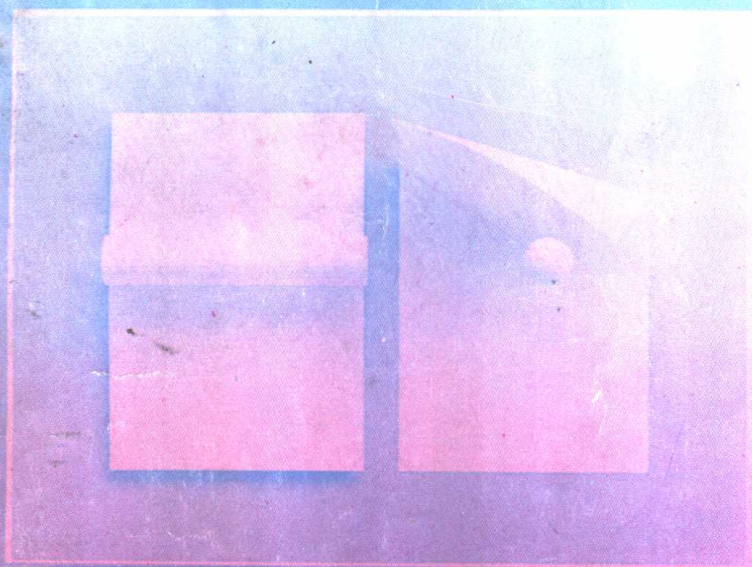
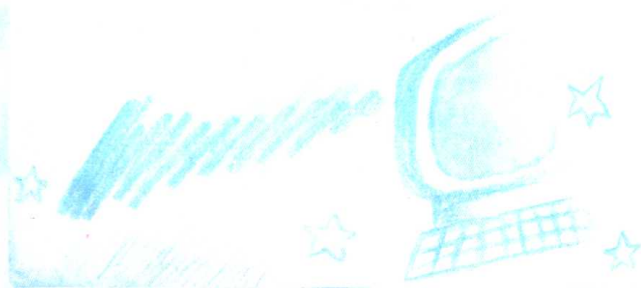


980548

模拟电子学

王志宏 叶治政 翟 钰 杨栓科 编



西安交通大学出版社

模拟电子学

王志宏 叶治政 翟 钰 杨栓科 编

西安交通大学出版社

内容简介

本书是按国家教委颁布的《高等工科学学校电子技术基础教学基本要求》编写的。本书内容有:半导体二极管、三极管和场效应管、基本放大电路、线性集成组件、反馈放大电路、各种运算电路、信号处理电路、信号发生器、功率放大电路和直流稳压电源等。每章均附有一定数量的复习思考题和习题,习题均附有答案。

本书在处理电子器件与电路的关系时,把重点放在基本电路的分析和应用上;在处理分立与集成电路的关系时,则以集成电路为主,加强了集成运算放大器和专用集成芯片应用方面的知识。同时考虑到便于学生自学,在文字叙述上力求通俗易懂,讲清物理概念,避免繁琐的数学推导。

本书可做工科院校电机、电力、电子、自动化和计算机工程等专业的教材,也可供函授院校学生、工程技术人员及业余自学者作为学习电子技术的参考书。

(陕)新登字 007 号

模拟电子学

王志宏 叶治政 翟 钰 杨栓科 编

责任编辑 林建萍

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路 28 号 邮政编码 710049)

西安正华印刷厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:18.125 字数:437 千字

1994 年 12 月第 1 版 1995 年 5 月第 1 次印刷

印数:1—3000

ISBN7-5605-0669-0/TN·41 定价:16.00 元

序 言

本书是在西安交通大学电子学教研室编写的《电子技术基础》(模拟电路部分)五次修订稿的基础上,经过 20 几年的教学实践,参照全国电子技术课程指导委员会于 1986 年 5 月厦门会议制定的基本要求进行大量修改补充而成的。这次修订、出版、定名为《模拟电子学》。且有《数字逻辑电路基础》与本书配套出版。

在编写此书的过程中,始终遵循加强基础和少而精的原则,并按教材的要求,注意了内容的选择和教学法上的改进。模拟电子学这门课是“电子技术方面入门性质的技术基础课”,因此,“重点在于基本电路的分析和应用”。讲电子器件时,则要“管为路用”,适可而止,主要了解它们的外部性能,使“能合理选择和正确使用”。讲电路时,根据分立为集成服务的要求,充实了线性集成电路的应用,增添了新器件和新电路。总之是按照管为路用,加强集成的原则来处理内容的取舍。

本书除适合工科院校电气、电力、自动化、电子和计算机工程类各专业做教材外,也可供其他院校的学生、以及工程技术人员和业余自学者作为学习电子技术的参考书。

本书的第 1,9,10 章,是叶治政同志写的,第 2,8 章是王志宏同志写的,第 4,5 章是翟钰同志写的,第 3,6,7 章是杨拴科同志写的,全书由王志宏同志统稿。编写过程中一直得到沈尚贤教授、何金茂教授、叶德璇教授的具体指导和帮助,教研室很多同志对本书的编写也都给予了热情支持,编者对此谨致衷心的感谢。

