



21世纪高职系列教材
SHIJI GAOZHI XILIEJIAOCAI

电力电子技术

主编 / 杨庆堂 ■

哈尔滨工程大学出版社



21世纪高职系列教材
SHIJI GAOZHI XILIE JIAOCAI

电力电子技术

主 编 / 杨庆堂 副主编 / 郭敬红 王 伟

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括:功率二极管和晶闸管、可控整流电路、触发电路、全控型电力电子器件应用、保护电路、交流调压、直流斩波、变频与逆变及通用变频器等。本书可作为高等工科大学电气技术、电气自动化等专业的教材,也适用于高职院校、职工大学、电视大学,并可供其他有关专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/杨庆堂主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2008.8
ISBN 978 - 7 - 81133 - 300 - 8

I . 电… II . 杨… 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(2008)第 130172 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 13.75
字 数 310 千字
版 次 2008 年 8 月第 1 版
印 次 2008 年 8 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

21 世纪高职系列教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任委员	王景代	丛培亭	刘 义	刘 勇
	李长禄	张亦丁	张学库	杨永明
委 员	杨泽宇	季永青	罗东明	施祝斌
	唐汝元	曹志平	蒋耀伟	熊仕涛
	马瑶珠	王景代	丛培亭	刘 义
	刘 勇	刘义菊	刘国范	闫世杰
	李长禄	杨永明	杨泽宇	张亦丁
	张学库	陈良政	沈苏海	肖锦清
	周 涛	林文华	季永青	罗东明
	施祝斌	钟继雷	唐永刚	唐汝元
	郭江平	晏初宏	柴勤芳	曹志平
	蒋耀伟	熊仕涛	潘汝良	

前言

高等职业教育是我国高等教育的重要组成部分。近年来高等职业教育发展迅速,规模越来越大。为适应经济社会对高职高专人才的需求,对高职高专教育模式、培养方案特别是教材必须作出相应的调整。

电力电子技术发展异常迅速,新型元件频繁换代、层出不穷,应用领域不断扩大,日趋成熟。电力电子技术在生产自动化、节能降耗、信息技术和日用电器等方面越来越产生着举足轻重的影响。本书以能力培养为目标,突出实际、实用、实践的原则,适当减少理论推导,力求深入浅出、循序渐进地介绍电力电子学的概念、原理及应用。重点放在基本概念的阐述、典型电路原理的分析及应用实例的介绍,注重培养学生实践能力、分析和解决问题能力。书中列举的器件及应用力求反映电力电子技术的发展水平。

本书以三年制高职高专学生为编写对象,其内容包括:全控型电力电子器件;可控整流电路;晶闸管有源逆变电路;晶闸管交流开关与交流调压;变频与直流斩波电路;电力电子装置举例。对相关内容进行适当删减也适用于两年制高职和中等技术学校相关专业。本书建议使用学时为 70 学时。

本书由渤海船舶职业学院杨庆堂主编。渤海船舶职业学院郭敬红、绥中职教中心王伟为副主编。渤海船舶职业学院张占芳参编。

本书编写的具体分工为:第三、五、六章及实验部分为渤海船舶职业学院杨庆堂编写,第二、七章为渤海船舶职业学院郭敬红编写,第一、八章为辽宁葫芦岛市绥中职教中心王伟编写。第四、九章为渤海船舶职业学院张占芳编写。由于编者水平、经验有限,疏漏及错误之处在所难免,希望广大读者批评指正。

编 者

2008 年 5 月

目 录

绪 论	1
第一章 功率二极管和晶闸管	4
08 第一节 功率二极管	4
48 第二节 晶闸管及其可控单向导电性	6
28 小 结	14
78 思考题与习题	14
第二章 单相可控整流电路	16
29 第一节 单相半波可控整流电路	16
99 第二节 单相全波可控整流电路	23
201 第三节 单相桥式可控整流电路	26
111 小 结	32
911 思考题与习题	32
第三章 三相可控整流电路	34
111 第一节 三相半波可控整流电路	34
811 第二节 三相桥式全控整流电路	40
121 第三节 三相桥式半控整流电路	43
124 第四节 整流电路的换相压降与外特性	45
821 第五节 晶闸管可控整流供电的直流电动机机械特性	47
131 第六节 晶闸管的保护与容量扩展	50
132 小 结	58
132 思考题与习题	58
第四章 晶闸管触发电路及应用实例	60
131 第一节 对触发电路的要求	60
141 第二节 简单触发电路	61
141 第三节 单结晶体管触发电路	63
841 第四节 正弦波同步触发电路	68
121 第五节 锯齿波同步触发电路	73
121	

