

模拟电子技术

常桂兰 王丹利 任桂兰 主编



数据电子技术

第1章 数据电子技术



高职高专计算机系列教材

模拟电子技术

常桂兰 王丹利 任桂兰 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本教材汲取了近几年各院校在教学过程中以及探索培养技术应用人才方面取得的成功经验,减少繁琐理论推导,注重结论与实践的应用,以培养能力为主,实际应用为原则,更好地贴近岗位需要。本书共分9章,内容包括半导体二极管、半导体三极管及其基本放大电路、功率放大器、集成运算放大器、负反馈放大电路、线性集成运算放大器的应用和模拟乘法器、有源滤波器及放大电路的频率特性、信号发生电路、直流稳压电源。为方便教学,各章均有小结和练习题。书后有部分习题答案供学生与自学者参考。

本书可作为高职高专电气、电子、自动化、通信信息、计算机、汽车电气和机电一体化等专业技术基础课教材,也可以作为职工大学、业余大学等的同类专业基础课教材,也可供有关技术人员自学与参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/常桂兰,王丹利,任桂兰主编. —北京:中国铁道出版社,2005.5(2006.12重印)
(高职高专计算机系列教材)

ISBN 7-113-06530-9

I. 模… II. ①常…②王…③任… III. 模拟电路-电子技术-高等学校:技术学校-教材 IV. TN710
中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第056479号

书 名: 模拟电子技术

作 者: 常桂兰 王丹利 任桂兰

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑: 严晓舟 商其坤

责任编辑: 苏 茜 崔晓静 黄园园

封面制作: 白 雪

印 刷: 北京新魏印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.75 字数: 403千

版 本: 2005年6月第1版 2006年12月第2次印刷

印 数: 5 001~7 000册

书 号: ISBN 7-113-06530-9/TP·1498

定 价: 23.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社计算机图书批销部调换。

高职高专计算机系列教材

编 委 会

主 任：汪燮华

副主任：陶 霖 陆 虹

编 委：（以姓氏拼音排序）

常桂兰	陈志毅	崔俊杰	韩田君
矫桂娥	李 斌	刘鸿基	刘 敏
刘 燕	刘中原	陆惠茜	聂青林
秦 川	王淑英	王 晴	吴慧萍
熊发涯	徐方勤	赵俊兰	周天亮

前 言

本书是在贯彻执行教育部《高职高专教育专业人才培养目标及规划》的教改中,积累了丰富的教学改革与实践的经验,根据高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求而编写的。本书可以作为高职高专电气、电子、自动化、通信信息、计算机、汽车电气、机电一体化等的专业技术基础课教材,也可供从事电子技术的工程技术人员自学与参考。

为适合高职高专培养目标及现代科学技术的发展需求,本书以现代电子技术的基本知识与基本理论为主线,以应用为目的,删繁就简,实践性强。在内容安排上,以岗位需求和培养学生工作能力为目的,重在理论的应用性,并在附录中引入计算机仿真技术,供学生做仿真训练实验。各章后均有小结和练习题,书后有部分习题答案,便于学生复习和自学。

本书共分9章,第1章半导体二极管,介绍二极管的结构与特性,主要讲解二极管的应用;第2章半导体三极管及其基本放大电路,介绍三极管的结构及工作特性,主要讲解三极管的放大原理,以及由三极管组成的基本放大电路;第3章功率放大电路,主要讲解应用较多的互补对称功率放大器,并介绍集成功放的典型应用;第4章集成运算放大器,主要介绍集成运放的组成及其特性;第5章负反馈放大电路,着重介绍反馈的概念与分类及负反馈对放大电路的影响;第6章线性集成运算放大器的应用和模拟乘法器,重点介绍线性集成运算放大器的应用,模拟乘法器可以作为选讲内容;第7章有源滤波器及放大电路的频率特性,着重讲解滤波器的概念,理解放大器的频率特性;第8章信号发生电路,重点介绍正弦波、方波振荡电路,并介绍应用较广泛的锁相环电路;第9章直流稳压电源,着重介绍三端集成稳压器及其应用和开关电源的工作原理及应用。各章内容的取舍可根据专业不同灵活选择。本教材参考学时为60~70学时。

