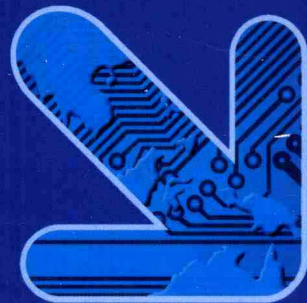




21 世纪高等继续教育精品教材

模拟电子技术基础

Monidianzijiishujichu

主 编◎马永兵

副主编◎刘媛媛 李震涛

主 审◎王均铭

 中国人民大学出版社

21 世纪高等继续教育精品教材

模拟电子技术基础

主 编 马永兵

副主编 刘媛媛 李震涛

主 审 王钧铭

中国人民大学出版社

• 北京 •

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础/马永兵主编

北京:中国人民大学出版社,2010

21 世纪高等继续教育精品教材

ISBN 978-7-300-12825-2

I. ①模…

II. ①马…

III. ①模拟电路-电子技术-成人教育:高等教育-教材

IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 198145 号

21 世纪高等继续教育精品教材

模拟电子技术基础

主 编 马永兵

副主编 刘媛媛 李震涛

主 审 王钧铭

出版发行 中国人民大学出版社

社 址 北京中关村大街 31 号

邮政编码 100080

电 话 010-62511242 (总编室)

010-62511398 (质管部)

010-82501766 (邮购部)

010-62514148 (门市部)

010-62515195 (发行公司)

010-62515275 (盗版举报)

网 址 <http://www.crup.com.cn>

<http://www.ttrnet.com> (人大教研网)

经 销 新华书店

印 刷 北京东方圣雅印刷有限公司

规 格 185mm×260mm 16 开本

版 次 2010 年 12 月第 1 版

印 张 12.5

印 次 2010 年 12 月第 1 次印刷

字 数 292 000

定 价 25.00 元

版权所有 侵权必究 印装差错 负责调换

正当教育战线正在深入学习贯彻《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》的新形势下，21世纪高等继续教育精品教材编审委员会送来了他们的编写计划和部分教材样稿，认真翻阅后，感觉耳目一新，颇具创意。

《规划纲要》明确指出：适应经济社会发展和科技进步的要求，推进课程改革，加强教材建设，建立健全教材质量监管制度。深入研究、确定不同教育阶段学生必须掌握的核心内容，形成教学内容更新机制。21世纪高等继续教育精品教材的编写和出版，正是遵循了这样的规定和要求，为提高成人继续教育的质量，办出成人继续教育的特色，办了一件好事实事。

我国成人高等教育是高等教育的重要组成部分，据统计，2009年成人高等教育在校生已达近千万规模，近几年发展迅猛，为我国培养了大批具有相应理论基础的应用型人才，充实了一线管理和技术岗位，提高了各行业的管理水平、技术能力和服务质量。

当然，在成人高等教育蓬勃发展过程中，也暴露了配套教材短缺的问题，不少有识之士为此也花费了大量的心血汗水，取得了相应的收获。但由于其专业繁多，层次复杂，体系多头，教材滞后的现象没有得到根本的改变，尤其是成人高等教育缺少应用型教材的问题更为突出，直接影响了教学的针对性和学习的效果。中国人民大学出版社和部分高校继续教育学院的学者决定由此入手，解决成人教育发展的瓶颈问题。于是，他们进行了多方调研，多次协商，深入探讨，并广揽人才，成立了21世纪高等继续教育精品教材编审委员会，对教材体系、目的、形式、内容、范围、编写人员构成诸方面制定了较为全面的规划。

该套成人教育特色系列教材的编者，都是具有丰富成人教育经验和较高专业水平的一线教学科研人员，他们在编写过程中，力求从内容到形式，突出成人教育的要求与特色，并且有了新的突破。主要表现在：教材编写特别注意双向互动的新理念，增加了生动活泼的小栏目，拓展了学习渠道，激发了学习兴趣，为学生提供了接触实践、质疑和思考的机会，提高了学生的分析能力。

这套教材注重理论的实用性、内容的实践性，注重学生应用能力的培养与考核，同时注重教材的系统与先进性，力求把新理念、新知识、新技术、新方法，穿插进教材的各个章节，推动学生的可持续发展。

