



“十三五”普通高等教育规划教材

DIANZI JISHU JICHU

电子技术基础

(第二版)

高安芹 朱传琴 主 编
杨露露 赵笑笑 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

电子技术基础

(第二版)

主 编 高安芹 朱传琴
副主编 杨露露 赵笑笑
编 写 王亚盛 崔西友



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育规划教材。

本书共分为八章,主要内容有半导体二极管及直流电源电路、晶体管及基本放大电路、集成运算放大器及应用、数字电路基础、基本逻辑门电路及组合逻辑电路、集成触发器与时序逻辑电路、脉冲产生与整形电路、A/D 转换及 D/A 转换。每章附有一节实训内容,以达到边学边练、学以致用用的效果。本书各章均配有大量的例题和习题,便于学生正确理解课程内容,也便于其自学。

本书可作为高等院校的计算机应用类、机电类、管理类等非电专业的本科教材,也可作为高职高专相关专业的教材和函授培训教材,以及相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础/高安芹,朱传琴主编. —2 版. —北京:中国电力出版社,2016.4

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5123-8863-5

I. ①电… II. ①高… ②朱… III. ①电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 018977 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 8 月第一版

2016 年 4 月第二版 2016 年 4 月北京第八次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 412 千字

定价 35.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书是根据教育部推荐教材编写工作会议精神编写的。编写过程中紧密围绕培养高素质技能型人才的目标,着重加强教学内容的针对性和实用性,淡化烦琐的理论推导,力争做到内容精练、重点突出。本书第一版于2007年被评为电力行业精品教材。这次修订,主要突出以下几个特点:

(1) 根据当前数字电路逐渐取代模拟电路的状况,本书内容以数字电路为主、模拟电路为辅,两者的分配比例大约为2:1。并且对模拟电路内容进行优化组合,把直流电源和半导体二极管应用合为一章,把晶体管、场效应晶体管以及放大器合为一章。前后衔接自然、完整,每章都尽可能保持其独立性和完整性,便于依据不同学时进行内容调节和增删。因此,本书不仅适用于多学时教学,对少学时教学也同样适用。

(2) 本书内容以集成电路应用为主、分立电路分析为辅。其中对分立电路的分析,以建立基本概念为目的,原则上以必需和够用为尺度,删掉某些过时内容的同时,又保持了课程体系的完整性。增加了集成电路的应用,主要是电子技术与计算机接口电路,如各种显示驱动电路的应用、A/D转换器和D/A转换器以及计算机接口等内容,便于学生为学习计算机技术等相关后续课程打下良好的基础。

(3) 本书增加了大量的例题,使学生能正确理解课程内容,也便于学生自学。

(4) 本书为适应“理实一体化”的教学模式,每章内容增加了综合实训,便于学生将理论学习与实践学习结合起来。

全书共分八章。其中第一、第二、第三章由山东电力高等专科学校高安芹老师编写,第四、第六章由山东电力高等专科学校赵笑笑老师编写,第五章由国网北京经济技术研究院杨露露老师编写,第七章由山东电力高等专科学校朱传琴老师编写,第八章由山东电力高等专科学校崔西友老师与威海技术学院王亚盛老师编写。本书习题及附录由山东电力高等专科学校崔西友老师编写。本书由山东大学姚福安教授担任本书的主审,姚教授在百忙中对本书稿进行了非常认真的审阅,并提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于时间仓促,本书难免会有不足之处,恳请读者批评、指正,并提出宝贵意见,以便修订时改进。联系电话:0531-82999218, E-mail: gaq1970@126.com。

编者

2015年12月

目 录

前言	
第一章 半导体二极管及直流电源电路	1
第一节 半导体的基本知识 with PN 结	1
第二节 半导体二极管	5
第三节 特殊二极管	8
第四节 半导体二极管的基本应用电路	12
第五节 直流稳压电源概述	16
第六节 稳压电路的质量指标	17
第七节 集成三端稳压器	18
第八节 综合实训	23
习题	26
第二章 半导体晶体管及基本放大电路	30
第一节 放大电路的基本概念	30
第二节 晶体管	32
第三节 特殊晶体管	37
第四节 晶体管放大电路	38
第五节 场效应晶体管	46
第六节 场效应晶体管放大器	52
第七节 多级放大电路	55
第八节 差分放大器	58
第九节 综合实训	61
习题	66
第三章 集成运算放大器及其应用	72
第一节 集成运算放大器	72
第二节 反馈放大器	77
第三节 模拟运算电路	84
第四节 测量放大器	90
第五节 运放在信号处理方面的应用	91
第六节 集成运放在波形产生方面的应用	97
第七节 集成功率放大器	101
第八节 使用集成运放注意的问题	103
第九节 综合实训	104

