

电子技术

济 南 大 学 陈庆礼 主 编
南京机械高等专科学校 董尔令 副主编

高等专科学学校机电一体化专业系列教材



业出版社

高等专科学校机电一体化专业系列教材

电 子 技 术

主 编 陈庆礼
副主编 董尔令
参 编 张广煜 王嵩尘 赵业平
主 审 周脉林

机 械 工 业 出 版 社

全书分为模拟电子技术、数字电子技术、电力电子器件三部分,共11章。内容为半导体器件及整流电路、基本放大电路、集成运算放大电路及其应用(包括反馈和振荡电路)、直流稳压电源、逻辑代数、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲及整形电路、DAC、ADC、半导体存储器、电力电子器件。各章均列举了一定数量的例题和习题。书末附录中列有典型器件参数。

本书为高等专科学校“机电一体化专业”及普通高校大专班、职业大学和业余大学电气、机械类专业“电子技术”教材,亦可供中等专业学校教师及从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/陈庆礼主编. —北京:机械工业出版社,1999.9 重印
高等专科学校机电一体化专业系列教材
ISBN 7-111-05125-4

I. 电… I. 陈… III. 电子技术-高等学校-教材 N. TN

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第39264号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:于宁 贡克勤 版式设计:冉晓华
责任校对:张晓蓉 封面设计:姚毅 责任印制:李妍

济南新华印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年7月第1版第8次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·16.25印张·388千字
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
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

序

随着微处理器和微型计算机的问世,电子计算机已深深介入机械制造的各个领域,一系列机、电、计算机一体化的新产品诞生。为适应这个变化,迫切需要高等专科学校培养制造、调试、使用、维修机电一体化产品的技术人才。有鉴于此,不少高等工业专科学校在多年探索机制专业改造并取得经验的基础上正在创办机电工程(机电一体化)专业,以满足社会的需要,但各校对新开专业缺乏经验,缺少教材和师资,在此形势下,1995年3月机械工业部教材编辑室在全国机械制造专业教材编审委员会和全国高等专科学校机械制造专业协会的协助下于南京召开了高等工业专科学校机电一体化教学与教材研讨会,研讨了机械行业技术发展的大趋势,认为办好机、电、计算机紧密结合的新机电工程专业,培养制造、调试、使用、维修机电一体化产品的机电一体化人材是非常必要的。为给机电一体化专业奠定物质基础,会议决定立即组织第一批急需的机电一体化专业系列教材,初步确定了各教材的主编、协编和主审人员。1995年4月机械工业部教材编辑室又在长沙召开了各课程编写大纲协调会,并进一步调整、落实了编审班子。会后各参编教师立即行动,认真撰写,在1995年9月威海召开的审稿会的基础上,历经了一年左右时间,这一套统编教材终于陆续交稿出版。

这批教材的出版是我们对机电工程(机电一体化)专业教学的一种尝试,希望它能满足各校的教学所需,这套教材在组织编写过程中得到了众多学校和老师的热心帮助,在这里特向吴善元、盛善权、黄鹤汀、易泓可等诸位老师表示衷心的感谢。

机械工业部教材编辑室

前 言

本书是高等专科学校机电一体化专业系列教材之一。

为能体现高等专科学校教学的特色,该书在编写过程中,力求在保证必要的基本理论的前提下,注重基本知识、基本分析方法和基本技能的培养,尽量避免繁琐公式的推导,贯彻理论和工程实际相结合,以便达到高等专科学校培养目标的要求。本书突出以下几个特点:

1) 内容上分为模拟电子技术、数字电子技术及电力电子器件三部分,而重点放在数字电子技术方面。

2) 遵循教学规律,教材内容由浅入深,由易到难,由简到繁,循序渐进。

3) 在模拟电子技术内容上,重点突出集成运算放大器的外特性及其应用,而把半导体器件当做基础知识,篇幅上尽量压缩、精简。在数字电子技术中,把逻辑代数和分立元件的门电路,当做基础知识介绍,内容上进行了删减,以突出中规模集成数字电路及其应用。

4) 每章都列举了一定数量的例题,使读者便于掌握基本电路的分析和计算方法,以培养学生分析问题和解决问题的能力。

本书教学参考学时范围,根据“高等专科学校机电一体化专业电子技术教学大纲要求”,定为70~80学时(不包括实验学时),而数字电子技术部分占1/2。本书读者对象是高等专科学校机电一体化专业师生,亦可供职业大学、业余大学有关专业师生选用。

本书由济南大学副教授陈庆礼任主编(编写第三、四章),南京机械高等专科学校讲师董尔令任副主编(编写第七、九章),常熟市高等专科学校讲师张广煜编写第一、八章,天津职业大学讲师王嵩尘编写第五、六、十章,丹东市纺织高等专科学校讲师赵业平编写第二、十一章。徐州彭城大学周脉林副教授担任主审。

