

高等工程专科学校教材



电子技术基础

模拟部分

胡宴如 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

774227

高等工程专科学校教材

电子技术基础

模拟部分

主编 胡宴如

参编 (以姓氏笔划为序)

师中伟 张建明 耿芬燕 章忠全



Handwritten signature or mark



21113001128648

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是以教育部(原国家教委)高教司组织制订的《高等学校工程专科电子技术基础、电子线路课程教学基本要求》(1996年修订版)为依据而编写的。与之配套使用的教材还有杨志忠主编的《电子技术基础数字部分》和章忠全主编的《电子技术基础实验及课程设计》两册。

全书共十一章,内容包括:半导体二极管和三极管、基本放大电路、差动放大电路、乙类推挽输出级与功率放大电路、集成运算放大器及基本运算电路、负反馈放大电路、线性集成电路的应用、信号产生电路、集成模拟乘法器及其应用、集成直流稳压电源、晶闸管及其应用。每章都有教学基本要求、小结、思考题与习题。

本书可作为高等工程专科,高等职业和高等函授电气、电子、通信、计算机和自动控制等专业的教材,也可作为自学考试自学参考用书;并可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟部分 数字部分 实验及课程设计/胡宴如
杨志忠 章忠全 主编. 北京:中国电力出版社,
1999

(电子技术基础)

ISBN 7-5083-0068-8

I. 模… II. 胡… III. ① 模拟电路-电子技术-
实验-高等学校 ② 模拟电路-课程设计-高等学校 ③
数字电路-电子技术-实验-高等学校 ④ 数字电路-课
程设计-高等学校 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 24450 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1999 年 7 月第一版 1999 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.25 印张 318 千字
印数 0001—5000 册 全三册定价 49.00 元(本册 22.00 元)

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书是以教育部高教司组织制定的《高等学校工程专科电子技术基础、电子线路课程教学基本要求》(1996年修订版)为依据而编写的。与杨志忠主编的《电子技术基础数字部分》及章忠全主编的《电子技术基础实验与课程设计》相互配套使用,由电子技术及电子线路课程组推荐出版,作为高等工程专科高等职业和高等函授电气、电子、通信、计算机和自动控制等专业电子技术及电子线路课程的教材,同时也可作为自学考试自学参考书,并可供有关工程技术人员参考。

现代科学技术的迅猛发展,许多新技术、新材料、新工艺已在电子技术方面得到广泛应用,性能优良、功能齐全、使用方便的集成电路品种与数量与日俱增,集成度越来越高,使得电子设备和电路的设计得以简化,并使系统及装置性能指标发生了飞跃。以集成芯片为核心的现代电子技术其基本知识、基本理论以及系统设计、使用方法等都与传统的电子技术基础有很大的差异。因此我们对现行电子教学内容与电子新技术以及在电力系统中的应用进行了仔细的分析和研究,确定以现代电子技术的基本知识、基本理论为主线,加强基本分析方法和集成电路应用技术的介绍,在保证教学基本要求的前提下,内容选择上重点突出,少而精。首先大量删减以晶体管为核心器件的电子电路内容,其次删去集成电路内部电路的分析,代之以应用为目的介绍其内部电路组成特点及典型应用电路。

此外,根据现代电子技术的需要,增加了若干新内容,如移相电路,压控振荡电路、锁相与频率合成技术、集成模拟乘法器调幅与解调电路等。使得本书内容更为丰富和实用。

根据专业教学改革的经验,电子技术及电子线路都安排有实验、课程设计和电子实习等实践性教学环节。因此将实践性较强的内容,如电路的测试、调整,集成电路的使用、功率器件的散热、光电耦合器件、电子小系统的设计,器件型号、参数等内容移到实践环节中去进行,使本书内容精练、简明,重点突出,使学生既有扎实的理论基础,又有很强的工程应用能力,以面对21世纪新技术的挑战和人才市场的竞争。

全书共十一章,按理论教学60学时左右编写,其中第九章、第十一章和第七章部分内容可根据各校专业要求及学时情况酌情取舍。章前都有本章教学基本要求,章末都有小结、思考题与习题,便于读者自学、复习,掌握教学基本要求及内容重点。

本书由胡宴如担任主编,第一、六章由耿苏燕编写,第二章由章忠全编写,第三、四、十章由师中伟编写,第五、八章由张建明编写,第七、九、十一章由胡宴如编写。

本书承蒙杨志忠教授审稿,提供了详尽修改意见,在此谨致衷心的感谢。

书中错漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1999.4

前言	
第一章 半导体二极管和三极管	1
第一节 半导体二极管	1
第二节 双极型半导体三极管	13
第三节 单极型半导体三极管	20
本章小结	27
思考题与习题	28
第二章 基本放大电路	32
第一节 放大电路的主要性能及分析方法	32
第二节 三种基本组态放大电路性能分析	43
第三节 多级放大电路	54
本章小结	57
思考题与习题	58
第三章 差动放大电路	62
第一节 差动放大电路的工作原理	62
第二节 具有电流源的差动放大电路	66
第三节 差动放大电路的输入输出方式及传输特性	69
本章小结	73
思考题与习题	73
第四章 乙类推挽输出级与功率放大电路	76
第一节 乙类互补对称功率放大电路	77
第二节 其他类型功率放大电路	83
本章小结	86
思考题与习题	86
第五章 集成运算放大器及基本运算电路	89
第一节 集成运算放大器	89
第二节 基本运算电路	92
第三节 基本运算电路应用举例	97
本章小结	100
思考题与习题	100
第六章 负反馈放大电路	104
第一节 反馈的基本概念	104
第二节 负反馈放大电路分析	106
第三节 负反馈对放大电路性能的影响	111
第四节 深度负反馈放大电路增益的计算	115
第五节 负反馈放大电路的稳定性	117
本章小结	118

思考题与习题	118
第七章 线性集成电路的应用	122
第一节 有源滤波电路	122
第二节 移相器与滤波序器	128
第三节 集成运算放大器小信号交流放大电路	131
第四节 集成宽带放大器及其应用	134
第五节 集成功率放大器及其应用	141
本章小结	144
思考题与习题	145
第八章 信号产生电路	149
第一节 正弦波振荡电路的工作原理	149
第二节 RC 振荡电路	151
第三节 LC 振荡电路	154
第四节 非正弦信号发生电路	159
第五节 锁相频率合成技术	163
本章小结	166
思考题与习题	167
第九章 集成模拟乘法器及其应用	171
第一节 集成模拟乘法器	171
第二节 模拟乘法器调幅与解调电路	174
第三节 模拟乘法器的鉴相功能及调频概念	181
本章小结	183
思考题与习题	184
第十章 集成直流稳压电源	186
第一节 直流稳压电源的主要性能指标及种类	186
第二节 单相整流滤波电路	187
第三节 线性集成稳压器	191
第四节 集成开关稳压电源	196
本章小结	201
思考题与习题	202
第十一章 晶闸管及其应用	205
第一节 晶闸管	205
第二节 单相可控整流电路	208
第三节 单结晶体管触发电路	212
本章小结	217
思考题与习题	217
参考文献	219