1	第六节 集成触发电路和数字触发电路(定相)	77
4	第七节 触发脉冲与主电路电压的同步(定相)	80
4	小 结	84
8	思考题与习题	85
11	第五章 全控型电力电子器件	87
11	第一节 电力晶体管	87
10	第二节 可关断晶闸管	95
10	第三节 功率场效应晶体管	99
10	第四节 绝缘栅双极型晶体管	105
10	第五节 其他新型电力电子器件	111
10	小 结	116
10	思考题与习题	117
10	第六章 晶闸管有源逆变电路	118
10	第一节 有源逆变的工作原理	118
10	第二节 逆变失败与逆变角的限制	123
10	第三节 晶闸管直流可逆拖动的工作原理	124
10	第四节 绕线转子异步电动机的串级调速与高压直流输电	128
10	第五节 晶闸管装置的功率因数、谐波对电网的影响	131
10	小 结	135
10	思考题与习题	135
10	第七章 晶闸管交流开关与交流调压	137
10	第一节 双向晶闸管	137
10	第二节 晶闸管交流开关	140
10	第三节 单相交流调压电路	143
10	第四节 三相交流调压电路	148
10	小 结	150
10	思考题与习题	151

第八章 变频电路与直流斩波电路	152
第一节 变频电路的基本概念	152
第二节 并联谐振与串联谐振逆变器	154
第三节 强迫换流式逆变电路(三相逆变器)	158
第四节 直流斩波电路	164
小 结	169
思考题与习题	169
第九章 电力电子装置举例	170
第一节 开关电源	170
第二节 有源功率因数校正装置	177
第三节 不间断电源	179
第四节 晶闸管中频装置	184
第五节 通用变频器	185
小 结	186
思考题与习题	186
实验	187
实验一 晶闸管简易测试及其导通、关断条件	187
实验二 单结管触发电路及单相半控桥式整流电路三种负载的研究	189
实验三 正弦波同步触发电路与三相半波可控整流电路的研究	193
实验四 锯齿波同步触发电路与三相全控桥式整流电路的研究	198
实验五 三相半控桥式整流电路的研究	202
实验六 三相半波(零式)有源逆变电路的研究	205
实验七 IGBT 斩波电路的研究	207
参考文献	210

绪论

一、电力电子技术概述

电力电子技术是一种利用电力电子器件对电能进行控制、转换和传输的技术。它的研究对象是电力电子器件的应用、电力电子电路的电能变换原理及电力电子装置的开发与应用。电力电子技术包括电力电子器件、电路和控制三个部分,是横跨电力、电子和控制三大电气工程技术之间的交叉学科,是目前最活跃、发展最快的一门新兴学科。半导体电子技术发展至今已形成两大技术领域,即以集成电路为核心的微电子技术和以功率半导体器件(亦称电力电子器件)为核心的电力电子技术,前者主要用于信息处理,向小功率发展,后者主要用于对电力的处理,向大功率多功能发展。

由于电力电子器件具有体积小、质量轻、容量大、损耗小、寿命长、维护方便、控制性能好以及可采用集成电路制造工艺等优点,用它组成的装置具有可靠性高、节能性好等优点。近半个世纪来,各种电力电子新器件不断涌现,应用范围已从传统的工业、交通、电力等部门扩大到信息、通信、家用电器以及宇宙开发等领域。实际上,电力电子技术的发展已不局限于高电压、大电流的工业范畴,当你开车、乘电梯、使用计算机、打开空调、看电视或听音乐时,你都在与电力电子技术打交道,电力电子技术已发展为一种无所不在的技术。

电力电子器件的发展可分为以下两个阶段。

(1) 传统电力电子器件 主要是功率整流管与晶闸管(亦称可控硅),属于不控与半控器件。自1957年生产第一只晶闸管以来,现已由普通晶闸管衍生出快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、不对称晶闸管等品种,器件的电压、电流等技术参数均有很大提高,单只普通晶闸管的容量已达8 000 V, 6 000 A。此类器件通过门极只能控制开通而不能控制关断。另外它立足于分立元件结构,工作频率难以提高,因而大大限制了其应用范围。但是晶闸管器件价格相对低廉,在大电流、高电压的发展空间依然较大,目前以晶闸管为核心的设备仍然在许多场合使用,晶闸管及其相关知识目前仍是初学者的基础。

(2) 现代电力电子器件 20世纪80年代以来,将微电子技术与电力电子技术相结合,研制出新一代高频、全控型的现代电力电子器件。主要有电力晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)、功率场效应管(MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、MOS门极晶闸管(MCY)、静电感应晶体管(SIT)等。特别是以绝缘栅双极晶体管(IGBT)与静电感应晶体管(SIT)为代表的全控型复合器件的问世,它们集MOSFET驱动功率小、开关速度快和GTR载流能力强的优点于一身,在大容量、高频率的电力电子电路中表现出非凡的性能。