这套教材能把握时代发展的脉搏，紧跟专业发展的前沿，针对成人教育的实际和特点，及时总结，及时修订，及时出版，为成人教育提供了丰富而实惠的精神食粮。

这套教材不仅适用成人教育，也适用于开放教育、社区教育、高级技工教育和相关专业培训。

感谢 21 世纪高等继续教育精品教材编审委员会成员和教材编者，以及中国人民大学出版社编辑共同付出的辛勤努力和智慧。他们要我写几句话作为序，以此共勉。

教育部社区教育专家组成员
中国成人教育协会副会长
江苏省成人教育协会会长



“模拟电子技术基础”是成人高等教育电类专业一门重要的专业基础课程。本书在编写过程中，注意在模拟电子技术理论知识中穿插实践的内容，并将模拟电子技术基础知识通俗化，回避了抽象、深奥的理论推导，在部分章节后面附有技能训练，方便学生提高动手能力。在本书最后附有半导体器件参数和电子电路的故障分析与排除，丰富了学生学习的內容。

本书适于作为成教、函授学生的教材，通过自学可以掌握模拟电子技术应用的技能。此外本书也适于广大的在职企业员工的学习，还可以作为电类专业的培训教材。

本书由南京信息职业技术学院马永兵老师负责内容的组织和统稿，刘媛媛、李震涛老师参与编写了其中部分章节，王钧铭教授担任主审。本书在编写过程中得到了刘谊宏、周彬彬、王庆桥等老师的大力支持和帮助，南京熊猫汉达科技有限公司叶玉娟女士对书中的实践内容也提出了宝贵的意见，编者在此表示诚挚的感谢。

希望本教材得到专家、同行和学生的认同和指正，意见和建议可用 E-mail 发至：mayb@njcit.edu.cn。

编 者

2010.8

第一章 常用半导体器件	1
第一节 半导体基础知识	1
第二节 二极管	5
第三节 三极管	11
第四节 场效应晶体管	19
第二章 信号放大器	30
第一节 放大器概述	30
第二节 放大器工作状态分析	31
第三节 多级放大器	51
第四节 放大器的频率响应	56
第五节 集成运算放大器	60
第六节 放大器中的反馈	71
第三章 功率放大器	97
第一节 功率放大器概述	97
第二节 低频功率放大器	99
第三节 集成功率放大器	105
第四节 功率管的散热问题	106
第四章 信号发生器	112
第一节 振荡产生的条件	112
第二节 常见的几种振荡器	114
第五章 直流稳压电源	127
第一节 直流稳压电源概述	127
第二节 串联型直流稳压电源	133
第三节 开关直流稳压电源	138
第六章 EDA 在电子仿真实验中的应用	142
第一节 EDA 技术及其发展	142
第二节 虚拟电子工作台 Multisim 9.0 的使用	145
第三节 虚拟实验	158

附 录	181
附录一 二极管	181
附录二 三极管	184
附录三 电子电路的故障分析与排除	186
参考文献	189

第一章 常用半导体器件

知识点提示

1. 本征半导体、掺杂半导体的特点及 PN 结单向导电机理
2. 二极管的基本原理及判别
3. 三极管的基本原理及判别
4. 场效应晶体管的基本原理及判别

第一节 半导体基础知识

自然界中的物体根据导电能力可分为导体、半导体和绝缘体。导电性能好的物体，如金、银、铜、铁、锡和电解液等称为导体；导电性能很差的物体，如玻璃、橡胶、陶瓷等称为绝缘体；而导电性能介于导体和绝缘体之间的就是半导体，它具有热敏、光敏、掺杂等特性。

目前，电子器件基本是由半导体器件组成的，常用的半导体材料有硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs）等，其中硅和锗是最典型的半导体，原子结构示意图如图 1—1(a)、(b) 所示。硅有 14 个质子和 14 个电子，锗有 32 个质子和 32 个电子。硅和锗都是四价元素，它们最外层有 4 个电子，称为价电子。价电子决定了元素的化学性质，也决定了与其他原子结合的形式，因此可以用简化模型来描述硅和锗的原子结构，如图 1—1(c) 所示。图中 4 个黑点表示价电子，由于原子呈电中性，故在图中原子核用带圆圈的 +4 符号表示。这种原子最外层的电子既不容易失去，也不容易得到，从原子结构上决定了它可能具有半导体的特性。