第一章 半导体二极管和三极管

教学基本要求

1. 了解半导体的基本知识,掌握 PN 结的单向导电性。
2. 掌握普通二极管和稳压管的伏安特性,熟悉其工作特点、主要参数。掌握二极管电路的基本分析方法。
3. 了解双极型和单极型半导体三极管的结构,掌握其伏安特性,熟悉其工作原理、主要参数。掌握三极管电路的分析方法。

引言 半导体二极管和三极管在电子技术中得到广泛的应用,为了更好地运用半导体器件,本章首先简要地介绍半导体的基础知识,然后介绍半导体二极管、双极性和单极性半导体三极管的工作原理、特性曲线及主要参数,同时对半导体二极管、三极管电路的基本分析方法进行讨论。

第一节 半导体二极管

一、半导体的基础知识

(一)本征半导体

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。纯净的半导体称为本征半导体。属于半导体的物质很多,用于制造半导体器件的材料主要有硅(Si)、锗(Ge)等,其中硅用得最广泛。硅和锗都是四价元素,其最外层原子轨道上有四个电子(称价电子)。在单晶结构中,由于原子排列的有序性,价电子为相邻的原子所共有,形成图 1-1 所示的共价键结构,图中 +4 代表四价元素原子核和内层电子所具有的净电荷。共价键中的价电子,将受共价键的束缚。在室温或光照下,少数价电子可以获得足够的能量摆脱共价键的束缚成为自由电子,同时在共价键中留下一个空位,如图 1-1 所示,这种现象称为本征激发,这个空位称为空穴,可见本征激发产生的自由电子和空穴是成对的。原子失去价电子后带正电,可等效地看成是因为有了带正电的空穴。空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子去填补,使空位发生转移,这种价电子填补空位的运动可以看成空穴在运动,但其运动方向与价电子运动方向相反。自由电子和空穴在运动中相遇时会成对消失,这种现象称为复合。温度一定时,自由电子和空穴的产生与复合将达到动态平衡,这时自由电子和空穴的浓

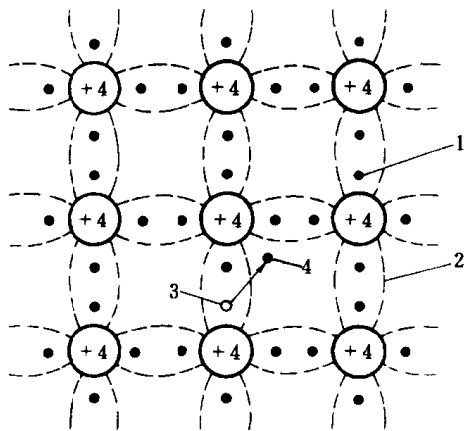


图 1-1 硅和锗的原子结构及本征激发示意图
1—价电子;2—共价键;3—空穴;4—自由电子

度一定。

在电场作用下,自由电子和空穴将作定向运动形成电流,这种运动称为漂移。因此,半导体中有自由电子和空穴两种载流子参与导电,这一点与金属导体的导电机理不同。在常温下本征半导体载流子浓度很低,因此导电能力很弱。

(二) 杂质半导体

为了提高半导体的导电能力,可在本征半导体中掺入微量杂质元素。掺杂后的半导体称为杂质半导体。

在四价的硅(或锗)中掺入五价元素(如磷、砷、镓等)后,杂质原子替代了晶格中某些四价元素原子的位置,如图 1-2(a)所示。杂质原子与周围的四价元素原子结合成共价键时多余一个价电子,这个多余的价电子在室温下就能挣脱共价键的束缚成为自由电子,杂质原子则变成带正电荷的离子。掺入多少杂质原子就能电离产生多少个自由电子,因此自由电子的浓度大大增加。这时由本征激发产生的空穴被复合的机会增多,使空穴浓度反而减少。这种以电子导电为主的半导体称为 N 型(或电子型)半导体,其中自由电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。

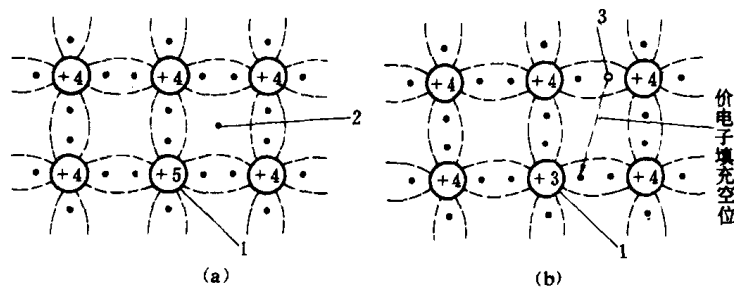


图 1-2 杂质半导体结构示意图

(a)N 型半导体;(b)P 型半导体

1—杂质原子;2—自由电子;3—空穴

掺入三价元素(如硼、铝、镓等)后杂质原子与周围的四价元素原子形成共价键时因缺少一个价电子而产生一个空位,室温下这个空位极容易被邻近共价键中的价电子所填补,使杂质原子变成负离子,如图 1-2(b)所示,这种掺杂使空穴的浓度大大增加,这是以空穴导电为主的半导体,称为 P 型(或空穴型)半导体,其中空穴为多子,自由电子为少子。

图 1-3 所示为杂质半导体中载流子和杂质离子的示意图,必须指出:杂质离子虽然带电荷,但不能移动,因此它不是载流子;杂质半导体中虽然有一种载流子占多数,但整个半导体仍呈电中性。

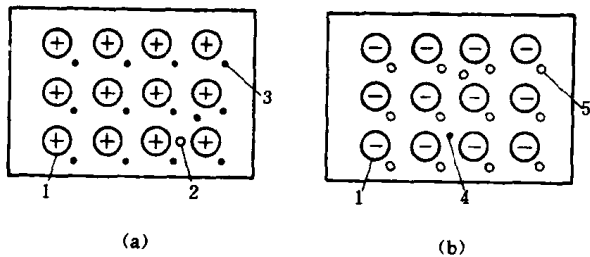


图 1-3 杂质半导体中的载流子和离子

(a)N 型半导体;(b)P 型半导体

1—杂质离子;2—少子空穴;3—多子电子;

