

职业学校电子类教材（实用电子技术专业）

模拟电路

●（第二版）

● 廖爽 主编 ● 刘志平 主审

● 电子工业出版社



职业学校电子类教材(实用电子技术专业)

模 拟 电 路(第二版)

廖 爽 主编

刘志平 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书是根据国家教委的要求组织编写的职业学校电子类教材。全书共分八章:半导体二极管和三极管;晶体管交流放大器;放大电路中的反馈;直流放大电路与集成运放;低频功率放大电路;正弦波振荡电路;直流稳压电源;调制、解调与变频。每章后有小结和习题。

重新编写后的本书重点突出,简练通俗,注重基础知识和基本概念的讲述与练习,注意实际应用,并照顾到教学实际和学生考工的需要,使之更符合职业学校的教学特点。

丛 书 名: 职业学校电子类教材(实用电子技术专业)

书 名: 模拟电路(第二版)

主 编: 廖 爽

主 审: 刘志平

责任编辑: 刘文杰

印 刷 者: 民族印刷厂

出版发行: 电子工业出版社出版、发行 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036 教材部电话: 010 66708597

经 销: 各地新华书店经销

开 本: 787×1092 1/16 印张: 11.5 字数: 298 千字

版 次: 1997 年 10 月第二版 1998 年 8 月第三次印刷

书 号: ISBN 7-5053-4073-5
C·335

定 价: 13.50 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换
版权所有·翻印必究

出版说明

根据 1986 年全国职业技术教育工作会议关于“职业技术教育管理职责暂行规定”的分工精神和国家教委的要求,为了满足职业学校、职业中专等职业学校的迅速发展对教材的需要,我部组织了职业学校电子类教材的编审与出版。成立了有 14 个省、市、自治区的教师和职教主管部门领导参加的职业学校电子类教材工作领导小组和编审委员会,制订了“实用电子技术”及“计算机”两个专业的参考性教学计划和 1988~1991 年教材出版规划。根据规划出版了第一轮教材 28 种、教学录像带 2 种。

为贯彻《国务院关于发展职业技术教育的决定》的精神,为进一步完善职业学校电子类教材的需要,我们根据调整完善的原则,成立了有 17 个省、市、自治区的教师和职教主管部门领导参加的第二轮职业学校电子类教材工作领导小组和编审委员会。修改了“实用电子技术”、“计算机”两个专业的参考性教学计划,制订了“通信广播”专业的参考性教学计划和第二轮(1992~1995 年)职业学校电子类教材编审、出版规划,列入规划的教材共 37 种选题。

这一轮教材选题的确定和教材书稿的编写要求,除以教学计划、大纲为依据外,还以劳动部、机械电子工业部颁发的《电子工业工人技术等级标准》中级工知识、技能要求为准则,较好地突出了职业学校着重职业技能训练的特点,侧重于教材的实用性、科学性以及增强学生实验和操作技能训练的内容。为适应各地电子工业发展的需要,教材除注意基础知识外,也适当反映了电子行业的现代技术。另一方面,由于电子类专业分支多,教材编写还立足于宽口径,以方便不同专业选用。

编写职业学校教材始终是一个新课题,经验不足,希望全国电子类职业学校广大师生积极提出批评建议,共同为进一步提高教材质量而努力。

机械电子工业部电子类专业教材办公室

一九九三年一月

全国职业高中电子类教材工作领导小组

组长:

姚志清 (中国电子工业总公司教育局副局长)

副组长: (以下按姓氏笔划为序)

孙金兰 (北京市教育局职教办副主任)

李 群 (黑龙江省教委职教处处长)

李步斗 (江苏省教委职教处处长)

赵家鹏 (机电部电子类专业教材办主任)

褚家蒙 (四川省教委职教处副处长)

成员:

王仲伦 (甘肃省教委职教处副处长)

刘志平 (北京市职教中心教研员)

苏 丹 (新疆维吾尔自治区教委副主任)