二、电力电子技术的主要功能与应用

电力电子电路是以电力电子器件为核心,通过对不同电路的各种控制来实现对电能的转换和控制,它的基本功能有以下四种。

(1) 整流与可控整流电路亦称交流/直流(AC/DC)变换电路,把交流电变换为固定或可调直流。

(2) 逆变电路亦称直流/交流(DC/AC)变换电路,把直流电变换成频率固定或频率可调的交流电。如把直流电能逆变成 50 Hz 的交流电返送电网称为有源逆变,把直流电能逆变为固定频率或频率可调的交流供给负载则称为无源逆变。

(3) 直流斩波电路亦称直流/直流(DC/DC)变换电路,其功能是把固定直流电变换成可调或固定直流电。

(4) 交流调压与周波变换亦称交流/交流(AC/AC)变换电路,把恒定交流变换为可变交流称为交流调压,把固定频率的交流电变为频率可变的交流电称为变频电路。

在实际使用时可将一种或几种功能电路进行组合,上述四种电路的变换功能统称为变流,因此电力电子技术通常也称为变流技术。也可形象通俗地讲,变流技术是将电网的交流电,所谓的“粗电”,通过电力电子电路进行变换,精练到使电能稳定、波形、频率、数值、抗干扰性能等方面符合各种用电设备需要的“精电”过程。据先进国家 20 世纪 90 年代的统计资料,超过 60% 以上的电能是经过电力电子技术处理变换后才使用的。

电力电子技术在生产与生活中的具体应用主要有:直流可调电源、电镀、电解、加热、照明控制与节能照明、不停电电源与开关电源、充电、电磁合闸、电机励磁、电焊接、电网无功与谐波补偿、高压直流输电、光电池与燃料电池变换、固态断路器、感应加热、电机直流调速与变频交流调速、电力牵引(地铁机车、矿山机车、城市电车、电瓶车、电动汽车)、汽车电气、计算机及通信电源以及各类家电与便携式电器等。

三、电力电子技术的发展

(一) 电力电子器件的发展

器件是电力电子技术的基础,也是电力电子技术发展的动力,电力电子技术的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。电力电子器件的发展方向主要在以下六个方面。

(1) 大容量化 应用微电子工艺,使单个器件的电压、电流容量进一步提高,以满足高压大电流需要。

(2) 高频化 采用新材料、新工艺,在一定的开关损耗下尽量提高器件的开关速度,使装置运行在更高频率。频率提高不仅可提高系统的性能、改善波形,而且大大减小装置的体积与质量,因此高频器件的技术性能指标用容量工作频率来衡量。

(3) 易驱动 由电流驱动发展为电压驱动,大力发展 MOS 结构的复合件如 IGBT, MCT。由于驱动功率小,因此可研制专用集成驱动模块,甚至把驱动与器件制作于一个芯片上,以

便更适合中小功率控制。

(4) 降低导通压降 研制出比肖特基二极管正向压降还低的器件以提高变流效率,节省电能。

(5) 模块化 采用制造新工艺如塑封化、表面贴装化和桥式化,将几个器件封装在一起以缩小体积与减少连线。如几个 IGBT 器件与续流管以及保护、检测器件、驱动等组成桥式模块,称为智能器件,缩写为 IPM。

(6) 功率集成化 充分应用集成电路工艺,将驱动、保护、检测、控制、自诊断等功能与电力电子器件集成于一块芯片,发展为功率集成电路 PIC,实现集成电路功率化、功率器件集成化,使功率与信息集成在一起,成为机电一体化的接口,并逐步向智能化方向发展。

(二) 变流电路与控制的发展

传统电力电子技术以整流为主导,以移相触发 PID 模拟控制方式为主。20 世纪 80 年代高频全控器件的出现,使逆变、斩波电路的应用日益广泛。由于逆变、斩波电路中都需要直流电源,因此整流电路仍占重要地位。在逆变、斩波电路中,以斩控形式的脉宽调制(PWM)技术大量应用,使变流装置的功率因数提高、谐波减少、动态响应快。特别是以微处理器实现的数字控制替代模拟控制,并应用了静止旋转坐标变换的矢量控制,使电力电子技术日臻完善。

电力电子技术在 21 世纪的主要研究方向之一是实现电力电子装置的所谓“无公害即绿色化”,其含义是:装置 $\cos\varphi = 1$, 输入电流正弦无谐波,电压、电流过零切换,以实现开关损耗降为零且避免装置对电网与负载的电磁辐射和高频干扰。

