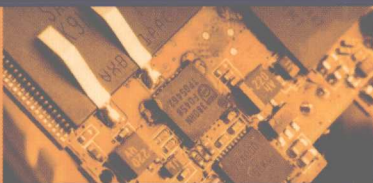




高职高专“十一五”电子信息类专业规划教材

模拟电子技术 及应用



曹光跃 主编



赠送电子课件等



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高职高专“十一五”电子信息类专业规划教材

模拟电子技术及应用

主 编 曹光跃

副主编 余战波



机械工业出版社

本书是机械工业出版社高职高专“十一五”电子信息类专业规划教材之一。

本书以现代电子技术的基本知识、基本理论为主线,使电子技术的基本理论与各种新技术有机地结合在一起;以培养学生的工作能力为目的,将理论知识的讲授与技能训练有机地融为一体,使能力培养贯穿于整个教学过程。主要内容包括半导体二极管、半导体三极管及放大电路基础、差动放大电路及集成运算放大电路、反馈放大电路、信号产生电路、功率放大电路和集成直流稳压电源等。每章都有本章小结、技能训练以及思考与练习题。技能训练内容丰富、实用,并引入计算机仿真技术 EWB。本书内容简明、文字精练,重点突出,便于自学。

本书可作为高等职业院校、高等专科院校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院电子信息类、通信类及相关专业的教学用书,也适用于五年制高职、中职相关专业,并可作为社会从业人士的业务参考书及培训用书。

为了便于教师教学,本书配有免费电子课件、习题解答和模拟试卷等,凡选用本书作为授课用教材的学校,均可来电索取,咨询电话:010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术及应用/曹光跃主编. —北京:机械工业出版社, 2008. 5

高职高专“十一五”电子信息类专业规划教材
ISBN 978-7-111-23706-8

I. 模… II. 曹… 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(2008)第 032421 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:于宁 责任编辑:王宗锋 版式设计:冉晓华
责任校对:陈延翔 封面设计:王伟光 责任印制:洪汉军
北京铭成印刷有限公司印刷

2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 12.5 印张 · 307 千字
0001—4000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-23706-8
定价: 21.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379758

封面无防伪标均为盗版

前 言

《模拟电子技术及应用》是电子信息类和通信类专业入门性质的重要技术基础课程，也是一门实践性很强的课程。通过本课程的学习，可以使学生掌握电子技术方面的基本知识、基本理论和基本技能，培养学生分析问题和解决问题的能力，并为学习后续课程和今后在实际工作中应用电子技术打好基础。

根据高职高专培养目标的要求以及现代科学技术发展的需要，本书以现代电子技术的基本知识、基本理论为主线，使电子技术的基本理论与各种新技术有机地结合在一起；以培养学生的工作能力为目的，将理论知识的讲授与技能训练有机地融为一体，使能力培养贯穿于整个教学过程。每章都有本章小结、技能训练以及思考与练习题。技能训练内容丰富、实用，并引入计算机仿真技术 EWB。在编写过程中，按高职教材在理论上“必需”、“够用”的原则，着重讲清物理概念，避免繁琐的理论计算和推导，着重介绍比较实用的工程计算和近似估算方法，使教材在内容上做到清楚、准确、简洁，通俗易懂，可读性好。

通过本课程的教学，应使学生达到如下基本要求：

- 1) 熟悉常用电子元器件的特性和主要参数，具有识别元器件和检测元器件的能力，具有会查阅器件手册和正确选用器件的能力。
- 2) 掌握常用基本单元电路和典型电路的结构、工作原理和功能，熟练掌握分析电子电路的基本方法，能对电子电路进行定性分析和工程估算，具有根据需要选择适用电路和使用集成电路的能力。
- 3) 具有识读整机电路图的能力。
- 4) 掌握电子技术的基本技能，具有实际操作的能力。

本书由安徽电子信息职业技术学院曹光跃老师担任主编，负责全书的统稿工作并编写了第3章和附录；重庆三峡职业学院余战波老师担任副主编并编写了第1章；重庆职业技术学院陈宗梅老师编写了第2章；西安航空职业技术学院马宁丽老师编写了第4章和第5章；烟台职业学院张海丹老师编写了第6章和第7章。本书在编写过程中，得到了安徽电子信息职业技术学院的领导和老师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

本教材常用符号说明

一、下角标符号意义

i、o 分别表示输入和输出量
s、f 分别表示信号源量和反馈量

L 负载

REF 基准值

二、常用符号意义

1. 放大倍数与增益

A 放大倍数、增益通用符号

A_u 电压放大倍数、增益

A_{ud} 差模电压放大倍数、增益

A_{us} 源电压放大倍数、增益

2. 电阻

R 直流电阻或静态电阻

r 交流电阻或动态电阻

RP 电位器

R_i 输入电阻

R_o 输出电阻

R_s 信号源电阻

R_L 负载电阻

R_f 反馈电阻

3. 电容、电感

C 电容通用符号

C_B 基极旁路电容

C_E 发射极旁路电容

C_S 源极旁路电容

C_j PN 结电容

L 电感、自感系数

4. 频率与通频带

f 频率通用符号

ω 角频率通用符号

f_H 电路高频截止频率(上限频率)