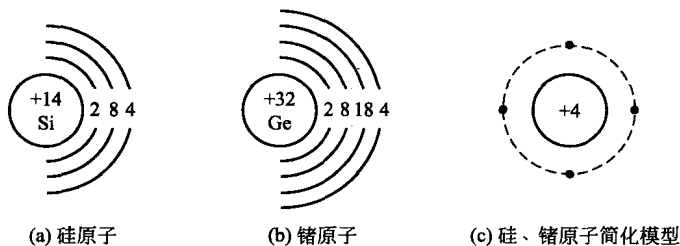


图 1—1 硅、锗原子结构示意图

半导体的导电能力在不同条件下有很大差别。一般来说，本征半导体相邻原子间存在稳固的共价键，导电能力并不强。但有些半导体在温度增高、受光照等条件下，导电能力

会大大增强,利用这种特性可制造热敏电阻、光敏电阻等器件。更重要的是,在本征半导体中掺入微量杂质后,其导电能力就可以增加几十万乃至几百万倍,利用这种特性就可制造二极管、三极管等半导体器件。

一、本征半导体

本征半导体,也就是纯净的单晶半导体,它的纯度达到 99.999 999 9%,常称为“九个9”。

1. 本征半导体的共价键结构

如图 1—2 所示,在单晶硅和单晶锗中,原子按照一定规律排布成空间点阵,最外层的电子不仅受到原子核的束缚,还受到周围原子核对它的吸引,使得价电子为相邻原子所共有,从而形成了共价键。在绝对零度 (-273°C) 时,价电子都被束缚在共价键里,不能自由移动,此时的半导体不能导电。

2. 本征激发

当本征半导体受到加热或光照的作用时,价电子的热运动就会加剧,获得一定的能量,个别价电子挣脱共价键的束缚,成为自由电子,同时在共价键的位置上留下一个空位,称作空穴,空穴是一个带正电荷的粒子。这一过程叫做本征激发或热激发,如图 1—3 所示。

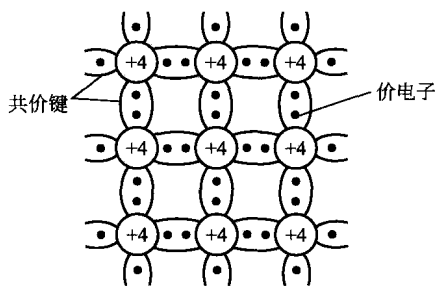


图 1—2 硅（锗）晶体结构

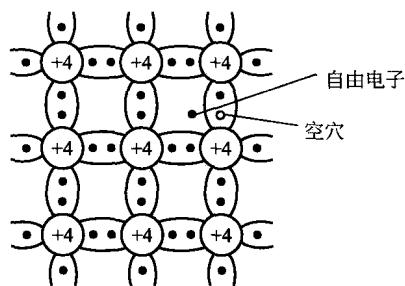


图 1—3 本征激发产生自由电子—空穴对

当出现空穴时,由于电场的作用,与它相邻的价电子很容易离开它所在的共价键而填补到这个空穴上,在电子原来的位置上留下空穴,而其他电子又可以转移到这个新的空穴上,那么在晶体中就出现了电荷移动,如图 1—4 所示。

在电场的作用下,会出现两种电流,一是自由电子逆电场方向定向移动形成的电子电流,二是空穴通过价电子(不是自由电子)的填补沿电场方向定向移动形成的空穴电流。因此半导体中有两种载流子:自由电子和空穴。

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现,同时又不断复合,在一定温度下达到动态平衡,载流子浓度维持一定数值。温度越高,载流子浓度越大,导电性能也就越好,利用这个特性可以制成热敏器件,同样,本征半导体光照加强时,载流子浓度增大,可以制成光敏器件。