四、课程性质与学习方法

电力电子技术是一门专业基础性质很强且与生产实际应用联系紧密的课程,在高等学校电气工程类专业中被确定为主干课程。

学习本课程时,要着重物理概念与分析方法的学习,理论要结合实际,尽量做到器件、电路、应用三者结合。在学习方法上要特别注意电路的波形与相位分析,抓住电力电子器件在电路中导通与截止的变化过程,从波形分析中进一步理解电路的工作情况,同时要注意培养读图与分析能力,掌握器件计算、测量、调整以及故障分析等方面的实践能力。

本课程涉及高等数学、电工基础、电子技术、电机拖动等知识,学习时需要复习相关课程,综合运用所学知识。



第一章 功率二极管和晶闸管

第一节 功率二极管

完全纯净的半导体在常温下可以激发出少量自由电子和相应数量的空穴,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。

在纯净半导体内掺入微量杂质如五价元素后,在晶体中出现多余自由电子,使自由电子数远大于空穴数,此类材料称为 N 型半导体。同样在纯净半导体内掺入三价元素后,晶体中出现多余空穴称为 P 型半导体。N 型半导体中的自由电子与 P 型中的空穴称为多数载流子简称多子;P 型半导体中的自由电子与 N 型中的空穴称为少数载流子简称少子。这种有不同极性载流子参与导电的器件统称为双极型器件。根据掺入杂质的多少可控制多子的浓度,但不管掺入多少杂质,半导体中正负电荷总量均相等且保持电中性。

现将一种半导体基片(N 型或 P 型)通过扩散或合金工艺在其上面形成相反导电类型,这两部分即形成 PN 结。PN 结在交界面处空穴与电子浓度的差异,使载流子从高浓度区向低浓度区扩散。图 1-1(a)所示即为 PN 结形成原理,P 区的空穴扩散到 N 区,N 区中的自由电子扩散到 P 区,在交界面出现空间电荷区,形成由 N 区指向 P 区的内电场。内电场阻止多子继续扩散同时又帮助少子向各自对方漂移,在一定温度下,扩散与漂移达到动态平衡,空间电荷区达到稳定值。

PN 结是半导体器件的核心,掌握 PN 结的性质是分析器件的基础。PN 结的主要特性是单向导电性,当 PN 结外加正向电压(P 正 N 负)时,外电压产生的外电场削弱内电场,使扩散大于漂移,空间电荷减少,PN 结变窄,使正向电流不断流过,称为正向导通,此时 PN 结表现为低阻,其电压降只有 0.7 V 左右。PN 结加上反向电压(P 负 N 正)时,外电压加强内电场,从而强烈阻止 PN 结两边的多子扩散,使 PN 结变宽,仅有少子通过漂移形成极小的反向漏电流,PN 结表现为高阻,称为反向阻断,这就是 PN 的单向导电特性。由 PN 结组成的二极管是结构最简单、应用最广泛的电子器件,是许多其他器件的基本组成部分。

功率二极管是允许电流较大电压较高的二极管,为了缩小体积和减少连线,除单管结构外,已有模块结构,即把几个管子集成为一个器件。由于流过电流较大,故其引线与焊接电阻的影响较明显。为了提高反向耐压必须降低掺杂浓度,这将导致二极管正向压降增大。

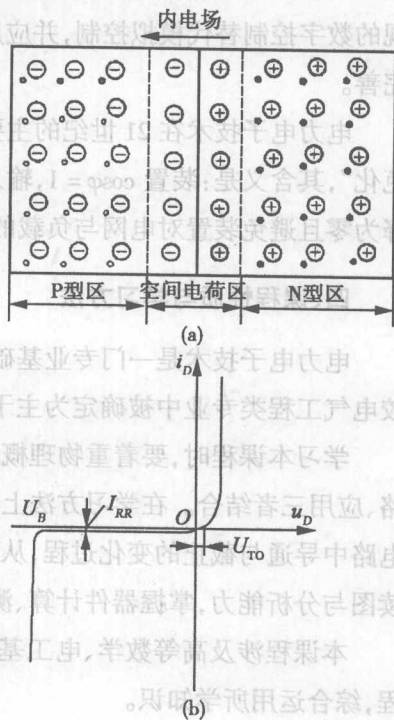


图 1-1 PN 结的形成与功率二极管正向伏安特性

任何电子器件耐压的提高都是牺牲其他性能指标来达到的。

功率二极管本身消耗功率,使用时必须十分重视管子的散热,应安装导热良好的散热器。目前功率电子器件常用的散热器冷却方式有自冷、风冷、液冷和沸腾冷(热管)四种。功率二极管的正常运行,在很大程度上取决于散热器的合理选配以及器件与散热器之间的装配质量。

功率二极管的伏安特性如图 1-1(b)所示,当外加电压大于 U_{TO} (门槛电压)即克服 PN 结内电场后管子才开始导通,正向导通后其电压基本不随电流变化。反向工作时,当反向电压增大到 U_B (击穿电压)时,PN 结内电场达到雪崩击穿强度时,反向漏电流 I_{RR} 剧增,导致二极管击穿损坏。

