

高等学校试用教材

电 工 学

下 册

湖 南 大 学 编
合 肥 工 业 大 学

人 民 教 育 出 版 社

内 容 提 要

本书是为高等工科院校土木、水工类有关专业的电工学课程而编写的试用教材。

下册为第三篇“电子技术”。考虑到非电类专业的特点,本篇只介绍晶体管电路的基础知识,以讲清电路的工作原理和元件的作用为主,只简单地阐述了电路中的电量关系。

第三篇共分五章,包括:晶体管放大器、晶体管正弦波振荡器、脉冲与数字电路、整流器和直流稳压电源、非电量电测及电子控制简介。每章都附有一定份量的思考题与习题,供读者演习之用。

高等学校试用教材

电 工 学

下 册

湖南大学 合肥工业大学编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 8.375 字数 202,000

1978年12月第1版 1979年6月第1次印刷

印数 00,001—65,000

书号 15012·0106 定价 0.70 元

目 录

第八章 晶体管放大器	1
第一节 PN 结和晶体二极管	1
一、PN 结的形成及其特性	1
二、晶体二极管和稳压管	5
1. 晶体二极管的结构及表示符号	5
2. 晶体二极管的特性及参数	6
3. 稳压管	8
第二节 晶体三极管	10
一、晶体三极管的结构	10
二、晶体三极管的放大作用	11
三、晶体三极管的特性曲线	16
1. 输入特性	16
2. 输出特性	18
3. 晶体三极管的主要参数	19
第三节 低频电压放大电路	23
一、单管共发射极放大电路	23
二、用图解法分析放大电路	25
1. 静态工作情况分析	25
2. 动态工作情况分析	27
3. 交流负载线	30
三、放大器的非线性失真	33
四、静态工作点的设置与稳定	34
1. 电压负反馈偏置电路	35
2. 电流负反馈偏置电路	37
*五、等效电路分析法	38
1. 等效电路的引出	39
2. 等效电路的绘制与条件	39
3. 应用等效电路分析共发射极放大电路	41
第四节 多级放大电路	43

第五节 射极输出器电路	49
一、静态工作点的选定	50
二、射极输出器的主要特点	51
第六节 负反馈放大器	53
一、反馈的概念	53
二、负反馈对放大器性能的改善	55
1. 负反馈使电压放大倍数减小	55
2. 负反馈提高了放大倍数稳定性	56
3. 加负反馈后, 减小了放大器的非线性失真	56
4. 加入负反馈后加宽了频带	58
三、反馈的方式	59
四、反馈的判别	60
第七节 功率放大器	64
一、单管功率放大器	65
1. 直流负载线与静态工作点	66
2. 交流负载线与输出功率	67
二、推挽功率放大器	70
三、无输出变压器的推挽功率放大电路	72
第八节 直流放大器	73
一、问题的提出	73
二、级间耦合方式——直接耦合	74
三、差动式放大器	76
1. 对称式差动放大电路	76
2. 典型对称差动放大电路	78
四、对称式电路的改进措施	79
*五、BG305 线性集成电路简介	81
第九节 应用举例	85
本章小结	88
思考题与习题	91
第九章 晶体管正弦波振荡器	95
第一节 概述	95
一、LC 振荡回路的振荡现象	95
二、自激振荡条件	97

1. 相位平衡条件·····	99
2. 幅度平衡条件·····	99
第二节 晶体管 LC 振荡器·····	100
一、变压器反馈振荡电路·····	101
1. 电路结构及工作原理·····	101
2. 几点讨论·····	102
3. LC 变压器反馈振荡器实用线路·····	103
二、电感反馈式振荡器·····	104
三、电容反馈式振荡器·····	105
第三节 RC 振荡器·····	107
一、负反馈放大器·····	108
二、选频网络·····	108
三、振荡频率·····	110
习题·····	111
第十章 脉冲与数字电路·····	113
第一节 脉冲波形的特征与晶体管的开关特性·····	113
一、脉冲波形的特征·····	114
二、晶体三极管的开关特性·····	115
第二节 基本脉冲变换电路·····	117
一、 RC 串联电路的充放电过程·····	117
1. 充电过程·····	117
2. 放电过程·····	119
二、微分电路·····	120
三、积分电路·····	122
四、限幅电路·····	124
五、箝位电路·····	126
第三节 门电路·····	128
一、“与”逻辑和二极管“与”门电路·····	129
1. “与”逻辑关系·····	129
2. 二极管“与”门电路·····	129
二、“或”逻辑和二极管“或”门电路·····	132
1. “或”逻辑关系·····	132
2. 二极管“或”门电路·····	132