二、掺杂半导体

在本征半导体中适当地掺入微量的其他元素后形成的半导体叫做掺杂半导体。掺入杂质后的半导体,导电性能大大地增强。根据掺入杂质的不同,掺杂半导体分为两种:掺入

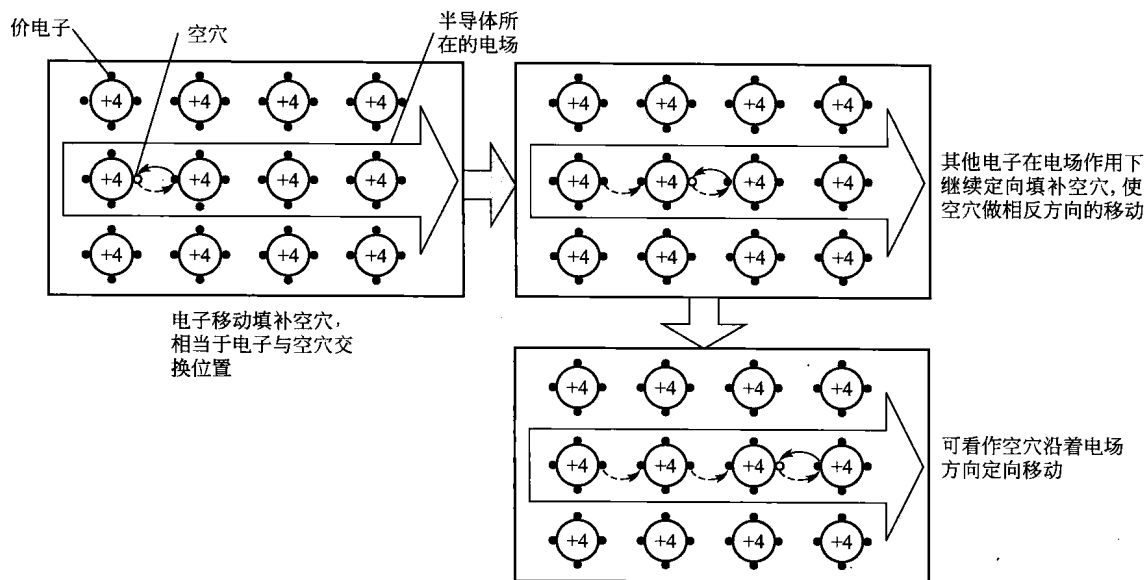


图 1—4 电荷的移动

五价杂质元素（如磷、砷等）形成的 N（Negative）型半导体，掺入三价杂质元素（如硼、镓、铟等）形成的 P（Positive）型半导体。

1. N 型半导体

在本征硅中，加入少量五价杂质元素磷，就形成了 N 型半导体。当磷加入半导体后，由于磷原子有 5 个价电子，其中 4 个与硅的价电子构成共价键，剩余的 1 个很容易成为自由电子，参与导电。此时的半导体中不仅有掺杂产生的大量的自由电子，还有少数由于本征激发而产生的自由电子和空穴。全部载流子中带负电的自由电子数大于空穴数，所以把自由电子称为多数载流子（简称多子），空穴称为少数载流子（简称少子）。

这种杂质原子在晶体结构中能给出自由电子，因此被称作施主原子。N 型半导体晶体结构如图 1—5 所示。

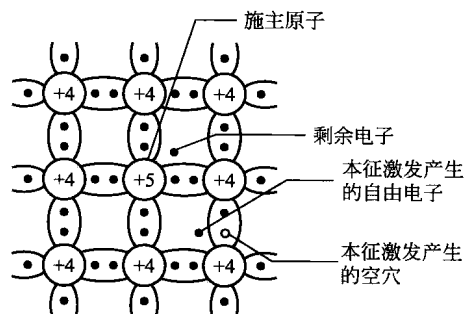


图 1—5 N 型半导体晶体结构图

2. P 型半导体

在本征硅中，掺入少量三价杂质元素硼，就形成了 P 型半导体。硼原子有 3 个价电子，当它与硅原子形成共价键时，缺少 1 个价电子而在共价键的位置中留下一个空穴。全部载流子带正电荷的空穴数大于自由电子数，所以 P 型半导体中多数载流子是空穴，少数载流子是自由电子。

这种杂质原子在晶体结构中产生空穴，可以接受其他电子，因此被称作受主原子。P 型半导体晶体结构如图 1—6 所示。

三、PN 结

如图 1—7 所示，将晶体的一侧做成 P 型半导体（P 区），另一侧做成 N 型半导体（N

区)，中间相接触的部分就是一个 PN 结。

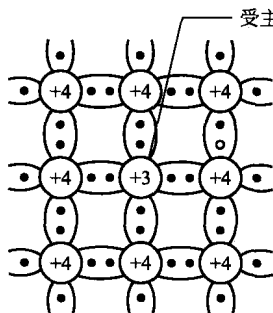


图 1—6 P 型半导体晶体结构图

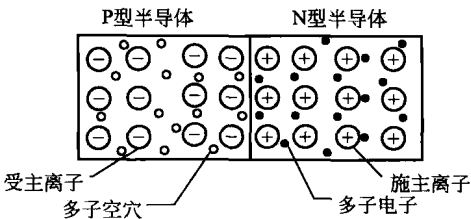


图 1—7 P 型半导体和 N 型半导体结合

1. PN 结的结构

N 型半导体中少空穴，P 型半导体中多空穴，因此在结合面形成空穴的浓度差，使 P 区的空穴向 N 区扩散。同样由于 N 型半导体和 P 型半导体中电子的浓度差，使 N 区的电子向 P 区扩散，如图 1—8 所示，这种现象称作扩散现象。