电子技术日新月异,本课程的教学,尚须不断改革。由于我们学识有限,书中错误和不妥之处,在所难免,请读者多加指正。

编者

1993 年 12 月于西安交通大学

EA1014108

目 录

第 1 章 半导体二极管和三极管

1.1 半导体二极管	(1)
1.1.1 PN 结	(1)
1.1.2 PN 结的单向导电性	(1)
1.1.3 二极管的结构和类型	(3)
1.1.4 二极管的伏安特性	(4)
1.1.5 二极管的主要电参数	(5)
1.1.6 温度对二极管参数的影响	(6)
1.2 特种二极管	(7)
1.2.1 硅稳压管	(7)
1.2.2 发光二极管	(8)
1.2.3 光敏二极管	(9)
1.3 半导体三极管	(10)
1.3.1 三极管工作原理	(11)
1.3.2 三极管的特性曲线	(12)
1.3.3 三极管的主要电参数	(14)
1.3.4 温度对三极管参数的影响	(16)
附录 1.1 半导体管型号命名方法	(17)
附录 1.2 部分半导体二、三极管的主要电参数	(18)

第 2 章 放大电路基础

2.1 放大电路的工作原理及组成	(24)
2.1.1 直流偏置	(24)
2.1.2 信号的输入和输出	(25)
2.2 放大电路的基本分析方法——图解法	(26)
2.2.1 静态值的计算	(27)
2.2.2 动态情况——分析静态工作点与非线性失真的关系	(29)
2.2.3 输出动态范围	(35)
2.3 放大电路的基本分析方法——微变等效电路法	(36)
2.3.1 晶体管的微变等效电路	(36)
2.3.2 r_{be} 的估算	(39)
2.3.3 电压放大倍数	(40)
2.3.4 输入电阻和输出电阻	(43)
2.4 静态工作点的稳定	(48)
2.4.1 环境温度 T_s 对静态工作点的影响	(48)

2.4.2 稳定静态工作点的典型电路	(49)
2.5 基本放大电路的三种接法及其性能比较	(52)
2.5.1 共集电极基本放大电路	(52)
2.5.2 共基极基本放大电路	(55)
2.5.3 三种接法的比较	(58)
2.6 多级放大电路	(60)
2.6.1 耦合方式	(60)
2.6.2 多级放大电路的组成	(61)
2.6.3 多级放大电路的计算	(62)
2.7 放大电路的频率特性	(64)
2.7.1 频率响应、频率失真	(64)
2.7.2 频率特性的分析方法	(66)
2.7.3 中频区的频率特性	(67)
2.7.4 低频区的频率特性和下限频率	(68)
2.7.5 高频区的频率特性和上限频率	(70)
2.7.6 对数频率特性——波特图	(79)
2.8 放大电路的瞬态响应	(82)
2.9 放大电路的主要性能指标	(85)

第3章 场效应管及其放大电路

3.1 结型场效应管	(86)
3.1.1 结型场效应管的结构和工作原理	(86)
3.1.2 结型场效应管的特性曲线	(89)
3.2 绝缘栅场效应管	(91)
3.2.1 绝缘栅场效应管的结构和工作原理	(91)
3.2.2 绝缘栅场效应管特性	(92)
3.3 场效应管的参数和使用注意事项	(94)
3.4 场效应管的基本放大电路	(95)
3.4.1 共源极放大电路	(95)
3.4.2 共漏极放大电路	(98)
附录 3.1 场效应管与半导体三极管的比较	(99)
附录 3.2 场效应管主要电参数举例	(100)

第4章 集成运算放大器

4.1 集成运算放大器的概述	(101)
4.1.1 集成电路制造工艺上的特点	(101)
4.1.2 直耦放大电路的零漂	(101)
4.2 差动放大电路	(103)
4.2.1 典型差动放大电路	(103)

4.2.2	其它输入、输出方式的差动放大电路	(106)
4.2.3	具有恒流源的差放电路	(110)
4.2.4	四种差动放大电路性能比较	(112)
4.3	集成运算放大器简介	(112)
4.3.1	集成运放的组成	(112)
4.3.2	复合管电路	(113)
4.3.3	集成运放的原理电路	(114)
4.3.4	集成运放的主要参数	(115)
4.4	基本运算电路	(117)
4.4.1	反相比例放大电路	(117)
4.4.2	同相比例放大电路	(118)
4.4.3	差动放大电路	(118)

第5章 负反馈放大电路

5.1	反馈放大电路的基本类型	(120)
5.1.1	反馈放大电路的方框图	(120)
5.1.2	负反馈放大电路的分类	(122)
5.2	负反馈放大电路的计算	(130)
5.2.1	单级负反馈放大电路的计算	(131)
5.2.2	深负反馈放大电路的计算	(133)
5.3	负反馈对放大电路性能的影响	(137)
5.3.1	提高放大倍数的恒定性	(137)
5.3.2	扩展通频带	(138)
5.3.3	减小非线性失真	(140)
5.3.4	抑制放大电路内部的干扰和噪声	(140)
5.4	反馈放大电路的自激振荡及消除	(141)
5.4.1	反馈放大电路的自激振荡条件	(141)
5.4.2	反馈放大电路的稳定性	(142)
5.4.3	相位补偿法	(143)

第6章 集成运算放大器组成的运算电路

6.1	加法和减法运算电路	(146)
6.1.1	加法运算电路	(146)
6.1.2	减法运算电路	(148)
6.2	积分和微分运算电路	(149)
6.2.1	积分运算电路	(149)
6.2.2	微分运算电路	(151)
6.3	对数和反对数运算电路	(152)
6.3.1	对数运算电路	(152)

6.3.2 反对数运算电路	(152)
6.4 模拟乘法器及其应用	(153)
6.4.1 模拟乘法器的原理	(153)
6.4.2 单片集成模拟乘法器 BG314 简介	(155)
6.4.3 模拟乘法器应用举例	(156)
6.5 集成运算放大器的运算误差	(157)