三、“非”逻辑和三极管反相器(“非”门).....	135
1. “非”逻辑关系	135
2. “非”门电路(反相器).....	135
四、复合门电路.....	137
1. “与非”门电路	137
2. “或非”门电路	137
第四节 集成电路简介	138
一、晶体管-晶体管逻辑门电路(TTL).....	139
1. 各元件的作用	139
2. 工作原理	140
二、高抗干扰晶体管逻辑电路(HTL).....	141
三、金属-氧化物-半导体场效应管集成电路(MOS)	142
(一) P-MOS集成电路.....	144
1. P-MOS“非”门电路.....	145
2. P-MOS“与非”门电路.....	146
3. P-MOS“或非”门电路.....	146
(二) CMOS 集成电路	147
1. CMOS“非”门电路.....	148
2. CMOS“与非”门电路.....	150
3. CMOS“或非”门电路.....	150
第五节 双稳态触发器	151
一、概述.....	151
二、双稳态触发器的工作原理.....	151
1. 电路具有两个稳定状态.....	152
2. 电路状态的翻转.....	154
3. 加速电容的作用.....	154
三、双稳态触发器的触发方式.....	155
1. 独立触发.....	156
2. 计数触发.....	157
*四、集成电路的双稳态触发器.....	159
五、施密特触发器.....	160
1. 施密特电路的工作原理.....	160
2. 关于滞后现象的原因.....	162
*3. 集成块组成的施密特电路.....	162

第六节 单稳态触发器	163
一、集-基耦合单稳态电路	163
1. 无触发脉冲时电路的状态	164
2. 当外加触发脉冲时电路翻转形成一个暂稳态过程	164
3. 电路的恢复过程	165
二、单稳触发器的应用	166
*三、集成电路单稳态触发器	167
1. 微分型单稳态触发器	168
2. 积分型单稳态触发器	169
第七节 多谐振荡器	170
一、多谐振荡器电路的基本结构	170
二、集-基耦合多谐振荡器的工作原理	171
*三、集成块组成的多谐振荡器	172
第八节 计数与显示-脉冲数字电路的应用举例	173
一、二进制计数器	173
二、十进制计数器	176
三、计数器的译码和数字显示	179
1. 辉光数码管及其译码驱动电路	180
2. 液晶显示器及其译码驱动电路	182
习题	185
第十一章 整流器和直流稳压器	188
第一节 单相整流电路	189
一、单相半波整流电路	189
1. 电路的工作原理及波形分析	189
2. 电路的电量关系	191
二、单相桥式整流电路	192
1. 工作原理与波形分析	192
2. 电路的电量关系	193
第二节 三相整流电路	195
一、三相半波整流电路	195
1. 电路图	195
2. 工作原理及波形分析	195
3. 电路的电量关系	197

二、三相桥式整流电路	197
1. 电路图	197
2. 工作原理与波形分析	198
3. 电路的电量关系	199
第三节 滤波电路	200
一、电容滤波器	201
二、电感滤波器	202
三、 π 型滤波器	203
第四节 可控硅及其整流电路	204
一、可控硅的构造及其工作原理	204
二、可控硅的伏安特性、参数及使用注意事项	210
1. 阳极伏安特性	210
2. 可控硅的主要参数	211
3. 使用注意事项	213
三、单相桥式可控硅整流电路	213
1. 工作原理与波形分析	213
2. 电路的电量关系	215
四、可控硅的触发控制电路	215
五、可控硅的保护电路	218
1. 过电流保护装置	218
2. 过电压保护装置	219
第五节 直流稳压电路	220
一、简单的并联式稳压电路	221
二、串联式晶体三极管稳压电路	222
1. 单管串联式稳压电路	223
2. 带有直流放大器的串联式稳压电路	224
3. 采用复合调整管的稳压电路	226
4. 典型串联式晶体管稳压电路	226
*5. 集成化的串联式稳压电路	228
习题	230
第十二章 非电量电测及电子控制装置	232
第一节 传感器	232
一、可变电阻传感器(应变片)	233
二、电感传感器	236