张兆松 (山东省教委职教处副处长)

李宏栋 (天津市教育教研室职教教室主任)

李启源 (广西壮族自治区教委职教处副处长)

何肃波 (吉林省教委中职处副处长)

张荫生 (上海市中等职业教育中心副校长)

何雪涛 (浙江省教委职教处主任科员)

杨玉民 (北京市教育局副局长)

林春赞 (湖北省教委职教处处长)

费爱伦 (上海市教育局中职处副处长)

梁 义 (辽宁省教委中职处副处长)

葛玉刚 (河北省教委职教处处长)

韩学理 (陕西省教育科学研究所副所长)

翟汝直 (河南省教委职教研究室主任)

秘书长:

邓又强 (电子工业出版社副总编)

副秘书长:

王玉国 (电子工业出版社编辑)

全国职业高中电子类教材编审委员会

主任委员：

杨玉民 (北京市教育局副局长)

副主任委员：(以下按姓氏笔划为序)

刘志平 (北京市职教中心教研员)

张荫生 (上海市中等职业教育中心副校长)

[实用电子技术编审组]

组长：

刘志平 (北京市职教中心教研员)

副组长：

李蕴强 (天津市教育教研室教研员)

陈其纯 (江苏省苏州市电子职业中学教研组长)

张晓明 (黑龙江省教育学院职教部教研员)

组员：

白春章 (辽宁省教育学院职教部教研员)

朱大海 (河北省教科所研究室主任)

孙介福 (四川省教科所职教室主任)

刘洪志 (河南省新乡市机电部 22 所职高教师)

沈大林 (北京市宣武职教中心副校长)

陈先铭 (广西壮族自治区柳州市一职高教研组长)

吴恒丰 (湖北省武汉市第一职教中心教务主任)

杜德昌 (山东省教学研究室教研员)

张志强 (甘肃省武威职业学校校长)

周金波 (河南省郑州市教委职业教研室副主任)

金国砥 (浙江省杭州市红星职业中学教研组长)

杨荫彪 (河北省河北机电学校电子系主任)

俞兰浦 (上海市静安职业学校校长)

徐洪吉 (吉林省吉林大学机关学校教师)

[计算机技术编审组]

组长：

张荫生 (上海市中等职业教育中心副校长)

副组长：

王森 (河北省军械工程学院计算所副教授)

王道生 (辽宁省沈阳工学院计算机系副教授)

史建军 (山东省青岛市教育局教研员)

· 组员:

- | | |
|-----|-----------------------|
| 王世学 | (黑龙江省哈尔滨市职业学校教师) |
| 刘永振 | (吉林省吉林大学计算中心副教授) |
| 刘逢勤 | (河南省郑州市第三职业中专教研组长) |
| 肖金立 | (天津市电子计算机职业中专教师) |
| 陈文华 | (浙江省温州市职业技术学校教研组长) |
| 严振国 | (江苏省无锡电子职业中学教务副主任) |
| 吴清萍 | (北京市财经学校副校长) |
| 钟 葆 | (上海市中等职业教育中心 OA 教研组长) |
| 戚文正 | (湖北省武汉市第一职教中心教师) |

再版前言

随着职业教育的改革与发展,特别是国家教委教职 017 号文件“关于制定职业高级中学(三年制)教学计划的意见”的颁布,电子工业部、劳动部关于家用电子产品维修工“职业技能鉴定规范”的颁布以及五天工作制的实施,为了既保证职业高中的教学水平,又保证学生考取中级技术工人证书,迫切需要制定新的“实用电子技术”专业教学计划,并按照新的教学计划对教材进行修订。

全国电子类职业高中教材编审委员会先后组织编写了“电子线路”、“模拟电路”两个版本的职业高中教材。前者内容较庞杂,由于职业高中学生水平和课时数所限,教师讲课时要删掉部分内容;后者又过于简单,内容有脱节,在一定程度上影响了知识的系统性,教师讲课时必须补充一部分内容。根据新的实用电子技术专业教学计划,基于上述两个原因,此次重编照顾到知识的系统性、完整性,又克服了内容庞杂,篇幅过长等问题。从职业高中的教学实际和考工需要重编了“模拟电路”一书。

