

42

TA01-43
574

双元制培训电工电子专业理论教材

电 子 技 术

——模拟电路分册

双元制培训电工电子专业理论教材编委会 编



A0956466



机械工业出版社

本书是职业技术学校推行双元制办学体制的电工电子专业理论教材之一,同时根据高等职业技术教学要求,教材增加了有关内容,也可供高职、高专有关专业使用。全书共分上、下两篇,上篇7章,下篇4章。上篇为基础知识部分,下篇为知识的技术应用部分。本书内容包括二极管及整流电路、三极管及其基本电路、运算放大器的线性应用及光电子器件、特殊敏感性半导体器件和晶闸管基本电路应用等。本书内容力求“新颖”和“实用”,侧重于物理概念表述及半导体器件与电路的紧密结合。书中举例具有工程背景,突出应用性、技术性和实用性。

本书可作为高等职业技术学院、中等职业学校电工、自动化专业的基础教材,也可作为有关工程技术人员和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术——模拟电路分册/双元制培训电工电子专业理论教材编委会编. —北京:机械工业出版社, 2001.9

双元制培训电工电子专业理论教材

ISBN 7-111-09252-X

I. 电… II. 双… III. ①电子技术—教材②模拟电路—教材 IV. TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第058084号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:吴天培 版式设计:冉晓华 责任校对:张佳

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

成都新华印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·14印张·345千字

0 001—5 000册

定价:21.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

双元制培训电工电子专业理论教材编委会

主 任	孙宝源	花 昀	
副 主 任	李超群	李大卫	蒋建华
委 员	(按姓氏笔划排列)		
	吕景泉	李本元	吴天培
	季福全	姚柳雄	贾文鹏
	徐琤颖		

本书主编	徐琤颖		
副 主 编	孙淑云		
参 编	(按章节顺序)		
	翟秀军	孙利华	姚 吉
主 审	尤建明		

编者的话

本书是我们在从事多年职业技术教学实践和经验的基础上编写而成的，可作为高等和中等职业技术学校教材。本书力求“新颖”和“实用”。传统的电子技术教材多是先讲器件的应用原理及其特性，而后再分析各种电路及系统。本教材在这方面作了较大的改革。它将器件和电路紧密结合起来讲述，在讲某一类器件原理及其特性后，紧接着介绍该类器件在模拟电路中的应用和工程分析方法。我们这样做，不是内容上简单的重新组合，而是加强模拟电子技术实用性的体现。无疑，电子技术的核心是器件，电子技术是随着器件发展而发展的。利用半导体器件的非线性和受控性实现各种电子电路的功能，将器件和电路相结合讲，强调“管为路用”，不仅可以从本质上了解电路的工作原理，同时也可解决教学枯燥乏味的问题。

本教材在对内容上，注意到取材新颖，叙述简练，分析透彻。譬如，随着功率半导体器件、特殊敏感性半导体器件（如压敏电阻、热敏电阻、霍尔元件及光敏元件）和光电子技术发展，这一部分内容在教材中占有一定的篇幅，因为，这些基本内容是从事电子技术人员必需的知识。加强集成电路器件及其应用的介绍，对电路的分析则大为简化。对于目前已很少使用的 PNP 锗三极管和通用晶闸管等，也给予少量篇幅介绍。

按职业技术教育培养第一线的应用型技术人才的要求，本书注意把实例和工程应用举例与基础原理紧密结合，以增强其实用性。在某种意义上讲，有关电子技术的工艺流程设计、设备调试和维修技术，单靠书本是学不到的，唯有通过实践和借助实验室的工作经验才能真正学到手。电子学的实践经验必须由学生从实践中获得。教科书只能用指南的形式提供电路学习的一般方法以及教会学生辨识电子系统组成的基本电路，本书的意图是避免对原理讲解过细，而以指导学生自己领悟为主进行编写的，培养学生独立思考和自学的能力。

本书共分上、下两篇，上篇为基本知识，下篇为技术应用。总课时为 64 学时，各院校可根据实际情况决定内容的取舍，部分内容可以指定学生自学。基本知识部分为各专业必读教材，技术应用部分可根据专业需要选学某些章节。参加本书编写工作的有翟秀军（上篇的第 1 章、第 2 章、第 3 章和第 4 章），孙利华（上篇的第 5 章、第 6 章和第 7 章），孙淑云（下篇的第 8 章），姚吉（下篇的第 9 章、第 10 章和第 11 章），中德职业技术学院副院长徐琤颖任主编，并负责全书统稿。上海大众汽车有限公司尤建明任主审。限于作者的水平有限，书中难免有错误和纰漏，恳请专家、同仁和广大读者批评指正。

前 言

“双元制”是德国等发达国家发展职业技术教育的一种先进的办学体制，被誉为二战后德国经济腾飞的“秘密武器”，其特点是企业与职业学校合作共同完成培养人才的任务。培训以企业为主，因此培养出来的人才能满足企业的要求；学习理论与学习技能，以技能为主，既注重基础技能的培养，更注重专业技能的训练，培养出来的是复合型实用人才；同时注重对学生解决问题的能力和社会能力的培养，以适应现代化大生产共同合作完成培训任务的要求。

