

普通高等教育“十二五”规划教材

电工学(下册)

DIANGONGXUE

电子技术

主编 艾永乐 副主编 王素玲



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

电 工 学

下 册

电 子 技 术

主 编 艾永乐
副主编 王素玲
参 编 李 端 王国东 唐恒娟
郭 宇 谢贝贝



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。全书共分9章，主要内容包
括常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、正弦波振荡电路、
直流稳压电源、门电路与组合逻辑电路、时序逻辑电路、A/D和D/A转
换电路、存储器 and 可编程逻辑器件等。附录介绍了Multisim电路仿
真。

本书内容全面、深入浅出，知识体系结构合理，可作为工科非电类各
专业的大、中专学生使用，也可作为相关工程技术人员的参考书。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录
www.cmpedu.com注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

电工学. 下册, 电子技术/艾永乐主编. —北京: 机械工业出版社, 2012. 1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-36659-1

I. ①电… II. ①艾… III. ①电工学—高等学校—教材②电工技术—
高等学校—教材 IV. ①TM②TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第247585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: 于苏华 责任编辑: 于苏华 谷玉春

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

封面设计: 张静 责任印制: 乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2012年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.75印张·353千字

标准书号: ISBN 978-7-111-36659-1

定价: 28.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心: (010) 88361066

销售一部: (010) 68326294

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

门户网: <http://www.cmpbook.com>

教材网: <http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据高等院校工科非电类专业的本科课程教学大纲，并结合教学实际编写而成的一本专业基础课教材。本书突出工科教育特色，将知识点讲授与能力培养有机结合起来，注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。本书在充分阐述概念和基本原理的基础上，适量介绍最新集成电路芯片及其实际应用电路；同时所选例题和习题也反映了电子领域的新技术、新器件信息，并配以 Multisim 仿真例题和仿真练习，加深学生的理解和认识。本书具有体系结构新颖、注重工程应用、启发思考、易于自学、理论紧密联系实际等特点。

全书共 9 章，分为两个部分。第 1~5 章为第一部分，主要讲授模拟电子技术；第 6~9 章为第二部分，主要讲授数字电子技术。此外，附录给出了 Multisim 电路仿真。

模拟电子技术部分的主要内容包括半导体二极管及其电路分析、晶体管及其电路分析、放大电路基础、负反馈放大电路、放大电路频率响应、集成运算放大器的应用、集成模拟乘法器及其应用、信号发生电路、直流稳压电源等。

数字电子技术部分主要介绍数字系统中常用的基本单元电路、基本功能模块及基本分析方法，主要内容包括数字逻辑基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、半导体存储器、脉冲波形的产生与变换、A/D 与 D/A 转换、可编程逻辑器件等。

参加本书编写工作的有：李端（第 1、9 章）、王国东（第 2 章）、唐恒娟（第 3 章），郭宇（第 4、5 章），王素玲（第 6 章），谢贝贝（第 7、8 章），艾永乐（附录）。艾永乐负责制定编写提纲，艾永乐、王素玲负责全书的统稿工作。

本书在编写过程中，得到了国家级“三电”基础课程教学团队全体成员的大力支持，在此表示感谢。由于编者水平所限，书中难免会有错误和不妥之处，恳切希望广大读者和同行给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 常用半导体器件 1

- 1.1 半导体的导电特性 1
- 1.2 半导体二极管 4
 - 1.2.1 二极管的结构 4
 - 1.2.2 二极管的伏安特性 4
 - 1.2.3 二极管的主要参数 5
- 1.3 特殊二极管 6
- 1.4 晶体管 8
 - 1.4.1 基本结构 8
 - 1.4.2 电流分配和放大原理 9
 - 1.4.3 特性曲线 9
 - 1.4.4 晶体管的主要参数 11
- 1.5 场效应晶体管 13
 - 1.5.1 N 沟道增强型绝缘栅场效应晶体管 14
 - 1.5.2 N 沟道耗尽型绝缘栅场效应晶体管 15
 - 1.5.3 场效应晶体管的主要参数 16
- 本章小结 17
- 思考题与习题 17
- Multisim 例题及习题 19

第 2 章 基本放大电路 21

- 2.1 基本放大电路概述 21
 - 2.1.1 基本放大电路的框图 21
 - 2.1.2 基本放大电路的组成 22
 - 2.1.3 基本放大电路的工作原理 22
 - 2.1.4 放大电路的性能指标 23
- 2.2 基本放大电路的特性分析 26
 - 2.2.1 放大电路的直流通路与交流通路 26
 - 2.2.2 基本放大电路的静态分析 27
 - 2.2.3 基本放大电路的动态分析 27
- 2.3 放大电路静态工作点的稳定 30
 - 2.3.1 温度对静态工作点的影响 30