用于工频整流的功率二极管亦称整流管,国产型号为 ZP,主要参数说明如下。

(1) 额定正向平均电流 I_F (额定电流)指管子长期运行在规定散热条件下,允许流过正弦半波时的最大平均电流,将此电流值配规定系列的电流等级即为管子的额定电流。 I_F 受发热限制,因此在使用中按有效值相等来选取管子电流定额。对应额定电流 I_F ,其有效值为 $1.57I_F$ 。

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} (额定电压)指管子反向能重复施加的最高峰值电压,此值通常为击穿电压 U_B 的 $2/3$ 。

(3) 正向平均电压 U_F 在规定条件下,管子流过额定正弦半波电流时,管子两端的正向平均电压亦称管压降,此值比直流压降小。

(4) 反向漏电流 I_{RR} 对应于反向重复峰值电压时的漏电流。

(5) 最高工作结温 T_{jm} 指器件中 PN 结不至于损坏的前提下所能承受的最高平均温度。 T_{jm} 通常在 $125 \sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。

ZP 系列参数列于表 1-1。由于工作于工频,故动态参数不标出。

表 1-1 部分功率二极管主要性能参数

型号	额定正向平均 电流 I_F/A	反向重复峰值 电压 U_{RRM}/V	反向电流 I_{RR}	正向压降 U_F/V	反向恢复 时间 t_r	备注
ZP1~4 000	1~4 000	50~5 000	1~40 mA	0.4~1		
ZK3~2 000	3~2 000	100~4 000	1~40 mA	0.4~1	$< 10\text{ }\mu\text{s}$	
10DF4	1	400		1.2	$< 100\text{ ns}$	
31DF2	3	200		0.98	$< 35\text{ ns}$	
30BF80	3	800		1.7	$< 100\text{ ns}$	
50WF40F	5.5	400		1.1	$< 40\text{ ns}$	
10CTF30	10	300		1.25	$< 45\text{ ns}$	
25JPF40	25	400		1.25	$< 60\text{ ns}$	
HFA90NH40	90	400		1.3	$< 140\text{ ns}$	
HFA180MD60D	180	600		1.5	$< 140\text{ ns}$	
HFA75MC40C	75	400		1.3	$< 100\text{ ns}$	
MR876	50	600	50 μA	1.4	$< 400\text{ ns}$	
MUR10 020CT	50	200	20 μA	1.1	$< 50\text{ ns}$	
MBR30 045CT	150(单支)	45	0.8 mA	0.78	≈ 0	

第二节 晶闸管及其可控单相导电性

晶闸管亦称可控硅,是硅晶体闸流管的简称。它是 20 世纪 60 年代以来发展起来的一种较理想的大功率变流器件,它的出现使大功率变流技术进入一个新时代。

晶闸管包括普通晶闸管、双向晶闸管、快速晶闸管、可关断晶闸管、光控晶闸管和逆导晶闸管。本章着重介绍普通晶闸管,其他晶闸管将在有关章节介绍。本书如不特别说明,则所说的晶闸管就指普通晶闸管。

一、晶闸管的结构及特性

晶闸管是一种大功率半导体元件,其外形大致有三种:塑封形、螺旋形与平板形。它有三个引出极,阳极(A)、阴极(K)和门极(G),外形与符号如图 1-2 所示。塑封形多见于额定电流 10 A 以下;螺旋形额定电流多为 10 ~ 200 A;平板形用于 200 A 以上。大功率晶闸管工作时发热较大,因此必须安装散热器。螺旋式晶闸管是紧栓在铝制散热器上的,如图 1-2(c) 所示。平板式则由两个彼此绝缘的散热器把晶闸管紧紧夹在中间,如图 1-2(d) 所示。