三、电容传感器	239
四、光电传感器	241
第二节 动态电阻应变仪	242
一、电桥	243
二、放大器	244
三、振荡器	246
四、相敏整流器	246
五、稳压电源	250
第三节 电感比较仪	250
一、稳压电源	250
二、振荡器	250
三、电感传感器	251
四、放大器	251
五、相敏整流电路	253
第四节 电子控制装置	254
一、电子继电器电路	254
二、光电控制装置	255
1. 光电继电器	255
2. 光电计数装置	256
三、水位自动控制装置	257

第八章 晶体管放大器

晶体管放大是电子技术的重要组成部分，在生产中得到了极为广泛的应用。它包括交流电压放大、功率放大、直流放大等。

本章的重点是低频交流电压放大器。分析的基本方法是图解法和微变等效电路分析法。本章以图解分析法为主，对三极管的输入、输出特性，放大器的电压放大倍数，静态工作点的设置，输出波形的失真，进行了比较详细的分析与研究。对微变等效电路分析法只作简单的介绍，对放大器输入电阻、输出电阻的概念，只要求同学们能够一般地了解。在讨论了交流电压放大器的基本分析方法的基础上，进一步讨论了功率放大器和直流放大器。本章专用一节介绍了反馈电路，有关反馈电路的应用与判别是晶体管电路的重要内容之一，同学们必需很好地掌握。

本章从 PN 结讲起，因为它是半导体器件的基本结构。 PN 结的基本特性是单向导电性，要求同学对 PN 结的单向导电性必须深刻地理解。

第一节 PN 结和晶体二极管

晶体二极管、晶体三极管、结型场效应管、MOS 场效应管、可控硅元件、集成电路等，均为半导体器件。而构成半导体器件的共同基础则是 PN 结。

一、 PN 结的形成及其特性

我们知道，一般半导体材料(如硅、锗等)只有经过提纯、拉单

晶等工艺过程后才能得到具有晶格点阵的单晶体。硅单晶和锗单晶的外层价电子都是四个，这四个价电子又分别与相邻原子的价电子组成共价键结构，这些价电子都处于稳定状态，所以纯净的硅（或锗）晶体（又称为本征半导体）基本上没有自由电子，它在绝对温度零度（ -273°C ）时，就是一个绝缘体。从实用角度来说，这种本征半导体没有多大价值。若在其中掺入其它少量合适的元素（一般称为杂质），尽管这些杂质只有原半导体材料的千万分之一，它将使这种掺杂后的半导体（称为杂质半导体）导电性能大大增强。

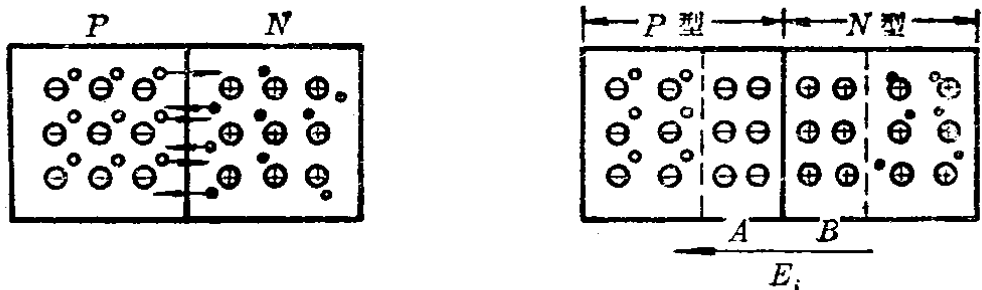
在单晶硅中加入微量的三价杂质（如硼），由于硼掺入硅中后，硼原子取代了硅晶格上某些原子的位置，硼外层只有三个价电子，与硅原子的价电子组成共价键时，则在硼的周围少了一个价电子，即可认为多出一个空穴。在外电场作用下，电子会来填补空穴，可看成空穴产生了定向运动因而形成电流。故把空穴看成能够载送正电荷的粒子，简称空穴载流子。在此类半导体中空穴成为主要载流子，故称此类半导体为 *P* 型半导体。

