

现代电力电子技术基础

赵良炳 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是一本从应用观点出发,简明扼要阐述现代电力电子学基础知识的专门书籍。本书以自关断器件及其电路为主,深入浅出地介绍了现代场控器件的工作原理、特性及其应用技巧;论述了各种典型电能变换电路的工作原理、波形分析及定量计算;同时还就当代电力电子学界感兴趣的诸问题——抑制网侧电流谐波、改善网侧功率因数、逆变器输出功率和波形控制、谐振开关技术、谐振环逆变器以及电力电子装置的可靠性和电磁兼容性等,结合科研实践,做了比较全面和深入的讨论,以拓宽读者的思路。

本书可供高等院校有关电力电子专业的大学生和研究生作为教材和参考书,也可供科研单位、高新技术公司等专门从事电力电子技术工作的广大科技人员和工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子技术基础/赵良炳编著. —北京:清华大学出版社,1995

ISBN 7-302-01787-5

I. 现… I. 赵… III. ① 电力系统-基础理论 ② 电子技术-基础理论 IV. ①
TM71 ② TN02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 02291 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:北京市海淀区清华园印刷厂

发行者:新华书店总店科技发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:12.25 字数:291 千字

版 次:1995 年 5 月 第 1 版 1995 年 5 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-01787-5/TM·20

印 数:0001—5000

定 价:11.00 元

前 言

利用 60 年代发展起来的晶闸管以及 70 年代取得迅速进展的自关断器件(巨型晶体管和可关断晶闸管)构成的电力电子装置和系统,在消除网侧电流谐波,改善网侧功率因数,逆变输出波形控制,减少环境噪声污染,进一步提高电能利用率、降低原材料消耗以及提高系统的动态性能等方面都遇到了困难,即使勉强地加以处理,技术上也显得非常复杂和麻烦。究其原因,最主要的限制因素是上述器件的工作频率低下,控制不便,因而都无法方便地实施 20kHz 高频调制技术。也就是说,利用传统的低频电力电子技术处理电能变换问题不是一种理想的办法。

80 年代急速兴起的场控自关断器件(绝缘栅双极型晶体管、静电感应晶体管和晶闸管、功率场效应晶体管和 MOS 栅控晶闸管)都是集高频、高压和大电流于一身的性能优越的电压控制器件。它的出现改变了人们长期以来以低频技术处理问题的习惯,转入到以高频技术处理电力电子技术问题的阶段,即进入现代电力电子学发展的时期。电力电子学这一新进展,为下列问题提供了技术保证:

- (1) 网侧和输出侧的谐波得到了有效的改善;
- (2) 网侧功率因数可方便地实施接近 1 的控制;
- (3) 进一步提高装置的效率;
- (4) 加快电力电子系统的动态响应;
- (5) 大幅度地降低原材料消耗和减少设备的占地面积;
- (6) 有效地控制环境噪声污染。

也就是说,以高频技术处理问题的现代电力电子学将使人们进入电能变换,特别是频率变换能更加自由控制的年代,并充分发挥其节约电能、降低原材料消耗以及提高装置运行性能的作用,从而进一步扩展了它的应用范围。因此,可以预言,现代电力电子技术和装置将成为跨世纪的主导技术和主流产品。

正是基于上述考虑,特编写本书,以便为读者了解、学习和研究现代电力电子学提供一本比较实用的基础书籍。本书从应用现代电力电子学的观点出发,以自关断器件及其电路为主,简明扼要地阐明了现代电力电子器件的工作原理、特点及其应用技巧;论述了各种典型的电力电子变换电路的工作原理及其分析方法。同时本书还比较系统地介绍了人们非常感兴趣的国内外学者在抑制网侧电流谐波、改善网侧功率因数、逆变器输出功率和波形的控制、谐振开关技术和谐振环逆变器以及有关装置的可靠性和电磁兼容性等方面的研究成果,作为读者进一步深入研究的参考。

本书共分七章。第一章从应用的观点出发,简明扼要地阐明了场控器件的工作原理和特点;第二章介绍了传统的相控整流电路,并在分析其缺点的基础上,讨论了抑制和消除电力公害的方法和措施;第三章介绍 AC/AC 变换原理;第四章着重阐述了自关断器件构成的典型逆变电路的工作原理及其输出功率和波形的控制原理和方法;第五章介绍了四

种典型 DC/DC 变换电路、错位斩波技术以及避免共振的原理;第六章比较详细地介绍了硬开关(PWM)、软开关和软开关 PWM 概念,谐振开关的基本原理及其进展,谐振环逆变器原理及其应用前景。最后一章从可靠性观点出发,介绍可靠性和电磁兼容性的基本知识和设计原则,同时还就同可靠性有关的器件应用技巧、驱动电路设计考虑、缓冲电路和保护电路等问题进行了讨论。

