



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
五年制高等职业教育专业基础课教学用书

电工电子技术基础

(下册 电子)

教育部机械职业教育教学指导委员会 组编
中国机械工业教育协会

夏奇兵 主编



GUIHUA JIAOCAI

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

gz



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
五年制高等职业教育专业基础课教学用书

电工电子技术基础

(下 册 电 子)

教育部机械职业教育教学指导委员会 组编
中国机械工业教育协会

主编 夏奇兵

参编 刘志超 吴南星

程远东 李冬冬

主审 李怀甫



机械工业出版社

《电工电子技术基础》教材分上册、下册及实验与实训三部分，本书为下册（电子技术部分）。

本书内容包括：半导体二极管和整流电路，半导体三极管和基本放大电路，集成运算放大器，正弦波振荡电路，直流电源稳压、调压电路，逻辑门电路和组合逻辑电路，触发器和时序逻辑电路，脉冲信号的产生与整形，A/D转换器和D/A转换器。

本书可作为高职高专数控技术应用、机电技术等专业基础课教材，也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电工电子技术基础. 下册, 电子/夏奇兵主编. —北京: 机械工业出版社, 2005.1

教育部职业教育与成人教育司推荐教材五年制高等职业教育专业基础课教学用书

ISBN 7-111-15983-7

I. 电… II. 夏… III. ①电工技术—高等学校: 技术学校—教材②电子技术—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 143399 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王世刚 于奇慧

责任编辑: 于 宁 于奇慧

版式设计: 冉晓华 责任校对: 吴美英 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 1 月第 1 版 · 第 2 次印刷

787mm × 1092mm $1/16$ · 12.5 印张 · 304 千字

4 001—8 000 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) 68326294
封面防伪标均为盗版

机电类高等职业技术教育教材建设 领导小组人员名单

顾问：郝广发

组长：杨黎明

成员：刘亚琴 李超群 惠新才 王世刚 姜立增
李向东 刘大康 鲍风雨 储克森 薛涛

专业基础课教材编审委员会名单

苏群荣 胡家秀 薛涛 刘魁敏 杜伟明

邱敏 夏奇兵 李怀甫 柴鹏飞 田鸣

许文茂 赵建彬 王世刚

前言

为了加强高等职业技术教育的教学改革,推进素质教育,培养面向生产、管理、服务第一线的应用型高级技术人才,根据教育部高职高专培养目标的要求,我们认真分析、研讨了五年制高等职业技术教育机电类专业教学计划,根据机电类各专业对电工电子技术的基本要求,编写了《电工电子技术基础》教材。本套教材分上册、下册及实验与实训三部分,本书为下册(电子技术部分)。

本书结合高职高专教育的特点和要求,注重以人为本的教学理念,同时结合五年制学生的生源特点,突出以能力为本位和学以致用原则,在内容的编排方面,以培养学生思考、会学习、会应用为出发点,简明扼要,注意讲清基本概念,注重基本概念的应用,减少理论推导,力求深入浅出,分析准确,内容适度、够用,结合专业实际,不仅开拓学生视野,还为学生学习后续课程打下一定基础。在充分考虑教学需要、自学需要和从事实际工作需要的基础上,力求遵循理论联系实际、用理论指导实践的教学原则,在问题的阐述方面力求作到通俗易懂、突出实际应用。

本书由上海电机学院的夏奇兵任主编,上海电机学院的刘志超、安徽机电职业技术学院的吴南星、四川省电子工业学校的程远东、辽宁机电职业技术学院的李冬冬参编。其中第一章和第四章由程远东编写,第二章由刘志超编写,第三章由吴南星编写,第六章由李冬冬编写,第五章、第七章、第八章和第九章由夏奇兵编写。

