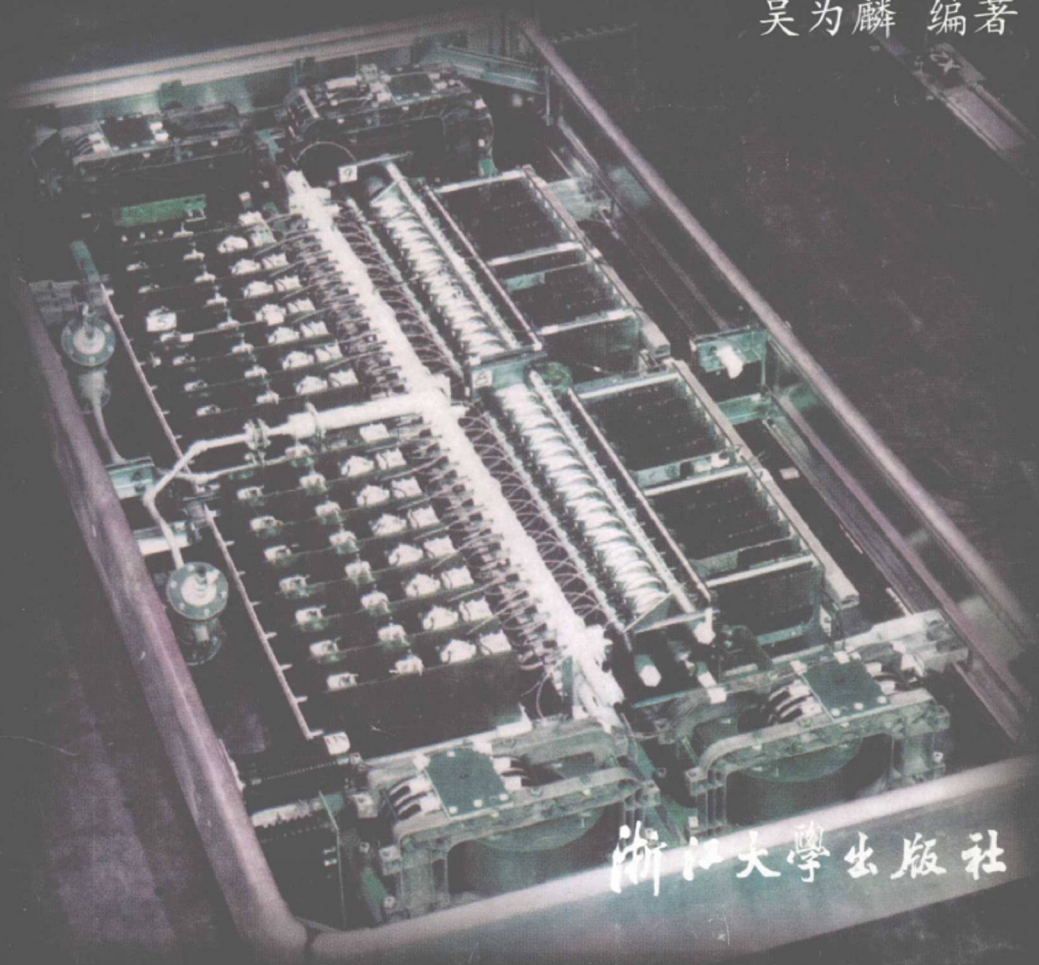


全国高等教育自学考试

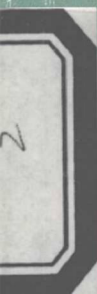
电力电子变流技术 自学辅导

全国高等教育自学考试指导委员会 组编
吴为麟 编著



浙江大学出版社

Q · G · G · D · J · Y · Z · X · K · S



全国高等教育自学考试

电力电子变流技术自学辅导

全国高等教育自学考试指导委员会 组编

吴为麟 编著

浙江大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

电力电子变流技术自学辅导/吴为麟编著. —杭州:
浙江大学出版社, 2001. 12
ISBN 7-308-02807-0

I. 电... II. 吴... III. 电力系统—变流器—高等
教育—自学考试—自学参考资料... IV. TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 068875 号

出版发行 浙江大学出版社
(杭州市浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)
(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 王 储

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江广育报业印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14

字 数 358 千字

印 数 0001—3070

版 印 次 2001 年 12 月第 1 版 2001 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-308-02807-0/TM·009

定 价 21.60 元

出版前言

为了完善高等教育自学考试教育形式,促进高等教育自学考试的发展,我们组织编写了全国高等教育自学考试自学辅导书。

自学辅导书以全国考委公布的课程自学考试大纲为依据,以全国统编自考教材为蓝本,旨在帮助自学者达到学习目标,顺利通过国家考试。

自学辅导书是高等教育自学考试教育媒体的重要组成部分,我们将根据专业的开考情况和考生的实际需要,陆续组织编写、出版文字、音像等多种自学媒体,由此构成与大纲、教材相配套的、完整的自学媒体系统。