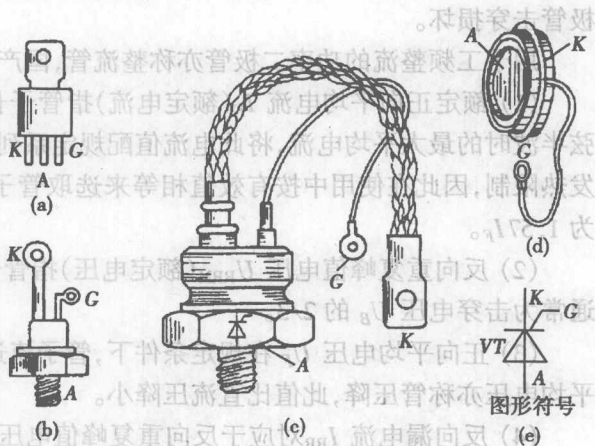


图 1-2 晶闸管的外形、图形及符文字符号

晶闸管的内部原理性结构,如图 1-3 所示。管芯由四层半导体($P_1N_1P_2N_2$)组成,有三个引出极端(A, K, G),三个 PN 结 J_1, J_2, J_3 。当晶闸管阳极与阴极加上反向电压时, J_1, J_3 结处于反向阻断状态;当加上正向电压时, J_2 结处于反向阻断状态。那么在什么条件下,晶闸管才能从正向阻断状态转变为正向导通状态呢?下面按图 1-4 连接实验电路,进行晶闸管的导通关断实验。阳极电源 E_a 经过双向刀开关(Q_1) 连接负载(白炽灯) 接到晶闸管的阳极(A) 与阴极(K),组成晶闸管的主电路。流过晶闸管阳极的电流称阳极电流 I_a 。晶闸管阳、阴极两端的电压称为阳极电压 U_a 。门极电源 E_g 经双向刀开关(Q_2) 连接晶闸管的门极(G) 与阴极(K),组成控制电路亦称触发电路。流过门极的电流称为门极电流 I_g ,门极与阴极之间的电压称门极电压 U_g ,实验步骤如下。

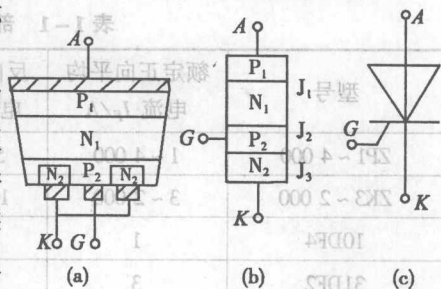


图 1-3 晶闸管的内部结构

(1) 当 Q_1 反向闭合,晶闸管承受反向阳极电压,不论 Q_2 正、反向闭合即门极承受何种电压,灯泡都不亮,说明晶闸管处于反向阻断状态。

(2) 当 Q_1 正向闭合,晶闸管承受正向阳极电压,仅当 Q_2 正向闭合即门极也承受正向电压时灯泡才亮。

(3) 晶闸管一旦导通, Q_2 不论正接、反接或者断开,晶闸管保持导通状态不变。说明门

极失去了控制作用。

(4) 要使晶闸管关断,可以去掉阳极电压,或者给阳极加反压;也可以降低正向阳极电压数值或增大回路电阻,使流过晶闸管的电流小于一定数值(维持电流)。

由以上实验结果,可得到如下结论。

(1) 晶闸管像二极管一样具有单向导通特性,电流只能从阳极流向阴极,当元件加上反向电压时,晶闸管处于反向阻断状态(只有极小的反向漏电流从阴极流向阳极)。晶闸管不同于二极管,它还具有可控的正向导通特性。当元件阳极加上正向电压时,元件还不能导通,元件呈正向阻断状态,这是二极管不具有的。

(2) 晶闸管的导通条件:晶闸管加上正向阳极电压,门极与阴极之间加上一定的正向门极电压,使得门极有足够的电流流入。这好像一条有闸门的河流,有水位差,河水还不能流通,还必须控制闸门打开,门极就是起闸门控制作用,这就是晶闸管所特有的闸流特性,也就是可控单相导电特性。

(3) 晶闸管加上正向阳极电压后,门极加上适当的正向门极电压,使晶闸管导通的过程称为触发。晶闸管一旦触发导通后,门极就对它失去控制作用,因此通常只要在门极加上一个正向脉冲即可,这个正脉冲称为触发电压。门极在一定条件下可触发晶闸管导通,但无法使其关断。

(4) 晶闸管的关断条件:要使已经导通的晶闸管恢复阻断,可降低阳极电源 E_a 或增大负载电阻,使流过晶闸管的阳极电流 I_a 减小,当 I_a 减至一定值时(约几毫安),电流会突然降到零,之后再调高阳极电压或减小负载电阻,电流 I_a 仍为零,说明晶闸管已经恢复阻断。当门极断开时,维持晶闸管导通所需要的最小阳极电流叫维持电流(I_H),因此,只要晶闸管的阳极电流小于维持电流(I_H),元件就关断了。当阳极电压是交流电压,负载是纯电阻时,可以认为晶闸管在电压波形正半周过零点时晶闸管就自行关断了。

