

高等职业教育

电子信息类专业 规划教材

ELECTRONIC ENGINEERING

模拟电子技术 及其应用

常 红 黄 法 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

高等职业教育

电子信息类专业 规划教材

ELECTRONIC ENGINEERING

模拟电子技术 及其应用

编著 常 红 黄 法



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为高等职业教育电子信息类专业规划教材。

本书是依据教育部关于高职高专课程内容体系改革的原则及高技能人才培养的特点和规律编写的。

全书共分为九个单元,内容包括半导体二极管及其应用、半导体三极管及其应用、集成运算放大器、负反馈放大电路、集成运算放大器的应用、信号产生电路、直流稳压电源及其应用、场效应管及其基本应用及晶闸管及其应用等。每个单元均采用“器件—电路—应用”结构,概念阐述简明扼要、重点突出;原理分析定性为主、定量为辅;应用方面关注实用、突出技能。各单元均有知识目标和技能目标,理论与实践教学融为一体,每节有思考与讨论,单元后配有小结与目标检测,所选择的实验与实训项目具有通用性,利教利学。本书以应用为目的,强化了基本概念的叙述和基本技能的培养,理论深度与广度合理,结构编排新颖。

本书可作为高职高专院校电子信息类专业教材,也可供从事电子技术的工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术及其应用 / 常红, 黄法编著. —北京: 中国电力出版社, 2009

高等职业教育电子信息类专业规划教材

ISBN 978-7-5083-9048-2

I. 模… II. ①常…②黄… III. 模拟电路—电子技术—高等学校: 技术学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 107689 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 9 月第一版 2009 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 327 千字

印数 0001—3000 册 定价 22.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

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

本教材是为了更好地适应高职高专教育教学改革和发展的需要,依据教育部关于高职高专课程内容体系改革的原则及高技能人才培养的特点和规律编写的。

模拟电子技术是一门理论性较强、覆盖面很广的专业基础课,既要为后续的专业课程提供必需的基础知识,又要使课程中的许多知识又可以直接运用到生产实践中,因此该课程具有基础与应用的双重性。本教材是在多年教学改革与实践的基础上,结合作者长期从事电气自动化、应用电子、机电一体化等技术领域的实践工作经历,吸收当前一些改革教材中的先进经验并进行实践创新而形成的。本教材体现并突出了以下特色。

1. 结构编排新颖,强化基本概念的叙述和基本技能的培养,符合高职学生认知规律。

在编写中主要采用了以下措施:

(1) 每单元均采用“器件—电路—应用”结构。“器件”即半导体器件,“电路”即基本原理电路,“应用”即实践与应用。整个结构循序渐进,依次展开,概念阐述简明扼要、重点突出;原理分析定性为主、定量为辅;应用方面关注实用、突出技能。

(2) 以集成运算放大器的结构为主线,将直接耦合放大电路、差分放大电路、功率放大电路合并为一个单元,突出电路的功能、原理分析,使学生概念清楚、易于对比、便于理解。

(3) 采用集成运算放大器构成的反馈放大电路进行反馈类型分析,电路简单、信号流程清晰、易于分析与掌握。

(4) 将集成运算放大器的应用放在负反馈放大器之后,独立成单元,使学生在掌握深度负反馈放大电路的特点之后,理解“虚短”与“虚断”概念,从而进一步掌握集成运算放大器的线性应用。

2. 理论与实践教学一体化。把课程作为一个整体,从内容选择到教学要求,从理论教学到实践教学,总体计划、交叉实施,融为一体。课堂讲授、课内讨论、课后作业和技能训练做到了有机结合,所选择的实验与实训项目具有通用性、易于实施。

3. 突出对能力的培养。教材中有许多知识链接、知识拓展、电路小制作等内容,这些内容既增加了教材的实用性、趣味性,又扩充了基础知识。通过鼓励学生自学这部分内容,锻炼学生自我获取知识的能力,独立分析问题、解决问题的能力。

4. 合理把握理论深度与广度。本教材体现了高职高专培养目标的要求和现代科学技术发展的需要,在内容取舍上以现代电子技术基本理论、基本应用为主线,增加了 SMT 与微型二极管等新知识、新器件、新工艺的介绍,以使学生了解模拟电子技术的发展趋势。

5. 利教利学。本教材每单元开篇均有知识目标和技能目标,课后有思考与讨论、单元小

结及目标检测,有利于体现教师的主导性和学生的主体性,增强教学互动,适应行动导向、教、学、做一体化等先进的教学模式、教学方法和手段的应用。

本教材共分九个单元。分别是半导体二极管及其应用、半导体三极管及其应用、集成运算放大器、负反馈放大电路、集成运算放大器的应用、信号产生电路、直流稳压电源及其应用、场效应管及其基本应用、晶闸管及其应用。本教材非常适合“教、学、做”一体化教学模式,也可根据实际情况将理论教学与实践教学有机衔接。本教材参考学时为90~108课时(含实训),使用者可根据具体情况而定。

本教材第2、3、4、8、9单元由常红编写,第1、5、6、7单元及知识拓展部分由黄法编写,最后由常红统编全稿。本书在编写过程中得到了山东电子职业学院的徐新艳教授的关心与支持,她对全书做了认真细致的审阅和修改,并提出了很多宝贵的意见,在此表示深深的敬意和由衷的感谢!

