

高等医药院校选修教材

供基础、预防、临床、口腔医学类专业用

医用电子学

刘 骥 主编

人 民 卫 生 出 版 社



高等医药院校选修教材

医 用 电 子 学

(供基础、预防、临床、口腔医学类专业用)

刘 骥 主编

(以姓氏笔划为序)

编者：刘 骥 (哈尔滨医科大学)

陈秀文 (大连医学院)

姜远海 (首都医学院)

曾仁端 (同济医科大学)

魏崇卿 (北京医科大学)

人 民 卫 生 出 版 社

前 言

电子仪器和电子技术在医学中的应用日益广泛,医学生和医务工作者学习一些电子学基本知识的要求亦日益迫切。卫生部1980年修订的教学计划已把“医用电子学”列为选修课,很多医学院校已开出这门选修课多年,并且作为某些专业的必修课,同时也作为医学研究生的选修课或必修课。因此,编写一本适合医学各专业本科生和研究生使用的教材,已成为普遍要求。卫生部教材编委会在1987年把“医用电子学”正式列入教材编写计划,本书的编写工作是在编委会的指导和帮助下进行的。

本书是以人民卫生出版社1983年出版,刘骥、陈秀文主编的《医用电子学》为基础改写的,内容有了较大的精简和更新。新版删去了电子计算机及有关内容,因为电子计算机在医学院校中已作为独立课程开设。本书中少量数字逻辑电路的内容主要是说明逻辑控制、脉冲计数和数字显示的基本原理,而不是作为电子计算机的基础。

本书的主要目的是使医学生和医务工作者在医疗和科研中在应用电子仪器和开展新技术时,具有基本的电子学知识,同时也能使他们在与电子技术工程人员协作时有共同的语言。本书重点为模拟电路基础,编写方针是从使用者的立场出发,在阐明分立元件器件和电路原理的基础上,以分立元件电路的简单模型来说明集成电路的工作原理和外部性能,而不涉及其内部复杂结构。在介绍医学中的一些实际应用电路时,以集成电路为主,并且对于其性能指标和适用范围都作了说明。这样安排的目的是期望作到从易到难,循序渐进,适应医学电子学发展的趋势。本书还用了大约三分之一的篇幅来说明生物医学信号的获取、显示和记录,以及抑制干扰和防止微电击等问题。这些都是医务工作者应当具备的电子技术知识,这是本书的另一个重点。

本书每章后面建议了一些实验项目,教师可根据实验设备和学时情况选作。各校已经开设的实验项目还有很多未曾列出,所以教师不应受这些实验项目的限制。本书每章后面还配有习题,其中包括复习题、思考题和计算题,可供教学选用。

本书内容力求适合医学生和医务工作者的实际需要和数理水平,易学易懂,便于自学,并且尽可能包括较新的知识。本书适于作为医、药院校各专业五年制和七年制本科学生的“医用电子学”课程教材,也可作为医学研究生“医用电子学”课程教材。在课程时数较少时,教师可适当选择一部分内容讲授。本书也可作为医务工作者和维护医用电子仪器的技术人员自学参考书或讲习班教材。

本书第一章由魏崇卿编写,第二章和第四章由刘骥编写,第三章和第五章由曾仁端编写,第六章由姜远海编写,第七章和第八章由陈秀文编写,全书插图由曾仁端绘制。

本书在编写过程中得到哈尔滨医科大学、北京医科大学、同济医科大学、首都医学院和大连医学院的积极支持,编写组的编审会议得到哈尔滨医科大学和中国医学物理学学会的大力支持,编写组秘书高翠霞(哈医大)为本书手稿的整理和会务作了大量工作,全国很多兄弟院校的教师都对本书的编写方针和内容提出了宝贵意见,在此一并致谢。

我们对医用电子学的教学还正在探索中,医学知识也不够丰富,书中错误和缺点在所难免,希望广大读者批评指正。

编 者

1988年5月

目 录

第一章 基本放大电路	1
第一节 晶体二极管	1
一、半导体的导电特性	1
二、PN结的形成及其特性	3
三、晶体二极管的特性和主要参数	4
四、稳压管	6
第二节 晶体三极管	8
一、晶体三极管的结构和符号	8
二、晶体管的放大作用	9
三、晶体管的特性曲线	11
四、晶体管的主要参数	13
第三节 晶体管单级放大器的基本原理	16
一、共发射极放大器的基本电路	16
二、共发射极放大器静态工作点的图解分析法	17
三、用图解法分析共发射极放大器的动态	19
四、电压放大倍数	22
五、放大器工作点的选择	23
六、工作点的稳定	26
七、放大器的输入阻抗和输出阻抗	29
八、频率特性、通频带	32
第四节 阻容耦合多级放大器	33
第五节 放大器的主要性能指标	35
第六节 场效应管放大器	38
一、结型场效应管	38
二、绝缘栅场效应管	41
三、场效应管的主要参数	43
四、场效应管基本放大电路	44
习题	46
实验一 晶体管的测试	48
实验二 典型的单管放大电路	49
第二章 生物医学常用放大器	50
第一节 生物医学信号和放大器的一些特点	50
一、各种生物电信号及其放大器	50
二、其他生物医学信号	51
第二节 信号的频谱	51
一、周期性波形的频谱	51
二、脉冲波形的频谱	52