f_L 电路低频截止频率(下限频率)

f_T 特征频率

BW 3dB 通频带

BW_c 单位增益带宽

5. 功率与效率

P_o 输出功率

P_{DC} 直流电源供给功率

P_C 集电耗散功率

P_{CM} 集电耗最大允许耗散功率

η 效率

6. 其他

F 反馈系数

F_u 电压反馈系数

K_{CMR} 共模抑制比

Q 静态工作点、品质因素

VD 半导体二极管

VF 场效应晶体管

VS 稳压管

VT 晶体管

T、t 时间、周期、温度

φ 相角

三、U(I)不同书写体电压(电流)符号的规定

1) 大写 U(I) 大写下角标, 表示直流电压(电流)值, 例如 U_{BE} 表示基极与发射极之间的直流电压。

2) 大写 U(I) 小写下角标, 表示交流电压(电流)的有效值, 例如 U_{be} 表示基极与发射极之间的交流电压的有效值。

3) 小写 u(i) 大写下角标, 表示含有直流电压(电流)的瞬时值, 例如, u_{BE} 表示基极与发射极之间电压的瞬时值。

4) 小写 u(i) 小写下角标, 表示交流电压(电流)的瞬时值, 例如 u_{be} 表示基极与发射极之间交流电压的瞬时值。

5) 大写 U(I) 小写 m 下角标, 表示交流电压(电流)的最大值, 例如, I_{cm} 表示集电极交流电流的最大值。

6) 大写 V 大写双字母下角标, 表示直流供电电源电压, 例如, V_{CC} 表示集电极直流供电电源电压。

目 录

前言

本教材常用符号说明

第 1 章 半导体二极管 1

1.1 半导体的基础知识 1

1.1.1 半导体的特性 1

1.1.2 本征半导体和杂质半导体 1

1.1.3 PN 结 3

1.2 半导体二极管的特性及主要参数 4

1.2.1 二极管的结构与符号 4

1.2.2 二极管的伏安特性 5

1.2.3 二极管的主要参数 6

1.2.4 理想二极管的特点及其电路的分析方法 7

1.3 二极管的应用电路 8

1.3.1 整流电路 8

1.3.2 钳位电路 8

1.3.3 限幅电路 9

1.3.4 元器件保护电路 9

1.4 特殊二极管 10

1.4.1 稳压二极管 10

1.4.2 发光二极管 11

1.4.3 光敏二极管 12

1.4.4 变容二极管 12

1.4.5 激光二极管 12

技能训练 1 半导体二极管特性的测试 13

本章小结 14

思考与练习题 15

第 2 章 半导体三极管及放大电路基础 17

2.1 双极型半导体三极管 17

2.1.1 晶体管的工作原理 17

2.1.2 晶体管的三种连接方式 19

2.1.3 晶体管的特性曲线 20

2.1.4 晶体管的主要参数 21

2.2 单极型半导体三极管 23

2.2.1 MOS 场效应晶体管 23

2.2.2 结型场效应晶体管 26

2.2.3 场效应晶体管的主要参数 28

2.3 放大电路的基础知识 29

2.3.1 放大电路的组成及各 元器件的作用 29

2.3.2 放大电路的性能指标 30

2.4 晶体管电路的基本分析方法 33

2.4.1 直流分析 33

2.4.2 交流分析 35

2.5 共发射极放大电路 39

2.5.1 固定偏置放大电路 39

2.5.2 分压式偏置放大电路 41

2.6 共集电极放大电路和共基极 放大电路 45

2.6.1 共集电极放大电路 45

2.6.2 共基极放大电路 47

*2.7 场效应晶体管放大电路 49

2.7.1 场效应晶体管放大电路的 构成及工作原理 49

2.7.2 场效应晶体管放大电路的分析 49

技能训练 2 晶体管的测试与应用 51

本章小结 54

思考与练习题 55

第 3 章 差动放大电路及集成运算 放大电路 58

3.1 多级放大电路 58



3.1.1 多级放大电路的组成及耦合方式	58	输出电阻	98
3.1.2 多级放大电路性能指标的估算	59	4.4 负反馈放大电路的应用	100
3.2 差动放大电路	61	4.4.1 放大电路引入负反馈的一般原则	100
3.2.1 差动放大电路的基本电路及工作原理	61	4.4.2 深度负反馈放大电路的特点及性能的估算	101
3.2.2 差动放大电路的输入、输出形式	66	*4.4.3 负反馈放大电路的稳定问题	102
3.2.3 恒流源式差动放大电路	68	4.4.4 实际应用电路举例	104
3.3 集成运算放大器	69	技能训练4 负反馈放大电路的调整与测试	104
3.3.1 集成运算放大器的组成	69	本章小结	107
3.3.2 集成运算放大器的主要参数	70	思考与练习题	108
3.3.3 理想集成运算放大器	72	第5章 信号产生电路	111
3.4 集成运算放大器的线性应用	73	5.1 正弦波信号振荡电路	111
3.4.1 比例运算	73	5.1.1 正弦波信号振荡电路的工作原理	111
3.4.2 加法与减法运算	74	5.1.2 RC 正弦波振荡电路	112
3.4.3 积分与微分运算	77	5.1.3 LC 正弦波振荡电路	114
3.5 集成运算放大器的非线性应用	78	5.1.4 石英晶体振荡电路	116
3.5.1 电压比较器	78	5.2 非正弦波信号振荡电路	118
3.5.2 方波产生电路	81	5.2.1 非正弦波发生器的基本工作原理	118