第7章 集成运算放大器组成的信号处理电路

7.1 有源滤波器	(161)
7.1.1 滤波器的基本概念	(161)
7.1.2 低通有源滤波器	(162)
7.1.3 高通有源滤波器	(165)
7.1.4 开关电容滤波器	(168)
7.2 线性检波与采样保持电路	(173)
7.2.1 线性检波电路	(173)
7.2.2 采样保持电路	(174)
7.3 电压比较器	(175)
7.3.1 单门限电压比较器	(176)
7.3.2 多门限电压比较器	(177)
7.4 测量放大器	(179)
7.4.1 三运放测量放大器	(179)
7.4.2 单片集成测量放大器 AD521 介绍	(181)

第8章 信号发生器

8.1 正弦波信号发生器的概述	(184)
8.1.1 产生自激振荡的条件	(184)
8.1.2 正弦波振荡器的选频性	(185)
8.1.3 振荡的建立与稳定	(185)
8.2 RC 型正弦波发生器	(186)
8.3 LC 型正弦波发生器	(188)
8.4 晶体振荡器	(193)
8.5 方波发生器	(194)
8.6 其它波形的发生器	(196)
8.6.1 三角波和锯齿波发生器	(196)
8.6.2 压控振荡器	(198)
8.6.3 单片函数发生器模块 5G8038 应用电路举例	(200)
8.6.4 阶梯波发生器	(200)

第 9 章 功率放大电路

9.1 功率放大电路概述	(202)
9.2 互补推挽式功率放大电路	(203)
9.3 集成功率放大电路	(206)
9.4 变压器耦合功率放大电路	(207)
9.5 功率 MOS 管及其放大电路	(208)
9.6 功率管的散热	(210)

第 10 章 直流稳压电源

10.1 概述	(212)
10.2 单相整流及电容滤波电路	(213)
10.3 倍压整流电路	(221)
10.4 串联型晶体管稳压电路	(221)
10.4.1 硅稳压管稳压电路	(221)
10.4.2 串联型稳压电路	(224)
10.5 集成稳压器	(226)
10.5.1 多端输出电压可调(WA7 型)集成稳压组件电路介绍	(226)
10.5.2 固定电压的三端稳压器	(229)
10.5.3 三端电压可调集成稳压器(W317 和 W117)	(230)
10.5.4 集成稳压组件的主要电参数	(232)
10.6 开关稳压器	(233)
10.7 晶闸管及其应用举例	(234)
10.7.1 晶闸管	(234)
10.7.2 单向可控整流电路	(236)
参考书目	(239)
思考题及习题	(240)

第 1 章 半导体二极管和三极管

学完本章后,应具有下列知识和能力:

(1) 掌握半导体二极管的单向导电性、主要参数,为今后选择二极管和分析二极管的电路打下基础。

(2) 掌握稳压管的稳压特性、主要参数,为今后选择稳压管和分析稳压管电路打下基础。

(3) 掌握三极管的电流分配、放大作用、输入和输出特性曲线及主要参数,为分析和应用三极管电路打下基础。

(4) 了解温度对二极管、三极管的特性以及参数的影响。

(5) 了解各种特种二极管的特性,为今后应用这些器件打下基础。

(6) 能够解释下列术语:

本征半导体、掺杂半导体、空间电荷层、电流放大系数。

1.1 半导体二极管

硅和锗的导电性能是介于导体和绝缘体之间,故称之为半导体。高度提纯后,几乎不含杂质的半导体称为本征半导体。在室温条件下,本征半导体价带上的价电子由于热激发受到一定能量,跳到导带上形成自由电子;与此同时,在原来价电子的位置上就留下一个空位,称为空穴。在本征半导体中,电子和空穴是成对产生的,故称之为电子空穴对。电子空穴对的数量与温度有关,温度越高,产生的电子空穴对数就越多。自由电子和空穴,在外加电场力的作用下,会产生定向运动形成电流。但在本征半导体中其电子空穴对数量较少,故电阻率较大,不宜直接使用。

为了控制半导体的电阻率,通常都在本征半导体中掺进少量的其他元素,这一过程称为掺杂,掺杂后的半导体称为掺杂半导体。当掺入三价元素硼或硼时,则在其共价键中便出现多余空穴,在此空穴数多于电子数,故空穴是多数载流子,电子是少数载流子,这种掺杂半导体称为P型或空穴型半导体。若掺入五价元素磷或砷时,其多余的价电子几乎都形成自由电子,故电子是多数载流子,空穴是少数载流子,这种掺杂半导体称为N型或电子型半导体。P型和N型半导体,从整体看,它正负电荷是相等的,保持电中性。

1.1.1 PN 结

通过掺杂过程使一块半导体一边形成N型半导体,另一边形成P型半导体,在这两种半导体交界面两侧,N区电子浓度大于P区,P区的空穴浓度大于N区。由于交界面两边存在着浓度差,故将分别向对侧扩散,扩散结果,N区失去电子;留下不能移动的带正电的离子,P区失去空穴留下带负电的离子,这样在交界面两侧就产生了电场,如图1.1.1所示。

1.1.2 PN 结的单向导电性

图1.1.2表示PN结在外加正向电压时的情况(亦称正向偏置,简称正偏)。当未加正向电压时,PN结的电位分布如图1.1.2(b)中的虚线所示。当加了正向电压后,在外加电场作用下,

