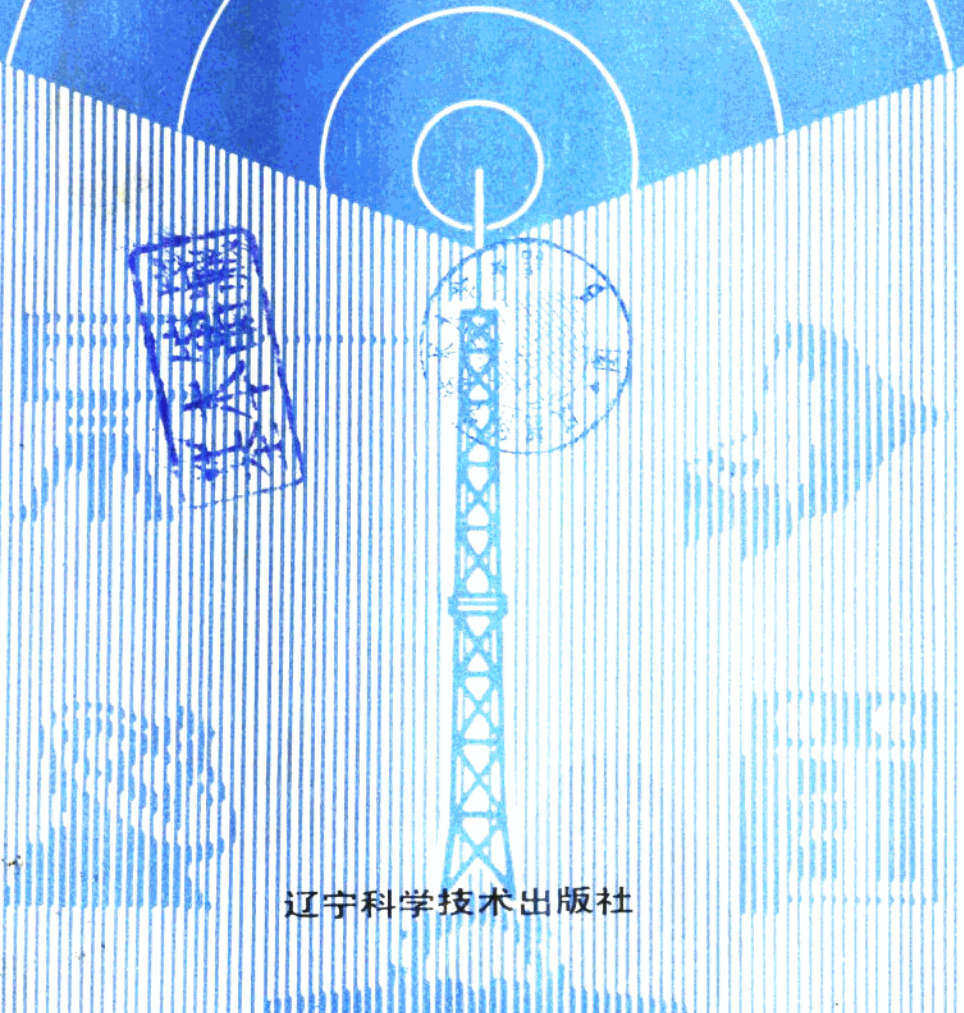


319054
高等专科学校教材

模拟电子技术

姚茂龙 叶辉



辽宁科学技术出版社

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。

原电子工业部教材办公室

EA016108

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由大专计算机专业教材编审委员会专业基础编审小组组织、征稿、评选、推荐出版的。

本教材是按课程总学时数为60学时编写的。在编写过程中，考虑了大专计算机专业的特点，力图加强基本概念，确保必要的基础知识，同时注意删繁就简、精选和更新有关内容，故在教材处理时作了以下几方面考虑。

有关半导体二极管、三极管和集成组件的知识均以器件外特性为主，对其内部结构、工作原理仅作一般介绍。图解法和微变等效电路法作为模拟电路两大基本分析方法是本教材学习放大电路的基础内容。集成运算放大电路是全书的重点内容。在其之前安排了负反馈、差动放大和互补对称功率放大的有关内容。作为其电路分析的基础，在其后续振荡和稳压电路的部分章节中引入了有关运放应用的具体内容。

本教材由姚茂龙和叶辉两位同志合编。上海电视大学姚茂龙副教授任主编，叶辉同志负责全书统稿。

上海第二工业大学张人伟副教授担任本书主审，全面和仔细地审阅了全书，并对初稿中的不妥之处提出了许多修改意见，在此特致以深切的感谢。

本书在编写过程中，还得到上海工业大学谢金华副教授、上海闸北区业余大学杨希恩副教授等同志的热情帮助和指导，在此一并表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中必然存在不少问题。如有错误或不妥之处，恳请读者予以批评指正。