习题	106
第四章 数字电路基础	112
第一节 概述	112
第二节 数制与二十进制编码	112
第三节 逻辑函数	114
第四节 逻辑函数的几种表示形式及其相互转换	119
第五节 逻辑代数基础	121
第六节 逻辑函数代数法化简及逻辑表达式形式转换	123
第七节 逻辑函数的卡诺图化简法	125
第八节 综合实训	134
习题	135
第五章 基本逻辑门电路及组合逻辑电路	137
第一节 分立元件门电路	137
第二节 TTL 集成与非门	142
第三节 三态输出 TTL 与非门及集电极开路与非门	145
第四节 CMOS 集成门电路	147
第五节 使用集成门电路的注意事项	149
第六节 组合逻辑电路的分析	150
第七节 组合逻辑电路的设计	151
第八节 常用中规模集成组合逻辑电路及其应用	154
第九节 综合实训	167
习题	170
第六章 集成触发器与时序电路	173
第一节 概述	173
第二节 RS 功能触发器	173
第三节 JK 功能触发器	178
第四节 D 功能触发器	182
第五节 T 和 T' 触发器	185
第六节 寄存器和移位寄存器	186
第七节 计数器	189
第八节 综合实训	202
习题	208
第七章 脉冲产生电路	211
第一节 555 定时器	211
第二节 单稳态触发器	213
第三节 多谐振荡器	217
第四节 石英晶体振荡器	219
第五节 施密特触发器	220
第六节 综合实训	223

习题.....	226
第八章 模拟量与数字量的转换.....	229
第一节 概述.....	229
第二节 数-模转换器	229
第三节 模-数转换器	236
第四节 综合实训.....	244
习题.....	247
附录.....	249
参考文献.....	254

第一章 半导体二极管及直流电源电路

本章从讨论半导体的导电特性和 PN 结的基本原理 (特别是它的单向导电性) 开始, 介绍了半导体二极管及其应用、直流电源电路的组成及集成三端式稳压器。学习本章内容时, 要掌握普通二极管和稳压二极管的外特性; 熟悉普通二极管和稳压二极管的工作原理、主要参数、使用方法, 熟悉集成三端式稳压器的使用方法; 掌握二极管和稳压二极管的主要应用, 了解发光二极管和光敏二极管的性能和使用方法。

第一节 半导体的基本知识与 PN 结

一、半导体的基本知识

1. 半导体的特性

在自然界中, 存在着许多不同的物质。有的物质很容易传导电流, 称为导体, 如金属一般都是导体。有的物质几乎不传导电流, 称为绝缘体, 如橡胶、陶瓷和塑料等。此外还有一类物质, 它的导电能力介于导体和绝缘体之间, 称为半导体, 如硅、锗、砷化镓、一些硫化物和氧化物等。在近代电子学中, 用的最多的半导体是锗和硅。

电子器件所用的半导体都要提纯为单晶体结构, 所以有时把半导体叫做晶体。在这种晶体结构中, 原子与原子之间形成了所谓的共价键结构。在绝对零度 (即 $T=0\text{K}$) 时, 电子被共价键束缚得很紧, 不能自由移动, 因此不能导电。

当电子受到一定能量的外界激发 (如受热或受光) 时, 电子由于动能增强, 就可能挣脱共价键的束缚成为自由电子; 同时, 在这些自由电子原来的共价键位置上便留下一个空位, 这个空位叫做空穴。原子是电中性的, 因此, 失去电子的原子带正电, 称为正离子。由于正负电荷的相互吸引, 空穴附近的电子便会填补这个失掉电子的空穴, 又产生新的空穴或正离子, 同样又会有相邻的电子来填补……如此进行下去, 形成所谓的空穴运动。由外界激发而产生的自由电子和空穴是成对出现的。自由电子和空穴分别带负电荷和正电荷, 它们都称为载流子。

因此, 半导体材料在外界激发下所形成的电流是由自由电子和空穴两种载流子的运动形成的。这是半导体导电与导体导电机理的本质区别。

另外当环境温度变化时, 半导体中自由电子和空穴的数量发生变化, 因此导电性能也发生变化, 即半导体具有热敏性; 当受到外界光照时, 半导体中自由电子和空穴的数量会增加, 导电性能增强, 即半导体具有光敏性; 纯净半导体中的自由电子和空穴是成对出现的, 在常温下其数量有限, 导电能力不强, 若在纯净半导体中掺入某些微量杂质, 其导电能力将大大增强, 即半导体具有掺杂性。

2. N 型半导体和 P 型半导体

纯净的半导体 (本征半导体) 中的载流子数量很少, 导电能力很弱, 其载流子——自由电子和空穴, 是在热或光照作用下 (称为热激发或本征激发) 成对地产生的。在本征半导体

硅或锗中掺入微量五价元素,如磷或砷(称为杂质)等,可使自由电子的浓度大大增加,自由电子成为多数载流子(简称多子),空穴成为少数载流子(简称少子)。这种以电子导电为主的半导体称为N型半导体。在本征半导体硅或锗中掺入微量三价元素,如硼或铟等,则空穴的浓度大大增加,空穴成为多数载流子,而电子成为少数载流子。这种以空穴导电为主的半导体称为P型半导体。

无论是N型半导体,还是P型半导体,虽然它们各自有一种载流子占多数,但是整个半导体仍然呈电中性。图1-1所示为N型半导体和P型半导体,图中示出了载流子和杂质离子,其中带正电荷的离子(正离子)和带负电荷的离子(负离子)不能移动,不能参与导电。