本书由四川省电子工业学校的李怀甫副教授主审,他对全书进行了认真、仔细的审阅,提出了许多具体、宝贵的意见,谨在此表示诚挚的感谢。

由于我们水平有限,编写时间仓促,书中难免有错误和不当之处,恳请广大读者批评指正。

编者

第一章 半导体二极管和整流电路 1

第一节 半导体二极管 1

第二节 整流电路 8

第三节 滤波电路 11

第四节 稳压管和简单的稳压电路 15

第五节 二极管的测试及其应用举例 18

本章小结 20

习题一 21

第二章 半导体三极管和基本放大电路 24

第一节 半导体三极管 24

第二节 交流放大电路的结构和工作特点 31

第三节 基本放大电路的静态分析 33

第四节 放大电路的动态分析 35

第五节 静态工作点的确定 40

第六节 射极输出器 43

第七节 多级放大电路及级间耦合方式 46

第八节 放大电路中的负反馈 49

第九节 差动放大电路 55

第十节 场效应晶体管及放大电路 57

本章小结 62

习题二 63

第三章 集成运算放大器 69

第一节 集成运算放大器的介绍 69

第二节 集成运算放大器的线性应用 75

第三节 集成运算放大器的非线性应用 90

本章小结 100

习题三 101

第四章 正弦波振荡电路 106

第一节 自激式振荡器的基本

工作原理 106

第二节 RC 正弦波振荡器 108

第三节 LC 正弦波振荡器 110

第四节 三点式振荡电路 113

本章小结 119

习题四 120

第五章 直流电源稳压、调压电路 122

第一节 串联型直流稳压电路 122

第二节 三端式集成稳压电路 123

第三节 晶闸管和晶闸管可控整流电路 125

本章小结 129

习题五 129

第六章 逻辑门电路和组合逻辑电路 131

第一节 数字逻辑基础 131

第二节 分立元件门电路 134

第三节 TTL 门电路 138

第四节 CMOS 门电路 143

第五节 逻辑代数 145

第六节 组合逻辑电路的分析 152

第七节 组合逻辑电路的设计 153

第八节 典型组合逻辑电路 155

本章小结 164

习题六 164

阅读材料 美国标准信息交换码 (ASC II) 166

第七章 触发器和时序逻辑电路 167

第一节 集成触发器 167

第二节 寄存器 170

第三节 计数器 172

本章小结 176

前言 1

第一章 半导体二极管和整流电路 1

第一节 半导体二极管 1

第二节 整流电路 8

第三节 滤波电路 11

第四节 稳压管和简单的稳压电路 15

第五节 二极管的测试及其应用举例 18

本章小结 20

习题一 21

第二章 半导体三极管和基本放大电路 24

第一节 半导体三极管 24

第二节 交流放大电路的结构和工作特点 31

第三节 基本放大电路的静态分析 33

第四节 放大电路的动态分析 35

第五节 静态工作点的确定 40

第六节 射极输出器 43

第七节 多级放大电路及级间耦合方式 46

第八节 放大电路中的负反馈 49

第九节 差动放大电路 55

第十节 场效应晶体管及放大电路 57

本章小结 62

习题二 63

第三章 集成运算放大器 69

第一节 集成运算放大器的介绍 69

第二节 集成运算放大器的线性应用 75

第三节 集成运算放大器的非线性应用 90

本章小结 100

习题三 101

第四章 正弦波振荡电路 106

第一节 自激式振荡器的基本

工作原理 106

第二节 RC 正弦波振荡器 108

第三节 LC 正弦波振荡器 110

第四节 三点式振荡电路 113

本章小结 119

习题四 120

第五章 直流电源稳压、调压电路 122

第一节 串联型直流稳压电路 122

第二节 三端式集成稳压电路 123

第三节 晶闸管和晶闸管可控整流电路 125

本章小结 129

习题五 129

第六章 逻辑门电路和组合逻辑电路 131

第一节 数字逻辑基础 131

第二节 分立元件门电路 134

第三节 TTL 门电路 138

第四节 CMOS 门电路 143

第五节 逻辑代数 145

第六节 组合逻辑电路的分析 152

第七节 组合逻辑电路的设计 153

第八节 典型组合逻辑电路 155

本章小结 164

习题六 164

阅读材料 美国标准信息交换码 (ASC II) 166

第七章 触发器和时序逻辑电路 167

第一节 集成触发器 167

第二节 寄存器 170

第三节 计数器 172

本章小结 176

第一章 半导体二极管和整流电路

半导体二极管是用半导体晶体材料制成的，所以，又称晶体二极管。半导体二极管在各种电子线路中有着广泛的用途。本章先讨论半导体的基本知识，再介绍二极管的结构、特点和主要参数，然后分别介绍整流电路、滤波电路、稳压电路及二极管的测试。

第一节 半导体二极管

一、半导体概述

自然界存在各种不同性质的物质，按导电能力强弱可分为导体、绝缘体和半导体，导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫半导体。常用的半导体材料有硅、锗、硒、砷化镓等，硅和锗都是四价元素，原子核最外层有四个价电子。

半导体还有一些特殊的性质，如光敏特性、热敏特性及掺杂特性等。即半导体受到光照和热的辐射，或在纯净的半导体中掺入微量的其他元素（也叫“杂质”）后，它的导电能力将有明显的改善。利用半导体的这些特性可制造出具有不同性能的半导体器件。

1. 本征半导体

完全纯净的半导体晶体，叫做本征半导体。以硅晶体为例，它们的原子排列很有规律，并且每两个相邻原子共有一对价电子，这样的组合叫做共价键结构，如图 1-1 所示。共价键中的价电子受两个原子核的制约，如果没有足够的能量就无法挣脱共价键的约束。因此，在热力学温度 0K （ -273.16°C ），且无外界能量的激发时，本征半导体中虽有大量的价电子，但却没有自由电子，和绝缘体一样不导电。在常温（热力学温度 300K ）下，或者受到光照，将有少数价电子获得足够的能量，挣脱共价键的束缚，跳到键外，成为自由电子。值得注意的是，价电子挣脱共价键成为自由电子后，在原来的共价键的相应位置处就留下空位，这个空位称为“空穴”，如图 1-2 所示，空位处因为少了一个带负电的价电子而呈正极性，因此空穴带有一个单位正电荷。显然，自由电子和空穴总是相伴而生，成对出现的，所以称之“电子空穴对”。可见，半导体仍呈电中性。我们把在热或光的作用下，本征