- 2.3.2 静态工作点稳定电路 30
- 2.3.3 静态分析与动态分析 31
- 2.4 射极输出器 33
 - 2.4.1 电路的基本分析 34
 - 2.4.2 射极输出器的特点和应用 36
 - 2.4.3 基本放大电路三种组态的性能比较 36
- 2.5 多级放大电路 37
 - 2.5.1 多级放大电路的耦合方式 37
 - 2.5.2 多级放大电路的分析 39
 - 2.5.3 阻容耦合多级放大电路的频率特性 41
- 2.6 互补对称功率放大电路 42
 - 2.6.1 功率放大电路的基本要求 43
 - 2.6.2 无输出变压器 (OTL) 的互补对称功率放大电路 44
 - 2.6.3 无输出电容 (OCL) 的互补对称功率放大电路 46
- 2.7 放大电路中的负反馈 48
 - 2.7.1 负反馈的概念 48
 - 2.7.2 负反馈的类型及判别 49
 - 2.7.3 负反馈对放大电路工作性能的影响 52
- 2.8 场效应晶体管放大电路 56
 - 2.8.1 场效应晶体管偏置电路 56
 - 2.8.2 场效应晶体管放大电路的静态分析 57
 - 2.8.3 场效应晶体管放大电路的动态分析 58
- 本章小结 59
- 思考题与习题 60
- Multisim 例题及习题 64

第 3 章 集成运算放大器 68

- 3.1 差动放大电路 68
 - 3.1.1 差动放大电路的工作原理 68
 - 3.1.2 典型差动放大电路 69

3.2 集成运算放大器	71	5.3.1 直流稳压电源的组成	118
3.2.1 集成运算放大器的组成及特点	71	5.3.2 直流稳压电源的主要特性 指标	118
3.2.2 集成运算放大器的主要参数	72	5.4 晶闸管整流电路	119
3.2.3 理想集成运算放大器	73	5.4.1 晶闸管	119
3.3 信号运算电路	74	5.4.2 可控整流电路	121
3.3.1 比例运算电路	74	本章小结	122
3.3.2 加法运算电路	76	思考题与习题	122
3.3.3 减法运算电路	76	Multisim 例题及习题	124
3.3.4 积分和微分运算电路	77	第 6 章 门电路与组合逻辑电路	127
3.4 信号处理电路	80	6.1 数字电路概述	127
3.4.1 有源滤波电路	80	6.1.1 数字电路与数字系统	127
3.4.2 采样保持电路	81	6.1.2 数制与码制	128
3.4.3 电压比较器	82	6.2 逻辑代数与逻辑函数	131
3.5 信号发生电路	85	6.2.1 基本逻辑运算	131
3.5.1 矩形波发生器	85	6.2.2 复合逻辑运算	133
3.5.2 三角波发生器	86	6.2.3 逻辑变量和逻辑函数	133
3.5.3 锯齿波发生器	87	6.2.4 逻辑代数的基本定律与运算 规则	134
3.6 运算放大器应用举例	87	6.3 组合逻辑电路的特点及分析	144
本章小结	89	6.3.1 组合电路的特点	144
思考题与习题	89	6.3.2 组合逻辑电路分析	145
Multisim 例题及习题	90	6.3.3 组合逻辑电路的设计	146
第 4 章 正弦波振荡电路	93	6.4 加法器	148
4.1 自激振荡	93	6.4.1 半加器	148
4.2 RC 振荡电路	95	6.4.2 全加器	149
4.3 LC 振荡电路	97	6.4.3 多位加法器	150
4.4 石英晶体正弦波振荡电路	101	6.5 编码器与译码器	151
本章小结	103	6.5.1 编码器	151
思考题与习题	103	6.5.2 译码器	155
Multisim 例题及习题	105	6.6 数据选择器与数据分配器	161
第 5 章 直流稳压电源	108	6.6.1 数据选择器	161
5.1 二极管整流电路	108	6.6.2 数据分配器	163
5.1.1 单相半波整流电路	108	本章小结	164
5.1.2 单相全波整流电路	110	思考题与习题	164
5.1.3 单相桥式整流电路	111	Multisim 例题及习题	167
5.2 滤波电路	113	第 7 章 时序逻辑电路	169
5.2.1 电容滤波电路	113	7.1 双稳态触发器	169
5.2.2 电感滤波电路	115	7.1.1 RS 触发器	169
5.2.3 复式滤波电路	116	7.1.2 JK 触发器	171
5.2.4 有源滤波电路	117	7.1.3 D 触发器	173
5.2.5 几种滤波电路的性能比较	117		
5.3 直流稳压电源的组成和特性指标	117		