本书由常桂兰编写第1、2章,赵琳编写第3章,吴建军编写第4章,杜文杰编写第5章,任桂兰主持了第4、5章的编写工作,闫兵编写第6、7章及附录B,王丹利编写第8、9章及附录C,林春丽编写附录A。天津滨海职业技术学院任志娟参加了编写工作,全书由辽宁省2004年精品课主讲人常桂兰统稿。

本书在编写过程中,得到了鞍山科技大学、辽宁机电职业技术学院、辽宁石油化工大学、沈阳师范大学等院校的有关领导和同行的帮助与支持,并提出了许多宝贵意见,另外,本书还得到中国铁道出版社的支持与帮助,在此一并表示感谢。

尽管我们在编写过程中做了许多努力,但由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免会有不妥之处,敬请广大师生和读者给予批评指正。

编 者

2005年5月

目 录

第 1 章 半导体二极管.....	1
1-1 半导体的基础知识.....	1
1-1-1 本征半导体.....	1
1-1-2 杂质半导体.....	2
1-1-3 PN 结及其特性.....	3
1-2 半导体二极管的结构及特性.....	5
1-2-1 半导体二极管的结构和类型.....	5
1-2-2 二极管的伏安特性.....	5
1-2-3 二极管的主要参数.....	7
1-3 二极管电路的分析方法.....	8
1-3-1 理想二极管及二极管特性的折线近似.....	8
1-3-2 二极管电路的图解法和解析法.....	9
1-3-3 二极管应用电路.....	12
1-4 特殊二极管.....	14
1-4-1 稳压二极管.....	14
1-4-2 发光二极管 (LED).....	16
1-4-3 光电二极管.....	17
1-4-4 变容二极管.....	17
本章小结.....	18
练习 1.....	18
动手做: 简单实用的功率控制电路.....	22
第 2 章 半导体三极管及其基本放大电路.....	23
2-1 双极型半导体三极管.....	23
2-1-1 三极管的结构及工作原理.....	23
2-1-2 三极管特性曲线.....	26
2-1-3 三极管主要参数.....	27
2-2 共发射极基本放大电路.....	29
2-3 共集电极放大电路和共基极放大电路.....	45
2-3-1 共集电极放大电路.....	45
2-3-2 共基极放大电路.....	47
2-4 多级放大电路.....	48
2-4-1 多级放大电路的组成.....	48
2-4-2 多级放大电路的分析方法.....	49
2-5 特殊三极管.....	51
2-6 场效应管及其基本放大电路.....	52

2-6-1 结型场效应管	53
2-6-2 绝缘栅型场效应管	54
2-6-3 场效应管基本放大电路	59
本章小结	61
练习 2	61
实用资料: 最新常用三极管的型号和参数	67
第 3 章 功率放大电路	68
3-1 乙类互补对称功率放大器	68
3-1-1 功率放大器的主要特点及工作状态	68
3-1-2 双电源乙类互补对称功率放大器工作原理及计算	70
3-2 甲乙类互补对称功率放大器	71
3-2-1 双电源甲乙类互补对称功率放大器的特点及工作原理	71
3-2-2 复合管互补对称功率放大电路	72
3-2-3 单电源互补对称功率放大器	74
3-2-4 集成功率放大器的典型应用	75
*3-3 功放管散热问题	77
本章小结	78
练习 3	79
第 4 章 集成运算放大器	81
4-1 差动式放大电路	81
4-1-1 差动放大电路的工作原理	81
4-1-2 具有电流源的差动放大电路	85
4-1-3 差动放大器的输入输出方式	89
4-2 通用型集成运算放大器的组成及其基本特性	90
4-2-1 集成电路的特点	90
4-2-2 通用型集成运算放大器内部电路简介	91
4-2-3 集成运算放大器电路符号及其理想化条件	92
4-2-4 集成放大器的主要参数	94
本章小结	95
练习 4	95
第 5 章 负反馈放大电路	98
5-1 反馈的基本概念与分类	98
5-2 负反馈放大电路介绍	99
5-2-1 负反馈放大电路基本类型	99
5-2-2 负反馈放大电路的框图	101
5-2-3 负反馈的一般表达式	102
5-2-4 负反馈对放大电路性能的影响	102