全国高等教育自学考试指导委员会
1999年10月

目 录

绪论

第 1 章 电力半导体器件	(5)
1. 1 功率二极管	(5)
1. 1. 1 PN 结	(5)
1. 1. 2 特性	(8)
1. 1. 3 分类	(9)
1. 2 晶 闸 管	(11)
1. 2. 1 静态特性	(11)
1. 2. 2 动态特性	(15)
1. 2. 3 主要参数	(18)
1. 3 特殊晶闸管	(21)
1. 3. 1 快速晶闸管	(21)
1. 3. 2 逆导晶闸管	(21)
1. 3. 3 双向晶闸管	(22)
1. 3. 4 光控晶闸管	(22)
1. 3. 5 可关断晶闸管	(22)
1. 4 功率晶体管	(25)
1. 4. 1 工作原理	(25)
1. 4. 2 静态特性	(26)
1. 4. 3 动态特性	(27)
1. 5 绝缘栅极晶体管	(30)
1. 5. 1 工作原理	(30)
1. 5. 2 静态特性	(30)
1. 5. 3 动态特性	(31)
1. 5. 4 擎住效应	(31)
1. 6 散热技术	(32)
1. 6. 1 散热原理	(32)
1. 6. 2 散热措施	(36)
第 2 章 单相可控整流电路	(39)
2. 1 单相半波可控整流电路	(40)

3.5.2 电源中谐波的影响	(83)
3.5.3 谐波抑制对策	(83)
第4章 有源逆变电路	(86)
4.1 有源逆变的工作原理	(86)
4.1.1 有源逆变产生的条件	(86)
4.1.2 有源逆变工作过程	(87)
4.2 常用晶闸管有源逆变电路	(90)
4.2.1 三相半波逆变电路	(90)
4.2.2 三相桥式逆变电路	(94)
4.2.3 单相反并联(双重)全控桥	(97)
4.3 逆变失败和最小逆变角的限制	(99)
4.3.1 逆变失败的原因	(99)
4.3.2 最小逆变角的限制	(100)
4.4 晶闸管的保护	(102)
4.4.1 过电压保护	(102)
4.4.2 过电流保护	(106)
4.4.3 电压和电流上升率的限制	(107)
第5章 触发电路	(109)
5.1 晶闸管变流器对触发电路的要求	(109)
5.1.1 触发电路的分类	(109)
5.1.2 晶闸管变流器对触发电路的要求	(110)
5.2 单结晶体管触发电路	(111)
5.2.1 单结晶体管特性	(111)
5.2.2 单结晶体管弛张振荡电路	(113)
5.2.3 简单单结晶体管触发电路	(116)
5.2.4 实用单结晶体管触发电路	(117)
5.3 晶体管触发电路	(118)
5.3.1 正弦波晶体管触发电路	(119)
5.3.2 锯齿波晶体管触发电路	(122)
5.4 触发定相	(126)
5.4.1 同步定相	(126)
5.4.2 如何实现同步定相	(127)
5.5 集成与数字触发器	(131)
5.5.1 集成触发器	(131)
5.5.2 数字触发器	(131)
5.6 其他电力电子器件的驱动电路	(133)

5.6.1	GTO 的门极驱动电路	(134)
5.6.2	GTR 的基极驱动电路	(136)
5.6.3	IGBT 的栅极驱动电路	(138)
5.7	电磁干扰及其抑制措施	(140)
5.7.1	电磁干扰的产生	(140)
5.7.2	电磁干扰的传播耦合方式	(140)
5.7.3	电磁干扰的分类及抑制措施	(141)
第 6 章	无源逆变电路	(144)
6.1	概述	(144)
6.1.1	逆变电路的分类	(144)
6.1.2	逆变与变频的含义	(144)
6.1.3	逆变和变频的两种型式	(144)
6.2	全控型器件逆变器	(145)
6.2.1	推挽式逆变器	(146)
6.2.2	全桥式逆变器	(146)
6.2.3	半桥式逆变器	(147)
6.2.4	单端反激式变换器	(148)
6.2.5	单端正激式变换器	(149)
6.2.6	双晶体管正激式变换器	(150)
6.3	晶闸管的换流电路	(151)
6.3.1	换流电路 1	(151)
6.3.2	换流电路 2	(152)
6.3.3	换流电路 3	(153)
6.3.4	换流电路 4	(153)
6.3.5	TC 换流开关电路	(154)
6.4	逆变器输出电压的控制	(155)
6.4.1	控制方式	(155)
6.4.2	脉宽调制(PWM)逆变器	(155)
6.4.3	正弦脉宽调制(SPWM)	(156)
6.5	逆变器输出谐波的抑制	(157)
6.5.1	多重化抑制方法	(157)
6.5.2	波形调制抑制方法	(159)
第 7 章	直流斩波电路	(161)
7.1	概述	(161)
7.1.1	分类	(161)
7.1.2	控制方式	(162)

