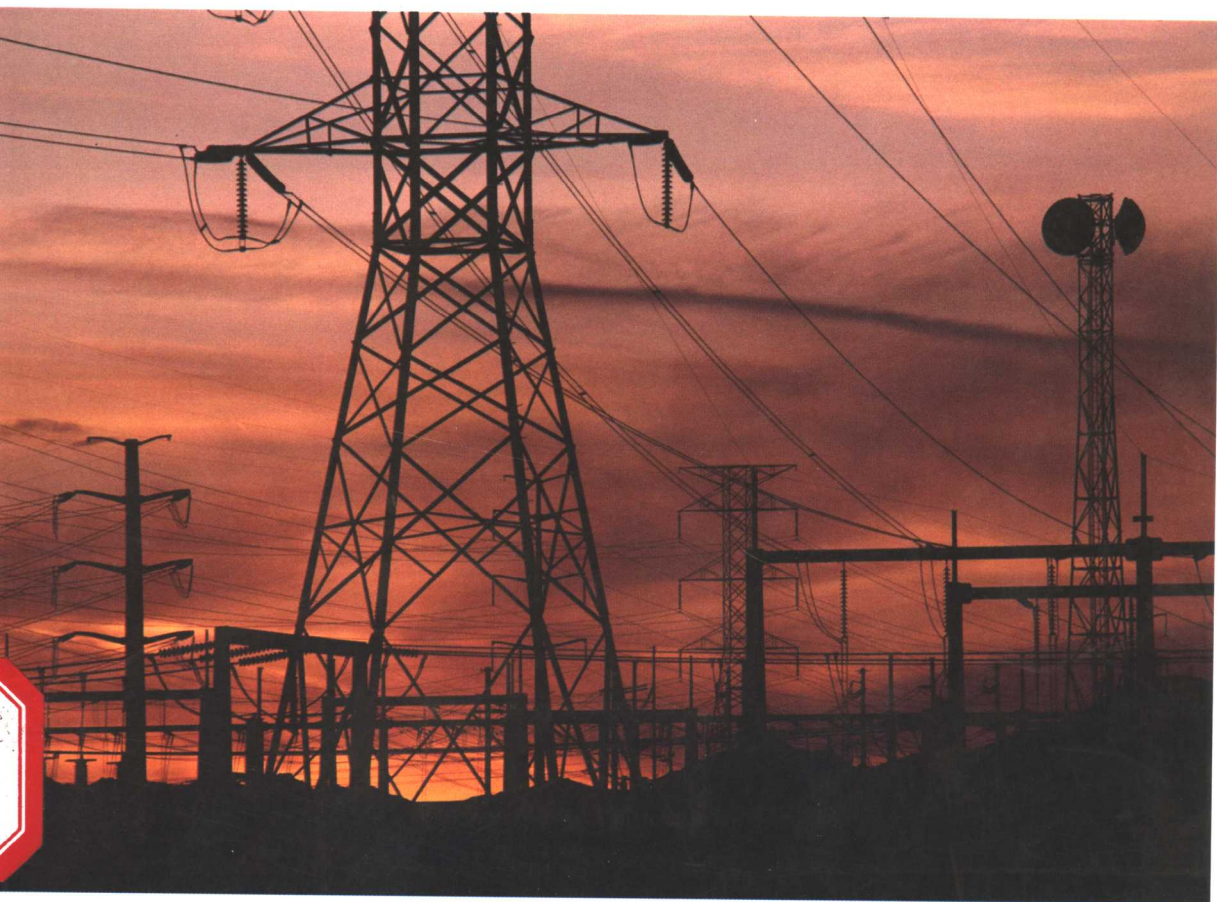


21 世纪高等院校教材

电力电子技术

贺益康 潘再平 编著



 科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

电 力 电 子 技 术

贺益康 潘再平 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是针对电气工程及其自动化专业基础课程教学需要编写的教材,其内容经过精选,既保持了学科的完整性,又反映了该领域内的最新技术成果,更注意适应教学的需求。本书内容包括功率半导体器件及其驱动与保护、可控整流与有源逆变、直流-直流变换(斩波)、直流-交流逆变电路、PWM逆变及整流、交流调压与调功、交流-交流变频、谐振软开关技术以及电力电子技术在电气工程中的应用等。

本书可作为电气工程及其自动化专业的教材,也可供相近专业选用。本书也可供从事电力电子技术、运动控制(交流调速)技术、电力系统及其自动化等领域工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/贺益康,潘再平编著. —北京:科学出版社,2004

(21世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-012839-7

I. 电… II. ①贺…②潘… III. 电力电子学-高等学校-教材
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 004853 号

策划编辑:巴建芬/文案编辑:彭 斌 姚 晖/ 责任校对:朱光光

责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年4月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2004年4月第一次印刷 印张: 19