4—少子电子;5—多子空穴

杂质离子虽然带电荷,但不能移动,因此它不是载流子;杂质半导体中虽然有一种载流子占多数,但整个半导体仍呈电中性。

杂质半导体的导电性能主要取决于多子浓度,多子浓度主要取决于掺杂浓度,其值较大并且稳定,因此导电性能得到显著改善。少子浓度主要与本征激发有关,因此对温度敏感,其大小随温度的升高而增大,在室温附近每升高 10°C ,少子浓度增加一倍。

(三) PN 结

1. PN 结形成

采用特定的制造工艺,在同一块半导体基片的两边分别形成 N 型和 P 型半导体,则它们的交界面附近会形成一个很薄的空间电荷区,称为 PN 结。

由于 P 型和 N 型半导体交界面两侧的两种载流子浓度有很大的差异,因此会产生载流子从高浓度区向低浓度区的运动,如图 1-4 (a) 所示,这种运动称为扩散。P 区中的多子空穴扩散到 N 区,与 N 区中的自由电子复合而消失;N 区中的多子电子向 P 区扩散并与 P 区中的空穴复合而消失。结果使交界面附近载流子浓度骤减,形成了由不能移动的杂质离子构成的空间电荷区,同时建立了内建电场(简称内电场),内电场方向由 N 区指向 P 区,如图 1-4 (b) 所示。

内电场将产生两个作用:一方面阻碍多子的扩散运动,另一方面促使两个区靠近交界面处的少子产生漂移运动。起始时内电场较小,扩散运动较强,漂移运动较弱,随着扩散的进行,空间电荷区增宽,内电场增大,扩散运动逐渐困难,漂移运动逐渐加强。外部条件一定时,扩散运动和漂移运动最终达到动态平衡,即扩散过去多少载流子必然漂移过来同样多的同类载流子,因此扩散电流等于漂移电流,如图 1-4 (c) 所示。这时空间电荷区的宽度一定,内电场一定,形成了所谓的 PN 结。PN 结内电场的电位差称为内建电位差,用 U_B 表示,硅材料 PN 结的 $U_B \approx 0.6 \sim 0.8V$,锗材料 PN 结的 $U_B \approx 0.2 \sim 0.3V$ 。

由于空间电荷区中载流子极少,都被消耗殆尽,所以空间电荷区又称为耗尽区。另外,从 PN 结内电场阻止多子继续扩散这个角度来说,空间电荷区也可称为阻挡层或势垒区。

2. PN 结的单向导电特性

加在 PN 结上的电压称为偏置电压,若 P 区接电源正极、N 区接电源负极,则称 PN 结外接正向电压或正向偏置,简称正偏;反之,称 PN 结外接反向电压或反向偏置,简称反偏。如图 1-5 所示。

PN 结正偏时,外电场使 P 区的多子空穴向 PN 结移动,并进入空间电荷区和部分负离子中和;同样,N 区的多子电子也向 PN 结移动,并进入空间电荷区和部分正离子中和。因此空间电荷量减少,PN 结变窄,如图 1-5 (a) 所示,这时内电场减弱,扩散运动将大于漂移运动,多子的扩散电流通过回路形成正向电流。当外加正向电压增加到一定值后,正向电流将显著增加,电流与外加电压呈指数关系,即不大的正向电压变化就可以产生较大的正向电流变化。此时,PN 结呈现的电阻很小,称为导通状态。为了限制正向电流值,通常在回路中串接限流电阻 R。

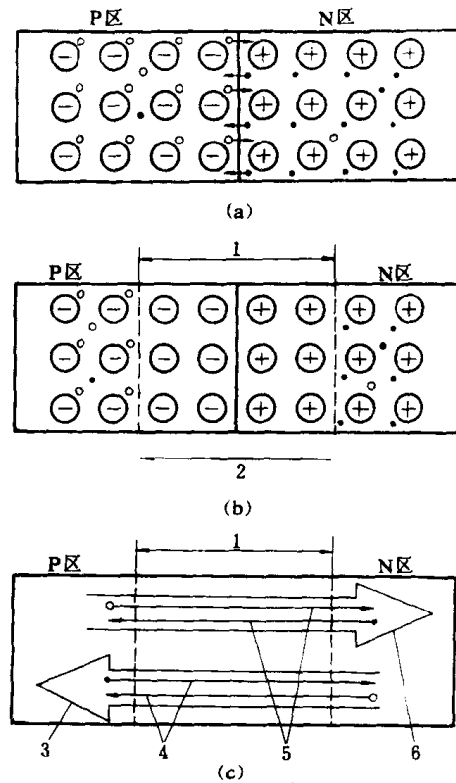


图 1-4 PN 结的形成

(a)载流子的扩散运动;(b)动态平衡时的 PN 结及其内电场;(c)动态平衡时 PN 结中的载流子运动及电流
1—空间电荷区;2—内电场;3—漂移电流;
4—漂移运动;5—扩散运动;6—扩散电流

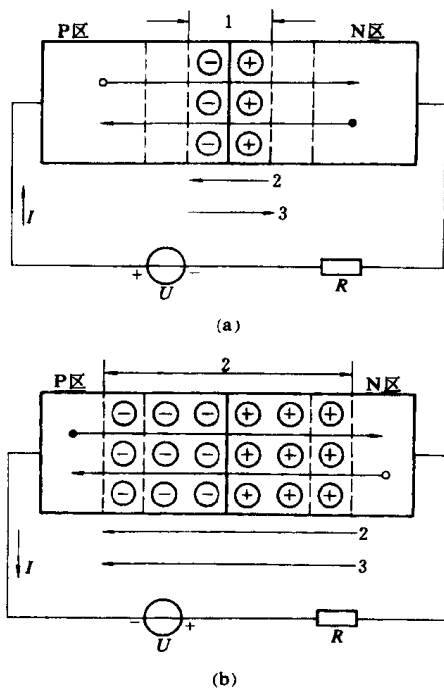


图 1-5 PN 结的单向导电特性
(a) 正向偏置, 导通; (b) 反向偏置, 截止
1—空间电荷区; 2—内电场; 3—外电场

PN 结反偏时, 外电场使 P 区的空穴和 N 区的电子向离开 PN 结的方向移动, 空间电荷区变宽, 如图 1-5(b) 所示。因此, 内电场增强, 多子的扩散运动受阻, 而少子的漂移运动加强, 这时通过 PN 结的电流(称为反向电流)由少子的漂移电流决定。由于少子浓度很低, 所以反向电流很小, 一般为微安级, 相对于正向电流可以忽略不计。反向电流几乎不随外加电压而变化, 故又称为反向饱和电流。此时, PN 结呈现的电阻很大, 称为截止状态。

