

高等医药院校教材

医用电子学

简明教程

主编 魏崇卿

13

图书馆

北京医科大学
中国协和医科大学

联合出版社



R312/110

高等医、药院校教材

(供基础、医疗、检验、药学、预防等专业用)

医用电子学简明教程

主 编 魏崇卿

副主编 张 烈

律有权

编 委 (以姓氏笔划为序)

马维原 (北京医科大学)

王 铭 (北京医科大学)

田晓明 (广东医学院)

孙朝晖 (滨州医学院)

吴祖明 (广东医学院)

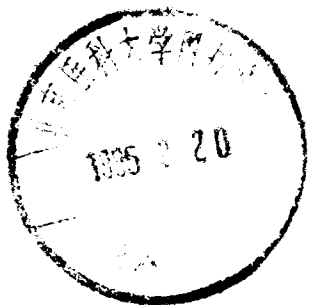
陈 生 (北京医科大学)

陈安宇 (首都医学院)

张 烈 (广东医学院)

律有权 (承德医学院)

魏崇卿 (北京医科大学)



北京医科大学联合出版社
中国协和医科大学

R312-43
WCQ



A1C01101890

(京)新登字147号

内 容 简 介

本书在多年教学实践的基础上,根据医药院校的特点,简明扼要、深入浅出地介绍了基本放大电路、负反馈放大器、直流放大器、集成运算放大器、振荡与调制、直流稳压电源、脉冲数字电路、医用传感器、干扰和噪声、显示与记录、医学仪器的安全性、常用医学仪器简介等内容,共计十二章,突出了集成电路的应用,密切结合常用的医学仪器,可供医疗、药学、检验、卫生、医学实验技术等专业的本科生、研究生、大专生做教材。也可供综合大学及师范院校生物、生物物理及生物医学工程等专业作教学参考书或教材。也可供医务工作者、医疗仪器维修的工作人员以及对生物医学电子学感兴趣的科技人员参考。

医用电子学简明教程

主 编: 魏崇卿

责任编辑: 暴海燕 马维原

* * *

北 京 医 科 大 学 联合出版社出版
中国协和医科大学

(地址: 北京医科大学院内)

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

北京密云华都印刷厂印刷

* * *

开本: 787×1092 1/16 印张: 19.25 字数: 480 千字

1994年8月第1版 1994年8月第1次印刷 印数: 1—4000册

ISBN 7-81034-316-5/R·316 定价: 19.30元

前 言

医用电子学(Medical Electronics)是一门新兴的边缘科学。它在医学中的应用日益广泛,医院中各种医学电子仪器日益增多。现代化的医学仪器促进了现代医学的迅速发展。医务人员深切地体会到:了解、掌握一定的电子技术基础知识是十分必要的。在医学教育中,适当增加工程技术方面的内容,医工结合,对培养适应现代医学发展的新一代医务人员是很重要的。因此,早在1980年,卫生部就把“医用电子学”列为选修课。目前,很多医药院校已把它列为本科生、研究生的必修课和选修课。本书是为适应这种形势要求,在近几年教学实践的基础上,在各院校领导的积极支持下,组织编写的。

学习“医用电子学”的主要目的是:使医务工作者(包括临床药学工作者)及医药院校学生、研究生在医疗和科研工作中,具有电子学的基本知识,能借助说明书正确使用仪器,开发仪器的功能;在与工程技术人员协作时有共同语言。根据医药学专业的需要和学生的实际水平,根据循序渐进的原则,全书对电路均作定性讲解,不求复杂的数学推导;以分立元件电路为基础,着重介绍集成电路的工作原理;在讲清基本概念和基本典型电路的基础上,介绍常用的医学仪器及其新进展。介绍常用仪器时,兼顾医疗、检验、药学等各专业。并就生物医学信号的特点、获取、显示与记录,以及干扰的抑制、医学仪器的安全性等问题作了专门的介绍。在编写上力求做到深入浅出,简明易懂,以较少的篇幅介绍医用电子学所涉及的主要方面。本书各章都列有实验项目及习题,供各校选用。

