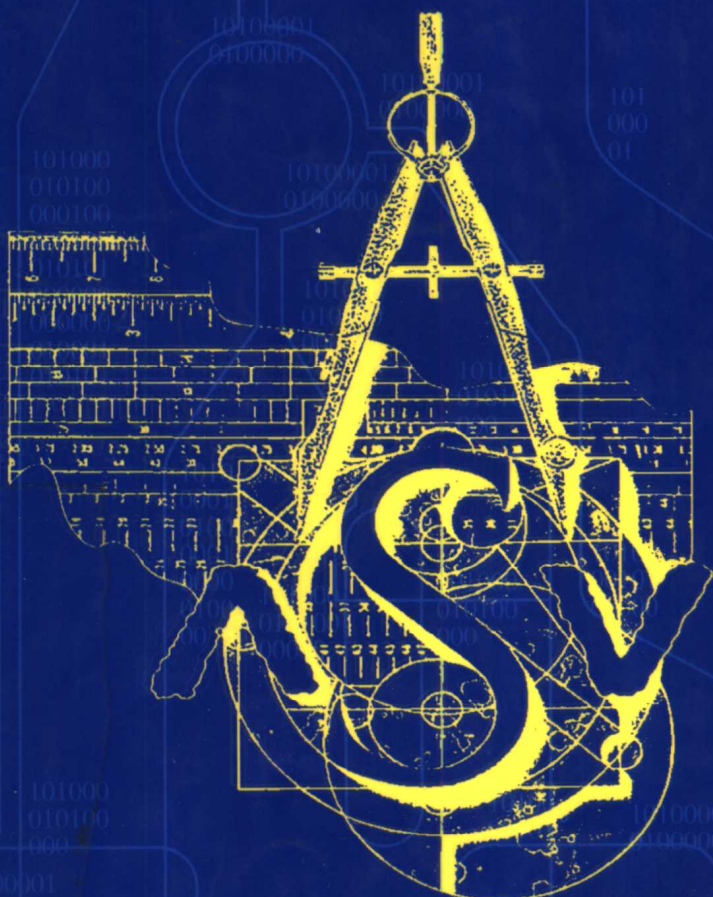


高职高专机电类系列教材

模拟电子技术

GAOZHIGAOZHUANJIDIANLEI
XILIEJIAOCAI

韦建英 主编



中国
人民
大学
出版
社

高职高专机电类系列教材

模拟电子技术

韦建英 主 编
于希贵 王 波 肖伸平 副主编

中国人民大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术/韦建英主编.

北京: 中国人民大学出版社, 2000

高职高专机电类系列教材

ISBN 7-300-03442-X/F·1029

I. 模...

II. 韦...

III. 模拟电路-电子技术-高等教育-教材

IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 64600 号

高职高专机电类系列教材

模拟电子技术

韦建英 主 编

于希贵 王 波 肖仲平 副主编

出版发行: 中国人民大学出版社

(北京海淀路 157 号 邮编 100080)

发行部: 62514146 门市部: 62511369

总编室: 62511242 出版部: 62511239

E-mail: rendafx@public3.bta.net.cn

经 销: 新华书店

印 刷: 北京市鑫鑫印刷厂

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11.5

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月第 1 次印刷

字数: 258 000

定价: 13.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

内容简介

本书为高职高专院校机电类专业的电子技术课程教材，模拟电子技术部分。

本书主要内容包括半导体器件、晶体管放大电路基础、负反馈放大器、集成放大电路基础、信号发生器、功率放大器和直流稳压电源等部分。

本书以二极管、三极管为起点，阐明电子技术的基本原理和基本分析方法，以集成运放为主要内容，介绍实用的模拟电路的基本原理和分析方法，以及实际技术的应用。

本书根据新高职高专教学的特点，通俗易懂，突出应用性内容，加强岗位技能培养，注意素质教育的要求，努力提高读者的分析和解决实际问题的能力。

本书主要作为电力类、自动化类和仪器仪表类等专业的 new 高职高专教材，还可供计算机专业及技术管理类专业选作教材，也可供广大电子技术爱好者自学与参考。

前 言

本书是为高职高专院校机电一体化专业而编写的电子技术课程教材的第一册——模拟电子技术。作者在多年从事高职高专电子技术教学实践的基础上,吸收了兄弟院校相关教材的优点编写而成,具有很强的针对性。