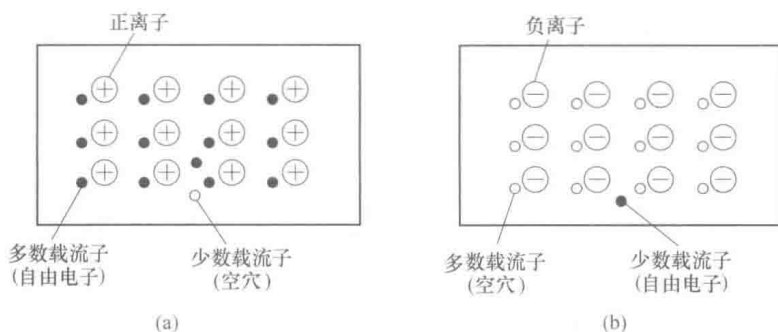


图1-1 N型半导体和P型半导体

(a) N型半导体; (b) P型半导体

N型半导体和P型半导体统称为杂质半导体。掺杂后的半导体的导电能力将显著增强,并且可以人为控制。在杂质半导体中,多子的浓度主要取决于杂质的含量;少子的浓度主要与本征激发有关,它对温度的变化非常敏感,随温度的升高基本上按指数规律增大。因此,温度是影响半导体器件性能的一个重要因素。

二、PN结

1. PN结的形成

PN结是构成各种半导体器件的基础。下面首先讨论PN结形成的物理过程。

(1) 载流子的扩散运动。用掺杂工艺在一块完整的半导体中,一部分形成P型半导体,另一部分形成N型半导体。那么,在两种杂质型半导体交界处两侧,P区的空穴(多子)浓度远大于N区的空穴(少子)浓度,因此,P区的空穴必然向N区运动,并与N区中的电子复合而消失;同样,N区的电子必然向P区运动,并与P区中的空穴复合而消失。这种由于浓度差而引起的载流子运动称为扩散运动,如图1-2(a)所示。

(2) 内电场的建立。载流子扩散运动的结果使交界面N区一侧失去电子而留下正离子,使P区一侧失去空穴而留下负离子。这些不能移动的带电离子称为空间电荷,相应地这个区域称为空间电荷区。在空间电荷区建立起一个电场,其方向由N区指向P区,如图1-2(b)所示。为区别由外加电压建立的电场,这个电场称为内电场。空间电荷将交界面两侧的电中性破坏了,但是,空间电荷区以外的P区和N区仍呈电中性。

(3) 内电场对载流子运动的作用。随着载流子扩散运动的进行,空间电荷区加宽,内电场加强,它将阻碍多子的扩散。但是,内电场又推动P区的少子(电子)向N区、N区的

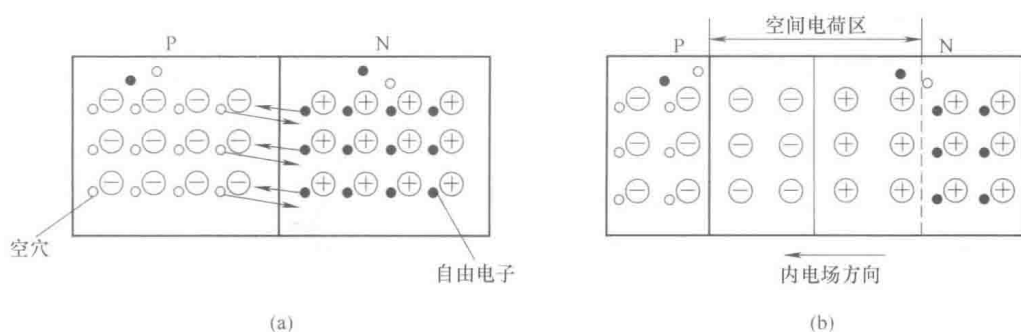


图 1-2 PN 结的形成

(a) 载流子的扩散运动; (b) PN 结和它的内电场

少数子(空穴)向 P 区运动,这种在电场作用下的载流子运动称为漂移运动,其结果使空间电荷区变窄,内电场削弱,这又将导致多子扩散运动的加强。

(4) PN 结的形成。由以上分析可见,载流子在 P 区和 N 区的交界面发生着扩散和漂移两种运动。开始时,扩散强于漂移;之后,随着内电场的逐步加强,又迫使扩散减弱,漂移增强;最后,扩散运动和漂移运动达到动态平衡,即 P 区的空穴向 N 区扩散的数量与 N 区的空穴向 P 区漂移的数量相等,自由电子亦类似,因而形成了宽度稳定的空间电荷区,这就是 PN 结,其厚度为数微米。对空间电荷区来说,其中的多数载流子扩散到对方复合了,故又称为耗尽区。另外,由于 PN 结内电场阻止多子的继续扩散,故又称空间电荷区为阻挡层,也可称为势垒区。

2. PN 结的单向导电性

以上讨论了 PN 结无外加电压时的情况,这时载流子的扩散与漂移处于动态平衡,流过 PN 结的电流为零。

实际工作中的 PN 结总是外加一定的电压。当外加电压的极性不同时,PN 结的导电性能迥然不同,即呈现单向导电性。

(1) PN 结正向偏置。通常将加在 PN 结上的电压称为偏置电压。PN 结外加正向电压(P 区接电源的正极, N 区接负极,或 P 区电位高于 N 区电位),称为正向偏置,简称正偏,如图 1-3 (a) 所示。这时外加电压在 PN 结上形成外电场,其方向与内电场方向相反,削弱了内电场作用,动态平衡被破坏,于是多子的扩散运动增强,形成较大的扩散电流,其方向由 P 区流向 N 区,称为正向电流 I_F 。在一定范围内,外加电压越大,正向电流 I_F 越大,PN 结呈低阻导通状态,相当于开关闭合。为了限制过大的 I_F ,回路中串入了限流电阻 R 。