三、波列的频谱·····	54
第三节 滤波电路·····	54
一、高通滤波·····	55
二、低通滤波·····	56
三、带通滤波·····	56
四、带阻滤波·····	56
第四节 负反馈放大器·····	57
一、负反馈的基本概念·····	57
二、电流串联负反馈、恒流源·····	58
三、电压串联负反馈、跟随器·····	60
四、电压并联负反馈·····	61
五、负反馈对放大器性能的影响·····	61
第五节 直流放大器·····	62
一、直流放大器的级间耦合·····	63
二、差分放大器·····	64
第六节 运算放大器的基本知识·····	67
一、运算放大器的概念和性能指标·····	67
二、理想运放·····	69
三、反相放大电路·····	70
四、同相放大电路·····	71
五、差分放大电路·····	72
第七节 运算放大器的一些应用·····	74
一、加法和减法运算电路·····	74
二、对数和指数运算电路·····	75
三、比较电路·····	76
四、微分和积分电路·····	77
五、有源滤波器·····	79
六、负电容放大器·····	80
第八节 功率放大器·····	81
一、阻抗匹配和变换·····	82
二、单管功率放大器·····	83
三、推挽放大器·····	84
四、无变压器功率放大器·····	85
习题·····	86
实验一 频谱分析仪·····	87
实验二 射极跟随器的研究·····	87
实验三 差分放大器参数的测量·····	87
实验四 集成运算放大器的研究·····	87
实验五 微分电路的研究·····	87
第三章 振荡与调制·····	88
第一节 简谐振荡的基本条件·····	88

第二节 RC振荡器	89
一、RC串并联选频电路	89
二、文氏桥选频电路	91
三、文氏桥式RC振荡器	92
第三节 LC谐振电路	93
一、LC串联谐振	93
二、LC并联谐振	95
第四节 LC振荡器	96
一、变压器反馈式振荡器	96
二、电感反馈式振荡器	97
三、电容反馈式振荡器	98
第五节 晶体振荡器	99
一、石英晶体的电特性及其等效电路	99
二、晶体振荡电路	101
第六节 调制与解调	102
一、调幅与解调	102
二、调频和解调	104
第七节 调制放大器	109
一、信号源的调制	109
二、斩波器	110
三、二极管环形解调器	111
四、相敏放大器	112
习题	113
实验一 文氏电桥振荡器	114
实验二 LC振荡器	114
第四章 脉冲与数字逻辑电路	115
第一节 脉冲电路的基本知识	115
一、脉冲的主要参数	115
二、电容负载对脉冲波形的影响、RC分压电路	116
三、脉冲的微分	117
四、计数率计电路——泵电路	118
五、削波、限幅和钳位	119
第二节 三极管反相器	120
一、三极管的开关特性	120
二、反相器	121
第三节 脉冲的整形和鉴别	123
一、二极管幅度鉴别电路	123
二、差分鉴幅器	124
三、施密特触发器	124
四、集成运放组成的施密特触发器	126
第四节 脉冲发生器	127

一、多谐振荡器	128
二、单稳态触发器	130
三、单结晶体管振荡器	131
四、间歇振荡器	133
第五节 基本逻辑电路	135
一、逻辑运算和门电路	135
二、集成门电路简介	138
三、门电路的主要性能指标	140
第六节 双稳态触发器	140
一、RS 触发器	141
二、主从式触发器	143
三、几种常用触发器	143
第七节 脉冲的计数和显示	145
一、计数制	145
二、二进制计数器	146
三、十进制计数器	149
四、数字显示	151
第八节 模数和数模转换	152
一、数模转换	152
二、模数转换	153
习题	154
实验一 不同电路对脉冲传输的影响	155
实验二 施密特电路的研究	155
实验三 多谐振荡器的研究	155
实验四 单结管振荡器的研究	156
实验五 触发器的研究	156
实验六 可逆计数器	156
实验七 D/A转换电路	156
第五章 整流电路与直流稳压电源	157
第一节 整流和滤波	157
一、半波整流	157
二、全波整流	158
三、桥式整流	159
四、倍压整流	159
五、滤波电路	160
第二节 串联式晶体管稳压电路	161
一、简单的串联式稳压电路	161
二、常用的串联式稳压电路	162
三、改进的串联式稳压电路	163
四、稳压电源的保护电路	163
五、稳压电源的主要性能指标	164