技能训练3 集成运算放大器应用电路的测试	82	5.2.2 三角波产生电路	118
本章小结	85	5.2.3 锯齿波产生电路	119
思考与练习题	86	*5.3 集成函数产生器 8038 的功能及应用	120
第4章 反馈放大电路	91	*5.4 应用电路举例	121
4.1 反馈的基本概念	91	技能训练5 正弦波信号发生器的调整与测试	121
4.1.1 反馈的概念	91	本章小结	124
4.1.2 反馈放大电路的一般表达方式	91	思考与练习题	124
4.2 反馈的类型及其判定方法	92	第6章 功率放大电路	127
4.2.1 正反馈和负反馈	92	6.1 功率放大电路概述	127
4.2.2 交流反馈和直流反馈	93	6.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	129
4.2.3 电压反馈和电流反馈	93	6.2.1 乙类双电源互补对称功率放大电路的工作原理	129
4.2.4 串联反馈和并联反馈	93	6.2.2 乙类双电源互补对称功率放大电路性能的估算	130
4.2.5 交流负反馈放大电路的四种组态	94		
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	97		
4.3.1 提高增益的稳定性	97		
4.3.2 减小失真和展宽通频带	97		
4.3.3 改变放大电路的输入和			



6.3 乙类单电源互补对称功率放大电路	132	7.3 滤波电路	146
6.4 甲乙类互补对称功率放大电路	133	7.3.1 电容滤波电路	146
6.4.1 甲乙类互补对称功率放大 电路的工作原理	133	7.3.2 电感电容滤波电路	148
6.4.2 复合管互补对称放大电路	134	7.3.3 RC- π 型滤波电路	149
6.5 集成功率放大器及其应用	136	7.4 线性集成稳压器	149
6.5.1 LA4102 集成功率放大器 及其应用	136	7.4.1 串联型稳压电路的工作原理	149
6.5.2 LM386 集成功率放大器 及其应用	137	7.4.2 三端固定输出集成稳压器	151
6.6 甲乙类互补对称功率放大 电路的测试	138	7.4.3 三端可调输出集成稳压器	153
技能训练6 功率放大电路的调整与测试	138	技能训练7 集成直流稳压电源的 调整与测试	154
本章小结	140	本章小结	157
思考与练习题	141	思考与练习题	158
第7章 集成直流稳压电源	142	附录	160
7.1 直流稳压电源的组成及各部 分的作用	142	附录A 半导体器件型号命名方法	160
7.2 整流电路	142	附录B 常用电子元器件的使用知识	162
7.2.1 半波整流电路	142	附录C 模拟电子技术 EWB 仿真实验	169
7.2.2 桥式整流电路	144	C.1 EWB 软件基本操作方法简介	169
		C.2 模拟电路仿真实验	171
		参考文献	192

第 1 章 半导体二极管

教学目的

- 1) 了解半导体的基本知识和 PN 结的形成。
- 2) 理解 PN 结及其单向导电特性、二极管、稳压管的特性。
- 3) 掌握二极管在实际中的应用, 提高实践能力。

1.1 半导体的基础知识

自然界中的物质按其导电能力可分为三类: 导体、半导体和绝缘体。导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。在自然界中属于半导体的物质很多, 用来制造半导体器件的材料主要有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等, 其中硅用得最广泛, 其次是锗。

1.1.1 半导体的特性

半导体除了在导电能力方面不同于导体和绝缘体外, 它还具有以下一些特点: 当半导体受光照射或热刺激时, 其导电能力将发生显著改变; 掺杂性, 即在纯净半导体中掺入微量杂质, 其导电能力会显著增加。

利用半导体的这些特性可制成光敏二极管、光敏三极管、光敏电阻和热敏电阻, 还可制成其他各种不同性能、不同用途的半导体器件, 例如场效应晶体管等。

1.1.2 本征半导体和杂质半导体

1. 本征半导体

纯净的、结构完整的半导体称为本征半导体。

(1) 本征半导体的原子结构和单晶体结构 常用的半导体材料硅和锗都是四价元素, 其原子最外层轨道上有四个电子(称为价电子), 为便于讨论, 采用图 1-1 所示的简化原子结构模型。在单晶体结构中, 相邻两个原子的一对最外层电子成为共有电子, 它们不仅受到自身原子核的作用, 同时还受到相邻原子核的吸引。于是, 两个相邻的原子共有一对价电子, 组成共价键结构。故在晶体中, 每个原子都和周围的四个原子用共价键的形式互相紧密地联系起来, 如图 1-2 所示。

(2) 本征激发和两种载流子(自由电子和空穴) 在绝对零度下, 本征半导体中没有可以自由移动的电荷(载流子), 因此不导电, 但在一定的温度和光照下, 少数价电子由于获得了足够的能量摆脱共价键的束缚而成为自由电子, 这种现象叫作本征激发。价电子摆脱共价键的束缚而成为自由电子后, 在原来共价键中必然留有一个空位, 称为空穴。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。在本征半导体中自由电子和空穴总是成对出现, 且数目相同, 如图 1-3 所示。