编 者

1989年8月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 半导体导电的特点及共价键结构	1
1.1.2 本征半导体	2
1.1.3 杂质半导体	3
1.2 PN结	3
1.2.1 PN结形成的物理过程	3
1.2.2 PN结的单向导电性	4
1.3 半导体二极管	5
1.3.1 二极管的伏安特性	5
1.3.2 二极管的电容效应	7
1.3.3 二极管的主要参数	8
1.4 稳压管	8
1.4.1 伏安特性曲线	8
1.4.2 主要参数	9
1.5 半导体三极管	9
1.5.1 三极管结构简介	9
1.5.2 三极管放大作用原理	10
1.5.3 伏安特性曲线	12
1.5.4 主要参数	14
习题一	16
第二章 放大电路基础	19
2.1 基本放大电路和静态工作点的设置	19
2.1.1 基本放大电路的组成	19
2.1.2 静态工作点的设置	20
2.2 放大电路基本分析方法之一——图解法	21
2.2.1 图解分析的具体方法	21
2.2.2 放大电路的非线性失真与静态工作点的关系	25
2.3 静态工作点的稳定及其偏置电路	26
2.3.1 温度对静态工作点的影响	27
2.3.2 工作点稳定的偏置电路	27
2.4 放大电路基本分析方法之二——微变等效电路法	30
2.4.1 晶体管的 h 参数微变等效电路	30
2.4.2 微变等效电路的应用	34
2.5 放大电路的三种组态及其性能比较	37
2.5.1 共集电极放大电路	38

2.5.2 共基极放大电路	39
2.5.3 三种基本组态性能比较	40
习题二	42
第三章 场效应管及其放大电路	47
3.1 结型场效应晶体管	47
3.1.1 基本结构和电压控制作用	47
3.1.2 特性曲线	48
3.1.3 主要参数	50
3.2 绝缘栅场效应晶体管	50
3.2.1 耗尽型场效应晶体管	52
3.2.2 增强型场效应晶体管	52
3.2.3 场效应管和普通晶体管的比较	53
3.3 场效应管放大电路	53
3.3.1 偏置电路	53
3.3.2 场效应管的微变等效电路	56
3.3.3 场效应管放大电路分析	57
习题三	59
第四章 放大器的级联及频率特性	62
4.1 放大器的级联	62
4.1.1 级间耦合方式	62
4.1.2 多级放大器电压放大倍数的计算	63
4.2 频率特性的基本概念	66
4.2.1 频率特性的表示方法	66
4.2.2 频率特性的主要指标	68
4.2.3 多级放大器的频率特性	68
4.2.4 频率失真和相位失真	69
4.3 阻容耦合放大器的频率特性	70
4.3.1 阻容网络的频率特性	70
4.3.2 频率特性主要指标的计算	72
附录 密勒定理	75
习题四	76
第五章 负反馈放大电路	79
5.1 反馈的基本概念	79
5.1.1 什么是反馈	79
5.1.2 负反馈放大器的方块图及放大倍数的一般表达式	80
5.2 反馈的分类和判别	82
5.2.1 直流反馈和交流反馈	82
5.2.2 正反馈和负反馈	82
5.2.3 反馈的四种连接形式	83
5.3 负反馈对放大器性能的影响	87
5.3.1 提高放大倍数的稳定性	87

5.3.2 扩展通频带	88
5.3.3 减小非线性失真	89
5.3.4 抑制内部干扰和噪声	90
5.3.5 对输入电阻的影响	91
5.3.6 对输出电阻的影响	91
5.4 深度负反馈放大电路闭环电压增益的近似计算	93
5.4.1 利用公式 $A_f = \frac{1}{F}$ 的近似估算	93
5.4.2 利用 $X_f \approx X_i$ 的近似估算	95
5.5 放大电路的自激振荡及其消除	98
5.5.1 自激振荡条件	98
5.5.2 负反馈放大器的自激振荡及其消除	98
习题五	99
第六章 直接耦合放大电路	103
6.1 直接耦合的特殊问题	103
6.1.1 级间电位配合问题	103
6.1.2 零点漂移	104
6.2 差动放大电路	105
6.2.1 差动放大电路的工作原理	106
6.2.2 差动放大典型电路的分析	108
6.2.3 差动放大电路的几种接法	110
6.2.4 带恒流源的差动放大电路	113
6.3 直接耦合功率放大电路	114
6.3.1 功率放大电路的特点和要求	114
6.3.2 乙类推挽互补对称功率放大电路	115
6.3.3 直接耦合多级放大电路实例分析	118
习题六	121
第七章 线性集成运算放大电路	126
7.1 集成运放组件介绍	126
7.1.1 集成运放组件的结构特点	126
7.1.2 集成运放组件F007介绍	127
7.1.3 集成运放组件的主要技术指标	130
7.2 基本运算放大电路	133
7.2.1 虚假短路的概念	133
7.2.2 反相比例放大电路	133
7.2.3 同相比例放大电路	135
7.3 信号运算电路	135
7.3.1 加法和减法电路	136
7.3.2 积分和微分电路	139
7.3.3 对数、反对数及其乘除电路	141
7.3.4 集成模拟乘法器及其应用	142
7.4 集成运算放大器的线性应用举例	146

7.4.1 信号检测电路	145
7.4.2 信号放大电路	146
7.4.3 信号处理电路	147
7.4.4 信号变换电路	149
7.4.5 控制与测量电路	151
习题七	152
第八章 振荡电路	157
8.1 正弦振荡电路	157
8.1.1 振荡条件和正弦振荡电路的组成	157
8.1.2 RC桥式振荡电路	158
8.1.3 LC正弦振荡电路	161
8.1.4 石英晶体振荡电路	164
8.2 非正弦振荡电路	166
8.2.1 比较器	166
8.2.2 方波振荡电路	169
8.2.3 三角波振荡电路	170
8.2.4 锯齿波振荡电路	171
习题八	172
第九章 直流电源	176
9.1 整流电路	176
9.1.1 半波整流电路	176
9.1.2 桥式整流电路	177
9.2 滤波电路	178
9.3 稳压电路基本原理和质量指标	179
9.3.1 稳压电路基本原理	180
9.3.2 稳压电路质量指标	180
9.4 稳压管稳压电路	181
9.4.1 工作原理	181
9.4.2 直流参考电压源	183
9.5 串联型稳压电路	184
9.5.1 工作原理	184
9.5.2 采用集成运算放大器的串联型稳压电路	186
9.5.3 过流保护电路	187
9.6 集成稳压器	189
9.6.1 W723多端可调式集成稳压器	189
9.6.2 三端集成稳压器	191
9.7 开关型稳压电路	192
9.7.1 主回路	193
9.7.2 自激式开关稳压电路	194
9.7.3 它激式开关稳压电路	195
习题九	196
部分习题答案	199