本书适用于医学、药学、医学检验、医学实验技术等专业的本科生、研究生、大专班做“医用电子学”课程教材。也可供综合大学及师范院校生物、生物物理及生物医学工程等专业作为参考书或教材,也可供医务工作者、医疗仪器维修工作者以及对生物医学电子学感兴趣的科技人员作自学参考书。

本书第一章由律有权编写,第二、十一章由陈安宇编写,第三、十章由孙朝晖编写,第四、八、九章由魏崇卿编写,第五章由王铭编写,第六章由田晓明编写,第七章由张烈编写,第十二章第一、二、四节由陈安宇编写,第三、八节由孙朝晖编写,第五节由魏崇卿编写,第六节由陈生编写,第七节由律有权编写,第九、十二节由吴祖明编写,第十、十一节由马维原编写。全书由魏崇卿最后统稿、定稿。贾丽玖(北医大)为编委会做了很多会务工作。

本书在编写过程中,得到北京医科大学、首都医学院、广东医学院、承德医学院和滨州医学院领导和北京医科大学、中国协和医科大学联合出版社的积极支持,并得到中华医学会医学工程学会和中国生物医学工程学会医学物理学会的支持。一些兄弟院校的教师对本书的编写内容提出了宝贵意见,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中不足之处难免,敬请读者批评指正。

编者

1993年9月

目 录

前 言

第一章 基本放大电路	(1)
第一节 半导体器件	(1)
一、晶体二极管	(1)
二、晶体三极管	(7)
三、场效应管	(14)
第二节 晶体管单级放大电路的基本原理	(21)
一、共发射极放大器的基本电路	(21)
二、电压放大过程	(21)
三、放大电路的图解分析法	(24)
四、电压放大倍数	(28)
五、放大电路工作点的选择	(29)
六、工作点的稳定	(31)
七、放大电路的输入电阻和输出电阻	(33)
八、频率特性 通频带	(36)
第三节 阻容耦合多级放大电路	(37)
第四节 放大电路主要性能指标	(39)
第五节 场效应管基本放大电路	(41)
第二章 放大电路中的负反馈	(45)
第一节 反馈的基本概念	(45)
第二节 负反馈的方式	(46)
一、电压负反馈和电流负反馈	(46)
二、串联负反馈和并联负反馈	(47)
三、负反馈的四种组合方式	(48)
第三节 反馈的判别及电路分析	(48)
一、电流串联负反馈放大电路	(49)
二、电压串联负反馈放大电路	(50)
三、电压并联负反馈放大电路	(52)
四、电流并联负反馈放大电路	(53)
第四节 负反馈对放大电路性能的影响	(54)
第三章 直流放大电路	(58)
第一节 直接耦合放大电路	(58)
一、直接耦合的具体方式	(58)
二、零点漂移	(60)

三、零输入零输出及交流干扰·····	(60)
第二节 差动放大电路·····	(60)
一、电路的组成及抑制零漂的原理·····	(61)
二、信号的输入方式·····	(61)
三、共模抑制比CMRR ·····	(62)
四、典型的对称式差动放大电路 ·····	(62)
五、带有射极恒流源的差动放大电路·····	(63)
六、输入和输出的四种接法及性能比较·····	(64)
七、差动放大电路应用举例·····	(66)
第四章 集成运算放大器·····	(68)
第一节 运算放大器的特性·····	(68)
一、典型电路及符号·····	(69)
二、主要参数·····	(69)
三、理想运算放大器的概念·····	(70)
第二节 集成运放组成的基本电路·····	(70)
一、反相输入运算放大器·····	(71)
二、同相输入运算放大器·····	(71)
三、差动输入运算放大器·····	(73)
第三节 生物电放大器·····	(73)
一、生物医学信号的特点·····	(73)
二、同相并联型差动输入运算放大器·····	(74)
三、同相串联型差动输入运算放大器·····	(76)
四、心电放大器电路举例·····	(76)
五、滤波电路·····	(77)
第四节 集成运放在运算方面的应用·····	(82)
一、求和运算电路·····	(82)
二、积分和微分运算·····	(84)
三、对数和反对数运算·····	(85)
第五节 集成运放在其它方面的应用·····	(86)
一、电压比较器·····	(86)
二、电桥放大器·····	(89)
第六节 实用中的几个问题·····	(90)
一、集成运放的分类和管脚排列图·····	(90)
二、调零技术·····	(92)
三、位相补偿·····	(92)
四、集成运算放大器的保护电路·····	(93)
五、通用型集成运放性能的扩展举例·····	(94)
第五章 振荡与调制·····	(97)
第一节 正弦振荡器的基本原理·····	(97)