改革开放以来，我国许多省、市和企业先后引进或借鉴“双元制”办学经验，培养出了一大批受企业欢迎、掌握现代科技技能的复合型技工。这株由日尔曼民族培养出的美丽奇葩，一经移栽到华夏大地的沃土之上即开放出鲜艳夺目的花朵。实践证明“双元制”基本适合我国国情，并具有强大的生命力。但是，由于多年来没有完整的、系统的、既能反映“双元制”特点、又适合我国国情的培训教材，已成为阻碍“双元制”在我国推广和发展的原因之一。为此，天津中德培训中心和上海大众汽车有限公司在机械工业出版社的支持下编写了这套双元制电工电子理论课培训教材。它包括《电工技术》、《电子技术——模拟电路分册》、《电子技术——数字电路分册》。在编写中我们特别注重保持“双元制”教材的特点，既保持教材的先进性、适用性、多样性以及形式的直观性，又特别注重结合我国的国情；注重专业理论为专业技能服务的基本原则和注重对学生专业能力、解决问题的能力和社会能力的培养。但是，由于我们实践的时间较短，对教材内容的选择、内容的深度和广度的把握缺乏经验，难免会详略不当、深浅不宜，对形式的选用也会有欠妥之处。因此，希望读者能提出宝贵意见，使其日趋正确、不断完善和适合读者的要求，以期为国家培养出更多、更好的复合型实用人才。

双元制培训电工电子专业理论教材编委会

2000年10月

目 录

前 言
编者的话

上篇 半导体器件

第1章 半导体二极管	1
1.1 概述	1
1.2 半导体原理	1
1.3 整流和开关二极管	5
1.4 整流和开关二极管的应用	8
1.5 稳压二极管	16
1.6 变容二极管	20
1.7 肖特基二极管(热载流子二极管)	23
复习思考题	24
第2章 半导体三极管(晶体管)	26
2.1 概述	26
2.2 基本原理	26
2.3 特性曲线	30
2.4 特性参数	33
2.5 三极管的结构规格	38
2.6 工作点的调整 and 稳定	40
复习思考题	45
第3章 场效应管	47
3.1 概述	47
3.2 结型场效应管	48
3.3 MOS场效应管[MOSVF(E)]	54
3.4 应用	58
复习思考题	60
第4章 光半导体和显示器件	61
4.1 概述	61
4.2 内光电效应	61
4.3 光敏性的光半导体	61
4.4 发光性和光半导体	69
4.5 光耦合器	72
4.6 显示器件	73
复习思考题	76
第5章 具有特殊性能的半导体器件	77

5.1 概述	77
5.2 压敏电阻	77
5.3 热敏电阻器	79
5.4 磁敏半导体	85
5.5 各国对特殊性能的半导体器件型号、命名及其特性参数	89
复习思考题	98
第6章 集成电路	99
6.1 概述	99
6.2 双极型元件	99
6.3 运算放大器	100
6.4 集成电路型号组成及符号意义	109
复习思考题	110
第7章 晶闸管	111
7.1 晶闸管	111
7.2 单结晶体管	111
7.3 二极管晶闸管	116
7.4 单向三极管晶闸管	120
7.5 双向三极管晶闸管(Triac)	132
复习思考题	137

下篇 技术应用

第8章 整流电路	139
8.1 概述	139
8.2 基本原理与参数	139
8.3 滤波网络	147
8.4 倍压电路	149
复习思考题	151
第9章 晶体管放大电路	152
9.1 概述	152
9.2 单级小信号放大器	153
9.3 多级小信号放大器	165
9.4 功率放大器	173
9.5 差分放大器	178
复习思考题	180
第10章 运算放大器	182
10.1 概述	182

10.2 运算放大器的电路和参数	183	第 11 章 恒流源和恒压源	205
10.3 运算放大器的基本电路	187	11.1 概述	205
10.4 干扰补偿	190	11.2 恒流源	205
10.5 反馈支路不取决于频率的运算 放大器	192	11.3 稳压管实现的恒压源	208
10.6 反馈支路取决于频率的运算放大器 ...	198	11.4 晶体管稳压源	209
10.7 运算放大器实现的功率放大器	202	11.5 运算放大器稳压源	210
复习思考题	204	11.6 集成固定稳压器	211
		复习思考题	214

上篇 半导体器件

第1章 半导体二极管

1.1 概述

半导体器件是近代电子学的重要组成部分。由于半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点而得到广泛应用。半导体器件是组成模拟电路的核心元件，电路的性能与其所用器件的特性有密切的关系。因此，半导体的基本结构、工作原理、特性和参数是学习电子技术和分析电子电路必不可少的基础。半导体器件种类很多，本章只讨论半导体二极管（包括稳压管），以后将逐步介绍一些常用半导体器件。

1.2 半导体原理

所谓半导体，顾名思义，就是它的导电能力介于导体和绝缘体之间。很多半导体的导电能力在不同条件下有很大的差别。如有些半导体对温度的反应特别灵敏，当环境温度升高时，它们的导电能力要增强很多，人们利用这种特性做成了各种热敏电阻。又如有些半导体受到光照时，它们的导电能力变得很强；当无光照时，又变得象绝缘体那样不导电，人们利用这种特性做成了各种光敏电阻。如果在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质后，它的导电能力就可增加几十万乃至几百万倍。利用这种特性就做成了各种不同用途的半导体器件，如半导体二极管、半导体三极管、场效应管及晶闸管等。

1.2.1 半导体材料

目前，用得最多的半导体是硅（Si）和锗（Ge），它们的原子结构图如图 1-1 所示。它们各有四个价电子，都是四价元素。将硅或锗材料提纯（去掉无用杂质）并形成单晶后，所有原子便基本排列整齐，原子按四角形系统组成晶体点阵，每个原子之间的距离相等。半导体一般都具有这种晶体结构，所以半导体也称为晶体，这就是晶体管名称的由来。

本征半导体就是完全纯净的，具有晶体结构的半导体。

在本征半导体的晶体结构中，每一个原子与相邻的四个原子结合。每一原子的一个价电子与另一原子的一个价电子组成一个电子对，这对价电子是每两个相邻原子共有的，它们把相邻的原子结合在一起，构成共价键结