周脉林副教授对书稿进行了认真、负责、全面的审阅,提出了许多宝贵的意见,彭城大学高级工程师冯兴才审阅了数字电子技术部分,也提出许多修改意见,编者在此表示衷心的感谢。

电子技术在飞速发展,教材内容应不断更新,由于时间仓促和编者的水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

符号说明

一、基本符号

1. 电流和电压

i, u	电流、电压瞬时值
I, U	直流电流、电压值；正弦电流、电压有效值
i_B, i_C, i_E	基极、集电极、发射极电流总瞬时值
i_b, i_c, i_e	基极、集电极、发射极电流交流分量瞬时值
I_{BQ}, I_{CQ}, I_{EQ}	基极、集电极、发射极静态电流
I_b, I_c, I_e	基极、集电极、发射极电流有效值
U_{CC}	放大电路直流电源电压
U_{DD}	MOS 电路漏极直流电压
U_{SS}	MOS 电路源极直流电压
U_i	正弦输入电压有效值
U_I	直流输入电压
U_f	反馈电压有效值
U_o	正弦输出电压有效值
U_O	直流输出电压
U_s	信号源电压有效值
U_T	温度的电压当量和参考电压
$\bar{u}_{DI}, U_{DI}$	稳压电路输入电压平均值
$\bar{u}_{DO}, U_{DO}$	稳压电路输出电压平均值
i_{VD}, u_{VD}	整流二极管电流、端电压瞬时值
$\bar{i}_{VD}$	整流二极管电流平均值
U_{RM}	整流二极管反向峰值电压
$\bar{i}_L$	整流电路负载平均值

2. 电阻、电容、电感

r	动态电阻
R	电阻
R_P	电位器
R_b	三极管基极外接电阻
R_c	集电极外接电阻
R_e	发射极外接电阻
R_L	负载电阻
R_s	信号源内阻或源极外接电阻

C	电容
C_e	发射极旁路电容
C_s	源极旁路电容
L	电感
3. 功率	
P	功率通用符号
p	瞬时功率
P_E	电源功率
P_o	输出功率
P_{OM}	最大输出功率

4. 频率

f	频率
ω	角频率
f_{bw}	通频带
f_h	放大电路的上限频率
f_l	放大电路的下限频率
f_o	振荡频率

5. 放大倍数

A	放大倍数
A_u	电压放大倍数
A_{us}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数
A_{uf}	有反馈时的放大倍数
A_{usf}	有反馈且考虑信号源内阻时的电压放大倍数
A_d	差模放大倍数
A_c	共模放大倍数
F	反馈系数

二、器件参数符号

g_m	跨导
$U_{GS(off)}$	场效应晶体管夹断电压
$U_{GS(th)}$	场效应晶体管开启电压
I_{CBO}	发射开路集电极和基极之间反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路集电极和发射极之间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流

I_{DSS}	结型场效应晶体管饱和漏极电流
I_{VS}	稳压管的稳定电流
I_{VSM}	稳压管的最大稳定电流
P_{CM}	集电极最大允许功率损耗
U_{VS}	稳压管稳定电压
$\bar{\beta}$ 、 β	三极管共射电流放大系数
α	三极管共基电流放大系数
U_{os}	失调电压
I_{os}	失调电流
K_{CMR}	共模抑制比

三、其它符号

K	绝对温度
T	周期、温度、变压器
θ	晶闸管的导通角

φ	初相角
η	效率、分压比
t	时间
S_R	转换速率
S_r	稳压系数
S_l	负载调整特性
N	电子型半导体
P	空穴型半导体
VD	二极管
VS	稳压二极管
V、VT	三极管和晶闸管
VF	场效应晶体管
q	脉冲占空比