第三节 集成稳压电源	165
一、三端集成稳压器	166
二、5G11 集成稳压器	168
三、W723 稳压器	169
第四节 直流电压变换器	170
习题	172
实验一 直流稳压电源参数的测量	173
第六章 生物医学传感器	174
第一节 生物电测量用电极	175
一、电极电位	176
二、极化电压	178
三、极化电极和非极化电极	179
四、微电极	182
五、电极的阻抗与测量法	183
第二节 生物医学用换能器	185
一、医用换能器的特点	186
二、直接型换能器	187
三、测量电桥	191
四、间接型换能器	194
第三节 检测生物体内离子与血液气体传感器	203
一、玻璃膜电极	203
二、离子敏感场效应管传感器	203
三、测量生物体血液气体电极	204
第四节 生物传感器	207
一、酶传感器	207
二、微生物传感器	208
三、免疫传感器	209
四、药物传感器	210
习题	210
实验一 医用电极的制造及其特性的测量	211
实验二 应变电阻器的制造及其应用	211
实验三 医用传感器在医学测量中的应用	212
第七章 医用仪器的显示和记录装置	213
第一节 屏幕式显示装置	213
一、示波管	214
二、示波器	215
第二节 数字式显示装置	216
一、荧光数码管	217
二、液晶显示器	218
三、半导体数码管	219
第三节 直接描记式装置	219

一、描笔偏转式记录器·····	220
二、自动平衡式记录器·····	222
第四节 磁带记录装置·····	224
一、磁带记录原理·····	225
二、模拟式磁带记录装置·····	226
三、数字式磁带记录装置·····	227
习题·····	227
实验一 描笔记录器实验·····	228
实验二 数码管实验·····	228
第八章 干扰的抑制和电击的防护·····	229
第一节 屏蔽·····	229
一、电场屏蔽·····	229
二、磁场屏蔽·····	231
三、高频电磁场的屏蔽·····	232
四、医用屏蔽室·····	233
第二节 干扰和抑制·····	233
一、交流电源引起的干扰和抑制·····	234
二、空间电磁波的干扰和抑制·····	235
三、地线引起的干扰及改进·····	235
四、连接线引起的干扰和改进·····	237
五、人体生理活动引起的干扰·····	238
第三节 电击和防护·····	239
一、人体的导电·····	239
二、电击的类型·····	241
三、电击的因素·····	242
四、防止电击的措施·····	244
习题·····	247
实验一 静电干扰检测·····	248
实验二 电子仪器漏电流的检测·····	248
附录一 部分国产集成运算放大器参数表·····	249
附录二 部分运算放大器型号对照表·····	253
附录三 部分常用集成稳压器主要性能及国内外型号对照表·····	255
习题答案·····	267

第一章 基本放大电路

工程技术是现代医学的支柱之一。由于医学科学的需要，电子技术在医学领域中得到广泛的应用。从人体上得到的各种信号，往往十分微弱。必须通过不失真地放大以后，才能显示、记录并被测量，经分析研究和适当处理，为诊断、治疗、监护等提供必要的依据和手段。对微弱电信号的放大，是电子技术基本内容之一。本章重点讨论低频交流电压放大器的基本原理。

放大电路中，常用的器件有晶体二极管、场效应管、集成运算放大器等，均为半导体器件。构成半导体器件的共同基础是 PN 结。因而本章先介绍 PN 结和晶体二极管、稳压管，然后介绍晶体三极管和由它构成的基本放大电路，用图解法分析它的放大工作原理。最后介绍场效应管及其放大电路。

第一节 晶体二极管

一、半导体的导电特性

1. 本征半导体 纯净的半导体 (semiconductor) 称为本征半导体。经过提纯，拉单晶的硅、锗等半导体材料是纯净的半导体。它们每个原子的外层都有四个价电子，分别与相邻原子的价电子组成共价键，如图 1-1 所示。在绝对零度时，这些价电子都处于稳定状态，纯净的半导体中基本上没有自由电子，是一个绝缘体。在常温 (300K) 下，由于热运动，少数价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子，在原处留下的空位称为空穴，形成电子-空穴对。自由电子和空穴都可以在半导体中自由移动。空穴的移动方式是：有空穴的原子把相邻原子中的价电子吸引过来，填补这个空穴，同时在这个相邻原子中就出现一个新的空穴。有空穴的原子缺少一个价电子，带有正电荷，所以空穴的移动象一个正电荷在移动。在外电场的作用下，自由电子和空穴均能形成定向运动，构成电流。从这个意义上讲，空穴和自由电子都称为**载流子** (carrier)。