第一章 半导体二极管和三极管

半导体器件是电子电路的核心组成部分。它具有体积小、重量轻、功耗小、寿命长等优点,故应用日趋广泛。本章首先简要介绍本征半导体和杂质半导体的导电机理,分析形成PN结的物理原因及其单向导电特性。在介绍二极管和稳压管的基础上,进一步讨论三极管的电流分配关系、放大作用以及有关的伏安特性曲线和主要参数。

1.1 半导体的基本知识

1.1.1 半导体导电的特点及共价键结构

1.1.1.1 半导体导电的特点。所谓半导体即导电能力介于导体和绝缘体之间的一类物质,其电阻率通常约为 10^{-4} — $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 。半导体导电具有以下特点:

1. 半导体的导电能力随着温度上升大致按指数规律迅速上升。我们知道,金属的电阻率具有正的温度系数,而半导体的电阻率却具有负的温度系数,而且热敏特性更为显著。

2. 半导体材料受到光线照射时,其导电能力也会明显增强。例如半导体材料硫化镉受光线照射时其导电能力将比无光线照射时增强几十至几百倍。

3. 微量杂质可使半导体导电能力大为增强。在纯净的半导体材料中掺入微量其它元素,这就是“掺杂”。而所谓微量,即所掺杂质浓度极微,不会影响半导体材料自身的晶格结构。例如在硅中掺入亿分之一的杂质硼或磷元素,在绝对温度 300K 时其导电率可从原来的 $4.91 \times 10^{-4} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ 增加到 $0.102 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$,可见竟增加了二万多倍。

世上所有物质都表现出千差万别的特性,其根本原因在于物质的内部结构不同。同理,半导体对外所呈现的导电特点也完全取决于它内在的原子结构和导电机理。

1.1.1.2 半导体的共价键结构。目前最常用的半导体材料硅和锗都是4价元素。它们的原子结构如图1—1(a)所示。

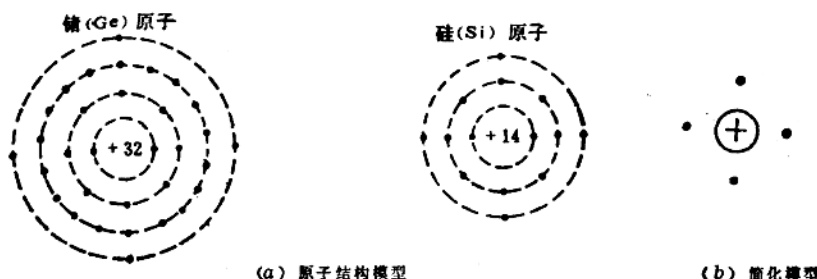


图1—1 锗和硅的原子结构

因为外层电子对元素的化学、物理性质是至关重要的，故价电子是我们首要的研究对象。为简便起见，在原子结构简化模型中仅用惯性核（把原子核和内层电子看作为一个整体）和外层电子来表示。如图 1—1(b)所示。

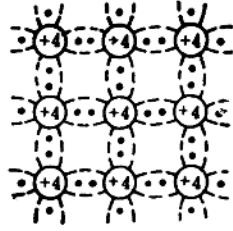


图 1—2 锗和硅单晶的共价键结构

锗和硅制成单晶后，原子有规则地重复排列着。图 1—2 为其晶格结构平面示意图。由图可见，每个原子最外层的 4 个电子不仅受自身原子核的束缚，而且与周围相邻的 4 个原子发生联系，为相邻 4 个原子所共有。这种原子间的价电子共有化结构称为共价键。共价键表明原子与相邻原子通过共有电子对的形式产生结合力。锗和硅都是 4 价元素，每个原子的 4 个价电子和 4 个邻近原子组成 4 个共价键。从而达到外层电子数为 8 个的稳定结构。

应当指出，共价键具有很强的结合力，如果没有足够的能量，共价键中的电子是不会跳出共价键的，故它们仍是束缚电子，不能自由运动。

1.1.2 本征半导体

不含杂质的完全纯净的半导体称为“本征半导体”。

1.1.2.1 本征激发和复合。在绝对零度 (-273°C) 时，价电子无法摆脱共价键的束缚，半导体中没有导电粒子，因此低温下的半导体相当于绝缘体。随着温度的升高，价电子在热能的激发下获得足够的能量以致可以挣脱共价键的束缚，脱离共价键而成为带负电荷的自由电子（以下简称为“电子”）。同时在原来共价键的位置里就留下一个空位，称为“空穴”。空穴由于失去一个负电荷而带正电荷。这种现象可称为“本征激发”。本征激发的结果必然使电子和空穴成对出现。

那么，本征激发是否会导致电子空穴对数目无限地增多呢？实践表明：对于确定材料，温度一定时，本征半导体内电子空穴对数目保持不变。这是因为伴随着本征激发的同时，半导体内还存在着另一个与之相反的逆过程，即“复合”。所谓复合就是在热运动的过程中，部分自由电子可能和空穴相遇，重新跳入共价键中的空位，于是电子空穴对一起消失。