高职高专教育培养目标是使受教育者具有一定的本专业理论水平,具有较强的动手能力和分析实际问题的能力,能在生产第一线胜任解决一般实际问题和技术管理的应用型人才。因此,本书在内容选取和叙述方式上与普通高校的教材有较大的差别,其主要特点是:

1. 内容少而精

随着电子技术的发展,新器件、新技术不断出现,使得模拟技术的内容越来越多。为了适应新高职高专的教学,对其内容进行了精心挑选,其原则是基本概念、基本原理和基本分析方法都要讲到,同时还要介绍新器件和新技术,然而只要求以够用为度,不求高深,所以要求其内容要少而精。全书篇幅不大,比一般模拟电子技术教材的字数要少三分之一到五分之一。本书以二极管、三极管、FET为起点,以集成运放等集成电路为主要内容,管路结合,介绍实用的模拟电子技术知识,并注意到新器件、新技术的介绍。

2. 讲解通俗易懂

为了让读者易读易懂,对精选出来的内容力求讲解深入浅出,通俗易懂,这是本书的第二个特点。读者会发现,你基本上可以不看其他参考书籍就能看懂书中的绝大部分内容。因此,本书特别适用学生的自学。

3. 加强技能培养

为了培养应用型人才,本书特别注重对学生进行技能方面培养,每章都安排有“应用”和“应用注意事项”的内容。同时还留有适量的习题和自测题,以培养学生的独立思考能力、分析问题的能力和解决简单的实际问题的能力。

4. 加强实践环节

电子技术是一门实践性很强的课程,因此,理论教学和实验教学要紧密配合进行。与本书配套的有一本“电子技术实验与学习辅导”教材,实验和理论教学最好同步进行。通过实验,不仅可以验证理论的正确性,而且要培养学生学会焊接技能、使用仪器测试、故障寻迹与维修和制作简单电子产品的技能。

综上所述,本书以通俗易懂的语言,由浅入深,由理论到实践,循序渐进,引导学生掌握电子技术的基本理论和实际应用方面的知识。

本书由尹飞凰、王波共同编写第1~3章，由于希贵编写第4~7章。由韦建英任主编，于希贵、王波、肖伸平任副主编。

限于本书编著者的水平，错误之处在所难免，敬望各位专家学者和广大读者批评指正。

作者

2000年6月

目 录

1. 半导体器件	(1)
1.1 半导体基础	(1)
1.1.1 半导体的导电性能	(1)
1.1.2 PN 结及其单向导电性	(3)
1.2 半导体二极管	(5)
1.2.1 二极管的结构及特性	(5)
1.2.2 二极管的参数及选用方法	(7)
1.2.3 二极管的应用举例	(7)
1.2.4 特殊二极管	(8)
1.3 半导体三极管	(9)
1.3.1 三极管的结构	(9)
1.3.2 三极管的电流放大作用	(10)
1.3.3 三极管的输入、输出特性	(11)
1.3.4 三极管的主要参数及选用方法	(13)
1.4 场效应管	(14)
1.4.1 N 沟道增强型场效应管	(14)
1.4.2 N 沟道耗尽型场效应管	(16)
1.4.3 P 沟道场效应管简介	(17)
1.4.4 场效应管的主要参数及使用特点	(17)
1.4.5 结型场效应管简介	(18)
1.5 晶闸管	(20)
1.5.1 晶闸管的结构和工作原理	(20)
1.5.2 应用举例	(21)
小结	(22)
习题一	(22)
自测题一	(25)
2. 晶体管放大电路基础	(27)
2.1 共射极基本放大电路	(27)
2.1.1 共射极放大电路的组成	(27)
2.1.2 共射极放大电路的工作原理	(28)