例 如图 1-5 所示,阳极电源为交流电压,在 t_1 瞬间合上开关 Q , t_4 时刻开关 Q 断开,求电阻 R_d 上电压波形 u_d 。

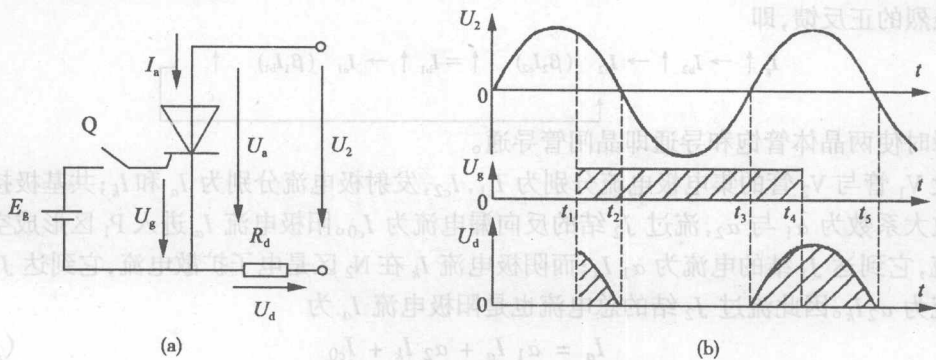


图 1-5 例题电路和波形

解 t_1 时刻,晶闸管阳极电压 U_a 为正,开关 Q 合上使得门极电压也为正,所以晶闸管

触发导通,忽略管子导通电压降,电源电压 U_2 全部加在负载 R_d 上;当 t_2 时刻由于 U_2 过零反向,流过晶闸管的电流 $I_a < I_H$ (维持电流),管子关断,之后因承受反向电压不会导通。 t_3 时刻, U_2 从零开始变正,晶闸管再次承受正压,使管子又导通, t_4 时刻, $U_g = 0$, 由于晶闸管已处于导通状态,维持导通。 t_5 时刻开始, U_2 过零反向,晶闸管关断。 R_d 上的电压波形 U_d 如图 1-5(b) 所示。

二、晶闸管的工作原理与特性

(一) 晶闸管触发导通原理

晶闸管为什么有上述性质,现从其内部结构来进行分析。晶闸管由 P 型半导体与 N 型半导体交替叠成。P 型半导体多数载流子是空穴,带正电荷;N 型半导体多数载流子是自由电子,带负电荷,在其接触界面上形成三个 PN 结。晶闸管的三个 PN 结可等效看成由两个晶体管 $V_1(P_1N_1P_2)$ 与 $V_2(N_1P_2N_2)$ 组成,如图 1-6 所示。

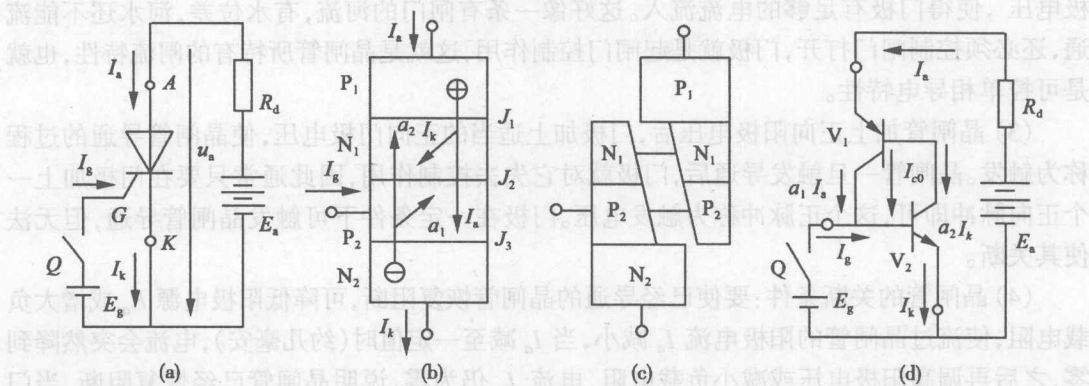


图 1-6 晶闸管的工作原理

当晶闸管阳极加上正向电压后,要使管子正向导通,关键是使 J_2 这个承受反向电压的 PN 结失去阻挡作用。从图中不难看出, V_1 的集电极电流同时又是 V_2 的基极电流; V_2 集电极电流同时又是 V_1 的基极电流,当晶闸管阳极加正向电压,一旦有足够的门极电流流入时,就形成强烈的正反馈,即

$$I_g \uparrow \rightarrow I_{b2} \uparrow \rightarrow I_{c2} (\beta_2 I_{c2}) \uparrow = I_{b1} \uparrow \rightarrow I_{c1} (\beta_1 I_{b1}) \uparrow$$

瞬时使两晶体管饱和导通即晶闸管导通。

设 V_1 管与 V_2 管的集电极电流分别为 I_{c1} , I_{c2} , 发射极电流分别为 I_a 和 I_k ; 共基极接法的电流放大系数为 α_1 与 α_2 , 流过 J_2 结的反向漏电流为 I_{c0} 。阳极电流 I_a 进入 P_1 区形成空穴扩散电流,它到达 J_1 结的电流为 $\alpha_1 I_a$; 而阴极电流 I_k 在 N_2 区是电子扩散电流,它到达 J_2 结的电子流为 $\alpha_2 I_k$ 。因此流过 J_2 结的总电流也是阳极电流 I_a 为