2. 杂质半导体 在本征半导体里，由于共价键的束缚，自由电子和空穴的数目很少，因而导电能力很差。要提高半导体的导电能力，必须在本征半导体中掺入其它少量合适的元素，这些元素对半导体基体而言，叫做杂质。掺有杂质的半导体叫做杂质半导

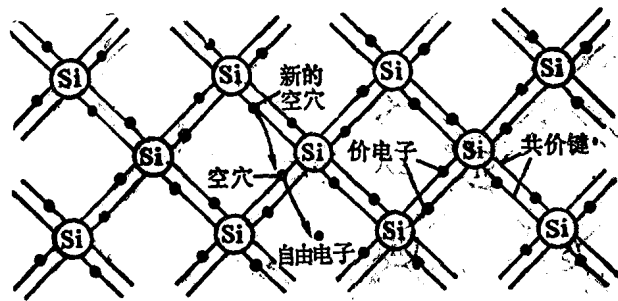


图 1-1 本征半导体中的共价键结构及电子-空穴对

体。杂质半导体分为两种类型：一种叫做N型 (negative type) 半导体，一种叫做P型 (positive type) 半导体。

(1) **N型半导体** 在纯净的硅单晶中掺入少量五价元素(如磷、砷或锑等)，即构成N型半导体。磷原子在半导体中占据了原来由硅原子所占的位置，如图1-2所示。磷原子最外层有5个电子，它同周围的硅原子进行共价结合时，多了一个价电子。这个价电子很容易从磷原子脱出，使磷成为正离子，同时生成一个自由电子。半导体中自由电子浓度大大提高，导电能力增强。在这类半导体中，自由电子是主要载流子，称为N型半导体。像磷这样的杂质，其原子可以提供自由电子，这种原子称为施主原子。在本征半导体中，掺入施主原子，就构成了N型半导体。

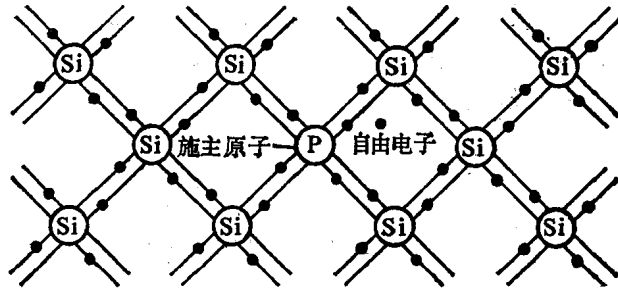


图 1-2 硅单晶中掺入磷形成N型半导体

在N型半导体中，自由电子的浓度远大于空穴的浓度，所以称自由电子为**多数载流子**，简称**多子** (majority carrier)，空穴为**少数载流子**，简称**少子** (minority carrier)。

(2) **P型半导体** 在纯净的硅单晶中掺入少量的三价元素(如硼、铝或镓等)的杂质原子，就构成了P型半导体。硼原子在半导体中将替换一个硅原子而占据它的位置，如图1-3所示。硼原子在与硅原子构成共价键时，将因缺少一个价电子而出现空穴。当邻近的价电子来填补这个空位时，硼原子便成为不能移动的负离子，同时邻近的原子处出现了一个可以移动的空穴。每掺入一个硼原子，便提供一个空穴，使单晶硅中空穴数量大大增加。在这类半导体中，空穴是主要载流子，称为P型半导体。由于这种杂质原子起着接受电子的作用，所以把硼原子称为受主原子。在本征半导体中，掺入受主原子，就构成了P型半导体。

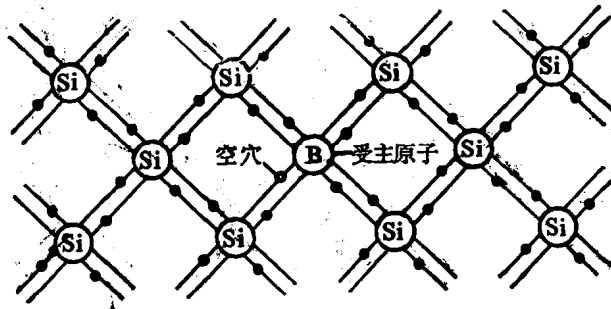


图 1-3 硅单晶中掺入硼形成P型半导体

在P型半导体中，空穴的浓度远大于自由电子的浓度。所以空穴为多子，自由电子为少子。

图1-4为P型和N型半导体结构的简化示意图。由于晶体内部呈中性，所以在杂质半导体中，当忽略少子时，导电的载流子必然与带电离子成对地出现：对于P型半导体，空穴数等于带负电的受主离子数；对于N型半导体，自由电子数等于带正电的施主离子数。