7.1.4 T 和 T'触发器	173	8.1.2 D/A 转换器的主要技术指标	197
7.1.5 各种触发器的变换和比较	174	8.2 A/D 转换器	197
7.2 计数器	174	8.2.1 逐次逼近式 A/D 转换器	197
7.2.1 二进制计数器	174	8.2.2 A/D 转换器的主要技术指标	199
7.2.2 十进制计数器	177	8.3 典型 D/A、A/D 芯片简介	199
7.2.3 CT74LS290 集成计数器	178	8.3.1 DAC 0732 8 位 D/A 转换器	199
7.3 寄存器	180	8.3.2 ADC 0809 8 位 A/D 转换器	200
7.3.1 数码寄存器	180	本章小结	201
7.3.2 三态输出寄存器	181	思考题与习题	202
7.3.3 移位寄存器	182	Multisim 例题及习题	202
7.4 555 定时器及其应用	184	第 9 章 存储器和可编程逻辑器件	205
7.4.1 555 定时器	184	9.1 半导体存储器	205
7.4.2 定时器电路的应用	185	9.1.1 只读存储器	205
7.5 时序电路综合应用举例	188	9.1.2 随机存储器	207
7.5.1 顺序控制器	188	9.2 可编程逻辑器件	209
7.5.2 计数译码显示电路	189	9.3 CPLD /FPGA 简介	212
本章小结	190	本章小结	214
思考题与习题	191	思考题与习题	214
Multisim 例题及习题	193	Multisim 例题及习题	215
第 8 章 D/A 及 A/D 转换电路	195	附录 Multisim 电路仿真	217
8.1 D/A 转换器	195	参考文献	228
8.1.1 T 形解码网络	195		

第 1 章 常用半导体器件

二极管和晶体管是电子电路中应用非常广泛的电子器件。它们的基本结构、工作原理、特性和参数是学习电子技术和分析电子电路的重要基础，而 PN 结又是构成各种半导体器件的核心部位。因此，本章从讨论半导体的导电特性和 PN 结的基本原理入手，介绍二极管和晶体管的有关知识，为后续学习打下基础。

1.1 半导体的导电特性

所谓半导体，顾名思义，就是它的导电能力介于导体和绝缘体之间，如硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体。半导体的导电能力在不同条件下有很大差别。例如，半导体对温度的反应特别灵敏，当环境温度升高时，导电能力显著增加，利用半导体的这种特性可以制作各种热敏元器件。又如，半导体（如硫化镉）对光照强度反应较灵敏，当光照强度加大时，其导电能力显著提高，利用这种特性就可制成各种光电元器件。更重要的是，如果在纯净的半导体中掺入某种微量杂质，其导电能力就可增加几十万倍甚至几百万倍。例如，单晶硅的电阻率为 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ，若掺入百万分之一的硼元素，电阻率就会减小到 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ 。因此，人们可以给半导体掺入微量的某种特定的杂质元素，精确控制它的导电能力，制成各种不同类型的半导体器件，如半导体二极管、晶体管、场效应晶体管及晶闸管等。

1. 本征半导体

本征半导体就是完全纯净的、不含其他杂质且具有晶体结构的半导体。使用最多的本征半导体是硅型半导体和锗型半导体。硅和锗的原子模型结构如图 1-1 所示。它们外层都有 4 个价电子，同属于四价元素。

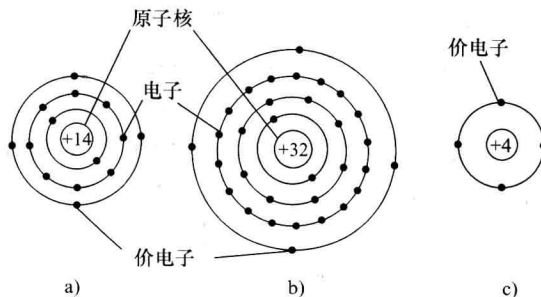


图 1-1 硅和锗的原子模型结构

a) 硅 b) 锗 c) 简化模型

在本征半导体中，每个原子的一个价电子与另外一个原子的一个价电子组成一个电子对，并且为两个原子所共有，因此称为共价键。

在共价键结构中，原子最外层虽然具有 8 个电子而处于较为稳定的状态，但是，当获得一定能量（温度升高或受光照）后，电子即可挣脱原子核的束缚（电子受到激发），成为自由电子。温度越高，晶体中产生的自由电子越多。

在电子受激发挣脱共价键的束缚成为自由电子后，共价键中就留下一个空位，称为“空穴”，如图 1-2 所示。在一般情况下，原子是中性的，当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，原子的中性便被破坏，而显出带正电。

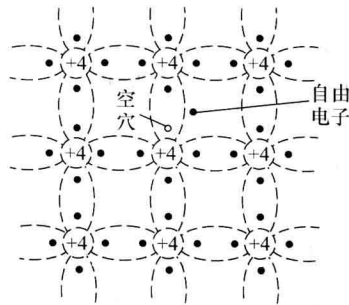


图 1-2 本征半导体中的自由电子与空穴

因此，当半导体两端外加电压时，半导体中将出现两部分电流：一部分是由自由电子作定向运动所形成的电子电流；另一部分是仍被原子核束缚的价电子（注意，不是自由电子）递补空穴所形成的空穴电流。在半导体中，同时存在着电子导电和空穴导电，这是半导体导电方式的最大特点，也是半导体和金属导体在导电原理上的本质差别。

自由电子和空穴都称为载流子。在一定温度下，载流子的产生和复合达到动态平衡，于是半导体中的载流子（自由电子和空穴）便维持一定数目。温度越高，载流子数目越多，导电性能也就越好。所以，温度对半导体器件性能的影响很大。