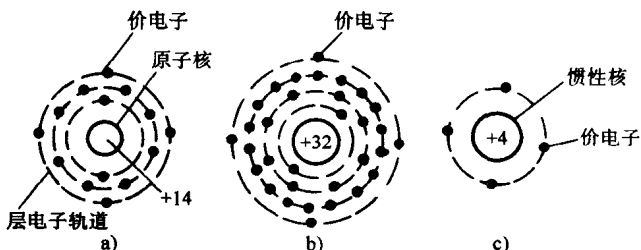


图 1-1 硅和锗原子结构示意图

a) 硅（Si）原子结构 b) 锗（Ge）原子结构

c) 硅和锗原子结构简化模型

构,如图 1-2 所示。

在共价键结构中,原子最外层具有八个电子而处于较为稳定的状态,但共价键中的电子还不像在绝缘体中的价电子被束缚得那样紧,在获得一定能量后(温度升高或受光照),即可挣脱原子核的束缚(电子受到激发),成为自由电子。温度越高,晶体中产生的自由电子越多。

在电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,共价键中就留下一个空位,称为空穴。在一般情况下,原子是中性的,当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,原子的中性便被破坏,而显出带正电。电子和空穴总是成对产生,称为电子空穴对,如图 1-3 所示。

空穴也能够运动,这是价电子填补共价键上空位的运动的结果。例如在图 1-3 上,共价键 A 处有一个空穴,附近共价键上的价电子便可能过来填补这个空穴。假设共价键 B 处的电子去填补了这个空穴,于是, A 处的空穴消失, B 处出现了空穴,这就如同空穴从 A 处移到了 B 处。如果共价键 C 处的价电子又来填补 B 处的空穴,那么空穴便又从 B 处移到 C 处。如此继续下去,就好像空穴在运动。而空穴运动的方向与价电子运动的方向相反,因此空穴运动相当于正电荷的运动。

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所形成的电子电流;一是仍被原子核束缚的价电子递补空穴所形成的空穴电流。因此在半导体中同时存在着电子导电和空穴导电,这是半导体导电方式的最大特点,也是半导体和金属相比在导电原理上的本质区别,自由电子和空穴都称为载流子。

本征半导体中自由电子和空穴总是成对出现,同时又不断复合。在一定温度下,载流子的产生和复合达到动态平衡,于是半导体中的载流子(自由电子和空穴)便维持一定数目。温度越高,载流子数目越多,导电性能也就越好。所以,温度对半导体器件性能的影响很大。

1.2.2 N 型和 P 型半导体

本征半导体中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。如果在其中掺入微量的杂质(某种元素),将使掺杂后的半导体(杂质半导体)的导电性能大大增强。由于掺杂的元素不同,杂质半导体可分为两大类:

一类是在硅或锗的晶体中掺入磷(或其它五价元素)。磷原子的最外层有五个价电子,由于掺入硅或锗晶体的磷原子数比硅或锗的原子数少得多,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磷原子取代。磷原子参加共价键结构只需四个价电子,多余的第五个价电子很容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子。于是半导体中自由电子数目大量增加,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,如图 1-4 所示。在 N 型半导体中,自由电子是多数载流子,空穴是少数载流子。

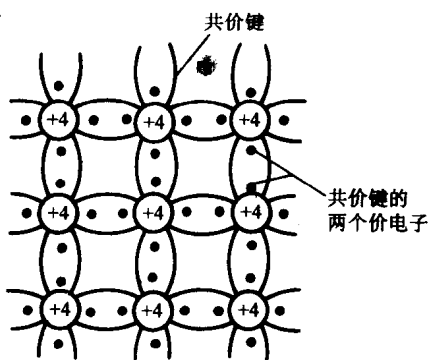


图 1-2 晶体的共价键结构

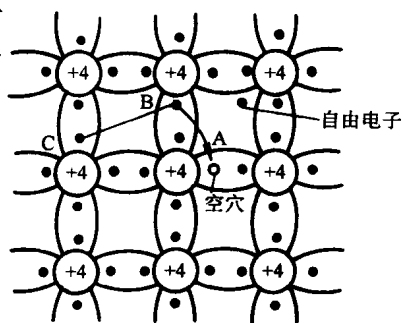


图 1-3 本征激发产生电子空穴对

另一类是在硅或锗晶体中掺入硼（或其它三价元素）。每个硼原子只有三个价电子，故在构成共价键结构时，因缺少一个电子而产生一个空穴。当相邻原子中的价电子受到热的或其它的激发获得能量时，就有可能填补这个空穴，而在该相邻原子中便出现一个空穴，如图 1-5 所示。每一个硼原子都能提供一个空穴，于是在半导体中就形成了大量空穴。这种以空穴导电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，自由电子是少数载流子。

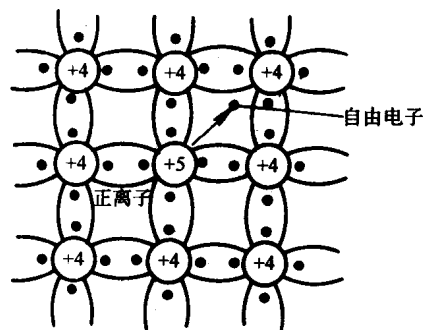


图 1-4 N 型半导体晶体结构示意图

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，但是整个晶体仍然是不带电的。

1.2.3 PN 结

P 型或 N 型半导体的导电能力虽然大大增强，但并不能直接用来制造半导体器件。通常采用半导体制造工艺将 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起，在它们的交界面处就形成 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