最后,我要对本书出版给予大力帮助和支持的清华大学出版社和本书责任编辑表示衷心的感谢。我还要感谢帮助我绘图的亲人和所有其他同志。

作者

1994年2月于清华园

目 录

第一章 电力半导体器件的基本原理、特性及参数	1
1.1 电力半导体器件发展史及评述	1
1.2 半导体整流器	3
1.2.1 结型整流管	3
1.2.2 其它类型的整流管	7
1.3 双极型晶体管	7
1.3.1 晶体管工作原理及静态输出特性	7
1.3.2 晶体管开关工作状态	9
1.3.3 二次击穿和安全工作区	11
1.3.4 晶体管的电压参数说明	15
1.3.5 晶体管的主要参数	15
1.4 逆阻型晶闸管及其派生器件	16
1.4.1 晶闸管的工作原理及静态特性	16
1.4.2 晶闸管的开关过程及动态参数	19
1.4.3 晶闸管的 di/dt 耐量及工作寿命	21
1.4.4 逆阻型晶闸管的参数	21
1.4.5 有关晶闸管派生器件的说明	22
1.5 功率场效应晶体管(VDMOS)	27
1.5.1 VDMOS 工作原理及静态输出特性	27
1.5.2 VDMOS 管的电容	29
1.5.3 VDMOS 管的栅电荷曲线	30
1.5.4 VDMOS 管的参数及安全工作区	32
1.6 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	32
1.6.1 IGBT 的工作原理及静态输出特性	32
1.6.2 IGBT 的参数特点	33
1.6.3 IGBT 的过载能力	36
1.7 MOS 栅控晶闸管(MCT)	39
1.7.1 MCT 工作原理	39
1.7.2 MCT 的特点	41
1.7.3 MCT 和 IGBT 的性能比较	42
1.8 静电感应晶闸管(SITH)和晶体管(SIT)	43
1.8.1 静电感应器件工作原理	43

• II •

1.8.2	SITH 和 SIT 的静态特性	44
1.8.3	静电感应器件的动态性能	45
	思考与练习一	45
第二章	AC/DC 变换技术	48
2.1	AC/DC 变流器的分类	48
2.2	单相半波整流电路	48
2.2.1	不可控整流电路	48
2.2.2	可控整流电路	50
2.3	单相全波可控整流电路	55
2.3.1	单相半控桥式整流电路	55
2.3.2	单相全控桥式整流电路	57
2.3.3	有源逆变	59
2.3.4	单相双重变流器	59
2.4	三相 AC/DC 变流器	62
2.4.1	三相半波可控整流电路	63
2.4.2	换相重叠——电源变压器漏感的影响	64
2.4.3	三相半控桥式整流电路	66
2.4.4	三相全控桥式整流电路	69
2.4.5	三相双重变流器	71
2.5	高频整流问题	74
2.5.1	概述	74
2.5.2	影响高频整流效率的几个问题	74
2.6	相控整流电路的主要性能指标	75
2.7	电力公害及其改善措施	77
2.7.1	简述	77
2.7.2	网侧电流谐波的抑制技术	78
2.7.3	改善功率因数的措施	80
	思考与练习二	84
第三章	AC/AC 变换技术	87
3.1	逆阻型晶闸管的关断问题	87
3.2	AC/AC 变换的工作原理	89
3.2.1	工作原理	89
3.2.2	α 调制工作方式的实现	91
3.3	AC/AC 变换器典型电路	92
3.3.1	三脉波单相负载 AC/AC 变换器	92
3.3.2	三脉波和六脉波三相负载 AC/AC 变换器	95

3.3.3 AC/AC 变换器的控制原理	96
思考与练习三	98
第四章 DC/AC 变换技术	99
4.1 概述及逆变器分类	99
4.1.1 概述	99
4.1.2 逆变器的分类	100
4.1.3 逆变器的波形参数指标	101
4.2 基本的逆变电路	101
4.2.1 单相半桥式逆变电路(电压型)	101
4.2.2 单相桥式逆变电路(电压型)	103
4.3 谐振(负载)式逆变电路	104
4.3.1 概述	104
4.3.2 电压型串联谐振式逆变电路	105
4.3.3 电流型并联谐振式逆变电路	109
4.3.4 有关问题的讨论	112
4.4 三相逆变电路	115
4.4.1 概述	115
4.4.2 电压型三相桥式逆变电路	116
4.4.3 电流型三相桥式逆变电路	118
4.4.4 SCR 三相逆变电路	119
4.5 时间分割逆变电路	121
4.6 逆变器输出参数及谐波的控制	123
4.6.1 概述	123
4.6.2 逆变器输出电压的控制	124
4.6.3 逆变器输出功率的控制	128
4.6.4 逆变器输出谐波的控制	130
思考与练习四	132
第五章 DC/DC 变换技术	136
5.1 基本斩波器的工作原理	136
5.2 Buck 电路	140
5.3 Boost 电路	142
5.4 Buck-Boost 电路	144
5.5 Cuk 电路	145
5.6 晶闸管斩波电路	148
5.7 有关输入滤波问题	150
5.8 斩波器的电路结构	153