印数: 1—3 000 字数: 364 000

定价: 25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

目 录

第一章 功率半导体器件	1
1.1 概述	1
1.2 大功率二极管	4
1.3 晶闸管	8
1.4 大功率晶体管	24
1.5 功率场效应晶体管	29
1.6 绝缘栅双极型晶体管	33
1.7 其他新型功率开关器件	37
本章小结	40
思考题与习题	42
第二章 功率半导体器件的驱动与保护	45
2.1 晶闸管的驱动与保护	45
2.2 电流型自关断器件的驱动	74
2.3 电压型自关断器件的驱动	82
2.4 自关断器件的保护	89
本章小结	92
思考题与习题	93
第三章 交流-直流(AC-DC)变换	97
3.1 单相可控整流电路	97
3.2 三相可控整流电路	109
3.3 有源逆变电路	126
3.4 电容滤波的不控整流电路	133
3.5 整流电路的谐波及功率因数	137
3.6 大功率整流电路	141
本章小结	148
思考题与习题	149
第四章 直流-直流(DC-DC)变换	152
4.1 DC-DC变换的基本控制方式	152
4.2 基本DC-DC变换器	155
4.3 晶闸管斩波器	170
4.4 桥式可逆斩波器	174

本章小结·····	176
思考题与习题·····	177
第五章 直流-交流(DC-AC)变换 ·····	178
5.1 逆变电路概述 ·····	178
5.2 负载谐振式逆变电路 ·····	184
5.3 强迫换流式逆变电路 ·····	188
5.4 逆变电路的多重化及多电平化 ·····	192
5.5 脉宽调制型(PWM)逆变电路·····	198
5.6 PWM 整流电路 ·····	218
本章小结·····	221
思考题与习题·····	222
第六章 交流-交流(AC-AC)变换 ·····	224
6.1 交流调压电路 ·····	224
6.2 交-交变频电路 ·····	236
6.3 矩阵式变换电路 ·····	245
本章小结·····	250
思考题与习题·····	250
第七章 谐振软开关技术 ·····	252
7.1 谐振软开关的基本概念 ·····	252
7.2 典型谐振开关电路 ·····	256
本章小结·····	265
思考题与习题·····	265
第八章 电力电子技术在电气工程中的应用 ·····	267
8.1 晶闸管-直流电动机调速系统 ·····	267
8.2 晶闸管无换向器电机 ·····	272
8.3 异步电机变频调速系统 ·····	274
8.4 变速恒频发电技术 ·····	278
8.5 有源电力滤波器 ·····	282
8.6 不间断电源 ·····	285
8.7 静止无功补偿 ·····	287
8.8 静止无功发生器 ·····	290
8.9 高压直流输电 ·····	292
8.10 灵活交流输电系统·····	294
本章小结·····	295
参考文献 ·····	297

第一章 功率半导体器件

功率半导体器件是电力电子电路的基础,要想学好电力电子技术,必须掌握功率半导体器件的特性和使用方法。本章主要介绍各种电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数。其中包括不可控的功率二极管、半控的晶闸管和全控的自关断器件,诸如大功率双极型晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(power MOSFET)、绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)等。

1.1 概 述

1.1.1 功率半导体器件的定义

图 1-1 为电力电子装置的示意图,输入电功率经功率变换器变换后输出至负载。功率变换器即为通常所说的电力电子电路(也称主电路),它由电力电子器件构成。目前,除了在大功率高频微波电路中仍使用真空管(电真空器件)外,其余的电力电子电路均由功率半导体器件组成。

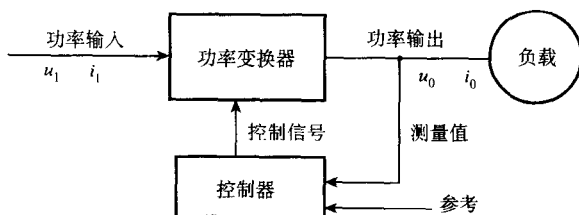


图 1-1 电力电子装置示意图

功率半导体器件的工作特点如下:

1) 与模拟电子电路中半导体器件工作在线性放大状态下不同,通常情况下,功率半导体器件都工作在开关状态。管子导通时,通态阻抗很小,相当于短路,管压降近似为零,流过的电流由外电路决定;管子关断时,断态阻抗很大,相当于断路,漏电流近似为零,管子两端的电压也由外电路决定。由于电力电子电路处理的大多为高电压、大电流的电,要求功率半导体器件的导通压降低、漏电流小,这样才能保证功率半导体器件在导通和阻断时损耗小,从而避免器件的发热。通常情况下,功率半导体器件的断态漏电流很小,断态损耗不大,通态损耗占器件功率损耗的主要部分。

2) 在高频逆变器、高频整流器等频率较高的电力电子电路中,功率半导体器件的开通、关断频率比较高,因此必须考虑功率半导体器件由断态转换成通态及由通态转换成断态时在转换过程中所产生的损耗,分别称之为开通损耗和关断损耗,总称为开关损耗。开关损耗在高频电力电子电路中占总损耗(通态损耗、断态损耗和开关损耗)的主要部分,通常采用开通、关断缓冲电路来降低开关损耗。

3) 尽管电力电子电路所处理的电功率大至兆瓦级,小到毫瓦级,但大功率却是功率半导体器件的特点,这要求功率半导体器件应该是能承受高电压、大电流的器件,而且需要安装散热器,防止因损耗而散发的热量导致器件温度过高而损坏。