目 录

序	
前言	
符号说明	
第一章 半导体器件及整流电路	1
第一节 半导体二极管及整流电路	1
第二节 稳压管稳压电路	9
第三节 半导体三极管	11
第四节 场效应晶体管	16
习题	21
第二章 基本放大电路	24
第一节 基本放大电路的组成及原理	24
第二节 场效应晶体管放大电路	33
第三节 直接耦合放大电路	36
第四节 功率放大电路	41
习题	44
第三章 集成运算放大电路及其应用	48
第一节 概述	48
第二节 集成运算放大电路	48
第三节 理想集成运算放大电路的分析方法	52
第四节 负反馈放大电路	53
第五节 基本运算电路	62
第六节 信号处理电路	69
第七节 波形产生电路	74
第八节 集成运放线性放大电路应用举例	79
第九节 集成运放的使用问题	81
习题	83
第四章 直流稳压电源	92
第一节 串联型稳压电源电路	92
第二节 稳压电路的质量指标	95
第三节 集成稳压电源	96
第四节 开关稳压电源	98
习题	101
第五章 逻辑代数基础	104
第一节 数制与码制	104
第二节 逻辑代数的基本运算	107
第三节 基本逻辑定律及规则	111
第四节 逻辑函数的代数法化简	113
习题	115
第六章 组合逻辑电路	117
第一节 门电路	117
第二节 组合逻辑电路的分析和设计方法	124
第三节 编码器	128
第四节 译码器	133
第五节 数据选择器	138
第六节 加法器与比较器	140
习题	145
第七章 时序逻辑电路	148
第一节 触发器	148
第二节 时序逻辑电路的分析	156
第三节 计数器	157
第四节 寄存器和移位寄存器	175
习题	181
第八章 脉冲及整形电路	188
第一节 555 集成定时器	188
第二节 施密特触发器	190
第三节 单稳态触发器	193
第四节 多谐振荡器	201
习题	203
第九章 数/模和模/数转换器	208
第一节 概述	208
第二节 数/模转换器 (DAC)	208
第三节 模/数转换器 (ADC)	215
习题	223
第十章 半导体存储器	225
第一节 半导体读写存储器	225
第二节 半导体只读存储器	230
第三节 可编程逻辑器件	235
习题	236
第十一章 电力电子器件	237
第一节 功率二极管	237
第二节 晶闸管	237

第三节 功率晶体管及功率场效应晶体	
管	242
习题	244
附录	245
附录 A 半导体分立器件型号命名方法 ...	245
附录 B ZP 系列普通功率二极管型号和	

主要参数	246
附录 C 肖特基二极管参数	247
附录 D KP 型晶闸管规定的特性参数	247
附录 E 国产 GTO 器件参数	247
附录 F 国产 GTR 参数	248
参考文献	249

第一章 半导体器件及整流电路

第一节 半导体二极管及整流电路

一、半导体基础知识

(一) 物质的导电性

在日常生活和生产实践中,有许多物质很容易导电,它们叫做导体,如金、银、铜、铝、铁等金属材料;而有许多物质是不容易导电或完全不导电,它们叫做绝缘体,如塑料、陶瓷、橡胶、玻璃等材料。还有一类物质,其导电能力介于导体和绝缘体之间,它们叫做半导体,如硅、锗及大多数金属氧化物。

物质的导电性为什么有这样的差异呢?主要原因在于物质内部原子的结合方式及原子本身的结构不同。

(二) 半导体的导电特性

半导体之所以引起人们注意并得到广泛应用,其主要原因并不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间,而在于它的导电能力在不同条件下(如掺杂、光照、受热)有很大的差别。根据这一特性,即可将半导体做成各种热敏元件、光敏元件、二极管、晶体管及场效应晶体管等半导体器件。

(三) 本征半导体

纯净的半导体叫做本征半导体。锗和硅是应用最多的半导体材料,它们最外层都有四个价电子,也被称为四价元素。本征半导体的原子结构如图 1-1 所示。

在本征半导体的晶体结构中,每个原子与相邻四个原子结合,每个原子的一个价电子与另一个原子的一个价电子组成电子对。这对价电子为两相邻原子所共有,构成共价键结构,如图 1-2 所示。这样,每个原子的每一个价电子除了受到自身原子核的束缚外,还受到共价

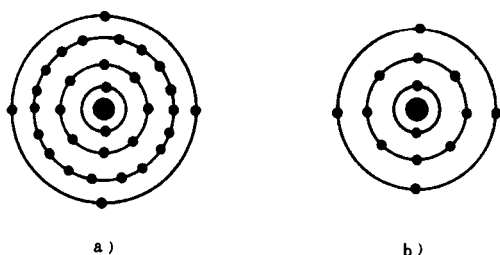


图 1-1 锗和硅的原子结构
a) 锗 (Ge) b) 硅 (Si)

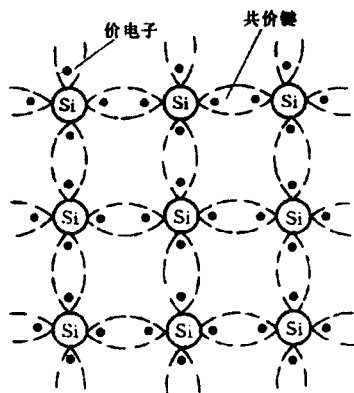


图 1-2 硅单晶中的共价键结构

键的束缚。因此，每个价电子都处于较为稳定的状态。但是共价键的电子还不像绝缘体中的价电子被束缚得那样紧，在获得一定能量（光照或温升）后，即可挣脱束缚成为自由电子。温度愈高，晶体中产生的自由电子愈多。

值得注意的是，共价键中的电子成为自由电子后，同时留下一个空位，称为空穴。在正常情况下，原子是中性的。当电子成为自由电子后，原子的中性被破坏而显出带正电。因此可以认为空穴带有正电荷。当相邻共价键中的价电子来填补这个空穴时，这个空穴便消失，同时在相邻共价键中出现了一个新的空穴。这个新空穴可能还被别的共价键中的电子所填补，这种价电子接连不断地填补空穴的运动，相当于空穴自身的迁移运动（见图 1-3）。这种空穴的迁移运动和自由电子在共价键外的自由运动相似。因此可以把空穴看成是带正电荷的载流子。