在结合面附近扩散的空穴与电子相遇复合后消失，形成了一个没有载流子的区域，这一区域称为耗尽层。在耗尽层内，电子和空穴复合后，分别留下了不能移动的受主负离子和失主正离子，称为空间电荷，这种电荷产生的电位差阻挡了载流子的进一步扩散，如图 1—9 所示。

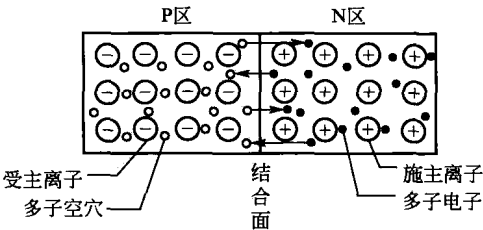


图 1—8 扩散引起的电子与空穴的移动

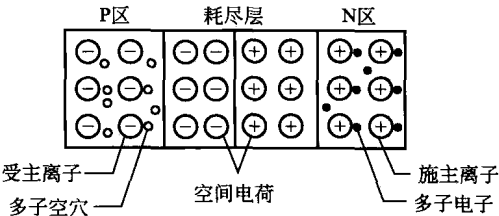


图 1—9 耗尽层与空间电荷的产生

2. PN 结的导电特性

当对这样一个半导体施加电压时，如图 1—10 所示，P 区接电源负极，N 区接电源正极，N 区的电子被吸引到正极，而 P 区的空穴则被吸引到负极，因此在中间的耗尽层变宽，阻挡了载流子的移动，不能使电流通过，这种电压加载的方式称作反向偏置。

如图 1—11 所示，P 区接电源正极，N 区接电源负极，则耗尽层的宽度变窄，P 区的

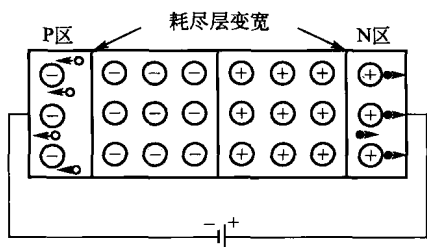


图 1—10 PN 结施加反向电压，无电流通过

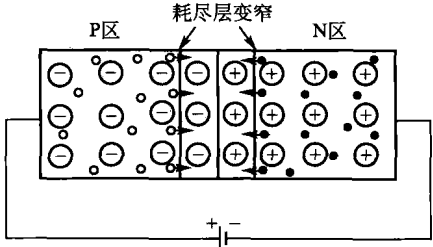


图 1—11 PN 结施加正向电压，电流通过

空穴跃过 PN 结移动到 N 区，N 区的电子则移动到 P 区。形成这样的状态后，只要稍微加大一点电压就能使电流通过，这种电压加载的方法称作正向偏置。

3. PN 结的用途

对 PN 结而言，它具有单向导电的特性。这种由外部加载电压使电流只能沿一种方向流动的现象叫做整流，因此可以利用 PN 结制作实现整流作用的半导体器件。同时，耗尽层有正、负电荷，由于电容器的两个电极是存储正、负电荷的装置，因此耗尽层也具有电容作用。对 PN 结施加不同的电压，耗尽层的宽度也随之变化，所以耗尽层是通过改变电压来改变电容量的可变电容。

在施加电压的时候，虽然反向偏置时 PN 结无电流通过，但在电压增大到一定数值时，电流会突然增大，此现象称为击穿，这时的电压称作击穿电压。击穿后的 PN 结两端电压基本保持不变，利用这一特性可以制作稳压器件，如稳压二极管等。

第二节 二极管

用一个 PN 结制成的半导体器件叫做二极管。二极管是在 PN 结上加电极引线和管壳构成的，P 区的电极叫做阳极（正极），N 区的电极叫做阴极（负极），结构示意图和电路符号如图 1—12 所示。