综合上面功率半导体器件的工作特点,一个理想的功率半导体器件应该具有好的静态和动态特性,在截止状态时能承受高电压且漏电流要小;在导通状态时能流过大电流和很低的管压降;在开关转换时,具有短的开、关时间;通态损耗、断态损耗和开关损耗均要小,同时还要能承受高的 di/dt 和 du/dt 以及具有全控功能。

1.1.2 功率半导体器件的发展

功率半导体器件是电力电子技术的基础,也是电力电子技术发展的“龙头”。从 1958 年美国通用电气公司研制出世界上第一个工业用普通晶闸管开始,电能的变换和控制就开始了从旋转的变流机组和静止的离子变流器进入由功率半导体器件构成的变流器时代。功率半导体器件的发展经历了以下阶段:

大功率二极管产生于 20 世纪 40 年代,是功率半导体器件中结构最简单、使用最广泛的一种器件。目前已形成整流二极管(rectifier diode)、快恢复二极管(fast recovery diode, FRD)和肖特基二极管(schottky barrier diode, SBD)等 3 种主要类型。

20 世纪 60 年代出现的晶闸管(thyristor, or silicon controlled rectifier, SCR)可以算作是第一代电力电子器件,它的出现使电力电子技术发生了根本性的变化。但它是一种无自关断能力的半控器件,应用中必须考虑关断问题,电路结构上必须设置关断(换流)电路,大大复杂了电路结构、增加了成本、限制了在频率较高的电力电子电路中的应用。此外晶闸管的开关频率也不高,难于实现变流装置的高频化。晶闸管的派生器件有逆导晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管等。

20 世纪 70 年代出现了称之为第二代的自关断器件,如门极可关断晶闸管(gate-turn-off thyristor, GTO),大功率双极型晶体管(bipolar junction transistor, BJT, or giant transistor, GTR),功率场效应管(power metal oxide semiconductor field effect transistor, power MOSFET)等,它们的开、关均可由控制极(门极、基极、栅极)控制,开关频率相对晶闸管较高,可达几至几百千赫兹。但也有不足之处:GTR、GTO 开关频率仍较低(几千赫兹);GTO 是电流控制型器件,因而在关断时需要很大的反向驱动电流;GTO 通态压降大、 du/dt 及 di/dt 耐量低,需要较大的

吸收电路;GTR 的驱动电流较大、耐浪涌电流能力差,耐压低、易受二次击穿而损坏;power MOSFET 开关速度快、工作频率高(可达 100kHz 以上),为现有电力电子器件中频率之最,因而最适合应用于开关电源、高频感应加热等高频场合,但其电流容量小、耐压低、通态压降大,不适宜运用于大功率装置。

20 世纪 80 年代出现了以绝缘栅极双极型晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT 或 IGT)为代表的第三代复合导电机构的场控半导体器件,另外还有静电感应式晶体管(static induction transistor, SIT),静电感应式晶闸管(static induction thyristor, SITH),MOS 控制晶闸管(MOS controlled thyristor, MCT),集成门极换流晶闸管(integrated gate-commutated thyristor, IGCT)等。这些器件有很高的开关频率,为几十至几百千赫兹,有更高的耐压,电流容量也大,可构成大功率、高频的电力电子电路。

20 世纪 80 年代后期,功率半导体器件的发展趋势为模块化、集成化,按照电力电子电路的各种拓扑结构,将多个相同的功率半导体器件或不同的功率半导体器件封装在一个模块中,这样可缩小器件体积、降低成本、提高可靠性。现已出现了第四代电力电子器件——集成功率半导体器件(power integrated circuit, PIC),它将功率器件与驱动电路、控制电路及保护电路集成在一块芯片上,从而开辟电力电子器件智能化的方向,具有广阔的应用前景。目前经常使用的智能功率模块(intelligent power module, IPM)就是典型的例子,IPM 除了集成功率器件和驱动电路以外,还集成了过压、过流、过热等故障监测电路,并可将监测信号传送到 CPU,以保证 IPM 自身不受损坏。

值得指出的是新一代器件的出现并不意味着老的器件被淘汰,世界上 SCR 产量仍占全部功率半导体器件总数的一半,是目前高压、大电流装置中不可替代的元件。

1.1.3 功率半导体器件的分类

功率半导体器件可按可控性、驱动信号类型来进行分类。

1. 按可控性分类

根据能被驱动(触发)电路输出控制信号所控制的程度,可将功率半导体器件分为不控型器件、半控型器件、全控型器件等 3 种。

(1) 不控型器件

不能用控制信号来控制开通、关断的功率半导体器件,如大功率二极管。此类器件的开通和关断完全由其在主电路中承受的电压、电流决定。对大功率二极管来说,加正向阳极电压,二极管导通;加反向阳极电压,则二极管关断。

(2) 半控型器件

能利用控制信号控制其导通,但不能控制其关断的功率半导体器件称为半控型器件。晶闸管及其大多数派生器件(GTO 除外)都为半控型器件,它们的开通由来自触发电路的触发脉冲来控制,而关断则只能由其在主电路中承受的电压、电流或其他辅助换流电路来完成。