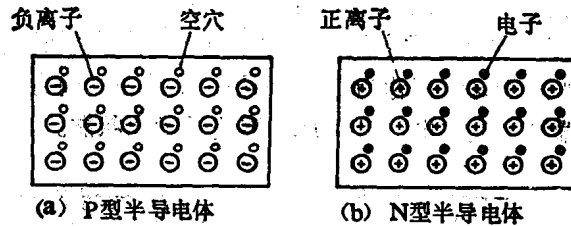


图 1-4 杂质半导体中的多数载流子与离子

二、PN 结的形成及其特性

1. PN 结的形成 当用一定的工艺方法把P型和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 (PN junction)。

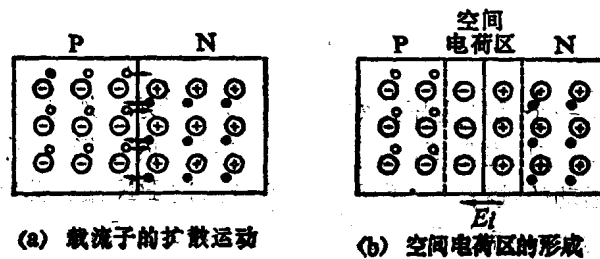


图 1-5 PN结的形成

如图1-5所示，当P型与N型半导体结合时，由于P型中的空穴浓度大，N型中的自由电子浓度大，在交界面处，空穴将由P区向N区扩散，自由电子则由N区向P区扩散。进入P区的电子可能落入空穴，进入N区的空穴也可能捕获自由电子，使电子-空穴对同时消失，这种现象称为**复合** (recombination)。随着扩散的进行，P区的空穴数减少，界面左方留下不能移动负离子；N区的自由电子减少，界面右方留下不能移动的正离子。其结果是在交界面处形成一个空间电荷区，由此产生一个由N区指向P区的内部电场 E_i 。由于 E_i 的方向与多子扩散运动方向相反，所以空间电荷区有阻止多子继续扩散的趋势。另一方面， E_i 驱使N区和P区的少子沿着与扩散方向相反的方向运动。少子在电场 E_i 作用下的这种运动叫做漂移运动。少子漂移形成的电流叫漂移电流。

当多子的扩散运动与少子的漂移运动二者相等时，扩散电流与漂移电流相等，这种状态称为动态平衡状态。此时，空间电荷区的厚度就确定下来，内电场 E_i 也达到一个稳定的值。空间电荷区有阻挡扩散运动的作用，所以称为**阻挡层**。又由于空间电荷区中基本上没有载流子，因而亦称为**耗尽层**。在动态平衡时的空间电荷区，就是PN结。

2. PN 结的导电性能 如果在 PN 结两端加上不同极性的直流电压,我们将看到其导电性能有很大差异。

(1) 当在 PN 结两端加上正向电压时,PN 结处于**导通状态**。

在 PN 结两端加正向电压,如图 1-6 (a) 所示,外电源的正极接 P 区、负极接 N 区时,外电场 E_o 与 PN 结的内电场 E_i 的方向相反,因而削弱了内电场,使空间电荷区变窄,有利于扩散运动继续进行,而不利子漂移运动。这样 P 区及 N 区的多子就能顺利地通过 PN 结,同时外部电源又不断地向半导体提供空穴及电子,形成较大的电流。至于少子运动形成的漂移电流是非常小的,它对总电流的影响可以忽略。这时 PN 结呈导通状态。对 PN 结所加的正向电压称为正向偏置。PN 结在正向导电时,电阻是很小的。

(2) 当在 PN 结两端加上反向电压时,PN 结处于**截止状态**。

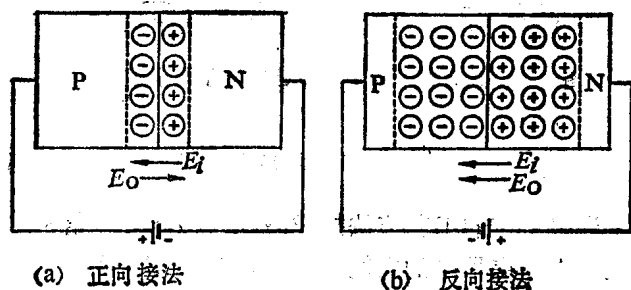


图 1-6 PN 结的导电性

如果给 PN 结加上一个反向电压,如图 1-6 (b) 所示,外电源的正极接 N 区、负极接 P 区时,外电场 E_o 与内电场 E_i 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,几乎没有多子能通过 PN 结。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。对 PN 结所加的反向电压称为反向偏置。PN 结在反向截止时,电阻是非常大的。

在 PN 结加反向电压时,使内电场加大,即阻挡层加宽,这对少子而言,更有利于漂移运动的进行。此时,少子穿过 PN 结所形成的漂移电流称为反向电流。它的值远远小于正向偏置时的电流值。

综上所述,当 PN 结加正向电压时,PN 结导通。当 PN 结加反向电压时,PN 结截止。这一特性,称为 PN 结的**单向导电性**,它是 PN 结的最重要的电特性。