(2) PN 结反向偏置。PN 结加反向电压(P 区接电源负极, N 区接电源正极,或 P 区电位低于 N 区电位),称为反向偏置,简称反偏。如图 1-3 (b) 所示。这时外电场的方向与内电场的方向相同,加强了内电场作用,少数子漂移占优势,于是多子的扩散运动难于进行,此时流过 PN 结的电流主要由少子的漂移运动形成的,其方向由 N 区流向 P 区,称为反向电流 I_R 。当温度不变时,少数载流子的浓度不变,因此反向电流 I_R 几乎不随外加电压变化,故又称为反向饱和电流 I_S 。在常温下,少数载流子的浓度很低,所以反向电流很小,一般可以忽略,PN 结呈高阻截止状态,相当于开关断开。

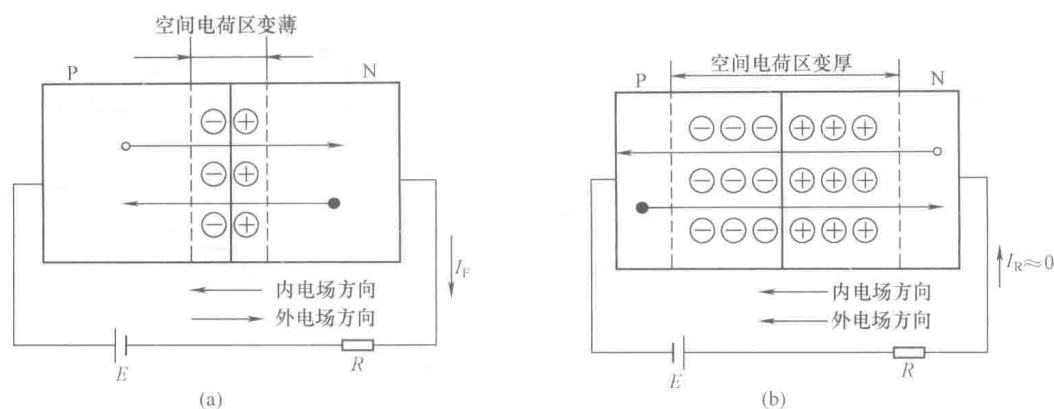


图 1-3 PN 结的单相导电性

(a) PN 结正向偏置; (b) PN 结反向偏置

由上可知, PN 结正偏时呈导通状态, 正向电阻很小; PN 结反偏时呈截止状态, 反向电阻很大, 这就是 PN 结的单向导电性。需要指出的是, 当反向电压超过一定数值后, 反向电流将急剧增加, 发生反向击穿现象, 单向导电性被破坏。

3. PN 结的结电容

PN 结内的电荷量随外加电压的变化而变化, 表明 PN 结具有电容的效应。按产生的原因不同, 这种效应分为势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 两部分。

势垒电容 C_B 是由空间电荷区的变化引起的。空间电荷区中缺少载流子, 只有不能移动的正、负离子, 它们都具有一定的电量。这种结构与平板电容器很相似。当外加电压使空间电荷区变宽时, 空间电荷量增加, 相当于电容充电; 当外加电压使空间电荷区变窄时, 空间电荷量减少, 相当于电容放电。这样, PN 结中的电荷随外加电压变化而改变时, 就显示了电容效应, 这个电容称为势垒电容 C_B 。

扩散电容 C_D 是由多子在扩散过程中的积累引起的。当 PN 结外加正向电压时, 多子的扩散运动加强, P 区内的空穴大量地向 N 区扩散, 在扩散过程中, 不断与 N 区的电子复合, 因此, 注入 N 区的空穴在 PN 结的边缘处浓度大, 离 PN 结远的地方浓度小, 也就是说, 在靠近 PN 结的 N 区的一段范围内积累了按一定浓度分布的空穴。同理, 在靠近 PN 结的 P 区的一段范围内积累了按一定浓度分布的电子。当外加正向电压增大时, 扩散运动增强, 则 PN 结两侧积累的空穴、电子增多; 反之, PN 结两侧积累的空穴、电子减少。可见, 在扩散过程中, PN 结两侧电荷的积累随外加电压变化而改变, 也显示了一种电容效应, 其对应的电容称为扩散电容 C_D 。

一般情况下, 势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 都是非线性电容, 且数值都较小, 一般为几个皮法至几十个皮法, 对低频影响不大, 但工作频率很高时, 就必须考虑结电容的作用。

太阳能电池是 PN 结的应用之一。太阳能电池工作原理的基础就是半导体 PN 结的光生伏打效应, 就是当物体受到光照时, 物体内的电荷分布状态发生变化而产生电动势和电流的一种效应, 即当太阳光或其他光照射半导体的 PN 结时, 就会在 PN 结的两边出现电压, 称为光生电压。将 PN 结短路, 在光生电压的作用下就会产生电流。