在本征半导体中，本征激发和复合始终同时存在着。前者不断地产生出电子空穴对，而后者又不断地促使电子空穴对消失。因而在一定的外界条件下，两者将达到动态平衡，使半导体中电子空穴对维持一定的浓度。

1.1.2.2 电子导电和空穴导电。自由电子带负电荷，可以在共价键外运动，这就是电子运动。

而空穴的实质即共价键中留下的空位，其它共价键中的束缚电子有可能填补该共价键中的空位，结果使原空位消失而原来束缚电子处出现新的空位，这就是空穴运动。其实质仍是共价键中束缚电子填补共价键中的空位，相当于空穴作反方向的运动。

电子和空穴都带有电荷，且又都能运动。带电粒子的定向运动即构成电流。故我们称电子和空穴为“载流子”，意即运载电荷的粒子。它们都是半导体内的两种导电机构，而空穴则是半导体内特有的导电机构。

1.1.3 杂质半导体

1.1.3.1 N型半导体。如果在本征硅或锗中掺入少量的磷或锑等五价元素，就得到N型半导体，如图1—3所示。由于五价的杂质原子与周围4个相邻原子组成共价键后，还多余一个电子未被结合进入共价键，这个电子受杂质原子核的吸引力很微弱，即使在室温下也几乎都能挣脱原子核的束缚成为自由电子。这样，每一个五价的杂质原子就能产生出一个自由电子，所以该五价杂质也称为“施主杂质”。

五价杂质原子失去一个电子后，便成为带正电荷的正离子。正离子虽然也带正电荷，但是与空穴不同，由于质量大而不能自由移动，因此它不属于载流子，也不能参与导电。施主杂质的掺入，打破了本征半导体中电子和空穴两种载流子浓度相等的平衡情况，使得N型半导体中电子浓度大大超过空穴浓度。故在N型半导体中，电子为多数载流子，简称“多子”；空穴为少数载流子，简称“少子”。杂质半导体中多子数目主要取决于所加杂质的浓度，少子数目主要取决于温度。

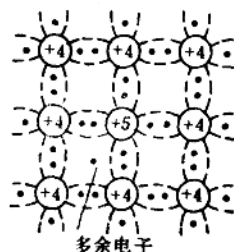


图1—3 N型半导体

1.1.3.2 P型半导体。如果在本征硅或锗中掺入少量的硼或镉等三价元素，就得到P型半导体，如图1—4所示。由于三价的杂质原子与周围4个相邻原子组成共价键时，还缺少一个电子，因此每掺入一个三价原子便产生一个能接受电子的空位，即空穴。故把这类杂质称为受主杂质。

三价杂质原子接受一个电子后便成为带负电荷的负离子。同理，在P型半导体中，空穴为多数载流子，其数目主要取决于所加杂质的浓度；电子为少数载流子，其数目主要取决于温度。

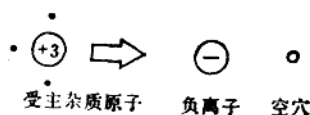
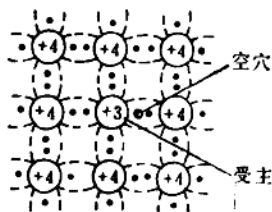


图1—4 P型半导体

1.2 PN结

1.2.1 PN结形成的物理过程

P型和N型半导体结合在一起时，由于P区和N区存在着电子和空穴的浓度差，P区的空穴向N区扩散并与N区的电子复合，在靠交界面的P区侧就剩下了负离子。同理，N区的电子向P区扩散并与P区的空穴复合，在靠交界面的N区侧也会剩下正离子。这样在P区和

N区交界面的两侧便分别形成了由负、正杂质离子所组成的空间电荷区，从而形成了半导体的内部电场，如图1—5所示。该内电场 $E_{内}$ 的方向由N区（正离子）指向P区（负离子）。因而，它将阻止P区和N区两边多子的扩散运动，却加强了两边少子的漂移运动。

扩散和漂移是半导体内载流子的两种不同运动形式。前者由浓度差引起，后者由电场作用引起。由于带电粒子的定向运动即能形成电流，故半导体内的电流应视为电子和空穴的扩散与漂移电流之总和。

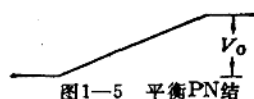
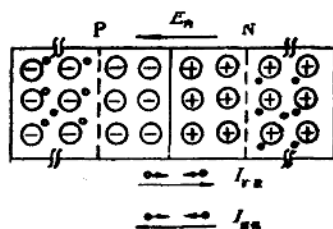
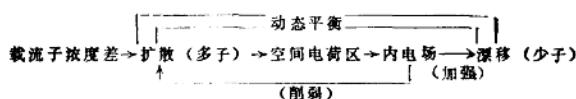


图1—5 平衡PN结

开始时，多子的扩散运动大于少子的漂移运动。随着扩散的进行，空间电荷数量不断增强，内电场越来越强并反过来促使扩散运动减弱，漂移运动加强，直到二者相抵（即大小相等，方向相反）达到动态平衡为止。这就是平衡PN结的情况。可见，在平衡PN结里，“平衡”是指动态平衡，并不是载流子静止不动的意思。