综上所述, PN 结正偏时导通, 形成较大的正向电流; 反偏时截止, 反向电流近似为零。因此, PN 结具有单向导电特性。但是需要指出, PN 结的反偏电压超过一定数值后, 反向电流将急剧增大而产生反向击穿现象(反向击穿特性将在后面叙述), 单向导电特性被破坏。

二、半导体二极管的特性及主要参数

(一) 二极管的结构

在 PN 结的两端各引出一根电极引线, 然后用外壳封装起来, 就构成了半导体二极管, 又称晶体二极管, 简称二极管, 其符号如图 1-6 (a) 所示,

由 P 区引出的电极称正极(或阳极), 由 N 区引出的电极称负极(或阴极)。

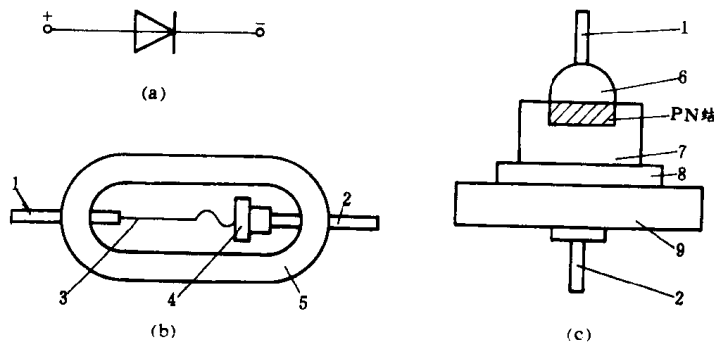


图 1-6 半导体二极管的符号和结构

(a) 符号; (b) 点接触型; (c) 面接触型

1—正极引出线; 2—负极引出线; 3—金属触丝; 4—N 型锗片; 5—外壳;

6—铝合金小球; 7—N 型硅; 8—金锡合金; 9—底座

图 1-6 (b)、(c) 所示为二极管的两种常用结构。点接触型二极管的 PN 结结面积小, 结电容小, 适用于高频电路, 但二极管不能通过大电流。面接触型二极管的 PN 结结面积大, 能通过大电流, 适用于低频电路, 主要用于整流电路。

(二) 二极管的伏安特性

二极管由一个 PN 结构成, 因此, 它同样具有单向导电特性。在外加电压的作用下, 二极管电流变化规律如图 1-7 所示, 它称为二极管的伏安特性曲线。

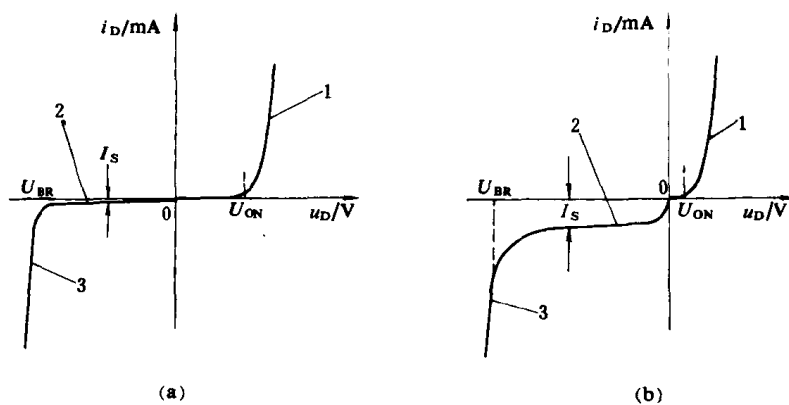


图 1-7 二极管的伏安特性曲线
 (a) 硅二极管; (b) 锗二极管
 1—正向特性; 2—反向特性; 3—击穿特性

其数学表达式为

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1 \right) \quad (1-1)$$

其中

$$U_T = kT/q \quad (1-2)$$

式中 i_D —— 流过二极管的电流, A;

I_S —— 反向饱和电流, A;

u_D —— 二极管的外加电压, V;

U_T —— 温度电压当量; V;

k —— 波尔兹曼常数; $1.380 \times 10^{-23} \text{J/K}$;

T —— 热力学温度; K;

q —— 电子电量, $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 。

常温 ($T=300\text{K}$) 时 $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

当外加正向电压大于 U_{ON} 时, 二极管的电流随外加电压增加而显著增大, 由式(1-1)可知, 电流与外加电压呈指数关系。当外加正向电压小于 U_{ON} 时, 外电场不足以克服 PN 结内建电场对多子扩散运动造成的阻力, 正向电流几乎为零, 可认为二极管没有导通, 因此将电压 U_{ON} 称为导通电压或死区电压。在室温下, 硅管 $U_{ON} \approx 0.5\text{V}$, 锗管 $U_{ON} \approx 0.1\text{V}$ 。正常工作时, 硅二极管的正向压降约为 $0.6 \sim 0.8\text{V}$, 通常取 0.7V ; 锗管约为 $0.1 \sim 0.3\text{V}$, 通常取 0.2V 。

二极管两端加上反向电压时, 由式 (1-1) 可知, 反向电流很小, 且与反向电压无关, 约等于 I_S 。在室温下, 小功率硅管的反向饱和电流 I_S 小于 $0.1\mu\text{A}$, 锗管约为几十微安。

当反向电压值超过 $U_{(BR)}$ 后, 反向电流将急剧增大, 如图 1-7 所示, 这种现象称为反向击穿, $U_{(BR)}$ 称为反向击穿电压。式 (1-1) 不能反映该击穿特性。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情况, 即这种击穿是可逆的, 称为电击穿。若反向击穿电流过高, 则会导致 PN 结结温过高而烧坏, 这种击穿是不可逆的, 称为热击穿。

PN 结的反向击穿有雪崩击穿和齐纳击穿两种机理。当反向电压足够大时, PN 结的内电场加强, 使少子漂移速度加快, 动能增大, 通过空间电荷区, 与原子相撞, 产生很多新的