本书重点突出了电子工业部、劳动部颁布的家用电子产品维修工“职业技能鉴定规范”初、中级工考核的有关知识、技能及要求,同时又保证了电路知识的系统性、连贯性,较广泛的适用性和较强的针对性。本书注重实际应用,突出基础知识和基本概念的讲述与练习。

本书从职业高中学生实际出发,力求突出职业高中特点,特别注重理论联系实际,注重对学生能力的培养,为学生学习后续课程和考取“双证书”打下坚实的基础。

参加本书编写工作的有北京市团结湖一中秦燕宾(第一章)、北京市崇文区电子技术职业教育中心董风云(第二、八章)、北京市西城区电子电器职业高中廖爽(第三、四、六章及实验)、北京市职教中心姜丽萍(第五章)、北京市团结湖一中赵燎原(第七章)。廖爽同志担任主编。

本书由北京市职教中心刘志平担任主审。

在本书编写过程中,得到了北京市崇文区电子技术职教中心、北京市西城区电子电器职业高中、北京市团结湖一中、北京市职教中心的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1996.12

目 录

第一章 半导体二极管和三极管	(1)
第一节 半导体基础知识.....	(1)
第二节 半导体二极管.....	(3)
第三节 硅稳压二极管.....	(6)
第四节 发光二极管、光敏二极管	(8)
第五节 半导体三极管	(10)
第六节 场效应晶体管	(15)
本章小结	(18)
习题	(19)
第二章 晶体管交流放大器	(20)
第一节 放大器概述	(20)
第二节 固定偏置共发射放大电路	(23)
第三节 分压式直流负反馈放大电路	(28)
第四节 射极输出器	(30)
第五节 阻容耦合放大电路的频率特性	(32)
第六节 多级放大电路	(33)
第七节 调谐放大电路	(34)
第八节 场效应晶体管放大电路	(38)
本章小结	(39)
习题	(40)
第三章 放大电路中的反馈	(43)
第一节 反馈的基本概念	(43)
第二节 反馈放大器的分类	(44)
第三节 反馈放大器的判断	(45)
第四节 负反馈对放大电路性能的影响	(47)
本章小结	(50)
习题	(50)
第四章 直流放大电路与集成运放	(53)
第一节 直流放大电路的几个特殊问题	(53)
第二节 差动放大电路	(57)
第三节 集成运算放大器的基本概念	(65)
第四节 集成运放的基本运算功能	(70)
第五节 集成运放应用举例	(74)
本章小结	(77)
习题	(77)

第五章 低频功率放大电路	(81)
第一节 功率放大电路的特点及分类	(81)
第二节 甲类功率放大电路	(83)
第三节 乙类推挽功率放大电路	(85)
第四节 无变压器功率放大电路	(90)
第五节 集成功率放大电路	(94)
本章小结	(97)
习题	(97)
第六章 正弦波振荡电路	(99)
第一节 振荡电路的基本原理	(99)
第二节 LC 振荡器	(101)
第三节 RC 振荡器	(105)
第四节 振荡器的频率稳定	(108)
第五节 石英晶体振荡器	(108)
本章小结	(111)
习题	(111)
第七章 直流稳压电源	(113)
第一节 整流电路	(113)
第二节 滤波电路	(121)
第三节 硅稳压管稳压电路	(126)
第四节 串联稳压电源	(129)
第五节 集成稳压器	(138)
本章小结	(142)
习题	(143)
第八章 调制、解调与变频	(145)
第一节 调制与解调的基本概念	(145)
第二节 检波	(147)
第三节 变频电路	(149)
第四节 鉴频器	(153)
本章小结	(157)
习题	(157)
实验	(158)
实验一 晶体管单极共发分压式放大电路的调测	(158)
实验二 负反馈对放大器性能的影响	(159)
实验三 差动放大电路的调试	(160)
实验四 乙类推挽功率放大电路的交越失真	(161)
实验五 OTL 功率放大电路	(162)
实验六 LC 正弦波振荡电路	(162)
实验七 串联型直流稳压电源	(163)
附录	(164)