2.2 放大电路的基本分析方法	(30)
2.2.1 图解分析法	(30)
2.2.2 微变等效电路分析法	(32)
2.3 静态工作点稳定的射偏电路	(35)
2.3.1 工作点不稳定的因素	(35)
2.3.2 射极偏置电路	(35)
2.4 共集电极放大电路	(38)
2.4.1 静态分析	(38)
2.4.2 动态分析	(39)
2.5 共基极放大电路	(41)
2.5.1 静态分析	(41)
2.5.2 动态分析	(42)
2.6 差动放大电路	(43)
2.6.1 直接耦合放大电路与零点漂移	(43)
2.6.2 差动放大电路的工作原理	(43)
2.7 放大电路的频率响应	(47)
2.7.1 频率响应的基本概念	(47)
2.7.2 单级共射极放大电路的频率响应	(47)
2.7.3 多级放大电路的频率响应	(49)
小结	(50)
习题二	(51)
自测题二	(57)
3. 负反馈放大电路	(59)
3.1 反馈的基本概述	(59)
3.1.1 反馈的基本概念	(59)
3.1.2 负反馈放大电路的一般关系式	(60)
3.2 负反馈的四种基本类型	(61)
3.2.1 电压串联负反馈	(61)
3.2.2 电压并联负反馈	(62)
3.2.3 电流负反馈	(62)
3.3 负反馈对放大电路的影响	(64)
3.3.1 提高增益的稳定性	(64)
3.3.2 扩展通频带	(64)
3.3.3 减小非线性失真	(65)
3.3.4 抑制噪声	(65)
3.3.5 对输入、输出电阻的影响	(65)
3.4 负反馈放大电路的自激振荡	(66)
3.4.1 自激振荡的基本概念	(66)

3.4.2 常用的消振方法	(67)
小结	(67)
习题三	(68)
自测题三	(69)
4. 集成放大电路基础	(71)
4.1 集成电路概念	(71)
4.2 集成运算放大器	(72)
4.2.1 运放的电路符号与基本结构	(72)
4.2.2 运放的主要技术指标及分类	(75)
4.2.3 理想运算放大器	(82)
4.3 运算放大器的应用	(82)
4.3.1 比例器	(83)
4.3.2 加法器和减法器	(85)
4.3.3 积分器和微分器	(87)
4.3.4 有源滤波器	(90)
4.3.5 比较器	(94)
4.3.6 电压跟随器	(98)
4.4 运算放大器应用中的若干实际问题	(98)
4.4.1 运放的选择与参数测试	(98)
4.4.2 调零	(99)
4.4.3 消除自激振荡	(99)
4.4.4 保护措施	(100)
小结	(101)
习题四	(101)
自测题四	(106)
5. 信号发生器	(108)
5.1 正弦波振荡器	(108)
5.1.1 振荡的平衡条件及起振条件	(108)
5.1.2 RC 桥式振荡器	(110)
5.1.3 LC 振荡器	(113)
5.1.4 石英晶体振荡器	(119)
5.2 矩形波发生器	(122)
5.2.1 方波发生器	(122)
5.2.2 矩形波发生器	(123)
5.3 三角波和锯齿波发生器	(124)
5.3.1 三角波发生器	(124)
5.3.2 锯齿波发生器	(125)
小结	(126)

习题五	(126)
自测题五	(129)
6. 功率放大电路	(131)
6.1 功率放大电路简介	(131)
6.1.1 功率放大电路的特点及技术要求	(131)
6.1.2 功率放大电路的分类	(132)
6.2 互补对称式功率放大电路	(134)
6.2.1 OCL 乙类互补对称电路	(134)
6.2.2 OTL 乙类互补对称电路	(137)
6.2.3 交越失真与电路的改进措施	(138)
6.3 功率器件	(141)
6.3.1 功率三极管	(141)
6.3.2 功率 VMOS 场效应管	(143)
6.3.3 功率模块	(144)
6.4 集成功率放大器	(144)
小结	(145)
习题六	(146)
自测题六	(148)
7. 直流稳压电源	(150)
7.1 概述	(150)
7.2 整流和滤波电路	(151)
7.2.1 单相桥式整流电路	(151)
7.2.2 滤波电路	(153)
7.3 稳压电路	(157)
7.3.1 稳压管稳压电路	(157)
7.3.2 串联型稳压电路	(159)
7.3.3 集成稳压器应用电路	(160)
7.3.4 开关型稳压电路	(164)
小结	(166)
习题七	(167)
自测题七	(169)
参考文献	(172)