(3) 全控型器件

能利用控制信号控制其导通,也能控制其关断的功率半导体器件称为全控型器件,通常也称为自关断器件。GTO、GTR、P-MOSFET、IGBT 等都是全控型器件。

2. 按驱动信号类型分类

(1) 电流驱动型

通过在控制端注入或抽出电流来实现开通或关断的器件称为电流驱动型功率半导体器件。GTO、GTR 为电流驱动型功率半导体器件。

(2) 电压驱动型

通过在控制端和另一公共端加入一定的电压信号来实现开通或关断的器件称为电压驱动型功率半导体器件。P-MOSFET、IGBT 为电压驱动型功率半导体器件。

1.2 大功率二极管

在电力电子装置中,常使用不可控的大功率二极管。这种电力电子器件常被用于不可控整流、电感性负载回路的续流、电压源型逆变电路提供无功路径以及电流源型逆变电路换流电容与反电势负载的隔离等场合。由于大功率二极管的基本原理和特性与一般电子线路中使用的二极管相同,本节着重在大功率、快恢复等特点上进行简述。

1.2.1 大功率二极管的结构

大功率二极管的内部结构是一个具有 P 型及 N 型两层半导体、一个 PN 结和阳极 A、阴极 K 的两层两端半导体器件,其符号表示如图 1-2(a)所示。

从外部构成看,可分成管芯和散热器两部分。这是由于二极管工作时管芯中要通过强大的电流,而 PN 结又有一定的正向电阻,管芯会因损耗而发热。为了管芯的冷却,必须配备散热器。一般情况下,200A 以下的管芯采用螺旋式(图 1-2(b)),200A 以上则采用平板式(图 1-2(c))。

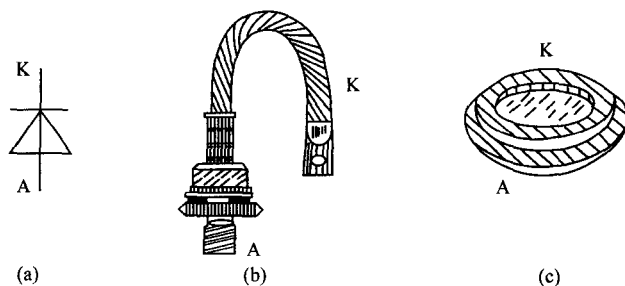


图 1-2 大功率二极管
(a) 符号; (b) 螺旋式; (c) 平板式

1.2.2 大功率二极管的特性

1. 大功率二极管的伏安特性

二极管阳极和阴极间的电压 U_{ak} 与阳极电流 i_a 间的关系称为伏安特性, 如图 1-3 所示。第 I 象限为正向特性区, 表现为正向导通状态。当加上小于 0.5V 的正向阳极电压时, 二极管只流过微小的正向电流。当正向阳极电压超过 0.5V 时, 正向电流急剧增加, 曲线呈现与纵轴平行趋势。此时阳极电流的大小完全由外电路决定, 二极管只承担一个很小的管压降 $U_F = (0.4 \sim 1.2)V$ 。

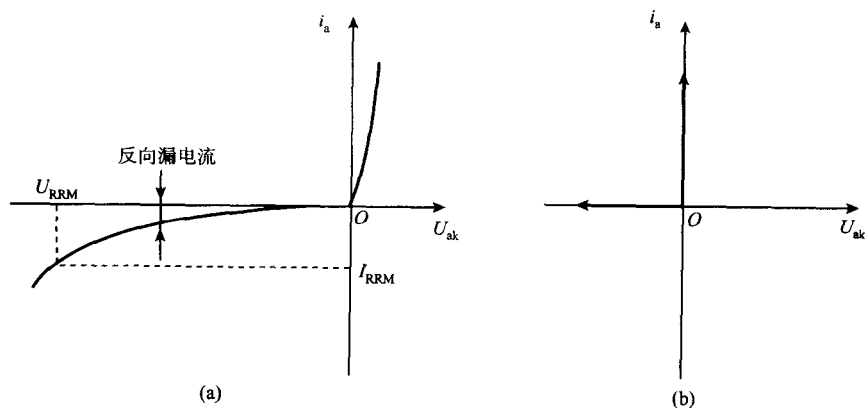


图 1-3 大功率二极管的伏安特性
(a) 实际特性; (b) 理想特性

第Ⅲ象限为反向特性区,表现为反向阻断状态。当二极管加上反向阳极电压时,开始只有极小的反向漏电流,特性平行横轴。随着电压增加,反向电流有所增大。当反向电压增加到一定程度时,漏电流就开始急剧增加,此时必须对反向电压加以限制,否则二极管将因反向电压击穿而损坏。由于大功率二极管的通态压降和反向漏电流数值都很小,忽略通态压降和反向漏电流后的大功率二极管的理想伏安特性如图 1-3(b)所示。