附录一	国产半导体器件型号命名方法及示例.....	(164)
附录二	常用半导体器件参数选录.....	(166)
附录三	国产集成运算放大器型号组成及主要参数.....	(170)

第一章 半导体二极管和三极管

半导体器件是组成半导体电路的核心元件。它具有体积小、重量轻、寿命长、工作稳定等优点,在电子技术中得到了广泛的应用。由于半导体器件的特性和参数关系着电路的性能,因此,学习模拟电路必须先了解半导体器件的工作原理,掌握其特性和参数。本章只讨论二极管和三极管。

第一节 半导体基础知识

一、导体、绝缘体和半导体

物质按其性能可分为三类。导电性能良好的一类物质称为导体,例如金、银、铜、铝、铁等金属物质都属于导体。几乎不导电的这类物质称为绝缘体,例如陶瓷、橡胶、塑料、玻璃等都是绝缘体。导电性能介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。制作半导体器件的常用材料有硅、锗、金属氧化物等。

半导体中存在着两种导电的带电体,叫做载流子。一种是带负电荷的自由电子,另一种是带正电荷的空穴,在电场力的作用下均可作定向移动。半导体材料得到广泛的应用,是因为它的导电能力具有独特的性质:其一是,纯净的半导体受热或受光照时,其导电率会显著增加。其二是,在纯净半导体材料中加入微量的“杂质”元素,其导电率会成千上万倍地增长。

二、半导体材料分类

(一)纯净半导体

纯净半导体又称为本征半导体,这种半导体只含有一种原子,并且原子按一定规律整齐排列。例如:单晶硅和单晶锗等,都是纯净半导体。它们在常温下,载流子数量少,导电率低,导电性能差。随着纯净半导体所处环境温度上升,载流子的浓度按指数规律增加。由此可见,温度对纯净半导体材料导电性能影响很大。

(二)掺杂半导体

为了控制半导体的导电性能,在纯净半导体中掺入微量有用的杂质元素所形成的半导体,称为杂质半导体。利用杂质半导体,制成了半导体器件。根据掺入杂质元素的不同,杂质半导体可分为两类。

1. N 型半导体

在纯净的单晶硅或单晶锗中,掺入微量的五价磷元素所得的掺杂半导体称为 N 型半导体,如图 1-1(a)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,因此又称其为电子型半导体。

2. P 型半导体

在纯净的单晶硅或单晶锗中,掺入微量的三价硼元素所得的掺杂半导体称为 P 型半导

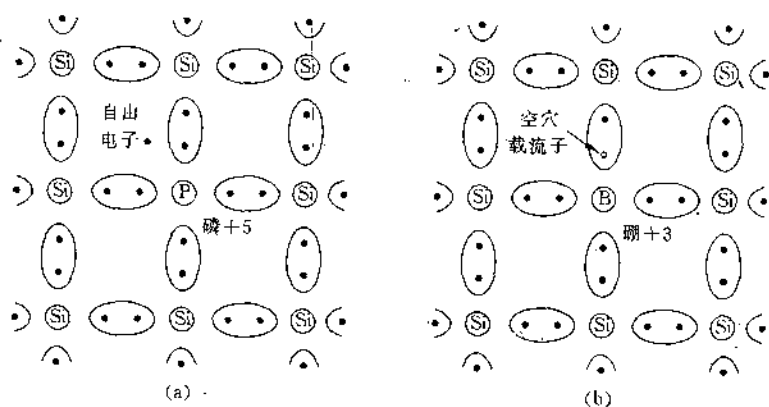


图 1-1 (a)为 N 型半导体 (b)为 P 型半导体

体,如图 1-1(b)所示。在 P 型半导体中,空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子,因此又称其为空穴型半导体。