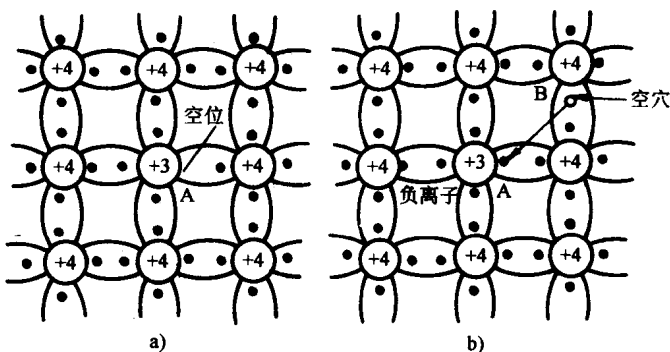


图 1-5 P 型半导体晶体结构示意图

a) 空位 b) 空穴和负离子

1.2.3.1 PN 结的形成

当采用半导体制造工艺将 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时，在其交界面处产生很大的载流子浓度差。因 N 型区中电子载流子浓度高，P 型区空穴载流子浓度高，电子和空穴都要从浓度高处向浓度低处扩散，多数载流子的定向运动，称为扩散运动。由于电子和空穴是两种相异的载流子，它们伴随着扩散运动将会在交界面附近复合掉。于是在 N 型区一边因电子的消失而留下不能移动的正离子，在 P 型区一边因空穴消失而留下不能移动的负离子。这样，在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面处形成一个空间电荷区，如图 1-6 所示。这个空间电荷区称为 PN 结。

形成空间电荷区的正负离子不能移动，不参与导电，在这个区域内载流子很少，所以空间电荷区的电阻率很高。由于这个区域内的两种多数载流子已扩散到对方并相互复合掉了（消耗尽了），所以空间电荷区有时又称为耗尽层。

如图 1-6c 所示，正负空间电荷在交界面两侧形成一个电场，称为内电场，其方向从带正电的 N 区指向带负电的 P 区。由 P 区向 N 区扩散的空穴在空间电荷区将受到内电场的阻力，而由 N 区向 P 区扩散的自由电子也将受到内电场的阻力，即内电场对多数载流子（P 区空穴和 N 区自由电子）的扩散运动起阻挡作用，所以空间电荷区又叫阻挡层。

空间电荷区的内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，这是一个方面；另一方面，内电场对少数载流子（P 区的自由电子和 N 区的空穴）则起推动作用，使它们越过空间电荷区，进入对方。少数载流子在内电场作用下有规则的运动叫漂移运动。

扩散和漂移是互相联系、互相矛盾的。当开始形成空间电荷区时，扩散运动占优势，随

着扩散运动的增强,空间电荷区逐渐加宽,内电场也逐步加强;而内电场的形成和增强则阻碍两边多数载流子的扩散运动,有利于两边少数载流子的漂移运动。最后,扩散运动和漂移运动达到动态平衡,空间电荷区的宽度基本上稳定下来,PN结就处于相对稳定的状态。

1.2.3.2 PN结的工作原理

PN结在没有加外电压时,半导体中的扩散和漂移处于动态平衡。如果在PN结上加正向电压即外电源的正端接P区,负端接N区(图1-7),由图可见,外电场与内电场的方向相反,因此扩散与漂移运动的平衡被破坏。外电场驱使P区的空穴进入耗尽层抵消一部分负空间电荷,同时N区的自由电子进入耗尽层抵消一部分正空间电荷。因此,整个空间电荷区变窄,内电场被削弱,多数载流子的扩散运动增强,形成较大的扩散电流(正向电流)。在一定范围内,外电场越强,正向电流(P区流向N区的电流)越大,这时PN结呈现低阻状态。正向电流包括空穴电流和电子电流两部分。空穴和电子虽然带有不同的极性,但由于它们的运动方向相反,所以电流方向一致。外电源不断向半导体提供电荷,使电流得以维持。

若给PN结加反向电压,即外电源的正端接N区,负端接P区(图1-8),则外电场与内电场方向一致,也破坏了扩散与漂移运动的平衡。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走,使得空间电荷增加,空间电荷区变宽,内电场增强,使多数载流子的扩散运动难以进行。但另一方面,内电场的增强也加强了少数载流子的漂移运动。在外电场的作用下,N区中的空穴越过PN结进入P区,P区中的自由电子越过PN结进入N区,在电路中形成了反向电流。由于少数载流子数量很少,因此反向电流不大,即PN结呈现的反向电阻很高。又因为少数载流子是由于价电子获得热能激发挣脱共价键的束缚而产生的,环境温度愈高,少数载流子的数量愈多。所以温度对反向电流的影响很大。