第二节 LC振荡器	(98)
一、LC并联电路	(98)
二、LC振荡器	(99)
三、电路举例	(102)
第三节 RC振荡器	(103)
一、RC相移式振荡器	(103)
二、文氏桥振荡器	(104)
三、电路举例	(107)
第四节 石英晶体振荡器	(108)
一、石英晶体谐振器基本结构和性能	(108)
二、石英晶体振荡器的基本原理	(109)
三、应用举例	(110)
第五节 调制与解调	(111)
一、简介	(111)
二、调制与解调的基本过程	(111)
第六章 直流电源	(116)
第一节 整流与滤波	(116)
一、基本的整流电路	(116)
二、基本的滤波电路	(119)
三、纹波系数	(120)
第二节 直流稳压电路	(120)
一、内阻和稳压系数	(120)
二、并联型稳压电路	(120)
三、串联型稳压电路	(121)
第三节 三端集成稳压器的应用	(126)
一、典型应用	(126)
二、电压连续可调的稳压电路	(126)
三、扩大输出电流	(127)
第四节 可控硅	(127)
一、可控硅简介	(127)
二、可控硅整流电路	(128)
三、双向可控硅	(129)
第五节 单结晶体管	(130)
一、单结晶体管的特性和主要参数	(130)
二、单结晶体管振荡器	(131)
三、单结晶体管构成的可控硅触发电路	(132)
第七章 脉冲数字电路	(135)
第一节 脉冲波形的特征及波形变换	(135)
一、脉冲波形的特征及主要参数	(135)

二、RC串联电路的充放电过程	(136)
三、基本脉冲的变换电路	(139)
第二节 晶体管的开关作用	(144)
第三节 基本逻辑门电路	(145)
一、分立元件门电路	(145)
二、集成门电路	(151)
第四节 双稳态触发器	(156)
一、R-S触发器	(156)
二、J-K触发器	(159)
三、触发器逻辑功能的转换	(161)
四、施密特触发器	(162)
第五节 计数与显示	(164)
一、二进制	(164)
二、计数器	(165)
三、译码器和数字显示	(168)
第六节 单稳态触发器	(174)
一、微分型单稳态触发器	(174)
二、CMOS积分型单稳态触发器	(175)
三、555集成定时器组成的单稳态触发器	(175)
第七节 多谐振荡器	(178)
一、TTL构成的多谐振荡器	(178)
二、集成运放组成的多谐振荡器	(179)
三、555定时器组成的多谐振荡器	(180)
四、石英晶体多谐振荡器	(181)
第八节 模拟量和数字量的转换	(182)
一、数—模转换器	(183)
二、模—数转换器	(186)
第八章 生物医学用电极和换能器简介	(191)
第一节 电极	(191)
一、金属—电解液接界特性	(191)
二、常见的电极	(194)
三、体表电极的等效电路	(195)
第二节 换能器	(196)
一、对医用换能器的基本技术要求	(197)
二、常用换能器简介	(198)
第九章 干扰和噪声	(204)
第一节 干扰的来源和抑制	(204)
一、50Hz磁场感应	(204)
二、50Hz电场影响	(205)