1. 半导体器件

自 20 世纪 50 年代以来,逐步出现了各种各样的电子电路,而随着半导体材料技术的迅速发展,集成电路、大规模和超大规模集成电路相继出现,并不断发展更新,更使各种工业自动化控制设备和电子设备在微型化、可靠性方面向前推进了一大步。半导体器件则是组成各种电子电路的核心元件。电路的原理性能与其所选用器件有着密切的关系。因此,本章首先介绍了半导体的基本知识,接着讨论了二极管、三极管、场效应管、晶闸管等半导体器件的结构、性能、参数和选用方法。着重说明其基本原理和由它们组成的基本电路的基本分析方法。

1.1 半导体基础

我们知道,自然界有许多物质,若按其导电性能而言,大体可分为导体、半导体和绝缘体,而多数现代电子器件则正是由半导体材料制成的。这不仅是因为它们之间导电性能的差别,更重要的是其所具有的独特性能,如当外部条件发生变化时(纯净半导体受到光照、加热或在其中加入微量“杂质”元素等),都会使其导电能力显著增加。又如二极管的单向导电性等。为了便于理解这些特点,我们首先要了解半导体的结构及基本知识。

1.1.1 半导体的导电性能

1.1.1.1 半导体的载流子

在电子器件中,常用的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge)。它们都是四价元素,最外层原子轨道上的电子(价电子)数均为四个,而且极易与相邻原子的价电子形成共价键,如图 1.1.1 所示。在共价键的束缚下,当外界条件为热力学零度和无外界激发时,这些价电子不能自由移动,而物体的导电能力又取决于能参与导电的粒子的多少。因此,此时半导体不能导电,相当于绝缘体。但在受到热或光照作用时,少数价电子克服共价键的束缚而成为自由电子。同时在原来共价键的位置会出现一个空位子,我们称它为“空穴”。一般情况下,原子本来是“中性的”,如果出现一个空穴,该原子就带正电,因此,也可以认为空穴是带正电的。而该空穴又可能被相邻原子中的价电子填补。同时,

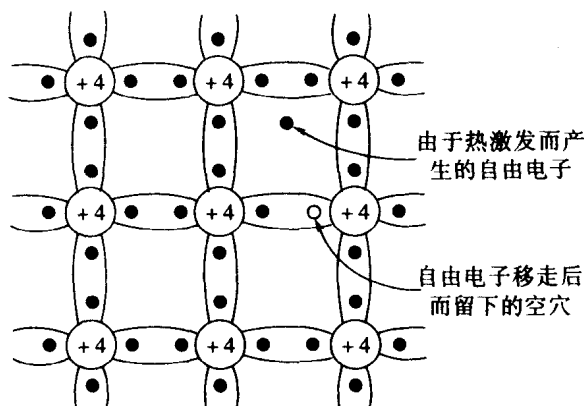


图 1.1.1 电子-空穴对的产生

相当于带正电的空穴在沿着电子填补运动的反方向移动。所以我们说纯净的半导体中存在着两种载流子（带电粒子）：带负电的自由电子和带正电的空穴。在电场的作用下，电子形成电子流，空穴形成空穴流，两者移动方向相反，但形成电流的方向相同，共同形成半导体中的电流。

由上可知，纯净半导体中电子与空穴总是成对出现。另外，当自由电子填补了空穴，它们又成对消失，称为复合。在一定条件下，电子、空穴对的产生、复合虽然总在进行，但最终处于平衡状态。对纯净半导体而言，电子、空穴数总是相等的，并且是少量的。

1.1.1.2 N 型半导体和 P 型半导体

以上分析的是纯净半导体的情况，这类半导体中虽含有两种载流子，但在共价键的作用下，数目仍很有限，导电能力依然很差。若在其中掺入微量杂质，则其导电性能会发生显著变化。