从图 1-1 中可以看出,N 型半导体和 P 型半导体中的多数载流子的浓度,主要取决于掺入杂质元素的多少,少数载流子的浓度取决于温度的影响。

三、PN 结及其单向导电性

(一)PN 结的形成

应用半导体制造工艺,把一块 P 型半导体和一块 N 型半导体紧密地结合在一起时,二者的界面两边产生很大的载流子浓度差。因为 P 型区内空穴载流子浓度高,N 型区内自由电子浓度高,所以界面处载流子由浓度高处向浓度低处扩散,结果在 P 型半导体和 N 型半导体交界面上形成一个特殊的薄层,即 PN 结。

(二)PN 结的单向导电性

1. 外加正向电压 PN 结导通

在 PN 结两端加正向电压,即 P 区接电源正极,N 区接电源负极,如图 1-2(a)所示。在外加正向电压的作用下 PN 结变窄,有利于扩散运动的进行,多数载流子在外加电压作用下将越过 PN 结,形成较强的正向电流,这时的 PN 结处于导通状态。

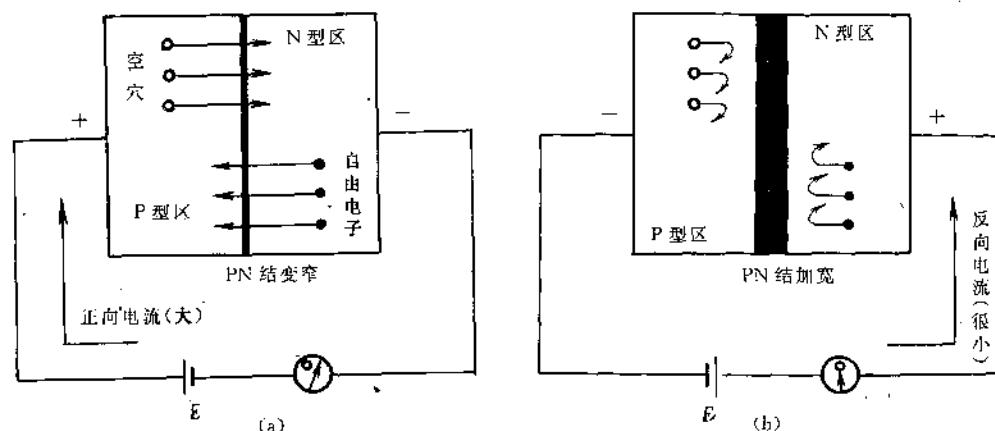


图 1-2 PN 结的导电特性

2. 外加反向电压 PN 结截止

在 PN 结两端加反向电压,即 P 区接电源负极,N 区接电源正极,如图 1-2(b)所示。在外加反向电压的作用下 PN 结变宽,阻碍多数载流子的扩散运动,热激发产生的少数载流子,在外加电压作用下形成微弱电流。由于电流很小,可忽略不计,所以 PN 结处于截止状态。

应当指出,少数载流子是由于热激发产生的,所以 PN 结的反向电流与温度有关,必须注意较大的温度变化会对半导体器件有影响。

综上所述,PN 结具有正向导通(呈低电阻),反向截止(呈高电阻)的导电特性,这就叫做 PN 结的单向导电性,其导电方向是由 P 到 N。

第二节 半导体二极管

一、半导体二极管的结构

半导体二极管一般由一个 PN 结和两条引出线组成,将其安装在一个密封的壳体中。二极管构成示意图如图 1-3(a)所示,P 区引出线为二极管正极,N 区的引出线为二极管负极。二极管在电路中的符号如图 1-3(b)所示,图中箭头方向为二极管单向导电时的电流方向。在现行国际标准中,二极管用 VD 表示。二极管的外形如图 1-3(c)所示。一般在二极管的外壳上标有图形符号,有的用标有黑环或色点的一端来表示二极管的负极,对于符号不明的二极管可用万用表欧姆档来判断。