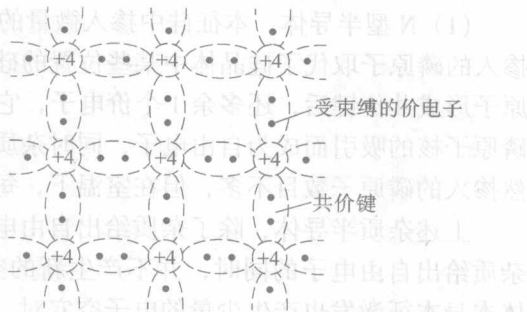


图 1-1 硅晶体的共价键结构

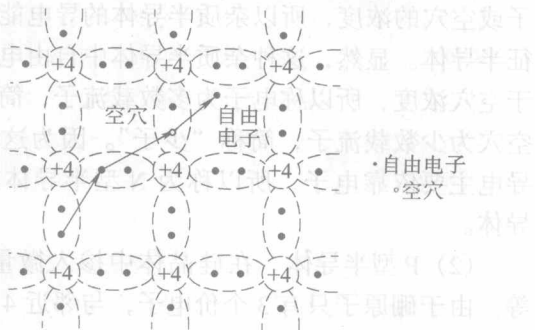


图 1-2 本征激发产生电子空穴对及其移动

的，所以称之“电子空穴对”。可见，半导体仍呈电中性。我们把在热或光的作用下，本征

半导体中产生电子空穴对的现象，称为本征激发。

本征激发产生空穴后，在其附近作热运动的价电子很容易被这个正电荷所吸引，从而填补到这个空位上，这个电子原来的位置又留下新的空位，这就相当于空穴移动了一个位置，因此，带正电荷的空穴也能像自由电子一样，在晶体中作热运动，如图 1-2 所示。此时若在半导体的上加上电压，自由电子将朝外电源正极的方向移动，产生电子电流；空穴将朝相反方向（外电源负极）移动，形成半导体中的空穴电流。可见，在外电场力的作用下，两种载流子（自由电子和空穴）的运动会产生电流。自由电子和空穴的运动方向是相反的，但它们产生的电流方向是一致的，电路电流为二者之和。

对于本征半导体，由于热激发而产生的自由电子和空穴会不会不断增多呢？不会的，因为在热运动中自由电子和空穴一旦相遇，空位子就会被自由电子填补掉，两者便一道消失，这个过程叫做自由电子和空穴的复合过程。在一定温度下，电子空穴对既产生又复合，达到相对的动态平衡。这时，产生与复合过程虽然在进行，但是电子空穴对却维持一定的数目。载流子的浓度不仅与半导体材料的性质有关，还对温度十分敏感。对于硅材料，温度每升高 8°C ，载流子的浓度大约增加 1 倍；对于锗材料，温度每升高 12°C ，载流子的浓度大约增加 1 倍。

2. 杂质半导体

本征半导体中，载流子的数目有限，导电能力很低，本身用处不大。但如果在本征半导体中掺入微量的杂质，导电性能却会发生显著改变。由于掺入杂质的性质不同，分成 N 型半导体和 P 型半导体。

(1) N 型半导体 本征硅中掺入微量的五价元素，例如磷 (P)、砷 (As)、锑 (Sb) 等。掺入的磷原子取代了硅晶体中某些位置的硅原子。由于磷原子有 5 个价电子，与邻近 4 个硅原子形成共价键后，还多余 1 个价电子，它不受共价键束缚，只要获得很少的能量就能挣脱磷原子核的吸引而成为自由电子，同时杂质磷原子变成带正电荷的离子，如图 1-3 所示。虽然掺入的磷原子数目不多，但在室温下，每掺入一个磷原子便产生一个自由电子。

上述杂质半导体，除了杂质给出自由电子外（注意杂质给出自由电子的同时，并不产生新的空穴），原晶体本身本征激发也产生少量的电子空穴对。通常，掺杂所产生的自由电子浓度远大于本征激发所产生的自由电子或空穴的浓度，所以杂质半导体的导电能力远超过本征半导体。显然，这种杂质半导体中自由电子浓度远大于空穴浓度，所以称电子为多数载流子，简称“多子”，空穴为少数载流子，简称“少子”。因为这种半导体的导电主要依靠电子，所以称为 N 型半导体或电子型半导体。

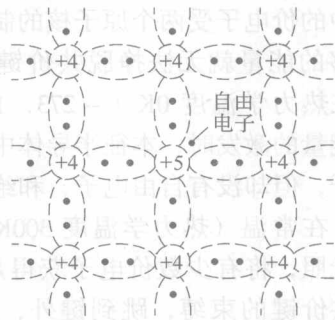


图 1-3 N 型半导体结构

(2) P 型半导体 在硅晶体中掺入微量的三价元素，例如硼 (B)、镉 (In)、镓 (Ga) 等。由于硼原子只有 3 个价电子，与邻近 4 个硅原子形成共价键时，缺少了 1 个价电子而产生一个空位，在室温下它很容易吸引邻近硅原子的价电子来填充，于是杂质原子变为带负电荷的离子，而邻近硅原子的共价键因缺少一个电子，出现了一个空穴，如图 1-4 所示。这样每个杂质原子都会提供一个空穴，从而使空穴载流子的数目大大增加成为多子，自由电子成

为少子，故这种杂质半导体叫做 P 型半导体或空穴型半导体。

综上所述，杂质半导体中，多子的浓度取决于所掺杂质的浓度，与温度无关，而少子是由本征激发产生的，故它的浓度与温度或光照密切相关。杂质半导体中正负电荷数量相等，因此仍然保持电中性。

3. PN 结

单纯的 P 型半导体或 N 型半导体，仅仅是导电能力增强了，并不能做成我们所需要的半导体器件。若在一块本征半导体基片上，通过掺杂使一侧形成 N 型半导体，另一侧形成 P 型半导体，则在两种半导体的界面附近形成一个具有特殊性质的薄层，叫做 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