电子—空穴对，这些新产生的电子又会去撞击更多的原子，这种作用如同雪崩一样，使电流急剧增加，这种击穿称为雪崩击穿。由高浓度掺杂材料制成的PN结，耗尽区宽度很窄，即使反向电压不高也容易在很窄的耗尽区中形成很强的电场，将价电子直接从共价键中拉出来产生电子—空穴对，致使反向电流急剧增加，这种击穿称为齐纳击穿。

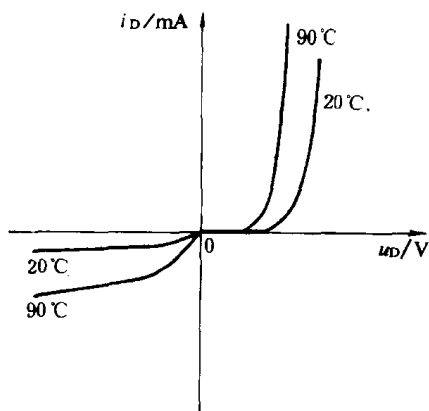


图 1-8 温度对二极管特性曲线的影响

一个具体的 PN 结的击穿究竟属于雪崩还是齐纳击穿，有时很难认定，但一般认为反向击穿电压超过 6V 为雪崩击穿，低于 4V 为齐纳击穿，4~6V 内则两种情况都有。

温度对二极管的特性有显著影响，如图 1-8 所示。当温度升高时，正向特性曲线向左移，反向特性曲线向下移。变化规律是：在室温附近，温度每升高 1°C，正向压降约减小 2~2.5mV，温度每升高 10°C，反向电流约增大一倍。

(三) 二极管的主要参数

二极管的特性还可用它的参数描述，实用中一般通过查手册，依据参数来合理选用和正确使用二极管。

(1) 最大整流电流 I_F ，二极管长期运行允许通过的最大正向平均电流。使用时不能超过此值，以免烧坏二极管。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} ，是允许施加在二极管上的最大反向电压，通常取为击穿电压的一半。

(3) 反向电流 I_R ，是二极管未击穿时的反向电流值。其值愈小，二极管的单向导电性愈好。

(4) 二极管的结电容 C_J ，它由势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 两部分构成。

当外加于 PN 结两端的反向电压值改变时，就会引起积累在 PN 结内空间电荷量的变化，从而显示出 PN 结的电容效应，这种电容效应用势垒电容 C_T 表示。如外加反向电压减小时，N 区的电子和 P 区的空穴便进入阻挡层与一部分杂质离子中和，这就好象有一部分电子和空穴存入 PN 结，相当于电子和空穴分别向势垒电容 C_T “充电”，如图 1-9(a)所示。反之，反向电压增加时，将有部分电子和空穴离开阻挡层，好象电子和空穴从 PN 结中取出，相当于势垒电容“放电”，如图 1-9(b)所示。

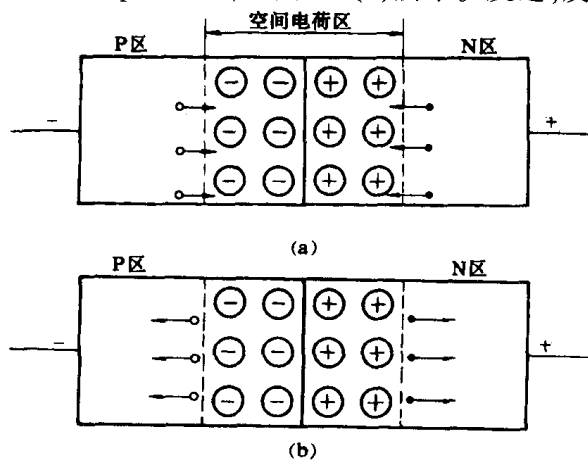


图 1-9 势垒电容效应

(a) 势垒电容“充电”；(b) 势垒电容“放电”

这种充、放电效应与普通电容在外加电压作用下进行充放电的过程相似，所不同的是这个势垒电容是随外加反向电压值改变的。当反向电压增加时，阻挡层变宽， C_T 减小；反之，反向电压减小时，阻挡层变窄， C_T 增大。势垒电容与外加电压的关系如图 1-10 所示，可见它是非线性电容。利用反向偏置的 PN 结的结电容特性可制成变容二极管。

二极管另一个结电容效应是由于多数载流子在扩散过程中的积累引起的。PN 结加正向电压时，N 区的电子扩散到 P 区，P 区的空穴扩散到 N 区，这些载流子除了一部分继续向前扩散形成正向电流外，还有一部分则分别在 P 区和 N 区储存起来，在结边缘处浓度大，离结远的地方浓度小，如图 1-11 所示。

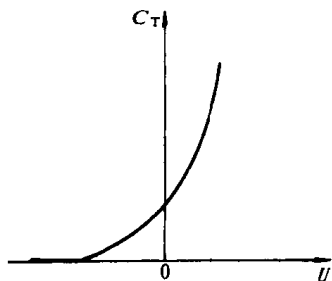


图 1-10 C_T 与 U 的关系曲线

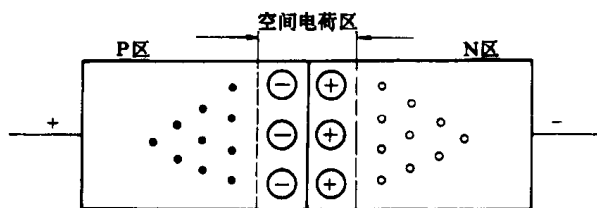


图 1-11 扩散电容效应

当正向电压加大时，正向电流随着增大，就要有更多的载流子积累起来以满足电流加大的需要；而当正向电压减小时，正向电流减小，积累在 P 区和 N 区的载流子就要相对减少。就是说外加正向电压的变化也会引起载流子在 P 区和 N 区的充入和取出，产生了电容效应。这个电容称为扩散电容，用 C_D 表示。 C_D 的大小随外加电压而变化，也是非线性电容。 C_D 值通常大于势垒电容 C_T 的值，约为几十皮法到 $0.01\mu\text{F}$ ，而 C_T 仅为 $0.5\sim 100\text{pF}$ 。

二极管的结电容是两者之和，用 C_J 表示，即

$$C_J = C_T + C_D \quad (1-3)$$

正向偏置时， C_J 以扩散电容 C_D 为主；反向偏置时 C_J 以势垒电容 C_T 为主。一般情况下，由于 C_J 很小，对低频影响不大。但工作频率很高时，就必须考虑二极管结电容的影响。