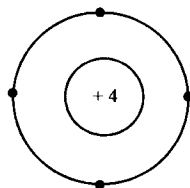


图 1-1 硅和锗简化原子结构模型

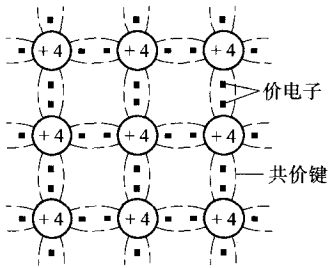


图 1-2 本征半导体共价键晶体结构示意图

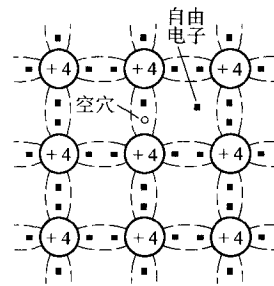


图 1-3 本征半导体中的自由电子和空穴

空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子去填补，使空位发生移动，这种价电子填补空位的运动可以看成是空穴在运动，称为空穴运动，其运动方向与电子的运动方向相反。自由电子和空穴在运动中相遇时会重新结合而成对消失，这种现象叫作复合。温度一定时，自由电子和空穴的产生与复合达到动态平衡，自由电子和空穴的浓度一定。

本征半导体中的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，本征半导体中的载流子浓度很低，随着温度的升高，载流子浓度基本上按指数规律增加，因此，半导体中载流子的浓度对温度十分敏感。

2. 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量杂质元素，可显著提高半导体的导电能力，掺杂后的半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的不同，可形成两种不同的杂质半导体，即 N 型半导体和 P 型半导体。

(1) N 型半导体 在本征半导体中，掺入微量五价元素，如磷、锑、砷等，则原来晶体中的某些硅(锗)原子被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层有五个价电子，因此它与周围四个硅(锗)原子组成共价键时，还多余一个价电子。这个多余的价电子受杂质原子束缚力较弱，很容易成为自由电子，并留下带正电的杂质离子，称为施主离子，半导体仍然是电中性，如图 1-4a 所示。掺入多少个杂质原子就能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，使空穴的浓度减少，显然，这种杂质半导体中电子浓度远远大于空穴的浓度，主要靠电子导电，所以称为电子型半导体，又叫 N 型半导体。N 型半导体中，将自由电子称为多数载流子(简称多子)；将空穴称为少数载流子(简称少子)。

(2) P 型半导体 在本征半导体中，掺入微量三价元素，如硼、镓、铟等，则原来晶体中的某些硅(锗)原子被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层只有三个价电子，因此它与周围四个硅(锗)原子组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，称为受主离子，如图 1-4b 所示。这种

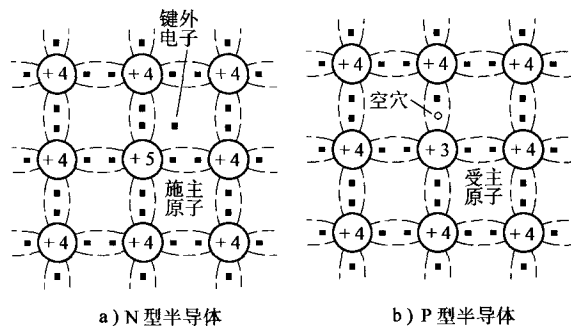


图 1-4 杂质半导体结构示意图



掺杂使空穴的浓度大大增加,这种杂质半导体是以空穴导电为主,所以称为空穴型半导体,又叫P型半导体,其中空穴为多子,自由电子为少子。

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。

1.1.3 PN 结

1. PN 结的形成

在同一块半导体基片的两边分别做成P型半导体和N型半导体。由于P型半导体中空穴的浓度大、自由电子的浓度小,N型半导体中自由电子的浓度大、空穴的浓度小,即在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1-5a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中的空穴复合而消失。结果使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1-5b所示。

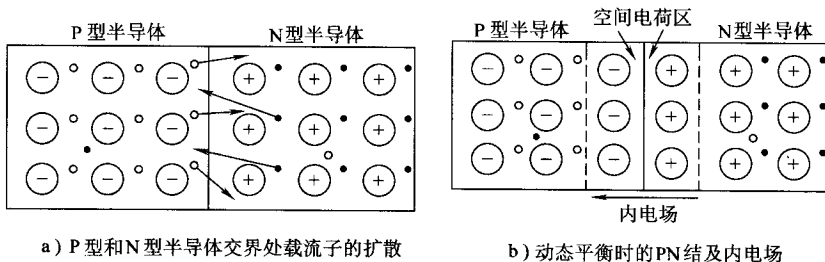


图 1-5 PN 结的形成

内电场将产生两个作用:一方面阻碍多子的扩散,另一方面促使两个区靠近交界面处的少子越过空间电荷区,进入对方,少子在内电场作用下有规则的运动称为漂移。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。