若在单晶硅中掺入微量的五价杂质（如磷），则在硅晶格上取代了某些硅原子，由于磷与硅组成共价键时磷原子周围出现了多余的价电子，它不受周围原子的束缚而成为自由电子。在外电场作用下，自由电子将作定向运动。这类半导体，自由电子是主要载流子，故被称为 *N* 型半导体。

必须指出，在常温下不论 *N* 型半导体或是 *P* 型半导体，都存在着两种载流子。但是 *P* 型半导体中空穴的数目远远大于电子的数目，故在 *P* 型半导体中把空穴称为多数载流子，电子称为少数载流子；而在 *N* 型半导体中则相反，电子是多数载流子，空穴则是少数载流子。*P* 型半导体中电流主要是空穴移动形成的，而 *N* 型半导体中电流主要是由电子移动形成的。

当用一定的工艺方法把 *P* 型半导体和 *N* 型半导体紧密地结合

在一起的时候,就会在两者结合处形成一层带电的空间电荷区,称为PN结。



(a) 空穴和电子的相互扩散 (b) PN 结内电场 E_i 的形成

图 8-1 PN 结的形成

如图 8-1(a)所示,当P型半导体与N型半导体结合时,在结合处P型区内,空穴浓度大,势必通过结合面向N型区扩散,同样N区电子浓度大,也会通过结合面向P区扩散。空穴与电子扩散运动的方向是相反的,正如图 8-1(a)中箭头所示。随着扩散的进行,在结合面两侧空穴与电子也不断的进行复合,扩散与复合的结果在交界面的两侧形成了正负电荷的积累:原来中性的P型区因失去空穴而在交界面的左侧剩下了一层带有负的体电荷的空间薄层A;在原来中性的N型区内则因失去了电子而在交界面的右侧出现了带有正的体电荷的空间薄层B。这两种极性相反的体电荷之间就产生了一个内电场,用 E_i 表示。内电场强度 E_i 的方向是由正电荷区指向负电荷区,即从B指向A(图 8-1,b)。内电场的出现,将阻碍扩散运动的继续进行,故PN结又称为阻挡层。

显然PN结的内电场是由多数载流子的扩散与复合作用而产生的,当内电场形成后它又阻碍扩散的继续进行。但对P区和N区中的少数载流子而言,在内电场力的作用下,P区中的少数载流子——电子和N区中的少数载流子——空穴将加速通过交界面而形成漂移电流。扩散与漂移是同时进行的,当扩散运动与漂移运动达到动态平衡时,PN结将达到一定的厚度, E_i 则达到

一个稳定的数值。

当 PN 结两端加上不同极性的直流电压时，其导电性能将产生很大差异。

1. 当 PN 结两端加上正向电压时 PN 结处于导通状态

如图 8-2 所示，当 PN 结两端加上正向电压，即外加电源的正极接 P 型区、负极接 N 型区时，外加电场 E_0 与 PN 结的内电场 E_i 的方向相反，因而削弱了内电场，使空间电荷区

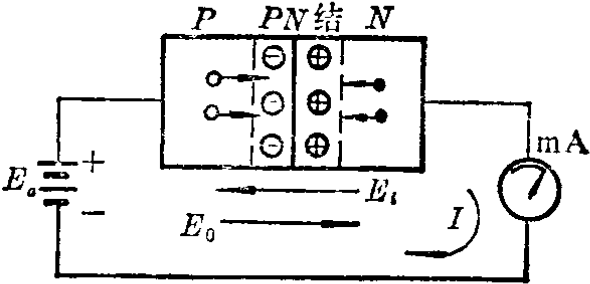


图 8-2 加正向电压时 PN 结导通

变窄，有利于扩散运动继续进行，而不利于是漂移运动。这样 P 区及 N 区内的多数载流子就能顺利地通过 PN 结，同时外部电源又不断地向半导体提供空穴与电子，形成较大的电流，此时 PN 结呈导通状态。所以 PN 结在正向导电时，其正向电阻是很小的。