思考与练习五.....	154
第六章 谐振开关技术.....	155
6.1 概述	155
6.2 器件的损耗	156
6.2.1 典型的开关损耗	156
6.2.2 Buck 电路中器件的开关损耗.....	157
6.3 谐振开关式 DC/DC 变换器	158
6.3.1 谐振开关技术	158
6.3.2 零电流准谐振开关电路(ZCS-QRC)	158
6.3.3 零电压准谐振开关电路(ZVS-QRC)	160
6.3.4 零电压多谐振开关电路(ZVS-MRC)	161
6.4 谐振开关技术的发展	162
思考与练习六.....	169
第七章 电力电子装置及系统的可靠性.....	170
7.1 概述	170
7.1.1 可靠性的基本概念	170
7.1.2 常用的可靠性指标	170
7.1.3 关于寿命试验的说明	174
7.2 提高变流装置及系统可靠性的几个问题	175
7.2.1 正确使用电力电子器件	175
7.2.2 电磁兼容性与可靠性的关系	181
7.2.3 变流装置及系统的保护	184
思考与练习七.....	185
参考文献.....	187

第一章 电力半导体器件的基本原理、特性及参数

电力半导体器件是构成各种电力电子电路的三大核心元件(开关器件、电感和电容元件)中最为关键的器件。这些开关器件性能的优劣可在很大程度上决定电力电子设备的技术经济指标。在确定了主电路形式和控制方式之后,设计者就需把精力集中到合理选用电力半导体器件上。为此,设计者应对开关器件的基本工作原理、外部影响因素、器件的特性及参数等有比较全面和深入的理解。否则,设计出来的电路将很难达到预期目的。

本章将针对目前主要的开关器件(特别是场控自关断器件)进行深入浅出的阐述,以便为读者学习本书和今后深造打下基础。

1.1 电力半导体器件发展史及评述

50年代初期,普通的整流器(semiconductor rectifier—SR)已获得应用,实际上已开始取代汞弧整流器。这是因为它的正向通态压降(1V左右)远比汞弧整流器的(10~20V)小得多,从而大大提高了整流电路的效率。普通整流器通常应用于400Hz以下的整流电路中。随着中频(10kHz以下)和高频(10kHz以上)整流应用的开展,人们又开发出快恢复整流器以及适合于低压高频整流应用的肖特基整流管。这些快速整流器件的诞生,都是围绕着缩短整流器的正反向恢复时间,即降低整流器的开关损耗为目的进行研究所获得的结果。为了进一步减少高频低压开关电源中开关器件的损耗,80年代中后期,同步整流器也应运而生。

1957~1958年期间,美国研制出世界上第一只普通(400Hz以下)的反向阻断型可控硅(silicon controlled rectifier—SCR),后称晶闸管(thyristor)。经过60年代的工艺完善和应用开发,到了70年代,晶闸管已形成了从低压小电流到高压大电流的系列产品。在这期间,世界各国同时还研制出一系列晶闸管派生器件,如不对称晶闸管(asymmetrical thyristor—ASCR)、逆导晶闸管(reverse-conducting thyristor—RCT)、双向晶闸管(TRIAC)、门极辅助关断晶闸管(gate-assisted turn-off thyristor—GATT)、光控晶闸管(light-activated silicon controlled rectifier—LASCR)以及在80年代迅速发展起来的可关断晶闸管(gate-turn-off thyristor—GTO)。这些器件的绝大多数主要应用在低频(400Hz以下)领域,如高压直流输电、静止无功补偿、电解和电镀、大容量同步电机启动、交流调功、低频静止变频器以及交直流电机调速等。有的器件通过缩短少子寿命和设计合理的门极图形,使其工作频率提高到数千赫至20kHz(快速晶闸管和高频晶闸管),主要用于20kHz以下中高频领域,如中高频感应加热、甚低频晶闸管发射机电源、长波通信电源、电火花加工电源、中频X射线机电源、中频逆变式整流焊机、超声清洗电源以及小型轻量化电源等。由晶闸管及其派生器件所构成的各种电力电子装置在工业应用中主要解决了传统的电能变换装置中所存在的能耗大和装置笨重的问题,因此电能的利用率大大地提高了,同

时也使工业噪声得到一定程度的控制。但因晶闸管类型器件中,多数是换流型器件,其工作频率又比较低,致使脉宽调制(PWM)技术难以很好的实施,即使勉强实施,也带来电路复杂化和滤波困难等问题。因此,通常由其组成的装置出现网侧谐波成分高以及功率因数恶化的弊病,引起了所谓“电力公害”。

自1948年美国贝尔实验室发明第一只晶体管以来,经过20多年的努力,到了70年代,用于电力变换的晶体管已进入工业应用阶段。最近10年,研究人员又在工艺改进、晶体管模块化以及驱动电路集成等方面进行了许多研究,使得晶管的性能变得更好,应用起来也更加方便,它被广泛地应用于数百千瓦以下功率的电路。功率晶体管的工作频率比晶闸管高,达林顿功率晶体管可工作在10kHz以下,非达林顿功率晶体管的工作频率高于20kHz。这样,PWM技术在晶体管变换电路中得到了广泛的应用,并促使装置性能的进一步提高和传统直流电源装置的革新,出现了所谓“20千周革命”,直流线性调整电源迅速地被20kHz开关电源所取代。目前100kHz晶体管开关电源也已商用化。同时,晶体管还被广泛地应用于中小功率电机变频调速、不间断电源(UPS)、激光电源、功率超声电源、电磁灶、高频电子镇流器、中高频静止变频器等。但因功率晶体管存在着二次击穿、不易并联以及开关频率仍然偏低等问题,它的应用面受到了限制。