2. 大功率二极管的开通、关断特性

大功率二极管的工作原理和一般二极管一样都是基于 PN 结的单向导电性,即加上正向阳极电压时,PN 结正向偏置,二极管导通,呈现较小的正向电阻;加上反向阳极电压时,PN 结反向偏置,二极管阻断,呈现极大的反向电阻。半导体变流装置就是利用了大功率二极管的这种单向导电性。大功率二极管有别于普通二极管的地方是具有延迟导通和延迟关断的特征,关断时会出现瞬时反向电流和瞬时反向过电压。

(1) 大功率二极管的开通过程

大功率二极管的开通需一定的过程,初期出现较高的瞬态压降,过一段时间后,才达到稳定,且导通压降很小。上述现象表明大功率二极管在开通初期呈现出明显的电感效应,无法立即响应正向电流的变化。图 1-4 为大功率二极管开通过程中的管压降 u_D 和正向电流 i_D 的变化曲线。由图可见,在正向恢复时间 t_{fr} 内,正在开通的大功率二极管上承受的峰值电压 U_{DM} 比稳态管压降高得多,在有些二极管中的峰值电压可达几十伏。

大功率二极管开通时呈现的电感效应与器件内部机理、引线长度、器件封装所采用的磁性材料有关。在高频电路中作为快速开关器件使用时,应考虑大功率二极管的正向恢复时间等因素。

(2) 大功率二极管的关断过程

图 1-5 为大功率二极管关断过程电压、电流波形。 t_1 时刻二极管电流 I_F 开始下降, t_2 时刻下降至零,此后反向增长,这个时间段内二极管仍维持一个正向偏置的管压降 U_{D0} 。 t_3 时刻反向电流达其峰值 I_{RM} ,然后突然衰减,至 t_4 时为零。图中 $t_{rr} = t_4 - t_3$ 为反向恢复时间。这样的电流、电压波形是由于大功率二极管内载流子或电荷分布与变化的结果。 t_2 时刻后,尽管流过的电流已反向,但二极管仍正向偏置,决定了管内 PN 结存储的电荷仍是一个正向分布。从正的电荷分布到能承受反压时,需要花时间来改变这个电荷分布,也就产生了关断时延。电荷变化的大小,就决定了反向恢复电流的峰值 I_{RM} ,所以正向电流 I_F 越大,总的电荷变化也大, I_{RM} 也大。随着载流子或电荷的消失,二极管电阻增大,到一定阻值就阻断了反向恢复电流。如果反向电流很快下降至零,将会在带电感的电路中感应出一

个危险的过电压,危及二极管的安全,必须采用适当吸收电路来加以保护。

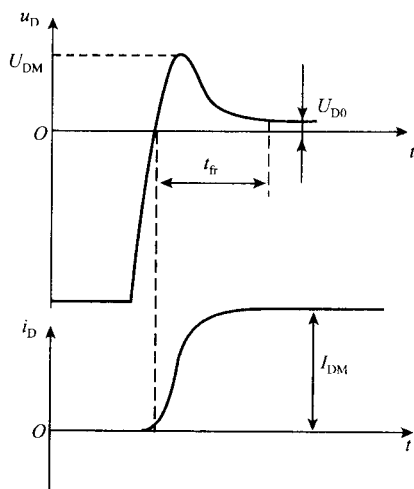


图 1-4 大功率二极管的开通过程

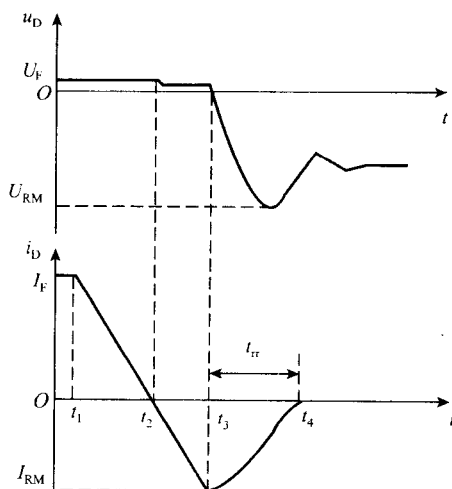


图 1-5 大功率二极管的关断过程

大功率二极管应用在低频整流电路时可不考虑其动态过程,但在高频逆变器、高频整流器、缓冲电路等频率较高的电力电子电路中就要考虑大功率二极管的开通、关断等动态过程。在上述频率较高的电路中通常使用快恢复二极管动态。反向恢复时间很短的大功率二极管称为快恢复二极管,简称快速二极管。快速二极管在结构上可分为 PN 结型结构和改进的 PiN 型结构,在同等容量下, PiN 型结构具有开通压降低,反向快速恢复性能好的优点。普通大功率二极管的反向恢复时间 $t_{rr} = (2 \sim 5) \mu s$, 快速恢复二极管的反向恢复时间 $t_{rr} = (200 \sim 500) ns$ 。

普通大功率二极管的特点是:漏电流小、通态压降较高 ($0.7 \sim 1.8 V$)、反向恢复时间较长、可获得很高的电压和电流定额,多用于牵引、充电、电镀等对转换速度要求不高的电力电子装置中。较快的反向恢复时间是快恢复整流管的显著特点,但是它的通态压降却很高 ($1.6 \sim 4 V$),它常应用于斩波、逆变等电路中充当旁路二极管或阻塞二极管。以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管,称为肖特基二极管,肖特基整流管兼有快的反向恢复时间和低的通态压降 ($0.3 \sim 0.6 V$) 的优点,但其漏电流较大、耐压能力低,常用于高频低压仪表和开关电源。