2. 当 PN 结两端加上反向电压时 PN 结处于截止状态

如果给 PN 结加上一个反向电压，即外加电源的正极接 N 区，负极接 P 区，如图 8-3 所示。这时外电场与内电场方向一致，加强了内电场，使内电场力远远大于扩散力，阻止了扩散运动的进行，几乎没有多数载流子能通过 PN 结，故此时回路中几乎无电流流通，即 $I \approx 0$ ，称为 PN 结处于反向截止状态。 PN 结在截止时其反向电阻远远大于正向电阻。

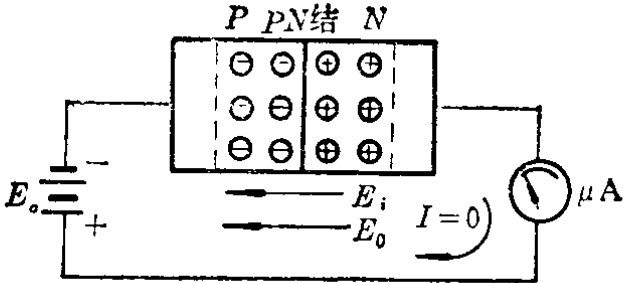


图 8-3 加反向电压 PN 结截止

必须指出： PN 结加反向电压时，使电场力加大，亦即使阻挡层加宽，但对少数载流子而言，更有利于漂移运动的进行。此时，少数载流子穿过 PN 结而形成的电流称为反向电流，其值远远小

于加正向电压时的电流数值。值得注意的是，少数载流子是由热运动产生的，当温度增高时，少数载流子的数目也增多。因此反向电流将受温度的影响而起激烈的变化，在使用半导体元件时，必须注意环境温度对元件特性的影响。

综上所述，本征半导体的导电率很低，掺杂后可使导电率大大提高，加入不同的杂质，可构成 P 型或 N 型半导体， P 型半导体中多数载流子为空穴， N 型半导体中多数载流子为电子。如把 P 型及 N 型半导体紧密地结合在一起，就会在其交界面处形成空间电荷区叫 PN 结。当 PN 结加正向电压时，则 PN 结导通。当 PN 结加反向电压时，则 PN 结截止。此一特性，称为 PN 结的单向导电性，它是 PN 结的最重要的电特性。

二、晶体二极管和稳压管

晶体二极管广泛地应用于整流电路、限幅电路、检波电路、保护电路、隔离电路、逻辑电路等电子电路中。常用的晶体二极管是用硅或锗等半导体材料制成的，目前我国已系列化生产的硅二极管有2CP、2CZ、2CK等系列，锗二极管有2AP、2AK等系列，另外还有应用于高压整流电路的硅堆和硒堆。

1. 晶体二极管的结构及表示符号

在一个 PN 结上，由 P 区和 N 区各引出一个电极，用金属、塑料或玻璃管壳封装后，即构成一个晶体二极管。它具有两个电极：由 P 型半导体上引出的电极叫正极或称为阳极，用字母 A 或符号“+”表示；由 N 型半导体上引出的电极称为负极或称为阴极，用字母 K 或符号“-”表示。

图8-4是2AP系列点接触式结构，它由一根金属触丝与半导体晶片形成点接触，由于接触面积小，不能承受较大的正向电流和较高的反向电压，适用于高频检波、脉冲电路和微小电流的整流电路中。