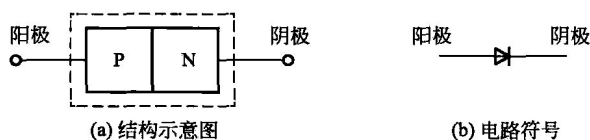


图 1—12 二极管结构示意图和电路符号

一、二极管的分类及命名

二极管按照封装形式可分为玻璃封装二极管、塑料封装二极管和金属封装二极管；按照功率可分为小功率二极管和大功率二极管，如图 1—13 和图 1—14 所示；按照材料又可分为硅二极管和锗二极管。

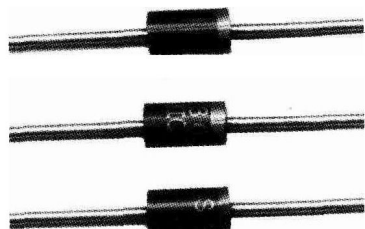


图 1—13 小功率二极管



图 1—14 大功率二极管

二极管有不同的尺寸和形状,一般来说,二极管的个头越大,可以处理的电流就越大,用螺栓作引线的二极管(见图1—14)通常可以安全地通过几安培到几十安培的电流。大功率二极管多采用金属封装,并且有个螺母以便固定在散热器上。

国际上对于二极管没有统一的命名方式,我国通常将二极管型号的命名分为五个部分(部分类别没有第五部分),各部分的含义详见附件。

二、二极管的伏安特性曲线

二极管就是一个PN结,它具有单向导电性,可以用流过它的电流和它两端电压的关系(即伏安特性)来描述,用逐点测量的方法绘制出来或用晶体管图示仪显示出来的曲线,称为二极管的伏安特性曲线。普通二极管的伏安特性曲线如图1—15所示。

1. 正向特性

二极管具有单向导电性。它以正向偏置的方式连接到电路中时,当正向电压超过某一数值时,会有正向电流经过电路,这个电压称作导通电压、开启电压、死区电压,用 U_{ON} 表示。室温下,硅管的 $U_{ON}=0.5\sim 0.6V$,锗管的 $U_{ON}=0.1\sim 0.2V$ 。

当正向电压大于 U_{ON} 时,正向电流随正向电压几乎呈线性增长,把正向电流随正向电压线性增长时所对应的电压用 U_{VD} 表示,它是二极管两端的电压,称为管压降,这段区域内,电流在较大的范围内变化时,管压降变化很小。通常,硅管的管压降为 $0.6\sim 0.8V$ (一般取 $0.7V$),锗管的管压降为 $0.1\sim 0.3V$ (一般取 $0.2V$)。在这个区域里可近似看作二极管的电阻很小,电路相当于短路。

2. 反向特性

二极管反向偏置时,少数漂移形成反向电流,当反向电压增大时,反向电流也略有增加,但对于小功率二极管,其反向电流仍然很小。通常,硅管的反向电流小于 $0.1\mu A$,而锗管通常为几微安。此时可看作二极管的电阻很大,相当于断路。

3. 伏安特性方程

由理论分析可得,流过PN结的电流和它两端的电压的关系如下:

$$I = I_{sat}(e^{U/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中, I_{sat} 为反向饱和电流,它的大小与PN结的材料、制作工艺、温度等有关; U_T 为温度电压当量。 $U_T = KT/q$, K 为波尔兹曼常数; T 为热力学温度; q 为电子电量,在室温($27^\circ C$ 或 $300K$)时, $U_T \approx 26mV$ 。

由式(1—1)可知,加正向电压时,只要 U 大于 U_T 几倍以上, $I \approx I_{sat}e^{U/U_T}$, I 随 I_{sat} 呈指数规律变化;加反向电压时,只要 $|U|$ 大于 U_T 几倍以上,则 $I \approx -I_{sat}$,与特性曲线的描述一致。