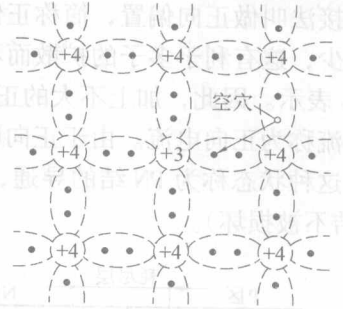


图 1-4 P 型半导体结构

(1) PN 结的形成 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时，在交界的地方必然发生由于电子与空穴的浓度不均匀分布，而引起的载流子从浓度高的区域向浓度低的区域扩散的现象，如图 1-5a 所示。扩散至 N 区的空穴与电子复合，扩散至 P 区的电子与空穴复合，在交界面附近，出现了由不能移动的带电离子组成的空间电荷区（由于载流子消耗尽了，又叫耗尽层）。P 型侧为负离子区，N 型侧为正离子区，它们形成了一个由 N 区指向 P 区的内建电场（简称内电场）。载流子浓度差愈大，则空间电荷区愈宽，内电场也愈强。内电场的这种方向，将给载流子的运动带来两种影响：一是内电场阻碍两区多子的扩散运动，二是内电场使 P 区和 N 区的少数载流子产生与扩散方向相反的运动。我们把载流子在电场力作用下的定向运动叫做漂移运动。从 N 区漂移到 P 区的空穴，填补了 P 区失去的空穴；从 P 区漂移到 N 区的电子，填补了 N 区失去的电子，从而使空间电荷减少，内电场削弱，又有利于扩散而不利漂移。结果，因载流子的扩散运动而建立的空间电荷区又因载流子的漂移运动而变窄。

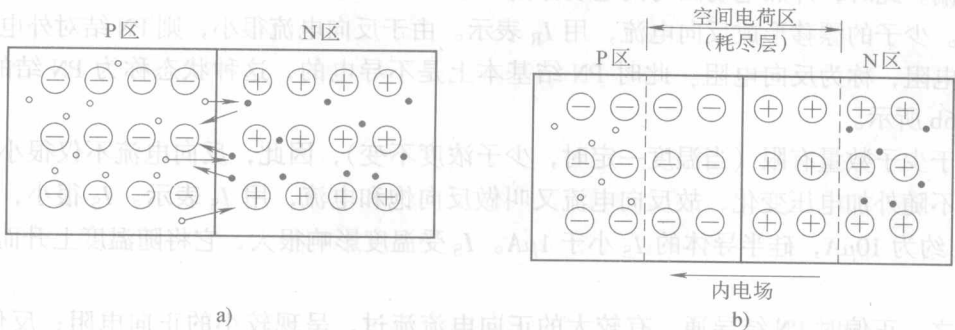


图 1-5 PN 结的形成

a) 载流子的扩散运动 b) 平衡状态下的 PN 结

由此可见，扩散与漂移既相互联系，又相互矛盾。扩散使空间电荷区加宽，内电场增强，反过来对扩散阻力加大，使漂移容易进行；而漂移又使空间电荷区变窄，内电场削弱，这又使扩散容易而阻碍漂移。开始时，扩散占优势，随着扩散进行，空间电荷区加宽，内电场增强，于是漂移也不断增强，当漂移运动与扩散运动达到相等时，便处于动态平衡状态，如图 1-5b 所示。此时，两边虽然仍有载流子的往返，但扩散电流与漂移电流大小相等，方

向相反, 流过 PN 结中的电流为零, 空间电荷的宽度和内电场强度都是定值。至此, “PN 结”宣告形成。

(2) PN 结的单向导电性 PN 结外加正向电压, 即 P 区接电源正极, N 区接电源负极, 这种接法叫做正向偏置, 简称正偏。此时, 内电场因与外电场方向相反而受到削弱, 空间电荷减少, 这有利于多子的扩散而不利子少子的漂移。多子的扩散通过外电路形成正向电流, 用 I_F 表示。因此, 加上不大的正向电压, 就可产生相当大的电流, 我们把正偏时 PN 结流过的电流称为正向电流。由于正向电流较大, 则 PN 结对外电路呈现较小的电阻, 称为正向电阻, 这种状态称为 PN 结的导通, 如图 1-6a 所示 (图中电阻 R 为限流电阻, 其作用是保护 PN 结不被损坏)。

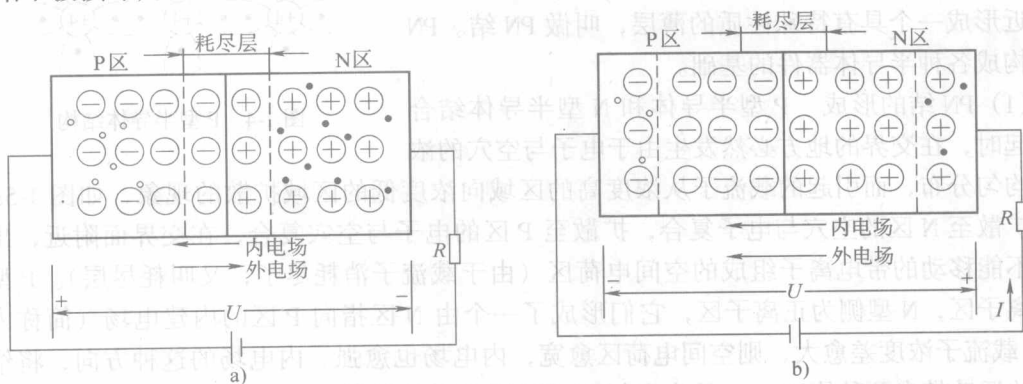


图 1-6 外加电压时的 PN 结

a) 正偏 b) 反偏

PN 结外加反向电压, 就是 P 区接电源负极, N 区接电源正极, 这种接法叫做反向偏置, 简称反偏。此时, 外加电场因与内电场方向一致, 因此使内电场得到加强, 阻碍扩散而有利于漂移。少子的漂移形成反向电流, 用 I_R 表示。由于反向电流很小, 则 PN 结对外电路呈现很大的电阻, 称为反向电阻。此时 PN 结基本上是不导电的, 这种状态称为 PN 结的截止, 如图 1-6b 所示。