综上所述，我们把PN结形成的物理过程简单表示如下：



所谓PN结，实质上是一些逸去了电子和空穴的正负杂质离子所组成的空间电荷层。由于该区域已不存在能参与导电的电子和空穴，所以相对于两旁的P区和N区而言它属高阻区，有时也称之为耗尽区，意即载流子扩散到对方因复合消耗已尽的意思。由于空间电荷区的内电场对两边多子的扩散起着象“堡垒”似的阻挡作用，多子的扩散必须克服该电场所造成的势能，因此PN结又可分为势垒区或阻挡层。

在平衡状态下，PN结的宽度通常约为零点几微米。由空间电荷区所决定的内电势通常又称为“接触电位差 V_0 ”。其数值取决于所用半导体材料的性质、掺杂浓度、环境温度等因素。通常，

硅材料： $V_0 = 0.6 - 0.7V$

锗材料： $V_0 = 0.2 - 0.3V$

这些数据对于理解二极管和三极管的伏安特性曲线是十分有用的。

1.2.2 PN结的单向导电性

在PN结中，扩散与漂移所谓的平衡状态是相对的，如果在PN结两端外加电压就会打破原来的平衡状态。

1.2.2.1 正向电压。P区接“正”电位，N区接“负”电位，称之为PN结加正向电压。如图1—6所示，由于空间电荷区相对于两侧的P区和N区来说，属于高阻区，因此，可以认为外加正向电压 V_F 全部降落在PN结两端。此时，外电场和内电场方向

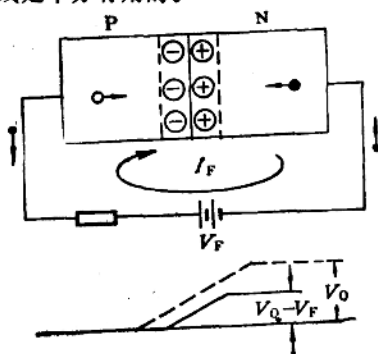


图1—6 正向电压

相反,并抵消了部分内电场,结果使PN结内合成的总电场强度减弱了,势垒高度降低为 $V_0 - V_F$,空间电荷量和空间电荷区的宽度也随之降低。于是PN结原来的平衡状态被打破,P区和N区两边的多子被推向耗尽区,扩散将大大超过漂移,形成了以扩散电流为主体的PN结正向电流 I_F 。由于扩散电流由多子定向运动所形成,而多子数量又很多,所以正向电流很大。这时PN结对外表现为低阻,即正向导通状态。并且外加正向电压稍有增大时,即PN结势垒高度稍有降低,就会使具有克服势垒能量的多子数目大为增加,因此随着正向电压的增加正向电流将按指数规律迅速增长。

1.2.2.2 反向电压。P区接“负”电位,N区接“正”电位,称之为PN结加反向电压,如图1-7所示。此时外电场与内电场方向相同,结果使PN结内合成的总电场强度增强了,势垒高度增大为 $V_0 + V_R$,空间电荷量和空间电荷区的宽度也随之增大。于是PN结原来的平衡状态也被打破,漂移将大大超过扩散,形成了以漂移电流为主体的PN结反向电流 I_R 。由于漂移是P区和N区的少数载流子在电场作用下定向运动所形成,而少子的数目又非常少,所以反向电流也非常小。这时PN结对外呈现高阻,即反向截止状态。

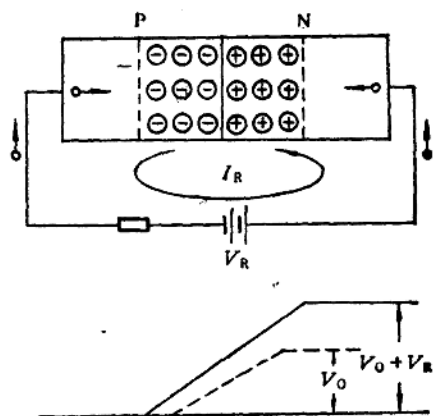


图1-7 反向电压

反向电流究其实质仍是少子的漂移电流。然而在一定温度下少子的浓度很小且大致不变,故事实上稍加一定数值反向电压后,所有少子即可全部出来参加漂移运动,这时即使再增大反向电压,漂移电流也不会有明显增加,即反向电流与反向电压大小几乎无关。因而又称PN结的反向电流为反向饱和电流 I_s 。反向饱和电流数值很小,通常小功率锗管约为微安数量级,硅管约为纳安数量级。

1.3 半导体二极管

二极管实质上就是由一个PN结再加上电极引线 and 外壳封装而成。

二极管有许多种类,按所用半导体材料分,常用的有硅管和锗管两种;按结构工艺分,有点接触型(PN结面积小),可用于高频小功率;面接触型(PN结面积大),可用于低频大功率。按用途分,有检波管、整流管、稳压管、开关管、光敏管、变容二极管等。

1.3.1 二极管的伏安特性

PN结的内部矛盾运动规律,反映到外部电路就是电压和电流的关系。所谓二极管的伏安特性就是加到二极管两端的电压 V 和通过二极管电流 I 之间的关系。

1.3.1.1 二极管方程及伏安特性曲线。由于二极管的内部结构都是由一个PN结所构成,因而它们的伏安特性必然具有某种共同的规律性。根据理论分析,二极管电流与电压

的关系（不包括反向击穿区）通常可由下式表示：

$$I = I_s (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) = I_s (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \quad 1-1$$