5-3 深度负反馈放大电路的分析方法	106
本章小结	109
练习 5	110
第 6 章 线性集成运算放大器的应用和模拟乘法器	112
6-1 基本运算电路	112
6-1-1 比例运算电路	112
6-1-2 反相加法运算电路	115
6-1-3 减法运算电路	116
6-1-4 微分运算电路和积分运算电路	119
6-2 电压电流变换器	121
6-3 电压比较器	122
6-3-1 单值比较器	122
6-3-2 滞回比较器	125
6-3-3 窗口比较器	127
6-4 乘法器	129
6-4-1 乘法器的原理	129
6-4-2 乘法器的应用举例	130
本章小结	133
练习 6	133
第 7 章 有源滤波器及放大电路的频率特性	138
7-1 放大电路的频率特性	138
7-1-1 频率特性的基本概念	138
7-1-2 RC 电路的频率特性	140
7-1-3 三极管共射电路的频率特性	145
7-1-4 单级阻容耦合放大电路的频率特性	146
7-1-5 多级放大电路的频率特性	148
7-2 有源滤波电路	149
7-2-1 滤波概念	149
7-2-2 一阶有源滤波电路	150
7-2-3 二阶有源滤波电路	152
7-2-4 带通、带阻有源滤波电路	154
本章小结	155
练习 7	155
第 8 章 信号发生电路	158
8-1 正弦波振荡电路	158
8-1-1 正弦波振荡电路的振荡条件与分类	158
8-1-2 RC 正弦波振荡电路	160

8-1-3	LC 正弦波振荡电路.....	163
8-1-4	石英晶体振荡器.....	167
8-2	非正弦波振荡电路.....	169
8-2-1	方波信号发生器.....	169
8-2-2	三角波信号发生器.....	170
8-2-3	锯齿波信号发生器.....	172
8-2-4	用集成时基电路 555 构成的矩形波信号发生器.....	172
8-2-5	5G8038 多种函数信号发生集成电路.....	174
8-3	锁相环技术及其应用.....	176
8-3-1	锁相环电路.....	176
8-3-2	频率合成器.....	177
8-3-3	压控方波信号发生器.....	179
	本章小结.....	180
	练习 8.....	180
第 9 章	直流稳压电源.....	185
9-1	单相整流滤波电路.....	185
9-1-1	单相整流电路.....	185
9-1-2	滤波电路.....	187
9-2	线性集成稳压器.....	190
9-2-1	串联调整型直流稳压电源.....	191
9-2-2	三端固定输出式集成稳压器.....	194
9-2-3	三端可调输出式集成稳压器.....	196
9-2-4	低压差三端集成稳压器.....	196
9-3	开关型直流稳压电源.....	199
9-3-1	开关型稳压电源的组成与特点.....	199
9-3-2	并联型开关稳压电源.....	201
9-3-3	串联型开关稳压电源.....	202
9-3-4	开关变压器型稳压电源.....	204
9-4	集成式开关稳压电源电路.....	208
9-4-1	由集成式开关稳压电路 MC3520 构成的开关电源.....	208
9-4-2	由集成式开关稳压电路 UC3842 构成的开关电源.....	209
9-4-3	实际开关稳压电源电路分析.....	212
	本章小结.....	215
	练习 9.....	216
	动手做: 方便实用的充电/稳压两用电源.....	219
附录 A	电阻器、电容器使用知识.....	221
A-1	电阻器.....	221
A-2	电容器.....	228

附录 B 电子设计自动化软件的应用电路仿真系统.....	235
B-1 概述.....	235
B-2 Electronics Workbench 基本操作	235
B-3 模式和参数设置.....	245
附录 C 模拟电子电路图	251
部分练习题答案.....	253
参考文献	257

第 1 章 半导体二极管

由于半导体器件具有体积小、质量轻、使用寿命长、输入功率小和转换效率高等优点，因而在现代电子技术中得到广泛的应用，半导体器件是组成电子电路的重要元件，有半导体二极管、双极型三极管、场效应管和半导体集成电路等。半导体二极管是最简单的半导体器件，它用半导体材料制成，其主要特性是单向导电性。

本章将介绍半导体的基本知识和半导体二极管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数等，为学习后续内容提供必要的基础知识。最后在实训中提高实践应用能力。