1.2.3 大功率二极管的主要参数

1. 额定正向平均电流(额定电流) I_F

指在规定 $+40^\circ C$ 的环境温度和标准散热条件下,元件结温达额定且稳定时,容

许长时间连续流过工频正弦半波电流的平均值。将此电流整化到等于或小于规定的电流等级,则为该二极管的额定电流。在选用大功率二极管时,应按元件允许通过的电流有效值来选取。对应额定电流 I_F 的有效值为 $1.57I_F$ 。

2. 反向重复峰值电压(额定电压) U_{RRM}

在额定结温条件下,元件反向伏安特性曲线(第Ⅲ象限)急剧拐弯处所对应的反向峰值电压称为反向不重复峰值电压 U_{RSM} 。反向不重复峰值电压值的 80% 称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。再将 U_{RRM} 整化到等于或小于该值的电压等级,即为元件的额定电压。

3. 反向漏电流 I_{RR}

对应于反向重复峰值电压 U_{RRM} 下的平均漏电流称为反向重复平均电流 I_{RR} 。

4. 正向平均电压 U_F

在规定的 $+40^{\circ}\text{C}$ 环境温度和标准的散热条件下,元件通以工频正弦半波额定正向平均电流时,元件阳、阴极间电压的平均值,有时亦称为管压降。元件发热与损耗与 U_F 有关,一般应选用管压降小的元件以降低元件的导通损耗。

5. 大功率二极管的型号

普通型大功率二极管型号用 ZP 表示,其中 Z 代表整流特性,P 为普通型。普通型大功率二极管型号可表示如下:

ZP[电流等级]-[电压等级/100][通态平均电压组别]

如型号为 ZP50-16 的大功率二极管表示:普通型大功率二极管,额定电流为 50A,额定电压为 1600V。

1.3 晶闸管

晶闸管(SCR)也称可控硅(可控硅整流器),属半控型功率半导体器件。晶闸管能承受的电压、电流在功率半导体器件中均为最高,价格便宜、工作可靠,尽管其开关频率较低,但在大功率、低频的电力电子装置中仍占主导地位。

1.3.1 晶闸管的结构

晶闸管是大功率的半导体器件,从总体结构上看,可区分为管芯及散热器两大部分,分别如图 1-6 及图 1-7 所示。

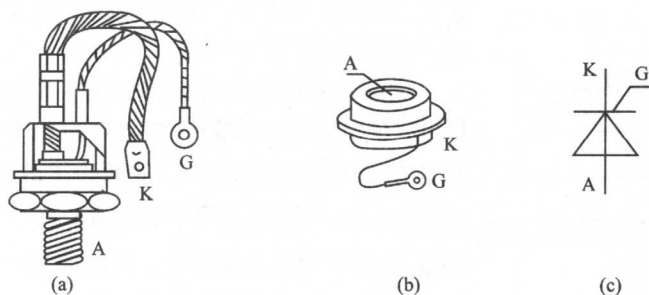


图 1-6 晶闸管管芯及电路符号表示

(a) 螺栓型; (b) 平板型; (c) 符号

管芯是晶闸管的本体部分,由半导体材料构成,具有三个与外电路可以连接的电极:阳极 A,阴极 K 和门极(或称控制极)G,其电路图中符号表示如图 1-6(c)所示。散热器则是为了将管芯在工作时由损耗产生的热量带走而设置的冷却器。按照晶闸管管芯与散热器间的安装方式,晶闸管可分为螺栓型与平板型两种。螺栓型(图 1-6(a))依靠螺栓将管芯与散热器紧密连接在一起,并靠相互接触的一个面传递热量。显然,螺旋型结构散热效果差,用于 200A 以下容量的元件;平板型结构散热效果较好,可用于 200A 以上的元件。冷却散热片的介质可以是空气,有自冷与风冷之分。自冷是利用空气的自然流动进行热交换带走传递到散热片表面的热量,风冷则是采用强迫通风设备来吹拂散热器表面带走热量,显然强迫风冷的效果比自冷效果好。由于水作为散热介质时其热容量比空气大,故在大容量或者相当容量却需要缩小散热器体积的情况下,可以采用水冷结构。水冷是用水作散热