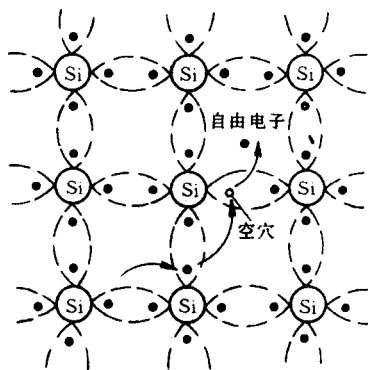


图 1-3 空穴和自由电子的形成

由此可见，半导体中存在两种载流子：带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。这是半导体导电方式的最大特点，也是半导体与金属导体在导电原理上的本质差别。

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现，同时又不不断复合。在一定温度条件下，电子-空穴对的产生和复合达到动态平衡，于是半导体中维持一定数目的载流子。当温度升高时，电子-空穴对数目增多，导电性能增强。所以温度对半导体器件性能影响极大。

（四）杂质半导体

本征半导体虽然有两种载流子，但在常温下其数量极少，导电能力很差。如果在其中掺入某种微量杂质元素，将使掺杂后的半导体（杂质半导体）的导电性能大大增强。根据掺入的杂质不同，杂质半导体可分为两类：N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体 在四价元素硅或锗中掺入少量磷（或其它五价元素），磷原子最外层有五个价电子。当硅晶体中某些位置上的硅原子被磷原子替代后，只需要四个价电子参加共价键结构，多余的一个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子，如图 1-4 a 所示。

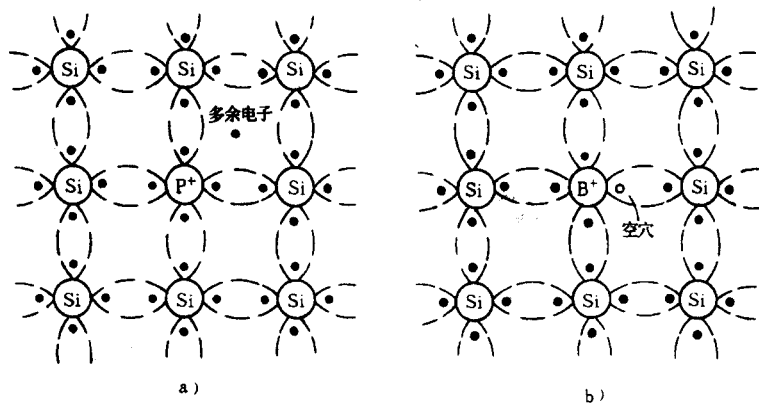


图 1-4 P 型和 N 型半导体结构示意图

a) N 型 b) P 型

于是杂质半导体中的自由电子数目大大增加，自由电子导电成为这种杂质半导体的主要导电方式，故称这种杂质半导体为电子半导体或N型半导体。在N型半导体中，自由电子是多数载流子，而空穴是少数载流子。

2. P型半导体 在四价元素硅或锗中掺入少量硼（或其它三价元素），硼原子最外层有三个价电子，当其构成共价键时，将因缺少一个电子而形成一个空穴，如图1-4b所示。这样，在杂质半导体中形成大量空穴，空穴导电成为这种杂质半导体的主要导电方式，故称这种杂质半导体为空穴半导体或P型半导体。在P型半导体中，空穴是多数载流子，而自由电子是少数载流子。

值得注意的是，无论是N型还是P型半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但整体上仍然呈中性。在外电场作用下，杂质半导体的导电能力有了较大的增强，但是它还是没有实用价值。只有将两种杂质半导体做成PN结后才成为半导体器件。

二、PN结的形成及其单向导电性

（一）PN结的形成

当P型半导体和N型半导体通过一定工艺结合为一体时，在界面必然要发生由于载流子浓度不均匀分布而引起的电子和空穴的扩散运动，即P区的空穴向N区扩散，N区的电子向P区扩散，如图1-5所示。扩散的结果，在界面附近的P区留下一些带负电的杂质离子（用 $\ominus$ 表示），而N区则留下一些带正电的杂质离子（用 $\oplus$ 表示）。因此在界面形成了一个空间电荷区，也就是PN结。该空间电荷区在界面形成一个内电场，其电场方向恰好与多数载流子的扩散方向相反，它对多数载流子的扩散运动起阻碍作用；另一方面，内电场对少数载流子则可推动其越过PN结而进入对方区域。少数载流子在内电场作用下的这种运动叫漂移运动。