由于时间较紧,虽经努力,书稿仍未达到理想程度,其错漏之处在所难免,恳请各使用单位和广大读者提出宝贵意见和建议。

编 者

2009年5月

目 录

前言

单元1 半导体二极管及其应用	1
1.1 半导体基本知识	1
1.2 半导体二极管	5
1.3 二极管应用电路	11
1.4 实验与技能训练	17
单元小结	20
目标检测	20
单元2 半导体三极管及其应用	23
2.1 晶体三极管	23
2.2 三极管的基本应用——放大电路	33
2.3 放大电路工作点的稳定	43
2.4 其他组态放大电路	46
2.5 多级放大电路	49
2.6 放大电路的测试与调整	53
2.7 实验与技能训练	58
单元小结	62
目标检测	63
单元3 集成运算放大器	67
3.1 集成运算放大器的构成及特点	67
3.2 直接耦合放大器及其特性	69
3.3 差动放大器	70
3.4 功率放大电路	76
3.5 集成运算放大器的主要技术指标	84
3.6 实验与技能训练	88
单元小结	90
目标检测	90
单元4 负反馈放大电路	94
4.1 反馈与反馈放大电路	94
4.2 反馈的分类与判别	96

4.3 负反馈对放大电路性能的影响	102
4.4 深度负反馈及其自激振荡	106
4.5 实验与技能训练	109
单元小结	111
目标检测	112
单元 5 集成运算放大器的应用	115
5.1 理想运算放大器的条件及特点	115
5.2 线性运算放大电路	116
5.3 运算放大器的非线性运用	126
5.4 集成运算放大器应用电路的使用与调测	130
5.5 实验与技能训练	132
单元小结	135
目标检测	135
单元 6 信号产生电路	138
6.1 振荡电路基本概念	138
6.2 RC 正弦波振荡电路	140
6.3 LC 正弦波振荡电路	143
6.4 石英晶体振荡电路及其应用	146
6.5 5G8038 多功能信号发生器	149
6.6 实验与技能训练	151
单元小结	154
目标检测	154
单元 7 直流稳压电源及其应用	157
7.1 直流稳压电源的组成及性能指标	157
7.2 整流电路	158
7.3 滤波电路	164
7.4 稳压电路	168
7.5 开关型稳压电路简介	173
7.6 实验与技能训练	177
单元小结	179
目标检测	180
单元 8 场效应管及其基本应用	183
8.1 场效应管	183
8.2 场效应管偏置电路及其放大电路	189
8.3 实验与技能训练	192
单元小结	193
目标检测	194
单元 9 晶闸管及其应用	196
9.1 晶闸管的基本知识	196

9.2 晶闸管整流电路	201
9.3 晶闸管触发电路	203
9.4 实验与技能训练	205
单元小结	206
目标检测	207
参考文献	208

单元1

半导体二极管及其应用

引言：半导体器件是组成各种电子电路的基础，而 PN 结则是构成半导体器件的基础。半导体二极管的管芯就是一个 PN 结。本单元主要从半导体的基本知识入手，讨论 PN 结的形成和主要特性、二极管的结构及特点，阐述半导体二极管的伏安特性和二极管电路的基本分析方法；重点分析二极管整流电路，同时对一些特殊二极管如光电二极管、变容二极管及目前广泛使用的微型二极管与 SMT 技术作了简略介绍。

【知识目标】

- (1) 了解半导体二极管的结构和种类，熟悉半导体二极管的伏安特性和主要参数，掌握半导体二极管电路的基本分析方法。
- (2) 掌握二极管整流电路的工作原理与分析方法。
- (3) 了解光电二极管、发光二极管、变容二极管、稳压二极管等特殊二极管的特性，了解 SMT 与微型二极管的基本知识及其应用。

【技能目标】

- (1) 能够正确选择实际电路所需二极管。
- (2) 能够使用普通二极管或特殊二极管进行一定功能电路的设计、安装、调试与检测。

1.1 半导体基本知识

1.1.1 半导体的导电特性

1. 半导体材料

半导体是导电性能介于导体和绝缘体之间的一大类物质的总称，如锗、硅、砷化镓及大多数的金属氧化物和金属硫化物。在电子技术中，常用的半导体材料有硅（Si）和锗（Ge）等。绝大多数半导体呈晶体结构，它们内部的原子都按照一定的规律排列，因此半导体也被称为晶体。半导体材料之所以有广泛的用途，是因为具有其他物质所没有的下列特性。