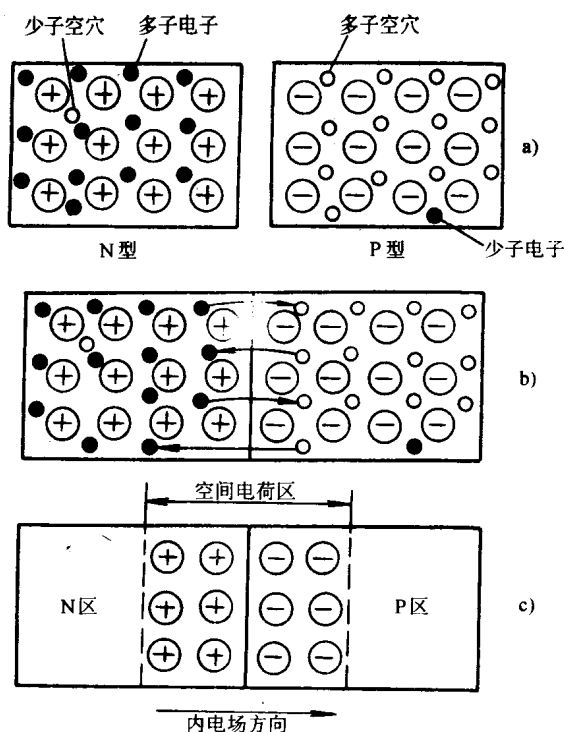


图 1-6 PN 结的形成

a) P 型和 N 型半导体

b) 多数载流子扩散 c) 空间电荷区

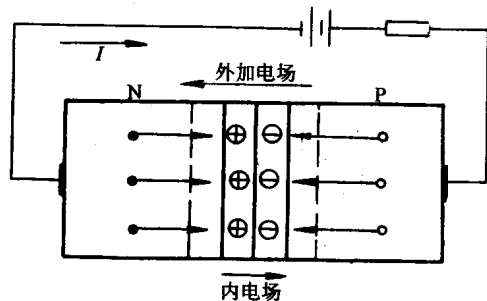


图 1-7 外加正向电压时的 PN 结

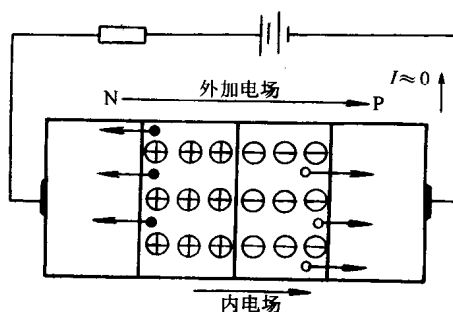


图 1-8 外加反向电压时的 PN 结

由以上分析可知：PN 结具有单向导电性，即在 PN 结上加正向电压时，PN 结电阻很低，正向电流较大，PN 结处于导通状态；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。

1.3 整流和开关二极管

半导体二极管实际上就是由一个 PN 结加上接触电极、引出线和管壳构成。前面介绍的 PN 结单向导电特性也就是半导体二极管所具有的特性。图 1-9 是二极管的符号及内部结构示意图，图中箭头的指向表示二极管单向导电时的电流方向，二极管的文字符号为 VD。

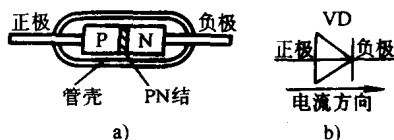


图 1-9 二极管符号及内部结构示意图

a) 内部结构 b) 符号

1.3.1 特性曲线

二极管既然是一个 PN 结，它当然具有单向导电特性。如图 1-10 所示，当外加正向电压很低时，由于外电场还不能克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力，所以正向电流很小，几乎为零。当正向电压超过一定数值后，内电场被大大削弱，电流增长很快，该正向电压称为死区电压，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 0.1V。导通时的正向压降，硅管约为 0.6~0.8V，锗管约为 0.2~0.3V。

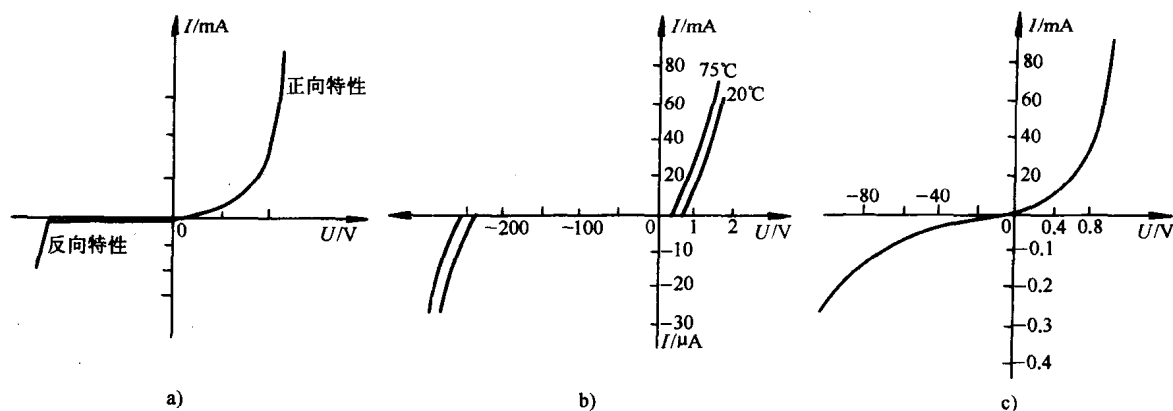


图 1-10 二极管的伏安特性曲线

a) 理论特性 b) 硅管特性 c) 锗管特性

在二极管上加反向电压时，由于少数载流子的漂移运动，形成很小的反向电流。反向电流有两个特点，一是它随温度的上升增长很快；二是在反向电压不超过某一范围时，反向电流的大小基本恒定，而与反向电压的高低无关，所以通常称它为反向饱和电流。而当外加反向电压过高时，反向电流将会突然增大，二极管失去单向导电特性，这种现象称为击穿。二极管被击穿后，一般不能恢复原来的性能，便失效了。击穿发生的原因之一是处于强电场中的载流子获得足够大的能量碰撞晶格而将价电子碰撞出来产生电子空穴对，新产生的载流子在电场作用下获得足够能量后又通过碰撞产生电子空穴对，如此形成连锁反应，反向电流越来越大，最后使二极管反向击穿；原因之二是强电场直接将共价键的价电子拉出来产生电子

空穴对, 形成较大的反向电流。发生击穿时加在二极管上的反向电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。

1.3.2 特性参数

二极管的参数是正确使用二极管的依据, 各种管子的参数由制造厂家给出。二极管的主要参数有

1. 最大整流电流 (平均值) I_{OM} I_{OM} 是指二极管长期正常使用时允许流过二极管的最大正向平均电流。使用时必须注意, 通过二极管的正向平均电流不能超过这个数值, 否则将损坏二极管。