(5) 最高工作频率 f_M ， f_M 是二极管允许的最高工作频率，当工作频率超过 f_M 时，电流容易从结电容通过，使其单向导电性能变差，甚至失去单向导电特性。 f_M 主要取决于 PN 结的结电容，结电容越大，其值越小。

三、二极管电路的分析方法

(一) 理想二极管及二极管特性的折线近似

1. 理想二极管

实际使用中，希望二极管具有理想特性，即正向偏置时导通，电压降为零，反向偏置时截止，电流为零，反向击穿电压为无穷大，称为理想二极管，其伏安特性可用图 1-12(a) 所示两段直线表示，符号如图 1-12(b) 所示。

在电路分析时，理想二极管可用一理想开关 S 来等效，如图 1-12(c) 所示。正偏时 S 合上，反偏时 S 断开。在实际电路中，当二极管的正向压降远小于和它串联的电压，反向电流远小于和它并联的电流时，可认为二极管是理想的。

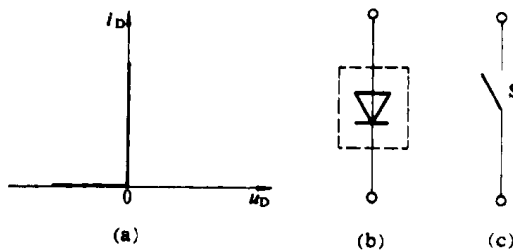


图 1-12 理想二极管
(a) 伏安特性曲线；(b) 符号；(c) 等效电路

2. 二极管特性的折线近似

将图 1-7 所示二极管特性曲线用两段直线来逼近，如图 1-13(a) 所示，这称为特性曲线折线近似。两段直线在 U_{ON} 处转折， U_{ON} 为导通电压。二极管两端电压小于 U_{ON} 时电流

为零，大于 U_{ON} 后，伏安直线的斜率为 $1/R_D$ ， $R_D = \Delta U / \Delta I$ ，称为二极管的导通电阻，表示在大信号作用下，二极管呈现的电阻。由于二极管正向特性曲线很陡直，所以导通电阻很小。根据图 1-13 (a) 可得到图 1-13 (b) 所示的等效电路。

由于二极管的导通电阻 R_D 很小，通常可以将其略去，则二极管的特性曲线和等效电路可进一步简化为图 1-14 所示。通常，图 1-13 和图 1-14 中的导通电压 U_{ON} 对于硅管取 0.7V，锗管取 0.3V。

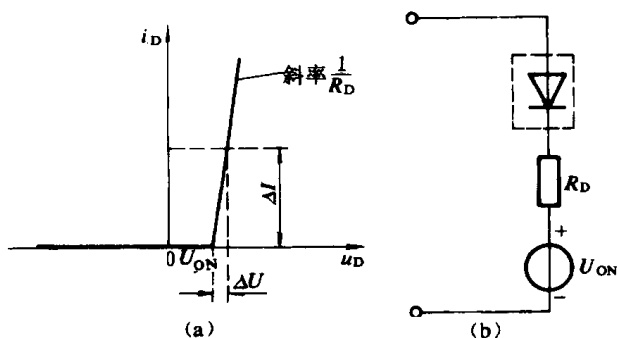


图 1-13 二极管特性的折线近似及等效电路
(a) 特性曲线的折线近似；(b) 等效电路

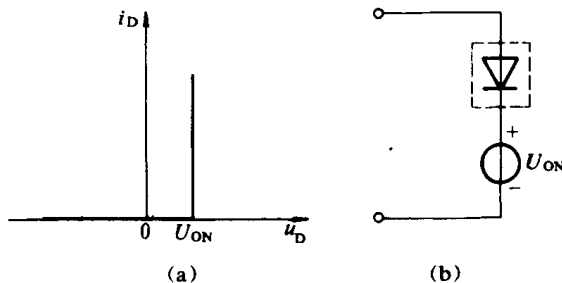


图 1-14 忽略导通电阻时二极管特性的折线近似及等效电路
(a) 特性曲线的折线近似；(b) 等效电路

【例 1-1】 二极管构成的电路如图 1-15 (a) 所示，已知输入电压 u_i 为正弦波，振幅为 15V，试求输出电压 u_o 的波形。

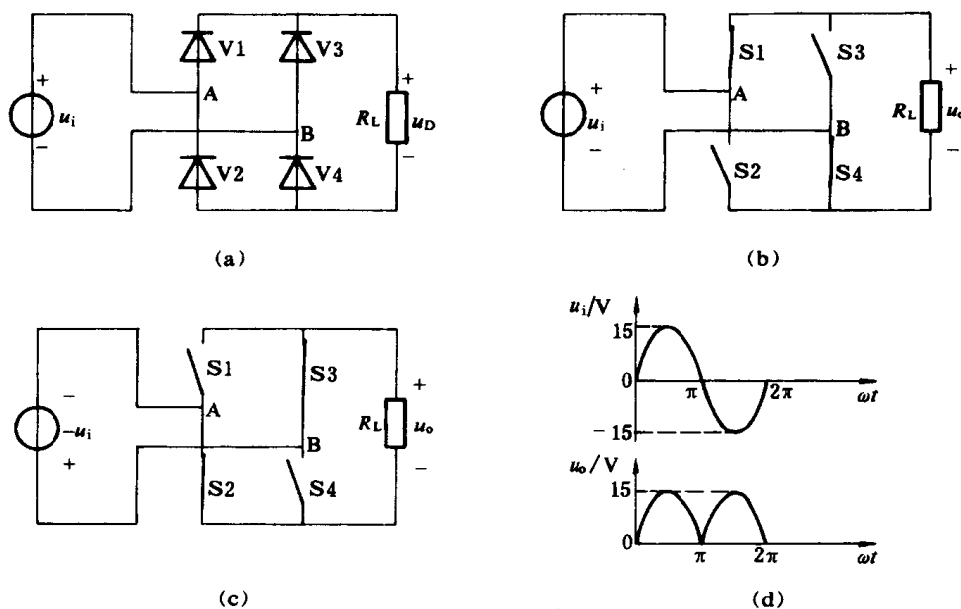


图 1-15 二极管桥式整流电路
(a) 原理电路；(b) u_i 正半周等效电路；(c) u_i 负半周等效电路；(d) 输入输出电压波形

解： 由于输入电压 u_i 幅值比较大，可以采用理想二极管特性来分析。当 u_i 为正半周时 V1、V4 两管正偏导通，而 V2、V3 反偏截止，因此可得到图 1-15 (b) 所示等效电路，由图可知输出电压 $u_o = u_i$ 。当 u_i 为负半周时，V2、V3 正偏导通，V1、V4 反偏截止，可得图 1-15 (c) 所示等效电路，由图可知输出电压 $u_o = -u_i$ 。由此可以得到输出电压波形，如图 1-15 (d) 所示，它是单方向的脉动电压。上述电路称为桥式整流电路。