在硅（或锗）晶体中掺入少量的五价元素（称为杂质），如磷（P），就成为电子（N）型半导体。磷原子的五个价电子中有四个与周围硅原子的四个价电子形成共价键。多余的一个价电子在常温下，就可以摆脱磷原子核的微弱束缚而成为自由电子。杂质原子就变成不能移动的正离子。如图 1.1.2 所示。所以在 N 型半导体中，电子数远大于空穴数目，导电主要靠自由电子。于是，可以说此类半导体中自由电子是多数载流子（多子），空穴是少数载流子（少子）。

如果在硅（或锗）晶体中掺入少量的三价元素杂质，如硼（B），这些杂质原子的三个价电子与周围的四个硅原子形成共价键时，留有一个空位。常温下，相邻硅原子的价电子很容易过来填补这个空位，在硅原子处产生一个空穴，并且使杂质原子变成带负电的离子。如图 1.1.3 所示。这种半导体的空穴数远大于自由电子数，称为空穴（P）型半导体。因此 P 型半导体中空穴是多子，自由电子是少子。

两种半导体中多子数目可由掺杂浓度决定。而少子数目则与掺杂无关，决定于未掺杂的半导体元素的原子核对电子的束缚力的大小，而这是受温度影响的。

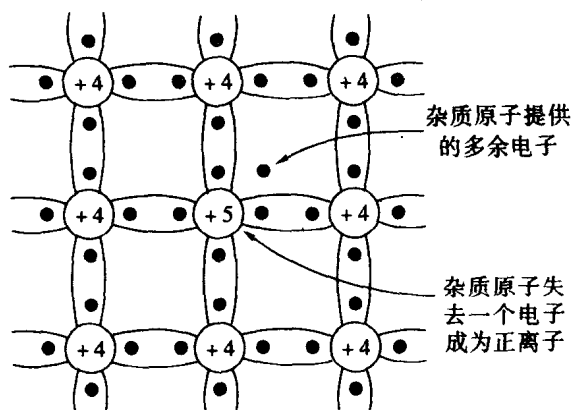


图 1.1.2 N 型半导体的共价键结构

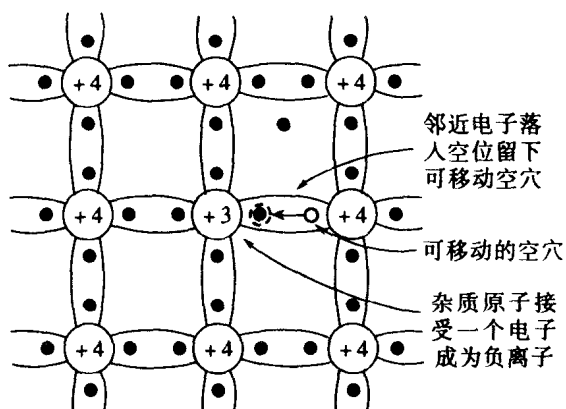


图 1.1.3 P 型半导体的共价键结构

1.1.2 PN 结及其单向导电性

1.1.2.1 PN 结的形成

若只有一个 P 型或 N 型半导体，则它在电路中的作用仅相当于一个电阻。但在同一块纯净半导体中，根据不同的掺杂工艺，使之一半为 P 型；另一半为 N 型，则在交界处就会形成 PN 结。它是构成各种半导体器件的基础。

N 型半导体中的电子为多子，因此，N 区电子浓度远大于 P 区电子的浓度。于是电子将从浓度大的 N 区向浓度小的 P 区扩散。首先是交界面附近的电子跑到 P 区，同 P 区的空穴复合。N 区一侧只留下一些不能自由移动的带正电的五价离子，它们不参与导电，形成正电荷区；而交界面附近的 P 区一侧因“吸收”了电子，出现了一些带负电的三价离子，形成负电荷区。这样在交界面附近就形成一空间电荷区。显然，空间电荷区构成一个由 N 区指向 P 区的内电场。在该电场的作用下，“多子”的扩散运动受到