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

如果在PN结两端加上不同极性的电压,PN结会呈现出不同的导电性能。

(1) PN结外加正向电压 PN结P区接高电位端、N区接低电位端,则称PN结外接正向电压或PN结正向偏置,简称正偏,如图1-6a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,这时内电场减弱,扩散运动将大于漂移运动,从而形成较

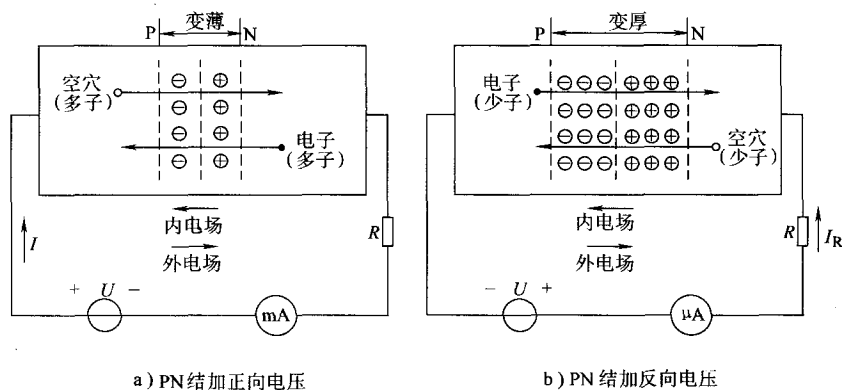


图 1-6 PN 结的单向导电性

大的扩散电流，扩散电流通过回路形成正向电流。这时 PN 结所处的状态称为正向导通（简称导通）。PN 结正向导通时，通过 PN 结的电流（正向电流）大，而 PN 结呈现的电阻（正向电阻）小。为了限制正向电流值，通常在回路中串接限流电阻 R 。

(2) PN 结外加反向电压 PN 结 P 区接低电位端、N 区接高电位端，则称 PN 结外接反向电压或 PN 结反向偏置，简称反偏，如图 1-5b 所示。

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，使空间电荷区变宽，内电场增强，使多子的扩散运动受阻，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。由于少数浓度很低，所以反向电流很小，一般为毫安级，相对于正向电流可以忽略不计。此时，PN 结呈现很大的电阻，称为截止。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。因为温度愈高，少数载流子的数目愈多，所以温度对反向电流的影响较大。

综上所述，PN 结正偏时导通，呈现很小的电阻，形成较大的正向电流；反偏时截止，呈现很大的电阻，反向电流近似为零。因此，PN 结具有单向导电特性。

1.2 半导体二极管的特性及主要参数

1.2.1 二极管的结构与符号

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二极管，由 P 区引出的电极称为正极（或阳极），由 N 区引出的电极称为负极（或阴极），其结构示意图如图 1-7a 所示，电路符号如图 1-7b 所示。

按 PN 结面积的大小，二极管可分为点接触型和面接触型两大类。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）的表面接触而做成的，如图 1-7c 所示。点接触型二极管的 PN 结结面积很小，结电容小，不允许通过较大的电流，不能承受较高的反向电压，但其高频性能好，适用于作为高频检波、小功率电路和脉冲电路的开关元件等。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1-7d所示。面接触型二极管的PN结结面积大,结电容大,可以通过较大的电流,能承受较高的反向电压,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。

图1-7e所示为硅工艺平面型二极管的结构图,它是集成电路中常见的一种形式。

按照用途的不同,二极管分为整流、检波、开关、稳压、发光、快恢复和变容二极管等。常用的二极管有金属、塑料和玻璃三种封装形式,其外形各异,图1-8为常见的二极管外形。