三、二极管的主要参数

器件参数是描述器件性能质量和安全工作范围的重要数据,是合理选择和正确使用器件的依据。参数一般可以从产品手册中查到,也可以通过直接测量得到。下面介绍二极管

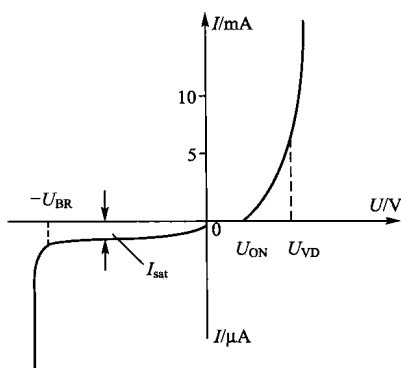


图1—15 二极管的伏安特性曲线

的主要参数。

1. 最大平均整流电流

最大平均整流电流是指二极管长期工作时, 允许通过的最大正向平均电流, 用 I_F 表示。它与 PN 结的面积、材料及散热条件有关。当电流通过二极管时会使管芯发热, 温度上升, 一旦温度超过容许限度 (硅管为 140°C 左右, 锗管为 90°C 左右), 就会导致管芯过热而损坏。所以在规定散热条件下, 工作电流应小于 I_F 。

2. 最高反向工作电压

最高反向工作电压是指二极管正常工作时, 允许施加的最大反向电压, 用 U_R 表示。加在二极管两端的反向电压大到一定值时, 会将管子击穿, 失去单向导电能力。为了确保二极管安全工作, 一般取反向击穿电压 U_{BR} 的一半作为 U_R 。例如, 二极管 IN4001 的 U_R 规定为 100V , 而它的 U_{BR} 实际上大于 200V 。

3. 反向电流

反向电流是指常温下二极管上施加最高反向工作电压时的反向电流, 用 I_R 表示。反向电流越小, 管子的单向导电性越好。另外, I_R 与温度密切相关, 使用时应注意。

4. 最高工作频率

最高工作频率是指二极管正常工作时, 允许通过交流信号的最高频率, 用 f_M 表示。当工作频率超过 f_M 时, 二极管将失去单向导电性, 因此实际应用时, 工作频率不要超过 f_M 。

5. 二极管电阻

就二极管在电路中电流与电压的关系, 可以把它看成一个等效电阻, 具有直流电阻与交流电阻的区别。

(1) 直流电阻。

直流电阻 (用 R_D 表示) 定义为二极管两端的直流电压 U_D 与流过二极管的直流电流 I_D 之比, 即:

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-2)$$

R_D 不是恒定值, 它与二极管的工作点有关, 通常用万用表测量出来的二极管电阻就是直流电阻。一般二极管的正向直流电阻在几十欧姆到几千欧姆之间, 反向直流电阻在几十千欧姆到几百千欧姆之间。正、反向直流电阻差距越大, 二极管的单向导电性越好。如图 1—16(a) 所示, 两条斜线的斜率为 R_D , 工作点 (设工作点为 Q) 不同, R_D 不同。

(2) 交流电阻。

交流电阻 (用 r_D 表示) 定义为二极管在某工作点 (设工作点为 Q) 处, 电压微变和电流微变之间的比值, 即:

$$r_D = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D}$$

由式 (1—1) 可导出当 $T=300\text{K}$ 时, $r_D = \frac{26\text{mV}}{I_D}$ 。

如图 1—16(b) 所示, r_D 也随工作点变化而变化, 是非线性电阻。

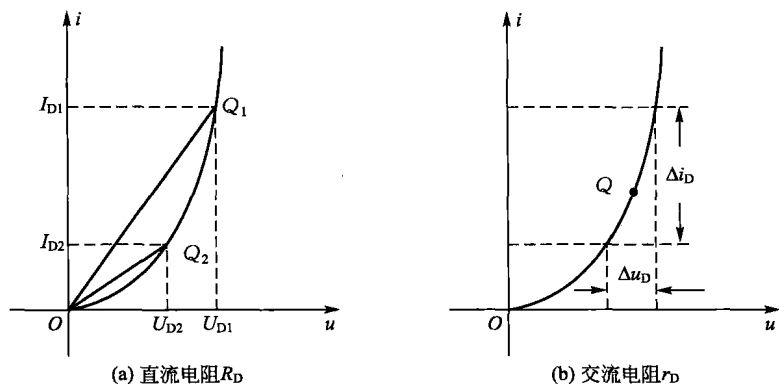


图 1—16 二极管电阻

需要指出的是, 由于制造工艺的限制, 即使是同型号的二极管, 其参数的分散性也很大。通常半导体手册上给出的参数都是在一定测试条件下测出的, 使用时应注意使用条件。