(1) 热敏特性：半导体的导电能力随着温度的升高会明显增加。利用半导体的热敏性，可以制成热敏电阻或其他对温度敏感的传感器。

(2) 光敏特性：半导体的导电能力在受到光照辐射时，会有显著变化，即光照越强，半导体的导电能力越强。利用半导体的光敏性，可以制成光敏电阻、光电池等各种光敏元件。

(3) 掺杂特性：在半导体中掺入极微量的其他元素（称为杂质），其导电性能会大幅度地提高。利用半导体的这一特性，可以制成各种不同用途的半导体器件和集成电路。

显然，要了解半导体器件，就要先了解半导体材料的导电机理。

2. 本征半导体

半导体在物理结构上有多晶体和单晶体两种形态。如果整块晶体内的原子按照一定的规则排列到底, 这样的晶体就称为单晶体; 如果整块晶体内的原子虽然也按照一定的规则排列, 但却排列不到底, 整块晶体实质上是由许多小的单晶体组成的, 这样的晶体就称为多晶体; 只有单晶结构的半导体才适合制作半导体器件。不含任何杂质、结构完整的单晶半导体就称为**本征半导体**。由纯净的硅或锗材料制成的半导体都可以认为是本征半导体。

半导体的导电能力取决于它的原子结构。世界上的物质都是由原子构成的, 原子中间有一个原子核, 核外是围绕原子核不停旋转的电子。不同元素的原子所包含的电子数目是不同的。在原子结构中, 最外层的电子是不稳定的, 受原子核的束缚力最小, 容易脱离原子核的束缚而成为自由电子。最外一层的电子通常叫价电子。硅和锗都是 4 价元素, 在硅 (或锗)

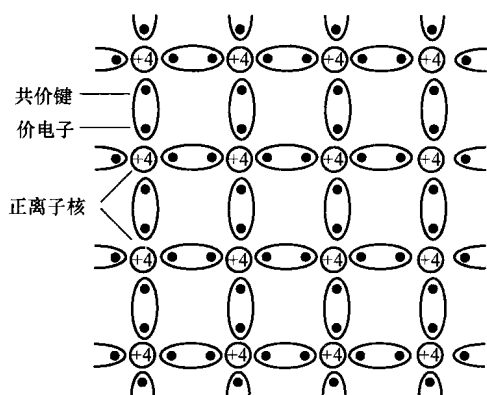


图 1.1 硅晶体的结构 (平面示意图)

的原子结构中, 最外层都是 4 个价电子。以硅晶体为例, 晶体内的原子很整齐地排列着, 每个原子除了吸引自己的价电子外, 还吸引相邻原子的价电子, 两个相邻原子的价电子便成对地存在。这一对电子同时受这两个原子核的吸引, 为它们所“共有”。这两个相邻原子也通过这个电子对被联系在一起。这样, 电子对就好像起了键 (联结) 的作用, 称为**共价键**。每一个硅原子以其 4 个价电子与其他 4 个原子的价电子组成 4 个共价键而达到稳定状态, 如图 1.1 所示。

在热力学温度 0K , 且无外界激发的条件下, 所有的价电子都被束缚在共价键内, 不能成为自由电子。所以此时的硅晶体基本不导电。当温度升高大于 0K 时, 或受到光的照射等外界激发时, 价电子能量增高, 有的价电子可以挣脱原子核的束缚, 成为自由电子, 同时在共价键内留下一个空位。由于原子本身正电荷和负电荷相等, 故原子失去了电子后, 整个原子就带正电荷, 称为正离子。正离子容易吸引相邻原子的价电子来填补, 电子离开后又留下空位, 而这个新出现的空位, 又可能被别的电子去填充。如此推演下去, 可以发现空位的位置不断地在原子间转移, 且空位的转移伴随着正电荷 (正离子) 的移动。为讨论方便, 人们把空位和正电荷合二为一, 称为**空穴**。空穴的转移, 实际上是正电荷的运动, 从而形成电流, 这叫做**空穴流**。而原来失去的电子, 在晶体中运动, 形成了**电子流**。

在电场作用下, 能运载电荷形成电流的带电粒子统称为**载流子**。综上所述, 在本征半导体中存在两种载流子: 一种是带负电的自由电子; 另一种是带正电的空穴, 它们总是成对出现, 又称为**电子—空穴对**。半导体中产生电子—空穴对的过程叫做**本征激发** (也称热激发), 如图 1.2 所示。常温下, 本征半导体中的载流

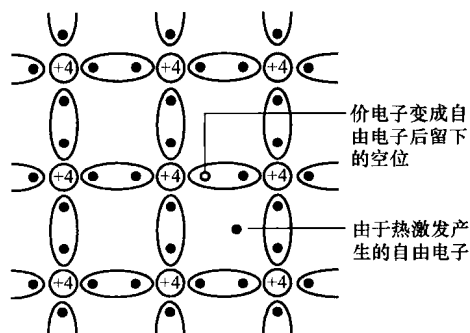


图 1.2 自由电子与空穴对产生示意图

子数目很少，显然它的导电能力很弱。

3. 杂质半导体

由于本征半导体的导电能力很弱，故而用途不广。在实际半导体器件的制造过程中，常常利用掺杂工艺，在本征半导体中有意掺入一定量的杂质元素，使其导电能力大大提高。这种人为地掺入了杂质的半导体称为**杂质半导体**。按掺入杂质元素的不同，杂质半导体又分为**N 型半导体**和**P 型半导体**两大类。