N 型半导体中性区内的多数载流子(电子)要向左移动,与原来空间电荷层内的正离子中和,使空间电荷层宽度和空间电荷量都减小。在 N 区中电子向左移动的同时,电源负端也不断地

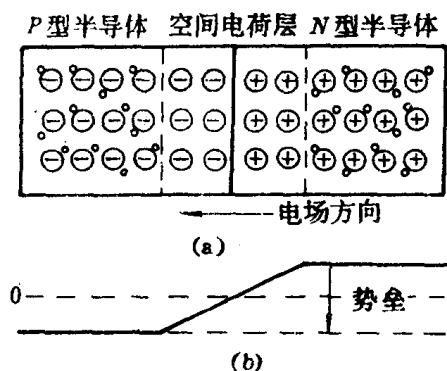


图 1.1.1 PN 结的示意图

(a) 平衡状态下的 PN 结; (b) 结电位分布

图中:⊖ 表示负离子; ⊕ 表示正离子

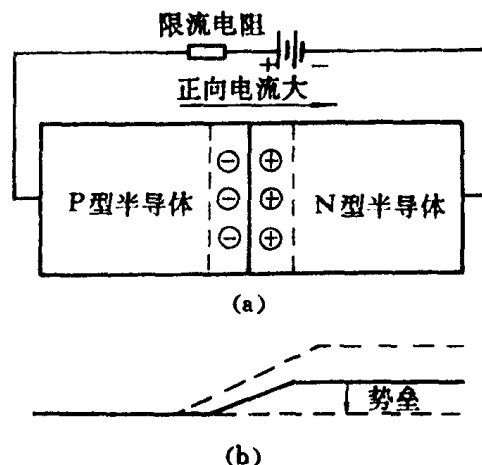


图 1.1.2 PN 结在外加正向电压时的情况

(a) PN 结外加正向电压,空间电荷层变窄;

(b) 电位分布

向 N 区中补充电子,维持它在电性能上保持中

性。同理,P 型半导体中性区内的多数载流子(空穴)要向右移动,亦要使空间电荷层的宽度和空间电荷量减小。于是,空间电荷层变窄,PN 结的势垒降低,如图 1.1.2(b) 中实线所示。因为 PN 结的势垒降低,所以 P 型半导体中的空穴(多子)就容易扩散到 N 型一边,N 型一边的电子(也是多子)也容易扩散到 P 型一边,也就是说,多子产生的扩散电流大大增加了。从而导致外电路中出现较大的电流。扩散电流的方向是从电源正端出发,经过限流电阻,再从 P 型半导体流向 N 型半导体,回到电源的负端。电源的这种接法称为正向接法。

由于 PN 结两边的少数子数量都很少,所以在正向偏置下漂移电流与扩散电流相比是很小的,可以忽略。

可见,加正向电压时,空间电荷层变薄,PN 结表现为低电阻,即导通状态。

图 1.1.3 表示 PN 结在外加反向电压的情况(也称反向偏置,简称反偏)。此时多数载流子将背离耗尽层,空间电荷量和耗尽层厚度都将增加,势垒高度也将增加,使多子的扩散电流被减弱,而漂移电流将占优势,于是这时通过 PN 结的电流将主要由漂移电流决定。它是由少数子组成的,少子的浓度很小,因此得到的电流远小于正向电流。电源的这种接法称为反向接法,产生的电流称为反向电流,它又称反向饱和电流。因为在温度不

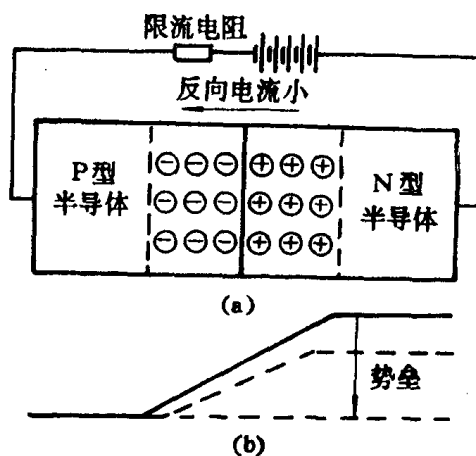


图 1.1.3 PN 结在外加反向电压时的情况

(a) PN 结外加反向电压,空间电荷层变宽;