2. 最高反向工作电压 U_{RM} U_{RM} 是保证二极管不被击穿而给出的反向峰值电压, 一般是反向击穿电压的一半或三分之二。

3. 反向电流 I_R I_R 是指二极管上加上一一定的反向工作电压时的反向电流值。 I_R 小, 说明管子单向导电特性好。 I_R 受温度的影响大。硅管的 I_R 较小, 一般在几个微安以下; 锗管的 I_R 较大, 是硅管的几十到几百倍, 例如, 在 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 时, 2CZ52A 有 $I_R \leq 5\mu\text{A}$, 而 2AP6 的 $I_R \leq 250\mu\text{A}$ 。

4. 正向压降 U_{on} U_{on} 是指通过最大整流电流时二极管两端的正向电压 (平均值)。一般锗管为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$, 硅管为 $0.6 \sim 0.8\text{V}$ 。

5. 最高工作频率 f_M 二极管在高频工作时, 由于 PN 结的电容效应, 单向导电作用退化, 最高工作频率就是指二极管的单向导电作用开始明显退化时的交流信号的频率。

1.3.3 Si、Ge 和 Se 二极管的特点

二极管根据制作材料不同分为 Si、Ge 和 Se 二极管, 表 1-1 列出几种管子的参数及特性曲线。

表 1-1 Si、Ge 和 Se 二极管的参数及特性曲线

参数	Si 二极管	Ge 二极管	Se 二极管
导通电压 U_{ON}/V	0.5~0.8	0.2~0.4	0.6
最高反向工作电压 U_{RM}/V	80~1500	40~100	20~30
反向饱和电流 $I_{RSM}/\mu\text{A}$	5~500nA	10~500	100~500
最高工作频率 f_M/kHz	8	10	5
伏安特性曲线图			

Se 二极管常用在一些整流设备中作过压保护器件, 一般并接在整流器输入端或输出端。它常由单个硒片串并联而成, 所以又叫硒堆, 见图 1-11。硒片的主体是一片铝的底板, 硒层通过高温蒸发工艺覆盖在铝质基片上。硒片过载能力很强, 工作中若出现过电压, 它只是局部击穿, 当电压恢复正常后, 它仍恢复功能, 只在击穿处留下疤痕。每一硒片允许承受反向电压 (有效值) 约为 $20 \sim 30\text{V}$, 允许通过电流约为 $25 \sim 40\text{mA}/\text{cm}^2$ 。

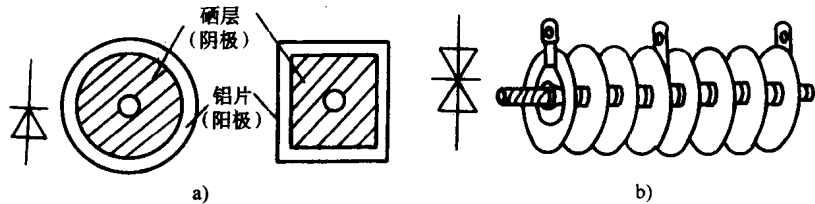


图 1-11 硒片与硒堆
a) 硒片 b) 硒堆

1.3.4 原始参数表举例

表 1-2 中列出一些国产二极管参数，以供参考。

表 1-2 国产半导体二极管参数

1. 2AP1~7 检波二极管（点接触型锗管，在电子设备中作检波和小电流整流用）							
参 数 型 号	最大整流电 流 I_{OM}/mA	最高反向 工作电压 (峰值) $\backslash V$	反向击穿电 压 (反向电流 为 $400\mu A$) $\backslash V$	正向电流 (正 向电压为 IV) $\backslash mA$	反向电流 (反向 电压分别为 $10V, 100V$) $\backslash \mu A$	最高工作 频率 $\backslash MHz$	极间电容 $\backslash PF$
2AP1	16	20	≥ 40	≥ 2.5	≤ 250	150	≤ 1
2AP7	12	100	≥ 150	≥ 5.0	≤ 250	150	≤ 1

2. 2CZ52~57 系列整流二极管（应用于电子设备中的整流电路中）					
参 数 型 号	最大整流电 流 $\backslash A$	最高反向电 压 (峰值) $\backslash V$	最高反向工作电 压下的反向电流 ($125^{\circ}C$) $\backslash \mu A$	正向压降 (平均值) ($25^{\circ}C$) $\backslash V$	最高工作频率 $\backslash kHz$
2CZ52	0.1	25 50 100 200	1000	≤ 0.8	3
2CZ54	0.5	300 800 1000	1000	≤ 0.8	3
2CZ57	5	1200 2400 3000	1000	≤ 0.8	3

1.3.5 二极管的命名和标示

二极管根据其外型、结构、材料、功率和用途分成各种类型，这些不同类型的管子都按国家标准来命名，它由四部分组成，其命名方法见表 1-3。

表 1-3 二极管命名方法

第一部分（数字）		第二部分（汉语拼音字母）		第三部分（汉语拼音字母）		第四部分（数字）
电极数		材料和特性		二极管类型		同类管子序号
符号	含义	符号	含义	符号	含义	表示同类型管中某些性能 参数上有差别
2	二极管	A	N 型锗	P	普通管	
		B	P 型锗	Z	整流管	
		C	N 型硅	K	开关管	
		D	P 型硅	W	稳压管	
		E	化合物	L	整流堆	
				C	参量管	
				U	光电器件	