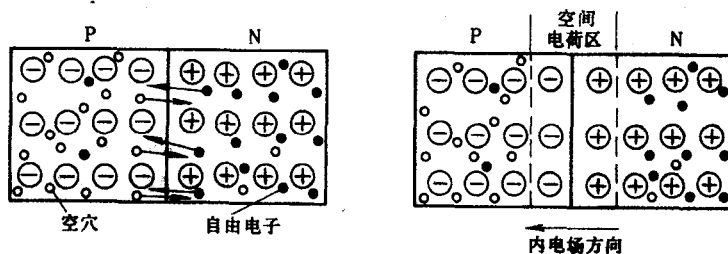


图 1-5 PN 结的形成

扩散运动和漂移运动是互相联系，又互相矛盾的。在一定的温度条件下，两种运动达到动态平衡，空间电荷区的宽度基本稳定下来，此时，PN结处于相对稳定的状态。

（二）PN结的单向导电性

如果在PN结上加正向电压，即外电源正极接P区，负极接N区，如图1-6a所示。由图可见，外电场与内电场方向相反，PN结的动态平衡被破坏，使空间电荷区的宽度变窄，多数载流子的扩散运动增强，并从电源中不断得到补充，形成较大的扩散电流——正向电流。此时PN结呈低阻状态。

如果在PN结上加反向电压，如图1-6b所示，则外电场与内电场方向相同，也会破坏PN结的动态平衡，空间电荷区变宽，多数载流子的扩散运动无法进行，而少数载流子的漂移运

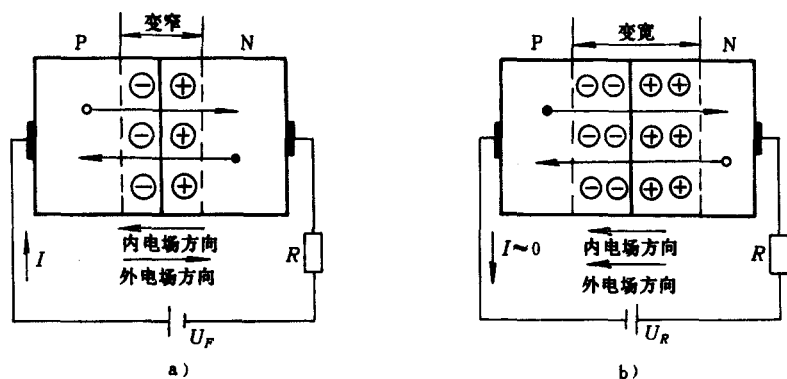


图 1-6 PN 结的单向导电性

a) PN 结加正向电压 b) PN 结加反向电压

动却能顺利进行，形成漂移电流——反向电流。由于少数载流子的浓度在常温下很小，故反向电流不大，因此又被称为反向饱和电流。此时 PN 结呈高阻状态。因为少数载流子的浓度是由温度决定的，所以温度的变化对 PN 结的反向电流大小的影响极其明显。

由此可见，PN 结具有单向导电性。当 PN 结加正向电压时，PN 结电阻较小，正向电流较大，PN 结处于导通状态；当 PN 结加反向电压时，PN 结电阻很大，反向电流极小，甚至可以忽略不计，PN 结处于截止状态。

三、整流二极管

(一) 整流二极管的结构

整流二极管是由 PN 结加上引出线和管壳所组成，图 1-7 所示为几种常见类型及图形符号。

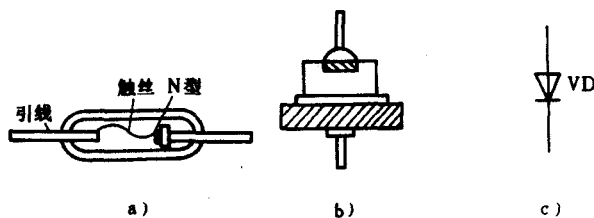


图 1-7 整流二极管

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 图形符号

点接触型二极管的特点是 PN 结的结面积小，因而结电容小，不能通过较大电流，适用于高频和小功率状态工作，也能用作数字电路的开关器件。

面接触型二极管的 PN 结的结面积大，结电容也大，故其可通过较大电流，但其工作频率低，一般用作电源整流。

(二) 伏安特性

PN 结二极管电流与端电压的关系可由下式表示

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

式中 I ——流过二极管的电流；

U ——二极管两端外加电压；

U_T ——温度的电压当量，在常温下一般取 $U_T = 26\text{mV}$ ；

I_S ——二极管反向饱和电流。

式 (1-1) 是理想的二极管电流方程，从式中的关系可得图 1-8 所示的二极管伏安特性曲线。

在二极管伏安特性曲线上,大致可将其分为三个部分。

1. 正向特性部分 当外加正向电压较低时,外电场还不足以克服PN结内电场对多数载流子扩散运动的阻力,故正向电流很小,几乎为零。当正向电压增加并超过一定数值后,电流增长很快。这个“一定数值”的电压称为门槛电压,它的大小与半导体材料及环境温度有关。通常硅管的死区电压约为0.5V,锗管约为0.2V。