(b) 电位分布

变时,少数载流子浓度不变,因此,反向电流几乎不随外加电压而变化^①。

可见,PN 结外加反向电压时,阻挡层变宽,势垒提高,反向电流很小,PN 结表现为高电阻,即截止状态。

因此,PN 结在正向电压作用下,表现为低电阻,在反向电压作用下,表现为高电阻,这就是 PN 结的单向导电性。

1.1.3 二极管的结构和类型

半导体二极管就是由一个 PN 结,再加上接触电极、引线,最后加以封装而成。按照它们的结构形式,可分为点接触型和面接触型两类。

一、点接触型二极管

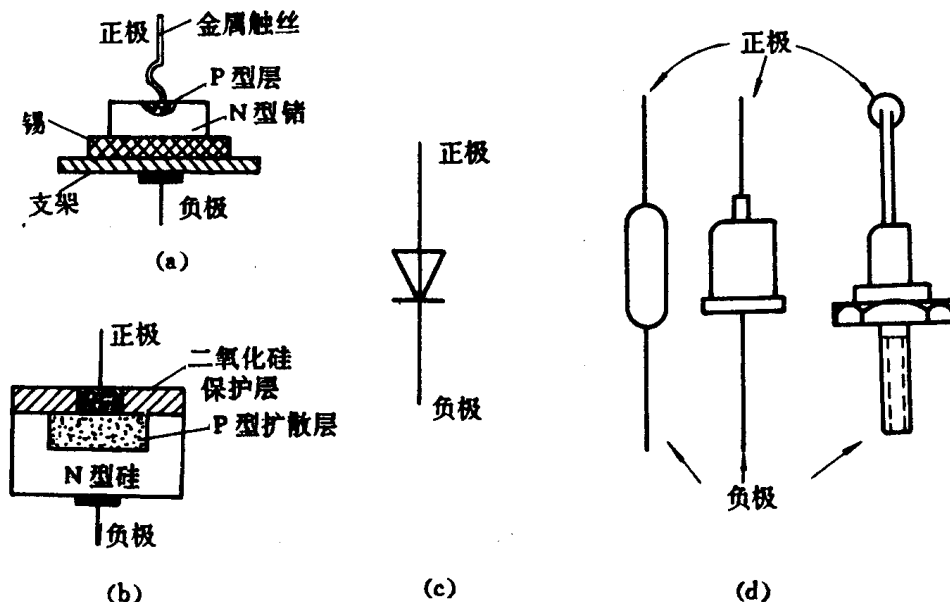


图 1.1.4 半导体二极管的结构示意图

(a) 点接触型; (b) 平面型; (c) 符号; (d) 外形

管芯结构如图 1.1.4(a) 所示。它是用一块 N 型锗或硅晶片上有一根金属丝靠弹性与它接触。制造时采用“电形成”工艺(在短暂时间内通过较大的电流),使触丝上的一部分金属原子转移到 N 型晶体片中去,从而在接触处形成一个 P 型区域,构成一个 PN 结。和触丝连接的引出线为正极,和晶片的锡底座连接的引出线为负极。它的特点是结的面积小,结电容小^②。适用于高频(几百兆赫)工作,但不能通过很大电流,常用作检波二极管。

二、平面型二极管

管芯结构如图 1.1.4(b) 所示。它是在一块 N 型硅片上经氧化生成一层二氧化硅(SiO_2),然后在需要形成 P 型硅的地方把二氧化硅腐蚀掉,将二氧化硅层开了一个“窗口”,以后就进行受主杂质的气态扩散,把“窗口”处的部分 N 型硅转变为 P 型硅,从而形成一个 PN 结。最后再加上接触电极与外壳,即成二极管。这种结构属于面接触型。

它的特点是结面积大,允许通过的正向电流可比点接触型大得多。常被用作整流管。

^① 这里是指外加反向电压小于 PN 结反向击穿电压而言,若外加反向电压等于或大于 PN 结反向击穿电压,则反向电流随外加反向电压的增加而急剧增大,详见 1.1.5 节。

^② 有关结电容概念,见 1.1.5 节。

半导体管的型号命名法,参看附录 1.1。

二极管的符号和外形如图 1.1.4(c) 和(d) 所示。

1.1.4 二极管的伏安特性

二极管的管压降 U_D 与其电流 i_D 之间的关系称为伏安特性。二极管的伏安特性可从半导体手册或制造厂的产品目录中查得,也可用图示仪(JT-1) 直接测出其伏安特性曲线。

根据理论分析,二极管的电流 i_D 与管压降 u_D 的关系可由下式表示:

$$i_D = I_s (e^{\frac{q u_D}{kT}} - 1) = I_s (e^{u_D/U_T} - 1) \quad (1.1.1)$$

式中 q 是电子的电荷量,等于 $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$;

T 是热力学温度,单位是 K;

k 是一个常数,等于 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$;

I_s 是反向饱和电流,它与 PN 结的结构和制造工艺等有关,与外加电压无关。当 PN 结制成后,它基本上只与温度有关;

$U_T = kT/q$, 为温度的电压当量。在热力学温度 300K 时, $U_T \approx 26 \text{mV}$ 。

当 u_D 比 U_T 大,满足 $e^{\frac{u_D}{U_T}} \gg 1$ 时,式(1.1.1) 可近似为

$$i_D = I_s (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1) \approx I_s e^{\frac{u_D}{U_T}} \quad (1.1.2)$$

当 u_D 为负值,且满足 $e^{\frac{u_D}{U_T}} \ll 1$ 时,则

$$i_D = I_s (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1) \approx -I_s$$

事实上,只要 $u_D \geq 100 \text{mV}$, 此时 $e^{\frac{u_D}{U_T}} \approx e^4 \approx 54.6$, 就可认为 $i_D \approx I_s e^{\frac{u_D}{U_T}}$ 。同理,只要 $u_D \leq -100 \text{mV}$, 就可认为 $i_D \approx -I_s$ 。

图 1.1.5 和图 1.1.6 为 2AP7 和 2CP33B 型二极管的伏安特性曲线。从伏安特性曲线上可以看出:

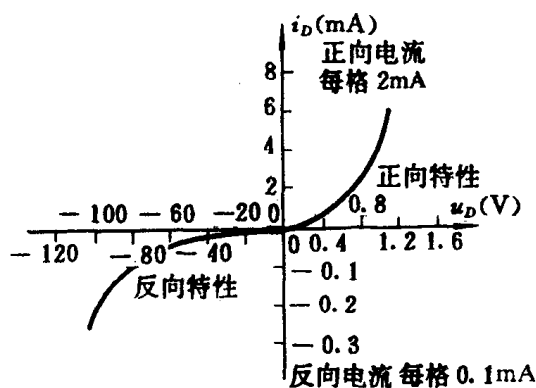


图 1.1.5 2AP7 型锗二极管的伏安特性曲线

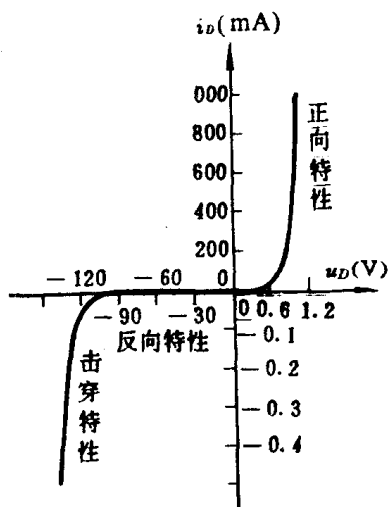


图 1.1.6 2CP33B 型硅二极管的典型伏安特性曲线

一、单向导电性

伏安特性曲线是非线性的,反映在正偏和反偏时的导电性能有很大差异,这就是前述的单向导电性。此外,即使都是正偏或都是反偏,但在不同的电压下,管子的等效直流电阻(管子两端间的直流电压与相应的直流电流之比)也是变化的。例如图 1.1.5 中,当正向电压为 0.4V

时,电流约为 0.5mA,故正向直流电阻为 $\frac{0.4}{0.5 \times 10^{-3}} = 800\Omega$;当正向电压为 1V 时,电流约为 4mA,正向电阻降到 250Ω ;当反向电压为 80V 时,反向电流约为 0.1mA,则反向直流电阻为 $800k\Omega$ 。可见,在二极管电路中,二极管两端的电阻是随管两端的电压而变化的。

二、正向特性

1. 在锗管和硅管的正向特性曲线中可见,外加正向电压很低时,正向电流几乎为零。只有当外加电压超过某一数值(对锗管讲,这一数值为 0.1V 左右;硅管为 0.5V 左右),才有明显的正向电流。这个电压称为死区电压。在死区电压内,外电场还不足以克服内建场,多子的扩散运动不显著,所以电流很小。

2. 在正向电流较大时,正向特性几乎是一直线,其电压增量 ΔU_D 与电流增量 ΔI_D 之比(即二极管交流电阻^①)接近于一个常数。这是因为电流较大时,对应的 PN 结的等效结电阻^②(即 PN 结两端电压与通过其电流的比值)较小,故此时二极管的交流电阻主要决定于结外 P 区和 N 区的体电阻、电极的接触电阻以及引线中的电阻等。这些电阻当二极管制成后,其阻值是一定的,与工作电流无关。

三、反向特性

由图 1.1.5 和 1.1.6 可见,当反向电压较低时,不论硅管与锗管,在常温下其反向电流均很小。小功率硅管的反向饱和电流 $I_s < 0.1\mu A$,锗管通常为几十到几百微安之间。面接触型硅管,在反向电压小于反向击穿电压的范围内,反向电流几乎不随反向电压而变。这是因为反向电流是由少子的漂移运动造成的,然而少子的浓度又很小,且它只取决于温度,而与外加电压无关,所以反向电流不随反向电压而增加。在这个范围内,电压增加而电流几乎维持不变,因此等效的反向直流电阻是随电压的升高而增大的。

但是当反向电压继续升高,超过某一特定的电压值时,例如在图 1.1.6 中超出 120V 时,反向电流将急剧地增大,这种现象叫做击穿。当发生击穿时,管子的反向直流电阻随着反向电流的增高而急剧下降。

二极管击穿后,若二极管回路中限流电阻能将反向电流限制在容许的范围内,则 PN 结不会损坏。当反向电压降低后,管子仍可以恢复到原来的状态,这就是电击穿,其过程是可逆的。但如果在电源回路中无限流电阻或限流电阻太小,则反向电流将增至很大,反向电流在 PN 结中所形成的结温(即 PN 结的温度,它与加在它上面的反向电压及反向电流的乘积成正比)将上升,当结温超过 PN 结允许的结温(硅管允许结温约为 $150 \sim 200^\circ C$,锗管约为 $75 \sim 100^\circ C$)时,PN 结将被烧毁,这就是热击穿,其过程是不可逆的。

1.1.5 二极管的主要电参数^③

二极管的参数一般可以从晶体管手册中查到,也可以从特性曲线上求出,或由直接测量得到。

现将二极管主要电参数的意义介绍如下:

一、最高反向工作电压 U_{DR} (峰值)

在 1.1.4 节中已经讲到:当加在管子上的反向电压等于或大于管子的反向击穿电压时,反

① 一般均定义 $r_d = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D}$ 为二极管的交流电阻,详见 1.1.5 节。

② PN 结等效结电阻,是一非线性电阻,其阻值与工作电流有关。

③ 有关二极管各种电参数的测试方法,可参阅原四机部(现为机电部)部标 SJ189 ~ 196-65 硅整流二极管测试方法。

向电流剧增,此时二极管电路中若无限流电阻,管子将会因流过管子的反向电流过大,使管子温度很快升高到超过允许结温而损坏。为确保管子安全工作,一般以管子击穿电压值的一半,定义为最高反向工作电压。

二、反向电流 I_{DR}

是指在室温条件下管子加上规定反向工作电压(由手册上给出)时,流经管子的电流。反向电流愈小,管子的单向导电性越好。

三、额定整流电流 I_{DF} (平均值)