三、抑制50Hz干扰的其它措施举例	(208)
第二节 噪声	(209)
一、仪器内部噪声的种类	(209)
二、放大器的噪声	(210)
第十章 医学信号的显示和记录装置	(213)
第一节 屏幕式显示装置	(213)
一、示波器	(214)
二、示波管	(216)
三、示波原理	(217)
第二节 数字显示装置	(218)
一、液晶数字显示	(218)
二、半导体数字显示	(219)
第三节 笔式记录装置	(219)
一、描笔偏转式记录器	(220)
二、自动平衡式记录器	(221)
第四节 磁带记录装置	(225)
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)
第十一章 医学仪器的安全性	(229)
第一节 安全的基础知识	(229)
一、安全的概念和涉及的范围	(229)
二、人体的电特性	(230)
三、各种能量对人体的作用	(230)
第二节 医用仪器的安全措施	(233)
一、医用仪器常见安全事故的原因	(233)
二、医用仪器的电气安全措施	(235)
三、医用仪器使用、维修和设计的安全措施	(236)
第三节 医用配电系统	(240)
一、接地配电系统	(240)
二、非接地配电系统	(241)
三、等电位接地系统	(241)
四、备用电源系统	(242)
第四节 常规电气安全检测	(242)
一、漏电流的检测	(242)
二、绝缘检测	(243)
三、保护接地的导线阻抗的检测	(243)
四、接地电阻的检测	(243)
第十二章 常用医学仪器简介	(245)

第一节 心电图机	(245)
一、概述	(245)
二、心电图机的主要技术要求	(245)
三、心电图机的总体组成及各部分作用原理	(246)
第二节 多导生理记录仪	(251)
一、概述	(251)
二、SJ-41型生理记录仪	(251)
第三节 心脏起搏器	(255)
一、低频脉冲发生电路	(255)
二、电极与导线	(256)
三、电源	(257)
四、起搏器的主要技术参数	(257)
五、起搏器的发展展望	(257)
第四节 超声诊断仪	(258)
一、超声波的产生和接受装置	(258)
二、医用超声仪器的分类	(259)
三、A型超声诊断仪	(259)
四、B型超声诊断仪	(259)
五、M型超声诊断仪	(262)
六、超声计算机断层成像仪	(263)
第五节 721分光光度计	(264)
一、外型及技术指标	(264)
二、仪器的工作原理	(265)
三、测量电路原理	(265)
四、仪器使用注意事项	(266)
第六节 血液生化分析仪	(267)
一、仪器原理	(267)
二、电路分析	(267)
第七节 血气分析仪	(270)
一、工作原理及其基本结构	(271)
二、AVL940型血气分析仪	(273)
第八节 火焰光度计	(276)
一、火焰光度法原理	(276)
二、火焰光度计的基本结构	(276)
三、主要技术指标	(278)
四、火焰光度计的发展趋势	(279)
第九节 电泳仪	(279)
一、电泳仪的一般结构	(279)
二、电泳仪电源	(280)

三、电泳仪电路简介.....	(280)
第十节 血细胞计数器.....	(282)
一、工作原理.....	(282)
二、血细胞计数器的基本结构.....	(283)
第十一节 医用遥测仪.....	(285)
一、遥测系统的分类.....	(285)
二、遥测系统的组成.....	(285)
第十二节 核医学仪器.....	(288)
一、核医学仪器的基本结构.....	(288)
二、核医学诊断仪器.....	(293)
附录 主要参考书.....	(296)

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、晶体三极管、场效应管、集成运算放大器等，均为半导体器件。构成这些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，用叠加原理和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 半导体器件