1-1 半导体的基础知识

在自然界中存在着导体、绝缘体和半导体。容易传导电流的物质称为导体。金属一般是导体，如铜、铝、银等。几乎不传导电流的物质称为绝缘体。例如：橡皮、陶瓷、塑料、石英和云母等。而导电性能介于导体和半导体之间的物质称为半导体。属于半导体的物质很多，用来制造半导体器件的材料主要是硅（Si）、锗（Ge）和砷化镓（GaAs）等，硅的使用较为广泛。

1-1-1 本征半导体

所谓本征半导体是指纯净的半导体。硅、锗都是四价元素，其原子核最外层有四个价电子。它们的晶体为共价键结构，如图 1-1 所示。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。在温度升高或光照下，少数价电子可以获得足够的能量来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重新结合而成对消失，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度一定。

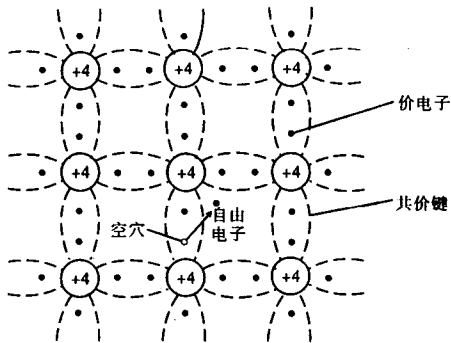


图 1-1 硅和锗的原子结构及本征激发示意图

在电场作用下，自由电子和空穴将做定向运动，这种运动称为漂移，所形成的电流叫做漂移电流。自由电子又叫电子载流子，空穴又叫空穴载流子。因此，半导体中有自由电子和空穴两种载流子参与导电，分别形成电子电流和空穴电流，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。但当温度升高时，半导体中的载流子浓度按指数规律增加。因此，半导体的导电能力将随温度的增加而显著增强，这是半导体的一个重要特性。

1-1-2 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或掺杂半导体。按掺入杂质的不同有 N 型半导体和 P 型半导体之分。

如果在纯净半导体中掺入微量的三价元素，如硼（B）等，由于硼原子比半导体原子少一个价电子，所以在形成共价键时，就产生了一个空穴，因此掺入微量的三价元素后，就会使半导体中的空穴浓度大大增加，半导体的导电能力明显提高。这种空穴（多数载流子，简称多子）浓度高于电子（少数载流子，简称少子）浓度，主要靠空穴导电的半导体称为 P 型半导体。反之，如果在纯净半导体中掺入微量的五价元素，如磷（P）等，由于磷原子比半导体原子多一个价电子，所以在形成共价键时，就会产生一个自由电子，因此掺入微量的五价元素后，就会在半导体中产生许多自由电子。这种多子为自由电子、少子为空穴、主要靠电子导电的半导体称为 N 型半导体。P 型半导体和 N 型半导体的结构如图 1-2、图 1-3 所示。

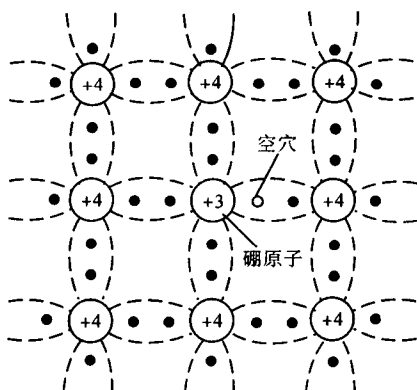


图 1-2 P 型半导体晶体结构

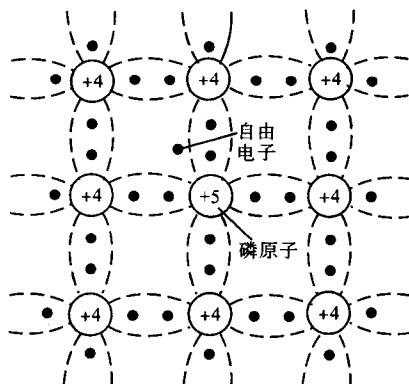


图 1-3 N 型半导体晶体结构

无论是 P 型半导体还是 N 型半导体，多数载流子的浓度主要由掺入杂质的多少控制，少数载流子的浓度主要由本征激发决定，如图 1-4 所示。但整个半导体中的正负电荷数量始终是相等的、是呈电中性的。