三、晶体二极管的特性和主要参数

1. 二极管的结构 二极管 (diode) 是由一个 PN 结加上相应的电极引线和管壳做成的。通常用图 1-7 (a) 的符号表示,箭头指向表示正向导通方向 (即电流方向)。它具有两个电极:由 P 型半导体上引出的电极叫正极或阳极,由 N 型半导体上引出的电极叫负极或阴极。按照晶体二极管的内部结构,可以把它分为点接触式和面结式二种。图 1-7 (b) 为点接触式,(c) 为面结式结构示意图。

点接触式结构,是由一根金属触丝与半导体晶片形成点接触,PN 结的面积很小,不能承受较大的正向电流和较高的反向电压,适用于高频检波和脉冲电路。

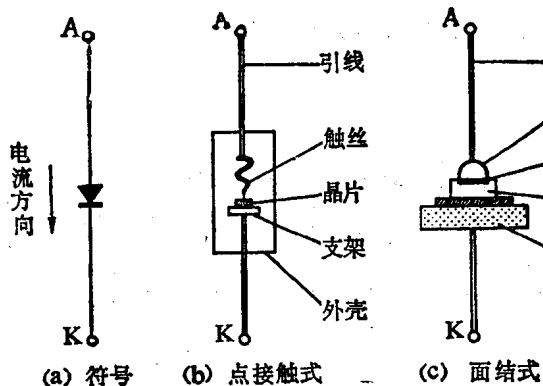


图 1-7 晶体二极管的符号及结构

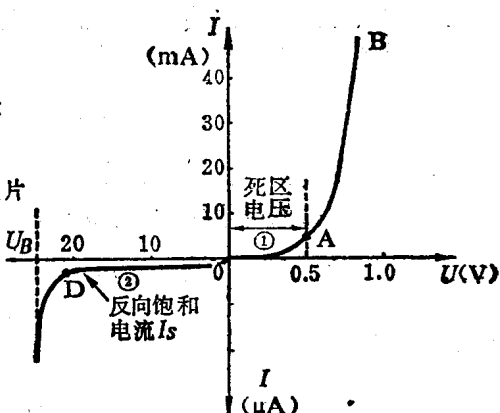


图 1-8 二极管的伏安特性

面结式的结构,是由不同类型的两种半导体以较大面积接触而形成 PN 结的。由于接触面积大,故能承受较大的正向电流和较高的反向电压。但它的结电容大,不适用于高频线路,只适用于低频大功率整流电路。

2. 晶体二极管的伏安特性和方程

(1) **晶体二极管的伏安特性曲线**: 二极管的端电压 U 和通过它的电流 I 的关系叫做二极管的伏安特性,它反映了二极管的单向导电性。图 1-8 给出了一个硅二极管的伏安特性曲线。

从正向特性曲线①看出:当外加电压很小 ($<0.5\text{V}$) 时,外电场还不足以克服内部电场对多子扩散运动所造成的阻力,这时的正向电流很小 (0A 段),二极管呈现较大的电阻。这段有正向电压加入、正向电流几乎为零的区域称为**死区**,相应的电压叫死区电压。硅二极管的死区电压一般在 0.5V 左右,锗管一般略低于 0.2V 。当外加电压大于死区电压以后,内电场被大大削弱,二极管内阻变小,电流随着电压的增长而迅速上升,这就是二极管的**正常工作区** (AB 段)。在正常工作时的管压降:硅管通常为 0.7V 左右,锗管为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。同一种材料和同一种型号的各个二极管的管压降并不完全一致,这种情况反映了半导体器件参数的分散性。

从反向特性曲线②看出:在外加反向电压时,有极小的反向电流通过二极管。反向电流基本上不随反向电压的变化而变化 (0D 段)。这是因为在一定的温度下和单位时间里,只能产生一定数量的少子。只要内电场的漂移作用使它们都越过 PN 结形成反向电流,即使内电场再增强一些,也不能使载流子的数目增加,这种情况下的电流称为**反向饱和电流**。当温度上升时,反向饱和电流将急剧增大。

当反向电压不断增加并超过某一数值时,反向电流将急剧增加,这种现象称为**反向击穿**,相应的电压称为**反向击穿电压**。其原因是外加电场强制地把原子外层的价电子拉出来,使载流子 (自由电子和空穴) 数目急剧上升,而处于强电场中的载流子在获得能量后,又去碰撞其它的外层电子,这种连锁反应造成了载流子突然急剧增加的现象,它破坏了二极管的单向导电性。如果电路中有适当的限流电阻,二极管的反向击穿是可以恢复的。如果没有适当的限流措施,管子将会因电流过大而永久性地损坏。