一、晶体二极管

(一) 半导体的导电特性

1. 本征半导体 完全纯净的、具有晶体结构的半导体 (Semiconductor) 称为本征 (Intrinsic) 半导体。用得最多的半导体是硅和锗。将硅、锗半导体材料，先经过提纯去掉无用的杂质，再经过拉单晶的工艺，使它们的原子整齐地排列起来，形成单晶体，才能成为用于制造半导体器件的本征半导体。这种本征半导体的内部原子按一定规律整齐排列，致使每个原子的四个价电子，分别与其相邻的四个原子的价电子构成共价键结构，如图1-1所示。在绝对零度，又无光照等外界影响时，本征半导体中的价电子处于相对稳定状态，因而基本上没有自由电子，相当于绝缘体。在常温(300K)时，由于热运动，总有少数价电子挣脱共价键的束缚而成为自由电子，同时就在原来的共价键处留下一个空位称为空穴，形成自由电子—空穴对。这种现象称为本征激发。当共价键上一旦出现空穴，相邻共价键上的电子极易被吸引过来填充这个空穴，同时在这个相邻原子中就出现了另一个空穴。如此继续下去，从而形成共价键电子递补空穴的运动。显然，价电子递补空穴的运动，可以等效为带正电荷的空穴作反向运动。为区别于自由电子的运动，这种运动称为空穴运动。

因此，当半导体两端加上外电压时，半导体中将出现两部分电流：一是自由电子作定向运动形成的电子电流，一是仍被原子核束缚的价电子递补空穴形成的空穴电流。在半导体中，同时存在着电子导电和空穴导电，这是

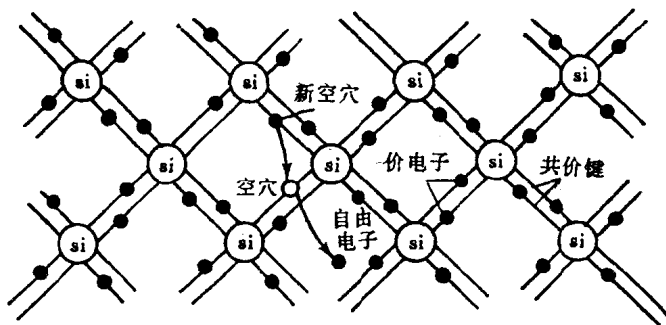


图1-1 本征半导体及本征激发

半导体导电方式的最大特点，也是半导体和金属在导电原理上的本质差别。

自由电子和空穴都称为载流子(Carrier)。

2. 杂质半导体 本征半导体虽然有自由电子和空穴两种载流子,但由于数量极少,导电能力仍然很低。要提高本征半导体的导电能力,必须在其掺入微量的杂质(也必须是一种纯净的元素)。掺杂后的半导体称为杂质半导体。按所掺杂质的不同,可得到N型(Negative type)和P型(Positive type)两种半导体。

(1) P型半导体 在纯净的硅或锗晶体中掺入微量的硼(或其它三价元素),就形成P型半导体。由于掺入硅晶体的硼原子数比硅原子数少得多,因此整个晶体结构基本上不变,只是某些位置上的硅原子被硼原子取代。三价硼原子在与其相邻的四个硅原子构成共价键时,因缺少一个电子而形成空穴。当邻近硅原子的价电子来填补该空穴(相当于空穴跑掉)时,硼原子就成为不能移动的负离子。掺入的每个硼原子都提供一个空穴,因而使半导体中空穴载流子数目大大增加。这种以空穴导电作为主要导电方式的半导体,称为空穴半导体或P型半导体。其中,空穴是多数载流子(简称多子),而由于本征激发产生的自由电子则为少数载流子(简称少子)。

由于硼原子起着接受电子的作用,故把硼原子称为受主原子。

为了简化表示P型半导体,通常只画出不能移动的负离子和可移动的空穴,如图1-2(a)所示。

(2) N型半导体 在纯净的硅或锗晶体中掺入微量的磷(或其它五价元素),就构成N型半导体。由于掺入硅晶体的磷原子数远比硅原子数少得多,使整个晶体结构基本不变,只是在某些位置上的硅原子被磷原子所代替。五价磷原子在与其相邻的四个硅原子构成共价键时,就多出一个价电子。该价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子,而磷原子将成为不能移动的正离子。掺入的每个磷原子都能提供一个自由电子,因而使这种半导体中自由电子数目大大增加。自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式,故称它为电子半导体或N型半导体。其中,自由电子是多数载流子,而空穴则为少数载流子。

