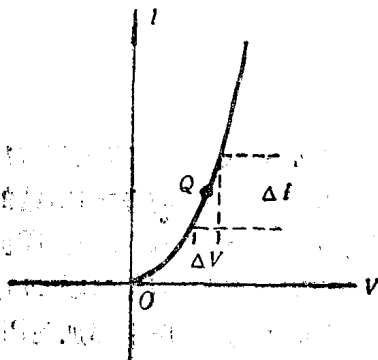


图1-2-5 二极管的小信号增量电阻

上决定的工作点称为静态工作点 Q ，如图1-2-5所示， Q 点相应的直流电压和电流分别为 V_0 和 I_0 。如果迭加在 V_0 上的信号电压 ΔV 很小，则可认为在 ΔV 的变化范围内，伏安特性近似为一段直线，所以二极管在 Q 点上的小信号增量电阻（或称结电阻）可定义为

$$r_i = \left. \frac{\Delta V}{\Delta I} \right|_Q \quad (1-2-1)$$

其倒数 $1/r_i$ 就是伏安特性在 Q 点的切线斜率。

由上式和二极管的伏安特性方程式（1-1-1），还可写出二极管的结电阻表达式为

$$r_i = \left. \frac{\Delta V}{\Delta I} \right|_Q = \frac{1}{\left. \frac{\Delta I}{\Delta V} \right|_Q} = \frac{V_T}{I_{R(sat)} \exp\left(\frac{V}{V_T}\right)} \approx \frac{V_T}{I_0} \quad (1-2-2)$$

一般，二极管的 r_i 值为几欧姆到几十欧姆。

因此，在小信号时，二极管的等效电路模型可由工作点上的增量电阻 r_i 、结电容 C_j 和前述的等效串联电阻 r_s 组成，如图1-2-6所示。

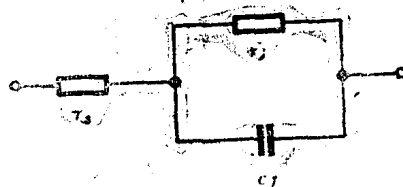
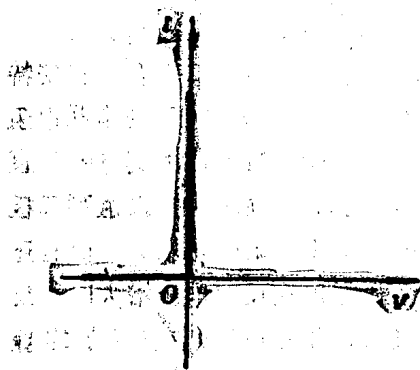


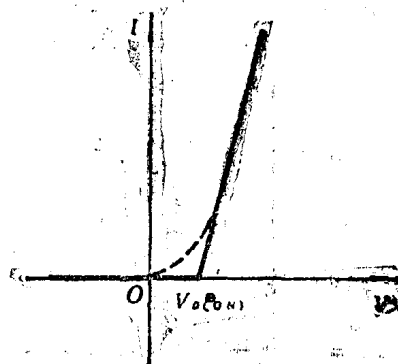
图1-2-6 二极管的小信号模型

二、二极管的大信号模型

为分析二极管在大信号工作时的等效电路，首先应引入理想二极管的概念，即先假设



(a) 理想特性



(b) 折线近似特性

图1-2-7 二极管的特性