第二节 半 导 体 二 极 管

一、基本结构和分类

在一个PN结的两端，各引一根电极引线，并用外壳封装起来，就构成了半导体二极管（或称晶体二极管，简称二极管）。由P区引出的电极称为阳极（正极），由N区引出的电极称为阴极（负极）。二极管的电路符号和文字符号如图1-4（a）所示，几种常用二极管的外形如图1-4（b）所示。

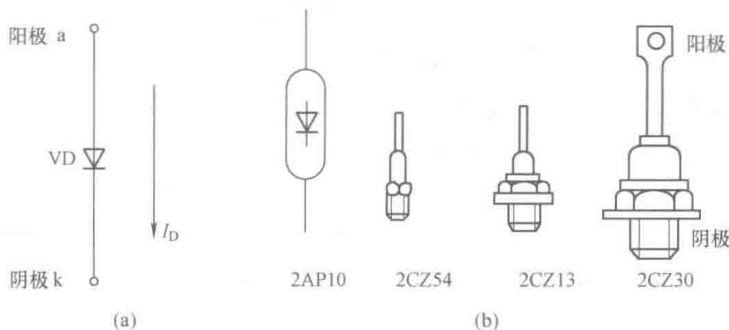


图 1-4 半导体二极管

(a) 电路符号和文字符号；(b) 几种常用二极管的外形

二极管的种类很多，按制造材料分，常用的有硅二极管和锗二极管；按用途分，常用的有整流二极管、稳压二极管、开关二极管和普通二极管等；按结构、工艺分，常用的有点接触型二极管、面接触型二极管等。

点接触型二极管的结构如图1-5（a）所示，它的PN结面积很小，因此结电容小，适用于高频、小电流（几十毫安以下）的场合，主要应用于小功率整流、高频检波和开关电路，如2AP10型锗管，可作为检波用，它的最大整流电流是5mA，最高工作频率是100MHz。

面接触型二极管的结构如图1-5（b）所示，它的PN结面积大，允许通过较大的电流（几百毫安以上），其结电容也大，只能工作在较低频率（几十千赫以下）下，主要应用于整流，如2CZ55A型硅管，它的最大整流电流为1A，最高工作频率只有3kHz。

图1-5（c）是硅工艺平面型二极管的结构图，是集成电路中常见的一种形式。

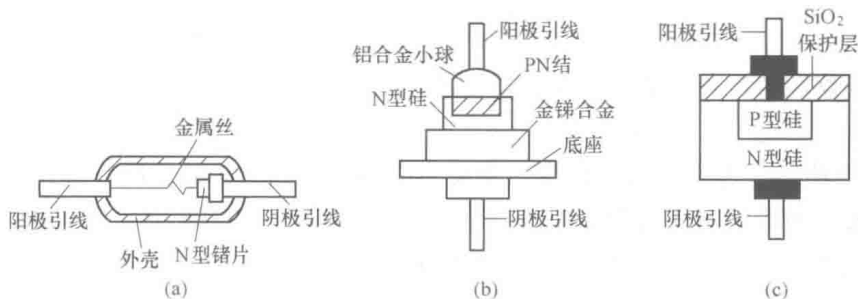


图 1-5 半导体二极管的结构

(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 平面型

二、半导体二极管的伏安特性

半导体二极管两端的电压 U_D 和流过二极管的电流 I_D 之间的关系可用一条曲线来描述, 这条曲线称为二极管的伏安特性曲线。

图 1-6 是实测的硅和锗二极管的伏安特性曲线。下面将特性曲线分为三部分来说明。

1. 正向特性

图 1-6 中曲线①为正向特性, 它是二极管外加正向电压时, 二极管两端电压 U_D 和通过二极管电流 I_D 的关系曲线。当正向电压比较小时, 外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻力, 正向电流几乎为零, 这个区域称为“死区”。当正向电压超过某一数值后, 二极管导通, 正向电流随外加电压的增加而迅速增大, 进入正向导通区。该电压值称为死区电压 (又称门坎电压或阈值电压)。在室温下, 硅管的死区电压约为 0.5V , 锗管的死区电压约为 0.1V 。在正常工作电流范围内, 二极管的正向压降 U_F 很小, 且几乎维持恒定, 硅管为 $0.6\sim 0.8\text{V}$ (通常取 0.7V), 锗管为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ (通常取 0.2V)。

2. 反向特性

图 1-6 中曲线②为反向特性, 它是二极管外加反向电压时的电压—电流关系曲线。在外加反向电压小于反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 时, 由少数载流子形成的反向饱和电流很小, 而且与反向电压的大小基本无关。在室温下, 硅管的反向饱和电流比锗管的小得多, 小功率硅管的反向饱和电流小于 $0.1\mu\text{A}$, 锗管为几十微安。