2. N 型半导体和 P 型半导体

在本征半导体中掺入微量杂质，其导电性能大大增强。根据掺入的杂质不同，杂质半导体可分为两大类，即 N 型半导体和 P 型半导体。

在硅和锗晶体中掺入磷（或其他五价元素），由于掺入硅晶体的磷原子数比硅原子数少得多，因此整个晶体结构基本上不变，只是某些位置上的硅原子被磷原子取代。磷原子的最外层有 5 个价电子，参加共价键结构只需 4 个价电子，第 5 个价电子很容易挣脱磷原子的束缚而成为自由电子，如图 1-3 所示。于是半导体中的自由电子数目大量增加，自由电子成为这种半导体的主要载流子，故称它为电子型半导体或 N 型半导体。因此，在 N 型半导体中，自由电子是多数载流子，而空穴则是少数载流子。

在硅或锗晶体中掺入硼元素（或其他三价元素），每个硼原子只有 3 个价电子，在构成共价键结构时，因缺少一个电子而形成空缺，如图 1-4 所示。这样，在半导体中就形成了大量空穴。这种以空穴导电作为主要导电方式的半导体称为空穴半导体或 P 型半导体，其中空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。

应该注意，不论是 N 型半导体还是 P 型半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但是整个晶体仍然是电中性的。

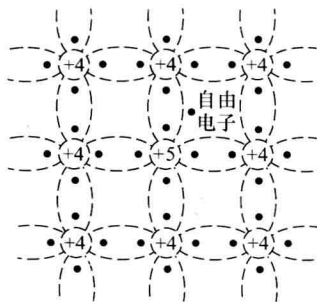


图 1-3 N 型半导体的晶体结构

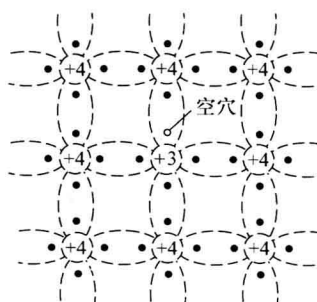


图 1-4 P 型半导体的晶体结构

3. PN 结

(1) PN 结的形成

将 P 型半导体与 N 型半导体通过物理、化学的方法有机地结合为一体，就会在两种半导体的交界处形成空间电荷区，称为 PN 结。由于交界处两边的电子和空穴的浓度不同（N 型区自由电子多，P 型区空穴多），因此，N 型区内的自由电子要向 P 型区扩散，而 P 型区内的空穴也要向 N 型区扩散，使交界面 P 型区一侧出现带负电的离子，而 N 型区一侧出现带正电的离子，因而在交界面两侧形成一个空间电荷区，如图 1-5 所示。

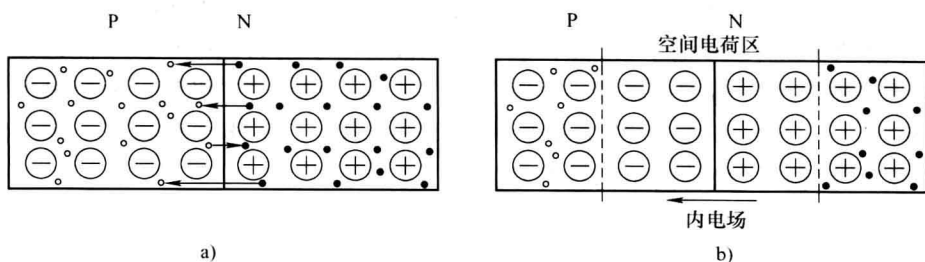


图 1-5 PN 结的形成

a) 多数载流子的扩散 b) 空间电荷区

形成空间电荷区之后，半导体内部将出现内电场，其方向从 N 区指向 P 区。内电场将阻碍多数载流子向对方扩散，同时又促进少数载流子的漂移。在一定条件下，当多数载流子的扩散运动与少数载流子的漂移运动达到动态平衡时，PN 结则处于相对稳定状态，即 PN 结形成。

(2) PN 结的单向导电性

PN 结外加正向电压时（P 区接电源正极，N 区接电源负极，如图 1-6 所示），外电场削弱了内电场，扩散运动增强，空间电荷区变薄，正向电阻很小，形成较大的扩散电流（又称正向电流）。PN 结的这种导通方式称为正向导通。

若给 PN 结加反向电压（P 区接电源负极，N 区接电源正极，如图 1-7 所示），外电场加强内电场，漂移运动大于扩散运动，空间电荷区加厚，其电阻很大，形成的电流 I_S 很小（微安量级），该电流称做反向饱和电流 I_S ，可忽略不计，称为反向截止。

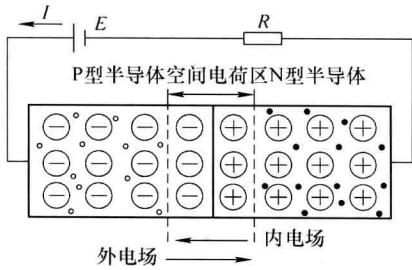


图 1-6 PN 结加正向电压

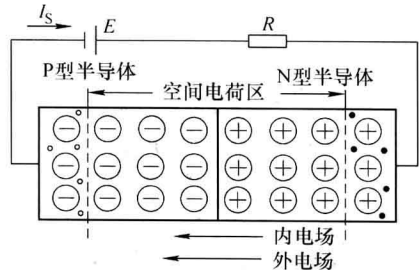


图 1-7 PN 结加反向电压

所以，PN 结加正向电压时，处于正向偏置，电阻很小，易于导通。PN 结加反向电压时，处于反向偏置，电阻很大，几乎不能导通，仅存在很小的反向饱和电流，即 PN 结具有单向导电性。