式中 V_k ——玻尔兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ；

q ——电子电荷量， $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ；

I_s ——反向饱和电流。

绝对温度 $T = 300 \text{K}$ 时，温度的电压当量

$$V_T = \frac{KT}{q} \approx 26 \text{mV}$$

故外加正向电压且 $V \gg V_T$ 时： $I \approx I_s \cdot e^{\frac{V}{V_T}}$ ；

外加反向电压且 $|V| \gg V_T$ 时： $I \approx -I_s$ 。

二极管的电路符号和伏安特性曲线如图

1—8 所示。现分析如下：

1. 正向特性。原点 O ； $V = 0$ 时 $I = 0$ 。相当于 PN 结被短接情况。由于 PN 结内部扩散和漂移达动态平衡，所以外电路宏观电流等于零。

OA 段（死区）：外加正向电压很小时（硅管约为 0.5V ，锗管约为 0.1V ），外电场还不足以克服 PN 结内电场所形成的势垒，故正向电流很小，几乎接近于零；这时二极管还没能充分导通。

AC 段（正向导通区）：外加正向电压超过死区后，外电场已足以克服内电场对多子扩散运动的阻力，从而形成以多子扩散电流为主体的正向电流，并随着正向电压稍有增大而按指数规律迅速上升。

2. 反向特性。OB 段（反向截止区）：外加反向电压时由少数子漂移运动产生的反向饱和电流 I_s 很小。常温下小功率硅管 I_s 约小于 $0.1 \mu\text{A}$ ，小功率锗管 I_s 通常在几十到几百微安之间。

BD 段（反向击穿区）：当反向电压超过一定值时（击穿电压），反向电流将急剧增大。这种现象称为“击穿”。这时，非但 PN 结单向导电性被破坏，甚至可造成管子损坏。故普通二极管通常不允许工作在该区域。

1.3.1.2 直流电阻和微变电阻：

1. 直流电阻 R_D 。指二极管两端所加的直流电压与流过它的直流电流之比。如在图 1—9 中， $R_D = V_D / I_D$ 。平时用万用表欧姆档测得的二极管正反向电阻即为直流电阻。由于伏安特性的非线性，所以直流电阻 R_D 与管子的工作点 Q 有关。二极管的正向直流电阻 R_D 随电流的增大而减小，而反向直流电阻则随反向电压值的增大而增大。对小功率二极管而言， $R_{D正}$ 约为几十欧到几千欧； $R_{D反}$ 约为几十千欧到几百千欧。两者相差应在 1000 倍以上，否则表示管子单向导电性不好。

2. 微变电阻 r_D 。指二极管在工作点 Q 附近电压的变化量与相应的电流变化量之比值。它的几何意义是伏安特性曲线在 Q 点的切线斜率的倒数，如图 1—9 所示。在交流小信号情

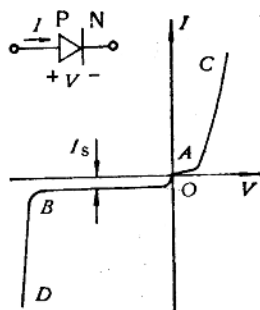


图1—8 二极管的电路符号
及伏安特性曲线

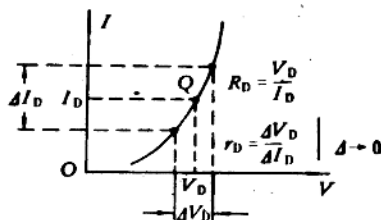


图1—9 R_D 和 r_D 的图解

况下工作时, 需要用到微变电阻 r_D 的概念, 也称为交流电阻或动态电阻。

r_D 的数值也可以从二极管方程式 1-1 中求得。

$$\therefore I = I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \approx I_s e^{\frac{V}{V_T}}$$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{d}{dV} [I_s (e^{\frac{V}{V_T}} - 1)] = \frac{I_s}{V_T} e^{\frac{V}{V_T}} \approx \frac{I}{V_T}$$

$$\therefore r_D = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \Big|_{A \rightarrow 0} = \frac{dV}{dI} \Big|_0 = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26\text{mV}}{I_D}$$

1-2

可见, 二极管的微变电阻 r_D 与工作点有关, 它随着工作电流增大而减小。通常正向微变电阻约为几欧到几十欧。例如某二极管工作点为: $V_D = 0.66\text{V}$, $I_D = 2\text{mA}$, 则

$$\text{直流电阻 } R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.66}{2 \times 10^{-3}} = 330(\Omega)$$

$$\text{微变电阻 } r_D \approx \frac{26}{I_D} = \frac{26}{2} = 13(\Omega)$$

可见, 在同一工作点上二极管的微变电阻比直流电阻小得多。

1.3.1.3 温度对二极管伏安特性的影响;

1. 温度对正向特性的影响。理论分析和实践表明, 当温度上升时, PN结的接触电位差 V_0 将减小, 即仅需较小的正向电压就能维持等量的正向电流, 体现为正向特性曲线随着温度上升往左移, 如图 1-10 所示。通常温度每上升 1°C , 二极管的正向压降约减小 $2-2.5\text{mV}$ 。

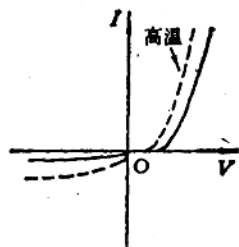


图 1-10 温度对二极管特性的影响
(虚线: 表示高温情况)

2. 温度对反向特性的影响。反向饱和电流数值虽小, 但它随温度的变化却很显著。当温度升高时, 本征激发所产生的少数载流子浓度迅速增加, 因而由少子漂移运动所形成的反向饱和电流也将随温度上升大致按指数规律迅速增大。通常只要温度升高 10°C 左右, 反向饱和电流就会增加 1 倍。体现在反向特性曲线随温度上升向下移, 如图 1-10 所示。