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。

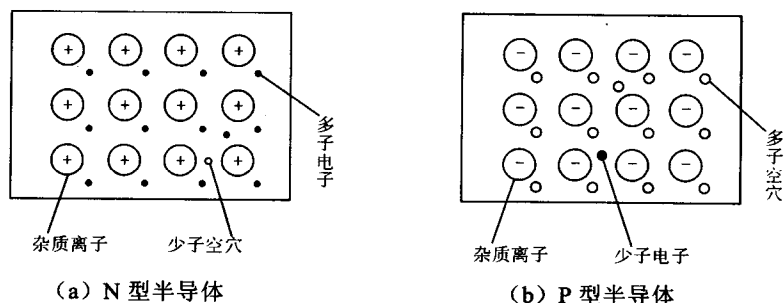


图 1-4 杂质半导体中的载流子和离子

1-1-3 PN 结及其特性

1. PN 结的形成

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。由于 P 型半导体和 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，这种运动称为扩散，如图 1-5 (a) 所示。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 1-5 (b) 所示。

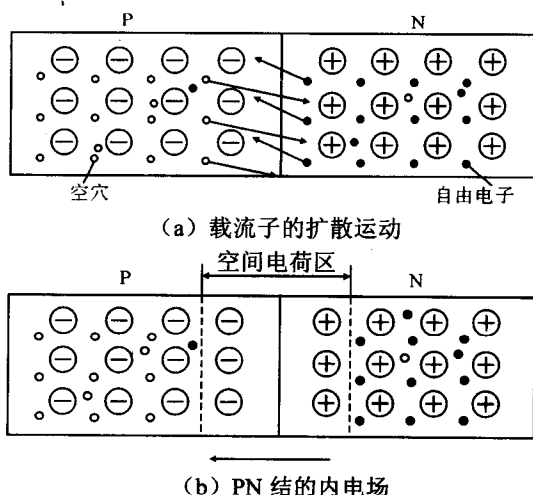


图 1-5 PN 结的形成

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。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 结内电场的电位称为内建电位差，其数值一般为零点几伏，室温时，硅材料 PN 结的内建电位差为 0.5~0.7V，锗材料 PN 结的内建电位差为 0.2~0.3V。

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 结的单向导电性

(1) PN 结外加正向电压

通常我们将外加在 PN 结上的电压称为偏置电压。如果 PN 结的 P 区电位高于 N 区电位，称为正向偏置，简称正偏。

当 PN 结正偏时，外加电场与内电场方向相反，使空间电荷区变窄，所以多子的扩散

运动增强,形成较大的扩散电流,其方向由P区流向N区,称为正向电流 I_F 。在一定范围内,外加正向电压 U_F 越大,正向电流 I_F 越大,PN结呈低阻导通状态。在PN结作开关使用时,相当于开关的闭合。

为了限制过大的 I_F ,回路中串联了限流电阻 R ,如图1-6(a)所示。

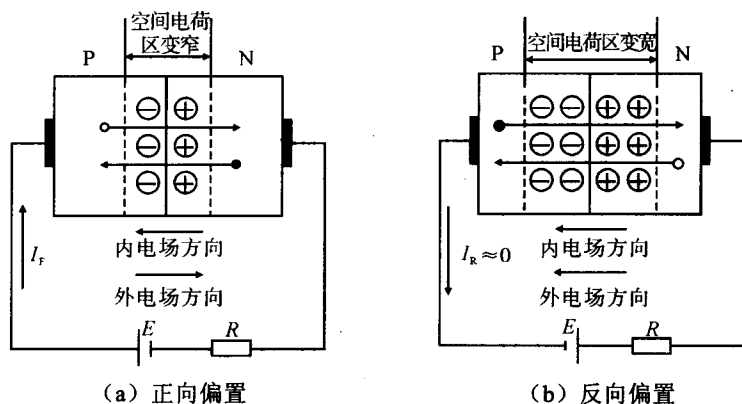


图 1-6 PN 结的单向导电性

(2) PN 结外加反向电压

如果PN结的P区电位低于N区电位,称为反向偏置,简称反偏。当PN结反偏时,外加电场与内电场方向相同,使空间电荷区变宽,所以多子的扩散运动受到抑制,这时流过PN结的电流,主要是少子形成的漂移电流,其方向由N区流向P区,称为反向电流 I_R 。