阻碍，而“少子”则产生与扩散反向的漂移运动。扩散运动使内电场增强，漂移运动又使内电场被削弱。当两者达到平衡时，交界面上扩散电流（单位时间扩散数量）与漂移电流（单位时间漂移数量）相等，总的“表现”电流为零。此时，空间电荷区达到一个相对稳定的状态，这个区域就称为PN结。如图1.1.4所示。

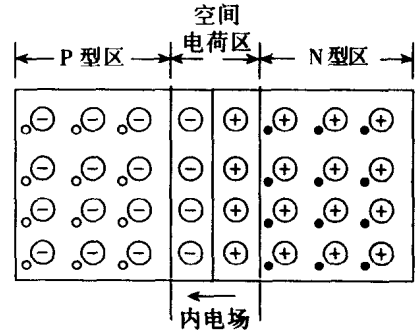


图 1.1.4 PN 结的形成

1.1.2.2 PN 结的单向导电性

如果在PN结两端外加正向电压 U_F ，即P区接电源正极，N区接电源负极，如图1.1.5所示。在外电场作用下，P区中的空穴（多子），与N区中的电子（多子）被推向PN结方向。当P区中的空穴进入PN结后，中和一部分负离子。同样，N区中的电子进入PN结也中和一部分正离子。内电场被削弱，导致扩散运动超过漂移运动，多子顺利通过PN结，形成较大的正向电流 I_F ，也就是说PN结正向电阻很小。

如果在PN结两端外加反向电压 U_R ，即P区接电源负极，N区接电源正极，如图1.1.6所示。在外电场的作用下，P区与N区中的多子进一步远离PN结，内电场被加宽增强，扩散运动几乎停止，而漂移运动被加强，少子顺利通过PN结，达到稳定状态后形成反向电流饱和 I_R ，但由于少子数目有限，在反向电压不是很大时，反向饱和电流通常很小，也说明PN结反向电阻很大。

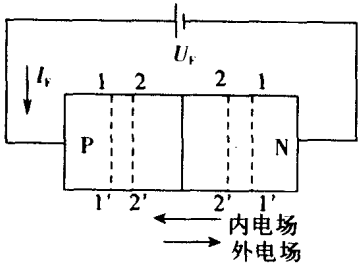


图 1.1.5 PN 结加正向电压

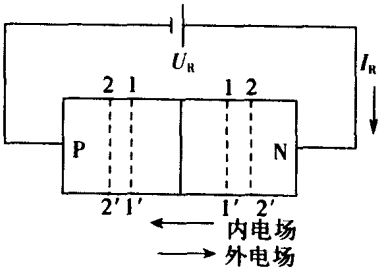


图 1.1.6 PN 结加反向电压

综上所述，PN结具有单向导电性，加正向电压，PN结电阻很小，正向电流较大，PN结处于导通状态；加反向电压时PN结电阻很大，反向电流很小，处于截止状态。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构及特性

1.2.1.1 二极管的结构

半导体二极管是由一个 PN 结加上相应的电极引线及外壳组成的。根据内部结构的不同，可分为点接触型和面接触型两种。

点接触型二极管结构如图 1.2.1 (a) 所示。其结构特点是 PN 结面积很小，不能通过大的电流。但由于 结电容很小，适于在高频下工作。这类二极管如 2AP1~10 系列点接触型锗管。它可在电子设备中作高频检波，也可用来作小电流整流。

面接触型二极管的结构如图 1.2.1 (b) 所示。其特点是 PN 结面积大，容许通过较大的电流。但结电容很大，不宜用于高频场合，常用作频率在 3kHz 以下整流，这类二极管如 2CP 系列。