7.2	降压型变换器	(163)
7.2.1	概述	(163)
7.2.2	连续电流方式	(163)
7.2.3	间断电流方式	(165)
7.3	升压型变换器	(166)
7.3.1	概述	(166)
7.3.2	连续电流方式	(166)
7.3.3	间断电流方式	(168)
7.4	升降压变换器	(169)
7.4.1	概述	(169)
7.4.2	连续电流方式	(170)
7.4.3	间断电流方式	(171)
7.5	库克变换器	(172)
7.6	全桥直一直变换器	(175)
7.6.1	概述	(175)
7.6.2	双极性电压开关 PWM 方式	(176)
7.6.3	单极性电压开关 PWM 方式	(178)
7.6.4	小结	(180)
第8章	电力电子在电力系统中应用	(182)
8.1	无触点开关	(182)
8.1.1	概述	(182)
8.1.2	无触点直流开关	(183)
8.1.3	晶闸管无触点交流开关	(184)
8.1.4	固态起动器	(185)
8.2	交流不间断电源	(185)
8.2.1	概述	(185)
8.2.2	电源调整器	(186)
8.2.3	不间断电源	(186)
8.3	高压直流输电	(189)
8.3.1	概述	(189)
8.3.2	12脉工频换流器	(190)
8.3.3	换流器的控制	(191)
8.3.4	HVDC 的评估	(192)
8.4	静止无功补偿	(193)
8.4.1	电力系统的无功补偿	(193)
8.4.2	晶闸管可控电抗器(TCR)	(195)
8.4.3	晶闸管投切电容器(TSC)	(196)

8. 5	静止无功发生器	(197)
8. 5. 1	瞬时无功补偿概念	(197)
8. 5. 2	SVG 补偿原理	(198)
8. 5. 3	SVG 的控制	(199)
8. 6	有源电力滤波器	(200)
8. 6. 1	电力系统谐波及其抑制	(200)
8. 6. 2	有源滤波补偿原理	(200)
8. 6. 3	有源滤波器主电路结构	(201)
8. 7	可再生能源与电网的互联	(202)
8. 7. 1	概述	(202)
8. 7. 2	太阳能光电系统	(203)
8. 7. 3	风力与小型水电系统	(206)
8. 7. 4	其他自然能发电装置	(207)
8. 7. 5	储能系统	(209)
8. 8	灵活交流输电系统	(210)
8. 8. 1	FACTS 概念的提出	(210)
8. 8. 2	用户电力技术的概念	(211)
8. 8. 3	主要装置	(211)
8. 8. 4	展望	(212)

绪 论

电力电子技术已成为一门新兴的高新技术学科。它是一门介于电气工程的三大领域——电力、电子和控制之间的边缘学科。电力电子学是研究电力的传送、电力的变换、电力的控制和电力的开关的电子学,又称为功率电子学或动力电子学,工业上称它为电力电子技术或半导体变流技术。

美国电气和电子工程师协会(IEEE)电力电子学会对电力电子技术的阐述是:“有效地使用电力半导体器件,应用电路和设计理论以及分析开发工具,实现对电能的高效能变换和控制的一门技术,它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。”由于当代许多高新技术离不开电能,离不开表征电能的电压、电流、频率、波形和相位等若干基本参数的控制与转换,而电力电子技术能够对这些参数实现精确的控制与高效能的处理,所以电力电子技术又成了其他多项高技术的发展基础。

近年来国际上电力电子技术得到飞速的发展,应用领域从航空航天到一切经济和生活领域,成为国民经济的支柱产业和改造传统产业的新技术。美国政府把它看作一种战略技术领域。美国工业界为了保持本国工业品的竞争力和国防上的自主发展能力,将该领域的领导权视如生命。我国也将电力电子技术列为国家重点发展的高新技术之一。在今后一段时间将是电力电子技术大发展时期。

电力电子技术的内容包括三个方面:电力电子器件、电力电子电路、电力电子装置。它与多种学科密切联系,不可分开,图 0-1 形象地表示了它与其他学科间的联系,因此也有将此图作为电力电子学的符号,这图可在许多书封底见到。

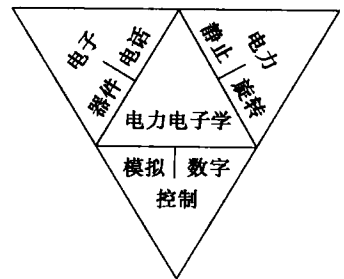


图 0-1

电力电子与其他学科的联系

一、电力电子器件(又称变流器件)