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

当 $I_g = 0$ 时, $I_a = I_k$, 晶闸管流过正向漏电流为

$$I_{a0} = \frac{I_{c0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-2)$$

由上式可见,晶闸管正向漏电流由于受 J_1 , J_3 结影响,要比单个 J_2 结的反向漏电流 I_{c0} 大。

当门极流入 I_g 时,则阴极电流为

$$I_k = I_a + I_g \quad (1-3)$$

把式(1-3)代入(1-1)得

$$I_a = \frac{I_{c0} + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-4)$$

由晶体管知识可知,晶体管的电流放大系数 α 随管子发射极电流的增大而增大,当门极电流 I_g 增大到一定程度,发射极电流也增大,当 $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 增大到接近 1 时,式(1-4)中阳极电流 I_a 将急剧增大成为不可控,这时 I_a 的值由阳极电源电动势 E_a 及负载电阻 R_d 来决定,晶闸管的正向导通压降约为 1.5 V 左右。由于正反馈的作用,此时即使门极电流降为零或负值,也不能使晶闸管关断,只有设法使晶闸管阳极电流 I_a 减小到维持电流 I_H 以下,此时 α_1 与 α_2 也相应的减小,导致内部正反馈无法维持,晶闸管才恢复阻断。如果晶闸管加反向阳极电压,此时 V_1, V_2 处于反压状态,不能工作,故无论有无门极电压,晶闸管都不能导通。

(二) 晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管阳极与阴极之间的电压 U_a 与阳极电流 I_a 的关系,称为元件的阳极伏安特性。晶闸管作为一个可以控制的单向无触点开关,最简单的电路如图 1-7(a) 所示。作为理想的开关,要求晶闸管关断时,其 A 与 K 之间电阻无穷大,阳极漏电流为零,这时, E_a 全部降在晶闸管上,特性曲线与横轴重合。如门极加足够的触发电压,使晶闸管转为正向导通时,要求其 A 与 K 之间的电阻降为零,电源电压 E_a 全部降

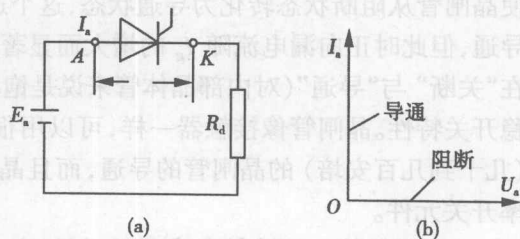


图 1-7 晶闸管理想开关的伏安特性

到负载电阻上,特性曲线与纵轴重合,理想的开关伏安特性如图 1-7(b) 所示。

晶闸管实际的伏安特性如图 1-8 所示。门极断开 $I_g = 0$ 时,逐渐增大阳极电压 U_a ,由于 J_2 结受反压阻挡,元件中只有很小的正向漏电流,当 U_a 升高到 U_{BO} 时,漏电流也相应增大到一定数值, J_1, J_3 结内电场消弱较多, α_1, α_2 也相应增大,使得电子扩散电流 $\alpha_2 I_k$ 与空穴扩散电流 $\alpha_1 I_a$ 分别与 J_2 中的空穴与电子相复合,导致 J_2 结的内电场消失,因此,晶闸管由阻断状态突然变为导通状态,对应曲线的 A 点突变到 B 点。 U_{BO} 称元件的正向转折电压。

当加上门极电压,使门极电流 $I_g > 0$ 时,元件的正向转折电压就大大降低,以某元件为例:

$$I_g = 0, U_{BO} = 800 \text{ V}$$

$$I_g = 5 \text{ mA}, U_{BO} = 200 \text{ V}$$

$$I_g = 15 \text{ mA}, U_{BO} = 5 \text{ V}$$

$$I_g = 30 \text{ mA}, U_{BO} = 2 \text{ V}$$

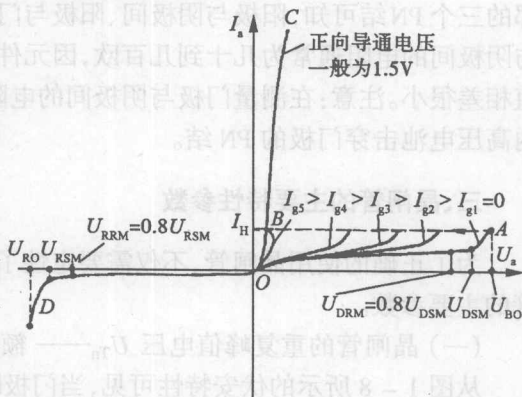


图 1-8 晶闸管阳极伏安特性