当 U 大于 U_T 几倍时,式(1-1)中的 $e^{U/U_T} \gg 1$,则式中第二项可略去, $I \approx I_S e^{U/U_T}$ 。可见二极管正向特性曲线近似于指数曲线。

2. 反向特性部分 当外加反向电压时,式(1-1)中的 $e^{U/U_T} \approx 0$, $I \approx -I_S$,且反向电流值很小。在同样的温度下,硅管的反向电流更小,是纳安级(nA),而锗管是微安级(μA)。

二极管反向电流具有两个特点:一是它随温度的升高增长很快;二是当反向电压不超过某范围时,反向电流很小且基本恒定,与反向电压的大小几乎无关。

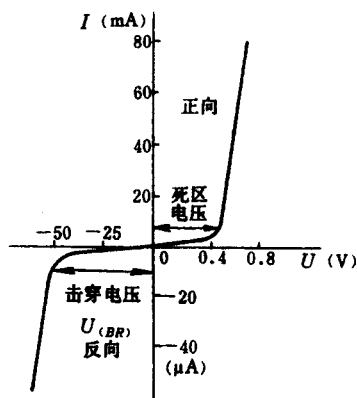


图 1-8 二极管 2CP 伏安特性曲线

3. 反向击穿部分 当反向电压超过一定值时,反向电流突然增大,二极管失去单向导电性,式(1-1)也不适用该部分。这种现象称为反向击穿现象。发生击穿的原因,一种是外电场过强,破坏了共价键结构,把价电子直接拉出,使少数载流子数目剧增,反向电流突然增加;另一种原因是处于强电场中的载流子获得足够大的能量去碰撞原子,产生新的电子空穴对,而新的载流子获得能量后又通过碰撞再产生电子空穴对。如此连锁反应使反向电流急剧增加。以上两种原因产生的击穿现象称为电击穿。产生击穿时在二极管两端所加的反向电压叫反向击穿电压,记作 $U_{(BR)}$ 。

如果二极管在反向击穿时没有适当的限流措施,造成二极管过热而损坏,这种击穿就叫做热击穿,在使用中应尽量避免。

(三) 主要参数

1. 最大整流电流 I_{FM} 指二极管长期运行时允许流过的最大正向平均电流。其大小由PN结的面积及散热条件决定。

2. 最大反向工作电压 U_{RM} 二极管运行时允许承受的最大反向电压。为避免二极管反向击穿,通常将二极管及向击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半定为 U_{RM} 。

3. 反向峰值电流 I_{RM} 指在常温下和最大反向电压下的反向电流值。该值愈小,二极管单向导电性能愈好。温度对 I_{RM} 影响大,使用时应加以注意。

四、整流二极管整流滤波电路

整流二极管应用范围很广泛,主要是利用其单向导电性,可用于整流、检波、器件保护及在数字电路中作开关元件等。

(一) 二极管整流电路

1. 单相半波整流电路 图 1-9 所示是单相半波整流电路。它由变压器 TR、整流二极管 VD 及负载电阻 R_L 组成。

设变压器二次线圈电压为

$$u = \sqrt{2} U \sin \omega t$$

式中 U ——变压器二次交流电压有效值；

ω ——交流电压角频率。

其波形图如图 1-10a 所示。

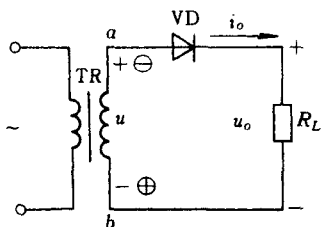


图 1-9 单相半波整流电路

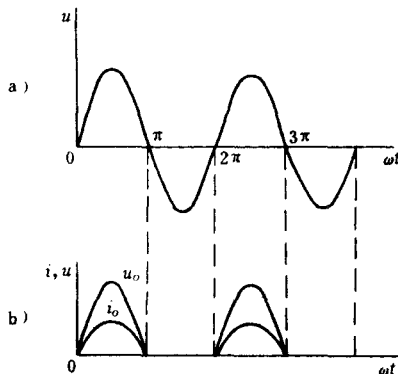


图 1-10 单相半波整流电路的电压、电流波形图

a) 输入交流电压波形 b) 输出电压、电流波形

由于二极管具有单向导电性，故当 T 二次电压 u 为正半周时，其极性为上正下负（见图 1-9），二极管承受正向电压而导通。这时负载电阻 R_L 上的电压为 u_o ，通过 R_L 的电流为 i_o 。在电压 u 的负半周时，二极管承受反向电压而截止，负载电阻 R_L 上没有电压输出。因此在正弦交流电压的一个周期内，负载 R_L 上得到的是半个周期的整流输出电压 u_o ，故称这种电路为半波整流电路。由于二极管 VD 导通时其正向压降很小，可以忽略不计，所以可认为 u_o 的波形与 u 的正半周波形相同。