(2) **二极管特性的表达式**: 由于PN结是一切半导体器件的共同基础,所以它的伏安特性也具有比较普遍的意义。根据固体物理中有关PN结的研究,晶体二极管电流与端电压的关系可由下式表示

$$I = I_s [\exp(qU/kT) - 1]$$

其中, $\exp$ 是指数函数, q 是电子的电量, 等于 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 。 T 是绝对温度, 单位为 K。 k 是玻尔兹曼常数, 等于 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。 I_s 为反向饱和电流, 是一个与外加电压无关的系数。在 25°C 时, $q/kT = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 298} \approx 39 \text{V}^{-1}$, 或写成 $U_T = kT/q \approx \frac{1}{39} \text{V} \approx 26 \text{mV}$ 。上式也可写成:

$$I = I_s [\exp(U/U_T) - 1] \quad (1-1)$$

如果 U 为正数且比 26mV 大得多, 则 $\exp(U/U_T) \gg 1$, $I \approx I_s \exp(U/U_T)$, 说明管子的电流与电压成指数关系(正向特性0B段)。二极管的端电压只要稍微增加一点, 电流就会增加很多。若 U 是负数, 即所加电压为反向电压, 且它的绝对值也比 26mV 大得多, 则 $\exp(U/U_T) \ll 1$, $I \approx -I_s$, 基本上是一个常数, 即前面所说的反向饱和电流与所加电压无关(反向特性0D段)。

应当指出的是, (1-1) 式不能描述二极管反向击穿的情况。

3. 二极管的主要参数

(1) **最大整流电流**(亦称额定整流电流或工作电流): 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值, 否则会损坏管子。对于大功率管, 为了防止过热, 还要加散热片。

(2) **最大反向工作电压**: 是指在使用时防止二极管反向击穿而不允许超过的反向电压的极限值。为了确保管子的安全工作, 一般给出击穿电压值的一半为最大反向工作电压。

(3) **结电容**: PN结是由带正、负电荷的两个离子层组成, 这一情形与极板带电时的电容器相似。PN结的这个电容叫做静态结电容。另外, 当空间电荷区由薄变厚时, 这个区域中的多子, 需要由扩散电流来中和, 这也相当于储有电荷的电容器情况, 这个电容称为动态结电容, 它与加在二极管上电压的大小和方向有关。静态与动态结电容, 常合称结电容。结电容的存在造成高频电流容易通过, 失去了单向导电性, 因此限制了二极管的最高使用频率。不同型号二极管的最高使用频率不同。在脉冲电路中, 应选用结电容很小的开关二极管。

四、稳压管

1. **稳压管的基本原理** 稳压管(Zener diode)是一种经过特殊工艺制成的晶体二极管, 它与普通二极管的区别在于它工作在反向击穿区。

图1-9为硅稳压二极管的伏安特性和表示符号。从图中看出正向特性与普通二极管一样。其反向特性是: 当所加的反向电压小于击穿电压时, 稳压管具有极大的内阻, 其反向饱和电流近似为零, 如图1-9中的0A段; 当外加电压超过反向击穿电压时, 电流

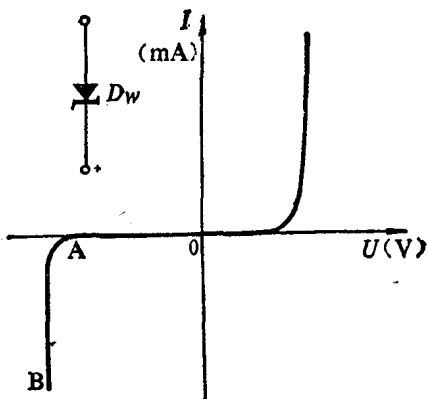


图 1-9 硅稳压管的伏安特性和符号

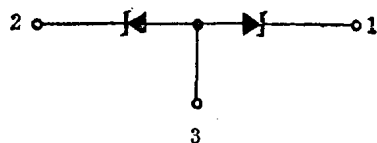


图 1-10 具有温度补偿特性的稳压管

急剧增大，如图中 AB 段所示。在它被击穿后，电流能在很大范围内变化，但管子两端的电压基本上保持不变，这就是稳压作用。由击穿转化为稳压的条件，一是制造工艺加以保证，二是外部电路中应有限制电流的措施。流过稳压管的电流如果超过其最大允许电流，稳压管会因热击穿而损坏。

2. 稳压管的主要参数

(1) **稳定电压**：指稳压管正常工作时的稳定电压值。由于工艺问题，同一种型号的稳压管，它的稳压值不是完全一致的，有一定的分散性。例如 2CW18 稳压管的稳压值在 10V 至 12V 之间。