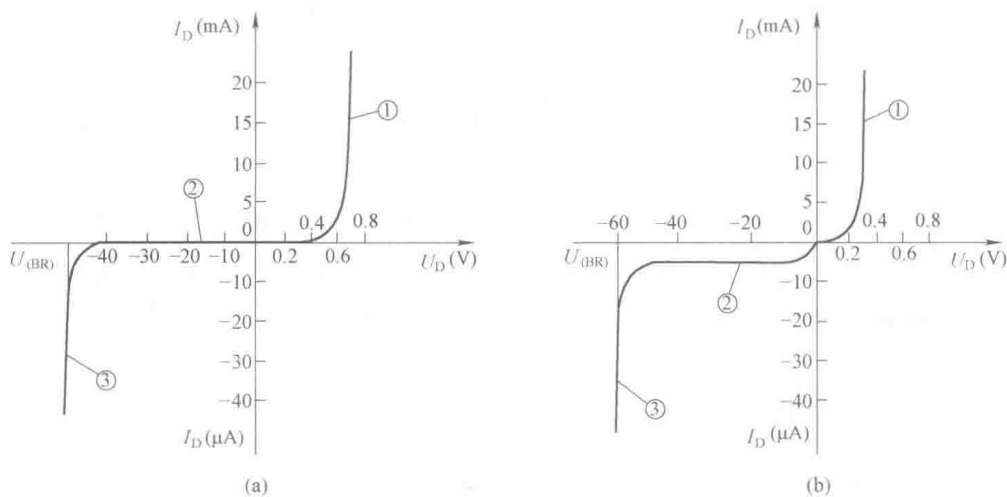


图 1-6 半导体二极管的伏安特性曲线

(a) 硅二极管 2CZ52 的特性曲线; (b) 锗二极管 2AP15 的特性曲线

由正向及反向特性可直观地看出: ①二极管是非线性器件; ②二极管具有单向导电性。

3. 反向击穿特性

图 1-6 中曲线③为反向击穿特性。当反向电压增大到某一数值时, 反向电流急剧增大, 这种现象叫做二极管的反向击穿 (电击穿), $U_{(BR)}$ 称为反向击穿电压。一般点接触型二极管的 $U_{(BR)}$ 为数十伏, 面接触型为数百伏, 最高可达几千伏。

在电击穿时, 尽管反向电流很大, 但只要反向电流限制在不烧毁 PN 结的范围内, 当反向电压下降到小于 $U_{(BR)}$ 时, 二极管还可以继续使用。但是, 当反向电压过高且没有适当的限流措施时, 将会因电流过大而发生热击穿, 从而烧毁 PN 结, 使管子造成永久性的损坏。

二极管的特性对温度的变化很敏感。当温度升高时，正向压降减小，反向电流增大。可以证明，当 I_D 一定时，温度每升高 1°C ，正向压降约减小 2.5mV ；温度每升高 10°C ，反向电流约增大一倍。但是，若温度过高时，则可能导致本征激发所引起的少子浓度超过杂质原子所提供的多子浓度，此时杂质半导体变得与本征半导体相似，PN 结就不存在了。为此，必须规定一个二极管的最高工作温度（结温），以保证它能正常工作。一般硅管所允许的最高结温为 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，锗管为 $75\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

三、半导体二极管的型号与主要参数

国产半导体器件的型号组成及意义见表 1-1。

表 1-1 国产半导体器件的型号组成及意义

第一部分	第二部分		第三部分		第四部分
用阿拉伯数字 2 表示 器件的电极数目	用汉语拼音字母表示器 件的材料和类型		用汉语拼音字母表示器 件的功能类别		用阿拉伯数字 表示序号
示例： 2 C K 18 —序号 —开关管 —N 型，硅材料 —二极管	符 号	意 义	符 号	意 义	
	A	N 型，锗材料	P	小信号管	
	B	P 型，锗材料	W	稳压管	
	C	N 型，硅材料	Z	整流管	
	D	P 型，硅材料	K	开关管	
			C	变容管	
			S	隧道管	
			U	光电管	

二极管的特性除了用伏安特性曲线表示外，还可用一套参数来描述，它是合理选择和正确使用二极管的依据。二极管的主要参数有以下几个。

1. 最大整流电流 I_{FM}

它是二极管长期运行允许通过的最大正向平均电流，由 PN 结的面积和散热条件决定，使用时不能超过此值，否则可能烧坏管子。

2. 最高反向工作电压 U_{DRM}

它是指允许加在二极管上的反向电压最大值（峰值）。为安全起见，最高反向工作电压约为击穿电压的一半。

3. 最大反向电流 I_{RM}

它是在室温下，二极管两端加最高反向电压时的反向电流。其值越小，管子的单向导电性能越好。 I_{RM} 随温度升高而增加，在高温运行时要特别注意。

4. 最高工作频率 f_M

二极管工作在高频时，电流容易从结电容通过，使得管子的单向导电性能变差，甚至可能失去单向导电性，为此规定一个最高工作频率 f_M 。它主要决定于 PN 结结电容的大小，结电容越大，则 f_M 越低。

此外，二极管还有正向压降、结电容及最高结温等参数，不再一一说明。

二极管各主要参数可以从半导体器件手册中查到。表 1-2 列出了几种二极管的典型参数，以供参考。但应指出，由于工艺制造不同，参数的分散性较大，手册上给出的往往是参

数值的范围。另外，各种参数是在规定的条件下测得的，在使用时要注意这些条件。

表 1-2 几种国产半导体二极管的参数

(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	最大整流 电流	最高反向 工作电压 (峰值)	反向击穿电压 (反向电流为 400 μ A)	正向电流 (正向电压为 1V)	反向电流 (反向电压分别为 10、100V)	最高工作 频率	极间电容
型号	mA	V	V	mA	μ A	MHz	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，用于电子设备的整流电路