PN 结的正向电压为：硅材料为 0.6 ~ 0.7V，锗材料为 0.2 ~ 0.3V。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构

将一个 PN 结外封管壳并引出电极，就成为半导体二极管。根据 PN 结的结构，二极管分为点接触型和面接触型两类。点接触型的二极管由于结面积很小，不能通过较大的正向电流，但结电容小，易于在高频小功率条件下使用，如开关二极管。面接触型二极管的 PN 结面积较大，允许通过较大的正向电流，但结电容大，不能在高频下工作，因此一般都用于整流。半导体二极管的结构及符号如图 1-8 所示。

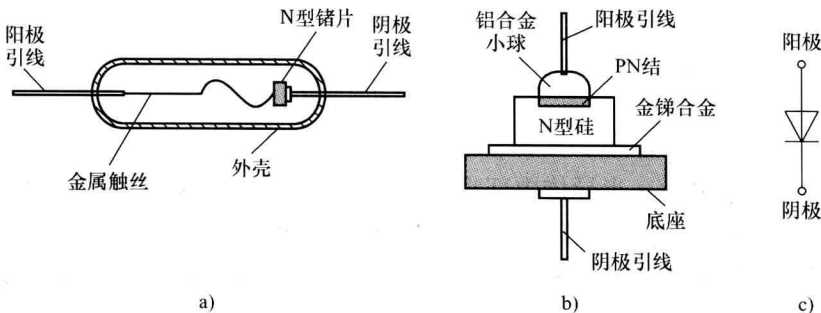


图 1-8 半导体二极管的结构及符号表示

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 符号

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的电流与外加电压的关系曲线称为伏安特性。典型的硅型二极管伏安特性曲线如图 1-9 所示，它由正向特性和反向特性组成。由图 1-9 可知，当外加正向电压很小时，外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻力，因此正向电流几乎为零。二极

管正向电流几乎为零的区域称为死区，对应死区的正向电压称为死区电压，其值与半导体材料和环境温度有关，通常硅型二极管约为0.5V，锗型二极管约为0.2V。外加正向电压大于死区电压后，二极管导通，其正向电流与正向电压的关系为指数关系。

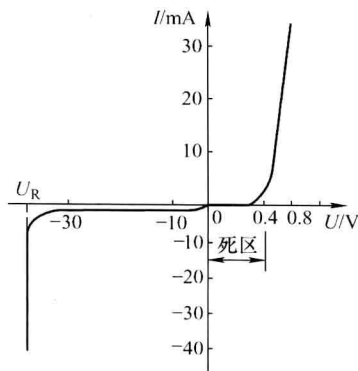


图 1-9 半导体二极管的伏安特性曲线

当二极管加反向电压时，在环境温度不变的条件下，少数载流子的数目近似为常数，因此当反向电压不超过某一范围时，反向电流的值很小，并且恒定，通常称它为反向饱和电流。当反向电压超过二极管的反向击穿电压 U_R 时，电场力将共价键中的电子拉出，使少数载流子的数量增多，并在强电场下加速，又将晶格中的价电子碰撞出来，这种连锁反应导致载流子的数目越来越多，最后使二极管反向击穿。二极管一旦被击穿，一般都不能恢复单向导电性能。

1.2.3 二极管的主要参数

二极管的参数是正确选择和使用二极管的依据。二极管的主要参数有以下几种。

(1) 最大整流电流 I_F

最大整流电流是指二极管长时间使用时，允许流过二极管的最大正向平均电流。点接触型二极管的最大整流电流在几十毫安以下；面接触型二极管的最大整流电流较大，如 2CP1 硅型二极管的最大整流电流为 400mA。当电流超过允许值时，将由于 PN 结过热而使二极管损坏。

(2) 最大反向工作电压 U_{RM}

为了保证二极管在反向电压下工作而不被击穿，制造厂家通常将反向击穿电压 U_R 的 1/2 或 2/3 定为最大反向工作电压。例如，2CP1 硅型二极管的反向击穿电压为 50V，而它的最大反向工作电压为 25V。