图 1.2.1 (c) 是硅工艺平面型二极管结构图，常用于集成电路。

二极管的符号如图 1.2.1 (d) 所示，P 区一边为阳极 a，N 区一边为阴极 k。

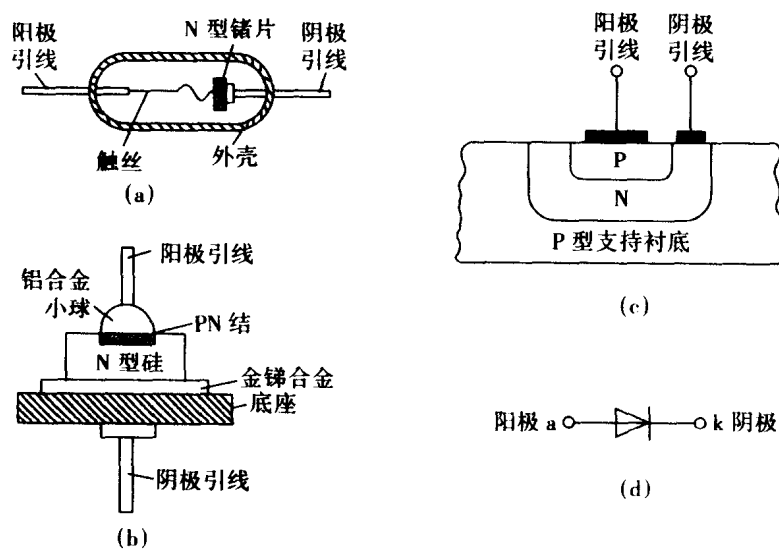


图 1.2.1 半导体二极管的结构及符号

(a) 点接触型; (b) 面接触型; (c) 平面型; (d) 符号

1.2.1.2 二极管的特性

由于二极管的核心元件是 PN 结，因此它也具有单向导电性。二极管的特性常用伏

安特性表示，指的是加到二极管两端的电压与通过管子的电流的关系。

实际二极管的伏安特性如图 1.2.2 所示。由该曲线可以看出其具有如下特点：

(1) 正向电压较小时，外电场还不足以克服 PN 结的内电场，因此，此时正向电流几乎为零。只有在外加正向电压超过一定数值后，才有明显的电流，该电压称为死区电压，室温下硅二极管的死区电压约为 0.5V，锗二极管的约为 0.1V。当正向电压大于死区电压时，电流随电压的增加而增长很快，且接近为直线，此时管子处于导通状态。如图 1.2.2 中①段。正向导通后，硅二极管压降约为 0.7V，锗二极管约为 0.3V。