当温度一定时,少数载流子的浓度不变,因此 I_R 的大小几乎不随外加电压而变化。所以,又称为反向饱和电流。在常温下,反向饱和电流很小,一般可以忽略。此时PN结呈高阻截止状态,相当于开关的断开,如图1-6(b)所示。

PN结在正偏时,呈导通状态;PN结在反偏时,呈截止状态。所以PN结具有单向导电性。

应当注意的是当反向电压超过一定数值时,PN结将发生反向击穿。此时,反向电流将急剧增大,单向导电性被破坏。

3. PN 结的结电容

PN结还具有一定的电容效应。PN结的结电容包括势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 两部分。

势垒电容是由空间电荷区引起的。当外加电压变化时,空间电荷区的宽度随之变化,空间电荷区中的电荷也相应改变。这样电荷量随外加电压变化而变化时,就形成了电容效应,称为势垒电容,用 C_b 表示。

扩散电容 C_d 是由多数载流子扩散引起的。当PN结正偏时,多子扩散过PN结,且在PN结的边缘处形成一定的电荷积累。当正向电压增大时,电荷积累增加;反之,电荷积累减少。这种效应,可用扩散电容 C_d 来描述。

当PN结正偏时,扩散电容效应远大于势垒电容效应;当PN结反偏时,势垒电容效应远大于扩散电容效应。

PN结的结电容是非线性电容。其大小随外加电压的变化而变化。

PN结的结电容数值较小,其电容效应对低频电路影响不大,但对高频电路必须考虑其影响。

1-2 半导体二极管的结构及特性

1-2-1 半导体二极管的结构和类型

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，简称二极管，如图 1-7 (a) 所示，其图形符号如图 1-7 (b) 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），图形符号中的箭头方向表示正向电流的流通方向。

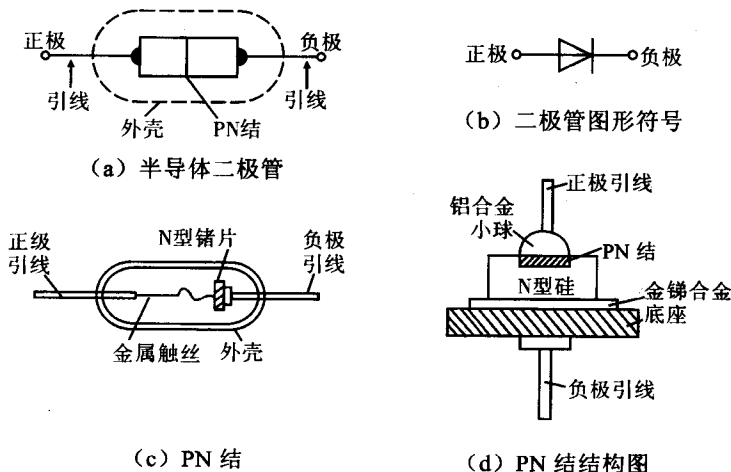


图 1-7 二极管结构与符号

按 PN 结面积的大小，二极管可分为点接触型和面接触型两类。点接触型二极管是由一根很细的金属触丝（如三价元素铝）和一块 N 型半导体（如锗）的表面接触，然后在正方向通过很大的瞬时电流，使触丝和半导体牢固地熔接在一起，三价金属与锗结合构成 PN 结，如图 1-7 (c) 所示。由于点接触型二极管金属丝很细，形成的 PN 结面积很小，所以它不能承受大的电流和高的反向电压，由于极间电容很小，所以这类二极管适用于高频电路，例如，2AP1 是点接触型锗二极管，其最大整流电流为 16mA，最高工作频率为 150MHz，但最高反向工作电压只有 20V。

面接触型或称面结型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法做成的，其结构如图 1-7 (d) 所示。由于这种二极管的 PN 结面积大，可承受较大的电流，但极间电容较大，所以这类器件适用于低频电路，主要用于整流电路。例如，2CZ53C 为面接触型硅二极管，其最大整流电流为 300mA，最大反向工作电压为 100V，而最高工作频率只有 3kHz。