主要以开关方式工作的电力半导体器件是电力电子技术的核心和龙头。器件特性的每一步新发展都引起了变换电路技术的相应突破,而每一变换电路技术的成熟必定和一批变换装置的出现紧紧连在一起。

(一)电力电子器件的发展概况

电力电子学的历史,最早可追溯到 20 世纪初汞弧整流器之时。而真正显示其生命力和具有革命性变革的,则要算自 1956 年贝尔实验室发明了世界上第一只晶闸管到 1958 年美国通用电气公司推出工业用普通晶闸管的时期。晶闸管的出现,实现了弱电对强电的控制,使电子技术步入功率领域。它在工业上也引起了一场技术革命,使变流装置由旋转方式变为静止方式,体现了提高效率、缩小体积、减轻重量、延长寿命、消除噪声、便于维修等优点,在当时称为

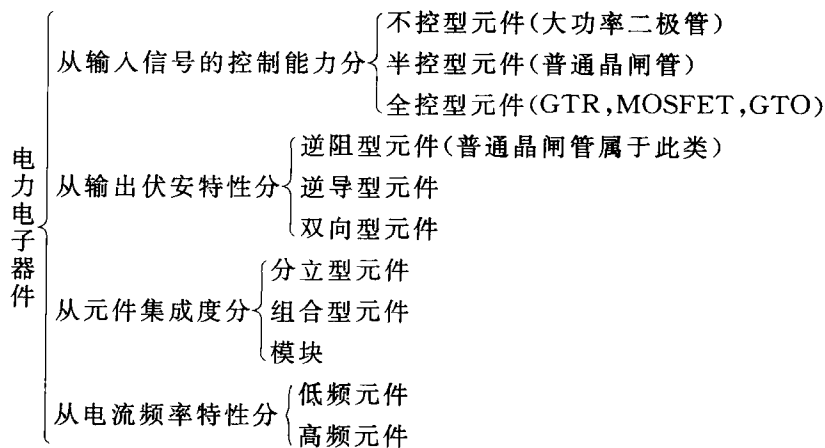
硅可控整流器(Silicon controlled rectifier),习惯上叫做可控硅(SCR)。

由于各个领域工业生产的需要,相继又发展了派生的器件:快速可控硅、双向可控硅、逆导可控硅等;后来,把所有这些器件统称为晶体闸流管,简称晶闸管(Thyristor)。通常所说的可控硅就是普通晶闸管,而所有派生器件则属于特殊晶闸管。这类器件的主要特性是只能控制其开通,不能控制其关断,即半控型器件;在控制技术上采用相移控制技术,结构上基本是分立元件。

1980年可关断晶闸管GTO的商品化,使电力电子学的发展进入了一个新的向全控型高频化领域发展的新阶段。电力晶体管(GTR)、功率场控晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)、MOS晶闸管(MCT)等各种高速、全控型器件先后问世。变流装置中的普通晶闸管逐渐被这些新型器件所取代,新的结构紧凑的变流电路随之出现,过去难以实现的控制方式也得以实现。这一切使得电力电子技术具有了全新的面貌,其主要特点除了全控型的自关断器件外,还朝着集成化、高频化、智能化方向发展;即:与传统的分立器件不同,几乎所有全控型器件都是由许多单元器件并联而组成,采用了集成化技术;同时,器件的工作速度提高了,从GTO数千赫兹工作频率到MOSFET数百千赫兹,而SIT则可达10 MHz以上;而且随着集成工艺的提高和突破,器件的功能扩大、品种增多,使之不但具有开关功能,并且有了保护、检测、驱动等功能,有的还具有放大、调制、振荡及逻辑运算的功能,使用范围拓宽,线路结构简化。

(二)电力电子器件的分类

电力电子器件的种类很多,大致分类如下:



GTR——双极型大功率晶体管

MOSFET——大功率场效应晶体管

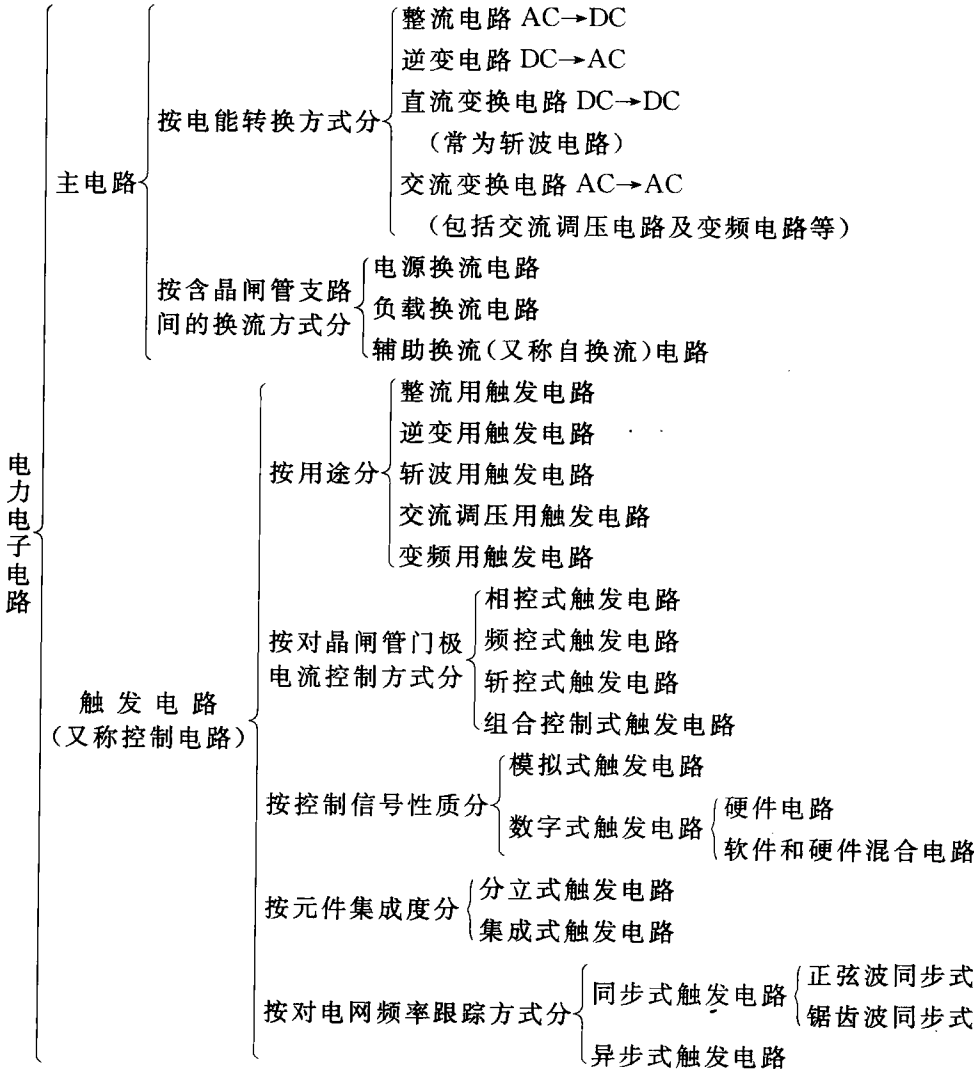
GTO——门极关断晶闸管(可关断晶闸管)

以上所有电力电子器件均具有导通和阻断两种工作状态,因而在电力电子电路中被用作大功率开关。这是它们的共同点。

二、电力电子电路(又称变流电路)

(一)电力电子电路的分类

电力电子电路最初只有整流电路,后来又发展了逆变电路、交流调压电路、变频电路、斩波电路等,使变流技术愈来愈完善。从主电路和触发电路来看,大致可作如下分类:



(二)电力电子电路的能量转换方式

按其功能来分,可有以下 4 种电能转换方式:

(1)AC→DC:指把交流电能转换为可调式固定直流电能的过程。凡能实现这一转换的电路统称为整流电路。

(2)DC→AC:指把直流电能转换为交流电能的过程。凡能实现这一转换的电路统称为逆变电路。

逆变电路又分为有源逆变和无源逆变两大类。有源逆变电路将直流电能逆反送回交流电网,而无源逆变电路将直流电能(一般是由工频交流电源整流而得)转换成另一种频率或频率可调的交流电能。所以,无源逆变电路又称为交—直—交变频电路,或称为间接变频电路。

(3)DC→DC:指将直流电能的任一参数(幅值或极性)加以转换的过程。凡能实现这一转换的电路统称为直流变换电路。

(4)AC→AC:指将交流电能的任一参数(幅值、频率、相位)加以转换的过程。凡能实现这一类转换的电路称为交流变换电路。

如变换幅值,将固定的交流电压转换成可调的交流电压,这种电路称为交流调压电路。如变换频率,将某种频率的交流电能转换成另一种频率的交流电能,这种电路称为交—交变频电路,或称为变频电路。

(三)电力电子电路的控制方式

电力电子电路不仅需要实现电能的转换,还要实现电能的控制,因此,除了以上主电路外,还需要有相应的控制电路(或称触发电路)和控制方式。其控制方式可分为以下几种:

(1)相控方式:即控制信号幅度和极性的变化将表现为触发脉冲的前沿相位(即控制角 α)的变化。具有交流电源的变流电路可采用这种方式。

(2)频控方式:即控制信号幅度和极性的变化将表现为触发脉冲频率的变化。变频电路可采用这种方法。

(3)斩控方式:即控制信号幅度和极性的变化将表现为触发脉冲宽度(脉宽)的变化,也即表现为元件导通比的变化。斩波电路可采用这种方式。

(4)组合方式:前三种基本控制方式的某种组合。

三、电力电子装置(又称变流装置)