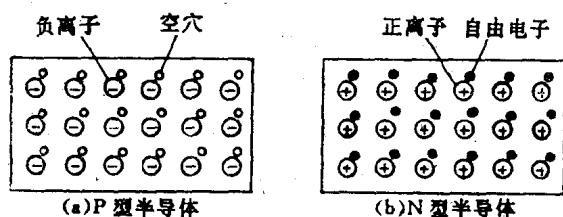


图1-2 杂质半导体

由于磷原子能提供出自由电子,故该原子称为施主原子。

为了简化表示N型半导体,通常只画出其正离子和自由电子,如图1-2(b)所示。

应注意,不论是N型半导体还是P型半导体,虽然它们都有一种载流子占多数,但整个晶体仍是中性的。

(二) PN结的形成及特性

1. PN结的形成 在一块本征半导体中,用一定的工艺使它一边变成P型半导体,另一边变为N型半导体,则在这两种半导体的交界面附近,就会形成一层带电的空间电荷区,称为PN结(PN junction)。

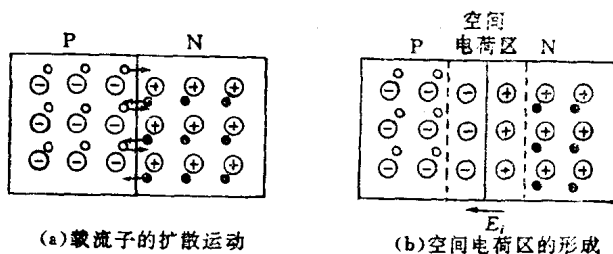


图1-3 PN结的形成

如图1-3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的负离子;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。

扩散和漂移是互相联系,又互相矛盾的。在开始形成空间电荷区时,多数载流子的扩散占优势。但在扩散运动进行过程中,空间电荷层逐渐加宽,内电场逐步加强。于是在一定条件下(例如温度一定),多数载流子的扩散运动逐渐减弱,而少数载流子的漂移运动则逐渐增强。最后,扩散运动和漂移运动达到动态平衡。也就是P区的空穴(多子)向右扩散的数量与N区的空穴(少子)向左漂移的数量相等;对自由电子来讲也是这样。达到动态平衡后,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。在动态平衡时的空间电荷区,就是PN结。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。

2. PN结的导电特性 上面讨论的是PN结没有外加电压时的情况,这时半导体中的扩散和漂移处于动态平衡。当在PN结上加不同极性的外部电压时,PN结则表现出单向导电性。

(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1-4(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,而不利于漂移运动。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。

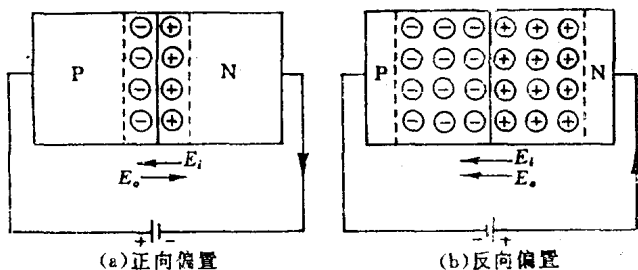


图1-4 PN结的导电性

(2) 当在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,如图1-4(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，其电阻很低，正向电流较大，PN结处于导通状态；当PN结加反向电压时，PN结电阻很高，反向电流很小，PN结处于截止状态。这种特性，称为PN结的单向导电性，它是PN结最重要的电特性。

(三) 晶体二极管和稳压管

1. 晶体二极管

(1) 晶体二极管的结构 二极管(diode)是由一个PN结，引出两个电极，并封装打标而制成。通常用图1-5(a)的符号表示，箭头方向表示二极管正向电流的方向。连接P区的电极称为正极或阳极，连接N区的电极称为负极或阴极。按照晶体二极管的内部结构，可分为点接触型和面接触型两种，如图1-5(b)、(c)所示。