在本征半导体中掺入微量 5 价元素（如磷元素），使其内部的自由电子数量显著增加，这类杂质半导体称为**N 型半导体**。N 型半导体中，电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子）。N 型半导体加上电压后，产生的电流主要是电子流，所以 N 型半导体也称**电子型半导体**。

若在本征半导体中掺入微量三价元素（如硼元素），使其内部的空穴数量显著增加，这类杂质半导体称为**P 型半导体**。P 型半导体中，空穴为多数载流子，电子为少数载流子。P 型半导体加上电压后，产生的电流主要是空穴流，所以 P 型半导体也称为**空穴型半导体**。

杂质半导体不仅可以大大改善导电性能，而且掺入不同性质、不同浓度的杂质，并使 P 型和 N 型半导体采用不同方式的组合，可以制造出品种繁多、用途各异的半导体器件。

1.1.2 PN 结及其特性

1. PN 结的形成

在一块本征半导体上，采用掺杂工艺，分别在两边生成 P 型和 N 型半导体，则在两者的交界处，形成了 PN 结。**PN 结是构成各种半导体器件的基础。**

P 型半导体中的多数载流子是空穴，N 型半导体中的多数载流子则是自由电子，在 P 型和 N 型半导体结合后，交界处两侧同类载流子浓度差异极大，从而导致 P 型区的空穴向 N 型区做扩散运动，N 型区的电子则向 P 型区做扩散运动。随着这种扩散运动的进行，P 型区靠近交界面附近失去空穴，只留下带负电的杂质离子；N 型区靠近交界面附近失去了电子，只留下了带正电的杂质离子。杂质离子不能移动，所以不参与导电，称为**空间电荷**。它们集中在 N 型区和 P 型区交界面附近，形成很薄的**空间电荷区**，称为**PN 结**。空间电荷区中的电荷会形成一个由 N 区指向 P 区的电场，这个电场是由于载流子的扩散运动在半导体内部形成的，并不是由外加电场产生的，故称为**内建电场**，空间电荷区中正、负电荷的数量会随着载流子的扩散逐渐增多，所以内建电场会由小到大逐渐增强。而内建电场的出现，又会对载流子的运动产生两方面的影响。

(1) 阻碍两边多数载流子的扩散。P 型区的空穴和 N 型区的电子在扩散穿越空间电荷区时，要克服电场力做功，这就使得能扩散到对方的多数载流子数量减少。

(2) 有利于两边少数载流子的漂移。载流子在电场力的作用下做定向运动称为漂移。在内建电场的作用下，P 型区和 N 型区中的少数载流子会加速漂移到对方。

随着内建电场的逐渐增强，两边多数载流子的扩散越来越困难，少数载流子的漂移则有所加强，最终这两种运动会达到一种动态平衡，达到动态平衡后，空间电荷区的电荷数量不再发生变化，PN 结的宽度稳定下来，PN 结也就形成了。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗殆尽了，因此，PN 结又称为**耗尽层**，如图 1.3 所示。

2. PN 结的单向导电性

(1) 外加正向电压（正向偏置）。若将电源的正极接 P 区，负极接 N 区，则称此为 PN

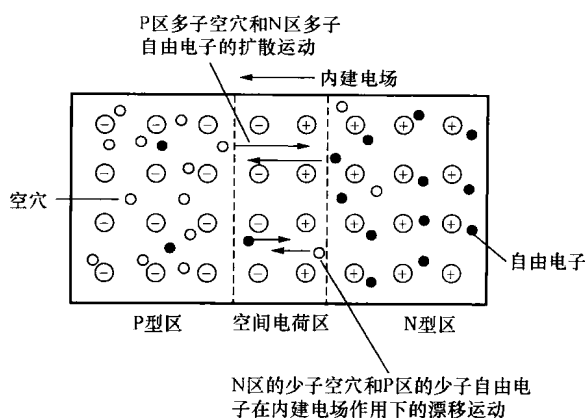


图 1.3 PN 结的形成

正向电流相反,称为反向电流。当温度一定时,少数载流子浓度一定,反向电流几乎不随外加电压而变化,故称为反向饱和电流,因少数载流子浓度很低,反向电流远小于正向电流。因此,PN 结具有单向导电性,如图 1.4 所示。