(2) 在反向电压作用下，少数载流子很容易通过 PN 结，但由于少数载流子数目很少，所以反向电流也很小。二极管处于截止区，如图 1.2.2 中②段。

温度升高时，少数载流子增加，反向电流随之增加。

(3) 当反向电压增加到一定数值时，反向电流剧增，称为二极管反向击穿。如图 1.2.2 中③段。产生击穿时的电压称反向击穿电压。普通二极管不允许工作于该区。

(4) 温度升高，正向特性曲线左移，反向特性曲线下移。如图 1.2.3 所示。

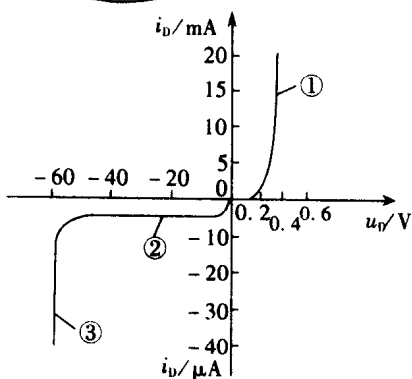


图 1.2.2 锗二极管 2AP15 的伏安特性

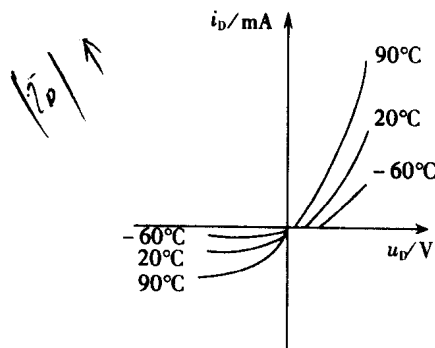


图 1.2.3 温度对二极管伏安特性的影响

例 1.2.1 如图 1.2.4 (a) 所示电路中，已知 $u_i = 10\sin\omega t$ (V)， $U_R = 5V$ ， $R =$

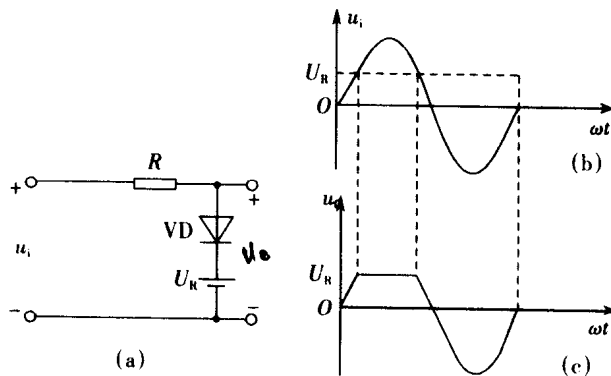


图 1.2.4 例 1.2.1 题图

(a) 电路；(b) 输入波形；(c) 输出波形

$i = I_S (e^{\frac{u}{kT}} - 1)$ 其中 I_S 为反向饱和电流, q 为电子电量, k 为玻尔兹曼常数。
 T 为热力学温度 $\Rightarrow i = I_S (e^{\frac{u}{kT}} - 1)$ 其中 $V_T = \frac{kT}{q}$ 当 $T = 300\text{K}$ 时:
 $V_T \approx 26\text{mV}$ 。
 $2\text{k}\Omega$, 二极管的正向压降和反向电流均忽略不计, 试画出 u_o 波形。

解: u_i 是按正弦规律变化的, 当 $u_i < U_R$ 时, 二极管两端所加的为反向电压, 于是相当于开路, 所以此时 $u_o = u_i$, 当 $u_i \geq U_R$ 时, 二极管正向导通, 二极管 VD 相当于短路, $u_i = U_R$, 可得 u_o 的波形如图 1.2.4 (c) 所示。

1.2.2 二极管的参数及选用方法

1.2.2.1 最大整流电流 I_F

这是指二极管长期运行时所允许通过的最大正向电流, 实际选用时, 应注意通过二极管的实际工作电流不超过此值, 并要满足其散热条件, 否则烧坏二极管。

1.2.2.2 最高反向工作电压 U_R

二极管在使用时允许加上的最高反向电压, 如果超过此值, 二极管就有可能被击穿。为确保安全, 一般用在最高反向击穿电压的一半。

1.2.2.3 最大反向电流 I_R

二极管两端加上 U_R 时的电流值。 I_R 越小, 管子单向导电性越好。此值与少数子浓度有关, 所以受温度影响很大, 使用时要注意温度的影响。

1.2.2.4 最高工作频率 f_M

二极管在高频下工作时, 由于 PN 结的电容效应, 单向导电作用退化。 f_M 就是指二极管的单向导电作用开始明显退化时, 交流信号的频率。因此使用二极管时, 若通过二极管的电流频率大于此值, 则不能起到应有的作用。

以上所列出的只是二极管的一些主要参数, 还有一些参数必要时可查阅手册。它们都是正确使用和合理选择器件的依据。使用时, 应注意不要超过 I_F , U_R 值, 否则管子容易损坏。另外, 温度对半导体影响也很大, 在温度变化大的情况下, 选择二极管要留有余地。

1.2.3 二极管的应用举例

根据二极管的特性, 它被广泛应用于各种电子电路中, 不仅可以利用普通二极管组成整流电路、开关电路等, 还可利用特殊二极管起到一些特殊的用途。

下面举一个简单的利用二极管组成防泄密装置的例子。常用的有线对讲机分机一般用一只喇叭 (扬声器), 就可以收听到主机讲话又可作为话筒向主机讲话。有时为了保证随时听到主机呼叫而始终接通, 这样就会使分机旁边的人谈话传入主机, 即干扰主机, 又不利于谈话内容保密。若采用图 1.2.5 所示电路, 平时按钮 S 不接通, 即使对喇叭大叫, 主机也听不到。因为喇叭音圈的声、电转换只会产生很小的信号, 它已被二极