点接触型二极管 是由一根金属触丝与半导体晶片成为点状接触，PN结的面积很小，因而允许通过的电流较小，但其高频性能好，适用于高频检波和用作数字电路中的开关元件。

面接触型二极管 是由两种不同类型的半导体以较大面积接触而形成的PN结，因而允许通过较大的电流，但其工作频率较低，适用于大功率整流电路。

(2) 晶体二极管的特性表示

① 晶体二极管的伏安特性曲线 二极管的单向导电性，可用其伏安特性来表征。所谓二极管的伏安特性，是指加在二极管两端电压 U 与流过管子的电流 I 之间的关系。由于电压用伏(V)表示，电流用安(A)表示，所以把二极管的电压与电流的关系，称为二极管的伏安特性。图1-6给出一个硅二极管的伏安特性曲线。

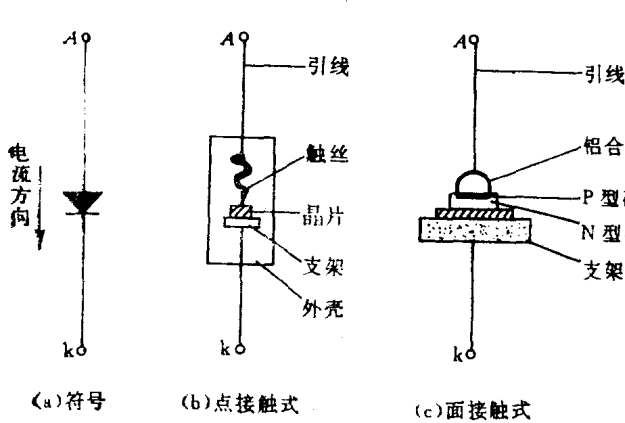


图1-5 晶体二极管符号及结构

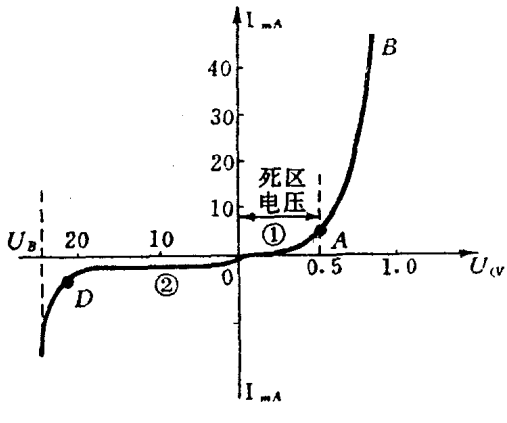


图1-6 二极管的伏安特性曲线

由晶体二极管的正向特性曲线①上看出：当正向电压较小时，由于外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动所造成的阻力，故正向电流很小(见 OA 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或门槛电压等，其大小与材料及环境温度有关。通常，硅管的死区电压约为 $0.5V$ ，锗管约为 $0.2V$ 。当正向电压超过死区电压 U_A 以后，内电场显著被削弱，二极管电阻变小，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)。保证二极管正常工作的导通电压，一般称为正向压降或管压降。硅二极管的管压降通常为 $0.7V$ 左右，而锗二极管的管压降

通常为0.3V左右。对于同一型号的二极管，其管压降具有一定的离散性。

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(OD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 晶体二极管的特性除了用其伏安特性曲线表示外，还可以用数学公式来表达。

根据理论分析，理想二极管的伏安特性可用下式表示

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

式(1-1)称为二极管方程。式中 I 为二极管电流， I_s 为反向饱和电流， U 为二极管外加电压， U_T 称为温度电压当量，在常温(300K)时， $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

若 U 为正值且比 U_T 大4倍以上时，则 $e^{U/U_T} \gg 1$ ，此时二极管的正向电流 $I \approx I_s e^{U/U_T}$ ，说明管子的电流与电压成指数关系(正向特性OB段)。当 U 为负值，且 $|U|$ 比 U_T 大4倍以上时，则 $e^{U/U_T} \approx 0$ ，此时二极管的反向电流 $I \approx -I_s$ ，即当温度一定时，它的反向电流将不随外加反向电压改变为一常数(反向特性OD段)。可见，理论分析的情况与实际二极管的伏安特性基本上是一致的：二极管正向偏置时导通，反向偏置时截止(反向电流很小)，这就是二极管的单向导电性。