(3) 最大反向电流 I_{RM}

I_{RM} 是在最大反向工作电压下二极管的反向电流值，一般在几微安以下。反向电流越小，单向导电性能越好。通常，锗型二极管的反向电流比硅型二极管大得多。

二极管的应用范围很广，主要都是利用它的单向导电性。它可用于整流、检波、元器件保护以及在脉冲与数字电路中作为开关器件。

【例 1-1】 已知图 1-10a 所示正向限幅器，输入波形 $u_i = U_{im} \sin \omega t$ (单位: V)， $U_{im} >$

U_s ，试分析其工作原理，并画出输出电压 u_o 的波形（假设二极管 VD 为理想二极管）。

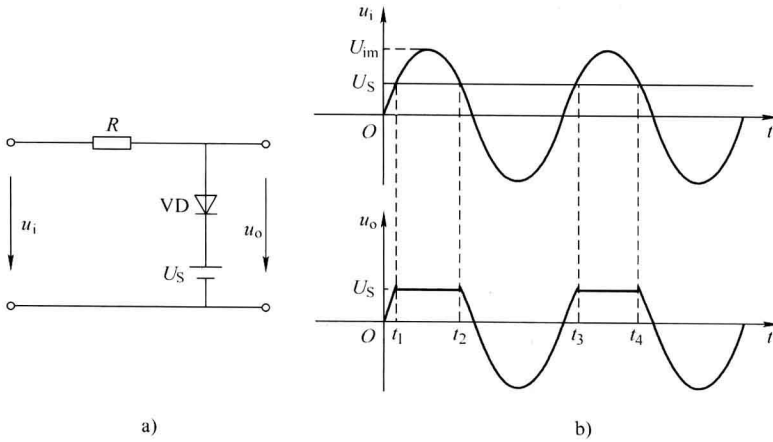


图 1-10 例 1-1 的电路图

a) 二极管限幅电路 b) 输出 u_o 的波形

解：(1) 当 $u_i > U_s$ 时，二极管导通，VD 为理想二极管，导通后，二极管压降为零，此时 $u_o = U_s$ 。

(2) 当 $u_i \leq U_s$ 时，二极管 VD 截止。该支路为开路，R 中无电流，二极管压降为零，所以 $u_o = u_i$ 。

根据以上分析，可作出 u_o 的波形图，如图 1-10b 所示。由图可知，输出波形的正向幅度被限制在 U_s 值。

1.3 特殊二极管

1. 硅稳压二极管

硅稳压二极管是一种特殊的面接触型半导体硅型二极管，由于它在电路中与适当阻值的电阻配合后能起稳压作用，故又称为稳压管。

稳压管的伏安特性曲线与普通二极管类似，其差异是稳压管的反向特性曲线比普通二极管更陡。稳压管的图形符号和伏安特性曲线如图 1-11 所示。

稳压管工作于反向击穿区，从反向特性曲线上可以看出，反向电压在一定范围内变化时，反向电流很小。当反向电压增高到击穿电压时，反向电流突然剧增，稳压管反向击穿，如图 1-11 所示。此后，电流虽然在很大范围内变化，但稳压管两端的电压变化很小。利用这一特性，稳压管在电路中能起到稳压作用。稳压管与一般二极管不一样，它的反向击穿是可逆的。当去掉反向电压之后，稳压管又恢复正常。但是，如果反向电流超过允许范围，稳压管将会发生热击穿而损坏。

为了保证稳压管在反向击穿情况下电流不超过额定值，要在电路中串联限流电阻，然后从稳压管两端输出稳定的电压接在负载电阻 R_L 上。图 1-12 是由稳压管构成的并联式稳压电路，当电源电压 U_i 升高时，稳压管所承受的反向电压也随之升高，由反向击穿特性可知，稳压管反向击穿电流 I_Z 增加，于是限流电阻 R 上的压降增大，将 U_Z 的增量限制在限

流电阻 R 上, 使输出电压基本上保持不变。如果负载电阻 R_L 变化, 电路同样可以起到稳压作用。

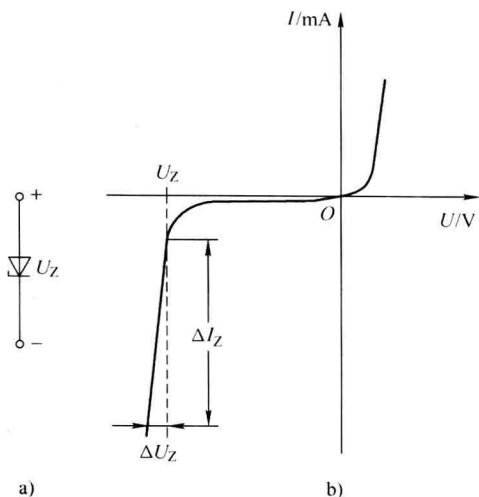


图 1-11 稳压管

a) 图形符号 b) 伏安特性曲线

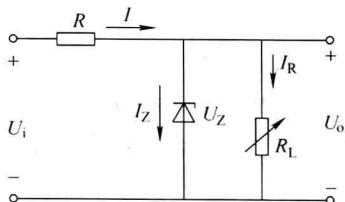


图 1-12 并联式稳压电路

稳压管的主要参数如下:

(1) 稳定电压 U_Z

稳定电压就是稳压管在反向击穿时能够正常工作的电压值, 由于工艺和其他方面的原因, 同一型号的稳压管其稳定电压值也略有差异。例如, 2DW7C 型稳压管的稳定电压值在 6.1 ~ 6.5V 范围之内。