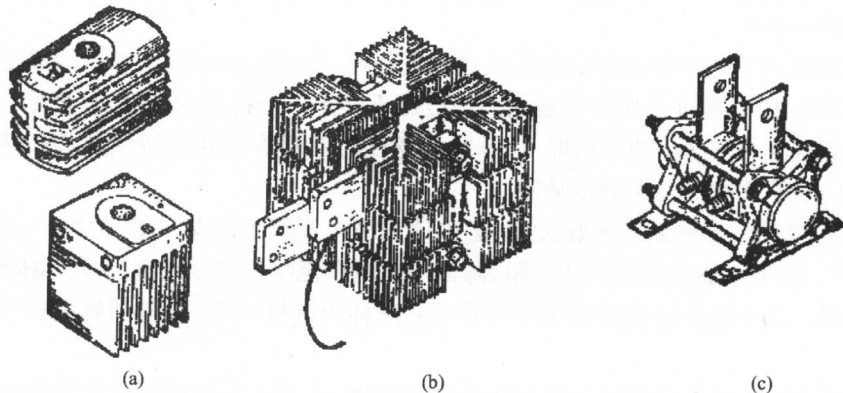


图 1-7 晶闸管的散热器

(a) 自冷; (b) 风冷; (c) 水冷

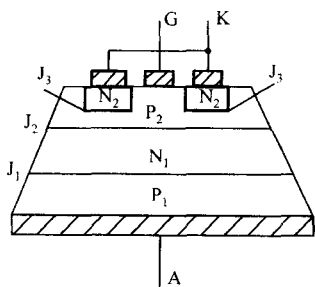


图 1-8 晶闸管管芯结构原理图

介质,使它流过平板式管芯的两个面,带走器件工作时产生的热量(图 1-7(c))。

晶闸管管芯的内部结构如图 1-8 所示,是一个四层($P_1-N_1-P_2-N_2$)三端(A、K、G)的功率半导体器件。它是在 N 型的硅基片(N_1)的两边扩散 P 型半导体杂质层(P_1 、 P_2),形成了两个 PN 结 J_1 、 J_2 。再在 P_2 层内扩散 N 型半导体杂质层 N_2 又形成另一个 PN 结 J_3 。然后在相应位置放置铝片作电极,引出阳极 A,阴极 K 及门极 G,形成了一个四层三端的大功率电子元件。这个四层半导体器件由于有三个 PN 结的存在,

决定了它的可控导通特性。

1.3.2 晶闸管的工作原理

晶闸管内部结构上有三个 PN 结。当阳极加上负电压、阴极加上正电压时(晶闸管承受反向阳极电压) J_1 、 J_3 结上反向偏置,管子处于反向阻断状态,不导通;当阳极加上正电压、阴极加上负电压(晶闸管承受正向阳极电压)时, J_2 结又处于反向偏置,管子处于正向阻断状态,仍然不导通。那么晶闸管在什么条件下才能从阻断变成导通,又能在什么条件下又从导通恢复为阻断呢?

当阳极电源使晶闸管阳极电位高于阴极电位时,晶闸管承受正向阳极电压,反之承受反向阳极电压。当门极控制电源使晶闸管门极电位高于阴极电位时,晶闸管承受正向门极电压,反之承受反向门极电压。通过理论分析和实验验证表明:

1) 只有当晶闸管同时承受正向阳极电压和正向门极电压时晶闸管才能导通,两者缺一不可。

2) 晶闸管一旦导通后门极将失去控制作用,门极电压对管子随后的导通或关断均不起作用,故使晶闸管导通的门极电压不必是一个持续的电平,只要是一个具有一定宽度的正向脉冲电压即可,脉冲的宽度与晶闸管的开通特性及负载性质有关。这个脉冲常称之为触发脉冲。

3) 要使已导通的晶闸管关断,必须使阳极电流降低到某一数值之下(约几十毫安)。这可以通过增大负载电阻,降低阳极电压至接近于零或施加反向阳极电压来实现。这个能保持晶闸管导通的最小电流称为维持电流,是晶闸管的一个重要参数。

晶闸管为什么会有以上导通和关断的特性,这与晶闸管内部发生的物理过程有关。晶闸管是一个具有 $P_1-N_1-P_2-N_2$ 四层半导体的器件,内部形成有三个 PN 结 J_1 、 J_2 、 J_3 ,晶闸管承受正向阳极电压时,其中 J_1 、 J_3 承受正向阻断电压, J_2 承受反

向阻断电压。这三个 PN 结的功能可以看做是一个 PNP 型三极管 $VT_1(P_1-N_1-P_2)$ 和一个 NPN 型三极管 $VT_2(N_1-P_2-N_2)$ 构成的复合作用,如图 1-9 所示。

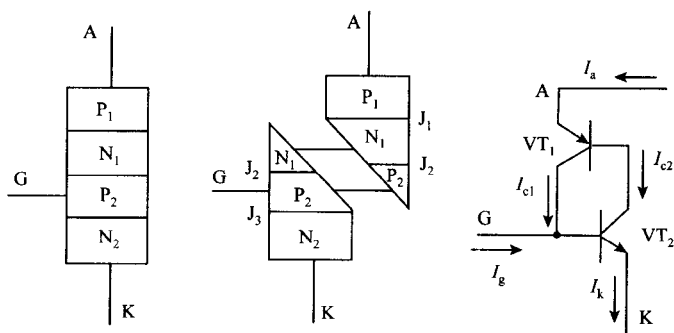


图 1-9 晶闸管的等效复合三极管效应

可以看出,两个晶体管连接的特点是一个晶体管的集电极电流就是另一个晶体管的基极电流,当有足够的门极电流 I_g 流入时,两个相互复合的晶体管电路就会形成强烈的正反馈,导致两个晶体管饱和导通,也即晶闸管的导通。