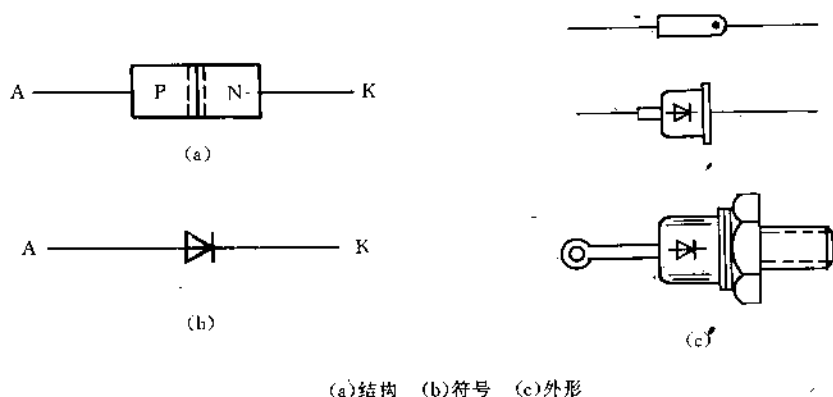


图 1-3 二极管构造示意图、电路符号和外形图

二、二极管的伏安特性

通过二极管中的电流与其两端外加电压的变化规律,可应用如图 1-4 所示的测试电路,用实验的方法测试出来。根据测出的电压及与之对应的电流数值,描绘出电流随电压变化的曲线,称为二极管的伏安特性曲线。

二极管的型号很多,参数不尽相同,但它们的伏安特性曲线的形状大致相似。二极管的伏安特性曲线如图 1-5 所示。

(一)正向特性

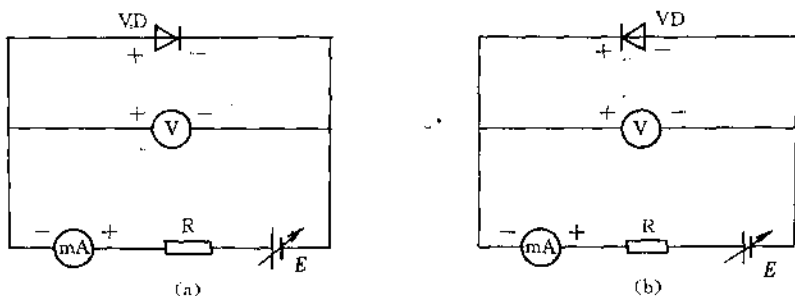


图 1-4 二极管伏安特性曲线测试电路

正向伏安特性如图 1-5 纵轴即 I (mA) 轴右侧部分所示, 图中 OA 段为正向死区, AC 段为正向导通区。

1. 正向死区

当二极管两端电压为零时电流也为零, 逐渐加大二极管两端的电压, 只要 $U_F < U_T$ (U_T 为二极管的死区电压, 也叫门限电压), PN 结不导通, 二极管中正向电流 I_F 近似为 0, 管子对外呈高阻。这象一个门坎, 当二极管两端电压不断增大, 跃过这道门坎时, 电流才随电压的增大而增大, 故称为门限电压, 门限电压的大小随管子的材料和温度的不同而变化。在室温下, 一般硅管的 U_T 在 0.6V 左右, 锗管的 U_T 在 0.2V 左右。

2. 正向导通区

当外加电压大于门限 U_T 时, 电流随电压增加而增加。在 AB 段, 电流与电压是非线性关系, 曲线是弯曲的, 这段曲线所对应的电压区域叫做二极管的非线性区。BC 段曲线很直, 电流 I_F 随电压 U_F 的增加按线性关系急速加大。BC 段所对应的电压区域叫做二极管的线性区。在二极管正常使用的电流范围内, 二极管的正向压降 U_F 基本保持不变。硅二极管正向压降 U_F 近似为 0.7V, 锗二极管的正向压降近似为 0.3V。正向导通时, 二极管对外呈低阻, 处于正向导通状态。