参数	最大整流 电流	最高反向 工作电压 (峰值)	最高反向工作电 压下的反向电流 (125 $^{\circ}$ C)	正向压降 (平均值) (25 $^{\circ}$ C)	最高工作 频率
型号	A	V	μ A	V	kHz
2CZ52	0.1	25, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000	1000	≤ 0.8	3
2CZ54	0.5	1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200	1000	≤ 0.8	3
2CZ57	5	2400, 2600, 2800, 3000	1000	≤ 0.8	3

第三节 特殊二极管

除了上面介绍的普通二极管外，还有若干种具有特殊用途的特殊二极管，现分别介绍如下。

一、稳压二极管

稳压二极管是一种用特殊工艺制造的面接触型硅二极管，由于它在电路中能起稳定电压的作用，故称为稳压二极管，简称稳压管。它的外形和内部结构与普通二极管相似，也有两个电极（阳极和阴极）。但其 PN 结面积比普通二极管大，允许工作在反向击穿区。

1. 稳压二极管的伏安特性和符号

稳压二极管的伏安特性如图 1-7 所示。从特性曲线来看，稳压二极管正向特性和普通二极管一样，而反向击穿特性曲线很陡，电流在很大范围内变化而电压基本恒定。因此，稳压二极管在实际应用中，主要利用这段特性进行稳压。稳压二极管的反向电压达到击穿电压 U_Z 后，由于制造工艺的特殊性，稳压二极管并不会因击穿而损坏。但如果反向电流太大，超过允许的最大值，或者管子的功率损耗超过允许值，那么管子便产生不可逆的热击穿，稳压二极管就烧坏了。为此，稳压二极管在使用时必须串联一个适当的限流电阻。

2. 稳压二极管的主要参数

(1) 稳定电压 U_Z ，即稳压二极管反向击穿后稳定工作的电压。

(2) 稳定电流 I_Z ，即工作电压等于稳定电压时的工作电流。

(3) 动态电阻 r_z ，在稳定电压范围内，管子两端电压的变化量与工作电流的变化量之比，即

$$r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (1-1)$$

从图 1-7 可见， r_z 和击穿特性曲线的斜率有关，曲线越陡， r_z 就越小，稳压性能就越好。

(4) 温度系数 α_v 。当稳压二极管中的电流等于稳定电流 I_Z 时，环境温度改变 1°C ，稳定电压变化的百分比称为温度系数 α_v 。例如，2CW21G 的电压温度系数为 $0.06\%/^\circ\text{C}$ 。若 $U_Z = 7\text{V}$ ，则环境温度升高 1°C 时，稳定电压将增加 $\Delta U_Z = 0.06\% \times 7 = 4.2\text{mV}$ 。

通常温度系数和稳定电压之间有一定的关系。一般当 $U_Z < 5.6\text{V}$ 时，稳压二极管具有负温度系数；当 $U_Z > 5.6\text{V}$ 时，稳压二极管具有正温度系数；而 U_Z 接近 5.6V 时，温度系数接近于零。

(5) 最大耗散功率 P_M 。这个参数是指管子不致产生热击穿的最大功率损耗， $P_M = U_Z I_{ZM}$ 。已知 P_M ，就可求出最大工作电流 $I_{ZM} = P_M / U_Z$ ，随着环境温度的升高，极限参数 P_M 和 I_{ZM} 将下降。

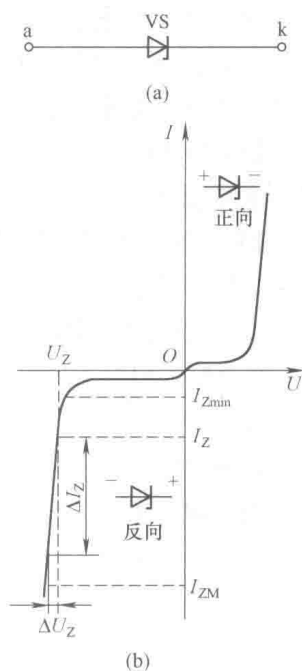


图 1-7 稳压二极管

(a) 电路符号；

(b) 伏安特性曲线

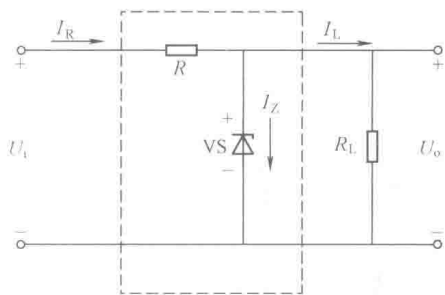


图 1-8 稳压二极管稳压电路

稳压二极管在电路中的主要作用是稳压和限幅。图 1-8 为稳压二极管稳压电路。稳压二极管 VS 与负载电阻 R_L 并联， R 是限流电阻。稳压原理如下：若输入电压 U_i 上升使输出电压 U_o 上升时，加在 VS 两端的反向电压略有增加，稳压二极管的电流 I_Z 随之大大增加，而 I_L 增加并不明显。于是 $I_R = I_Z + I_L$ 增加很多，在限流电阻 R 上的压降 U_R 增加，使得 U_i 的增量大部分降落在 R 上，因此，输出电压基本维持不变。反之，当 U_i 下降时，限流电阻上的压降减小，