四、二极管的基本功能

1. 二极管的整流作用

方向交替变化的交流电变成方向单一的脉动直流电的过程称为整流。利用二极管单向导电性, 可以起到整流的作用。图 1—17 为利用二极管的整流作用构成的一个简单的整流电路。如图 1—18 所示, 正半周期时, 二极管导通 (相当于短路), 输入等于输出; 负半周期时, 二极管截止 (相当于断路), 输出为 0。整流电路可以用于信号检测, 也是直流电源的一个组成部分。

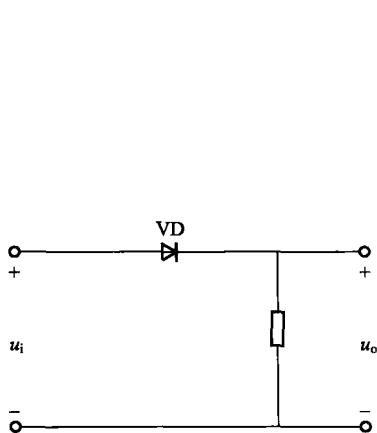


图 1—17 简单整流电路

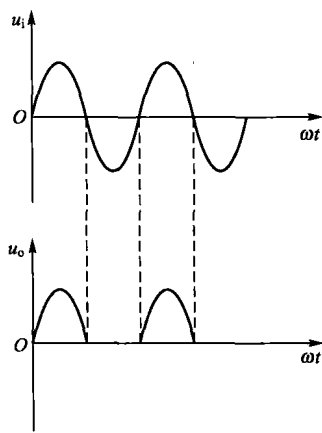


图 1—18 简单整流电路的波形

2. 二极管的开关作用

理想二极管在正向电压作用下电阻很小, 处于导通状态, 相当于一只接通的开关; 在反向电压作用下电阻很大, 处于截止状态, 相当于一只断开的开关。利用二极管的开关特性, 可以组成各种逻辑电路。

3. 二极管的限幅作用

把输入电压的变化范围加以限制叫做限幅，常用于波形变换和整形。二极管正向导通后，它的正向管压降基本保持不变（硅管为 0.7V ，锗管为 0.2V ）。利用这一特性，在电路中作为限幅元件，可以把信号幅度限制在一定范围内。

图 1—19 为一个由二极管构成的限幅电路。设输入正弦波的幅值为 5V ，当 $U=3\text{V}$ ， $u_i \geq U + U_{\text{VD}} = 3.7\text{V}$ 时，二极管导通， $u_o = 3.7\text{V}$ ，即将 u_o 的最大电压限制在 3.7V ；当 $u_i < 3.7\text{V}$ 时二极管截止，相当于开路， $u_i = u_o$ ，这样便可以得到如图 1—20 所示的波形。

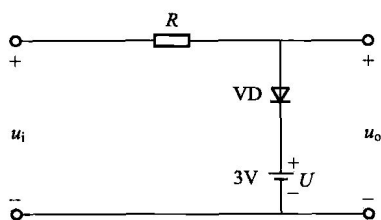


图 1—19 二极管限幅电路

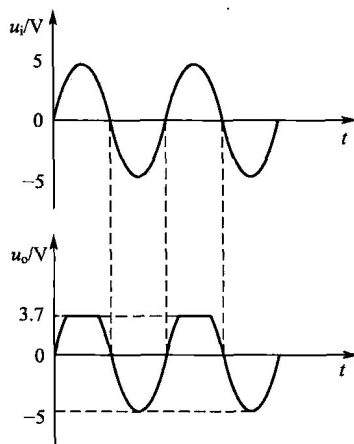
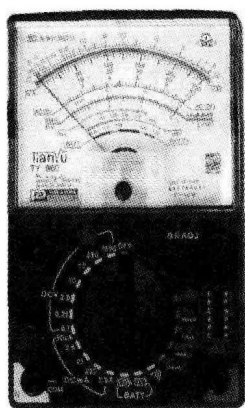


图 1—20 二极管限幅电路的波形

五、普通二极管的判别

对二极管进行判别时，通常使用的工具是万用表，常见万用表有指针式和数字式两种，如图 1—21 所示。



(a) 指针式



(b) 数字式

图 1—21 万用表

1. 二极管正、负极的判别

一般情况下二极管有圆环标志的一侧是负极；无标志的二极管，可用万用表来判别正、负极。将指针式万用表量程拨到电阻挡，用 $R \times 100\Omega$ 挡或 $R \times 1\text{k}\Omega$ 挡（不选用