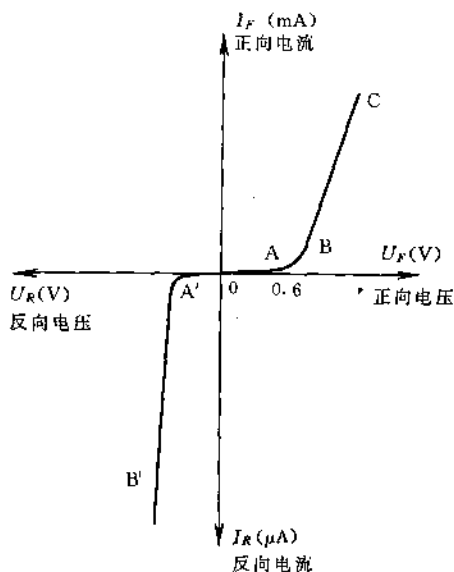


图 1-5 二极管伏安特性曲线

(二) 反向特性

当二极管两端加反向电压时, 伏安特性曲线分为反向截止区和反向击穿区两部分。

1. 反向截止区

图 1-5 所示 $0A'$ 段为反向截止区。当加在二极管两端的反向电压逐渐增大而又小于某一数值时, 二极管中的电流很小, 该电流叫反向饱和漏电流 I_S 。硅管的 I_S 为微安级, 锗管的 I_S 是硅管 I_S 的数十倍。二极管对外呈很高的内阻, 处于反向截止状态。 A' 点所对应的电压叫反向击穿电压, 不同类型和不同材料制成的管子的反向击穿电压是不同的。

2. 反向击穿区

当外加反向电压超过反向击穿电压时,PN 结被击穿,反向电流 I_R 突然剧增,曲线 A'B' 段很陡。二极管失去了单向导电性能。如果被电压击穿的管子又因电流过大而引起了热击穿,管子将被烧毁造成永久性损坏。在实际电路中,要特别注意,不能让二极管承受过高的反向电压。

三、温度对二极管特性的影响

在不同温度下二极管伏安特性曲线如图 1-6 所示。

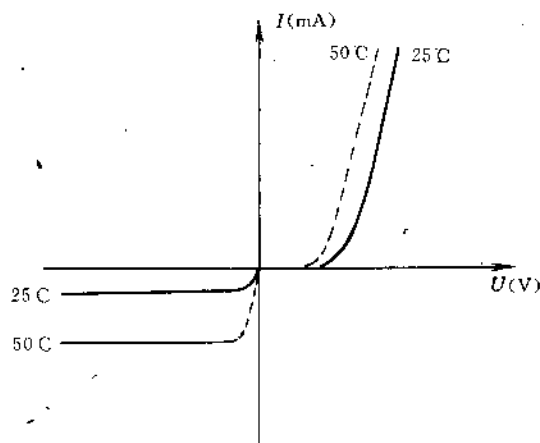


图 1-6 温度对二极管特性的影响

当温度升高时,半导体本征激发加剧,少数载流子数量增加,使正向特性曲线左移,反向特性曲线下移。

正向特性曲线左移说明要获得相同的正向电流,二极管的正向压降随温度升高而减小。当温度每升高 1°C 时,正向压降大约降低 2mV 。

反向特性曲线下移说明温度升高时反向电流增大。当温度每升高 10°C 时,反向电流大约增加一倍。

四、二极管的主要参数

要正确使用二极管就必须了解二极管的参数,其参数由制管子的厂家给定,二极管主要参数有:

(一) 额定整流电流 I_F

额定整流电流是指二极管长时间工作时,允许流过二极管的最大正向平均电流。在使用时的工作电流不得超过 I_F 值,如果超过此值,将会引起 PN 结过热而损坏管子。

(二) 额定反向电压 U_R

额定反向电压是指二极管使用时所允许加的最大反向电压,一般手册上给出的 U_R 是反向击穿电压的一半。

(三) 反向电流 I_R

反向电流是指二极管加反向电压时的反向电流值。 I_R 越大,表明二极管单向导电性能越差。 I_R 受温度影响较大。

不同型号的二极管参数不同,通常用二极管的型号表示制造二极管所用的材料、性能和用途。

五、二极管的开关特性

在电子技术中,利用二极管的正、反向特性,让管子工作在开、关状态中,其电路如图 1-7 所示。在图(a)中,当二极管两端电压大于 0.7V 时,VD 导通,二极管可等效成一个开关 S 和 0.7V 电源串联。图(b)中,二极管承受反向电压,VD 截止,二极管等效成一个处于截止态的开关 S。应当指出的是二极管承受的反向电压 U_F 值要在管子允许范围之内。

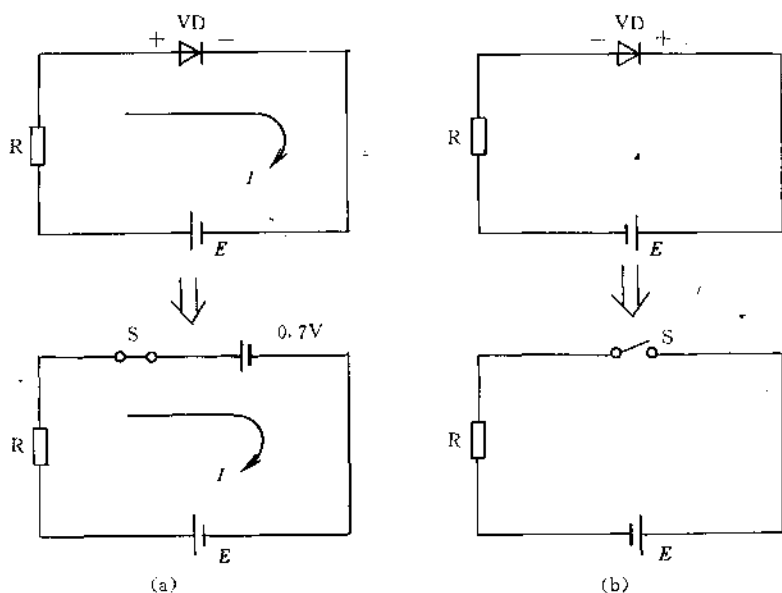


图 1-7 硅二极管简化开关等效电路
(a)正向导通等效为开关 S 闭合 (b)反向截止等效为开关 S 断开

第三节 硅稳压二极管

一、稳压管的电路符号、伏安特性曲线及稳压作用

当外加的反向电压大到一定数值以后,二极管的反向电流会突然增加,这叫做击穿现象。对于普通二极管来说,击穿就意味着管子损坏而失去单向导电性能。但是利用击穿时通过管子的电流在很大范围内变化,而管子两端的电压却几乎不变的特性,可以实现“稳压”。硅稳压管就是用硅材料通过特殊工艺处理之后,使其得到很陡峭的反向击穿特性,用之稳压的二极管。

稳压管常用的图形符号如图 1-8 所示。图中 m 端是它的正极, n 端是它的负极,与普通二极管正好相反,因为稳压管正常工作时 PN 结需要加反向电压。

稳压管的伏安特性曲线如图 1-9 所示。其正向特性与普通硅二极管相同,反向特性在击穿区比普通硅管更陡。在正常工作时,稳压管的稳压范围在特性曲线的 A 点到 B 点之间,其工作电流一般约几毫安到几十毫安。从图中可以看到,虽然通过稳压管的电流发生了很大的变化 (ΔI_Z),但稳压管两端的电压变化 (ΔU_Z) 很小,这就体现了稳压作用。