设流入 VT_1 管的发射极电流 I_{e1} 即晶闸管的阳极电流 I_a ,它就是 P_1 区内的空穴扩散电流。这样流过 J_2 结的电流应为 $I_{c1} = \alpha_1 I_a$,其中 $\alpha_1 = I_{c1}/I_{e1}$ 为 VT_1 管的共基极电流放大倍数。同样流入 VT_2 管的发射极电流 I_{e2} 即晶闸管的阴极电流 I_k ,它就是 N_2 区内的电子扩散电流。这样流过 J_2 结的电流为 $I_{c2} = \alpha_2 I_k$,其中 $\alpha_2 = I_{c2}/I_{e2}$ 为 VT_2 管的共基极电流放大倍数。流过 J_2 结的电流除 I_{c1} 、 I_{c2} 外,还有在正向阳极电压下处于反压状态下 J_2 结的反向漏电流 I_{c0} 。如果把两个晶体管分别看成两个广义的结点,则晶闸管的阳极电流应为

$$I_a = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_k + I_{c0} \quad (1-1)$$

晶闸管的阴极电流为

$$I_k = I_a + I_g \quad (1-2)$$

从以上两式中可求出阳极电流表达式为

$$I_a = \frac{I_{c0} + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-3)$$

两个等效晶体管共基极电流放大倍数 α_1 、 α_2 是随其发射极电流 I_a 、 I_c 作非线性变化的; I_a 、 I_c 很小时, α_1 、 α_2 也很小; α_1 、 α_2 随电流 I_a 、 I_c 增大而增大。

当晶闸管承受正向阳极电压但门极电压为零时, $I_g = 0$ 。由于漏电流很小, I_a 、 I_c 也很小,致使 α_1 、 α_2 很小。由式(1-3)可见,此时 $I_a \approx I_{c0}$ 为正向漏电流,晶闸管

处于正向阻断状态,不导通。

当晶闸管承受正向阳极电压而门极电流为 I_g 时,特别是当 I_g 增大到一定程度的时候,等效晶体管 VT_2 的发射极电流 I_{c2} 也增大,致使电流放大系数 α_2 随之增大,产生足够大的集电极电流 $I_{c2} = \alpha_2 I_{c2}$ 。由于两等效晶体管的复合接法, I_{c2} 即为 VT_1 的基极电流,从而使 I_{c1} 增大, α_1 也增大, α_1 的增大将导致产生更大的集电极电流 I_{c1} 流过 VT_2 管的基极,这样强烈的正反馈过程将导致两等效晶体管电流放大系数的迅速增加。当 $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1$ 时,式(1-3)表达的阳极电流 I_a 将急剧增大,变得无法从晶闸管内部进行控制,此时的晶闸管阳极电流 I_a 完全由外部电路条件来决定,晶闸管此时已处于正向导通状态。

正向导通以后,由于正反馈的作用,可维持 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$ 。此时即使 $I_g = 0$ 也不能使晶闸管关断,说明门极对已导通的晶闸管失去控制作用。

为了使已导通的晶闸管关断,惟一可行的办法是使阳极电流 I_a 减小到维持电流以下。因为此时 α_1 、 α_2 已相应减小,内部等效晶体管之间的正反馈关系无法维持。当 α_1 、 α_2 减小到 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时, $I_a \approx I_{c0}$,晶闸管恢复阻断状态而关断。

如果晶闸管承受的是反向阳极电压,由于等效晶体管 VT_1 、 VT_2 均处于反压状态,无论有无门极电流 I_g ,晶闸管都不能导通。

1.3.3 晶闸管的基本特性

1. 静态特性

静态特性又称伏安特性,指的是器件端电压与电流的关系。这里介绍阳极伏安特性和门极伏安特性。

(1) 阳极伏安特性

晶闸管的阳极伏安特性表示晶闸管阳极与阴极之间的电压 U_{ak} 与阳极电流 i_a 之间的关系曲线,如图 1-10 所示。

阳极伏安特性可以划分为两个区域:第Ⅰ象限为正向特性区,第Ⅲ象限为反向特性区。第Ⅰ象限的正向特性又可分为正向阻断状态及正向导通状态。正向阻断状态随着不同的门极电流 I_g 大小呈现不同的分支。在 $I_g = 0$ 的情况下,随着正向阳极电压 U_{ak} 的增加,由于 J_2 结处于反压状态,晶闸管处于断态,在很大范围内只有很小的正向漏电流,特性曲线很靠近并与横轴平行。当 U_{ak} 增大到一个称之为正向转折电压的 U_{bo} 时,漏电流增大到一定数值, J_1 、 J_3 结内电场削弱很多,两等效晶体管的共基极电流放大系数 α_1 、 α_2 随之增大,使电子扩散电流 $\alpha_2 I_k$ 与空穴扩散电流 $\alpha_1 I_a$ 分别与 J_2 结中的空穴和电子相复合,使得 J_2 结的电势壁垒消失。这样,晶闸管就由阻断突然变成导通,反映在特性曲线上就从阻断状态的高阻区①(高电