负载上得到的虽然是单方向且大小也变化的单向脉动电压，但可以用一个周期内的电压平均值来衡量。单相半波整流电压的平均值为

$$\begin{aligned} U_{DO} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \sqrt{2} U / \pi \approx 0.45U \end{aligned} \quad (1-2)$$

如图 1-11 所示，若使半个周期正弦波与横轴所包围的面积等于一个矩形的面积，矩形的宽度为周期 T ，则矩形的高即是这个半波整流输出电压的平均值 U_{DO} 。

由式 (1-2) 可得出整流电流的平均值

$$I_{DO} = U_{DO} / R_L = 0.45U / R_L \quad (1-3)$$

我们在选择整流电路器件时，不但要根据负载所需要的直流电压和直流电流，还要考虑二极管截止时所承受的最大反向电压 U_{RM} 。显然在单相半波整流电路中，二极管截止时承受的最高反向电压即变压器二次交流电压 u 的最大值 U_m ，即

$$U_{RM} = U_m = \sqrt{2} U \quad (1-4)$$

这样可根据 U_{DO} 、 I_{DO} 、 U_{RM} 选择合适的整流二极管。半波整流的优点是电路简单，只需一个二极管，其缺点是输出电压脉动大。

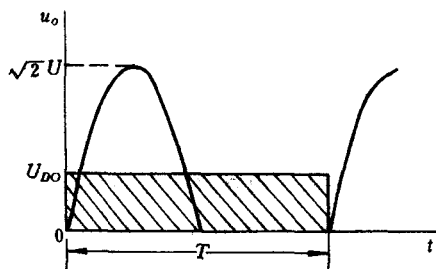


图 1-11 半波电压 u_o 的平均值 U_{DO}

2. 单相桥式整流电路 图 1-12 所示为单相桥式整流电路及其电压与电流波形图。

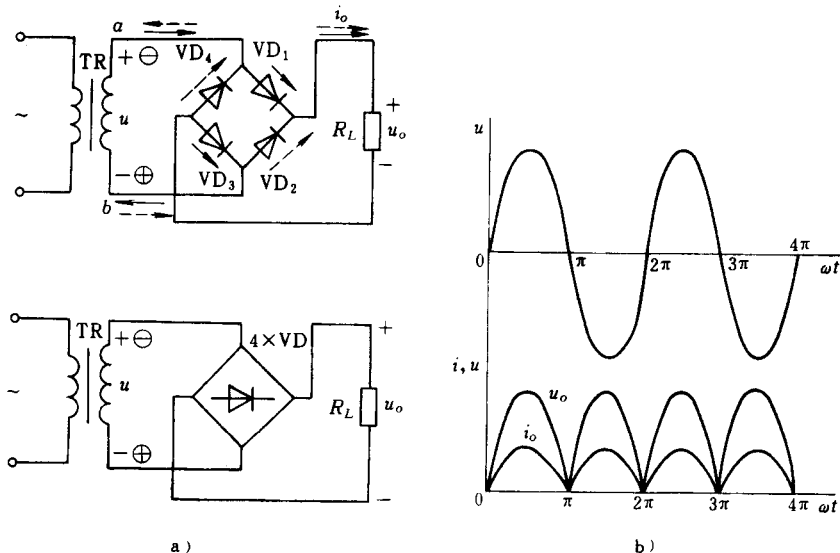


图 1-12 单相桥式整流电路

a) 电原理图 b) 电压电流波形图

当 u 为正半周时, a 点电位高于 b 点, 二极管 VD_1 和 VD_3 导通, VD_2 和 VD_4 截止, 电流 i_1 的通路是 $a \rightarrow VD_1 \rightarrow R_L \rightarrow VD_3 \rightarrow b$ 。这时在 R_L 上得到一个半波电压, 如图 1-12b 中 $0 \sim \pi$ 段所示。

当 u 为负半周时, a 点电位低于 b 点, 二极管 VD_1 和 VD_3 截止, VD_2 和 VD_4 导通, 电流 i_2 的通路是 $b \rightarrow VD_2 \rightarrow R_L \rightarrow VD_4 \rightarrow a$, 同样在 R_L 上得到一个半波电压, 如图 1-12b 中 $\pi \sim 2\pi$ 段所示。