是指管子应用于半波纯电阻负载的整流电路中,长期运行时所允许通过的正向电流的平均值,它由 PN 结的面积和散热条件决定。使用时,应注意通过二极管的平均电流值不能大于这个数值,否则将会使二极管中 PN 结的结温超过允许值而损坏。

四、正向压降 U_{DF} (平均值)

整流二极管的正向压降 U_{DF} ,是指用二极管组成半波整流电路,通过二极管的电流为额定整流电流时,在二极管两端所测得的正向压降平均值。而检波和开关二极管的正向压降 U_{DF} ,则是指通过二极管的直流电流(由恒流源提供)为规定值时,在极间产生的压降。^①

当管子应用于交流电路时,还应考虑到它的交流参数。管子的交流电阻就是一种交流参数,现介绍如下:

五、交流电阻 r_d

交流电阻,相当于 1.1.4 节所介绍的二极管伏安特性曲线斜率的倒数。从图 1.1.7 的伏安特性中可见,当管子工作在图中的 Q 点时,管子的压降为 U_{DQ} ,电流为 I_{DQ} ,这个 Q 点称为管子的直流工作点。如果在此基础上, u_D 有微小的变化量 Δu_D ,则 i_D 变化 Δi_D ,如图 1.1.7 所示。或者在 U_{DQ} 上叠加有一微小的交流电压 u_d ,则电流 i_D 将产生一交流分量的电流 i_d 。由此可得工作点 Q 的交流电阻 r_d 为

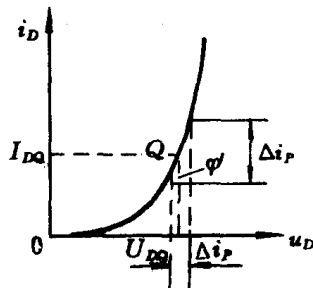


图 1.1.7 交流电阻的几何意义

$$r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} = \frac{u_d}{i_d}$$

由图 1.1.7 还可看出, r_d 的大小是随工作点 Q 的电流增大而减小的。小功率二极管的 r_d 一般为几欧到几十欧之间。

r_d 数值还可从式(1.1.1)中导出,在(1.1.1)中取 i_D 对 u_D 的微分可得

$$g_d = \frac{di_D}{du_D} = \frac{d}{du_D} [I_s (e^{u_D/U_T} - 1)] = \frac{I_{DQ}}{U_T}$$

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{du_D}{di_D} = \frac{U_T}{I_{DQ}}, \quad U_T \approx 26\text{mA} \quad (1.1.3)$$

此外,二极管的交流参数还有势垒电容、扩散电容以及由这些电容决定的二极管的最高工作频率等,这些参数在后面各章中用到时再作介绍。

1.1.6 温度对二极管参数的影响

图 1.1.8(a) 和 (b) 中分别绘出了 2CP48 型硅二极管在两种温度(25℃ 和 100℃)时的正向和反向伏安特性。

① 详见原四机部(现为机电部)部标 SJ170 ~ 180-77 检波和开关二极管测试方法。

从图 1.1.8(a) 中可以看出温度对二极管正向特性的影响。在同样的电流下, 温度每升高 1°C , 二极管的正向压降将减少 $2 \sim 2.5\text{mV}$ 。这就是说二极管的正向特性曲线, 将随温度升高而向左移。这个规律对锗管、硅管都适用。

从图 1.1.8(b)①中可以看出温度对二极管反向特性的影响。当温度为 25°C 时, 反向电流约为百分之几微安; 而当温度升高到 100°C 时, 则反向电流将增到几微安; 增加约一百多倍。一般只要温度升高 10°C 左右, 就会使反向饱和电流增加一倍。设温度为 T_0 时, 反向饱和电流为 $I_{s(T_0)}$, 则当温度升高为 T 时, 其反向饱和电流 $I_{s(T)}$ 近似地为

$$I_{s(T)} \approx I_{s(T_0)} 2^{(T-T_0)/10} \quad (1.1.4)$$

1.2 特种二极管

1.2.1 硅稳压管

硅稳压管的正向伏安特性曲线和硅二极管一样, 只是它比硅二极管具有更陡的反向安特性曲线击穿特性, 硅稳压管通常都是工作在反向电击穿区, 如图 1.2.1 所示。同时在其稳压电路②中, 一般都串有限流电阻 R_z , 来保证管子的耗散功率 ($U_z I_z$) 不超过允许的最大耗散功率, 以免损坏管子。稳压管的符号如图 1.2.2(a) 所示, 它和普通的二极管符号略有不同, 以示二者作用上