1.3.6 二极管的制作方法

二极管按制作方法可分为点接触型、面接触型和平面型等几种，如图 1-12 所示。

点接触型二极管的管芯结构如图 1-12a 所示。用一根含有“杂质”元素的细金属丝压在

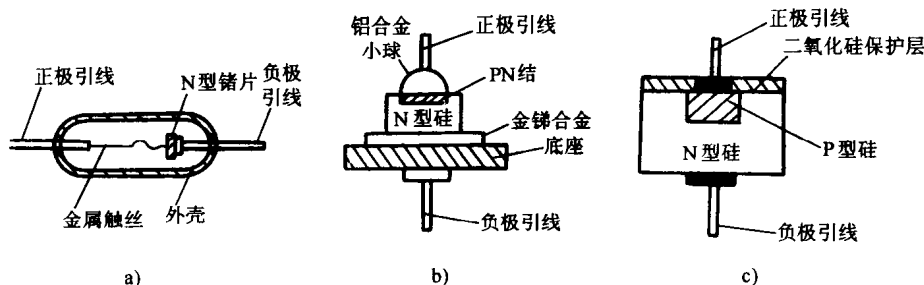


图 1-12 二极管结构示意图

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 平面型

硅或锗晶片上，经过电处理，部分杂质原子掺入到晶片上，从而形成一个导电类型与原来晶片相反的区域，构成 PN 结。由于金属丝很细，形成 PN 结面积很小，所以点接触型二极管的极间电容很小，允许通过的电流小。适用于高频电路，如 2AP 系列的二极管。

面接触型二极管的管芯结构如图 1-12b 所示。将小铝球置于 N 型硅片上，通过烧结工艺，在铝球下面形成一薄层 P 型硅，它与下面的 N 型硅构成一个 PN 结，面结构二极管的特点是允许通过的电流可比点接触型大数倍、数十倍甚至数万倍，但结面积大，结电容大，所以工作频率低。如 2CP 系列二极管。

平面型二极管的管芯结构如图 1-12c 所示。它是利用“平面工艺”制成的。这种管子的性能稳定，结面积的大小可以控制，结面积大时，可以通过大电流，适合于大功率整流；若要求结电容小，以便在较高频率下工作，则结面积可以做得较小，如脉冲数字电路中用的开关管。

1.3.7 二极管的外壳结构

因为功能和用途的不同，二极管大小不同，外形和封装各异。图 1-13 中，从左到右是由小功率到大功率的几种常见二极管的外形。从二极管使用的封装材料看，小电流的二极管常用玻璃壳和塑料壳封装；电流较大的二极管，工作时 PN 结温度较高，常用金属外壳封装，外壳就是一个电极并制成螺栓形，以便与散热器联接成一体。随着新材料、新工艺的应用，二极管采用环氧树脂、硅酮塑料或微晶玻璃封装也比较常见。

二极管外壳上一般印有符号表示极性，正、负极的引线与符号一致。有的在外壳一端印有色圈表示负极；有的在外壳一端制成圆角形来表示负极；但也有的在正极端打印标记或用红点来表示正极。这一点在使用时要特别注意。

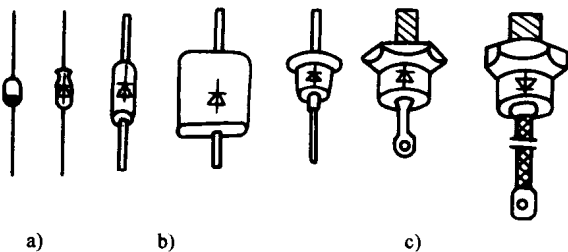


图 1-13 二极管封装图

a) 玻璃封装 b) 塑料封装 c) 金属封装

1.4 整流和开关二极管的应用

1.4.1 整流电路

所谓“整流”，就是把交流电变成直流电的一种转换方法。很多电子设备要用整流电源。能将平均值为零的正弦波交流电压变换为平均值不为零的单向脉冲直流电压的器件叫整流器。由于二极管具有单向导电的伏安特性，因而可用来作成各种整流器。

一般在小功率（指 1kW 以下）直流电源中，整流电路多采用单相整流电路，即由单相交流电源供电。常用的整流电路有半波、全波、桥式和倍压整流等形式。

1.4.1.1 单相半波整流电路

单相半波整流电路如图 1-14a 所示，它由电源变压器 T、二极管 VD 以及负载电阻 R_L 组成。

图 1-14a 是利用二极管的单向导电特性，把二极管串联在交流电源 u_1 和负载 R_L 之间，把交流电的半个波“切去”，而在负载上就得到了直流电压 u_0 ，但 u_0 具有很大的“脉动”，如同人的脉搏跳动一样，所以叫脉动电压。

图中 T 表示电源变压器，二次侧电压 u_1 的变化规律与一次侧电压 u 一样，用函数式表示为

$$u_1 = U_{1m} \sin \omega t = \sqrt{2} U_1 \sin \omega t \quad (1-1)$$

式中， U_{1m} 和 U_1 分别为变压器二次侧电压 u_1 的最大值和有效值。下面就图 1-14c、d 所示波形图来进行分析，设二极管正向导通时的电压降忽略不计。

在 $\omega t = 0 \sim \pi$ 时间内，a 点电位高于 b 点电位，二极管导通，产生电流 i_1 (i_0)，流过负载 R_L ，在 R_L 上的电压降为 u_0 ，见图 1-14c 中的 u_0 波形。

在 $\omega t = \pi \sim 2\pi$ 时间内，b 点电位高于 a 点电位，二极管承受反向电压，不导通，因此， $u_0 = 0$ ，见图 1-14c 中的 u_0 的波形。

如此下去，即把电网中来的交流电转变为负载上的直流电。由图 1-14c 中 u_0 的波形可见，这种整流电路只利用了电源电压 u_1 的半个周期，所以叫半波整流电路。经过整流后的电压平均值一般称为整流电压，用 U_0 表示。这里所说的平均值是指整流电压瞬时值 u_0 波形所围的面积（见图 1-14c 中竖线阴影部分）在一个周期内的平均值，即