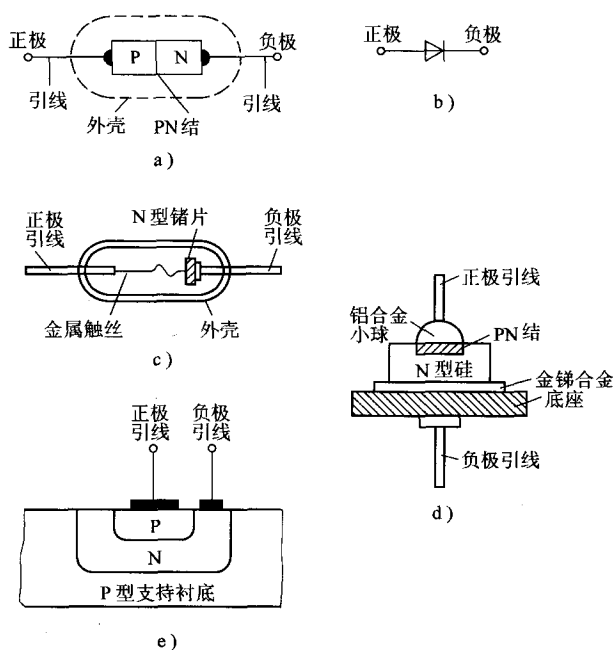


图1-7 二极管的结构和符号

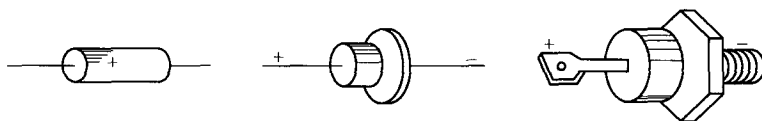


图1-8 常见的二极管外形

有关二极管的器件型号命名的方法参见附录A。

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管由一个PN结构成,因此,它的特性就是PN结的单向导电性。常利用伏安特性曲线来形象地描述二极管的单向导电性。二极管的伏安特性,就是指二极管两端的电压 U_V 和流过二极管的电流 I_V 之间的关系。若以二极管两端的电压 U_V 为横坐标,流过二极管的电流 I_V 为纵坐标,用作图法将电压、电流的对应点用平滑曲线连接起来,就得到了二极管的伏安特性曲线,如图1-9所示(图中实线为硅二极管的伏安特性曲线,虚线为锗二极管的伏安特性曲线),下面就二极管的伏安特性曲线进行说明。

1. 正向特性

二极管两端加正向电压时,电流和电压的关系称为二极管的正向特性,当正向电压比较小时($0 <$

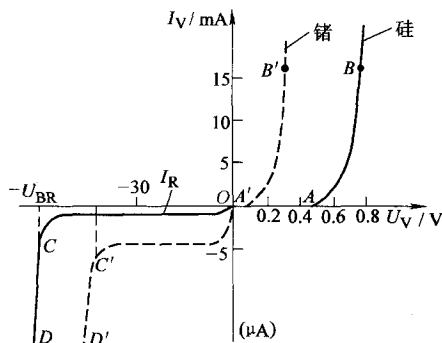
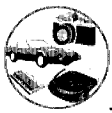


图1-9 二极管的伏安特性曲线



$U < U_{th}$), 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, 正向电流极小(几乎为零), 二极管呈现为一个电阻, 此区域称为死区, 电压 U_{th} 称为死区电压(又称门槛电压)。在室温下硅管 $U_{th} \approx 0.5V$, 锗管 $U_{th} \approx 0.1V$, 如图 1-9 中 $OA(OA')$ 段所示。

当外加正向电压大于 U_{th} 时, 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, 电流与外加电压呈指数关系, 二极管呈现很小的电阻而处于导通状态, 硅二极管的正向导通压降约为 $0.7V$, 锗二极管的正向导通压降约为 $0.3V$, 如图 1-9 中 $AB(A'B')$ 段所示。

二极管正向导通时, 要特别注意它的正向电流不能超过最大值, 否则会烧坏 PN 结。

2. 反向特性

二极管两端加上反向电压时, 电流和电压的关系称为二极管的反向特性, 由图 1-9 中 $OC(或 OC')$ 段所示, 二极管的反向电流很小(约等于二极管的反向饱和电流 I_R), 且与反向电压无关, 这时二极管呈现很大的电阻而处于截止状态, 一般硅二极管的反向饱和电流比锗二极管小很多, 在室温下, 小功率硅管的反向饱和电流小于 $0.1\mu A$, 锗管为几十毫安。

3. 反向击穿特性

当加在二极管两端的反向电压增大到 U_{BR} 时, 二极管内 PN 结被击穿, 二极管的反向电流将随反向电压的增加而急剧增大, 如图 1-9 中 $CD(或 C'D')$ 段所示, 此现象称为反向击穿, U_{BR} 为反向击穿电压。反向击穿后, 只要反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结允许的耗散功率, 二极管一般不会损坏。若反向电压下降到小于击穿电压时, 其性能可恢复到原有状况, 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。

4. 温度对特性的影响

温度对二极管的特性有显著的影响, 如图 1-10 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 $1^\circ C$, 正向压降约减小 $2 \sim 2.5mV$, 温度每升高 $10^\circ C$, 反向电流约增大一倍。若温度过高, 可能导致 PN 结消失。一般规定硅管所允许的最高结温为 $150 \sim 200^\circ C$, 锗管为 $75 \sim 150^\circ C$ 。

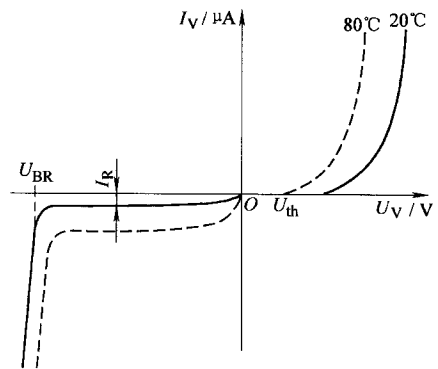


图 1-10 温度对二极管伏安特性的影响

1.2.3 二极管的主要参数

实用中一般通过查器件手册, 依据参数来合理选用二极管。二极管的主要参数有:

1. 最大整流电流 I_F

指二极管长期连续工作时, 允许通过的最大正向电流的平均值。使用时若超过此值, 二极管会因过热而烧坏。点接触型二极管的 I_F 较小, 在几十毫安以下, 面接触型二极管的 I_F 较大。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