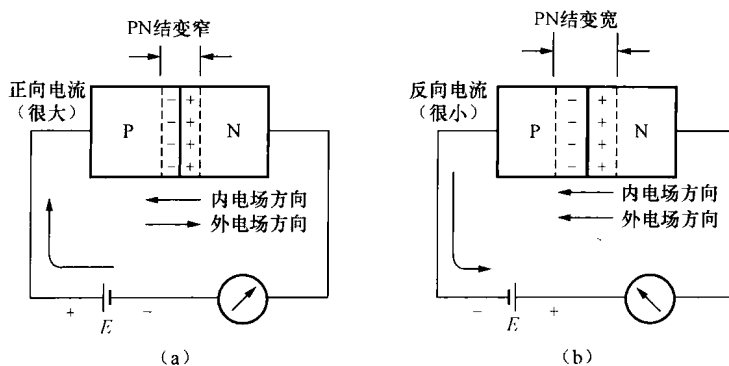


图 1.4 PN 结的单向导电性

(a) 加正向电压 PN 结导通; (b) 加反向电压 PN 结截止

3. PN 结的击穿特性

当 PN 结两端的反向电压增大到一定数值时,反向电流急剧增加。这个现象就称为 PN 结的反向击穿。发生击穿所需的反向电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。反向击穿后,只要反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结容许的耗散功率,PN 结一般不会损坏,反向电压下降到击穿电压以下后,其性能可恢复到原有状况,即这种击穿是可逆的,称为电击穿。

PN 结电击穿又可分为雪崩击穿和齐纳击穿两种类型。

(1) 雪崩击穿:当 PN 结反向电压增加时,空间电荷区中的电场随之增强。通过空间电荷区的载流子将受到强烈的电场加速作用,获得足够的能量去碰撞原子,产生新的电子—空穴对。被撞出的载流子获得能量后又去碰撞别的原子,再产生电子—空穴对,如此连锁反应造成了载流子数量剧增,从而引起反向电流急剧增大,其现象类似于雪崩,所以称为雪崩击穿。这种击穿多发生在掺杂浓度不大的 PN 结,雪崩击穿电压一般高于 6V。

(2) 齐纳击穿：一般发生在杂质浓度特别大的 PN 结中。因为杂质浓度大，空间电荷区内电荷密度（即杂质离子）也大，因而空间电荷区很窄，电场强度就可能很高，它能够将束缚电子分离出来造成电子—空穴对，形成较大的反向电流。齐纳击穿电压一般低于 6V。

必须指出，除电击穿外，PN 结还可能发生热击穿，即当反向电流和反向电压的乘积超过 PN 结容许的耗散功率时，会因为热量散不出去而使 PN 结温度上升，直到过热而烧毁，这种现象就是热击穿。电击穿往往可被利用制作稳压器件（如稳压管），而热击穿则是必须避免的。

4. PN 结的电容效应

(1) 势垒电容：当 PN 结外加电压变化时，空间电荷区的宽度将随之变化，即其电荷量将随外加电压而增多或减少，这种现象与电容器的充、放电过程相同。空间电荷区宽窄变化所等效的电容称为势垒电容 C_b 。势垒电容值不是一个常数，可见它是非线性电容。

(2) 扩散电容：由于多数载流子在扩散过程中的积累电荷量随外加正向电压变化这一现象引起的，PN 结正偏时，P 型区的空穴和 N 型区的电子扩散进入对方，并形成一定浓度的分布，离结近的地方浓度高，离结远的地方浓度低。当外加正向电压增大时，扩散运动增强，正向电流加大，就会有更多的多数载流子扩散到对方积累起来，反之，若正向电压减小，则积累的电荷量就会减少。这个现象也与电容器充、放电过程相似，这种电容效应称为扩散电容 C_d 。

势垒电容与扩散电容之和为 PN 结的结电容 C_j ，工作频率低时其作用可以忽略不计，只在工作频率较高时其作用明显，才考虑它的影响，应尽量选用结电容小的管子。

思考与讨论



1. 半导体的导电特性与导体的导电特性有何不同？
2. 怎样理解 PN 结的正向偏置和反向偏置？PN 结的导电特性是什么？
3. 何为 PN 结的击穿特性？雪崩击穿和齐纳击穿各有什么特点？

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的种类和作用

半导体二极管又称晶体二极管，简称二极管，是最早诞生的半导体元件之一，其应用非常广泛。特别是在各种电子电路中，利用不同参数的二极管和一定参数的电阻、电容、电感等元器件进行合理的连接，构成不同功能的电路，可以实现对交流电流整流、对调制信号检波、限幅和钳位以及实现对电源电压的稳压等多种作用。

二极管按所用材料不同可分为硅管和锗管；按制造工艺不同可分为点接触型和面接触型；按功能不同可分为整流二极管、检波二极管、发光二极管、光电二极管、稳压二极管、开关二极管等。

1.2.2 二极管的结构及符号

二极管是由一个 PN 结并引出两个电极，外加管壳封装而成的。由 P 区引出的电极称为二极管的阳极（Anode）（正极），由 N 区引出的电极称为阴极（Cathode）（负极）。