(2) 稳定电流值 I_Z

稳定电流是指稳压管进入反向击穿工作区所必需的电流参考值, 通常该电流为 5mA。一般来说, 稳压管的实际电流大于稳定电流值时, 稳压性能较好。

(3) 最大允许耗散功率 P_{ZM}

最大允许耗散功率是指稳压管不致因发热而击穿的最大功率损耗, 其值为 $P_{ZM} = U_Z I_{Zmax}$ 。根据最大允许耗散功率和稳压值可计算出稳压管的最大稳定电流, 即

$$I_{Zmax} = \frac{P_{ZM}}{U_Z} \tag{1-1}$$

使用稳压管时, 应使 $I_Z \leq I_{Zmax}$ 。

(4) 动态内阻 r_z

动态内阻是指稳压管电压的变化量 ΔU_Z 与电流变化量 ΔI_Z 的比值, 即

$$r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \tag{1-2}$$

显然, 反向击穿特性曲线越陡, 动态内阻越小, 稳压性能也越好。

(5) 电压温度系数 α_U

电压温度系数是指当稳压管的电流为常数时, 环境温度每变化 1°C 引起稳压值变化的百分数。例如, 2CW18 型稳压管在 20°C 时的稳压值为 11V, 其电压温度系数为 0.095%。

一般情况下，高于7V的稳压管具有正的电压温度系数，低于4V的稳压管具有负的电压温度系数，而4~7V之间的稳压管其电压温度系数最小。因此选用4~7V的稳压管，可得到满意的温度稳定性。

2. 发光二极管

发光二极管(LED)是一种能将电能转换成光能的半导体器件。当有正向电流通过时，LED就会发光。LED用砷化镓、磷化镓等材料制成，主要用于音响设备及电路通、断状态的指示等。

3. 光敏二极管

光敏二极管是一种能将光信号转换成电信号的半导体器件。光敏二极管的反向电流随光照度的变化而变化。光敏二极管主要用于需要光电转换的自动探测、计数、控制等装置中。

1.4 晶体管

双极型晶体管(BJT)是最重要的一种半导体器件，简称晶体管，它的放大作用和开关作用促使电子技术飞跃发展。为了更好地理解和熟悉晶体管的外部特性，首先要简单介绍晶体管的内部结构和载流子运动规律。

1.4.1 基本结构

目前最常见的晶体管结构有平面型和合金型两类。硅型晶体管主要是平面型，锗型晶体管都是合金型。

不论平面型还是合金型，都分成N、P、N或P、N、P三层，因此又把晶体管分为NPN型和PNP型两类，其结构示意图和图形符号如图1-13所示。当前国内生产的硅型晶体管多为NPN型(3D系列)，锗型晶体管多为PNP型(3A系列)。每一只晶体管内部都分成基区、发射区和集电区，分别引出基极B、发射极E和集电极C。每一类都有两个PN结，基区和发射区之间的PN结称为发射结，基区和集电区之间的PN结称为集电结。

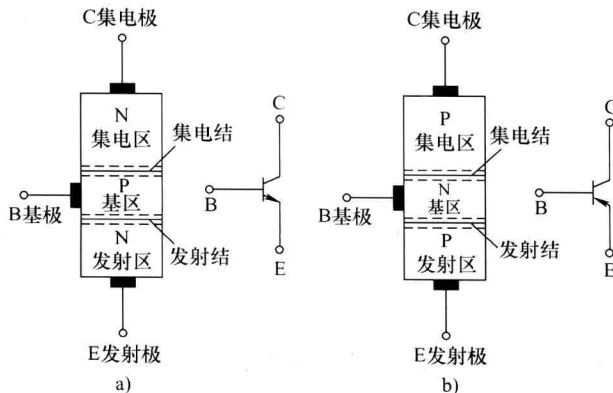


图 1-13 晶体管的结构和图形符号
a) NPN 型晶体管 b) PNP 型晶体管

NPN型和PNP型晶体管的工作原理类似，仅在使用时电源极性连接不同而已。

1.4.2 电流分配和放大原理

为了了解晶体管的放大原理和电流的分配，我们先做一个实验，实验电路如图1-14所示，把晶体管接成两个电路：基极电路和集电极电路。发射极是公共端，因此这种接法称为晶体管的共射极接法。如果用的是NPN型晶体管，电源 E_B 的极性必须照图1-14中那种接法，使发射结上加正向电压（正向偏置），由于 E_C 大于 E_B ，集电结加的是反向电压（反向偏置），晶体管才能起到放大作用。

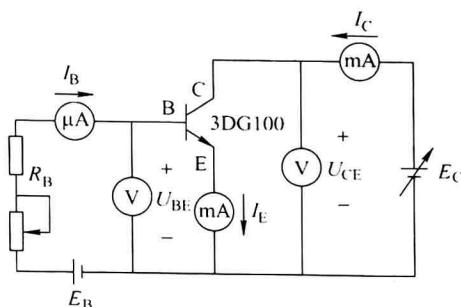


图 1-14 晶体管电流放大的实验电路

改变可变电阻 R_B ，则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都发生变化。测量结果见表1-1。