1.3.2 二极管的电容效应

我们知道, 电容器能储存电荷。若电容器储存电荷的变化量为 ΔQ , 其端电压变化为 ΔV , 则电容量为:

$$C(\text{法拉}) = \frac{\Delta Q(\text{库伦})}{\Delta V(\text{伏特})}$$

当二极管两端外加电压改变时, 伴随着二极管电流的改变, 管内势垒区和 PN 结两侧中性扩散区内部将发生电荷量的变化。即这两个区域都具有改变存储电荷的能力, 因而具有电容效应。相应地二极管的极间电容应包括势垒电容和扩散电容两部分。并且它们都是动态电容。

势垒电容 C_B 描述了势垒区中空间电荷随外加电压变化而变化所产生的电容效应。这里, 我们可以把它比作一个平板电容器。因势垒区内无载流子故属高阻区, 相当于电容器中的介质; 两侧的 P 和 N 中性区内有很多载流子故属低阻区, 相当于电容器的两块金属极板; 势垒区中由正、负杂质离子组成的空间电荷相当于电容器中存储的电荷。若加大正向

电压, 则P和N两边中性区将有更多的载流子被引向势垒区与离子中和, 使空间电荷数量减少。反之, 若加大反向电压, 则P和N两边将有更多的载流子背离势垒区使杂质电离, 结果使空间电荷数量增加, 如图1—6和图1—7所示, 从而产生电容效应,

扩散电容 C_D 描述了多数载流子在扩散过程中的积累, 即电荷的积累随外加电压变化而变化所产生的电容效应。外加正向电压时, 多数载流子扩散运动进入对方区域后成为对方区域中的少数载流子并聚积在结的边界两侧, 形成了少子的浓度差。在结的边缘处浓度大, 离结远处浓度小。也就是说在P区有电子的积累, 在N区有空穴的积累。当PN结正向电压加大时, 正向电流随着加大, 这需要有更多的载流子积累以满足电流增大的需要; 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少。这样就相应要有载流子的充入和放出。从而产生电容效应。

由以上分析可知, 高频运用时必须考虑PN结的电容效应。这样, 我们可以得到图1—11所示的二极管高频等效电路。结电容 $C = C_B + C_D$ 。

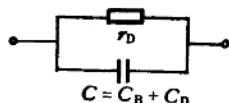


图1—11 二极管高频等效电路

正向电压时 $C_D \gg C_B$, 故 $C \approx C_D$ 以扩散电容为主, 通常约几十至几百皮法。

反向电压时 $C_B \gg C_D$, 故 $C \approx C_B$ 以势垒电容为主, 通常约几至几十皮法。

1.3.3 二极管的主要参数

1.3.3.1 额定正向平均电流 I_F 。指管子长期运行时允许通过的最大正向平均电流。它主要由PN结的面积和散热条件决定, 使用时不能超过此值, 否则可能导致PN结过热损坏。

1.3.3.2 最高反向电压 V_{RM} 。当二极管进入反向击穿区时, 反向电流剧增, 使管子温度很快升高到超过允许结温而损坏。为了确保管子安全工作, 手册中一般给出的最高反向电压 V_{RM} 约为击穿电压的一半。

1.3.3.3 反向电流 I_R 。指管子在反向截止区的饱和电流值。它随温度上升大致按指数规律增长。其值愈小, 表示二极管单向导电性愈好。

1.4 稳压管

1.4.1 伏安特性曲线

稳压管由一个PN结构成。因而其特性曲线和普通二极管相似, 如图1—12所示。区别在于普通二极管通常不允许工作在反向击穿区, 否则可能导致管子击穿损坏, 而稳压管恰恰就是利用这段反向击穿区内电流变化时管子两端电压几乎不变这一特点进行工作的。当然, 由于在元件制造时, 采用了特殊的工艺, 稳压管能够在反向击穿区相当大的范围内正常工作而不致损坏, 并且稳压管的反向击穿特性比普通二极管更“陡”, 因而稳压效果更佳。

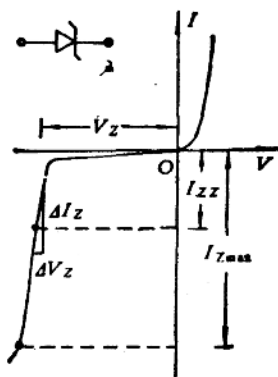


图1—12 稳压管的电路符号和特性曲线

1.4.2 主要参数

表1—1示出了某些常用稳压管的主要参数。

1. 稳定电压 V_Z ：即稳压管的反向击穿电压值。同一型号的稳压管，击穿电压可有少许差别；也即具有一定的离散性。

2. 动态电阻 r_Z ：指稳压管在反向击穿区的动态微变电阻值。如图1—12所示， $r_Z = \Delta V_Z / \Delta I_Z$ 。通常，稳压管内电流越大则 r_Z 越小，即稳压效果更趋理想。

3. 最大耗散功率 $P_{Z\max}$ 和最大稳定电流 $I_{Z\max}$ ： $P_{Z\max}$ 为稳压管允许的最大功耗值，若超过此值，PN结将进入热击穿而导致损坏。相应地还可以得到稳压管的最大稳定电流 $I_{Z\max} = P_{Z\max} / V_Z$ 。