电力电子装置是电力电子电路的实际应用。目前,电力电子技术已广泛用于电气工程的所有领域,并深入到航天、国防、工业生产、交通运输、电力系统、文教卫、办公室自动化,以至于家庭生活各个角落。

教科书中例举了:柔性交流输电系统(FACTS)、高压直流输电(HVDC)、工业传动、电气牵引、伺服驱动、不间断电源和开关电源、感应加热等方面的应用。最近,在诸如有源滤波器、能量储存设备、超导磁悬浮铁道系统、电子化汽车、家用电器等方面的应用,也有了新的突破。

电力系统是电力电子技术主要应用领域之一,本课程的学习者大多也是在电力系统工作或与电力系统有密切的关系。为了加深对电力电子技术应用的理解,本教科书专门增加了一章:电力电子技术在电力系统中应用,以饷读者。

第1章 电力半导体器件

在绪论学习中,我们已知道电力半导体器件是电力电子技术的核心、基础,是发展的龙头;器件特性的每一步新发展,都会引起变换电路技术的相应突破。因此,我们首先必须学好这技术的核心和龙头,把器件学好学透。

本章以晶闸管、功率晶体管、IGBT 为半控型和全控型器件的代表,分别介绍它们的结构原理、外特性和主要参数,从而了解半控型器件和全控型器件的特点,并了解其他电力电子器件。重点是晶闸管的外特性及其主要参数,难点是功率晶体管的二次击穿现象。

为了增进对不控型器件的了解,本章增加了“功率二极管”一节。通过 PN 的形成、单向导电性、反向击穿和电容效应等内容的学习加深对 PN 结的了解;通过瞬态开关特性学习,加深对频率特性的了解。

电力电子器件通以电流后,要消耗大量的功率,使管芯发热。为了正确、安全地使用电力半导体器件,本章还增加了“散热技术”一节。通过对散热原理的研究、热阻概念的应用,采取散热措施就心中有数了。

1.1 功率二极管

1.1.1 PN 结

1. PN 结的形成

完全纯净的、结构完整的半导体称为本征半导体。在常温下,本征半导体可以激发出少量的自由电子,并出现相应数量的空穴。这两种不同极性的带电粒子,统称为载流子。空穴的出现是半导体区别于导体的一个显著特点。

本征半导体内,自由电子和空穴总是成对出现的,由于数量极少,所以导电性能很差。但因为载流子浓度随温度的增加会按指数规律增大,所以半导体的导电能力也随温度的增加而显著增加,这又是半导体的一个重要特性。

用适当的方法(如合金法、扩散法、外延生长法、离子注入法等)在本征半导体内掺入微量的杂质,就会使半导体的导电能力发生显著的变化。依掺入杂质化合价的不同,杂质半导体分为电子型(N 型)半导体和空穴型(P 型)半导体两类。N 型半导体中杂质为五价元素,它在半导体晶体中能给出一个多余的电子。由于增加了这额外的自由电子,晶体中自由电子数远大于空穴数;在 N 型半导体中,自由电子称为多数载流子(简称多子),空穴称为少数载流子(简称少子)。P 型半导体中杂质为三价元素,在其晶体中空穴数远大于自由电子数;在 P 型半导体中空穴称为多子,自由电子称为少子。

我们控制掺入杂质的多少,便可控制载流子数目的多少,即控制多数载流子浓度的高低。但不管掺杂多少,半导体中的正负电荷总数总是相等的,它们的作用相互抵消,保持着电中性。

当N型半导体与P型半导体结合,即在物理上紧紧接触在一起后,就会产生质的变化。由于在它们的交界处出现了电子和空穴的浓度差别,存在着浓度的梯度,在无规则热运动之中的载流子将由高浓度区向低浓度区扩散。这一过程首先在界面两侧附近进行。当电子离开N区后,留下了不能移动的带正电荷的杂质离子,形成了一层带正电荷的区域。同理,空穴离开P区后,留下不能移动的带负电荷的杂质离子,形成了一层带负电荷的区域。这些杂质离子虽然带电,但不能任意移动,因此也不参与导电。这些不能移动的正、负电荷叫做空间电荷。

空间电荷出现,形成了由N区指向P区的电场,它是由载流子的扩散运动在半导体内部形成的,不是外加电压形成的,所以称为内电场,也叫自建电场,如图1-1(a)所示。这个内电场的方向是阻止扩散的。与此同时,电子又会逆电场方向漂移回N区,而空穴则沿电场方向漂移至P区。这样,扩散运动和漂移运动既互相联系又互相矛盾。在一定的温度下,两者达到动态平衡时,正、负空间电荷量达到稳定值,形成了一个稳定的由空间电荷构成的范围,称为空间电荷区。在整个空间电荷范围内,正、负电荷数量相等,仍保持中性,这就是PN结。