指二极管正常工作时, 允许施加在二极管两端的最高反向电压(峰值), 通常手册上给出的最高反向工作电压 U_{RM} 为击穿电压 U_{BR} 的一半。



3. 反向饱和电流 I_R

指二极管未击穿时的反向电流值。其值会随温度的升高而急剧增加，其值越小，二极管单向导电性能越好。反向电流值会随温度的上升而显著增加，在实际应用中应加以注意。

4. 最高工作频率 f_M

指保证二极管单向导电作用的最高工作频率。当工作频率超过 f_M 时，二极管的单向导电性能就会变差，甚至失去单向导电特性。 f_M 的大小与 PN 结的结电容有关，点接触型锗管由于其 PN 结结面积较小，故 PN 结结电容很小，通常小于 1pF，其最高工作频率可达数百兆赫，而面接触型硅整流二极管，其最高工作频率只有 3kHz。

1.2.4 理想二极管的特点及其电路的分析方法

1. 理想二极管

实际应用中，希望二极管具有正向偏置时导通，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的理想特性，具有这些特性的二极管称为理想二极管。在分析电路时，理想二极管可用一理想开关 S 来等效，正向偏置时 S 闭合，反向偏置时 S 断开，这一特性称为理想二极管的开关特性，如图 1-11 所示。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。

2. 理想二极管的等效模型

(1) 理想二极管串联恒压降模型 二极管导通后，其管压降认为是恒定的，且不随电流变化而变化，典型值为 0.7V，如图 1-12 所示。该模型提供了合理的近似，用途广泛。

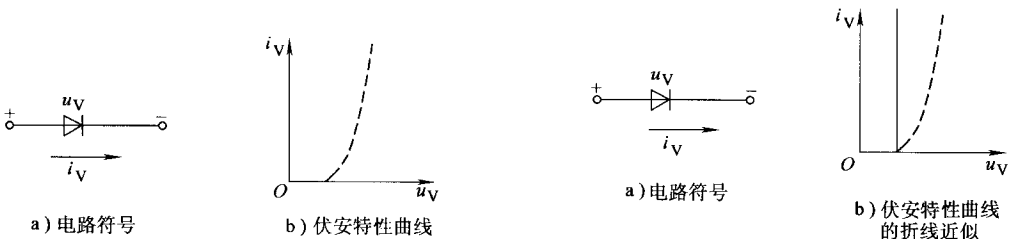


图 1-11 理想二极管等效模型

图 1-12 恒压降等效模型

(2) 折线模型 折线模型认为二极管的管压降不是恒定的，而随二极管的电流增加而增加，模型中用一个电池和电阻 r_p 来做进一步的近似，此电池的电压选定为二极管的门槛电压 U_{th} ，约为 0.5V， r_p 的值为 200Ω。由于二极管的分散性， U_{th} 、 r_p 的值不是固定的。折线模型如图 1-13 所示。

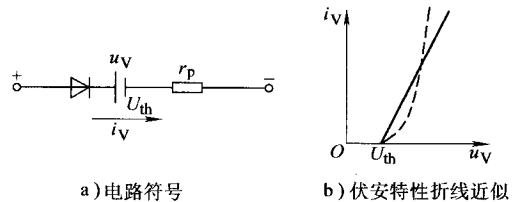


图 1-13 折线模型

(3) 小信号模型 如果二极管在它的伏安特性的某一小范围内工作，例如在静态工作点 Q (此时有 $u_V = U_V$ 、 $i_V = I_V$) 附近工作，则可将伏安特性看成一条直线，其斜率的倒数就是所求的小信号模型的微变电阻 r_d ，如图 1-14 所示。

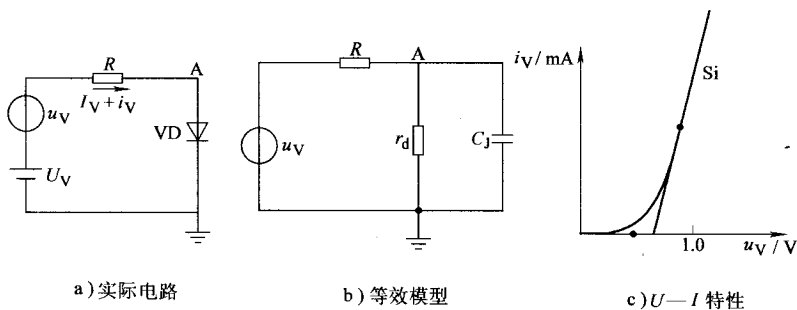


图 1-14 小信号模型

1.3 二极管的应用电路

普通二极管是电子电路中最常用的半导体器件之一，其应用非常广泛。利用二极管的单向导电性及导通时正向压降很小等特点，可完成整流、检波、钳位、限幅、开关及电路元件保护等任务。

1.3.1 整流电路

所谓整流，就是将交流电变成脉动直流电。利用二极管的单向导电性可组成多种形式的整流电路，常用的二极管整流电路有单相半波整流电路和桥式整流电路等。这些内容将在第 7 章中详细介绍。

1.3.2 钳位电路

钳位电路是指能把一个周期信号转变为单向的(只有正向或只有负向)或叠加在某一直流电平上，而不改变它的波形的电路。在钳位电路中，电容是不可缺少的元件。图 1-15a 为一个实用的二极管正钳位电路，现分析一下它的工作原理。设 $t=0$ 时电容上的初始电压为零， $t=0_+$ 时， $u_i = U_m$ ，电容也被充上了大小为 U_m 的电压，极性如图所示。此刻 $u_o = 0$ ，并且 $u_o = 0$ 将一直保持到 $t = t_1$ 。