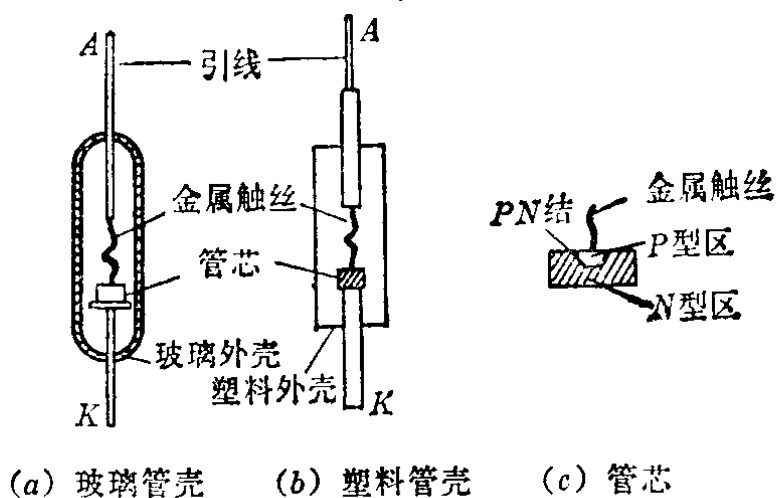


图 8-4 点接触晶体二极管结构

图 8-5 是面接触型晶体二极管的结构，它是由两种不同类型的半导体以较大面积接触而构成的 PN 结。由于接触面积大，所以能承受较大的正向电流和较高的反向电压，但因其结间电容较大(约 $15\sim 20$ 皮法)，因此不适用于高频线路中，只适用于低频大功率整流电路中，如 2CZ 系列就是面接触型晶体二极管。

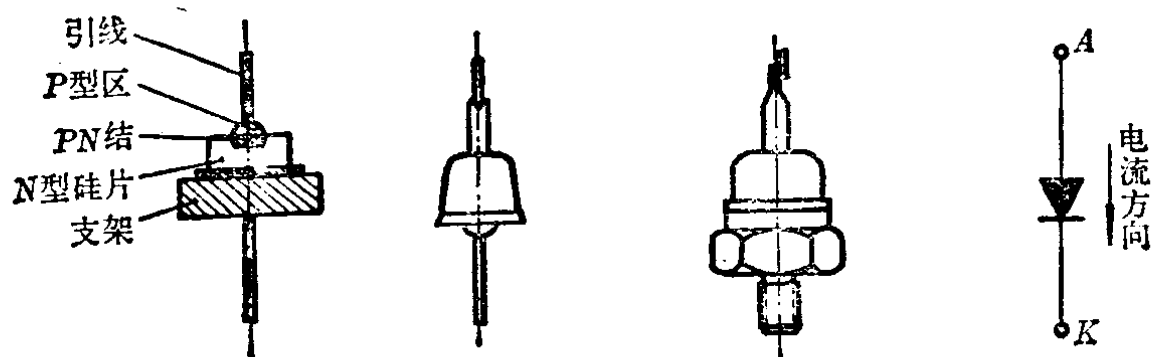


图 8-5 面接触型晶体二极管的结构

图 8-6 晶体二极管的符号

晶体二极管，统一的表示符号如图 8-6 所示，箭头表示电流流过二极管的方向，即由正极(A)流向负极(K)，在出厂时，一般厂家都在二极管的管壳上用色点或者符号注明二极管的正负极性，以免使用时接错。

2. 晶体二极管的特性和参数

为了进一步了解晶体二极管的性能，可以通过实验方法测出

在二极管两端的电压和通过它的电流的关系，根据这些数据绘出的曲线，叫做晶体二极管的伏安特性。在图 8-7、8-8 分别绘出了 2AP 15 锗二极管及 2CP15 硅二极管的伏安特性。