4. 稳定电流 I_{ZZ} ：指稳压管正常工作时的参考电流值。若小于此值，则管子动态电阻 r_Z 变大，稳压性能变差；若大于此值，只要不超过 $I_{Z\max}$ ，稳压管都可以正常工作。

5. 稳定电压的温度系数 α ：指温度 t 变化 1°C 时，稳定电压的相对变化量。即： $\alpha = \Delta V_Z / V_Z / \Delta t$ 。通常稳定电压小于4V的稳压管具有负温度系数，稳定电压大于7V的稳压管具有正温度系数。因而稳定电压为5—6V左右的稳压管温度系数为最小。图1—13示出了具有温度补偿的2DW7系列标准稳压管的内部结构。它由两个特性相同的稳压管反向串接而成。1、2端使用时，不论电压极性如何，总有一个管子可处于反向击穿状态，其反向击穿电压具有正温度系数；另一个管子则处于正向导通状态，PN结的正向压降具有负温度系数。二者相抵的结果，使1、2两端稳定电压的温度系数大为减小，此外，利用管脚3，每个管子也可单独使用。

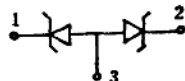


图1—13 具有温度补偿的标准稳压管

表1—1 几种型号稳压的性能参数

型 号	$V_Z(\text{V})$	$I_{ZZ}(\text{mA})$	$r_Z(\Omega)$	$I_{Z\max}(\text{mA})$	$P_{Z\max}(\text{W})$	$\alpha(90^\circ/\text{C})$
2CW12	4—5.5	10	≤ 50	45	0.25	-0.06—0.04
2CW14	6.2—7.5	10	≤ 15	33	0.25	≤ 0.06
2CW16	8.5—9.5	5	≤ 20	26	0.25	≤ 0.08
2CW19	11.5—12.5	5	≤ 40	18	0.25	≤ 0.095
2DW7A	5.8—6.6	10	≤ 25	30	0.2	≤ 0.005
2DW7B	5.8—6.6	10	≤ 15	30	0.2	≤ 0.005

1.5 半导体三极管

1.5.1 三极管结构简介

三极管的种类很多。按频率分，有高频管、低频管；按功率分，有大功率管、小功率管；按半导体材料分，有硅管、锗管等等。但不论哪种类型，它们的结构大致相同，都是由三层杂质半导体向外引出三个电极，其中包含有两个PN结所组成。按结构来分，晶体

三极管又有NPN型和PNP型两种，如图1—14所示。

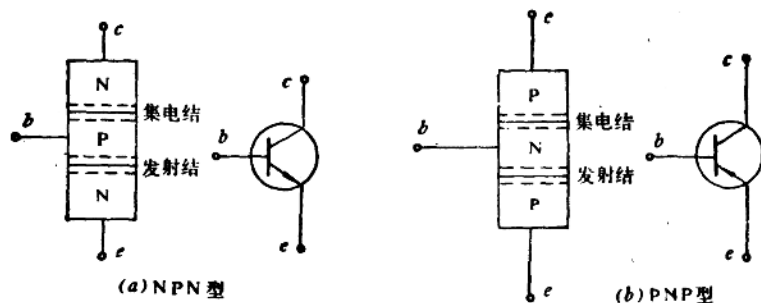


图1—14 晶体三极管结构及符号

三个电极分别叫做发射极 e 、基极 b 、集电极 c 。对应的三个半导体区分别为发射区，基区和集电区。在发射区和基区之间的PN结可称为发射结，在集电区和基区之间的PN区可称为集电结。虽然发射区和集电区都是相同类型的杂质半导体，但其掺杂浓度及结面积大小都有很大的差异，因此通常情况下发射极和集电极不能对调使用。

晶体三极管具有放大作用。通过各种不同的接法，可构成各种组态的放大电路。我们知道，在放大电路中，与管子三个电极相连接的输入信号和输出信号必然会有一个公共端。按其公共端所属的那个电极来区分，可分为共射、共集及共基三个组态，如图1—15所示。不同组态具有不同的电路特性，但管子的工作原理都是相同的。下面我们以NPN管共射组态为例来讨论，并分析晶体三极管的放大作用。

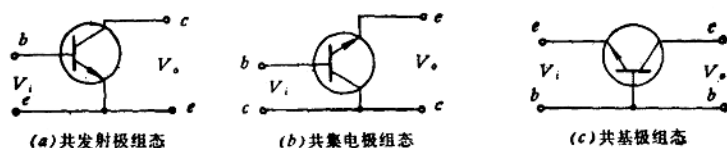


图1—15 晶体管的三种组态

1.5.2 三极管放大作用原理

1.5.2.1 三极管放大作用的条件。要使三极管具有放大作用必须管、路相结合，即必须同时具备管内条件和电路条件，才能进行正常放大工作。

1. 管内条件：

(1) 与发射区和集电区相比，基区宽度必须非常薄，通常约零点几到几十微米左右，而且所掺杂质浓度低。我们知道半导体中多子的浓度主要取决于杂质的浓度。普通晶体管发射区中多子的浓度可以比基区中多子的浓度大几十到几百倍。

(2) 发射区和集电区都是相同类型的杂质半导体。然而集电区比发射区面积大得多。通常小功率合金管集电区比发射区约大2—3倍左右，大功率管约大1—2倍左右。

2. 电路条件。外加电压通过 e 、 b 、 c 三个电极加到管子的两个PN结上，必须同时满足发射结为正向电压，集电结为反向电压的条件。

对于管内条件，我们认为元件制造厂已给予充分满足。为此，作为电路工作者的任务