表 1-1 晶体管电流测量数据

$I_B/\mu\text{A}$	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
I_C/mA	0.001	0.50	1.00	1.70	2.50	3.30
I_E/mA	0.001	0.51	1.02	1.73	2.54	3.35

由实验测量的数据可得出如下结论：

- 1) 三个电极的电流符合基尔霍夫定律，即

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-3)$$

- 2) I_C 、 I_E 比 I_B 大得多。 I_C 与 I_B 的比值称为晶体管的直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 。

- 3) 当 $I_B = 0$ 时（基极开路）， I_C 很小，用 I_{CE0} 表示，称为穿透电流。

- 4) 要使晶体管起放大作用，外界条件必须保证发射结正向偏置，集电结反向偏置。

上述实验得出的晶体管电流分配关系和电流放大作用，是由晶体管内部结构和外界条件决定的。内部结构指的是基区做得很薄且掺杂很少（多数载流子浓度低）；外界条件指的是外加电源一定要使发射结处于正向偏置，集电结处于反向偏置。对于NPN型晶体管，三个电极的电位是 $U_C > U_B > U_E$ ；对于PNP型晶体管，电源极性反接，三个电极的电位是 $U_C < U_B < U_E$ 。

1.4.3 特性曲线

晶体管的特性曲线是用来表示该晶体管各极电压和电流之间的相互关系的，它反映晶

体管的性能，是分析放大电路的重要依据。晶体管的特性曲线有输入特性曲线和输出特性曲线两种，最常用的是共发射极接法时的输入特性曲线和输出特性曲线。它们可用晶体管特性图示仪直观地显示出来，也可以通过实验进行测绘。下面以 NPN 型晶体管共发射极接法电路（如图 1-14 所示）为例，分析它的特性曲线。

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指在一定的 U_{CE} 下，加在晶体管的基极和发射极之间的电压 U_{BE} 与基极电流 I_B 之间的关系曲线，即

$$I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{CE}=\text{常数}} \quad (1-4)$$

当 $U_{CE} = 0$ 时，改变 R_B ，可得到一条曲线；当 U_{CE} 为另一值时，调节 R_B 又可测得另一条曲线。但是，当 $U_{CE} \geq 1$ 时的输入特性曲线几乎重合，所以通常用 $U_{CE} \geq 1V$ 的一条曲线代表晶体管的输入特性曲线，如图 1-15a 所示。

1) 输入特性就是发射结的正向特性，它是一条非线性曲线，与二极管的正向伏安特性曲线相似。

2) 同二极管的伏安特性一样，晶体管输入特性也有一段死区电压。只有当加在发射结的电压大于死区电压时，晶体管才会出现基极电流 I_B 。硅型晶体管的死区电压约为 $0.5V$ ，锗型晶体管的死区电压约为 $0.1V$ 。

3) 正常工作时，NPN 型晶体管的发射结电压 U_{BE} 为 $0.6 \sim 0.7V$ ，PNP 型晶体管的发射结电压 U_{BE} 为 $-0.2 \sim -0.3V$ 。这是估算静态值和检查晶体管工作是否正常的依据之一。

4) 当 $U_{CE} \geq 1V$ 时，输入特性曲线相近，与 U_{CE} 关系不大。这是因为对硅型晶体管来说，当 $U_{CE} \geq 1V$ 时，只要 U_{BE} 保持不变，则从发射区发射到基区的电子数一定，而集电结所加的反向电压大于 $1V$ 以后已能把这些电子中的绝大部分拉到集电区。因此这时再增大 U_{CE} ， I_B 也基本保持不变。

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是指当基极电流 I_B 为常数时，输出电路中集电极电流 I_C 与集-射极电压 U_{CE} 之间的关系曲线，即

$$I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B=\text{常数}} \quad (1-5)$$

在 I_B 的值不同时，可以得到不同的曲线，所以输出特性曲线是一族曲线，如图 1-15b 所示。由输出特性曲线可见，当集电极与发射极间电压 U_{CE} 超过一定数值后， U_{CE} 再增加，电流 I_C 几乎不再增大，表现出恒流特性。其原因是，在基极电流一定时，发射区向基区扩散的电子数是一定的，所以 U_{CE} 的值高于一定数值（约 $1V$ ）之后，发射区扩散到基区内的电子大部分已被集电区收集形成集电极电流 I_C ，故电压 U_{CE} 再增加时， I_C 也不再明显增加，出现 I_C 与 U_{CE} 几乎无关的现象。

通常把晶体管的输出特性曲线分为三个工作区域，即截止区、饱和区和放大区，如图 1-15c 所示。

(1) 截止区

曲线 $I_B = 0$ 以下的区域称为截止区。对于 NPN 型晶体管，当 $U_{BE} < 0.5V$ 时，已处于截止状态。当 $U_{BE} < 0V$ 时，晶体管可靠截止，此时发射结处于零偏置或反向偏置状态。处在截止区下的晶体管的基极电流 $I_B = 0$ ，但集电极仍然存在一个很小的电流，即 $I_C =$