【例 1-2】 由硅二极管构成的电路如图 1-16 (a) 所示，试求在图示输入信号 u_i 的作用

下，输出电压 u_o 的波形。

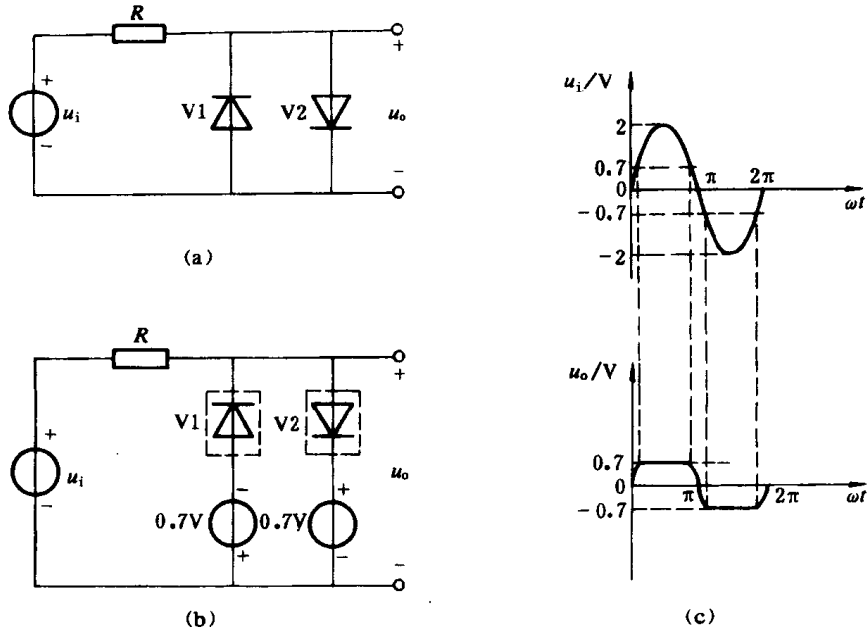


图 1-16 二极管限幅电路

(a) 原理电路；(b) 等效电路；(c) 输入输出波形

解：考虑到输入电压的幅度只有 2V，而二极管又采用硅管，因此不能略去二极管的导通电压 (0.7V)，但可略去导通电阻，故画出等效电路如图 1-16 (b) 所示。由图可知，在 u_i 的正半周， u_i 小于 0.7V 时，二极管 V1、V2 均截止，输出电压 u_o 等于输入电压 u_i ； u_i 大于 0.7V 时，V2 导通，V1 仍截止，输出电压 u_o 恒等于 V2 的导通电压 0.7V。在 u_i 的负半周，V2 始终截止， u_i 大于 -0.7V 时，V1 也截止，输出电压 u_o 等于输入电压 u_i ； u_i 小于 -0.7V 时，V1 导通，输出电压 u_o 恒等于 V1 的导通电压 -0.7V。由此可得图 1-16 (c) 所示输出电压波形。这是利用二极管恒定的导通电压对输入信号进行限幅的电路。

(二) 图解分析法和微变等效电路分析法

1. 二极管电路的直流图解分析

二极管电路如图 1-17 (a) 所示。 U_G 为直流电源电压。

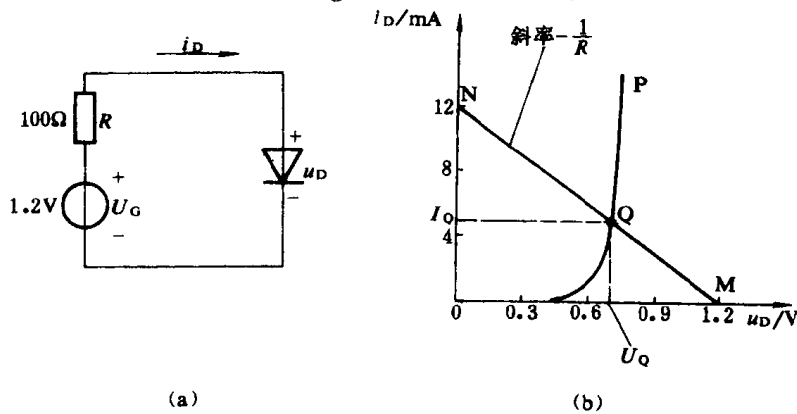


图 1-17 二极管电路的直流图解分析

(a) 二极管电路；(b) 直流图解

由图 1-17 (a) 可列出方程

$$u_D = U_G - i_D R \quad (1-4)$$

$$i_D = f(u_D) \quad (1-5)$$

式中, u_D 与 i_D 分别表示二极管两端直流压降和流过二极管的电流。

式 (1-5) 为二极管的伏安特性, 其曲线如图 1-17 (b) 中线段 OQP 所示, 它为一非线性曲线。对式 (1-4) 和式 (1-5) 联立求解便可求得二极管的管压降 U_Q 和流过二极管的电流 I_Q 。由于式 (1-5) 为非线性函数, 用作图的方法求解比较方便。

在图 1-17 (b) 中作出式 (1-4) 所描述的直线 MN。令 $i_D = 0, u_D = U_G$ 得 M 点; 令 $u_D = 0, i_D = U_G/R$ 得 N 点, 连接 M、N 两点就是式 (1-4) 所示的直线, 该直线的斜率等于 $-1/R$ 。直线 MN 与二极管伏安特性曲线相交于 Q 点, Q 点对应的电流 I_Q 和电压 U_Q 就是图 1-17(a) 所示电路中流过二极管的电流和二极管两端压降。由图 1-17(b) 可得 $I_Q = 5.0\text{mA}$, $U_Q = 0.7\text{V}$ 。Q 点称为直流工作点, 它表示二极管直流工作时的电压和电流。