点接触型二极管是由一根很细的金属触丝（如三价元素铝）和一块半导体（如锗）熔接，并做出相应的电极引线，外加管壳密封而成，如图 1.5（a）所示。其特点是 PN 结面积小（结

电容小), 不能承受高的反向电压和大的电流(几十毫安以下)。可用来做小电流整流、高频检波及开关管。国产检波二极管 2AP 系列和开关二极管 2AK 系列都属于这一结构。

面接触型二极管的结构如图 1.5 (b) 所示。其特点是 PN 结面积大, 可承受较大的电流, 但结电容也大。这类器件适用于整流, 而不宜用于高频电路中。国产硅二极管 2CP 和 2CZ 系列都属于这一结构。

图 1.5 (c) 是硅平面型二极管的结构图。采用光刻、杂质原子扩散等生产工艺制成的硅平面型二极管是集成电路中常见的一种形式。国产开关管 2CK 系列就是硅平面型结构二极管。

图 1.5 (d) 是二极管的电路符号。符号中的三角箭头表示二极管正向电流的方向, 二极管的文字符号用“VD”表示。常用的几种二极管的外形及其型号如图 1.6 所示。

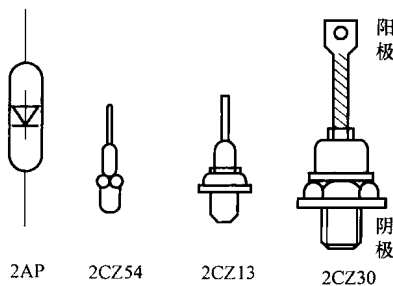
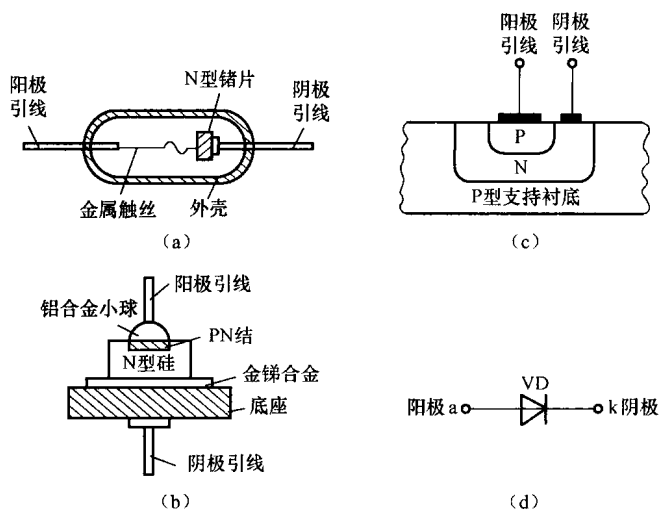


图 1.5 二极管内部结构示意图和电路符号

图 1.6 几种常用二极管的外形图及其型号

(a) 点接触型; (b) 面接触型; (c) 硅平面型; (d) 二极管的电路符号

1.2.3 二极管的伏安特性 (Volt-ampere characteristics)

二极管最基本的特性就是单向导电性, 用伏安特性曲线描述。伏安特性是指加在二极管两端的电压与流过它的电流之间的函数关系, 如图 1.7 所示。由图中可知, 二极管是非线性器件, 其特性曲线分为正向特性和反向特性两部分。

1. 正向特性

正向特性曲线分为两个区。当二极管的正向电压较小时, 外电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力, 这时的正向电流几乎为零, 这一段称为“死区”, 曲线如图中 OA 段所示, 这一正向电压称为死区电压 U_{th} (又称为

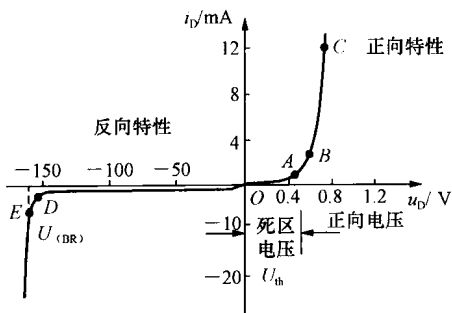


图 1.7 半导体二极管(硅管)伏安特性

阈值电压或门槛电压)。其值大小与环境温度及二极管材料有关, 硅管的死区电压为 0.5V, 锗管则为 0.1V。

当二极管的正向电压超过一定数值后, 外电场加强, PN 结内电场大为削弱, 二极管的电流随外加电压增加而显著增大, 并呈指数关系。这一段称为“正向导通区”, 曲线如图中 BC 段所示。在实际电路中, 二极管导通时的正向压降硅管为 0.6~0.8V, 锗管为 0.1~0.3V, 因此工程上定义这一电压为导通电压, 这一段二极管正向管压降近似恒定。一般取硅管导通