在空间电荷区这个区域内,多数载流子因已相互复合,因而这个区域中的多数载流子浓度比P区和N区的多数载流子浓度低得多,像是被消耗尽一样,因此空间电荷区又称耗尽层。另外,内电场对载流子的扩散运动具有阻挡作用,所以空间电荷区还称为阻挡层。内电场的存在说明,N区电位高于P区电位,我们称这个电位差为接触电位差;由于电子要从N区到P区必须越过接触电位差这个势垒能量高坡,因此又把空间电荷区称为势垒区。

2. PN结的单向导电性

上面分析了PN结不加外电场即零偏置时情况:由于通过空间电荷区的多子扩散电流和在自建电场推动下的少子漂移电流相等,故从整体上看,没有电流通过PN结。

PN结的主要特征是具有单向导电性,这一特征只有在外加电压时才显示出来。分析如下:

当PN结加正向外加电压即正偏置时(正端接P区,负端接N区时),外加电场与内电场的方向相反。在这个外加电场作用下,破坏了空间电荷区原先的平衡,使扩散运动大于漂移运动,形成扩散电流。由于中和的结果,空间电荷量减少,PN结变窄,在外电路上形成一个流入P区的电流,称正向电流 I ;当外加电压再升高时,PN结内电场进一步削弱,扩散电流随之进一步增加,正向PN结表现为一个很小电阻,可以出现较大的正向电流,这时即为正向导通。载流子运动如图1-1(b)所示。

当PN结加上反向外加电压(反偏置)时,如图1-1(c)所示,外加电压正端接N区,负端接P区,外加电场与PN结内电场方向一致,进一步阻止扩散运动的进行,少数载流子更容易产生漂移运动,形成反偏置时的漏电流;而且,少数载流子还都将进一步离开PN结,从而使PN结变宽。由于少数载流子的浓度很小,在一定温度下,漂移电流的值趋于恒定,大约为微安数量级,反向的PN结表现为一个很大的电阻,几乎没有电流通过,故称为反向截止。这就是PN结的单向导电性,这种非线性关系是由于阻挡层的存在,并且其厚度随外加电压的变化而变化所造成的。

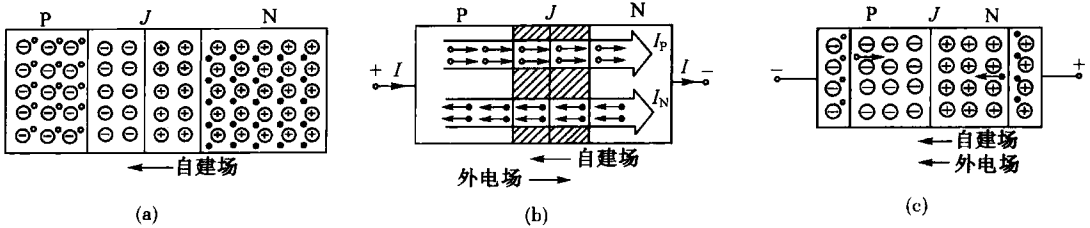


图 1-1 不同偏置下的 PN 结
(a)零偏置 (b)正偏置 (c)反偏置

3. PN 结的反向击穿

PN 结具有一定的反向耐压能力。如果反向电压增加过大,达到反向击穿电压时,反向电流将会急剧增大,破坏 PN 结反向偏置为截止的工作状态,这时称为反向击穿。反向击穿有时会造成 PN 结损坏。

PN 结反向击穿有三种形式:雪崩击穿、齐纳击穿和热击穿。

①雪崩击穿

当加于 PN 结的反向电压增加时,空间电荷区的电场强度增大,通过空间电荷区的电子和空穴的漂移运动被加速,使其动能增大。这些高能量、高速度的载流子不断与晶体原子相碰撞,激发形成新的自由电子和空穴对,这种现象称为碰撞电离。新产生的载流子在强电场作用下也被加速,又获得能量,产生新的碰撞电离,导致载流子迅速成倍增加,而出现雪崩倍增效应。一旦发生雪崩倍增现象,载流子浓度就将急剧增加,使反向电流急剧增大,从而导致 PN 结反向击穿。

②齐纳击穿

齐纳击穿又称隧道击穿,它与雪崩击穿的性质完全不同,是指在比较低的反向电压下发生的击穿。根据能带理论,在高掺杂浓度的 PN 结中,P 区与 N 区之间能带的间距较窄,再加上反偏电压使电场强度增加,进一步使其间距减小。这时,P 区中某些电子就可能穿过空间电荷区(称为隧道效应)进入 N 区,变成自由电子,形成反向电流,导致齐纳击穿。齐纳击穿多发生于高掺杂浓度的特殊器件中,且空间电荷区内最大电场又较大时。