图 1-17(a) 中, 二极管处于直流工作状态, 此时二极管呈现的电阻称为直流电阻 R_Q

$$R_Q = \frac{U_Q}{I_Q} \quad (1-6)$$

R_Q 值等于直流工作点与原点间所连直线斜率的倒数, 工作电流 I_Q 不同, 相应的 R_Q 值也就不同, I_Q 越大, R_Q 越小。

2. 微变等效电路分析法

图 1-18 (a) 所示电路中既含有直流电源, 又含有交流信号电压, 这种情况在电子电路中经常遇到。设交流信号电压 u_i 为一幅度很小的正弦波, 如图 1-18 (b) 所示。C 为隔除直流耦合交流的电容, 它对交流信号的容抗近似为零。这样加在二极管两端的电压既有直流成分又有交流成分, 流过二极管的电流也既有直流又有交流。分析交直流量共存的电子电路, 常用的方法是对直流状态和交流状态分别进行讨论 (称静态分析和动态分析), 然后再进行综合。

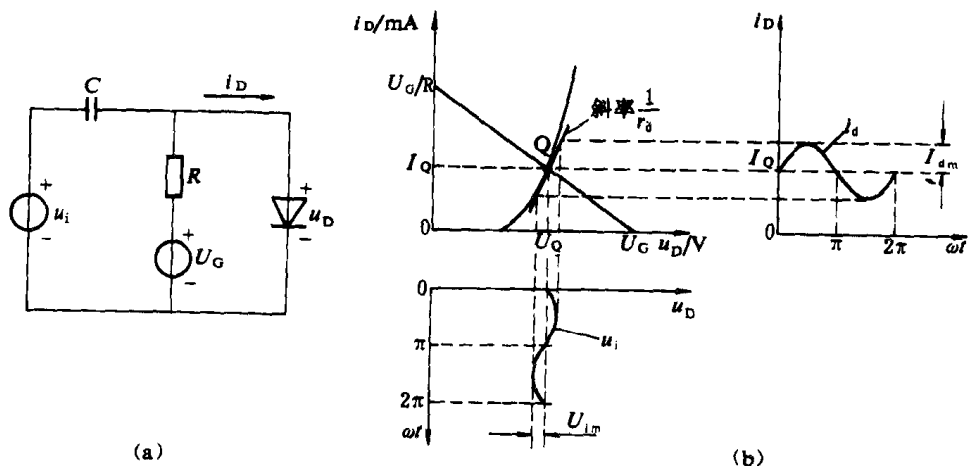


图 1-18 交直流作用下的二极管电路

(a) 电路; (b) 电压、电流波形

令 $u_i = 0$, 此时电路中只有直流量, 称为直流工作状态, 又称静态。根据前面所述二极管直流图解分析法可求得流过二极管电流为 I_Q 、管压降为 U_Q , 如图 1-18 (b) 所示, 常将 I_Q 、 U_Q 称为静态工作点参数。由于二极管导通后, 两端压降接近于恒压, 所以工程中常用

估算法求流过二极管的电流 I_Q , 即

$$I_Q = \frac{U_G - U_Q}{R} \quad (1-7)$$

式中的 U_Q 对小功率硅管取 0.7V, 对小功率锗管取 0.2V。

当 $u_i \neq 0$, 电路中加入交流信号电压, 此时加在二极管两端的电压 $u_D = U_Q + u_i = U_Q + U_{im}\sin\omega t$, U_{im} 为正弦信号的幅值, 要求 $U_{im} \ll U_Q$ 。根据二极管伏安特性曲线可以作出流过二极管电流波形, 如图 1-18 (b) 所示。

U_{im} 很小时, 二极管伏安特性曲线在 Q 点附近很小范围内近似为直线, 如图 1-18 (b) 所示。故由 u_i 产生的交流电流 i_d 也为正弦波, 其幅值为 I_{dm} 。可见流过二极管的电流也由直流和交流合成, 即 $i_D = I_Q + i_d, i_d = I_{dm}\sin\omega t$ 。

由于 u_i 很小时, 在 u_i 的变化范围内, 二极管伏安特性可用一段直线近似表示, 因此二极管在 Q 点对交流小信号的作用可等效为一电阻 r_d , 该电阻称为二极管在 Q 点处的动态电阻或交流电阻。其值的倒数即为 Q 点切线的斜率, 即

$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{di_D}{du_D} \right|_Q \quad (1-8)$$

根据式 (1-1) 可求得

$$\frac{1}{r_d} = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{u_Q}{U_T}} \approx \frac{I_Q}{U_T}$$

即
$$r_d = \frac{U_T}{I_Q} \quad (1-9)$$

上式说明, 在温度一定时, r_d 的值与直流工作点电流 I_Q 有关, I_Q 越大, r_d 越小。在室温时, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。如 $I_Q = 2\text{mA}$, 则 $r_d = 13\Omega$, 可见二极管的动态电阻是很小的。

利用 r_d 可以画出二极管的小信号等效电路(又称微变等效电路), 如图 1-19(a) 所示。图 1-18(a) 电路的微变等效电路则如图 1-19(b) 所示, 这是因为对交流信号而言, 电容近似短路, 直流电压源也近似短路。由图 1-19(b) 不难求出流过二极管的交流电流 $i_d = u_i/r_d$ 。因此流过二极管的总电流 $i_D = I_Q + i_d$ 。

【例 1-3】 二极管电路如图 1-18 (a) 所示, 已知 $u_i = 5\sin\omega t\text{mV}$, $U_G = 4\text{V}$, $R = 1\text{k}\Omega$, 试求硅二极管两端的电压及流过二极管的电流。

解: (1) 静态分析。令 $u_i = 0$, 用估算法得

$$U_Q \approx 0.7\text{V}$$

$$I_Q = \frac{U_G - U_Q}{R} = \frac{(4 - 0.7)\text{V}}{1\text{k}\Omega} = 3.3\text{mA}$$

(2) 动态分析

$$u_d = u_i = 5\sin\omega t \text{ mV}$$

$$r_d = \frac{U_T}{I_Q} = \frac{26\text{mV}}{3.3\text{mA}} = 8\Omega$$

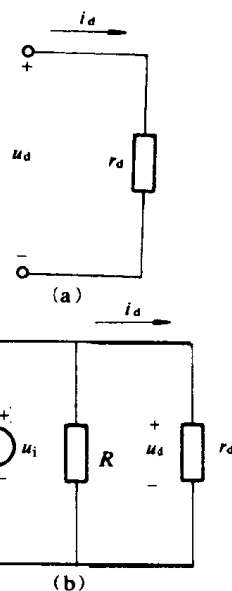


图 1-19 二极管电路
微变等效电路分析
(a) 二极管的微变等效电路;
(b) 图 1-18 (a) 电路的微变
等效电路