70年代后期,功率场效应管(power MOSFET)开始进入实用阶段,这标志着电力半导体器件在高频化进程中的一次重要进展。进入80年代,人们又在降低器件的导通电阻、消除寄生效应、扩大电压和电流容量以及驱动电路集成化等方面进行了大量的研究,取得了很大的进展。功率场效应管中应用最广的是电流垂流结构的器件(VDMOS)。它具有工作频率高(几十千赫至数百千赫,低压管可达兆赫)、开关损耗最小、安全工作区宽(几乎不存在二次击穿问题)、漏极电流为负温度特性(易并联)、输入阻抗高等优点,是一种场控自关断器件,是目前高频化电力电子技术赖以发展的主要器件之一。100A/1000V的VDMOS已商用化,研制水平达250A/1000V,其电流容量还有继续增大的趋势。由于VDMOS器件的开关损耗远比晶体管小得多,由其构成的开关电源的工作频率迅速地提高到数百千赫。500kHz的VDMOS开关电源已投放市场。在采用谐振开关技术时,其开关频率可进一步提高到数兆赫至几十兆赫,这时效率大于80%,出现了功率密度达到每立方英寸30~50W的所谓“卡片式”开关电源,引起了空间站电源、宇航电源、计算机电源以及智能化仪表电源等超小型化的变革。尽管VDMOS器件的开关速度非常快,但其导通电阻却与 $U^{2.5}$ 成正比,这就限制了它在高频中、大功率领域的应用。

80年代电力电子器件较为引人注目的成就之一就是开发出双极型复合器件。研制复合器件的主要目的是实现器件高压、大电流参数同其动态参数之间最合理的折衷,使其兼有MOS器件和双极型器件的突出优点,从而产生出较为理想的高频、高压和大电流器件。目前被认为最有发展前途的复合器件是绝缘栅双极型晶体管IGBT(insulated gate bipolar transistor)和MOS栅控晶闸管MCT(MOS controlled thyristor)。IGBT于1982年在美国率先研制出样品,1985年开始投产。目前研制水平为1500A/2000V,360A/1700V,1200A/1600V模块已投放市场。MCT是80年代后期出现的另一种比较理想的器件,目前研制水平为300A/2000V,1000A/1000V,最高电压达3000V。GE公司的50~100A/1000V MCT已投入市场。这两种器件均为场控器件,其工作频率都超过20kHz。它

们的出现为工业应用领域的高频化开辟了广阔的前景。IGBT 有取代 GTR 和 MOSFET 的趋势,而 MCT 有取代 SCR 和 GTO 的趋势,至少在比较广泛的应用范围内是这样的。这两种器件都可以应用于中、高频感应加热、高精度变频调速、UPS、开关电源、高频逆变式整流焊机、超声电源、高频 X 射线机电源、高频调整流电源以及各种高性能、低损耗和低噪声的场合。

80 年代期间发展起来的静电感应晶体管 SIT (static induction transistor) 和静电感应晶闸管 SITH (static induction thyristor) 是利用门极电场改变空间电荷区的宽度来开闭电流通道的原理制成的器件。SIT 是单极型器件, SITH 是双极型器件, 它们都具有高压、大电流和高频同时兼备的特点, 也是工业高频应用领域中很有发展前途的器件。利用 SIT 器件制成的 200kW/200kHz 感应加热电源已经问世。

总之, 80 年代飞速发展起来的场控器件为 90 年代的电力电子电路和装置的研制开发转入“高频场控换流”的轨道创造了极为有利的条件。对于电力电子技术来说, 这种转变是一次重大的技术突破, 具有深远的意义。

80 年代另一重要的发展是高压功率集成电路 (HVIC) 和智能功率集成电路 (smart power IC) 的研制和开发。它问世于 80 年代中期, 现已展现出极其诱人的应用前景。它们是在制造过程中, 将电力电子电路同微电子电路一起集成在一个芯片上或是封装在一个模块内产生的。它们是电力电子同微电子技术紧密结合的产物, 是今后微型化电力电子装置发展的方向。这两种功率集成电路的差别在于, 前者的电路比较简单, 功能单一; 而后的电路较复杂, 功能多样化, 同时具有信号检测及处理、系统自保护及自诊断功能等。它们实际上是一种微型化的功率变换装置, 应用起来更加方便、更加可靠。目前国际上已有若干产品投放市场, 如 PM50RHA120 等, 将首先在汽车电子化和家用领域获得应用。

上述历史回顾表明, 由于半导体制造工艺, 特别是功率集成制造技术日趋完善和精确以及新技术的应用, 新型电力电子器件的研制、开发和商品化周期日渐缩短。可以预料, 90 年代将进入电力电子技术飞速发展的时期, 它的发展将给工业进步带来很多的益处, 其前景无限广阔。

1.2 半导体整流器

1.2.1 结型整流管

(一) PN 结工作原理及静态特性

一种导电类型的半导体基片通过工艺方法 (扩散或合金法) 在其上形成导电类型相反的两部分, 则在交界面处形成了 PN 结, 如图 1.1(a) 所示。整流管是由 1 个 PN 结构成的, 其符号表示在图 1.1(b) 中, 它的特性与 PN 结的特性是一样的。