由于少数数量有限 (当温度一定时, 少数浓度不变), 因此, 反向电流不仅很小, 而且基本上不随外加电压变化, 故反向电流又叫做反向饱和电流, 用 I_S 表示。 I_S 很小, 锗半导体的 I_S 约为 $10\mu\text{A}$, 硅半导体的 I_S 小于 $1\mu\text{A}$ 。 I_S 受温度影响很大, 它将随温度上升而显著增加。

总之, 正偏时 PN 结导通, 有较大的正向电流流过, 呈现较小的正向电阻; 反偏时 PN 结截止, 仅有微小反向饱和电流流过, 几乎不导电, 呈现很大的反向电阻。这就是 PN 结的单向导电性。

(3) PN 结的电容效应 PN 结具有电容效应, 按产生的原因不同分为势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 两种。

1) 势垒电容 C_b : PN 结的空间电荷随外加电压 (无论是正偏还是反偏) 变化而形成的电容效应, 叫做势垒电容, 记为 C_b 。例如, 当外加正向电压增加时, 由于空穴的扩散, 中和一部分带电粒子, 空间电荷量减少, 就像一部分电子和空穴“存入”PN 结, 相当于势垒

电容充电；外加正向电压减少时，又有一部分电子和空穴离开 PN 结，好似电子和空穴从 PN 结中“取出”，相当于势垒电容放电；当外加电压不变时，空间电荷量保持不变，势垒电容无充放电现象。因此，势垒电容只在外加电压变化时才起作用，外加电压频率越高，其作用越显著。

2) 扩散电容 C_d ：外加正向电压时，PN 结两边的载流子向对方区域作扩散运动，扩散到对方区域的载流子并不立即复合消失，而是在一定路程内，一边扩散，一边复合消失。于是，P 区积累（存入）大量的电子，N 区存入大量的空穴。存入电荷的多少随外加电压变化，也是一种电容效应，称为扩散电容，用 C_d 来描述。

PN 结的结电容 C_j 为势垒电容与扩散电容之和，即

$$C_j = C_b + C_d \quad (1-1)$$

正向偏置时， $C_b \ll C_d$ ，结电容以扩散电容为主；反向偏置时， $C_b \gg C_d$ ， C_j 主要由势垒电容决定。

二、二极管的结构和类型

二极管是用一个 PN 结做成管芯，在 P 区和 N 区两侧各接上电极引线，并以管壳封装而成，如图 1-7a 所示。P 区引出电极叫阳极（或正极），用 a 表示，N 区引出电极叫阴极（或负极），用 k 表示。二极管的符号如图 1-7b 所示，其中三角箭头表示正向电流的方向，即正向电流从二极管的阳极流入，阴极流出。

二极管的类型很多，按所用的半导体材料的不同分，有硅二极管和锗二极管。按内部结构的不同分，有点接触型、面接触型和平面型，如图 1-8 所示。

点接触型二极管 PN 结结面积很小，不允许通过较大的电流，但它的结电容小，可以在高频下工作，因此，适用于小电流整流、高频检波、混频等。国产二极管中的 2AP、2AK 型，就属于点接触型。

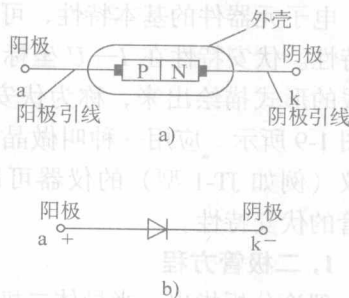


图 1-7 二极管的组成和符号

a) 组成 b) 符号

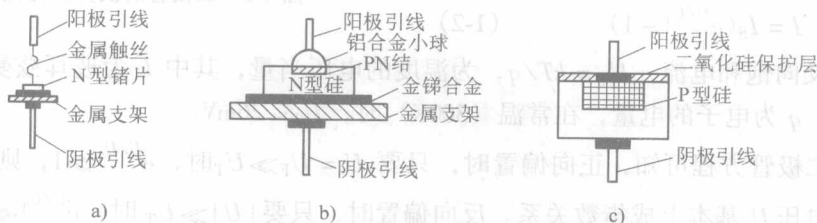


图 1-8 二极管的内部结构

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 平面型

面接触型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法做成的，它的 PN 结结面积大，可通过较大的电流，但结电容也较大，因此不能在高频情况下工作，只能用于较大电流整流等低频电路中。国产二极管中的 2CP、2CZ 型，就属于面接触型。

硅平面型二极管是采用制造平面管的工艺制成的。其中 PN 结面积较大的管子可通过较

大的电流，适用于大功率整流；结面积较小的管子因其结电容小，适用于脉冲数字电路中作开关管。

此外，还有若干利用 PN 结的各种特性制出的特殊二极管。

常用二极管的型号及用途见表 1-1。

表 1-1 常用二极管的型号、意义和用途

型 号	意 义	用 途
2AP	锗普通二极管	检波、限幅、小电流整流
2AK	锗开关二极管	开关电路或检波、整流
2CP	硅普通二极管	整流
2CZ	硅整流二极管	电源中整流
2CK	硅开关二极管	高速开关电路、高频电路
2DP	硅普通二极管	高压整流
2DZ	硅整流二极管	电源中整流
2AN	锗阻尼二极管	黑白电视机中阻尼与升压
2CN	硅阻尼二极管	电视机中阻尼与升压、大电流中速开关
2CW、2DW	硅稳压二极管	稳压