输出电压也基本维持不变。当输入电压 U_i 不变， R_L 减小时， I_L 增大，使总电流 I_R 增大，输出电压 U_o 降低，流过 VS 的电流大大减小， I_L 增加的部分几乎与 I_Z 减小的部分相等，使总电流几乎不变，从而保持了输出电压 U_o 的稳定。由此可见，稳压二极管的电流调节作用是这种稳压电路能够稳压的关键。即利用稳压二极管端电压的微小变化引起电流较大的变化，通过限流电阻 R 产生补偿电压，从而使输出电压基本保持不变。

3. 使用稳压二极管的注意事项

(1) 稳压二极管必须工作在反向偏置（利用正向特性稳压除外）。

(2) 稳压二极管工作时的电流应在稳定电流 I_Z 和允许的最大工作电流 I_{ZM} 之间。为了不

使流过稳压二极管的电流超过 I_{ZM} , 电路中必须串接限流电阻。

(3) 稳压二极管可以串联使用, 串联后的稳压值为各管稳压值之和, 但不能并联使用, 以免因稳压二极管稳压值的差异造成各管电流分配不均匀, 引起管子过载损坏。

【例 1-1】 在图 1-9 (a) 电路中, 稳压二极管 VS1 的稳定电压 $U_Z=8V$, VS2 的 $U_Z=6V$, 输入电压 $u_i=12\sin\omega t V$, 试画出输出电压 u_o 的波形。

解 当 u_i 为正半周时, VS1 反偏, VS2 正偏。若要 VS1 反向击穿、VS2 正向导通, 则需 $u_i \geq U_{Z1} + U_{F2} = 8 + 0.7 = 8.7 (V)$ 。故 $u_i < 8.7V$ 时, $u_o = u_i$; $u_i > 8.7V$ 时, $u_o \approx 8.7 (V)$ 。

当 u_i 为负半周时, VS1 正偏, VS2 反偏。若要 VS1 正向导通, VS2 反向击穿, 则需 $|u_i| \geq U_{Z2} + U_{F1} = 6 + 0.7 = 6.7 (V)$ 。故 $|u_i| < 6.7V$ 时, $u_o = u_i$; $|u_i| > 6.7V$ 时, $u_o = 6.7 (V)$ 。

u_o 的波形如图 1-9 (b) 所示, 可见电路实现了双向限幅稳压。在实际产品中已有根据这个电路制作的硅双向限幅稳压二极管 (2DW 系列), 其中正向导通管子可起温度补偿作用。

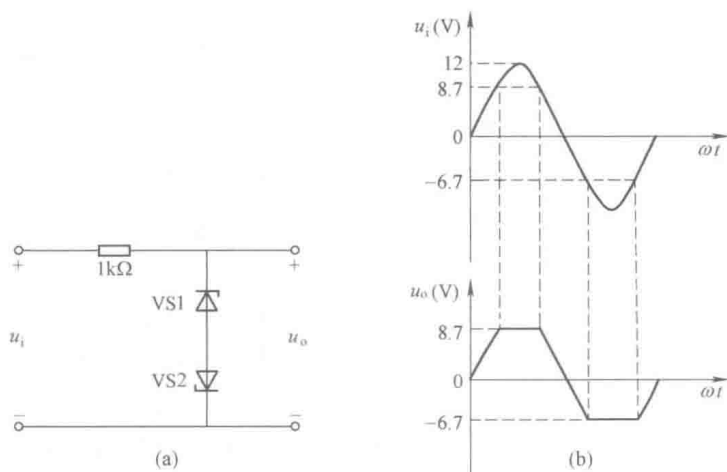


图 1-9 例 1-1 的图

(a) 电路; (b) 波形

由上可见, 利用稳压二极管正向特性实现的稳压与普通硅二极管一样, 稳定电压为 $0.7V$ 左右, 故一般不单独用稳压二极管的正向特性来稳压。

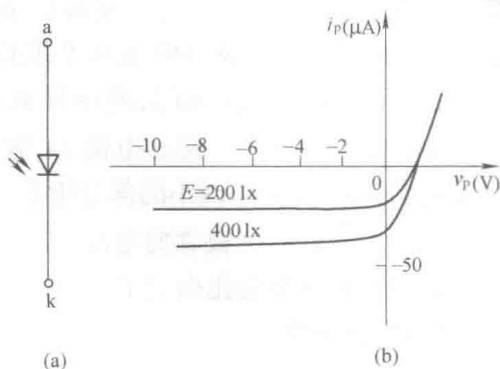


图 1-10 光敏二极管符号和伏安特性曲线

(a) 电路符号; (b) 伏安特性曲线

二、光敏二极管

光敏二极管旧称光电二极管, 是一种将光信号转换为电信号的特殊二极管 (受光器件)。光敏二极管电路符号如图 1-10 (a) 所示。与普通二极管一样, 其基本结构也是一个 PN 结, 它的管壳上开有一个嵌着玻璃的窗口, 以便于光线射入。为增加受光面积, PN 结的面积做得比较大。在 PN 结受到光线照射时, 可以激发产生电子—空穴对, 从而提高了少数载流子的浓度。当外加反向电压时, 少数载流子增多, 少数载流子漂移电流显著增大。所以, 当外界光的强弱发生