电压为 0.7V ，锗管导通电压为 0.2V 。

二极管 (PN 结) 处于导通状态 (Turn-on state) 时，流过二极管的电流 I_F 称作正向电流 (Forward current)。

2. 反向特性

反向特性曲线分为两个区。反向截止区，当二极管反向偏置时，只有微小的电流通过二极管，称为反向电流，如图中 OD 段所示。反向电流基本上不随外加反向电压变化而变化，故称为反向饱和电流 (亦称反向漏电流)，用 I_s 表示。 I_s 很小，是由少数载流子运动形成的，它会随温度上升而显著增加。所以，半导体二极管的热稳定性较差，在使用半导体器件时，要考虑温度对器件和由它构成电路的影响。在同样的温度下，硅管的反向电流比锗管小得多，锗管是微安级 (μA)，硅管是纳安级 (nA)。二极管的反向电流越小，表明二极管的反向性能越好。

反向击穿区，当反向电压增大到一定数值时，二极管的反向电流急剧增大，反向电压值几乎不变，二极管失去单向导电性，如图中 DE 段所示。这种现象称为反向击穿 (Reverse breakdown)， $U_{(\text{BR})}$ 称为反向击穿电压。反向击穿后，只要反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结容许的耗散功率，二极管的击穿即为电击穿；若反向击穿电流过高，则会导致 PN 结结温过高而烧坏，击穿则成为热击穿。普通二极管、整流二极管等不允许反向击穿情况发生，因二极管反向击穿后，电流不加限制，会使二极管 PN 结过热而损坏。

温度对特性的影响：由于半导体的导电性能与温度有关，因此二极管的特性对温度很敏感，温度升高时，二极管的正向特性曲线向左移动，反向特性曲线向下移动。在室温附近，温度每升高 1°C ，二极管导通压降约下降 2.5mV ；温度每升高 10°C ，反向饱和电流增加约 1 倍，击穿电压也下降较多。

1.2.4 二极管的开关作用

所谓开关，是指具有通与断两种工作状态的构件。开关在电路中的作用是将某一支路接通或断开，而且这种接通与断开既要迅速，又不受其他环境的影响。一个理想开关应满足以下条件：开关闭合时阻抗为零；开关断开时阻抗为无穷大，开关中没有电流流过。由于二极管具有正向偏置导通、反向偏置截止 (即单向导电性) 两种可以明显区分的状态，因此，在电压的作用下，二极管具有开关的作用。

实际使用中，希望二极管具有正向偏置时导通，电压降为零；反向偏置时截止，电流为零；反向击穿时电压为无穷大的理想特性，而具有这样特性的二极管称为理想二极管。在一般电路分析中，常把二极管理想化，理想二极管可等效为理想开关。

【例 1.1】 如图 1.8 所示为二极管电路，设 VD1 和 VD2 都是理想二极管，求 U_{AO} 和流过电阻 R 中的电流。

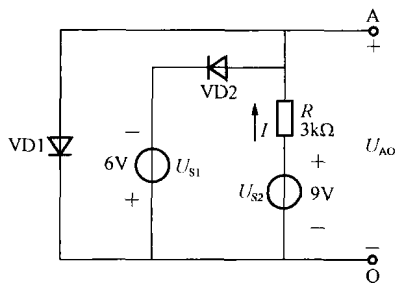


图 1.8 二极管电路

小提示：对于含有多个二极管的电路，首先求出各二极管假设未导通时的阳极和阴极电位；再比较各二极管阳极对阴极的电位差，电位差为正且较高的二极管优先导通 (即其他二极管来不及导通时，它已导通)。

解 本例中两个二极管的阳极连接在一起，即阳极电位相同，而 VD1 阴极电位为零，

VD2 阴极电位为 -6V , VD2 所加的正向偏置电压大, 优先导通, VD2 可视做一个闭合的开关, U_{AO} 钳制在 -6V , 使 VD1 反偏而截止。所以 $U_{AO} = -6\text{V}$, $I = \frac{U_{s2} + U_{s1}}{R} = 5\text{mA}$, 方向如图所示。

1.2.5 二极管的主要技术参数 (main parameter)

元器件的参数是国家标准或制造厂家对生产的元器件应达到技术指标所提供的数据要求, 也是合理选择和正确使用元器件的依据。晶体二极管的使用寿命一般可达到 10^5 小时以上。要合理地使用二极管, 必须掌握它的主要技术参数。

1. 最大整流电流 I_F

I_F 是指二极管长期运行时允许通过的最大正向电流。 I_F 与 PN 结的材料、面积及散热条件有关。大功率二极管使用时, 一般要加散热片。在实际使用时, 流过二极管最大平均电流不能超过 I_F , 否则二极管会因过热而损坏。

2. 最高反向工作电压 U_{RM} (反向峰值电压)

U_{RM} 是指二极管在使用时允许外加的最大反向电压, 其值通常取二极管反向击穿电压的一半左右。在实际使用时, 二极管所承受的最大反向电压值不应超过 U_{RM} , 以免二极管发生反向击穿。