1. PN 结为零偏置

在 PN 结不加电压 (零偏置) 时, 交界面处两边的多子浓度差引起了两边的多子各自向对方区扩散, 致使 PN 结附近形成了一个空间电荷区, 建立了一个自建电场, 其方向如图 1.2(a) 所示, 该电场方向恰好起着阻碍多子扩散的作用, 直到建立动平衡为止, 空间电荷区也就展宽到一定的宽度。这时通过空间电荷区的多子扩散电流同在自建电场推动下

也通过空间电荷区的少子漂移电流相等,因此从总体上看,没有电流通过PN结。

2. PN结为正偏置

在PN结加正电压(正偏置)下,如图1.2(b)所示,外加电压削弱了内部电场,空间电荷区缩小了,因而也就削弱了自建电场对多子扩散的阻碍作用,原先的动平衡被破坏。这时P区的空穴不断地涌入N区,而N区的电子也会不断涌入P区,各自成为对方区中的少数载流子。我们把多数载流子在外加电压作用下不断向导电类型相反的区域运动的现象称为少子的注入。这些注入的多余载流子在几个扩散长度内被复合掉,在几个扩散长度之外的载流子运动为漂移运动,以维持电流的连续流动。这样,PN结中也就通过了一个正向电流。随着外加电压的增加,正向电流按指数规律增长,因此PN结的正向伏安特性如图1.3第一象限所示。

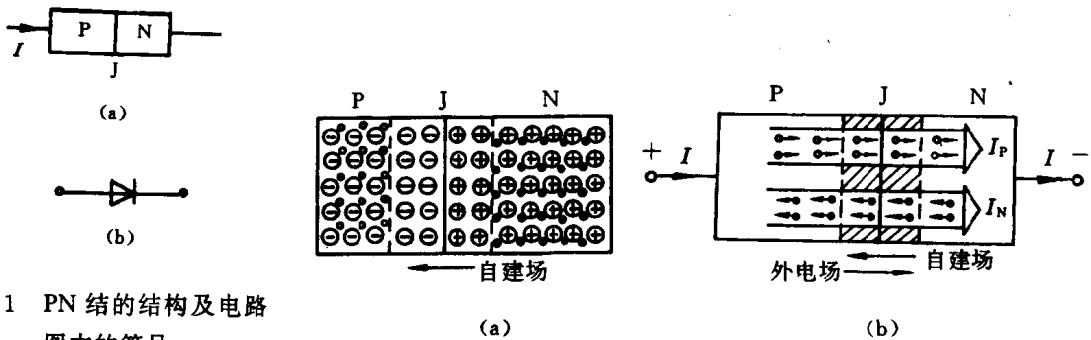


图 1.1 PN 结的结构及电路
图中的符号
(a) 结构; (b) 符号

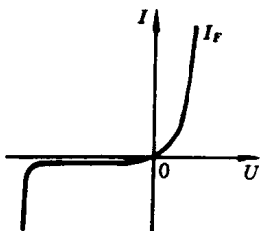


图 1.3 PN 结静态伏安特性

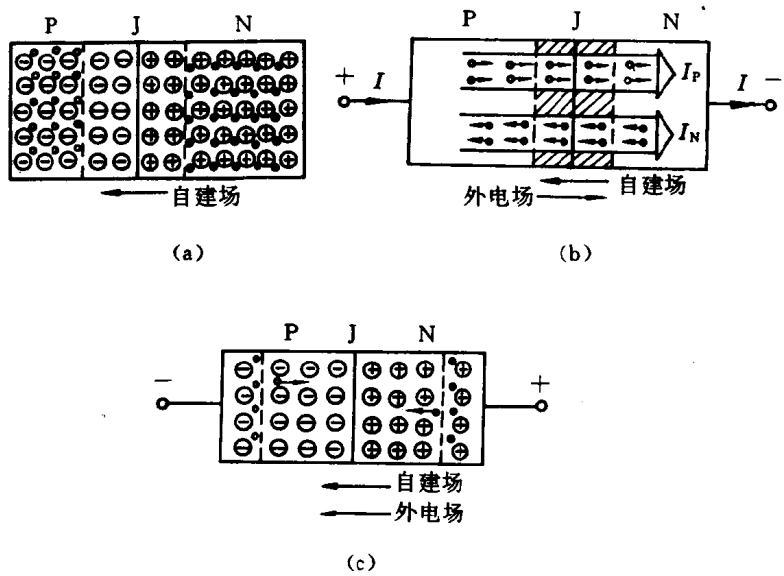


图 1.2 不同偏置下的 PN 结

(a) 零偏置下 PN 结; (b) 正偏置下 PN 结; (c) 反偏置下 PN 结

当PN结通过正向大电流时,其上的压降只有1V左右。这是因为在通过正向大电流时,注入基区(通常是N型材料)的空穴浓度大大超过原始N型基片的多子浓度,为了维持半导体中电中性条件,多子浓度也要相应大幅度地增加。这意味着,在大注入条件下原始基片的电阻率实际上大大地下降了,也就是电导率大大地增加了。我们把这种现象称为基区电导调制效应。这样一来,P和N区两端部的电压就维持在很低水平,即1V左右,所以正偏置的PN结相当于“低阻态”。在GTR,SCR,IGBT,SITH和MCT器件中都存在着这种电导调制效应,因此它们导通后的压降都很低。