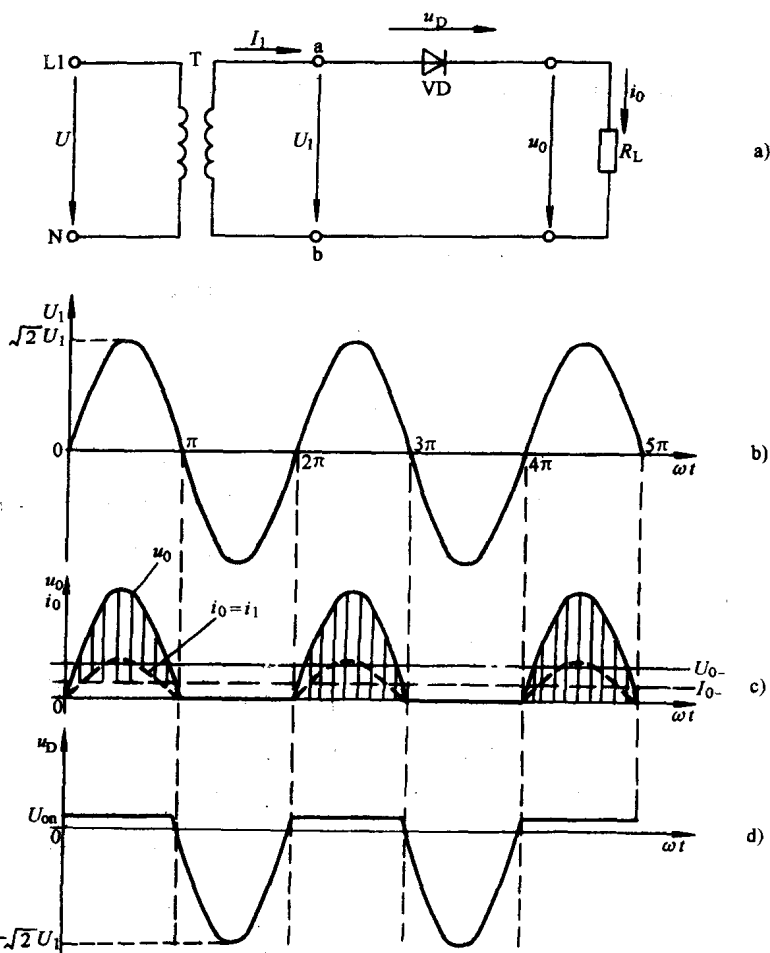


图 1-14 单相半波整流电路及其波形

a) 单相半波整流电路 b) 交流电源波形
c) 半波整流波形 d) 整流二极管反向电压波形

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} U_1 \sin \omega t d(\omega t) = 0.45 U_1 \quad (1-2)$$

也就是说半波整流电路的整流电压平均值 U_0 等于交流电源电压有效值 U_1 的 0.45 倍。例如, 将交流 220V 电源用半波整流电路直接整流, 则得整流电压 $U_0 = 0.45 \times 220V = 99V$ 。根据式 (1-2) 可以在知道 U_1 时计算出 U_0 , 也可以在知道整流电压 U_0 时求 U_1 , 即

$$U_1 = \frac{U_0}{0.45} = 2.22 U_0$$

从电路的工作过程又可以看出, 流过二极管的电流 i_D 和流过负载 R_L 的电流 i_0 是一个电流, 这个电流的平均值为

$$I_D = I_0 = \frac{U_0}{R_L} \quad (1-3)$$

根据此式可以选择二极管的电流定额。

再看一下二极管在工作过程中所承受的最大电压是多少。由图 1-14d 的 u_D 波形可见, 最大电压出现在二极管 VD 不导通期间, 是反向电压, 其最大值为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_1 = \frac{\sqrt{2} U_0}{0.45} = 3.14 U_0 \quad (1-4)$$

由此式可以选择二极管的电压定额。

例 1 某厂需要一直流电源, 采用单相半波整流电路, 交流电源电压为 220V, 负载电阻为 75Ω , 要求输出直流电压 7.5V。试选择整流二极管的型号, 并求出变压器二次侧电压有效值及其变比。

解 通过负载的电流

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} = \frac{7.5V}{75\Omega} = 0.1A = 100mA$$

通过二极管的平均电流 I_D 即是电流 I_0 。

变压器二次侧电压 U_1 和二极管承受的最高反向电压 U_{RM} 为

$$U_1 = \frac{U_0}{0.45} = 2.22 U_0 = 2.22 \times 7.5V = 16.7V$$

$$U_{RM} = 3.14 U_0 = 3.14 \times 7.5V = 23.6V$$

根据计算所得 I_D 和 U_{RM} 的数值, 查晶体管手册选一合适的管子。此处可选用 2CP11 (100mA、50V)。

变压器电压比

$$K = \frac{U}{U_1} = \frac{220}{16.7} \approx 13.1$$

1.4.1.2 单相全波整流电路

为了利用电源的负半波, 可以采用全波整流电路。它由两个半波整流电路组合而来, 且变压器二次绕组引出一个中心抽头, 多用一个二极管, 见图 1-15a 所示电路。变压器二次绕组的中心抽头, 把二次侧电压分成大小相等而相位相反的两个电压 U_1 (变压器二次侧电压是以二次绕组的中心点为参考点, 所以两个二次侧电压的相位相反)。

在 $0 \sim \pi$ 这半周期内, a 点电位高于 b 点电位, 于是 VD1 导通, VD2 截止。这时电流通路如图中实线箭头所示, 与半波整流电路的工作情况是一样的。在 $\pi \sim 2\pi$ 这半周期内, b 点