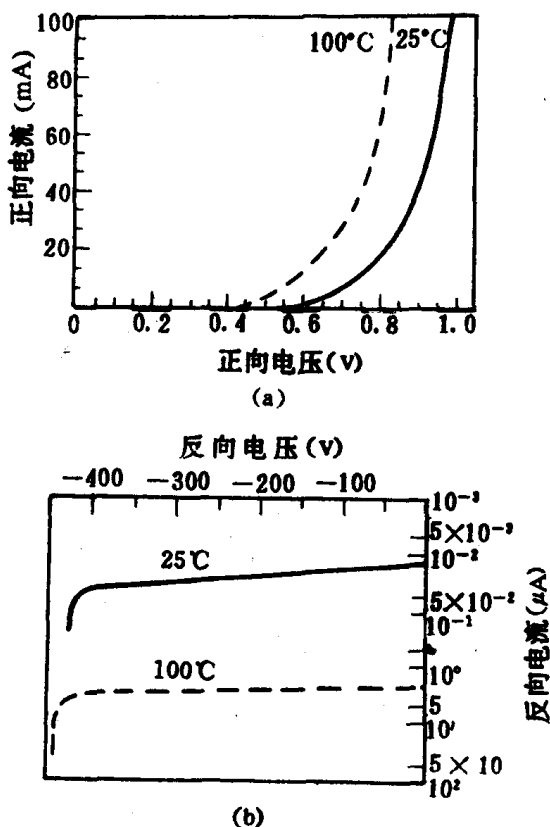


图 1.1.8 在不同温度下的二极管正向和反向伏安特性

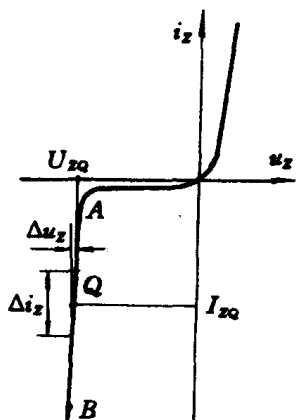


图 1.2.1 硅稳压管的伏安特性

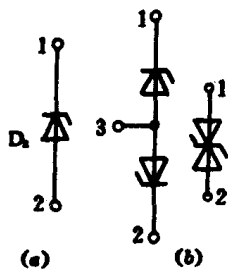


图 1.2.2 稳压管的符号

(a) 稳压管符号; (b) 具有温度系数补偿作用的硅稳压管符号

① 此图中的反向电流坐标, 采用对数关系的标尺, 使电流变化成千上万倍时, 仍可表达出来。
② 有关硅稳压管的稳压电路, 在第 10 章中再叙述。

稳压管的几个主要参数:

一、稳定电压 U_{ZQ}

当通过稳压管的电流为规定的测试电流 I_{ZQ} 时,在稳压管两端测得的电压称为稳定电压,记作 U_{ZQ} 。它相当于图 1.2.1 中 Q 点处的电压。

二、交流电阻(亦称动态电阻) r_z

在稳定范围内,稳压管两端的电压变化量与通过稳压管的电流变化量之比称为交流电阻,记作 r_z 。显然, r_z 和 AB 段的斜率有关,斜率越大 r_z 就越小,稳压性能越好。如图中 Q 点的 r_z 为

$$r_z = \frac{\text{电压变化量}}{\text{电流变化量}} = \frac{\Delta u_z}{\Delta i_z}$$

实际上 AB 一段不是一条直线,因此,各点的斜率不同,即动态电阻和工作电流有关。

图 1.2.3 所示为稳压管的动态等效电路,图中二极管为理想二极管。所谓理想二极管,即指加上正向偏置,管子导通时正向压降为零;当加反向偏置,管子截止时,反向电流为零的二极管,用空心三角形表示,以区别于实际二极管。图中 $U_{ZO} = U_{ZQ} - I_{ZQ} \cdot r_z$ 为稳压管伏安特性折线化后的转折电压。

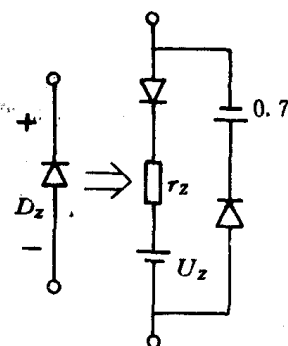


图 1.2.3 稳压管等效电路

三、稳定电压的温度系数 ρ

当通过稳压管中的电流等于测试电流 I_{ZQ} 时,环境温度改变 1°C 稳定电压变化的百分比称为稳定电压的温度系数,即 $\rho = \frac{\Delta U_z}{U_z \cdot \Delta T}$ 。

例如 2CW17 的电压温度系数为 $+0.09\% / ^\circ\text{C}$ 。若 $U_z = 10\text{V}$,则环境温度升高 1°C 时,稳定电压将增加 $0.09\% \times 10 = 0.009\text{V} = 9\text{mV}$ 。

需要注意的是:不同型号的稳压管有不同的稳定电压的温度系数,温度系数有正有负。大致的分界线是:稳定电压低于 4V 的稳压管,稳定电压的温度系数为负值;稳定电压高于 6V 的稳压管,稳定电压的温度系数为正值。而稳定电压在 4V 到 6V 之间的稳压管,稳定电压的温度系数有可能为正,也有可能为负。

为了获得温度系数为零的稳压元件,可将两个温度系数符号相反的稳压管串联使用,以便互相补偿温度的影响。这时总的稳定电压为两者之和。此外,由于二极管正向偏置时的管压降温度系数为负,因此,若将两个反向工作时温度系数为正的稳压管,接成如图 1.2.2(b) 所示,则亦可获得补偿温度系数的作用。此时虽然两个稳压管的温度系数均为正的,但若以 1、2 两端作为一个稳压管使用时,则始终有一只稳压管是正向接法(相当于一个普通二极管),故能以其正向压降的负温度系数来补偿另一个稳压管的正温度系数,使在 1、2 两端间的电压降几乎不受温度变化的影响。2DW7 型稳压管即属于此类。

四、最大耗散功率 P_M

最大耗散功率即管子允许的最大损耗功率,记作 P_M

$$P_M = U_z \cdot I_{zM}$$

式中: I_{zM} 为最大稳定电流。

1.2.2 发光二极管

二极管的正向偏置时,载流子越过结后有些就复合,每一复合的晶格上发射一粒光子。■