三、二极管的伏安特性

电子元器件的基本特性，可用流过它的电流 I 与它两端电压 U 的关系来描述，这就是伏安特性。伏安特性在 $I-U$ 坐标平面上是以曲线的形式描绘出来，称为伏安特性曲线，如图 1-9 所示。应用一种叫做晶体管特性图示仪（例如 JT-1 型）的仪器可以观察到晶体管的伏安特性。

1. 二极管方程

理论分析指出，半导体二极管的伏安特性（反向击穿前）可以用二极管方程表示，即

$$I = I_S(e^{U/U_T} - 1) \tag{1-2}$$

式中， I_S 为反向饱和电流； $U_T = kT/q$ ，为温度的电压当量，其中 k 为玻耳兹曼常数， T 为热力学温度， q 为电子的电量，在常温（300K）时， $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

由理想二极管方程可知，正向偏置时，只要 $U = U_F \gg U_T$ 时， $e^{U/U_T} \gg 1$ ，则 $I = I_S e^{U/U_T}$ ，即电流 I 与电压 U 基本上成指数关系。反向偏置时，只要 $|U| \gg U_T$ 时， $e^{U/U_T} \ll 1$ ，则有 $I \approx -I_S$ 。即反向电压达到一定值后，反向电流 I 就是反向饱和电流 $-I_S$ 。

2. 二极管的伏安特性曲线

由图 1-9 可看出，二极管的伏安特性具有下述的特点：

(1) 正向特性 正向特性曲线开始部分（图 1-9 中 OA 段）变化很平缓，说明当正向电压小于某一数值 U_{th} 时，由于外电场还不足以克服内电场，扩散运动难以进行，正向电流几乎为零，二极管呈现较大的电阻，这个区域叫做死区， U_{th} 叫做阈值电压（门坎电压或死区电压）。硅管 $U_{th} = 0.5\text{V}$ ，锗管 $U_{th} = 0.1\text{V}$ 。死区以后的正向特性曲线上升较快（图中 AB

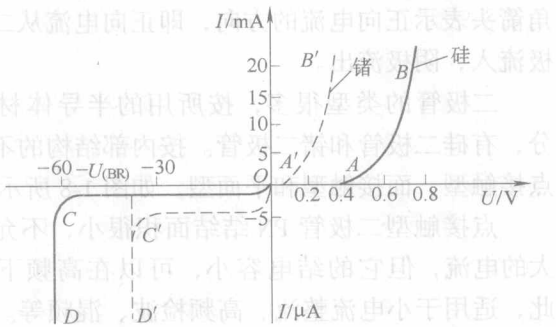


图 1-9 二极管的伏安特性曲线

段),说明当正向电压超过 U_{th} 后,内电场大大削弱,有利于多子的扩散,正向电阻较小,正向电流基本上按指数规律增长,二极管处于导通状态。硅管的导通压降为 $0.6 \sim 0.8V$,锗管的导通压降为 $0.1 \sim 0.3V$ 。

(2) 反向特性 反向特性曲线(图中 OC 段)靠近横轴,说明二极管外加反向电压时,反向饱和电流 I_S 很小,管子处于反向截止状态,呈现很大的电阻,而且反向饱和电流 I_S 几乎不随反向电压的增大而变化。小功率硅管的反向电流一般小于 $0.1\mu A$,而锗管通常为几十微安。

(3) 反向击穿特性 在图中,当由 C 点继续增大反向电压时,反向电流将突然上升,这种现象叫反向击穿。 $U_{(BR)}$ 叫反向击穿电压,一般为几十伏以上(高压管可达几千伏)。

反向击穿有电击穿和热击穿。电击穿是可逆的,只要反向电压降低后,二极管仍可恢复正常。但是,电击穿时如果没有适当的限流措施,就会因电流大,电压高,使管子过热造成永久性损坏,这叫做热击穿。电击穿往往为人们所利用(如稳压管),而热击穿必须避免。

3. 温度对二极管伏安特性的影响

由于二极管主要由 PN 结构成,所以它的特性对温度很敏感,如图 1-10 所示。在同一正向电流下,随着温度的升高,二极管

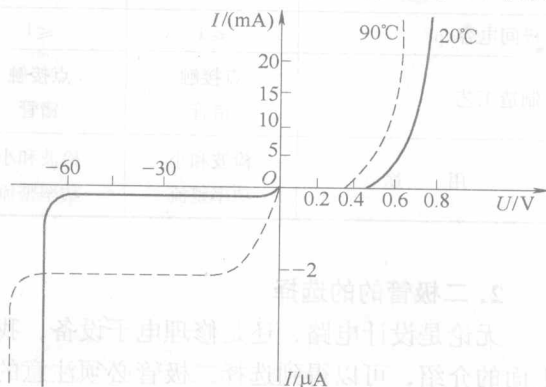


图 1-10 温度对硅二极管伏安特性曲线的影响

的正向压降反而减小,即 PN 结具有负的温度特性。通常当温度每升高 $1^{\circ}C$,正向压降减小 $2mV$ 左右。再看反向特性,随着温度的升高,反向饱和电流 I_S 急剧增大。通常温度每升高 $10^{\circ}C$, I_S 约增大一倍。此外,温度升高时,由于 $U_{(BR)} > 7V$ 的二极管的 $U_{(BR)}$ 增大, $U_{(BR)} < 4V$ 的二极管的 $U_{(BR)}$ 减小,而一般硅二极管的 $U_{(BR)}$ 均大于 $7V$,因此反向特性左移。