③热击穿

上述两种型式的击穿都是可逆的,只要在外电路中采取适当措施,而把反向电流限制在一定范围内,使反向电流产生的功率不超过 PN 结容许的耗散功率即可。此时,当反向电压降低后,PN 结仍可恢复原来的状态。但是,如果反向电流产生的功率超过了容许的耗散功率,就会因热量散发不出去而导致 PN 结温度上升,直至过热而烧毁,这种现象称热击穿。热击穿应该尽可能避免。

4. PN 结的电容效应

PN 结中的电荷量随外加电压变化而变化,呈现出电容效应,故可称其为结电容 C_j ,又称微分电容。结电容影响 PN 结的工作频率,特别是在高速开关状态时,可使其单向导电性变坏,甚至不能工作。PN 结电容又由势垒电容和扩散电容两种不同因素而共同造成。

①势垒电容 C_b

PN 结交界处形成势垒区,是积累空间电荷的区域。极性不同的电荷分别处于界面两侧,

像平行板电容器的极板一样。它们能够存放电荷即充电,也能够取走电荷即放电;当 PN 结两端电压变化引起空间电荷的改变时,就表现为电容性效应。势垒电容 C_b 正是描述这种效应的。

势垒电容 C_b 只有在外加电压变化时才起作用,外加频率越高,势垒电容越显著。 C_b 大小与 PN 结截面积成正比,与阻挡层厚度成反比。

② 扩散电容 C_d

PN 结的正向电流是由 P 区中的空穴和 N 区中的电子相互扩散造成的。当 PN 结外加正向电压时,大量电子由 N 区进入 P 区,但进入 P 区后并不是立即与空穴复合,而是在靠近耗尽层的一定距离内(通常称扩散长度)一边继续扩散,一边与空穴复合后而消失,反之亦同。可见,在扩散长度内存储了一定数量的电荷,正向电流越大,存储电荷越多。它们随正向电压的变化,亦具有电容的性质,被称为扩散电容 C_d 。

综上所述,PN 结电容 C_j 的两种成分在不同外加电压条件下所占的份额不同。在正向偏置状态下,当正向电压较低时,因扩散运动较弱,扩散电容比较小,势垒电容占主要成分。正向电压较高时,扩散运动加剧,使扩散电容按指数规律上升,成为 PN 结电容的主要成分。在反向偏置状态下,因扩散运动被抑制,因而扩散电容较小,结电容以势垒电容为主。

1.1.2 特性

1. 伏安特性

功率二极管的伏安特性如图 1-2 所示。

第一象限为正向特性,表现为正向导通状态。一旦所加正向电压大于势垒压降 U_F ,正向电流就会激增,此时电流的大小由外部电路所决定。

第三象限为反向特性,表现为反向阻断状态。施加反向电压时,只有少数载流子引起的微小而且数值几乎恒定的反向漏电流。但当反向电压增大至一定程度,则会造成反向击穿。

由于 PN 结漏电流与温度有关,它随着温度的升高而增大,其正向特性也会因温度升高而向左平移。

整流管的主要电参数有正向电流、正向压降、反向漏电流、反向电压。正向电流和反向电压是整流二极管的功能参数,正向压降和反向漏电流是整流管能正常、可靠工作的参数。大功率整流管的质量优劣主要由正向压降和反向漏电流来标志。

2. 动态特性

功率二极管在电力电子电路中是一个开关器件。它在正向偏置时呈低阻状态,正向管压降很低,近似于短路;在反向偏置时呈高阻状态,反向电流很小,近似于开路。从低阻转变成高阻或从高阻转变成低阻时间并不是瞬时完成的,这些过程都要经历一定的时间。从反向阻断转变成正向导通称正向恢复,从正向导通转变为反向阻断称为反向恢复。这两种恢复过程限制了功率二极管的工作频率。

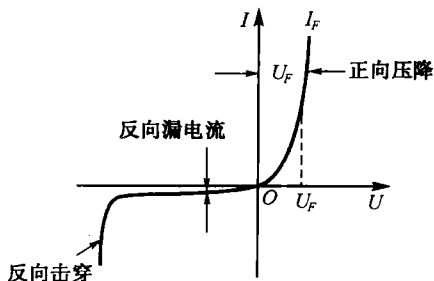


图 1-2 功率二极管伏安特性

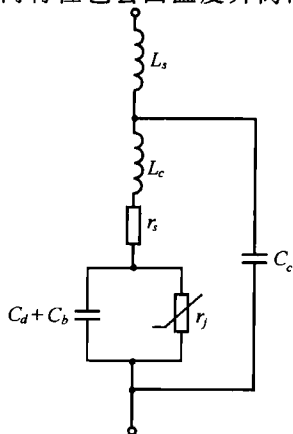


图 1-3 功率二极管的动态特性等效电路