应当指出的是，(1-1)式不能描述二极管的反向击穿的现象。

(3) 二极管的主要参数

① 最大整流电流：它是指二极管长期运行时所允许通过的最大正向平均电流值。使用时不允许超过给定的这个指标，否则会损坏二极管。对于大功率管，为了防止过热，还需加散热片。

② 反向击穿电压：它是指二极管反向击穿时的电压值。使用中决不允许超过这个指标，否则二极管将被击穿损坏。

③ 最大反向工作电压：它是指为了确保二极管的安全工作，一般规定反向击穿电压的一半或三分之二为最大反向工作电压。

④ 最大反向电流：它是指当二极管加上最大反向工作电压时，流过二极管的反向电流。反向电流大，说明二极管的单向导电性能差，而且受温度的影响大。

⑤ 最高工作频率：它是指二极管具有单向导电性的最高交流信号的频率。该值主要由PN结的结电容大小决定。PN结是一边带正电，另一边带负电的薄层。这与平行板电容相似，该电容叫做静态结电容。另外，当PN结的厚度由薄变厚时，其中的多数子需要由扩散

电流中和,因而相当于储有电荷的电容,该电容称为动态结电容。静态与动态电容,通常称为结电容。当二极管正向导通时,结电阻小,PN结电容影响较小。但当二极管反向偏置时,

PN结电阻变大,结电容较大,其反向充电速度变慢,使PN结反向截止性能变差,故结电容限制了二极管的最高使用频率。

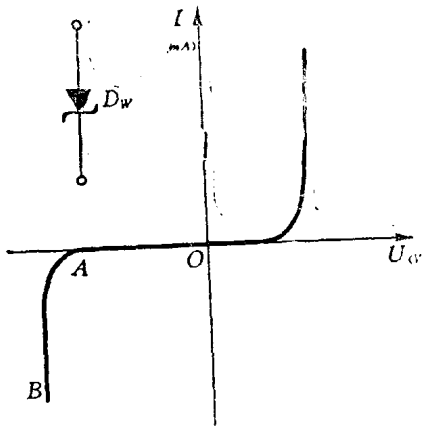


图1-7 硅稳压管的伏安特性及符号

(1) 稳压管的结构及符号 稳压管(Zener diode)就其构造而言,就是一个面接触型硅二极管。因它在电路中能起稳定电压的作用,故名为稳压管。它与一般二极管的主要区别是它工作在反向击穿区。其电路符号如图1-7所示。

(2) 稳压管特性及稳压原理 由图1-7可见,稳压管的伏安特性曲线的形状与普通二极管相似,其重要区别是稳压管的反向特性极为陡峭。

因为稳压管工作于反向击穿区,而其反向特性又十分陡峭,故当其管流变化 ΔI 很大时,其端电压 ΔU 却变化甚微,只要在外电路加有限流电阻,使稳压管不致于击穿而损坏,则稳压管就能起稳定电压的作用。

(3) 稳压管的主要参数

① 稳定电压 U_w :即稳压管在反向击穿后其两端的电压。由于制造工艺问题,对于同一型号的稳压管来说,其稳定电压值也不完全一样。例如2CW18稳压管,其稳定电压为10~12V的范围。

② 稳定电流 I_w :即稳压管的电压等于其稳定电压时的工作电流。

③ 电压温度系数:是指温度每增加 1°C 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 $+0.095\%/^\circ\text{C}$,这就是说,温度每增加 1°C ,它的稳压值将升高0.095%。如果在 20°C 时的稳压值是11V,那么在 50°C 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1-8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。

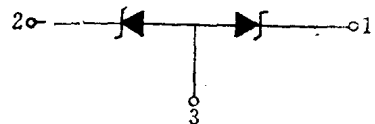


图1-8 具有温度补偿特性的稳压管

④ 动态电阻 r :即稳压管在正常工作区的电压变化量 ΔU 与电流变化量 ΔI 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1-7中稳压管伏安特性曲线愈