四、二极管的主要参数及其选择

1. 二极管的主要参数

二极管的性能除了用伏安特性表示外,还可以用一些参数来描述。参数是用来定量描述管子性能的指标,它表明管子的应用范围。它是正确使用和合理选择管子的依据。二极管的主要参数有:

(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平均电流。实际使用时的工作电流应小于 I_F ,如果超过此值,将引起 PN 结过热而损坏。

(2) 最高反向工作电压 U_R U_R 为工作时二极管两端所允许加的最大反向电压。为安全起见,一般取 $U_R = U_{(BR)}/2$ 。在实际运用时二极管所承受的最高反向工作电压不应超过 U_R ,否则二极管就有发生反向击穿的危险。

(3) 反向电流 I_R I_R 是指二极管未被反向击穿时的反向电流值。此值越小,二极管的单向导电性越好。由于温度升高时 I_R 将急剧增大,所以使用时要注意温度的影响。

(4) 最高工作频率 f_M f_M 是由 PN 结的结电容大小决定的参数。如果信号频率超过管子的 f_M ,则结电容的容抗变小,高频电流将直接从结电容通过,管子的单向导电性变差。

表 1-2 列出了几种国产二极管的参数，以供参考。

表 1-2 几种国产二极管的参数

参 数	型 号				
	2A P1—2A P7	2A P11—2A P17	2C P1—2C P28	2C K1—2C K19	2C Z11—2C Z13
最大整流电流/mA	12 ~ 25	15 ~ 40	5 ~ 400	30 ~ 100	1000 ~ 5000
最高反向工作电压/V	20 ~ 100	10 ~ 100	25 ~ 800	10 ~ 180	50 ~ 1000
反向电流/ μ A	≤ 250	≤ 250	$\leq 5 \sim 250$	≤ 1	$\leq 0.6 \sim 2/\text{mA}$
最高工作频率/MHz	≤ 150	≤ 40	3 ~ 50	反向恢复时间 $\leq 150\text{ns}$	3kHz
极间电容/pF	≤ 1	≤ 1	$\leq 5 \sim 250$	$\leq 3 \sim 30$	
制造工艺	点接触 锗管	点接触 锗管	面结型 硅管	平面型 开关管	硅扩散型 整流管
用 途	检波和小 功率整流	检波和小 功率整流	小功率整流 和一般整流	开关、脉冲及 超高频电路	大功率 整 流

2. 二极管的的选择

无论是设计电路，还是修理电子设备，我们都会面临一个如何选择二极管的问题。根据上面的介绍，可以得到选择二极管必须注意的几点：

(1) 设计电路时，根据电路对二极管的要求查阅半导体器件手册，从而确定选用的二极管型号。确定选用管子型号时，选用的二极管极限参数 I_F 、 U_R 和 f_M 应分别大于电路对二极管的最大平均电流、最大反向工作电压和最高工作频率的要求。并应注意：要求导通电压低时选锗管，要求反向电流 I_R 小时选硅管，要求反向击穿电压高时选硅管，要求工作频率高时选 f_M 高的点接触型号，要求工作环境温度高时选硅管。

(2) 在修理电子设备时，如果发现二极管损坏，则用同型号的管子来替换。如果找不到同型号的管子而改用其他型号二极管来替代时，则替代管子极限参数 I_F 、 U_R 和 f_M 应不低于原管，且替代管子的材料类型（硅管和锗管）一般应和原管相同。

第二节 整 流 电 路

整流电路是小功率（200W 以下）直流稳压电源的组成部分，其主要功能是利用二极管的单向导电性，将市电网的单相正弦交流电压转变成单方向脉动的直流电压。然后，再经滤波电路和稳压电路，得到平滑而稳定的直流电压源，为电子电路提供能源。

常见的单相整流电路有半波、全波、桥式及倍压整流电路。我们重点讨论单相半波整流电路和单相桥式整流电路。

一、整流电路的技术指标

1. 整流电路的性能指标

(1) 输出电压的平均值 $U_o(AV)$ 它是输出电压 u_o 在一个周期内的平均值，即 u_o 的直流

分量。它的大小反映整流电路将交流电压转换成直流电压的能力。

(2) 脉动系数 S 它定义为整流后的输出电压 u_o 中基波分量幅值 U_{o1M} 与平均值 $U_{o(AV)}$ 之比。即

$$S = \frac{U_{o1M}}{U_{o(AV)}} \quad (1-3)$$

它说明整流电路输出电压中交流成分的大小，是用来衡量整流电路输出平滑程度的指标。

2. 整流二极管的参数

(1) 流过整流二极管的正向平均电流 $I_{V(AV)}$ 选择整流二极管时，应满足 $I_F > I_{V(AV)}$ 。

(2) 整流二极管所承受的最大反向电压 U_{RM} 选择整流二极管时，应满足 $U_R > U_{RM}$ 。

同时注意，除满足上述条件外，还要留有充分的余量。

二、单相半波整流电路

半波整流电路如图 1-11a 所示。通常由降压电源变压器 TR，整流二极管 VD 和电阻性负载 R_L 组成。

1. 工作原理

设变压器二次绕组交流电压 $u_2 = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$ ，其中 U_{2m} 为其幅值， U_2 为有效值。当 u_2 处于正半周时，二极管 VD 受正向偏置电压而导通（为简化分析，假设整流管为理想二极管，正向压降为零，反向电阻为无穷大）， $u_o = u_2$ ；当 u_2 处于负半周时，二极管 VD 处于反向偏置状态而截止， $u_o = 0$ 。即