(2) **稳定电流**：指稳压效果较好的工作电流，其值可以从有关手册上查到。

(3) **电压温度系数**：是指温度每增加 1℃ 时，稳压值所升高的百分数，表明稳压值受温度变化的影响。例如 2CW18 的电压温度系数是 +0.095%/℃，这就是说，温度每增加 1℃，它的稳压值将升高 0.095%。如果在 20℃ 时的稳压值是 11V，那么在 50℃ 时的稳压值将是

$$11 + \frac{0.095}{100} \times (50 - 20) \times 11 \approx 11.3 \text{ V}$$

一般说来，低于 6V 的稳压管的电压温度系数是负的（温度升高，稳压值降低），高于 6V 的稳压管，电压温度系数是正的。而在 6V 左右的管子，稳压值受温度的影响就比较小。因此，在电压稳定度要求较高的情况下，一般常选用 6V 左右的稳压管。在要求更高的情况下，还用两个温度系数相反（一正一负）的管子串联作为温度补偿，例如 2DW7 这一类的稳压管的内部就包含了一个硅稳压管和一个作为温度补偿用的硅二极管，如图 1-10 所示。1、2 两端可任意连接，中间引出的 3 端供单独使用一个稳压管时用。

(4) **动态电阻**：指稳压管在正常工作区的电压变化量与电流变化量之比，即

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

动态电阻是衡量稳压管稳压性能好坏的指标。动态电阻愈小，图 1-9 中稳压管伏安特性

曲线的 AB 段愈陡，电压稳定性愈好。

3. 简单的稳压电路 图 1-11 是一个最简单的稳压电路。由于所用的元件少，又能取得一定程度的稳压效果，所以应用较广泛。

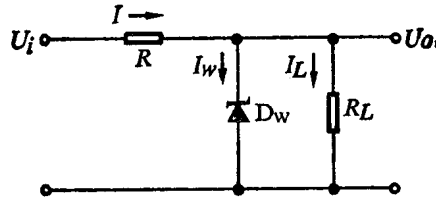


图 1-11 简单的稳压电路

图中 R 为限流电阻， R_L 为负载电阻， D_w 为稳压管。由于稳压管是用来稳定负载电压，所以稳压管与负载 R_L 并联，而且稳压管为反向接法，使其工作于击穿区。稳压电路的输入电压 U_i 等于 R 上电压 U_R 与输出电压 U_o 之和。稳压电路的输入电流 I 等于稳压管的工作电流 I_w 与负载电流 I_L 之和。

引起输出直流电压波动的原因主要有两个：电网电压波动和负载电流变化。

当电网电压波动使 U_i 升高，造成输出电压 U_o 上升时，稳压管电压的微小上升导致电流 I_w 的较大增加，总电流 I 随之有较大增加，电阻 R 上压降的增加几乎足以补偿 U_i 的升高，从而保持输出电压 U_o 基本不变。同理，当 U_i 下降时， I_w 有较大减少，电阻 R 上压降的减少几乎足以补偿 U_i 的下降，从而保持 U_o 基本不变。

当负载电流 I_L 在一定范围内变化时，也可由稳压管的电流来补偿。若负载电流 I_L 增加导致 U_o 下降时， I_w 会相应减小来补偿 I_L 的增加，使 $I = I_w + I_L$ 基本不变，从而保持 U_o 基本不变。反之， I_L 减小时 I_w 相应增加，使 I 基本不变，从而保持 U_o 基本不变。

第二节 晶体三极管

一、晶体三极管的结构和符号

晶体三极管 (transistor) 简称三极管或晶体管。它是在一块半导体上制作两个紧密结合的 PN 结，再引出三个电极，然后封装加固而成。根据 PN 结的组合方式不同，可分为 NPN 和 PNP 两种类型。根据使用的材料不同，有锗管与硅管之分。锗管多数是 PNP 型，硅管多数是 NPN 型。图 1-12 上部表示三极管的结构示意图，下部

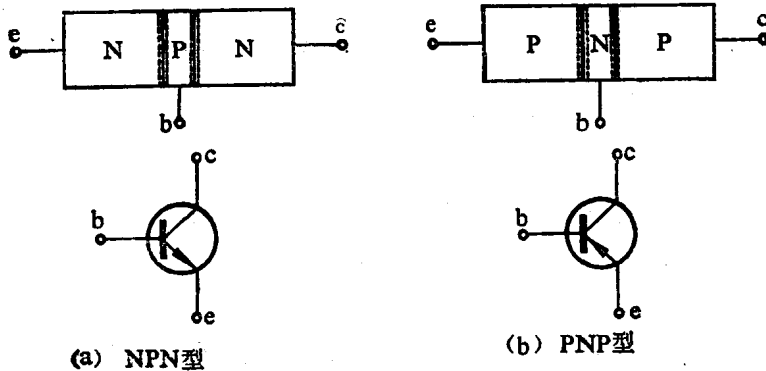


图 1-12 晶体管的结构示意图和符号