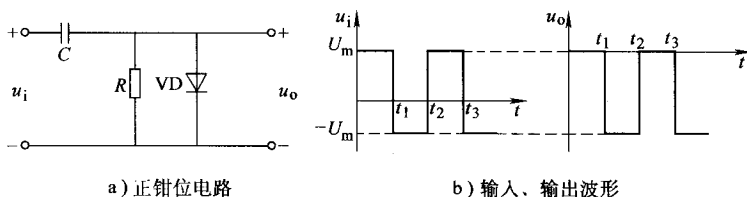


图 1-15 钳位电路

此后， u_i 突降到 $-U_m$ ，二极管截止，如果电阻和电容足够大， RC 时间常数远大于输入信号周期，则电容上的充电电压一直保持 U_m ，于是输出电压为 $u_o = u_i - U_m = -2U_m$ ，并一直保持到 t_2 ，其输入输出波形如图 1-15b 所示。显然，输出信号总不会是正值，所以称为正钳位电路。



1.3.3 限幅电路

当输入信号电压在一定范围内变化时,输出电压随输入电压相应变化;而当输入电压超出该范围时,输出电压保持不变,这就是限幅电路。通常将输出电压 u_o 开始不变的电压值称为限幅电平,当输入电压高于限幅电平时,输出电压保持不变的限幅称为上限幅;当输入电压低于限幅电平时,输出电压保持不变的限幅称为下限幅。

限幅电路如图 1-16 所示。改变 E 值就可改变限幅电平。下面就并联上限幅电路加以说明。

如果 $E = 0V$, 则限幅电平为 $0V$ 。 $u_i > 0$ 时二极管导通, $u_o = 0$; $u_i < 0$, 二极管截止, $u_o = u_i$ 。波形如图 1-17a 所示。

如果 $0 < E < U_m$, 则限幅电平为 $+E$ 。 $u_i < E$, 二极管截止, $u_o = u_i$; $u_i > E$, 二极管导通, $u_o = E$ 。波形如图 1-17b 所示。

如果 $-U_m < E < 0$, 则限幅电平为 $-E$, 波形如图 1-17c 所示。

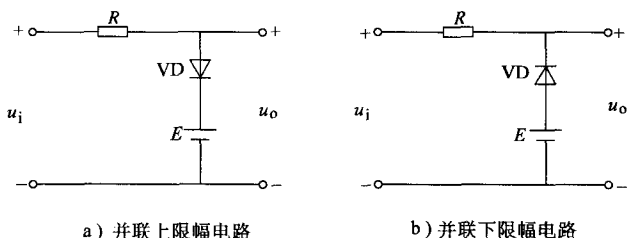


图 1-16 二极管限幅电路

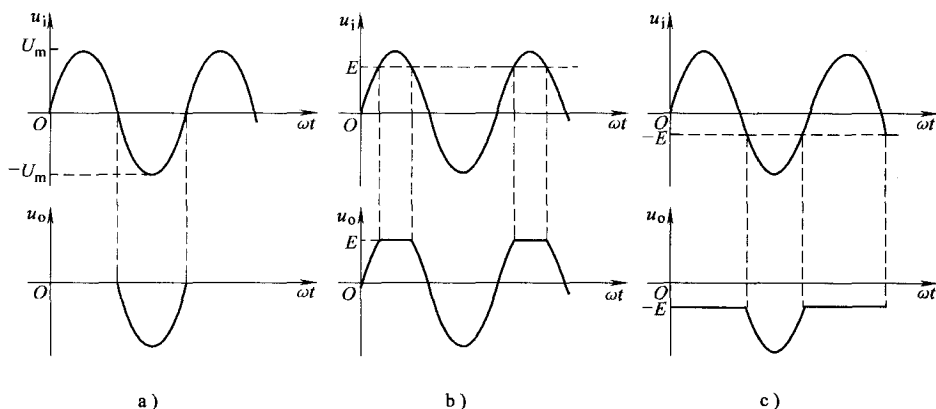


图 1-17 二极管并联上限幅电路波形关系

1.3.4 元器件保护电路

在电子电路中常用二极管来保护其他元器件,图 1-18 所示为二极管用来保护其他元器件使其免受过高电压损害的电路。

在开关 S 接通时,电源 E 给线圈供电, L 中有电流流过,储存了磁场能量。在开关 S 由接通到断开的瞬间,电流突然中断, L 中将产生一个高于电源电压很多倍的自感电动势 e_L , e_L 与 E 叠加作用在开关 S 的端子上,会产生电火花放电,这将影响设备的正常工作,使开关 S 寿命缩短。接入二极管 VD 后, e_L 通过二极管 VD 产生放电电流 i , 使 L 中存储的能量不经过开关 S 放掉,从而保护了开关 S 。

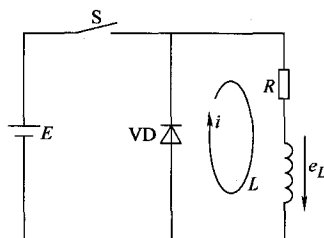


图 1-18 二极管保护电路