几种常见的二极管的外形如图 1-8 所示。

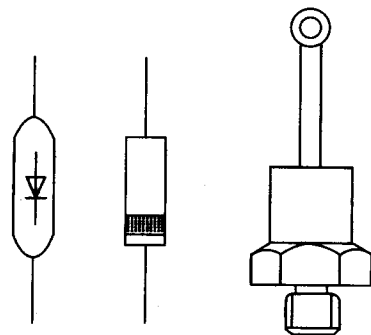


图 1-8 几种常见的二极管的外形

1-2-2 二极管的伏安特性

1. PN 结的伏安特性方程

根据理论分析，PN 结两端的电压 u_D 与流过 PN 结的电流 i_D 之间的关系可表示为

$$I = I_S (e^{u_D/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中, I_S 为 PN 结的反向饱和电流; $U_T = \frac{kT}{q}$ 称为温度电压当量, 其中 k 为玻耳兹曼常量

($1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T 为热力学温度, q 为电子的电量 ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$), 在常温 ($T=300\text{K}$) 时, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

其中, u_D 和 i_D 的参考方向都是由 P 指向 N 的。

由式 (1-1) 可见, 当 $u_D=0$ 时, $I=0$; 当 PN 结正偏 ($u_D>0$) 且 $u_D \gg U_T$ 时, $I \approx I_S e^{u_D/U_T}$, I 随 u_D 按指数规律增大; 当 PN 结反偏 ($u_D \ll -U_T$) 时, 则 $I \approx -I_S$, 其大小与外加电压 u_D 无关。

二极管的核心是一个 PN 结, 所以它的伏安特性与式 (1-1) 基本相同。但是由于存在引线的接触电阻、半导体的体电阻和表面漏电流等因素, 实际的二极管伏安特性与式 (1-1) 略有差别。

2. 二极管的伏安特性

实际的二极管伏安特性曲线如图 1-9 所示。

(1) 正向特性

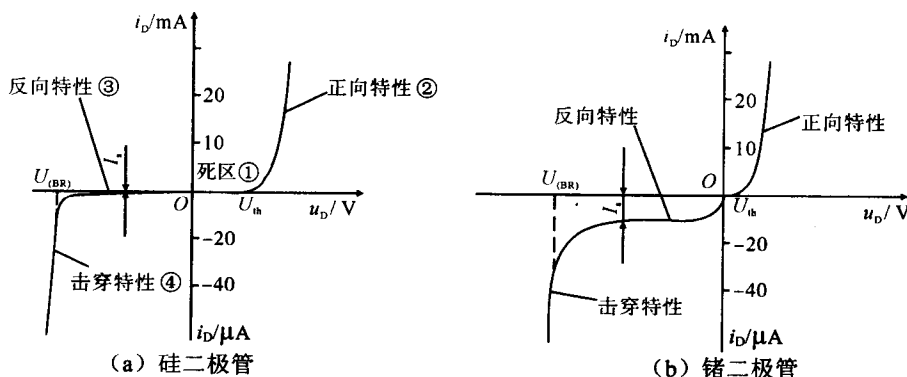


图 1-9 二极管的伏安特性曲线

当外加正向电压小于 U_{th} 时, 外电场不足以克服 PN 结的内电场对多子扩散运动造成的阻力, 正向电流几乎为零, 二极管呈现为一个电阻, 好像有一个门坎, 因此将电压 U_{th} 称为门坎电压 (又称死区电压)。在室温下, 硅管 $U_{th} \approx 0.5\text{V}$, 锗管 $U_{th} \approx 0.1\text{V}$ (见图 1-9 (a) 中①区域)。当外加正向电压大于 U_{th} 后, PN 结的内电场大为削弱, 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, (见图 1-9 (a) 中②区域)。实际电路中二极管导通时的正向电压降硅管约为 $0.6 \sim 0.8\text{V}$, 锗管约为 $0.1 \sim 0.3\text{V}$, 因此工程上定义这一电压为导通电压, 用 $U_{D(on)}$ 表示, 认为 $u_D > U_{D(on)}$ 时, 二极管导通, i_D 有明显的数值, 而 $u_D < U_{D(on)}$ 时, i_D 很小, 二极管截止。工程上, 一般取硅管 $U_{D(on)} = 0.7\text{V}$, 锗管 $U_{D(on)} = 0.2\text{V}$ 。

(2) 反向特性

当外加反向电压时, 在小于反向击穿电压的范围内, 由少数载流子产生反向饱和电流, 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