3. PN结为反偏置

在PN结加上反向电压(反偏置)下,如图1.2(c)所示,外加电压加强了内部电场,从

而强烈地阻止 PN 结两边多子的扩散,多子的扩散电流变得微不足道。但对 PN 结两边的少子却不起阻碍作用,而以漂移电流形式通过空间电荷区,形成了 PN 结反偏置下的漏电流。也就是说,反偏置的 PN 结存在着少子抽取现象。由于 PN 结两边热平衡状态下的少子浓度很低,所以所形成的反向漏电流也就很小,而且随外加电压增大(雪崩击穿电压以内)变化很小。由此可知,反偏置的 PN 结相当“高阻态”。这时空间电荷区承受着全部外加电压。随着外加电压的增加,空间电荷区变宽,其内的场强也增加,当外加电压增加到空间电荷区内场强达到雪崩击穿强度时,反向漏电流急剧增加,故 PN 结反偏置时的伏安特性曲线如图 1.3 第三象限所示。雪崩击穿时,PN 结会因其内的损耗急剧增加而损坏,所以 PN 结上所加反向电压受雪崩击穿电压的限制。

由上面分析可知:

(1) 在具有 PN 结结构的器件中,参与导电的有两种相反类型的载流子(空穴和电子)。我们把有两种载流子参与导电的器件称为双极型器件(或少子器件),而只有一种载流子参与导电的器件称为单极型器件(或多子器件)。

(2) PN 结通过正向大电流时,在基区存在着强烈的电导调制效应,因此双极型器件通态压降比较小。

(3) 反偏置的 PN 结存在着少子抽取现象。空间电荷区内的雪崩击穿电场强度决定了 PN 结承受外加电压的大小。雪崩击穿前,反向漏电流很小,一旦出现雪崩击穿,反向漏电流急剧增加。

(4) PN 结的静态伏安特性曲线应如图 1.3 所示。PN 结正偏置时呈现“低阻态”,反偏置时呈现“高阻态”,即通常人们所说的,PN 结具有单向导电的整流特性。

(二) PN 结的动态行为

当整流管置于图 1.4 所示电路中,只要晶体管一直交替通断,那么,按照电路工作原理,整流管也一直交替通断地工作着。当电路迫使整流管(PN 结)从正向导通转入反向闭锁时,PN 结不能在正向电流降到零时就立即承受反向电压,而需过了反向恢复期(t_{rr})后方能完全恢复“高阻态”。在这期间,PN 结将通过很大的反向恢复电流(取决于当时电路的状况),如图 1.5(a)所示。这是因为 PN 结正向导通时在基区储存了大量少数载流子的缘故,要清除这些少数载流子达到稳态值就需有一段恢复时间(反向恢复时间)。在这期间,这些多余的少数载流子一方面通过复合消失掉,另一方面被空间电荷区内的电场扫出去,而形成很大的反向恢复电流。

当电路迫使 PN 结从反向闭锁状态转入正向导通时,PN 结的通态压降并不立即达到其静态伏安特性所对应的稳态压降值,而需经过一段正向恢复时期(t_{FR})。在这期间,正向动态峰值压降可以达到数伏至数十伏。这是因为基区少子的储存也需要一定时间才能达到稳态值。图 1.5(b)给出了 PN 结正向导通时的动态波形。

整流管的动态行为除了影响自身的开关损耗外,还能引起其它开关器件附加的损耗。在高频整流电路中,整流管的反向恢复时间和正向动态峰值压降都是影响电路性能的主

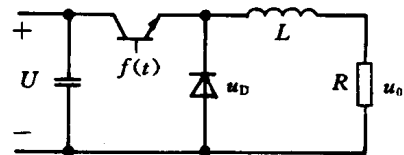


图 1.4 整流管通断工作电路

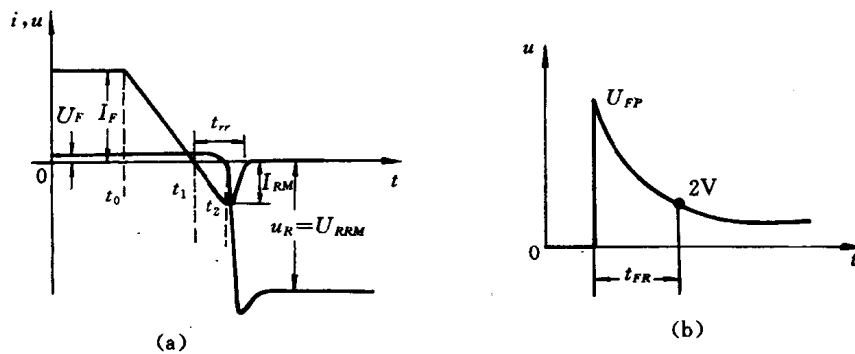


图 1.5 PN 结的动态波形
(a) 反向恢复; (b) 正向恢复

要因素。因此,在设计电路时应考虑到整流管动态行为的影响。

整流管的正向动态峰值压降、正反向恢复时间、反向恢复电流峰值等除了同工艺及型号有关外,还受下列外部因素的影响:

- (1) 结温;
- (2) 正向电流峰值;
- (3) 电流上升率(影响开通过程);
- (4) 电流下降率(影响关断过程);
- (5) 电路所加的电压(影响开通过程);
- (6) 电路阻抗(影响关断过程)。

因此,在使用时人们应注意到这些影响因素。

(三) PN 结电容

空间电荷区就象一个平板电容器,基区储存的电荷在外加电压变化时也发生相应的变化,因此也起着电容的作用,前者称为结电容,后者称为扩散电容。这些电容都是外加电压的函数。PN 结的电容即由上述这两部分组成。在开关电路中,PN 结的电容同电路中的杂散电感可能引起高频振荡,此点,应引起使用者的注意。

(四) 整流管的参数

整流管的主要参数包括:

- (1) 额定平均电流(I_F);
- (2) 稳态平均压降(U_F);
- (3) 反向重复峰值电压(U_{RRM});
- (4) 正向动态峰值压降(U_{FP});
- (5) 反向恢复时间(t_{rr});
- (6) 反向恢复电荷量(Q_{rr});
- (7) 浪涌电流(I_{sm});
- (8) 整流管的电容值。

对于普通整流管,一般不给出它的动态参数;对于快速整流管和开关二极管,都应当

给出它们的动态参数。

1.2.2 其它类型的整流管

除了PN结类型(结型)的整流管外,还有肖特基整流管。它是一种金属同半导体相接触形成整流特性的整流管。它导通时,多子导电占主导地位,因此原则上不存在像双极型整流管那样的正反向恢复过程,是一种单极型器件。当肖特基整流管设计的电压超过100V时,它导通时,少子导电开始占主导地位,这时它的性能同结型整流管一样,存在着恢复过程。通常肖特基整流管的通态(稳态)压降典型值为0.4~0.6V,而结型整流管的通态压降典型值为1V左右,而且它的反向恢复时间很短,为几十纳秒。它常被用于高频低压开关电路或高频低压整流电路中。

此外,目前还有利用VDMOS管构成的同步整流器,用于开关电源的整流部分。据资料表明,采用同步整流器的电路效率比肖特基的高。

1.3 双极型晶体管

1.3.1 晶体管的工作原理及静态输出特性

双极型晶体管是由三层半导体(组成两个PN结)构成的,如图1.6(a)和(c)所示。现以NPN结构的晶体管为例,作进一步说明。 N^+P 构成发射结(J_1),PN构成集电结(J_2); N^+ 为发射区, E 为发射极; N 为集电区, C 为集电极; P 为基区, B 为基极。

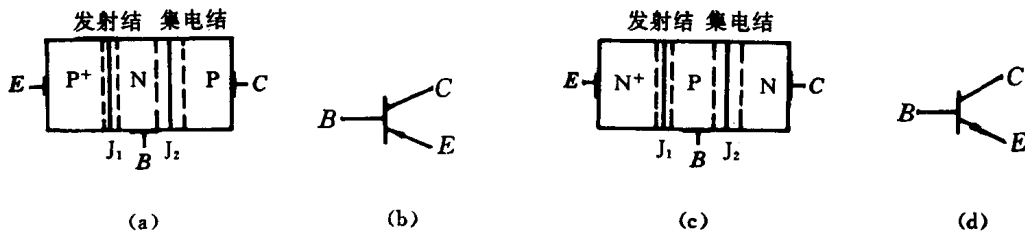


图 1.6 晶体管的结构及电路图中的符号

(a) PNP 结构; (b) PNP 管符号; (c) NPN 结构; (d) NPN 管符号

(一) 晶体管 $B-E$ 间不加电压

如图 1.7 所示, $U_{CE} > 0$ (晶体管加正向电压),这时发射结为正偏置,集电结为反偏置,外加电压 U_{CE} 几乎全部加在反偏置 PN 结(J_2)的空间电荷区上,反偏置 PN 结中流过反向漏电流 I_0 。但同只有一个 PN 结的情形不一样,这时通过 J_2 结的电流还包括从发射结注入到基区的电子被 J_2 结空间电荷区电场扫到集电区那部分所形成的电子电流。若令这时通过晶体管的电流为 I ,则这部分电子电流为 αI ,按电流连续性原理,则有

$$I = \alpha I + I_0$$

$$I = \frac{I_0}{1 - \alpha} \quad (1.1)$$

下面分析可知, α 为晶体管共基极接法的电流放大系数,且 α 总是小于 1。因此,实际流过

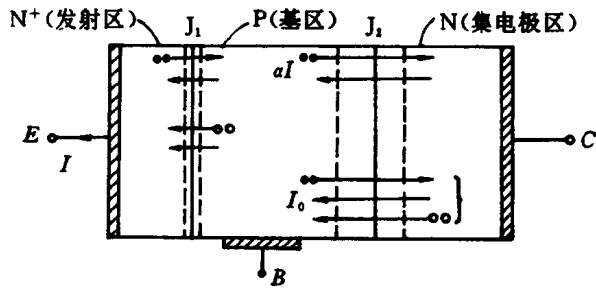


图 1.7 B-E 间不加电压时晶体管中电流的传输

晶体管的漏电流比 I_0 (单个集电结漏电流) 大, α 越接近 1, 实际的漏电流越大, 这是两个 PN 结相互影响的结果。

(二) 晶体管 B-E 间加正向电压

如图 1.8 所示, 当 B-E 间加足够大的正向电压时, 则 J_1 结的 N^+ 侧有大量电子注入到基区, 而 P 侧也有空穴注入到 N^+ 区。注入到基区的电子除一部分复合掉, 其中绝大部分被 J_2 结的空间电荷区的电场扫到集电区。从发射结看, 通过的电流由空穴电流 I_{PE} 和电子