$$u_o = \begin{cases} \sqrt{2} u_2 \sin \omega t & 0 \leq \omega t \leq \pi \\ 0 & \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (1-4)$$

u_o 的波形如图 1-11b 所示，它是一个单相脉动电压，好像将正弦波削掉一半，所以称它为半波整流电路。

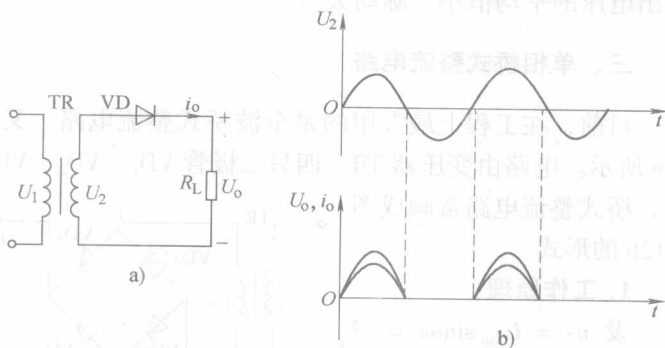


图 1-11 单相半波整流电路

a) 电路 b) 波形图

2. 电路的分析

(1) 输出电压的平均值 $U_{o(AV)}$ 将图 1-11b 中的电压 u_o 用傅里叶级数分解为

$$u_o = \sqrt{2} U_2 \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \dots \right) \quad (1-5)$$

其中的直流分量就是 $U_{o(AV)}$ 。所以

$$U_{o(AV)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.45 U_2 \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可知，单相半波整流电路输出电压的平均值（直流分量）只是变压器二次电压有效值的 45%。它的转换效率较低。

(2) 输出电压的脉动系数 S 由式 (1-5) 可得

$$U_{o1M} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_2 \quad (1-7)$$

将式 (1-6) 和式 (1-7) 代入式 (1-3), 求出

$$S = \frac{\sqrt{2} U_2 / 2}{\sqrt{2} U_2 / \pi} = \frac{\pi}{2} \approx 1.57 \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可知, 单相半波整流电路输出电压的脉动较大, 因此只能用在对脉动要求不高的场合。

(3) 整流二极管的平均电流 $I_{V(AV)}$ 由图 1-11a 可知, 通过整流二极管的电流与负载电流相同, 所以

$$I_{V(AV)} = I_{o(AV)} = \frac{U_{o(AV)}}{R_L} \approx \frac{0.45 U_2}{R_L} \quad (1-9)$$

(4) 整流二极管承受的最大反向电压 U_{RM} 在单相半波整流电路中, 当 u_2 处于负半周时, 电路中 i_o 和 u_o 均为零。此时, 二极管承受的反向电压就是 u_2 , 其最大值就是 u_2 的峰值。即

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 \quad (1-10)$$

由以上分析可知, 单相半波整流电路结构简单, 所用二极管少, 但缺点是转换效率低, 输出电压的平均值小、脉动大。

三、单相桥式整流电路

目前, 在工程上最常用的是全波桥式整流电路, 又称桥式整流器。其典型电路如图 1-12a 所示。电路由变压器 TR, 四只二极管 VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 VD_4 和负载 R_L 组成。为了绘图方便, 桥式整流电路常画成图 1-12b 的形式。

1. 工作原理

设 $u_2 = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$, 在电压 u_2 的正半周时, 即上正下负, 二极管 VD_1 、 VD_3 因受正向偏压而导通; VD_2 、 VD_4 因承受反向电压而截止。电流 i_o 的通路是由 A 端 $\rightarrow$ VD_1 $\rightarrow$ R_L $\rightarrow$ VD_3 $\rightarrow$ B 端。于是在负载 R_L 上得到 u_L 的半波电压。

在电压 u_2 的负半周内, 即上负下正, 二极管 VD_1 、

VD_3 均截止, VD_2 、 VD_4 均导通, 电流 i_o 的通路是由 B 端 $\rightarrow$ VD_2 $\rightarrow$ R_L $\rightarrow$ VD_4 $\rightarrow$ A 端。同样, 在负载 R_L 上得到与正半周时的电压波形相同的半波电压。

因此, 当电源变化一个周期后, 在负载电阻 R_L 上得到的电压和电流是单向全波脉动波

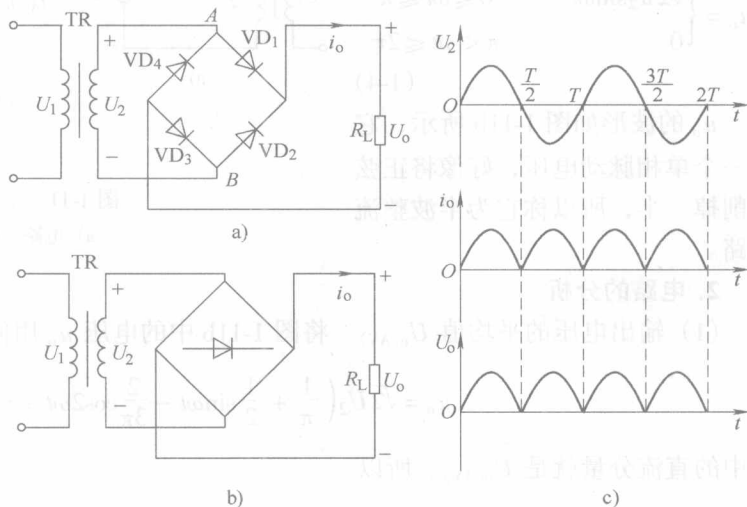


图 1-12 桥式整流电路