显然, 全波整流电路比半波整流电路的输出电压脉动减小且平均值 U_{DO} 增大了一倍, 即

$$U_{DO} = 2 \times 0.45U = 0.9U \quad (1-5)$$

负载电阻 R_L 中的电流平均值为

$$I_{DO} = U_{DO} / R_L = 0.9U / R_L \quad (1-6)$$

在半个周期内, 只有两个二极管导通, 因此每个二极管中流过的平均电流只有负载电流的一半, 即

$$I_{VD} = I_{DO} / 2 = 0.45U / R_L \quad (1-7)$$

在半个周期内, 两个截止的二极管所承受的最高反向电压为变压器二次电压的最大值, 即

$$U_{RM} = U_m = \sqrt{2}U \quad (1-8)$$

可见, 桥式整流电路的 U_{RM} 值与半波整流电路的相同。

(二) 电源滤波电路

上面分析的几种整流电路所得到的输出电压都是单向脉冲电压。为了改善输出电压的脉动程度, 往往在整流电路后加接滤波电路。下面介绍两种常用的滤波电路。

1. 电容滤波电路 图 1-13 所示在负载电阻 R_L 上并接一个电容器 C , 就是一个简单的

滤波电路。它的工作原理可以用电容器的充放电过程来说明。

如果单相半波整流电路中不接滤波电容器 C ，输出电压 u_o 的波形如图 1-14a 所示。当加接电容器 C 后，输出电压 u_o 的波形如图 1-14b 所示。

当二极管 VD 导通时，一方面给负载提供电流，同时对电容器 C 充电。在二极管正向压降忽略时，充电电压 u_c 与上升的正弦电压 u 一致，见图 1-14b 中 $0m$ 段。 u 值在 m 点到达最大值， u_c 也到达最大值。而后 u 和 u_c 开始下降， u 按正弦规律下降， u_c 按放电曲线下降。当 $u < u_c$ 时，VD 承受反向电压而截止，电容 C 上的电压 u_c 经 R_L 放电，负载中仍存在电流，见图 1-14b 中的 $m'n'$ 段。在 u 的下一个周期正半周内，当 u 上升达到 $u > u_c$ 时，VD 再次导通，电容器 C 再次充电，重复上述过程。

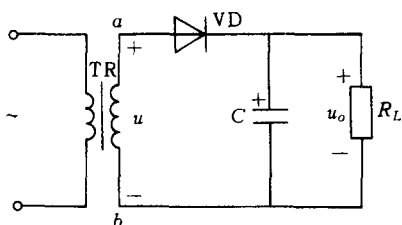


图 1-13 电容滤波电路

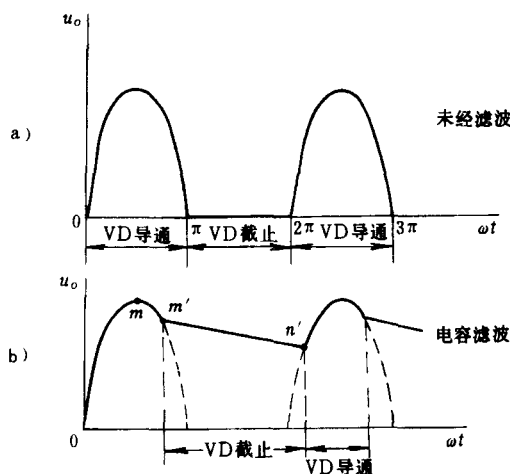


图 1-14 电容滤波电路的输出电压波形

a) 未接 C 时 b) 加接 C 后

因为 C 是与 R_L 并联的，所以 u_c 就是输出电压 u_o 。可见，加了滤波电容器 C 后，输出电压的脉动系数大为减小，而且还提高了输出电压的平均值 U_{DO} 。

在空载（即 $R_L = \infty$ ， $I_{DO} = 0$ ）和忽略二极管正向压降时，当 $u < u_c$ ，VD 截止，电容器 C 无放电回路，则 $U_{DO} \approx \sqrt{2}U \approx 1.4U$ 。当负载加重（即 R_L 减小、 I_{DO} 增大），放电时间常数（ $\tau = R_L C$ ）减小，则放电速度加快， U_{DO} 也下降。整流电路的输出电压 U_{DO} 与输出电流 I_{DO} 的变化关系曲线称为电容滤波电路的外特性，如图 1-15 所示。由图可见，与无电容滤波的电路相比，其外特性较差，或者说它的带负载能力较差。

为了取得较好的滤波效果，我们取 $R_L C \geq (3-5) T/2$ 。式中 T 为电网电压周期。这时输出电压近似为

$$\left. \begin{aligned} U_{DO} &\approx U \text{ (半波)} \\ U_{DO} &\approx 1.2U \text{ (全波)} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

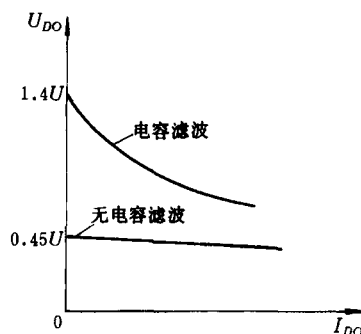


图 1-15 电容滤波电路的外特性

此外，外接电容器滤波后，二极管 VD 的导通时间缩短了（小于 180° ），而且电容放电