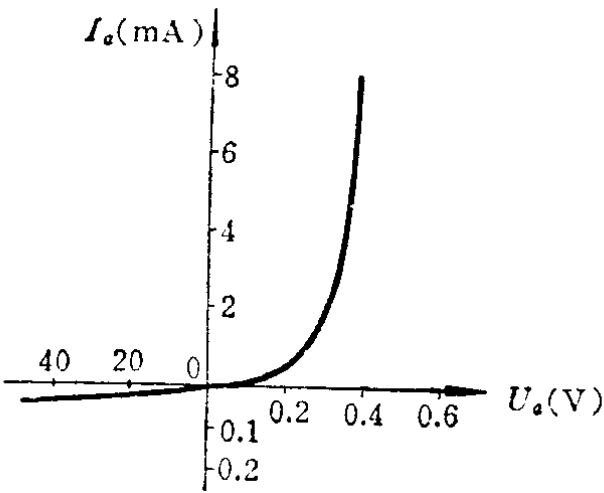


图 8-7 2AP15 锗二极管的伏安特性

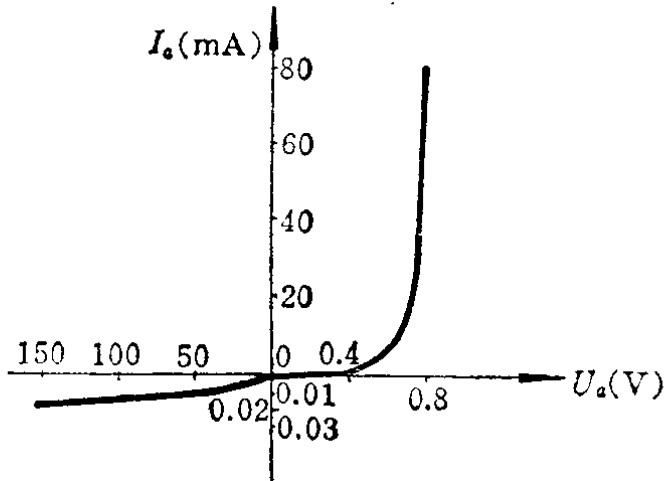


图 8-8 2CP15 硅二极管的伏安特性

从伏安特性曲线上我们可以看出：

(1) 正向特性

在二极管加正向电压时二极管导通，但在正向电压很低时，外加的电场不足以克服内电场的阻力，无扩散电流通过 PN 结，故此时电流很小，即二极管的内阻较大。对于二极管正向伏安特性中，这段有正向电压加入而无正向电流流过（或者电流很小）的区域，称为死区。

当外加电压超过一定的数值（即超过管子的死区电压值）时，它能足以克服内电场的阻力，二极管内阻变小，电流随着电压的增长而迅速的上升，这就是二极管的正常工作区。

由图 8-7 及图 8-8 可见，对于锗二极管其死区电压约为 0.15~0.3 伏，对于硅二极管死区电压一般为 0.3~0.5 伏，死区电压的数值与环境温度有关，当温度增高时，此值将下降。

二极管在工作时，其两端的压降很小，当电流增加时，管压降稍有增大。

(2) 反向特性

在二极管两端加反向电压时,管中仍有较小的电流出现,其方向与前述加正向电压时电流方向相反,这是由于在反向电压作用下,少数载流子的漂移运动形成的,在一定的工作温度时,只存在着一定数量的少数载流子,因此反向电流常被称为反向饱和电流。反向电流大,说明二极管的单向导电性能差。反向电流随电压增长变化甚微,但随温度变化较大。

当反向电压增加时,开始反向电流变化不大,但当反向电压增加到一定数值时,反向电流将急剧增加,这种现象称为反向击穿。其原因是外加强电场强制地把半导体材料外层电子拉出来,使载流子数目急剧增多,这个电压叫做反向击穿电压。

(3) 二极管的参数

主要极限参数有两个:最大整流电流及最高反向电压。

最大整流电流(或称为额定整流电流、工作电流)是指二极管长期工作时允许通过的正向电流值,使用时不能超过这个电流数值,否则会损坏二极管。对于大功率二极管,为了防止二极管过热,还要加装散热片,并且散热片的尺寸也有一定的规定。此外,还可以采用风冷、水冷和油冷等冷却方式,以提高散热效果。

最高反向电压是指为了防止二极管反向击穿在使用时反向电压的极限值。

除上述主要参数外,手册上还给出最高工作频率、最大反向电流,最高使用温度及最低工作温度等参数。

这里值得注意的是温度的问题,当温度升高时,二极管的正向电流会增加,反向击穿电压会降低。所以二极管在高温条件下使用时,其工作电压必须降低,否则就有被击穿的危险。

3. 稳压管

稳压管也是一种晶体二极管,它在外形和内部结构上都与晶