3. 反向电流 I_R

I_R 是指二极管在规定的温度和最高反向电压作用下, 二极管未击穿时的反向电流值。

4. 最高工作频率 f_M

二极管的工作频率若超过一定值, 就可能失去单向导电性, 这一频率称为最高工作频率。它主要由 PN 结的结电容的大小来决定。点接触型二极管结电容较小, f_M 可达几百兆赫兹。面接触型二极管结电容较大, f_M 只能达到几十兆赫兹。

必须注意的是, 手册上给出的参数是在一定测试条件下测得的数值。如果条件发生变化, 相应参数也会发生变化。在选择使用二极管时注意留有余量。

1.2.6 二极管的检测与选用

1. 二极管的检测

二极管的外壳上一般都标有符号或标志, 据此能直接判断二极管的正、负极, 还有一种贴片二极管, 它的外表标志及判别方法: 黑色并有极性标志 (有色带端为负极) 或一个引脚粗一个引脚细 (粗端为负极)。

当二极管的外表无法判断极性时, 可以利用它的单向导电性用万用表对二极管进行简易的检测判断。

(1) 用数字万用表检测, 判断二极管的电极。将万用表转换开关拨到二极管图形符号所示档位, 两表笔分别与二极管两极相接, 读数; 交换表笔再测量一次, 则其中表的示数为“1”者, 黑表笔所接为二极管正极。

判断二极管的材料。将红表笔接二极管正极, 黑表笔接二极管负极, 表的示数为“600”左右的为硅管, 表的示数为“200”左右的为锗管。

若正反测量都不符合上述要求的, 说明二极管已损坏。

(2) 用指针万用表检测, 判断二极管的电极。将万用表的转换开关拨到电阻挡 (小功率管使用 $R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$ 挡, 大功率管使用 $R \times 10\Omega$ 或 $R \times 1\Omega$ 挡), 用表笔分别与二极管的两极相接, 测出电阻; 交换表笔再测量一次, 则所测阻值较小的一次, 黑表笔所接为二极管

的正极（此时二极管正偏。万用表置于电阻挡时，黑表笔接表内电源的正极，红表笔接负极）。

判断二极管的材料。小功率管使用 $R \times 1k\Omega$ 挡，大功率管使用 $R \times 10\Omega$ 挡。将黑表笔接二极管正极，红表笔接二极管负极，指针示数在 1 左右的是锗管，指针示数在 5 左右的是硅管。

用万用表分别与二极管的两极相接，测出正、反两个电阻，若反向电阻与正向电阻的差值较大，则二极管的质量较好，反之，则为劣质管；若正、反向电阻值都是无穷大或都是零，则二极管内部已断路或已被击穿。

2. 二极管的选用

一般根据设备及电路技术要求，查阅半导体器件手册，选用参数满足要求的二极管，在挑选过程中应尽量选用经济、通用、市场容易买到的。具体选用普通二极管时应注意以下几点。

(1) 所选用二极管在使用时不能超过它的极限参数，特别注意不要超过最大整流电流和最高反向工作电压，并留有适当的余量。

(2) 尽量选用反向电流和正向压降均很小的二极管。

(3) 二极管的型号应根据适用场合不同来确定。若用于整流电路，由于工作时平均电流大，应选用整流二极管；若用于高频检波电路，应选用点接触型锗管；若用于高速开关电路，则应选用开关二极管等。

(4) 在维修过程中，若发现二极管已损坏，可选用同型号的二极管来替换。若手头无同型号的二极管，可改用其他型号的同材料的二极管来替代，但替代二极管的极限参数应不低于原二极管的参数。

思考与讨论



1. 半导体二极管伏安特性有几个工作区，各有什么特点？
2. 温度对二极管的特性有哪些影响？
3. 理想二极管有什么特点？二极管的正向导通压降与电阻、电容等器件的导通压降有什么不同？
4. 选用二极管应注意哪些问题？

知识链接：半导体器件型号命名方法



(1) 半导体器件的型号：根据国家标准 GB 249—74，半导体型号由 5 个部分组成，具体见图 1.9。

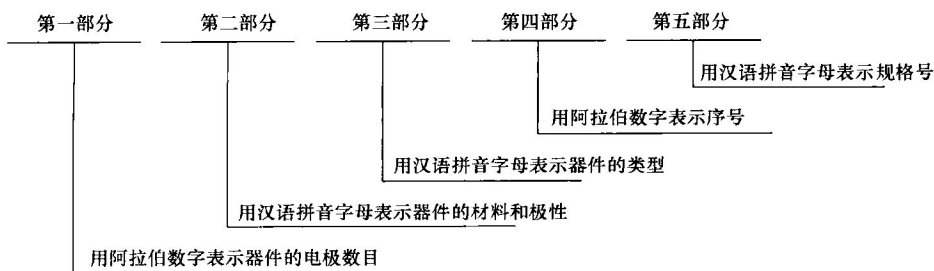


图 1.9 半导体型号组成