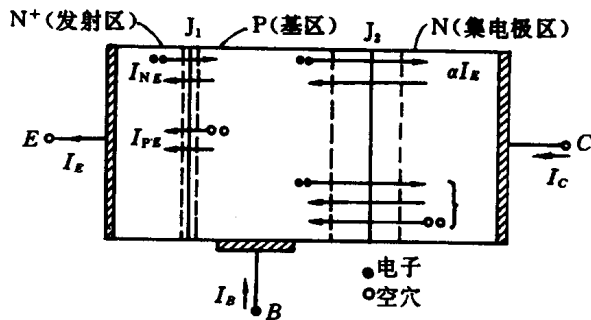


图 1.8 B-E 间加正向电压时晶体管中的电流传输

电流 I_{NE} 两部分组成, 即

$$I_E = I_{PE} + I_{NE} \quad (1.2)$$

而电子电流 I_{NE} 是流向集电区, 对 I_C 电流有贡献。为了表征其贡献的大小, 引入发射率 γ , 并定义

$$\gamma = \frac{I_{NE}}{I_E} \quad (1.3)$$

注入基区的电子一边扩散, 一边复合, 到达集电结边界的电子已经减少了。但只要到达边界的都将被空间电荷区的电场扫入集电区, 转成集电区的电流 I_C 。为表征到达 J_2 结边界区电子减少的数量, 引入输运系数, 即定义

$$\beta = \frac{I_C}{I_{NE}} \quad (1.4)$$

这样, 发射区的电流 I_E 能转成集电区的电流为

$$I_C = \gamma\beta I_E \quad (1.5)$$

若定义晶体管共基极接法时的电流放大系数为

$$\alpha = \gamma\beta \quad (1.6)$$

则有

$$I_C = \alpha I_E \quad (1.7)$$

很显然, I_C, I_E 和 I_B 应遵守下列原则:

$$I_E = I_B + I_C$$

$$\text{即} \quad I_B = (1 - \alpha)I_E \quad (1.8)$$

那么

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha I_E}{(1 - \alpha)I_E} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

现定义

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (1.9)$$

则 β 就是晶体管共射极接法时的电流放大系数。 α 一定是小于 1 的, 且接近 1。当 $\alpha = (0.9 \sim 0.99)$ 时, $\beta = (10 \sim 100)$ 。高压功率晶体管(单管)一般 $\beta < 10$ 。

(三) 有源放大区

无论是共基极接法还是共射极接法, 只要集电结反偏电压达到一定值, 发射结注入的能到达集电结空间电荷区边界的载流子将全部被空间电荷区的电场扫到集电区, 形成集电极电流。若发射极(或基极)电流不变, 这时再增加集电结反偏电压, 集电极电流也不会有明显的增加。但只要发射极(或基极)电流增加, 到达集电结空间电荷区边界的载流子数量也增加, 于是集电极电流也随着增加。在这种情况下, 晶体管工作在有源放大区。NPN 晶体管共射极接法的输出特性示于图 1.9。

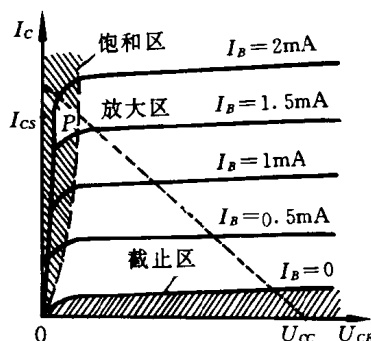


图 1.9 NPN 晶体管共射极接法的输出特性

(四) 饱和状态

当晶体管电路接有负载(电阻)时, 晶体管能工作在饱和区。以共射极接法为例, 随着基极电流增加, 负载上电压增大, 而电源电压不变, 故集电结反偏电压必须下降。当负载上电压增加到集电结反偏电压为零时, 晶体管进入临界饱和状态; 当基极电流进一步增加时, 集电结变为正偏置, 晶体管进入过饱和状态; 基极电流再加大时, 晶体管的饱和程度加深。晶体管进入饱和时, 集电极电流就不再明显增加了。这是因为此时基区少数载流子浓度梯度不再增加了。所以晶体管进入饱和区的特点是两个 PN 结均为正偏置, 饱和压降很小。

1.3.2 晶体管开关工作状态

晶体管可以工作在截止、有源放大及饱和三种工作状态。在交流技术应用中, 晶体管只作为开关使用, 工作于截止和饱和两种状态。在状态转换过程中, 晶体管快速地通过有源区, 如图 1.10 所示。

当基极施以脉冲驱动信号时, 晶体管将工作于开关状态, 如图 1.11 所示。在 t_0 时刻